

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



이원섭¹, 손동훈², 정대한², 박세권³, 김희은⁴, 유희천¹,
유민지⁵, 박춘식⁵

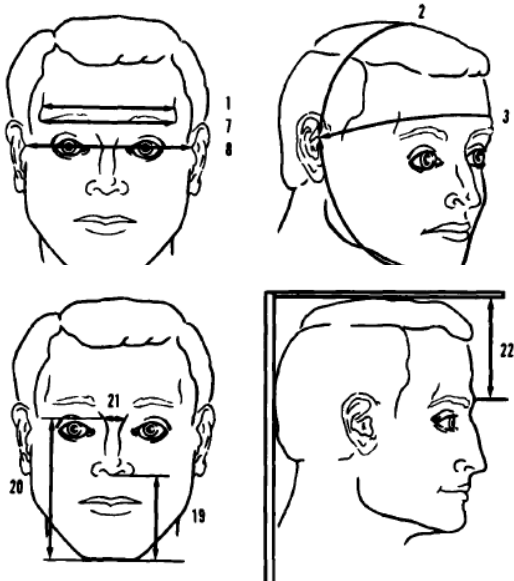
- 1 포항공과대학교 산업경영공학과
- 2 공군사관학교 기계공학과
- 3 공군사관학교 시스템공학과
- 4 경북대학교 의류학과
- 5 공군군수사령부

Contents

- **Introduction**
 - Background
 - Objectives of the Study
- **Virtual Fit Assessment Method**
- **Validation of Revised Oxygen Mask**
- **Discussion**

Background

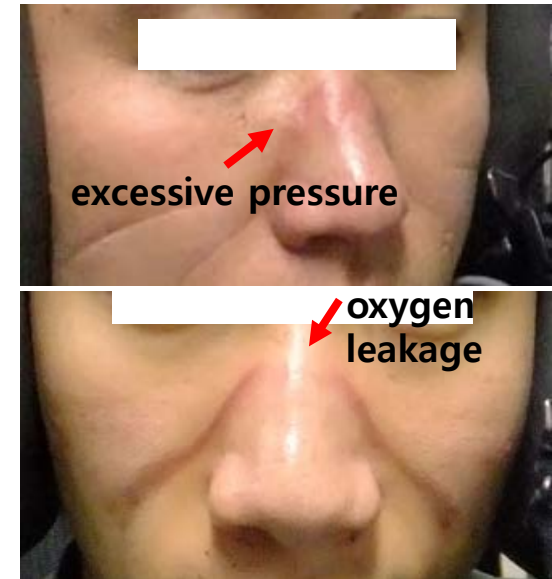
- MBU-20/P: F-15/F-16 전투기 조종사가 착용하는 **고성능 산소마스크**
 - 1967년 측정된 **미공군 안면 측정 data** 기반으로 설계됨
 - 상당수 **한국인 조종사 안면에 적합하지 않음**
 - ⇒ 특히 코 부위에서 **과도한 압박** 및 **산소 누설** 발생
 - ⇒ 비행 임무 중 **높은 불편도** 야기됨
- ⇒ **한국인 조종사 안면에 적합하도록 마스크 설계 개선 필요**



US Air Force
face anthropometric data (1967)



MBU-20/P oxygen mask
(Gentex Corp., USA)



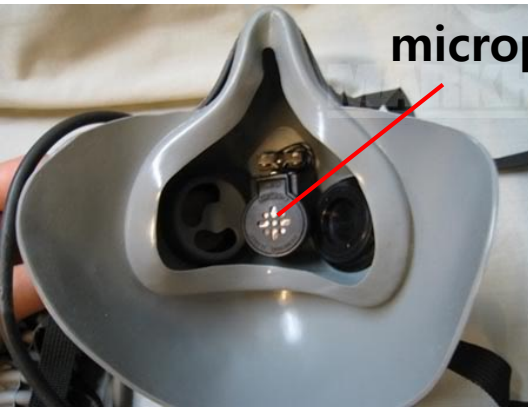
MBU-20/P Pilot Oxygen Mask



- 반면형 호흡구(half-face respirator)
- 고 고도, 고 중력가속도 상황에서 안정적인 산소 공급, 라디오 통신 지원
- 1967년 측정된 미공군 남성 안면 측정 data 기반으로 초기 설계
- 미공군 3D 안면 scan data (남 30, 여 30) 기반으로 형상 수정 (Gross et al., 1997)

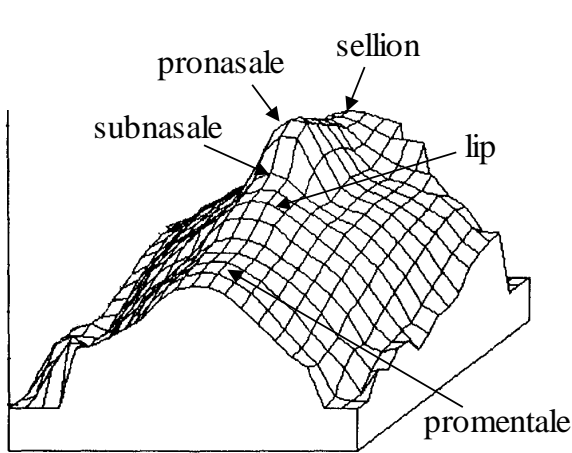
Components of MBU-20/P

- Facepiece: 산소 누설 방지 역할 (재질: silicone rubber)
- Hardshell: facepiece의 형상 유지 및 주변부품 결합 (material: carbide)

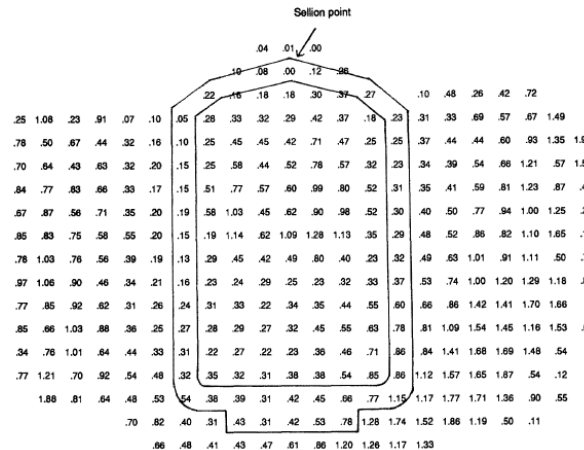


Respirator Design Based on Average 3D Facial Shape

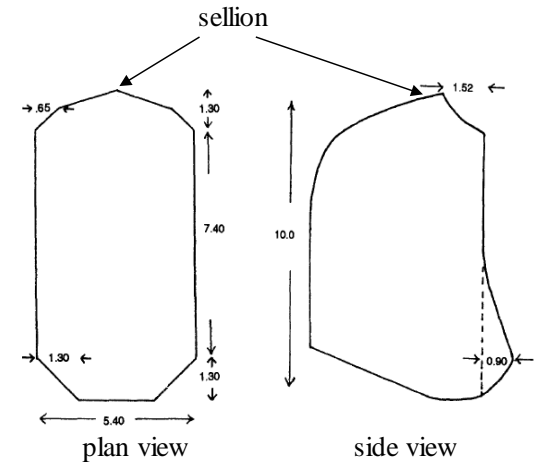
- 3D 안면 data의 평균 형상을 이용한 호흡구 설계 (Yatapanage and Post, 1992)
 - ✓ Low-quality 3D scan data (안면 형상 구성 point 수 = 약 400개)
 - ✓ 안면 구성 point들의 평균 및 분산을 이용한 호흡구 형상 설계
- 기존 연구 한계
 - ✓ 다양한 안면 형상이 아닌 평균 형상을 사용 ⇒ 다양한 안면에 적합한지 평가되지 못함
 - ✓ 호흡구 설계 특성을 고려하지 못하고 안면 특성(평균, 분산)으로만 호흡구 설계 ⇒ 호흡구 형상이 비합리적으로 설계됨 (예: 마스크 폭 = 5.4 cm)
 - ✓ 시제품 제작 및 착용성 평가를 통한 설계 방법의 타당성 검증이 필요함



평균 안면 형상 예
(21 ~ 63세 남성 72명)



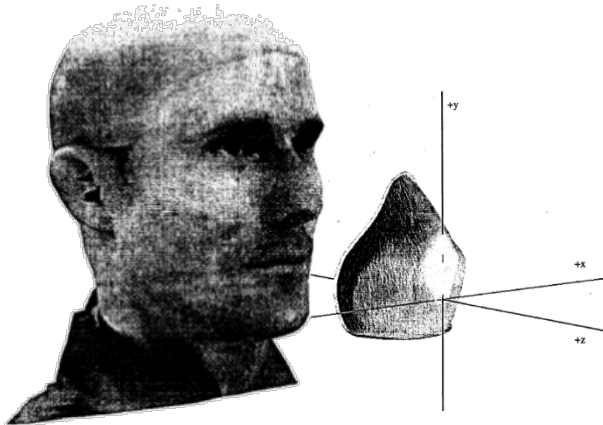
안면 형상을 구성하는 좌표 중
분산이 적은 부위를 따라
호흡구 형상(contour) 파악



