

# Development and Validation of a Virtual Fit Assessment Method for Pilot Oxygen Mask Design

Wonsup Lee<sup>1</sup>, Donghoon Son<sup>2</sup>, Daehan Jung<sup>2</sup>, Seikwon Park<sup>3</sup>, Hee-Eun Kim<sup>4</sup>,  
Heecheon You<sup>1</sup>, Minji Yoo<sup>5</sup>, and Chunsik Park<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Air Force Academy, Cheongwon, Korea

<sup>3</sup>Department of Systems Engineering, Air Force Academy, Cheongwon, Korea

<sup>4</sup>Department of Clothing & Textiles, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>5</sup>Air Force Logistics Command, ROKAF, Daegu, Korea

## ABSTRACT

**Objective:** 본 연구는 조종사 산소마스크 개발을 위한 3차원 안면 scan data 기반의 가상 착의 평가(virtual fit assessment) 방법을 개발하여 산소마스크 형상 설계에 적용하고 설계된 형상을 가상 및 실제 환경에서 평가하였다. **Background:** 안전하고 원활한 비행 임무 수행을 위해 조종사 산소마스크는 사용자의 안면 형상에 불편 없이 착용되어야 하지만 미공군의 안면 특성을 기반으로 설계된 현 조종사 산소마스크는 한국인 조종사들의 안면에 적합하지 않아 압박으로 인한 통증이나 산소누설을 유발시키고 있다. **Method:** 본 연구는 한국인 조종사들의 3차원 안면 scan data에 마스크 CAD를 가상 착용하여 안면 부위별 마스크의 밀착/압박도를 평가할 수 있는 가상 착의 평가 방법을 개발하고 한국인 조종사에 적합한 산소마스크 형상 설계 및 평가에 적용하였다. 본 연구는 가상 착의 평가 방법을 이용하여 한국 공군 조종사 121명의 3차원 안면 형상에 적합하도록 산소마스크 형상을 개선하고, 개선된 산소마스크를 시제품으로 개발하여 실제 한국 공군 조종사 20명을 대상으로 설계 개선 효과를 평가(주관적 설문 평가 및 압박도 측정 평가)하였다. **Results:** 가상 착의 평가 방법 기반으로 개선된 산소마스크는 기존 마스크에 비해 밀착/압박도가 평균 27% 개선되었으며, 안면 부위들에 대한 주관적인 선호도가 유의하게( $\alpha = 0.05$ ) 높았다(36 ~ 50%). 또한, 압박도 측면에서 개선 마스크는 기존 마스크에 비해 안면 부위별 균일한 압박도를 보였으며, 과도하게 압박되던 부위의 압박도는 0.6 ~ 0.7배 감소하였고, 밀착이 결여되던 부위의 밀착도는 1.3 ~ 1.7배 향상되었다. **Conclusion:** 가상 착의 평가 방법을 기반으로 설계 개선된 산소마스크는 기존 마스크에 비해 압박 및 밀착도와 주관적 선호도 측면에서 한국 공군 조종사의 안면에 적합한 것으로 파악되었다. **Application:** 가상 착의 평가 방법은 다양한 호흡구(방독면, 산업용 방진마스크 등)와 안면 보호구와 같은 안면 착용 제품들의 형상 설계 유용하게 활용될 수 있다.

Keywords: Pilot oxygen mask, Virtual fit assessment, Respirator design, Ergonomic experiment

## 1. Introduction

조종사 산소마스크는 전투기 조종사들이 안전하고 원활하게 임무를 수행할 수 있도록 지원하는 중요한 장비이나 미국 공군 안면부 data를 기반으로 설계되어 일부 한국 공군 조종사에 맞지 않고 코 부위에 과도한 압박감이나 산소 누설을 발생시키는 것으로 나타났다. 조종사 산소마스크는 조종사의 코와 입을 동시에 덮는 반면형(half-face) 마

