

석사학위논문

동작 분석을 통한
인간공학적 제품 설계 평가 프로세스 개발

장준호 (張俊鎬)

기계산업공학부 산업경영공학과 (인간공학 전공)

포항공과대학교 대학원

2007

동작 분석을 통한
인간공학적 제품 설계 평가 프로세스 개발

**Development of an Ergonomic Product Design
Evaluation Process Using Motion Analysis**

Development of an Ergonomic Product Design Evaluation Process Using Motion Analysis

by
Joonho Chang

**Department of Industrial & 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 the Industrial & Management
Engineering (Human Factors and Ergonomics Program)**

**Pohang, Korea
December 28, 2006
Approved by**

Heecheon You, Major Advisor

동작 분석을 통한
인간공학적 제품 설계 평가 프로세스 개발

장 준 호

위 논문은 포항공대 대학원 석사 학위논문으로 학위논문 심사위원회를 통과하였음을 인정합니다.

2006년 12월 28일

학위논문심사 위원회	위원장	유 희 천 (인)
	위 원	한 성 호 (인)
	위 원	김 광 재 (인)

MIE 20052246 **장준호, Joonho Chang, Ergonomic Product Design Evaluation Process Using Motion Anlysis, 동작 분석을 통한 인간공학적 제품 설계 평가 프로세스 개발, Department of Industrial & Management Engineering, 2007, 117p, Advisor: Heecheon You, Text in Korean.**

Abstract

The preferred posture and motion for the use of a product is an important point in the aspect for improvement of the usability between a user and product. This study is willing to develop the product design evaluation process which grasps the preferred and natural posture and motion for the use of a product quantitatively and compares it with the real product usage posture and motion. So, there are three objectives in this study. First is to grasp the natural and preferred posture and motion for the use of a product quantitatively and to verify the variation of it using the intra-variation, inter-variation, and standard of measurement. Second is to propose the ergonomic product design evaluation process using motion analysis including the method comparing the preferred and natural posture and motion for the use of a product with real product usage posture and motion. Finally is to prove the validation of the process applying to the vacuum cleaner (canister type) design evaluation.

The present study developed a process for ergonomic product evaluation using motion analysis. In the proposed process, the preferred posture and motion for the use of

a product were quantitatively measured to compare with the usage posture and motion for the product. The process consisted of 3-steps such as user interface analysis, preferred and product usage motion analysis, and design improvement. User interface analysis is the step to understand the characteristics of the product in terms of users, product usage activities, and physical interface. The second step is related to measurement and analysis of the preferred and product usage motion by using motion analysis system. Lastly, ergonomic evaluation and improvement for product designs are conducted based on comparison between the preferred and usage posture and motion(similarity).

To validate the proposed process, the present study applied the process to the evaluation of vacuum cleaner (canister type) designs. The preferred posture and motion without the vacuum cleaner and the product usage posture and motion with the vacuum cleaners are measured using Falcon motion capture system. Participants were 15 housewives (average age = 38; SD = 4.99) and the experimental design such as floor conditions and tasks based on the user interface analysis result. The 4 vacuum cleaners (A, B, C, D)having diverse design characteristics in terms of canister length, weight, and brush weight were selected as independent variables. Dependent variables were joint angle (Falcon), EMG (TeleMyo), and subjective rating (Borg's CR 10).

The intra-subject variation of the preferred and natural posture and motion was small (less than 5°overall), but the inter-variation which was over 10° overall and bigger than the intra-variation. Standard error of measurement was calculated small(less than 5° overall). The similarity (%) between the preferred and natural motion for the use of a cleaner and the cleaner usage motion was calculated in order: cleaner D>A=C>B and the

result of EMG was measured in similar order. In the result of subject rating, the cleaner A and D was most popular, and the cleaner D was most uncomfortable among 4 cleaners. The design problems such as canister length, weight, brush weight were found and the direction of design improvement was decided.

목차

1. 서론	1
1.1. 연구 배경 및 필요성.....	1
1.2. 연구 목표	4
1.3. 연구의 중요성.....	5
1.4. 논문 구성	7
2. 문헌 조사	8
2.1. 신체의 해부학적 구조.....	8
2.1.1. 손의 해부학적 구조	8
2.1.2. 전신의 해부학적 구조	10
2.2. 동작 분석 시스템.....	12
2.2.1. 3D motion capture system	12
2.2.2. Marker set.....	14
2.3. 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가 연구 동향.....	17
2.3.1. 손 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가	17
2.3.2. 전신 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가	19
3. 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 프로세스	22
3.1. 사용자 interface 분석.....	23
3.1.1. 제품 설계 특성 분석	23

3.1.2 사용자 특성 분석.....	24
3.1.3 사용 환경 특성 분석.....	24
3.1.4 제품 사용 작업 특성 분석.....	24
3.2. 제품 사용 동작 분석.....	25
3.2.1. 동작 분석 protocol 수립 및 측정.....	25
3.2.2. 동작 분석 및 제품 설계 평가.....	26
3.2.3. 결과 보완을 위한 별도의 객관적, 주관적 평가 방법의 도입.....	28
3.3. 제품 설계 개선 대상 및 방향 분석.....	28
4. 제품 설계 평가 프로세스 적용 - 밀대형 진공 청소기.....	30
4.1. 사용자 interface 분석 결과.....	30
4.1.1. 밀대형 진공 청소기 설계 특성 분석.....	30
4.1.2. 밀대형 진공 청소기 사용자 특성 분석.....	32
4.1.3. 밀대형 진공 청소기 사용 환경 특성 분석.....	33
4.1.4. 밀대형 진공 청소기 사용 작업 특성 분석.....	34
4.2. 밀대형 진공 청소기 사용 동작 분석 계획 및 측정.....	37
4.2.1. 실험 참여자.....	37
4.2.2. 실험 환경 구성.....	37
4.2.3. 수행 작업.....	38
4.2.4. 실험 계획.....	41
4.2.5. 동작 분석 시스템 및 reflective marker 설정.....	45
4.2.6. 동작 측정 및 기타 제약 사항.....	46

4.2.7. 후처리 과정	47
4.3. 동작 분석 보완을 위한 EMG 측정 및 불편도 측정	49
4.3.1. EMG 측정 계획	49
4.3.2. 불편도 측정 계획	50
4.4. 밀대형 진공 청소기 사용 동작 분석 및 설계 평가 결과	52
4.4.1. 자연스러운 청소기 사용 동작에 대한 분석 결과	52
4.4.2. 자연스러운 청소기 사용 동작 결과에 대한 변동성 파악	57
4.4.3. 유사도 평가	62
4.5. 제품 설계 평가 보완을 위한 EMG 측정 및 불편도 측정 결과	75
4.5.1. EMG 측정 결과	75
4.5.2. 불편도 측정 결과	78
4.6. 밀대형 진공 청소기 개선 대상 및 방향 분석	79
5. 토의	82
6. 결론	87
References	89
부록 1. 정량적으로 파악된 자연스러운 청소기 사용 동작	93
부록 2. 정량적으로 파악된 자연스러운 청소기 사용 동작 범위	100
부록 3. Task별 파악된 <i>SDme</i> , <i>SDmeas</i> , <i>SDme</i> 결과	103
부록 4. Task별 유사도 파악 결과	106
부록 5. 불편도 측정 결과	112

표 목차

표 2-1. 손 관절의 명칭	9
표 2-2. 신체 부위별 동작 자유도 및 명칭	12
표 2-3. 손 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가 예	19
표 2-4. 전신 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가 예	21
표 4-1. 구성 요소 별 제원 분석 및 설계 trend 분석 결과 예	32
표 4-2. 밀대형 진공 청소기 주요 사용 장소	34
표 4-3. Activity 별 연관 청소기 구성 요소 분석표 예	36
표 4-4. Activity 별 연관 신체 부위 분석표 예	36
표 4-5. 선별된 밀대형 진공 청소기의 설계 specification	44
표 4-6. 종속 변수로 선별된 신체 부위 및 동작 자유도	45
표 4-7. 초당 측정 프레임(FPS) 변화에 따른 팔꿈치 각도 data 분석 결과 예	49
표 4-8. EMG 부착 근육 및 관련 청소 동작	50
표 4-9. Task 별 주요하게 사용되는 신체 부위와 동작 범위 예	54
표 4-10. 공통적으로 주요하게 사용되는 관절 동작에 대한 task 별 분산분석	55
표 4-11. 사용자 내의 변동성(SD_{me}) 예	58
표 4-12. 사용자 간의 변동성(SD_x) 예	59

표 4-13. 자연스러운 청소기 사용 동작 범위와 SD_x 값의 비교 예	60
표 4-14. 측정 표준 오차(SD_{meas}) 예	61
표 4-15. 제자리 청소 동작 task 에서의 청소기 별 유사도 결과 예	64
표 4-16. 청소기 D 의 유사도가 높은 관절 동작에 대한 분산분석 결과	65
표 4-17. 전후 청소 동작 task 에서의 청소기 별 유사도 결과 예	70
표 4-18. 팔꿈치 굽히기 동작에 대한 분산분석 결과	70
표 4-19. 좌우 청소 동작 task 에서의 청소기 별 유사도 결과 예	73
표 4-20. 유의하게 파악된 관절 동작의 분산분석 결과	73
표 4-21. EMG 근육 별 SNK 분석 결과	77
표 4-22. 청소기 A 와 청소기 B 의 브러쉬 무게 비교	78
표 4-23. 전반적인 불편도 측정 결과	79
표 4-24. 청소기 A, B, C, D 에 파악된 주요 개선 사항	80
표 5-1. 측정 기준에 실용적 요구 사항 적용 결과	84

그림 목차

그림 1-1. 제품과 사용자 사이의 interface.....	1
그림 1-2. 자연스러운 사용 자세와 동작을 고려한 드럼세탁기 설계 개선	3
그림 2-1. 손의 골격 구조	8
그림 2-2. 전신 골격 구조	10
그림 2-3. 광학식 motion capture system 구성	14
그림 2-4. 손의 reflective marker set.....	15
그림 2-5. 대표적인 전신 reflective marker set.....	17
그림 2-6. Treaster and Marras 의 연구에 활용된 keyboard.....	18
그림 3-1. 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 프로세스	23
그림 3-2. 제품 설계 평가 방법 예	27
그림 3-3. 제품 설계 개선 방향 설정 예	29
그림 4-1. 밀대형 진공 청소기 구성 요소	31
그림 4-2. 하루 평균 청소기 사용 시간	33
그림 4-3. 청소기 주 사용 시간대	33
그림 4-4. 밀대형 진공 청소기 activity 분석 결과	35
그림 4-5. 실험실 바닥 구성	38
그림 4-6. 제자리 청소 동작	39
그림 4-7. 자연스러운 보폭과 각도	40

그림 4-8. 전후 이동 청소 동작	40
그림 4-9. 좌우 이동 청소 동작	41
그림 4-10. 실험 구성	42
그림 4-11. 평가대상으로 선정된 청소기	43
그림 4-12. 22 개의 reflective marker set.....	46
그림 4-13. Marker tracking 작업과 뼈대 구성	48
그림 4-14. EMG 부착 근육 위치	50
그림 4-15. 신체 부위 별 불편도 측정	51
그림 4-16. Borg CR-10.....	52
그림 4-17. Task 간의 SNK 분석 결과	56
그림 4-18. Task 별 평균 SEmeas 값 비교	62
그림 4-19. SNK 분석 결과	66
그림 4-20. 세 관절 동작의 유사도와 청소대 길이 및 무게의 비교	68
그림 4-21. 팔꿈치 굽히기 동작에서의 SNK 분석 결과	71
그림 4-22. SNK 분석 결과	75
그림 4-23. 제자리 청소 동작 task 수행 시 Carpi Ulnaris 근육의 힘 사용량 ..	78
그림 4-24. Swiveling 청소대 메커니즘	81

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 필요성

제품 사용시 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작은 제품의 사용성(usability)을 향상시키는 중요한 역할을 한다. 사용자와 제품의 interface 측면에서 사용성은 제품을 사용하는 자세, 동작, 힘, 감성에 의해 결정된다(그림 1-1 참조). 특히, 제품 사용 자세와 동작은 제품 사용시 사용자가 느끼는 편안함 및 제품의 효율성과 밀접한 관계가 있다. 사용 자세와 동작을 분석하여 새롭게 설계된 드럼세탁기 연구(Nyberg and Kempic, 2006)와 자연스러운 포인팅 자세를 유발하는 착용형 레이저포인터(Takahashi, 2005)의 연구는 제품 사용 자세 및 동작이 사용자가 느끼는 편안함 및 제품의 효율성에 주는 영향력을 보여주는 좋은 예이다. 그러므로, 제품과 사용자의 interface 측면에서 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세와 동작을 구현하는 것은 제품의 사용성을 향상시키는 중요한 요소이다.

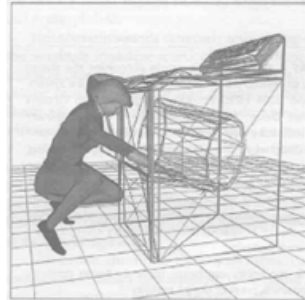


그림 1-1. 제품과 사용자 사이의 interface

제품의 사용성 향상을 위해 인간의 동작을 분석하여 제품 설계를 평가하고 반영하는 연구가 지속적으로 진행되어왔으나, 사용자가 선호하고 자연스러워하는 자세와 동작을 정량적으로 분석하여 제품 설계를 평가하고 설계에 반영하려는 연구는 미흡하다. 제품의 사용 자세와 동작을 분석하여 제품의 설계를 평가하는 연구는 손에 대한 연구와 전신에 대한 연구로 두 부분으로 진행되어 왔다. 손 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 연구는 주로 컴퓨터 마우스, 컴퓨터 키보드, 핸드폰 등 주로 **hand-device** 중심으로 평가가 이루어져 왔으며, 전신 동작 분석을 통한 제품 설계 평가의 경우 가구, 가전 제품, 신발, 공장 설비 등을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 이러한 손과 전신에 대한 대부분의 제품 설계 평가 연구가 제품의 효율성, 신체 부하 등을 객관적으로 평가하는 것에만 치우쳐져 사용자 입장에서의 편안하고 자연스러운 자세와 동작을 반영한 제품 설계 평가는 간과되고 있다. 최근에 Nyberg and Kempic(2006)의 연구(그림 1-2 참조)와 같이 사용자의 자연스러운 제품 사용 자세와 동작을 고려한 연구가 일부 진행되고 있으나, 역시 정량적인 측면에서 분석 방법이 미흡한 한계를 드러내고 있다.



(a) 개선 전



(b) 개선 후

그림 1-2. 자연스러운 사용 자세와 동작을 고려한 드럼세탁기 설계 개선

그러므로, 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세와 동작을 정량적으로 분석하여 제품의 설계를 평가하고 제품의 설계에 반영하는 체계적인 프로세스 개발이 필요하다. 사용자가 제품을 사용할 때 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 파악하기 위해 제품과 사용자에 대한 포괄적인 분석이 이루어져야 하며, 사용자가 제품을 사용하는 activity 들이 파악되어야 한다. 또한, 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 정량적으로 분석하는 방법이 필요하며 이를 기준으로 제품을 평가하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 사용자와 제품에 대한 포괄적인 이해를 통해 사용자가 선호하고 자연스러워하는 제품 사용 자세 및 동작과 실제 제품 사용 자세 및 동작을 비교 분석하여 제품의 설계를 평가하는 체계적인 인간공학적 제품 설계 평가 프로세스를 개발하고자 한다.

1.2. 연구 목표

본 연구는 제품에 대한 자연스러운 사용 자세 및 동작을 정량적으로 분석하고 실제 제품 사용 자세 및 동작과 비교 분석하여 제품을 평가하는 프로세스를 개발하고자 한다. 이를 위해 본 연구는 다음의 세 가지 세부 목표를 포함한다.

첫째, 동작 분석에 근거하여 제품에 대한 자연스러운 사용 자세 및 동작을 정량적으로 분석하고 실제 제품 사용 자세 및 동작과 비교 분석하여 제품을 평가하는 제품 설계 평가 프로세스를 개발한다. 본 연구는 사용자 interface 분석 단계와 제품 사용 동작 분석 단계로 구성된 제품 설계 평가 프로세스를 제안한다. 사용자 interface 분석 단계에서는 제품과 사용자 사이의 물리적인 interface 를 포괄적으로 분석하여 제품과 사용자의 특성을 파악한다. 제품 사용 동작 분석 단계에서는 사용자 interface 분석을 기반으로 동작 분석 protocol 을 수립하고 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작과 실제 제품 사용 자세 및 동작을 측정 및 비교 분석하여 제품의 설계를 평가한다.

둘째, 밀대형 진공 청소기 설계 평가에 적용하여 개발된 평가 프로세스의 타당성을 평가한다. 청소기와 사용자 사이의 물리적인 interface 분석을 수행하여 청소기와 청소기 사용자의 특성을 파악한다. 청소기 interface 분석을 기반으로 자연스러운 청소기 사용 자세 및 동작과 청소기 사용 자세 및 동작을 비교 분석하여 청소기의 설계를 평가한다.

셋째, 정량적으로 파악된 자연스러운 청소기 사용 자세 및 동작의

타당성과 신뢰성을 확인하기 위해 사용자 내의 변동성(intra-subject variation)과 사용자 간의 변동성(inter-subject variation)을 분석한다. 사용자 한 명에 대해 반복 측정된 자연스러운 청소기 사용 동작 범위들 간의 표준편차를 산출하여 사용자 내의 변동성을 파악하고, 사용자 사이의 반복 측정된 자연스러운 청소기 사용 동작 범위들 간의 평균의 표준편차를 산출하여 사용자 간의 변동성을 파악한다. 파악된 사용자 내의 변동성과 사용자 간의 변동성을 분석하여 자연스러운 청소기 사용 자세 및 동작의 타당성과 신뢰성을 확인한다.

1.3. 연구의 중요성

본 연구의 동작 분석에 기반한 인간공학적 제품 설계 평가 방법은 세 가지 측면에서 이론적 및 실용적 의의를 가진다. 첫째, 본 연구에서 제시한 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 프로세스는 체계적인 절차와 사용자와 제품에 대한 포괄적인 분석을 통해 사용자와 제품을 전반적으로 이해하고 제품의 설계를 체계적으로 평가하는 특징을 가지고 있다. 기존에도 여러 연구자들에 의해 동작 분석 기반 제품 설계 평가 연구들이 진행되어 왔으나, 제품과 사용자의 물리적인 interface 에 대한 분석과 평가 절차의 체계성이 대부분 미약하였다. 이로 인해, 제품 설계 평가 절차와 평가가 비체계적이고 국소적으로 진행되는 한계를 보였다. 본 연구에서는 제품과 사용자 사이 물리적인 interface 에 대한 포괄적인 이해를 통해 체계적으로 동작 분석 절차를 수행하는 제품 설계 평가 프로세스를 제공함으로써 동작 분석을

활용한 제품 설계 평가 시 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

둘째, 본 연구에서는 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였다. 기존의 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가 연구들은 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 파악하지 않거나 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 고려하더라도 정량적 평가가 이루어지지 않는 한계를 가지고 있었다. 본 연구에서는 motion capture system 을 이용하여 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 정량적으로 분석하는 방법을 제시하였다. 또한, 사용자 내의 변동성과 피실험자 간의 변동성을 분석하여 정량적으로 파악된 자연스러운 제품 사용 자세와 동작에 대한 타당성과 신뢰성을 확인하였다.

마지막으로, 본 연구에서는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작과 실제 제품 사용 자세 및 동작과의 정량적인 비교 분석을 통해 기존 제품 설계에 대한 개선 대상의 파악과 설계 개선안 제시에 도움을 줄 수 있다. 기존의 동작 분석 기반 제품 설계 평가 연구들이 제품의 설계 평가에만 중점을 두었던 것과는 차별적으로 본 연구에서는 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 기준으로 실제 제품을 사용하는 자세 및 동작을 비교 분석함으로써 제품의 설계를 정량적으로 평가하고 제품 사용 자세가 자연스러운 사용 자세 및 동작과 유사하게 구현될 수 있도록 설계 개선 대상을 파악하고 개선안을 제시할 수 있다. 이와 같은 평가 방법은 사용자와 제품 사이의 물리적인 interface 분석과 함께 제품에 대한 구체적인 개선안 제시와 인간공학적 설계에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

1.4. 논문 구성

본 논문은 6개의 장과 5개의 부록으로 구성되어 있다. 제 1장은 연구의 배경, 필요성, 목적과 같은 연구의 전반적 개요에 대해 서술하고 있으며, 제 2장은 본 연구를 진행하는데 필요한 기본 정보 및 지식과 문헌조사를 통해 파악된 기존에 수행되었던 동작분석을 통한 제품 설계 평가 관련 연구들에 대해 설명하고 있다. 제 3 장은 본 연구에서 제안한 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 프로세스와 그 내용에 대해 서술하고 있으며, 제 4장은 3장에서 제안한 프로세스를 밀대형 지공 청소기 설계 평가에 적용하여 구체적인 적용 방법 및 적용 결과에 대해 서술하고 있다. 제 5장은 본 연구의 의의, 기대 효과, 특징에 대해 토의하고 있고 제 6장은 연구의 결과에 대해 설명하고 있다. 마지막으로, 부록은 각 장에서 예시적으로 서술하고 있는 분석 정보의 전 내용을 제시하고 있다.

2. 문헌 조사

2.1. 신체의 해부학적 구조

2.1.1. 손의 해부학적 구조

손과 손목의 골격은 총 27개의 뼈로 구성되어 있으며, 크게 손가락뼈(phalanx of the finger), 손바닥뼈(metacarpal bone), 손목뼈(carpal bone) 3부분으로 분류된다(Buchholz, 1992; 그림 2-1 참조). 손가락뼈는 엄지 2개, 검지, 중지, 약지, 소지 각각 3개 총 14개로 구성되어 있으며, 몸의 중앙부터 proximal, middle, distal phalange 라고 부른다. 손바닥뼈는 총 5개로, 긴 뼈들(long bones)로 구성되어 있다. 손목뼈는 모두 8개로 구성되어 있으며, 몸의 중앙으로부터 순서로 proximal carpal row 와 distal carpal row 로 분류된다.

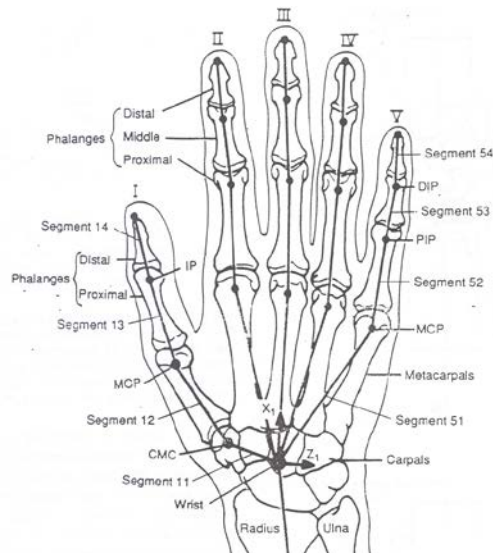


그림 2-1. 손의 골격 구조

손의 관절은 여러 개의 관절로 구성된 손목 관절과 14개의 관절로 구성된 손 내부의 관절로 구성되며, 관절의 동작에 따라 자유도 1 또는 2를 가진다. 손의 관절은 표 2-1과 같이 손목 관절(wrist joint), 손목손바닥뼈 관절(carpometacarpal joint), 손바닥손가락뼈 관절(metacarpophalangeal joint), 근위 손가락뼈 사이 관절(proximal interphalangeal joint), 위 손가락뼈 사이 관절(distal interphalangeal joint) 5부분으로 구분되며(Chao et al., 1989), 각 관절은 손의 뼈 연결 형태에 따라 경첩 관절(hinge joint), 타원형 관절(ellipsoidal joint)로 분류된다. 손가락뼈 사이 관절(IP)과 손바닥손가락뼈 관절(MCP)은 자유도가 1인 경첩 관절로 구성되어 있으며, 나머지 손의 관절들은 자유도가 2인 타원 관절로 구성되어 있다. 엄지의 손목손바닥뼈 관절(CMC)의 경우 일반적으로 자유도 2로 정의하나 연구자에 따라 자유도 3으로 정의하는 경우도 있다(Buchholz, 1992).

