Master's Thesis

인간공학적 핸들 설계를 위한 손목 내전 및 외전에 따른 Power Grip 형상 변화 분석

Sujin Mun (문 수 진)

Department of Industrial and Management Engineering

(Human Factors and Ergonomics Program)

Pohang University of Science and Technology

2018

인간공학적 핸들 설계를 위한 손목 내전 및 외전에 따른 Power Grip 형상 변화 분석

Analysis of Power Grip Deformation by Wrist Adduction/Abduction for Ergonomic Handle Design

Analysis of Power Grip Deformation by Wrist Adduction/Abduction for Ergonomic Handle Design

by

Sujin Mun

Department of Industrial and Management Engineering

(Human Factors and Ergonomics Program)

Pohang University of Science and Technology

A thesis submitted to the faculty of the Pohang University of Science and Technology in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Department of Industrial and Management Engineering (Human Factors and Ergonomics Program)

Pohang, Korea

05. 14. 2018

Approved by

Heecheon You (signature)

Academic Advisor

Analysis of Power Grip Deformation by Wrist Adduction/Abduction for Ergonomic Handle Design

Sujin Mun

The undersigned have examined this thesis and hereby certify that it is worthy of acceptance for a master's degree from POSTECH

05/14/2018

Committee Chair Heecheon You (Seal)

Member Sooyoung Chang (Seal)

Member Wonsup Lee (Seal)

MIME 문수진, Sujin Mun
20162140
Analysis of Power Grip Deformation by Wrist Adduction/Abduction for Ergonomic Handle Design,
인간공학적 핸들 설계를 위한 손목 내전 및 외전에 따른 Power Grip 형상 변화 분석,
Division of Industrial and Management Engineering (Human Factors and Ergonomics Program), 2018, 116P, Advisor: Heecheon You, Text in Korean.

ABSTRACT

A handle, the part of an object for lifting, carrying, or controlling the object easily, needs to be ergonomically designed to prevent work-related musculoskeletal disorders of users. To recognize optimal handle design, previous studies evaluated applied forces, pressures, electromyograms (EMGs), and satisfactions with handles in various size and shape, and analyzed effect of hand size and grip posture. But most handle design dimensions in previous studies were limited to length variables of cylindrical handle and one grip posture.

The present study is intended to analyze power grip deformation in hand dimension by wrist motion and propose the method of handle design related with hand dimensions. The proposed study consists of three steps: (1) understanding hand/handle dimension and analysis of hand-handle interface, (2) developing experiment protocol of hand grip deformation, (3) developing analysis protocol of hand grip deformation.

First, in hand-handle interface analysis step, 40 handle related hand dimensions

were chosen for measurement and analysis after understanding handle design dimensions and hand dimensions. Handle design dimensions of length, angle, and curvature were identified by dividing handle into 4 parts and using 16 reference points and 8 reference lines with shape of side, and cross section view. Handle related hand dimensions were chosen by checking the hand dimensions influence to decide handle dimension or not. For example, the width of handle was related with length of each finger's tip to DTC/PTC. Finally, total 24 hand landmarks and 40 hand-handle dimensions were selected.

Second, in experiment of hand deformation step, 15 participants (male 10, female 5) with 3 group of hand length was recruited and their hand grip postures were scanned by 3D scanner (3dMD). The 3 grip postures deformed by 3 handle orientation angles (65°, 45°, 15°) were selected to induce wrist adduction and abduction (20°, 0°, -30°). The elbow was controlled in 45° with elbow supporter. The 24 hand landmarks were marked to subjects' hands with water-based pen. The outer hand shapes for each posture were scanned using 3dMD, and the inner hand shapes for each posture were molded using Otoform.

Third, inner/outer hand 3D scan data were merged to body out full hand in grip posture and hand dimensions were measured based on hand landmarks. After 3D hand scan data were processed by modifying and aligning, inner and outer hand scan data were merged using Rapidform. The points of hand landmarks were created and hand dimensions of static posture and dynamic posture chosen by hand-handle interface analysis were measured and analyzed based on the points. The important measures of hand dimensions

were tip to DTC/PTC and PIP to MMC in linear length, and tip to MMC in surface length which were related with handle width, thickness (height), and circumference. In addition, the measure of angle and curvature were measured by creating average curves fitted to inner hand.

As a result, hand dimensions were significantly different by hand grip postures. When wrist angle was changed from neutral to adduction, tip to DTC/PTC (width) was increased 2.4% ~ 8.4%, PIP to MMC (height) was decreased 1.9% ~ 8.4%, and tip to MMC (circumference) was increased 2.8% in front part and decreased 3.6% in back part. When wrist angle was changed from neutral to abduction, tip to DTC/PTC (width) was increased 1.8% in front part and decreased 2.9% ~ 10.8% in back part, PIP to MMC (height) was increased 2.0% ~ 4.6% in front part and decreased 3.5% ~ 9.5% in back part, and tip to MMC (circumference) was decreased 0.1% ~ 6.3%. Also, the measures were decreased in ratio 64.7% ~ 73.9%, 43.1% ~ 54.4%, and 29.9% ~ 36.5% in comparison with static hand. If these results were applied to handle design, the thickness was increasing in front part and decreasing in back part when changing wrist adduction to abduction. The width was decreasing in all part and the circumference was decreasing in front part when changing wrist adduction to abduction.

TABLE OF CONTENTS

ABSTRACT ..... **i**

TABLE OF CONTENTS ..... **iv**

LIST OF FIGURES ..... **vi**

LIST OF TABLES ..... **ix**

I. Introduction **9**

1.1. Research Background 9

1.2. Objectives of the Study 15

1.3. Organization of the Thesis 17

II. Literature Review **19**

2.1. Hand Anatomy and Hand Grip Posture 21

2.1.1. Hand Anatomy 21

2.1.2. Hand Grip Posture 25

2.2. Hand Anthropometry 28

2.2.1. Hand Anthropometry Survey 28

2.2.2. Hand Dimensions 28

2.3. Handle Design and Evaluation Method 34

III. Analysis of Hand-Handle Interface **38**

3.1. Handle Design Dimensions 38

3.2. Reference Points and Lines for Handle Design 40

3.3. Hand-handle Interface Analysis 46

IV. Analysis of Hand Grip Deformation **52**

4.1. Methods 52

4.1.1. Participants 52

4.1.2. Apparatus 54

4.1.3. Procedure....58
4.1.4. Hand Scan Data Processing....63
4.1.5. Hand Deformation Measurement....67
4.1.6. Repeatability experiment....73
4.2. Results....74
V. Discussion....92
VI. Conclusion....100
REFERENCES....103
APPENDICES....106
Appendix A. Handle 관련 문헌 리뷰 결과 요약....106
Appendix B. MATLAB code of Measurement of Linear Length and Surface Length....110
Appendix C. Results of Linear Length....112
Appendix D. Results of Surface Length....113

LIST OF FIGURES

Figure I.1. 제품의 handle 예시 9
Figure I.2. Handle 인간공학적 평가 예시 11
Figure I.3. 평가 handle 예시: (a) Customized handle, (b) optimal handle 12
Figure I.4. 4가지 grip 자세의 actual image와 hand model 12
Figure I.5. Hand landmark points 13
Figure I.6. Measured, digitized, hand model에 대한 hand length 값 비교 14
Figure I.7. 손목 동작에 따른 손 내측 형상 변화 15
Figure I.8. 인간공학적 handle 설계를 위한 grip 형상 변화 분석 연구 절차 17
Figure II.1. Handle 연구 문헌 선별 절차 19
Figure II.2. 손의 뼈 구조 22
Figure II.3. 손목의 관절 구조 24
Figure II.4. 손가락 운동을 위한 근육 구조 25
Figure II.5. Grip postures: (a) Power grip과 (b) precision grip 27
Figure II.6. Hand landmarks 29
Figure II.7. Hand dimensions 31
Figure II.8. Handle 인간공학적 평가 예시 35
Figure III.1. Hand-handle interface 분석 절차 38
Figure III.2. Handle 설계 특성 분석 및 중요도 선정 39
Figure III.3. 기준점 및 기준선 선정 결과 40
Figure III.4. Palmar hand landmarks 46
Figure III.5. Handle 접촉 범위 및 hand landmark 수정 47
Figure III.6. Hand-handle interface 분석: 단면 너비 48
Figure III.7. Hand-handle interface 분석: 단면 높이 49

Figure III.8. Hand-handle interface 분석: 단면 둘레길이 49
Figure III.9. Hand-handle interface 분석: 측면 구간 길이 50
Figure III.10. Hand-handle interface 분석: 측면 각도 50
Figure III.11. Hand-handle interface 분석: 측면 구간 곡률.....51
Figure III.12. Hand-handle interface 분석: 단면 곡률 51
Figure IV.1. 실험참여자 모집 기준 (손 길이 및 손 너비).....52
Figure IV.2. Apparatus 54
Figure IV.3. 실험 환경 55
Figure IV.4. 실험 protocol.....58
Figure IV.5. 실험 준비(실험 참여 동의서, 손 크기 측정, hand landmark).....59
Figure IV.6. Static hand scanning: (a) scan 자세 및 환경, (b) scan 결과 예시 60
Figure IV.7. Shoulder, elbow, wrist angle 조절 및 팔과 handle 방향 일치 60
Figure IV.8. Casting 결과 landmarking.....61
Figure IV.9. Otoform 3D scanning 62
Figure IV.10. 손 외측 및 내측 3D scan data 보완.....63
Figure IV.11. 손 외측/내측 data 정렬.....64
Figure IV.12. 손 외측 및 내측 scan data 병합.....65
Figure IV.13. Hand data 병합 결과 예시 66
Figure IV.14. Hand landmark 위치 및 표기 순서.....67
Figure IV.15. Hand landmark 표기 예시.....68
Figure IV.16. Landmark 간 거리 측정 방법: (a) 직선 길이, (b) 표면 길이.....69
Figure IV.17. Hand surface mesh 분할 예시.....69
Figure IV.18. 손가락 내측 평균 curve 도출 방법 70
Figure IV.19. 단면 생성 및 정렬 방법: (a) 단면 생성, (b) 단면 정렬 71
Figure IV.20. 상하측 비율/각도/곡률/구간길이 측정 방법 72

Figure IV.21. Repeatability 실험 protocol.....73
Figure IV.22. Hand dimension: Linear length와 surface length.....74
Figure IV.23. 곡률, 각도, 상하측 비율, 구간 길이 측정 방법.....75
Figure IV.24. 손목 동작에 따른 digits 2, 3의 tip to DTC/PTC 변화.....82
Figure IV.25. 손목 동작에 따른 digit 2, 3의 PIP to MMC 변화.....82
Figure IV.26. 손목 동작에 따른 digits 2, 3의 tip to MMC 변화.....83
Figure IV.27. 손목 동작에 따른 digits 4, 5의 tip to DTC/PTC 변화.....84
Figure IV.28. 손목 동작에 따른 digit 4, 5의 PIP to MMC 변화.....84
Figure IV.29. 손목 동작에 따른 digits 4, 5의 tip to MMC 변화.....85
Figure IV.30. 손 크기별 증감 패턴 예시: (a) digit 4의 tip to DTC/PTC, (b) digit 2의 PIP to MMC.....88
Figure IV.31. 단면 상측, 하측, 좌우측 곡률 및 상하측 비율 측정 결과.....90
Figure IV.32. 측면 상측/하측 곡률, 각도 및 구간 길이.....91

LIST OF TABLES

Table II.1. Handle 관련 문헌 조사 핵심어 20
Table II.2. Handle 관련 문헌 조사 결과 20
Table II.3. The list of hand landmarks 30
Table II.4. The list of hand dimensions.....32
Table II.5. Handle 관련 문헌 리뷰 결과 요약: Participants.....37
Table III.1. 기준점 및 기준선 기반 handle 주요 설계 인자 42
Table IV.1. 피실험자 손 길이 평균(Mean ± SD).....53
Table IV.2. 피실험자 손 길이 정보(Unit: mm).....53
Table IV.3. Static 대비 dynamic posture의 hand dimension 길이 및 변화율 77
Table IV.4. 손목 동작에 따른 hand dimension 변화.....79
Table IV.5. Repeatability 분석 결과: SD와 CV 80
Table IV.6. 손 크기별 hand dimension 차이 86

I. Introduction

1.1. Research Background

Handle은 어떤 물체를 쥐고 들거나 이동 및 조작하기 쉽도록 설계된 물체의 일부분으로서 다양한 작업에 사용되며 작업 효율성과 사용자 편의 향상을 위해 사용 목적 및 사용 상황을 고려한 인간공학적 설계가 중요하다. Handle은 Figure I.1의 예시와 같이 일반적으로 제조(e.g., drill, hammer, screwdriver), 수술 및 검진(e.g., scaling tool, 초음파 probe, laparoscopic tool), 동체 조작(e.g., 청소기 handle, steering wheel, joystick) 등 manual work 수행 시 사용된다. 잘못된 형태로 설계된 handle을 지속적, 반복적으로 사용 시 carpal tunnel syndrome, hand-arm vibration syndrome (HAVS), tendonitis 등 상지(팔)의 근골격계 질환을 유발할 수 있다(Punnett & Wegman, 2004). 반면, 인간공학적으로 설계된 handle은 적절한 힘

Figure I.1. 제품의 handle 예시

사용, 신체 부하 감소, 그리고 주관적 만족도를 향상시킬 수 있으며 사용성 향상, 작업 효율성 향상 및 근골격계 질환 예방에 기여할 수 있다(Bohlemann et al., 1994; Dong et al., 2007; Harih and Dolsak, 2014; Lewis and Narayan, 1993).

기존의 인간공학적 handle 연구는 최적 크기 및 형상을 도출하기 위해 다양한 크기 및 형상의 handle에 대하여 객관적 척도와 주관적 척도를 활용하여 수행되었다(Figure I.2 참조). 기존 연구에서는 주로 3-level diameter로 설계된 handle을 대상으로 contact force, grip force, peak pressure에 대한 평가(Aldien et al, 2007; McDowell et al., 2012; Seo et al., 2007; Welcome et al., 2004)가 이루어졌고, 2-level과 6-level diameter handle을 대상으로 핸들의 사용성이 평가(Dong et al., 2007; Kong and Lowe, 2005)되기도 하였다. 일부 연구에서는 diameter 뿐만 아니라 circular, triangular, rectangular, hexagonal로 다양한 단면 형상이 적용되어 크기와 형상이 서로 다른 handle에 대하여 사용 만족도, 형태 적합성 등 객관적 및 주관적으로 평가(Dong et al., 2007; Herring et al., 2011)되었다. 객관적 평가는 contact force, grip force, push force 등의 force 관련 measure와 flexor digitorum superficialis (FDS), flexor pollicis longus (FPL) 등의 상지 근육 부하(EMG) 관련 measure, 그리고 contact pressure, peak pressure 등의 pressure 관련 measure를 활용하여 수행되었다(Aldien et al., 2007; Dong et al., 2007; McDowell et al., 2012; Seo et al., 2007;

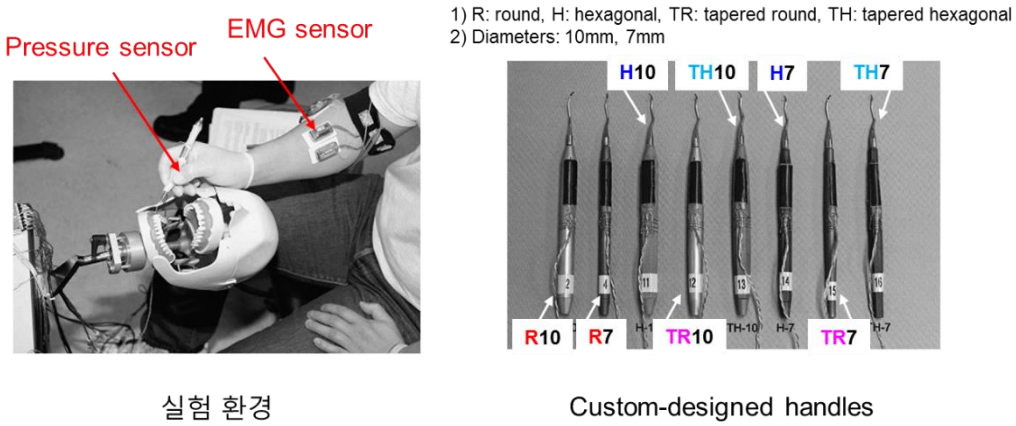


Figure I.2. Handle 인간공학적 평가 예시 (Dong et al., 2007)

Welcome et al., 2004). 주관적 평가는 handle의 diameter 적절성, shape 적절성, productivity, comfort 등에 대한 5-point scale 또는 7-point scale의 questionnaire를 활용하여 수행되었다(Dong et al., 2007; Harih and Dolsak, 2014; Kong and Lowe, 2005). 기존 연구들의 평가 결과를 요약한 결과, 객관적 척도에서는 주로 30 ~ 40 mm의 handle이 가장 선호되었고, 주관적 만족도 평가 결과에서는 25 ~ 50 mm 범위 중 35 ~ 45 mm의 handle이 가장 선호되는 것으로 파악되었다.

일부 연구에서는 handle의 최적 형상에 영향을 주는 주요 변수로 사용자의 손 크기와 grip 자세가 고려되었다. Gonzalez et al. (2015)은 피실험자를 손직선길이에 따라 4가지 손 크기 group (XS, S, M, L)으로 분류하고, 손 크기별 선호 handle diameter를 평가하여(XS: 3.6 mm, S: 4.2 mm, M: 4.8 mm, L: 5.4 mm) 손 크기가 증가할 수록 선호하는 handle 크기가 커짐을 보고하였다. Harih and Dolsak

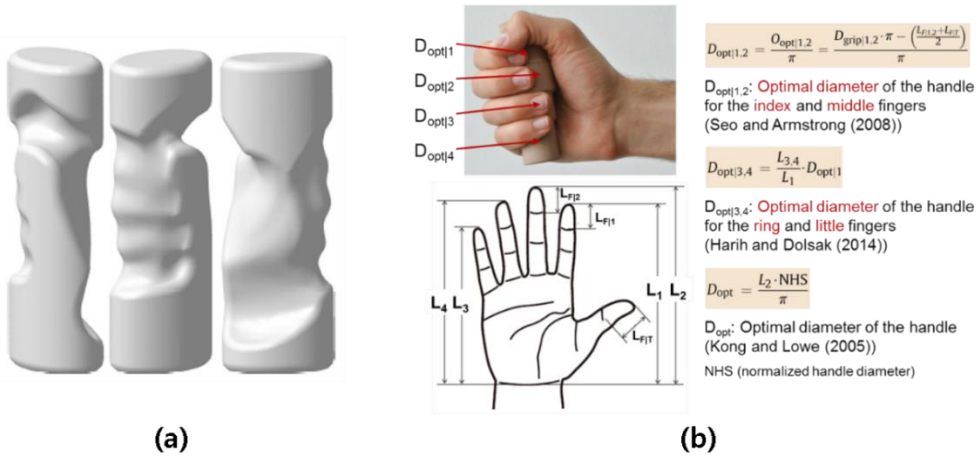


Figure I.3. 평가 handle 예시: (a) Customized handle, (b) optimal handle (Harih and Dolsak, 2014)

(2014)은 Figure I.3 (a)와 같이 CT scan을 통해 피실험자 각자의 손에 맞게 설계된 customized handle과 Figure I.3 (b)와 같이 기존 연구들(Seo and Armstrong, 2008; Harih and Dolsak, 2014; Kong and Lowe, 2005)로부터 도출된 optimal handle을 주관적 만족도 측면에서 비교 평가하였다. 평가 결과, customized handle과 optimal handle이 각각 4.7 ± 1.4, 3.1 ± 0.9 점을 기록하여 customized handle이 optimal

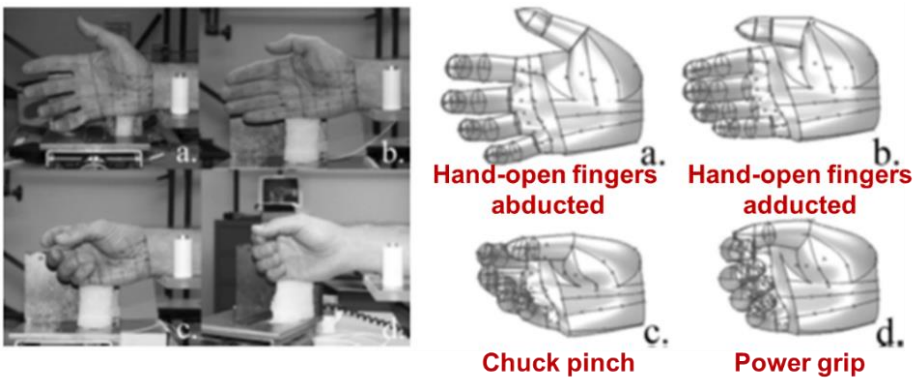


Figure I.4. 4가지 grip 자세의 actual image와 hand model (Rogers et al., 2008)

handle에 비해 선호도가 약 1.6 점(50 %) 높음을 규명하였다. Rogers et al. (2008)은 handle 설계 시 grip 자세에서 측정된 hand dimension data의 부재로 손을 완전히 편 자세에서 측정된 static hand dimension을 사용해야 하는 한계를 인식하여 Figure I.4 의 4가지 grip 자세(hand-open fingers abducted, hand-open fingers adducted, chuck pinch, power grip)에서의 hand model을 생성하여 hand dimension 치수 변화를 분석하였다. 분석 결과 Figure I.5의 landmark point 30 (the centre of the wrist) – 15 (thumb pad)는 (a) 자세 대비 (b), (c), (d) 자세에서 각각 3.7%, 7.3%, 5.7% 감소하였고, 30 – 39 (middle finger pad)는 각각 1.8%, 22.0%, 35.4% 감소하는 경향을 파악하였다.

사용성이 높은 handle 설계를 위한 다양한 연구가 수행되었으나 handle 사용 동작에 의해 변화하는 손 자세를 고려하고 손 내부 grip 형상을 직접 측정 및 분석한 연구는 부족하였다. 청소기 handle 사용 동작과 같이 handle을

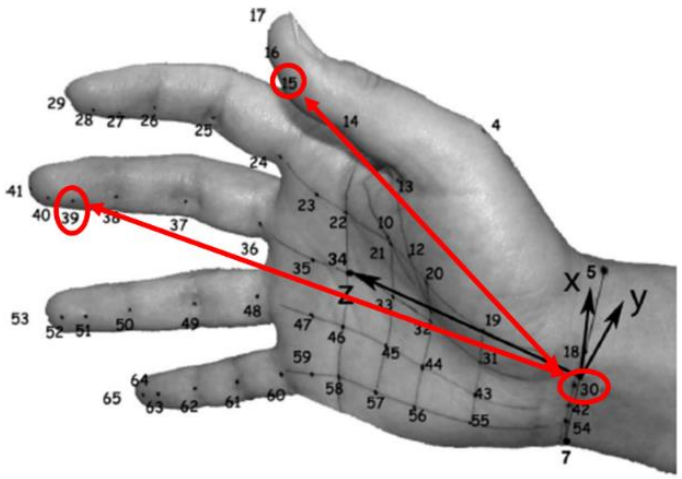


Figure I.5. Hand landmark points (Rogers et al., 2008)

power grip 형태로 잡고 손목 동작을 수행할 경우 Figure I.6과 같이 손 내측 형상이 변하는 것을 확인할 수 있으나, 기존 연구는 정적인 자세의 handle 사용 상황에서 handle 형상이 사용자의 신체적 부하 및 만족도에 미치는 영향을 평가하여 손 내측 형상의 측정 및 분석은 부족하였다. 예를 들어, Kong and Lowe (2005)는 handle diameter와 handle orientation이 finger force, EMG, subjective comfort rating에 미치는 영향을 확인하기 위해 handle orientation을 vertical, horizontal로 구분하고 handle diameter를 6가지(25, 30, 35, 40, 45, 50 mm)로 구분하여 평가하였으나, handle orientation에 따른 선호 handle diameter를 도출하거나 손 내측 형상 변화를 확인하지는 못하였다. Rogers et al. (2008)은 grip 자세에서의 hand dimension을 측정하여 handle 설계에 적용할 수 있도록 하기 위해 hand model을 개발하였으나, hand landmark를 digitizing하여 추정된 한계로 인해 측정된 hand dimension 값이 실제 측정 값(measured)과 비교하여 최대 약 15

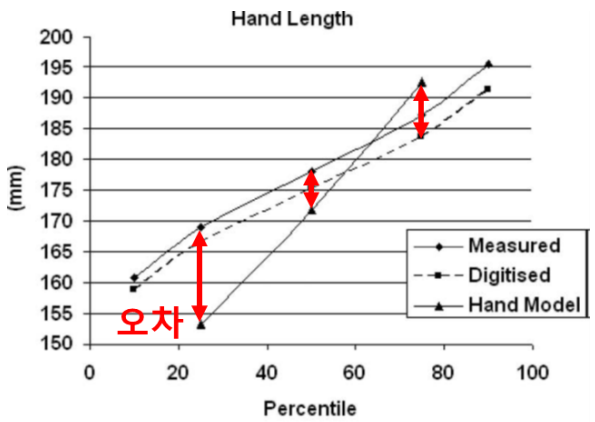


Figure I.6. Measured, digitized, hand model에 대한 hand length 값 비교 (Rogers et al., 2008)

Figure I.7. 손목 동작에 따른 손 내측 형상 변화

mm의 차이가 발생하는 한계를 나타냈다(Figure I.7). 인간공학적 handle 설계를 위해서는 다양한 grip 자세에서의 hand 형상 분석 방법 수립 및 hand와 handle의 interface 분석이 필요하다.

1.2. Objectives of the Study

본 연구는 handle power grip 시 손목 동작에 따른 손 내측 형상 변화 분석을 위해 (1) hand/handle dimension 파악 및 hand-handle interface 분석, (2) 손 내측 형상 변화 실험 protocol 개발, (3) 손 내측 형상 변화 분석 protocol 개발의 세 가지 목표를 가진다.

- 첫째, 본 연구는 handle design dimension과 연관된 hand dimension 도출을 위해 hand와 handle dimension을 파악하고 연관성을 분석한다. Handle design dimension은 너비, 두께, 둘레길이, 각도, 곡률 측면에서 파악되고 hand dimension은 기존 문헌에서 제시된 palm dimension을 통해 파악되며, handle 파지 시 주요 handle dimension과 접촉되어

dimension 결정에 영향을 미치는 hand landmark 및 hand dimension을 선정한다.

- 둘째, 본 연구는 손목 adduction/abduction에 따른 손 내측 형상을 3D로 구현하기 위해 실험 protocol을 개발한다. 먼저, 분석하고자 하는 세부 자세를 shoulder, elbow, wrist를 기준으로 선정하고 해당 자세를 control 하기 위한 각도 조절기를 구비한다. 그리고 손 내측 형상을 본 뜨기 위한 casting material과 손 형상을 3D로 scan하기 위한 3D scanner를 구비하여 실험 환경을 구성한다. 피실험자는 다양한 손 크기의 20~50대 남녀를 대상으로 수행된다.
- 셋째, 본 연구는 손목 adduction/abduction에 따른 손 내측 형상 변화를 분석하기 위해 3D data processing 및 hand dimension 분석 protocol을 개발한다. 3D data processing은 3D scanner로 scan한 손 외측 및 내측 data를 보완 및 정렬한 후 병합하는 과정으로써 손의 완전한 형상을 3D data로 구현한다. Hand dimension 분석은 모든 손에 동일한 기준으로 landmark를 marking하고 hand-handle interface 분석을 통해 도출된 주요 hand dimension의 직선 거리 및 표면 거리를 측정하여 static hand 대비 변화율, 손 크기별 차이, 손목 각도별 차이를 비교 분석함으로써 이루어진다.

본 연구는 상기의 3가지 목표를 달성하기 위해 Figure I.8과 같이 (1)

literature review, (2) hand-handle interface 분석, (3) grip 형상 변화 실험 protocol 개발, (4) grip 형상 변화 분석 protocol 개발, (5) 결과 분석의 절차로 수행된다.

1.3. Organization of the Thesis

본 논문은 5개의 장으로 구성되어 있다. 제 1장은 연구의 배경 및 필요성, 연구 목적 등의 전반적인 연구 개요를 서술하고 있으며, 제 2장은 기존 문헌을 참고하여 손의 해부학적 구조 및 grip posture를 파악하고, 손 길이 분석을 위한

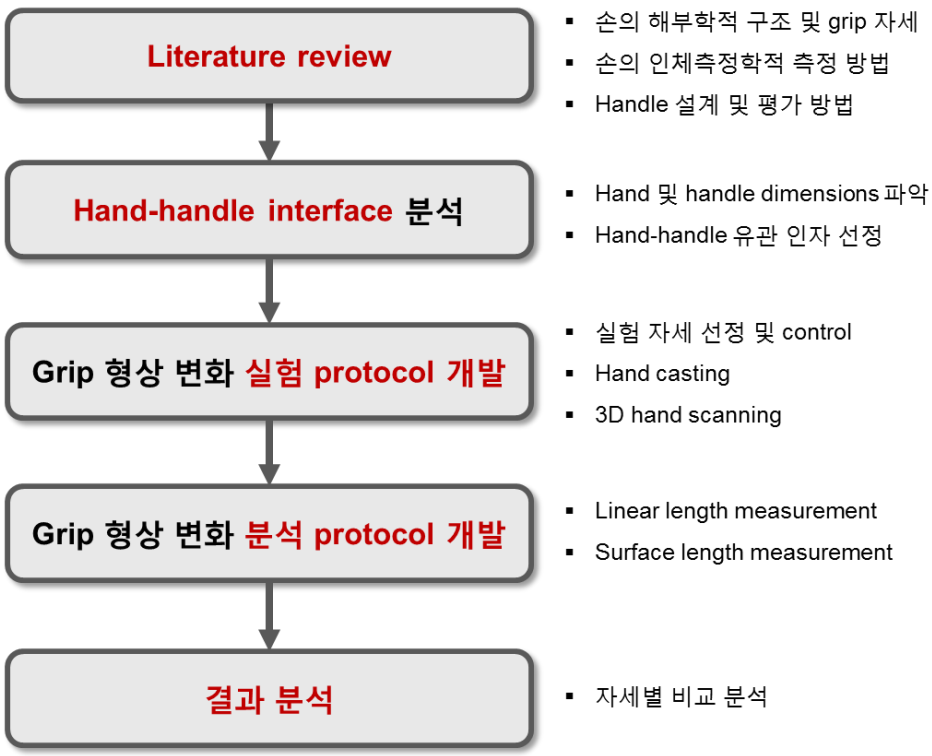


Figure I.8. 인간공학적 handle 설계를 위한 grip 형상 변화 분석 연구 절차

기존의 hand landmark 및 dimension을 나열하며, 기존 handle 설계 및 평가 방법을 정리하고 한계점을 서술하고 있다. 제 3장은 hand-handle interface 분석을 통해 handle 설계와 연관된 hand dimension을 도출함으로써 주요 분석 hand dimension 선정 결과를 기술하고 있으며, 제 4장은 handle angle 변화에 의한 손 내측 형상 변화 3D scan 실험 및 분석 방법과 결과를 기술한다. 제 5장은 제 3장, 제 4장에서 제안된 hand-handle interface 분석 결과 및 손 내측 형상 변화 파악 실험/분석 방법과 그 결과에 대한 본 연구의 의의 및 한계에 대한 토의 내용을 서술하고 있다. 제 6장은 앞선 장들의 내용을 종합적으로 요약하여 본 연구의 결론을 도출하였다. 마지막으로, 부록은 각 장에서 기술된 내용의 구체적인 분석 결과와 추가 정보를 제시하고 있다.

II. Literature Review

본 장에서는 (1) 손의 해부학적 구조에 대하여 기술하고, (2) 손의 인체측정학적 방법을 파악하였으며, (3) handle 설계 및 인간공학적 평가 방법에 대해 정리하고 기존 연구의 한계점을 파악하였다. 손의 해부학적 구조는 Functional Anatomy of the Limbs and Back (David B. Jenkins, 2002)와 Occupational Biomechanics (Chaffin et al., 1999)를 기반으로 서술하였고, 문헌 조사는 keyword 조합, title screening, abstract screening, 문헌의 중요도 평가를 통해 최종 review 대상 문헌을 선별하여 수행되었다(Figure II.1 참조). Table II.1에 정리된 주요 keywords를 조합하여 문헌 검색 사이트인 ScienceDirect (www.sciencediret.com)에서 검색한 결과 총 185건의 논문이 검색되었고, title과 abstract를 검토하여 최종적으로 Table II.2와 같이 18편의 연구가 선정되었다.