스크로서 산소가 희박한 높은 고도에서 임무를 수행하는 조종사에게 지속적이고 안정적인 산소 공급을 도와준다. 또한, 마스크의 내부에는 마이크가 장착되어 조종사가 용이하게 통신할 수 있도록 한다. 하지만 최신 전투기(F-15K, KF-16 등)를 조종하는 한국 공군 조종사들이 착용하는 산소마스크(MBU-20/P)는 Churchill et al. (1977)이 측정 한 미공군의 안면부 측정 자료와 Gross et al. (1997)이 수집 한 미공군 조종사 60명의 3차원 안면 scan data 이용하여 설계되었기 때문에 한국인 조종사의 얼굴에 적합하지 않아

대한민국 공군에서 2006년에 실시한 항공장구의 사용성에 대한 설문조사는 산소마스크가 한국인 조종사들의 콧대 (nasal bridge) 부위에서 과도한 압박 혹은 산소 누설을 유발하는 것으로 보고하고 있다.

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 data 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 한국 공군 조종사의 안면부 특성에 적합한 산소마스크의 설계 개선을 위해 한국 공군 조종사들의 3차원 안면 scan data를 이용한 가상 착의 평가 방법(virtual fit assessment method)을 기반으로 한국인 조종사에 적합한 산소마스크를 개선 설계하고, 설계 개선 효과를 평가하였다. 가상 착의 방법은 3차원 안면 scan data들에 산소마스크 CAD를 가상으로 착의시켜 밀착성 등을 평가하는 방법으로, 본 연구는 가상 착의 평가 방법을 활용하여 한국인 조종사 다수에 적합한 최적의 산소마스크 형상을 설계하였다. 설계 개선된 산소마스크는 밀착/압박도, 주관적 착용감, 그리고 객관적 압박도 측정을 통해 평가되었다.

## 2. Virtual Fit Assessment Method

### 2.1 Virtual Fit Assessment System

본 연구는 3D scan된 안면 data에 현행 또는 개선 마스크의 3D 형상 data를 가상으로 착의하고 착의 특성들(압박/밀착도, 여유공간)을 분석할 수 있는 가상 착의 평가 시스템(virtual fit assessment system)을 개발하여 활용하였다. 본 시스템은 본 연구의 선행 연구(Lee et al., 2012)에서 파악된 산소마스크 착의 위치 및 착의 각도 정보를 활용하여 마스크 3D 형상 data를 3D 안면 data에 일괄적인 방법으로 자동으로 착의한다(그림 1 참조). 본 연구는 다수의 조종사들에게 기존 및 개선 마스크를 각각 가상 착의하고 압박/밀착도 (fitness) 측면에서 기존 마스크 대비 개선 마스크의 설계 개선 효과를 분석하였다. 본 시스템은 Matlab 2008a (The Mathwork, Inc., USA)를 이용하여 개발되었다.



Figure 1. Concept of virtual fit assessment based on 3D facial scan data and oxygen mask CAD

가상 착의 평가 시스템은 마스크가 안면에 가하는 압박/밀착도(fitness)를 평가한다. 압박/밀착도는 가상 착의된 마스크의 facepiece가 3D 안면의 내부로 침투된 정도로서 파악된다. Facepiece는 silicone rubber 재질로서 실제 안면부에 밀착되면서 형상이 변형(deformation)되지만 3D 마스크의 경우는 그림 2와 같이 밀착부위가 3D 안면 내부로 facepiece가 침투된다. 따라서 본 연구는 facepiece가 3D 안면 내부로 침투된 정도를 파악하여 산소마스크의 압박/밀착도를 평가하였다. 가령, facepiece가 안면 내부로 깊이 침투된 부위일수록 압박도가 크며, facepiece가 안면에 접촉하지 않으면 밀착이 결여된다고 해석될 수 있다. 본 연구는 마스크 상단점(mask top point)에서 마스크 하단점(mask bottom point)까지 1 mm 간격으로 facepiece의 침투 깊이를 측정하여 안면 부위별 압박/밀착도를 분석하였다(그림 2 참조).

