

Facial Anthropometric Surveys and Respiratory Design: A Literature Review and Future Works

Wonsup Lee¹, Daehan Jung², Seikwon Park³, Hee-Eun Kim⁴, and Heecheon You¹

¹Department of Industrial Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Air Force Academy, Cheongwon, Korea

³Department of Systems Engineering, Air Force Academy, Cheongwon, Korea

⁴Department of Clothing & Textiles, Kyungpook National University, Daegu, Korea

ABSTRACT

Objective: 본 연구는 인간공학적 호흡기(respirator) 형상 설계에 관한 기존의 안면 특성 분석 및 호흡기 설계 연구들을 검토하고, 호흡기 연구의 현황과 향후 주요 연구 과제들을 제시해보고자 한다. **Background:** 산소마스크나 방독면과 같은 호흡기들은 사용자가 유해 환경에 노출되지 않도록 하기 위해 해당 사용 집단의 안면 특성(예: 안면 크기, 형상)에 적합하게 설계되는 것이 중요하다. 기존 연구들은 직접 측정 및 3D scanning을 통해 파악된 안면 크기 및 형상 특성을 이용하여 호흡기를 설계하고자 하였으나 안면 특성 분석 방법, 설계 방법, 그리고 설계 결과에 대한 평가 측면에서 한계를 보이고 있어 향후 보다 체계적인 연구들이 요구된다. **Method:** 본 연구는 기존 안면 특성 분석 연구들의 review를 통해 (1) 안면 측정(직접 측정과 3차원 측정) 및 안면 특성 분석, (2), 안면 특성 분석 자료의 활용, (3) 안면 특성 기반의 호흡기 설계, 그리고 (4) 개발된 호흡기의 평가(가상 착용 평가 및 인간공학적 착용성 평가) 측면에서의 기존 연구 현황 및 추후 연구 기회들을 파악하였다. **Conclusion:** 본 연구는 안면 특성 분석 및 호흡기 설계에 관한 기존 연구 현황과 향후 연구 기회들을 제시하고 있으며, 이는 향후 인간공학적 호흡기 및 안면 착용 제품 개발에 다양하게 적용될 수 있을 것이다.

Keywords: Facial anthropometry, Respirator design, Literature review

1. Introduction

산소마스크나 방독면과 같은 호흡기들은 사용자가 유해 환경에 노출되지 않도록 하기 위해 해당 사용 집단의 안면 특성(예: 안면 크기, 형상)에 적합하게 설계되는 것이 중요하다. 안면부 형상에 적합한 마스크 설계를 위하여 기존 연구들은 3D 안면 scan data를 이용하는 digital 설계 또는 평가 방법들을 고안하고 있으나 현재까지는 객관적 설계 기준 및 평가 기준이 제시되지 못하고 있다. 마스크 설계에 관한 기존 연구들(Gross et al., 1997; Han and Choi, 2003; Song and Yang, 2010)은 각 연구에서 파악한 대표안면모델(representative face model)을 이용하여 마스크의 형상을 설계하는 방법을 제시하였다. 하지만 기존 방법들은 3차원 안면 형상들에 기반하여 마스크를 설계하는 일련의 설계 절차를 구체적으로는 제시하지 못하였으며, 기존 연구들에서 제시된 대표안면모델 기반 마스크가 마스크 사용 집단 다수에

적합한가에 대한 체계적인 평가가 미흡하다. 한편, Butler (2009)와 Dai et al. (2011) 등은 상용화된 유한 요소 모델링(finite element modeling, FEM) 시스템(예: LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation, USA)을 이용하여 3D scan된 안면과 마스크 간의 밀착 및 압박도를 simulation하는 방법을 제시하였다. 기존 연구들은 FEM 시스템을 이용하여 3차원 상에서 안면과 마스크를 밀착시킨 후, 안면 부위별 압박 수준을 평가하고 공기의 흐름을 simulation하여 산소 누설을 검토하고자 하였다. 하지만 기존 연구들은 실제 마스크 착용과 유사하도록 3차원 상에서 안면 data와 마스크를 밀착시킬 수 있는 방법을 고려하지 못하였으며, 평가 결과를 토대로 마스크 설계에 적용 가능한 적정 밀착/압박 기준을 제시하지 못하였다.

본 연구는 인간공학적 호흡기(respirator) 형상 설계에 관한 기존의 안면 특성 분석 및 호흡기 설계 연구들을 검토하고, 호흡기 연구의 현황과 향후 주요 연구 과제들을 제시해보고자 한다.

2. Facial Anthropometry and Applications

2.1 Facial anthropometric Survey

안면 측정 연구는 군용 및 산업용 호흡기와 보호구 설계를 목적으로 국내외의 다양한 기관에서 수행되어 왔다. 대규모 인체 치수 조사 사업을 처음 실시한 미국의 경우, 1950년대부터 군용 호흡기 및 보호구(예: helmet, oxygen mask, gas filter mask 등) 개발에 적용하기 위해 머리 및 안면 치수 data를 수집하였다. 미공군(US Air Force)은 1967~1968년 2,420명의 남성을 대상으로 인체 치수(전신 182개 측정 항목 중 안면 측정 항목: 48개)를 수집(Churchill et al., 1977) 하였으며, 이 data는 현행 전투기 조종사 산소마스크인 MBU-12P 설계 시 참고(Alexander et al., 1979)되었을 뿐 아니라 2000년 이후까지 미국의 산업용 호흡기 설계 및 평가에도 활용되었다(Zhuang and Bradtmiller, 2005). 한편, Gordon et al. (1988)은 1987~1988년 미육군(US Army) 8,997명을 대상으로 전신에 대한 132개 측정항목(안면 측정항목: 16개)을 수집하였으며, 2010~2011년에는 미육군 약 13,000명을 대상으로 2차 치수 조사(ANSUR II)를 수행하여 전신 97개 측정 항목(안면 측정항목: 14개)에 대한 측정 data(직접 측정치와 3D scan data)를 수집하였다(Hotzman et al., 2011).

