

석사학위논문

제품 설계 특성 평가를 위한  
손 동작 분석 방법의 개발

이 상 기 (李 商 杞)

기계산업공학부 산업경영공학과 (인간공학 전공)

포항공과대학교 대학원

2006

제품 설계 특성 평가를 위한  
손 동작 분석 방법의 개발

**Development of a Hand Motion Analysis  
Method for Product Design Evaluation**

# **Development of a Hand Motion Analysis Method for Product Design Evaluation**

by  
Sangki Lee

Department of Industrial and Management Engineering,  
(Human Factors and Ergonomics Program)  
Pohang University of Science & Technology

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

Pohang, Republic of Korea  
January 5, 2006  
Approved by

---

Heecheon You, Major Advisor



**MIE**  
**20042580**

이상기, Sangki Lee, Development of a Hand Motion Analysis Method Product Design Evaluation, 제품 설계 특성 평가를 위한 손 동작 분석 방법의 개발, Department of Industrial and Management Engineering, 2006, 58p, Advisor: Heecheon You, Text in Korean.

### **Abstract**

This study develops a methodology for hand motion analysis to evaluate product design characteristics. The hand motion data were measured by using 3D motion capture system Falcon<sup>®</sup> and reflective marker set, which can minimize interference of measurement device. From coordinates of reflective markers, angle of finger joint and trace of tip can be calculated. And, hand motion data were visualized by 3D hand model which was developed with software, Maya<sup>®</sup> and SI. The hand motion analysis method was applied to the text input task by using 4 types of mobile phones. Mobile phones were selected based on button layout area (3 level) and index of difficulty (2 level), and index of difficulty is calculated based on Fitt's law. As a result of application, an average posture of finger during task can be determined with angles of finger joints. The average posture of each phone has little difference. And the range of motion during task is increased in area of button layout, which can be measured with maximum and minimum angle values. The finger movement can be quantified by calculating the trace of finger tip, and it is also increased in area of button. Finally, subjective

satisfaction was measured about finger reach-ability and finger move-ability, and it showed different results for each hand size group of subjects. In this study, hand motion is quantified by using motion capture system, and angle and trace data were analyzed. This information can be used to evaluate product design characteristics and improve the satisfaction of product.

# 목차

1. 서론.....	1
1.1 연구 배경 및 필요성 .....	1
1.2 연구 목적.....	3
1.3 논문 구성.....	4
2. 문헌 조사.....	5
2.1 손의 해부학적 구조.....	5
2.2 손 동작의 측정.....	7
2.3 손 분석을 통한 제품 설계 평가.....	10
3. 손 동작 분석 방법 개발 및 시각화.....	12
3.1 손 동작 분석 방법.....	12
3.1.1 손 동작의 측정 시스템.....	12
3.1.2 손의 각도 변화량 분석.....	13
3.1.3 손의 궤적 변화량 분석.....	19
3.2 3D hand modeling.....	20
4. 손 동작 분석 방법 적용: 휴대폰 문자 입력 button layout .....	24
4.1 실험참여자.....	24
4.2 수행작업 .....	26

4.3 실험 계획.....	27
4.3.1 독립 변수.....	27
4.3.2 종속 변수.....	31
4.4 실험 절차.....	33
4.5 적용 결과.....	33
4.5.1 Button layout 면적의 차이에 따른 효과.....	34
4.5.2 Index of difficulty 차이에 따른 효과.....	42
5. 토의.....	50
6. 결론.....	53
참고 문헌.....	55
부록 .....	57

## 표 목차

표 2-1. 손 관절의 명칭 .....	6
표 3-1. 각도 산출 과정 validation 결과.....	19
표 4-1. 실험참여자.....	25
표 4-2. 수행작업 문자 입력 내용 sample .....	26
표 4-3. S사 휴대폰 37종에 대한 측정치 평균값 .....	28
표 4-4. 선정된 휴대폰의 design specification.....	31
표 4-5. 주관적 만족도의 정의.....	32
표 4-7. Button layout area 차이에 따른 작업 수행 시간 분산분석 결과.....	34
표 4-8. Index of difficulty 차이에 따른 작업 수행 시간 분산분석 결과.....	42

## 그림목차

그림 2-1. 손의 골격 구조.....	5
그림 2-2. Electro-goniometer를 이용한 손 관절 각도 측정.....	7
그림 2-3. 손의 reflective marker landmark.....	9
그림 2-4. 3 자유도의 각도 조절이 가능한 keyboard.....	11
그림 2-5. Treaster and Marras (2000)의 실험에 사용된 keyboard.....	11
그림 3-1. 손 동작 측정 시스템.....	12
그림 3-2. 실험에 사용된 reduced marker set.....	13
그림 3-3. Reflective marker set.....	14
그림 3-4. 손의 좌표계 설정.....	15
그림 3-5. 자유도 1인 관절의 각도 계산.....	15
그림 3-6. Adduction-abduction 값의 측정.....	17
그림 3-7. Adduction-abduction 값의 측정.....	18
그림 3-8. 각도 산출 과정 validation에 사용된 jig.....	19
그림 3-9. 3D hand model을 통한 손 동작의 가시화.....	21
그림 3-10. SI를 이용한 손 뼈대 생성.....	22
그림 3-11. Skin과 뼈대의 binding 작업.....	23
그림 4-1. 손직선길이.....	25
그림 4-2. 휴대폰 문자 입력 작업 모습.....	27
그림 4-3. 휴대폰의 독립변수 요인 별 분포.....	30

그림 4-4. 실험에 사용된 휴대폰 .....	30
그림 4-5. 주관적 평가에 사용된 scale.....	32
그림 4-6. Button layout 면적 차이에 따른 작업 수행 시간.....	35
그림 4-7. Button layout 면적 차이에 따른 관절 별 각도 범위 .....	36
그림 4-8. Button layout 면적 차이에 따른 관절 별 각도 변화 누적량.....	37
그림 4-9. Button layout 면적 차이에 따른 tip의 초당 이동 궤적 .....	38
그림 4-10. Button layout 면적 차이에 따른 tip의 초당 이동 궤적 .....	39
그림 4-11. Button layout 면적 차이에 따른 엄지 조작 용이성.....	40
그림 4-12. Design questionnaire 분석 결과.....	41
그림 4-13. Index of difficulty 차이에 따른 작업 수행 시간 .....	43
그림 4-14. Index of difficulty 차이에 따른 관절 별 각도 범위.....	44
그림 4-15. Index of difficulty 차이에 따른 관절 별 각도 변화 누적량 .....	45
그림 4-16. Index of difficulty 차이에 따른 tip의 이동 궤적.....	46
그림 4-17. Index of difficulty 차이에 따른 엄지 조작 용이성 .....	48
그림 4-18. Design questionnaire 분석 결과.....	49

# 1. 서론

## 1.1 연구 배경 및 필요성

휴대폰, 키보드, 마우스와 같은 손으로 조작하는 **hand-held device** 및 **input device**의 사용이 증가하고 있다. 휴대폰의 경우 통화 기능뿐만 아니라 디지털 카메라, **MP3 player** 등 다양한 전자기기와 결합되면서 사용 빈도가 증가하고 있다. 또한, 업무의 전산화 및 인터넷 사용 증가는 키보드, 마우스와 같은 입력 도구의 사용을 증가시키고 있다.

이러한 기기의 부적합한 설계 또는 사용 빈도의 증가는 손가락 또는 손목의 질환으로 이어질 가능성이 있다. 휴대폰의 경우 문자메시지 서비스 (**SMS**)가 음성 통화 사용량을 앞서가고 있는 것으로 알려지고 있으며(최연진, 2005), 이에 따라 엄지손가락의 사용 또한 증가하고 있다. 이와 같이 **hand-held device**의 문자 입력 횟수가 증가함에 따라 일부 제품에서는 문자 입력의 편의성을 위해 기존의 번호 keypad가 아닌 **Qwerty** 타입의 다양한 keypad를 적용하고 있다(김원석, 2005). 또한 전자 제품의 사용량이 증가하면서 나타나는 **e-피로증후군**(이준규, 2004)의 경우 마우스와 같은 입력 도구의 장시간 사용이 원인의 하나로 알려져 있다.

제품의 설계를 평가하기 위해 손에 대한 연구가 수행된 바 있으나, 손 동작에 대한 연구는 활발히 진행되지 못하고 있다. 손에 대해서 수행된 기존 연구는 손의 힘 사용에 대한 연구 위주로 진행되어 왔다. **Kong and Freivalds**

(2003)는 meat hook의 형태 평가를 위해 FSR (Force Sensing Resistor) 센서가 부착된 장갑과 EMG (Electromyography) 측정 시스템을 사용함으로써 meat hook 사용시 손 힘을 분석하였다. You et al. (2005)는 plier의 design 평가 연구에서 EMG 시스템을 사용하여 plier의 design 차이에 따른 손 힘 크기를 비교 평가하였다.

손 동작 분석을 수행한 기존 연구는 측정이 용이한 일부 손가락의 자유도만을 분석하여 연구를 수행하고 있다. Nelson et al. (2000)은 컴퓨터 키보드의 설계 형태별 비교 평가를 수행한 연구에서 index finger에 electrogoniometer를 부착함으로써 타이핑 작업 시 손가락 관절 움직임의 속도, 가속도와 같은 joint kinematics와 손목 관절의 deviation을 분석하였다. Electrogoniometer의 경우 손과 같은 작은 신체 부위에 부착하는 것은 다소 제한적이며, 여러 개를 근접하여 사용할 경우 간섭에 의한 영향이 있는 것으로 알려져 있다(Chaffin et al., 1999).

따라서, 사용시 소요되는 힘이 크지 않으면서 빈번한 손 동작이 발생하는 제품에 대해서 손 동작의 종합적인 분석을 수행함으로써, 제품의 설계 또는 편의성을 평가하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 제품의 설계 특성에 따라 손 동작 분석 척도를 비교 분석함으로써, 손 동작 정량화 정보의 효용성 및 유용성을 파악하고자 한다.

## 1.2 연구 목적

본 연구는 효율적으로 손의 각도를 측정하고 이를 시각화하며, 동작 분석 데이터를 바탕으로 제품 설계 변화에 따른 손 동작 및 편의성을 평가하고자 한다. 이를 위해 본 연구는 다음과 같은 세 가지의 세부 목표를 수행한다.

첫째, 3차원 동작 분석 시스템을 이용하여 손 동작을 정확하고 효율적으로 측정할 수 있는 방법을 제시한다. 동작 분석 연구에서 전신과 같은 경우 정형화된 marker set을 통하여 측정을 수행하고 데이터를 분석하기 위한 software가 따로 제공되고 있으나, 손의 동작 분석은 그렇지 못하다. 예를 들어, 보행 분석의 경우 Helen Hayes marker set과 같이 해부학적으로 잘 정의된 marker set이 일반적으로 사용되고 있다(최훈우, 2005). 손 동작을 측정할 수 있는 marker set과 그에 따른 적절한 좌표계 설정 및 각도 분석 방법을 제시하고자 한다.

둘째, 측정된 손 동작 데이터를 바탕으로 손의 움직임을 가시화 할 수 있는 3D hand model를 제작한다. 전신의 움직임을 측정하여 가시화하고 특정 character를 연동할 수 있는 Filmbox®와 같은 software가 제공되고 있으나, 손의 움직임을 가시화 할 수 있는 방안은 제공되지 않고 있다. 따라서, 인체 뼈대 생성 software인 SI (Solver interface)와 3D graphic modeling software인 Maya®를 이용하여 3D hand model을 제작하여 손 측정 데이터와 연동이 가능하게 한다.

셋째, 제시한 손 동작 분석 방법을 hand-held device에 적용함으로써 각

도 또는 이동계적과 같은 척도를 통한 제품 설계 특성 평가의 효용성을 파악하고자 한다. 가장 대표적인 **hand-held device**인 휴대폰의 문자 입력 작업을 통해 휴대폰 **design specification**에 따른 손 동작의 차이를 분석하고, 작업 수행 시간, 주관적 만족도와 같은 척도를 비롯하여 손 동작 분석 척도 상호간의 경향을 비교 분석하고자 한다.

### **1.3 논문 구성**

본 연구는 모두 7장에 걸쳐 손 동작 분석을 통한 제품 설계 평가에 대한 내용을 서술하고 있다. 1장에서는 연구의 수행 배경과 필요성, 구체적인 목적을 제시하였으며, 2장에서는 기존에 수행된 연구를 통해 본 연구를 수행하는데 필요한 기본적인 정보와 지식을 파악하였다. 3장에서는 손 측정과 가시화 방법을 구체화하였으며, 4장에서는 정의된 손 측정 방법을 실험을 통해 실제 제품에 적용하여 보았다. 5장은 앞선 4장에서 수행된 실험의 결과를 서술하고 각 측정값을 해석하였으며, 6장과 7장에 걸쳐 토의와 결론을 서술하였다.

## 2. 문헌 조사

### 2.1 손의 해부학적 구조

손과 손목의 골격 구조는 손가락뼈, 손바닥뼈, 손목뼈로 구분되어 총 27개의 뼈로 구성되어 있다(그림 2-1 참조). 손가락뼈(phalanx of the finger)는 총 14개로 엄지에 2개, 나머지 손가락에는 각각 3개씩 존재하며, 몸의 중앙에서 가까운 순서로 proximal, middle, distal phalange라고 한다. 손바닥뼈(metacarpal bone)는 모두 5개가 있으며, 손목뼈(carpal bone)는 모두 8개로 구성되어 있다.

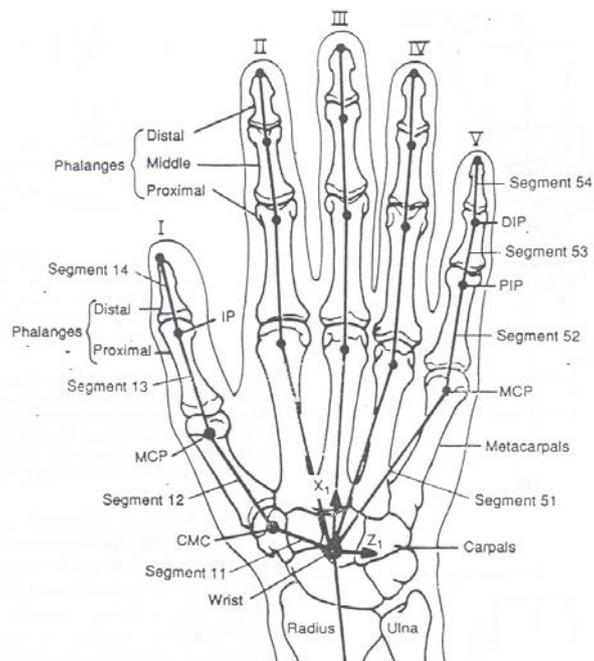


그림 2-1. 손의 골격 구조 (Buchholz, 1992)

손의 관절 구조는 손목에 있는 여러 관절과 손 내부의 14개 관절로 이루어지며, 관절에 따라 1 또는 2의 자유도를 가진다. 손의 관절은 손목 관절 (wrist joint)부터 위 손가락뼈 사이 관절(distal interphalangeal joint)까지 모두 5 부분으로 구성되며, 각 부분에 대한 명칭은 표 2-1와 같다(Chao et al., 1989). 각 관절은 서로 다른 관절 형태를 가지고 있으며, 그에 따라 1 또는 2의 자유도를 가진다(표 2-2 참조). 예를 들어, 손가락뼈 사이 관절(IP)의 경우 자유도가 1인 경첩 관절 형태를 하고 있으며, 손바닥손가락뼈 관절(MCP)의 경우 엄지는 자유도 1인 경첩 관절(hinge joint) 나머지 손가락은 자유도 2인 타원 관절 (ellipsoid joint)의 형태를 하고 있다. 엄지의 손목손바닥뼈 관절(CMC)의 경우, 연구자에 따라 자유도가 3이라고 하는 경우도 있으나(Buchholz, 1992), 일반적으로 자유도를 2로 본다.