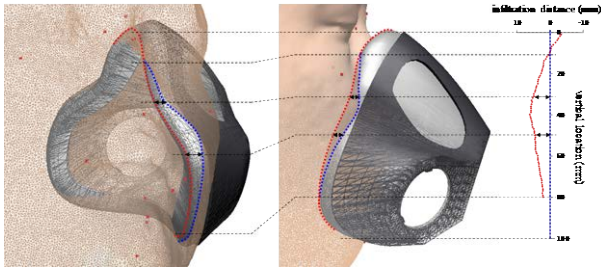


Figure 2. Illustration of fitness analysis

## 2.2 Virtual Fit Assessment Process

본 연구에서 개발된 가상 착의 평가 시스템은 5단계 절차(data loading, adjustment of vertical location, adjustment of horizontal location, adjustment of angle, evaluation of fitness)를 거쳐 3D 안면 data에 마스크 CAD를 가상 착의한다(그림 3 참조). 첫 번째 단계로, 시스템은 3D 안면 data와 3D 마스크 data를 불러들인다. 두 번째 단계로, 선행 연구(Lee et al., 2012)에서 파악된 평균 마스크 착의 위치(예: 마스크상단-코뿌리점 간격, 마스크하단-입술밀합물점 간격)에 최대한 근접하게 위치하도록 마스크의 수직 위치가 조절된다. 세 번째 단계로, 마스크 하단 기준점이 3D 안면 data의 턱 부위에 접촉되도록 마스크의 수평 위치가 조절된다. 네 번째 단계로, 마스크 상단 기준점이 3D 안면 data의 코 부위에 접촉되도록 마스크의 각도가 조절됨으로써 마스크의 초기 위치가 결정된다. 마지막으로, 시스템은 마스크의 초기 위치를 기준으로하여 착의 위치를 상하좌우로 이동(이동 범위:  $\pm 5$  mm, 이동 간격: 1 mm)하고 착의 각도를 조절(조절 범위:  $\pm 5^\circ$ , 조절 간격:  $1^\circ$ )해가면서, 마스크가 평균 착의 위치 및 평균 착의 각도에 최대한 근접하게 가상 착의되는 위치를 최종 최적 위치로 결정한다.

