JESK J Ergon Soc Korea 2023; 42(5): 435-448
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2023.42.5.435
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Head Motion Analysis for the Development of Robotic Headform for Mask Performance Evaluation

Youngjae Jung[1], Eunjin Jeon[1], Minjae Kim[1], Eunmi Kim[2], Hyungjin Na[2], Heecheon You[1]

[1]Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, 37673
[2]Medical Convergence Textile Center, Gyeongbuk Technopark, Gyeongsangbuk-do, 38412

마스크 성능 평가용 로보틱 헤드폼 개발을 위한 머리 동작 분석

정영제[1], 전은진[1], 김민재[1], 김은미[2], 나형진[2], 유희천[1]

[1]포항공과대학교 산업경영공학과
[2]경북테크노파크, 첨단메디컬융합섬유센터

Corresponding Author
Heecheon You
Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, 37673
Email : hcyou@postech.ac.kr

Received : April 24, 2023
Revised : August 28, 2023
Accepted : August 29, 2023

Objective: This study aimed to collect and analyze quantitative data on head and jaw movements during three leakage evaluation maneuvers used in the evaluation of leakage of medical masks for personal protective equipment.

Background: Conventional mask leakage evaluation has been performed with actual human subjects wearing masks. However, the results of leakage evaluation can vary depending on the size and shape of the subject's face, and there are limitations such as the risk of physical harm when conducting leakage tests on children and older adults.

Method: In this study, 40 participants (20 males and 20 females) aged 20 to 50 were recruited to measurement and analysis of head and jaw movements during three mask leakage evaluation maneuvers (walking at 6km/h with head movement to the left and right, moving the head up and down, and speaking Korean sentences) using an optical motion analysis system.

Results: Head movements were measured to be on average 50.3±1.2° to the right, 52.3±1.2° to the left, 40.7±2.0° upwards, and 37.7±1.6° downwards. The least movement was observed in the 50s age group (left: 47.1±2.0°, right: 48.1±1.9°, upwards: 34.4±3.9°, downwards: 33.1±2.9°). Jaw movements were found to be 16.1 ±0.6° in angle and 9.0±0.5mm in distance, with the greatest movement observed in the 40s age group (angle: 17.7±0.9°, distance: 9.9±0.6mm).

Conclusion: This study involved the quantitative measurements of head and jaw movements during a mask leakage test conducted on a sample of 40 Koreans to ascertain variations in these movements with respect to age and gender.

Application: The findings from this research may serve as fundamental data for the design of a robot that aligns with the facial characteristics of Koreans and enhance the accuracy and efficiency of mask leakage assessments.

Keywords: Head motion, Mask, Leakage evaluation

Copyright@2023 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

1. Introduction

마스크 누설률은 마스크의 여과 성능을 평가하는 지표로(Brown, 1995) 식품의약품안전처의 지침에 따라 마스크를 착용 후 러닝머신에서 4가지 동작을 수행하며 평가된다. 마스크는 호흡기를 통한 바이러스와 미세 먼지 등을 차단하는 목적으로 사용되고 있으며, 이때 여과 성능이 좋은 필터를 사용한 마스크라도 얼굴에 잘 맞지 않게 설계된 경우 마스크가 여과 성능을 발휘하지 못할 수 있다(Grinshpun et al., 2009). 또한, 사용자의 제품 사용 동작을 마우스(Karlqvist et al., 1999)와 키보드(Nelson et al., 2000)를 이용해 평가하는 사례와 같이 실제 사용자의 제품 사용 동작을 고려할 필요가 있다. 누설률 테스트는 보건용 마스크의 기준 규격에 대한 가이드라인 평가 방법에 따라 진행되며 사용자의 얼굴과 마스크가 잘 맞지 않는 상황을 미연에 방지하기 위해 실시된다. 누설률 평가 가이드라인 평가 방법은 염화나트륨, 에어로졸을 적정 농도로 챔버 내에 공급하고 시험대상자가 마스크를 착용 후 러닝머신 위에서 시속 6km/h로 걸으며 4가지 동작 (1) 2분 동안 머리를 움직이지 않고 말하지 않으며 걷기, (2) 2분 동안 머리를 좌우로 15회 회전, (3) 2분 동안 머리를 위아래로 15회 회전, (4) 2분 동안 한글로 된 문장 말하기를 수행하는 것이다(Figure 1).

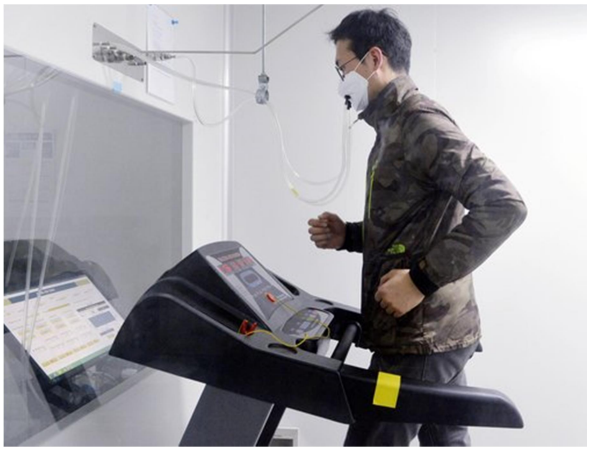


Figure 1. Evaluation of mask leakage (illustration)

기존 마스크 누설률 평가 방법은 데이터의 정확성, 피험자의 안전성, 경제성에 대한 제한점이 있다. 데이터의 정확성 측면에서 기존 누설률 평가는 시험대상자가 직접 마스크를 착용한 상태에서 평가가 진행되어 시험대상자의 얼굴 크기나 피부 경도, 모양에 따라 평가 결과가 상이하게 나타날 수 있다. 피험자의 안전성 측면에서 특정 인구군(어린아이, 고령층)은 러닝머신 위에서 보행하며 평가하기에 신체적 위험의 소지가 있다. 마지막으로 경제성 측면에서는 마스크 누설률 평가 특성 상 다양한 신체 사이즈를 가진 시험대상자 모집을 위해 많은 시간과 비용이 소요되는 단점이 있다.