표 2-1. 손 관절의 명칭

명칭	설명	자유도
손목 관절 (wrist joint)	아래팔과 손목뼈 사이의 관절	2
손목손바닥뼈 관절 (carpometacarpal joint, CMC)	손목뼈와 손바닥뼈 사이의 관절	2
손바닥손가락뼈 관절 (metacarpophalangeal joint, MCP)	손바닥뼈와 첫마디뼈 사이의 관절	2 (엄지: 1)
근위 손가락뼈 사이 관절 (proximal interphalangeal joint, PIP)	첫마디뼈와 중간마디뼈 사이의 관절	1 (엄지: IP)
위 손가락뼈 사이 관절 (distal interphalangeal joint, DIP)	중간마디뼈와 끝마디뼈 사이의 관절	

## 2.2 손 동작의 측정

손과 손목의 움직임을 측정하기 위해서 **electro-goniometer**, **cyber-glove**, **video spot locator system**과 같은 다양한 장비들이 사용되고 있다. Nelson et al. (2000)는 **index finger**와 **wrist**의 **flexion** 및 **extension** 각도를 측정하기 위해서 **electro-goniometer**를 사용하였다(그림 2-2 참조). **Keyboard** 사용시 손가락과 손목의 각도 변화를 관찰하기 위해서 수행된 이들의 연구에서는 **electro-goniometer**를 부착할 경우 발생하는 공간적 문제 때문에 4개의 관절에 대한 측정만이 수행되었다. 류태범(2000)은 손가락과 손목의 각도 측정을 위해서 18개의 전기 저항 **sensor**가 부착된 **cyber-glove**를 사용하였다. Lee and Zhang (2005)는 **power-grip** 자세의 **prediction**에 관한 연구를 수행하기 위해서, 대표적인 **video spot locator system** 가운데 하나인 **Vicon 250 motion capture system**을 사용하였다.

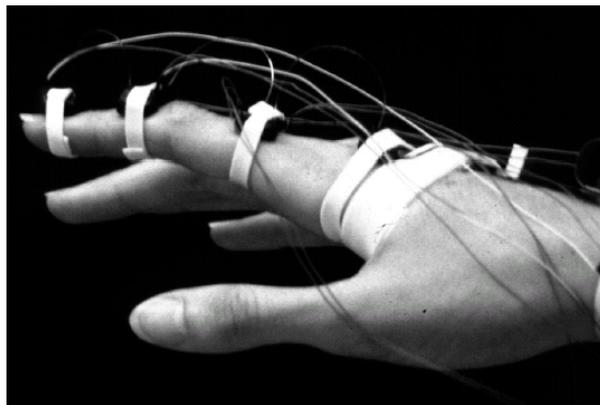
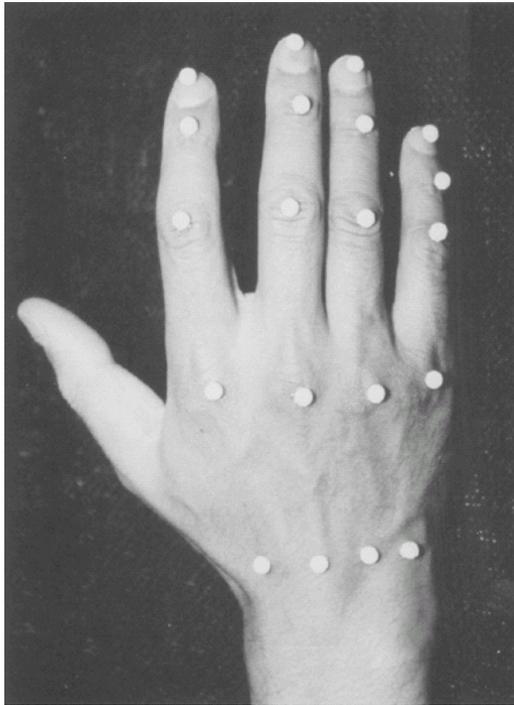


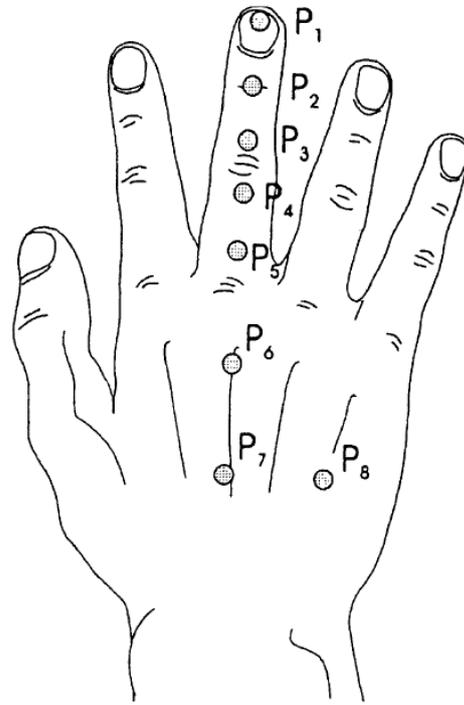
그림 2-2. Electro-goniometer를 이용한 손 관절 각도 측정

Motion capture system을 이용하여 손 동작을 측정하기 위해 손의 각 관절 부위 피부 표면에 reflective marker를 부착하여 관절의 각도를 측정하고 있다. 손이 아닌 신체부위의 경우 신체 관절과 segment 상에 marker를 부착함으로써, 각 segment의 공간상의 움직임을 측정하고 있다. 예를 들어, motion capture system을 이용한 보행 분석에서는 무릎과 같은 관절뿐만 아니라, 넓적다리 및 정강이에도 marker를 부착하는 표준화된 marker set을 일반적으로 사용하고 있다(최훈우, 2005). 그러나, 손의 경우 motion capture system의 resolution과 손의 공간적 크기를 고려할 때, 각 관절 부위에 reflective marker를 부착함으로써 동작 분석을 수행하고 있다.

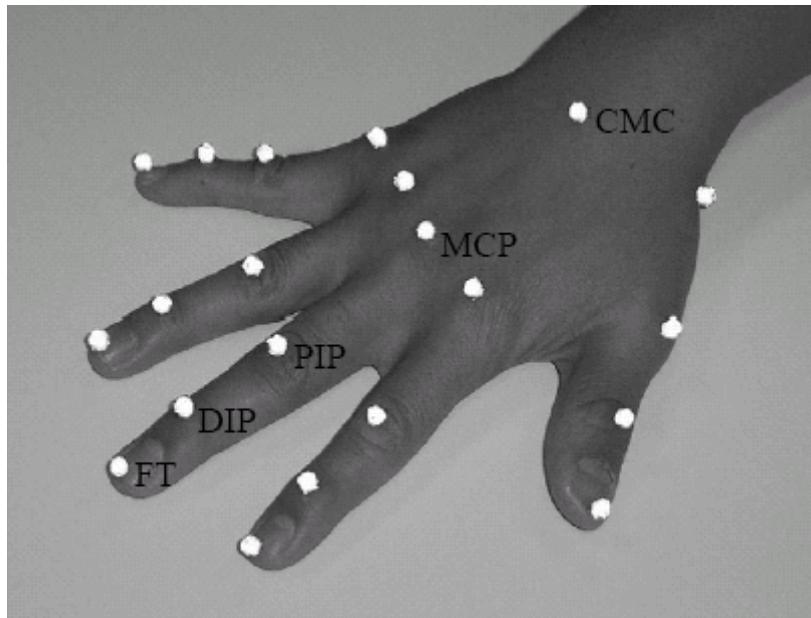
Motion capture system을 이용한 손 동작 분석을 위해 손에 부착하는 marker set 몇 가지가 정의되어 왔으며, 각 marker set의 형태와 한계점은 다음과 같다. Somia et al. (1998)이 사용한 그림 2-3(a)는 손바닥뼈(metacarpal bone) 각각에 marker를 부착하고 있으며, 엄지의 marker 위치는 정의하지 않고 있다. 그림 2-3(b)는 Chiu et al. (1998)이 사용한 marker set으로 손가락뼈마다 각 segment를 나타내는 두 개의 marker를 사용하고 있어 상대적으로 많은 marker를 사용하고 있다. 그림 2-3(c)는 Zhang et al. (2003)이 사용한 marker set으로 엄지손가락의 marker를 정의하고 있으며, CMC3에 하나의 marker를 부착함으로써 MCP 각도를 측정하고 있다. 하지만, 그림 2-3에서 제시된 방법은 모두 MCP joint의 deviation 측정 방법을 제시하지 않고 있다는 한계점이 있다.



(a) Somia et al. (1998)



(b) Chiu et al. (1998)

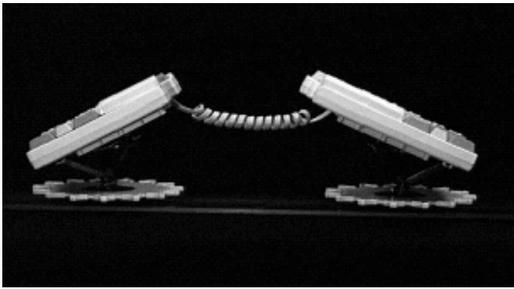


(c) Zhang et al. (2003)

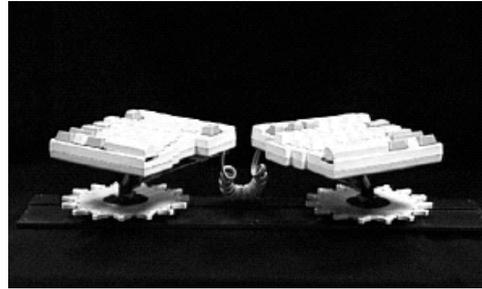
그림 2-3. 손의 reflective marker landmark

### 2.3 손 분석을 통한 제품 설계 평가

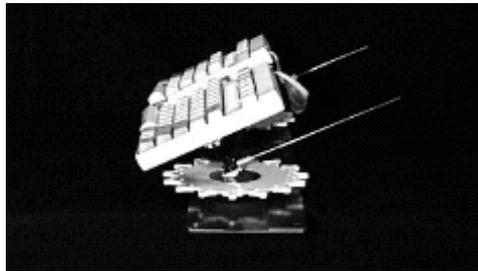
Nelson et al. (2000)은 electro-goniometer를 이용하여 집게 손가락의 동작을 분석함으로써 키보드 종류에 따라 유의하게 차이가 나는 measurement를 분석하였다. Nelson et al. (2000)은 그림 2-4와 같이 3 자유도로 각도 조절이 가능하고, 양쪽 키보드의 간격 조절이 가능한 키보드를 이용하여 타이핑 작업 시 집게 손가락과 손목의 예측된 tendon 길이 변화를 측정하고, joint kinematics 및 wrist deviation을 측정하였다. 측정 결과, 3 자유도의 변화 및 자유도간 교호 작용이 손가락과 손목에 대한 측정치에 유의한 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 그러나, Nelson et al. (2000)의 공저자로서 같은 연구방법을 그림 2-5와 같은 실제 키보드에 적용한 Treaster and Marras (2000)의 연구에서는 Nelson et al. (2000)의 연구와 측정치의 경향에서 일부 상반된 결과를 보였으며, 이를 통해 손의 동작을 분석하여 제품을 평가하는 방법이 명확하게 정립되어 있지 않은 것을 알 수 있다.



(a) 좌우 기울임



(b) 좌우 벌림



(c) 상하 기울임

그림 2-4. 3 자유도의 각도 조절이 가능한 keyboard

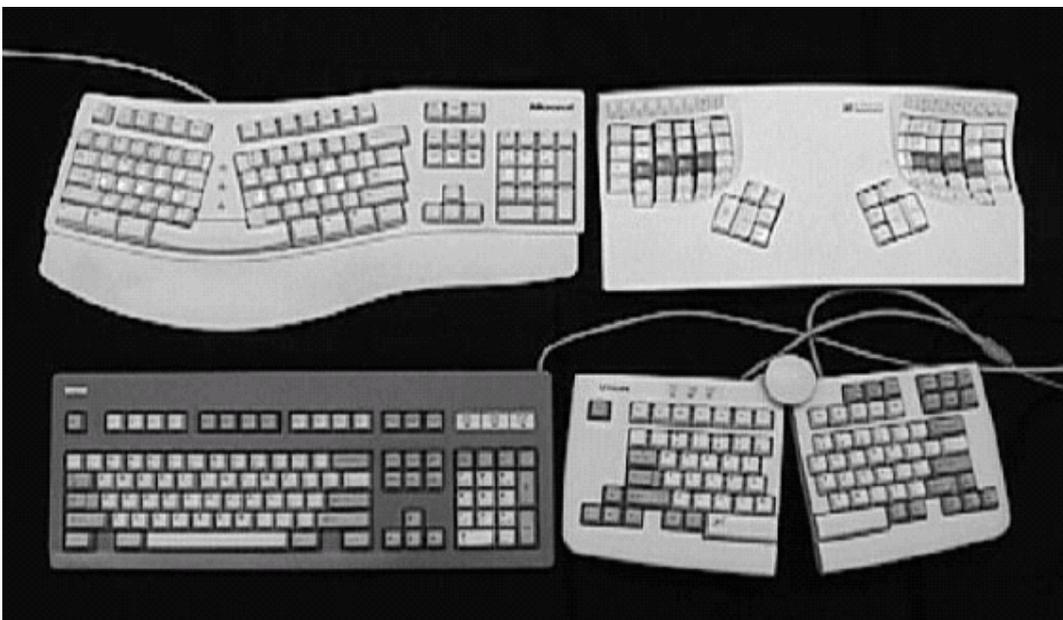


그림 2-5. Treaster and Marras (2000)의 실험에 사용된 keyboard

### 3. 손 동작 분석 방법 개발 및 시각화

#### 3.1 손 동작 분석 방법

##### 3.1.1 손 동작 분석 시스템

손 동작을 측정하기 위해서 Motion analysis사의 Falcon 240 카메라를 사용하였다. 손의 움직임을 정확하게 측정하기 위해서 8 mm 렌즈가 부착된 카메라 6 대를 실험참여자를 중심으로 1.5 ~ 2 m 거리에 배치하였으며, 측정 frequency는 60 Hz로 설정하였다. 그림 3-1은 손 동작 측정에 이용된 Falcon system의 개요를 나타낸 것으로 6대의 카메라(Falcon HiRES)와 데이터 처리 서버(Midas), 데이터 분석 컴퓨터로 구성이 되었다. 데이터 처리 서버(MIDAS)를 통해서 수집된 data는 데이터 분석 컴퓨터에서 실시간으로 기록되었으며, 데이터 편집 및 분석에는 EVaRT 4.2 소프트웨어가 사용되었다.