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
위 손가락뼈 사이 관절 (distal interphalangeal joint, DIP)	중간마디뼈와 끝마디뼈 사이의 관절	

2.1.2. 전신의 해부학적 구조

전신 골격은 성인의 경우 총 206개의 뼈로 구성되어 있으며, 뼈의 위치와 기능에 따라 몸통뼈(axial skeleton)와 팔다리뼈(appendicular skeleton)로 구분된다(그림 2-2 참조). 몸통뼈는 두개골(skull), 척주(vertebral column), 흉곽(thoracic cage)의 3부분으로 구분되며, 두개골 23개, 척주 32개, 흉곽 25개의 총 80개의 뼈로 구성되어 있다. 팔다리뼈는 상지골 64개와 하지골 62개로 이루어져 있으며, 이는 위치와 기능에 따라 위팔이음뼈(shoulder girdle), 팔(upper extremity), 다리어음뼈(pelvic girdle), 다리(lower extremity)로 구분된다.

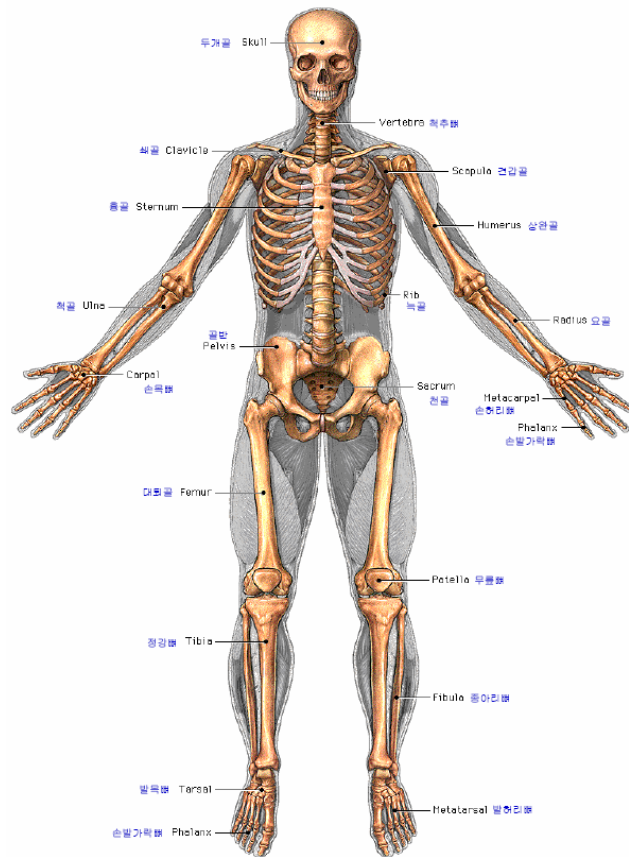


그림 2-2. 전신 골격 구조

전신의 관절은 뼈의 연결형태에 따라 경첩(hinge)형, 차축(pivot)형, 구(ball & socket)형, 기타형으로 구분된다(권영국과 변승남, 1999). 경첩형 관절은 단 방향으로 움직일 수 있는 관절로 팔꿈치와 무릎 관절이 대표적이며, 차축형 관절은 목, 손목, 발목 등과 같이 회전이 가능한 관절을 의미한다. 구형 관절은 모든 방향으로 움직일 수 있는 관절을 의미하며, 어깨, 골반 등이 대표적인 예이다. 기타형 관절로는 안장형, 타원형, 평면형 관절들이 있으며 요골수근관절, 추간관절, 중수지절관절 등이 기타형 관절에 속하는 대표적인 관절들이다.

관절의 가동성(joint mobility)에 따라 신체의 움직임은 몸의 부위별로 다양한 동작이 가능하다. 대표적인 신체 움직임으로는 굽히기(flexion), 펴기(extension), 벌리기(abduction), 모으기(adduction), 회전(rotation)이 있으며, 우리 몸의 경우, 굽히기/펴기의 동작으로 이루어진 자유도 1의 신체 부위와 굽히기/펴기, 벌리기/모으기, 회전의 동작으로 이루어진 자유도 3의 신체 부위로 분류된다(Greene and Heckman, 1994; 표 2-2 참조). 신체 부위에 따라 회전을 옆치기(pronation), 뒤치기(supination)로 굽히기/펴기를 올리기(elevation), 내리기(depression) 등으로 적절히 바꾸어 사용하며, 또한 연구자에 따라 신체 부위별 동작 자유도와 명칭을 다르게 정의하기도 한다.

표 2-2. 신체 부위별 동작 자유도 및 명칭

신체 부위	자유도	동작
손목 (wrist)	3	Flexion/Extension
		Radial Deviation/ Ulnar Deviation
		Pronation/Supination
팔꿈치 (elbow)	1	Flexion/Extension
어깨 (shoulder)	3	Elevation/Extension
		External Rotation/Internal Rotation
		Abduction
목 (neck)	3	Flexion/Extension
		Lateral Bending
		Axial Rotation
허리 (waist)	3	Flexion/Extension
		Lateral Bending
		Rotation
골반 (pelvis)	3	Elevation/Extension
		External Rotation/Internal Rotation
		Adduction/Abduction
무릎 (knee)	1	Flexion/Extension

2.2. 동작 분석 시스템

2.2.1. 3D motion capture system

대표적인 3D motion capture system 으로는 비디오 카메라를 이용한 광학식(optical) 방법, 전자기장을 이용한 전자기식(electro-magnetic) 방법, 기계 골격을 활용한 기계식(mechanical) 방법이 있으며 최근에는 광학식 방법이 가장 주목을 받고 있다(이제희, 2003). 광학식 방법은 연기자의 몸에 부착된

붉은 가시광선 또는 적외선을 반사시키는 marker 를 특정 주파수만 받아들이는 필터를 갖춘 여러 대의 비디오 카메라로 측정하는 방식으로, 2대 이상의 카메라를 이용하여 marker 의 3D 좌표를 계산한다. 전자기식 방식은 트랜스미터(transmitter)로 공간상에 전자기장(electro-magnetic field)을 형성하도록 하고 연기자의 몸에 부착된 sensor 들이 전자기장으로부터 스스로의 위치와 방향을 계산할 수 있도록 한 방법이다. 기계식 방법은 기계 골격(mechanical skeleton)을 연기자 몸에 부착하여 기계 골격의 관절에 부착된 sensor 로부터 동작을 인식하는 방법이다. 최근에는 전자기식 방법, 기계식 방법과 차별적으로 연기자의 움직임을 제약하지 않는다는 장점과 장비 가격의 하락으로 인해 광학식 방법이 가장 많이 활용되고 있다.

일반적으로 광학식 motion capture system 은 카메라, server, 운용 컴퓨터, 분석 프로그램으로 구성되어 있다(그림 2-3 참조). 광학식 motion capture system 의 카메라와 server 는 analogue 방식으로 동작을 녹화하고 digital data 로 변환하는 역할을 수행하며 운영 컴퓨터와 분석 프로그램은 digital data 를 분석하여 marker 들을 추적(tracking)하는 후처리 과정을 수행한다. 광학식 motion capture system 의 경우 digital system 과 analogue system 의 두 종류가 있으며, digital system 의 경우 analogue system 과 차별적으로 server 없이 카메라, 운용 컴퓨터, 분석 프로그램으로만 구성되어 있다. 최근에는 digital system 의 가격이 analogue system 가격과 크게 차이가 나지 않아 digital system 의 활용도가 증가하고 있다.



그림 2-3

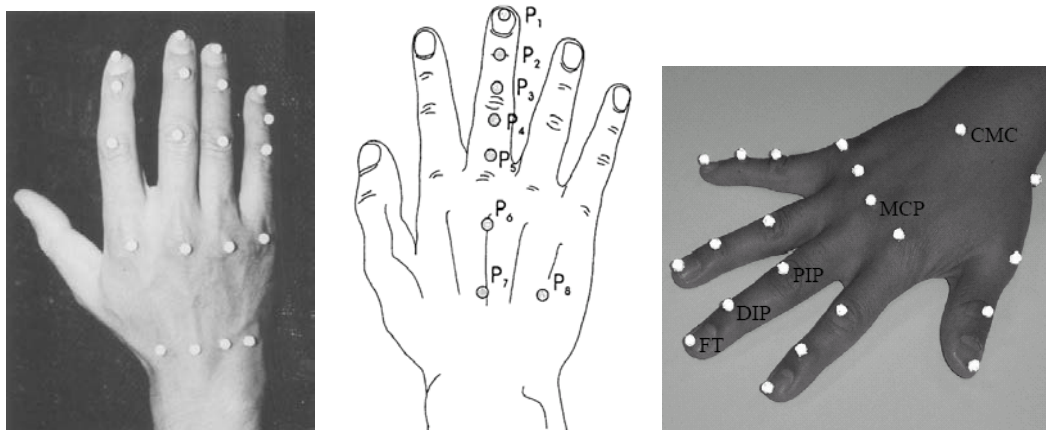
그림 2-3. 광학식 motion capture system 구성

2.2.2. Marker set

광학식 motion capture system 을 이용하여 동작을 분석하는 경우 피부 표면에 붉은색 가시광선 또는 적외선을 반사시키는 reflective marker 를 부착하여 동작을 측정하고 분석하고 있다(이상기, 2006). 손의 경우 motion capture system 의 resolution 과 손의 공간적 크기를 고려하여 손의 각 관절 부위 피부 표면에 reflective marker 를 부착하여 동작 분석을 수행하고 있다. 전신 또는 신체 부위의 경우 신체 관절 위 피부뿐만 아니라, 신체 segment 상의 피부에도 reflective marker 를 부착하여 신체 부위의 공간상의 움직임을 측정하고 있다. 전신 또는 신체 부위의 동작 측정의 경우 일반적으로 표준화된 reflective marker set 을 사용하고 있으나, 손의 경우 특별하게 표준화된 marker set 이 존재하지 않고 있다.

손 동작 분석을 위해 손에 부착하는 marker set 의 경우 연구의 목적과

연구자에 따라 다르게 정의되어 왔다. Somia et al. (1998)이 사용한 손의 marker set 의 경우 손가락 끝, 손가락 관절, 손바닥뼈에 marker 를 부착하였으나, 엄지에는 marker set 을 정의하지 않았다(그림 2-4(a) 참조). Chiu et al. (1998)이 사용한 손의 marker set 은 손가락뼈 segment 마다 두 개의 marker 를 부착하여 상대적으로 많은 수의 marker 사용을 특징으로 하였으나, 셋째 손가락에만 marker 를 정의한 reduced marker set 이라는 단점을 가지고 있다(그림 2-4(b) 참조). Zhang et al. (2003)의 marker set 은 손가락 끝, 손가락 관절, 손목손바닥뼈 관절에 marker 를 부착하였으며, 엄지 손가락에도 marker set 을 정의하여 손 전체의 동작을 측정할 수 있도록 정의하였다(그림 2-4(c) 참조).

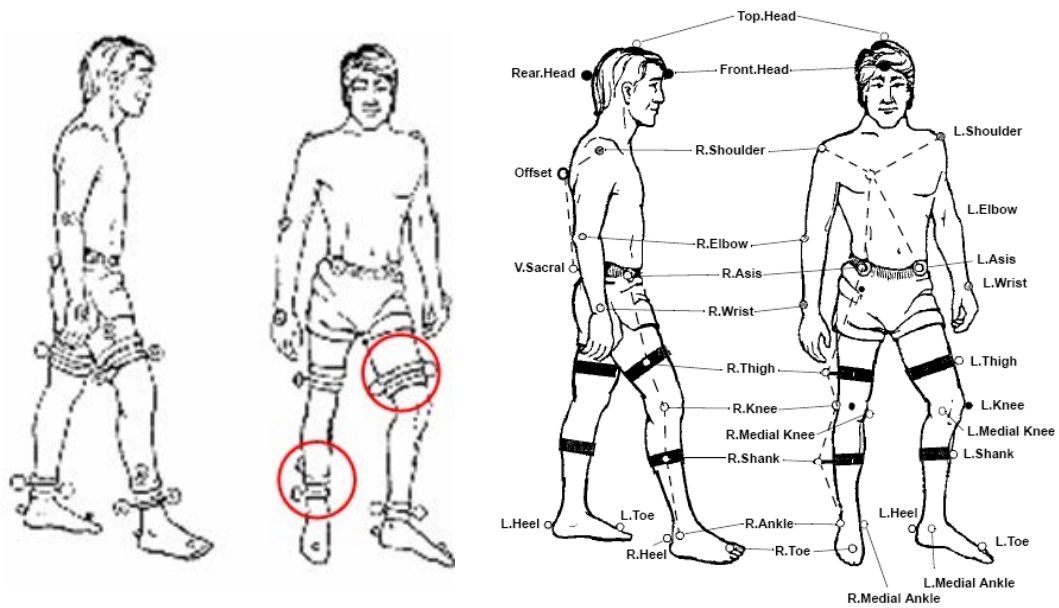


(a) Somia et al. (1998) (b) Chiu et al. (1998) (c) Zhang et al. (2003)

그림 2-4. 손의 reflective marker set

전신 또는 신체 부위 동작 분석을 위한 대표적인 reflective marker set 으로는 Cleveland Clinic marker set 과 Helen Hayes marker set 이 있다(Richards

and Bruening, 2006). Cleveland Clinic marker set 은 Cleveland Clinic 에서 개발된 marker set 으로 3개 이상의 marker 로 구성된 marker group(rigid triad)들을 신체 segment 중간에 붙이는 것을 특징으로 하는 marker set 이다(그림 2-5(a) 참조). 3개 이상의 marker 가 일정한 간격을 두고 묶여 있기 때문에 한 개의 marker 가 측정 중 가려지거나 부정확하더라도 나머지 2개의 marker 로 보완할 수 있는 장점을 가지고 있으나, rigid triad 를 관절 위에 붙이는 것이 아니기 때문에 정지 자세를 별도로 측정하여 관절의 값을 정의해야 하는 단점을 가지고 있다. Helen Hayes 병원에서 개발된 Helen Hayes marker set 은 신체 관절과 segment 에 골고루 marker 를 부착하는 marker set 이다(그림 205(b) 참조). Helen Hayes marker set 은 Cleveland Clinic marker set 과 다르게 별도로 정지자세를 측정할 필요가 없어 simplified marker set 이라고 불리우기도 하는 측정의 용이함이 장점인 marker set 이다(최훈우, 2005).



(a) Cleveland Clinic marker set

(b) Helen Hayes marker set

그림 2-5. 대표적인 전신 reflective marker set

2.3. 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가 연구 동향

2.3.1. 손 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가

손 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가는 주로 컴퓨터 input device, cell phone 에 대해 진행되어 왔으나, 대상 제품에 대한 손의 자연스러운 사용 자세 및 동작을 고려하여 제품의 설계를 평가한 연구는 미흡한 실정이다(표 2-3 참조). Nelson et al. (2000)과 Treaster and Marras (2000)는 높이 조절이 가능하고 양쪽 keyboard 의 간격 조절이 가능한 alternative keyboard 를 이용하여(그림 2-5 참조) 둘째 손가락, 손목의 각도 변화를 측정하고 tendon 의 길이 변화를 예측하였으나, alternative keyboard 의 높이와 각도의 교호작용이 검지 손가락과

손목에 영향을 주는 것만 파악하고 손가락과 손목의 자연스러운 자세 및 동작에 대한 고려는 하지 않았다. Rampel et al. (2006)의 경우 역시 설계가 다른 6개의 일반 keyboard 와 alternative keyboard 사용시 손목의 각도 변화, 아래팔의 자세와 그에 따른 keyboard 사용시의 typing speed, typing accuracy, subjective rating 을 관찰하였으나, 중립 자세(neutral posture)와 typing 성능을 기준으로만 평가하고 사용자가 선호하고 자연스러워 하는 자세 및 동작에 대한 파악 및 고려는 하지 않았다. 이 외에도 이러한 대부분의 제품 설계 평가 연구들은 중립 자세와 제품 성능을 기준으로 평가되고 있으며, 사용자가 선호하고 자연스러워하는 자세 및 동작을 고려한 제품 설계 평가는 미흡한 실정이다,

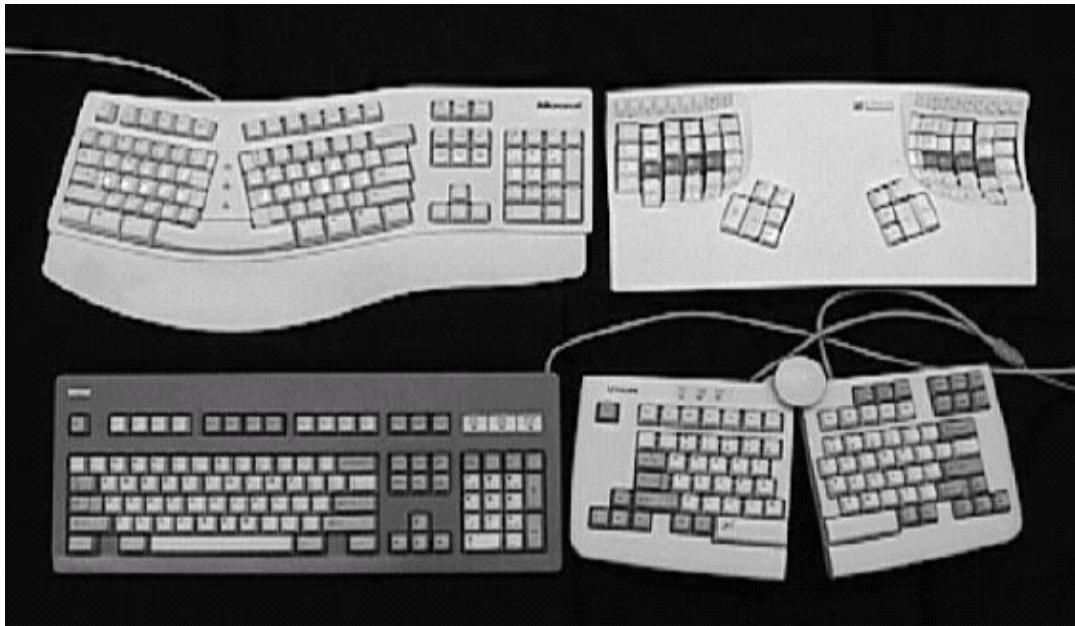


그림 2-6. Treaster and Marras 의 연구에 활용된 keyboard

표 2-3. 손 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가 예

Study	Author (Year)	Product	Measures	Other measures
Computer mouse and track-ball operation: similarities and differences in posture, muscular load and perceived exertion	Karlqvist et al. (1997)	Mouse Track-ball	Wrist angle	Muscle load Subjective rating
An assessment of alternative keyboards using finger motion, wrist motion and tendon travel	Treaster and Marras (2000)	Keyboard	Finger angle Wrist angle Tendon travel	
Finger motion, wrist motion and tendon as a function of keyboard angles	Nelson et al. (2000)	Keyboard	Finger angle Wrist angle Wrist deviations Tendon travel	Subjective rating
The effect of six keyboard designs on wrist and forearm postures	Rampel et al. (2006)	Keyboard	Wrist extension Ulnar deviation Forearm pronation	Subjective rating Typing speed Typing accuracy

2.3.2. 전신 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가

전신 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가는 다양한 제품에 적용되어 진행되어 왔으나, 대상 제품에 대한 자연스러운 사용 자세 및 동작을 고려하지 않은 측면과 체계적인 연구 접근 절차와 계획 측면에서 미흡함을 보여왔다(표 2-4 참조). Andreoni et al. (2002)은 운전자의 앉은 자세와 cushion,

backrest 와의 interaction 을 동작과 압력 분석을 통해 관찰하여 자동차 설계에 반영하려 하였지만, 실제 운전 시 운전자 관절의 동작 범위(range of motion)만을 실험을 통해 파악하였을 뿐, 사용자가 선호하고 자연스러워 하는 운전 자세 및 동작에 대한 파악은 미흡하였다. Moffet et al. (2002)은 손바닥 받침 부위의 설계가 다른 두 종류의 Notebook 에 대해 사용 자세 및 동작, 근육 부하를 기준으로 적절한 notebook 사용 자세를 파악하려 시도 하였으나, 두 notebook 설계 사이의 큰 물리적인 결과 차이를 찾아내지 못해 연구의 체계적인 절차 및 계획 측면에서 미흡함을 보였다. 이 외에도 동작 분석을 활용한 다양한 제품 설계 평가 연구들이 존재하나, 대부분의 연구들이 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작에 대한 고려에 미흡하고 연구가 국부적으로 진행되고 있어 일부 연구에서 연구 절차와 계획의 체계성에 문제를 보여주었다.

표 2-4. 전신 동작 분석을 활용한 제품 설계 평가 예

Study	Author (Year)	Product	Measures	Other measures
Manual wheelchair Pushrim biomechanics and axle position	Boninger et al. (2000)	Wheelchair	Axle position	Force(moment) Speed
Method for the analysis of posture and interface pressure of car drivers	Andreoni et al. (2002)	Car	Neck ROM Lumbar ROM Hip ROM Knee ROM Elbow ROM Shoulder ROM	Pressure
Influence of laptop computer design and working position on physical exposure variables	Moffet et al. (2002)	Notebook	Head angle Upper arm angle Trunk angle Wrist angle	Muscle load Subjective rating
An ergonomic evaluation comparing desktop, notebook, and subnotebook computers	Szeto et al. (2002)	Desktop Notebook Subnotebook	Cervical angle Spine angle	Typing speed Typing accuracy Typing efficiency
Moderate-heeled shoes and knee joint torques relevant to the development and progression of knee osteoarthritis	Kerrigan et al. (2005)	Shoes	Knee joint torque	

3. 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 프로세스

제품 사용시 동작 분석을 통한 인간공학적인 제품 설계 평가를 수행하기 위해 두 단계(사용자 interface 분석과 제품 사용 동작 분석)로 구성된 제품 설계 평가 프로세스를 개발하였다(그림 3-1 참조). 사용자 interface 분석은 대상 제품을 체계적으로 이해하기 위한 단계로써, 제품 설계 특성 분석, 사용자 특성 분석, 사용 환경 특성 분석, 제품 사용 작업 특성 분석으로 구성된다. 제품 사용 동작 분석은 사용자 interface 분석 결과를 활용하여 동작 분석을 계획, 측정, 분석, 평가하는 단계로써 동작 분석 protocol 수립 및 측정, 동작 분석 및 제품 설계 평가로 구성된다. 본 연구에서 제안한 제품 설계 평가 프로세스에 대한 상세한 설명은 본 장에 서술되어 있으며, 밀대형 진공 청소기 설계 평가 적용 사례는 4장에 상세히 기술되어 있다.

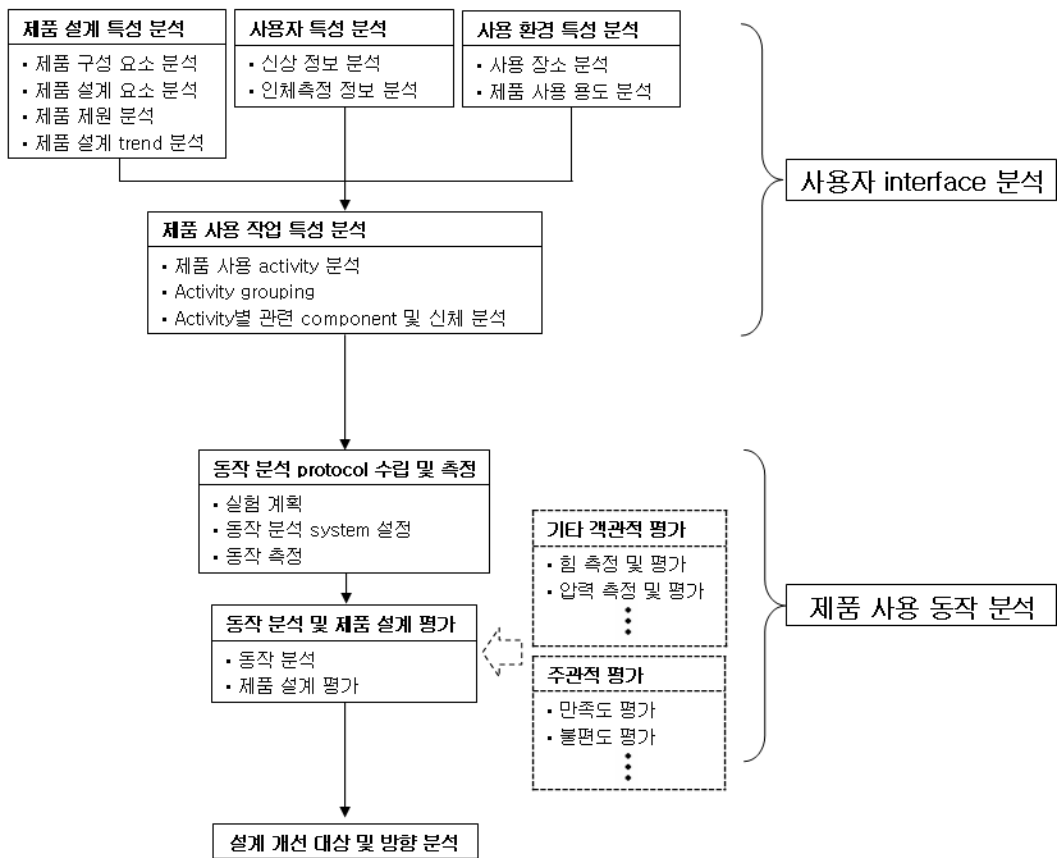


그림 3-1. 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 프로세스

3.1. 사용자 interface 분석

3.1.1. 제품 설계 특성 분석

대상 제품의 설계 특성에 대한 이해를 위해 제품의 구성 요소, 설계 요소, 설계 trend 를 분석한다. 제품을 component 별로 분류하여 제품 구성 요소를 파악한다. 제품 구성 요소 별로 크기, 무게, 부피, 형태, 개수 등의 설계 요소를 파악하고 선별된 설계 요소를 기준으로 측정을 통해 제원 분석을 수행한다. 제원 분석 결과를 바탕으로 제품 구성 요소 별 설계 특성을

파악하고 설계 trend 를 유추한다.

