

한국인 얼굴의 3차원 형상해석을 통한 반면형 호흡보호구용 신개념 3D test panel 개발

김강윤 · 김현욱^{1)†} · 이 중²⁾ · 이응대²⁾ · 김동욱²⁾

대한산업보건협회 산업보건연구소 · 가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실¹⁾ · 국립과학수사연구소 문서사진과²⁾

Development of the New 3D Test Panel for Half-Mask Respirators by 3D Shape Analysis for Korean Faces

Kang Yoon Kim · Hyunwook Kim^{1)†} · Joong Lee²⁾ · Eung Dae Lee²⁾ · Dong Wook Kim²⁾

Institute of Occupational Health, Korean Industrial Health Association · Dept. Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University of Korea¹⁾ · Document Photography Dept., National Institute of Scientific Investigation²⁾

This study was performed to suggest the new three-dimensional (3D) fit test panel, constructed based on facial 3D data, for respirator fit testing.

Three dimensional surface data were obtained using a 3D laser scanner; facial data from 102 volunteers (70 males and 32 females). The collected digitalized data were used for shape analysis utilizing the Procrustes algorithm.

The results were as follows:

1. Facial shapes between genders were statistically significantly different. The misclassification error rate was 2.99%.

2. Facial shapes of all subjects including both gender were categorized into 4 different facial types by cluster analysis.

3. The new 3D fit test panel containing both facial shape and length information data was developed. The panel was composed of the shape information on x-axis which were expressed as A, B, C, and D, and the lengths information on y-axis that were classified 4 groups ranged from 103.7mm to 133.5mm.

The new 3D fit test panel for Koreans, developed utilizing shape information as well as length information, was constructed. The concept for developing the 3D test panel can be applied for other ethnic groups having different facial shapes.

Key Word: Procrustes algorithm, 3D laser scanner, Test panel, Shape information, Length information

I. 서 론

호흡보호구를 새로이 디자인하거나 기존 제품을 근로자가 착용하고자 할 때, 호흡보호구가 적합한지 여부를 판정하기 위하여 밀착 적합성 검정 (fit test)을 실시

해야 한다. 그중 새롭게 디자인된 호흡보호구에 대해 국가가 검정을 하고자 할 경우, 미국 산업안전보건연구원 (National Institute for Occupational Health and Safety, 이하 NIOSH)에서는 호흡보호구를 착용할 인구를 대표할 수 있는 피검 인구

집단을 대상으로 밀착 적합성 검정을 실시하는데, 이 피검 인구집단을 test panel이라 한다. 국내에서도 호흡보호구를 검정하고자 할 때 법적으로 한국산업안전공단에서 밀착 적합성 검정을 실시하도록 규정되어 있으나 (노동부, 2003), 밀착 적합성 검정을 수행하기 위한 test panel을 어떻게 구성할 것인가에 대한 세부사항은 결정된 바 없다. 단지 한돈희 (1999)에 의해 한국인을 위한 test panel이 제안

접수일: 2003년 10월 6일, 채택일: 2003년 12월 12일

† 교신저자: 김현욱(서울 서초구 반포동 505 가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실)

Tel : 02-590-1237, E-mail : hwkim@catholic.ac.kr

되었을 뿐이다.

Test panel에 대한 연구는 미국에서 시작되어, 국내에서도 최근 관련연구가 이루어지고 있으며 (한돈희, 1999; 한돈희와 최국렬, 2002; Kim 등, 2003), 타이완에서도 현재 연구진행중인 것으로 보인다 (Chen 등, 2003). 기존 연구에서 test panel을 구성할 때 필요한 인체측정학적 자료로 얼굴길이, 얼굴폭 또는 입술 길이, 코뿌리 폭, 코에서 턱끝 길이 (menton-subnasale length), 코폭이 관련된다고 하였고 (Hack, 1974; Hack & McConville, 1978; Liau 등, 1982; Oestenstad 등, 1990; Oestenstad와 Perkins, 1992; Brazile 등, 1998), 또 국내에서는 반면형 호흡보호구와 bitracion-subnasale arc, bizygomatic breadth가, 1/4형 마스크에서는 biocular breadth, bitracion-subnasale arc, biectoorbitale breadth, menton-subnasale length가 밀착계수와 관련이 있다고 하였다 (한돈희와 최국렬, 2002; Kim 등, 2003). 타이완의 Chen 등 (2003)은 하안 길이와 입술 길이가 반면형 호흡보호구용 test panel을 구성하거나 개인이 반면형 호흡보호구를 선택할 때 고려해야 할 부분이라 하였다.

3차원으로 구성된 얼굴정보가 test panel에 모두 반영되기 위해서는 인체측정 자료에 대한 정확한 해석이 전제되어야 한다. 형태 (form)는 크기 (size)와 형상 (shape)의 합으로 이루어져 있다 (Penrose, 1954). 인체의 모든 부분이 굴곡이 많은 곡선으로 이루어져 있지만, 그중 얼굴은 다른 부위보다 다양한 곡선을 갖고 있다. 이러한 얼굴형태가 반영되기 위해서는 각 표지점간의 거리나 호 등의 크기를 측정하는 전통적인 인체측정방법으로는 한계가 있다.

형상을 해석하기 위한 방법은 크게 윤곽방법 (boundary outline method 또는 outline method)과 표지점 방법 (homologous-point approaches 또는 landmark methods)의 두 범주로 구분된다 (Chen 등, 2000; Adams 등, 2003).

윤곽방법은 다시 중간축 분석 (medial axes analysis, 이하 MAA), 고유형상해석

(eigen shape analysis)과 푸리에 해석 (Fourier analysis) 등으로 나누어질 수 있다.