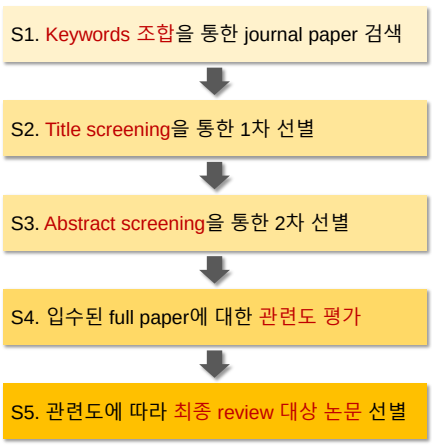


Figure II.1. Handle 연구 문헌 선별 절차

Table II.1. Handle 관련 문헌 조사 핵심어

구분	Keywords
Domain	Handle, hand, grip
Design dimensions	Size, span, grip span, diameter, shape

* 검색 조건: title, abstract, keyword 위주로 검색
** 검색 분야: Ergonomics, biomechanics 분야의 journal paper

Table II.2. Handle 관련 문헌 조사 결과

No.	Authors	Year	Title	Source
1	Aldien et al.	2005	Contact pressure distribution at hand–handle interface: Role of hand forces and handle size	*International Journal of Industrial Ergonomics*
2	Blackwell et al.	1999	Effect of grip span on maximal grip force and fatigue of flexor digitorum superficialis	*Applied Ergonomics*
3	Böhlemann et al.	1994	Ergonomic assessment of handle design by means of electromyography and subjective rating	*Applied Ergonomics*
4	Cuijpers et al.	2004	On the relation between object shape and grasping kinematics	*Journal of Neurophysiology*
5	Dong et al.	2007	The effect of tool handle shape on hand muscle load and pinch force in a simulated dental scaling task	*Applied Ergonomics*
6	Dusenberry et al.	2009	Effect of handrail shape on graspability	*Applied Ergonomics*
7	Eksioglu et al.	2004	Relative optimum grip span as a function of hand anthropometry	*International Journal of Industrial Ergonomics*
8	Grant et al.	1992	An analysis of handle designs for reducing manual effort: The influence of grip diameter	*International Journal of Industrial Ergonomics*
9	Harih and Dolšak	2013	Tool-handle design based on a digital human hand model	*International Journal of Industrial Ergonomics*
10	Harih and Dolšak	2014	Recommendations for tool-handle material choice based on finite element analysis	*Applied Ergonomics*
11	Harih and Dolšak	2014	Comparison of subjective comfort ratings between anatomically shaped and cylindrical handles	*Applied Ergonomics*
12	Herring et al.	2011	User-centered evaluation of handle shape and size and input controls for a neutron detector	*Applied Ergonomics*
13	Kong and Lowe	2005	Evaluation of handle diameters and orientations in a maximum torque task	*International Journal of Industrial Ergonomics*
14	Kong et al	2004	Evaluation of handles in a maximum gripping task	*Ergonomics*
15	McDowell et al.	2012	Effects of handle size and shape on measured grip strength	*International Journal of Industrial Ergonomics*
16	McGorry et al.	2009	Oxygenation kinetics of forearm muscles as a function of handle diameter during a repetitive power grip force task	*International Journal of Industrial Ergonomics*
17	Seo et al.	2007	The effect of torque direction and cylindrical handle diameter on the coupling between the hand and a cylindrical handle	*Journal of Biomechanics*
18	Welcome et al.	2004	An investigation on the relationship between grip, push and contact forces applied to a tool handle	*International Journal of Industrial Ergonomics*

2.1. Hand Anatomy and Hand Grip Posture

손과 손목은 뼈, 인대, 관절, 근육 등이 다른 인체부위보다 해부학적으로 더욱 복잡한 구조로 구성되어 있고, 관절과 근육의 움직임으로 다양한 운동이 가능하다. 본 장에서는 손과 손목의 뼈, 관절, 근육의 구조 및 운동에 대하여 설명한다.

2.1.1. Hand Anatomy

손은 Figure II.2와 같이 8개의 수근골 (carpal bones), 5개의 중수골 (metacarpals), 14개의 지절골 (phalanges), 그리고 2개의 종자골 (sesamoid bones)로 총 29개의 뼈로 이루어져 있다(David B. Jenkins, 2002). 수근골은 손목 부근의 손 골격을 구성하는 뼈로, 주상골 (scaphoid), 월상골 (lunate), 삼각골 (triquetrum), 두상골 (pisiform), 대능형골 (trapezium), 소능형골 (trapezoid), 유두골 (capitate), 유구골 (hamate)이 두 줄로 배열되어 있다. 주상골, 월상골 및 삼각골은 관절면을 형성하여 손목 운동을 일으킨다. 중수골은 손바닥 부위를 구성하는 뼈로 수근골과 관절하고 있고 중수골을 따라 5개의 손가락 뼈가 이어져있다. 손가락 뼈는 thumb는 2개, 나머지 손가락은 3개의 지절골로 구성되어 있고, 지절골은 손가락 끝에서부터 말절 (distal), 중절 (middle), 기절 (proximal)로 이루어져 있다. 종자골은 thumb의 중수지절관절 (metacarpophalangeal joint)의 앞쪽 양측에

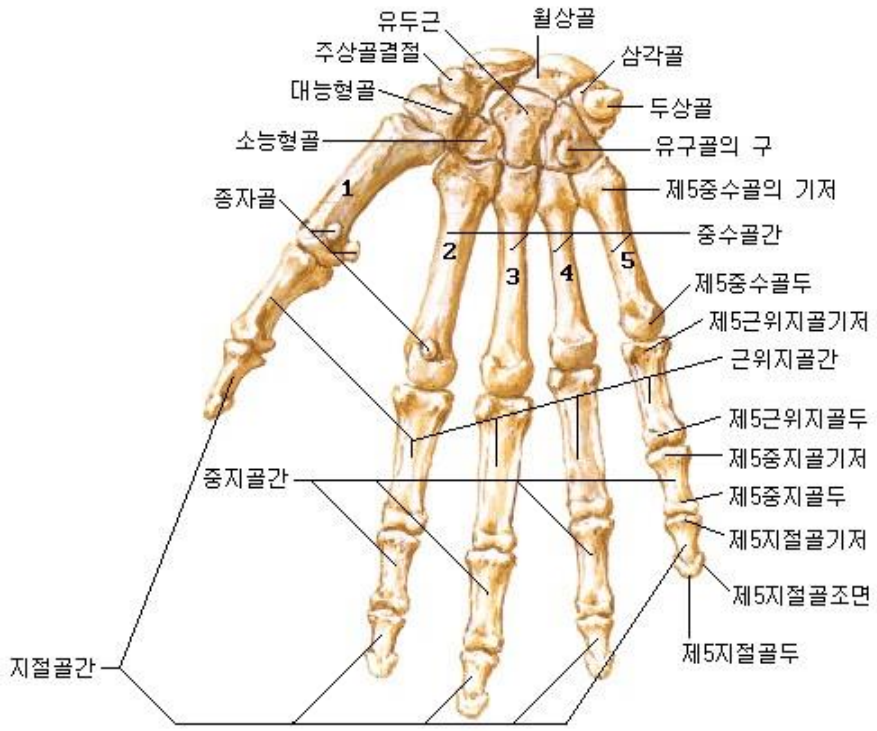


Figure II.2. 손의 뼈 구조 (Colangelo, 2007)

위치하여 제1 중수골의 머리 부분과 관절한다.

손목은 원위 요척관절 (distal radioulnar joint), 요골수근관절 (radiocarpal joint), 수근골간관절 (intercarpal joint), 수근중앙관절 (midcarpal joint), 수근중수관절 (carpometacarpal joint), 중수지절관절 (metacarpophalangeal joints), 지절간관절 (interphalangeal joint)로 총 7개의 관절로 이루어져 있다(David B. Jenkins, 2002; Chaffin et al., 1999). 원위 요척관절은 회내 및 회외운동을 가능하게 하는 요골과 척골 사이의 L자형 차축관절 (trochoid or pivot joint)이며, 수직부는 요골과 척골의 원위단 사이에 있고 수평부는 척골 원위단과 관절원판 사이에

있다. 요골수근관절은 요골의 관절면, 주상골, 월상골, 삼각골 사이에 형성된 관절로 요측 측부 인대, 척측 측부 인대, 장측 요골수근인대, 배측 요골수근인대 등 특수한 인대들에 의해 보강되어 있다. 손의 회내운동 때는 배측 요골수근인대, 회외운동 때는 장측 요골수근인대가 요골과 함께 손이 움직일 수 있도록 역할을 한다. 수근간관절과 수근중앙관절은 수근골 근위열의 각 골 사이 및 원위열의 각 골 사이의 관절로 수근중앙관절은 수근간관절에 비해 더 자유로운 운동이 가능하다. 수근중수관절은 thumb과 나머지 4개 손가락이 각각 다른 관절강을 이루는데, thumb의 수근중수관절은 독립된 관절강을 갖는 안상관절 (saddle or sellar joint)로 외전, 내전, 굴곡, 신전 및 회전운동이 가능하고, 나머지 4개 손가락의 수근중수관절은 공통의 단일 관절강을 이루면서 연장부를 내어 중수골간관절 (intermetacarpal joint)을 형성하고 있다. 중수지절관절은 굴곡, 신전운동뿐만 아니라 손가락을 신전시킨 상태에서 양 옆으로 움직이는 운동을 가능하게 한다. 지절간관절은 경첩관절 (hinge joint)이고 굴곡과 신전운동만이 가능하다.

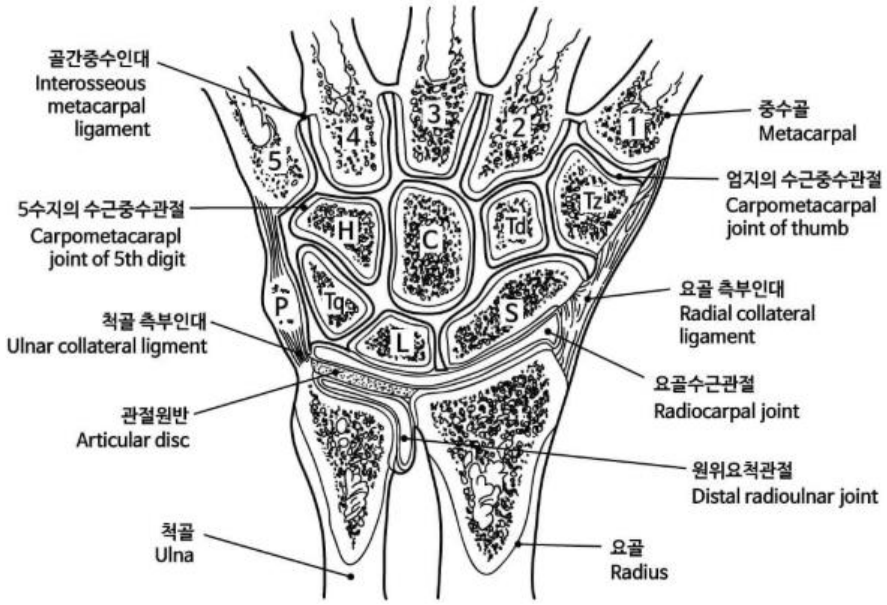


Figure II.3. 손목의 관절 구조 (Colangelo, 2007)

손가락의 운동은 손바닥과 손가락 내부의 다양한 근육에 의해 일어난다(Chaffin et al., 1999). 손가락의 굴곡 운동은 심지굴근 (flexor digitorum profundus), 천지굴근 (flexor digitorum superficialis)과 수장부 근육(무지내전근, 단무지굴근, 단무지외전근, 단소지굴근, 소지외전근 등)에 의해 일어나고, 손가락의 신전운동은 지신근 (extensor digitorum)과 신전근건에 의해 일어나며, 손가락의 외전운동 (abduction)은 배측 골간근 (dorsal interosseous) 및 thumb과 소지의 외전근에 의해, 손가락의 내전운동은 장측 골간근 (palmar interosseous) 및 thumb의 내전근에 의해 일어난다. 심지굴근은 원위지절간관절의 굴곡근으로써 계속 수축 시 근위지절간관절과 중수지절관절도 굴곡시킬 수

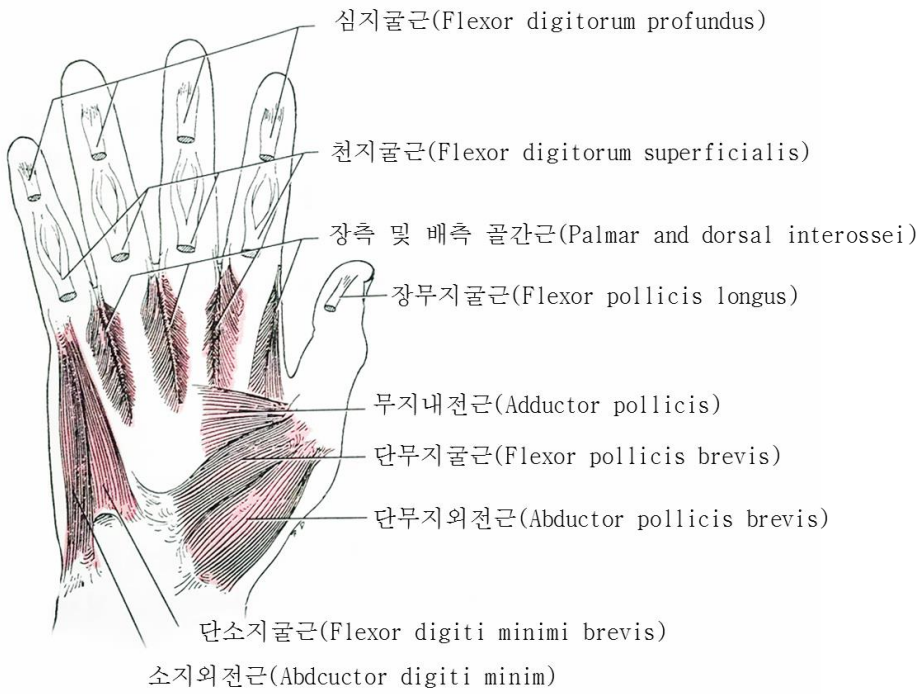


Figure II.4. 손가락 운동을 위한 근육 구조 (David B. Jenkins, 2002)

있고, 천지굴근은 중절골에 부착되어 근위지절간관절에 작용하며 계속 수축 시 중수지절관절의 굴곡운동을 돕는다.

2.1.2. Hand Grip Posture

손으로 물체를 잡을 때는 물체의 형태와 사용 방법에 따라 그립 자세가 달라진다. 잡는 형태는 5개의 모든 손가락을 포함하여 물체와 접촉하는 강한 잡기 (power grips)와 thumb 및 index finger/middle finger와 대립하여 작은 물체를

집거나 다룰 때 이용되는 섬세한 잡기 (precision grips) 2가지 범주가 있고 각각 여러 가지 형태로 다시 나뉘어진다(David B. Jenkins, 2002).

강한 잡기 (power grips)는 Figure II.5 (a)와 같이 원통잡기 (cylindrical grip), 갈고리 잡기 (hook grip), 공 잡기 (spherical or ball grip)로 분류할 수 있다. 원통 잡기는 손바닥까지 물체와 접촉하고 운전대나 테니스 라켓을 잡을 때 이용되는 잡기 방법으로, 손가락들이 손잡이 주위에서 굴곡 및 회전이 일어난다. Thumb은 손잡이를 강하게 잡기 위해 나머지 손가락 위에 겹치거나 손잡이를 따라 놓는다. 갈고리 잡기는 가방 따위의 물건을 운반하기 쉽도록 만들어진 갈고리 형태의 손잡이를 잡는 방법으로, thumb과 손바닥은 작용하지 않는다. 공잡기는 야구공 또는 오렌지 등 구 형태의 물체를 잡을 때 이용되는 잡기 방법으로 손가락이 외전 되어 물체를 감싸 잡으며 손바닥은 물체와 접촉할 수도, 안할 수도 있다.

섬세한 잡기 (precision grips)는 Figure II.5 (b)와 같이 thumb과 손가락의 표면 접촉 면적에 따라 집게 잡기 (tip-to-tip grip), 꼬집어 잡기 (pad-to-pad grip), 열쇠 잡기 (pad-to-slide grip for key grip)로 분류할 수 있다. 집게 잡기는 thumb과 손가락의 끝 (tip)으로 물건을 집는 방법으로 '끝과 끝으로 잡기'라고도 한다. 꼬집어 잡기는 thumb의 볼 (pad)과 index finger/middle finger의 볼 (pad)이 대립되어 못 따위를 집는 방법으로 '볼과 볼로 잡기'라고도 한다. 열쇠 잡기는 thumb의 볼과 index finger의 요측면을 이용하여 열쇠나 종이 등을 잡는

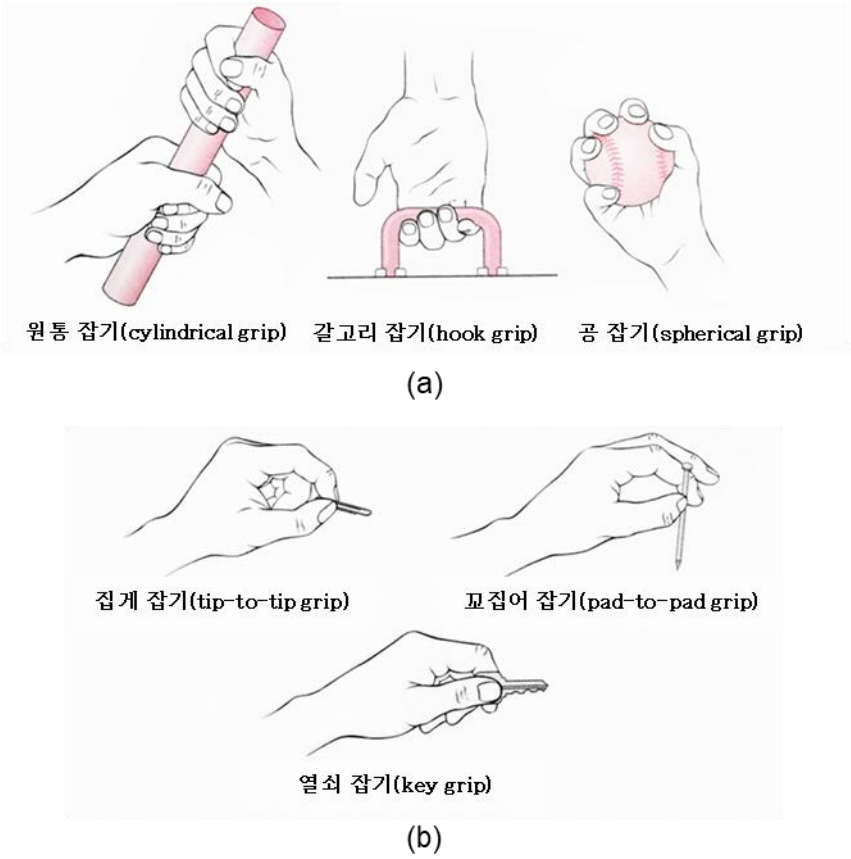


Figure II.5. Grip postures: (a) Power grip과 (b) precision grip (David B. Jenkins, 2002)

방법으로 '볼과 측면으로 잡기'라고도 한다. 열쇠 잡기는 집게 잡기와 꼬집어 잡기에 비해 상대적으로 덜 섬세한 잡기 방법이다.

2.2. Hand Anthropometry

2.2.1. Hand Anthropometry Survey

손은 많은 뼈와 관절로 이루어져 있어 형상을 분석하기가 쉽지 않으나 손 형상을 정확히 분석하기 위해 hand dimension을 측정하는 방법이 다양하게 시도되었다. Greiner (1991)는 총 2,854명(남성 1,108명, 여성 1,746명)의 미군을 대상으로 손을 사진으로 촬영하여 길이를 측정하는 사진 측정 방법을 사용하였고, Ki et al. (2008)은 총 840명(남성 429명, 여성 411명)을 대상으로 캘리퍼스 및 줄자를 이용하여 직접 측정 방법을 사용하였다. Park et al. (2010)에서는 한국인 총 14,016명(남성 7,532명, 여성 6,484명)을 대상으로 Martin식 계측자를 사용하여 직접 측정 방법을 사용하거나 총 4,568명(남성 2,306명, 여성 2,262명)을 대상으로 인체용 3D 스캐너를 이용하여 3D 형상 측정 방법을 사용하였다.

2.2.2. Hand Dimensions

Hand dimension 측정은 여러 개의 hand landmark를 기준으로 손 길이, 너비, 두께, 둘레 등에 대해 측정되었다. 일반적으로 hand landmark는 손의 뼈 구조 및 손 주름에 기반하여 정의되는데, Greiner (1991)은 digit별 tip과 radial/ulnar 방향의

distal interphalangeal (DIP) joint, proximal interphalangeal (PIP) joint, distal transverse palm crease (DTPC), proximal transverse palm crease (PTPC), 그리고 digit base, crotch, wrist crease 등 총 41개의 landmark를 선정하였다(Table II.3, Figure II.5). 이를 기반으로 Greiner (1991)은 digit tip과 base 사이 거리인 digit length, crotch와 wrist crease 사이 수평 거리인 crotch height, digit tip과 wrist crease 사이 수평 거리인 digit height, digit tip과 DTC or PTC 사이 거리인 digit link length, radial joint와 ulnar joint 사이 거리인 joint breadth 등 총 72가지의 hand dimension과 stature, arm length 등 14개의 body dimension을 함께 측정하여 정리하였다(Table II.4, Figure II.6).

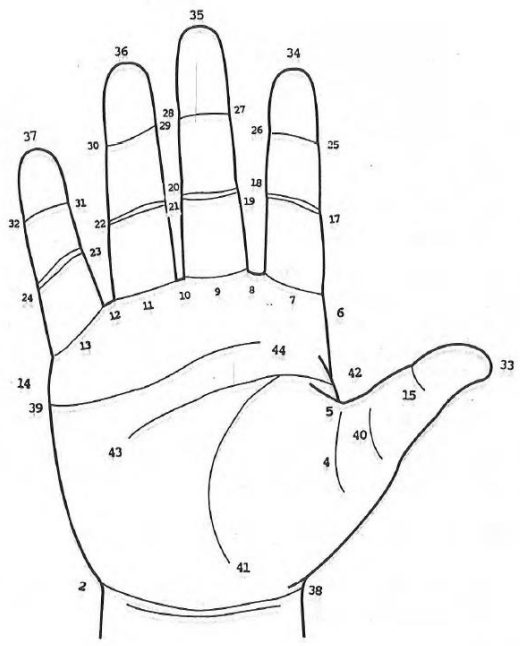


Figure II.6. Hand landmarks (Greiner, 1991)

Table II.3. The list of hand landmarks (Greiner, 1991)

No.	Name	No.	Name	No.	Name	No.	Name
1	Stylion (origin)	13	The base of digit 5	25	Digit 2 distal interphalangeal joint – radial	37	The tip of digit 5
2	Ulnar edge of the distal wrist crease	14	Palm breadth – ulnar edge	26	Digit 2 distal interphalangeal joint – ulnar	38	Radial edge of the distal wrist crease
3	(Skipped)	15	Digit 1 interphalangeal joint	27	Digit 3 distal interphalangeal joint – radial	39	Distal transverse palm crease – ulnar
4	The base of digit 1	16	(Skipped)	28	Digit 3 distal interphalangeal joint – ulnar	40	Head of the first metacarpal
5	Crotch 1	17	Digit 2 proximal interphalangeal joint – radial	29	Digit 4 distal interphalangeal joint – radial	41	Base of the first metacarpal
6	Palm breadth – radial edge	18	Digit 2 proximal interphalangeal joint – ulnar	30	Digit 4 distal interphalangeal joint – ulnar	42	Proximal transverse palm crease – radial
7	The base of digit 2	19	Digit 3 proximal interphalangeal joint – radial	31	Digit 5 distal interphalangeal joint – radial	43	Termination of the proximal transverse crease
8	Crotch 2	20	Digit 3 proximal interphalangeal joint – ulnar	32	Digit 5 distal interphalangeal joint – ulnar	44	Termination of the distal transverse crease
9	The base of digit 3	21	Digit 4 proximal interphalangeal joint – radial	33	The tip of digit 1		
10	Crotch 3	22	Digit 4 proximal interphalangeal joint – ulnar	34	The tip of digit 2		
11	The base of digit 4	23	Digit 5 proximal interphalangeal joint – radial	35	The tip of digit 3		
12	Crotch 4	24	Digit 5 proximal interphalangeal joint – ulnar	36	The tip of digit 4		

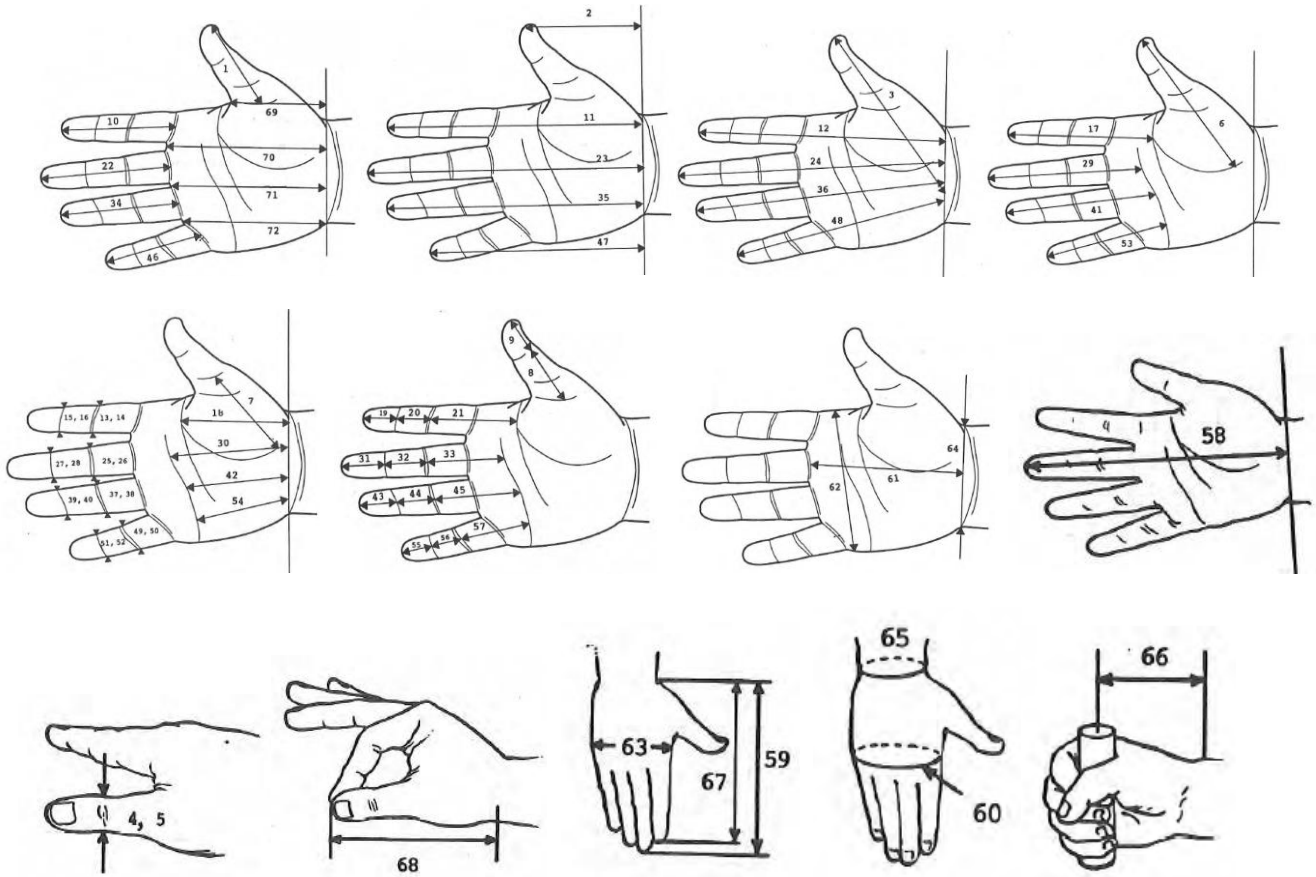


Figure II.7. Hand dimensions (Greiner, 1991)

Table II.4. The list of hand dimensions (Greiner, 1991) (1 of 2)

No.	Dimension name	No.	Dimension name	No.	Dimension name
1	Digit 1 length	13	Digit 2 proximal interphalangeal joint breadth	25	Digit 3 proximal interphalangeal joint breadth
2	Digit 1 height	14	Digit 2 proximal interphalangeal joint circumference	26	Digit 3 proximal interphalangeal joint circumference
3	Digit 1 tip to wrist crease length	15	Digit 2 distal interphalangeal joint breadth	27	Digit 3 distal interphalangeal joint breadth
4	Digit 1 interphalangeal joint breadth	16	Digit 2 distal interphalangeal joint circumference	28	Digit 3 distal interphalangeal joint circumference
5	Digit 1 interphalangeal joint circumference	17	Digit 2 link length	29	Digit 3 link length
6	Digit 1 link length	18	Digit 2 metacarpal link length	30	Digit 3 metacarpal link length
7	Digit 1 metacarpal link length	19	Digit 2 distal phalanx link length	31	Digit 3 distal phalanx link length
8	Digit 1 proximal phalanx link length	20	Digit 2 medial phalanx link length	32	Digit 3 medial phalanx link length
9	Digit 1 distal phalanx link length	21	Digit 2 proximal phalanx link length	33	Digit 3 proximal phalanx link length
10	Digit 2 length	22	Digit 3 length	34	Digit 4 length
11	Digit 2 height	23	Digit 3 height	35	Digit 4 height
12	Digit 2 tip to wrist crease length	24	Digit 3 tip to wrist crease length	36	Digit 4 tip to wrist crease length

Table II.4. The list of hand dimensions (Greiner, 1991) (2 of 2)

No.	Dimension name	No.	Dimension name	No.	Dimension name
37	Digit 4 proximal interphalangeal joint breadth	49	Digit 5 proximal interphalangeal joint breadth	61	Palm length
38	Digit 4 proximal interphalangeal joint circumference	50	Digit 5 proximal interphalangeal joint circumference	62	Hand breadth from digitizer
39	Digit 4 distal interphalangeal joint breadth	51	Digit 5 distal interphalangeal joint breadth	63	Hand breadth measured
40	Digit 4 distal interphalangeal joint circumference	52	Digit 5 distal interphalangeal joint circumference	64	Wrist breadth
41	Digit 4 link length	53	Digit 5 link length	65	Wrist circumference
42	Digit 4 metacarpal link length	54	Digit 5 metacarpal link length	66	Wrist-center of grip length
43	Digit 4 distal phalanx link length	55	Digit 5 distal phalanx link length	67	Wrist-index finger length
44	Digit 4 medial phalanx link length	56	Digit 5 medial phalanx link length	68	Wrist-thumbtip length
45	Digit 4 proximal phalanx link length	57	Digit 5 proximal phalanx link length	69	Crotch 1 height
46	Digit 5 length	58	Hand length from digitizer	70	Crotch 2 height
47	Digit 5 height	59	Hand length measured	71	Crotch 3 height
48	Digit 5 tip to wrist crease length	60	Hand circumference	72	Crotch 4 height

2.3. Handle Design and Evaluation Method

Handle의 최적 형상 및 크기 파악을 위해 다양한 크기 및 형상의 cylindrical handle이 handle 사용 시 손과 팔에 작용하는 힘, 압력, 근육 부하, 주관적 만족도 측면의 객관적 및 주관적 척도를 이용하여 평가되었다. Aldien et al. (2005)은 diameter가 30, 40, 48 mm인 cylindrical handle에 대하여 grip force 및 push force에 따른 peak pressure가 각각 101.6 ± 37.4 kPa, 94.2 ± 36.5 kPa, 112.2 ± 43.1 kPa로 30 mm 대비 40 mm에서 약 7 % 감소, 48 mm에서 약 10 % 증가함을 확인하였다. McGorry et al. (2009)는 diameter 30, 40, 50 mm의 handle에 대하여 maximum voluntary contraction (MVC)가 각각 219 ± 55 N, 213 ± 64 N, 189 ± 62 N으로 30 mm 대비 40 mm에서 약 3 % 감소, 48 mm에서 약 14 % 감소함을 확인하였다. Seo et al. (2007)은 handle의 diameter가 45.1, 57.8, 83.2 mm 일 때 grip force는 각각 334 ± 129 N, 179 ± 54 N, 75 ± 44 N으로 45.1 mm 대비 57.8 mm에서 46 % 감소, 83.2 mm 에서 78 % 감소하였다. Dong et al. (2007)은 2-level (7, 10 mm)의 handle diameter와 4-level (round, hexagonal, tapered round, tapered hexagonal)의 단면 형상으로 설계된 scaling instrumental handle에 대하여 mean EMG(%MVC)를 평가하였다. Mean EMG (%MVC)는 diameter가 7, 10 mm 일 때 각각 35.0 ± 1.9, 24.4 ± 2.0로 7 mm 대비 10 mm에서 약 30 % 감소하는 경향이 파악되어 diameter가 10 mm이고 round and tapered 단면 형상을 가진 handle이

EMG 측면에서 부하가 덜 발생함을 확인하였다. Herring et al. (2011)은 3-level (9, 11, 13 mm)의 perimeter와 8-level (circular with flat side, circular with two flat sides, square, triangular, ratio가 다른 rectangular 4종)의 단면 형상으로 설계된 handle에 대하여 주관적 선호도를 평가하여 perimeter 11 mm 및 circular 형상의 handle이 가장 선호됨을 파악하였다. Kong and Lowe (2005)는 6-level (25, 30, 35, 40, 45, 50 mm)의 diameter으로 설계된 handle에 대하여 주관적으로 평가하여 diameter 35 ~ 45 mm의 handle이 가장 선호됨을 파악하였다(Appendix A 참조).

