

호흡보호구 평가용 얼굴 로봇을 위한 한국인 얼굴 피부의 경도 측정

전은진¹⁾ · 이아람²⁾ · 정영제¹⁾ · 김희은²⁾ · 유희천^{1)†}

¹⁾포항공과대학교 산업경영공학과

²⁾경북대학교 의류학과/장수생활과학연구소

The Measurement of Korean Face Skin Rigidity for a Robotic Headform of Respiratory Protective Device Testing

Eun-Jin Jeon¹⁾, Young-jae Jung¹⁾, Ah-lam Lee²⁾, Hee-Eun Kim²⁾, and Hee-Cheon You^{1)†}

¹⁾Dept. of Industrial & Management Engineering, POSTECH; Pohang, Korea

²⁾Dept. of Clothing & Textiles/Center for Beautiful Aging, Kyungpook National University; Daegu, Korea

Abstract: This study aims to measure the skin rigidity of different facial areas among Koreans and propose guidelines for each area's skin rigidity that can be applied with a facial robot for testing respiratory protective devices. The facial skin rigidity of 40 participants, which included 20 men and 20 women, aged 20 to 50, was analyzed. The rigidity measurement was conducted in 13 facial areas, including six areas in contact with the mask and seven non-contact areas, by referring to the facial measurement guidelines of Size Korea. The facial rigidity was measured using the Durometer RX-1600-00 while in a supine position. The measurement procedure involved contacting the durometer vertically with the reference point, repeating the measurement of the same area five times, and using the average of three values whose variability was between 0.4 and 4.2 Shore OO. The rigidity data analysis used precision analysis, descriptive statistics analysis, and mixed-effect ANOVA. The analysis confirmed the rigidity of the 13 measurement areas, with the highest rigidity of the face being at the nose and forehead points, with values of 51.2 and 50.8, respectively, and the lowest rigidity being at the chin and center of the cheek points, with values of 19.2 and 20.7, respectively. Significant differences between gender groups were observed in four areas: the tip of the nose, the point below the chin, the area below the lower jaw, and the inner concha.

Key words: robotic headform (로보틱 헤드폼), face skin rigidity (얼굴피부 경도), respiratory (호흡기), protective device testing (보호장치 평가)

1. 서 론

현재 호흡보호구의 누설률 평가는 피험자 조건을 표준화하지 않고 반복적으로 시행됨으로써 평가에 장시간이 소요되고 동일한 시료의 경우에도 결과가 상이하게 나타나는 문제가 있다. 인간을 대상으로 한 평가는 피험자 조건 표준화를 통해 객관적 정보를 기반으로 평가가 이루어져야 하나 다양한 연령, 성별, 얼굴 형태를 가진 피험자를 표준화하는 데에는 한계가 있다. 이러한 사유로 피험자를 대체하는 평가 방법으로 얼굴 로봇을 활용하여 호흡보호구의 누설률 평가가 진행되고 있다.

2000년대 초반부터 미국, 유럽 등 국가에서는 3차원 데이터를 이용한 호흡보호구 성능 시험용 표준 머리를 디자인하였고, 연구집단의 표준 머리에 해당하는 얼굴 로봇 헤드폼을 제작하여 마스크의 누설률 평가를 진행하고 있다.

National Institute for Occupational Safety & Health (NIOSH)에서는 얼굴 로봇 헤드폼 및 누설률 체임버 장치를 개발하여 인간을 대체할 마스크 성능평가 시스템에 대한 연구를 진행하고 있다(Zhuang et al., 2020). Bergman et al(2015)는 정적인 얼굴 로봇 헤드폼을 평가에 활용하였으며, Lore et al(2012)은 얼굴 로봇 헤드폼 외에도 인체 피부 두께를 적용하고 3개 동작이 구현 되는 동적 얼굴 로봇 헤드폼을 활용하여 마스크 밀착도와 누설률을 평가하였다. 그러나, 기존 얼굴 로봇 헤드폼을 활용한 마스크 밀착도와 누설률 평가는 성인용으로 진행되고 있다. 실제 많은 수의 어린이가 보건용 마스크를 사용하고 있는 점을 감안한다면 어린이용 얼굴 로봇 헤드폼의 개발도 필요하다. 마스크의 밀착도 및 누설률 평가가 동적 헤드폼 적용과 얼굴 피부 두께를 적용하는 데까지는 발전되었지만 얼굴 부위

†Corresponding author: Hee-Cheon You

Tel. +82-54-279-2210

E-mail: hcyou@postech.ac.kr

©2023 Fashion and Textile Research Journal (FTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

별로 인간과 유사한 피부 경도를 적용한 얼굴 로봇 헤드폼은 개발되지 않은 상황이다. 얼굴 로봇 헤드폼을 활용하여 마스크 밀착도 및 누설률에 대한 정확한 평가를 위해서는 로봇 헤드폼의 외피에 얼굴 부위별 인간과 동일한 피부 경도의 적용이 필요하다.