3.1.2 사용자 특성 분석

사용자 특성 분석을 위해 대상 제품 사용자의 신상 정보와 인체측정 정보를 분석한다. 설문이나 FGI(focus group interview)를 통해 사용자의 성별, 연령, 소득 수준, 제품 평균 사용 기간 등을 조사하여 주요 사용 대상, 연령 등을 파악한다. 파악된 주요 사용자들을 대상으로, 키, 손길이, 손둘레, 손너비 등의 인체측정 정보를 측정하고 분석한다.

3.1.3 사용 환경 특성 분석

제품에 대한 사용 환경 특성 분석을 위해 제품 사용 장소를 조사하고 제품 사용 용도를 파악한다. 대상 제품의 사용 장소와 제품 사용 용도를 조사하기 위해 설문, FGI, 제품 manual 분석 brainstorming 등을 수행한다. 수행 결과를 통해 제품을 사용하는 주요 장소를 파악하고 제품의 주요 사용 용도를 분석한다. 마지막으로, 파악된 주요 제품 사용 장소에 대한 크기, 형태, 표면 특성 등의 장소 특성을 분석한다.

3.1.4 제품 사용 작업 특성 분석

대상 제품에 대한 사용 작업 특성을 이해하기 위해 제품 사용 activity 분석, activity 별 관련 제품 구성 요소 및 관련 신체 부위 분석, activity grouping 을 수행한다. 제품 설계 특성 분석, 사용자 특성 분석, 사용 환경

특성 분석 결과와 제품 사용자 manual, brainstorming, video 분석 등을 통해 제품 사용 activity 들을 분석한다. 분석된 activity 별로 관련 제품 구성 요소를 파악하고 제품 사용시 관련된 사용자의 신체 부위를 파악한다. 청소기 사용 activity 를 목적, 장소, 빈도 등을 기준으로 activity grouping 을 수행한다.

3.2. 제품 사용 동작 분석

3.2.1. 동작 분석 protocol 수립 및 측정

대상 제품에 대한 사용 자세 및 동작을 분석하기 위해 사용자 interface 분석 결과를 활용하여 동작 분석 계획을 수립한다. 신상 분석 결과를 활용하여 실험 참여 대상을 선정하며, 분석된 주요 사용 장소와 유사하게 실험 환경을 구축한다. 제품 설계 특성 분석 결과를 통해 얻은 data 와 동작 분석 목적을 고려하여 독립변수와 종속변수를 선정한다. 제품 사용 activity 와 사용 빈도를 고려하여 주요 activity 를 선별하고 실험 환경에 맞게 task 로 변환한다. 대상 제품에 대한 자연스러운 사용 자세 및 동작과 실제 제품 사용 자세 및 동작을 비교 분석하기 위해 task 를 실제 제품을 사용하지 않은 상태에서 사용자가 생각하는 자연스럽고 편안한 사용 자세 및 동작을 수행하는 task 와 실제 제품을 사용한 task 로 분류한다. 실험 환경과 목적을 고려하여 실험 시간과 순서를 결정하고 실험 수행시 지켜야 할 제약 조건이나 주의 사항은 별도로 기록해 둔다.

제품의 사용 자세 및 동작 분석을 위해 동작 분석 system 을 설정한다. 실험 protocol 에서 선정된 task 를 고려하여 관련 중요 신체 부위를 분석하고

reflective marker 의 크기, 개수, 부착 위치 및 카메라 종류와 개수를 결정한다. Task 수행시 동작의 크기와 범위를 고려하여 카메라를 배치하고 동작의 속도와 분석 용이성을 고려하여 sampling rate 를 결정한다.

동작 분석 계획과 동작 분석 system 설정이 완료되면, 제품 사용 자세 및 동작 측정을 수행한다. 파일럿 테스트를 통해 동작 분석 계획과 동작 분석 system 설정을 확인하고 예상시간과 실험시 발생하는 문제점 등을 파악한다. 동작 분석 계획과 동작 분석 system 설정 보완이 완료되면, 제품 사용 자세 및 동작 측정을 수행한다.

3.2.2. 동작 분석 및 제품 설계 평가

사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작 측정 결과를 분석하여 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 정량적으로 파악하고 자세 및 동작의 변동성을 파악한다. 실제 제품을 사용하지 않고 제품을 사용한다는 가정아래 실험 참여자가 선호하고 자연스러워하는 제품 사용 자세 및 동작을 구현한 실험 결과를 task 별로 관절 별로 분류하고 정량적인 각도 변화 data 를 산출한다. 산출된 정량적인 각도 변화 data 의 이상치를 제거하기 위해 5%ile, 95%ile 의 통계 수치로 파악하고 task 별 반복 측정을 고려하여 5%ile 과 95%ile data 의 평균을 산출한다. 산출된 5%ile 과 95%ile 의 평균값을 task 및 관절 별 제품 사용 자세 및 동작의 최소값과 최대값으로 정의하고 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작의 범위를 파악한다. 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작 범위의 최소값과 최대값에 대해 사용자 내의 변동성(standard deviation of

measurement error), 사용자 간의 변동성(standard deviation of biological variation), 측정에 대한 표준 오차(standard error of measurement)를 산출하여 실험 참여자 내의 변동성, 실험 참여자 간의 변동성, 실험 전반에 대한 변동성을 파악하여 data 의 신뢰성을 파악한다(Norkin and White, 1995).

정량적으로 파악된 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 기준으로 독립 변수로 선택된 제품의 실제 사용 자세 및 동작과 비교 분석하여 제품의 설계를 평가한다(그림 3-2 참조). 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 정량적으로 파악한 방법과 동일하게 통계 수치를 활용하여 제품, task, 관절 별로 실제 제품 사용 자세 및 동작의 범위를 정량적으로 파악한다. 파악된 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작 범위와 실제 제품 사용 자세 및 동작 범위를 비교하여 겹치는 부분의 크기를 식 1을 이용하여 유사도(%)라 정의하고 실제 제품들 간의 비교를 통해 제품의 설계를 평가한다.

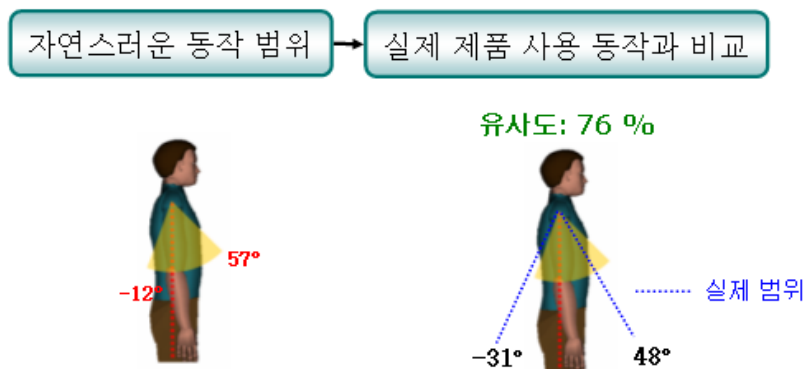


그림 3-2. 제품 설계 평가 방법 예

$$\frac{\text{겹쳐진 범위 내에서 실제 제품 사용 자세 및 동작이 지속된 시간}}{\text{실제 제품 사용 자세 및 동작을 구현한 전체 시간}} \times 100 \quad (1)$$

3.2.3. 결과 보완을 위한 별도의 객관적, 주관적 평가 방법의 도입

본 연구에서 제안한 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 방법을 보완하기 위해 대상 제품을 평가하기에 적절한 객관적인 평가 방법과 주관적 평가 방법을 추가한다. 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 결과를 보완하고 제품에 대한 보다 구체적인 설계 개선 방향을 도출하기 위해 EMG, FSA 등의 적절한 객관적인 평가 방법들을 도입한다. 또한, 제품 설계 평가의 목적에 맞게 만족도, 불편도 등의 주관적 평가(subjective rating)를 수행하여 본 연구에서 제안한 제품 설계 평가 결과를 보완한다.

3.3. 제품 설계 개선 대상 및 방향 분석

본 연구에서 제안한 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 결과와 기타 추가 분석 결과를 고려하여 제품의 설계 개선 대상을 파악하고 개선 설계 방향을 설정한다. 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 결과와 기타 추가 분석 결과를 활용하여 대상 제품의 문제점을 파악하고 설계 개선 대상을 파악한다. 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 결과, 기타 추가 분석 결과, 사용자 interface 분석 결과를 활용하여 설계 개선 대상 별로 개선 방향을 결정하고 구체적인 개선 방법을 제안한다(그림 3-3 참조).

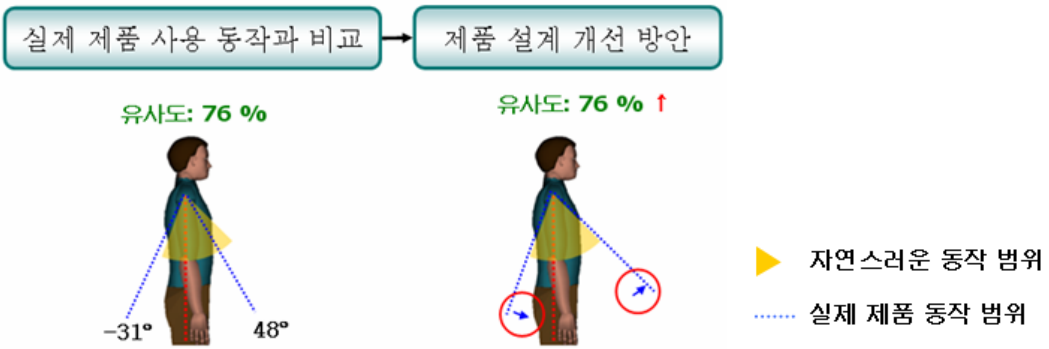


그림 3-3. 제품 설계 개선 방향 설정 예

4. 제품 설계 평가 프로세스 적용 - 밀대형 진공 청소기

본 연구에서 제안한 동작 분석을 통한 인간공학적 제품 설계 평가 프로세스의 효용성을 파악하기 위해 밀대형 진공 청소기 설계 평가에 적용해 보았다. 밀대형 진공 청소기에 대한 사용자 interface 분석을 통해 제품의 설계 특성, 사용자 특성, 사용 환경 특성, 사용 작업 특성을 파악하였으며, 이를 기반으로 동작 분석 protocol 을 작성하고 밀대형 진공 청소기 사용 동작을 측정하였다. 사용자가 선호하는 자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작과 실제 밀대형 진공 청소기 사용 동작을 동작 분석 장비를 사용하여 정량적으로 파악하였으며, 측정 결과를 비교하여 자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작과 선별된 밀대형 진공 청소기 사용 동작 사이의 유사도를 산출하고 청소기의 설계를 평가하였다.

4.1. 사용자 interface 분석 결과

4.1.1. 밀대형 진공 청소기 설계 특성 분석

밀대형 진공 청소기 설계 특성에 대한 전반적인 이해를 위해 구성요소, 설계 요소, 설계 trend 를 분석하였다. 밀대형 진공 청소기를 component 별로 분류하여 구성 요소를 분석한 결과, 청소기는 크게 본체와 청소대로 구분되는 것으로 파악되었으며 본체는 몸체, 먼지통, 운반용 손잡이, 상태 표시창, 운반용 바퀴로 청소대는 호스, 손잡이, 연장관, 브리쉬로 구성되었다(그림 4-1

참조). 파악된 구성 요소 별로 크기, 무게, 형태, 각도, 동작 범위 등의 설계 요소들이 파악되었으며 측정을 통해 제원 분석을 수행하였다(표 4-1 참조). 제원 분석 결과 시중에 판매중인 밀대형 진공 청소기 제품 별로 설계 요소에 차이점을 확인할 수 있었으며, 또한 구성 요소 별로 설계 trend 를 분석할 수 있었다(표 4-1 참조).

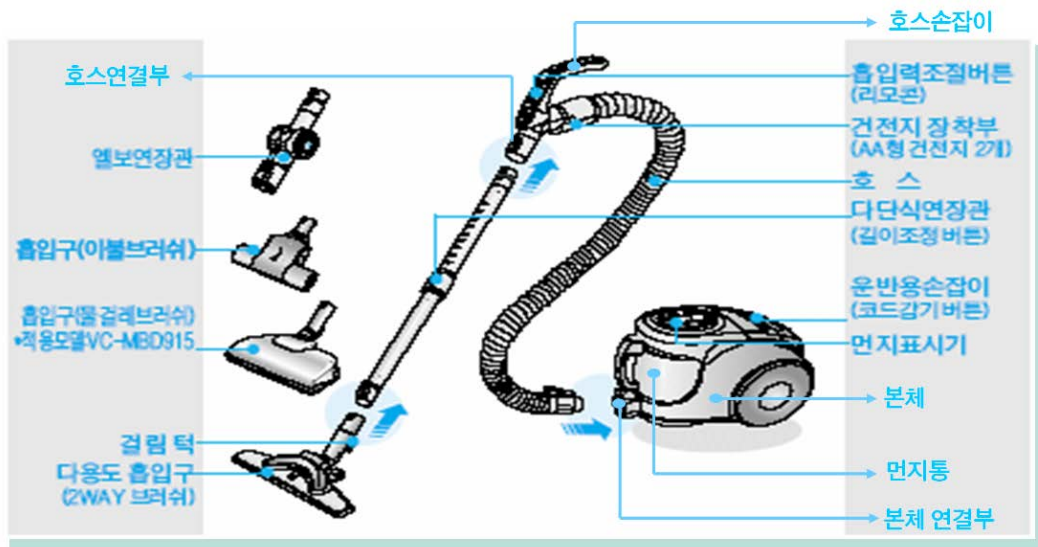


그림 4-1. 밀대형 진공 청소기 구성 요소 (삼성 싸이클로맥스 사용자 manual)

표 4-1. 구성 요소 별 제원 분석 및 설계 trend 분석 결과 예

구성 요소	설계 요소	청소기 A	청소기 B	설계 trend
본체 손잡이	크기 (가로*세로*두께)	18.5*8.5*2.0	상단: 20.5*12*1.5 먼지통: 9.5*4.5*3.0	가로: 11.0 ~ 18.5 cm 세로: 2.0 ~ 8.5 cm 두께: 1.5 ~ 3.0 cm
	재질	플라스틱	플라스틱	재질: 플라스틱 본체 재질과 동일
	개수	1	2	개수: 1~2개
	위치	본체 상단	본체 상단 본체 전면 먼지통	위치: 본체 상단, 전면
	형태 및 방식	U자형, 접이식	상단: U자형, 접이식 먼지통: 고정형	형태: U자형 방식: 고정 일체형, 접이식
	Grip 형태	사각형 (내측 경사)	상단손잡이: 사각형 먼지통손잡이: 사각형	형태: 사각형, 내측 경사
	동작 범위	90도	상단: 90도 먼지통: 고정형	동작범위: 고정형 혹은 90도

4.1.2. 밀대형 진공 청소기 사용자 특성 분석

밀대형 진공 청소기 주요 사용자와 사용자 특성을 파악하기 위해 가정 주부 250명에게 임의로 설문을 배포하여 조사를 수행하였다. 응답자 92명을 대상으로 주요 사용 연령층을 파악하였으며, 조사 결과 30~50대가 주 사용 연령으로 파악되었다. 하루 평균 청소기 사용 시간은 30분 이내가 73%로 가장 많이 파악되었으며(그림 4-2 참조), 청소기 주 사용 시간대는 오전8~12시 사이로 파악되었다(그림 4-3 참조).

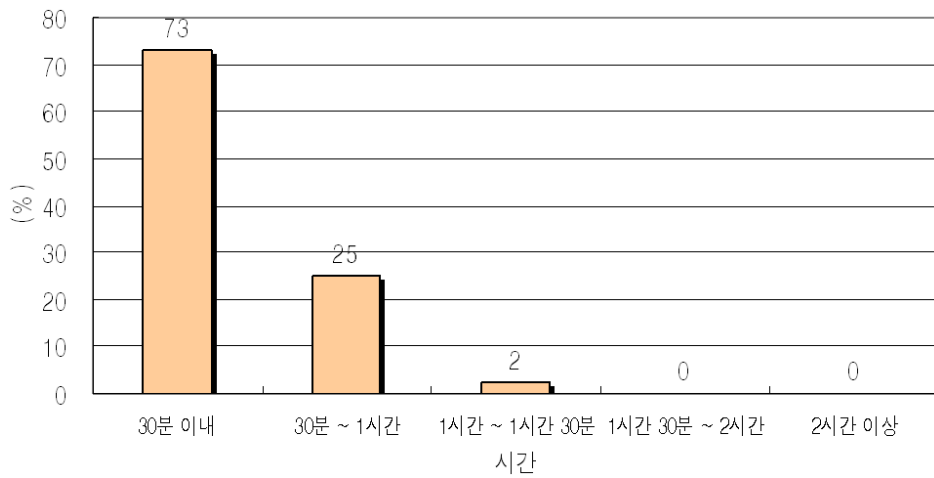


그림 4-2. 하루 평균 청소기 사용 시간

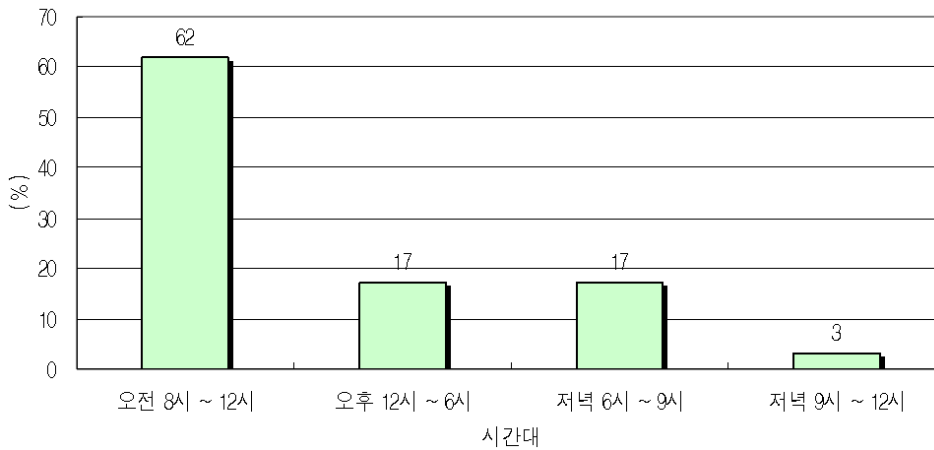


그림 4-3. 청소기 주 사용 시간대

4.1.3. 밀대형 진공 청소기 사용 환경 특성 분석

밀대형 진공 청소기 사용 환경을 분석하기 위해 video 분석을 수행하고 주요 청소기 사용 장소와 사용 용도를 파악하였다. 밀대형 진공 청소기 사용 video 분석 결과 거실, 방, 현관, 베란다 등의 바닥, 가구 아래 등이 주요 사용 장소로 파악되었다(표 4-2 참조). 주요 사용 용도로는 거실, 방

바닥 청소, 현관, 베란다 청소, 모서리 청소, 가구 아래, 위 청소 등이 파악되었다.

표 4-2. 밀대형 진공 청소기 주요 사용 장소

사용 환경	사진	사용 환경	사진
바닥 (거실, 방, 현관, 베란다 등)		가구 아래	
가구, 전자제품, 운동기구 위		틈새 및 모서리	
이불 및 카펫		창틀	

4.1.4. 밀대형 진공 청소기 사용 작업 특성 분석

밀대형 진공 청소기 설계 특성 분석, 사용자 특성 분석, 환경 특성 분석 결과와 video 분석을 활용하여 밀대형 진공 청소기 사용 activity 분석, activity grouping, activity 별 연관 제품 구성 요소 분석, activity 별 연관 신체 부위 분석을 수행하였다. 밀대형 진공 청소기 사용 activity 분석 결과, bruch 장착, 전원 연결, 이동, 버튼 조작 등의 activity 들이 파악되었으며, 작업 순서에 따라 준비, 청소, 보관, 조립, 해체, 유지 작업으로 분류되었다(그림 4-4 참조). 또한,

주요 activity 를 파악하기 위해 작업의 반복 수준에 따라 반복적인 activity 와 간헐적인 activity 로 grouping 하였다. 청소기 activity 별로 연관된 청소기 구성 요소를 파악하였으며(표 4-3 참조), 연관 신체 부위를 조사하였다(표 4-4 참조).

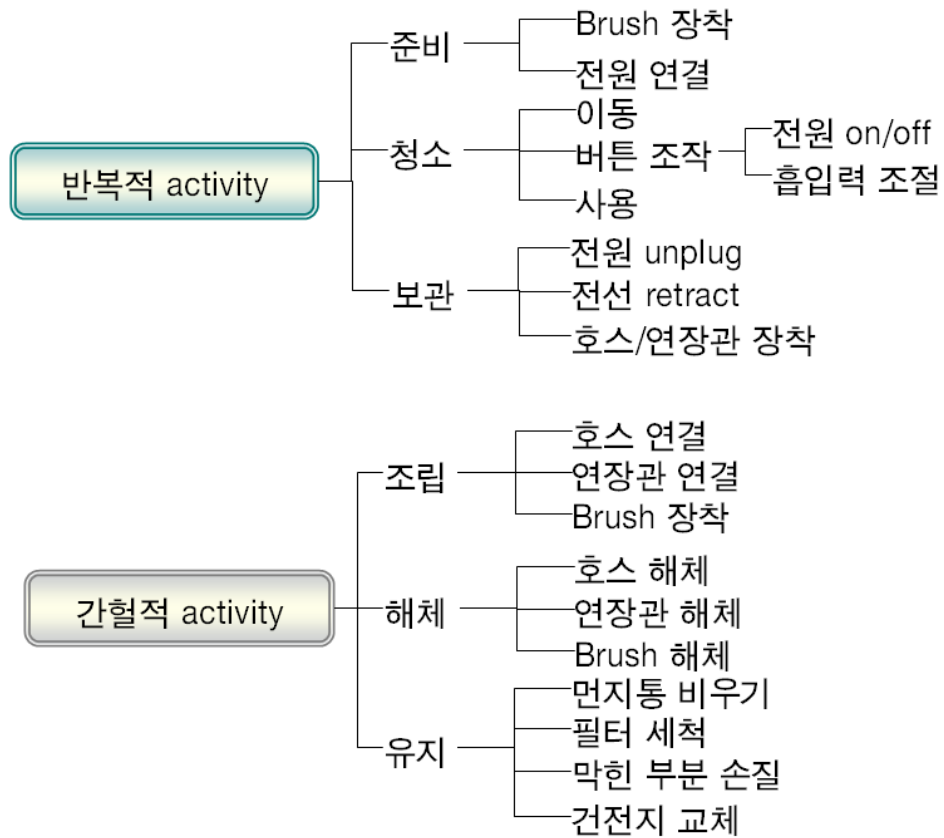


그림 4-4. 밀대형 진공 청소기 activity 분석 결과

표 4-3. Activity 별 연관 청소기 구성 요소 분석표 예

반복 수준	Activity		청소기 구성 요소				
			본체	손잡이	본체버튼	코드 감김 버튼	디스플레이
반복적 activity	준비	Brush 장착					
		전원연결	0				
	청소	이동	운반용 손잡이 이용	0	0		
			본체 바퀴 이용	0			
		버튼 조작	전원 on/off	0		0	0
			흡입력 조절				0
		사용	바닥청소				
			가구 아래 청소				
			가구 위 청소				
			이불 청소				
			모서리 청소				
			창틀 청소				
	틈새 청소						
	보관	전원 unplug					
		전선 정리	0			0	
		호스/연장관 장착					

표 4-4. Activity 별 연관 신체 부위 분석표 예

반복 수준	Activity		신체 부위				
			신체전반	팔, 몸통	손	손가락	
반복적 activity	준비	Brush 장착		0	0	0	
		전원연결		0	0	0	
	청소	이동	운반용 손잡이 이용		0	0	0
			본체 바퀴 이용		0	0	0
		버튼 조작	전원 on/off				0
			흡입력 조절				0
		사용	바닥청소	0	0	0	0
			가구 아래 청소	0	0	0	0
			가구 위 청소	0	0	0	0
			이불 청소	0	0	0	0
			모서리 청소	0	0	0	0
			창틀 청소	0	0	0	0
	틈새 청소	0	0	0	0		
	보관	전원 unplug		0		0	
		전선 정리				0	
		호스/연장관 장착			0	0	

4.2. 밀대형 진공 청소기 사용 동작 분석 계획 및 측정

4.2.1. 실험 참여자

본 연구에서는 밀대형 진공 청소기 사용 동작 분석을 수행하기 위해 30~40대 가정 주부 15명(30대: 7명, 40대: 8명)을 선별하였다. 실험에서 수행되는 task 를 고려하여, 사용자 interface 분석 단계에서 밀대형 진공 청소기 사용자 특성 분석 설문에 참여했던 응답자 92명 중에서 밀대형 진공 청소기 사용이 익숙한 30~40대 가정 주부를 실험 참여자로 선정하였다. 실험 참여자 모두 오른손 잡이로 상지 및 하지에 근골격계 관련 질환 경험이 없었으며, 실험 참여자 평균 나이는 만 38세(표준편차: 4.99)였다.