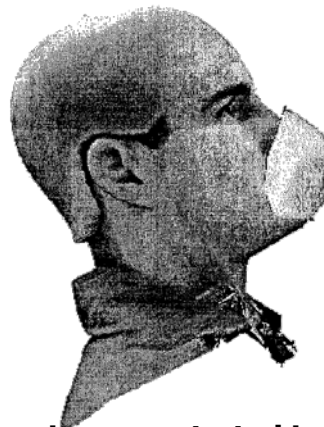
호흡구 형상의 전개도 예

Oxygen Mask Design Based on Mask Contour Analysis

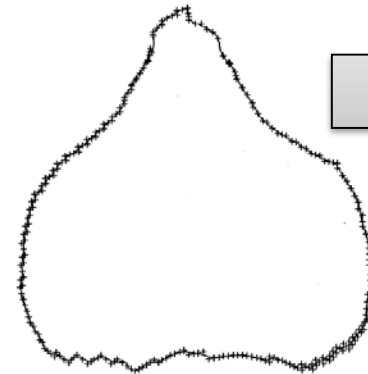
- 안면 밀착 형상 분석 기반의 마스크 형상 개선 (Gross et al., 1997)
 - ✓ 현행 MBU-20/P 산소마스크 형상 설계에 관한 연구
 - ✓ 초기 마스크 형상을 3D 안면에 가상 착의 후 마스크의 밀착 형상 분석
 - ✓ 안면 밀착 형상과 주관적 착용감(예: 산소누설, 미끄러짐)을 기반으로 마스크 형상 개선
- 기존 연구 한계
 - ✓ 안면 밀착 형상과 주관적 착용감의 마스크 형상 설계 적용 방법 언급 부재
 - ✓ 무작위 선별된 미공군 60명(남 30명, 여 30명) 안면 특성을 활용하여 4가지 치수 설계 ⇒ 전체 산소마스크 사용 집단에 대한 고려가 미흡
 - ✓ 다양한 크기와 형상의 사용자 대상 개선 마스크에 대한 평가 검증 부재



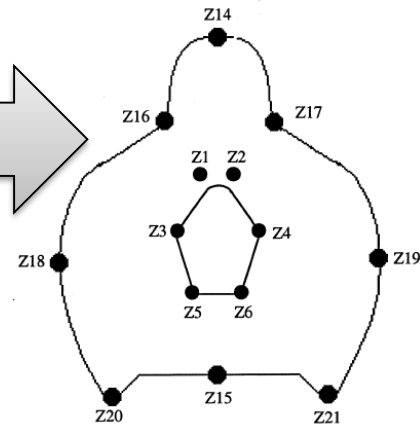
안면 및 초기 마스크의
3D scan 예



마스크 가상 착의



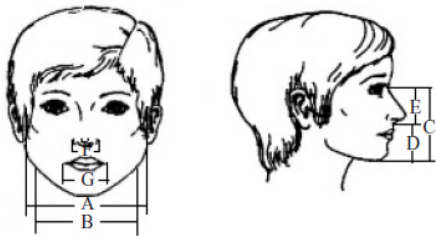
3차원 안면 밀착
형상(contour) 분석



개선 마스크 설계를
위한 설계 landmark

Respirator Design Based on Representative Models

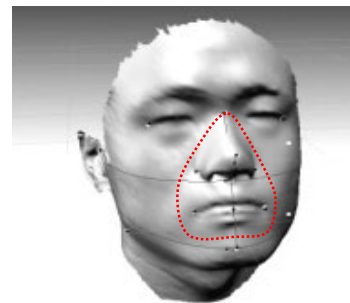
- 대표안면모델 기반의 산업용 호흡구 형상 설계 (Han et al., 2004)
 - ✓ 50명(남 25명, 여 25명)의 안면 측정 항목 기반 3개 치수 group 선정(대, 중, 소)
 - ✓ 치수별 평균 안면에 근접한 얼굴을 clay 제작한 후, 측정 항목 평균이 되도록 clay 수정
 - ✓ Clay model을 3D scan 후, 3D 형상 profile 기반 호흡구 형상 설계
- 기존 연구 한계
 - ✓ 50명 data 기반으로 생성된 대표모델이 전체 호흡구 사용 집단을 대표하는지 고려 미흡
 - ✓ 안면 특성과 호흡구 설계 특성을 고려한 세부적인 형상 설계 방법이 제시되지 못함
 - ✓ 호흡구 사용 집단 내 안면 형상이 다양한 사용자 대상 착용성 평가 검증 부재



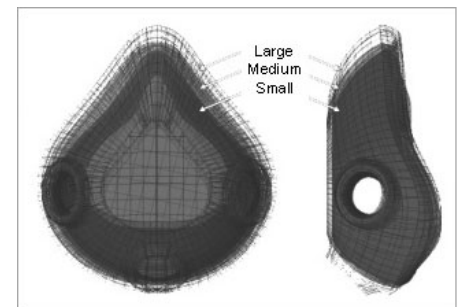
안면 측정 항목 예
(10개 항목)



Clay로 제작된 대표안면모델



Clay의
3D scanning



RMFs를 기반으로
3가지 치수 설계

Respirator Fit Assessment

- 정성적 평가 방법: 마스크 외부에 비산된 aerosol (예: banana oil)의 마스크 침투 여부를 주관적으로 검출
- 정량적 평가 방법: 장비를 사용하여 호흡구 내부 및 외부의 aerosol 농도를 측정
- 조종사 산소마스크 평가 적용 한계
 - ✓ 기존 방법은 외부 공기의 호흡구 내 침투 여부 파악이 주 목적
⇒ 조종사 산소마스크의 산소 누설 평가에 부적절
 - ✓ 기존 CAST 장비는 마스크의 기능적 결함 여부만 평가
 - ✓ 안면에 가해지는 압박감의 객관적 평가를 위한 실험적 방법 부재



Qualitative fit testing



INDUSTRIAL AND MANAGEMENT
ENGINEERING, POSTECH



Quantitative fit testing system
(PORTACOUNT PRO+, TSI Inc., USA)

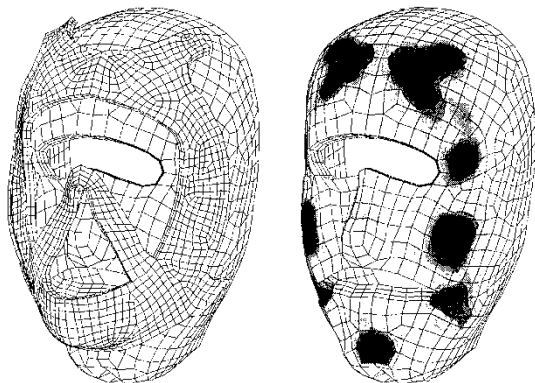
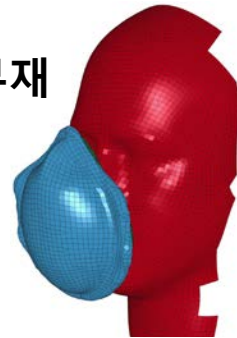


Combined Aircrew Systems Tester
(Gentex Corp., USA)

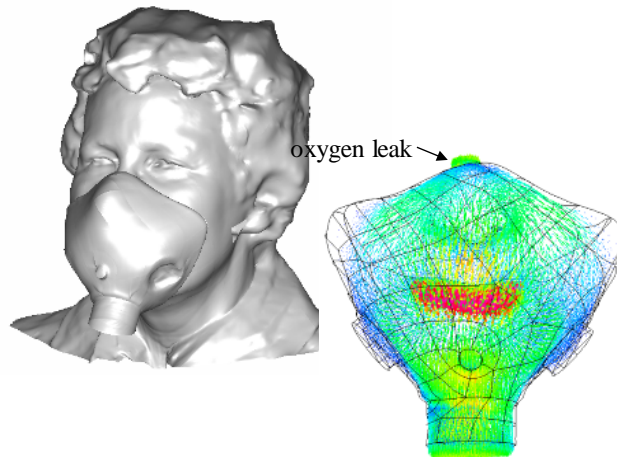
Argonics Design
Technology Lab

Virtual Fit Assessment Method

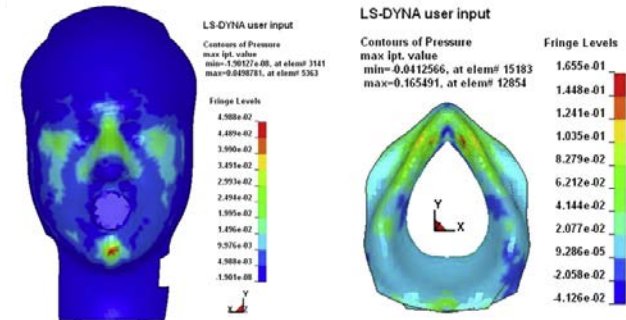
- 3D 안면 scan data와 호흡구 CAD를 활용하여 가상으로 착용성 평가
- Finite element method (FEM) 기반으로 밀착도, 압박도, 간섭(interference), 공기의 흐름, 산소 누설 등을 simulation
- 기존 연구의 한계
 - ✓ 호흡구를 안면에 착용시키는 방법(예: 착용 위치, 착용 특성)에 대한 고려 부재
 - ✓ 안면 크기와 형상이 다양한 사용자들에 대한 평가 부재
 - ✓ 가상 착의 평가 기반 최적 호흡구 형상 설계 방법은 제시되지 못함