NIOSH에서는 안면부 인체 측정 데이터 8개를 기준으로 안면부 형상을 분석하여 얼굴 전체 크기와 모양을 고려한 5가지 크기(소형, 중형, 대형, 길고 좁은 및 짧고 넓은)의 디지털 3D 헤드폼을 개발하였다. 또한, 로봇틱 메커니즘을 이용한 마스크 밀착도 검사 시스템을 개발하고 있으며, 사람이 착용한 마스크 밀착도 검사와 로봇틱 헤드가 착용한 마스크 밀착도 시험 결과의 상관성을 분석하는 연구를 진행하였다(Bergman et al., 2015). 헤드폼의 표피 경도는 ISO16900-5(Breathing machine, metabolic simulator, RPD head forms and torso, tools and verification tools)에서는 Shore A의 10에서 30 사이로 제작되어야 한다고 규정하고 있으나 얼굴 부위별 경도 수치는 명시되어 있지 않다. Wolff et al.(2011)은 경도계(duro meter)를 사용하여 107명의 폐경기 미국인 여성들에 대해 피부 경도를 측정하여 이마에서 42.5 ± 12.3 , 볼에서 10.7 ± 7.9 측정 결과를 보고하였다. Lim and Chung(2002)은 한국인의 신체 부위별 피부 경도에 대한 측정 결과를 보고하였으나 얼굴 부위에 대한 측정은 수행하지 않았다는 한계가 있다.

호흡보호구의 밀착감과 누설률 평가에서는 얼굴의 불규칙한 곡선, 요철, 각도와 같은 형상 특성과 안면부 부위별 피부 경도 특성이 중요한 요소이다. 마스크의 정확한 밀착도와 누설률 평가를 위해서는 헤드폼의 형상 설계와 더불어 얼굴 부위별 경도를 적용한 외피의 제작이 필요하다. 호주에서 진행된 N95와 PFR® N95 마스크에 대한 QNFT 밀착도 검사 결과 아시아인들의 실패율(failure rate)이 16.3%(276명 중 45명)로 가장 높게 나타났다(Ahmad et al., 2010; Wikinson et al., 2010). 이는 서양인과 다른 얼굴 형상에 기인한 것으로 밀착도 검사에 대한 중요성이 확인된 결과이다. 캐나다에서는 1,271명의 병원 종사자를 피험자로 N95 마스크에 대한 QLFT 밀착도 검사 결과, 남자는 95.1%, 여자는 85.4%로 성별에 따라 상이한 결론을 얻었다(McMahon et al., 2008). 마스크의 밀착도에 영향을

주는 요인으로는 안면 형상과 치수, 성별, 나이 등으로 인간을 대체할 얼굴 로봇 헤드폼은 이러한 요인을 고려하여 제작되어야 한다. 더불어 인간과 동일한 부위별 피부 경도 적용하여 표피를 제작할 경우 정확한 마스크 밀착감과 누설률 평가가 진행될 것으로 사료된다.

본 연구에서는 한국인의 얼굴 부위별 경도를 측정하여 호흡보호구 평가용 얼굴 로봇 제작시에 적용할 수 있는 피부의 경도를 파악하고 마스크와 접촉이 발생하는 볼, 광대, 콧등, 턱, 귀(Fig. 1)의 경도 측정치(Shore A)를 고려하여 인간의 실제 피부와 유사한 재질 특성 기준을 제안하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 피험자 및 장비

얼굴 피부의 경도 분석은 20~50세 연령에 해당하는 안면부 피부질환이 없는 40명(남성 20명, 여성 20명)을 대상으로 진행하였다. 얼굴 피부 경도 측정 장비는 Duro meter RX-1600-OO(Rex Gauge Company, USA(Fig. 2)를 사용하였으며, 측정 대상 표면에 측정부를 수직으로 밀착시켜 경도를 측정하였다(Dellalana, et al., 2019; Lim & Chung, 2002). 경도는 압축 변형에 대한 재료 저항의 척도로 일반적인 피부의 경도 측정 방법은 Shore A 경도계를 사용하는 것이다(Choh et al., 2010;

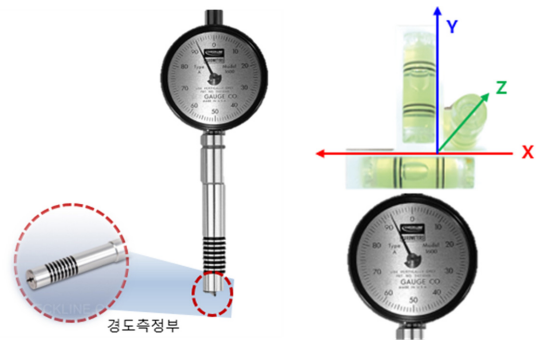


Fig. 2. Measuring equipment for skin rigidity(Durometer RX-1600-OO, Rex Gauge Company, USA).



Fig. 1. Example of making headform skin(Wander et al., 2012).