4.2.2. 실험 환경 구성

가정 주부들이 밀대형 진공 청소기를 사용하는 환경과 유사한 실험 환경 구축을 위해 일반 가정의 거실 바닥과 유사한 바닥판을 제작하여 실험실 바닥에 설치하였다(그림 4-5 참조). 밀대형 진공 청소기 사용 환경 특성 분석 결과를 통해 청소 빈도가 높은 거실 바닥을 실험 환경으로 결정하였다. 실험에서 수행되는 task 를 고려하여 가로 1m, 세로 1.8m 크기의 바닥판 3개를 제작하였으며, 바닥판 3개를 붙여서 가로 3m, 세로 1.8m 의 실험 공간을 구축하였다. 장판은 일반적으로 거실 바닥에 활용되는 거실용 장판을 사용하였으며, 실험 중 장판이 진공 청소기에 의해 빨려 올라오는 것을 방지하기 위해 바닥판과 장판 사이를 본드로 부착하였다.



그림 4-5. 실험실 바닥 구성

4.2.3. 수행 작업

밀대형 진공 청소기를 사용하는 기본 동작들을 고려하여 제자리 청소 동작, 전후 이동 청소 동작, 좌우 이동 청소 동작의 3가지 실험 task 를 선정하였다. 밀대형 진공 청소기 사용 작업 특성 분석에서 선별한 activity 들과 청소기 사용 video 를 분석하여 기본적으로 빈도 높게 활용되는 동작들을 추출하고 실험에 적합하게 제자리 청소 동작, 전후 이동 청소 동작, 좌우 이동 청소 동작의 3가지로 재구성하였다. 제자리 청소 동작은 정해진 위치에 서서 주어진 5개의 방향으로 청소를 수행하는 task 로 30초간 3회 반복 측정하였다(그림 4-6 참조). Task 에 사용된 발의 보폭과 각도는 실험 참여자 3명의 평균 25 cm(표준편차: 4.23)의 보폭과 평균 40° (표준 편차: 7.29)의 각도를 활용하여 결정하였으며(그림 4-7 참조), 청소대의 방향 전환 순서는 모두 randomize 하였다. 전후 이동 청소 동작은 앞뒤로 이동하며 청소 동작을

수행하는 task 로 20초간 3회 반복 측정하였다 (그림 4-8 참조). Task 시작 위치와 시작 자세는 제자리 청소 동작 task 와 동일하게 위치 시켰다. 좌우 이동 청소 동작은 좌우로 이동하며 청소 동작을 수행하는 task 로 20초간 3회 반복 측정하였다(그림 4-9 참조). 앞에서 설명한 2개의 task 와 차별적으로 그림 4-8과 같이 task 의 시작 위치가 다르며, 시작 자세 역시 좌우 이동이 용이하게 양쪽 발을 수평하게 위치 시켰다.

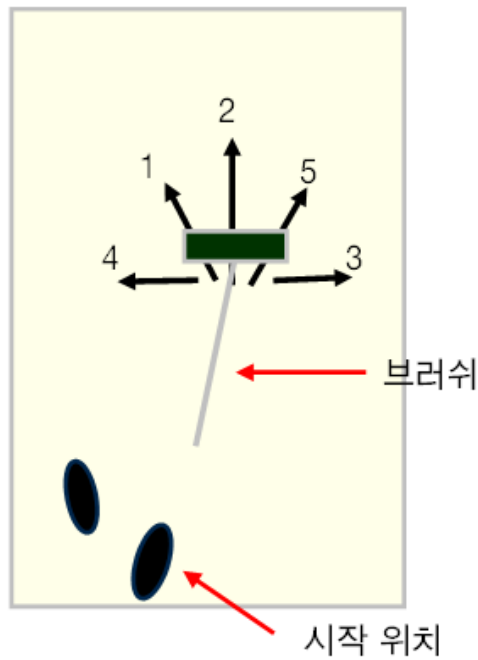


그림 4-6. 제자리 청소 동작

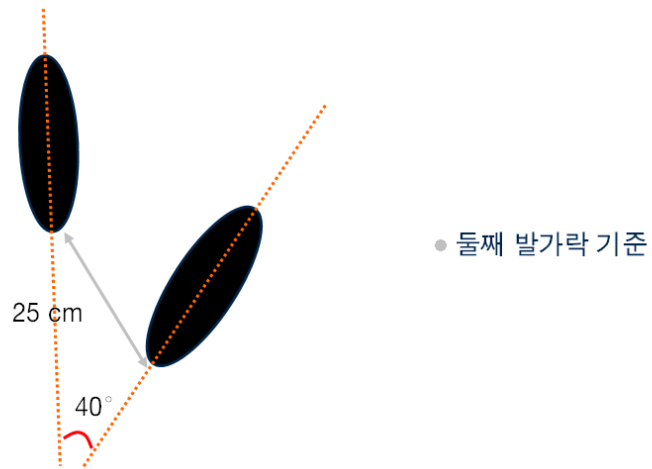


그림 4-7. 자연스러운 보폭과 각도

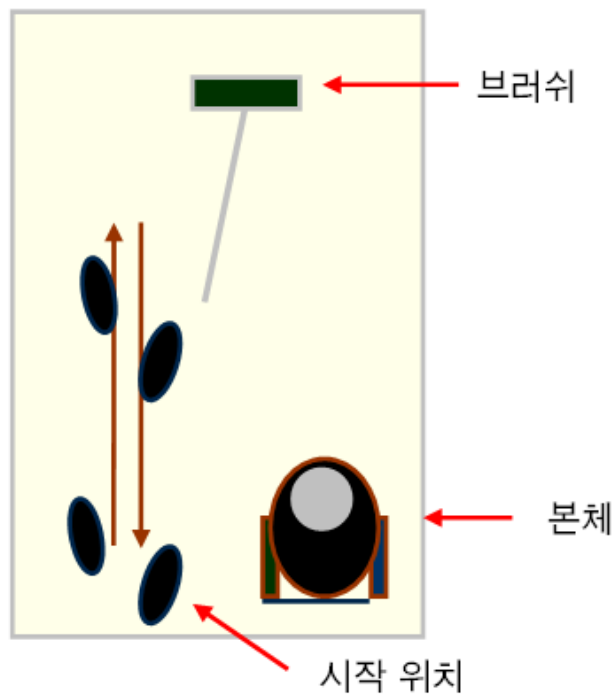
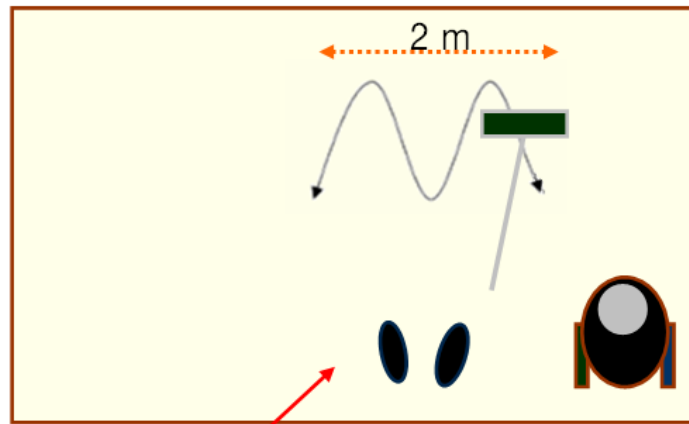


그림 4-8. 전후 이동 청소 동작



시작 위치

그림 4-9. 좌우 이동 청소 동작

4.2.4. 실험 계획

본 실험은 밀대형 진공 청소기를 사용하지 않고 사용자가 선호하는 자연스러운 청소기 사용 동작을 측정하는 실험과 밀대형 진공 청소기 사용하며 청소기 사용 동작을 측정하는 실험의 두 개의 within-subject design 으로 구성하였다(그림 4-10 참조). 두 실험은 별도로 나뉘어 진행하였으며, 자연스러운 청소기 사용 동작을 측정하는 실험을 우선적으로 수행하고 실제 청소기 사용 동작 실험을 수행하였다. 실험 순서에 의한 학습 효과와 간섭 효과를 최소화하기 위해 모든 task 진행 순서는 randomize 하였으며, 독립 변수로 선정된 청소기들 간의 실험 순서도 모두 randomize 하였다.

청소기 사용 동작 분석

자연스러운 청소기 사용 동작

- 제자리 청소 동작
- 전후 이동 청소 동작
- 좌우 이동 청소 동작

청소기 사용 동작

- 제자리 청소 동작
- 전후 이동 청소 동작
- 좌우 이동 청소 동작

그림 4-10. 실험 구성

4.2.4.1 독립 변수

자연스러운 청소기 사용 동작은 밀대형 진공 청소기를 사용하지 않은 상태에서 측정되었고, 청소기 사용 동작은 시중에 판매중인 밀대형 진공 청소기 모델 4종을 각각 사용하면서 측정되었다(그림 4-11 참조). 자연스러운 청소기 사용 동작을 측정하기 위한 실험에서는 청소기 설계에 의해 청소기 사용자의 동작이 수동적으로 결정되는 것을 방지하기 위해 청소기를 사용하지 않고 사용자가 선호하고 자연스러워하는 이상적인 밀대형 진공 청소기 사용 동작을 구현시켰다. 실제 청소기 사용 동작을 측정하는 실험에서는 밀대형 진공 청소기 설계 특성 분석 결과와 사용 작업 특성 분석 결과를 활용하여 청소기 사용 동작을 결정하는 주요 설계 특성이 청소대의 최대 길이, 무게, 브러쉬 무게임을 파악하고 3가지 기준에 따라 4대의 청소기(A, B, C, D)를 독립

변수로 선정하였다(표 4-5 참조).



(a) 청소기 A



(b) 청소기 B



(c) 청소기 C



(d) 청소기 D

그림 4-11. 평가대상으로 선정된 청소기

표 4-5. 선별된 밀대형 진공 청소기의 설계 specification

선정 기준	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D
청소대 최대 길이	100 cm	120 cm	107 cm	93 cm
청소대 무게	1385 g	1889 g	1522 g	1150 g
브러쉬 무게	311 g	639 g	409 g	257 g
브러쉬 부분 비중	22 %	34 %	27 %	22 %

4.2.4.2 종속 변수

자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작과 실제 밀대형 진공 청소기 동작을 파악하기 위해 전신 8개 관절 부위의 18개 관절 동작의 각도를 종속 변수로 선정하였다. 밀대형 진공 청소기 사용 작업 특성 분석에서 파악된 청소기 사용 activity 별 연관 신체 부위 분석 결과를 활용하여 청소 동작과 연관성이 높은 오른쪽 손목, 오른쪽 팔꿈치, 오른쪽 어깨, 목, 등, 허리, 오른쪽 무릎, 왼쪽 무릎을 종속 변수 신체 부위로 선정하였다. Greene and Heckman (1994)이 정의한 관절 별 동작 움직임을 활용하여 본 실험을 위해 선별된 신체 부위의 자유도 별 동작을 정의하고(표 4-6 참조) 정의된 동작의 각도 변화를 종속 변수로 선정하였다.

표 4-6. 종속 변수로 선별된 신체 부위 및 동작 자유도

신체 부위	자유도	동작
허리	3	굽히기/펴기
		좌측 굴곡/우측 굴곡
		우측 회전/좌측 회전
등	3	굽히기/펴기
		좌측 굴곡/우측 굴곡
		우측 회전/좌측 회전
목	3	굽히기/펴기
		좌측 굴곡/우측 굴곡
		우측 회전/좌측 회전
어깨	3	올리기/내리기
		우측 회전/좌측 회전
		모으기/벌리기
오른쪽 팔꿈치	1	굽히기/펴기
오른쪽 손목	3	내전/외전
		우측 회전/좌측 회전
		굽히기/펴기
오른쪽 무릎	1	굽히기/펴기
왼쪽 무릎	1	굽히기/펴기

4.2.5. 동작 분석 시스템 및 reflective marker 설정

밀대형 진공 청소기 사용 동작을 측정하기 위해서 Motion Analysis 사의 광학식 motion capture system 인 Falcon240 카메라를 사용하였으며 동작의 효율적인 측정을 위해 22개의 reflective marker set 을 활용하였다. 전신의 움직임을 정확하게 측정하기 위해서 6 mm 렌즈가 부착된 카메라 5대를 실험을 위해 설치한 바닥판을 중심으로 2.5m~3m 거리에 배치하였으며 청소

동작의 속도를 고려하여 초당 측정 프레임(FPS; frame per second)을 60Hz 로 설정하였다. 또한 전신 8개 신체 부위의 18개 관절 동작을 효율적으로 측정하기 위해 22개의 새로운 reflective marker set 을 정의하였으며(그림 4-12 참조) 청소 동작의 크기를 고려하여 25mm marker 를 사용하였다.

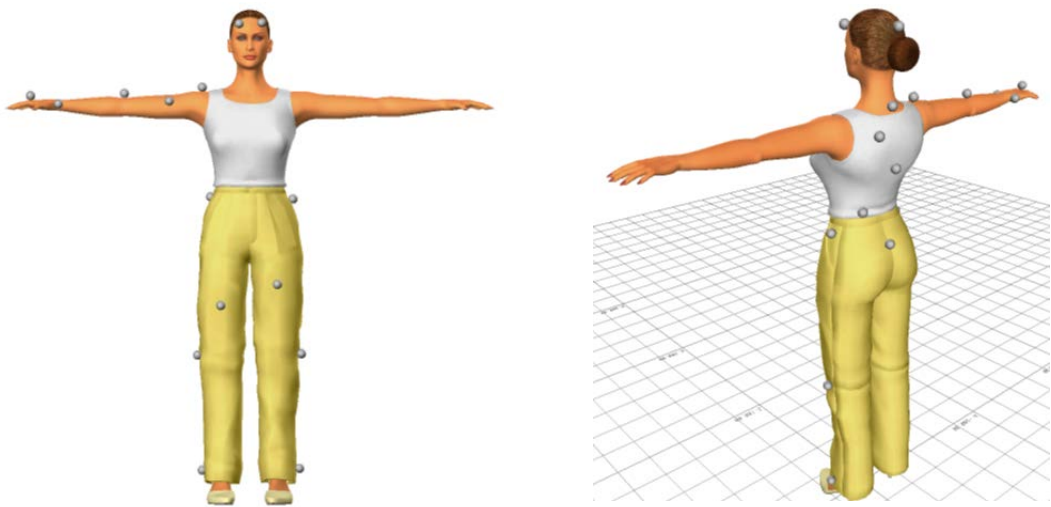


그림 4-12. 22개의 reflective marker set

4.2.6. 동작 측정 및 기타 제약 사항

사용자가 선호하는 자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작 측정을 위해 밀대형 진공 청소기를 사용하지 않고 동작을 측정하였다. 밀대형 진공 청소기의 설계 요인에 의해 청소기 사용 동작이 수동적으로 결정되는 것을 방지 하기 위해 실제 밀대형 진공 청소기를 사용하지 않고 실험을 진행하였다. 실험 참여자가 밀대형 진공 청소기를 사용한다는 가정 아래 가장 이상적으로 생각되는 청소기 사용 동작을 구현하도록 하였으며, 약 3분 정도의 training

시간을 주어 가장 자연스러운 청소기 사용 동작이 구현되도록 하였다.

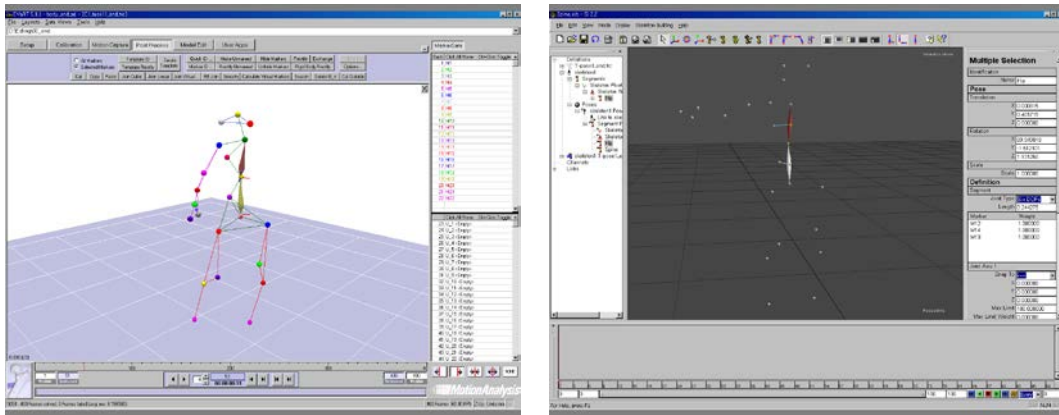
사용자가 선호하는 자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작 측정을 위해 밀대형 진공 청소기를 사용하지 않고 동작을 측정하였다. 밀대형 진공 청소기의 설계 요인에 의해 청소기 사용 동작이 수동적으로 결정되는 것을 방지 하기 위해 실제 밀대형 진공 청소기를 사용하지 않고 실험을 진행하였다. 실험 참여자가 밀대형 진공 청소기를 사용한다는 가정 아래 가장 이상적으로 생각되는 청소기 사용 동작을 구현하도록 하였으며, 약 3분 정도의 training 시간을 주어 가장 자연스러운 청소기 사용 동작이 구현되도록 하였다.

청소기 본체와 호스의 움직임이 청소기 사용 동작을 방해하는 것을 방지하기 위해 실험 참여자의 이동 거리를 제한하였다. 청소 동작 시 청소기 본체가 끌려오거나 호스가 청소 동작을 방해하는 것을 방지하기 위해 본체와 호스의 영향을 받지 않으며 이동할 수 있는 거리를 파악하여 task 별로 설정하였다. 전후 이동 청소 동작 task 의 경우 시작 위치에서 앞으로 2m 까지만 움직일 수 있게 제한하였으며, 좌우 이동 청소 동작 task 의 경우에도 시작 위치에서 좌측으로 2m 까지만 움직일 수 있게 제한하였다.

4.2.7. 후처리 과정

측정이 완료된 동작 data 를 EVaRT 5.0과 Solven Interface 2.0을 활용하여 관절의 동작 별 각도 data 로 변환하였으며, 분석 효율성을 고려하여 각도 data 의 초당 측정 프레임(FPS; frame per second)을 30 Hz 로 변환하였다. 동작 측정이 완료된 data 를 EVaRT 5.0 소프트웨어를 활용하여 tracking 과 editing 작업을

수행하였으며, Solven Interface 2.0 소프트웨어를 사용하여 뼈대를 구성하고(그림 4-13 참조) 다시 EVaRT 5.0을 활용하여 관절 동작 별 각도 data로 변환하였다. 제한된 분석 시간과 효율적인 각도 data 분석을 위해 실험 참여자 1명에 대한 초당 측정 프레임 값의 변화에 따른 각도 data의 최대값, 평균, 표준편차, 최소값, skewness, kurtosis의 변화를 관찰하였으며(표 4-7 참조), 그 결과 초당 측정 프레임을 30 Hz로 줄여도 각도 data 분석 결과에는 영향을 미치지 않는 것으로 파악되어 각도 data의 초당 측정 프레임을 30 Hz로 변환하였다.



(a) EVaRT 5.0

(b) Solver Interface 2.0

그림 4-13. Marker tracking 작업과 뼈대 구성

표 4-7. 초당 측정 프레임(FPS) 변화에 따른 팔꿈치 각도 data 분석 결과 예

FPS	최대값	평균	표준편차	최소값	Skewness	Kurtosis
10 Hz	111.37	64.614	18.828	32.274	0.00008	2.1396
20 Hz	111.54	64.576	18.835	31.924	0.00180	2.1415
30 Hz	111.65	64.545	18.835	31.865	0.00337	2.1409
40 Hz	111.75	64.545	18.832	31.704	0.00337	2.1409
50 Hz	111.75	64.544	18.834	31.704	0.00340	2.1414
60 Hz	111.75	64.555	18.828	31.704	0.00285	2.1411

4.3. 동작 분석 보안을 위한 EMG 측정 및 불편도 측정

4.3.1. EMG 측정 계획

동작 분석을 통한 밀대형 진공 청소기 설계 평가를 보완하기 위해 추가적으로 EMG 를 측정하였다. 측정 장비로는 Noraxon 사의 Telemetry 900을 사용하였으며 측정 frequency 는 1000 Hz 로 설정하였다. 7개의 채널을 사용하여 청소 동작과 관련이 있는 상체 근육(표 4-8 참조; 그림 4-14 참조)의 힘 사용량을 측정하였으며, 측정은 동작 분석 실험과 동시에 이루어졌다. 보다 정확한 힘 측정을 위해 FIR filter 를 사용하여 10 Hz 미만, 350 Hz 초과하는 noise 는 제거하였으며, EMG base 값을 별도로 측정하여 측정 data 를 보정하였다. 분석 시간을 줄이기 위해 근육 별 MVC 는 별도로 측정하지 않았으며, 청소기 간의 힘 사용 순서만을 파악하기 위해 window 50ms 로 RMS 처리된 data 들의 실험 참여자 간의 평균을 산출하여 분산분석과 SNK 분석을 수행하였다.

표 4-8. EMG 부착 근육 및 관련 청소 동작

근육	관련 청소 동작
Brachioradialis	팔꿈치 굽히기
Extensor Carpi Ulnaris	손목의 굽히기/펴기
Biceps Brachii	팔꿈치 굽히기, 손목 회전
Triceps, Lateral Head	팔꿈치 굽히기
Deltoid, Anterior	어깨 앞으로 올리기
Neck Muscle	목 굽히기/펴기
Erector Spinae	등 굽히기/펴기

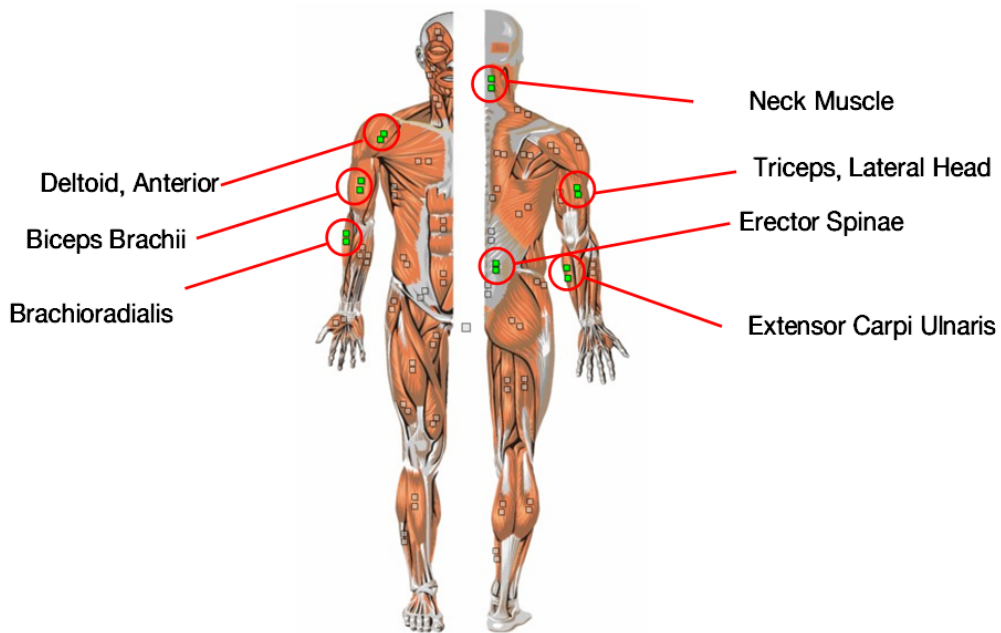


그림 4-14. EMG 부착 근육 위치

4.3.2. 불편도 측정 계획

동작 분석을 통한 밀대형 진공 청소기 설계 평가를 보완하기 위해 추가적으로 전반적인 불편도와 16개 신체 부위별 불편도를 조사하였다(그림

15 참조). 불편도 측정은 청소기 사용 동작 측정 실험에서만 조사되었으며, 청소기 별로 task 가 끝날 때 마다 수행되었다. Task 수행 시 사용한 청소기에 대해 신체 전반적으로 느껴지는 전반적인 불편도와 신체를 앞뒤로 구분하여 평가된 16개 부위에 대한 신체 부위 별 불편도가 측정되었으며, 평가 도구로는 Borg CR-10이 사용되었다(그림 4-16 참조).