일반인 대상의 대규모 안면 치수 조사는 주로 산업용 호흡기 및 보호구 개발을 목적으로 2000년도 이후 본격적으로 수행되었다. 최초의 일반인 대상 안면 치수 조사는 산업용 또는 일반인용 호흡기 설계를 목적으로 호주에서 Hughes and Lomaev (1972)에 의해 수행되었으며, 15~80세 남성 538명을 대상으로 8개 항목이 측정되었다. 2000년대 이후, 미국 National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)의 Zhuang and Bradtmiller (2005)는 미국 일반인에 보다 적합한 산업용 호흡기 개발을 위해 일반인 3,997명(남성 2,543명, 여성 1,454명)을 대상으로 19개 안면 측정 항목들을 수집하였다. 중국의 Du et al. (2008)은 일반인 근로자 3,000명(남성 2,026명, 여성 974명)을 대상으로 19개 안면 측정 항목들을 수집하였고, 일본의 Research Institute of Human Engineering for Quality Life (HQL) (2008)은 인체 치수 조사 사업을 통해 6,842명(남성 3,530명, 여성 3,312명)에 대한 17개 안면 측정 항목들을 수집하였다. 국내의 경우, 인체 치수 조사 사업인 Size Korea 사업을 통해 1979년 이후 한국 일반인의 인체 치수 정보들을 수집하고 있다. 가장 최근의 치수 조사 사업은 2010년 한국 일반인 14,016명(남성 7,532명, 여성 6,484명)에 대해 수행되었으며, 그 중 848명(남성 438명, 여성 410명)에 대한 45개의 머리 및 안면 측정 항목들이 3D로 측정되었다(KATS, 2010).

2.2 Comparison of Facial Dimensions

한국인 및 중국인 등의 아시아인(Mongoloid)의 얼굴은 미국인 등의 서양인(Caucasian)에 비해 평균 5~10 mm 정도 넓고 길이는 평균 5~10 mm 정도 짧은 경향이 있다. Kim et al. (2003)은 한국인 측정 data (Han et al., 1997; Kim et al., 2003; KATS, 1998)와 미국인(Brazile et al., 1998; Churchill et al., 1977; Gross and Horstman, 1990; Liao et al., 1982; Oestenstad and Perkins, 1992) 및 호주인(Hughes and Lomaev, 1972) 측정 data를 비교하여 한국인의 얼굴 너비가 서양인(미국인 및 호주인)에 비해 평균 5~10 mm 정도 넓은 것으로 밝혔다. 중국의 Yang et al. (2007)은 측정된 중국인 안면 data(남성 270명, 여성 191명)를 미국인 측정 data들(Gordon et al., 1988; Gross and Horstman, 1990; Liao et al., 1982; Oestenstad and Perkins, 1992; Zhuang and Bradtmiller, 2005)과 비교하여 중국인의 얼굴 너비는 미국인에 비해 평균 3.7~11.5 mm 정도 넓고, 얼굴 길이는 평균 4.1~8.2 mm 정도 짧은 것으로 보고하였다. 중국의 Du et al. (2008) 또한, 측정된 중국인의 얼굴 너비가 미국인 안면 data (Zhuang and Bradtmiller, 2005)에 비해 평균 4.0 mm 넓고, 얼굴 길이는 5.4 mm 짧은 것으로 보고하였다. 한편, Ball et al. (2010)은 Size China 사업을 통해 측정된 중국 일반인 270명(남성 135명, 여성 135명)의 머리 및 안면 3D scan data (Ball, 2009; Ball and Molenbroek, 2008)를 Civilian American and European Surface Anthropometry Resource (CAESAR[®]) data 비교하여 중국인의 머리 두께(head length)가 미국인에 비해 평균 11.0 mm 짧고, 머리 너비(head breadth)는 4.0 mm 넓은 것으로 밝혔다(그림 1 참조).

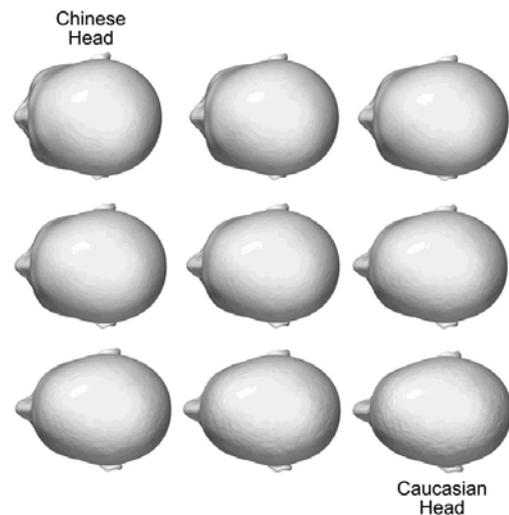


Figure 1. The demonstration of differences between Chinese head and Caucasian head (Ball et al., 2010)