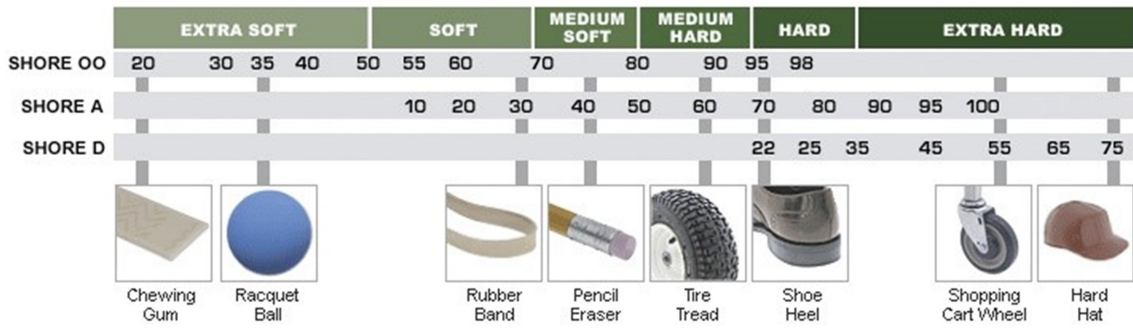


Fig. 3. Shore hardness scale.

Cuaderes et al., 2009; Moon et al., 2012; Wiese et al., 2014). Merkel et al.(2008)은 경도계를 이용하여 피부 경도 측정의 유용성이 입증된 정량적 측정 방법을 사용하였다.

얼굴 피부 경도 측정은 곡선 형태의 얼굴 피부 표면에 경도 측정부를 수직, 수평을 유지한 상태에서 측정해야 하므로 경도계 상단에 X, Y, Z축을 기준으로 버블 미터 3개를 부착하여 진행하였다. 경도계를 직각으로 압력을 가하지 않은 상태로 피부에 접촉하면 경도계의 바닥에 있는 측정부가 내부로 밀려가면서 용수철이 달린 감지기에 측정된 경도를 전달하여 보정된 게이지(calibrated gauge)에 0에서 100까지의 눈금으로 값을 나타내게 된다. 곡선 형태와 굴곡진 얼굴 부위의 경도 측정 시에 표면 접촉의 정도에 따른 측정값의 차이를 최소화하기 위해 측정 부위에 기준점을 표시하고 동일한 위치에 5회 반복 측정하였다(Dellalana, et al., 2019; Falanga & Bucalo, 1993).

헤드폼 표피 경도의 국제규격(ISO16900-5)은 경도 기준을 Shore A(10~30)로 규정하고 있으나, 얼굴 부위의 경도에 대한 규격은 명시되어 있지 않아 본 연구에서는 젤과 같이 부드러운 재료 측정에 사용되는 Shore OO 단위를 사용하였다.

국제규격 경도 기준인 Shore A와 Shore OO에 대한 경도 스케일은 Fig. 3과 같이 예를 들어 95 Shore OO는 70 Shore A와 22 Shore D와 동일한 경도이다.

2.2. 실험 환경 및 절차

얼굴 피부 경도 측정은 S1. 기준점 표시를 위한 안면부 치수 계측, S2. 안면부 및 귀 부위 13개 기준점 표시, S3. 누운 평가 자세 유지, S4. 안면부 접촉 시 경도계 수평/수직 확인, S5. 측정 기준점 부위 경도 측정의 절차로 진행하였다. 기준점 표시를 위한 안면부 치수 계측은 제7차 Size Korea(2015)의 기준점 정보에 제시되지 않은 부위의 기준점 위치 선정을 위해 진행하였으며, 콧대 점(코뿌리점에서 1 cm 아래), 볼 중앙(광대뼈 점과 턱 끝점의 1/2 지점), 아래턱뼈 점 아래 점(아래턱뼈 점에서 5 cm 이동한 점) 등의 부위이다(Fig. 4).

경도 측정 부위의 선정은 제7차 Size Korea(2015)의 얼굴 부위 측정 기준점을 참고로 하여 마스크 접촉부와 마스크 비접촉부(안면부, 귀)에 해당하는 기준점을 선정하였다. 경도 측정

부위는 마스크 접촉부 6개 콧대 점(Subnasale), 코끝 점(Pronasale), 광대뼈 점(Zygion), 아래턱뼈 점 5 cm 이동점(Submandibular fossa), 턱끝 점(Menton), 턱끝 밑점(Submandibular) 부위, 마스크 비접촉부 7개 안면부 4개 부위 이마점(Crinion), 코뿌리 점(Sellion), 볼중앙 점(Center of cheek), 아래턱뼈 점(Gonion)과 귀 3개 부위 헬릭스(Helix), 포사(Fossa), 이너 컨츠(Inner concha) 총 13개 부위이다(Fig. 4). 귀부위는 복잡한 구조로 인해 총 8개 부위 헬릭스(Helix), 아우트 컨츠(Outer concha), 이너 컨츠(Inner concha), 튜브클(Tubercle), 안티 트래이구스(Anti tragus), 트래이구스(Tragus), 룩(Look), 데이스(Daith) 기준점을 대상으로 사진 경도 측정을 진행하여 컷바퀴에 포함되는 헬릭스(helix)와 평면이고 얼굴 부위와 연결되어 비교적 안정된 값이 도출되는 포사(Fossa), 이너 컨츠(Inner concha) 3개 부위를 최종 선정하였다(Table 1).