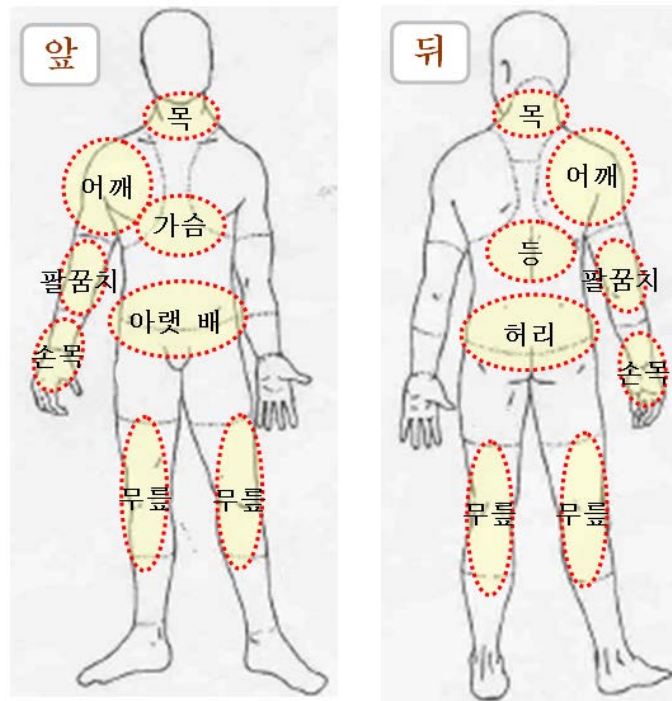


그림 4-15. 신체 부위 별 불편도 측정

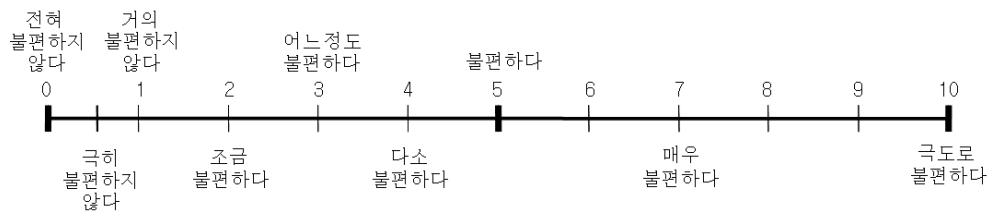


그림 4-16. Borg CR-10

4.4. 밀대형 진공 청소기 사용 동작 분석 및 설계 평가 결과

4.4.1. 자연스러운 청소기 사용 동작에 대한 분석 결과

자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작을 정량적으로 파악한 결과, 자연스러운 청소기 사용 동작 시 목, 어깨, 오른쪽 팔꿈치가 주요하게 사용되는 신체 부위로 파악되었다. 정량적으로 파악된 자연스러운 청소기 사용 동작을 활용하여 관절 별 동작 범위를 산출한 결과(표 4-9 참조) 목 좌측 굴곡/우측 굴곡, 어깨 올리기/내리기, 우측 회전/좌측 회전, 모으기/별리기, 오른쪽 팔꿈치 굽히기/펴기가 공통적으로 주요하게 사용되는 관절 동작으로 파악되었다(기준: 20° 이상). Task 별로 파악해 본 결과 제자리 청소 동작 task 의 경우 손목 내전/외전, 손목 우측 회전/좌측 회전, 손목 굽히기/펴기 동작이 주요하게 사용되는 관절 동작으로 파악되었고, 전후 이동 청소 동작 task 에서는 양쪽 무릎 굽히기/펴기 동작이 주요하게 사용되는 관절 동작으로 파악되었다. 또한 좌우 이동 청소 동작 task 의 경우 등 좌측/우측 굴곡과 오른쪽 손목 굽히기/펴기가 주요하게 사용되는 관절 동작으로 파악되었다. 공통적으로 주요하게 사용되는 관절 동작에 대해 task 별 분산분석을 수행한 결과, 신뢰수준 $\alpha = 0.05$ 에서 목의 좌측 굴곡/우측 굴곡($F(2, 28) = 6.63, p =$

0.0044; 표 4-10 (a) 참조), 어깨 우측 회전/좌측 회전($F(2, 28) = 10.14, p = 0.0005$;
표 4-10 (b) 참조), 오른쪽 팔꿈치 굽히기/펴기($F(2, 28) = 5.91, p = 0.0072$; 표 4-10
(c) 참조)의 task 간의 차이가 유의하였다. Task 간 Student-Newman-Keuls (SNK)
테스트를 수행한 결과, 목의 좌측 굴곡/우측 굴곡, 어깨 우측 회전/좌측 회전,
오른쪽 팔꿈치 굽히기/펴기에서 모두 전후 이동 청소 동작과 좌우 이동 청소
동작 task 가 동일한 집단으로 분류되었으며(그림 4-17 참조) 제자리 청소 동작
task 의 관절 동작 범위가 전후 이동 청소 동작 task 와 좌우 이동 청소 동작
task 에서 보다 큰 것으로 파악되었다. 부록 1은 사용자가 선호하는
자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작을 task, 동작 별로 최소값, 최대값,
평균, 중앙값으로 파악한 결과이고 부록 2는 사용자가 선호하는 자연스러운
밀대형 진공 청소기 사용 시 관절의 동작 범위를 task 별로 파악한 결과이다.

표 4-9. Task 별 주요하게 사용되는 신체 부위와 동작 범위 예

신체 부위	동작	통계량	Task		
			제자리	전후	좌우
등	좌측 굴곡/우측 굴곡	Mean	19.0(°)	19.8	21.7
		SD	8.4	8.4	9.9
목	좌측 굴곡/우측 굴곡	Mean	38.3	30.7	31.0
		SD	13.3	10.0	9.6
어깨	올리기/내리기	Mean	61.3	66.3	63.5
		SD	26.2	27.1	27.3
	우측 회전/좌측 회전	Mean	44.7	33.3	35.0
		SD	11.1	17.2	16.1
	모으기/벌리기	Mean	48.3	35.3	41.6
		SD	32.9	27.8	42.0
오른쪽 팔꿈치	굽히기/펴기	Mean	32.2	21.0	23.7
		SD	16.6	10.7	14.0
오른쪽 손목	내전/외전	Mean	31.8	12.8	13.7
		SD	16.5	6.7	6.1
	우측 회전/좌측 회전	Mean	37.4	15.3	18.5
		SD	14.3	7.8	10.5
	굽히기/펴기	Mean	25.9	13.1	21.4
		SD	9.8	4.2	14.5
왼쪽 무릎	굽히기/펴기	Mean	6.4	27.2	19.5
		SD	5.0	8.3	8.0

표 4-10. 공통적으로 주요하게 사용되는 관절 동작에 대한 task별 분산분석

(a) 목의 좌측 굴곡/우측 굴곡

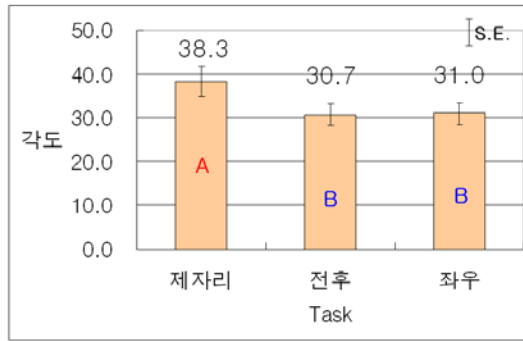
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	3964.9	283.2		
Task(T)	2	563.5	281.8	6.63	0.0044
S × T	28	1189.1	42.5		
전체	44	5717.5			

(b) 어깨 우측 회전/좌측 회전

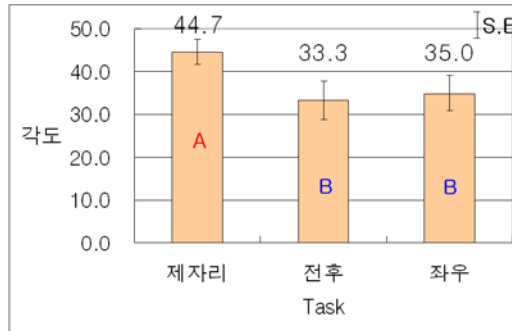
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	7914.2	565.3		
Task(T)	2	1123.8	561.9	10.14	0.0005
S × T	28	1550.8	55.4		
전체	44	10588.8			

(c) 오른쪽 팔꿈치 굽히기/펴기

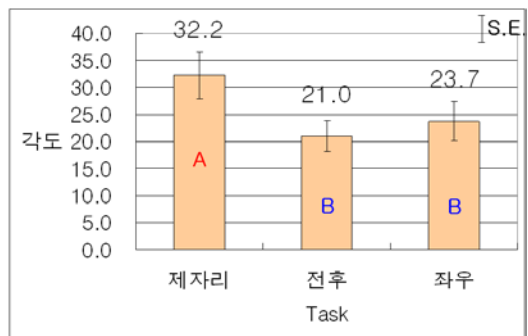
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	5776.7	412.6		
Task(T)	2	1027.1	513.6	5.91	0.0072
S × T	28	2431.1	86.8		
전체	44	9235.0			



(a) 목의 좌측 굴곡/우측 굴곡



(b) 어깨 우측 회전/좌측 회전



(c) 오른쪽 팔꿈치 굽히기/펴기

그림 4-17. Task 간의 SNK 분석 결과 (A, B는 서로 다른 group을 의미함)

4.4.2. 자연스러운 청소기 사용 동작 결과에 대한 변동성 파악

정량적으로 파악된 자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작에 대한 실험 참여자 내의 변동성(intra-subject variation)과 실험 참여자 간의 변동성(inter-subject variation)을 파악한 결과, 실험 참여자 내의 변동성이 실험 참여자 간의 변동성 보다 안정적으로 나타났다. 실험 참여자 내의 변동성(standard deviation of measurement error, SD_{me})을 산출한 결과(표 4-11 참조), SD_{me} 이 전반적으로 5° 이하의 안정된 변동성을 보였으나, 목의 굽히기/펴기, 어깨의 모으기/별리기 등의 일부 관절 동작에서 SD_{me} 값이 5 이상으로 상대적으로 높은 변동성을 보였다(사용자 내의 변동성의 범위: 03.~13.9). 실험 참여자 간의 변동성(standard deviation of biological variation, SD_x)을 산출하여 data 의 변동성을 파악한 결과(표 4-12 참조) 산출된 SD_x 값들이 전반적으로 10° 이상으로 실험 참여자 간의 변동성에 비해 상대적으로 변동성이 큰 것으로 파악되었다(사용자 간의 변동성의 범위: 1.4~31.1). 4.4.1 절에서 파악된 자연스러운 청소기 사용 동작에서의 관절 별 동작 범위 크기와 비교해 본 결과, 관절 별 동작 범위 크기와 SD_x 크기 사이에 유사 관계가 파악되어 동작 범위가 큰 관절일수록 실험 참여자 간의 변동성이 커지는 것을 확인하였다(표 4-13 참조).

표 4-11. 사용자 내의 변동성(SDme) 예

신체 부위	동작	제자리 task	전후 task
		최소값 SDme	최소값 SDme
허리	굽히기/펴기	2.3 (°)	1.1
	좌측 굴곡/우측 굴곡	1.1	1.8
	우측 회전/좌측 회전	2.5	0.9
목	굽히기/펴기	2.7	11.1
	좌측 굴곡/우측 굴곡	1.9	3.8
	우측 회전/좌측 회전	1.0	1.5
어깨	올리기/내리기	4.1	1.3
	우측 회전/좌측 회전	3.0	1.1
	모으기/벌리기	7.0	13.9
오른쪽 팔꿈치	굽히기/펴기	1.7	0.7
오른쪽 손목	내전/외전	7.0	8.1
	우측 회전/좌측 회전	4.9	9.1
	굽히기/펴기	4.0	1.9

표 4-12. 사용자 간의 변동성(SDx) 예

신체 부위	동작	제자리 task	전후 task
		최소값 SDx	최소값 SDx
허리	굽히기/펴기	12.3 (°)	4.1
	좌측 굴곡/우측 굴곡	9.5	3.7
	우측 회전/좌측 회전	16.1	10.8
등	굽히기/펴기	6.5	5.3
	좌측 굴곡/우측 굴곡	13.1	6.9
	우측 회전/좌측 회전	8.8	7.5
목	굽히기/펴기	12.4	15.0
	좌측 굴곡/우측 굴곡	14.7	15.6
	우측 회전/좌측 회전	11.4	10.9
어깨	올리기/내리기	21.9	21.5
	우측 회전/좌측 회전	17.3	18.6
	모으기/벌리기	22.0	19.2
오른쪽 팔꿈치	굽히기/펴기	7.9	9.3
오른쪽 손목	내전/외전	16.7	12.0
	우측 회전/좌측 회전	13.6	12.5
	굽히기/펴기	16.4	13.7

표 4-13. 자연스러운 청소기 사용 동작 범위와 SDx 값의 비교 예

신체 부위	동작	전후 이동 청소 동작 task		
		동작 범위	최소값 SDx	최대값 SDx
허리	굽히기/펴기	7.5(°)	4.1	6.9
	좌측 굴곡/우측 굴곡	8.0	3.7	4.7
	우측 회전/좌측 회전	9.0	10.8	8.3
등	굽히기/펴기	5.1	5.3	7.4
	좌측 굴곡/우측 굴곡	19.8	6.9	12.7
	우측 회전/좌측 회전	8.4	7.5	8.7
목	굽히기/펴기	11.7	15.0	11.0
	좌측 굴곡/우측 굴곡	30.7	15.6	14.0
	우측 회전/좌측 회전	10.9	10.9	11.8
어깨	올리기/내리기	66.3	21.5	27.7
	우측 회전/좌측 회전	33.3	18.6	22.1
	모으기/별리기	35.3	19.2	30.2
오른 팔꿈치	굽히기/펴기	21.0	9.3	12.8
오른 손목	내전/외전	12.8	12.0	11.2
	우측 회전/좌측 회전	15.3	12.5	12.2
	굽히기/펴기	13.1	13.7	13.9
오른 무릎	굽히기/펴기	23.4	2.6	10.0
왼 무릎	굽히기/펴기	27.2	4.5	8.0

정량적으로 파악된 자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작에 대한 신뢰성 검증을 위해 측정 표준 오차(standard error of measurement, SE_{meas})를 산출하여 data 전반적인 변동성을 파악한 결과, 전반적으로 안정된 변동성을 확인할 수 있었다(표 4-14 참조). 자연스러운 청소기 사용 동작에 대한 SE_{meas} 값을 산출해 본 결과, SE_{meas} 값이 전반적으로 5° 이하로 안정적으로 낮게 산출되어 정량적으로 파악된 자연스러운 청소기 사용 동작의 신뢰성을

확인시켜주었다(측정 표준 오차 산출 범위: 0.4~12.5). Task 별로 SE_{meas} 값의 평균 값을 산출해본 결과, 제자리 청소 동작 task 에서 4.1(표준편차: 2.1), 전후 이동 청소 동작 task 에서 1.5(표준편차: 0.9), 좌우 이동 청소 동작에서 2.4(표준편차: 1.5)로 전후 이동 청소 동작에서의 변동성이 가장 안정적인 것으로 파악되었으며, 제자리 청소 동작의 변동성이 큰 것으로 파악되었다(그림 4-18 참조). 본 연구에서 산출된 SD_{me} , SD_x , SE_{meas} 값은 부록 3에 별도로 정리하였다.

표 4-14. 측정 표준 오차(SD_{meas}) 예

신체 부위	동작	제자리 task	전후 task
		최소값 SD_{meas}	최소값 SD_{meas}
허리	굽히기/펴기	2.7(°)	1.3
	좌측 굴곡/우측 굴곡	1.9	1.9
	우측 회전/좌측 회전	2.5	0.7
목	굽히기/펴기	4.3	2.0
	좌측 굴곡/우측 굴곡	2.8	1.3
	우측 회전/좌측 회전	2.2	0.8
어깨	올리기/내리기	2.8	0.5
	우측 회전/좌측 회전	2.9	0.4
	모으기/벌리기	4.3	2.2
오른쪽 팔꿈치	굽히기/펴기	4.3	0.8
오른쪽 손목	내전/외전	7.1	2.0
	우측 회전/좌측 회전	7.1	2.2
	굽히기/펴기	4.7	0.9

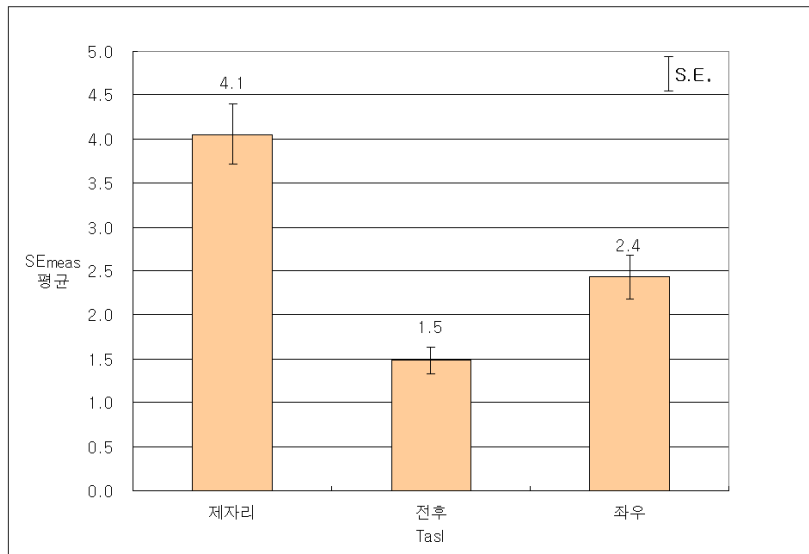


그림 4-18. Task 별 평균 SEmeas 값 비교

4.4.3. 유사도 평가

4.4.3.1 제자리 청소 동작에서의 유사도 파악 및 청소기 설계 분석

4.4.3.1 제자리 청소 동작에서의 유사도 파악 및 청소기 설계 분석

제자리 청소 동작 task 에서의 유사도를 분석한 결과, 청소기 D 의 사용 동작이 대부분의 관절에서 자연스러운 청소기 사용 동작과 가장 유사한 것으로 파악되었다(표 4-15 참조). 특히, 청소대의 밀고 당기는 동작에 주요하게 관여하는 팔꿈치 굽히기, 어깨 앞으로 올리기/뒤로 올리기, 어깨 회전, 목 좌측 굴곡/우측 굴곡 동작에서 다른 청소기에 비해 유사도가 상대적으로 높은 것으로 파악되었다. 유사도가 높은 관절에 대해 신뢰수준 $\alpha = 0.05$ 에서 분산 분석을 수행한 결과 팔꿈치 굽히기($F(3, 42) = 18.49, p = <0.0001$; 표 4-16 (a) 참조), 어깨 앞으로 올리기/뒤로 올리기($F(3, 42) = 3.23, p =$

0.0320; 표 4-16 (b) 참조), 목 좌측 굴곡/우측 굴곡($F(3, 42) = 4.99, p = 0.0048$; 표 4-16 (c) 참조) 동작에서 유의한 결과를 얻을 수 있었다. SNK 분석 결과 유의한 세 관절에서 모두 청소기 D 가 가장 유사도가 높은 group 으로 분류 되었으며(그림 4-19 참조), 사용자 interface 분석 결과를 활용하여 다른 청소기들과의 청소대 설계 요소와 유사도 값을 비교 분석한 결과 유의한 세 관절 동작에서의 유사도 결과가 4개 청소기의 청소대 길이와 반비례되는 것을 파악하였다. 또한, 통계적으로 유의하지 않지만 양쪽 무릎 관절과 목의 굽히기/펴기 동작에 대한 유사도를 다른 청소기와 비교해 본 결과 청소대 길이가 짧을수록 무릎이 많이 굽혀지고 목이 많이 숙여진다는 것을 파악할 수 있었다. 본 연구에서 파악된 유사도 산출 결과는 부록 4에 별도로 정리하였다.