일부 연구에서는 handle 평가 시 손 크기에 따른 효과를 파악하고 다양한 손 크기의 사용자를 고려하기 위해 손 크기 그룹별로 실험참여자를 모집하여 연구를 수행하였다. 기존 연구는 hand length를 기준으로 3가지 손 크기별 실험참여자 그룹을 모집하였다(Herring et al., 2011; Kong and Lowe, 2005; Kong et al). Herring et al. (2011)은 손직선길이를 기준으로 female 5th %ile ~ male

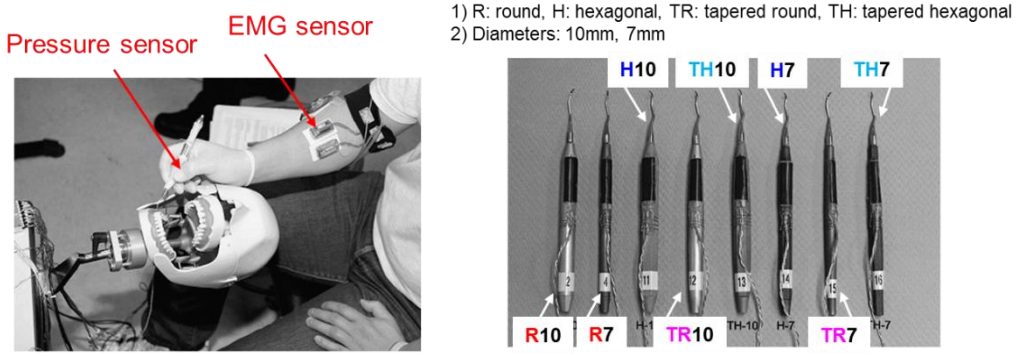


Figure II.8. Handle 인간공학적 평가 예시 (Dong et al., 2007)

5th %ile (small), male 5th %ile ~ male 50th %ile (medium), male 50th %ile ~ male 95th %ile (large)로 손 크기 그룹을 구분하고, Kong and Lowe (2005)와 Kong et al. (2004)는 손직선길이를 기준으로 min ~ 30th %ile (small), 30th %ile ~ 70th %ile (medium), 70th %ile ~ max (large)로 손 크기 그룹을 구분하였다. McDowell et al. (2012)는 실험참여자를 손 크기로 그룹을 구분하지는 않았으나 hand length에 따른 optimum handle size 및 MVC ratio를 분석하여 hand length가 증가할수록 optimum handle size와 MVC ratio가 증가하는 경향이 있음을 파악하였다. 한편, Table II.5와 같이 기존 연구는 실험참여자 최소 8명 ~ 최대 73명을 대상으로 평가를 수행하였다.

인간공학적 handle 설계를 위해 다양한 연구가 수행되었으나 handle 사용 동작에 의해 변화하는 손 자세를 고려하고 손 내부 grip 형상을 직접 측정 및 분석한 연구는 부족하였다. McDowell et al. (2012)와 Aldien et al. (2005)는 shoulder 0°, elbow 90°, wrist neutral로 설정된 정적인 자세에서 서로 다른 크기의 handle을 대상으로 사용성 평가를 수행하였다. McGorry et al. (2009)은 shoulder 10°, elbow 80°, wrist neutral의 1가지 정적인 자세에 대하여 handle의 사용성을 평가하였다. Harih and Dolsak (2013)은 MRI scan을 활용하여 handle을 grip한 손 형상을 3D로 구현하고 그 형상을 활용한 customized handle을 제작하여 기존 cylindrical handle 대비 사용편의성 측면에서 1.5배 정도의 향상을 확인하였으나, handle을 자연스럽게 grip한 정적인 자세에서만 scan 되었으며 손 내부 형상의 정량적 측정 및 분석은 수행되지 않았다.

Table II.5. Handle 관련 문헌 리뷰 결과 요약: Participants

No.	Author(s)	Year	Participants					
			# subjects	Age	Gender		Hand size	Measurement standard
					Female	Male		
1	Aldien et al.	2005	10	adults	-	10	-	-
2	Blackwell et al.	1999	18	25.8 (3.6)	-	18	-	-
3	Böhlemann et al.	1994	9	-	-	9	-	-
4	Cuijpers et al.	2004	8	-	-	-	-	-
5	Dong et al.	2007	24	-	12	12	-	-
6	Dusenberry et al.	2009	73	-	34	39	-	-
7	Eksioglu et al.	2004	12	-	-	12	-	-
8	Grant et al.	1992	16	-	-	16	-	-
9	Harih and Dolšak	2013	10	-	-	10	-	-
10	Harih and Dolšak	2014	10	-	-	10	-	-
11	Harih and Dolšak	2014	10	-	-	10	-	-
12	Herring et al.	2011	Test 1: 10	-	2	8	▪small hand (female 5th %tile ~ male 5th %tile) ▪middle hand (male 5th ~ male 50th %tile) ▪large hand (male 50th ~ male 95th %tile)	Hand length
			Test 2: 30	20-32	15	15		
			Test 3: 14	23-55	1	13		
13	Kong and Lowe	2005	24	-	12	12	▪small hand (< 30th %tile) ▪middle hand (30th ~ 70th %tile) ▪large hand (> 70th %tile)	Hand length (from the tip of middle finger to the crease of wrist)
14	Kong et al	2004	30	-	15	15	▪small hand (< 30th %tile) ▪middle hand (30th ~ 70th %tile) ▪large hand (> 70th %tile)	Hand length (from the tip of middle finger to the crease of wrist)
15	McDowell et al.	2012	12	-	6	6	-	-
16	McGorry et al.	2009	19	44.2 (14.1)	8	11	-	-
17	Seo et al	2007	12	-	6	6		-
18	Welcome et al.	2004	10	-	-	10	-	-

III. Analysis of Hand-Handle Interface

본 장에서는 handle의 최적 설계를 위해 handle dimension과 연관된 hand dimension이 분석되었다. Hand와 handle 간 연관 부위 특성 분석은 Figure III.1과 같이 (1) handle design dimension 파악, (2) handle 설계 기준점/기준선 정립, (3) hand-handle interface 분석의 절차로 수행되어 hand와 handle의 주요 상호 연관 인자를 선정하였다.

3.1. Handle Design Dimensions

Handle의 설계 특성 분석은 디자인 및 인간공학 전문가들의 의견을 참고하여

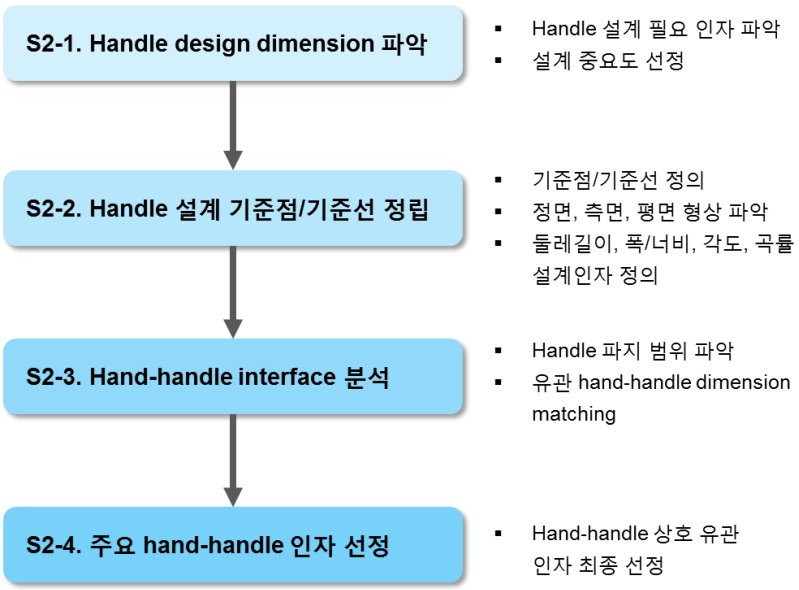
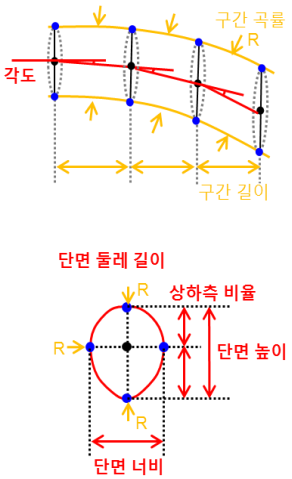


Figure III.1. Hand-handle interface 분석 절차

handle 영역을 구분하고 설계 인자를 파악한 뒤 중요도를 선정하여 수행되었다. Handle은 Figure III.2와 같이 3개(전단부, 중단부, 후단부) 또는 4개 영역(전단부 전측, 중단부 전측, 중단부 후측, 후단부 후측)으로 구분되었고, 단면 기준 너비, 둘레길이, 상측점 곡률 등 9종의 설계 인자와 측면 기준 구간 곡률, 점 곡률, 측면 각도 등 8종의 설계 인자가 선정되었다. 디자인 및 인간공학 전문가들의 의견을 통해 handle의 설계 인자 중 작은 변화에도 사용자가 느끼는 사용성 또는 감성에 영향이 클 것으로 사료되는 인자를 '필수 인자', 나머지를 '선택 인자'로 분류하였다. 예를 들어, 단면의 너비, 높이, 둘레길이, 상하측 길이 비율과 측면 각도는 중요도가 높은 '필수 인자'로 분류되었고 단면의 곡률, 구간 길이 등 나머지 인자는 상대적으로 중요도가 낮은 '선택 인자'로



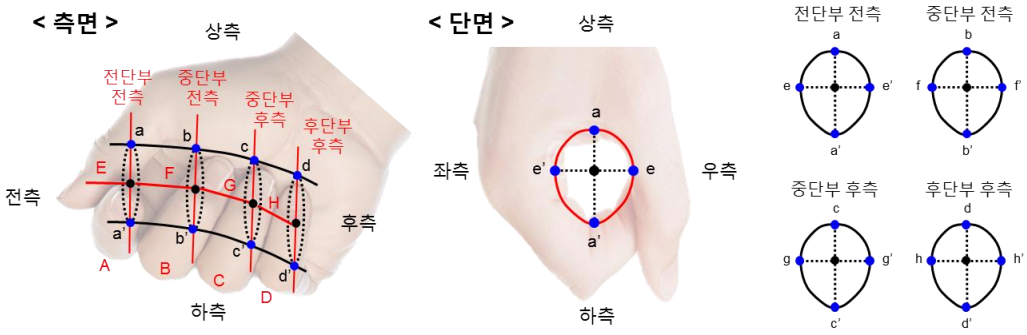
View	설계 인자		필수/선택	선정	
단면	길이	너비	필수	o	필수 선정
		높이	필수	o	
		둘레길이	필수	o	
		상하측 길이 비율	필수	o	
	곡률	상측점 곡률	선택	o	일부 선정
		하측점 곡률	선택	o	
		좌우측점 곡률	선택	o	
		상측 구간 곡률	선택		
		하측 구간 곡률	선택		
측면	길이	구간 길이	선택	o	
	곡률	측면 상측 점 곡률	선택		
		측면 상측 구간 곡률	선택	o	
		측면 상측 평균 곡률	선택		
		측면 하측 점 곡률	선택		
		측면 하측 구간 곡률	선택	o	
		측면 하측 평균 곡률	선택		
	각도	단면 중심 사이 각도	필수	o	필수 선정

Figure III.2. Handle 설계 특성 분석 및 중요도 선정

분류되었다. 선정된 중요도를 기반으로 Figure III.2와 같이 '필수 인자' 5종과 '선택 인자' 중 6종(단면의 상측점, 하측점, 좌우측점 곡률과 측면 구간 길이, 측면 상측 및 하측 구간 곡률)이 선정되어 최종적으로 11종의 설계 인자가 주요 인자로 선정되었다.

3.2. Reference Points and Lines for Handle Design

Handle grip부는 handle 설계 시 손가락 치수 및 grip 특성을 용이하게 적용하기 위해 handle 파지 시 각 손가락이 접촉되는 위치를 따라 4개 영역(전단부 전측, 중단부 전측, 중단부 후측, 후단부 후측)으로 구분되었고, 측면과 단면을



View	기호	명칭
측면	A	전단부 전측 단면선
	B	중단부 전측 단면선
	C	중단부 후측 단면선
	D	후단부 후측 단면선
	E	Handle 방향선
	F	전단부 전측-중단부 전측 단면중심점 연결선
	G	중단부 전측-중단부 후측 단면중심점 연결선
	H	중단부 후측-후단부 후측 단면중심점 연결선

View	기호	명칭
측면	a, a'	전단부 전측 최상/하측점
	b, b'	중단부 전측 최상/하측점
	c, c'	중단부 후측 최상/하측점
	d, d'	후단부 후측 최상/하측점
단면	e, e'	전단부 전측 최좌/우측점
	f, f'	중단부 전측 최좌/우측점
	g, g'	중단부 후측 최좌/우측점
	h, h'	후단부 후측 최좌/우측점

Figure III.3. 기준점 및 기준선 선정 결과

기준으로 기준점 및 기준선이 정의되었다. 기준점은 측면과 단면에서 각 영역별 최상측점, 최하측점, 최좌측점, 최우측점 등 특징적인 부위에 정의되었고, 기준선은 단면 생성 및 각도 파악을 위해 기준점들을 연결하여 정의되었다. 본 연구에서는 기준점 20개, 기준선 8개가 정의되었으며 정의된 기준점과 기준선은 Figure III.3과 같이 정리되었다.

정의된 기준점 및 기준선을 기반으로 앞서 3.1장에서 선정된 주요 handle 설계 인자(e.g., 너비, 높이, 각도, 곡률, 둘레길이 등)가 Table III.1과 같이 총 40개 정립되었다. 예를 들어 측면 기준 전단부 전측 최상측점과 최하측점은 각각 기준점 a, a'로 정의되고, a와 a'를 이은 선은 전단부 전측의 단면을 형성하는 기준선 A로 정의된다. 기준선 A로 절단된 단면의 최좌측점과 최우측점은 각각 e, e'로 정의되어 단면 너비를 결정하고 단면의 최상측점과 최하측점이 되는 a, a'는 단면 높이를 결정한다. 또한, 측면 기준점 i (전단부 전측 단면 중앙점)와 j (중단부 전측 단면 중앙점)를 연결한 기준선 F와 handle head의 방향선인 기준선 E가 이루는 각도를 전단부 각도로 정의하고, j와 k (중단부 후측 단면 중앙점)를 연결한 기준선 G와 기준선 E가 이루는 각도를 중단부 각도로 정의한다. 전단부 전측 최상측점과 중단부 전측 최상측점인 기준점 a, b 주변 곡률은 점 곡률이고 a와 b를 잇는 곡선의 곡률은 구간 곡률, 그리고 기준점 a, d (후단부 후측 최상측점)를 잇는 곡선의 곡률은 상측 구간 평균 곡률로 정의된다.

Table III.1. 기준점 및 기준선 기반 handle 주요 설계 인자 (1 of 4)

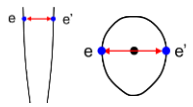
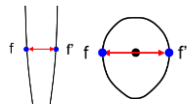
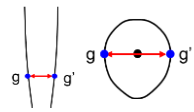
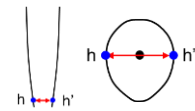
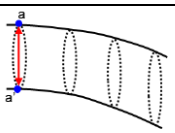
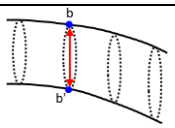
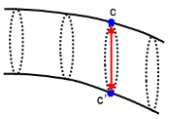
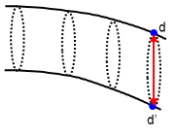
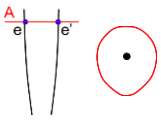
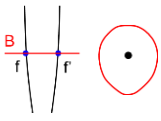
No.	View	설계인자	Image	기준점/선	설명
1	단면	전단부 전측 단면 너비		e (전단부 전측 최좌측점) e' (전단부 전측 최우측점)	기준점 e, e' 사이의 직선거리
2	단면	중단부 전측 단면 너비		f (중단부 전측 최좌측점) f' (중단부 전측 최우측점)	기준점 f, f' 사이의 직선거리
3	단면	중단부 후측 단면 너비		g (중단부 후측 최좌측점) g' (중단부 후측 최우측점)	기준점 g, g' 사이의 직선거리
4	단면	후단부 후측 단면 너비		h (후단부 후측 최좌측점) h' (후단부 후측 최우측점)	기준점 h, h' 사이의 직선거리
5	단면	전단부 전측 단면 높이		a (전단부 전측 최상측점) a' (전단부 전측 최하측점)	기준점 a, a' 사이의 직선거리
6	단면	중단부 전측 단면 높이		b (중단부 전측 최상측점) b' (중단부 전측 최하측점)	기준점 b, b' 사이의 직선거리
7	단면	중단부 후측 단면 높이		c (중단부 후측 최상측점) c' (중단부 후측 최하측점)	기준점 c, c' 사이의 직선거리
8	단면	후단부 후측 단면 높이		d (후단부 후측 최상측점) d' (후단부 후측 최하측점)	기준점 d, d' 사이의 직선거리
9	단면	전단부 전측 둘레길이		A (전단부 전측 단면선)	기준선 A의 단면 둘레길이
10	단면	중단부 전측 둘레길이		B (중단부 전측 단면선)	기준선 B의 단면 둘레길이

Table III.1. 기준점 및 기준선 기반 handle 주요 설계 인자 (2 of 4)

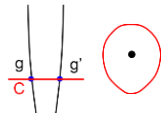
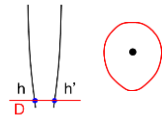
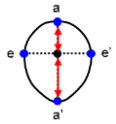
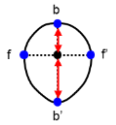
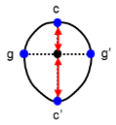
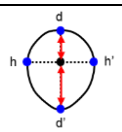
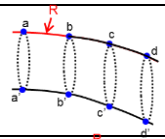
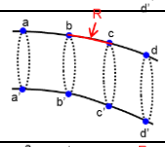
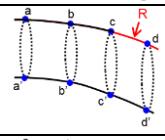
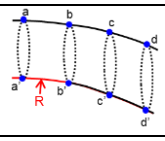
No.	View	설계인자	Image	기준점/선	설명
11	단면	중단부 후측 둘레길이		C (중단부 후측 단면선)	기준선 C의 단면 둘레길이
12	단면	후단부 후측 둘레길이		D (후단부 후측 단면선)	기준선 D의 단면 둘레길이
13	단면	전단부 전측 상하측 비율		a (전단부 전측 최상측점) a' (전단부 전측 최하측점) e (전단부 전측 최좌측점) e' (전단부 전측 최우측점)	기준점 a, a' 연결선과 e, e' 연결선의 교점 기준 상측 길이 및 하측 길이 비율
14	단면	중단부 전측 상하측 비율		b (중단부 전측 최상측점) b' (중단부 전측 최하측점) f (중단부 전측 최좌측점) f' (중단부 전측 최우측점)	기준점 b, b' 연결선과 f, f' 연결선의 교점 기준 상측 길이 및 하측 길이 비율
15	단면	중단부 후측 상하측 비율		c (중단부 후측 최상측점) c' (중단부 후측 최하측점) g (중단부 후측 최좌측점) g' (중단부 후측 최우측점)	기준점 c, c' 연결선과 g, g' 연결선의 교점 기준 상측 길이 및 하측 길이 비율
16	단면	후단부 후측 상하측 비율		d (후단부 후측 최상측점) d' (후단부 후측 최하측점) h (후단부 후측 최좌측점) h' (후단부 후측 최우측점)	기준점 d, d' 연결선과 h, h' 연결선의 교점 기준 상측 길이 및 하측 길이 비율
17	측면	전단부 상측 구간 곡률		a (전단부 전측 최상측점) b (중단부 전측 최상측점)	기준점 a, b를 잇는 곡선의 곡률
18	측면	중단부 상측 구간 곡률		b (중단부 전측 최상측점) c (중단부 후측 최상측점)	기준점 b, c를 잇는 곡선의 곡률
19	측면	후단부 상측 구간 곡률		c (중단부 후측 최상측점) d (후단부 후측 최상측점)	기준점 c, d를 잇는 곡선의 곡률
20	측면	전단부 하측 구간 곡률		a' (전단부 전측 최하측점) b' (중단부 전측 최하측점)	기준점 a', b'를 잇는 곡선의 곡률

Table III.1. 기준점 및 기준선 기반 handle 주요 설계 인자 (3 of 4)

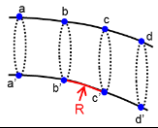
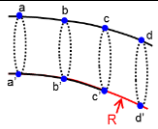
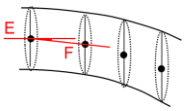
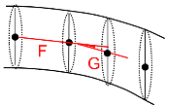
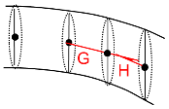
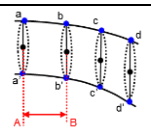
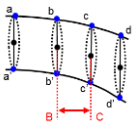
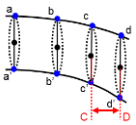
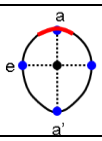
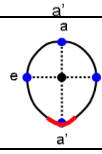
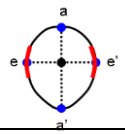
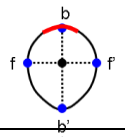
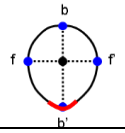
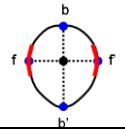
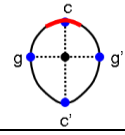
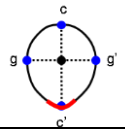
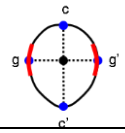
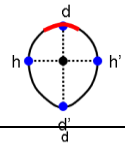
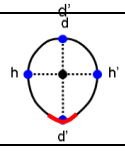
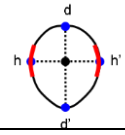
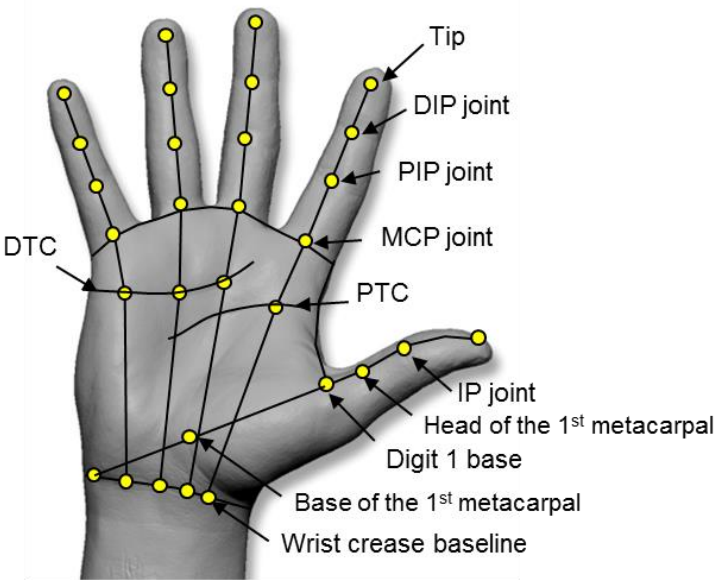
No.	View	설계인자	Image	기준점/선	설명
21	측면	중단부 하측 구간 곡률		b' (중단부 전측 최하측점) c' (중단부 후측 최하측점)	기준점 b', c'를 잇는 곡선의 곡률
22	측면	후단부 하측 구간 곡률		c' (중단부 후측 최하측점) d' (후단부 후측 최하측점)	기준점 c', d'를 잇는 곡선의 곡률
23	측면	전단부 측면 각도		E (Handle 방향선) F (전단부 전측-중단부 전측 단면중심점 연결선)	기준선 E, F 사이의 각도
24	측면	중단부 측면 각도		F (전단부 전측-중단부 전측 단면중심점 연결선) G (중단부 전측-중단부 후측 단면중심점 연결선)	기준선 F, G 사이의 각도
25	측면	후단부 측면 각도		G (중단부 전측-중단부 후측 단면중심점 연결선) H (중단부 후측-후단부 후측 단면중심점 연결선)	기준선 G, H 사이의 각도
26	측면	전단부 단면 사이 수평 길이		A (전단부 전측 단면선) B (중단부 전측 단면선)	기준선 A, B의 단면 중심 사이 수평 길이
27	측면	중단부 단면 사이 수평 길이		B (중단부 전측 단면선) C (중단부 후측 단면선)	기준선 B, C의 단면 중심 사이 수평 길이
28	측면	후단부 단면 사이 수평 길이		C (중단부 후측 단면선) D (후단부 후측 단면선)	기준선 C, D의 단면 중심 사이 수평 길이
29	단면	전단부 전측 단면 상측 곡률		a (전단부 전측 최상측점)	기준점 a의 주변 곡률
30	단면	전단부 전측 단면 하측 곡률		a' (전단부 전측 최하측점)	기준점 a'의 주변 곡률

Table III.1. 기준점 및 기준선 기반 handle 주요 설계 인자 (4 of 4)

No.	View	설계인자	Image	기준점/선	설명
31	단면	전단부 전측 단면 좌/우측 곡률		e (전단부 전측 최좌측점) e' (전단부 전측 하측점)	기준점 e, e'의 주변 곡률
32	단면	중단부 전측 단면 상측 곡률		b (중단부 전측 최상측점)	기준점 b의 주변 곡률
33	단면	중단부 전측 단면 하측 곡률		b' (중단부 전측 최하측점)	기준점 b'의 주변 곡률
34	단면	중단부 전측 단면 좌/우측 곡률		f (중단부 전측 최좌측점) f' (중단부 전측 하측점)	기준점 f, f'의 주변 곡률
35	단면	중단부 후측 단면 상측 곡률		c (중단부 후측 최상측점)	기준점 c의 주변 곡률
36	단면	중단부 후측 단면 하측 곡률		c' (중단부 후측 최하측점)	기준점 c'의 주변 곡률
37	단면	중단부 후측 단면 좌/우측 곡률		g (중단부 후측 최좌측점) g' (중단부 후측 최우측점)	기준점 g, g'의 주변 곡률
38	단면	후단부 후측 단면 상측 곡률		d (후단부 후측 최상측점)	기준점 d의 주변 곡률
39	단면	후단부 후측 단면 하측 곡률		d' (후단부 후측 최하측점)	기준점 d'의 주변 곡률
40	단면	후단부 후측 단면 좌/우측 곡률		h (후단부 후측 최좌측점) h' (후단부 후측 최우측점)	기준점 h, h'의 주변 곡률

3.3. Hand-handle Interface Analysis

기존 연구(Greiner, 1991; Hidson, 1991; Lee et al., 2017)를 통해 handle power grip 시 접촉되는 palmar hand의 주요 hand anthropometric dimension들이 조사되어 유관 landmark 및 dimension들이 정리되었다. Hand landmark 지점은 Figure III.4와 같이 무지(digit 1)의 tip, interphalangeal (IP) joint, base of digit 1, head of the first metacarpal, base of the first metacarpal과 나머지 손가락(digit 2~5)의 tip, distal interphalangeal (DIP) joint, proximal interphalangeal (PIP) joint, metacarpophalangeal (MCP) joint가 파악되었다. 그리고 digit 3~5의 연장선과 손바닥의 distal transverse crease (DTC)가



- DIP: Distal interphalangeal
- PIP: Proximal interphalangeal
- MCP: Metacarpophalangeal

Figure III.4. Palmar hand landmarks

만나는 3개의 점, digit 2의 연장선과 proximal transverse crease (PTC)가 만나는 1개의 점, 마지막으로 digit 1~5의 연장선이 손목의 wrist crease baseline와 만나는 5개의 점까지 총 30개가 파악되었다. Hand dimension은 digit 1~5 tip to wrist baseline, digit 1~5 tip to DIP 등 landmark에 대하여 landmark 사이 최단 거리인 직선 길이와 손 표면을 따르는 최단 거리인 표면 거리로 나누어 측정될 수 있다. Hand-handle interface 분석을 통해 연관성이 높게 파악된 hand dimension이 주요 분석 대상으로 선정되었다.

Hand-handle interface 분석을 위해 handle grip 시 hand와 handle이 접촉되는 범위가 정의되었으며 분석 범위를 고려하여 hand landmark가 선정되었다(Figure III.5 참조). Hand 및 handle 접촉 부위는 handle grip 특성을 고려하여 각 손가락의 tip에서부터 digit 1 base to hand blade 연결선 범위로 선정되었다. Hand landmarks 중 wrist crease baseline 및 digit 1은 handle grip 시 접촉

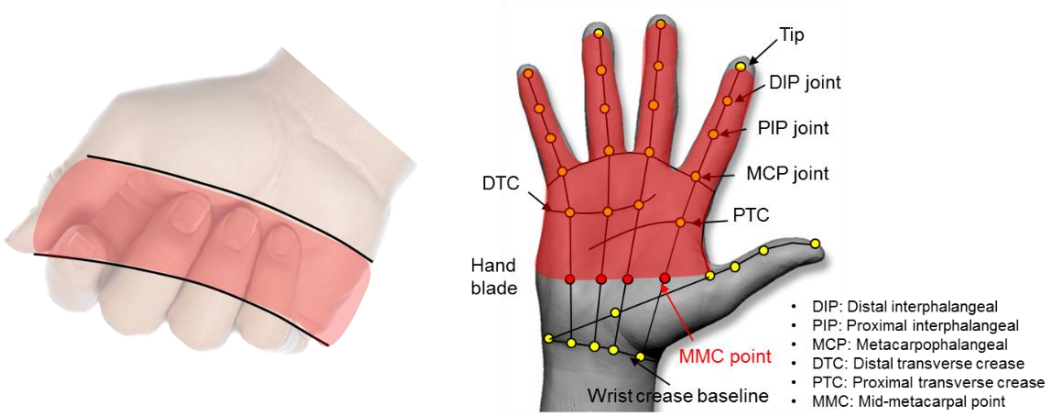


Figure III.5. Handle 접촉 범위 및 hand landmark 수정

범위에 포함되지 않으므로 wrist crease baseline 및 digit 1의 landmark 점들은 제외되었고 각 손가락의 연장선과 digit 1 base to hand blade 연결선이 만나는 점들인 mid-metacarpal (MMC) point들이 추가로 정의되어 최종적으로 24개의 hand landmarks가 선정되었다.