측정 자세는 누운 자세로 얼굴 부위를 수평으로 유지한 상태에서 안면부를 측정하고 턱부위 측정 시에는 턱부위가 경도계와 수평이 되도록 턱을 위쪽으로 당긴 상태로 측정하였으며, 귀 부위는 옆으로 누운 자세에서 측정하였다. 안면부 부위별 경도 측정은 기준점 부위에 수평/수직을 유지한 상태로 경도계를 피부에 접촉한 후 약 1초 이내에 고정된 값을 측정하였고, 동일 부위에 5회 반복 측정하였으며, 측정된 값에서 변동률이 0.4

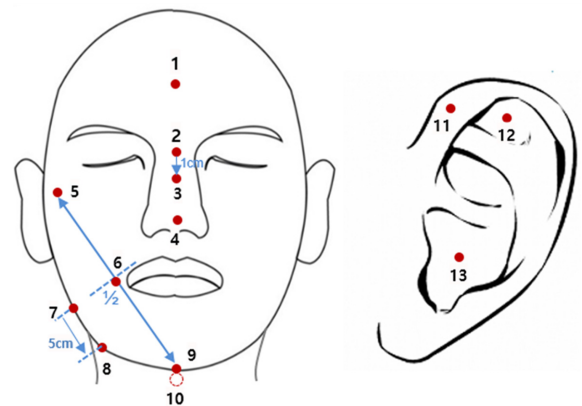


Fig. 4. Reference point for rigidity measurement.

Table 1. Definition of reference points for rigidity measurement

No.	Contact with mask	Reference point	Definition
1	×	Crinion	The point where the hairline meets the midpoint of the forehead
2	×	Sellion	The root of the nose
3	○	Subnasale	The bottom of the nose
4	○	Pronasale	The most anterior point on the midline of the nasal tip
5	○	Zygion	Most lateral point of each zygomatic arch (right/left)
6	×	Center of cheek	Halfway between the zygion and the menton
7	×	Gonion	The most posterior-inferior point on the angle of the mandible (right/left)
8	○	Submandibular fossa	The point 5cm away from the gonion
9	○	Menton	The most anterior-inferior point on the mandibular symphysis
10	○	Submandibular	The point at the midline border between the submental area and the neck
11	×	Helix	The prominent outer rim of the pinna
12	×	Fossa	The shallow depression of the outer concha
13	×	Inner concha	The hollow of the inner concha

Table 2. Rigidity measurements of silicone products

Unit: Shore OO

Trial	Product	Dragon Skin 20	Dragon Skin 30	Ecoflex 10	Ecoflex 20	Ecoflex 30	Ecoflex 50	Dragon Skin FX-Pro	Dragon Skin 10 Medium	Rebound 25
1		66	76	15	16	27	37	45	55	66
2		67	76	16	17	28	37	46	56	67
3		67	76	16	18	29	37	46	56	68
	Mean	67	76	16	17	28	37	46	56	67
	SD	0.4	0.0	0.4	0.7	0.7	0.0	0.4	0.4	0.7
	CV	0.6	0.0	2.6	4.2	2.5	0.0	0.9	0.7	1.1

~4.2 shore OO 이내인 3개 값의 평균값을 사용하였다. Dellalana et al.(2019)은 경도 측정 시 피험자를 누운자세에서 피부를 평평하게 유지하고 부위별 피부 경도를 10회 반복 측정 후 평균값을 도출하였으며, 장비의 반복의 정확성 검증을 위해 변동계수를 분석하였다.

측정 데이터 컨트롤은 경도가 10~70 shore OO 범위인 10개 실리콘 시편(L: 65 mm × W: 65 mm × D: 8~12 mm)을 5회 반복 측정하여 변동을 범위를 확인한 후 피험자 3명을 대상으로 사전에 경도 평가를 진행하여 측정자의 변동을 범위 기준 0.4~4.2(±5)로 설정하였다(Table 2).

측정 데이터 컨트롤을 위한 실리콘 시편 재료는 Smooth-On Inc 제조사(미국)의 부가형 실리콘 제품으로 EcoFlex(<https://www.hyup-shin.co.kr/>) 링크를 통해 구매하여 사용하였다.

2.3. 통계 분석

얼굴 경도 데이터 분석은 측정 방법의 정밀도 분석, 기술 통계분석, 혼합효과 분산분석(mixed effect ANOVA)을 사용하였다. 측정 방법의 정밀도는 3회 반복 측정된 값의 피험자 내 변동계수(CV: coefficient of variation)를 통해 분석하였으며, 기술 통계분석은 부위별로 3회 반복 측정된 피험자별 평균치를

수집하여 분석하였다. 혼합효과 분산분석은 성별, 연령대별 특성이 피부 경도에 미치는 영향 분석을 위해 사용하였다. 임의 효과(random effect)를 피험자, 고정효과(fixed effect)를 성별 및 연령대로 두어 반복측정으로 인한 피험자의 영향을 고려하였고 유의차가 도출된 그룹별 서열 관계는 Fisher's LSD(Least Significant Difference)로 확인하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. 측정 방법의 정밀도

피험자 40명의 얼굴 피부 경도를 분석한 결과는 Table 3과 같다. 얼굴 13개 부위 중 최대 경도는 콧대 점(51.2)과 이마 점(50.8)이고 최소 경도는 턱 아래 점(19.2), 볼중앙(20.7)으로 나타났다. 마스크를 착용하였을 때 얼굴과 맞닿는 부위인 콧뿌리 점(32.4), 광대뼈점(38.7), 볼 중앙(20.7), 턱 아래 점(19.2)의 경우 다른 부위에 비해 경도가 상대적으로 낮게 나타났다. 일 반적인 보건용 마스크를 착용할 때 마스크의 고무줄을 걸게 되는 귀 부위는 상세 부위별로 경도가 다양하고 변동계수가 큰 것으로 확인되었다.