표 4-15. 제자리 청소 동작 task에서의 청소기 별 유사도 결과 예

신체 부위	동작	통계량	청소기			
			A	B	C	D
허리	굽히기(+)	Mean	71.7(%)	58.5	71.3	64.4
	펴기(-)	SD	24.9	33.2	24.9	29.4
	좌측 굴곡(+)	Mean	54.2	44.0	60.6	46.6
	우측 굴곡(-)	SD	27.9	21.5	24.3	28.4
	우회전(+)	Mean	23.7	35.9	21.2	29.9
	좌회전(-)	SD	24.6	25.2	20.8	26.6
어깨	앞으로 올리기(+)	Mean	60.0	60.9	61.6	66.3
	뒤로 올리기(-)	SD	22.2	16.8	20.5	19.7
	우회전(+)	Mean	30.8	28.7	33.4	36.7
	좌회전(-)	SD	21.1	17.8	24.4	21.6
	모으기(+)	Mean	71.7	67.1	72.5	71.4
	벌리기(-)	SD	20.4	19.1	22.4	20.6
팔꿈치	굽히기(+)	Mean	34.4	26.2	35.7	47.4
		SD	21.3	20.4	22.8	17.8
손목	내전(+)	Mean	50.9	46.1	53.0	51.4
	외전(-)	SD	20.6	19.5	21.2	19.5
	우회전(+)	Mean	47.0	43.0	44.4	41.6
	좌회전(-)	SD	13.6	10.4	14.8	16.5
	굽히기(+)	Mean	42.4	47.5	46.4	41.9
	펴기(-)	SD	26.3	25.4	29.0	27.7

표 4-16. 청소기 D의 유사도가 높은 관절 동작에 대한 분산분석 결과

(a) 팔꿈치 굽히기

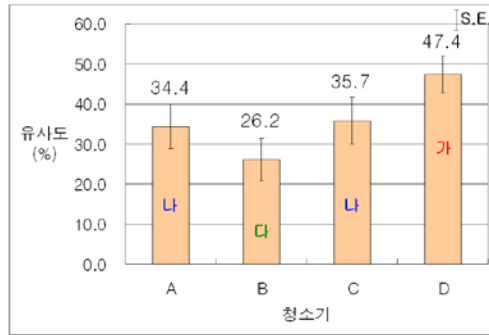
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	21329.9	1523.6		
Task(T)	3	3430.2	1143.4	18.49	<0.0001
S × T	42	2597.9	61.9		
전체	59	27358.0			

(b) 어깨 앞으로 올리기/뒤로 올리기

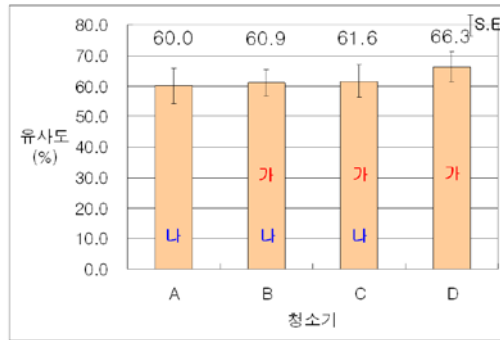
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	20606.7	1471.9		
Task(T)	3	349.4	116.5	3.23	0.0320
S × T	42	1516.7	36.1		
전체	59	22472.8			

(c) 목 좌측 굴곡/우측 굴곡

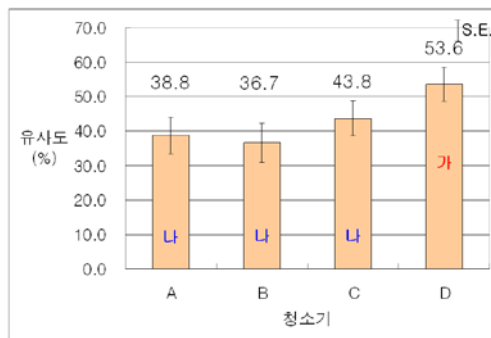
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	16383.8	1170.3		
Task(T)	3	2565.1	855.0	4.99	0.0048
S × T	42	7199.8	171.4		
전체	59	26148.6			



(a) 팔꿈치 굽히기



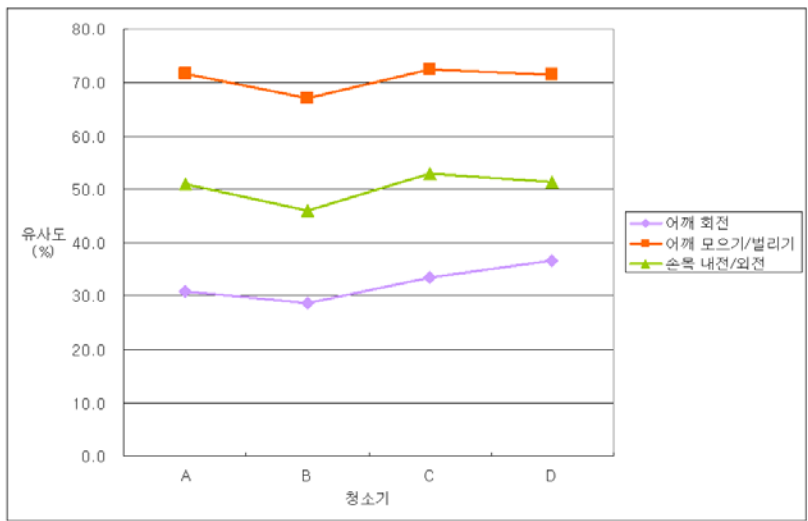
(b) 어깨 앞으로 올리기/뒤로 올리기



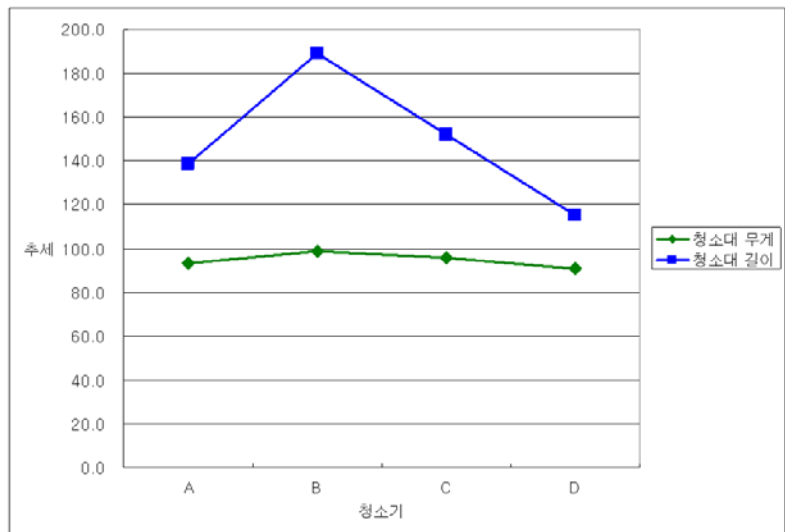
(c) 목 좌측 굴곡/우측 굴곡

그림 4-19. SNK 분석 결과

청소대 B 의 경우 청소기 D 와 대조적으로 대부분의 동작에서 상대적으로 낮은 유사도를 보여주는 것으로 파악되었다. 특히 청소기의 방향을 조절하기 위해 사용되는 어깨 회전, 어깨 모으기/별리기, 손목 내전/외전 동작에서 낮은 유사도를 보였으며, 청소대 전후 청소 동작에 주요하게 관여하는 팔꿈치에서도 낮은 유사도를 보였다. 어깨 회전, 어깨 모으기/별리기, 손목 내전/외전, 팔꿈치 굽히기 동작에 대해 신뢰수준 $\alpha = 0.05$ 에서 분산분석을 수행한 결과, 팔꿈치 굽히기 동작($F(3, 42) = 18.49, p = <0.0001$; 표 4-16 (a) 참조)에서 유의한 결과를 얻을 수 있었다. 조사 결과, 청소기 B 의 경우 청소대 길이가 가장 길기 때문에 그림 4-18 (a)에서처럼 SNK 분석 결과 가장 유사도가 낮은 grouping 으로 분류되는 것으로 파악되었다. 어깨 회전, 어깨 모으기/별리기, 손목 내전/외전 동작의 경우 통계적으로 유의하지는 않지만 산출된 유사도 결과와 청소기 A, B, C, D 의 청소대 길이 및 청소대 무게를 비교해 본 결과 청소대 길이 및 무게 순서와 반비례하는 경향을 보여 주는 것으로 파악되었다(그림 4-20 참조).



(a) 어깨 회전, 어깨 모으기/벌리기, 손목 내전/외전에서의 유사도



(b) 청소기 별 청소대 무게와 청소대 길이

그림 4-20. 세 관절 동작의 유사도와 청소대 길이 및 무게의 비교

4.4.3.2 전후 이동 청소 동작에서의 유사도 파악 및 청소기 설계 분석

전후 이동 청소 동작 task 에서의 유사도를 분석한 결과, 팔꿈치의 굽히기/펴기 동작을 제외한 모든 동작에서 청소기 A, B, C, D 유사도 간의 차이가 작은 것으로 파악되었다(표 4-17 참조). 청소기 A, B, C, D 를 기준으로 관절 동작에 대한 분산분석을 수행한 결과 신뢰수준 $\alpha = 0.05$ 에서 팔꿈치 굽히기 동작($F(3, 42) = 4.62, p = 0.0070$; 표 4-18 참조)만이 유의하게 파악되었다. 팔꿈치에 대해 SNK 분석을 수행한 결과, 청소기 B 가 가장 유사도가 낮은 group 에 분류되었으며(그림 4-21 참조), 청소기 설계 특성 분석을 통해 원인을 파악해 본 결과 청소기 B 의 청소대 길이가 가장 긴 것 때문인 것으로 파악되었다. 청소기 A, C, D 의 경우 하나의 group 으로 grouping 되었으며, 유사도 결과와 SNK 분석 결과의 비교를 통해 일정한 길이 이하로 청소대 길이를 짧게 하여도 팔꿈치 굽히기/펴기 동작의 유사도는 향상되지 않는 것을 파악할 수 있었다. 전후 이동 청소 동작 task 의 경우 제자리 청소 동작 task 와는 차별적으로 무릎 굽히기 동작에 대한 유사도가 상대적으로 높았으며, 이를 통해 제자리에 서서 청소하는 동작이 이동하며 청소하는 동작 보다 청소대 길이에 민감한 것을 파악할 수 있었다.

표 4-17. 전후 청소 동작 task에서의 청소기 별 유사도 결과 예

신체 부위	동작	통계치	청소기			
			A	B	C	D
허리	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	74.8(%)	67.0	74.9	69.3
		SD	28.9	28.2	24.5	29.6
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	67.7	66.8	68.9	65.4
		SD	15.5	18.5	15.9	18.9
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	39.3	32.9	37.6	32.6
		SD	32.3	32.0	34.4	31.6
목	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	19.5	24.0	25.9	15.9
		SD	24.5	27.7	30.9	19.4
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	44.5	45.6	46.5	49.4
		SD	23.2	18.3	27.4	20.5
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	20.9	25.2	21.7	23.2
		SD	25.4	29.4	26.0	30.9
오른쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	76.7	75.4	78.0	78.4
		SD	16.1	19.0	15.1	14.2
왼쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	74.4	74.5	71.9	73.1
		SD	18.6	18.2	21.2	20.3

표 4-18. 팔꿈치 굽히기 동작에 대한 분산분석 결과

변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	42309.4	3022.1		
Task(T)	3	1480.4	493.5	4.62	0.0070
S × T	42	4489.4	106.9		
전체	59	48279.2			

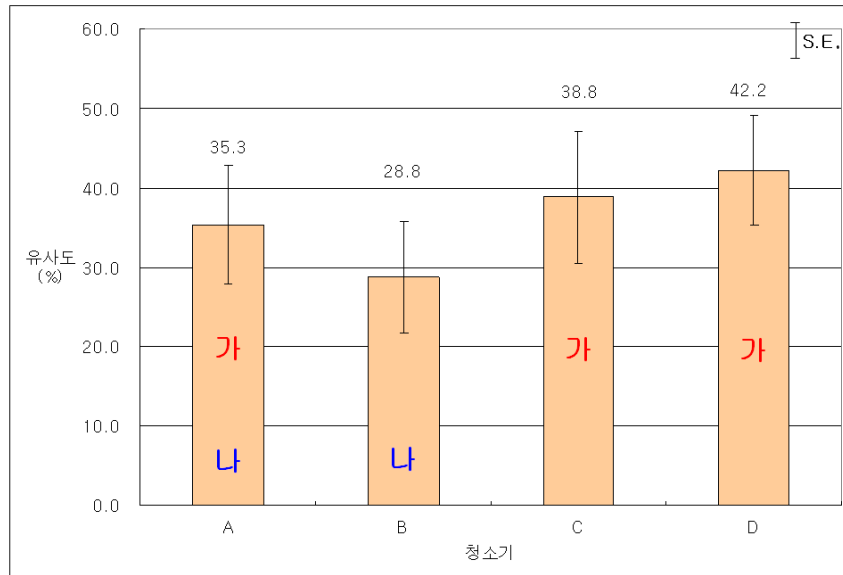


그림 4-21. 팔꿈치 굽히기 동작에서의 SNK 분석 결과

4.4.3.3 좌우 이동 청소 동작에서의 유사도 파악 및 청소기 설계 분석

좌우 이동 청소 동작 task 에서의 유사도를 분석한 결과, 다른 두 task 에 비해 전반적으로 유사도가 높은 것으로 파악되었다(표 4-19 참조). 제자리 청소 동작 task 와 전후 이동 청소 동작 task 에서의 청소대를 밀고 당기는 동작 메커니즘과는 다르게 좌우 이동 청소 동작 task 에서는 청소대를 좌우로 움직이기 때문에 청소기 A, B, C, D 모두 등을 숙이는 동작이 줄어들어 등 부위의 유사도가 높게 산출 되었으며, 전후 이동 청소 동작 task 처럼 이동하며 청소 동작을 수행하는 task 이기 때문에 무릎의 동작의 유사도 역시 높게 산출 되었다. 청소기 A, B, C, D 를 기준으로 관절의 동작에 대한 분산분석을 수행한 결과 신뢰수준 $\alpha = 0.05$ 에서 목 굽히기/펴기($F(3, 42) = 3.29, p = 0.0299$; 표 4-20 (a) 참조), 목 좌측 굴곡/우측 굴곡($F(3, 42) = 3.40, p =$

0.0264; 표 4-20 (b) 참조), 어깨 앞으로 올리기/뒤로 올리기($F(3, 42) = 4.28, p = 0.0100$; 표 4-20 (c) 참조), 팔꿈치 굽히기($F(3, 42) = 13.87, p = <0.0001$; 표 4-20 (d) 참조) 동작이 유의하게 파악되었다. SNK 분석 결과 목 굽히기/펴기 동작에서는 유사도에 의한 청소기들의 grouping 결과가(그림 4-22 (a) 참조), 청소기들의 청소대 길이 순서와 유사하였으며, 조사 결과 청소대가 짧을수록 청소 수행 시 브러시를 관찰하기 위해 목을 많이 숙이고 청소대가 길수록 목을 적게 숙이는 것으로 파악되었다. 목 좌측 굴곡/우측 굴곡 동작의 SNK 분석 결과 청소기 grouping 결과(그림 4-22 (b) 참조)가 청소대 무게 순서와 유사하게 분포되었으며, 어깨 앞으로 올리기/뒤로 올리기 동작에서는 청소기 B 가 유사도가 낮은 group 으로 분류 되었지만 유사도가 60% 이상으로 다른 청소기들과 큰 차이를 보이지는 않았다(그림 4-22 (c) 참조). 팔꿈치 굽히기 동작의 SNK 분석 결과에서는 기존의 두 task 와 유사하게 유사도가 청소대 길이와 반비례하는 양상을 보였으나, 청소기 A 가 가장 낮은 유사도 group 으로 분류는 되는 결과가 파악되었다(그림 4-22 (d) 참조). 좌우 이동 청소 동작 task 에서도 전반적으로 청소대 길이가 가장 길고 무거운 청소기 B 가 전반적으로 가장 낮은 유사도를 보여, 청소대 길이와 무게가 청소 동작에 유의하게 영향을 주는 설계 요소임을 확인할 수 있었다.

표 4-19. 좌우 청소 동작 task에서의 청소기 별 유사도 결과 예

신체 부위	동작	통계치	청소기			
			A	B	C	D
허리	굽히기(+)	Mean	61.7(%)	53.8	58.5	53.7
	펴기(-)	SD	30.7	27.4	28.7	29.0
	좌측 굴곡(+)	Mean	79.2	77.4	80.3	75.7
	우측 굴곡(-)	SD	11.1	16.3	9.3	16.4
	우회전(+)	Mean	72.9	72.3	71.9	70.0
	좌회전(-)	SD	17.1	14.9	17.6	16.3
어깨	앞으로 올리기(+)	Mean	66.0	64.7	68.8	69.1
	뒤로 올리기(-)	SD	21.7	22.0	21.4	22.0
	우회전(+)	Mean	27.1	25.3	27.2	27.5
	좌회전(-)	SD	22.6	21.8	18.7	20.4
	모으기(+)	Mean	74.0	76.6	73.8	75.4
	벌리기(-)	SD	27.7	25.4	27.1	26.0
오른쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	77.6	79.8	77.2	78.3
		SD	14.9	12.5	17.8	13.6
왼쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	81.9	81.1	80.2	80.4
		SD	11.1	12.4	12.2	16.5

표 4-20. 유의하게 파악된 관절 동작의 분산분석 결과

(a) 목 굽히기/펴기

변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	44102.4	3150.2		
Task(T)	3	1949.6	649.9	3.29	0.0299
S × T	42	8307.8	197.8		
전체	59	54359.7			

(b) 목 좌측 굴곡/우측 굴곡

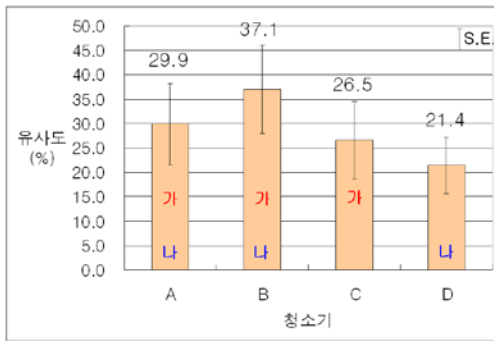
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	24483.0	1748.8		
Task(T)	3	1216.3	405.4	3.40	0.0264
S × T	42	5013.6	119.4		
전체	59	30712.9			

(c) 어깨 앞으로 올리기/뒤로 올리기

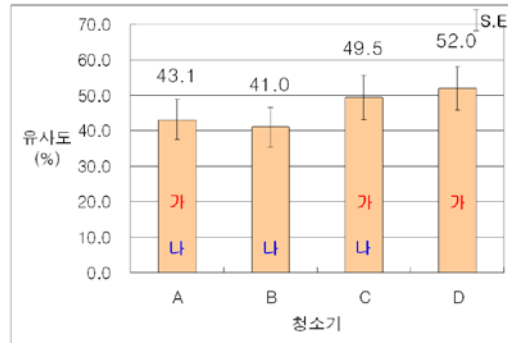
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	25861.8	1847.3		
Task(T)	3	202.8	67.6	4.28	0.0100
S × T	42	663.0	15.8		
전체	59	26727.6			

(d) 팔꿈치 굽히기

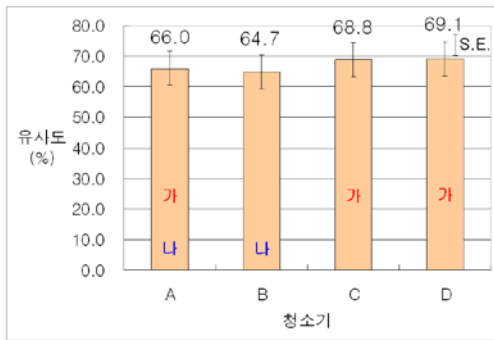
변동요인	자유도	제곱합	평균제곱	F 값	p 값
피실험자(S)	14	26620.9	1901.5		
Task(T)	3	2219.4	739.8	13.87	<.0001
S × T	42	2239.7	53.3		
전체	59	31080.0			



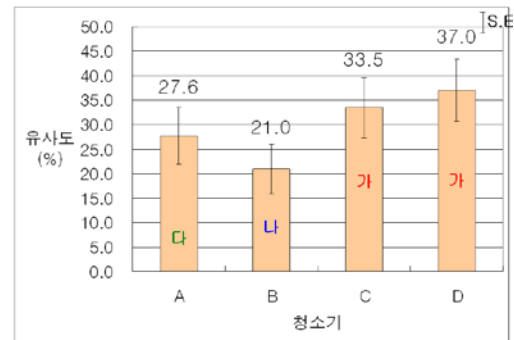
(a) 목 굽히기/펴기



(b) 목 좌측 굽곡/우측 굽곡



(c) 어깨 앞으로 올리기/뒤로 올리기



(d) 팔꿈치 굽히기

그림 4-22. SNK 분석 결과

4.5. 제품 설계 평가 보안을 위한 EMG 측정 및 불편도 측정 결과

4.5.1. EMG 측정 결과

EMG 측정을 통해 청소기 A, B, C, D 사용 시 사용되는 힘의 양의 순서를 파악한 결과(표 4-21 참조) 전반적으로 청소대 무게와 관련이 큰 것으로 파악되었다. 청소대 무게가 가장 무거운 청소기 B의 경우 대부분의 근육에서 힘 사용량이 가장 많은 group으로 grouping 되었으며, 청소대 무게가

가장 가벼운 청소기 D 의 경우 힘 사용량이 가장 적은 group 으로 grouping 되었다. 동작 분석 결과와 비교해 본 결과 손목 굽히기/펴기에 관여하는 Extensor Carpi Ulnaris 근육의 결과 값을 제외하고는 전반적으로 유사하게 파악되었으며, 청소대의 무게가 팔꿈치 굽히기/펴기, 손목 회전, 어깨 앞으로 올리기/뒤로 내리기의 동작 범위와 힘 사용량 결정에 영향을 주고 있는 것을 파악할 수 있었다.

청소기 A 의 경우 유사한 청소대 무게와 길이를 가지고 있는 청소기 C 보다 방향전환 청소 시 손목을 굽히고 펴는데 보다 많은 힘이 필요한 것으로 파악되었다. 손목을 굽히고 펴는데 관련된 Extensor Carpi Ulnaris 근육의 측정 결과를 살펴보면(그림 4-23 참조) 청소기 C 보다 청소기 A 가 상대적으로 많은 힘을 사용하는 것으로 파악할 수 있었으며, 청소기 설계 특성과 비교 분석해 본 결과 청소기 A 와 청소기 C 사이에 브러쉬 무게로 인한 청소대 무게 중심의 차이가 발견되었다(표 4-22 참조). 분석 결과 청소대를 미는 동작을 수행할 때 브러쉬 부위의 무게가 무거울수록 보다 안정적으로 원하는 방향으로 청소가 가능하다는 것을 파악할 수 있었다.

표 4-21. EMG 근육 별 SNK 분석 결과

Task	근육	관련 동작	청소기 힘 사용 순서
제자리	Brachioradialis	팔꿈치 굽히기	$B > A > C = D$
	Extensor Carpi Ulnaris	손목 굽히기	$A = B > C = D$
	Biceps Brachii	팔꿈치, 손목	$B > A = C > D$
	Triceps, Lateral Head	팔꿈치 굽히기	$B > A = C > D$
	Deltoid, Anterior	어깨 올리기	$B > A = C > D$
	Neck Muscle	목 굽히기	$B > A = C = D$
	Erector Spinae	등 펴기	$A = B = C = D$
전후	Brachioradialis	팔꿈치 굽히기	$A = B > C = D$
	Extensor Carpi Ulnaris	손목 굽히기	$B > A = C = D$
	Biceps Brachii	팔꿈치, 손목	$B > A = C > D$
	Triceps, Lateral Head	팔꿈치 굽히기	$B > A = C = D$
	Deltoid, Anterior	어깨 올리기	$B > A = C = D$
	Neck Muscle	목 굽히기	$B > A = C = D$
	Erector Spinae	등 펴기	$A = B = C = D$
좌우	Brachioradialis	팔꿈치 굽히기	$A = B > C = D$
	Extensor Carpi Ulnaris	손목 굽히기	$B > A = C = D$
	Biceps Brachii	팔꿈치, 손목	$B > A = C > D$
	Triceps, Lateral Head	팔꿈치 굽히기	$B > A = C = D$
	Deltoid, Anterior	어깨 올리기	$B > A = C = D$
	Neck Muscle	목 굽히기	$A = B = C = D$
	Erector Spinae	등 펴기	$A = B = C = D$

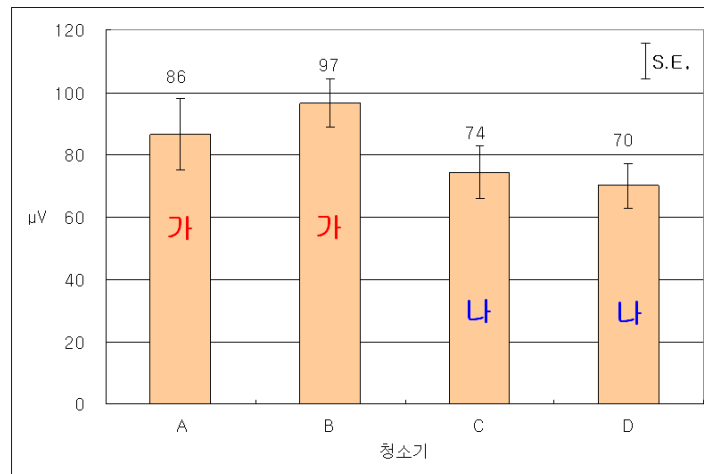


그림 4-23. 제자리 청소 동작 task 수행 시 Carpi Ulnaris 근육의 힘 사용량

표 4-22. 청소기 A와 청소기 B의 브러쉬 무게 비교

설계 요소	청소기 A	청소기 B
브러쉬 무게	311 g	409 g
브러쉬 부위 비중	22 %	27 %

4.5.2. 불편도 측정 결과

불편도 측정 결과, 전반적인 불편도와 신체 부위 별 불편도에서 모두 청소기 A 와 C 가 가장 선호되는 청소기로 파악되었다(표 4-23 참조). 청소기 D 의 경우 동작 분석 결과와 EMG 분석 결과에서 가장 좋은 평가를 받았지만 전반적인 불편도와 신체 부위별 불편도에서 전반적으로 청소기 A 와 C 보다 불편도가 통계적으로 유의하지는 않지만 상대적으로 높은 것으로 파악되었다. 원인 분석을 위해 실험 참여자를 대상으로 간소한 interview 를 수행한 결과 청소기 D 의 경우 청소대가 길이가 부적절하게 짧은 것이 원인으로 지적 되었다. 청소기 B 의 경우 동작 분석과 EMG 측정 결과에서처럼 불편도가

높은 것으로 파악되었다. 전반적 불편도, 신체 부위 별 불편도에서 모두 가장 불편도가 높게 파악되었으며, interview 결과 청소대의 무게와 길이가 부적절하게 무겁고 긴 것이 원인으로 파악되었다. 불편도 측정 결과와 분산분석 결과는 부록 5에 별도로 기재하였다.

표 4-23. 전반적인 불편도 측정 결과

Task	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D
제자리	1.8	6.1	1.4	3.0
	1.9	2.9	1.7	2.2
전후	0.4	3.5	0.5	1.8
	0.7	2.2	1.0	2.2
좌우	0.3	2.9	0.8	1.8
	0.4	2.1	1.1	1.6

4.6. 밀대형 진공 청소기 개선 대상 및 방향 분석

동작 분석 결과와 기타 추가적인 분석 결과를 종합하여, 실험에 사용한 청소기 4대에 대한 주요 개선 대상을 선별하여 보았다(표 4-24 참조). 청소기 A의 경우 청소대 길이와 무게에 대해서는 큰 문제점이 발생하지는 않았지만 방향전환 작업 시 힘의 사용량을 줄이기 위해 브러쉬의 무게를 높여 청소대 무게 중심을 브러쉬 쪽으로 이동시켜야 하는 개선 사항이 파악되었다. 청소기 B의 경우 동작 분석, EMG 분석, 불편도 분석 결과 모두 가장 좋지 않은 평가를 받았으며 그 원인으로 부적절하게 청소대 무게와 길이가 파악되었다.