Ratnaparkhi 등 (1992)은 푸리에 해석을 이용하여 호흡보호구 디자인에 필요한 크기와 형상해석을 소개하였다. 이 연구에서는 얼굴의 3차원 형상에 대한 20개 단면을 얻어서 푸리에 서술자를 이용한 군집분석을 수행하였다. 그러나 코나 귀와 같은 부분적인 형상에서 실제 형상과 차이를 보였다고 하였다. 또 이 방법은 턱뼈와 같이 복잡하고 불규칙적인 형상의 경우 전통적인 푸리에 방법이나 고유형상해석으로는 쉽게 다룰 수 없는 단점이 있다 (Chen 등, 2000). 그럼에도 불구하고 생물학적 형상을 설명하는데 푸리에 해석이 이용되었다 (Ferrario 등, 1996a; Ferrario 등, 1996b; Ferrario 등, 1997; Tangchaitrong 등, 2000; Chen 등, 2000). 표지점 방법은 전통적인 측정분석 (conventional metric analysis, 이하 CMA), 두 직교격자 방법 (Biorthogonal grid, 이하 BOG), BOG이 발전된 형태의 유한요소방법 (finite element method, 이하 FEM), 유클리드 거리 행렬분석 (Euclidean distance matrix analysis, 이하 EDMA)과 박판 spline (thin plate spline, 이하 TPS)이 이용되고 있다. 최근에는 프로크루스테스 분석 (Procrustes analysis)이 연구되고 있다.

CMA는 본래 규칙적인 기하학적 형상을 측정하기 위하여 개발되었으며, 불규칙적인 생물학적 형상에 적용하기에는 부적절한 방법이다. 이는 거리, 각 또는 비의 선형적 측정으로 구성되어 있다. 생물학적 형상에 적용할 경우 한정된 표지점만을 사용해야 하고, 표지점을 선택하는데 있어 피할 수 없는 오차가 발생되며, 크기를 적절히 표준화하는데 어려움이 있어 일반적으로 만족스럽지 못한 결과를 나타낸다. 그럼에도 불구하고 전통적인 호흡보호구 디자인이나 호흡보호구의 적합성 검정과 관련된 test panel에는 이 방법이 이용되어 왔다 (Hack, 1974; Hack & McConville, 1978; 한돈희와 최국렬, 2002; Kim 등, 2003).

EDMA는 생물학적 응용측면에서 주로

개발된 방법이다. 각 형상에서 가능한 표지점간의 유클리드 거리를 계산한다. 이 거리 행렬을 “형태행렬”이라 한다 (Lele & Richtsmeier, 1991). 이는 각 형태간의 비 (ratio)의 행렬을 계산하여 쌍 비교하는데 활용된다 (Lele & Richtsmeier, 1991; Ferrario 등, 1993c; Ferrario 등, 1997; O'Grady & Anthonyshyn, 1999). Taylor (1994)는 EDMA 방법을 이용하여 산소 마스크의 밀착을 연구하였으며, 마스크의 밀착을 설명하는데 있어 3차원 측정 및 해석의 필요성을 역설하였다.

소개된 BOG, FEM, EDMA, TPS 등은 모두 생물학적 형태에 존재하는 새로운 정보를 수학적 방법으로 나타낸 것이지만, 경계 또는 곡면의 정보가 누락되는 문제를 완전히 개선하지 못한 문제점을 안고 있으며, 3차원 자료를 사용하는데 있어 제한점을 갖고 있다.

최근 형상해석에 많이 이용되고 있는 프로크루스테스 분석은 2차원 또는 3차원 대상물체의 일정 표지점을 병진, 회전 또는 크기조절을 이용하여 하나로 중첩한 후 중첩된 2차원 또는 3차원 대상물체의 형상에 대한 중심크기, 프로크루스테스 평균과 프로크루스테스 잔차에 대한 값을 얻을 수 있으며, 이 값은 주성분분석 결과를 이용하여 변이 및 다변량 분석 등으로 형상을 해석하는 방법의 하나이다. 본래 형태는 형상과 크기를 모두 고려하여야 한다. 그러나 프로크루스테스 분석 방법은 형태에서 크기를 제거하여 형태해석이 곧 형상해석이 될 수 있도록 하여 크기와 형상간의 간섭을 제거함으로써 더 정확한 형상해석이 가능한 방법이다 (Rohlf와 Slice, 1990; Rohlf, 1999; Hennessy와 Stringer, 2002; Hennessy 등, 2002).

본 연구에서는 프로크루스테스 알고리즘을 이용하여 얼굴 및 호흡보호구의 3차원 형상해석을 시도하였다. 호흡보호구 디자인에 앞서 디자인된 호흡보호구의 신뢰성을 확보에 유리하고, 얼굴형태 (form)가 가지고 있는 형상 (shape) 자료와 크기 (size) 자료가 모두 포함된 3D test panel을 제시하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 얼굴형상의 3차원 자료획득

본 연구에서는 20-40세 사이의 임의의 대상자 102명 (남자 70명, 여자 32명)에 대하여 얼굴의 3차원 형상 자료를 얻었다. 대상자는 가장 활발한 생산연령층을 고려하여 결정하였고, 대학생, 대학원생, 사무직 근로자가 포함되었다. 측정시 대상자의 나이를 조사하였다. 얼굴의 3차원 측정에 사용된 3차원 레이저 스캐너는 RAPID 3D digitizer (3030R-GC/PS, Cyberware, U.S.A)였고, 얻어진 얼굴의 3차원 형상은 Silicon graphics에서 캐드 형식의 파일 (DXF)로 전환하여 3차원 좌표를 읽어 형상해석에 이용하였다.

2. 얼굴의 표지점 선정

얼굴의 3차원 형상해석을 위해 10개의

표지점을 선정하였다. 10개의 표지점은 호흡보호구와 접촉되는 부분인 코뿌리점 (sellion, SE), 오른쪽과 왼쪽 앞눈물능선점 (maxillofrontale, MF), 오른쪽과 왼쪽 위턱점 (maxillary point, MX), 오른쪽과 왼쪽 중간뺨점 (middle cheek point, MCK), 오른쪽과 왼쪽 결절점 (tuberculare, TB), 턱끝 용기점 (gnathion, GN)이었다 (Figure 1).