현재 마스크 누설률 및 밀착감 평가에 사용되고 있는 NIOSH 얼굴 로봇 헤드폼은 부위별로 상이한 인간의 피부

Table 3. Descriptive statistics of facial skin rigidity (n = 40)

Unit: Shore OO

Variable	Mean	SE	SD	CV	Percentile										
					min.	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	99%	max.
Crinion	50.8	0.7	4.6	9.1	42.0	42.5	43.7	44.3	47.8	51.0	54.6	57.0	57.0	57.9	58.3
Sellion	32.4	1.0	6.0	18.6	18.3	19.5	24.5	26.3	28.0	32.0	36.7	39.1	40.0	46.8	51.0
Subnasale	51.2	0.9	5.9	11.5	38.0	38.4	41.5	43.9	46.6	52.3	55.7	57.1	58.8	62.7	64.0
Pronasale	36.1	0.9	5.6	15.5	25.7	25.7	26.0	28.0	31.6	36.3	40.4	42.4	43.7	46.2	47.7
Zygion	38.7	0.6	4.0	10.4	30.7	30.7	30.7	31.6	36.3	39.3	41.8	43.3	44.0	44.9	45.0
Center of cheek	20.7	0.4	2.5	12.1	17.0	17.1	17.3	17.6	18.9	20.3	22.1	23.1	25.4	27.3	27.7
Gonion	37.3	0.9	5.8	15.5	25.0	26.4	28.7	29.9	33.6	37.3	39.4	45.0	48.7	49.3	49.3
Submandibular fossa	19.2	0.5	3.3	17.0	13.7	14.3	15.7	16.6	17.3	18.5	20.0	21.3	27.1	29.5	30.0
Menton	30.0	0.7	4.3	14.4	22.7	22.7	22.7	24.0	27.5	30.2	33.2	35.7	36.4	38.8	40.0
Submand- bular	35.8	0.7	4.4	12.3	25.0	26.0	28.0	29.8	32.7	36.5	38.7	41.0	41.7	43.4	43.7
Helix	35.5	0.9	5.4	15.2	24.0	24.3	25.3	28.1	33.5	35.8	38.9	40.9	43.7	46.2	47.3
Fossa	48.0	1.0	6.1	12.7	32.7	33.6	36.0	40.5	44.6	48.5	53.0	54.7	55.4	56.8	57.3
Inner-concha	27.3	1.0	6.2	22.7	17.7	17.8	18.3	19.3	23.2	27.3	30.8	35.7	36.7	42.5	45.3

경도를 적용하지 않았다는 한계가 있다. 본 연구 결과와 같이 얼굴 경도는 각 부위별 경도 차이(19.2~51.2)가 큰 것으로 나타나 로보틱 헤드폼을 활용한 마스크 누설률 및 밀착감 평가의 정확성 향상을 위해서는 얼굴 부위별 경도를 적용한 로보틱 헤드폼의 개발이 필요하다.

본 연구에서 수집한 인간의 부위별 얼굴 경도 측정 프로토타입은 다양한 곡선형태와 요철이 있는 다양한 인체부위의 경도 측정에 활용이 가능하다는 장점이 있다.

3.2. 연령대 및 성별 얼굴 경도 분석

고정 효과를 성별과 연령대, 임의 효과를 피험자로 둔 혼합 효과 분산분석을 실시한 결과 성별 그룹 간 유의차가 발견되는 치수는 “코끝 점, 아래턱뼈 점, 아래 턱뼈 아래 점, 이너컨츠” 4개 부위로 나타났다(Table 4). 남성은 코끝 점과 귀부위인 이너컨츠의 피부경도가 높았으며, 여성은 아래턱뼈 점, 아래턱뼈

Table 4. Group means of face areas showing a significant gender effect in the mixed-effects ANOVA of skin rigiditys

	Male	Female	F	P	
Pronasale (20~40)	38.8	33.4	15.34	0.000	***
	A	B			
Gonion (20~35)	28.7	31.4	5.42	0.025	*
	B	A			
Submandibular fossa (30~45)	33.8	37.8	11.32	0.002	**
	B	A			
Inner concha (20~40)	30.2	24.5	13.38	0.001	**
	A	B			

Mixed effect ANOVA: * $p < .01$, ** $p < .005$, *** $p < .001$
Fisher LSD Grouping: A>B

점 아래 3 cm 부위의 피부 경도가 유의하게 높았다.