청소기 C 의 경우 동작 분석, EMG 분석, 불편도에서 전반적으로 양호한 평가를 받았으며 특별한 개선 사항이 파악되지는 않았다. 청소기 D 의 경우 동작 분석과 EMG 결과에서는 가장 좋은 결과를 받았지만, 불편도 측정 결과 청소대의 길이가 짧은 것으로 파악되었다.

표 4-24. 청소기 A, B, C, D에 파악된 주요 개선 사항

	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D
청소대 길이		길다		짧다
청소대 무게		무겁다		
브러쉬 무게	가볍다			

본 연구에서 수행한 밀대형 진공 청소기 설계 평가를 통해 두 가지 개선 방향을 파악할 수 있다. 첫째, 현재 청소대를 밀고 당기는 메커니즘을 유지하는 조건 아래, 청소기 A, B, C, D 의 문제점으로 파악된 청소대 길이, 청소대 무게, 청소대 무게 비중을 우선적으로 개선하는 것이다. 파악된 개선 대상을 중심으로 보다 세부적이고 구체적인 실험 수행을 통해 설계 요소들을 파악하고 적절한 청소대 길이, 브러쉬 무게, 무게 비중을 파악하여 현재 청소대 메커니즘에 적절한 청소를기 설계를 해야 한다. 두 번째 개선 방향은, 현재 청소기 사용 메커니즘을 청소대를 밀고 당기는 방식에서 어깨, 팔꿈치, 손목, 허리의 자연스러운 동작 유사도를 더 높일 수 있도록 새로운 청소대 메커니즘을 개발하는 것이다. 자연스러운 청소기 사용 동작과 실제 사용 동작을 비교 해 본 결과 현재의 청소대를 밀고 당기는 메커니즘을 유지한

상태로는 어깨, 팔꿈치, 손목의 유사도를 높이는 것에 한계가 있다는 것을 파악할 수 있었다. 그러므로 자연스러운 청소기 사용 동작을 구현할 수 있도록 어깨, 팔꿈치, 손목, 허리의 동작 범위를 감소시키고 자연스러운 청소기 사용 동작과 유사하도록 청소대와 청소대 손잡이 부위의 메커니즘을 새로이 개발해야 한다. 그림 4-24는 현재 자연스러운 청소 동작을 고려하여 개발하고 있는 Swiveling 청소대 손잡이 그림이다.

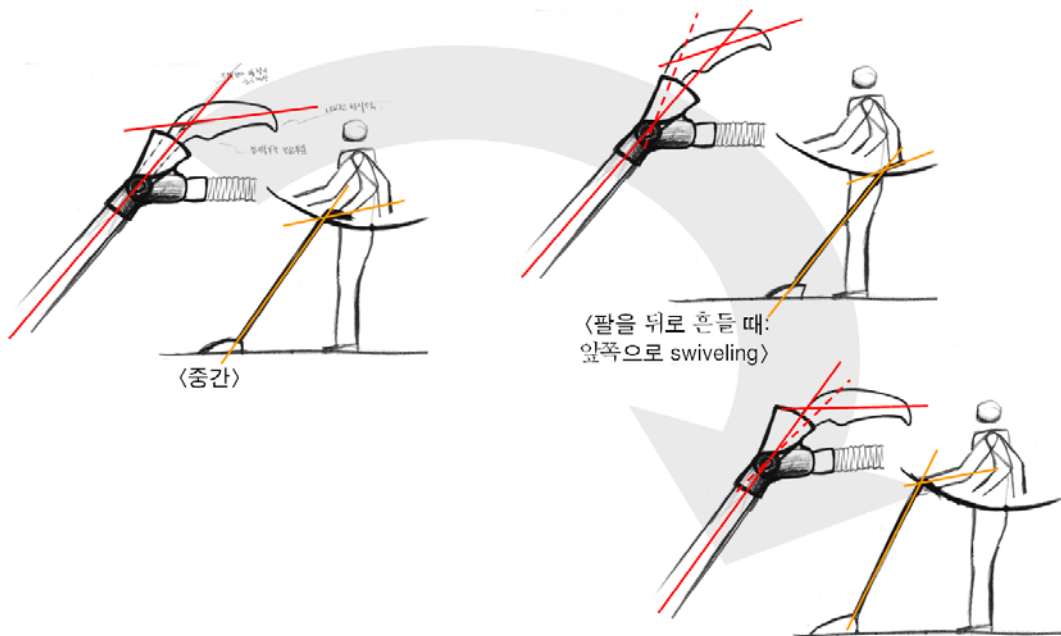


그림 4-24. Swiveling 청소대 메커니즘

5. 토의

본 연구에서는 사용자와 제품에 대한 체계적인 분석을 통해 사용자와 제품을 물리적인 측면에서 전반적으로 이해하고 정량적으로 제품의 설계를 평가할 수 있는 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 프로세스를 제안하였다. 기존 동작 분석을 통한 제품 설계 평가 연구들의 경우 제품과 사용자 사이의 interface 에 대한 분석과 평가 절차에 있어서 국소적이거나 비체계적인 경향을 보이는 연구들이 있었다. 본 연구에서 제안한 제품 설계 프로세스는 제품 설계 특성 분석, 사용자 특성 분석, 사용 환경 특성 분석, 제품 사용 작업 특성 분석을 포함하는 사용자 interface 분석 단계를 포함하고 있어 대상 제품과 사용자 사이의 물리적인 측면에서의 interface 를 포괄적으로 이해할 수 있으며 사용자 interface 분석 결과를 바탕으로 동작 분석 protocol 을 구성하고 측정하기 때문에 체계적으로 제품의 설계를 평가할 수 있다. 또한 동작 분석 결과 보완을 위해 필요에 따라 기타 객관적, 주관적 평가 방법을 자유롭게 추가할 수 있기 때문에 유연성 있게 제품의 설계를 평가할 수 있다.

본 연구에서는 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 정량적으로 파악하는 방법을 제시하였고 변동성을 파악하여 신뢰성을 검증하였다. 기존의 제품 사용 자세 및 동작을 분석하는 방법은 Cutsky (1988)의 classification of grasp 와 같이 정성적으로 손의 grip 자세를 정의하거나, Zhang et al. (2003)과 같이 손의 자세 및 동작에 대해 정량적인 분석은 이루어졌으나 선호되는 자연스러운 자세 및 동작에 대해서는 고려되지 않았다.

본 연구에서는 광학식 motion capture system 을 이용하여 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 정량적으로 파악하는 방법을 제시하였다. 또한 본 연구에서 제안된 정량적인 방법으로 파악된 동작 data 에 대해 사용자 내의 변동성(standard deviation of measurement error), 사용자 간의 변동성(standard deviation of biological variation), 측정 표준 오차(standard error of measurement)를 산출하여 파악된 동작 data 의 신뢰성을 파악하였다.

본 연구에서는 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작과 실제 제품 사용 자세 및 동작을 비교 분석하는 방법을 제시하여 제품의 설계를 평가하는 새로운 기준을 제시하였다. 기존의 동작분석을 활용한 객관적인 제품 설계 평가 방법들은 중립 자세, 힘 사용, 성능 등의 연구자 입장에서만 제품의 설계를 평가하였기 때문에 사용자 입장에서 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 자세 및 동작을 기준으로 제품의 설계를 객관적으로 평가할 수 있는 방법이 없었다. 본 연구에서 제안한 방법은 사용자가 선호하는 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 기준으로 실제 제품의 설계를 정량적이고 객관적으로 평가하는 새로운 평가 기준을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 새로운 평가 기준을 측정 기준에 대한 6가지 실용적 요구사항 (Meister, 1985)에 적용해 보았다(표 5-1 참조). 적용 결과, 본 연구에서 제시한 새로운 평가 기준의 경우 객관적이고, 정량적이고, 신중한 평가 기준이라는 측면에서는 높이 평가할 수 있었지만 동작측정 장비를 이용해서 data 를 수집해야 하고 실험과 분석에 많은 노력과 시간이 소요된다는 측면에서는 다소 미흡함을 보였다.

표 5-1. 측정 기준에 실용적 요구 사항 적용 결과

기준	평가 수준	
	상	하
객관적인가?	√	
정량적인가?	√	
신뢰성이 있는가?	√	
쉽게 data를 수집할 수 있는가?		√
Data를 수집하기 위해 별도의 기술과 장비가 필요한가?		√
적은 비용과 노력으로 data 수집이 가능한가?		√

본 연구는 동작 분석 기반 제품 설계 평가 결과에 기타 객관적, 주관적 평가 결과를 보완하여 기존 제품에 대해 보다 구체적으로 문제점을 파악하고 개선안을 도출하는데 도움을 줄 수 있다. 기존의 동작 분석 기반 제품 설계 평가 연구들의 대부분이 제품의 설계 평가에만 연구의 초점을 두었던 것과는 차별적으로 본 연구에서 제안한 제품 설계 평가 프로세스는 사용자 interface 분석 단계에서 파악된 제품과 사용자 사이의 물리적 측면에서의 interface 를 정보를 통해 제품 설계 평가 후 제품의 설계 개선 대상을 파악하고 개선 방향을 도출하는데 유용한 도움을 줄 수 있다. 또한 대상 제품의 특성과 필요에 따라 기타 객관적, 주관적 평가 방법을 추가적으로 도입할 수 있는 유연성을 가지고 있어 보다 구체적으로 제품 설계의 문제점을 파악하고 개선 대상과 개선 방향을 도출할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 제안한 동작 분석을 통한 인간공학적 제품 설계 평가

프로세스의 추후 개선이 요구되는 사항은 다음과 같다. 첫째, 정량적으로 파악된 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작을 실험 참여자들의 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작의 특성에 따라 분류하고 군집 별로 제품의 설계를 평가할 수 있는 연구 방법의 개발이 필요하다. 정량적으로 파악된 자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작의 경우 실험 참여자 내의 변동성이 낮게 파악되어 실험 참여자 내의 자연스러운 청소기 사용 동작이 반복적으로 존재함을 확인할 수 있었다. 그러나 실험 참여자 간의 변동성은 실험 참여자 내의 변동성 보다 크게 파악되어 실험 참여자 간의 자연스러운 청소기 사용 동작에 다소 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 실험 참여자 간의 변동성이 실험 참여자 내의 변동성 보다 큰 원인 분석을 위해 동작 분석 raw data 를 관찰해 본 결과 실험 참여자들의 자연스러운 청소기 사용 동작이 몇 가지 특성에 의해 사용자 간의 청소기 사용 동작이 grouping 될 수 있는 것을 알 수 있었다. 그러므로 추후 연구에서는 자연스러운 제품 사용 동작을 clustering 하고 제품 설계 평가 프로세스에 반영할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

둘째, 대상 제품에 대한 전반적인 평가를 내릴 수 있는 평가 체계가 필요하다. 본 연구에서 제안한 제품 설계 평가 프로세스의 경우 대상 제품에 대해 설계 요소 별로 세부적으로 평가할 수 있는 장점을 가지고 있지만 제품의 전반에 대해 평가 점수를 줄 수 있는 평가 시스템이 갖추어져 있지 않다. 이는 본 연구가 기존에 수행되었던 적이 없고 본 연구에서 처음 시도해보는 방법이기 때문이다. 본 연구에서 제안한 제품 설계 평가 프로세스가

여러 제품 분야에 적용된 후, 세부적으로 파악된 평가 요인들을 종합하고 세부 평가 결과들에 대한 점수를 부여할 수 있는 체계가 개발된다면 전반적으로 대상 제품을 평가할 수 있는 평가 체계가 구성될 수 있을 것으로 파악된다.

6. 결론

본 연구에서는 동작 분석에 근거하여 제품에 대한 자연스러운 사용 자세 및 동작을 정량적으로 분석하고 실제 제품 사용 자세 및 동작과 비교 분석하여 제품의 설계를 평가하는 인간공학적 제품 설계 평가 프로세스를 제안하였다. 제품 설계 특성 분석, 사용자 특성 분석, 사용 환경 특성 분석, 제품 사용 작업 특성 분석으로 구성된 사용자 interface 분석을 통해 대상 제품에 대해 전반적으로 이해할 수 있게 하는 방법을 제안하였다. 또한 사용자 interface 분석 결과를 활용하여 대상 제품 사용 동작에 적합한 동작 분석 protocol 을 수립할 수 있게 하고 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작과 실제 제품 사용 자세 및 동작을 비교 평가하는 방법을 제시하여 대상 제품의 설계를 체계적이고 정량적으로 분석할 수 있는 프로세스를 개발하였다.

본 연구에서 제안한 제품 설계 평가 프로세스를 밀대형 진공 청소기 설계 평가에 적용하여 그 효용성을 파악하였다. 밀대형 진공 청소기에 대한 사용자 interface 분석을 통해 밀대형 진공 청소기의 설계 특성, 사용자 특성, 사용 환경 특성, 사용 작업 특성들을 파악하여 밀대형 진공 청소기에 대해 전반적으로 이해할 수 있었다. 또한 밀대형 진공 청소기에 대한 이해를 바탕으로 자연스러운 청소기 사용 동작을 정량적으로 파악하고, 시중에 판매되고 있는 4 종류의 청소기와 비교 평가함으로써 4 종류의 청소기의 설계를 평가할 수 있었으며, 평가 결과를 통해 4 종류의 청소기에 대한 설계 개선 대상을 파악하고 개선안을 도출할 수 있었다.

마지막으로, 본 연구에서는 정량적으로 파악된 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작의 신뢰성을 확인하였다. 자연스러운 제품 사용 자세 및 동작의 존재 여부와 신뢰성을 파악하기 위해 밀대형 진공 청소기를 사용하는 자연스러운 청소기 사용 자세 및 동작을 측정해 보았다. 실험 참여자 내의 반복성, 실험 참여자 간의 반복성, 표준 측정 오차를 산출하였으며, 이를 통해 자연스러운 밀대형 진공 청소기 사용 동작의 존재 여부와 신뢰성을 확인할 수 있었다.

추후 연구 사항으로는 밀대형 진공 청소기 설계 평가 결과에서 파악된 개선 대상과 개선안을 활용하여 실제로 밀대형 진공 청소기를 개선하여야 하고 본 연구에서 제안된 제품 설계 프로세스가 대상 제품에 대해 전반적인 평가 내릴 수 있도록 체계적인 평가 시스템이 구축되어야 한다. 밀대형 진공 청소기 설계 평가에서 청소기 별로 파악된 개선 대상 및 개선안을 보다 구체적이고 세부적인 실험을 통해 청소기를 개선해 보아야 하고 개선된 청소기에 대해 유효성 평가를 수행하여야 한다. 또한 제품에 대해 등급이나 점수를 평가할 수 있게 하는 평가 체계를 수립하여 대상 제품에 대해 전반적으로 평가할 수 있도록 제품 설계 평가 프로세스의 개선이 필요하다.

References

- 권영국, 변승남 (1999). 생체역학개론, 청문각.
- 이상기 (2006). 제품 설계 특성 평가를 위한 손 동작 분석 방법의 개발. 석사학위논문, 포항공대.
- 이제희 (2003). 모션 캡처의 과거, 현재, 그리고 미래. *정보과학회지*, 21(7), 24-29.
- 최훈우 (2005). 한국 20 대 남녀의 정상보행에 대한 운동형상학 및 운동역학적 평가. 석사학위논문, 포항공대.
- Andreoni, G., Santambrogio, G. C., Rabuffetti, M., and Pedotti, A. (2002). Method for the analysis of posture and interface pressure of car drivers. *Applied Ergonomics*, 33, 511-522.
- Boninger, M. L., Baldwin, M., Cooper, R. A., Koontz, A., and Chand, L. (2000). Manual wheelchair pushrim biomechanics and axle position. *Arch Phys Med Rehabil*, 81, 608-613.
- Buchholz, B. O. (1992). A kinematic model of the human hand to evaluate its prehensile capabilities, *Journal of Biomechanics*, 25(2), 149-162.
- 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.
- Cutkosy, M. R., (1988). On grasp choice, grasp models and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 10, 599-620.

- Greene, W. B., and Heckman, J. D. (1994). *The clinical measurement of joint motion*. American Academy of Orthopaedic Surgeons.
- Karlqvist, L., Bernmark, E., Ekenvall, L., Hagberg, M., Isaksson, A., and Rostö, T. (1999). Computer mouse and track-ball operation: similarities and differences in posture, muscular load and perceived exertion. *Industrial Ergonomics*, 23, 157-169.
- Kerrigan, D. C., Johansson, J. L., Bryant, M. G., Boxer, J. A., Croce, D., and Riley, O. O. (2005). Moderate-heeled shoes and knee joint torques relevant to the development and progression of knee osteoarthritis. *Arch Phys Med Rehabil*, 86, 871-875.
- Meister, D. (1985). *Behavioral analysis and measurement methods*. New York:Wiley.
- Moffet, H., and Hagberg, M., Hansson-Risberg, E., and Karlqvist, L. (2002). Influence of laptop computer design and working position on physical exposure variables. *Clinical Biomechanics*, 17, 368-375.
- 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.
- Norkin, C. C., and White, D. J. (1995). *Measurement of Joint Motion*. 2nd ed. F. A. Davis Company, Philadelphia, USA, Validity and Reliability, Ch. 3, 35-46.
- Nyberg, P., and Kempic, J. (2006). Transforming the Laundry Process, *Ergonomics in Design*, 14(2), 16-21.
- Rempel, D., Barr, A., Brafman, D., and Young, E. (2007). The effect of six keyboard designs on wrist and forearm postures. *Applied Ergonomics*, 38, 293-298.

- Richards, J. G., and Bruening, D. (2006). *Gait analysis marker sets*. Unpublished manuscript, University of Delaware.
- 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.
- Szeto, G. P., and Lee, R. (2002). An ergonomic evaluation comparing desktop, notebook, and subnotebook computers. *Arch Phys Med Rehabil*, 83, 527-532.
- Takahashi, H. (2005). Laser pointer, Japan patent: 2005-140920
- 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.
- 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 1. 정량적으로 파악된 자연스러운 청소기 사용 동작

A. Task 별 관절 동작의 최소값, 최대값 정리

신체 부위	동작	통계량	제자리		전후		좌우	
			최소값	최대값	최소값	최대값	최소값	최대값
허리	굽히기(+)	Mean	-1.2(°)	7.0	-3.0	4.5	-10.6	-0.7
	펴기(-)	SD	12.3	15.7	4.1	6.9	9.2	5.6
	좌측 굴곡(+)	Mean	-7.2	-0.2	-6.4	1.6	-8.5	3.4
	우측 굴곡(-)	SD	9.5	11.1	3.7	4.7	4.1	6.6
	우회전(+)	Mean	-17.3	-6.5	-11.8	-2.7	-8.3	1.2
	좌회전(-)	SD	16.1	10.9	10.8	8.3	3.2	2.3
등	굽히기(+)	Mean	5.9	11.0	6.1	11.2	5.2	11.7
	펴기(-)	SD	6.5	6.5	6.9	7.4	6.3	6.4
	좌측 굴곡(+)	Mean	9.4	28.4	-0.5	19.3	-1.9	19.8
	우측 굴곡(-)	SD	13.1	15.5	6.9	12.7	5.8	13.5
	우회전(+)	Mean	-10.1	0.1	-4.7	3.7	-6.2	4.2
	좌회전(-)	SD	8.8	9.1	7.7	8.7	9.2	8.3
목	굽히기(+)	Mean	5.6	18.0	8.4	20.1	5.7	19.2
	펴기(-)	SD	12.4	10.1	14.3	11.0	14.5	9.8

신체 부위	동작	통계량	제자리		전후		좌우	
			최소값	최대값	최소값	최대값	최소값	최대값
목	좌측 굴곡(+)	Mean	-35.7(°)	2.6	-28.5	2.2	-29.8	1.2
	우측 굴곡(-)	SD	14.7	12.9	15.6	14.0	14.7	14.0
	우회전(+)	Mean	-26.6	-13.8	-22.9	-12.0	-23.8	-11.1
	좌회전(-)	SD	11.0	11.6	11.4	11.8	11.2	10.9
어깨	앞으로 올리기(+)	Mean	-4.6	56.6	-18.1	48.2	-15.5	48.0
	뒤로 올리기(-)	SD	21.9	26.8	21.5	27.7	21.4	27.0
	우회전(+)	Mean	-17.0	27.6	-15.4	17.9	-16.1	18.9
	좌회전(-)	SD	17.3	21.2	18.6	22.1	18.7	22.6
	모으기(+)	Mean	7.0	55.3	20.2	55.5	13.8	55.4
	벌리기(-)	SD	22.0	31.1	19.2	30.2	24.1	30.0
팔꿈치	굽히기(+)	Mean	28.1	60.4	26.2	47.2	27.6	51.3
		SD	7.9	20.2	9.3	12.8	8.4	16.2
손목	내전(+)	Mean	-11.0	20.8	5.8	18.5	3.2	16.9
	외전(-)	SD	16.7	11.7	12.0	11.2	13.3	11.6
	우회전(+)	Mean	5.5	42.9	12.0	27.3	11.0	29.5
	좌회전(-)	SD	13.6	15.1	12.4	12.2	18.7	14.0

신체 부위	동작	통계량	제자리		전후		좌우	
			최소값	최대값	최소값	최대값	최소값	최대값
손목	굽히기(+)	Mean	-2.3(°)	23.6	6.2	19.3	5.7	27.1
	펴기(-)	SD	15.9	12.9	13.9	13.9	16.5	23.3
오른쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	8.7	14.2	5.6	29.1	5.1	22.4
		SD	4.4	5.4	2.6	10.0	2.9	10.3
왼쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	7.7	14.1	6.5	33.7	3.8	23.3
		SD	4.2	7.1	4.5	8.0	1.4	8.6

B. Task 별 관절 동작의 평균값 정리

신체 부위	동작	통계량	제자리	전후	좌우
허리	굽히기(+)	Mean	3.1(°)	0.5	-5.6
	펴기(-)	SD	13.7	3.9	7.2
	좌측 굴곡(+)	Mean	-3.8	-2.4	-2.7
	우측 굴곡(-)	SD	10.1	4.0	4.2
	우회전(+)	Mean	-12.0	-7.4	-3.4
	좌회전(-)	SD	13.9	9.6	2.4
등	굽히기(+)	Mean	8.5	8.6	8.3
	펴기(-)	SD	6.2	7.1	6.3
	좌측 굴곡(+)	Mean	18.6	9.7	8.3
	우측 굴곡(-)	SD	14.1	9.4	8.4
	우회전(+)	Mean	-4.9	-0.7	-0.9
	좌회전(-)	SD	8.7	8.1	8.4
목	굽히기(+)	Mean	12.1	14.4	12.7
	펴기(-)	SD	10.9	12.1	12.0
	좌측 굴곡(+)	Mean	-17.9	-14.3	-14.6
	우측 굴곡(-)	SD	12.8	14.2	13.4
	우회전(+)	Mean	-20.4	-17.6	-17.7
	좌회전(-)	SD	10.9	11.3	10.8
어깨	앞으로 올리기(+)	Mean	23.1	15.5	15.0
	뒤로 올리기(-)	SD	22.4	19.7	18.8
	우회전(+)	Mean	2.2	-0.8	-0.5
	좌회전(-)	SD	17.9	18.5	18.9
	모으기(+)	Mean	31.8	36.7	35.7
	벌리기(-)	SD	19.1	18.5	17.3
팔꿈치	굽히기(+)	Mean	41.6	36.0	38.7
		SD	13.4	9.7	11.6
손목	내전(+)	Mean	7.9	11.7	10.5
	외전(-)	SD	11.2	11.1	11.7
	우회전(+)	Mean	23.3	19.5	20.6
	좌회전(-)	SD	13.1	12.1	15.3
	굽히기(+)	Mean	10.4	12.9	14.7
	펴기(-)	SD	13.2	13.2	18.0
오른쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	11.5	12.8	11.4
		SD	4.8	3.6	4.2

신체 부위	동작	통계량	제자리	전후	좌우
왼쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	10.9(°)	14.5	10.6
		SD	5.4	4.9	2.8