그림 3-1. 손 동작 측정 시스템

휴대폰 문자 입력 작업의 손 동작을 효율적으로 측정하기 위해서 엄지손가락의 움직임을 측정하였다. 본 연구에서는 한 손으로 휴대폰을 이용하여 문자를 입력하는 작업을 분석하고자 하였으므로, 동작분석의 관심 대상은 엄지손가락이다. 따라서, 그림 3-2과 같이 손의 좌표 공간 정의와 엄지손가락 각도 측정에 필요한 11개의 marker를 부착하여 실험을 진행하였다. 손 등의 4개의 marker는 기준 평면을 설정하기 위해 부착되었고, 상완의 marker는 손목의 움직임을 쉽게 가시화하기 위해서 부착하였다.

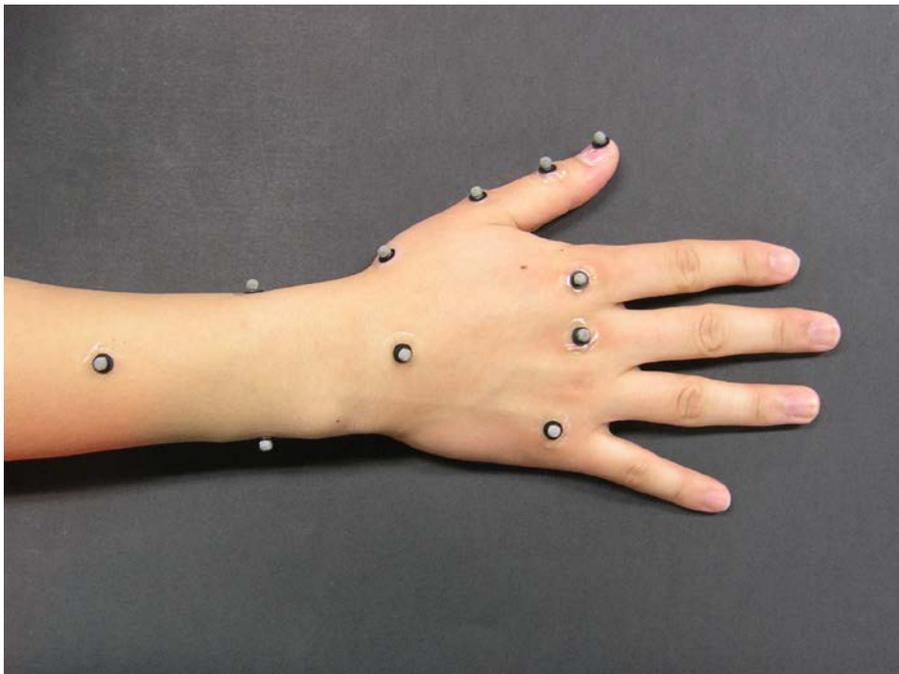


그림 3-2. 실험에 사용된 reduced marker set

### 3.1.2 손의 각도 변화량 분석

손가락 및 손목의 각도 변화를 측정하기 위해서 총 24개의 reflective

marker를 부착하고 손의 좌표계를 설정하였다. 손가락 및 손목의 각 관절 부위 피부 표면에 reflective marker를 부착함으로써 각도 측정에 필요한 vector 정보를 산출하였다. Lee and Zhang (2003)이 사용한 21개의 marker 이외에 손목 부위의 각도를 측정하기 위해서 3개의 marker를 추가로 부착하였다(그림 3-3 참조). 각 관절의 각도를 계산하는 기준을 설정하기 위해서 중지의 CMC<sub>3</sub> joint를 원점으로 하는 좌표계를 설정하였다. 그림 3-4에서 MCP<sub>2</sub>, MCP<sub>5</sub>, CMC<sub>3</sub>을 포함하는 평면을 X-Y plane으로 가정함으로써, 각도 계산의 기준 평면으로 정의하였다.



그림 3-3. Reflective marker set

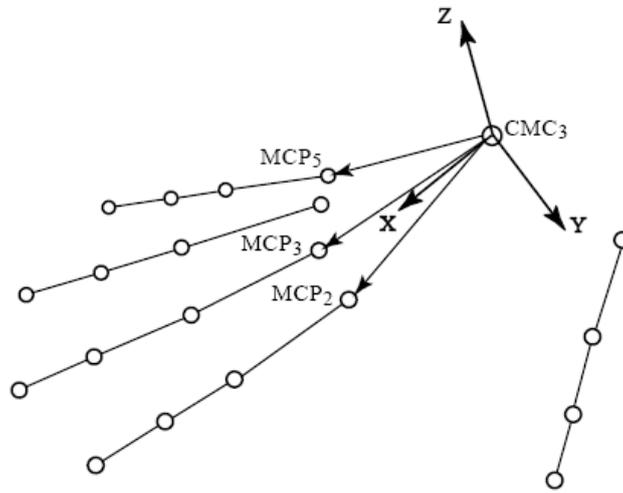


그림 3-4. 손의 좌표계 설정

인접한 세 점의 좌표를 이용하여 두 벡터의 사이각을 구하는 방법으로 자유도가 1인 손의 각 관절에 대한 각도를 산출하였다. 엄지의 IP, MCP 및 인지-소지의 DIP, PIP와 같이 자유도가 1인 관절 총 10개에 대해서 벡터의 내적을 이용하여 사이각의 크기가 측정되었다. 그림 3-5에서와 같이 측정하고자 하는 관절에 부착된 marker를 시점으로 하는 두 개의 벡터를 구하고 내적값을 이용하여 사이각의 크기를 구하였다(수식 1 참조).

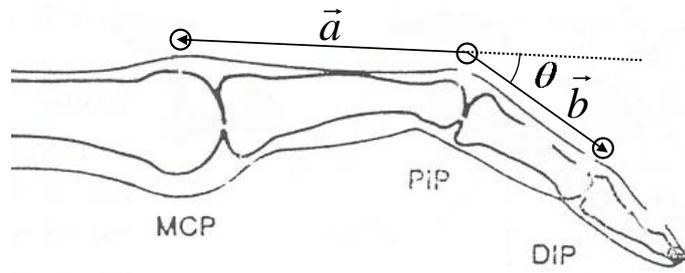


그림 3-5. 자유도 1인 관절의 각도 계산

$$\theta = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \right) \quad (\text{단위: radian}) \quad (1)$$

자유도가 2인 관절의 자유도별 각도를 산출하기 위해서 각도 산출의 기준이 되는 평면과 그에 수직인 평면을 정의하였다. 엄지의 CMC와 인지-소지의 MCP, wrist 관절은 adduction-abduction과 flexion-extension 두 자유도의 움직임이 가능하다. 따라서, marker의 위치를 서로 수직인 두 평면에 투영하여 해당 관절의 자유도별 각도를 구하는 것이 필요하다. 먼저 adduction-abduction을 값을 산출하기 위해서, 그림 3-6에서 정의된 X-Y plane을 이용하였다. 예를 들어, 그림 3-4에서 인지 MCP joint의 adduction-abduction 값을 산출하기 위해서, PIP joint marker의 위치를 X-Y plane에 투영하여 PIP<sub>2</sub>' marker의 좌표를 산출하고, marker PIP<sub>2</sub>'와 MCP<sub>2</sub>로 구성되는 벡터와 MCP<sub>2</sub>와 CMC<sub>3</sub>로 구성되는 벡터가 이루는 각을 계산하였다. 손이 움직임에 따라 기준 평면은 매 frame마다 새롭게 정의되며, 지속적으로 각 관절 각도 산출의 기준이 되었다.

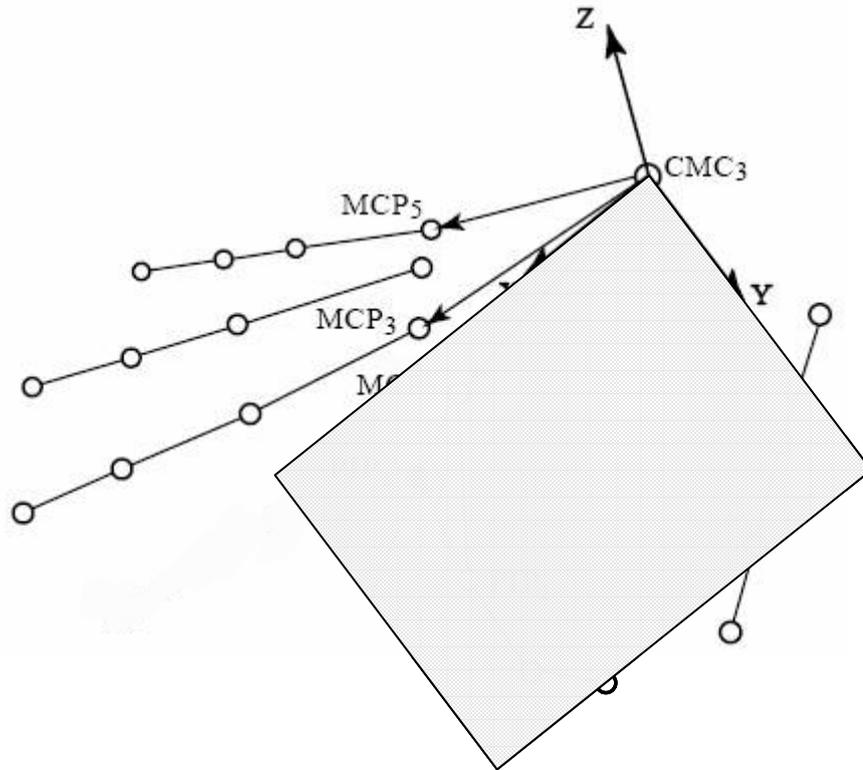


그림 3-6. Adduction-abduction 각의 측정

자유도가 2인 관절의 flexion-extension 값을 산출하기 위해서, 기준 X-Y plane과 수직인 평면을 정의하고 인접한 marker를 투영시켰다. 인지-소지 MCP joint의 flexion-extension 값을 구하기 위해서 각 손가락의 손바닥뼈 (metacarpal bone)를 지나고 X-Y plane에 수직인 평면을 정의하였다. 그림 3-7에서 보는 바와 같이 분석하고자 하는 손가락의 PIP<sub>2</sub> joint 위치를 X-Y plane에 수직인 평면에 투영하여 PIP<sub>2</sub>라고 하고 CMC<sub>3</sub>, MCP<sub>2</sub>, PIP<sub>2</sub>가 이루는 각을 계산함으로써 각 MCP joint의 flexion-extension을 산출하였다. 손목과 엄지 손가락 또한, 기준 평면에 수직이고 CMC<sub>3</sub>과 MCP<sub>3</sub>을 지나는 평면을 기준으로

marker 좌표를 투영하여 2 자유도의 각도를 산출하였다.

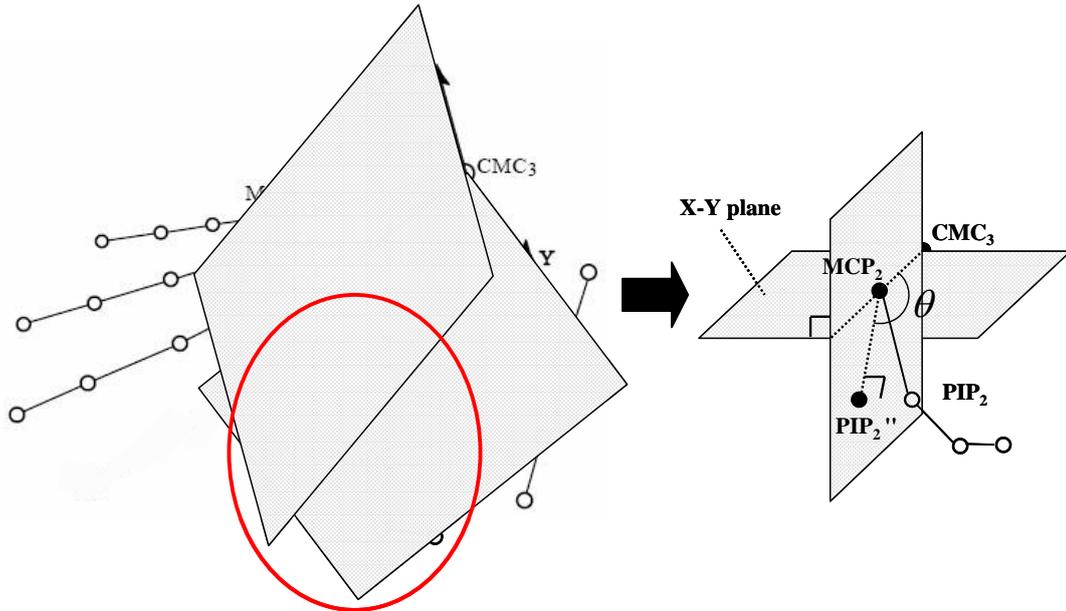


그림 3-7. Adduction-abduction 값의 측정

실시간으로 얻어지는 marker의 좌표 정보를 바탕으로 손가락과 손목의 관절 각도를 계산하기 위해서 계산과정을 Excel sheet로 작성하고 validation 과정을 거쳤다. 각도 산출의 기준이 되는 X-Y plane을 정의하고 수직인 평면을 구하며, 모든 관절의 각도를 계산하는 과정을 validation하기 위해서 그림 3-8와 같은 jig를 제작하여 실제 의도한 각도가 산출되는지를 검증하였다. 검증 결과 표 3-1에서 보는 바와 같이 최대 편차가 3°를 넘지 않는 것으로 밝혀졌으며, Excel을 이용하여 작성한 계산과정을 통해 각도를 산출하는 것이 가능한 것으로 판단되었다. 이러한 오차는 motion capture system의 측정오차와 jig 제작 시 발생한 치수 오차에 기인한 것으로 생각된다.