2.3 Facial Anthropometric survey and Analysis Based on 3D Scanning Method

최근 연구들은 머리 및 안면의 3D scan data를 이용하여 치수를 측정하거나 형상을 분석하고 있다. 2000년대 이후의 인체 측정 조사는 기존의 직접 측정 방법(traditional direct measurement method)뿐만 아니라 3D scan 측정 방법(3D scan measurement method)을 함께 사용하여 인체 측정 data를 수집하고 있다. 3D scan 측정 방법은 측정 참조점들이 표기된 인체의 3D scanning을 통해 생성된 3D 형상 data 및 측정 참조점들의 3차원 좌표 정보를 이용하여 인체 치수들을 측정하는 방법이다. CAESAR (Harrison and Robinette, 2002)와 Size Japan (HQL, 2008) 등은 head scanner를 이용해 머리 및 안면을 따로 scan하지 않고 전신 3D scanner로 전신과 안면을 함께 scan하였다. 전신용 scanner로 촬영된 안면부위는 data의 detail이 낮고 quality가 좋지 못하기 때문에 이들 조사들은 세부적인 안면 변수들은 측정하지 못하였고 20개 이내의 주요 안면 변수만을 측정할 수 있었다. Size Korea (KATS, 2010)는 3D 전신 측정과 별개로 head scanner를 사용하여 품질이 높은 머리 및 안면 3D data와 45개의 세부적인 안면 치수들을 수집하였으며, Size China (Ball and Molenbroek, 2008)는 headform 제작을 위해 머리 및 안면만을 3D scan하였다. 한편, Zhuang et al. (2010)는 Zhuang and Bradtmiller (2005)의 연구에서 측정된 미국인 1,013명의 3D head scan data 중에서 대표 얼굴 크기에 근접한 사람을 추출한 후, Polyworks (InnovMETRIC™, Canada)를 이용하여 해당 3D data를 가공(예: 수염 및 머리카락 제거, smoothing, 대표 안면 크기에 부합하도록 치수 조절, 입술 및 귀를 피측정자들의 평균 위치에 배치 등)함으로써 5개 대표 형상(headform)을 제안하였다(그림 2 참조). Luximon et al. (2012)은 3D head scan data를 구성하는 6,000개 정도의 점들(vertices)과 안면 측정 data를 기반으로 PCA를 수행하여 4가지의 3D 대표 머리 및 안면 형상들을 파악하였다(그림 3 참조).

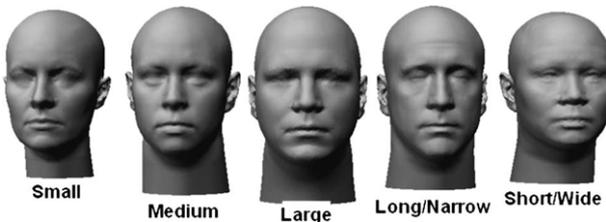


Figure 2. Five digital 3D headforms representing the five face size categories for the US workforce (Zhuang et al., 2010)

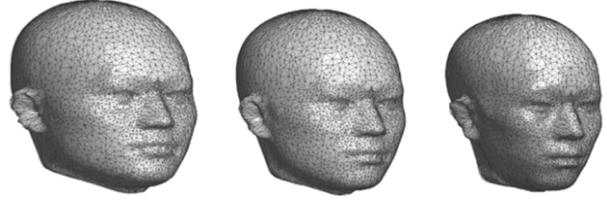


Figure 3. Illustration of representative 3D head shapes of male Chinese derived by PCA (Luximon et al., 2012)

3. Respirator Design Methods Based on 2D & 3D Facial Characteristics

기존 연구들은 안면 치수와 호흡구 치수 간의 연관관계 분석을 기반으로 호흡구 치수 결정에 필요한 연관 안면 치수들을 제시하였으나, 최근 연구들은 3D face data를 이용하여 호흡구의 치수를 결정하는 방법들을 제안하고 있다. 기존 연구들(Brazile et al., 1998; Gross and Horstman, 1990; Hack et al., 1973; Han and Choi, 2003; Liau et al., 1982; Oestenstad et al., 1990; Oestenstad and Perkins, 1992; Zhuang et al., 2005)은 호흡구의 밀착도에 영향을 미치는 안면 치수들(예: face length, face width, nose length, lip width 등)을 제안하였으나 연구 방법과 연구에 사용한 호흡구의 종류에 따라 서로 다른 결과를 제시하고 있다. 초기 연구들은 반면 호흡구 설계에 있어 lip width가 중요하다고 밝혔으나, 1990년 이후 연구들은 lip width보다는 코 관련 부위(예: nose width, nose protrusion, nasal root breadth)가 중요한 것으로 제시하였다. 한편, 최근 연구들(Godil, 2009; Kim, et al., 2003; Luximon et al., 2012; Song and Yang, 2010; Yang and Shen, 2008; Zhuang et al., 2010; Zhuang, et al., 2010)은 1차원의 안면 치수들만으로 3차원 안면 형상에 적합한 호흡구를 설계하는 데에는 한계가 있음을 지적하고 호흡구 설계 시 3차원 안면 scan data를 이용하는 방안을 제시하고자 하였다.

호흡구의 형상 설계 측면에서 기존 연구들은 3차원의 안면 형상을 사용하여 밀착성이 높은 호흡구의 형상을 설계하고자 다양한 노력을 기울였으나 체계적인 형상 설계 방법은 제시되지 못하였다. 1960 ~ 1980년대까지 설계된 군용 및 산업용 호흡구들의 형상은 주로 2차원 측정치에 기반한 정성적이고 경험적인 방법에 의해 설계되었으며 체계적인 형상 설계 기법은 소개되지 못하였다. 이러한 초기의 호흡구 형상에 대해 사용자들은 착용성(fitness) 측면에서 개선을 요구하였으며, 기존 연구들은 안면의 3차원 형상 특성을 기반으로 한 호흡구 형상 설계가 중요함을 인식하였다 (Cobb, 1972; Lovesey, 1974; Piccus et al., 1993; Seeler, 1961; Yatapanage and Post, 1992). 이들 연구들 중 일부는 안면의 3

차원 특성들(예: curvatures of facial surface, facial contours, 3D facial measurements)을 파악하여 호흡구 설계에 반영하고자 하였으나, 1960~1980년대 당시의 3차원 특성 분석 및 적용 기술들(예: 3차원 인체 특성 측정 기술, 3차원 data 처리 기술, 3차원 설계 적용 및 평가 기술 등)의 한계로 체계적인 호흡구 형상 설계 방법은 제시되지 못하였다. 1990년대 이후 3D scan 기술이 발전함에 따라 3D scan을 통해 수집된 3차원 점군 data (point-cloud data)를 이용한 호흡구 형상 설계 방법 및 가상 착용성 평가 방법(virtual fit assessment method) 들도 소개되었다(Butler, 2009; Dai et al., 2011; Gross et al., 1997; Han et al., 2004; Piccus et al., 1993; Song and Yang, 2010; Yatapanage and Post, 1992).