Evaluation of fitness for full-face gas filtering mask (Piccione and Moyer Jr., 1997)



Evaluation of air flow and leakage based on CFD-ACE+ and CFD-GEOM FEM software (Butler, 2009)



Evaluation of pressure Based on LS-DYNA, FEM software (Yang et al., 2009; Dai et al., 2011)

Research Objectives

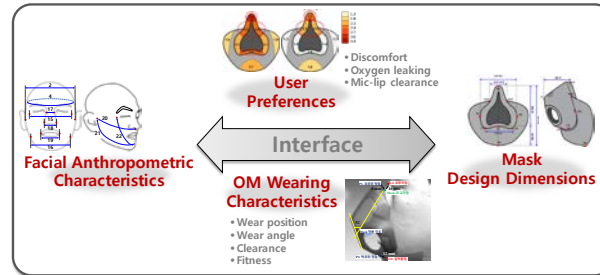
Development and Validation of a Virtual Fit Assessment Method for Pilot Oxygen Mask Design

1. 가상 착의 평가 방법(virtual fit assessment method) 기반 산소마스크 설계
 - ✓ 조종사 3차원 안면 scan data와 산소마스크 CAD를 이용한 가상 착의 평가 방법 개발
 - ✓ 가상 착의 평가 방법 기반으로 한국인 조종사 다수에 적합한 최적 산소마스크 형상 설계
2. 설계된 산소마스크 형상의 설계 개선 효과 평가
 - ✓ 가상 착의 방법 기반 평가
 - ✓ Prototype 제작 및 기존 마스크와의 비교 평가: 주관적 착용감 평가, 객관적 압박도 측정