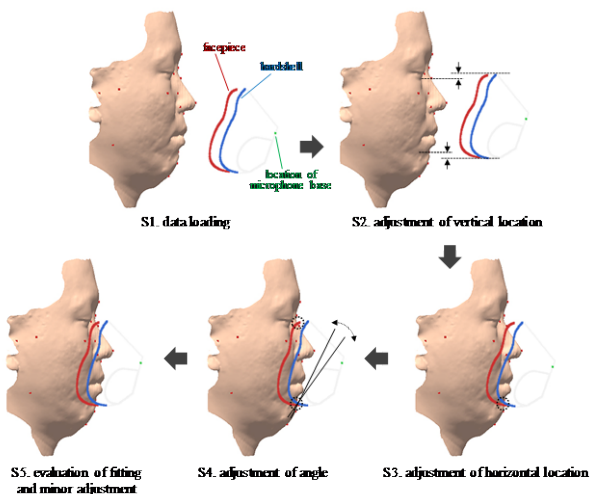


Figure 3. Process for virtual fit assessment

## 2.3 Evaluation of Oxygen Mask Shape and Iterative Design

최적의 마스크 형상은 가상 착의 평가 시스템을 이용하여 설계 대상 인구 집단 다수의 3차원 안면 scan data에 개선 마스크 CAD를 착의 및 평가함으로써 도출되었다. 가상 착의 평가 시스템은 다양한 크기와 형상의 3차원 안면 scan data들에 개선 마스크를 자동으로 착의한 후 압박/밀착도를 평가한다. 본 시스템을 사용한 마스크 형상에 대한 압박/밀착도 평가의 예로, 그림 4a는 기존 마스크에 대한 압박/밀착도를 121명에 대해 평가한 결과를 나타낸다. 현재 기존 마스크에 대한 문제점으로 알려져 있듯이 기존 마스크는 코 옆(nasal side)과 광대뼈(zygomatic bone) 부위에서 과도하게 압박(facepiece의 침투 깊이 > 10 mm)이 되거나 콧대 부위(nasal bridge area)에서 밀착이 결여(침투 깊이 > 0 mm)되는 현상을 보였다. 그림 4b는 본 연구에서 초기 설계 개선된 마스크에 대한 압박/밀착도를 나타내는데, 대부분의 조종사들이 안면 전반 부위에서 밀착이 결여되는 현상을 보여 설계 개선안의 보완이 필요하였다. 본 연구는 이와 같이 설계 보완과 가상 착의 평가를 반복적으로 수행해가며 대다수의 설계 대상 인구(한국인 조종사)에 가장 적합한 마스크 형상을 도출하였다. 이때 설계 적합성은 본 연구가 정한 안면 부위별 infiltration distance의 범위(예: 코 옆의 침투 깊이 = 0 ~ 5 mm)에 따라 평가(Lee et al., 2012)되었다.

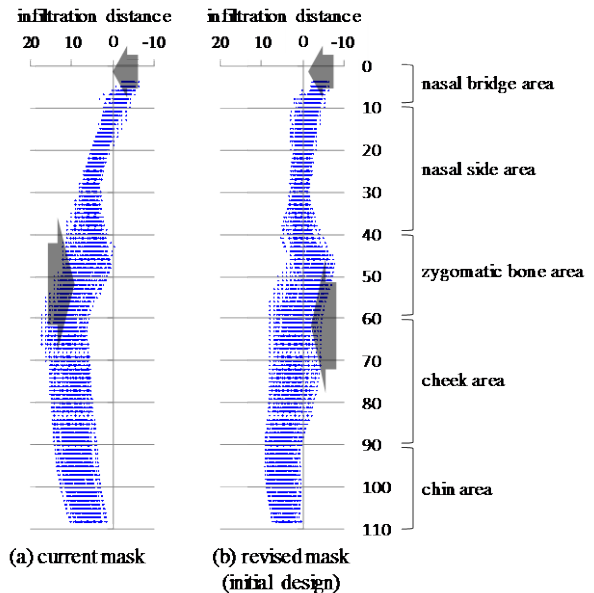


Figure 4. Illustration of fitness analysis for current and revised mask

### 3. Validation of Revised Oxygen Mask

개선된 마스크의 설계 개선 효과는 가상 착의 평가 시스템을 사용한 압박/밀착도 분석과 산소마스크 시제품에 대한 인간공학적 착용성 평가(주관적 선호도, 압박도)를 통해 검증되었다. 압박/밀착도 분석 결과(그림 5 참조), 기존 마스크는 설계 대상 인구의 55.3% (부위별 21~89%)만이 본 연구에서 정한 압박/밀착 기준(붉은 선)에 만족하는 것으로 나타났으나, 최종 개선 설계된 마스크는 설계 대상 인구의 82.3% (부위별 66~92%)가 설계 기준을 만족하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 개발된 가상 착의 평가에 의한 설계 개선 효과는 27% 정도인 것으로 나타났다.