기존 마스크 누설률 평가 방법의 한계점을 극복하기 위해 미국에서 로보틱스를 이용한 누설률 평가 방법이 제안되고 있지만 국내에 도입하기 위해 한국인의 얼굴에 맞춤화된 로보틱스 제작이 필요하다. 미국의 호흡기 보호구 통합 인증 기관인 NIOSH (National Institute of Occupational Safety & Health)에서는 2003년 3,997명의 데이터를 이용하여 표준 얼굴 로보틱스를 제작하였다. 제작된 표준 얼굴 로보틱스는 실리콘으로 제작된 인공피부로 구성되어 있으며, 머리, 입술 그리고 턱의 움직임을 구현하여 평가에 활용되고 있다. 로보틱스를 이용한 누설률 평가 방법을 한국인에 적용하기 위해 한국인의 얼굴 부위별 크기, 피부 경도, 머리와 턱 동작 범위의 기반 데이터를 수집하는 것이 필요하다.

본 연구는 누설률 평가 동작을 정량적으로 모사하기 위해 광학식 동작 측정 시스템을 이용하여 누설률 평가 동작을 측정 및 분석하였다. 기존의 누설률 평가 동작을 수행할 수 있도록 평가 환경이 구성되었으며, 광학식 동작 측정 시스템을 통해 최대 머리 회전 각도와 턱 각도 및 인중과 턱 끝 사이의 거리가 수집되었다. 수집된 데이터는 연령별, 성별로 구분되어 통계적으로 분석되었다.

2. Methods

2.1 Participants

본 연구는 한국인의 인체 크기를 통계적으로 적합하게 대표할 수 있는 20~50대 성인 40명(남성 20명, 여성 20명, 각 연령대 남성 5명, 여성 5명)을 실험 참여자로 모집하여 수행되었다. 실험 참여자는 러닝머신 위에서 걸으며 목과 턱 동작 수행하기 위해 근골격계 질환이 없는 인원으로 모집되었다. 실험 참여자들은 본 실험 시작 전 실험의 목적과 내용에 대해 충분히 숙지하고 실험 참여 동의서에 서명하였다(PIRB-2021-R043).

2.2 Apparatus

본 연구는 광학식 동작 분석 시스템을 활용하여 마스크 누설률 평가 동작을 측정하였다. 이를 위해 60fps 데이터 촬영이 가능한 동작 측정 카메라 Osprey (Motion Analysis, USA; 해상도: 640 pixels × 480 pixels) 8대가 실험 참여자의 동작이 수행되는 영역에서 약 2.5m 떨어진 지점에 분산 배치되었다. 동작 측정 및 분석에는 Cortex (Motion Analysis, USA) 프로그램을 사용하여 각 관절의 각도 및 거리가 산출되었다. 보행 중 동작을 수행하기 위한 러닝머신은 Excider-ew-701(중산물산, 대한민국)가 실험에 사용되었다(Figure 2 참조).

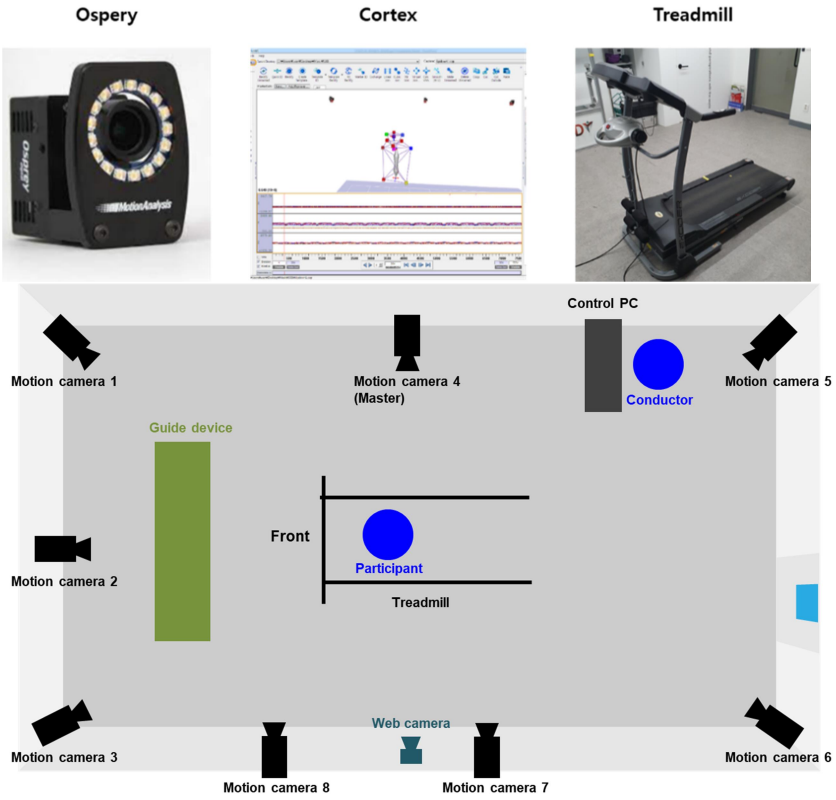


Figure 2. Experimental layout for the quantification of head and jaw movements

지름 13mm의 크기의 반사 마커는 광학식 3D 데이터를 얻기 위해 실험 참여자의 신체에 부착되어 머리와 턱의 움직임을 측정하기 위해 사용되었다. 총 14개의 마커가 사용되었으며, 이 중 10개의 마커는 머리의 앞/뒤/좌/우, 어깨의 좌/우, 골반의 좌/우, 우측 날개뼈, 꼬리뼈에 부착되어 머리의 움직임 측정을 위해 사용되었다. 또한, 8개의 마커는 머리의 앞/뒤/좌/우, 턱관절의 좌/우, 인중, 턱 끝에 부

착되어 턱의 움직임 측정을 위해 사용되었다. 이때, 머리와 턱 움직임 측정에 4개의 마커(머리 앞/뒤/좌/우)가 중복으로 사용되었다 (Figure 3).