Approach

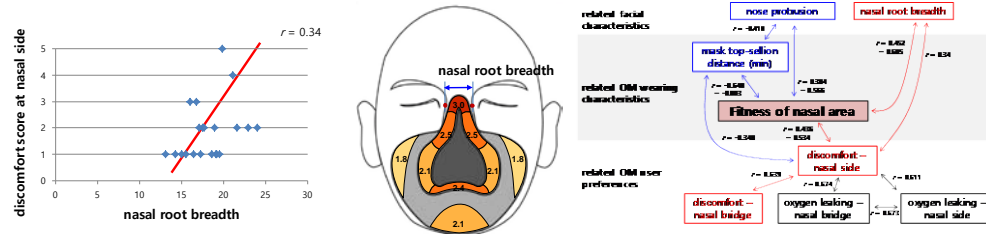
S1 산소마스크 design factors 분석

- 마스크 설계 특성
- 한국인 조종사 안면 특성
- 마스크 착용 특성
- 사용자 선호도 특성



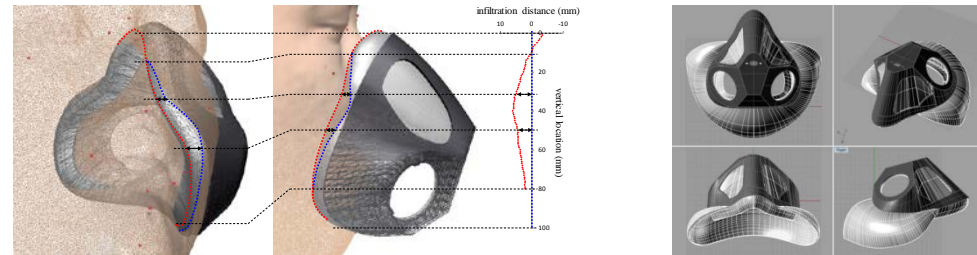
S2 산소마스크 설계 전략 개발

- 마스크 design factor 간 연관성 분석
- 산소마스크 설계 개선 전략 개발



S3 가상 착의 평가 기반 마스크 설계

- 가상 착의 평가 방법 개발
- 산소마스크 설계 개선



S4 개선 마스크 평가

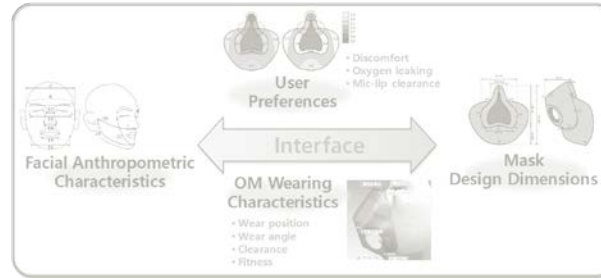
- 가상 착의 방법 기반 평가
- 시제품 제작 및 착용성 평가



Approach

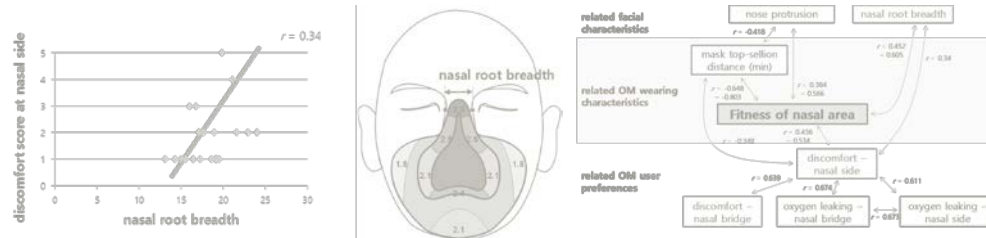
S1 산소마스크 design factors 분석

- 마스크 설계 특성
- 한국인 조종사 안면 특성
- 마스크 착용 특성
- 사용자 선호도 특성



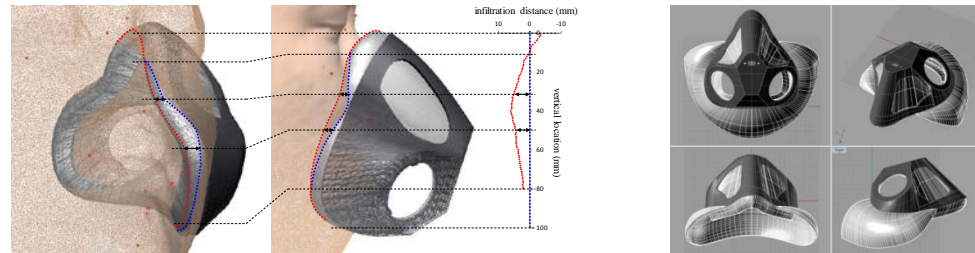
S2 산소마스크 설계 전략 개발

- 마스크 design factor 간 연관성 분석
- 산소마스크 설계 개선 전략 개발



S3 가상 착의 평가 기반 마스크 설계

- 가상 착의 평가 방법 개발
- 산소마스크 설계 개선



S4 개선 마스크 평가

- 가상 착의 방법 기반 평가
- 시제품 제작 및 착용성 평가



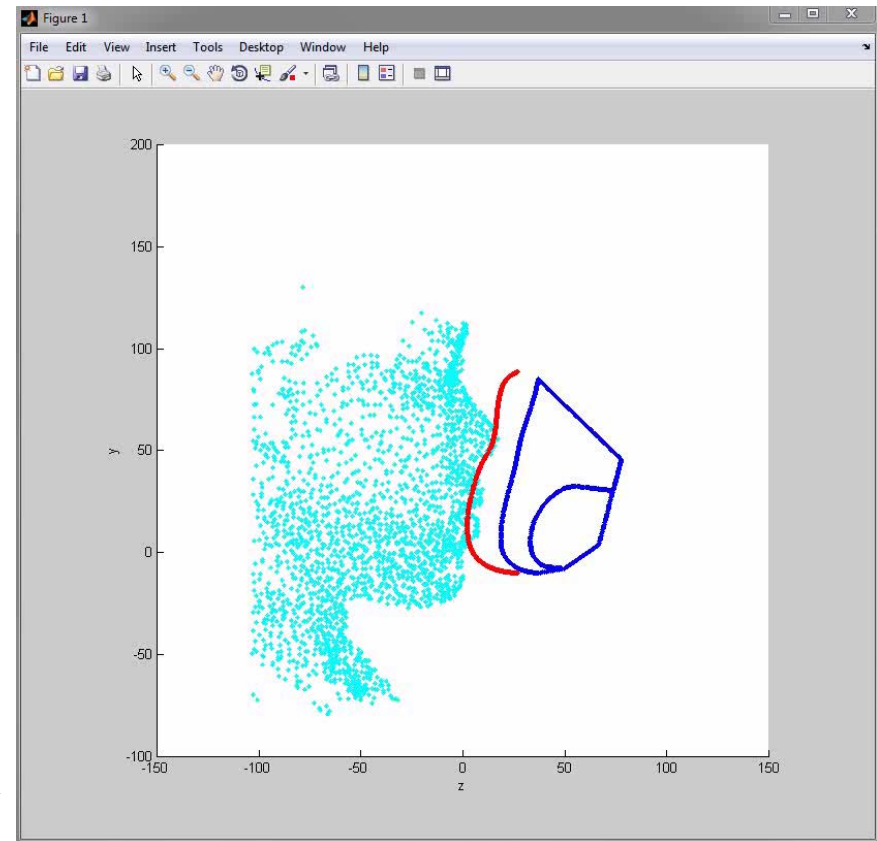
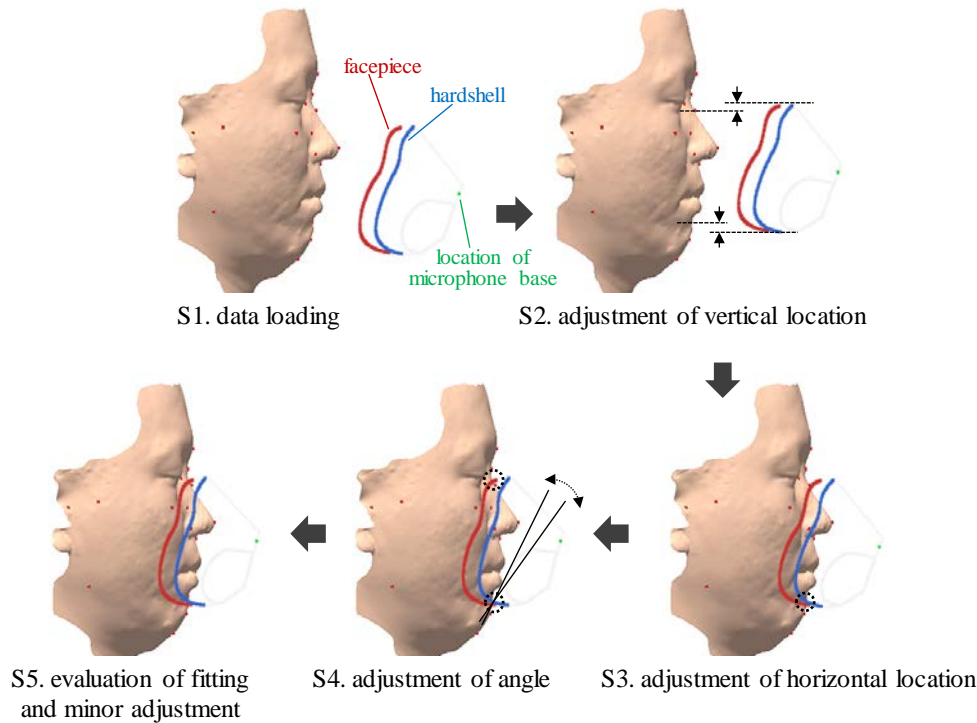
Virtual Fit Assessment Method

- 다수의 조종사 3차원 안면 scan data와 산소마스크 CAD를 이용
- 산소마스크 착용 특성(이원섭 외, 2012)에 따라 마스크 CAD를 3차원 안면에 가상 착용
(코 부위 착용 위치, 턱 부위 착용 위치, 착용 각도, 밀착/압박도)
- Virtual fit assessment system을 이용하여 다수의 조종사 안면에 마스크 자동 착용 및 분석



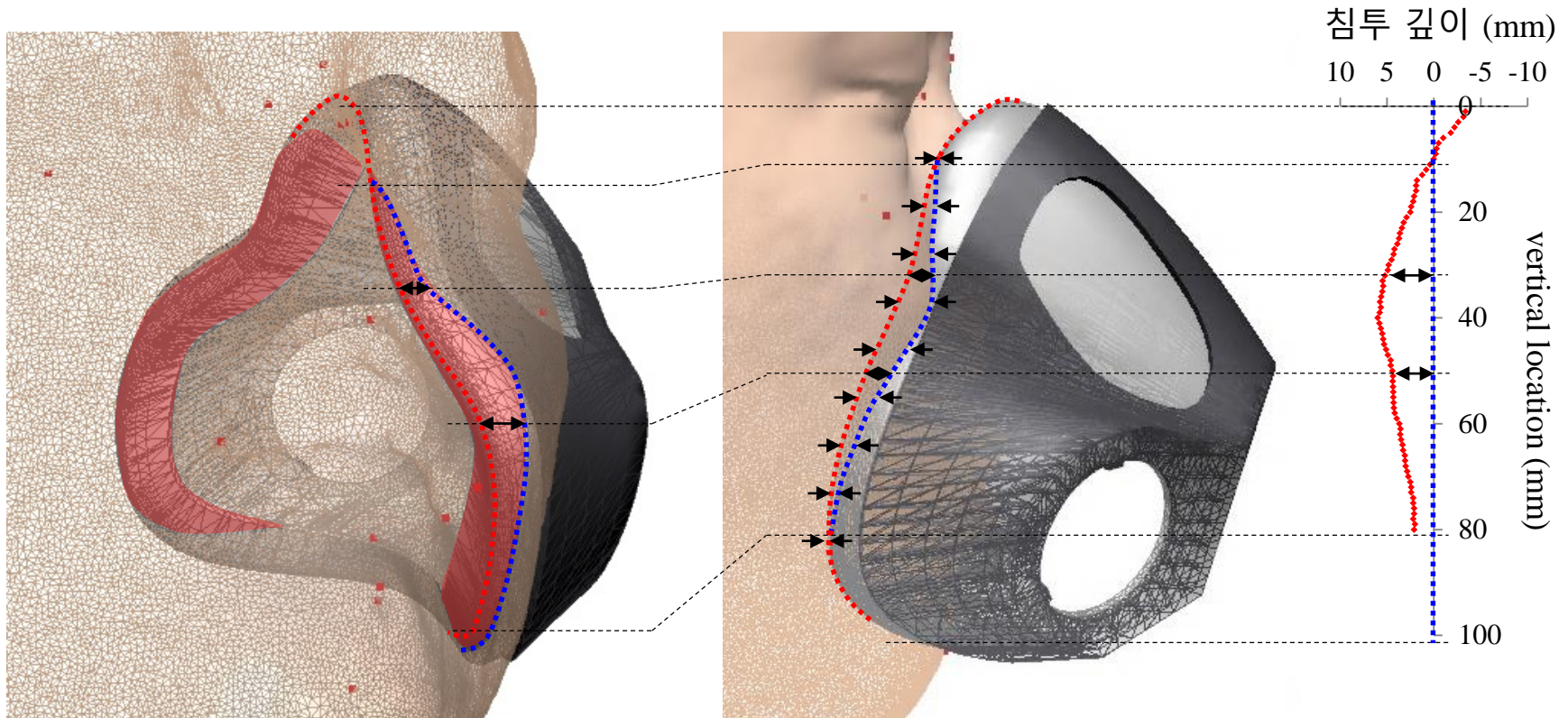
Process of Virtual Fitting

- 마스크 착용 특성(착용 위치 및 착용 각도의 평균과 범위) 기반으로 여러 조종사들의 얼굴에 마스크 CAD(hardshell과 facepiece 형상)를 자동 착용