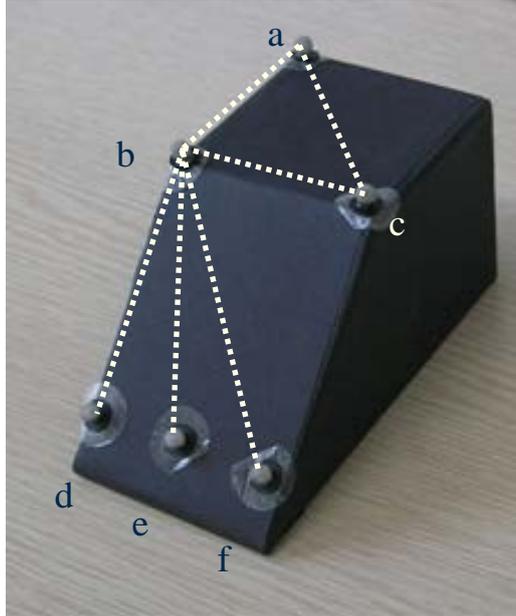


그림 3-8. 각도 산출 과정 validation에 사용된 jig

표 3-1. 각도 산출 과정 validation 결과

(단위: °)

	∠ abd		∠ abe		∠ abf	
	Flexion	Deviation	Flexion	Deviation	Flexion	Deviation
기준	45	0	45	28.41	45	48.29
실측	43.81	0.12	43.28	28.57	42.76	48.50
편차	-1.19	0.12	1.72	0.16	2.24	0.21

### 3.1.3 손의 궤적 변화량 분석

제품 사용시 움직이는 손가락의 움직임 정도를 정량화하기 위해서 손가락 tip에 부착된 marker의 이동궤적을 분석하였다. 손가락 끝(tip)으로 버튼을

조작하는 경우, tip에 부착된 marker의 위치를 분석함으로써 손가락이 움직인 경로를 분석하는 것이 가능하다. Motion capture system에 사용되는 camera는 60에서 240 Hz의 sampling rate를 가지며, 본 연구에서는 60 Hz로 측정이 수행되었다. 각 frame별 marker의 3차원 변위 차이를 계산하여 누적함으로써 marker의 이동궤적의 거리를 계산하였다(수식 2 참조).

$$Trajectory = \sum_i \sqrt{(x_{ij} - x_{i(j-1)})^2 + (y_{ij} - y_{i(j-1)})^2 + (z_{ij} - z_{i(j-1)})^2}$$

*i*: marker name (2)  
*j*: frame number

### 3.2 3D hand modeling

손 동작 측정 data를 바탕으로 손의 움직임을 가시화하기 위해서 인체 뼈대 생성 software인 SI와 3D graphic modeling software인 Maya®를 이용하여 3D hand model을 작성하였다. 3D hand model을 이용하여 그림 3-9와 같이 실제 사람 손과 유사한 hand model이 motion capture data와 연동되어 움직이는 것이 가능하다. 제작된 3D hand model은 skin을 변경함으로써 다양한 크기 또는 형태의 손 모델을 연동하는 것이 가능하다.

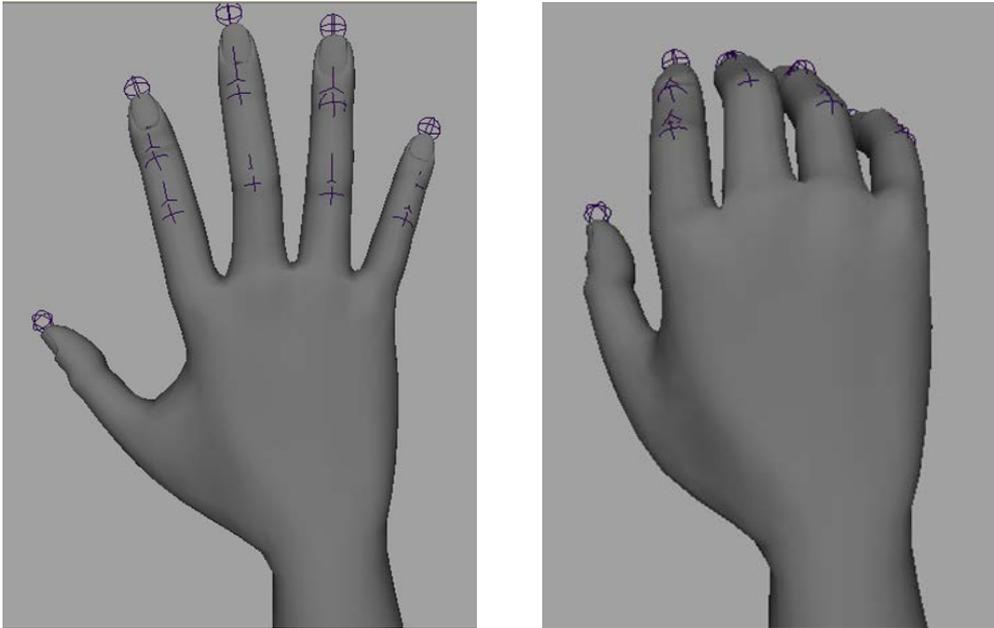


그림 3-9. 3D hand model을 통한 손 동작의 가시화

인체 뼈대 생성 software인 SI 2.0을 이용하여 손의 뼈대 모델을 생성하였다. SI는 motion capture software인 EVaRT와 함께 제공되는 software로서 Falcon system으로 측정된 motion data를 바탕으로 인체 뼈대를 생성하는 기능을 가지고 있다. 손의 뼈대를 생성하기 위해서는 다음과 같은 과정의 작업이 필요하다. 먼저, 손을 편 상태의 초기자세를 기준으로 뼈대의 크기와 위치를 설정해야 한다(그림 3-10 참조). 둘째, 생성된 뼈대의 관절속성인 자유도 (degree of freedom)와 동작범위(range of motion)를 정의한다. 이 과정에서 뼈대의 자유도와 동작범위를 설정함으로써 인체동작의 실제성을 보완하는 것이 가능하다. 마지막으로, 시각화하고자 하는 인체동작 데이터에 적용함으로써 뼈대생성 및 적용을 완료하게 된다.

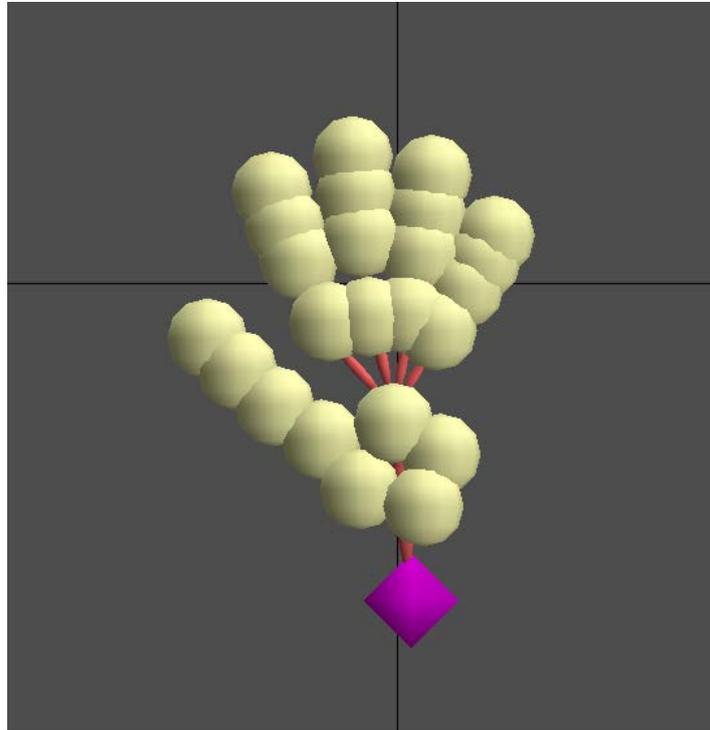


그림 3-10. SI를 이용한 손 뼈대 생성

3D graphic modeling software인 Maya<sup>®</sup>를 이용하여 SI에서 만들어진 뼈대와 사람의 손 skin model을 결합하여 3D hand model을 완성하였다. Maya<sup>®</sup>를 이용하여 SI에서 만들어진 손 뼈대와 polygon으로 구성된 skin을 결합하였다 (그림 3-11 참조). 손 뼈대와 skin의 scale을 조절하여 유사한 크기로 조정 한 후, 뼈대의 관절과 skin의 관절부위를 binding하였다. 손의 움직임에 따라 skin의 polygon이 뼈대를 따라 움직이는 정도가 달라지므로, 그림 3-9와 같이 각 polygon이 뼈대에 결합되는 weight를 조절함으로써 원활한 움직임을 구현할 수 있게 하였다. 구현된 hand model은 motion capture system에서 만들어지는

motion data를 담은 TRC (Tracked ASCII) 파일을 적용함으로써, 해당 움직임을 재생하는 것이 가능하였다.

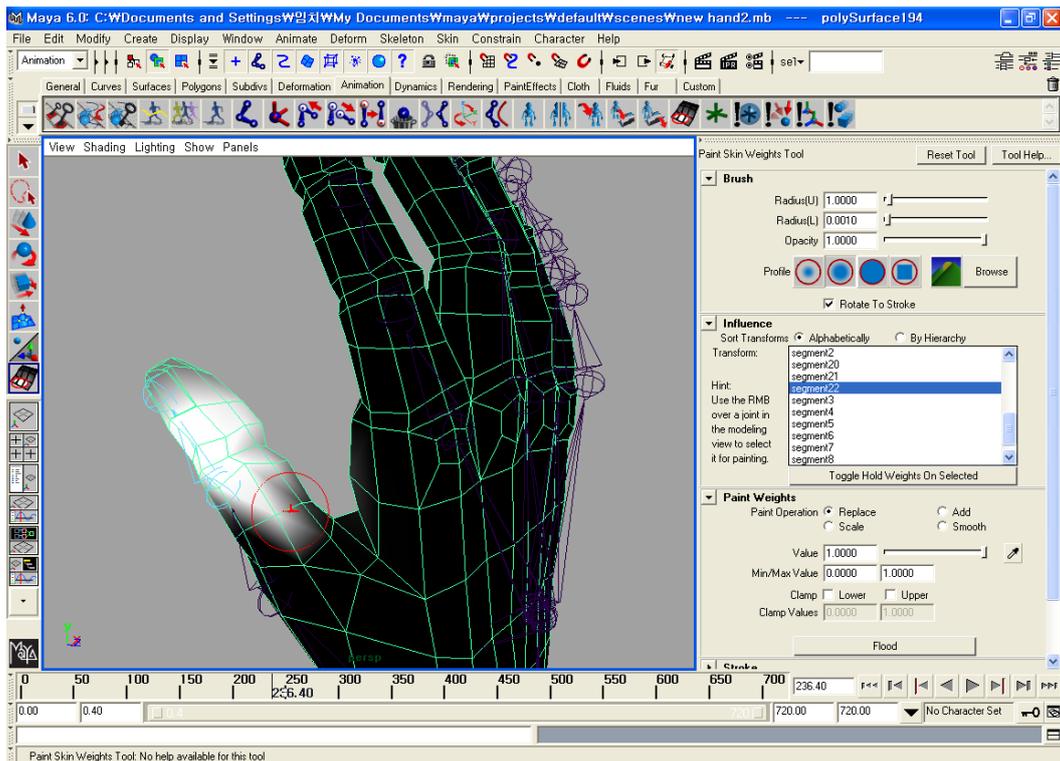


그림 3-11. Skin과 뼈대의 binding 작업

## 4. 손 동작 분석 방법 적용: 휴대폰 문자 입력 button layout

제안한 손 동작 분석 방법을 휴대폰 문자 입력 작업에 적용함으로써 손 동작 분석으로 얻어지는 정보의 유용성 및 효용성을 파악하고자 하였다. 휴대폰의 디자인 특성 가운데 button layout 설계의 차이에 따른 손 동작 분석 정보의 차이를 분석하고자, button layout area와 index of difficulty에 따라 휴대폰을 선정하고 문자 입력 작업을 수행하였다. 작업을 수행하는 동안 엄지 손가락의 각도와 finger tip의 이동 궤적이 측정되었으며, 주관적 만족도가 측정되었다. 휴대폰 설계 특성에 따라 측정값의 변화를 분석함으로써, 측정치 간의 변화 경향과 제품 평가 척도로서의 유용성 및 효용성을 파악하였다.

### 4.1 실험참여자

본 연구를 수행하기 위해 20대 남녀 12명(남: 9명, 여: 3명)이 실험에 참여하였다. 실험에서 수행되는 수행작업을 고려하여 S사 휴대폰을 6개월 이상 사용했으며, 해당 제조사의 문자 입력 방식이 익숙한 사용자를 실험참여자로 선정하였다. 선정된 실험참여자는 상지 및 손과 관련된 질환 병력이 없고 모두 오른손잡이이며, 실험참여자의 평균 나이는 만 23세(표준편차: 3.07)였다. 손직선길이는 그림 4-1과 같이 손목가쪽점 수준의 접힘선에서 손끝점까지의 직선길이로서, 손을 펴서 탁자 위에 올려놓은 다음 손목선에서부터 손끝점까지의 거리를 측정하였다(기술표준원, 2005).

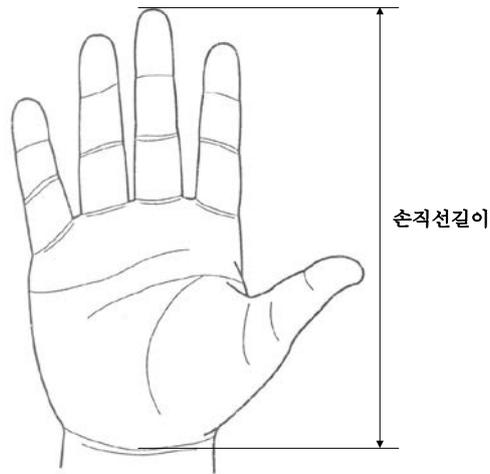


그림 4-1. 손직선길이

실험참여자의 손 크기가 실험의 결과에 미치는 영향을 분석하기 위해서 손 크기에 따라 실험참여자를 3 그룹으로 blocking하였다. 실험참여자를 나누는 기준은 기술표준원 주관의 ‘한국인 인체치수조사(Size Korea)’ 사업에서 제공되는 인체 치수 직접측정자료를 바탕으로 설정되었다(기술표준원, 2005). 20대 남녀의 손 크기를 조사한 결과 평균 18 cm (표준편차: 0.98)인 것으로 조사되었으며, 33 %ile (17.6 cm)과 67 %ile (18.4 cm)를 기준으로 실험참여자를 세 그룹으로 grouping하여 모집하였다. 각 group 별 손직선길이는 표 4-1에 주어진 값과 같다.

표 4-1. 실험참여자

Group	인원 수(명)	평균 손직선길이(cm)
대	4	19.3
중	4	18.2
소	4	16.5

## 4.2 수행작업

실험참여자는 motion capture system이 설치된 공간에 편하게 앉아서 휴대폰에 주어진 문자를 입력하는 작업을 수행하였다(그림 4-2 참조). 주어진 문자 입력 내용은 길이가 비교적 짧고 친숙한 내용을 제시함으로써, 실험참여자가 입력 내용을 따로 보거나 외우기 위해 작업수행에 방해가 되지 않는 내용으로 선별하였으며, 수행작업 간에 편차를 줄이기 위해서 문자의 타수를 유사하게 구성하였다. 표 4-2는 실험에 사용된 각 수행작업으로 애국가 구절 또는 쉽게 접할 수 있는 명언 또는 속담이 선정되었다.