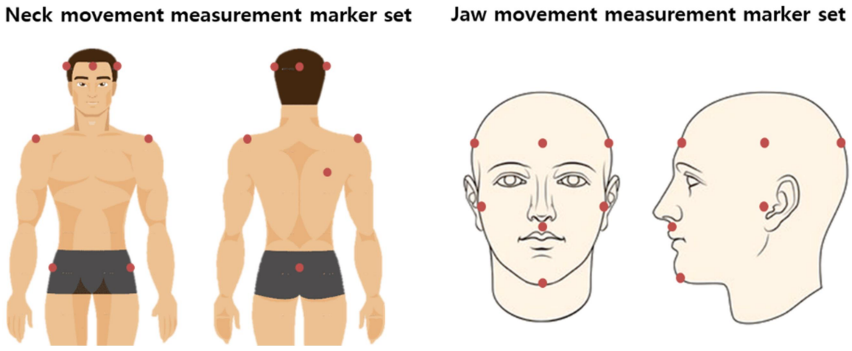


Figure 3. Attachment of reflective markers for head and jaw motion analysis

2.3 Experiment procedure

본 실험은 6단계 절차(실험 안내, 실험 준비, 머리 좌우 움직이기, 머리 상하 움직이기, 한글로 된 문장 발화하기, 실험 마무리)에 따라 수행되었다. 실험 안내 단계에서는 실험 진행자가 참여자에게 실험 목적과 방법을 실험 설명하고, 실험 참여 동의서에 서명을 받았다. 실험 준비 단계에서는 실험 참여자가 실험복으로 환복 후 각 신체 부위에 반사 마커를 부착하고 러닝머신 위에서 각 동작을 미리 수행해 보며 동작을 학습하였다. 머리 좌우 움직이기 단계에서는 실험 참여자가 러닝머신 위에서 6km/h로 보행하며, 미리 준비된 가이드 영상을 참고하여 2분간 머리를 15회(1회 8초 소요) 좌우로 움직이도록 하였다. 자연스러운 동작 측정을 위해서 최대 머리 움직임 반경은 통제하지 않았다. 머리 상하 움직이기 단계에서는 머리 좌우 움직이는 방식과 동일하게 머리 상하 움직임을 측정하였다. 한글로 된 문장 발화하기 단계에서는 실험 참여자가 러닝머신 위에서 6km/h로 보행하며, 미리 준비된 가이드 영상을 참고하여 애국가를 발화하도록 하였다. 자연스러운 동작 측정을 위해 읽는 속도는 통제하지 않았으며, 1~4절을 한 번의 주기로 하여 2분 동안 반복적으로 발화하도록 하였다. 마지막으로 실험 마무리 단계에서는 측정 데이터 확인 및 반사 마커 탈착이 수행되었다.

2.4 Analysis

본 연구에서는 연속된 60fps의 머리 회전 각도, 턱 움직임 각도, 인중과 턱 끝의 길이 데이터를 엑셀 형태로 추출하기 위해 Cortex

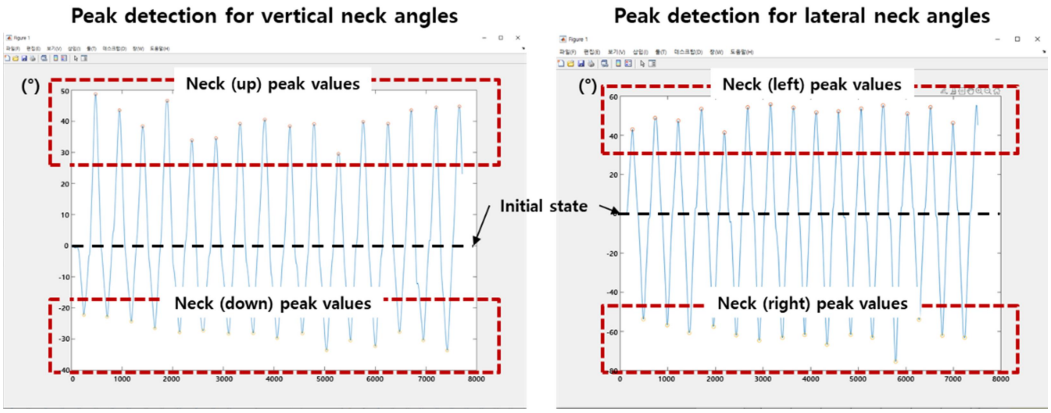


Figure 4. Head motion analysis results by MATLAB (illustration)

(Motion Analysis, USA) 프로그램이 사용되었다. 추출된 엑셀 데이터는 MATLAB (MathWorks Inc, USA) 프로그램을 이용하여 세부 분석되었다. 머리 움직임 각도는 반복 동작 수행으로 인해 발생하는 주기적인 반복 데이터(Figure 4 참조)에서 peak detection 기법을 이용하여 주기별 머리 움직임의 최대 각도들을 추출하여 전체 데이터의 평균값, 최댓값, 최솟값이 분석되었다. 턱 움직임 각도와 인중과 턱 끝의 길이 데이터는 전체 데이터상의 최대 입 벌림 각도와 최대 이격 거리가 추출되어 분석되었다.

3. Results

3.1 Lateral head rotation angle

방향별 머리 좌측과 우측 움직임 분석 결과, 좌측 움직임 각도와 우측 움직임 각도에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다(t [78] = 1.20, p = 0.234). 머리 좌우 움직임은 좌측의 경우 50.3±1.2°, 우측의 경우 52.3±1.2°로 나타났다(Table 1).