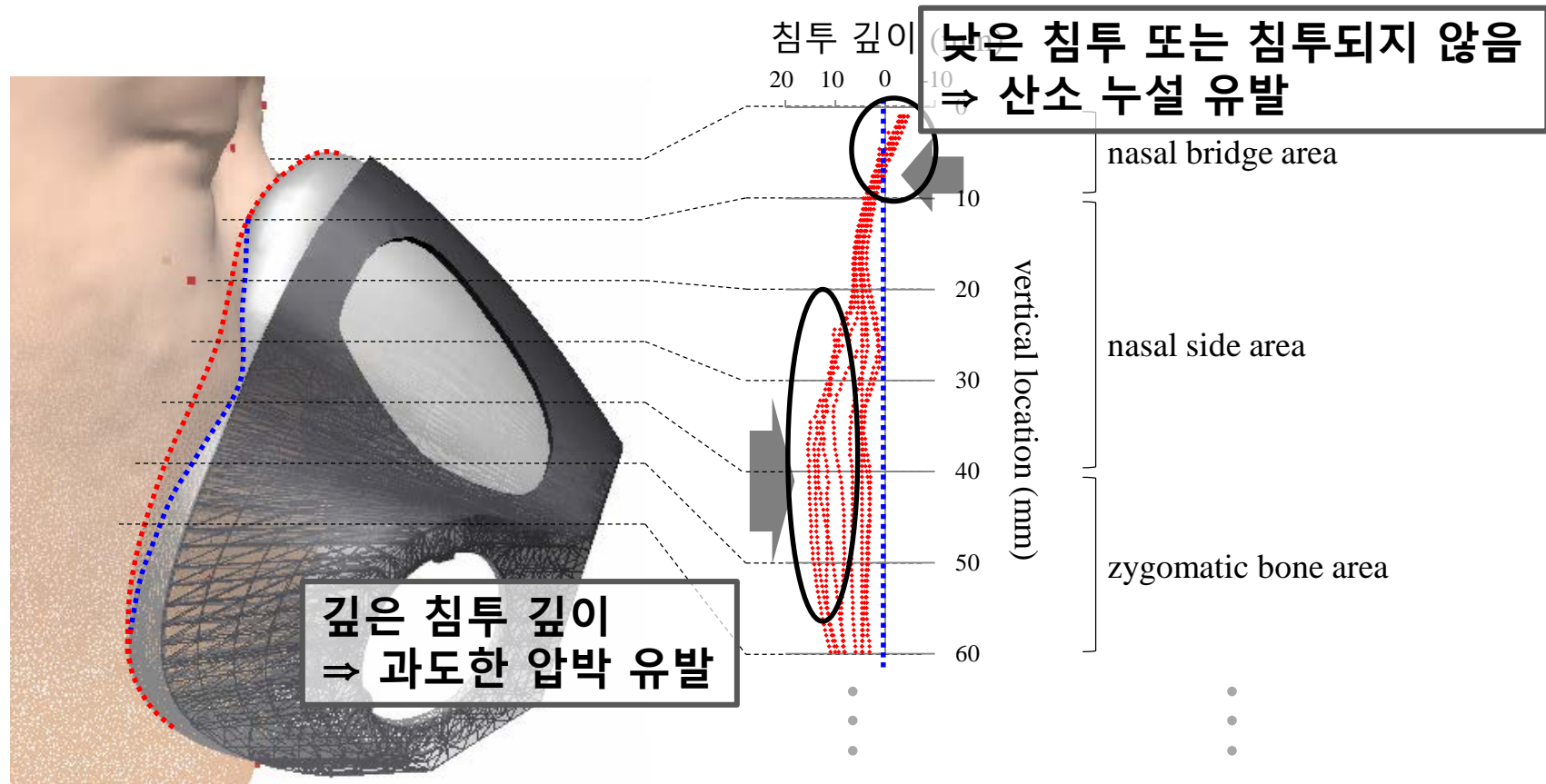
Analysis of Fitness

- 마스크가 안면 내부로 침투한 정도를 이용하여 밀착/압박도(fitness)를 분석



밀착/압박도 (= facepiece가 얼굴 내부로 침투된 깊이)

Analysis of Fitness (cont'd)



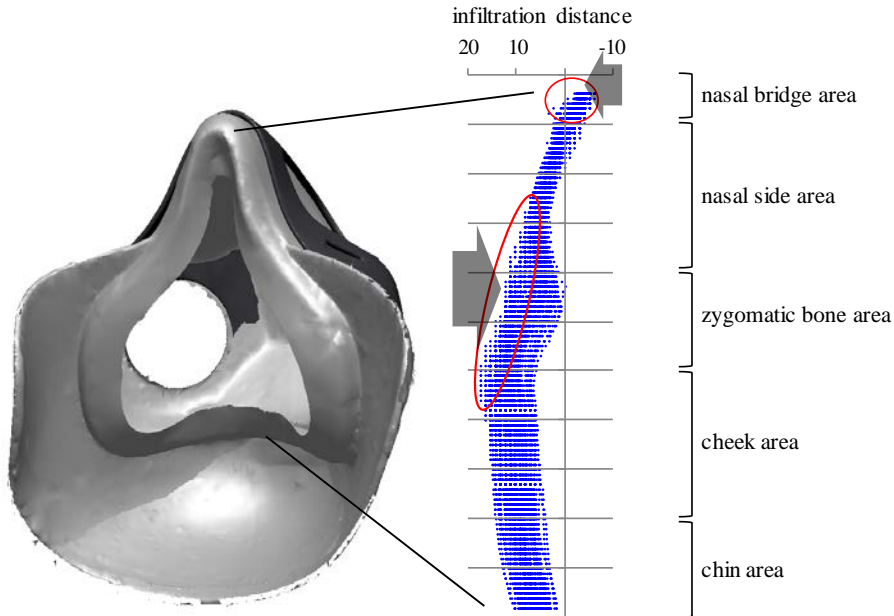
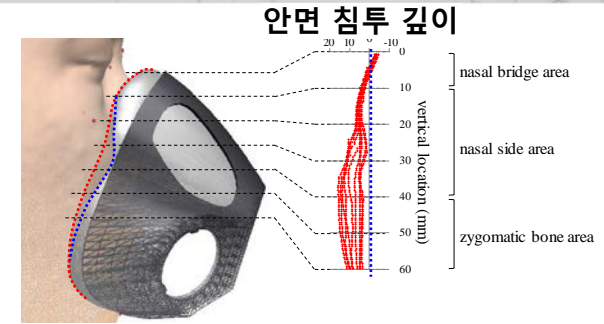
밀착/압박도 분석 예

OM Design Method

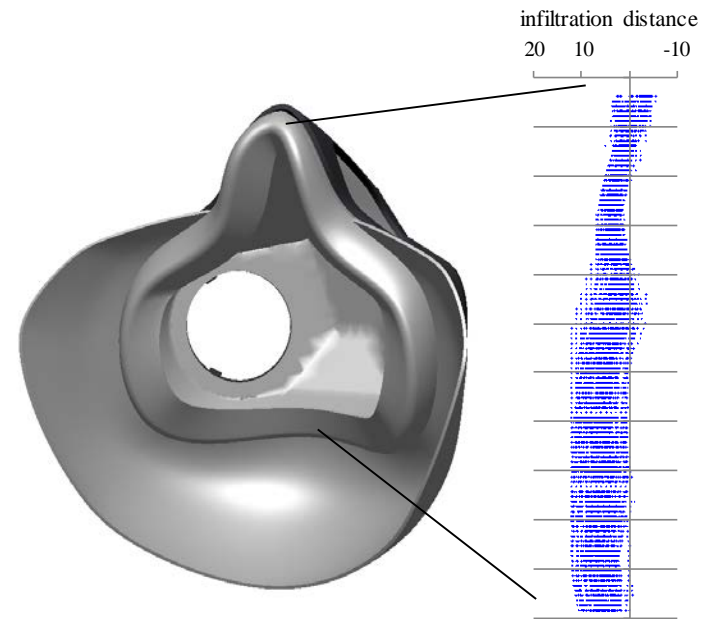
S1. Evaluation of fitness based on various faces with virtual fit assessment method