본 연구에서는 얼굴 부위별 경도 측정 범위에 대한 기준을 확립하였으나 연령별, 성별에 대한 차이는 포함하지 않고 40명 에 대한 전체 평균을 적용하여 로보틱 헤드폼 표피 경도 기준 을 수립하였다. 연구 결과에서 성별 기준 남성에서 유의한 차 이가 나타난 코끝점 및 이너컨츠와 여성의 아래턱뼈점과 아래 3 cm 부위는 남녀 얼굴 골격 특성에 기인한 것으로 사료된다. 따라서, 추후 마스크 평가용 로보틱 헤드폼의 제작시에는 남녀 특성을 고려하여 성별 구분을 통한 개발이 필요하다.

연령 그룹의 유의차가 발견되는 부위는 “턱 아래 점, 헬릭스 ”의 2개 부위이며, 턱 아래 점의 경도는 50대가 가장 높고 헬릭스의 경도는 20대가 가장 높은 것으로 나타났다(Table 5).

피부의 기계적 성질은 신체의 위치와 대상의 연령에 따라 달라지므로(Pittar et al., 2018) 본 연구에서는 연령 그룹간의 유 의차가 있는 부위를 확인하였다. 연령 그룹의 유의차가 발생한 2개 부위의 경우 경도의 차이가 턱 아래점은 18~21이며, 헬릭스는 33.1~38.6으로 차이가 작은 것으로 확인되었다. 따라서, 마스크 평가용 로보틱 헤드폼의 개발 연령 그룹에 대한 개별 제작은 고려하지 않아도 될것으로 사료된다.

Table 5. Group means of face areas showing a significant age effect in the mixed-effects ANOVA of skin rigiditys

	20s'	30s'	40s'	50s'	F	P	
Submandibular (15~25)	18.0	19.5	18.1	21.2	2.84	0.005	**
	B	AB	B	A			
Helix (20~40)	38.6	33.6	36.6	33.1	2.95	0.044	*
	A	B	AB	B			

Mixed effect ANOVA: * $p < .01$, ** $p < .005$, *** $p < .001$
Fisher LSD Grouping: A>B

Table 6. Group means of face areas showing a significant interaction effect of gender and age in the mixed-effects ANOVA of skin rigidity

	Male				Female				F	P	
	20s'	30s'	40s'	50s'	20s'	30s'	40s'	50s'			
Sellion	31.1	27.0	33.4	28.4	31.9	40.5	32.2	34.9	5.31	0.004	**
	BCD	D	BC	CD	BCD	AB	BCD	A			
Center of cheek	18.9	21.1	23.3	20.0	21.8	20.7	19.5	20.4	4.32	0.010	*
	C	ABC	A	BC	AB	ABC	BC	BC			

Mixed effect ANOVA: * $p < .01$, ** $p < .005$, *** $p < .001$

Fisher LSD Grouping: A>B>C>D

성별과 연령 두 변수의 교호작용으로 그룹별 측정값의 유의차가 발견되는 치수는 “코 뿌리 점, 코 중앙 점”의 2개 부위로 확인되었다. 코 뿌리 점의 경도는 30대 여성이 가장 높고 볼 중앙의 경도는 40대 남성이 가장 높은 것으로 나타났다.

성별과 연령 두 변수의 교호작용으로 그룹별 측정값의 유의차가 발견된 코 뿌리 점과 코 중앙 점에 대한 치수 차이에 대한 검증은 추후 피험자 수를 확대한 추가 실험을 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

마스크 밀착감과 누설률 평가용 얼굴 로봇 헤드폼 외피는 마스크 밀착도와 누설률에 대한 정확한 성능 평가를 위해 인간의 피부와 유사한 경도로 제작되어야 한다. 본 연구에서는 얼굴 부위별 상이한 경도를 적용한 헤드폼 제작을 위해 얼굴 부위별 경도 측정 프로토콜을 수립하고 반복 평가를 통해 신뢰성 있는 안면부 경도 측정을 진행하였으며, 얼굴 로봇 헤드폼의 표피 제작에 필요한 부위별 경도 기준을 수립하였다. 경도 측정은 피험자를 누운 자세에서 피부를 평평하게 유지하고 부위별 피부 경도를 5회 반복 측정 후 평균값을 도출하였으며, 장비의 반복 측정 정확성 검증을 위해 변동계수를 분석하였다. Dellalana et al., (2019)은 연구에서 경도 측정 시 누운 자세와 반복측정을 진행하여 장비의 정확성을 확보하였다.