하지만 현재까지의 연구들은 소수의 안면 크기 및 형상 특성만을 호흡구 설계에 반영하였으며, 설계 대상 집단 내 다양한 얼굴 크기 특성 및 3차원 형상 특성들의 총체적인 해석을 기반으로 한 체계적인 호흡구 형상을 설계 방법론을 제시하지 못하고 있다.

3차원 안면 scan data를 이용한 초기 연구 중 하나로 Yatapanage and Post (1992)는 GP-8-3D 3D sonic digitizer (Science Accessories Corp., USA)를 이용하여 남성 72명(21~63세) 안면을 3차원 촬영함으로써 3차원 안면 형상을 구성하는 400개 정도의 point들을 rough하게 파악하였다(그림 4 참조). Yatapanage and Post (1992)는 72명에 대한 3차원 point들의 평균과 분산을 활용하여 등고선 형태의 3차원 안면 형상을 추출하고 이를 토대로 호흡구의 형상을 설계하고자 하였다. Gross et al. (1997)은 US Air Force 안면 측정 data (Churchill et al., 1977)를 기반으로 초기 설계된 공군 전투기 조종사 산소마스크 MBU-20/P를 안면 크기가 다양한 미 공군 조종사 60명(남성 30명, 여성 30명)의 3D 안면 scan data를 활용하여 개선하였다. Gross et al. (1997)은 3D 안면 scan data들로부터 3차원 facial contour 정보를 추출해낸 후, 이를 바탕으로 안면-마스크 밀착 형상 생성에 필요한 마스크 치수별 design landmark를 제시하고, design landmark들을 spline curve로 연결하는 방법으로 안면-마스크 밀착 형상을 생성하였으나 자세한 마스크 형상 설계 방법은 제시하지 않고 있다. 국내의 경우, Han et al. (2004)와 Song and Yang (2010)은 한국인의 안면 크기 및 형상에 적합한 호흡구를 설계하였다. Han et al. (2004)는 한국인 50명의 안면 측정치를 활용하여 3개의 평균 안면 크기(대, 중, 소)를 제시한 후, 이들을 clay model로 제작한 후, clay model을 3D scan하고 안면-마스크 밀착 형상을 추출하여 크기별 호흡구(대, 중, 소) 설계에 활용하였다. Song and Yang (2010)은 Size Korea (KATS, 2004)를 통해 측정된 20~59세 남성 1,536명의 평균 1개 크기의 안면을 clay model로 제작한 후, 3D scan을 통해 얼굴-마스크 밀착 형상을 추출하여 호흡구 설계에 활용하였다. 하지만 Han et al. (2004)와 Song and Yang (2010)은 안면 크기와 형상

특성 분석 및 호흡구 설계에 다양한 형상의 3D 안면 scan data들을 직접 활용하지는 못하였으며, clay model도 일부 안면 측정치를 기반으로 정성적이고 경험적인 방법에 의해 제작되었다는 한계가 있다.

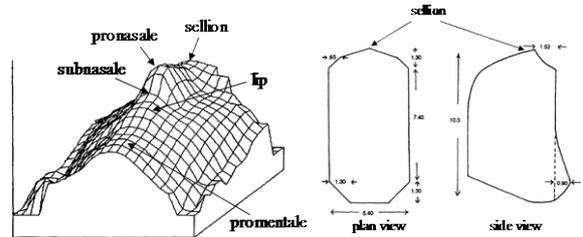


Figure 4. Respirator design based on 3D scan data proposed by Yatapanage and Post (1992)

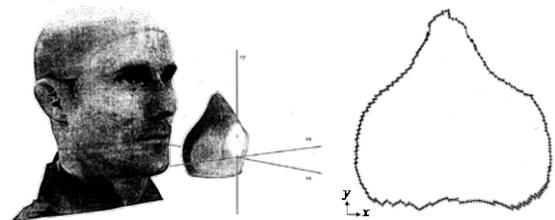


Figure 5. Respirator design based on design landmarks (Gross et al., 1997)

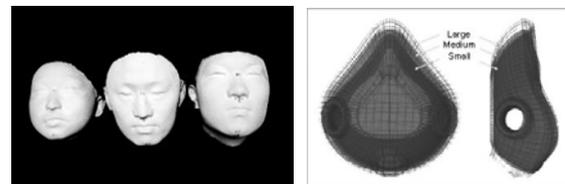


Figure 6. Respirator design based on clay models of representative faces (Han et al., 2004)

4. Respirator Fit Test

실험 기반의 호흡구 밀착성 평가(fit test)는 평가 방법에 따라 정성적 방법과 정량적 방법으로 구분되며, 주로 외부 공기의 호흡구 내 침투 여부를 분석하기 위해 사용되고 있다. 외부 유해 물질 차단(filtering)해주거나 공기를 정화(air-purifying)해주는 가스 마스크, 방진 마스크, 화학물질 필터 마스크 등은 유해 물질 침투를 방지하기 위해 호흡구의 안면 밀착성이 매우 중요하다(Han and Lee, 2005; NIOSH, 1987; Yang et al., 2009). 따라서 미국의 American National Standards Institute (ANSI), Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 그리고 National Institute for