Iterative Design

S2. Design refinement



Fitness of current mask



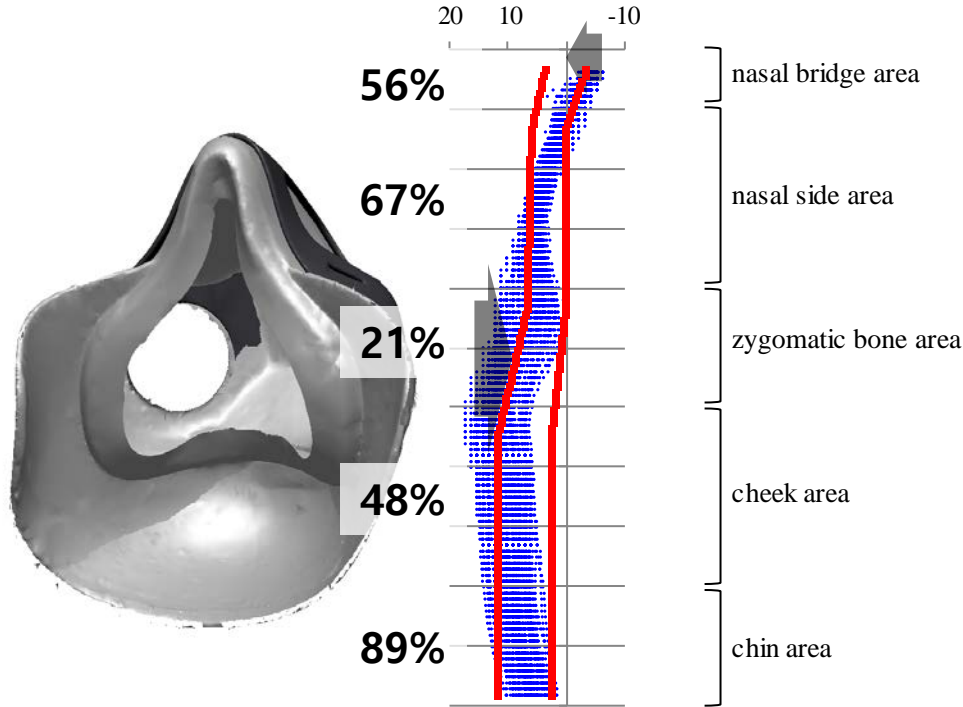
optimal mask shape for Korean pilots based on virtual fit assessment method

Results of Virtual Fit Assessment

(n = 121)

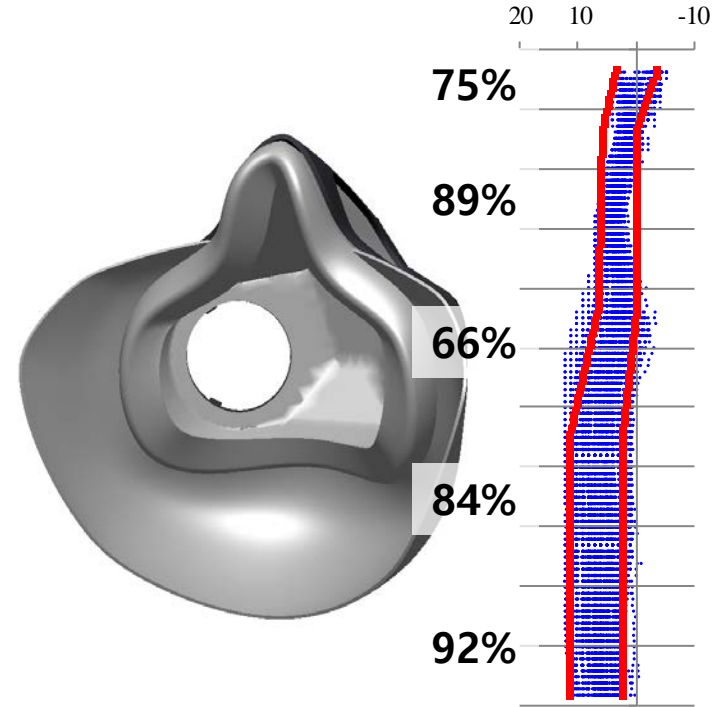
- 본 연구에서 정한 **적정 밀착/압박 기준**에 적합하게 설계되도록 iterative design
- 밀착/압박도가 설계기준에 수용하는 비율 평균 27% 증가

55.3%



Current mask

82.3%



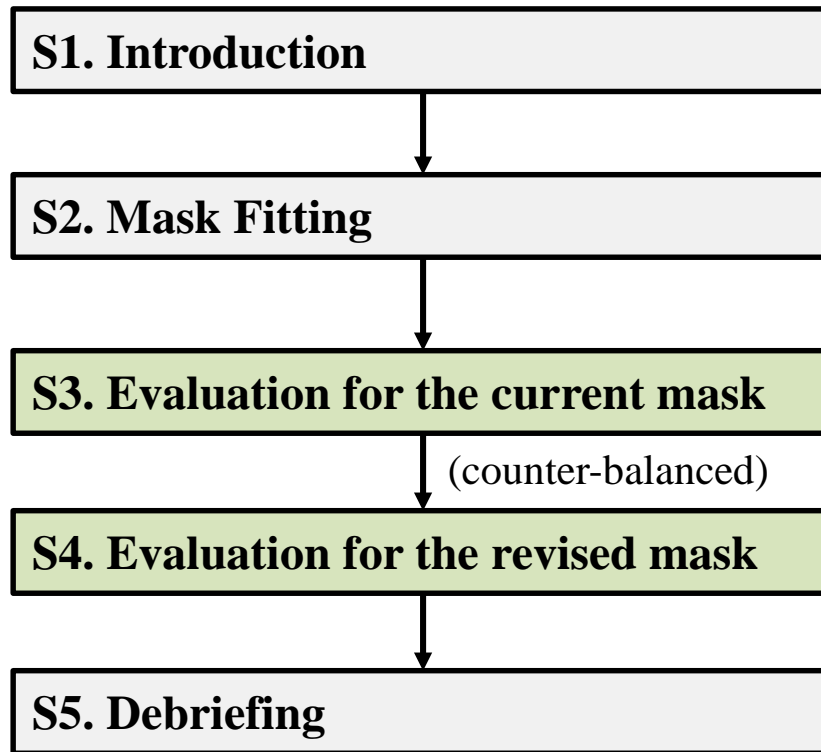
Revised mask

Usability Testing

- 개선 설계된 형상대로 prototype 제작 (동일 물성 적용)
- 산소마스크 비교 평가 protocol 개발
- Pilot test 수행 ($n = 20$)



Mask prototype



Testing protocol



Usability Testing Methods

- 기존 및 개선 마스크에 대한 평가
- 주관적 만족도(불편감, 산소누설감 등) 및 객관적 압박도 평가

Subjective evaluation – Questionnaire

Discomfortness by pressure, oxygen leakage, microphone-lip clearance, overall satisfaction

II. 산소 Mask 적합성 평가

II-1. 착용 압박감 (comfort)

1. 아래 그림을 참고하여 산소 mask 각 부위별 압박에 따른 불편감에 대해 표시해 주세요.

부 위	동일 없음 (comfortable)	조금 불편 (slightly uncomfortable)	중등 불편 (moderately uncomfortable)	매우 불편 (very uncomfortable)	극히 불편 (hot spot)
A: 코대	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
B: 코 옆	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C: 뺨	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D: 광대뼈-코 사이	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E: 입술 밑	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
F: 턱	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2. 산소 mask의 전반적인 착용 안락감에 대해 표시해 주세요.

불편 없음 (comfortable)	조금 불편 (slightly uncomfortable)	불편 (moderately uncomfortable)	매우 불편 (very uncomfortable)	극히 불편 (hot spot)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

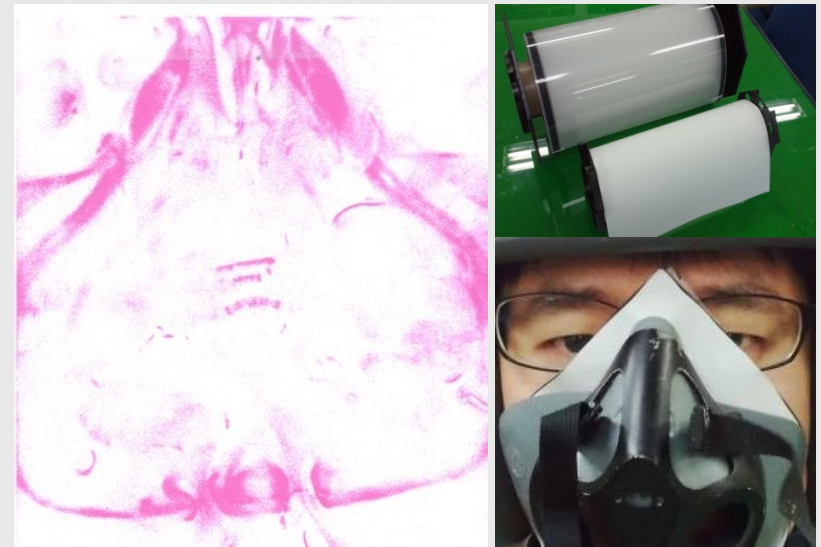
3. 산소 mask 착용 중 말을 할 때, 산소 mask의 전반적인 착용 안락감에 대해 표시해 주세요.