표 4-2. 수행작업 문자 입력 내용 sample

Task	내 용(타수)
1	동해물과 백두산이 마르고 닳도(54타)
2	급하면 바늘 허리에 실 매어 쓸까(53타)
3	순간의 선택이 십 년을 좌우한다(52타)



그림 4-2. 휴대폰 문자 입력 작업 모습

### 4.3 실험 계획

본 실험은 Fitt's law를 이용한 index (Index of difficulty)와 버튼 layout 면적을 within-subject variable로 가지고, 사용자의 손 크기를 between-subjects variable로 가지는 두 개의 mixed-factor design으로 구성되었다. 실험은 Index of difficulty와 버튼 layout 면적 두 factor에 대해서 각각 수행되었으며, 실험 순서에 의한 학습 효과를 최소화하기 위해서 실험 순서는 randomize하였다.

#### 4.3.1 독립 변수

본 실험에서는 Fitt's law에 근거한 index와 휴대폰의 문자판이 배열되어

있는 공간의 면적을 독립 변수로 설정하였다. 실제 휴대폰을 사용하여 각 변수의 level을 설정하기 위해서 시중에 판매되고 있는 휴대폰에 대한 사전조사가 이루어졌다. 표 4-3는 시중에 판매되고 있는 S사의 폴더(folder)형 휴대폰 52종을 대상으로 휴대폰 grip 및 문자 배열과 관계 있는 주요 측정치를 조사한 데이터에 대한 평균값 및 표준편차를 보여주고 있다. 주요 측정치는 grip부의 길이, 너비, 두께와 문자입력 버튼의 세로, 가로 길이 및 간격, 버튼 전체 layout의 세로와 가로 길이를 측정하였다.

표 4-3. S사 휴대폰 37종에 대한 측정치 평균값

(단위: mm)

측정치	Grip부			Button				Button layout	
	세로 길이	가로 길이	두께	세로 길이	가로 길이	세로 간격	가로 간격	세로 길이	가로 길이
평균	88.9	46.6	17.5	6.2	11.6	7.8	12.9	29.9	37.2
표준편차	5.8	3.8	4.3	1.2	1.8	1.1	1.4	3.1	3.3

Fitt's law를 이용하여 휴대폰 문자 입력의 difficulty와 휴대폰 버튼의 크기 및 간격을 하나의 Index of difficulty로 나타내었다. 수식 (3)은 Fitt's law의 movement time을 나타낸 것으로 휴대폰의 문자 입력 버튼의 가로, 세로 길이 ( $W$ )와 버튼 중심간의 가로, 세로 간격( $D$ )을 알면 버튼 1회 조작 시 소요되는 이동시간을 예측하는 것이 가능하다. 문자 입력 버튼 10개를 대상으로 문자 입력 시 발생 가능한 이동의 모든 경우의 수를 파악하여 movement time의 log항을 산출하고, 이를 모두 더하여 index로 사용하였다. 대상 휴대폰 51종에

대한 index 계산 결과, index는 최소 115.8에서 최대 171.2이었으며, 평균값은 134.9 (표준편차: 13.4)인 것으로 분석되었다.

$$\begin{aligned} \text{Movement time} &= a + b \log_2(2D/W) \\ a, b &= \text{empirically derived constants} \\ D &= \text{distance of movement from start to target center} \\ W &= \text{withd of the target} \end{aligned} \quad (3)$$

휴대폰의 문자 입력 버튼이 배열되어있는 layout의 가로, 세로 길이를 측정하여 layout의 면적을 산출하였다. 면적은 최소 969 mm<sup>2</sup>, 최대 1558 mm<sup>2</sup>이었으며 평균값은 1225 mm<sup>2</sup>(표준편차: 142)인 것으로 분석되었다. 그림 4-3는 Index of difficulty와 layout 면적을 기준으로 조사된 휴대폰의 분포를 나타낸 것으로 원으로 표시된 4개의 휴대폰이 실험 대상으로 선정되었다. 표 4-4는 실험에 선정된 휴대폰의 design specification을 나타내고 있다. 실제 판매되고 있는 제품의 분포를 보았을 때, Fitt's law를 이용한 index와 버튼 layout의 면적 두 factor가 서로 유의한 차이를 보이도록 cross된 휴대폰을 선정하는 것이 불가능하였다. 따라서 두 가지 factor에 대해서 3 level (Layout area), 2 level (Index of difficulty)의 실험으로 나누어 분석하였다.

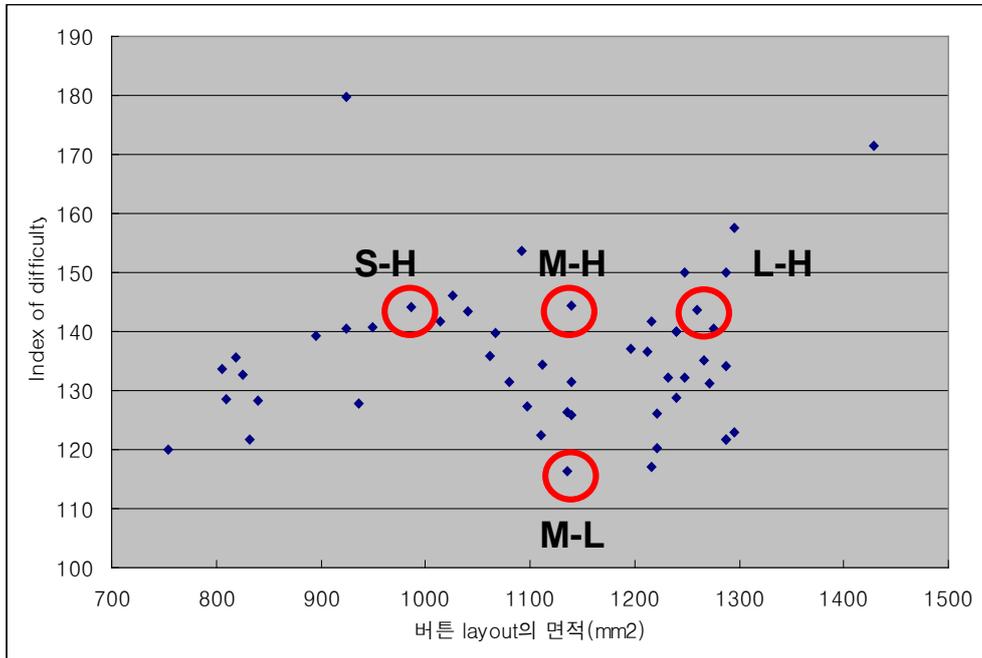


그림 4-3. 휴대폰의 독립변수 요인 별 분포



**S-H**

**M-H**

**L-H**

**M-L**

그림 4-4. 실험에 사용된 휴대폰

표 4-4. 선정된 휴대폰의 design specification

(단위: mm(길이), mm<sup>2</sup>(면적))

Button layout area	Index of difficulty	Button layout			Button				Body		Index of difficulty
		가로	세로	면적	가로 길이	세로 길이	가로 간격	세로 간격	Grip span	Grip length	
Small	High	34	29	986	11	5.5	12	7	42	80	144.2
Medium	High	40	28.5	1140	11.5	5.5	14	7.6	48	85.5	144.4
Large	High	35	36	1260	8	8	13	9.3	45.4	91.5	143.7
Medium	Low	36	32	1152	12	8	12	8	42	85	116.2

#### 4.3.2 종속 변수

서로 다른 디자인의 휴대폰을 사용할 때 손 동작의 차이를 측정하기 위해서 작업 수행 시간, 엄지손가락의 각도, 엄지 tip의 이동궤적이 종속 변수로 사용되었다. 작업 수행 시간은 실험 진행자가 작업 시작을 지시한 시간부터 실험참여자가 수행작업 완료를 말할 때까지의 시간으로써 동작 분석 시스템의 data 기록 file에 motion data와 함께 저장되었다. 엄지손가락의 IP (1 dof), MCP (1 dof), CMC (2 dof)에 대해서 각도가 측정이 되었으며, 엄지손가락에서 발생하는 flexion의 합과 CMC의 deviation을 포함한 전체 각도의 합을 추가로 계산하였다. 각 각도 측정치에 대해서 작업간 평균 각도, 작업간 각도 변화 누적량, 최대값, 최소값이 분석되었다. 엄지 tip에 부착된 marker의 좌표 정보를 이용해 엄지 tip의 이동궤적을 계산하였으며, 초당 이동 궤적과 작업간 궤적 누적량이 분석되었다.

실험참여자가 주관적으로 느끼는 만족도 또는 불편도를 측정하기 위해

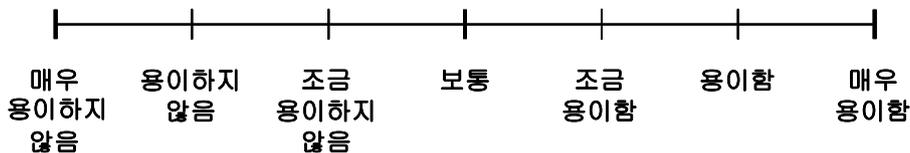
서 design questionnaire와 주관적 만족도가 사용되었다. 실험참여자들이 각 휴대폰의 design specification에 대해 느끼는 만족도를 측정하기 위해서 휴대폰 grip span, grip length, button size, button gap에 대한 만족도가 7점 Likert - scale로 측정되었다. 그림 4-5(a)는 design questionnaire에 사용된 scale로써 사용자가 가장 만족하는 경우 가운데의 '만족함'을 선택하고 specification이 크거나 작음에 따라 좌우로 scale을 선택할 수 있도록 했다. 마지막으로, 그림 4-5(b)와 같이 엄지손가락에 대한 조작 용이성을 평가하기 위해서, 버튼에 도달할 때 느껴지는 도달 용이성과 버튼간에 이동하면서 느끼는 이동 용이성을 7점 척도로 측정하였다. 표 4-5는 각 주관적 만족도의 정의를 나타내고 있다.

표 4-5. 주관적 만족도의 정의

용어	설명
엄지 도달 용이성	사방에 배열되어 있는 버튼을 접근(도달)하기 편리한 정도
엄지 이동 용이성	Keypad 조작 시 버튼간에 엄지의 이동이 편리한 정도



(a) Design specification: grip span의 예



(b) 엄지 도달 용이성 및 이동 용이성

그림 4-5. 주관적 평가에 사용된 scale

#### 4.4 실험 절차

손 동작 측정 및 제품 평가 실험은 크게 실험 준비, 실험 수행, 주관적 평가의 세 단계로 진행되었다. 실험 준비 단계에서는 실험참여자의 손에 **reflective marker**를 부착하고, 각 휴대폰의 문자 입력 단계까지의 메뉴 구조 및 문자 입력 내용을 숙지하도록 하였다. 실험 수행 단계에서 실험참여자는 12번의 작업을 **randomization**된 순서로 진행하였으며, 휴대폰의 문자 입력에 실수가 발생할 경우 해당 실험은 다시 측정하였다. 마지막으로 주관적 평가 단계에서는 **design questionnaire**와 주관적 만족도에 대한 평가를 실시하였다.

#### 4.5 적용 결과

본 연구의 실험결과는 독립변수인 **Index of difficulty**와 **button layout** 면적을 **factor**로 가지는 두 개의 실험으로 분리되어 분석되었다. **Index of difficulty**와 **button layout** 면적 두 **factor** 가운데, 한 **factor**의 수준이 동일한 휴대폰에 대해서 다른 **factor**에 의한 영향을 분석하였다. 각 실험에 대해서 작업 수행 시간, 관절 부위별 각도, 손가락 **tip**의 이동궤적과 같은 객관적 측정치를 **ANOVA**를 통해서 분석하였으며, 엄지 손가락의 조작 용이성과 **design questionnaire** 결과를 분석하였다. 문자 입력 과정에서 실수가 발생한 경우, 해당 작업은 재 수행하였다.

#### 4.5.1 Button layout 면적의 차이에 따른 효과

작업 수행 시간을 분석한 결과, button layout 면적이 커질수록 작업 수행 시간은 유의하게 증가하였으나, 실험참여자의 손 크기는 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. Layout에 따라 작업 수행 시간에는 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었으며( $F(2, 18)=3.58, p=0.049$ ), Bonferroni t-test 결과, layout이 작은 휴대폰이 나머지 휴대폰과 유의한 차이를 보이는 것으로 분석되었다(표 4-7 참조). Layout이 작은 휴대폰의 경우 평균 27.1초의 작업 수행 시간이 걸렸으며, 중간 휴대폰과 큰 휴대폰은 각각 평균 24.4초, 24.1초로서 그 차이는 최대 3.0초인 것으로 분석되었다(그림 4-6 참조).

표 4-7. Button layout area 차이에 따른 작업 수행 시간 분산분석 결과

Source	df	SS	MS	F 값	p 값
피실험자 그룹(G)	2	2467.78	1233.90	1.27	0.326
피실험자(S)[G]	9	8720.03	968.89		
Layout (L)	2	192.17	96.08	3.58	0.049
L x G	4	119.68	29.92	1.11	0.381
L x S[G]	18	483.42	26.86		
Total	35	11983.07			

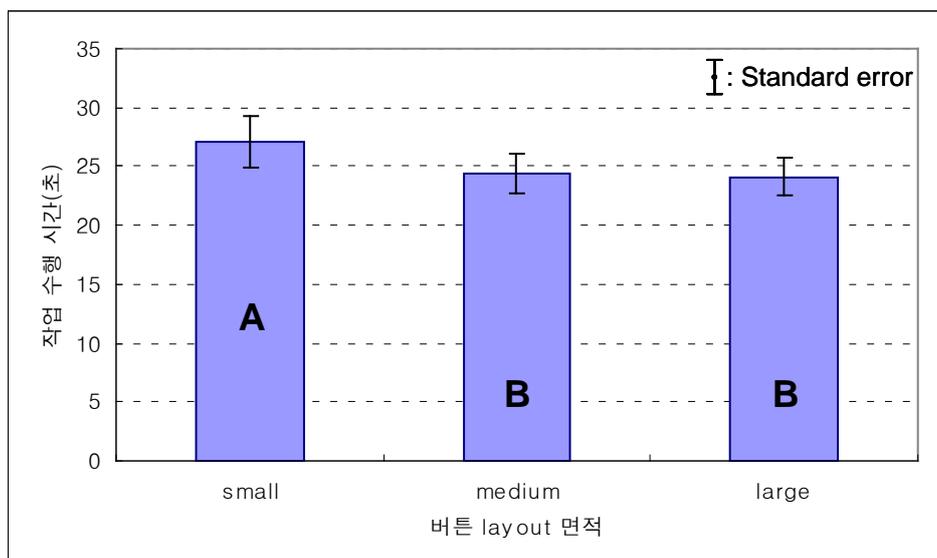
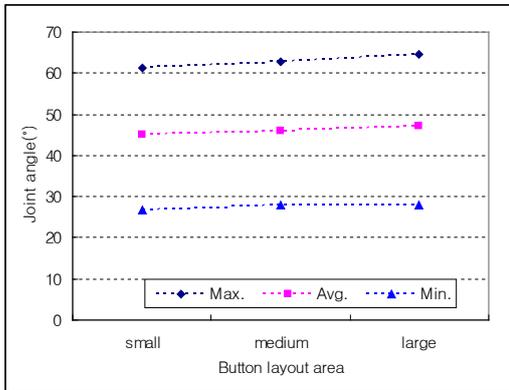
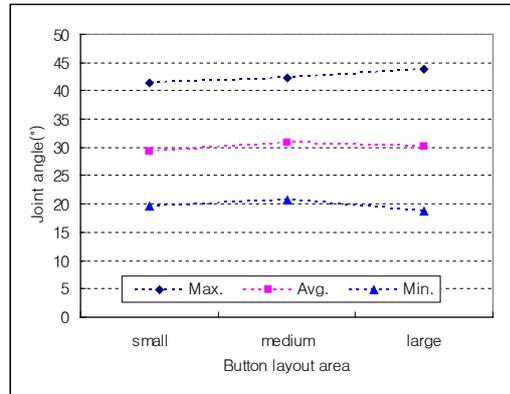