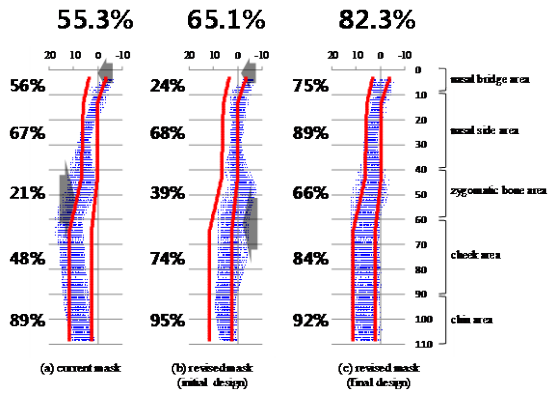


Figure 5. Analysis of design accommodation ratio

본 연구는 설계 개선된 형상을 토대로 기존 마스크와 유사한 재질을 가진 시제품을 제작하여 일부 한국인 공군 조종사들을 대상으로 평가하여 개선 효과를 파악하였다. 평가는 기존 마스크와 개선 마스크에 대한 주관적 착용감 (예: 안면 부위별 불편도, 안면 부위별 산소누설 정도, 전반적 만족도)과 압박 정도에 따라 색이 변하는 film (prescale pressure indicating film, Fujifilm corp., Japan)을 사용한 압박도 평가로 구성되었다(그림 6 참조). 평가 결과, 개선된 형상은 안면 부위들에 대한 주관적인 불편감이 기존 마스크에 비해 낮았으며, 콧대, 코 옆, 광대뼈, 그리고 입술 밑 부위에서 유의한 차이( $\alpha = 0.05$ )를 보였다. 개선 마스크에서 불편감이 해소된 정도는 안면 부위에 따라 기존 마스크의 36~50% 수준이었다(그림 7 참조). 또한, 압박도는 콧대, 코 옆, 뺨, 그리고 입술 밑의 4개 안면 부위에 대해 측정되었다. 압박도 측면에서 개선 마스크는 기존 마스크에 비해 안면 부위별 균일한 압박도를 보였으며, 안면 부위에 따라 과도하게 압박되던 부위의 압박도는 0.6~0.7배 감소하였고, 밀착이 결여되던 부위의 밀착도는 1.3~1.7배 향상되었다(그림 8 참조).

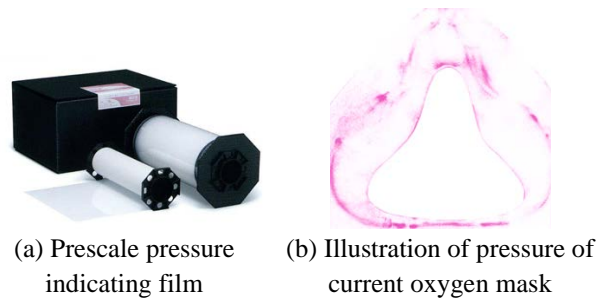


Figure 6. Prescale pressure indicating film and example of mask pressure measurement

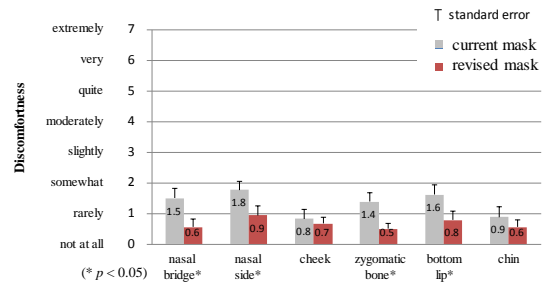
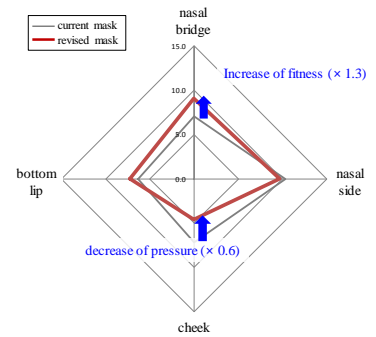
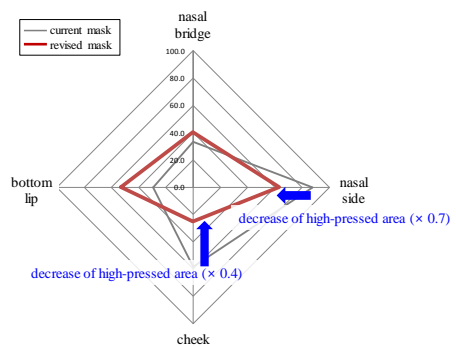


Figure 7. Result of subjective evaluation ( $n = 20$ )



(a) Evaluation of average pressure



(b) Evaluation of high-pressed area

Figure 8. Illustration of pressure analysis ( $n = 20$ )