Table 1. Lateral head rotation angles by age and gender (n = 40)

Direction	Age	Sex	Mean	*SD*	*SE*	Overall Mean	Overall *SD*	Overall *SE*
Left turn	20~29	Male	51.0	9.7	4.3	50.3	7.3	1.2
		Female	58.2	4.6	2			
	30~39	Male	51.6	3.8	1.7			
		Female	55.3	8.1	3.6			
	40~49	Male	47.4	5.1	2.3			
		Female	58.7	3.7	1.6			
	50~59	Male	46.7	5.8	2.6			
		Female	49.6	6.1	2.7			
Right turn	20~29	Male	47.1	6.5	2.9	52.3	8.5	1.2
		Female	53.6	5.8	2.6			
	30~39	Male	59.5	7	3.1			
		Female	56.2	6.2	2.8			
	40~49	Male	46.3	4.4	2			
		Female	56.4	5	2.3			
	50~59	Male	45.1	6.6	3			
		Female	49.1	5	2.2			

연령대별 좌우 움직임 분석 결과, 모든 연령대에서 좌측 움직임 각도와 우측 움직임 각도에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Figure 5). 각 연령대의 좌측 움직임 각도는 20대에서 50.4±2.2°, 30대에서 52.9±2.3°, 40대에서 50.8±2.3°, 50대에서 47.1±2.0°로 나타났다. 그리고 우측 움직임 각도는 20대에서 54.6±2.7°, 30대에서 53.5±2.1°, 40대에서 53.0±2.3°, 50대에서 48.1±1.9°로 나타났다(Figure 6, Table 2).

성별 기준 머리 좌우 움직임 분석 결과는 여성이 남성보다 우측(t [38] = 2.82, p = 0.008)과 좌측(t [38] = 3.40, p = 0.002) 모든 움직임 각도 범위가 큰 것으로 확인되었다. 좌측 움직임은 여성(53.8±1.4°)이 남성(46.8±1.4°)보다 7.0° 크게 나타났으며, 우측 움직임은 여성(55.4±1.5°)이 남성(49.2±1.5°)보다 5.2° 크게 나타났다(Figure 7, Table 3).

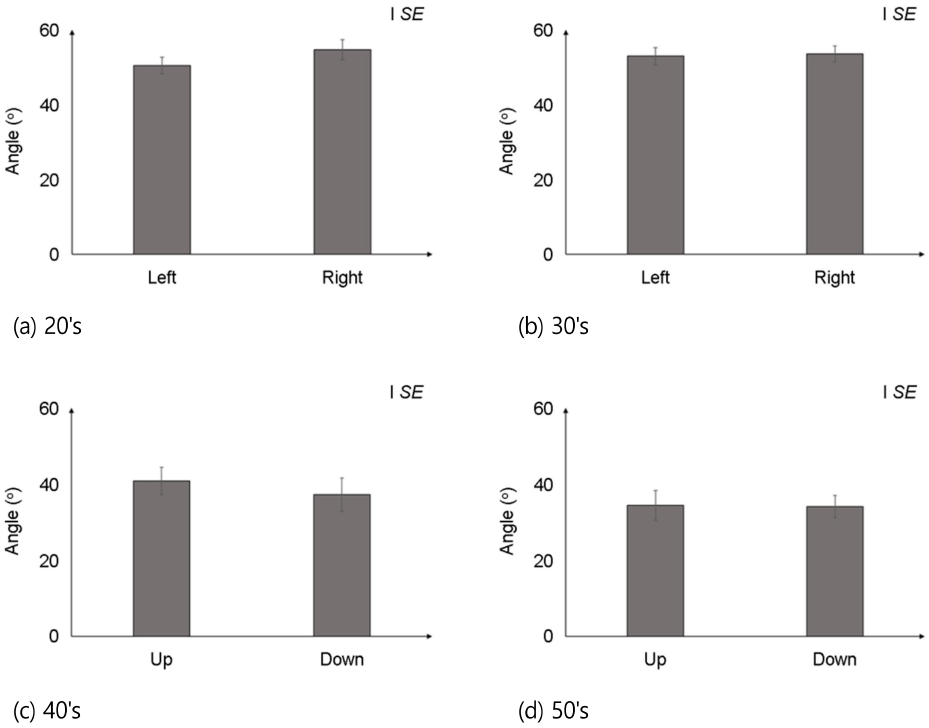


Figure 5. Comparison of average left and right head rotation angles by age

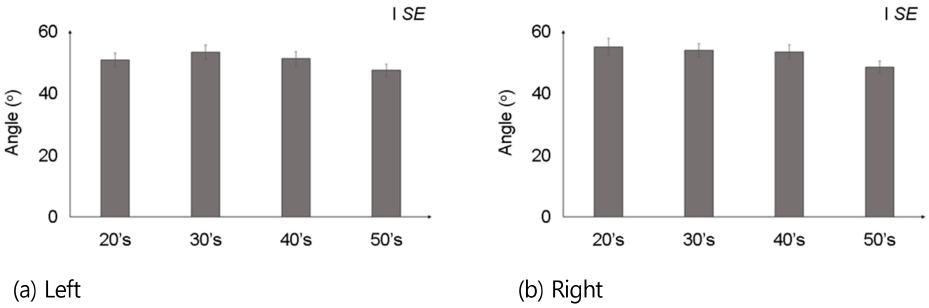


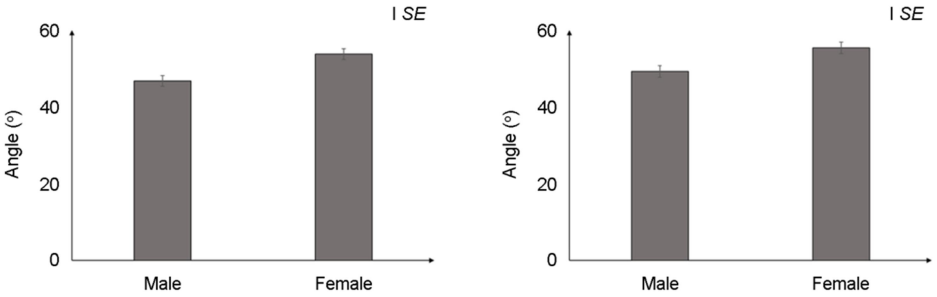
Figure 6. Comparison of average left and right head angles across different age groups