불편 없음 (comfortable)	조금 불편 (slightly uncomfortable)	불편 (moderately uncomfortable)	매우 불편 (very uncomfortable)	극히 불편 (hot spot)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Example of questionnaire

Objective evaluation - Pressure

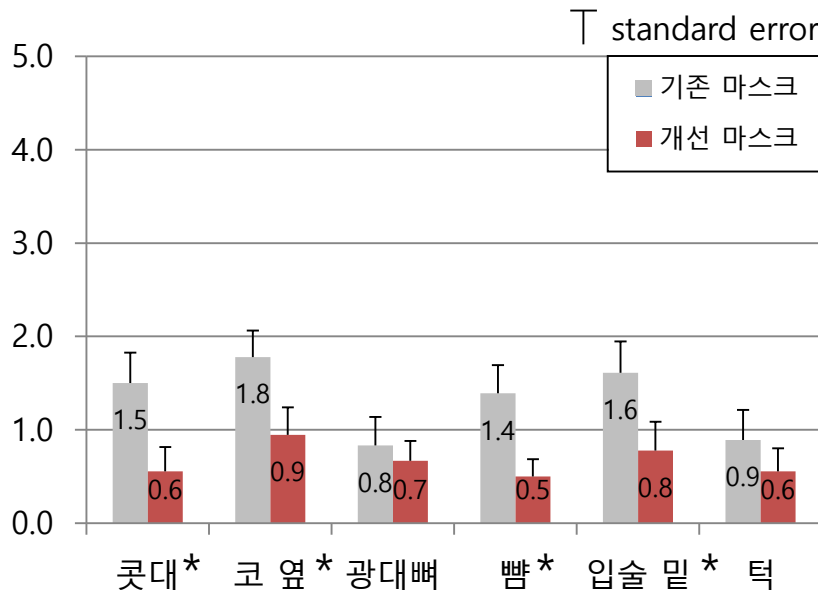
Pressure by facial area



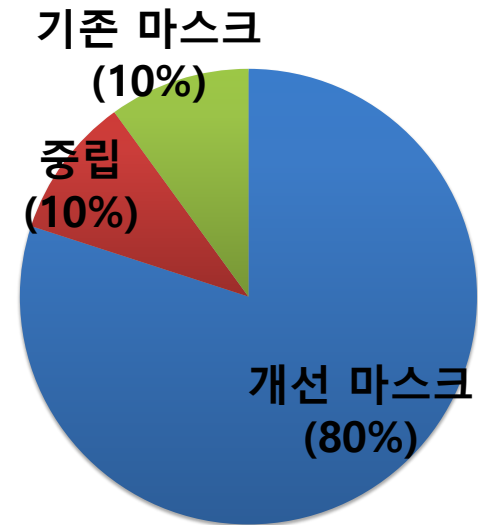
Prescale Pressure Indicating Film (Fujifilm, Japan)

Results: Subjective Evaluation

- 대부분 항목에서 통계적으로 유의($\alpha = 0.05$)하게 개선 마스크 선호됨(광대뼈, 턱 제외)
- 조종사의 80% 이상이 개선 마스크를 선호

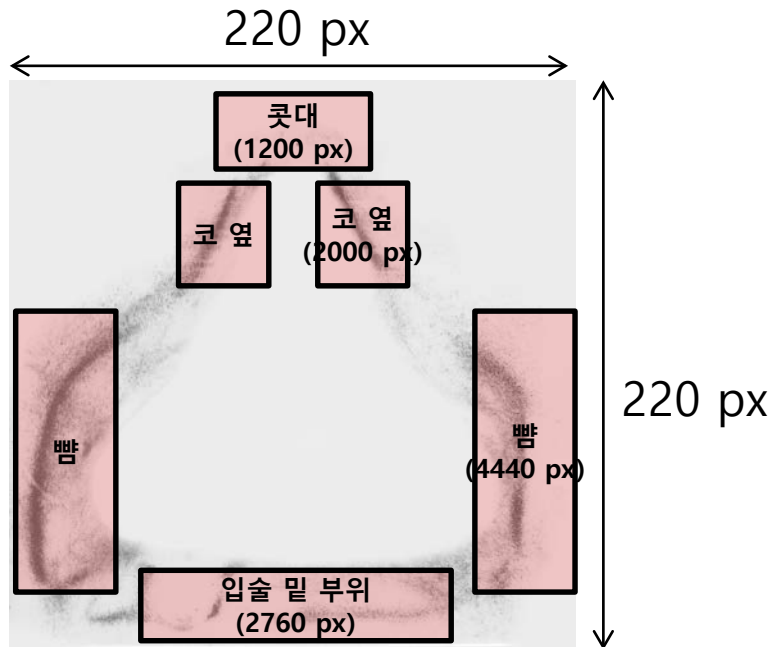


*paired *t*-test 결과 p -value < 0.05

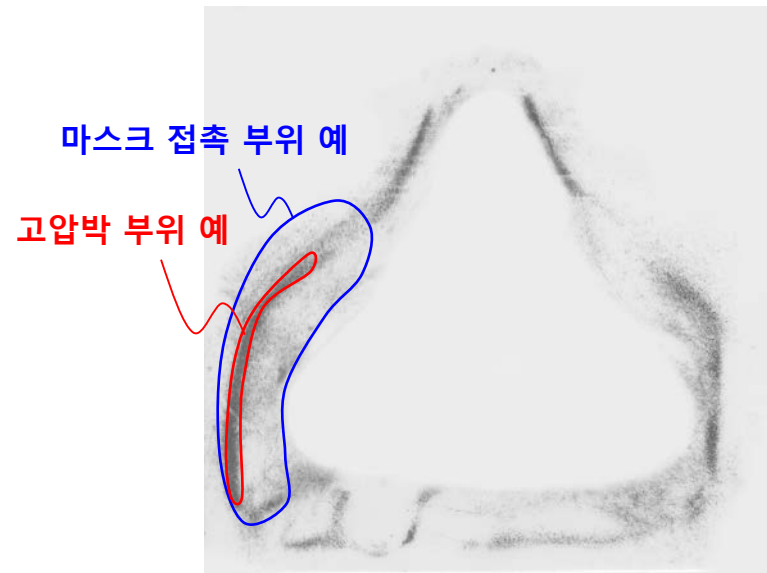


분석 부위 및 분석 지표

- 분석 부위: 콧대, 코 옆(좌/우), 뺨(좌/우), 입술 밑
- 분석 지표
 - ✓ 압박지수 평균 (average of PI)
 - ✓ 고압박 면적(highly pressed area)