Occupational Safety and Health (NIOSH) 등은 밀착성 평가 결과에 기반하여 정량적인 산업용 호흡구 양산 인증 기준을 제시하고 있다(Han et al., 1997). Kolar et al. (1982), Han et al. (1997), 그리고 Coffey et al. (2002) 등에 따르면 기존 연구들은 호흡구 밀착성 평가를 위해 다양한 정성적 혹은 정량적 방법들을 제시하고 있다. 정성적 평가 방법은 주로 외부 공기 중에 비산된 측정 물질(예: isoamyl acetate, sodium ascharin, irritant fume)을 실험참여자가 주관적으로 감지하는지 여부를 평가한다. 정량적 평가는 특수한 장비를 사용하여 수행되는데, 특정 에어로졸(aerosol)이 비산된 공간에서 일정 시간 후 호흡구 내부의 에어로졸 농도를 측정하여 공기 침투 여부를 파악하는 방법들(예: flame photometric aerosol measurement, condensation nuclei count, particle penetration)과 호흡구 내의 공기의 흐름 및 공기의 압력 측정에 기반한 공기의 누설 및 침투 측정 방법들(예: leak flow measurement, leak and cartridge flow measurement)이 제시되었다. 한편, 기존의 실험 기반의 밀착성 평가 방법들은 호흡구 내부로의 외부 공기 침투나 호흡구 내부 공기의 누설에 대해서만 주로 평가하였으며, 실험 기반의 호흡구의 안면 부위별 정량적 압박 정도 및 정성적 압박감에 대한 연구는 미비하다.

최근 연구들은 호흡구가 안면에 밀착되는 특성(예: 밀착도, 압박도, 간섭, 여유공간)을 가상으로 평가하고 있다. 가상 착의 평가(virtual fit assessment)는 3차원 인체 형상 data와 3차원 제품 형상 data를 가상으로 착의 또는 밀착한 후, 인체와 제품 간의 밀착도, 압박도, 또는 간섭 등을 simulation하는 평가 방법이다(Ashdown et al., 2004; Bye and McKinney, 2010; Meunier et al., 2000). 가상 착의 방법은 주로 인체에 착용되는 제품(예: 의복, 신발, 헬멧, 호흡구 등에 적용되었으며, 기존 제품의 3D scan data를 이용하여 착의성을 평가하거나 새로운 제품의 설계 단계에서 도면(CAD)을 이용하여 설계 효과를 분석하기 위해 활용되고 있다. 최근의 호흡구 가상 착의 평가 연구들은 finite element method (FEM)를 응용하여 압박도를 평가하고 있다(Butler, 2009; Dai et al., 2011; Yang et al., 2009). FEM 기반 연구는 3차원 안면 data와 3차원 호흡구 data를 구성하는 point들 간의 interface 되는 특성을 이용하여 밀착도 또는 압박도를 정량화하고 있다. Bitterman (1991)과 Piccione and Moyer Jr. (1997)이 수행한 초기의 FEM 기반 fit assessment 연구들은 3D 안면 및 마스크 scan data를 alignment한 후, 피부 및 마스크의 변형(deformation) 정도를 고려하여 3D 안면과 3D 마스크 간의 간격 및 간섭(interference) 정도를 파악함으로써 마스크의 밀착도 또는 압박도를 정량적으로 파악하고자 하였다.(그림 7 참조) 당시 3D scan 기술이 발달하지 못하여 3D scan data가 정교하지 못하였으며 다양한 안면 크기 및 형상에 대해 분석되지 못하는 못하였지만, 정량적인 착용 특성을 체계적으로

파악하고 설계에 반영하기 위한 일련의 방법론을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

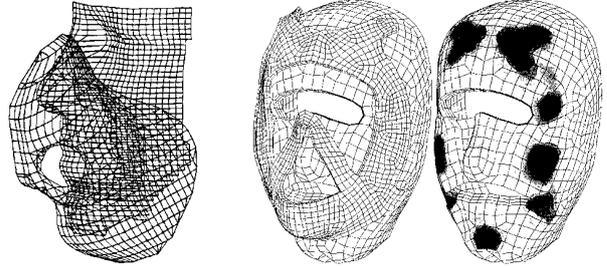


Figure 7. Illustration of early studies which conduct virtual mask fit assessment based on finite element method (Bitterman, 1991 and Piccione and Moyer Jr., 1997)

최근에는 3D scan 기술 및 FEM 기반의 분석 시스템이 발전함에 따라 보다 많은 양의 point들로 구성된 정교한 3D 안면 및 호흡구 data를 이용하여 다양한 분석이 가능해졌으나 아직까지 FEM 분석 결과에 기반한 체계적인 호흡구 설계 방법은 제시되지 못하고 있다. Butler (2009)와 Dai et al. (2011)은 상업용 FEM simulation software를 이용하여 호흡구의 재질과 안면 피부의 특성을 세부적으로 고려한 착용성(예: 밀착도, 압박도, 산소누설, 공기의 흐름 등) 평가 방법을 제시하였다. Butler (2009)는 CFD-ACE+와 CFD-GEOM (ESI Group, France)이라는 FEM software를 기반으로 호흡구 faceseal의 재질 특성과 안면 부위별 피부 탄력 특성을 고려하여 가상 착의 평가를 수행하였다(그림 8 참조). 평가를 통해 안면 부위별 압박 및 밀착 정도가 정량적으로 산출되었으며, 그 밖에도 호흡 과정을 simulation함으로써 호흡구 내부의 공기 흐름(interior flow field)이나 공기 누설(outward leak)과 같은 유체역학적 분석도 수행할 수 있었다. Yang et al. (2009)과 Dai et al. (2011)은 LS-DYNA (Livermore Software Technology Corp., USA) software를 사용하여 다양한 조건(예: 호흡구 착용 힘, 호흡구에 부착된 strap의 위치와 각도, 마스크 재질 및 마찰계수 등)에 있어서의 호흡구의 밀착도 차이를 정량적으로 분석하였다(그림 9 참조). 하지만 현재까지의 연구들은 안면에 가장 적합한 압박/밀착 범위를 정량적으로 제시하지는 못하였는데, 이는 실제 사용자를 대상으로 한 주관적 및 객관적 착용성 실험을 통해 검증될 수 있다. 또한, 호흡구를 안면에 가상 착의하는 방법(예: 착용 위치, 착용 힘) 수립, 다양한 크기 및 형상의 3D 안면 data에 대한 호흡구 밀착 특성 분석, 그리고 가상 착의 평가 결과의 호흡구 설계 적용 등에 대해서도 지속적인 연구가 필요하다.