연구대상의 남자 70명과 여자 32명에 대한 각 표지점의 3차원 좌표를 AutoCAD 프로그램에서 읽은 후 중첩 (superimposition)하여 형상 해석에 이용하였다.

1) 얼굴의 3차원 형상해석 (shape analysis)

본 연구에서는 형상해석을 위해 프로크루스테스 분석 (Procrustes analysis)을 실시하였다. 이 방법은 2차원 또는 3차원으로 측정된 형상을 병진 (translating), 회전 (rotating), 크기조절 (rescaling)을 통해 각 좌표점을 중첩한 후, 형상의 변이를 측정하거나 다변량 분석 등을 통해 형상

을 정량화하는 방법이다.

각각 측정된 자료의 좌표점을 하나로 겹치는 것을 중첩이라고 하는데, 중심크기인 S(X)에 대하여 병진, 회전, 크기조절을 통해 총 제곱합 (total sum of squares)이 최소가 되도록 하는 방법이다. 주로 Generalized Procrustes Analysis 알고리즘을 이용한다 (Dryden & Mardia, 1998).

2) 통계분석

3차원 자료의 형상해석은 프로크루스테스 분석을 이용하였다. 이를 위해서 PAST 1.12 프로그램 (PAleological STatistics)을 상용하였다. 대상자 102명의 10개 표지점을 중첩하여 프로크루스테스 분석을 수행하였다. 프로크루스테스 분석에서 얻은 중첩자료를 이용하여 얼굴의 3차원 자료에 대한 군집분석을 수행하였고, 얼굴길이 측정은 3차원으로 측정된 자료를 이용하여 엑셀 프로그램 (Microsoft® Excel 2002)을 이용하여 거리를 계산하였다. 남녀간 얼굴 형상차이를 알아보기 위한 판별분석과 얼굴형 분류를 위한 군집분석은 SAS (version 8.01) 통계프로그램을 이용하였다. 군집분석에서 군집수를 결정하기 위하여 본 연구에서는 cubic clustering criterion (이하 CCC)을 적용하였다 (김기영과 전명식, 1998).

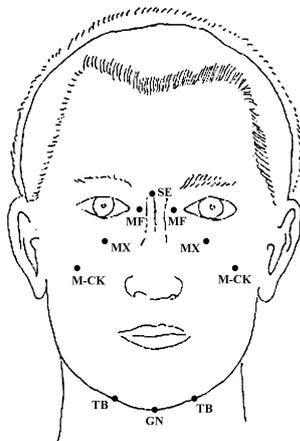
III. 결 과

1. 일반적인 특성

본 연구에 참여한 대상자 중 남자 70명과 여자 32명의 나이는 각각 평균 25.80±6.15세, 20.31±3.35세였다. 대상자 102명의 얼굴길이는 남녀 각각 122.38±5.54mm, 113.25±4.79mm였다 (Table 1).

2. 얼굴에 대한 성별 형상해석의 차이 분석

Figure 2는 3차원 스캐너로 측정된 70명의 남자 얼굴 (A)과 32명의 여자 얼굴 (B) 자료에서 획득된 10개 표지점에 대한



Definition of landmarks

- SE(sellion) : the deepest landmark located on the bottom of the nasofrontale angle.
- MF(maxillofrontale) : at the base of the nasal root medially from each endocanthion, close to the bony maxillofrontale of the medial margin of each orbit, where the maxillofrontal and nasofrontal sutures meet.
- MX (maxillary)point : the point which is located 1-cm below the midpoint of low margin of orbit.
- M-CK(middle cheek) point: the mid-point of zygomaticomaxillary suture.
- TB(tuberculare) : the point of mandibular tubercle.
- GN(gnathion) : the lowest median landmark on the lower border of the mandible. It is identified by palpation and is identical to the bony gnathion. This landmark is the lowest point used in measuring facial height.

Fig. 1. Selected landmarks of face for three dimensional shape analysis.

Table 1. General characteristics of 102 subjects

| Characteristics | Sub-classification | | Results |
|-----------------|--------------------|--------|-------------|
| Subject | Age (yrs.) | Male | 25.80±6.15 |
| | | Female | 20.31±3.35 |
| | Face length (mm) | Male | 122.38±5.54 |
| | | Female | 113.25±4.79 |

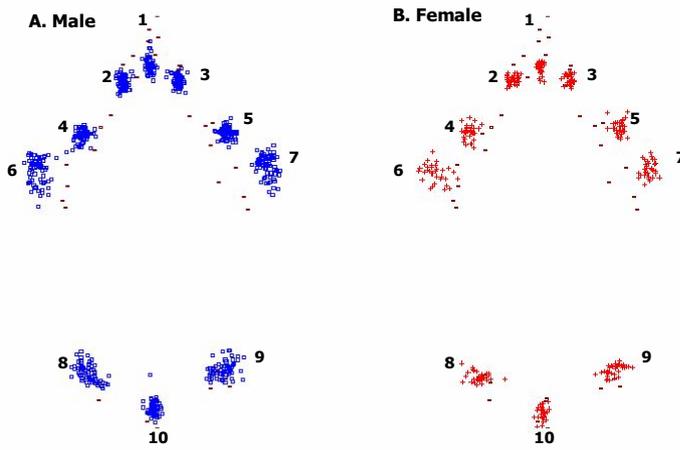


Fig. 2. Procrustes superimposition of 10 landmarks for 70 male (A) and 32 female faces (B) with 4 commercial half-mask respirators (bar).

3차원 좌표를 중첩하여 프로크루스테스 분석을 수행한 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 10개 표지점의 번호는 코뿌리점 (SE), 오른쪽과 왼쪽 앞눈물능선점 (MF), 오른쪽 및 왼쪽 위턱점 (MX), 오른쪽 및 왼쪽 중간뺨점 (MCK), 오른쪽과 왼쪽 결절점 (TB), 턱끝융기점 (GN) 순이다.

본 연구의 대상자인 남자 70명과 여자 32명의 얼굴자료를 이용하여 판별분석을 수행한 결과, Figure 3과 같은 결과를 얻었다. 오차율 (error rate)은 여자 0.0313, 남자 0.0286, 평균 0.0299로 나타났다.