Table 2. Lateral head rotation angles by age (n = 40)

Age	Direction	Mean	*SD*	*SE*
20~29	Left	50.4	7	2.2
	Right	54.6	8.4	2.7
30~39	Left	52.9	7.4	2.3
	Right	53.5	6.6	2.1
40~49	Left	50.8	7.3	2.3
	Right	53.0	7.2	2.3

Table 2. Lateral head rotation angles by age (n = 40) (Continued)

Age	Direction	Mean	*SD*	*SE*
50~59	Left	47.1	6.2	2
	Right	48.1	6.1	1.9



(a) Left (b) Right

Figure 7. Comparison of average left and right head angles by gender

Table 3. Lateral head rotation angles by gender (n = 40)

Sex	Direction	Mean	*SD*	*SE*
Male	Left	46.8	6.5	1.4
	Right	49.2	6.8	1.5
Female	Left	53.8	6.3	1.4
	Right	55.4	6.9	1.5

3.2 Vertical head rotation angle

방향별 머리 움직임 분석 결과, 상측 움직임 각도와 하측 움직임 각도에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다(t [74] = 1.52, p = 0.133). 머리 상하 움직임은 상측(40.7±13.0°)과 하측(36.7±10.1°)으로 나타났다(Table 4).

Table 4. Vertical head rotation angles by age and gender (n = 40)

Direction	Age	Sex	Mean	*SD*	*SE*	Overall Mean	Overall *SD*	Overall *SE*
Up	20~29	Male	34.9	8.8	3.9	40.7	13	2
		Female	54.7	3.2	1.4			
	30~39	Male	45.4	17.3	7.8			
		Female	40.3	7.7	3.4			
	40~49	Male	39.6	9	4			
		Female	42.1	13.4	6			

Table 4. Vertical head rotation angles by age and gender (*n* = 40) (Continued)

Direction	Age	Sex	Mean	*SD*	*SE*	Overall Mean	Overall *SD*	Overall *SE*
Up	50~59	Male	35.4	11.6	5.2	40.7	13	2
		Female	33.4	12.7	5.7			
Down	20~29	Male	37.5	7.3	3.3	37.7	10	1.6
		Female	42.4	5.5	2.4			
	30~39	Male	39.4	9.2	4.1			
		Female	39.7	6.5	2.9			
	40~49	Male	35.5	15.1	6.7			
		Female	38.9	12.5	5.6			
	50~59	Male	33.1	7.8	3.5			
		Female	35.0	10.3	4.6			

연령대별 상하 움직임의 분석 결과 모든 연령층에서 상측 움직임 각도와 하측 움직임 각도 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Figure 8). 각 연령대의 상측 움직임 각도는 20대에서 44.8±3.8°, 30대에서 42.8±4.3°, 40대에서 40.8±3.6°, 50대에서 34.4±3.9°로 나타났다. 그리고 하측 움직임 각도는 20대에서 40.0±2.2°, 30대에서 39.5±2.5°, 40대에서 37.2±4.4°, 50대에서 34.1±2.9°로 나타났다 (Figure 9, Table 5).

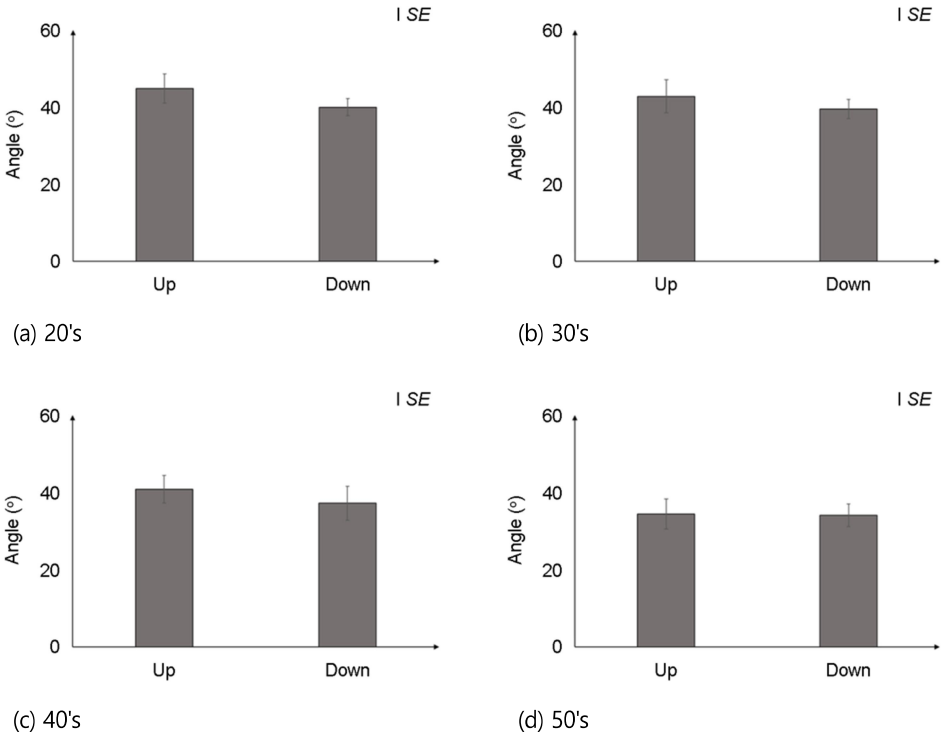
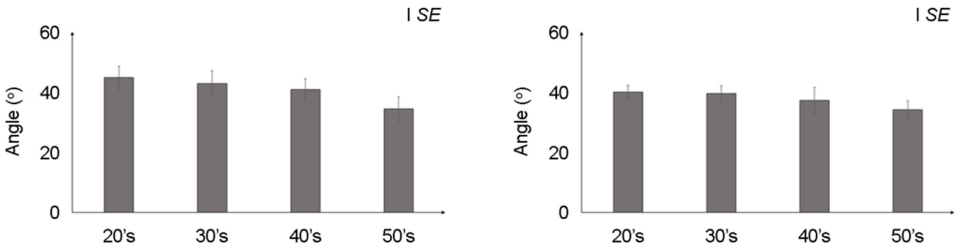