수정된 hand landmark를 기반으로 hand dimension 선정되었으며 handle design dimension과의 연관성 분석을 수행하여 handle 단면 너비, 단면 높이, 곡률 등의 handle design dimensions에 상응하는 hand dimensions이 선정되었다. 평면(top view)을 기준으로 최좌측 및 최우측 hand landmark는 각 손가락의 tip과 DTC/PTC이므로, Figure III.6과 같이 handle의 부위별 단면 너비와 연관된 hand dimension은 digits 2 ~ 5의 tip to DTC/PTC 직선 거리로 선정되었다. 측면 상에서 볼 때 최상측 및 최하측 hand landmark는 MMC point와 PIP joint이므로, Figure

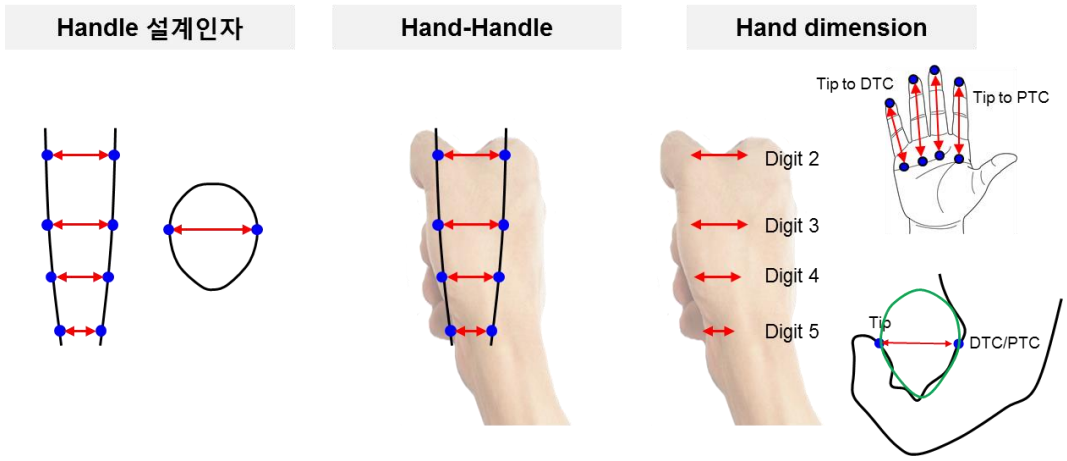


Figure III.6. Hand-handle interface 분석: 단면 너비

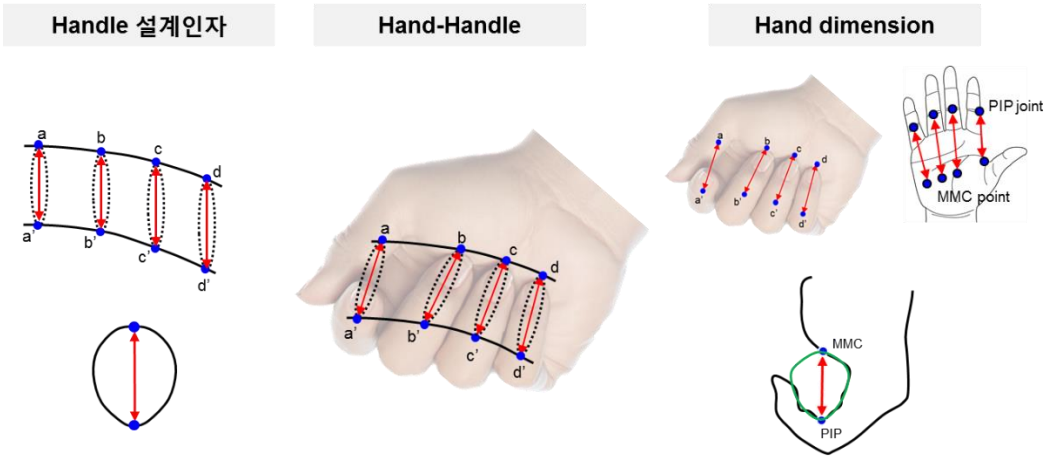


Figure III.7. Hand-handle interface 분석: 단면 높이

III.7과 같이 handle 부위별 단면 높이와 연관된 hand dimension은 digits 2 ~ 5의 PIP to MMC 직선 거리로 선정되었다. 또한, 각 손가락은 handle grip 시 tip에서부터 MMC point까지 handle을 둘러싸므로, Figure III.8과 같이 handle 단면 둘레길이는 digits 2 ~ 5의 tip to MMC 표면 거리로 선정되었다. Handle의 측면 구간 길이와 연관된 hand dimension은 Figure III.9와 같이 digits 2 ~ 5의 내측 중심

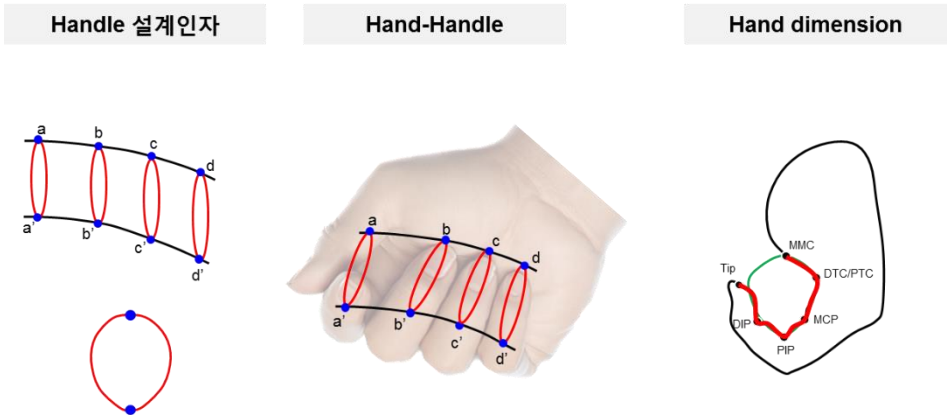


Figure III.8. Hand-handle interface 분석: 단면 둘레길이

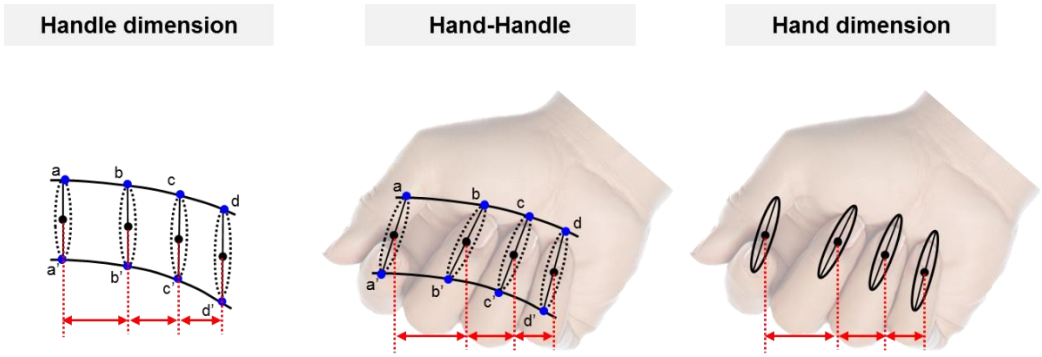


Figure III.9. Hand-handle interface 분석: 측면 구간 길이

사이 수평길이로 선정되었다. Handle의 각도 연관 hand dimension은 Figure III.10과 같이 handle 방향선과 digits 2 ~ 5 내측 중심 연결선이 이루는 각도로 선정되었다. Handle의 상측 및 하측 측면 구간 곡률은 Figure III.11과 같이 각각 digits 2 ~ 5의 PIP joint 연결 곡선과 MMC point 연결 곡선의 곡률과 연관되었다. Handle의 단면 상측, 하측, 좌측 곡률은 Figure III.12와 같이 각각 digits 2 ~5의 MMC point, PIP joint, 그리고 DTC/PTC와 연관되었다. Handle 단면 우측 곡률은

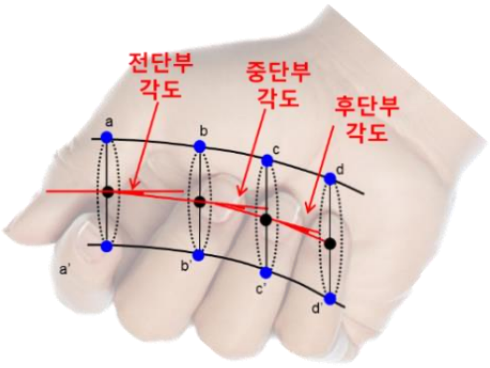


Figure III.10. Hand-handle interface 분석: 측면 각도

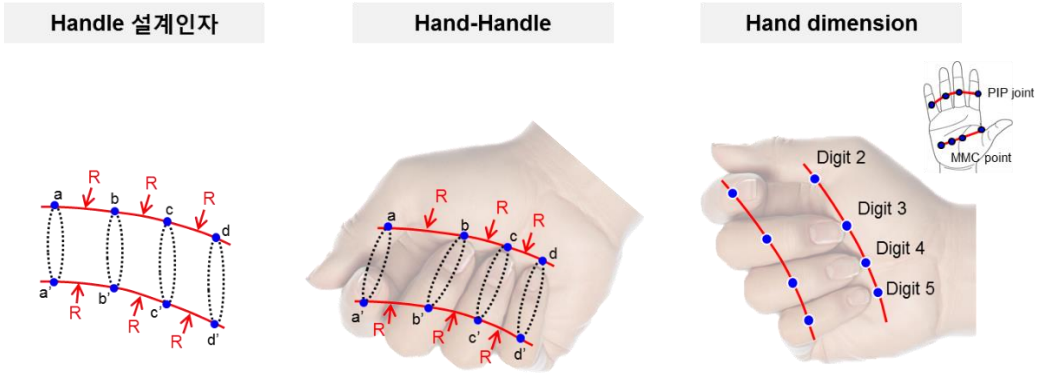


Figure III.11. Hand-handle interface 분석: 측면 구간 곡률

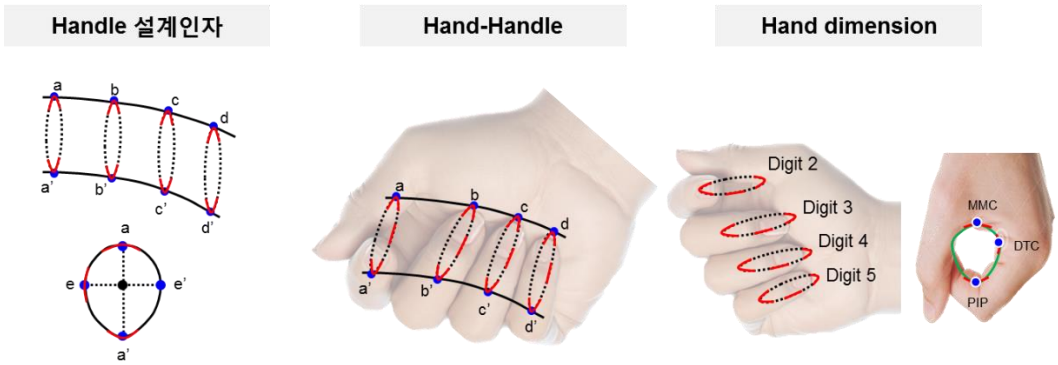


Figure III.12. Hand-handle interface 분석: 단면 곡률

양손 grip을 위한 좌우 대칭 설계를 고려하여 단면 좌측 곡률과 동일하게 적용된다.

IV. Analysis of Hand Grip Deformation

4.1. Methods

4.1.1. Participants

Handle angle 변화에 따른 손 내측 형상 변화 파악을 위해 20 ~ 50대의 다양한 손 크기를 가진 실험 참여자 15명(M: 10, F: 5)이 모집되었다. 실험 참여자는 손직선길이에 따라 small (<33rd %ile) 5명, medium (33rd %ile ~ 67th %ile) 5명, large (>67th %ile) 5명이 각각 모집되었고(Figure IV.1, Table IV.1, Table IV.2), 손 길이는 평균적으로 177.9 ± 12.3 mm로, Size Korea (2010)에서 제시하는 20 ~ 50대 남녀(n = 4,050)의 손 길이(177.4 ± 10.4 mm)와 유사하였다($t(4063) = 0.22$, $p = 0.83$).

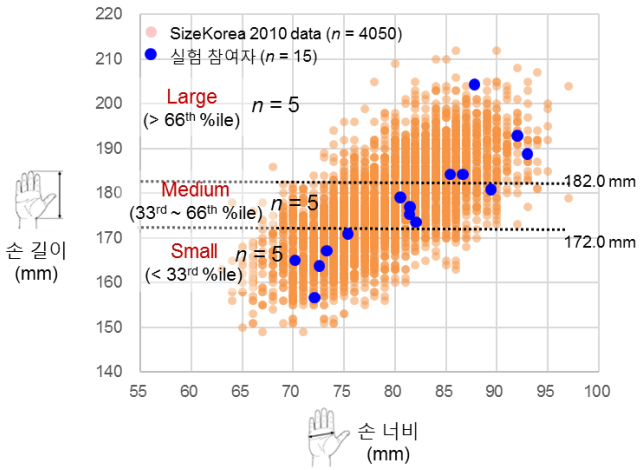


Figure IV.1. 실험참여자 모집 기준 (손 길이 및 손 너비)

Table IV.1. 피실험자 손 길이 평균(Mean ± SD)

Group	*n*	Average hand length (mm)	Total average hand length (mm)	Average age
Small (< 33rd%ile = 172.0 mm)	5	165.1 ± 5.4	177.9 ± 12.3	27.2 ± 8.1
Medium (33rd %ile ~ 67th %ile)	5	177.5 ± 3.0		
Large (> 67th %ile = 182.0 mm)	5	191.2 ± 8.4		

Table IV.2. 피실험자 손 길이 정보(Unit: mm)

Subject	Hand size	Hand length	Hand width
S01	L	204.8	86.5
S02	S	164.3	70.1
S03	L	184.3	87.1
S04	M	179.6	81.2
S05	M	181.0	89.0
S06	S	163.6	72.7
S07	M	175.8	81.8
S08	M	177.7	81.9
S09	S	168.4	73.4
S10	L	184.3	85.9
S11	S	157.5	72.1
S12	L	193.0	92.1
S13	S	171.8	75.3
S14	M	173.5	82.1
S15	L	189.5	93.2
Total		177.9	81.6

4.1.2. Apparatus

손목 동작에 따른 손 형상 변화 파악 실험은 Figure IV.2와 같이 (1) 피실험자 자세 control, (2) 손 내부 형상 casting, 그리고 (3) 손 3D scan의 3단계 절차를 통하여 수행되었다. 피실험자 자세는 팔꿈치 각도 조절기 및 handle 각도 조절기를 이용하여 통제되었다. 팔꿈치 각도 조절 및 고정은 각도 변경(range: 180°)이 가능한 팔꿈치 보조 의료기기(DR. MED, Busan, Korea)가 사용되어 조절되었다. Handle 각도 조절기는 본 실험에서 주요하게 요구되는 손목의 adduction/abduction 동작을 구현하기 위해 handle의 각도와 높이 조절이 가능한

Figure IV.2. Apparatus

스탠드와 diameter 15 mm의 cylindrical handle이 사용되었다. 용이한 3D scan을 위해 cylindrical handle을 노란색 tape로 masking 하였으며, handle 정렬 시 방향을 파악할 수 있도록 문서 집게가 reference로 활용되었다. Handle의 각도는 1/10 단위까지 측정 가능한 디지털 각도계(Dongguan Kuaijie Measuring Tool & Instrument Co., Ltd., Guangdong, China)를 사용하여 각도가 설정되었으며 실험 진행자에 의해 실험 중 각도가 잘 유지되는지 확인되었다. 또한, hand scan 시 control된 팔의 움직임 없이 손 높이가 조절될 수 있도록 발판이 마련되었고, 피실험자가 실험 도중 휴식을 취할 수 있도록 편안한 의자가 마련되었다(Figure IV.3).

손 내측 형상은 Otoform(Dreve Otoplastik GmbH, Unna, Germany)을

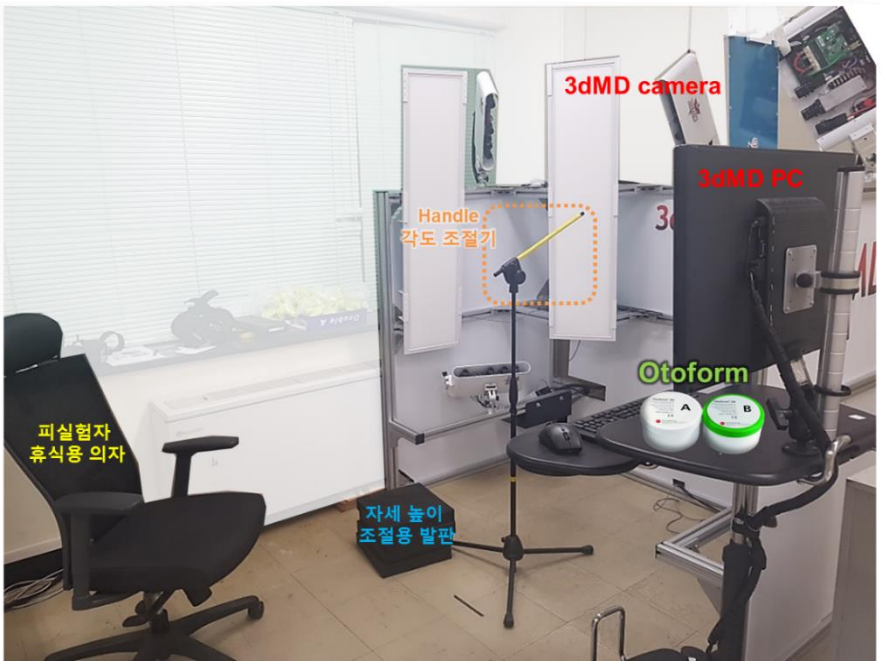


Figure IV.3. 실험 환경

이용하여 casting 되었으며 수성펜(AUDENA 500; MONAMI, Yongin, Korea)을 이용하여 landmark가 표기되었다(Figure IV.2). Handle이나 공 등의 물체를 grip한 자세의 손 내측 형상은 grip 시 손 내부가 가리워지는 형태적 특성으로 인해 3D scanner로 대상 부위를 직접 촬영하여 3D 형상을 구현하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 보청기 제작 시 귀 내측 형상을 본뜨기 위해 사용되는 의료용 casting material인 Otoform을 활용하여 손 내측 형상을 본뜨는 casting 방법이 활용되었다. Otoform은 연한 재질의 A type과 B type으로 구성되어 두 재료를 1:1의 비율로 섞을 시 약 2분 이내로 빠르게 굳는 특성을 가졌으며, 굳은 후 형상이 변형되지 않아 실험 후 형태 측정에 유용하게 활용된다. 본 연구에서는 효율적인 평가를 위해 실험 시작 전 Otoform A type과 B type의 정해진 용량을 미리 준비하였다. 또한, 수성펜이 사용되어 피실험자의 손과 Otoform에 손 형상 분석의 주요 참조점인 hand landmark가 표기되었다. 수성펜은 피실험자의 손에 표기한 후 시간이 지나도 깨끗이 지울 수 있어 유용하게 활용되었다.

3차원 손 형상은 3dMD hand system (3dMD LLC, Atlanta in Georgia, USA)을 사용하여 handle grip 시 손 전반 형상과 casting 된 손 내측 형상이 각각 측정되었다. 3dMD는 2대 이상의 camera로 구성된 3D scanner로 hand, face, whole body의 형상과 동작을 10Hz의 속도로 빠르게 scan할 수 있다. 3D scan 시 자주 활용되는 portable scanner는 휴대가 간편하고 3D scan camera를 원하는 방향으로 자유롭게 control이 가능하지만, 피사체가 흔들림 없이 고정되어 있어야 하고

피사체를 완전히 scan하는 데 약 10분이 소요되기 때문에 사용이 비교적 까다롭다. 반면, 3dMD는 휴대가 불가하고 camera 위치를 control 하기는 어렵지만 여러 대의 camera가 향하는 공간 내에서는 피사체가 움직여도 짧은 순간에 전체 형태 scan이 가능하여 피사체를 약 20초 이내에 scan 할 수 있고 특정 동작까지 scan하여 확인 가능하다. 본 실험에서는 handle을 grip하고 있는 손 외측 형상을 scan하고 손 내측 형상이 casting된 Otoform을 scan하는 데 3dMD가 사용되었다(Figure IV.2). 효율적인 실험 진행을 위해 실험 시작 전 3dMD camera calibration을 완료하였다.

4.1.3. Procedure

Hand grip 형상 변화 분석 실험은 Figure IV.4와 같이 (1) 실험 준비, (2) static hand scanning, (3) 자세별 hand grip 형상 casting 및 3D scanning, (4) hand landmark 제거의 4 단계로 수행되었다. 실험 준비 단계에서 실험참여자는 실험 수행 전 실험 진행에 관한 설명을 들은 후 실험 동의서를 작성하였다. 실험참여자의 손 크기 확인을 위해 버니어 캘리퍼스(Mitutoyo America Corporation, Aurora in Chicago, USA)가 활용되었으며, 결과 분석의 중요한 reference가 되는 총 24개의 hand

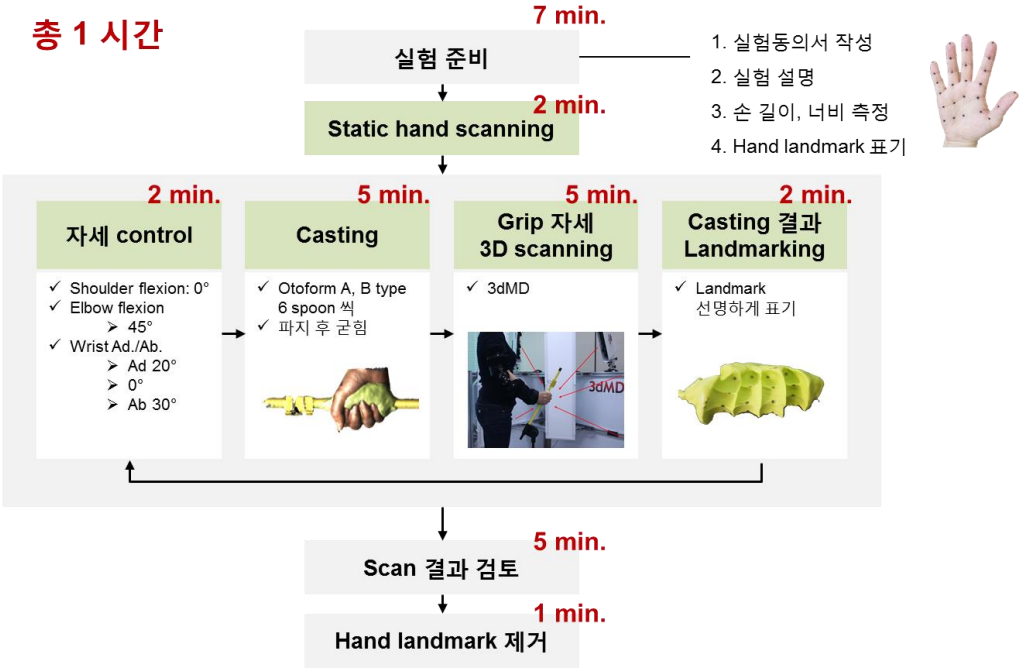


Figure IV.4. 실험 protocol

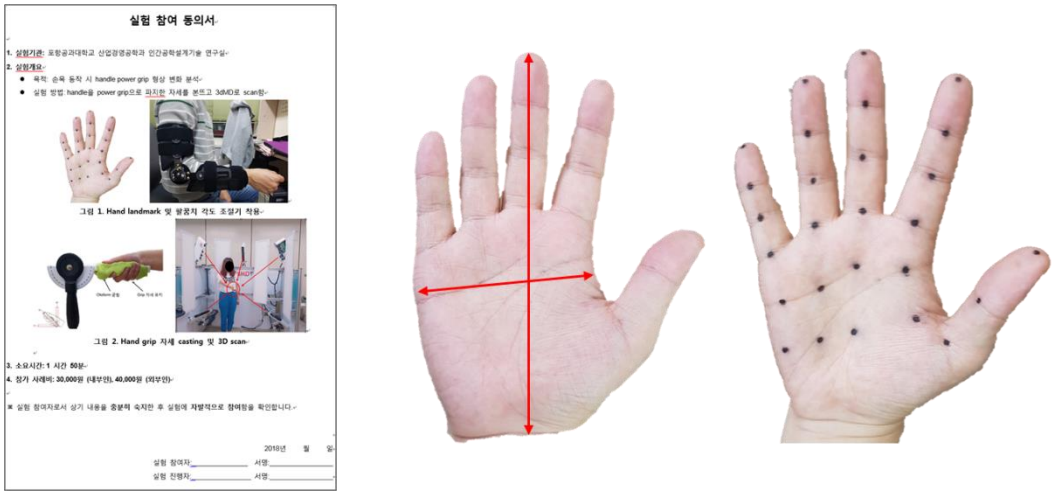
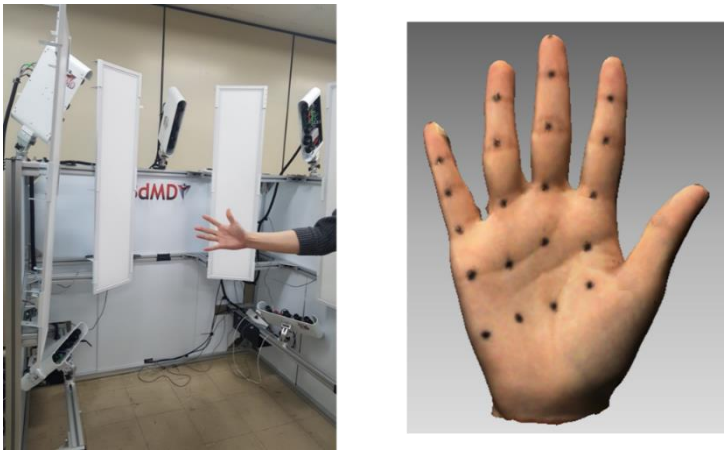


Figure IV.5. 실험 준비(실험 참여 동의서, 손 크기 측정, hand landmark)

landmark가 피실험자의 손에 Figure IV.5와 같이 수성펜을 이용하여 표기되었다(약 7분 소요).

Static hand scanning 단계에서는 Figure IV.6과 같이 피실험자의 static hand 자세의 3차원 scan이 수행되었다. 피실험자가 3dMD hand scan set-up으로 이동하여 지정된 위치에서 손을 모두 편 자세로 약 20초 간 서있는 동안 3차원 손 형상이 측정되었다(약 2분 소요). 실험진행자는 3dMD가 손을 더욱 선명하게 scan할 수 있도록 피실험자의 손 위치를 일부 조정할 수 있다. 만약 surface mesh가 균일하지 않거나 구멍이 생기는 등 scan이 제대로 되지 않았을 경우 hand scanning을 2 ~ 3번 반복할 수 있다. Static hand가 scan된 결과 data는 hand landmarks가 찍힌 texture를 포함하고 OBJ format으로 저장되었다.



(a) (b)

Figure IV.6. Static hand scanning: (a) scan 자세 및 환경, (b) scan 결과 예시

자세별 hand grip 형상 casting 및 3D scan 단계에서는 3가지 wrist adduction/abduction 자세에 대하여 자세 control, grip 자세 casting, grip 자세 3D scanning, 그리고 landmark 표기가 순서대로 진행되었다(약 42분 소요). Grip 자세는 Figure IV.7과 같이 shoulder와 elbow가 수직선을 기준으로 각각 0°, 45°로 통제되었고, wrist adduction(+)/abduction(-) 동작의 최대 동작 범위인 20°, 0°, -30°의

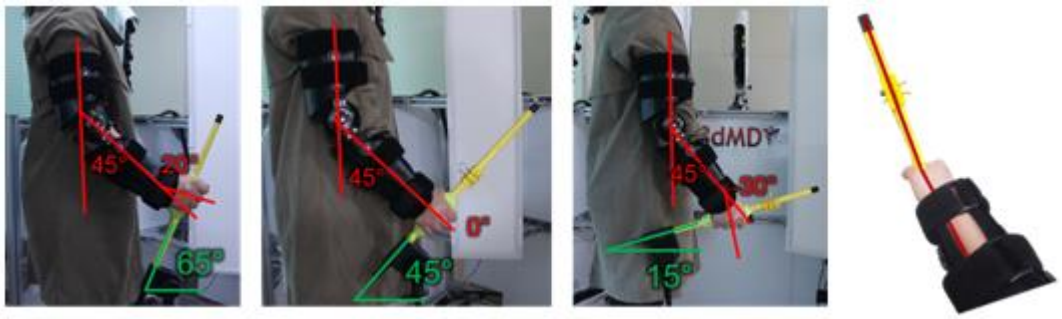


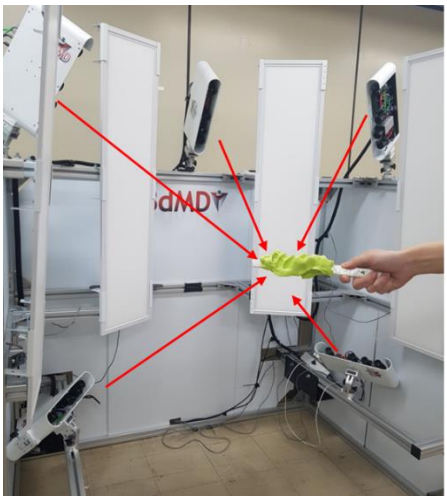
Figure IV.7. Shoulder, elbow, wrist angle 조절 및 팔과 handle 방향 일치

손목 자세가 선정되었다. 피실험자의 팔꿈치는 팔꿈치 각도 조절기를 이용하여 45°로 고정되었고, handle-orientation angle은 wrist adduction(+)/abduction(-) 각도(20°, 0°, -30°)를 유도하도록 지면을 기준으로 15°, 45°, 65°가 되도록 handle 각도 조절기가 조절되었다. 피실험자가 handle을 grip할 때 팔과 handle이 동일선상에 위치할 수 있도록 line tape가 팔과 handle에 부착되어 정렬 여부가 확인되었다. 또한, 추후 분석 시 3D scan data의 정렬을 위해 line tape가 부착된 집게가 handle에 끼워져 reference로 활용되었다. 피실험자의 어깨, 팔꿈치, 손목 부위의 각도 조절이 완료된 후 실험진행자는 미리 준비되어 있던 Otoform A type 30 ml (5 ml × 6 spoon)와 B type 30 ml을 섞어 각도 조절기에 끼워진 cylindrical handle에 부착하였으며 피실험자는 자연스러운 power grip 자세로 Otoform을 파지하고 내측 grip 형태가 측정될 때까지 약 2분 간 grip 자세를 유지하였다. Otoform은 손가락의 형상을 최대한 정확하게 본뜨기 위해 굳기 전에 손가락 사이사이의

Figure IV.8. Casting 결과 landmarking

빈 공간이 채워졌다. Otoform이 완전히 굳은 후 Otoform을 casting한 자세 그대로 손 형상이 scan 되었고, Figure IV.8과 같이 Otoform에 landmark가 정확하게 표기되도록 수성펜을 이용한 선명화 작업이 수행되었다.

Hand landmark 제거 단계에서는 피실험자의 손에 수성펜으로 표기된 landmark를 물티슈 또는 비눗물을 이용해 제거하였다(약 1분 소요). Hand landmark를 제거할 때는 hand grip 자세 casting 단계에서 손에 묻은 Otoform의 기름이 함께 제거되었다. 그리고 실험이 끝난 후 Figure IV.9와 같이 landmark가 표기된 casting 형상이 3D로 scan 되었다(약 20분 소요). Otoform scan data는 hand grip 자세 scan data 확인 과정과 동일하게 scan 부위에 대한 측정 quality가 실험 진행자에 의해 확인되었다.



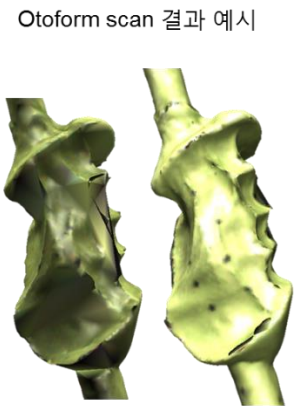


Figure IV.9. Otoform 3D scanning

4.1.4. Hand Scan Data Processing

손 외측 grip scan data와 손 내측 casting data는 효율적인 분석을 위해 (1) 후처리, (2) 정렬, 그리고 (3) 병합의 단계를 통해 hand grip fusion 형상으로 도출되었다. 각 3D data의 후처리는 Figure IV.10과 같이 Rapidform (INUS Technology, Korea)의 selection, delete, registration, merge, hole filling function을 이용하여 수행되었다. 분석에 주요하게 활용되는 손 부위(e.g., handle grip part)를 대상으로 data trim이 수행되었다. 또한, 부분적으로 scan된 손 외측 grip scan data 또는 손 내측 casting data를 온전한 부분끼리 병합하여 scan data의 quality 향상 작업이 수행되었다. 병합 과정에서 생성된 일부 구멍들은 Rapidform의 hole filling function을 이용하여 매끄러운 형상으로 보정되었다.

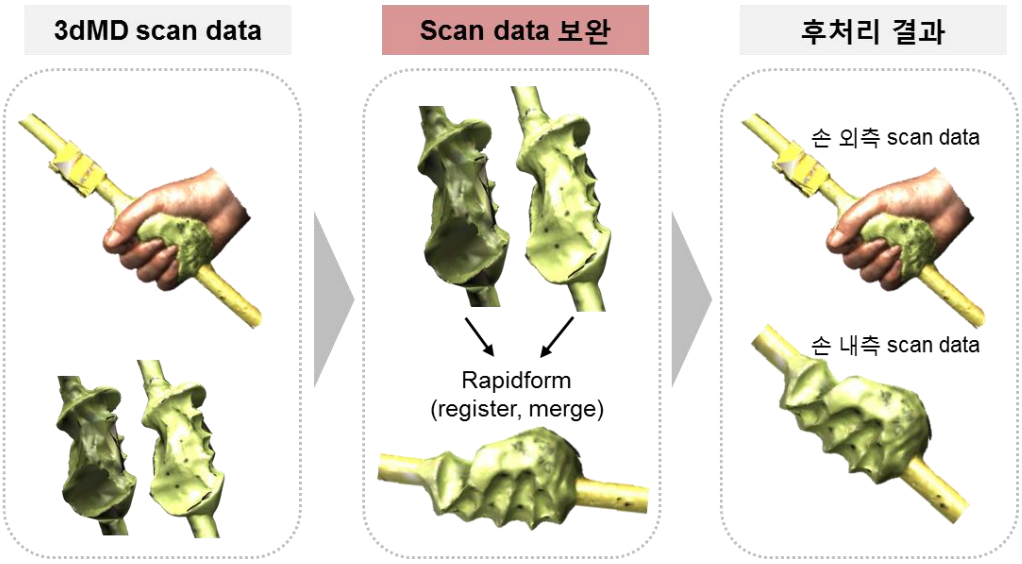


Figure IV.10. 손 외측 및 내측 3D scan data 보완

서로 다른 위치에서 scan된 손 외측 scan data와 손 내측 casting data는 동일한 위치에서 병합하기 위해 Figure IV.11과 같이 두 data의 공통 영역과 고정 handle을 기준으로 정렬되었다. 손 외측 및 내측 data는 Rapidform의 regional registration function을 이용하여 공통으로 scan된 Otoform 영역을 regional reference로 선정하여 정렬되었다. 또한, 모든 hand grip scan data가 정해진 handle 위치에 정렬될 수 있도록 shell trackball function을 이용하여 손 외측 및 내측 data가 이동 및 회전되었고 미리 위치해 둔 고정 handle에 정렬되었다.