3. 군집분석을 통한 얼굴의 형 분류

1) 얼굴형 분류

Figure 4는 대상자 102명 얼굴의 10개 표지점을 토대로 한 군집분석결과이다. 얼굴의 3차원 자료에 대한 군집분석은 향후 한국인을 위한 반면형 호흡보호구를

디자인하고자 할 때 사용하기 위한 얼굴형 분류에 이용하고, 호흡보호구 개발품

을 시판하기 위해 실시되고 있는 기존의 test panel과는 구별되는 3D test panel을 제안하기 위한 자료이다.

얼굴 형상은 크게 4가지 형태로 분류된다고 볼 수 있는데, 주로 남자, 여자 모두 거의 두 그룹씩 집중되어 있었다. A형은 거의 대부분이 여자로 구성되어 있으며, B형은 반대로 대부분이 남자로 구성되었다. C형은 남자와 여자가 섞여 있었으며, D형은 주로 남자로 구성되었으나, 여자도 일부 포함되었다. 남자와 여자 얼굴형 중 남자가 여자의 얼굴형을 또는 여자가 남자의 얼굴형을 갖고 있는 경우가 있는 것으로 나타났다.

호흡보호구 디자인이나 제품개발 및 test panel 구성을 위한 각 type별 형태는 Figure 5와 같다. 호흡보호구 디자인이나 제품개발을 위한 각 타입별 형태는 A형은 얼굴에 굴곡이 많지 않은 밋밋한 타원형, B형은 얼굴전체에 굴곡이 많고 긴 타원형, C형은 둥근 타원형, D형은 턱이 밋밋하고 긴 타원형 얼굴이다.

2) 얼굴형 분류의 타당도

군집분석 결과 나타난 얼굴형 분류의 타당도를 검증하기 위하여 전체 102명중 70명을 무작위로 선정한 후, 70명에 대한 군집분석결과와 102명 전체에 대해 실시

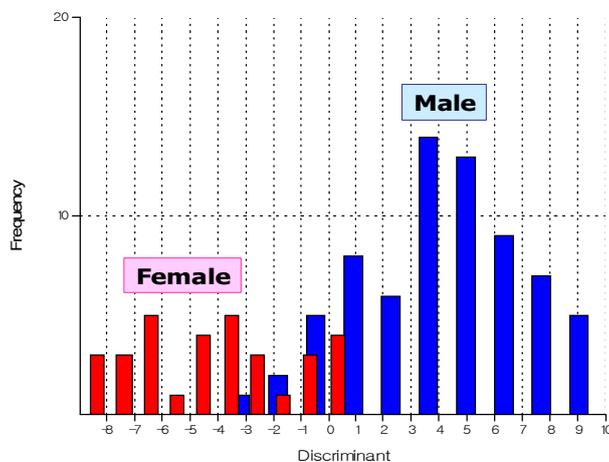


Fig. 3. Comparison of facial shapes of 70 males and 32 females by discriminant analysis.

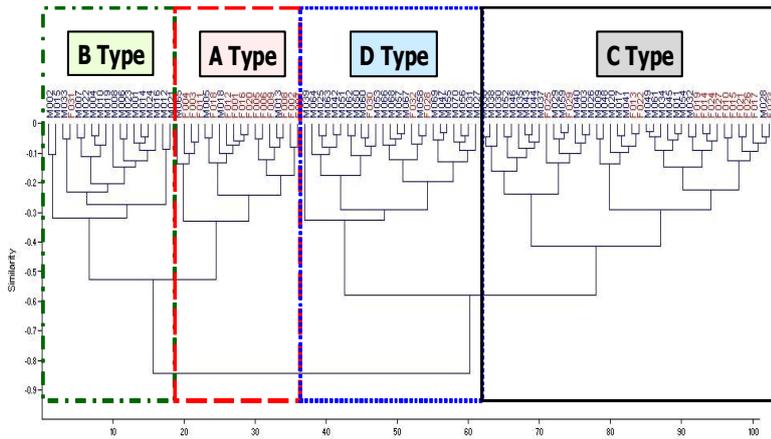


Fig 4. The results of cluster analysis for classifying 102 subjects.

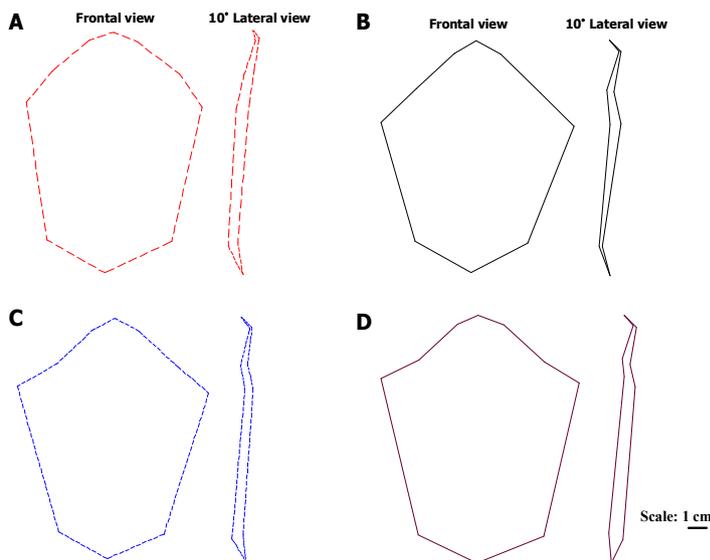


Figure 5. Four half-mask respirator shapes modeled by cluster analysis for the facial shapes of Koreans (type A : Flat round elliptic faces, type B : Bendy long elliptic faces, type C : Round elliptic faces, type D : Flat chin and long elliptic faces).