Figure 8. Comparison of average upward and downward head rotation angles by age



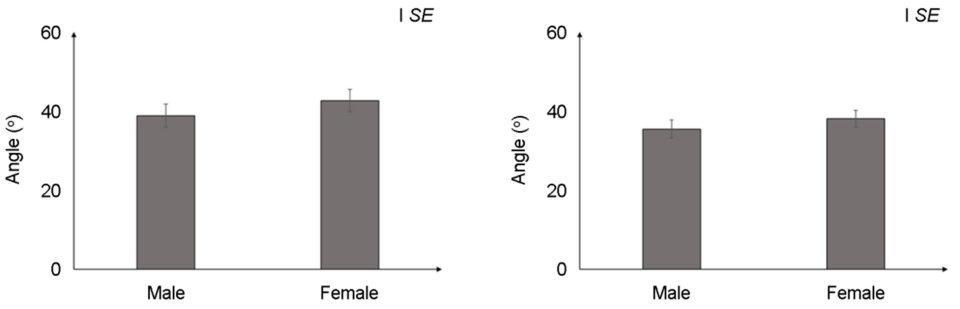
(a) Up (b) Down

Figure 9. Comparison of average upward and downward head rotation angles across different age groups

Table 5. Vertical head rotation angles by age (n = 40)

Age	Direction	Mean	*SD*	*SE*
20~29	Up	44.8	11.9	3.8
	Down	40.0	6.9	2.2
30~39	Up	42.8	13.6	4.3
	Down	39.5	8	2.5
40~49	Up	40.8	11.5	3.6
	Down	37.2	14	4.4
50~59	Up	34.4	12.2	3.9
	Down	34.1	9.2	2.9

성별 기준 머리 상하 움직임 분석 결과, 남성과 여성 간에 상측 움직임 각도(t [38] = 0.92, p = 0.363)와 하측 움직임 각도(t [39] = 0.80, p = 0.427)에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 상측 움직임은 남성이 38.8±2.9°, 여성이 42.6±2.8°로 나타났으며, 하측 움직임은 남성이 35.4±2.3°, 여성이 38.0±2.1°로 나타났다(Figure 10, Table 6).



(a) Up (b) Down

Figure 10. Comparison of average vertical head rotation angles by gender

Table 6. Vertical head rotation angles by gender (n = 40)

Sex	Direction	Mean	*SD*	*SE*
Male	UP	38.8	12.9	2.9
	Down	35.4	10.4	2.3
Female	UP	42.6	12.7	2.8
	Down	38.0	9.6	2.1

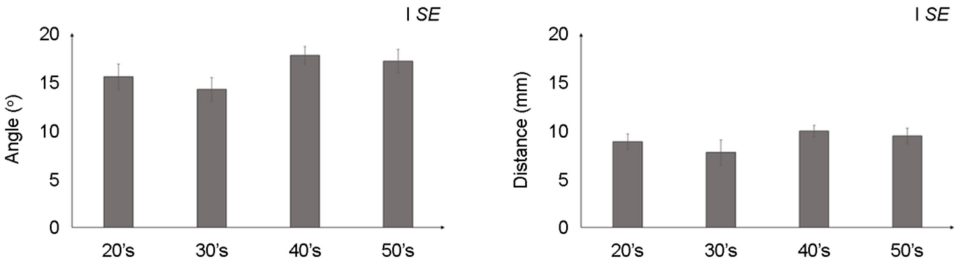
3.3 Jaw angle and separation distance

턱 움직임 분석 결과 중 평균 턱 움직임 각도는 16.1±0.6°로 나타났으며, 턱과 인중 사이의 평균 거리는 9.0±0.5mm로 확인되었다 (Table 7).

Table 7. Jaw angle and distance between jaw and philtrum by age and gender (n = 40)

Measurement	Age	Sex	Mean	*SD*	*SE*	Overall Mean	Overall *SD*	Overall *SE*
Angle (°)	20~29	Male	16.4	5	2.2	16.1	4	0.6
		Female	14.6	2.8	1.2			
	30~39	Male	12.8	3.6	1.6			
		Female	15.6	3.7	1.7			
	40~49	Male	16.4	2.5	1.1			
		Female	19.1	2.8	1.3			
	50~59	Male	17.5	2.2	1			
		Female	16.7	4.6	2.1			
Distance (mm)	20~29	Male	9.3	2.7	1.2	9	2.9	0.5
		Female	8.3	2.1	0.9			
	30~39	Male	7.4	4.1	1.8			
		Female	8	3.8	1.7			
	40~49	Male	9.2	1.8	0.8			
		Female	10.6	1.7	0.8			
	50~59	Male	9.2	3.1	1.4			
		Female	9.6	1.5	0.7			

턱 각도는 20대에서 15.5±1.3°, 30대에서 14.2±1.2°, 40대에서 17.7±0.9°, 50대에서 17.1±1.2°로 나타났다. 턱과 인중 사이 거리는 20대에서 8.8±0.8mm, 30대에서 7.7±1.3mm, 40대에서 9.9±0.6mm, 50대에서 9.4±0.8mm로 나타났다(Figure 11, Table 8).