정렬된 손 외측 scan data와 손 내측 casting data는 Figure IV.12와 같이 handle을 grip한 손 형상의 완전한 구현을 위해 병합되었다. 손 외측 scan data와 손 내측 casting data는 효율적인 분석을 위해 Rapidform의 remesh, smoothing

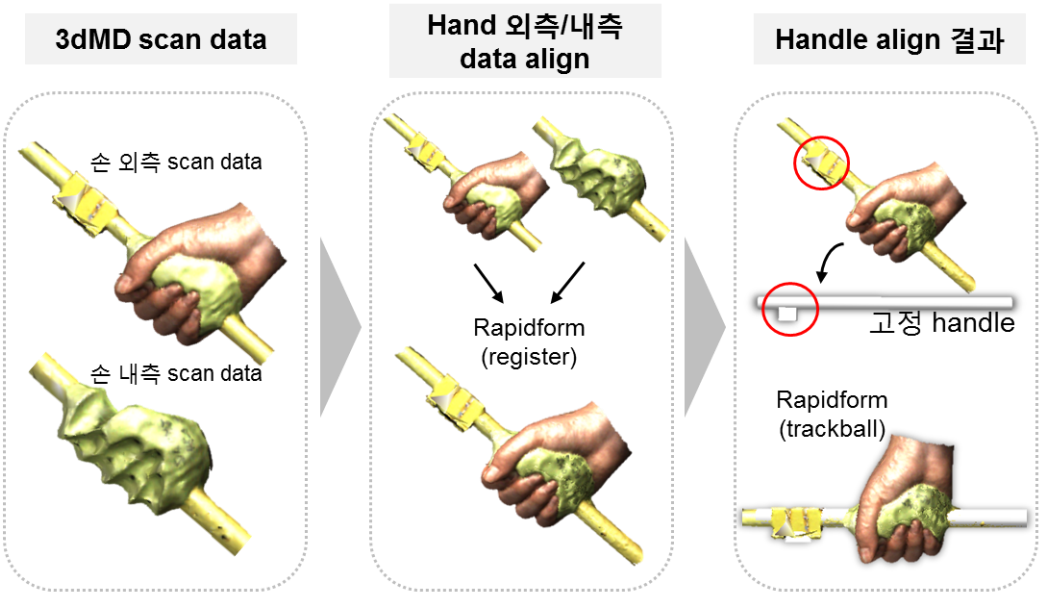


Figure IV.11. 손 외측/내측 data 정렬

function을 이용하여 mesh 균일화 및 surface smoothing 작업이 수행되었다. 손 외측 scan data에서는 손 부위를 제외한 casting material scan 영역, 손 내측 casting data에서는 손 미접촉 영역이 selection function 및 delete function을 이용하여 제거되었다. 보존된 손 외측 형상 data와 손 내측 형상 data는 merge function을 이용하여 동일한 mesh로 통합되었으며, bridge function, hole filling function이 적용되어 주변 곡률을 고려한 매끄러운 형상으로 병합되었다. 병합된 hand grip scan data는 smoothing, remeshing function이 적용되어 부드러운 형상으로 후처리 되었다. 두 data가 병합된 경계 부위(e.g., 손가락 측면, 손톱 영역, 손날 부위 등)는 형태가 다소 왜곡되었지만 분석 부위(e.g., 손바닥 형상, 손가락 관절

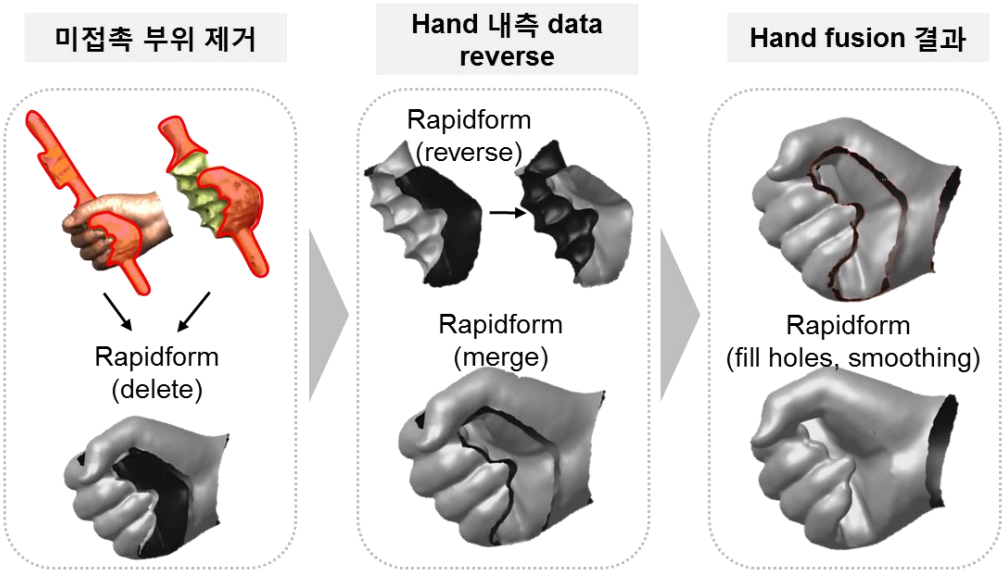


Figure IV.12. 손 외측 및 내측 scan data 병합

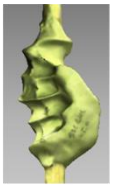
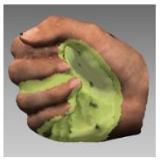
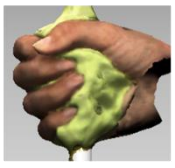
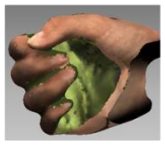
Handle angle	Wrist Ad./Ab.	Hand 외측 scan data	Hand 내측 scan data (Otoform)	Fusion 결과
65°	Ad 20°			
45°	0°			
15°	Ab 30°			

Figure IV.13. Hand data 병합 결과 예시

주변 형상)는 기존 3차원 측정 형상을 유지하여 병합되었다(Figure IV.13). 최종적으로 병합이 완료된 hand data는 'ply' format으로 저장되었다. Hand data 병합은 다양한 손 크기의 15명의 실험 참여자와 3가지 handle grip 각도 조건에 대하여 수행되었다.

4.1.5. Hand Deformation Measurement

손목 동작에 따른 손 내측 형상 변화는 Rapidform S/W와 MATLAB (MathWorks, Natick in Massachusetts, USA)을 이용하여 15명의 실험참여자의 손 병합 data를 측정하여 분석되었다. Hand dimension을 측정하는 데 기준이 되는 hand landmarks 표기는 fusion된 hand mesh 상에서 Rapidform의 pick point function을 이용하여 실험 시 표기된 landmarks 위치를 따라 수행되었다. Landmark 표기 시, 각 landmark를 identification 하는 과정을 생략하여 더 효율적으로 분석될 수 있도록 Figure IV.14와 같이 landmark의 순서를 고려하여 최종적으로 Figure IV.15와 같이 표기되었다. 최종 표기된 24개의 hand landmarks는 IGES format으로 출력 되었다.

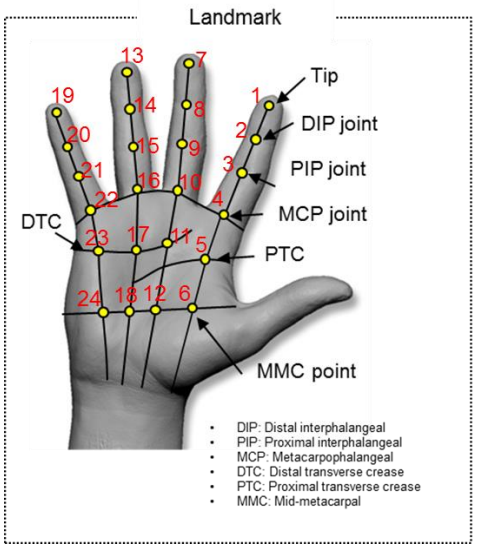


Figure IV.14. Hand landmark 위치 및 표기 순서

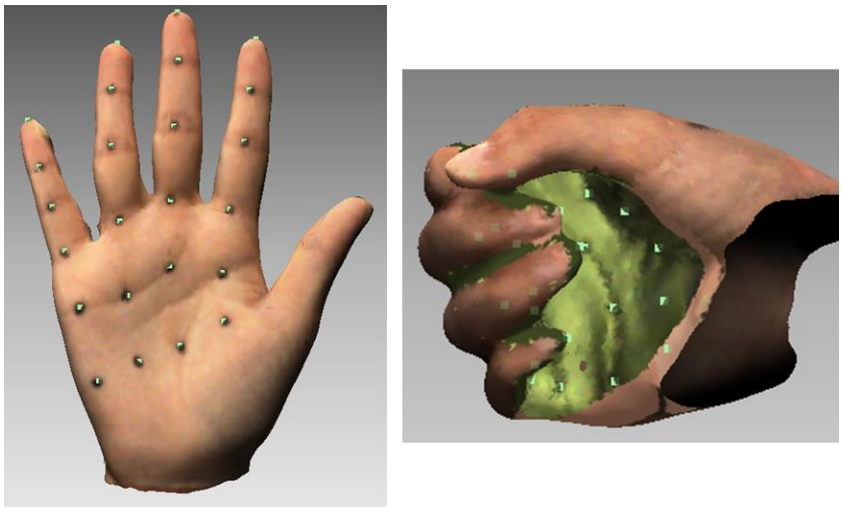
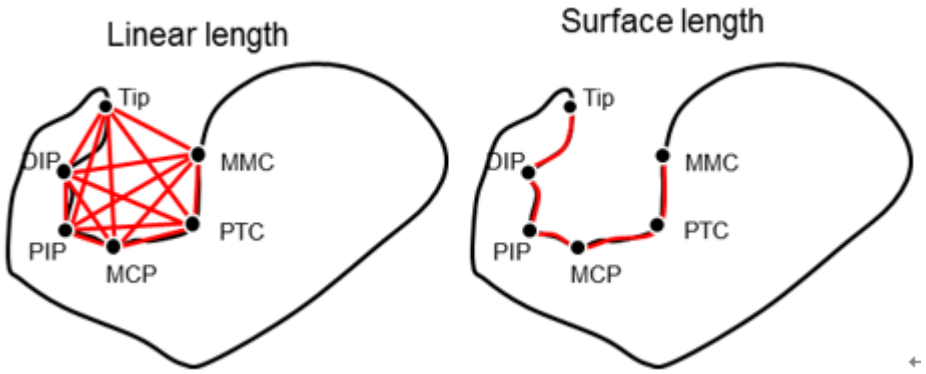


Figure IV.15. Hand landmark 표기 예시

Landmark 간 길이 관련 hand dimension은 static hand posture와 dynamic hand posture(hand grip posture)에 대하여 landmark 간 직선 거리와 landmark 간 표면 길이가 측정되었고, 각도 및 곡률 관련 hand dimension은 손가락 단면에서 추출된 평균 curve를 활용하여 측정되었다. Landmark 간 직선 거리는 landmark coordination을 MATLAB의 norm function을 이용하여 Figure IV. 16 (a)와 같이 각 landmark 사이에 생성된 vector의 길이를 계산하여 측정되었다. 각 손가락의 tip-PTC/DTC와 PIP joint-MMC point는 각각 단면 너비와 단면 높이로 측정되었다. Landmark 간 표면 거리는 병합된 hand mesh와 landmark data를 활용하여 shortest path algorithm을 적용하여 Figure IV.16 (b)와 같이 hand surface를 따라 landmark point 사이 최단 거리를 계산하여 측정되었다. Shortest path algorithm은 여러 개의 작은 삼각형으로 이루어진 surface mesh를 따라 최단거리를 찾아가므로 zigzag

모양이며 실제 길이보다 길게 측정될 수 있다. 표면 길이 측정 시 실제와 유사하게 측정되도록 Rapidform의 subdivide shell function을 이용하여 hand fusion data의 surface mesh 1개가 16개의 mesh로 세분화되어 분석이 수행되었고, hand data의 용량을 고려하여 주요 분석 대상인 손 내측 부위의 mesh에만 해상도 보정 작업이 수행되었다(Figure IV.17). 측정된 표면 길이 중 각 손가락의 tip-MMC point는 단면 둘레 길이로 측정되었다.

Handle의 상하측 비율, 각도, 곡률, 구간 길이와 연관된 hand



(a) (b)

Figure IV.16. Landmark 간 거리 측정 방법: (a) 직선 길이, (b) 표면 길이

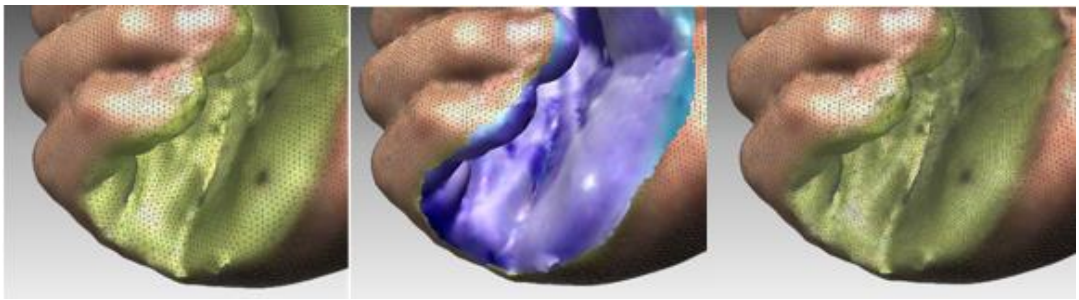


Figure IV.17. Hand surface mesh 분할 예시

dimensions는 dynamic hand의 각 손가락 내측 표면을 따라 생성된 평균 curve로부터 도출된 단면을 대상으로 측정되었다. Dynamic hand의 손 내측 curve는 피실험자 15명의 각 손가락의 tip에서부터 MMC point까지 landmark 사이를 hand surface를 따라 연결하여 생성되었다. 3가지 hand grip 자세(wrist adduction(+)/abduction(-) 20°, 0°, -30°)별로 도출된 15명의 손가락 내측 curve는 Figure IV.18과 같이 5th % 지점마다 평균 점이 도출되었다. 평균점들은 서로 연결되어 1가지 자세당 4개의 평균 curves (검지 내측 평균 curve, 중지 내측 평균 curve, 약지 내측 평균 curve, 소지 내측 평균 curve)가 생성되었다. 따라서 4개의 curve가 3가지 자세에 대해 형성되어 총 12개의 평균 curve가 IGES format으로 저장되었다.

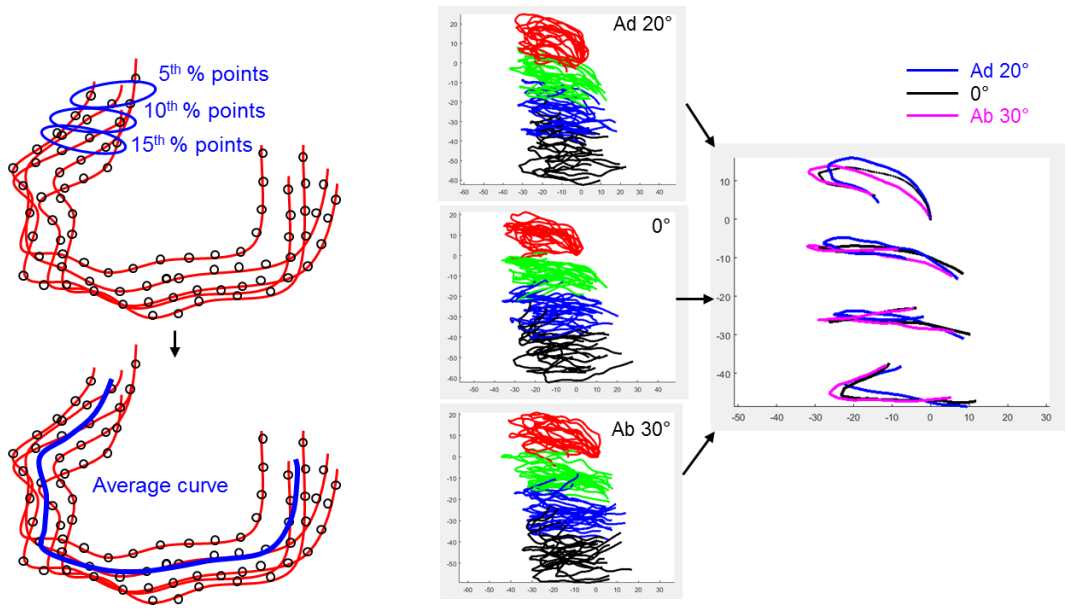


Figure IV.18. 손가락 내측 평균 curve 도출 방법

생성된 curve는 Figure IV.19와 같이 handle의 부위별 단면 형상을 도출하는데 활용되었고, 도출된 단면은 좌우대칭 설계를 위해 평면 기준 전후방향으로 중심이 정렬되었다. 단면 형상 우측의 형상은 Figure IV.19 (a)와 같이 손 내부의 주요 참조점(PIP joint, MCP joint, DTC or PTC, MMC point 지점)을 지나는 fitting curve로 생성되었다. Handle 파지 시 손이 닿지 않는 clearance 부위는 반대편 손으로 grip할 경우를 고려하여 Figure IV.19 (a)와 같이 우측 형상을 대칭으로 적용하여 도출되었다. 마찬가지로 좌우 대칭 형상을 위해 Figure IV.19 (b)와 같이 top view 상에서 전후방향을 기준으로 각 단면의 중심이 정렬되었다.

각 구간별 도출된 단면으로부터 단면 곡률, 측면 구간 곡률, 상하측 비율, 측면 각도, 그리고 구간 길이가 각 구간별로 측정되었다. 검지측, 중지측, 약지측, 소지측 단면 경계는 각각 handle의 전단부 전측, 중단부 전측, 중단부

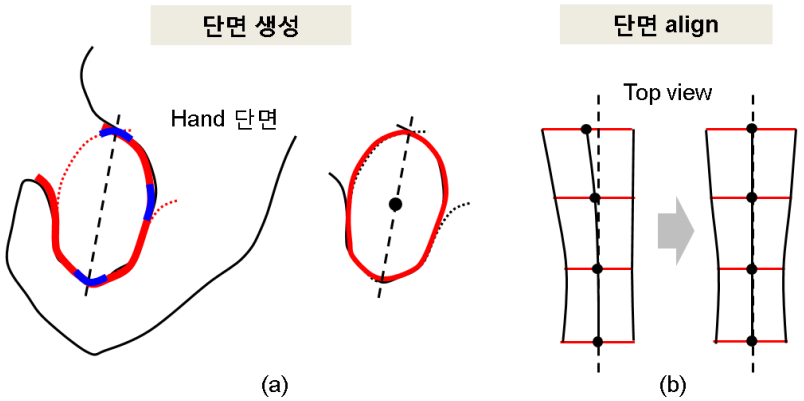


Figure IV.19. 단면 생성 및 정렬 방법: (a) 단면 생성, (b) 단면 정렬

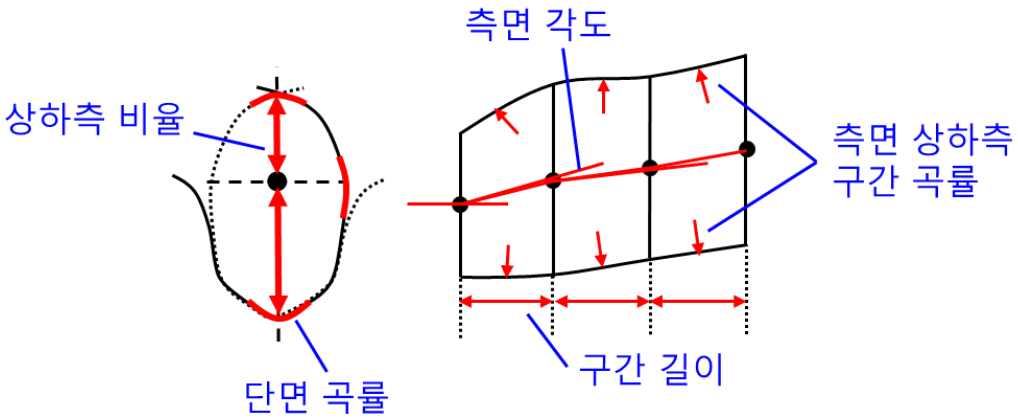


Figure IV.20. 상하측 비율/각도/곡률/구간길이 측정 방법

후측, 후단부 후측과 matching 되었다. 단면 곡률은 Rhinoceros CAD S/W의 radius measurement function을 이용하여 단면의 최상측점, 최하측점, 최좌측점(최우측점)에 유사하게 fitting 되는 원의 반지름 값으로 측정되었다. 측면 구간 곡률은 각 구간의 단면 최상측점끼리 연결한 곡선과 최하측점끼리 연결한 곡선에 대해 측면 형상에서 handle의 내측을 기준으로 convex, concave 형상이 각각 (+), (-)로 표기되었다. 단면 상하 비율은 그림 Figure IV.20과 같이 단면의 최상측점 및 최하측점을 이은 수직선과 최좌측점 및 최우측점을 이은 수평선의 교차점을 기준으로 최상측점-교차점 대비 교차점-최하측점 길이 비율로 측정되었다. 측면 각도는 각 단면의 중심을 연결한 직선들이 인접한 직선들과 이루는 각도에 대해 측정되었다. 구간 길이는 각 단면 중심 사이 수평 길이로 측정되었다.

4.1.6. Repeatability experiment

본 실험 protocol 에서 측정된 결과의 신뢰도 확보를 위해 repeatability 실험이 수행되었다. 실험 과정은 Figure IV.2 와 같이 (1) 실험 준비, (2) static hand scanning, (3) 자세별 hand grip 형상 casting 및 3D scanning, (4) hand landmark 제거의 과정으로 본 실험과 동일하였다. 실험 자세는 shoulder 0°, elbow 45°, wrist 0°로 control 되어 3 번 반복되었다(Figure IV.22). 피실험자는 총 5 명(M: 3, F: 2)으로 손 길이 Small (<33rd %ile = 172 mm) 1 명, Medium (33rd %ile ~ 67th %ile) 3 명, Large (>67th %ile = 182 mm) 1 명이 모집되었다. 피실험자 손 길이는 평균적으로 175.0 ± 8.0 mm 이고, 실험 시간은 한 사람당 약 50 분 소요되었다.

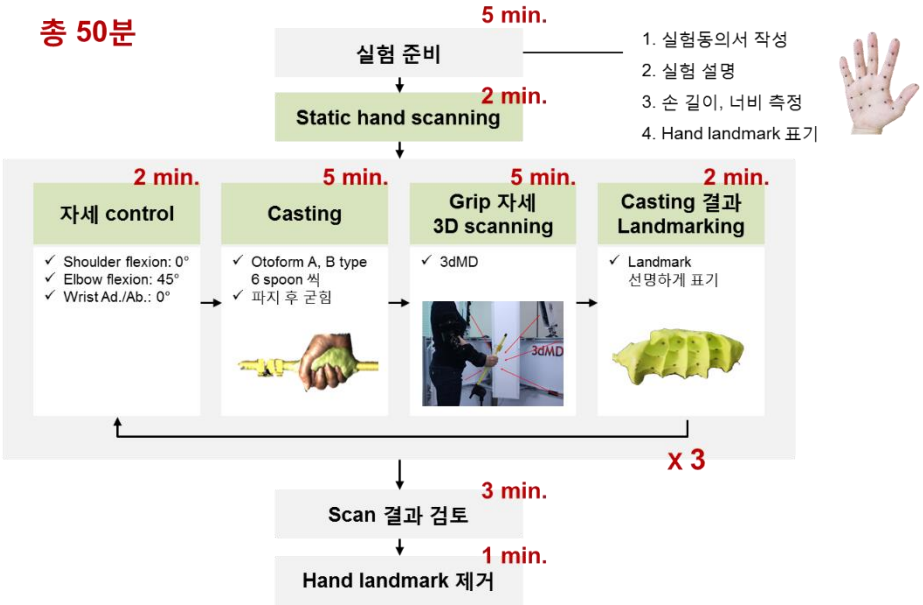


Figure IV.21. Repeatability 실험 protocol

4.2. Results

본 연구는 손을 완전히 편 자세인 static hand와 wrist adduction/abduction 동작 시 power grip 자세인 dynamic hand에 대해 Figure IV.22와 같이 hand landmark 간 직선 거리 및 표면 거리를 측정하여 static hand 대비 dynamic hand dimension 길이 변화율, dynamic hand 간 dimension 차이, 그리고 손 크기별 hand dimension 차이를 분석하였다. Hand landmark 간 직선 거리는 handle의 단면 너비 및 높이와 연관된 손가락별 tip to DTC/PTC 및 PIP to MMC point 길이에 대하여 주요하게 분석되었다. Hand landmark 간 표면 거리는 handle의 단면 둘레길이와 연관된 tip to MMC point에 대하여 주요하게 분석되었다. 측정된 dimension은 static 대비 dynamic hand 길이의 변화 비율, wrist neutral 자세 대비 adduction, abduction 자세의 증감 패턴 및 손 크기 group 간 길이 차이가 분석되었다. Wrist

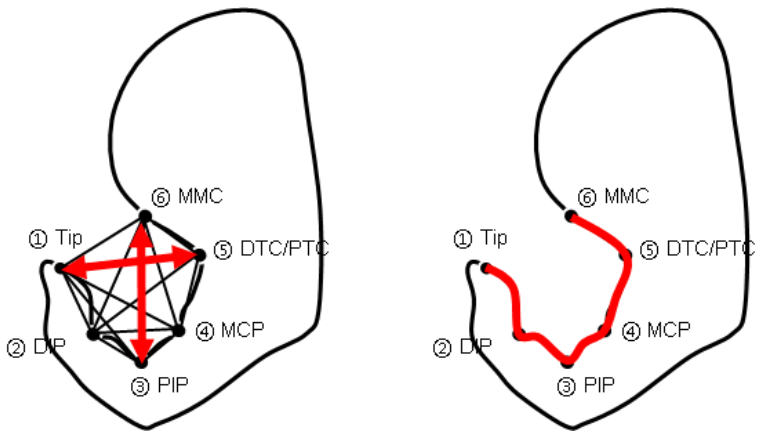


Figure IV.22. Hand dimension: Linear length와 surface length

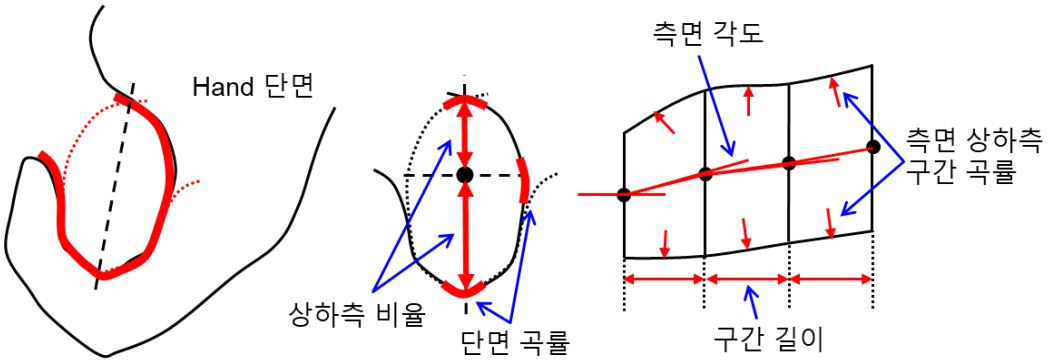


Figure IV.23. 곡률, 각도, 상하측 비율, 구간 길이 측정 방법

angle별 또는 손 크기 그룹별 통계적 차이는 one-way ANOVA (within subject) 분석을 통해 유의성이 확인되었으며, 유의성은 $\alpha = 0.05$ 수준에서 분석되었다. Repeatability는 측정 값의 SD (standard deviation)와 CV (Coefficient of Variation)를 분석하여 반복 실험 간 변동성을 분석하였다.

곡률, 각도, 상하측 비율, 구간 길이 관련 hand dimensions는 Figure IV.23과 같이 손 내측 평균 curve로 형성된 단면을 이용하여 wrist adduction 20°, 0°, abduction 30° 각 자세에 대해 측정되어 비교 분석되었다. 단면의 최상측점, 최하측점, 최좌측점(최우측점) 곡률은 각각 curve의 MMC point, PIP, DTC/PTC 상의 변곡점에 형성되는 곡률 반지름을 이용하여 측정되었으며, 값이 클수록 완만하고 작을수록 뾰족한 형상(크게 굽어진 형상)의 특성을 가진다. 단면 상하측 비율은 curve에 fitting 되어 형성된 단면의 최상측점 및 최하측점을 이은 직선을 최좌측점 및 최우측점을 이은 직선으로 나누었을 때 상측 길이와 하측 길이 비율로 측정되었다. 측면 각도는 curve에 fitting 된 단면의 중심을

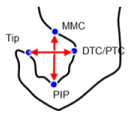
연결한 직선 사이의 각도로 측정되었고, 측면 곡률은 각 단면의 최상측점을 연결하여 생성된 상측 곡선과 최하측점을 연결하여 생성된 하측 곡선에 대하여 구간별로 측정되었다. 구간 길이는 단면 중심 사이 수평 길이로 측정되었다.

4.2.1. Overall hand deformation

Static posture 대비 dynamic posture 에서의 hand dimension 변화율은 손 내부의 너비는 64.7% ~ 73.9%, 높이는 43.1% ~54.4%, 그리고 표면 둘레는 29.9% ~ 36.5% 정도로 파악되어 handle grip 시 너비 측면의 길이 변화가 가장 큰 것으로 파악되었다. Handle 너비와 연관된 hand dimension인 tip to DTC/PTC는 Table IV.3과 같이 static posture 일 때 digits 2 ~ 5에서 각각 90.9, 99.7, 98.4, 76.6 mm이고 dynamic posture 일 때 각각 27.8 ~ 30.1, 27.3 ~ 30.0, 25.7 ~ 28.1, 23.6 ~ 27.1 mm로 파악되어 dynamic posture에서 static posture 대비 66.9% ~ 69.4%, 69.9% ~ 72.6%, 71.5% ~ 73.9%, 64.7% ~ 69.2% 수준으로 감소하는 것으로 분석되었다. Handle 높이와 연관된 handle dimension인 PIP to MMC는 Table IV.3과 같이 static posture 일 때 digits 2 ~ 5에서 각각 68.6, 82.3, 78.2, 64.1 mm이고 dynamic posture 일 때 각각 33.2 ~ 35.4, 37.8 ~ 40.3, 35.7 ~ 38.5, 33.1 ~ 36.5 mm 로 파악되어 dynamic posture에서 static posture 대비 48.4% ~ 51.6%, 51.0% ~ 54.1%, 50.8% ~ 54.4%, 43.1% ~ 48.5% 수준으로 감소하는 것으로 분석되었다. 표면 둘레와 연관된 tip to MMC

표면 거리는 Table IV.3과 같이 static posture 일 때 digits 2 ~ 5에서 각각 117.9, 135.8, 129.8, 106.0 mm이며 dynamic posture 일 때 각각 79.5 ~ 81.8, 86.2 ~ 87.3, 83.8 ~ 86.2, 69.6 ~ 74.3 mm로 파악되어 dynamic posture에서 static posture 대비 30.6% ~ 32.6%, 35.7% ~ 36.5%, 33.6% ~ 35.4%, 29.9% ~ 34.4% 수준으로 감소하는 것으로

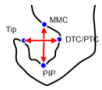
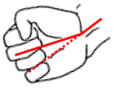
Table IV.3. Static 대비 dynamic posture의 hand dimension 길이 및 변화율

Hand dimension  * p<0.05		Handle dimension	Static	Dynamic		
				Ad 20°	0°	Ab 30°
Tip to PTC 직선 거리	D2*	전단부 전측 단면 너비	90.9	30.1 66.9% ↓	27.8 69.4% ↓	28.3 68.9% ↓
	D3*	중단부 전측 단면 너비	99.7	30.0 69.9% ↓	28.1 71.8% ↓	27.3 72.6% ↓
	D4*	중단부 후측 단면 너비	98.4	28.1 71.5% ↓	26.6 73.0% ↓	25.7 73.9% ↓
	D5*	후단부 후측 단면 너비	76.6	27.1 64.7% ↓	26.4 65.5% ↓	23.6 69.2% ↓
PIP to MMC 직선 거리	D2*	전단부 전측 단면 높이	68.6	33.2 51.6% ↓	33.8 50.7% ↓	35.4 48.4% ↓
	D3*	중단부 전측 단면 높이	82.3	37.8 54.1% ↓	39.6 51.9% ↓	40.3 51.0% ↓
	D4*	중단부 후측 단면 높이	78.2	35.7 54.4% ↓	38.5 50.8% ↓	37.1 52.6% ↓
	D5*	후단부 후측 단면 높이	64.1	33.4 47.8% ↓	36.5 43.1% ↓	33.1 48.5% ↓
Tip to MMC 표면 거리	D2*	전단부 전측 둘레길이	117.9	81.8 30.6% ↓	79.6 32.5% ↓	79.5 32.6% ↓
	D3*	중단부 전측 둘레길이	135.8	87.3 35.7% ↓	87.2 35.8% ↓	86.2 36.5% ↓
	D4*	중단부 후측 둘레길이	129.8	84.7 34.7% ↓	86.2 33.6% ↓	83.8 35.4% ↓
	D5*	후단부 후측 둘레길이	106.0	71.6 32.5% ↓	74.3 29.9% ↓	69.6 34.4% ↓

파악되었다. Handle 너비 측면의 hand dimension은 static posture 대비 dynamic posture에서 높이 측면, 둘레길이 측면의 hand dimension에 비해 상대적으로 20% ~ 35% 정도 큰 변화율을 나타내는 것으로 파악되었다.