된 군집분석결과를 비교하였다. 102명에 대한 군집분석결과를 참값으로 보고, 70명에 대한 군집분석결과를 실제 실험값으로 하여 A, B, C, D 형 얼굴로 분류된 민감도 (sensitivity), 특이도 (specificity), 위음성 (false negative), 위양성 (false positive) 및 유효도 (efficiency)를 측정하였다. 측정 공식은 Figure 6과 같고, 각 얼굴형별 민감도, 특이도, 위음성, 위양성 및 유효도는 Table 2와 같다. A, B, C, D 형의 유효도는 각각 97.10%, 97.10%, 79.71%, 82.61%로, C형의 유효도가 제일 낮았고 A, B형의 유효도는 매우 높게 나타났다.

4. 얼굴의 3차원 자료를 이용한 신개념 3D test panel 개발

군집분석 결과에서 나타난 얼굴형 (Figure 4)과 얼굴길이자료를 이용하여 반면형 호흡보호구의 적합성 검정을 수행하기 위한 3D test panel을 개발하고자 하였다.

얼굴의 3차원 자료를 이용한 적합성 검정용 test panel의 개발은 Hack 등 (1974)에 의해 미국에서 30여년전 개발된 test panel 방식을 모방하되, 각 x, y축에 있는 입술길이 또는 얼굴폭과 얼굴길이 대신 x축에는 얼굴형을 구분하여 사용함으로써 얼굴에 대한 전체적인 형상정보를 갖게 하고, y축에는 얼굴형에서 제외된 크기정보 중 얼굴길이를 이용하였다. 이를 통하여 길이와 형상에 대한 얼굴의 3차원적 모든 정보가 망라된 새로운 개념의 3D test panel을 구현하고자 하였다.

전체 얼굴형은 A, B, C, D 네 가지로 구분하고, 얼굴크기는 코뿌리점에서 턱끝 융기점까지의 좌표값을 이용하여 측정된

Table 2. Assessment of efficiency by cluster analysis

(Unit : %)

| Type | Sensitivity | Specificity | False Pos. | False Neg. | Efficiency |
|------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| A | 100.00 | 96.61 | 0.00 | 16.67 | 97.10 |
| B | 85.71 | 100.00 | 3.51 | 0.00 | 97.10 |
| C | 88.89 | 76.47 | 4.88 | 42.86 | 79.71 |
| D | 59.26 | 97.62 | 21.15 | 5.88 | 82.61 |

| | | True | | Sensitivity=K/K+L Specificity=N/M+N False Negative=L/L+N False Positive=M/K+M Efficiency=(K+N)/(K+L+M+N) |
|--------|---|------|---|--|
| | | + | - | |
| Actual | + | K | L | |
| | - | M | N | |

Fig. 6. Classification table and index.

| | | Face shape | | | |
|------------------|------------|-------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | A | B | C | D |
| Face length (mm) | 133.5 | 2M (2.90%) | 2M (2.90%) | 8M (11.59%) | 5M (7.25%) |
| | 126.1 | 2T (1.98%) | 2T (1.98%) | 8T (7.92%) | 5T (4.95%) |
| | 118.6 | 2M (2.90%) | 8M (11.59%) | 15M (21.74%) 2F (6.25%) | 9M (13.04%) |
| | 111.2 | 2T (1.98%) | 8T (7.92%) | 17T (16.83%) | 9T (8.91%) |
| | 103.7 | 8F (25.00%) | 7M (10.14%) 1F (3.13%) | 4M (5.80%) 8F (25.00%) | 7M (10.14%) 2F (6.25%) |
| | 103.7 | 8T (7.92%) | 8T (7.92%) | 12T (11.88%) | 9T (8.91%) |
| | 103.7 | 6F (18.75%) | | 2F (6.25%) | 3F (9.38%) |
| 103.7 | 6T (5.94%) | | 2T (1.98%) | 3T (2.97%) | |

Fig. 7. Distribution of 101 subjects by face sizes and shapes.

거리를 이용하였다 (Figure 7). 얼굴형 4가지와 얼굴크기 4가지, 즉 16개의 박스로 나누어 각각의 구획에 속하는 대상자들을 선정하였다. 실제 test panel에서는 최저 얼굴길이는 여자 32명의 평균 얼굴길이 113.25mm에서 2배의 표준편차를 뺀 103.7mm로 하고, 최고 얼굴길이는 남자 70명의 평균 얼굴길이 122.38mm에서 2배의 표준편차를 더한 133.5mm로 하여 총 102명중 남자 1명이 제외된 101명으로 그 분포를 조사하였다.

분포를 살펴보면, 남자는 C형 얼굴에 얼굴길이가 118.6mm-126.1mm인 대상자가 21.74%로 가장 많았고, 여자는 A형과 C형에서 얼굴길이가 111.2mm-118.6mm인 경우가 각각 25.00%로 가장 많았다. 총

대상자수는 C형 얼굴에 얼굴크기가 118.6mm-126.1mm에서 16.83%로 가장 많았다.

기존의 Hack 등 (1974)이 test panel을 구성하기 위한 panelist의 수는 남자 13명, 여자 12명으로 총 25명으로 구성되어 있다. 이 방법을 그대로 적용할 경우 인구 구성비에서 차이가 나기 때문에 총 백분율을 구한 후, 남녀 각각 13명, 12명에 해당되는 인구수를 계산하였다. 단, 전체 16개 박스 중 인구구성비가 3%이하의 구획 6개를 제외한 10개 박스에 대한 인구수를 계산하였다. 그 결과 Figure 8과 같은 test panel을 구성하였다.

25인으로 구성된 test panel이 남녀 각각 13, 12인을 대상으로 한 것과 달리 실제 작업현장에서 호흡보호구를 착용하

는 근로자의 대부분이 남자이고 여성 작업자는 드물다는 점에 착안하여 구성된 남성 근로자만을 위한 16인의 test panel은 Figure 9와 같다.

반면형 호흡보호구를 위한 남자의 얼굴형상은 대부분 B, C, D형으로 요약될 수 있고, 얼굴크기 또한 25인의 test panel에서 작은 크기를 제외한 나머지 3가지 크기로 요약되었다. 9개 박스로 구성되어 있으나 B형의 126.1mm-133.5mm 얼굴크기를 가진 대상자는 없었으므로 결국 8개 박스에 해당되는 panelist로 구성되었다.