그림 4-6. Button layout 면적 차이에 따른 작업 수행 시간

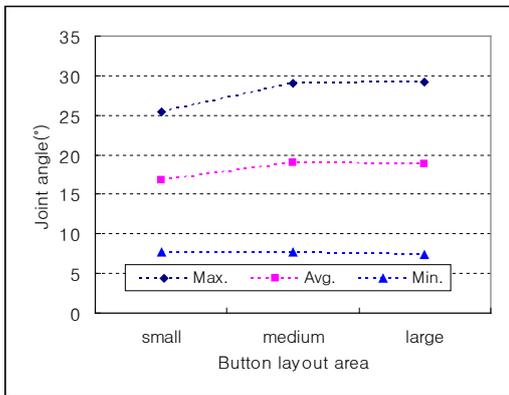
손가락의 관절 별 각도 범위를 분석한 결과, 평균 각도와 움직임의 범위는 버튼 layout이 커질수록 증가하는 것으로 나타났으나 그 차이는 미미하였다(그림 4-7 참조). Layout이 넓은 휴대폰에서의 IP의 평균 각도는 47.3 도로 가장 크게 나타났으며, MCP (30.1 도), CMC flexion (18.8 도), CMC deviation (15.1 도) 순으로 손 끝으로 갈수록 평균 각도가 큰 것으로 분석되었다. 또한, Layout이 넓은 휴대폰에서의 IP의 움직임 범위는 36.5 도로 가장 크게 나타났으며, MCP (25.1 도), CMC flexion (21.8 도), CMC deviation (14.7 도) 순으로 손 끝으로 갈수록 움직임 범위가 큰 것으로 분석되었다.



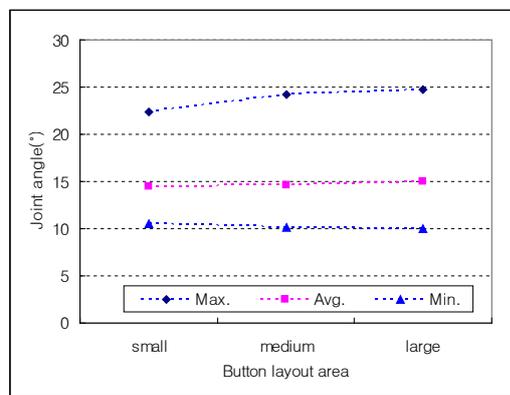
(a) IP flexion



(b) MCP flexion



(c) CMC flexion

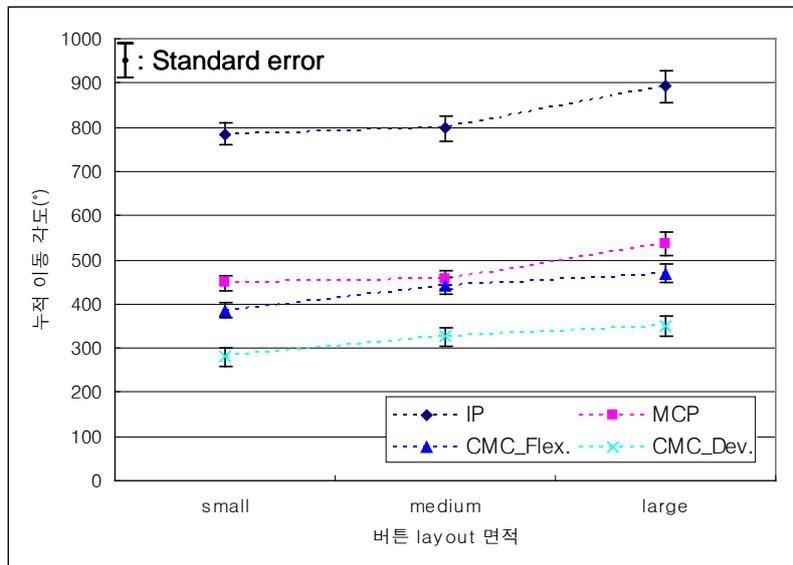


(d) CMC deviation

그림 4-7. Button layout 면적 차이에 따른 관절 별 각도 범위

각도 변화 누적량을 통해 손가락의 움직임을 분석한 결과, layout 면적이 넓어질수록 손가락 관절의 움직임도 유의하게 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 관절의 최대값과 유사한 것으로 나타났으며, 휴대폰 사용시 손가락의 움직임을 정량화하는 것이 가능하다. Layout 면적에 따라 IP ( $F(2, 18)=5.85, p=0.011$ ), MCP ( $F(2, 18)=8.24, p=0.003$ ), CMC flexion ( $F(2, 18)=6.9$ ,

$p=0.006$ ) 및 deviation ( $F(2, 18)=4.06, p=0.035$ ) 각도가 모두 유의한 차이를 보였다(그림 4-8 참조). Layout이 넓은 휴대폰과 작은 휴대폰의 각도 변화 누적량의 차이는 IP가 107.2도로 가장 큰 것으로 분석되었으며, MCP (87.0도), CMC flexion (83.1도), CMC deviation (69.5도) 순으로 관절의 위치가 손 끝에 위치할수록 크게 나타났다. 전체 각도 합은 layout 크기에 따라 최대 347도 차이가 나는 것으로 나타났다.



(a) 관절 별 각도 변화 누적량

그림 4-8. Button layout 면적 차이에 따른 관절 별 각도 변화 누적량

엄지손가락 tip의 초당 이동 궤적에 대한 분석 결과, layout 면적이 넓을수록 손가락의 움직임이 빨라지는 것으로 나타났다. Layout 면적에 따라 초당 이동 궤적은 유의한 차이를 보였으며( $F(2, 18)=15.62, p<0.001$ ), SNK 분석 결과

세 가지 휴대폰 모두 서로 유의한 차이를 보이는 것으로 분석되었다(그림 4-9 참조). 초당 이동 궤적 값은 각각 45.7 mm/s(작은 휴대폰), 51.8 mm/s(중간 휴대폰), 56.2 mm/s(넓은 휴대폰)으로 최대 10.5 mm/s의 차이가 났으며, layout 면적이 28% 증가할 때 초당 이동 궤적은 23%가량 증가하는 것으로 분석되었다.

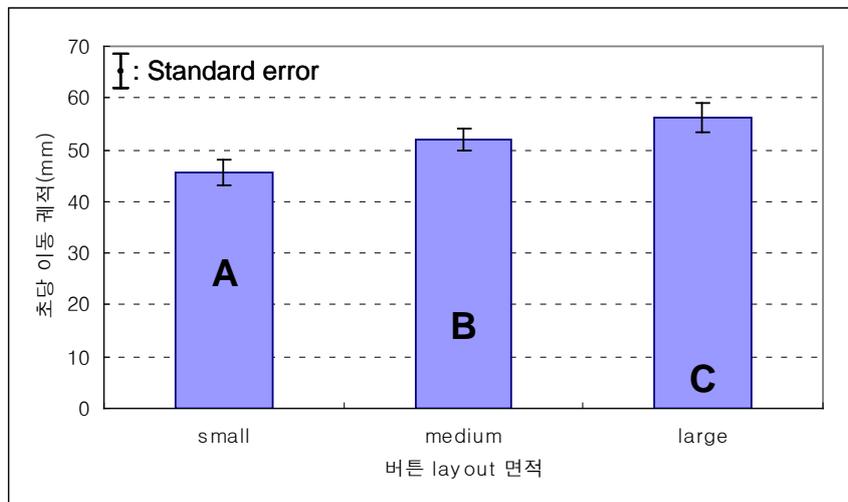


그림 4-9. Button layout 면적 차이에 따른 tip의 초당 이동 궤적

엄지손가락 tip의 누적 이동 궤적에 대한 분석 결과, layout 면적이 넓어질수록 tip의 이동궤적이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 관절의 각도 변화 누적량과 유사한 경향으로, 각도 변화 누적량과 함께 누적 이동 궤적이 손가락의 움직임을 정량화 할 수 있는 것으로 분석된다. 누적 이동 궤적과 각도 변화 누적량 사이의 상관 계수를 구해본 결과, 0.82로 높은 상관관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. Layout 면적에 따라 누적 이동 궤적은 유의한

차이를 보였으며( $F(2, 18)=14.24, p<0.001$ ), SNK 분석 결과 세 가지 휴대폰 모두 서로 유의한 차이를 보이는 것으로 분석되었다(그림 4-10 참조). 누적 이동 궤적 값은 각각 1081.1 mm(작은 휴대폰), 1162.9 mm(중간 휴대폰), 1233.7 mm(넓은 휴대폰)으로 최대 152.6 mm의 차이가 났으며, layout 면적이 28% 증가할 때 이동 궤적은 14%가량 증가하는 것으로 분석되었다.

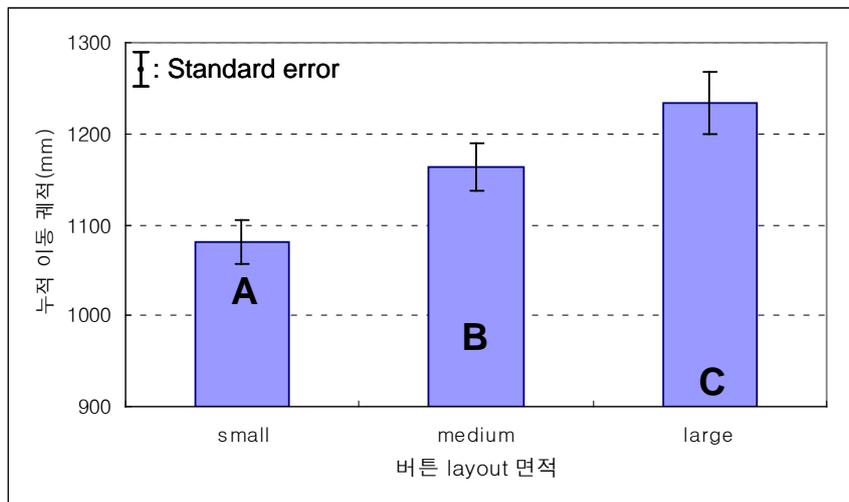
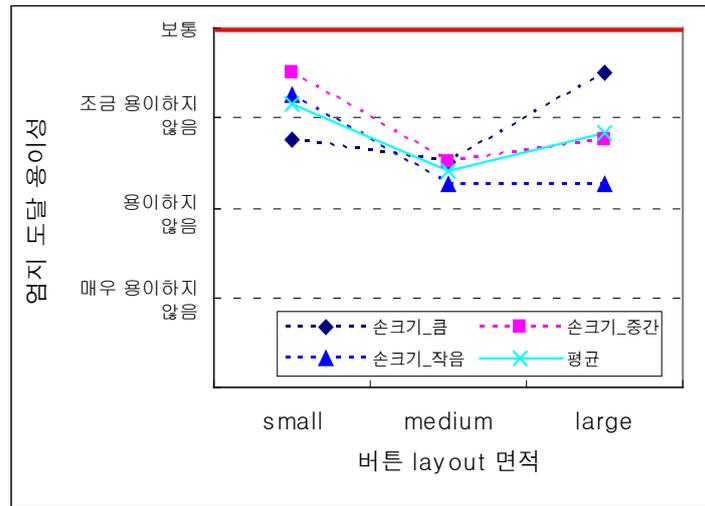


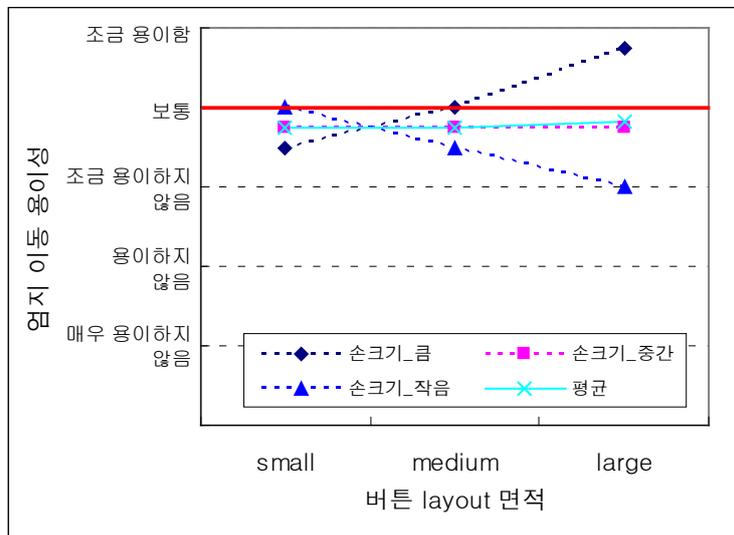
그림 4-10. Button layout 면적 차이에 따른 tip의 초당 이동 궤적

엄지손가락의 조작 용이성에 대한 주관적 만족도를 분석한 결과, 손 크기에 따라 선호하는 휴대폰이 다른 것으로 분석되었다(그림 4-11 참조). 엄지손가락에 대한 도달 용이성을 분석한 결과 손이 큰 사람은 상대적으로 layout이 넓은 휴대폰을 조작하기 용이했던 반면, 손 크기가 작거나 중간인 사람은 layout이 작은 휴대폰이 상대적으로 조작하기 용이한 것으로 나타났다. 엄지손가락에 대한 이동 용이성을 분석한 결과 손이 큰 사람은 layout이 클수록 용

이한 반면, 손이 작은 사람은 layout이 클수록 용이성이 떨어지는 것으로 나타나 상반된 결과를 보여주었다.