손목 동작에 따른 hand dimension은 Table IV.4와 같이 wrist neutral (0°) 자세를 기준으로 adduction 20° 시 손 내부의 너비는 2.4% ~ 8.4% 증가하고 높이는 1.9% ~ 8.4% 감소하며, abduction 30° 시 손 내부의 너비는 2.9% ~ 10.8% 감소하고 높이는 손 전측(digit 2 ~ 3)에서는 2.0% ~ 4.6% 증가하나 후측(digit 4 ~ 5)에서는 3.5% ~ 9.5% 감소하는 것으로 분석되었다. 너비와 연관된 tip to DTC/PTC는 wrist 0° 대비 adduction 20° 시 digits 2 ~ 5에서 각각 8.4%, 6.9%, 5.6%, 2.4% 증가하였고, abduction 30° 시 각각 1.8% 증가, 2.9%, 3.4%, 10.8% 감소하였다. 따라서 tip to DTC/PTC는 대체로 adduction 20° 일 때 가장 크고 abduction 30° 일 때 가장 작은 경향을 보였으며, adduction 20° 일 때는 0° 대비 손 전측(digit 2)이 가장 크게 변하고 abduction 30° 일 때는 0° 대비 손 후측(digit 5)이 가장 크게 변하였다. 높이와 연관된 PIP to MMC는 digit 2 ~ 5에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 시 각각 1.9%, 4.5%, 7.2%, 8.4% 감소하였고, abduction 30° 시 digits 2, 3은 각각 4.6%, 2.0% 증가, digits 4, 5는 각각 3.5%, 9.5% 감소하였다. 따라서 PIP to MMC는 손 전측(digits 2, 3)에서는 abduction 30° 일 때 가장 크고 adduction 20°일 때 가장 작으며, 손 후측(digits 4, 5)에서는 wrist 0°일 때 가장 큰 경향을 보였다. 둘레와 연관된 tip to MMC 표면 거리는 wrist 0° 대비 adduction 20° 시 digits 4, 5에서

Table IV.4. 손목 동작에 따른 hand dimension 변화

Hand dimension  * $p<0.05$		Handle dimension	Ad 20° 	0°	Ab 30°
Tip to PTC 직선 거리	D2*	전단부 전측 단면 너비	29.4 8.4% ↑	26.9	29.8 1.8% ↑
	D3*	중단부 전측 단면 너비	31.0 6.9% ↑	27.0	27.4 2.9% ↓
	D4*	중단부 후측 단면 너비	28.5 5.6% ↑	25.0	26.8 3.4% ↓
	D5*	후단부 후측 단면 너비	25.6 2.4% ↑	25.5	25.9 10.8% ↓
PIP to MMC 직선 거리	D2*	전단부 전측 단면 높이	37.6 1.9% ↓	32.4	32.3 4.6% ↑
	D3*	중단부 전측 단면 높이	42.0 4.5% ↓	38.3	37.5 2.0% ↑
	D4*	중단부 후측 단면 높이	38.0 7.2% ↓	36.0	37.2 3.5% ↓
	D5*	후단부 후측 단면 높이	34.1 8.4% ↓	33.9	35.0 9.5% ↓
Tip to MMC 표면 거리	D2	전단부 전측 둘레길이	78.7 2.8% ↑	78.5	83.7 0.1% ↓
	D3	중단부 전측 둘레길이	85.7 0.2% ↑	86.1	88.8 1.1% ↓
	D4*	중단부 후측 둘레길이	81.5 1.8% ↓	84.7	88.6 2.8% ↓
	D5*	후단부 후측 둘레길이	67.1 3.6% ↓	73.0	75.3 6.3% ↓

각각 1.8%, 3.6% 감소하였으며, abduction 30° 시 digits 4, 5는 각각 2.8%, 6.3% 감소하였다. 따라서 tip to MMC는 손 전측(digits 2, 3)에서는 서로 유사하였고, 손 후측(digits 4, 5)에서는 0°일 때 가장 크고 abduction 30° 일 때 가장 작은 경향을 보였다.

Repeatability 실험에서 수행된 3번의 반복 실험을 분석한 결과, Table IV.5와 같이 tip to DTC/PTC가 (SD = 0.5 ~ 3.6 mm, CV = 1.8% ~ 12.4%) PIP to MMC (SD = 0.2 ~ 2.5 mm, CV = 0.5% ~ 7.4%)와 tip to MMC (SD = 0.2 ~ 4.1 mm, CV = 0.3% ~ 5.4 %)에 비해 큰 변동성을 보였다. Tip to DTC/PTC는 digit 2에서 SD = 0.6 ~ 2.8 mm, CV = 1.8% ~ 8.9%로 다른 digits에 비해 낮은 변동성을 보였으나, 특히 digit 4, 5에서 SD가 최대 3.6 mm, CV가 최대 12.4%로 상대적으로 큰 변동성을 보였다. PIP to MMC는 digits 2, 5에서 SD = 0.9 ~ 2.5 mm, CV = 2.4% ~ 7.4%로 digits 3, 4 (SD = 0.2 ~ 1.9 mm, CV = 0.5% ~ 5.5%)에 비해 높은 변동성을 보였다. Tip to

Table IV.5. Repeatability 분석 결과: SD와 CV

Digit	Sub.	Tip-DTC/PTC		PIP-MMC		tip-MMC	
		SD (mm)	CV (%)	SD (mm)	CV (%)	SD (mm)	CV (%)
2	S01	2.8	8.9	0.9	2.4	3.0	3.6
	S02	0.6	1.8	1.6	5.8	0.4	0.4
	S03	1.5	4.7	2.3	6.9	1.6	2.0
	S04	1.0	3.2	2.2	7.1	4.0	5.4
	S05	1.1	3.4	1.4	4.4	0.2	0.3
3	S01	2.2	7.7	0.2	0.5	1.5	1.6
	S02	2.0	6.2	1.6	4.4	4.1	4.3
	S03	2.3	7.5	0.5	1.2	2.0	2.3
	S04	0.8	2.9	1.5	3.9	1.4	1.6
	S05	2.2	7.0	1.7	4.4	1.1	1.3
4	S01	3.1	12.4	0.8	1.6	3.8	4.1
	S02	2.7	7.5	1.9	5.5	0.6	0.6
	S03	2.4	7.9	1.6	4.2	2.2	2.6
	S04	2.1	9.7	1.6	4.3	2.7	3.3
	S05	2.3	8.3	1.8	4.6	1.0	1.2
5	S01	2.3	8.1	1.4	3.0	3.0	3.6
	S02	3.6	10.2	2.5	7.4	2.5	3.2
	S03	2.3	7.2	1.9	6.2	3.7	5.1
	S04	2.1	8.9	1.1	2.9	2.4	3.3
	S05	0.5	1.8	2.3	6.6	1.5	2.4

SD	CV
>2.0 mm	>5.0%
	>10.0%

MMC는 전체적으로 SD가 0.2 ~ 4.1 mm로 다른 hand dimensions에 비해 높았으나 CV가 0.3% ~ 5.4%로 가장 낮았다. 이는 static 대비 dynamic posture의 hand dimension 변화율과 유사하게 표면 거리를 측정한 tip to MMC가 직선 거리를 측정한 tip to DTC/PTC, PIP to MMC에 비해 변동성이 낮고, 특히 유동성이 큰 landmark인 tip이 관여되어 있는 tip to DTC/PTC가 변동성이 가장 크게 나타나는 것으로 파악된다.

4.2.2. Hand deformation by digits

손 전측(digits 2 ~ 3)에서의 power grip 내부 형상은 손목 adduction 및 abduction 시 너비는 1.8% ~ 8.4% 증가하였으며, 높이는 손목 adduction 시 1.9% ~ 4.5% 감소하나 abduction 시 2.0% ~ 4.6% 증가하였으며, 표면 둘레는 손목 adduction 시 0.2% ~ 2.8% 증가하나 abduction 시 0.1% ~ 1.1% 감소하는 경향을 보였다. 손 내측 너비와 연관된 tip to DTC/PTC는 Figure IV.24와 같이 digit 2에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 8.4% 유의하게 증가($F_{(2,12)} = 3.59, p = 0.041$), abduction 30° 일 때 1.8% 증가하였고, digit 3에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 6.9% 유의하게 증가하였다($F_{(2,12)} = 4.90, p = 0.015$). 손 내측 높이와 연관된 PIP to MMC는 Figure IV.25와 같이 digit 2에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 약 1.9%

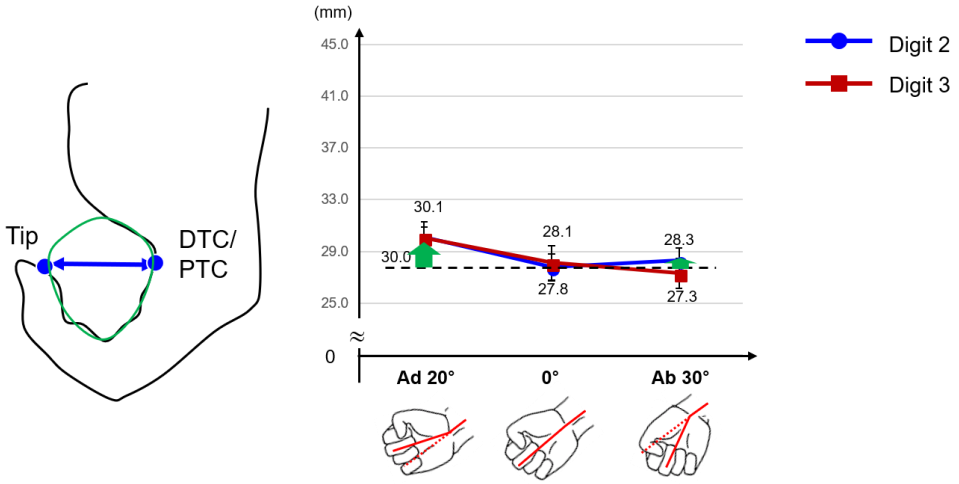


Figure IV.24. 손목 동작에 따른 digits 2, 3의 tip to DTC/PTC 변화

감소, abduction 30° 일 때 4.6% 유의하게 증가하였고($F_{(2,12)} = 4.36$, $p = 0.023$), digit 3에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 약 4.5% 유의하게 감소, abduction 30° 일 때 2.0% 증가하였다($F_{(2,12)} = 12.26$, $p < 0.01$). 손 내측 표면 둘레와 연관된 tip to

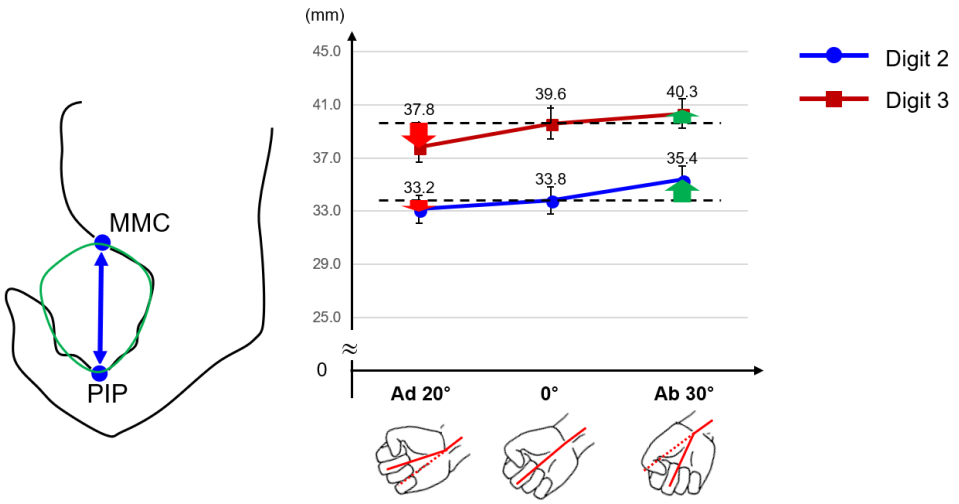


Figure IV.25. 손목 동작에 따른 digit 2, 3의 PIP to MMC 변화

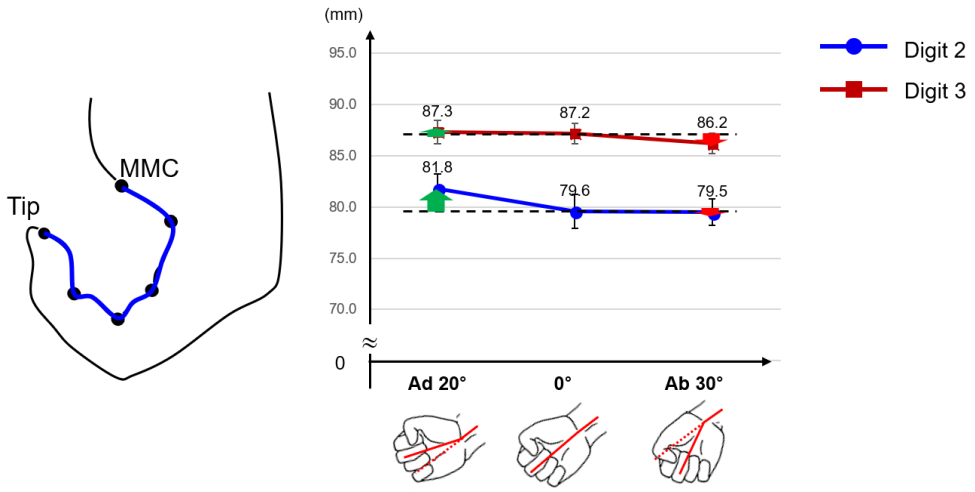


Figure IV.26. 손목 동작에 따른 digits 2, 3의 tip to MMC 변화

MMC 표면 거리는 Figure IV.26과 같이 digit 2에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 약 2.8% 증가, abduction 30° 일 때 0.1% 감소하였고($F_{(2,12)} = 3.06$, $p = 0.063$), digit 3에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 약 0.2% 증가, abduction 30° 일 때 1.1% 감소하였다($F_{(2,12)} = 0.75$, $p = 0.481$). 따라서 digit 2와 digit 3은 손 내측 너비, 높이, 표면 둘레에 대해 유사한 변화 경향을 보였고, 상대적으로 digit 2가 digit 3에 비해 최대 2.6% 더 큰 비율로 변화하는 것으로 분석되었다.

손 후측(digits 4 ~ 5)에서의 power grip 내부 형상은 손목 adduction 시 2.4% ~ 5.6% 증가하나 abduction 시 3.4% ~ 10.8% 감소하고, 높이와 표면 둘레길이는 adduction 및 abduction 시 각각 3.5%~9.5%, 1.8%~6.3% 감소하는 경향을 보였다. 손 내측 너비와 연관된 tip to PTC는 Figure IV.27과 같이 digit 4에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 약 5.6% 증가, abduction 30° 일 때 3.4% 감소하였고($F_{(2,12)} =$

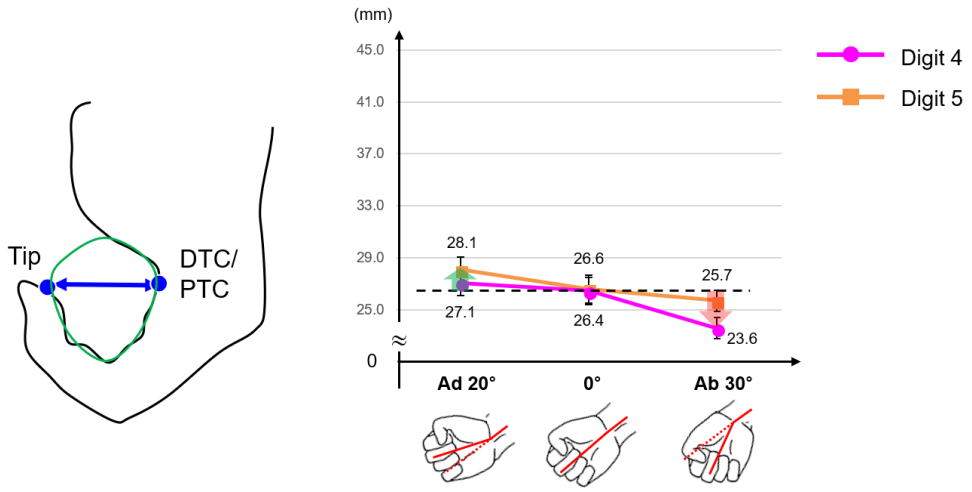


Figure IV.27. 손목 동작에 따른 digits 4, 5의 tip to DTC/PTC 변화

3.70, p = 0.038), digit 5에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 약 2.4% 증가, abduction 30° 일 때 10.8% 감소하였다($F_{(2,12)}$ = 6.35, p < 0.01). 손 내측 높이와 연관된 PIP to MMC는 Figure IV.28과 같이 digit 4에서 wrist 0° 대비 adduction 20°

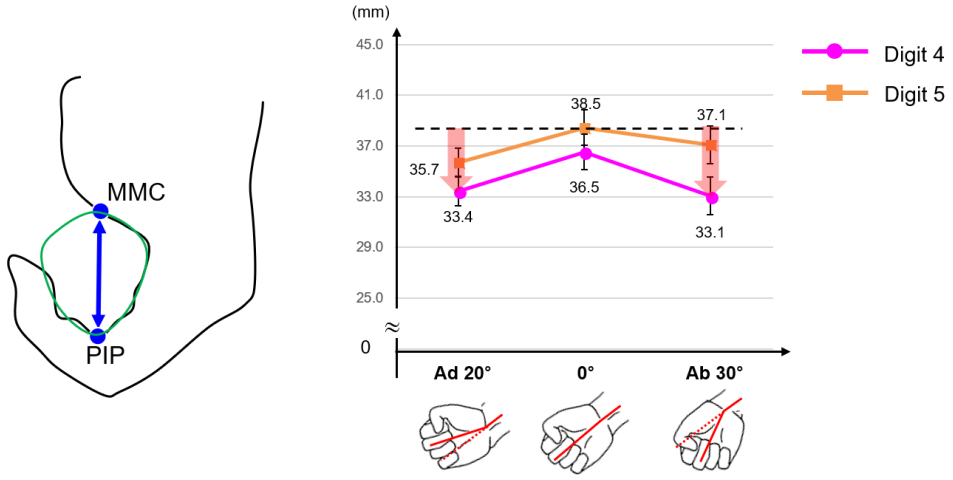


Figure IV.28. 손목 동작에 따른 digit 4, 5의 PIP to MMC 변화

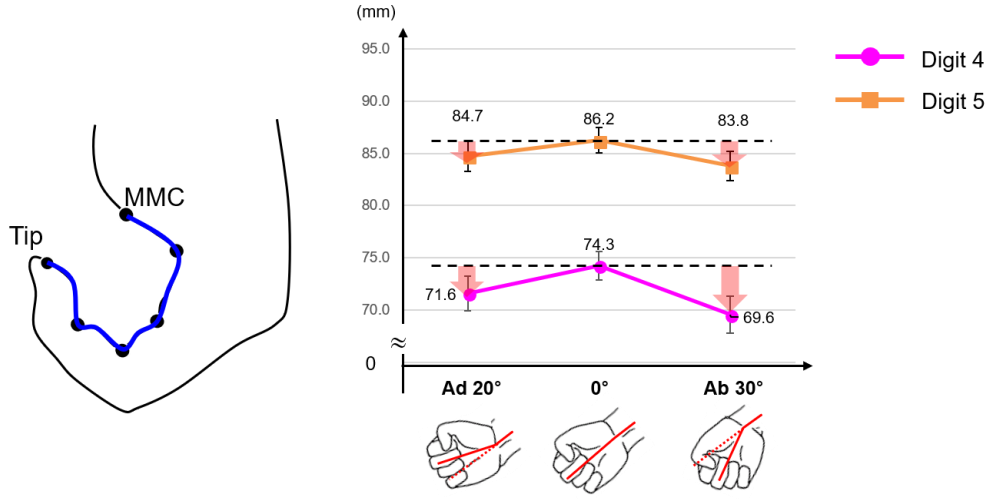


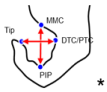
Figure IV.29. 손목 동작에 따른 digits 4, 5의 tip to MMC 변화

일 때 약 7.2% 감소, abduction 30° 일 때 3.5% 감소하였고($F_{(2,12)} = 6.95$, $p < 0.01$), digit 5에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 약 8.4% 감소, abduction 30° 일 때 9.5% 감소하였다($F_{(2,12)} = 8.32$, $p < 0.01$). 손 내측 표면 둘레와 연관된 tip to MMC 표면 거리는 Figure IV.29와 같이 digit 4에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 1.8% 감소, abduction 30° 일 때 2.8% 감소하였고($F_{(2,12)} = 6.71$, $p < 0.01$), digit 5에서 wrist 0° 대비 adduction 20° 일 때 약 3.6% 감소, abduction 30° 일 때 6.3% 감소하였다($F_{(2,12)} = 8.87$, $p < 0.01$). 따라서 digit 4와 digit 5는 손 내측 너비, 높이, 표면 둘레에 대해 유사한 변화 경향을 보였고, 상대적으로 digit 5가 digit 4에 비해 최대 7.4% 큰 비율로 변화하는 것으로 분석되었다.

4.2.3. Hand deformation by hand size group

손 크기별 hand dimension 차이는 손 내측 너비의 경우 S (small) group이 M (medium)과 L (large) group 대비 중단부(digit 3, 4)에서 각각 최대 15.0%, 13.2% 크고, 높이의 경우 S group이 M, L group 대비 각각 최대 15.9%, 16.2% 크고,

Table IV.6. 손 크기별 hand dimension 차이

Hand dimension  * p<0.05		Handle dimension	S	M	L
Tip to PTC 직선 거리	D2	전단부 전측 단면 너비	29.4	26.9	29.8
	D3*	중단부 전측 단면 너비	31.0	27.0	27.4
	D4*	중단부 후측 단면 너비	28.5	25.0	26.8
	D5	후단부 후측 단면 너비	25.6	25.5	25.9
PIP to MMC 직선 거리	D2*	전단부 전측 단면 높이	37.6	32.4	32.3
	D3*	중단부 전측 단면 높이	42.0	38.3	37.5
	D4	중단부 후측 단면 높이	38.0	36.0	37.2
	D5	후단부 후측 단면 높이	34.1	33.9	35.0
Tip to MMC 표면 거리	D2*	전단부 전측 둘레길이	78.7	78.5	83.7
	D3*	중단부 전측 둘레길이	85.7	86.1	88.8
	D4*	중단부 후측 둘레길이	81.5	84.7	88.6
	D5*	후단부 후측 둘레길이	67.1	73.0	75.3

표면 둘레의 경우 L group이 S와 M group 대비 각각 최대 12.2%, 6.6% 크게 나타났다. 손 내측 너비와 연관된 digits 2 ~ 5의 tip to DTC/PTC 직선 거리는 Table IV.6과 같이 S group에서 평균적으로 25.6 ~ 31.0 mm, M group에서 25.0 ~ 27.0 mm, L group에서 25.9 ~ 29.8 mm로 나타났다. 따라서 tip to DTC/PTC 직선 거리는 S group이 digit 3, 4에서 M group 대비 각각 15.0% (4.0 mm), 13.8 % (3.6 mm) 증가, L group 대비 각각 13.2% (3.5 mm), 6.2% (1.7 mm) 증가하여 유의하게 큰 것으로 파악되었다(digit 3: $F_{(2,12)} = 3.42$, $p = 0.042$; digit 4: $F_{(2,12)} = 3.52$, $p = 0.039$). 손 내측 높이와 연관된 digits 2 ~ 5의 PIP to MMC 직선 거리는 Table IV.6과 같이 S group에서 평균적으로 34.1 ~ 42.0 mm, M group에서 32.4 ~ 38.3 mm, L group에서 32.3 ~ 37.5 mm로 나타났다. 따라서, PIP to MMC 직선 거리는 S group이 digits 2, 3에서 S group이 M group 대비 각각 15.9% (5.2 mm), 9.6% (3.7 mm) 증가, L group 대비 각각 16.2% (5.3 mm), 11.9% (4.5 mm) 증가하여 유의하게 큰 것으로 파악되었다(digit 2: $F_{(2,12)} = 13.02$, $p < 0.010$; digit 3: $F_{(2,12)} = 5.15$, $p = 0.010$). 손 내측 표면 둘레와 연관된 digits 2 ~ 5의 tip to MMC 표면 거리는 Table IV.6과 같이 S group에서 67.1 ~ 85.7 mm, M group에서 73.0 ~ 86.1 mm, L group에서 75.3 ~ 88.8 mm로 나타났다. 따라서, tip to MMC 표면 거리는 L group이 digits 2 ~ 5에서 S group 대비 3.6% (3.1 mm) ~ 12.2% (8.2 mm) 증가, M group 대비 3.1% (2.7 mm) ~ 6.6% 5.2 mm) 증가하여 유의하게 큰 것으로 파악되었다(digit 2: $F_{(2,12)} = 5.31$, $p < 0.010$; digit 3: $F_{(2,12)} = 3.54$, $p = 0.038$; digit 4: $F_{(2,12)} = 9.45$, $p < 0.010$; digit 5: $F_{(2,12)} = 8.97$, $p <$

0.010).

Hand dimension의 손목 동작에 따른 증감 패턴은 손 내측 너비의 경우 M과 L group이 서로 유사(e.g., adduction 시 증가, abduction 시 감소)하였고, 높이의 경우 S와 M group이 서로 유사(e.g., adduction 시 증가, abduction 시 증가)하였다. 예를 들어, Figure IV.30 (a)와 같이 digit 4의 너비(tip to DTC/PTC)는 S group이 wrist 0° 대비 adduction 20°, abduction 30°에서 각각 0.4% 감소, 4.3% 감소할 때 M group은 각각 12.7% 증가, 2.7% 감소하였고, L group은 각각 5.7% 증가, 3.0% 감소하였다. 또한, Figure IV.30 (b)와 같이 digit 2의 높이(PIP to MMC)는 S group이 wrist 0° 대비 adduction 20°, abduction 30°에서 각각 1.1% 증가, 8.9% 증가할 때 M group은 각각 2.3% 증가, 6.6% 증가하였고, L group은 각각 9.1%

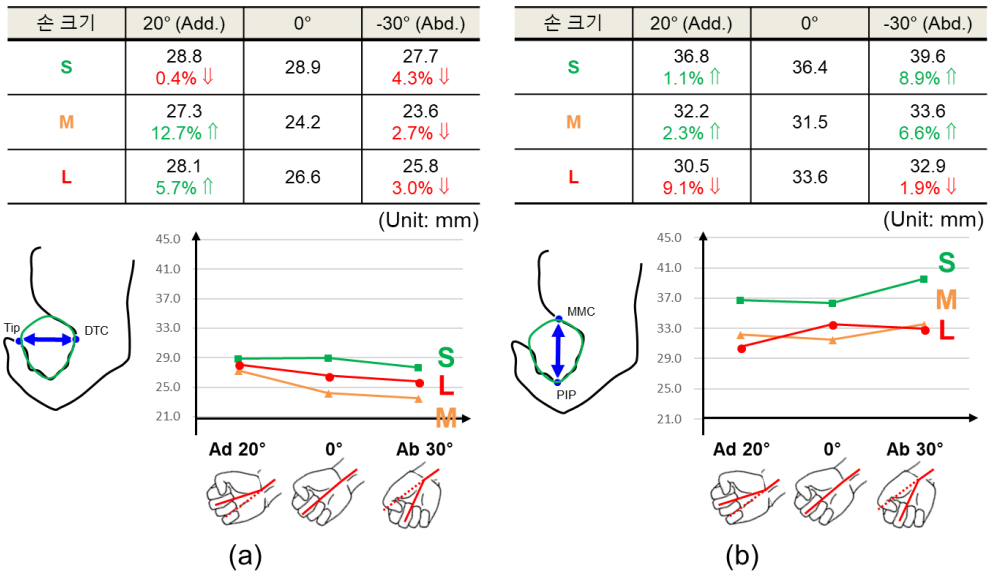


Figure IV.30. 손 크기별 증감 패턴 예시: (a) digit 4의 tip to DTC/PTC, (b) digit 2의 PIP to MMC

감소, 1.9% 감소하였다. 또한, tip to DTC/PTC는 S group의 경우 손 전측(digits 2 ~ 3)에서는 abduction 30°보다 adduction 20° 일 때 더 크게 변하고 손 후측(digits 4 ~ 5)에서는 abduction 30° 일 때 더 크게 변하였다. M group과 L group은 손 전/중측(digits 2 ~ 4)에서 adduction 20° 일 때 더 큰 비율로 변하고 손 후측(digit 5)에서는 abduction 30° 일 때 더 큰 비율로 변하였다. PIP to MMC는 S와 M group의 경우 손 전측(digits 2 ~ 3)에서 abduction 30° 일 때 더 큰 비율로 변하고 손 후측(digits 4 ~ 5)에서 adduction 20° 일 때 더 큰 비율로 변하였다. 반면, L group의 경우 손 전/중측(digits 2 ~ 4)에서 adduction 20° 일 때 더 큰 비율로 변하고 손 후측(digit 5)에서 abduction 30° 일 때 더 큰 비율로 변하였다.

4.2.4. Additional Design Dimensions

단면에서는 Figure IV.31과 같이 상측, 하측, 좌우측 곡률, 그리고 상하측 길이 비율이 손목 자세 및 손가락별로 분석되었다. 손목 0° 대비 adduction 20° 및 abduction 30° 시 상측 곡률은 손 전측에서 19.7 ~ 23.2 mm 감소(more sharp)하여 손목 0° 일 때 가장 완만하였다. 하측 곡률은 모든 자세에서 1.1 ~ 4.8 mm로 서로 유사하였다. 좌우측 곡률은 중후단부에서 0° 일 때 15.2 ~ 62.8 mm, adduction 20° 일 때 3.0 ~ 10.1 mm, abduction 30° 일 때 12.4 ~ 20.1 mm 로 손목 0° 일 때 가장 완만한 것으로 파악되었다. 단면 상하측 길이 비율은 전체적으로

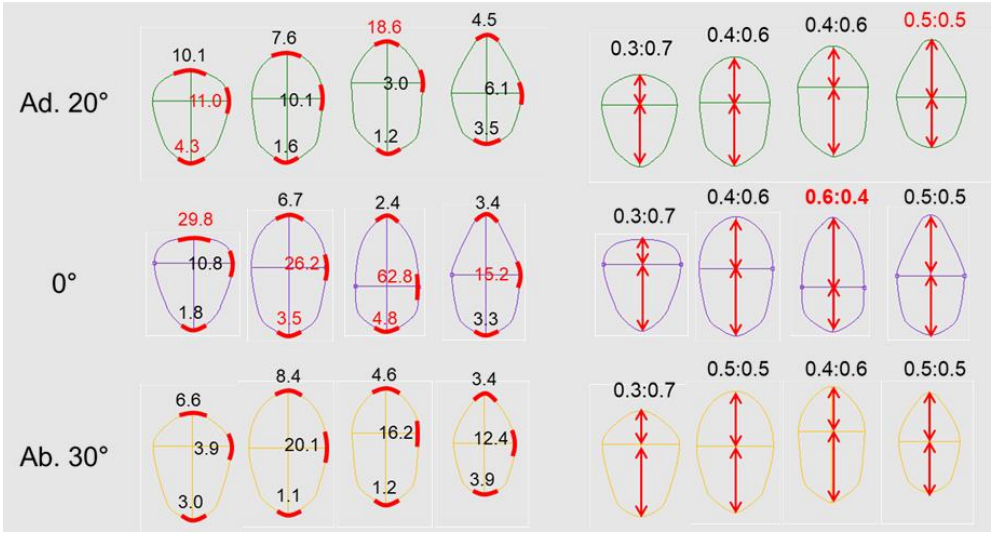


Figure IV.31. 단면 상측, 하측, 좌우측 곡률 및 상하측 비율 측정 결과

전단부 전측 1:2, 중단부 전/후측 2:3, 후단부 후측 1:1의 경향을 보였다. 대체로 하측 길이가 상측 길이보다 크게 나타났으나 중단부 후측 상하 길이 비율의 경우 wrist 0°은 다른 wrist 동작과 달리 약 3:2의 비율로 나타났다.