본 연구에서는 인간의 피부 경도를 객관적으로 측정할 수 있는 측정 프로토콜 기준을 수립하였다. 얼굴은 다양한 곡선 형태와 요철이 있는 각으로 이루어져 있어 경도 측정 시 경도계의 수직 및 수평의 유지 및 반복 측정 시 일정한 범위 내의 변동을 유지가 중요하다. 사람의 피부 경도를 측정하는 데 사용되는 장비는 정확하고 재현 및 반복 측정할 수 있어야 하며, 검사는 신속하고 측정이 용이해야 한다(Rosicka et al., 2020). 본 연구에서는 경도계(Duro meter RX-1600-OO, Rex Gauge Company, USA)를 이용하여 피부 경도 측정의 유용성이 입증된 정량적 측정 방법을 사용하였다(Merkel et al., 2008). 경도 측정은 곡선 형태의 얼굴 피부 표면과 수직 및 수평을 유지해야 함으로써 경도계 상단에 X, Y, Z축을 기준으로 버블 미터 3개를 부착하여 진행하였으며, 물성별 사진 경도 평가를 통해 경도 측정 방법을 숙지하고 반복 측정을 진행하였다. 측정 테

이터 컨트롤은 경도가 10~70 Shore OO 범위인 10개 실리콘 시편(L: 65 mm × W: 65 mm × D: 8~12 mm)을 5회 반복 측정하여 변동을 범위를 확인한 후 피험자 3명을 대상으로 사전 경도 평가를 진행하여 측정자의 변동을 범위 기준 0.4~4.2(±5)로 설정하였다. 본 연구에서는 경도값의 신뢰성 확보를 위해 13개 부위별 반복 측정하여 경도값의 평균 측정 오차가 무시할 수 있는 정도(≤ 1.0)의 차이로 입증되었다.

본 연구에서의 얼굴 부위별 경도 측정 프로토콜과 측정 결과는 안면부 로보틱 헤드폼 제작 시 피부 부위별 경도 적용 기준을 제시하였다. 경도 측정 프로토콜은 안면부 이외의 다른 신체 부위의 경도 측정에 활용이 가능하며, 부위별 경도 측정 범위에 대한 기준을 제공할 수 있다. Pittar et al.(2018)는 경도계를 활용하여 두피 부위별 경도를 측정하였으며, Merkel et al.(2008) 피부 경피증 환자를 대상으로 3개 부위(앞 팔, 허벅지, 종아리)의 경도를 측정하여 결과를 비교하였다.

본 연구는 얼굴 부위별 경도 측정 프로토콜을 수립하고 한국인 20~50세의 남녀 40명에 대한 평가 결과를 기준으로 부위별 경도 범위를 제시하였으나, 인종별, 연령별, 성별에 대한 고려는 포함되지 않았다는 한계가 있다. 피부 경도는 인종별, 연령별, 성별에 따라 상이하게 나타나므로 다양한 피험자를 대상으로 한 얼굴 피부 경도에 대한 평가가 필요하다. 마스크에 대한 QNFT 밀착도 연구에서 아시아인들의 실패율이 16.3%로 가장 높게 나타났다(Ahmad et al., 2010; Wikinson et al., 2010). 이는 인종별 다른 얼굴 형상에 기인한 것으로 밀착도 검사 시 인종별 얼굴 형상의 중요성이 확인된 결과이다.

우리나라 어린이 피험자는 윤리적인 문제로 마스크 평가가 불가하여 성인을 대상으로 한 실험이 진행되고 있지만 실제 많은 수의 어린이가 보건용 마스크를 사용하고 있어 추후 어린이용 안면부 로보틱 헤드폼 개발이 필요하다. 어린이용 안면부 로보틱 헤드폼의 개발 시 본 연구에서 제안한 프로토콜을 기반으로 어린이 얼굴 경도를 측정하고 제작 경도 기준을 제안할 수 있다. 어린이나 노인, 여성은 성인 남성보다 낮은 경도를 보이며, 이는 진피조직의 차이가 아니라 피부 두께가 상이한 결과로 추측된다(Aghassi et al., 1995). 어린이 안면부 피부 경도를 적용한 로보틱 헤드폼 개발은 어린이 보건용 마스크에 대한 밀착감 및 누설률 평가 수행을 가능케 함으로써 어린이의 마스크 착용성 향상에 도움을 줄 것으로 사료된다. 추후 얼굴