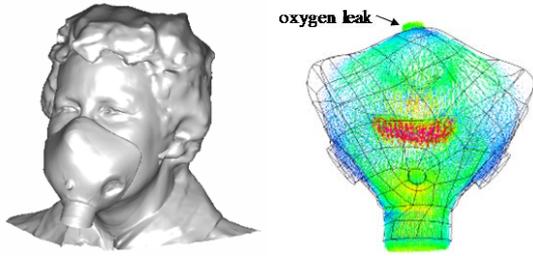


Figure 8. Example of virtual fit assessment conducted by Butler (2009)

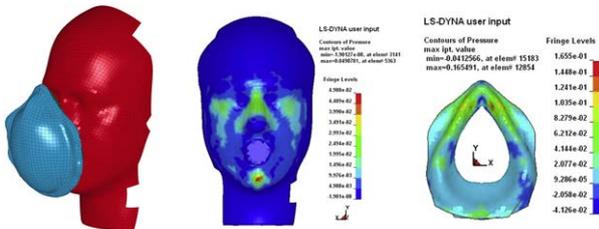


Figure 9. Example of virtual fit assessment conducted by Dai et al. (2011)

5. Discussion

기존 인체 측정 조사에서 수집된 3차원 안면 scan data 들 기반의 안면 착용 제품 설계 적용을 위한 제품 설계 방법론 개발이 필요하다. CAESAR®, Size Korea, Size China 등의 인체 측정 조사 사업에서 대규모의 3차원 안면 scan data 들이 측정되었으나 현재까지 안면 착용 제품(예: 산소마스크, 필터마스크, 방독면, 보호안경, 귀마개, 헬멧 등)에 다양하게 활용되지 못하고 있다. 그 이유는 안면, 제품, 그리고 안면과 제품 간의 interface (face-product interface; FPI) 측면에서의 세부적인 분석 방법과 FPI 분석을 통한 제품 설계 전략 및 제품 설계 아이디어 도출 방법 등이 부재하기 때문이다. 따라서 FPI 측면을 고려하여 3차원 안면 scan data에서 추출된 3차원 치수 및 형상 profile뿐만 아니라 제품의 설계 특성, 제품 사용 및 착용 특성, 그리고 사용자 선호도 특성 등이 함께 고려된 체계적인 안면 착용 제품 설계 방법이 제시될 필요가 있다.

안면 크기와 형상이 다양한 설계 대상 인구 다수의 3차원 안면 data들을 이용한 제품 설계 기법이 개발이 필요하다. 일부 기존 연구들은 3차원 scan data로부터 대표 안면 모델(representative face models)을 선정한 후, 이들을 제품 설계에 활용하고자 하였다(Han et al., 2004; Luximon et al., 2012; Zhuang et al., 2010). 하지만 대표 안면 모델만을 사용하여 제작된 제품이 설계 대상 인구 다수에 적합하지 않을 수 있으므로 3차원 scan된 다양한 안면 크기 및 형상 data들을

제품 설계에 모두 적용하는 것이 바람직하다. 따라서 다양한 3차원 scan data들을 사용한 digital 제품 설계 방법 개발이 필요하다.

개발된 호흡구는 제품 사용 집단 다수에 대해 설계 적합성이 평가될 필요가 있다. 기존 호흡구 설계 연구들은 개발된 호흡구의 형상이 호흡구 사용자 집단 다수에 대해 적합하게 설계되었는지 주관적 및 객관적 측면에서 검증이 부족하였다. 하지만 3차원 대표 안면 모델을 기반으로 설계된 호흡구가 다른 사용자들에게도 적합한지 검증될 필요가 있다. 착용성의 검증은 주관적인 선호도뿐만 아니라 밀착성 및 압박도 측면에서의 객관적인 측정을 통해서도 평가되고 분석될 필요가 있다. 하지만 기존에는 압박감을 정량적으로 측정 평가할 수 있는 실험적 방법이 부재하므로 압박도 평가 방법의 마련이 필요한데, Prescale pressure indicating film (Fujifilm, Japan) 등이 압박도 평가에 사용될 수 있을 것이다. 한편, 최근 FEM software를 사용한 연구들 (Butler, 2009; Dai et al., 2011)에서처럼 가상으로 다양한 크기와 형상의 3D 안면 data들에 호흡구를 착의하며 밀착도, 압박도, 산소누설 등을 simulation하는 방법을 적용하면 시제품 제작 전에 호흡구의 설계 적합성을 다양하게 평가해가며 설계 형상을 수정하는 것이 용이할 것이다. 평가된 결과는 호흡구의 형상 설계 방법 개선 및 최종 형상의 설계 수정에 반영될 수 있다.