측면에서는 Figure IV.32와 같이 곡률, 각도, 그리고 구간길이가 손목 동작에 따른 구간별 변화에 대해 분석되었다. 손목 adduction 20° 및 abduction 30° 시 측면 상측 곡률은 각각 151.6 ~ 267.7, 95.2 ~ 98.1 mm의 곡률로 볼록(convex)하였고 하측 곡률은 전단부에서 101.2 ~ 299.3 mm 로 볼록하고 후단부에서 739.4 ~ 2707.5 mm로 오목(concave)하여 대체로 완만한 경향을 보였다. 측면 각도는 모든 손목 동작에서 전단부가 7.7° 이상 상측으로 굽어지고, adduction 20° 및 abduction 30°에서 후단부가 2.2 ~ 5.1° 정도 하측으로 꺾이는 경향을 보였다. 구간 길이는 손목 동작이 변하더라도 전단부, 중단부,

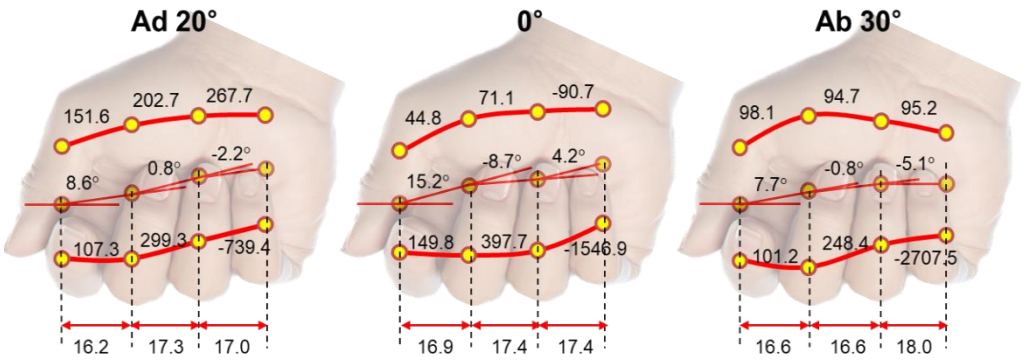


Figure IV.32. 측면 상측/하측 곡률, 각도 및 구간 길이

후단부에서 모두 최대 1 mm만큼 차이를 보여 서로 유사한 경향을 보였다.

V. Discussion

본 연구는 3D scan 및 casting 방법을 활용하여 측정이 어려운 hand grip 내부 형상을 정확하게 측정하는 방법을 개발하였으며, 손목 adduction/abduction 동작에 의한 hand power grip 내부 형상 변화를 정량적으로 분석하였다. Grip 자세에서의 손 내측 형상 및 치수는 handle 설계에 직접 활용될 수 있어 중요하나 grip 시 손의 형태적인 특징으로 그 내부 형상의 3차원 측정이 어렵다. Rogers et al. (2008)은 landmark coordinate 측정에 기반한 digitized hand model을 생성하여 다양한 손 자세별 hand dimension 변화 양상을 분석하였으나, hand model 기반 측정 값은 실제 측정 값에 비해 최대 15 mm 정도의 차이가 발생하였다. 본 연구에서는 고형 성능이 높은 casting material (Otoform)을 활용하여 손 내측 형상을 정확하게 casting 하였으며 3D scan된 손 전반 형상과 casting hand를 fusion하여 손 내부 형상과 hand landmark가 포함된 온전한 3차원 hand grip 형상을 도출하였다. 3D hand fusion 형상은 손목 adduction 및 abduction 자세별로 개별 측정되어 자세 변화에 따른 hand dimension 변화가 정량적으로 분석되었다. 한편, 본 연구에 적용된 손 내부 측정 방법과 유사하게 ear 3D scan, ear casting 및 fusion이 수행되어 귀 형상 및 치수의 정량적 분석이 수행된 사례가 있다(Lee et al., 2018).

Power grip 내측 형상 분석은 hand-handle 연관성 분석을 통해 도출된

직선 길이, 둘레길이, 각도, 그리고 곡률 측면의 주요 hand dimension 40종이 측정되어 수행되었다. Handle 설계 측면에서 중요한 handle design dimension (e.g., 단면 너비, 둘레길이, 곡률 등) 11종이 인간공학 및 디자인 전문가 group의 discussion을 통해 선정되었고, 분석 기준점이 되는 hand landmarks (e.g., digit별 tip, DIP, PIP, MCP, DTC/PTC, MMC) 24종이 hand-handle간 접촉 범위 내에서 각 손가락 관절을 따라 선정되었다. 손 내측 형상 분석을 위한 hand dimension (e.g., tip to DTC/PTC – 단면 너비, PIP to MMC – 단면 높이 등)은 4건의 기존 연구에서 도출된 palmar hand dimensions과 handle design dimension간 연관성 분석을 수행하여 40종이 최종 선별되었으며 handle design 시 직접 활용될 수 있다. Power grip 내측 형상 분석은 power grip 자세의 fusion hand를 대상으로 hand dimension의 직선 길이, 둘레 길이, 각도, 그리고 곡률이 측정되었으며 손목 자세별 hand dimension 변화량이 정량적으로 분석되었다. 각도 및 단면 곡률 분석 시 polygon mesh의 다각형 구조로 인해 발생하는 noise를 최소화하고 handle clearance 부분의 자연스러운 형상 보강을 위해 손 단면 형상에 fitting된 symmetric curve가 생성되어 분석에 활용되었다. 본 연구는 길이 측면의 design dimension 분석을 주로 수행한 기존 연구에 비해 곡률, 각도, 단면 형상 등의 복합적인 분석을 수행하여 handle 설계 시 참고할 수 있는 세부적이고 다양한 정보를 제공하였다는 측면에서 의의가 있다.

손을 편 static 자세 대비 power grip의 dynamic 자세에서 hand dimension

치수는 너비 측면 65% ~ 74% 감소, 높이 측면 43% ~ 54% 감소, 표면 둘레 측면 30% ~ 37% 감소하는 경향이 파악되었으며, 손가락 및 hand dimension별로 측정된 변화율은 power grip 자세에서의 손 치수 추정 및 handle 설계에 유용하게 활용될 수 있다. Power grip 너비와 연관된 tip to DTC/PTC 직선 거리는 static 자세 대비 dynamic 자세에서 각 digit별(digits 2 ~ 5)로 31% ~ 33%, 27% ~ 30%, 26% ~ 29%, 31% ~ 35% 수준으로 감소하였다. 손 내측 높이와 연관된 PIP to MMC 직선 거리는 static 자세 대비 dynamic 자세에서 각각 48% ~ 52%, 46 ~ 49%, 46% ~ 49%, 52% ~ 57% 수준으로 감소하였다. 손 내측 표면 둘레와 연관된 tip to MMC 표면 거리는 static 자세 대비 dynamic 자세에서 각각 67% ~ 69%, 63% ~ 64%, 65% ~ 66%, 66% ~ 70% 수준으로 감소하였다. 본 연구에서 파악된 각 손가락별 너비, 높이, 표면 둘레 길이 변화 비율은 static 자세에서 측정된 hand dimension 측정 데이터 적용 시 power grip 자세에서의 hand dimension을 추정할 수 있어 기존 손 측정 연구를 이용한 power grip 치수 분석에 활용될 수 있다. 또한 분석된 hand dimension은 power grip 내부의 너비, 높이, 표면 둘레와 직접 연관되어 있어 static 자세에서 측정된 hand dimension 치수와 변화율을 이용하여 세부 handle design dimension을 추정하여 설계에 유용하게 활용할 수 있다.

Power grip 형상은 손목 각도 0° (neutral) 대비 adduction 20°에서 너비가 2.4% ~ 8.4% 증가하며 높이가 1.9% ~ 8.4% 감소하는 양상의 tapered 형태를 이루고, abduction 30°에서 손 전측(digits 2~3)의 너비 및 높이가 1.8% ~ 4.6%

증가하나 손 후측(digits 4~5)에서 너비와 높이가 최대 9.5%, 10.4% 감소하여 비교적 급격한 tapered 형태를 이루는 것으로 파악되었다. 너비와 연관된 tip to DTC/PTC 직선 거리는 손목 각도 0° 대비 adduction 20°에서 digit별 8.4%, 6.9%, 5.6%, 2.4 % 증가하고, 높이와 연관된 PIP to MMC 직선 거리는 digit별 1.9%, 4.2%. 7.2%, 8.4% 감소하여, power grip 시 전측의 너비가 넓고 후측의 높이가 작은 tapered 형태를 이루는 것으로 파악되었다. 손목 각도 0° 대비 abduction 30°에서는 전단부(digits 2~3) 에서는 너비 및 높이가 각각 최대 1.8%, 4.6% 증가하나 후단부(digits 4~5)에서는 digit 별로 너비는 3.4%, 10.8%, 높이는 3.5%, 9.5% 감소하여, power grip 시 전반적으로 전측은 약간 증가하고 후측에서 너비 및 높이가 급격히 감소하는 taperd 형태를 이루는 것으로 파악되었다.

본 연구에서 파악된 손목 자세별 손 내측 형상 분석 결과는 손목 adduction 및 abduction의 고정된 자세 또는 abduction/adduction motion을 이용한 handle의 최적 형상을 제안하는데 유용하게 활용될 수 있다. 손목 adduction 자세로 사용되는 handle 제품 설계 시 중립 자세에서의 손 내부 형상 대비 너비가 8% 정도 넓고 높이가 8% 정도 감소된 tapered 형태 handle을 제안할 수 있다. 손목 abduction 자세로 사용되는 handle의 경우 중립 자세 대비 후단부 너비 및 높이가 10% 정도 감소된 tapered 형태로 handle을 설계할 수 있다. Handle 제품 중 초음파 검진용 probe handle과 같이 검시 시 abduction과 adduction을 동작을 모두 수행하는 사용하는 handle 제품의 경우 compromised

papered 형태를 적용하여 handle 설계를 제안할 수 있다. 손목 자세 변화에 따른 power grip 형상을 고려한 handle 설계 시 사용자의 인체 부담이 줄어들고 손 내측 형상 적합성 향상된 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

손 크기별 power grip 형상 분석 결과 너비 및 높이의 경우 S (small) group이 M (medium)과 L (large) group 대비 각각 최대 15.9%, 16.2% 크고, 표면 둘레의 경우 L group이 S와 M group 대비 각각 최대 12.2%, 6.6% 큰 것으로 확인되었다. 손 내측 너비와 연관된 digits 2 ~ 5의 tip to DTC/PTC 직선 거리는 S group이 M group 대비 0.2% ~ 15.0 % 증가하고, L group 대비 digits 3 ~ 4에서 6.2% ~ 13.2 % 증가하였다. 따라서 손 내측 너비는 digits 3 ~ 4에서 S group이 M, L group과 비교하여 가장 큰 것으로 파악되었다. 손 내측 높이와 연관된 digits 2 ~ 5의 PIP to MMC 직선 거리는 S group이 M group 대비 0.5% ~ 15.9 % 증가하고, L group 대비 digits 2 ~ 4가 2.3% ~ 16.2 % 증가하였다. 따라서, 손 내측 높이는 digits 2 ~ 4에서 S group이 M, L group과 비교하여 가장 큰 것으로 파악되었다. 손 내측 표면 둘레와 연관된 tip to MMC 표면 거리는 L group이 S group 대비 digits 2 ~ 5에서 3.6% ~ 12.2 % 증가하고, M group 대비 3.1% ~ 6.6 % 증가하였다. 따라서, 손 내측 표면 둘레는 digits 2 ~ 5에서 L group이 S, M group과 비교하여 가장 큰 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 cylindrical handle을 대상으로 optimal handle diameter 분석을 수행한 기존 연구와는 달리 손 내측 형상을 너비, 높이 등의 hand

dimension을 분석하여 선호 handle design dimension을 분석하였으며 너비 측면에서 최대 14.9 mm, 높이 측면에서 최대 4.7 mm의 차이를 나타냈다. Kong and Lowe (2005)는 주관적 만족도 측면에서 diameter 35 ~ 45 mm가 가장 선호됨을 파악하였고, Aldien et al. (2005), McGorry et al. (2009)는 peak pressure 및 MVC 측면에서 diameter 30 ~ 40 mm가 가장 선호됨을 파악하였다. 본 연구에서 도출된 handle의 최적 단면 너비는 23.6 ~ 30.1 mm, 최적 단면 높이는 33.1 ~ 40.3 mm로 파악되어 기존 연구에서 파악된 cylindrical handle diameter에 비해 너비 측면에서는 4.6 ~ 14.9 mm, 높이 측면에서는 -3.1 ~ 4.7 mm 정도 차이가 발생하였다. 이는 단면이 정원인 cylindrical handle을 이용한 기존 연구에 비해, 본 연구에서는 자연스러운 power grip 자세를 적용하고 팔꿈치 및 어깨 관절의 영향을 최소화하였으며, 부드러운 casting material을 활용하여 손 내부 deformation을 최소화한 방법에 의한 차이인 것으로 사료된다.

본 연구는 제한된 전신 및 grip 자세에 대한 측정, 한국인에 국한된 실험 및 분석과 handle grip 시 힘의 영향을 고려하지 못한 한계를 지닌다. 본 연구는 shoulder 0° 및 elbow 45°의 고정된 자세에서의 손목 adduction 및 abduction 동작에 의한 손 내측 grip 형상 변화 분석에 한정되었다. Grip 자세는 power grip과 pinch grip 중 power grip이 선정되었으며 power grip 중에서도 엄지손가락을 나머지 손가락에 겹쳐 쥐는 cylindrical grip에 대하여만 평가가 수행되었다. Handle의 종류와 사용 상황에 따라 shoulder flexion/extension 및

adduction/abduction, elbow flexion, wrist flexion/extension 및 pronation/supination 각도를 조합하여 더욱 다양한 자세를 고려할 수 있으며 각 관절 간 interaction 효과를 확인할 수 있으므로 이에 관련된 후속 연구가 수행될 필요가 있다. 본 연구는 한국인 남녀 15명을 대상으로 손 형상을 3D scan하고 분석한 한계를 지닌다. 본 연구 결과를 일반화하기 위해서 한국인에 비해 손 크기가 더 크거나 더 작은 범위에 포함되는 다양한 인종을 대상으로 추가 연구를 수행하여 본 연구에서 도출된 손 형상 측정 결과 및 크기 변화 경향이 검증될 필요가 있다. 뿐만 아니라, 사용자가 handle grip 시 가하는 힘에 따라 선호하는 최적 handle 크기 및 형상이 달라질 수 있으나 본 연구에서는 힘의 영향을 배제한 상황에서 실험 참여자의 자연스러운 grip 형상을 측정하여 분석하였다. 따라서, 힘을 주어 handle을 사용하는 task와 grip force 등의 객관적 측정이 병행되는 손 내부 형상 측정 연구가 수행되면 실효성 있는 최적 handle 설계 제안이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에서 도출된 fusion hand data를 활용하여 3D anthropometry 측정에 대한 추가 분석과, 손목 자세별 손 내측 형상을 최적 handle 설계에 적용하기 위한 추가 연구가 필요하다. 본 연구에서 수행된 길이, 각도 등의 2D anthropometry 측면의 손 형상을 분석 외 실험을 통해 구축된 fusion hand data set을 활용하여 체표면적, 손 내측 공간 등의 3D anthropometry에 대한 분석을 수행할 수 있다. 3D anthropometry 분석 시 handle 최적 부피, 최적 표면적 등

handle 설계를 위한 다양한 정보 획득이 가능하며, 3D anthropometry가 handle의 사용성에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 또한, 본 연구를 통해 도출된 handle design dimensions는 handle 설계에 직접적으로 적용되기 위해 grip force, push force, EMG, questionnaire 등에 대한 사용성 평가를 수행하여 설계 치수 측면의 최적화가 수행될 수 있다. 예를 들어 실물 handle을 제작하고 실제 제품 사용 환경에서 handle의 사용성을 평가하고 handle design dimension 별 개선 방향을 도출하여 본 연구에서 도출된 최적 handle design dimension이 보완될 수 있다.

VI. Conclusion

본 연구는 hand-handle interface 분석을 통해 24개의 hand landmarks 및 40개의 hand-handle 연관 dimensions를 선정하였고, 손 형상으로부터 최적 handle 설계를 연관하여 도출하는 데 적극 활용될 것으로 기대된다. Hand landmarks는 handle grip 시 접촉 부위를 따라 각 손가락별 tip, DIP, PIP, MCP, DTC/PTC, MMC point들로 총 24개가 선정되었다. Hand-handle 연관 dimension들은 handle 전단부 전측, 중단부 전측, 중단부 후측, 후단부 후측의 단면 너비, 높이, 둘레 길이 등이 tip to DTC/PTC, PIP to MMC, tip to MMC 등의 hand dimension과 연관되어 총 40가지가 선정되었다. 손 내측 형상 변화 분석 시 24개의 hand landmark들이 분석의 기준점이 되었고, 측정될 수 있는 여러가지 hand dimensions 중 40개의 hand-handle 연관 dimension들이 주요한 measure로써 비교 및 분석되었다. 따라서, 본 연구에서 선정된 hand landmarks는 손 형상 분석 연구에서 분석 기준을 선정하는 데 주요한 참고가 될 수 있고, hand-handle 연관 dimension들은 손 형상 분석 결과를 handle 형상에 적용하는 데 주요하게 활용될 수 있다.

본 연구는 wrist adduction/abduction 동작에 의한 손 내측 grip 형상 변화 분석을 위한 실험 및 분석 protocol을 제안하여, 최적 handle 설계를 위한 다양한 hand 형상 분석 연구에 활용될 수 있다. 본 연구에서 handle을 grip하는 자세는 shoulder 0°, elbow 45°, 그리고 wrist adduction(+)/abduction(-)의 ROM

범위인 20°, 0°, -30°로 선정되었고 power grip 중에서도 엄지손가락을 나머지 손가락과 겹쳐 쥐는 cylindrical grip에 한정되었다. 자세 control을 위해 팔꿈치 각도 조절기와 handle 각도 조절기가 사용되었고, 손 형상의 3D 구현을 위해 3D scanner(3dMD)와 casting material (Otoform)이 활용되었다. 3D scan된 손 외측 및 내측 형상은 (1) data 가공을 위한 smoothing, remeshing 등의 후처리, (2) 병합 및 분석 기준 위치 고정을 위한 정렬, 그리고 (3) 병합의 단계를 거쳐 완전한 손 형상으로 구현되었다. Hand dimension들은 landmark들간 직선 거리와 표면 거리에 대해 각각 vector 사이 거리 계산 식과 shortest path algorithm을 이용하여 측정되었다. 정립된 실험 protocol과 분석 protocol은 다른 handle grip 자세에도 적용 가능하다. 예를 들어, shoulder flexion/extension 45° 또는 elbow flexion 90°으로 변경하거나 wrist adduction/abduction이 아닌 wrist flexion/extension 자세를 고려할 수 있다. 또한, 엄지손가락을 handle을 따라 놓는 cylindrical power grip이나 pinch grip 자세에 대하여 실험 및 분석 protocol이 동일하게 적용이 가능하다.

본 연구는 wrist adduction/abduction 에 따른 손 내측 형상 변화를 분석하여 grip 자세별로 요구되는 최적 handle 형상이 다름을 확인하였고 그 결과를 관절 작용 측면에서 해석하였다. 손목 중립 자세에서 adduction 시 handle 단면 너비는 2.4% ~ 8.4% 증가하고, 단면 높이는 1.9% ~ 8.4% 감소하며, 둘레 길이는 전단부에서 2.8% 증가, 후단부에서 3.6% 감소하는 경향을 보였다.

이 결과는 wrist adduction 동작 시 모든 digits 의 PIP joint 가 손 내측으로, tip 이 손 외측으로 관절이 작용하면서 도출된 것으로 추측되었다. 손목 중립 자세에서 abduction 시 handle 단면 너비는 전단부에서 1.8% 증가 및 중후단부에서 2.9% ~ 10.8% 감소, 단면 높이는 전단부에서 2.0% ~ 4.6% 증가, 후단부에서 3.5% ~ 9.5% 감소하며, 둘레 길이는 전체적으로 0.1% ~ 6.3% 감소하는 경향을 보였다. 이 결과는 wrist abduction 동작 시 동작 방향과 가까운 digits 4 ~ 5 의 관절들이 손 내측으로, 동작 방향에서 먼 digits 2 ~ 3 의 관절들이 손 외측으로 관절이 작용하면서 도출된 것으로 추측되었다. 이와 같이 손 내측 형상 변화를 분석한 결과는 grip 자세별 최적 handle 형상 또는 다양한 grip 자세를 고려한 최적 handle 형상을 설계하는 데 주요한 참조가 될 수 있다.

REFERENCES

Aldien, Y., Welcome, D., Rakheja, S., Dong, R., Boileau, P.-E., 2005. Contact pressure distribution at hand-handle interface: Role of hand forces and handle size. *International Journal of Industrial Ergonomics,* 35(3), 267-286

Blackwell, J.R., Kornatz, K.W., Heath, E.M., 1999. Effect of grip span on maximal grip force and fatigue of flexor digitorum superficialis. *Applied Ergonomics,* 30(5), 401-405

Bohlemann, J., Kluth, K., Kotzbauer, K., Strasser, H., 1994. Ergonomic assessment of handle design by means of electromyography and subjective rating. *Applied Ergonomics,* 25(6), 346-354

Chaffin, D.B., Andersson, G.B.J., Martin, B.J., 1999. Occupational biomechanics (3rd edition).

Colangelo, E.A., 2007. Integrate – the Benjamin cummings custom laboratory program for anatomy & physiology (anatomy and physiology I and II – biology 223 and 224)

Cuijpers, R.H., Smeets, J.B.J., Brenner, E., 2004. On the relation between object shape and grasping kinematics. *Journal of Neurophysiology,* 91, 2598-2606

Dong, H., Loomer, P., Barr, A., LaRoche, C., Young, E., Rempel, D., 2007. The effect of tool handle shape on hand muscle load and pinch force in a simulated dental scaling task. *Applied Ergonomics,* 38, 525-531

Dusenberry, D.O., Simpson, H., DelloRusso, S.J., 2009. Effect of handrail shape on graspability. *Applied Ergonomics,* 40, 657-669

Eksioglu, M., 2004. Relative optimum grip span as a function of hand anthropometry.

International Journal of Industrial Ergonomics, 34, 1-12

Gonzalez, A.G., Salgado, D.R., Moruno, L.G., 2015. Optimisation of a laparoscopic tool handle dimension based on ergonomic analysis. *International Journal of Industrial Ergonomics,* 48, 16-24

Grant, K.A., Habes, D.J., Steward, L.L., 1992. An analysis of handle designs for reducing manual effort: The influence of grip diameter. *International Journal of Industrial Ergonomics,* 10, 199-206

Greiner, T.M., 1991. Hand anthropometry of U.S. army personnel.

Harih, G., Dolsak, B., 2013. Tool-handle design based on a digital human hand model. *International Journal of Industrial Ergonomics,* 43(4), 288-295

Harih, G., Dolsak, B., 2014. Recommendations for tool-handle material choice based on finite element analysis. *Applied Ergonomics,* 45(3), 577-585

Harih, G., Dolsak, B., 2014. Comparison of subjective comfort ratings between anatomically shaped and cylindrical handles. *Applied Ergonomics,* 45(4), 943-954

Herring, S.R., Castillejos, P., Hallbeck, M.S., 2011. User-centered evaluation of handle shape and size and input controls for a neutron detector. *Applied Ergonomics,* 42(6), 919-928

Jenkins, D.B., 2001. Hollinsheads Functional Anatomy of the Limbs and Back (8th edition).

Kong, Y.K., Lowe, B.D., 2005. Evaluation of handle diameters and orientations in a maximum torque task. *International Journal of Industrial Ergonomics,* 35(12), 1073-1084

Kong, Y.K., Freivalds, A., Kim, S.E., 2004. Evaluation of handles in a maximum gripping task. *Ergonomics,* 47(12), 1350-1364

Lee, W., Yang, X., Yoon, S., Lee, B., Kim, H., You, H., 2017. A semi-automatic protocol using plastering and 3D scanning techniques for hand measurement. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 27(3), 138-146

McDowell, T.W., Wimer, B.M., Welcome, D.E., Warren, C., Dong, R.G., 2012. Effects of handle size and shape on measured grip strength. *International Journal of Industrial Ergonomics,* 42(2), 199-205

McGorry, R.W., Maikala, R.V., Lin, J.H., Rivard, A., 2009. Oxygenation kinetics of forearm muscles as a function of handle diameter during a repetitive power grip force task. *International Journal of Industrial Ergonomics,* 39, 465-470

Rogers, M.S., Barr, A.B., Kasemsontitum, B., Rempel, D.M., 2008. A three-dimensional anthropometric solid model of the hand based on landmark measurements. *Ergonomics,* 51(4), 511-526

Seo, N.J., Armstrong, T.J., Ashton-Miller, J.A., Chaffin, D.B., 2007. The effect of torque direction and cylindrical handle diameter on the coupling between the hand and a cylindrical handle. *Journal of Biomechanics,* 40, 3236–3243

Welcome, D., Rakheja, S., Dong, R., Wu, J.Z., Schopper, A.W., 2004. An investigation on the relationship between grip, push and contact forces applied to a tool handle. *International Journal of Industrial Ergonomics,* 34, 507-518

APPENDICES

Appendix A. Handle 관련 문헌 리뷰 결과 요약 (1 of 4)

No.	Author(s)	Year	Objectives	Handle Type	Factors	Measures	Key findings
1	Aldien et al.	2005	• To figure out the magnitudes and distribution of hand–handle interface pressure during a gripping and pushing task vary considerably with the applied grip and push forces, and the handle diameter	• Cylindrical handle	Cylindrical handle diameter: • 30 mm • 40 mm • 48 mm	• Contact force • Peak pressure	• Smaller size handles (30 and 40 mm) lead to relatively higher contact force • The relative differences in peak pressures within different zones for the 30 and 40mm handles are considerably smaller than those observed for the 48mm handle
2	Blackwell et al.	1999	• To investigate the effect of grip span on isometric grip force and fatigue of the #exor digitorum super"cialis (FDS) muscle during sustained voluntary contractions at 60}65% of the maximal voluntary contraction (MVC)	-	4 type grip circumference • #1: 100mm • #2: 130mm • #3: 160mm • #4: 180mm)	• MVC • Median FDS EMG • Time to fatigue	• MVC absolute grip force: as lowest levels of force were exhibited for the smallest and largest settings, 1 and 4, and the greatest forces were found at the middle settings, 2 and 3 • Median FDS EMG drops for all grip settings across all subjects • Time to fatigue: no signicant di!erences between grip settings
3	Böhlemann et al.	1994	• To examine the effect of handle type on muscular strain and subjective satisfaction	• Electric hedge-clipper	Hand type • Model A (3200g) • Model G (3900g) • Model M (3900g)	• Heart rate • Muscular strain (EMG) • Subjective satisfaction	• No heart rate differences among handle types • One of the handle designs (Model A) enabled working under varying conditions (work height and direction) at a reduced level of muscular strain of the right arm • Subjective satisfaction: M > G > A (not specified)
4	Cuijpers et al.	2004	• To see how asymmetrical objects are grasped by systematically varying both their shape and orientation. • To see effects of target orientation and of direction of movement on the final grasp.	-	Handle orientation • 0 ° • 30 ° • 60 ° • 90 ° • 120 ° • 150 °	• Grip aperture • Hand orientation variation	• Final hand orientation could already be inferred from its value after 30% of the movement distance with reliability that explains 50% of the variance. • Final grip aperture was only after 80% of the movement distance.
5	Dong et al.	2007	• To develop ergonomically designed dental scaling instruments to help reduce the prevalence of carpal tunnel syndrome among dental practitioners	Dental scaling instruments	Handle diameter: • 7 mm (tapered: 6.5 mm) • 10 mm (tapered: 9.3 mm) Handle shape: • Round • Hexagonal • Tapered round • Tapered hexagonal	• EMG(FDS, FPL, EDC, ECR) • Thumb pinch force • Questionnaires	• The instrument with a round and tapered shape and a large diameter (10 mm) required the least force to use • No significant differents with handles at questionnaires

Appendix A. Handle 관련 문헌 리뷰 결과 요약 (2 of 4)

No.	Author(s)	Year	Objectives	Handle Type	Factors	Measures	Key findings
6	Dusenberry et al.	2009	• To address the performance of handrail shape as graspability evaluation	• Handrail	Handrail shape • A00/8.0 • A15/8.0 • A45/8.0 • A30/2.0 • A30/1.5 • A30/1.25 • A30/8.0 • Round ' Force direction • Transverse • Longitudinal • Normal upward	• % of body weight • Probability of failure (probability of loss of grip: likelihoods that the force required to be exerted on a handrail to abort a fall exceeds the ability of the test subject)	• Depth of the finger purchase (undersurfaces) in the sides of handrails is an important factor affecting handrail performance • It is in the longitudinal direction that fall victims are most likely to lose grip
7	Eksioglu et al.	2004	• To investigate the optimum grip span for a power grip exertion relative to an individual's hand anthropometry considering MVGF (maximum isometric voluntary grip), EMG, SR (subjective ratings) as critera.	• Cylindrical handle	Hand spans • TCL_m-4.0 • TCL_m-3.5 • TCL_m-3.0 • TCL_m-2.5 • TCL_m-2.0 • TCL_m-1.5 • TCL_m-1.0 • TCL_m-0.5 • TCL_m	• Maximum voluntary isometric grip force (MVGF) • Muscular activity (EMG) • Subjective rating (SR)	• Most highest grip force is generated at the TCL_m-2 (ROGS , relative optimum grip span). • TCL_m-2.5 is the optimum grip span based on the EMG (least muscular activity)
8	Grant et al.	1992	• To evaluate the effects of three cylindrical handle diameters based on anthropometric measures of inside grip diameter with manual effort in a simulated assemly task.	• Cylindrical handle	Handle diameter: • User's inside grip diameter - 1cm • User's inside grip diameter • User's inside grip diameter + 1cm	• Grip force • EMG	• Cylindrical handles 1.0 cm smaller than user's inside grip diameter can reduce the manual effort (grip force & forearm muscle activity).
9	Harih and Dolšak	2013	• To overcom those limitations of current digital human-hand models (DHHMs) regarding the tool-handle design that require extensive ergonomic knowledge and iterative design process	• Tool-handle	Handle shape • Cylindrical handle • Handle based on DHHM	• Subjective comfort rating (7-point)	• Handle based on DHHM > Cylindrical handle (p < 0.01) • Anatomically shaped tool-handles based on the developed DHHM can improve user performance and lower the risk of cumulative trauma disorders (CTD)

Appendix A. Handle 관련 문헌 리뷰 결과 요약 (3 of 4)