## 4. Discussion

본 연구는 3차원 안면 scan data와 마스크의 CAD를 이용한 가상 착의 평가(virtual fit assessment) 방법을 활용하여 다양한 크기 및 형태의 안면에 적합한 최적 마스크 형상을 설계하였다. Han and Choi (2003) 및 Song and Yang (2010) 등의 기존 연구는 3차원 안면 scan data로부터 대표 안면 모델을 생성한 후, 대표 안면 모델의 3차원 형상 profile을 이용하여 호흡구를 설계하였다. 하지만 대표 안면 모델만을 기반으로 설계된 호흡구는 설계 대상 인구 다수에 적합하지 못할 수 있으므로 설계 대상 인구의 3차원 안면 data를 전부 이용하여 마스크 형상이 설계될 필요가 있다. 본 연구는 Butler (2009)와 Dai et al. (2011) 등이 제시한 유한 요소 방법(finite element method)과 유사하게 3차원 안면 data와 산소마스크 CAD를 이용하여 가상으로 압박/밀착도와 여유공간 등을 분석하는 가상 착의 평가 방법을 개발하여 사용하였다. 기존 연구들은 유한 요소 방법을 적용하여 호흡구의 밀착도 등을 평가하는 방법을 소수의 3차원 안면 data에 대해 예시적으로 제시하였으나 다수의 설계 대상 인구에 대해서는 평가하지 못하였으며, 평가 결과를 기반으로 호흡구를 개선하는 방법을 제시하지 못하였다. 반면, 본 연구는 가상 착의 평가 방법을 사용하여 설계 대상 인구를 대상으로 산소마스크의 압박/밀착도를 평가하였으며, 평가 결과를 기반으로 다수에 적합한 최적의 산소마스크 형상을 설계할 수 있었다.

본 연구는 설계 개선 효과 검증을 위한 가상 착의 평가뿐만 아니라 인간공학적인 착용성 평가를 수행하였으나 평가 protocol의 보완 및 평가 대상의 확장이 필요하다. 본 연구에서 3차원 안면 data 기반으로 설계된 마스크는 가상 착의 평가 분석과 주관적 및 객관적 착용성 평가 분석을 통해 설계 대상 인구 다수에 적합한지 검증되었다. 본 연구에서 개발된 가상 착의 평가 방법은 산소마스크 설계뿐 아니라 설계된 마스크의 설계 개선 효과 평가에도 활용되었다. 또한 본 연구는 개선된 산소마스크의 시제품을 제작한 후, 인간공학적인 착용성 평가 실험을 통해 주관적 불편도와 객관적 압박특성 측면에서 기존 마스크와의 차이를 설계 대상 인구에 대해 평가하였다. 본 연구에서 수행한 착용성 평가는 평가 protocol 보완, 평가 대상의 확장, 그리고 압박도 평가 결과의 분석 protocol 개발 등의 측면에서 보완될 필요가 있다.

## Acknowledgements

본 논문은 공군 군수사령부의 위탁연구과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lee, W., Jeong, J., Son, D., Park, S., Jung, D., Kim, H., You, M., Park, C., and You, H. (2012). Development of a methodology to design a pilot oxygen mask based on virtual fit testing method. In *Proceedings of the 2012 Spring Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers*.
- 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.

## 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

**Donghoon Son:** dhson2@gmail.com

**Highest degree:** M.S., Mechanical Engineering, Seoul National University

**Position title:** Full-time instructor, Department of Aerospace and Mechanical

Engineering, Korea Air Force Academy  
**Areas of interest:** Robotics, Mechanical design

**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

**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

**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

**Minji Yoo:** yoominjjj@afa.ac.kr  
**Highest degree:** MS, Aerospace Engineering, Pennsylvania State University  
**Position title:** Manager, Department of Developed Aerospace Part Certification, Aero-Technology Research Institute, Logistics Command, ROKAF  
**Areas of interest:** Nano-composites, Fracture mechanics, Structural health monitoring

**Chunsik Park:** surv45@hanmail.net  
**Highest degree:** Airforce Aviation Science Highschool  
**Position title:** Life Support System Manager, Logistics Management Wing, Logistics Command, ROKAF  
**Areas of interest:** Improvement of Life Support Items