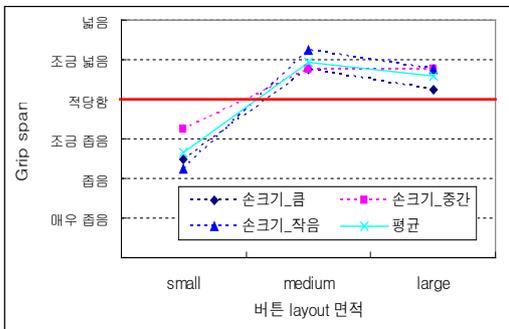
(a) Button layout 면적에 따른 엄지 도달 용이성



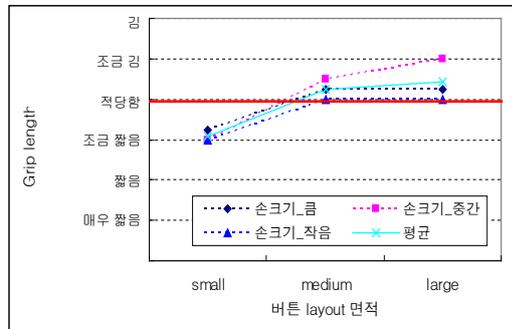
(b) Button layout 면적에 따른 엄지 이동 용이성

그림 4-11. Button layout 면적 차이에 따른 엄지 조작 용이성

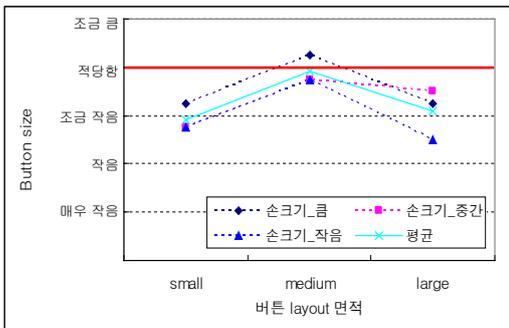
휴대폰 design에 대한 만족도를 분석한 결과, grip length, button size, button distance 측면에서 layout이 넓은 휴대폰이 선호되었으며, grip span 측면에서는 layout이 좁은 휴대폰이 선호되었다(그림 4-12 참조). Design specification에 대한 만족도는 손 크기에 따라 뚜렷한 경향의 차이를 보이지 않았다.



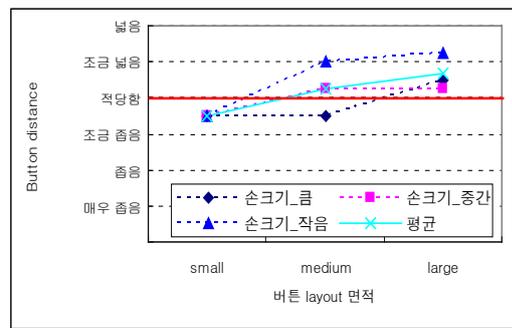
(a) Grip span



(b) Grip length



(c) Button size



(d) Button distance

그림 4-12. Design questionnaire 분석 결과

#### 4.5.2 Index of difficulty 차이에 따른 효과

작업 수행 시간을 분석한 결과, Index of difficulty가 낮은 휴대폰이 상대적으로 짧은 작업 수행 시간을 보였으나(표 4-8 참조), 그 차이는 유의하지 않았다( $F(2, 9)=4.18, p=0.071$ ). Index of difficulty가 낮은 휴대폰과 높은 휴대폰은 각각 평균 24.4초, 23.0초의 작업 수행시간을 보였으며, 그 차이는 1.4초였다(그림 4-13 참조).

표 4-8. Index of difficulty 차이에 따른 작업 수행 시간 분산분석 결과

Source	df	SS	MS	F 값	p 값
피실험자 그룹(G)	2	1321.25	660.63	1.77	0.225
피실험자(S)[G]	9	3365.02	373.89		
ID (I)	1	37.98	37.98	4.18	0.071
I x G	2	68.96	34.48	3.80	0.064
I x S[G]	9	81.74	81.74		
Total	23	4874.96			

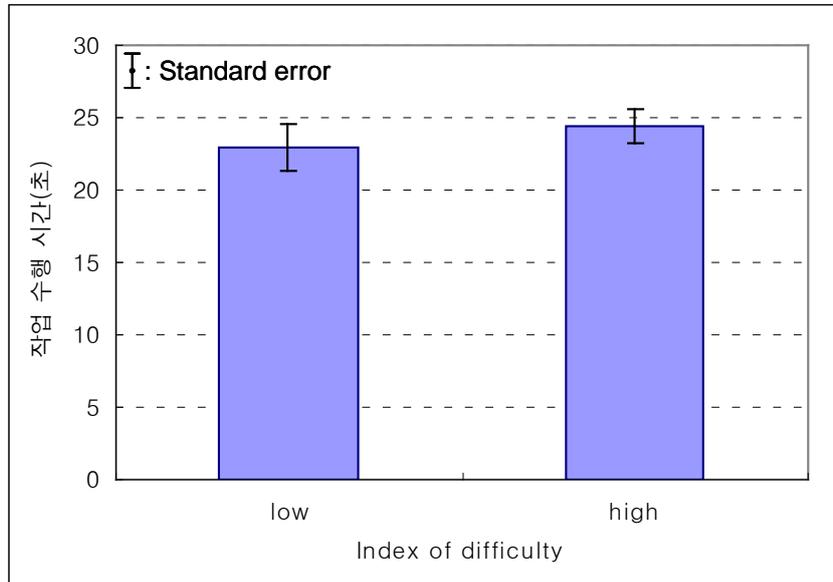
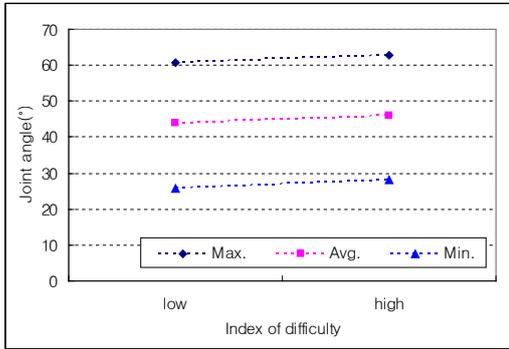
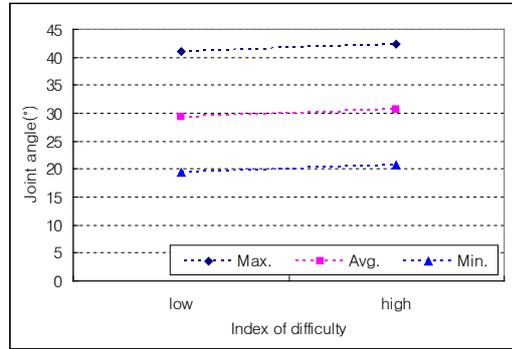


그림 4-13. Index of difficulty 차이에 따른 작업 수행 시간

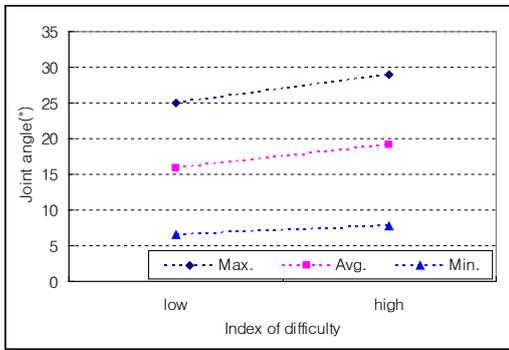
손가락의 관절 별 각도 범위를 분석한 결과, 평균 각도는 Index of difficulty가 커질수록 증가하는 것으로 나타났으나 그 차이는 미미하였다(그림 4-14 참조). Index가 큰 휴대폰에서의 IP의 평균 각도는 46.1 도로 가장 크게 나타났으며, MCP (30.7 도), CMC flexion (19.1 도), CMC deviation (14.6 도) 순으로 손 끝으로 갈수록 평균 각도가 큰 것으로 분석되었다. 또한, Layout이 넓은 휴대폰에서의 IP의 움직임 범위는 34.7 도로 가장 크게 나타났으며, MCP (21.6 도), CMC flexion (21.4 도), CMC deviation (14.1 도) 순으로 손 끝으로 갈수록 움직임 범위가 큰 것으로 분석되었다.



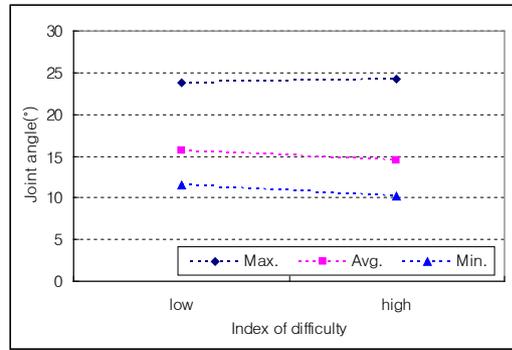
(a) IP flexion



(b) MCP flexion



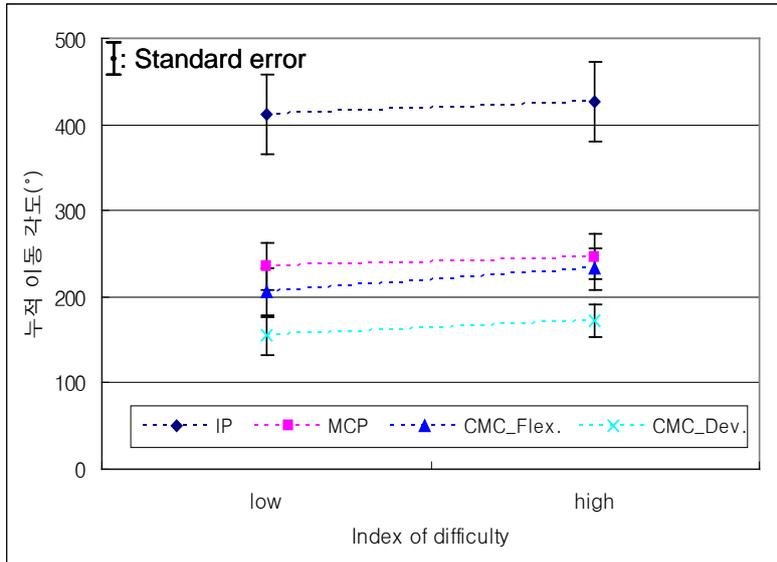
(c) CMC flexion



(d) CMC deviation

그림 4-14. Index of difficulty 차이에 따른 관절 별 각도 범위

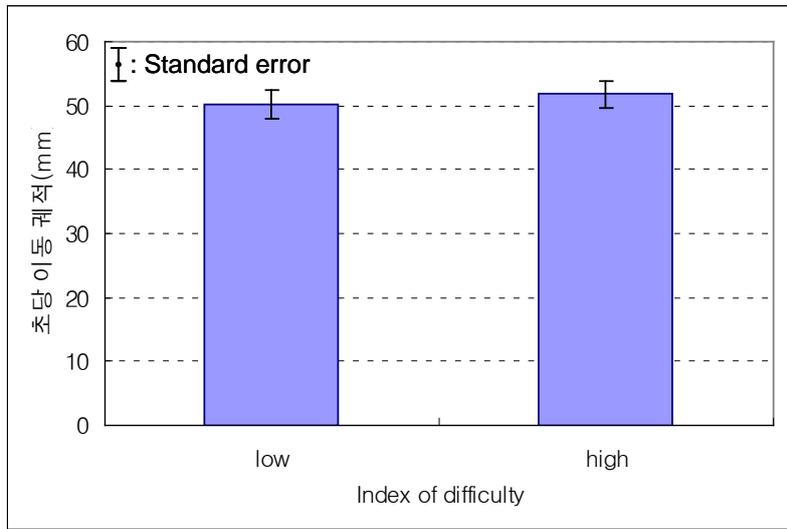
각도 변화 누적량은 Index of difficulty가 높은 휴대폰이 더 높은 것으로 나타났으나 그 차이는 유의하지 않았다(그림 4-15 참조). Layout 면적에 따른 각도 변화 누적량이 모든 관절에서 유의하게 차이가 났던 반면, layout 면적이 동일한 휴대폰간에는 유의한 차이가 나지 않아 layout 면적에 따른 손가락의 움직임 차이를 각도 변화 누적량을 통해서 분석할 수 있음을 알 수 있었다. Index가 낮은 휴대폰과 높은 휴대폰의 전체 각도 합은 각각 2017.4도, 1909.0도로 108.4도의 차이를 보였다.



(a) 관절 별 각도 변화 누적량

그림 4-15. Index of difficulty 차이에 따른 관절 별 각도 변화 누적량

엄지손가락 tip의 초당 이동 궤적은 유의한 차이를 보이지 않았으며, 누적 이동 궤적은 Index of difficulty가 높은 휴대폰이 상대적으로 높은 값을 보였다. 버튼 layout 면적이 유사하더라도 버튼의 크기 또는 간격에 따라 엄지손가락의 이동량이 유의하게 차이가 날 수 있음을 알 수 있다( $F(2, 9)=11.01$ ,  $p=0.009$ ). 높은 index의 휴대폰이 평균 1162.9 mm로 낮은 index의 휴대폰의 누적 이동 궤적 1075.3 mm와 비교했을 때, 87.6 mm 더 큰 값을 보였다(그림 4-16 참조).



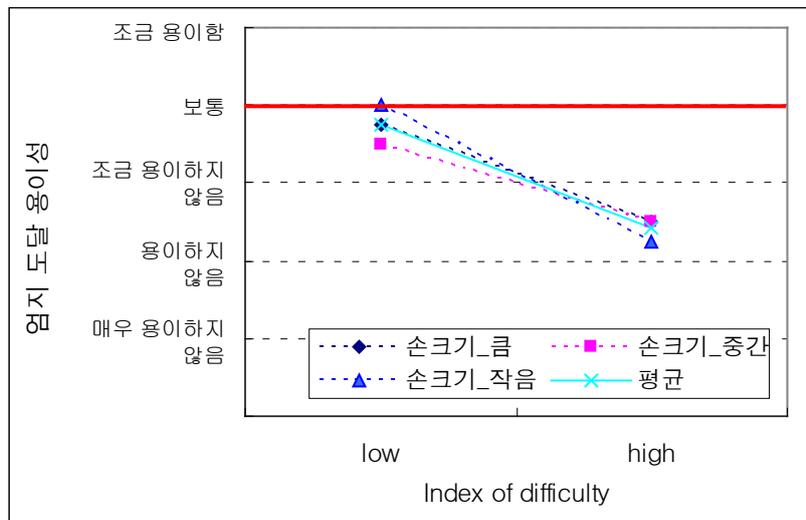
(a) 초당 이동 궤적



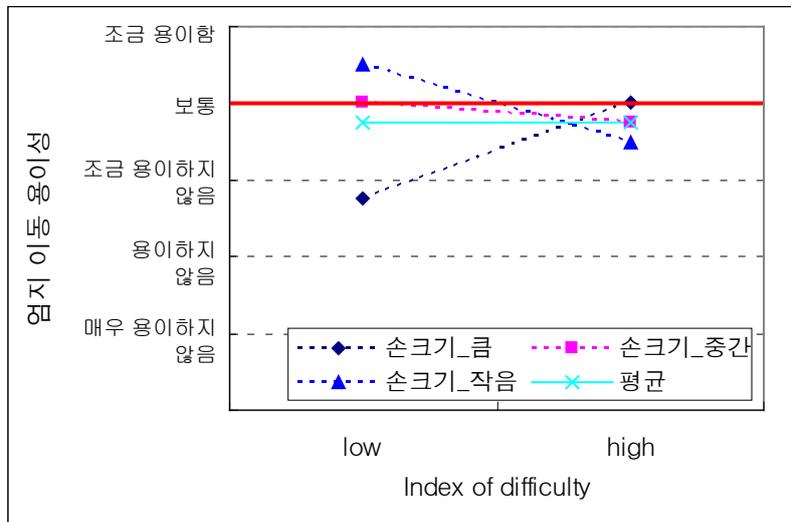
(b) 누적 이동 궤적

그림 4-16. Index of difficulty 차이에 따른 tip의 이동 궤적

엄지손가락의 도달 용이성은 index가 낮은 휴대폰이 높은 만족도를 보였으며, 이동 용이성은 손 크기에 따라 선호하는 휴대폰이 다른 것으로 분석되었다. 엄지 도달 용이성을 분석한 결과 그림 4-17(a)에 보이는 바와 같이 index가 낮은 휴대폰이 높은 만족도를 보였으며, 이러한 결과는 index가 낮은 휴대폰이 객관적 측정치에서 낮은 각도 최대값 또는 이동량을 보인 것과 일치하는 경향을 보여주고 있다. 엄지 조작 용이성을 분석한 결과 그림 4-17(b)에 보이는 바와 같이 손 크기가 큰 사람은 버튼이 크고 버튼 간격이 좁은 low index의 휴대폰을 선호한 반면, 손 크기가 작은 사람은 반대의 경향을 보이는 것으로 나타났다.