C. Task 별 관절 동작의 중앙값 정리

신체 부위	동작	통계량	제자리	전후	좌우
허리	굽히기(+)	Mean	3.3(°)	0.3	-5.4
	펴기(-)	SD	13.7	3.8	7.2
	좌측 굴곡(+)	Mean	-3.8	-2.3	-2.7
	우측 굴곡(-)	SD	10.1	4.0	3.8
	우회전(+)	Mean	-12.0	-7.5	-3.2
	좌회전(-)	SD	14.2	9.9	2.4
등	굽히기(+)	Mean	8.7	8.7	8.3
	펴기(-)	SD	6.0	7.1	6.4
	좌측 굴곡(+)	Mean	18.5	10.2	8.4
	우측 굴곡(-)	SD	14.5	9.6	8.1
	우회전(+)	Mean	-4.8	-0.5	-0.7
	좌회전(-)	SD	8.7	8.1	8.3
목	굽히기(+)	Mean	12.4	14.5	13.0
	펴기(-)	SD	11.0	12.0	12.1
	좌측 굴곡(+)	Mean	-18.0	-14.7	-14.8
	우측 굴곡(-)	SD	13.7	14.7	13.3
	우회전(+)	Mean	-20.3	-17.6	-17.7
	좌회전(-)	SD	10.8	11.3	10.8
어깨	앞으로 올리기(+)	Mean	22.1	17.2	15.3
	뒤로 올리기(-)	SD	24.9	19.1	18.8
	우회전(+)	Mean	-0.2	-3.4	-3.1
	좌회전(-)	SD	17.4	18.7	18.2
	모으기(+)	Mean	32.3	34.9	35.2
	벌리기(-)	SD	18.8	17.1	15.9
팔꿈치	굽히기(+)	Mean	40.9	35.8	38.7
		SD	14.1	10.0	12.8
손목	내전(+)	Mean	10.5	11.5	10.7
	외전(-)	SD	10.9	11.5	11.5
	우회전(+)	Mean	22.6	19.4	20.7
	좌회전(-)	SD	13.9	12.7	15.8
	굽히기(+)	Mean	11.0	13.2	14.6
	펴기(-)	SD	13.3	13.0	19.4
오른쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	11.5	10.5	10.2
	SD	5.0	3.0	3.4	

신체 부위	동작	통계량	제자리	전후	좌우
왼쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	10.9(°)	11.7	9.2
		SD	5.5	5.8	2.4

부록 2. 정량적으로 파악된 자연스러운 청소기 사용 동작 범위

A. Task 별 동작 범위

신체 부위	동작	제자리	전후	좌우	F-value	p-value
허리	굽히기/펴기	8.2(°)	7.5	9.9	1.44	0.2544
	좌측 굴곡/우측 굴곡	7.0	8.0	11.9	13.31	<0.0001
	우측 회전/좌측 회전	10.8	9.0	9.5	1.34	0.2783
등	굽히기/펴기	5.1	5.1	6.4	2.97	0.0679
	좌측 굴곡/우측 굴곡	19.0	19.8	21.7	0.89	0.4214
	우측 회전/좌측 회전	10.2	8.4	10.3	1.61	0.2173
목	굽히기/펴기	12.4	11.7	13.5	0.63	0.5422
	좌측 굴곡/우측 굴곡	38.3	30.7	31.0	6.63	0.0044
	우측 회전/좌측 회전	12.8	10.9	12.8	1.79	0.1861
어깨	올리기/내리기	61.3	66.3	63.5	1.45	0.2515
	우측 회전/좌측 회전	44.7	33.3	35.0	10.14	0.0005
	모으기/벌리기	48.3	35.3	41.6	2.34	0.1148
오른쪽 팔꿈치	굽히기/펴기	32.2	21.0	23.7	5.91	0.0072
오른쪽 손목	내전/외전	31.8	12.8	13.7	15.51	<0.0001
	우측 회전/좌측 회전	37.4	15.3	18.5	21.17	<0.0001
	굽히기/펴기	25.9	13.1	21.4	6.74	0.0041
오른쪽 무릎	굽히기/펴기	5.6	23.4	17.3	29.6	<0.0001
왼쪽 무릎	굽히기/펴기	6.4	27.2	19.5	41.09	<0.0001

B. Task 별 SNK 분석 결과

신체 부위	동작	제자리	전후	좌우
허리	굽히기(+) 펴기(-)			
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	B	B	A
	우회전(+) 좌회전(-)			
등	굽히기(+) 펴기(-)			
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)			
	우회전(+) 좌회전(-)			
목	굽히기(+) 펴기(-)			
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	A	B	B
	우회전(+) 좌회전(-)			
어깨	앞으로 올리기(+) 뒤로 올리기(-)			
	우회전(+) 좌회전(-)	A	B	B
	모으기(+) 별리기(-)			
팔꿈치	굽히기(+)	A	B	B
손목	내전(+) 외전(-)	A	B	B
	우회전(+) 좌회전(-)	A	B	B
	굽히기(+) 펴기(-)	A	B	A

* 서로 다른 문자 A, B는 다른 group임을 의미함 (A>B)

신체 부위	동작	체자리	전후	좌우
오른쪽 무릎	굽히기(+)	C	A	B
왼쪽 무릎	굽히기(+)	C	A	B

부록 3. Task별 파악된 SD_{me} , SD_{meas} , SD_{me} 결과

신체 부위	동작	척도	체자리		전후		좌우	
			최소값	최대값	최소값	최대값	최소값	최대값
허리	굽히기(+) 펴기(-)	SD_{me}	2.3	2.7	1.1	1.4	0.7	1.9
		SD_x	12.3	15.7	4.1	6.9	9.2	5.8
		SE_{meas}	2.7	3.0	1.3	2.0	1.5	2.3
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	SD_{me}	1.1	1.3	1.8	0.7	3.1	1.9
		SD_x	9.5	11.1	3.7	4.7	4.1	6.6
		SE_{meas}	1.9	2.6	1.9	1.9	6.6	1.5
	우회전(+) 좌회전(-)	SD_{me}	2.5	2.3	0.9	2.6	2.5	0.7
		SD_x	16.1	10.9	10.8	8.3	3.2	2.3
		SE_{meas}	2.5	4.3	0.7	2.4	6.9	3.4
등	굽히기(+) 펴기(-)	SD_{me}	0.9	1.0	0.8	0.5	1.1	0.9
		SD_x	6.5	6.5	5.3	7.4	6.3	6.4
		SE_{meas}	2.2	3.6	1.0	0.8	2.1	1.4
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	SD_{me}	2.7	2.6	3.2	1.4	3.1	2.4
		SD_x	13.1	15.5	6.9	12.7	5.8	13.5
		SE_{meas}	3.3	4.1	2.0	1.2	5.2	1.6
	우회전(+) 좌회전(-)	SD_{me}	0.7	0.7	0.6	1.1	1.7	1.3
		SD_x	8.8	9.1	7.5	8.7	9.2	8.3
		SE_{meas}	2.4	2.1	0.6	1.2	2.6	1.3

신체 부위	동작	척도	제자리		전후		좌우	
			최소값	최대값	최소값	최대값	최소값	최대값
목	굽히기(+) 펴기(-)	SD me	2.7	1.5	11.1	11.7	2.8	2.8
		SDx	12.4	10.1	15.0	11.0	15.1	9.8
		SE meas	4.3	3.3	2.0	4.7	2.3	2.1
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	SD me	1.9	3.7	3.8	1.9	2.3	2.7
		SDx	14.7	12.9	15.6	14.0	14.7	14.0
		SE meas	2.8	7.1	1.3	1.6	2.3	1.6
	우회전(+) 좌회전(-)	SD me	1.0	1.9	1.5	3.6	1.6	2.0
		SDx	11.4	11.6	10.9	11.8	11.2	10.9
		SE meas	2.2	3.9	0.8	2.2	2.1	1.6
어깨	앞으로 올리기(+) 뒤로 올리기(-)	SD me	4.1	4.8	1.3	2.0	1.4	2.3
		SDx	21.9	26.8	21.5	27.7	21.4	27.0
		SE meas	2.8	3.6	0.5	0.9	1.1	0.8
	우회전(+) 좌회전(-)	SD me	3.0	2.8	1.1	1.7	2.9	1.8
		SDx	17.3	21.2	18.6	22.1	18.7	22.6
		SE meas	2.9	2.9	0.4	0.8	1.9	0.7
	모으기(+) 벌리기(-)	SD me	7.0	2.1	13.9	1.2	13.1	1.6
		SDx	22.0	31.1	19.2	30.2	24.1	30.0
		SE meas	4.3	1.7	2.2	0.4	4.2	0.5
팔꿈치	굽히기(+)	SD me	1.7	3.3	0.7	2.2	1.4	3.2
		SDx	7.9	20.2	9.3	12.8	8.4	16.2
		SE meas	4.3	3.8	0.8	2.1	2.0	1.7

신체 부위	동작	척도	제자리		전후		좌우	
			최소값	최대값	최소값	최대값	최소값	최대값
손목	내전(+) 외전(-)	SD me	7.0	2.5	8.1	0.8	4.1	2.5
		SDx	16.7	11.7	12.0	11.2	13.3	11.6
		SE meas	7.1	6.6	2.0	0.8	3.1	1.5
	우회전(+) 좌회전(-)	SD me	4.9	4.4	9.1	1.5	2.4	6.3
		SDx	13.6	15.1	12.5	12.2	18.7	14.0
		SE meas	7.1	6.1	2.2	1.4	1.9	2.5
	굽히기(+) 펴기(-)	SD me	4.0	11.2	1.9	1.0	10.5	9.0
		SDx	16.4	12.9	13.7	13.9	16.5	23.3
		SE meas	4.7	12.5	0.9	0.8	5.0	2.4
오른쪽 무릎	굽히기(+)	SD me	1.8	1.2	0.5	2.3	0.4	1.7
		SDx	4.4	5.4	2.6	10.0	2.9	10.3
		SE meas	5.0	4.9	1.3	2.4	2.4	1.4
왼쪽 무릎	굽히기(+)	SD me	1.3	1.6	1.0	2.4	0.3	1.8
		SDx	4.2	7.1	4.5	8.0	1.4	8.6
		SE meas	4.1	3.3	0.5	3.3	4.1	1.9

부록 4. Task별 유사도 파악 결과

A. 제자리 청소 동작 task에서의 유사도 결과 및 분산분석 결과

신체 부위	동작	통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
허리	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	71.7(%)	58.5	71.3	64.4	2.85	0.0486
		SD	24.9	33.2	24.9	29.4		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	54.2	44.0	60.6	46.6	5.26	0.0036
		SD	27.9	21.5	24.3	28.4		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	23.7	35.9	21.2	29.9	3.09	0.0372
		SD	24.6	25.2	20.8	26.6		
등	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	42.2	32.0	30.2	31.9	1.44	0.24
		SD	41.7	35.5	36.9	36.1		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	27.0	37.3	32.2	50.5	7.77	0.0003
		SD	19.6	19.1	18.9	23.3		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	41.8	37.4	38.7	37.5	0.91	0.44
		SD	40.5	35.5	38.2	39.0		
목	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	26.6	35.8	29.8	26.3	2.03	0.12
		SD	27.3	25.4	31.7	26.1		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	38.8	36.7	43.8	53.6	4.99	0.0048
		SD	20.6	22.0	19.8	19.6		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	22.6	27.2	24.4	29.0	1.46	0.24
		SD	24.8	26.9	27.3	28.8		
		SD	24.8	30.6	27.3	32.9		

신체 부위	동작	통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
어깨	앞으로 올리기(+) 뒤로 올리기(-)	Mean	60.0	60.9	61.6	66.3	3.23	0.032
		SD	22.2	16.8	20.5	19.7		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	30.8	28.7	33.4	36.7	2.2	0.10
		SD	21.1	17.8	24.4	21.6		
	모으기(+) 벌리기(-)	Mean	71.7	67.1	72.5	71.4	1.73	0.17
		SD	20.4	19.1	22.4	20.6		
팔꿈치	굽히기(+)	Mean	34.4	26.2	35.7	47.4	18.49	<.0001
		SD	21.3	20.4	22.8	17.8		
손목	내전(+) 외전(-)	Mean	50.9	46.1	53.0	51.4	1.93	0.14
		SD	20.6	19.5	21.2	19.5		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	47.0	43.0	44.4	41.6	0.92	0.44
		SD	13.6	10.4	14.8	16.5		
	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	42.4	47.5	46.4	41.9	1.35	0.27
		SD	26.3	25.4	29.0	27.7		
오른쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	31.2	30.5	29.0	25.8	0.47	0.70
		SD	31.1	21.5	29.3	24.5		
왼쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	37.1	36.7	35.2	36.8	0.07	0.98

B. 전후 이동 청소 동작 task에서의 유사도 결과 및 분산분석 결과

신체 부위	동작	통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
허리	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	74.8(%)	67.0	74.9	69.3	1.27	0.30
		SD	28.9	28.2	24.5	29.6		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	67.7	66.8	68.9	65.4	0.23	0.88
		SD	15.5	18.5	15.9	18.9		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	39.3	32.9	37.6	32.6	1.25	0.30
		SD	32.3	32.0	34.4	31.6		
등	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	32.8	28.8	30.6	37.2	1.49	0.23
		SD	38.3	35.4	37.6	37.8		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	10.4	15.6	12.1	15.7	1.6	0.20
		SD	11.4	13.2	11.7	13.1		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	34.9	31.0	37.2	32.5	0.53	0.67
		SD	40.2	36.9	39.0	36.8		
목	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	19.5	24.0	25.9	15.9	2.08	0.12
		SD	24.5	27.7	30.9	19.4		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	44.5	45.6	46.5	49.4	0.67	0.58
		SD	23.2	18.3	27.4	20.5		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	20.9	25.2	21.7	23.2	0.39	0.76
		SD	25.4	29.4	26.0	30.9		
		SD	18.6	18.2	21.2	20.3		

신체 부위	동작	통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
어깨	앞으로 올리기(+) 뒤로 올리기(-)	Mean	68.4(%)	68.6	66.9	71.3	2.38	0.08
		SD	21.8	22.1	23.3	22.9		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	21.4	22.9	18.9	22.8	1.15	0.34
		SD	24.5	19.7	21.3	22.7		
	모으기(+) 벌리기(-)	Mean	70.4	67.8	70.5	68.4	1.2	0.32
		SD	26.4	26.7	28.9	28.5		
팔꿈치	굽히기(+)	Mean	35.3	28.8	38.8	42.2	4.62	0.007
		SD	29.0	27.2	32.3	26.8		
손목	내전(+) 외전(-)	Mean	40.4	33.8	33.4	35.5	1.77	0.17
		SD	19.6	22.9	24.2	24.3		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	33.4	25.9	29.9	28.1	0.62	0.60
		SD	23.8	27.8	29.0	32.7		
	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	21.1	24.9	21.4	19.8	0.93	0.43
		SD	32.0	28.4	28.7	26.3		
오른쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	76.7	75.4	78.0	78.4	1.28	0.29
		SD	16.1	19.0	15.1	14.2		
왼쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	74.4	74.5	71.9	73.1	0.92	0.44

C. 좌우 이동 청소 동작 task에서의 유사도 결과 및 분산분석 결과

신체 부위	동작	통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
허리	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	61.7(%)	53.8	58.5	53.7	0.91	0.44
		SD	30.7	27.4	28.7	29.0		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	79.2	77.4	80.3	75.7	0.51	0.68
		SD	11.1	16.3	9.3	16.4		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	72.9	72.3	71.9	70.0	0.12	0.95
		SD	17.1	14.9	17.6	16.3		
등	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	48.6	44.8	46.8	44.6	0.23	0.88
		SD	40.4	36.3	39.8	39.7		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	60.0	60.4	62.4	64.4	0.44	0.72
		SD	20.5	22.3	21.3	16.8		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	44.4	47.8	45.5	46.8	0.33	0.80
		SD	41.2	40.8	39.8	42.1		
목	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	29.9	37.1	26.5	21.4	3.29	0.0299
		SD	32.3	35.2	30.7	22.7		
	좌측 굴곡(+) 우측 굴곡(-)	Mean	43.1	41.0	49.5	52.0	3.4	0.0264
		SD	22.0	21.8	23.9	24.0		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	26.3	23.7	29.2	31.4	0.93	0.43
		SD	25.8	28.0	27.9	31.1		
SD		11.1	12.4	12.2	16.5			

신체 부위	동작	통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
어깨	앞으로 올리기(+) 뒤로 올리기(-)	Mean	66.0(%)	64.7	68.8	69.1	4.28	0.01
		SD	21.7	22.0	21.4	22.0		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	27.1	25.3	27.2	27.5	0.26	0.86
		SD	22.6	21.8	18.7	20.4		
	모으기(+) 벌리기(-)	Mean	74.0	76.6	73.8	75.4	0.77	0.52
		SD	27.7	25.4	27.1	26.0		
팔꿈치	굽히기(+)	Mean	27.6	21.0	33.5	37.0	13.87	<.0001
		SD	22.3	20.0	23.9	24.3		
손목	내전(+) 외전(-)	Mean	35.3	34.8	38.7	36.0	0.39	0.76
		SD	19.8	18.2	20.6	19.3		
	우회전(+) 좌회전(-)	Mean	37.1	36.6	36.6	34.8	0.04	0.99
		SD	25.1	27.2	27.7	28.1		
	굽히기(+) 펴기(-)	Mean	33.0	33.0	32.2	27.0	0.53	0.67
		SD	29.0	30.1	32.9	28.9		
오른쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	77.6	79.8	77.2	78.3	0.5	0.69
		SD	14.9	12.5	17.8	13.6		
왼쪽 무릎	굽히기(+)	Mean	81.9	81.1	80.2	80.4	0.13	0.94

부록 5. 불편도 측정 결과

A. 제자리 청소 동작 task에서의 불편도 분석 결과 및 분산분석 결과

신체 부위		통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
전반적 불편도		Mean SD	1.8 1.9	6.1 2.9	1.4 1.7	3.0 2.2	14.56	<.0001
앞	목	Mean SD	0.6 0.7	2.3 2.0	0.6 0.8	1.2 1.6	5.44	0.003
	어깨	Mean SD	1.1 1.2	5.1 3.0	1.4 1.5	2.8 2.1	16.2	<.0001
	팔꿈치	Mean SD	1.7 1.9	5.2 2.2	1.8 2.0	2.7 2.4	13.56	<.0001
	손등/손목	Mean SD	2.9 2.0	6.7 2.3	2.9 2.7	3.7 2.5	10.01	<.0001
	가슴	Mean SD	0.3 0.5	2.3 2.3	0.7 1.0	0.6 1.4	7.93	0.0003
	아랫 배	Mean SD	0.6 0.8	2.2 2.6	0.6 1.0	0.9 1.5	5.77	0.0021
	오르쪽 무릎	Mean SD	1.6 1.8	2.9 2.7	1.2 1.6	1.6 1.8	4.98	0.0048
	왼쪽 무릎	Mean SD SD	1.4 1.9 1.9	2.7 2.6 2.6	0.9 1.2 1.3	1.7 2.0 1.8	2.61	0.0642

신체 부위		통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
뒤	목	Mean SD	1.0 0.9	3.5 2.3	0.8 0.8	1.7 1.7	7.98	0.0003
	어깨	Mean SD	1.2 1.2	5.6 2.7	1.7 2.0	2.8 2.2	14.19	<.0001
	팔꿈치	Mean SD	1.6 1.8	5.8 2.6	1.9 1.9	2.9 2.2	15.34	<.0001
	손바닥/손목	Mean SD	2.6 2.0	6.7 2.4	2.7 2.5	3.2 2.6	12.29	<.0001
	윗등	Mean SD	0.9 1.4	2.7 2.4	1.0 1.3	1.5 1.9	4.56	0.0075
	아랫 등	Mean SD	1.4 1.6	3.1 2.8	1.3 1.5	2.2 2.2	3.31	0.0291
	오른쪽 무릎	Mean SD	1.3 1.6	2.8 2.5	1.2 1.6	1.5 1.9	3.01	0.0407
	왼쪽 무릎	Mean	1.1	2.9	0.9	1.3	3.63	0.0205

B. 전후 이동 청소 동작 task에서의 불편도 분석 결과 및 분산분석 결과

신체 부위		통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
전반적 불편도		Mean SD	0.4 0.7	3.5 2.2	0.5 1.0	1.8 2.2	12.74	<.0001
앞	목	Mean SD	0.4 0.7	1.2 1.5	0.3 0.6	0.8 1.1	1.81	0.1607
	어깨	Mean SD	0.5 0.7	2.6 2.3	0.5 0.7	1.3 1.5	5.27	0.0036
	팔꿈치	Mean SD	0.5 0.9	2.2 1.8	0.6 0.9	1.3 1.8	4.2	0.011
	손등/손목	Mean SD	0.9 1.2	3.2 2.5	1.3 1.6	0.9 1.2	4.54	0.0076
	가슴	Mean SD	0.2 0.4	1.0 1.1	0.2 0.4	0.5 1.1	5.53	0.0027
	아랫 배	Mean SD	0.3 0.4	1.1 1.6	0.3 0.4	0.6 1.2	2.54	0.0696
	오르쪽 무릎	Mean SD	0.7 1.0	1.4 1.2	0.4 1.1	1.2 1.2	3.29	0.0297
	왼쪽 무릎	Mean SD	0.5 0.8	1.4 1.3	0.3 0.6	0.8 0.9	4.98	0.0048

신체 부위		통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
뒤	목	Mean SD	0.5 0.8	1.9 1.8	0.4 0.6	1.2 1.3	4.46	0.0083
	어깨	Mean SD	0.6 0.8	3.0 2.3	0.8 0.9	1.5 1.5	7.9	0.0003
	팔꿈치	Mean SD	0.7 1.2	2.5 2.0	0.8 1.1	1.5 1.8	4.93	0.0051
	손바닥/손목	Mean SD	0.9 1.3	3.7 2.8	1.1 1.6	1.0 1.4	7.12	0.0006
	윗등	Mean SD	0.2 0.4	1.5 1.4	0.2 0.4	1.0 1.4	4.76	0.0061
	아랫 등	Mean SD	0.5 0.7	2.3 1.9	0.3 0.6	1.6 1.9	6.37	0.0012
	오른쪽 무릎	Mean SD	0.5 1.0	1.3 1.4	0.4 1.1	1.0 1.1	2.53	0.0697
	왼쪽 무릎	Mean SD	0.4 0.7	1.3 1.4	0.3 0.7	0.6 0.8	3.11	0.0362

C. 좌우 이동 청소 동작 task에서의 불편도 분석 결과 및 분산분석 결과

신체 부위		통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
전반적 불편도		Mean SD	0.3 0.4	2.9 2.1	0.8 1.1	1.8 1.6	8.45	0.0002
앞	목	Mean SD	0.2 0.4	1.3 1.9	0.2 0.4	1.1 1.6	1.65	0.193
	어깨	Mean SD	0.7 0.9	2.8 2.6	1.1 1.8	1.7 1.7	2.73	0.0561
	팔꿈치	Mean SD	0.6 0.8	2.6 2.4	1.3 1.8	1.2 1.3	4.75	0.0061
	손등/손목	Mean SD	0.6 0.7	3.4 3.0	2.0 2.7	1.3 1.1	5.57	0.0026
	가슴	Mean SD	0.2 0.4	1.3 2.1	0.2 0.4	0.7 1.2	2.66	0.0601
	아랫 배	Mean SD	0.6 1.2	1.2 1.5	0.3 0.5	1.0 1.6	0.93	0.4351
	오르쪽 무릎	Mean SD	0.7 1.3	1.6 1.7	0.7 1.1	1.4 1.4	2.6	0.065
	왼쪽 무릎	Mean SD	0.4 0.7	1.5 1.5	0.5 0.8	1.1 1.1	3.34	0.0281

신체 부위		통계량	청소기 A	청소기 B	청소기 C	청소기 D	F-value	p-value
뒤	목	Mean SD	0.5 0.7	1.6 1.2	0.4 0.7	1.3 1.4	3.03	0.0396
	어깨	Mean SD	0.6 0.8	2.9 2.7	1.3 1.7	1.9 1.4	3.67	0.0194
	팔꿈치	Mean SD	1.0 1.8	2.9 2.3	1.2 1.8	1.2 1.2	2.29	0.0921
	손바닥/손목	Mean SD	0.6 0.7	3.5 2.5	1.7 2.4	1.2 1.2	8.01	0.0002
	윗등	Mean SD	0.5 0.7	1.8 1.7	0.3 0.7	1.1 1.8	3.17	0.0339
	아랫 등	Mean SD	0.7 1.0	1.7 1.8	0.9 1.4	1.7 1.8	2.03	0.1241
	오른쪽 무릎	Mean SD	0.5 1.1	1.5 1.5	0.5 1.0	0.9 1.2	3.29	0.0298
	왼쪽 무릎	Mean SD	0.3 0.7	1.2 1.4	0.4 0.7	0.8 0.9	2.66	0.0601