분석 부위

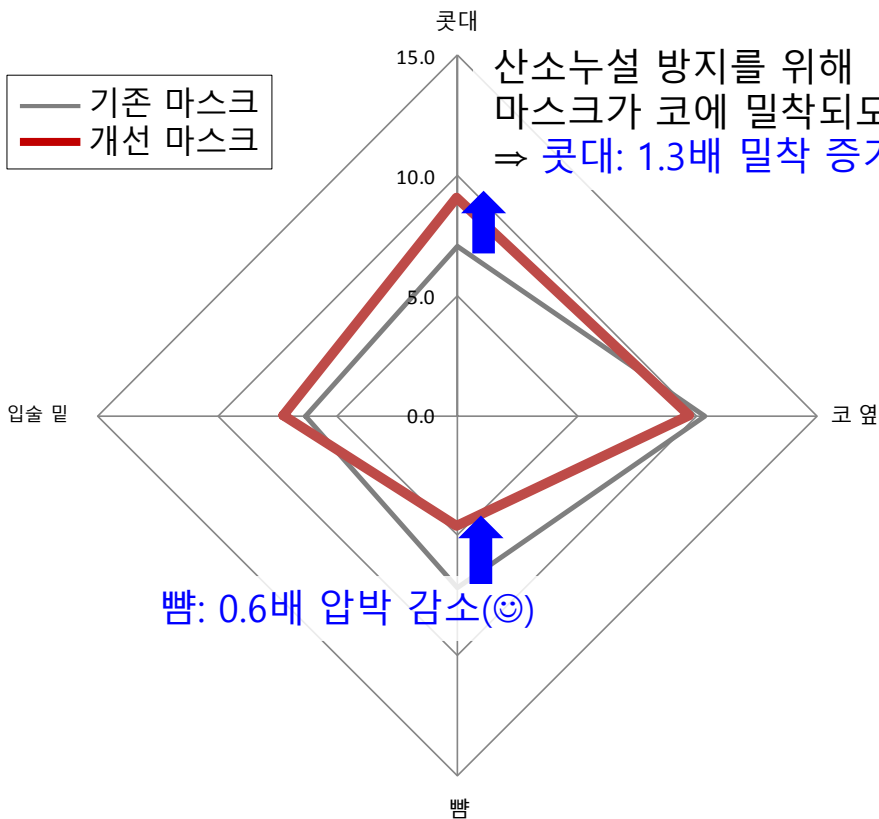


분석 지표

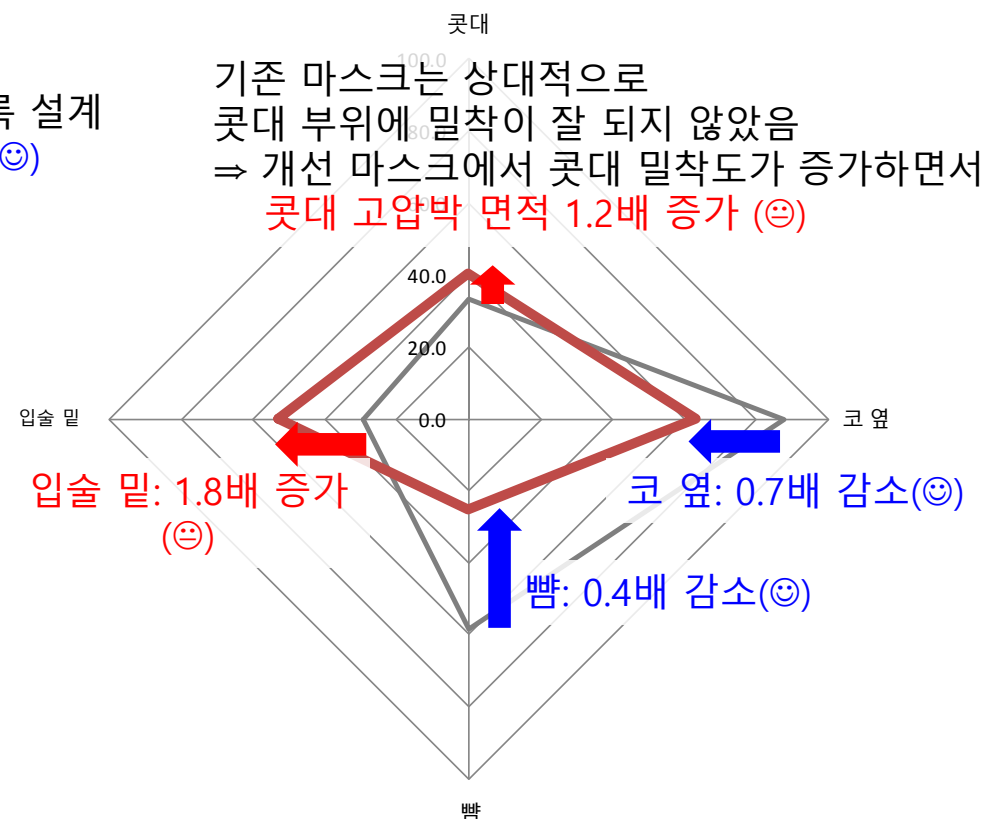
압박도 분석 결과: 압박지수 평균

(pressure index)

- 전반적으로 **평균 압박 지수 및 고압박면적 감소**
- 콧대와 입술 밑 고압박 면적은 상대적으로 증가(1.2 ~ 2.7배)하였으나 주관적 선호도에는 영향을 미치지 않음



압박지수 평균



고 압박 면적

Discussion (1/3)

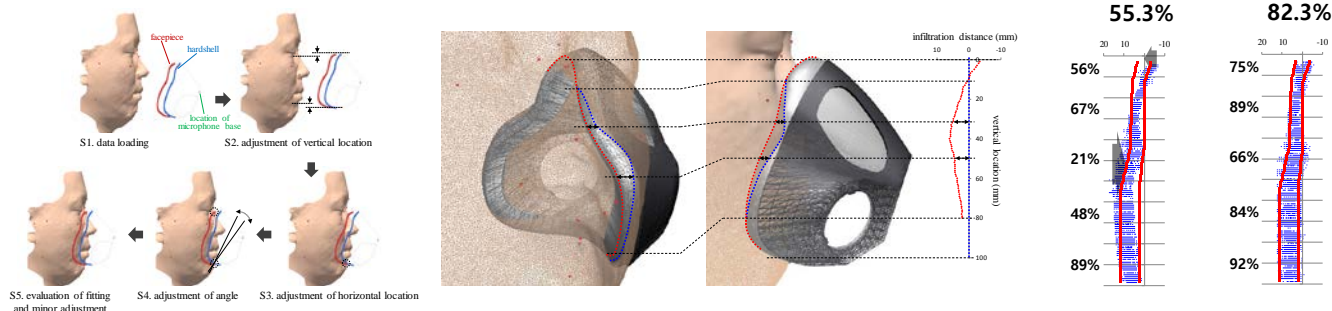
- 가상 착의 평가(virtual fit assessment) 기반 마스크 설계 개선

- ✓ 기존 한계

- 대표안면모델의 3차원 안면 형상 정보만 이용하여 마스크 형상 설계
- 설계 대상 인구 다수의 다양한 3차원 안면 형상 특성이 고려되지 못함
- 대표안면모델 기반 설계된 마스크가 설계 대상 인구 다수에 적합한지 평가되지 못함
- 다양한 형상의 3차원 안면 data들을 활용하는 digital 설계 및 평가 기술 적용 필요

- ✓ 본 연구의 의의

- 3차원 안면 scan data 기반의 **마스크 형상 설계 기법 개발**
- **다양한 크기 및 형태의 3차원 안면 data들에 적합한 최적 설계안 개발**
- 설계안의 가상 착의 평가를 통한 ⇒ 시제품 제작 전 **설계 개선 효과 가상 평가**



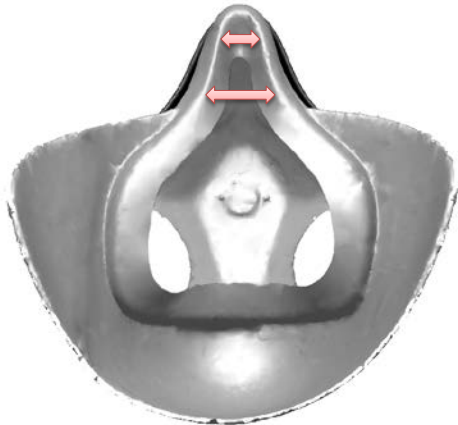
Discussion (2/3)

- 개선안 prototype의 **인간공학적 평가 및 설계 개선 효과 검증 (pilot test)**
 - ✓ 기존 한계
 - 설계된 마스크의 주관적 및 객관적 착용성 검증 부재
 - 산소마스크의 압박도 평가를 위한 실험적 방법 부재
 - 마스크 사용 환경에서의 적합성 평가 필요
 - ✓ 본 연구의 의의
 - 마스크 사용 집단 대상 **인간공학적 착용성 평가 protocol** 개발
 - 평가 내용: 주관적 만족도, **객관적 압박 특성**
 - ✓ 향후 추진 사항
 - 마스크 사용 집단 대상 **인간공학적 착용성 평가 수행** (치수별 30명 × 4개 치수)
 - 군 적합성 평가 수행: **저압 및 가속도 환경에서의 산소마스크 기능성 평가**

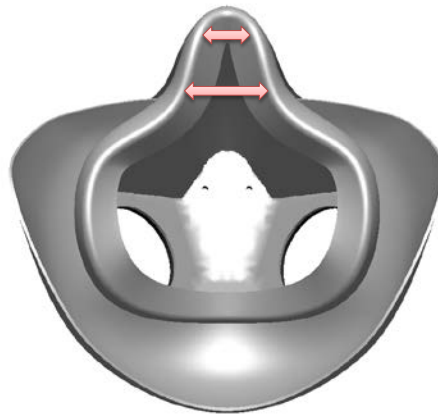
Discussion (3/3)

- 개선 산소마스크 형상 특성

- ✓ 한국인의 코 부위 특성(미국인보다 콧대가 넓은)을 반영하여 마스크 코 부위를 3~5 mm 넓게 설계
- ✓ 크기와 형상이 다양한 3차원 안면 scan data 기반 설계
⇒ 최적 마스크 형상 도출



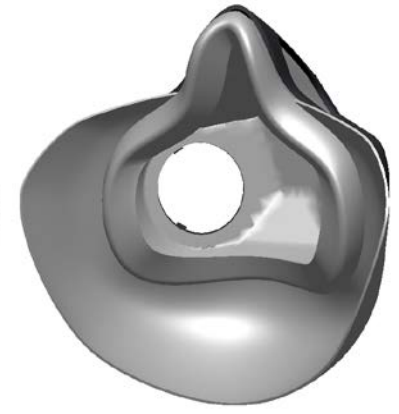
current OM design



OM design for Korean pilots



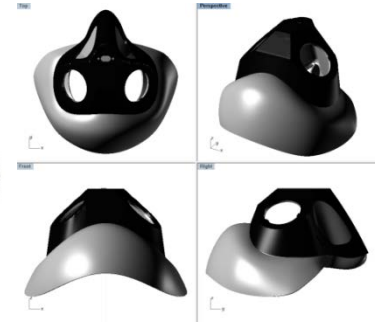
current mask



revised mask

Q & A

Thank you for your attention!



edt.postech.ac.kr
mcury@postech.edu