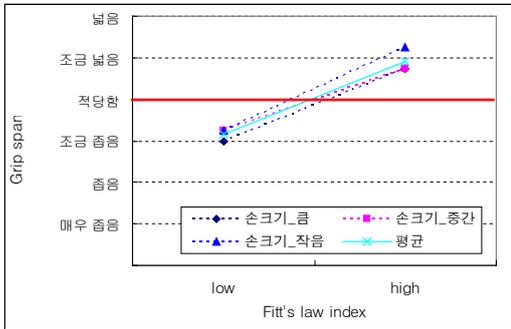
(a) Index of difficulty 차이에 따른 엄지 도달 용이성



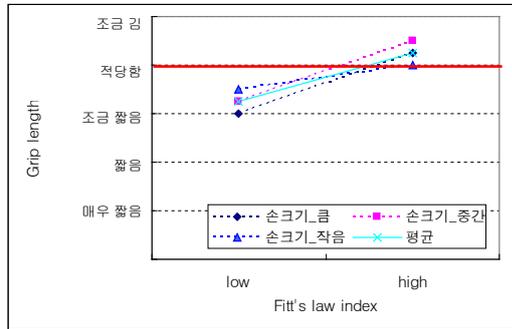
(b) Index of difficulty 차이에 따른 엄지 이동 용이성

그림 4-17. Index of difficulty 차이에 따른 엄지 조작 용이성

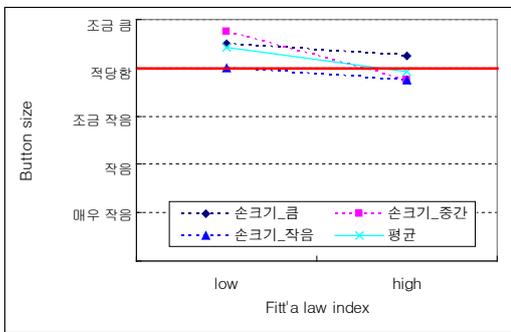
휴대폰 design에 대한 만족도를 분석한 결과, grip span은 index가 작은 휴대폰은 더 선호하는 것으로 나타났으며, grip length와 button size는 index가 높은 휴대폰이 더 적당한 것으로 나타났으나 그 차이는 미미하였다(그림 4-18 참조). 버튼간 거리는 손 크기가 작을수록 index가 높은 휴대폰의 버튼간 거리를 더 크게 느끼는 것으로 나타나 손 크기에 따라 약간의 차이를 보였다.



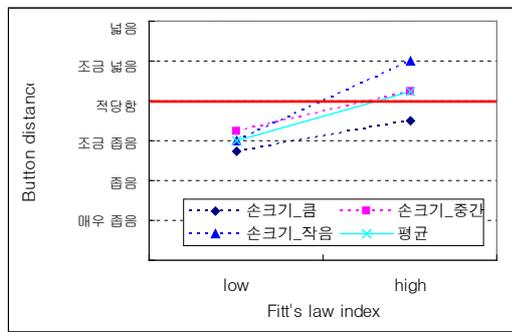
(a) Grip span



(b) Grip length



(c) Button size



(d) Button distance

그림 4-18. Design questionnaire 분석 결과

## 5. 토의

본 연구는 motion capture system을 이용하여 손 동작을 측정함으로써 제품 설계 특성에 따른 손의 자세 및 움직임을 정량화하고자 하였다. 본 연구에서는 motion capture system을 이용하여 task 수행 시 측정 장비의 간섭을 최소화하였으며, 손의 여러 관절로부터 산출되는 각도 및 궤적 정보를 동시에 측정할 수 있었다. 손의 각도 정보 계산을 위해서 손등 부위에 기준이 되는 평면을 정의하였으며, 각 손가락과 손목에 대해 기준평면에 수직인 평면을 정의함으로써 각도 산출을 용이하게 하였다.

본 연구에서는 손 동작 측정 및 분석 방법을 휴대폰 문자 입력 작업에 적용하여, 손의 각도 및 이동 궤적 정보를 분석하였다. 작업간 손가락의 평균 각도는 산출함으로써 측정된 손가락의 작업간 평균자세를 파악할 수 있었으며, 손가락 각도의 최대값을 산출함으로써 손가락에서 발생할 수 있는 부적절한 자세를 파악할 수 있었다. 또한, 각도 변화 누적량을 산출함으로써 작업간 손가락의 각도 변화를 정량화하는 것이 가능하였다. 마지막으로, 손가락 tip에 부착된 marker의 초당 이동 궤적을 산출함으로써 작업 시 손가락이 움직이는 속도를 분석할 수 있었으며, 누적 이동 궤적을 통해 손가락이 움직이는 경로의 합을 파악함으로써 손가락의 움직임을 정량화 할 수 있었다. 누적 이동 궤적은 각도 변화 누적량과 상관계수 0.82의 높은 상관관계를 보임으로써 각도 변화 누적량과 함께 손가락의 움직임을 정량화 할 수 있는 척도로 사용하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 휴대폰 버튼 layout 면적 차이에 따른 손 동작을 측정함으로써, 손가락의 자세와 움직임 양을 평가하였다. 분석 결과, 버튼 layout 면적이 증가함에 따라 엄지손가락의 평균자세에는 큰 차이가 없었으나, 손가락이 최대로 굽혀진 각도는 layout 면적이 클수록 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 각도 변화 누적량과 누적 이동 궤적을 분석한 결과, layout 면적이 증가함에 따라 손의 움직임 양도 많아지는 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 휴대폰의 문자입력 작업 수행 시 layout 면적 차이에 따른 손의 자세 변화와 움직임을 정량화 하는 것이 가능하며, 빈번한 문자입력 작업 수행 시 손가락의 부하를 비교 예측할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 휴대폰 버튼의 Index of difficulty 차이에 따른 손 동작을 측정함으로써, 손가락의 자세와 움직임을 분석하였다. 분석 결과, 엄지손가락의 평균자세 및 최대값인 CMC flexion을 제외하고는 큰 차이가 없는 것으로 분석되어, 버튼 layout 면적이 유사한 경우 손의 자세가 유사하게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 각도 변화 누적량과 누적 이동 궤적 값에서는 Index of difficulty가 낮은 휴대폰의 측정치가 낮은 경향을 보였으며, 이러한 경향은 Index of difficulty가 낮은 휴대폰의 버튼의 크기가 상대적으로 크고 버튼 사이에 공간이 없기 때문에 버튼을 누를 때 버튼의 중심이 아닌 부분을 누름으로써, 이동 거리가 줄어든 것으로 생각된다. 따라서, 동일한 버튼 layout 면적에 버튼을 설계할 때 손가락의 움직임을 줄이기 위해서는 상대적으로 큰 버튼을 사용하는 것이 바람직할 것이다.

마지막으로, 본 연구에서 손 크기에 따라 사용자를 나누어 분석한 결과,

객관적 측정치에서는 손 크기 별 차이가 거의 나타나지 않았으나, 주관적 만족도에서는 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 실험에서 측정된 손가락 각도와 궤적과 같은 객관적 측정치에서는 사용자의 손 크기 별로 크게 다른 경향이 나타나지 않았으나, 엄지 도달 용이성과 이동 용이성 같은 주관적 만족도에서는 손 크기에 따른 선호도의 차이가 나타났다. 이러한 결과를 통해 사용자가 단시간 문자 입력 작업을 수행하였을 때, 손가락의 정량적 움직임과 perception에는 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서, 제품 설계 시 적절한 design specification을 설정하기 위해서는 이러한 객관적 측정치와 주관적 만족도 두 가지 모두를 고려하는 것이 요구되며, 장시간 작업 시 만족도 또는 손가락의 불편도의 변화를 추가로 고려하는 것이 필요하다.

## 6. 결론

본 연구는 motion capture system을 이용하여 손 동작을 측정 및 분석하는 방법을 제안하고, 휴대폰 문자 입력 작업에 적용하였다. 첫째, motion capture system을 이용하여 손동작을 측정하고 손가락의 각도를 효율적으로 계산할 수 있는 방법을 제시하였으며, 측정된 손 동작을 시각화 할 수 있는 3D hand model을 3D modeling software인 Maya와 인체 뼈대 생성 software인 SI를 이용하여 제작하였다. 둘째, 휴대폰의 버튼 layout 면적과 Index of difficulty 차이에 따른 측정값의 차이를 작업 수행 시간, 손가락의 각도, tip의 이동궤적과 같은 객관적 측정치와 엄지 조작 용이성과 같은 주관적 만족도로 측정하였다. 분석 결과, 휴대폰의 design specification의 차이에 따라 손가락의 평균자세와 부적절한 자세, 동작 속도 및 양에 차이가 있는 것으로 파악되었다. 또한 엄지 이동 용이성과 같은 주관적 만족도에서는 사용자의 손 크기 별로 만족도의 차이가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안된 손 동작 측정 방법을 바탕으로 주관적 만족도의 측정과 제품의 design specification의 설정에 관한 추가 연구가 필요하다. 손 동작 측정 방법의 휴대폰에 대한 적용 결과, 일부 객관적 측정치와 주관적 만족도 사이에 경향의 차이가 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 두 가지 측정치 사이의 특성을 비교 분석하고, 가장 선호되는 design specification을 찾는 연구가 요구된다. 또한, 관심이 있는 특정 design specification의 수준을 체계적으로 설정하여 평가를 수행함으로써 사용자 손 동작을 측정하고 만족도를 측정한다

면, 제품 설계자에게 좀더 명확한 **design guideline** 또는 치수 정보를 제시할 수 있을 것이다.

본 연구를 통해서 제품 사용시 손 동작을 각도 또는 이동궤적을 이용하여 정량화하는 것이 가능하며, 이러한 정보를 제품 설계 시 **design specification**을 설정하는데 활용함으로써 제품 설계를 평가하고 편의성을 높이는 데 활용될 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- 기술표준원 (2005). 제 5차 한국인 인체치수조사 자료: 직접측정에 의한 인체 치수 통계.
- 김원석 (2005). 삼성, 듀얼 쿼티폰 출시, *전자신문*. Retrieved December 13, 2005, from <http://www.etnews.co.kr/news/detail.html?id=200511020026>
- 류태범 (2000). 잡기 동작 동안의 손관절 각변위 유형분석. 석사학위논문, 포항공대.
- 이준규 (2004). e 피로증후군 “족쇄야, 족쇄”. *경향신문*. Retrieved December 13, 2005, from [http://www.khan.co.kr/section/art\\_view.html?artid=200408091548191z&code=900102](http://www.khan.co.kr/section/art_view.html?artid=200408091548191z&code=900102)
- 최연진 (2005). KTF, 휴대폰 문자메시지 음성통화 발신건수 앞질러. *한국일보*. Retrieved December 13, 2005, from <http://news.hankooki.com/lpage/economy/200507/h2005072718020321540.htm>
- 최훈우 (2005). 한국 20대 남녀의 정상보행에 대한 운동형상학 및 운동역학적 평가. 석사학위논문, 포항공대.
- Buchholz, B. O. (1992). A kinematic model of the human hand to evaluate its prehensile capabilities, *Journal of Biomechanics*, 25(2), 149-162.
- Chaffin, D. B., Andersson, G. B., and Martin, B. J. (1999). *Occupational Biomechanics(3rd ed.)*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Chao, E. Y., An, K. N., Cooney, W. P., and Linscheid, R. L. (1989). *Biomechanics*

- of the hand: A basic research study(1st ed.)*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Chiu, H., Su, F. C., Wang, S., and Hsu, H. Y. (1998). The motion analysis system and goniometry of the finger joint. *Journal of Hand Surgery*, 23B(6), 788-791.
- Kong, Y., and Freivalds, A. (2003). Evaluation of meat-hook handle shapes. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 32, 13-23.
- Nelson, J. E., Treaster, D. E., and Marras, W. S. (2000). Finger motion, wrist motion and tendon travel as a function of keyboard angles. *Clinical Biomechanics*, 15, 489-498.
- Somia, N., Rash, G. S., Wachowiak, M., and Gupta, A. (1998). The initiation and sequence of digital joint motion. *Journal of Hand Surgery*, 23B(6), 792-795.
- Treaster, D. E., and Marras, W. S. (2000). An assessment of alternative keyboard using finger motion, wrist motion and tendon travel. *Clinical Biomechanics*, 15, 499-503.
- You, H., Kumar, A., Young, R., Veluswamy, P., and Malzahn, D. E. (2005). An ergonomic evaluation of manual Cleco plier designs: Effects of rubber grip, spring recoil, and worksurface angle. *Applied Ergonomics*, 36, 575-583.
- Zhang, X., Lee, S., and Braido, P. (2003). Determining fingers segmental centers of rotation in flexion-extension based on surface marker measurement. *Journal of Biomechanics*, 36, 1097-1102.

## 부록 A. Design specification questionnaire

피실험자: \_\_\_\_\_ 실험 조건: \_\_\_\_\_ 일시: \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ :

### 1. 휴대폰 grip span



### 2. 휴대폰 grip length



### 3. 버튼의 크기



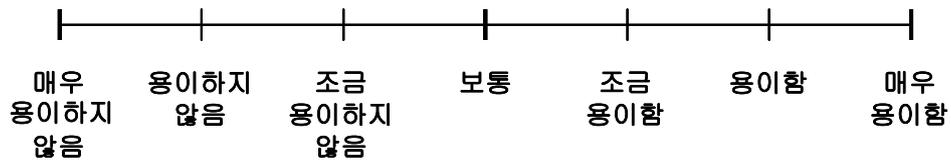
### 4. 버튼간의 간격



## 부록 B. Usability subjective rating

용어	설명
엄지 도달 용이성	사방에 배열되어 있는 버튼을 접근(도달)하기 편리한 정도
엄지 이동 용이성	Keypad 조작 시 버튼간에 엄지의 이동이 편리한 정도

### 1. 엄지 도달 용이성



### 2. 엄지 이동 용이성