Acknowledgements

This work was supported by an Air Force Logistics Command grant funded by the Republic of Korea Air Force.

References

- Alexander, M., McConville, J. T., and Tebbetts, I. (1979). Anthropometric Sizing, Fit-Testing, and Evaluation of the MBU-12/P Oral-Nasal Oxygen Mask. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Aerospace Medical Research Laboratory.
- Ashdown, S. P., Loker, S., Schoenfelder, K., and Lyman-Clarke, L. (2004). Using 3D Scans for Fit Analysis. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 4(1), 1-12.
- Ball, R. M. (2009). 3-D design tools from the SizeChina project. *Ergonomics in Design*, 17(3), 8-13.
- Ball, R. M., and Molenbroek, J. F. M. (2008). Measuring Chinese heads and faces. In *Proceeding of the 9th International Congress of Physiological Anthropology, Human Diversity: Design for Life*, Delft, The Netherlands.
- Ball, R. M., Shu, C., Xi, P. C., Rioux, M., Luximon, Y., and Molenbroek, J. F. M.

- (2010). A comparison between Chinese and Caucasian head shapes. *Applied Ergonomics*, 41(6), 832-839.
- Bitterman, B. H. (1991). Application of Finite Element Modeling and Analysis to the Design of Positive Pressure Oxygen Masks. Wright-Patterson Air Force Base, OH: The Air Force Institute of Technology.
- Brazile, W. J., Buchan, R. M., Sandfort, D. R., Melvin, W., Johnson, J. A., and Charney, M. (1998). Respirator fit and facial dimensions of two minority groups *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 13(4), 233-237.
- Butler, K. M. (2009). Using 3D head and respirator shapes to analyze respirator fit. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI 2009)*, LNCS 5620, San Diego, CA.
- Bye, E., and McKinney, E. (2010). Fit analysis using live and 3D scan models. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 22(2/3), 88-100.
- Churchill, E., Kikta, P., and Churchill, T. (1977). The AMRL Anthropometric Data Bank Library: Volumes I-V. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Aerospace Medical Research Laboratory.
- Cobb, J. (1972). A Projected Grid Method for Recording the Shape of the Human Face. Farnborough, UK: Procurement Executive, Ministry of Defence, UK.
- Coffey, C. C., Lawrence, R. B., and Myers, W. R. (2002). Comparison of five methods for fit testing N95 filtering-facepiece respirator. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 17(10), 723-730.
- Dai, J. C., Yang, J. Z., and Zhuang, Z. Q. (2011). Sensitivity analysis of important parameters affecting contact pressure between a respirator and a headform. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(3), 268-279.
- Du, L. L., Zhuang, Z., Guan, H. Y., Xing, J. C., Tang, X. Z., Wang, L. M., . . . Chen, W. H. (2008). Head-and-Face Anthropometric Survey of Chinese Workers. *Annals of Occupational Hygiene*, 52(8), 773-782.
- Godil, A. (2009). Facial Shape Analysis and Sizing System. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI 2009)*, LNCS 5620, San Diego, CA.
- Gordon, C. C., Bradtmiller, B., Churchill, T., Clauser, C. E., McConville, J. T., Tebbetts, I. O., and Walker, R. A. (1988). 1978-1988 Anthropometric Survey of US Army Personnel: Methods and Summary Statistics. Natick, MA: US Army Natick Research, Development and Engineering Center.
- Gross, M. E., Taylor, S. E., Mountjoy, D. N., and Hoffmeister, J. (1997). Anthropometric research on the sizing of the MBU-20P. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Human Effectiveness Directorate, Crew System Interface Division.
- Gross, S. F., and Horstman, S. W. (1990). Half-mask respirator selection for a mixed worker group. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 5(4), 229-235.
- Hack, A. L., Hyatt, E. C., Held, B. J., Moore, T. O., Richards, C. P., and McConville, J. T. (1973). Selection of Respirator Test Panels Representative of U.S. Adult Facial Sizes. Los Alamos, NM: Los Alamos Scientific Lab.
- Han, D., and Choi, K. (2003). Facial dimensions and predictors of fit for half-mask respirators in Koreans. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 64(6), 815-822.
- Han, D., and Lee, J. (2005). Evaluation of particulate filtering respirators using inward leakage (IL) or total inward leakage (TIL) Testing - Korean experience. *Annals of Occupational Hygiene*, 49(7), 569-574.
- Han, D., Rhi, J., and Lee, J. (2004). Development of prototypes of half-mask facepieces for Koreans using the 3D digitizing design method: A pilot study. *Annals of Occupational Hygiene*, 48(8), 707-714.
- Han, D., Willeke, K., and Colton, C. E. (1997). Quantitative fit testing techniques and regulations for tight-fitting respirators: Current methods measuring aerosol or air leakage, and new developments. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 58, 219-228.
- Harrison, C. R., and Robinette, K. M. (2002). CAESAR: Summary Statistics for the Adult Population (Ages 18-65) of the United States of America. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Air Force Research Laboratory, Human Effectiveness Directorate, Crew System Interface Division, Air Force Materiel Command.
- Hotzman, J., Gordon, C. C., Bradtmiller, B., Corner, B. D., Mucher, M., Kristensen, S., Paquette, S., and Blackwell, C. L. (2011). Measurer's Handbook: US Army and Marine Corps Anthropometric Surveys, 2010-2011. Natick, MA: US Army Natick Soldier Research, Development and Engineering Center.
- Hughes, J. G., and Lomaev, O. (1972). An anthropometric survey of Australian male facial sizes. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 33(2), 71-78.
- Kim, H., Han, D., Roh, Y., Kim, K., and Park, Y. (2003). Facial anthropometric dimensions of Koreans and their associations with fit of quarter-mask respirators. *Industrial Health*, 41(1), 8-18.
- Kolear, E. S., Cosgrove, D. J., de la Barre, C. M., and Theis, C. F. (1982). Comparison of respirator protection factors measured by two quantitative fit test methods. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 53(11), 1116-1122.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). (1998). The Report on the 4th Size-Korea (Korean Body Measurement and Investigation). Seoul, Korea: Size Korea, Ministry of Knowledge Economy.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). (2010). The Report on the 6th Size-Korea (Korean Body Measurement and Investigation). Seoul, Korea: Size Korea, Ministry of Knowledge Economy.
- Liau, Y. H., Bhattacharya, A., Ayer, H., and Miller, C. (1982). Determinations of critical anthropometric parameters for design of respirators. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 43, 897-899.
- Lovesey, E. J. (1974). The development of a 3-dimensional anthropometric measuring technique. *Applied Ergonomics*, 5(1), 36-41.
- Luximon, Y., Ball, R. M., and Justice, L. (2012). The 3D Chinese head and face modeling. *Computer-Aided Design*, 44(1), 40-47.
- Meunier, P., Tack, D., Ricci, A., Bossi, L., and Angel, H. (2000). Helmet accommodation analysis using 3D laser scanning. *Applied Ergonomics*, 31(4), 361-369.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (1987). Guide to Industrial Respiratory Protection. Washington, DC: Government Printing Office.
- Oestenstad, R. K., Dillion, H. K., and Perkins, L. L. (1990). Distribution of face seal leak sites on a half-mask respirator and their association with facial dimensions. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 51(5), 285-290.
- Oestenstad, R. K., and Perkins, L. L. (1992). An assessment of critical anthropometric dimensions for predicting the fit of a half-mask respirator. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 53(10), 639-644.
- Piccione, D., and Moyer Jr., E. T. (1997). Modeling the interface between a respirator and the human face. Aberdeen Proving Ground, MD: US Army Research Laboratory, Human Research and Engineering Directorate (HRED).
- Piccus, M. E., Smith, G. A., Standley, B. K., Volk, T. L., and Wildes, L. B. (1993). Creation of Prototype Aircrew Protection Equipment Based on Face Anthropometry. Wright-Patterson Air Force Base, OH: The Air Force Institute of Technology.
- Research Institute of Human Engineering for Quality Life (HQL). (2008). Japanese