No.	Author(s)	Year	Objectives	Handle Type	Factors	Measures	Key findings
10	Harih and Dolšak	2014	• To investigate the mechanical contact interaction between a fingertip and composites of rubber and hyper-elastic foam materials using the finite element (FE) method, and compared them to the traditional materials used in tool-handle design	• Tool-handle	• Material: steel, ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber, EPDM rubber + EODM foam, EPDM rubber + poly-urethane (PU) foam	• Contact pressure distribution • Vertical deformation • Vertical finger force	• The best results were obtained using proposed composites of EPDM rubber and EPDM foam as well EPDM rubber and PU foam • Limited tool-handle material thickness can maintain low deformation rate of the tool-handle material for maintaining desired rate of stability of the hand tool in the hands
11	Harih and Dolšak	2014	• To develop a mathematical method for customising tool handles to the shapes of particular users' hands and to compare to the shape of the users' hands with handles that were cylindrical	• Anatomically shaped handle • Cylindrical (optimized diameter) handle	• Anatomically shaped (subject specific)	• Subject comfort rating questionnaire	• Subjective comfort ratings: anatomically shaped handle > cylindrical handles (p < .05)
12	Herring et al.	2011	• To determine the best handle shape and size for gloved first responders	• Cylindrical handle (8 different shape: (1) circular with two flat sides, (2)circular with flat side, (3) square, (4) rectangular with 4differnet H/W ratio, (5) triangular)	-	• Subjective comfort rating	• General recommendations for the design of handheld devices are as follows: (1) basic shape (square, semi-circle or oval) with rounded edges, (2) diameter of 3.5 ~ 4 cm, a perimeter of 11 cm, and a minimum length of 11 cm
13	Kong and Lowe	2005	• To evaluate the effects of handle diameter and handle orientation on torque, total finger force, efficiency of flexor and extensor electromyographic (EMG) activity, and subjective comfort rating in a maximum voluntary torque task • To define the handle diameters that maximize perceived comfort rating according to the user's hand length	• Cylindrical handle	• Handle diameter: 25, 30, 35, 40, 45, 50 mm) • Handle orientations: vertical (perpendicular to the floor), horizontal (parallel to the floor) • Gender	• Torque • Finger force • EMG • Subjective comfort rating (7 point scale)	• Largest maximum torque: 45, 50mm diameter handles • Least maximum torque: 25mm diameter handle • Most comfortable: 35 ~ 45 mm diameter handles
14	Kong et al	2004	• To evaluate the effects of gender, user's hand size, handle type and hook position on subjective discomfort and individual phalange forces in a maximum gripping task; • To compare force distributions on fingers and phalanges • Recommend the handle shapes and sizes for subjective rating and mean of individual phalange forces in a maximum gripping task	• Oval handle • Double frustum handle	• 10 handles: 5 types x 2 EA • Double frustum handle 1) 30-24 DF 2) 37-26 DF 3) 45-35 DF • Oval handles 1) 30-24 OV 2) 37-26 OV	• Individual finger force (4 fingers) • Phalange force (3 phalanges) • Discomfort rating (7-point scale)	• The phalange force is more related to handle shape than to handle size (oval handle > double frustum handle) • Force distributions - highest to the lowest 1) Finger: middle, index, ring and little fingers 2) Phalanges: distal, middle, and proximal

Appendix A. Handle 관련 문헌 리뷰 결과 요약 (4 of 4)

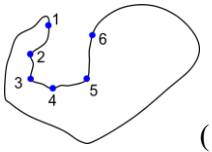
No.	Author(s)	Year	Objectives	Handle Type	Factors	Measures	Key findings
15	McDowell et al.	2012	• To compare how changes in grip size affects grip strength measured with each dynamometer style	• Cylindrical handle	Handles diameters • 30 mm • 40 mm • 50 mm The Jarmar handle spans • 34 mm • 47 mm • 60 mm	• Force ratio (measured force/baseline value) • Grip force	• The grip force on cylindrical handle is effected by handle diameters (30, 40 mm > 50 mm). • Torque reaction forces has a high relation with a handle diameter between 30 - 50 mm.
16	McGorry et al.	2009	• To expand the knowledge base available to guide selection of an optimal tool handle diameter for the general population	• Stainless steel instrumented handle	• 30mm • 40mm • 50mm	• MVC • TOI • cHb	• MVC: for the 30 mm (219±55 N) and 40 mm (213±64 N) handles were significantly greater than for the 50 mm (189±62 N) handle, $p < 0.001$ and $p < 0.0001$ • TOI and cHb: significantly different when working with the 30 and 40 mm handles than with the 50 mm handle (with a decreasing TOI and increasing cHb observed with the larger handle)
17	Seo et al	2007	• To examine the effect of torque direction and handle diameter on grip force distributions and torque	• Cylindrical handle	• Handle diameter: 45.1, 57.8, 83.2 mm • Torque direction: toward fingertips (inward), toward the thumb (outward) • Gender	• Torque • Grip force • Total normal force • Fingertip force • Thumb force	• Grip force decreased as the handle diameter increased from 45.1 to 83.2 mm
18	Welcome et al.	2004	• To identify the relationship between the contact force and hand grip and push forces.	• Cylindrical handle	Handle diameter • 30 mm • 40 mm • 48 mm • Grip force with five levels (0, 15, 30, 50, 75N) • Push force with four levels (0, 25, 50, 75N)	• Grip force • Push force • Contact force	• Hand–handle contact force is strongly dependent on grip and push forces and the handle diameter between 30 - 50 mm (linear relation). • $F_c(\text{contact}) = a \cdot F_g(\text{grip}) + b \cdot F_p(\text{push})$

Appendix B. MATLAB code of Measurement of Linear Length and Surface Length

```
clc
clear
close all
addpath 'functions';

%% run if file is selected
ForderName = 'Data';
ForderNameList = dir(ForderName);
ForderNameList(1:2) = [];

TableLineLength = [];
q = 1;
r = 1;

for pp = 1:size(ForderNameList, 1)
    SubForderName = fullfile(ForderName, ForderNameList(pp).name);
    SubForderNameList = dir(fullfile(SubForderName, '*.igs'));

    for hh = 1:size(SubForderNameList, 1)
        clc;
        fprintf('Participant no: %s, Hand name: %s\n', ForderNameList(pp).name,
        SubForderNameList(hh).name);
        %% data loading
        LM = function_get_LM_from_iges(fullfile(SubForderName,
        SubForderNameList(hh).name));
        if length(LM) > 24
            LM(25:end, :) = [];
        end
        assert(size(LM, 1) >= 24, 'igs에 저장된 landmark 개수가 24개가 아님');
        filename_PLY = [SubForderNameList(hh).name(1:10), '_complete hand.ply'];

        [V, F, FB, H] = function_loading_ply_file(fullfile(SubForderName,
        filename_PLY));

        %%
        ptCloudVertex = pointCloud(V(:, 1:3));
        for i = 1:size(LM, 1)
            [indices(i), dump(i)] = findNearestNeighbors(ptCloudVertex, LM(i, :), 1);
        end
        LM(:, :) = V(indices, 1:3);

          loop = 0;
        simplified = 1;
        smooth = 1;
        interval = 5;

        %% point-to-point length measurement
        for t=1:4
            for i=(6*t-5):(6*t)
                for j=(6*t-5):(6*t)
                    length_points(i,j) = norm(LM(i, :) - LM(j, :));
                end
            end
```

```
        end

        p = 1;

        for t=1:4
            for i=(6*t-5):(6*t)
                for j=(i+1):(6*t)
                    TableLineLength(p,q) = length_points(i,j);
                    p = p+1;
                end
            end
        end
        q = q+1;

        %% surface length
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+1) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(1:2, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+2) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(2:3, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+3) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(3:4, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+4) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(4:5, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+5) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(5:6, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+6) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(7:8, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+7) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(8:9, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+8) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(9:10, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+9) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(10:11, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+10) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(11:12, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+11) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(13:14, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+12) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(14:15, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+13) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(15:16, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+14) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(16:17, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+15) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(17:18, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+16) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(19:20, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+17) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(20:21, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+18) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(21:22, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+19) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(22:23, :),
    loop, simplified, smooth, interval);
    TableSurfaceLength(r, (hh-1)*20+20) = SurfaceCrveMeasurement(V, F, LM(23:24, :),
    loop, simplified, smooth, interval);

    end
    r = r+1;
end
```

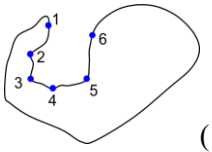
Appendix C. Results of Linear Length



(1: tip, 2: DIP, 3: PIP, 4: MCP, 5: DTC/PTC, 6: MMC)

		측정 값 평균				측정 값 SD				Static 대비 변화율			0° 대비 증감율		Statistics	
	Dimensions	Static	Ad. 20°	0°	Ab. 30°	static	Ad. 20°	0°	Ab. 30°	Ad. 20°	0°	Ab. 30°	Ad. 20°	Ab. 30°	Static 제외 F	p
Digit 2	① to ②	23.8	18.9	17.5	17.6	2.1	2.1	2.3	2.1	-20.9	-26.6	-26.0	7.9	0.8	5.23	0.012
	① to ③	43.9	27.1	25.1	25.2	4.0	3.5	2.9	2.8	-38.3	-42.8	-42.6	7.9	0.3	5.62	<0.01
	① to ④	67.1	29.5	27.1	27.3	4.7	3.8	3.4	3.2	-56.0	-59.6	-59.3	8.8	0.7	4.90	0.015
	① to ⑤	90.9	30.1	27.8	28.3	6.2	3.0	4.0	3.7	-66.9	-69.4	-68.9	8.4	1.8	3.59	0.041
	① to ⑥	112.2	19.3	19.1	21.4	8.5	6.3	6.1	7.8	-82.8	-83.0	-81.0	1.3	12.0	3.92	0.032
	② to ③	20.3	9.3	8.8	8.7	2.3	2.1	2.0	1.5	-54.4	-56.7	-57.0	5.3	-0.7	1.47	0.247
	② to ④	43.8	16.6	15.8	16.3	3.3	2.1	2.9	2.4	-62.1	-63.9	-62.8	4.9	2.8	0.87	0.431
	② to ⑤	67.6	26.3	26.3	26.9	4.8	2.4	2.8	3.3	-61.0	-61.0	-60.2	0.0	2.0	0.54	0.589
	② to ⑥	88.7	28.6	29.4	31.6	7.1	5.5	5.0	6.1	-67.8	-66.9	-64.4	-2.6	7.5	7.52	<0.01
	③ to ④	23.6	10.6	10.3	10.8	1.8	1.7	1.5	1.6	-55.1	-56.4	-54.1	3.1	5.2	0.87	0.432
	③ to ⑤	47.4	24.5	25.0	25.3	3.3	2.2	2.3	2.5	-48.2	-47.3	-46.5	-1.8	1.4	1.34	0.277
	③ to ⑥	68.6	33.2	33.8	35.4	5.4	4.1	3.9	4.0	-51.6	-50.7	-48.4	-1.9	4.6	4.36	0.023
	④ to ⑤	23.9	15.6	16.4	16.3	2.5	2.0	2.0	2.6	-34.6	-31.2	-31.8	-4.9	-0.8	1.52	0.236
	④ to ⑥	45.4	29.6	30.2	30.9	4.5	3.2	3.5	3.0	-34.9	-33.5	-31.9	-2.2	2.3	2.23	0.127
	⑤ to ⑥	22.0	20.5	20.3	20.1	3.6	2.5	3.3	2.5	-7.2	-8.1	-9.0	1.0	-0.9	0.32	0.731
Digit 3	① to ②	24.7	19.8	18.9	19.0	2.6	2.4	2.8	2.7	-19.8	-23.2	-23.1	4.4	0.1	1.46	0.249
	① to ③	47.5	30.4	28.8	28.6	4.1	3.2	3.1	3.4	-36.1	-39.4	-39.9	5.4	-0.9	3.51	0.044
	① to ④	74.4	32.7	31.0	29.8	5.0	3.9	3.5	3.4	-56.0	-58.3	-59.9	5.4	-3.8	6.74	<0.01
	① to ⑤	99.7	30.0	28.1	27.3	6.8	4.9	5.2	4.5	-69.9	-71.8	-72.6	6.9	-2.9	4.90	0.015
	① to ⑥	129.6	22.5	22.5	22.9	8.8	7.8	8.2	8.2	-82.6	-82.6	-82.3	0.1	1.6	0.09	0.916
	② to ③	23.2	11.8	11.3	11.0	2.0	1.7	1.3	1.8	-49.3	-51.3	-52.8	4.2	-2.9	2.32	0.117
	② to ④	50.2	18.8	18.6	17.7	2.7	2.4	2.7	2.7	-62.5	-62.9	-64.7	0.9	-5.0	1.90	0.168
	② to ⑤	75.4	25.8	26.2	25.6	4.5	3.0	4.0	3.4	-65.8	-65.2	-66.0	-1.5	-2.3	0.41	0.669
	② to ⑥	105.3	32.1	34.0	34.8	6.6	5.4	5.9	5.7	-69.5	-67.7	-67.0	-5.5	2.3	7.54	<0.01
	③ to ④	27.1	11.1	11.5	11.3	2.1	1.9	1.6	1.8	-58.9	-57.6	-58.4	-3.0	-1.8	0.32	0.726
	③ to ⑤	52.4	24.4	25.3	24.9	3.4	3.0	3.5	2.9	-53.4	-51.7	-52.5	-3.6	-1.7	1.62	0.217
	③ to ⑥	82.3	37.8	39.6	40.3	6.0	4.4	4.5	4.3	-54.1	-51.9	-51.0	-4.5	2.0	12.26	<0.01
	④ to ⑤	25.5	15.5	16.3	15.4	2.4	2.1	2.7	2.1	-39.1	-36.0	-39.4	-4.8	-5.3	3.33	0.050
	④ to ⑥	55.5	33.6	35.1	34.9	4.5	3.2	3.3	3.2	-39.5	-36.8	-37.1	-4.3	-0.4	9.96	<0.01
	⑤ to ⑥	30.3	21.5	22.0	22.5	3.5	2.7	3.2	3.0	-28.9	-27.5	-25.6	-2.0	2.7	6.47	<0.01
Digit 4	① to ②	24.4	20.5	20.1	19.7	2.5	2.1	2.4	1.9	-15.8	-17.5	-19.2	2.1	-2.0	2.57	0.094
	① to ③	45.8	30.6	29.8	29.0	4.4	3.1	2.9	2.7	-33.2	-35.0	-36.8	2.8	-2.8	5.66	<0.01
	① to ④	69.1	33.1	31.9	30.1	5.6	3.2	2.7	3.0	-52.1	-53.8	-56.4	3.6	-5.8	9.54	<0.01
	① to ⑤	98.4	28.1	26.6	25.7	7.5	3.9	4.1	3.1	-71.5	-73.0	-73.9	5.6	-3.4	3.70	0.038
	① to ⑥	123.5	20.5	21.6	19.5	9.0	7.3	8.7	8.0	-83.4	-82.5	-84.2	-5.2	-9.5	2.55	0.096
	② to ③	21.7	11.3	10.9	10.5	2.4	1.8	1.6	1.5	-48.0	-49.6	-51.5	3.3	-3.7	2.42	0.107
	② to ④	45.1	18.4	18.5	17.1	3.9	2.5	2.1	1.8	-59.3	-59.0	-62.0	-0.6	-7.3	3.88	0.033
	② to ⑤	74.5	25.1	26.3	25.6	5.5	2.8	3.2	3.0	-66.3	-64.7	-65.7	-4.6	-2.8	2.05	0.148
	② to ⑥	99.6	30.2	33.0	31.4	7.1	5.5	6.5	6.5	-69.7	-66.9	-68.4	-8.6	-4.7	6.18	<0.01
	③ to ④	23.6	10.7	11.5	10.8	2.5	1.7	1.5	1.4	-54.7	-51.2	-54.1	-7.1	-5.9	2.86	0.074
	③ to ⑤	53.1	24.8	26.7	26.0	3.8	3.1	3.2	3.6	-53.3	-49.6	-50.9	-7.2	-2.6	5.38	0.011
	③ to ⑥	78.2	35.7	38.5	37.1	5.8	4.4	5.4	5.7	-54.4	-50.8	-52.6	-7.2	-3.5	6.95	<0.01
	④ to ⑤	29.6	17.5	18.8	17.8	2.3	2.5	2.4	3.0	-40.8	-36.4	-39.8	-7.0	-5.3	3.61	0.040
	④ to ⑥	54.7	32.4	34.3	32.7	4.5	3.0	4.0	4.3	-40.8	-37.3	-40.2	-5.5	-4.6	5.87	<0.01
	⑤ to ⑥	25.4	17.9	18.0	18.2	3.4	2.4	3.0	3.0	-29.6	-28.9	-28.3	-0.9	0.8	0.17	0.848
Digit 5	① to ②	21.8	17.2	16.9	16.0	2.7	2.3	1.9	2.4	-21.0	-22.3	-26.6	1.6	-5.6	2.77	0.080
	① to ③	37.5	24.0	23.4	22.0	4.7	3.4	2.7	2.9	-36.0	-37.5	-41.3	2.4	-6.1	4.18	0.026
	① to ④	55.1	27.2	26.8	24.4	4.9	3.8	3.0	3.2	-50.6	-51.4	-55.6	1.7	-8.7	7.22	<0.01
	① to ⑤	76.6	27.1	26.4	23.6	7.0	4.9	5.3	4.2	-64.7	-65.5	-69.2	2.4	-10.8	6.35	<0.01
	① to ⑥	101.3	24.6	27.2	22.4	8.5	8.1	8.9	7.3	-75.7	-73.1	-77.9	-9.5	-17.8	10.46	<0.01
	② to ③	15.9	8.2	8.1	7.5	2.4	2.0	1.3	1.7	-48.5	-49.0	-52.8	0.9	-7.5	2.57	0.094
	② to ④	33.7	15.3	16.2	14.0	2.9	3.1	1.4	2.4	-54.8	-51.9	-58.5	-6.1	-13.7	8.31	<0.01
	② to ⑤	55.2	22.5	24.2	21.4	5.1	3.4	3.4	3.7	-59.2	-56.1	-61.2	-6.9	-11.6	8.69	<0.01
	② to ⑥	79.9	31.6	35.0	30.9	6.8	5.5	6.6	6.6	-60.5	-56.2	-61.4	-9.7	-11.8	8.58	<0.01
	③ to ④	17.9	8.9	10.0	8.4	1.7	1.9	1.1	1.7	-50.4	-43.8	-53.2	-11.7	-16.6	12.47	<0.01
	③ to ⑤	39.3	19.5	21.6	19.2	3.4	2.6	3.3	3.6	-50.4	-45.1	-51.2	-9.5	-11.0	9.60	<0.01
	③ to ⑥	64.1	33.4	36.5	33.1	5.3	4.2	5.5	5.8	-47.8	-43.1	-48.5	-8.4	-9.5	8.32	<0.01
	④ to ⑤	21.7	12.4	13.9	12.6	2.4	1.5	2.4	2.5	-42.8	-35.9	-41.9	-10.8	-9.3	6.03	<0.01
	④ to ⑥	46.6	29.8	32.3	29.7	4.2	3.3	3.6	4.3	-36.1	-30.7	-36.3	-7.7	-8.0	7.81	<0.01
	⑤ to ⑥	25.0	19.8	20.1	19.6	3.1	3.0	2.6	2.6	-20.8	-19.7	-21.8	-1.3	-2.6	0.43	0.658

Appendix D. Results of Surface Length



(1: tip, 2: DIP, 3: PIP, 4: MCP, 5: DTC/PTC, 6: MMC)

		측정 값 평균				측정 값 SD				Static 대비 변화율			0° 대비 증감율		Statistics	
	Dimensions	Static	Ad. 20°	0°	Ab. 30°	static	Ad. 20°	0°	Ab. 30°	Ad. 20°	0°	Ab. 30°	Ad. 20°	Ab. 30°	Static 제외 F	p
Digit 2	① to ②	25.2	20.3	18.9	19.0	2.3	2.4	2.7	2.4	-19.5	-25.3	-24.6	7.8	0.9	4.45	0.021
	① to ③	45.9	30.5	28.4	28.5	4.2	4.4	3.7	3.3	-33.7	-38.3	-38.0	7.5	0.5	5.06	0.013
	① to ④	70.2	41.9	39.6	40.2	5.1	4.0	4.3	3.7	-40.3	-43.5	-42.8	5.8	1.3	4.05	0.029
	① to ⑤	95.0	59.4	57.7	57.7	6.7	4.3	4.6	4.4	-37.5	-39.2	-39.2	2.8	0.0	1.90	0.169
	① to ⑥	117.9	81.8	79.6	79.5	9.2	5.5	6.4	4.9	-30.6	-32.5	-32.6	2.8	-0.1	3.06	0.063
	② to ③	20.7	10.2	9.5	9.5	2.4	2.8	2.3	1.7	-51.0	-54.1	-54.3	6.8	-0.4	2.07	0.145
	② to ④	45.0	21.6	20.8	21.1	3.4	2.6	3.1	2.5	-52.0	-53.8	-53.0	3.9	1.7	0.94	0.402
	② to ⑤	69.7	39.1	38.9	38.7	5.1	3.0	3.9	3.4	-44.0	-44.3	-44.5	0.5	-0.4	0.10	0.902
	② to ⑥	92.6	61.5	60.7	60.5	7.6	4.3	5.3	3.9	-33.6	-34.4	-34.7	1.3	-0.5	1.02	0.373
	③ to ④	24.3	11.5	11.3	11.7	1.9	1.7	1.5	1.6	-52.8	-53.5	-51.9	1.5	3.4	0.34	0.717
	③ to ⑤	49.0	28.9	29.4	29.2	3.6	2.3	2.9	2.9	-41.1	-40.1	-40.3	-1.6	-0.4	0.24	0.785
	③ to ⑥	71.9	51.4	51.2	51.0	5.7	2.4	3.7	2.8	-28.6	-28.8	-29.1	0.2	-0.5	0.12	0.888
	④ to ⑤	24.8	17.4	18.1	17.6	2.6	1.9	2.5	2.7	-29.5	-26.9	-29.0	-3.6	-2.8	0.73	0.493
	④ to ⑥	47.7	39.9	40.0	39.3	4.7	2.5	3.6	3.0	-16.3	-16.2	-17.5	-0.1	-1.6	0.61	0.550
	⑤ to ⑥	22.9	22.5	21.9	21.8	3.7	3.2	3.5	2.7	-2.0	-4.5	-5.0	2.7	-0.5	1.03	0.369
Digit 3	① to ②	26.1	21.5	20.7	20.6	3.0	2.9	3.1	3.0	-17.6	-20.7	-21.2	3.8	-0.6	1.22	0.312
	① to ③	49.9	34.2	32.9	32.4	4.5	3.3	3.1	3.9	-31.4	-34.1	-35.1	4.1	-1.5	2.51	0.100
	① to ④	77.8	46.3	45.4	44.5	5.5	3.6	2.5	4.2	-40.5	-41.7	-42.8	2.0	-1.8	1.78	0.187
	① to ⑤	104.3	63.5	63.1	61.5	7.2	4.9	3.5	4.1	-39.1	-39.5	-41.0	0.7	-2.5	2.24	0.125
	① to ⑥	135.8	87.3	87.2	86.2	9.3	4.5	3.9	3.8	-35.7	-35.8	-36.5	0.2	-1.1	0.75	0.481
	② to ③	23.8	12.7	12.2	11.8	2.0	1.9	1.5	1.9	-46.5	-48.9	-50.4	4.7	-2.9	2.29	0.120
	② to ④	51.7	24.8	24.6	23.9	2.8	3.2	2.8	2.9	-52.1	-52.4	-53.7	0.5	-2.8	0.79	0.462
	② to ⑤	78.2	42.0	42.3	40.9	4.4	4.6	4.3	3.2	-46.3	-45.8	-47.7	-0.8	-3.4	1.57	0.227
	② to ⑥	109.7	65.8	66.5	65.6	6.7	3.9	4.4	2.9	-40.0	-39.4	-40.2	-1.0	-1.3	0.54	0.587
	③ to ④	27.9	12.0	12.5	12.1	2.2	2.0	1.9	1.7	-56.9	-55.3	-56.6	-3.5	-2.8	0.49	0.618
	③ to ⑤	54.4	29.3	30.2	29.1	3.4	3.7	4.0	3.0	-46.2	-44.5	-46.5	-3.1	-3.7	1.48	0.246
	③ to ⑥	85.9	53.1	54.3	53.8	6.0	3.4	4.1	3.1	-38.2	-36.8	-37.4	-2.2	-0.9	1.81	0.182
	④ to ⑤	26.5	17.2	17.7	17.0	2.2	2.3	2.7	2.2	-34.9	-33.1	-35.9	-2.7	-4.2	1.76	0.191
	④ to ⑥	58.0	41.0	41.8	41.7	4.5	2.4	3.1	2.9	-29.2	-27.9	-28.2	-1.9	-0.4	2.45	0.104
	⑤ to ⑥	31.5	23.8	24.1	24.7	3.5	2.6	3.3	3.1	-24.5	-23.5	-21.6	-1.2	2.5	3.22	0.055
Digit 4	① to ②	26.0	22.4	22.2	21.5	2.7	2.7	2.8	2.2	-13.6	-14.3	-17.2	0.8	-3.3	3.73	0.037
	① to ③	48.2	34.4	33.8	32.8	4.7	3.7	3.5	2.8	-28.6	-29.9	-31.9	1.7	-3.0	5.34	0.011
	① to ④	72.5	46.0	46.2	44.5	6.0	3.8	3.4	3.3	-36.5	-36.2	-38.6	-0.5	-3.7	6.64	<0.01
	① to ⑤	103.2	65.4	66.8	64.2	7.9	5.5	4.2	5.4	-36.6	-35.3	-37.7	-2.0	-3.8	6.49	<0.01
	① to ⑥	129.8	84.7	86.2	83.8	9.6	5.6	4.7	5.4	-34.7	-33.6	-35.4	-1.8	-2.8	6.71	<0.01
	② to ③	22.2	12.0	11.5	11.3	2.4	2.0	1.6	1.6	-46.2	-48.0	-49.2	3.5	-2.3	1.54	0.231
	② to ④	46.5	23.6	24.0	23.0	4.1	2.9	2.3	2.4	-49.3	-48.4	-50.5	-1.7	-4.1	1.47	0.248
	② to ⑤	77.2	43.0	44.5	42.7	5.7	4.8	3.7	4.6	-44.3	-42.3	-44.6	-3.4	-4.0	3.25	0.054
	② to ⑥	103.9	62.3	64.0	62.3	7.4	4.3	4.3	4.3	-40.0	-38.4	-40.0	-2.6	-2.6	3.34	0.050
	③ to ④	24.3	11.6	12.5	11.7	2.7	1.7	1.7	1.4	-52.1	-48.7	-51.7	-6.6	-5.8	2.70	0.085
	③ to ⑤	55.0	31.1	33.0	31.5	3.9	3.8	3.2	4.0	-43.5	-40.1	-42.8	-5.8	-4.6	4.81	0.016
	③ to ⑥	81.7	50.4	52.5	51.0	6.1	3.4	4.2	4.2	-38.3	-35.7	-37.5	-4.0	-2.7	4.41	0.022
	④ to ⑤	30.7	19.4	20.5	19.7	2.4	2.5	2.4	3.2	-36.8	-33.2	-35.8	-5.3	-3.8	2.17	0.133
	④ to ⑥	57.3	38.7	40.0	39.3	4.9	2.5	3.9	3.9	-32.5	-30.3	-31.5	-3.2	-1.7	1.96	0.160
	⑤ to ⑥	26.6	19.3	19.5	19.6	3.5	2.6	3.1	3.2	-27.5	-26.8	-26.5	-0.9	0.4	0.10	0.909
Digit 5	① to ②	23.1	18.4	18.5	17.2	3.1	2.6	2.3	2.9	-20.4	-19.9	-25.5	-0.6	-7.0	2.60	0.092
	① to ③	39.4	27.3	27.2	25.4	5.2	4.0	3.3	4.0	-30.7	-30.9	-35.6	0.4	-6.8	4.34	0.023
	① to ④	57.7	37.0	38.1	34.4	5.6	4.7	3.4	4.3	-36.0	-34.0	-40.4	-3.0	-9.7	11.93	<0.01
	① to ⑤	80.2	50.6	53.2	48.3	7.6	5.7	4.7	6.0	-36.9	-33.7	-39.8	-4.8	-9.2	15.96	<0.01
	① to ⑥	106.0	71.6	74.3	69.6	9.4	6.4	5.3	6.8	-32.5	-29.9	-34.4	-3.6	-6.3	8.87	<0.01
	② to ③	16.3	8.9	8.7	8.2	2.4	2.2	1.4	2.0	-45.2	-46.5	-49.9	2.4	-6.2	2.15	0.136
	② to ④	34.6	18.6	19.6	17.2	3.0	3.5	1.8	2.8	-46.4	-43.4	-50.3	-5.2	-12.2	9.48	<0.01
	② to ⑤	57.1	32.2	34.7	31.1	5.3	4.7	3.8	4.9	-43.6	-39.3	-45.6	-7.1	-10.4	11.52	<0.01
	② to ⑥	82.9	53.2	55.8	52.4	7.2	5.2	4.3	5.6	-35.8	-32.7	-36.8	-4.6	-6.1	6.75	<0.01
	③ to ④	18.3	9.6	10.9	9.0	1.7	1.9	1.0	1.6	-47.3	-40.6	-50.7	-11.4	-17.1	13.54	<0.01
	③ to ⑤	40.8	23.3	26.0	22.9	3.5	3.2	3.2	3.8	-42.9	-36.4	-43.8	-10.3	-11.8	13.66	<0.01
	③ to ⑥	66.6	44.3	47.0	44.2	5.6	3.9	4.1	4.8	-33.5	-29.3	-33.6	-5.9	-6.1	7.00	<0.01
	④ to ⑤	22.5	13.6	15.1	13.9	2.5	1.7	2.4	2.7	-39.3	-32.9	-38.2	-9.5	-7.9	4.64	0.018
	④ to ⑥	48.3	34.6	36.2	35.2	4.5	3.4	3.5	3.9	-28.3	-25.1	-27.1	-4.3	-2.8	1.59	0.222
	⑤ to ⑥	25.8	21.0	21.1	21.3	3.2	3.0	2.6	2.8	-18.7	-18.3	-17.5	-0.5	0.9	0.13	0.881

Acknowledgements

지난 2 년의 석사 과정 동안 많은 가르침과 아낌없는 관심을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다. 먼저, 다양한 연구에 참여할 수 있게 기회를 열어 주시고, 연구 뿐만 아니라 좋은 생활 습관, 인성에 대해 끊임없이 지도해주신 유희천 교수님께 감사드립니다. 교수님께서 늘 강조하셨던 '소통'과 '협력'을 통해 사회에 기여하고 좋은 결실을 맺는 책임 있는 연구자가 되도록 노력하겠습니다. 또한, 논문을 심사해주시고 항상 저에게 진심 어린 관심과 조언을 주신 장수영 교수님, 연구를 수행함에 있어 어려움에 부딪힐 때마다 함께 고민해주시고 세심하게 도움 주신 이원섭 교수님께 감사드립니다.

석사 과정 동안 연구실 생활을 함께하며 저를 진심으로 아껴주신 EDT 및 휴머노피아 구성원 분들께 감사의 말씀을 드립니다. 논문 연구를 더 올바른 방향으로 수행할 수 있도록 지도해주시고 어려움을 극복할 수 있도록 늘 바로 옆에서 함께 고민해주신 정하영 선배님, 실험 및 분석 방법에 대한 세심하고 명확한 지도로 역량을 키우는 데 큰 도움을 주시고 항상 저의 질문에 대해 최선을 다해 답변해주신 이승훈 선배님께 감사드립니다. 또한, 연구실 생활에 있어 적응하는 데 어려움을 겪거나 혼자 해결하기 어려운 일이 생겼을 때 자기 일처럼 도와주신 최영근 선배님,

힘든 일을 겪었을 때 진심 어린 격려와 조언을 해주신 이지형 선배님께 감사드립니다. 그리고 항상 저를 배려해주시고 초기 연구실 생활에 적응할 수 있도록 멘토가 되어 주신 이나현 선배님, 친구처럼 편하게 대해주시고 어려운 문제를 쉽게 해결할 수 있도록 도움주신 샤오펑 박사님께 감사드립니다. 옆에서 동고동락하며 서로 공감하고 응원해준 동기들, 업무가 과도하게 쌓였을 때 흔쾌히 도움 주셨던 후배들과 휴머노피아 구성원 분들께도 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로, 제가 석사 과정을 무사히 수행할 수 있도록 옆에서 묵묵히 기다리고 응원해주신 가족, 친구들에게 감사드립니다. 아직 어리고 부족해 보였을 저를 끝까지 믿고 지켜봐주신 엄마, 아빠, 그리고 고민이 있을 때마다 공감하고 조언해준 오빠에게 감사드립니다. 또한, 힘들 때 달려와서 제 편이 되어준 소중한 친구들에게 감사드립니다. 이 밖에 언급되지 못했지만 도움을 주신 많은 분들에게 감사를 표합니다.

2018. 05. 14

문수진 드림

Curriculum Vitae

Mun Sujin

Ergonomic Design Technology (EDT) Laboratory,
Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Education

M.S., Industrial and Management Engineering — Aug. 2018
Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, South Korea

B.S., Industrial and Management Engineering — Feb. 2016
Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, South Korea