부위별 경도를 적용한 로봇틱 헤드폼을 제작하고 보건용 마스크를 대상으로 밀착도 및 누설률 평가를 진행하여 성능에 대한 비교 검증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업(2022R1A2C1013198)과 식품의약품안전처의 재원으로 ‘의약외품 품질관리 체계 개선을 위한 기술 개발’ (과제고유번호 : 21172화의안172) 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- Ahmad J., Pisaniello, D., & Wilkinson, I. J. (2010). Organizational issues in implementation of a large-scale, quantitative respirator fit-testing program. *Infect Control Hosp Epidemiol*, *31*(9), 971-972. doi:10.1086/655836
- Aghassi, D., Monoson, T., & Braverman, I. (1995). Reproducible measurements to quantify cutaneous involvement in scleroderma. *Archives of dermatology*, *131*(10), 1160-1166.
- Bergman, M. S., He, X., Joseph, M. E., Zhuang, Z., Heimbuch, B. K., Shaffer, R. E., Choe, M., & Wander, J. D. (2015). Correlation of respirator fit measured on human subjects and a static advanced headform. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, *12*(3), 163-171. doi:10.1080/15459624.2014.957832
- Choh, C., Wall, M., Brown, M., Nicolson, A., & Simms, M. (2010). Use of durometry in assessment of venous disease. *Phlebology*, *25*, 94-99. doi:10.1258/phleb.2009.008088
- Cuaderes, E., Khan, M. M., Azzarello, J., & Lamb, W. L. (2009). Reliability and limitations of the durometer and pressurestat to measure plantar foot characteristics in native Americans with diabetes. *Journal of Nursing Measurement*, *17*(1), 3-18. doi:10.1891/1061-3749.17.1.3
- Dellalana, L., Chen, F., Vain, A., Gandelman, J., Pöldemaa, M., Chen, H., & Tkaczyk, E. (2019). Reproducibility of the durometer and myoton devices for skin stiffness measurement in healthy subjects. *Skin Research Technology*, *25*(3), 289-293. doi:10.1111/srt.12646
- EcoFlex (2023, March 4). *HYUP SHIN Co*. Retrieved March 4, 2023, from https://www.hyup-shin.co.kr/product/detail.html?product_no=2060&cate_no=156&display_group=1
- Falanga, V., & Bucalo, B. (1993). Use of a durometer to assess skin hardness. *Journal of American Academy of Dermatology*, *29*, 47-51.
- ISO (2016A). ISO 16900-5 Respiratory protective devices - Methods of test and test equipment – Part 5: Test equipment – Breathing machine, metabolic simulator, RPD headforms/torso, tools and transfer standards, International Organization for Standardization (ISO).
- Korean Agency for Technology and Standards. (2015). *The 7th Size Korea 3D scan & measurement technology report*. Seoul: Government Printing Office.
- Lim, H., & Chung, K. (2002). Measurement of skin hardness with durometer in normal Korean individuals. *Journal of Korean Dermatological Association*, *40*(1), 19-24.
- Lore, M. B., Heimbuch, B. K., Brown, T. L., Wander, J. D., & Hinrichs, S. H. (2012). Effectiveness of three decontamination treatments against influenza virus applied to filtering facepiece respirators. *Annals Work Exposures and Health*, *56*(1), 92-101. doi:10.1093/annhyg/mer054
- McMahon, E., Wada, K., & Dufresne, A. (2008). Implementing fit testing for N95 filtering facepiece respirators - Practical information from a large cohort of hospital workers. *American Journal of Infection Control*, *36*, 298-300. doi:10.1016/j.ajic.2007.10.014
- Merkel, P., Silliman, P., Denton, C., Furst, D., Khanna, D., Emery, P., Hsu, V., Streisand, J., Polisson, P., Akesson, A., Coppock, J., Van Den Hoogen, F., Herrick, A., Mayes, D., Veale, D., Seibold, J., Black, C., & Korn, J. (2008). Validity, reliability, and feasibility of durometer measurements of scleroderma skin disease in a multicentre treatment trial. *Arthritis Care & Research*, *59*(5), 699-705. doi:10.1002/art.23564
- Moon, K., Song, R., Kim, J., Lee, E., Lee, B., & Song, Y. (2012). The correlation between durometer score and modified Rodnan skin score in systemic sclerosis. *Rheumatology International*, *32*, 2465-2470. doi:10.1007/s00296-011-1993-9
- Pittar, N., Winter, T., Falland-Cheung, L., Tong, D., & Waddell, J. N. (2018). Scalp simulation – A novel approach to site-specific biomechanical modeling of the skin. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *77*, 308-313. doi:10.1016/j.jmbm.2017.09.024.
- Rosicka, K., Mierzejewska-Krzyżowska, B., & Mrówczyński, W. (2020). Comparison of different MyotonPRO probes for skin stiffness evaluation in young women. *Original Article*, *28*, 332-338. doi:10.1111/srt.12946
- Wander, J., Hanson, D., & Margolin, R. (2012). Humanlike articulate robotic headform to replace human volunteers in respirator fit testing. *Han Robotics Inc Plano TX*.
- Wiese, A., Berrocal, V., Furst, D., Seibold, J., Merkel, P., Mayes, M., & Khanna, D. (2014). Correlates and responsiveness to change of measurements of skin and musculoskeletal disease in early diffuse systemic sclerosis. *Arthritis Care Research*, *66*, 1731-1739. doi:10.1002/acr.22339.
- Wilkinson, I. J., Pisaniello, D., Ahmad, J., & Edwards, S. (2010). Evaluation of a large-scale quantitative respirator-fit testing program for healthcare workers - Survey results. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, *31*(9), 918-925. doi:10.1086/655460
- Wolff, E., Pal, L., Altun, T., Madankumar, R., Freeman, R., Amin, H., Harman, M., Santoro, N., & Taylor, H. S. (2011). Skin wrinkles and rigidity in early postmenopausal women vary by race/ethnicity: baseline characteristics of the skin ancillary study of the KEEPS trial. *Fertility and Sterility*, *95*(2), 658-662. doi:10.1016/j.fertnstert.2010.09.025
- Zhuang, Z., Benson, S., & Viscusi, D. (2020). Digital 3-D headforms with facial features representative of the current US workforce. *Ergonomics*, *53*(5), 661-671. doi:10.1080/00140130903581656

(Received April 10, 2023; 1st Revised April 18, 2023; 2nd Revised April 21, 2023; Accepted April 26, 2023)