- Body Size Data Book 2004-2006. Osaka, Japan: Research Institute of Human Engineering for Quality Life.
- Seeler, H. W. (1961). Development of Oral-Nasal Masks, Oxygen, MC-1 and MBU-5/P. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Aeronautical Systems Division, Air Force Systems Command.
- Song, Y., and Yang, W. (2010). Half-mask interface prototype design using Korean face anthropometric data. *Journal of Korea Safety Management and Science*, 12(4), 87-92.
- Yang, J., Dai, J., and Zhuang, Z. (2009). Human head modeling and personal head protective equipment: A literature review. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI 2009)*, LNCS 5620, San Diego, CA.
- Yang, L., and Shen, H. G. (2008). A pilot study on facial anthropometric dimensions of the Chinese population for half-mask respirator design and sizing. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(11-12), 921-926.
- Yang, L., Shen, H. G., and Wu, G. (2007). Racial differences in respirator fit testing: A pilot study of whether American fit panels are representative of Chinese faces. *Annals of Occupational Hygiene*, 51(4), 415-421.
- Yatapanage, K. G., and Post, K. (1992). Measurement of 3-D facial contours for the design of half-face respirators. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 53(1), 19-26.
- Zhuang, Z., Benson, S., and Viscusi, D. J. (2010). Digital 3-D headforms with facial features representative of the current US workforce. *Ergonomics*, 53(5), 661-671.
- Zhuang, Z., and Bradtmiller, B. (2005). Head-and-face anthropometric survey of US respirator users. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2(11), 567-576.
- Zhuang, Z., Coffey, C. C., and Ann, R. B. (2005). The effects of subject characteristics and respirator features on respirator fit. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2(12), 641-649.
- Zhuang, Z., Slice, D. E., Benson, S., Lynch, S., and Viscusi, D. J. (2010). Shape Analysis of 3D Head Scan Data for US Respirator Users. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*.

Author listings

Wonsup Lee: mcury@postech.ac.kr

Highest degree: BS, Industrial and Media Design, Handong University

Position title: PhD student, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic product design, Product shape design based on 3D scanning, 3D human modeling, Engineering design

Daehan Jung: daehanj@afa.ac.kr

Highest degree: PhD, Mechanical Engineering, State University of New York at Buffalo

Position title: Associate Professor, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Air Force Academy

Areas of interest: Fluid dynamics, Turbulence, Computer fluid dynamics

Seikwon Park: parksk@afa.ac.kr

Highest degree: PhD, Industrial Engineering, Pennsylvania State University

Position title: Professor, Department of Systems Engineering, Korea Air Force Academy

Areas of interest: Human factors in aviation and aerospace, Fatigue/Stress modeling & assessment, Human performance & workload assessment, Bio-signal measurement and analysis techniques, Biofeedback training

Hee-Eun Kim: hekim@knu.ac.kr

Highest degree: PhD, Clothing physiology, Nara Women's University, Japan

Position title: Professor, Department of Clothing & Science, Kyungpook National University

Areas of interest: Clothing environment, Clothing pattern & construction, Clothing comfort

Heecheon You: hcyou@postech.ac.kr

Highest degree: PhD, Industrial Engineering, Pennsylvania State University

Position title: Associate Professor, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic product design & development, User interface design & evaluation, Digital human modeling & simulation, Human performance & workload assessment, Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) prevention, Usability testing