IV. 고 찰

3차원으로 구성된 얼굴 정보를 단지 1차원의 길이자료로 표현하는 것은 많은 정보를 잃게 될 가능성이 있다. 기존에 개발되었던 test panel은 그런 점에서 호흡보호구의 밀착 적합성 검정의 조건을 충족시키는 대표 인구집단으로 부적합할 수밖에 없다.

Test panel 구성에 따른 문제점을 보고한 NIOSH (2002)는 Hack 등 (1974)이 개발한 LANL (Los Alamos National Laboratory)의 test panel은 군인을 대상으로 측정된 자료이기 때문에, 일반 시민들과 다르다는 점을 지적하였다. 또 군인집단과 비교했을 때 LANL의 전면형 호흡보호구용 test panel은 현재 일반시민의 84.0%만이 해당된다고 하였다.

Test panel에 대한 기존 연구결과를 살펴보면, 모두 길이자료만을 이용하였다. 어떤 자료가 호흡보호구의 밀착 적합성 검정결과와 관련이 있다고 하더라도 길이자료 상호간에 상관성을 갖고 있는 경우가 많기 때문에 길이 자료만으로 호흡보호구의 밀착 적합성 결과와 관련성을 보는 것은 제한된 자료일 수밖에 없다. 이러한 이유 때문에 얼굴에 대한 정보 중 크기자료만으로 짜여진 test panel은 대표성면에서 문제가 있다. 즉 얼굴이 갖고 있는 굴곡은 무시된 채 크기자료 특히, 길이자료만으로 구성된 test panel은 얼굴 정보를 대표할 수 없다.

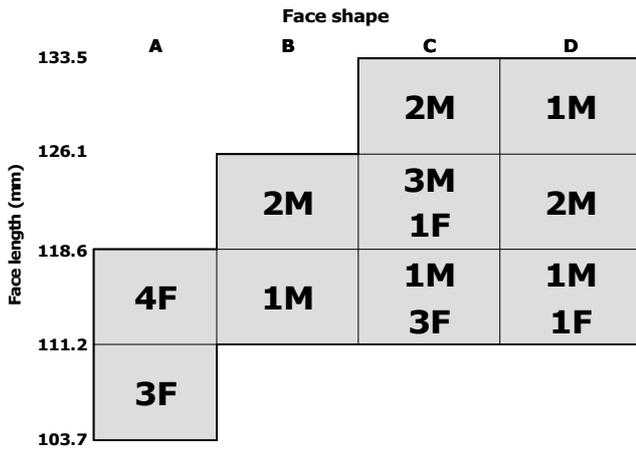


Fig. 8. Male and female, 3D test panel of 25 members for half-mask respirator.

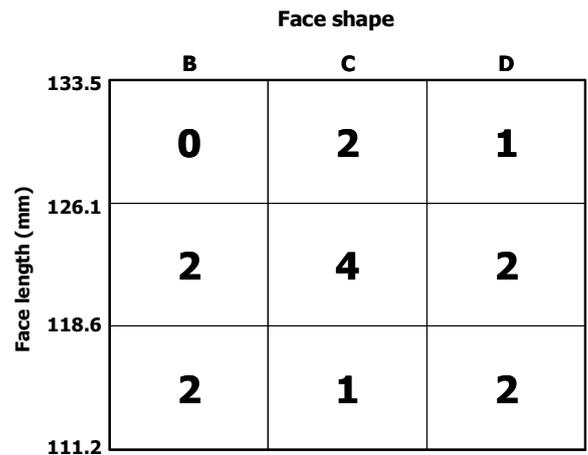


Fig. 9. 3D test panel of Sixteen-male for half-mask respirators.

개발된 호흡보호구의 시판을 결정하기 위한 test panel의 구성은 호흡보호구를 착용해야 할 대상자의 대표집단을 정확히 표현해야 한다는 점에서 그 중요성을 갖는다고 할 수 있다. 그러므로 test panel은 3차원으로 구성된 얼굴에 대한 정보가 최대한 포함되어야 한다.

본 연구에서는 한국인의 얼굴자료를 3차원으로 측정하여 3차원 자료를 가장 적절히 표현할 수 있는 것으로 알려진 프로크루스테스 알고리즘을 이용하여 형상해석을 수행하고, 길이자료중 반면형 호흡보호구의 크기를 대표할 수 있는 얼굴길이자료를 이용하여 기존 test panel을 대체할 3차원 (3D) test panel을 개발하였다.

남·여간 얼굴형상에 차이가 있는지 살피기 위하여 판별분석을 수행하고, 대상자 102명의 얼굴형을 분류하기 위하여 군집분석을 수행하였다. 그 결과 남·여간 얼굴형상에 차이가 있는 것으로 나타났으며, 얼굴형은 4가지로 구분할 수 있었다. 4가지 얼굴형은 A형은 얼굴에 굴곡이 많지 않은 뾰족한 타원형, B형은 얼굴 전체에 굴곡이 많고 긴 타원형, C형은 둥근 타원형, D형은 턱이 뾰족하고 긴 타원형 얼굴이었다. 얼굴형 구분은 향후 한국인을 위한 반면형 호흡보호구를 디자인하거나 test panel을 재구성하는데 활용될 수 있을 것이다.

기존 test panel은 전면형의 경우 x축에

얼굴폭, y축에 얼굴길이를 두었으며, 반면형은 x축에 입술길이, y축에 얼굴길이를 두었다 (Hack 등, 1974; 한돈희, 1999). 그러나 반면형 호흡보호구용 3D test panel 개발을 위한 본 연구에서는 y축의 얼굴길이자료는 그대로 두고, x축에 입술길이 대신 3차원 형상분석결과 얻어진 얼굴형 자료를 두었다.