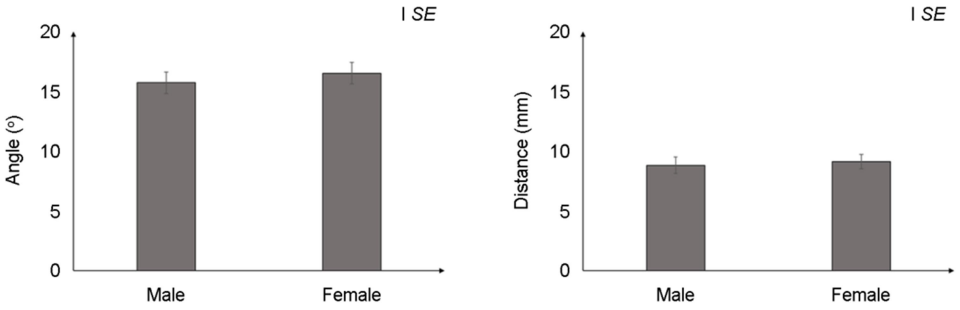
(a) Angle (°) (b) Distance (mm)

Figure 11. Comparison of average jaw angle and distance between jaw and philtrum by age

Table 8. Jaw angle and distance between jaw and philtrum by age (n = 40)

Age	Measurement	Mean	*SD*	*SE*
20~29	Angle (°)	15.5	4.1	1.3
	Distance (mm)	8.8	2.4	0.8
30~39	Angle (°)	14.2	3.9	1.2
	Distance (mm)	7.7	4	1.3
40~49	Angle (°)	17.7	3	0.9
	Distance (mm)	9.9	1.9	0.6
50~59	Angle (°)	17.1	3.6	1.2
	Distance (mm)	9.4	2.4	0.8

성별 기준 턱 각도와 턱과 인중 사이 거리 분석 결과, 남성과 여성 간의 각도 (t [78] = 0.87, p = 0.389)와 이격 거리(t [78] = 0.57, p = 0.569)는 각각 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 턱 각도의 경우 남성은 15.7±0.9°, 여성은 16.5±0.9°로 나타났으며, 이격 거리의 경우 남성은 8.8±0.7mm, 여성은 9.1±0.6 mm로 나타났다(Figure 12, Table 9).



(a) Degree (°) (b) Distance (mm)

Figure 12. Comparison of average jaw angle and distance between jaw and philtrum by gender

Table 9. Jaw angle and distance between jaw and philtrum by gender (n = 40)

Sex	Measurement	Mean	*SD*	*SE*
Male	Angle (°)	15.7	3.9	0.9
	Distance (mm)	8.8	3.1	0.7
Female	Angle (°)	16.5	3.9	0.9
	Distance (mm)	9.1	2.6	0.6

4. Discussion

본 연구에서는 러닝머신에서 걷는 동작을 하는 동안 머리의 움직임을 측정하고 분석하여, 연령 및 성별에 따른 머리 움직임의 차이를 확인하였다. 방향별 머리 움직임의 결과는 머리 좌우의 경우 우측의 동작 범위가 좌측에 비해 2.2° 크고 상측의 경우 하측에 비해 4.0° 크게 움직이는 것으로 확인되었으나 통계적으로 유의하지 않았다. Lecoublet et al. (2019)는 머리 움직임은 좌측 62.2±15.5°, 우측 62.5±13.3°, 상측 53.4±11.9°, 하측 48.5±10.5°로 나타나 우측이 좌측에 비해 0.3° 크고 상측이 하측보다 4.9° 크게 움직이는 것으로 나타났으나 통계적으로 유의하지 않아 본 연구와 유사한 결과를 보인 것으로 확인되었다. 또한, 연령별 분석 결과 전 연령 평균 대비 머리 좌우상하 모두에서 50대가 가장 작은 동작 범위를 가지는 것으로 나타났다(좌측: 2.0°, 우측: 1.0°, 상측: 6.3°, 하측: 2.6°). 이러한 결과는 신체적 노화로 인해 발생한 것으로 추정되며, 노화로 인한 근력 감소나 균형감각 저하(Chodzko-Zajko et al., 2009)가 이러한 결과를 야기했을 것으로 추측된다. 따라서, 50대는 다른 연령층에 비해 러닝머신 위에서 걷는 것에 더 많은 어려움을 느낄 수 있다는 것이 예상된다. 마지막으로, 성별 분석의 경우 머리 좌우상하 모두에서 여성이 남성에 비해 큰 동작 범위를 가지는 것으로 나타났다(좌측: 7.0°, 우측: 6.2°, 상측: 3.8°, 하측: 2.6°). 이러한 결과는 일반적으로 여성이 남성에 비해 높은 유연성을 가지는 경향(Yu et al., 2022)으로 발생한 것이라고 추정된다.

본 연구는 머리와 턱의 움직임을 정량적으로 측정하고 분석하는 방법을 제시함으로써, 제품 디자인 및 인간공학적 설계 분야에서 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 광학식 동작 측정 시스템을 이용하여 3가지 마스크 누설률 평가 동작(6km/h로 걸으며 머리 좌우 움직임, 머리 상하 움직임, 한글로 된 문장 말하기) 시 머리 움직임 및 턱 움직임을 측정하고 분석하는 프로토콜을 정립하였다. 이를 통해 제품의 사용성을 높일 수 있을 뿐 아니라, 제품 사용자의 만족도와 편의성을 향상시킬 수 있다(Nelson et al., 2000). 특히 머리와 턱의 움직임이 중요한 역할을 하는 다양한 분야에서 유용하게 활용될 수 있다. 예를 들어, 스포츠 분야에서는 머리와 턱 움직임을 고려한 헬멧 디자인이 부상 예방 및 안전성을 높일 수 있다(Bottlang et al., 2022). 또한, 의료 분야에서는 환자의 머리와 턱 움직임을 측정하여 치아 보철물 등의 제작에 활용할 수 있다(García et al., 2020). 뿐만 아니라, 가전 제품 디자인 분야에서도 머리와 턱의 움직임을 고려한 제품 개발이 사용자의 편의성을 높일 수 있다.