본 연구의 대상자인 남자 70명과 여자 32명의 얼굴길이는 각각 $122.4 \pm 5.5\text{mm}$, $113.3 \pm 4.8\text{mm}$ 였으며, 이는 한국인 남자 $120.1\text{-}120.6\text{mm}$, 여자 $109.5\text{-}111.0\text{mm}$ (Han 등, 1997; 한국표준과학연구원, 1998; 윤훈용과 정성길, 2002; Kim 등, 2003)과 통계적인 유의한 차를 보이지 않았다 ($p > 0.05$). 이는 본 연구에 참여한 대상자가 일반적인 한국인의 얼굴범위를 크게 벗어나지 않는다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있을 것이다. 참고로 미국인은 남자 $113.7\text{-}126.0\text{mm}$, 여자 $106.3\text{-}118.0\text{mm}$ (Anthropology Branch, 1967; Liau et al., 1982; Gross와 Horstman, 1990; Oestenstad와 Perkin, 1992; Brazile et al., 1998)로 나타났다. 이는 여러 인종에 대한 결과이므로 본 연구의 한국인 얼굴자료와 단순 비교 할 수는 없었다.

한돈희 (1999)가 개발한 한국인을 위한 test panel은 Hack 등 (1974)의 연구결과와 동일한 시스템하에서 얼굴길이와 얼굴폭 또는 입술길이의 인체측정학적 길이자료

가 미국자료와 차이가 있음을 증명함으로써 한국인에게 적용 가능한 test panel을 소개하였다. 이 연구는 각 인종 간 또는 민족 간 길이자료만으로도 차이가 있음을 증명했다는 점에서, 그리고 미국에서 개발된 test panel을 한국인에게 적용하는데 한계가 있음을 보여주었다는 점에서 의의가 있다.

지금까지 개발된 test panel의 한계점을 극복하기 위해서는 3차원 자료의 이용이 불가피할 것이다. 그런 관점에서 볼 때 3차원 자료에 대한 올바른 해석은 3차원 자료의 획득 못지않게 중요성을 갖는다. 본 연구에서 개발된 신개념 3D test panel은 3차원 자료의 획득 및 해석을 통해 개발된 것으로서 앞으로 한국인의 반면형 호흡보호구를 위한 test panel로 활용가치가 충분하다고 생각된다.

그러나 본 연구에서 개발된 3D test panel은 한국인에게만 적용이 가능하므로, 서양인은 물론 같은 아시아인이라고 하더라도 일본인, 중국인은 한국인과 얼굴형에서 다를 수 있으므로 적용이 제한적일 것이다. 그러나 다른 민족 또는 인종에 대한 3차원 자료를 얻게 된다면 같은 연구과정을 거쳐 3D test panel을 개발할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서 개발된 3D test panel은 아직 타당성 조사가 아직 완료되지 않았으므로 앞으로 연구가 계속되어야 할 필요성이 있

다. 또 전면형 호흡보호구에 대한 3D test panel 개발 또한 필요할 것으로 생각된다.

V. 결 론

본 연구는 얼굴의 3차원 자료를 이용하여 호흡보호구의 밀착 적합성 검정을 위한 신개념의 3D test panel을 제안하고자 하였다. 얼굴의 3차원 자료는 3차원 레이저 스캐너를 이용하였고, 대상자는 남자 70명과 여자 32명을 포함해 총 102명이었고, 수집된 자료는 형상해석을 위한 프로크루스테스 알고리즘을 이용하였다.

결과는 다음과 같다.

1. 남녀간 얼굴형상은 통계적으로 유의하게 다른 것으로 나타났고, 오차율은 2.99%이었다.

2. 대상자 102명의 얼굴형상은 군집분석에 의해 4가지 형으로 분류되었다. 4가지 형의 얼굴은 얼굴에 굴곡이 많지 않은 밋밋한 타원형 (A형), 얼굴전체에 굴곡이 많고 긴 타원형 (B형), 둥근 타원형 (C형), 턱이 밋밋하고 긴 타원형 얼굴 (D형)로 구분되었다.

3. 신개념 3D test panel은 얼굴형과 길이자료가 포함된 형태로 개발되었다. x축에는 형상정보를 반영하였고, y축에는 얼굴길이 103.7-133.5mm를 4 그룹으로 분류하였다.

본 연구에서는 한국인을 위한 호흡보호구 개발에 앞서 호흡보호구 검정에 활용하기 위한 대표피검인구집단 구성을 위해 신개념 3D fit test panel을 개발하였다. 신개념 3D test panel은 길이정보뿐 아니라 형상정보가 모두 포함되었다. 향후 같은 개념을 적용하여 다른 얼굴형상을 가진 타 인종을 위한 3D test panel의 개발도 가능할 것이다.

REFERENCES

- 김기영, 전명식. SAS 군집분석. 서울 : 자유아카데미. 1998.
- 김현욱, 김강윤. 호흡보호구 디자인을 위한 삼차원 얼굴인식 및 측정에 관한 고찰. 한국산업위생학회지 2001; 11(2): 92-101
- 노동부. 보호구 성능검정 규정 고시(노동부고시 제2003-19호 2003. 7. 11). 노동부
- 윤훈용, 정석길. 한국 성인의 머리 및 얼굴부위 측정치에 관한 연구. IE interface. 2002 ; 15(2) : 199-208
- 한국표준과학연구원. 산업제품의 표준치 측정을 위한 국민표준체위 조사 보고서. 국립기술품질원. 1998.
- 한돈희. 호흡기보호구의 밀착도 검사와 안면규격 Panel의 개발. 한국산업위생학회지. 1999; 9(1): 1-13
- 한돈희, 최국렬. 한국인의 얼굴체형에 알맞은 반면형 마스크의 개발 (1) - 얼굴치수와 밀착정도의 관계. 한국산업위생학회지. 2002; 12(1): 46-54
- Adams DC, Rohlf FJ, Slice DE. Geometric morphometrics: Ten years of progress following the 'Revolution'. [cited 2003. Mar.] Available from: URL:<http://life.bio.sunbs.edu/morph>
- Brazile WJ, Buchan RM, Sandfort DR, Melvin W, Johnson JA, Charney M. Respirator fit and facial dimensions of two minority groups. Appl Occup Environ Hyg 1998; 13(4): 233-237
- Chen C-W, Yeh W-Y, Chen Y-K. Determination of critical facial dimensions affecting the fit factor of a half-mask respirator. [cited Sep. 2003] Available from: URL:<http://www.iosh.gov.tw/data/f16/shp713pdf>
- Chen SYY, Lestrel PE, Kerr WJS, McColl JH. Describing shape changes in the human mandible using elliptical Fourier functions. Eur J Orthod 2000; 22: 205-516
- Coblentz A, Mollard R, Ignazi G. Three-dimensional face shape analysis of French adults, and its application to design of protective equipment. Ergonomics, 1991; 34(4): 497-517
- Dryden IL, Mardia KV. Statistical Shape Analysis. Wiley. 1998, pp 81-108
- Ferrario VF, Sforza C, Poggio CE, D'Addona A, Taroni A. Fourier analysis of cephalometric shapes. Cleft Palate-Craniofacial J 1996a; 33(3): 206-212
- Ferrario VF, Sforza C, Guazzi M, Montorsi F, Taroni A. Effect of growth and development on human soft tissue facial shape: A Fourier analysis. Int J Adult Orthod Orthognath Surg 1996b; 11: 155-163
- Ferrario VF, Sorza C, Pizzini G, Vogel G, Miani A. Sexual dimorphism in the human face assessed by euclidean distance matrix analysis. J Anat. 1996c; 183: 593-600
- Ferrario VF, Sforza C, Miani A, Pizzini G. A size-standardized analysis of soft tissue facial profile during growth. Am J Orthod Dentofac orthop 1997; 112: 28-33
- Ferrario VF, Sforza C, Schmitz JH, Miani A, Serrao G. A three-dimensional computerized mesh diagram analysis and its application in soft tissue facial morphology. Am J Orthod Dentofacial Orthod 1998; 114(4): 404-413
- Hack AL, Hyatt EC, Held BJ, Moore TO, Richards CP McConville JT. Selection of respirator test panels representative of U.S. adults facial size. Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, NM, 1974
- Hack AL, McConville JT. Respirator protection factors: Part I - Development of an anthropometric test panel. Am Ind Hyg Assoc J 1978; 39(12): 970-9
- Han DH, Willeke K, Colton CE. Quantitative fit testing techniques and regulations for tight-fitting respirators: Current methods measuring aerosol or air leakage and new developments. Am Ind Hyg Assoc J 1997 ; 58(3) : 219-228
- Hennessy RJ, Stringer CB. Geometric morphometric study of the regional

- variation of modern human craniofacial form. *Am J Phys Anthropol* 2002; 117: 37-48
- Hennessy RJ, Kinsella A, Waddington JL. 3D laser surface scanning and geometric morphometric analysis of craniofacial shape as an index of Cerebro-Craniofacial morphogenesis: initial application to sexual dimorphism. *Biol Psychiatry* 2002; 51: 507-514
- Kim HW, Han DH, Roh YM, Kim KY, Park YG. Anthropometric dimensions of Koreans and their associations with fit of quarter-masks respirators. *Industrial Health* 2003; 41: 8-18
- Lele S, Richtsmeier JT. Euclidean distance matrix analysis: A coordinate-free approach for comparing biological shapes using landmark data. *Am J Phys Anthropol* 1991; 86(3): 415-427
- Lestrel PE. Some approaches toward the mathematical modeling of the craniofacial complex. *J Craniof Gen Devel Biol* 1989; 9: 77-91
- Liau YH, Bhattacharya A, Ayer H, Miller C. Determinations of critical anthropometric parameters for design of respirators, *Am Ind Hyg Assoc J* 1982; 43(12): 897- 899
- Lovesey EJ. The development of a 3-dimensional anthropometric measuring technique. *Appl Ergonomics* 1974; 5.1: 36-41
- Lowe BF, Phillips C, Lestrel PE, Fields HW. Skeletal jaw relationships: a quantitative assessment using elliptical Fourier functions. *Angle Orthod* 1994; 64: 299-310
- Meunier P, Tack D, Ricci A, Bossi L, Angel H. Helmet accommodation analysis using 3D laser scanning. *Appl Ergo* 2000; 31: 361-369
- NIOSH. Agency Forms Undergoing Paperwork Reduction Act Review: Anthropometric Survey of Respirator Users-New. Available from: URL:<http://www.cdc.gov.niosh/02-23>
- Oostenstad RK, Dillion HK Perkins LL. Distribution of face seal leak sites in a half-mask respirator and their association with facial dimensions. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1990; 51(5): 285-290
- Oostenstad RK, Perkins LL. An assessment of critical anthropometric dimensions for predicting the fit of a half mask respirator. *Am Ind Hyg Assoc J* 1992; 53(10): 639-644
- O'Grady KF, Anthonyshyn OM. Facial asymmetry: Three-dimensional analysis using laser surface scanning. *Plas Reconstr Surg* 1999; 104(4): 928-937
- Ratnaparkhi MV, Ratnaparkhimm, Robinette KM. Size and shape analysis techniques for design. *Appl Ergo* 1992; 23(3): 181-185
- Robinette KM. Fit testing as a helmet development tool. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting*, 1993. 69-73
- Rohlf FJ, Slice D. Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Syst Zool* 1990; 39(1): 40-59
- Rohlf FJ. Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces. *J Class* 1999; 16: 197-223
- Tangchaitrong K, Messer LB, Thomas CDL, Townsend GC. Fourier analysis of facial profiles of young twins. *Am J Phys Anthropol* 2000; 113: 369-379
- Taylor S. Euclidean distance matrix analysis and MBU-20/P oxygen mask fit. In Mardia KV, Gill CA, Dryden IL, editors, *Proceedings in Image Fusion and Shape Variability Techniques*, pages 220-221, Leeds. University of Leeds Press pp. 220-221
- Whitstone JJ. Design and evaluation of helmet systems using 3D data. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting*, 1993. 64-68