본 연구는 실험 참여자의 수가 제한적이었고 동작 적절성 검증을 위한 연구가 수행되지 않은 제한 사항이 있다. 본 연구는 기본적인 동작 획득을 목적으로 실험 참여자 40명에 대해서만 수행되었다. 추후 다양한 신체 사이즈를 대상으로 실험 참여자 수를 확장하면 데이터의 정확성을 올릴 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 실험 참여자의 신체적 상태에 따라 동작에 차이가 있을 수 있으므로 동작에 대한 반복성 검증을 위해 inter, intra-subject variability의 추가 실험을 통한 동작 적절성 검증이 필요하며, 광학식 동작 측정 시스템뿐 아니라 다양한 측정 기기나 방법을 도입하여 연구의 범위를 확장할 필요가 있다. 이러한 추가적인 연구를 통해 더욱 정교하고 신뢰성 높은 동작 측정 및 분석 방법을 개발하여 다양한 분야에서 응용이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구를 토대로 안면 형상에 따른 누설률 변화 연구 및 동작 변화에 따른 마스크 누설률 연구가 필요하다. 안면 형상 및 동작에 따른 누설률 변화를 추정할 수 있게 되면, 안면 형상만으로도 누설률을 추정할 수 있어 실제 누설률 측정에 드는 시간과 비용을 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 개인 맞춤형 마스크 제조나 특정 집단군을 위한 안면부 보호 장비 개발 등이 보다 쉽게 이루어질 수 있고, 보건 및 안전 분야에서 중요한 기여를 할 수 있다. 또한, 이러한 연구 결과는 전염병 등으로 인한 마스크 착용이 필수적인 상황에서 안면 형상에 따른 누설률 변화를 고려하여 보다 효과적인 마스크 착용 방법을 제공하는 데에도 활용될 수 있다. 본 연

구의 머리 동작 분석은 누설률 평가 로보틱스 제작에 필요한 기반 자료로 활용될 수 있어, 누설률 평가의 정확성과 안전성을 향상하고 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

Acknowledgment

This research was jointly supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant (2022R1A2C1013198) funded by Korean Government, the grant 'Development of technology to improve quasi-drug quality management system' (21172MFDS172) from the Ministry of Food and Drug Safety of the Republic of Korea in 2021, the grant by the Biomedical Research Institute Fund, Chonbuk National University Hospital, and the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (P0008691, HRD Program for Industrial Innovation.

References

Bottlang, M., DiGiacomo, G., Tsai, S. and Madey, S., Effect of helmet design on impact performance of industrial safety helmets. *Heliyon*, 8(8), 2022.

Brown, R.C., Protection Against Dust by Respirators. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics: JOSE*, 1(1), 14-28, 1995. https://doi.org/10.1080/10803548.1995.11076301

Chodzko-Zajko, W.J., Proctor, D.N., Singh, M.A.F., Minson, C.T., Nigg, C.R., Salem, G.J. and Skinner, J.S., Exercise and physical activity for older adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(7), 1510-1530, 2009.

García, M., Cabrera, J.A., Bataller, A., Vila, J. and Mayoral, P., Mandibular movement analysis by means of a kinematic model applied to the design of oral appliances for the treatment of obstructive sleep apnea. *Sleep Medicine*, 73, 29-37, 2020.

Grinshpun, S.A., Haruta, H., Eninger, R.M., Reponen, T., McKay, R.T. and Lee, S.A., Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: two pathways for particle penetration. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(10), 593-603, 2009. https://doi.org/10.1080/15459620903120086

Karlqvist, L., Bernmark, E., Ekenvall, L., Hagber, M., Isaksson, A. and Rostö, T., Computer mouse and track-ball operation: Similarities and differences in posture, muscular load and perceived exertion. *Industrial Ergonomics*, 23, 157-169, 1999.

Lecoublet, B., Boisclair, D., Evin, M., Wagnac, E., Petit, Y., Aubin, C.E. and Arnoux, P.J., Assessing the global range of motion of the helmeted head through rotational and translational measurements. *International Journal of Crashworthiness*, 2019.

Nelson, J.E., Treaster, D.E. and Marras, W.S., Finger motion, wrist, motion and tendon travel as a function of keyboard angles. *Clinical Biomechanics*, 15, 489-498, 2000.

Yu, S., Lin, L., Liang, H., Lin, M., Deng, W., Zhan, X., Fu, X. and Liu, C., Gender difference in effects of proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on flexibility and stiffness of hamstring muscle. *Frontiers in Physiology*, Volume 13-2022, 2022. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.918176

Author listings

Youngjae Jung: nonoman2000@postech.ac.kr
Highest degree: Bachelor's degree, Electronics, Sogang University, Seoul, Korea
Position title: Senior researcher, Department of Industrial and Management, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea
Areas of interest: Ergonomics design, Usability evaluation, Health care product

Eunjin Jeon: slowjeon@postech.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Clothing, Kyungpook National University, Deagu, Korea
Position title: Post Doctor, Department of Industrial and Management, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea
Areas of interest: Ergonomics design, Usability evaluation, Health care product

Minjae Kim: minjae@postech.ac.kr
Highest degree: BS, Department of Industrial and Management, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea
Position title: PhD candidate, Department of Industrial and Management, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea
Areas of interest: Ergonomics design, Usability evaluation, Health care product

Eunmi Kim: emkim@gbtp.or.kr
Highest degree: PhD, Department of Fiber system Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea
Position title: Senior researcher, Medical Convergence Textile Center, Gyeongbuk Technopark, Gyeongsan, Korea
Areas of interest: Mask Efficacy, Usability evaluation, User interface

Hyungjin Na: hjna@gbtp.or.kr
Highest degree: PhD, Department of Bio-fibers and materials Science , Kyungpook National University, Daegu, Korea
Position title: Senior researcher, Medical Convergence Textile Center, Gyeongbuk Technopark, Gyeongsan, Korea
Areas of interest: Mask Efficacy, Biofibres

Heecheon You: hcyou@postech.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA
Position title: Professor, Department of Industrial and Management, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea
Areas of interest: Ergonomics design, Usability engineering, User experience design, User interface design