

# An Estimation Method of Representative Humanoids for Digital Human Simulation

Kihyo Jung

School of Industrial Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 680-749

## ABSTRACT

**Objective:** The present study developed an estimation method of boundary zone representative humanoids(hereafter, *EBZ* method) using descriptive statistics on the design target population. **Background:** The boundary zone method(hereafter, *BZ* method) generates representative humanoids at a boundary zone that statistically accommodates a designated percent of the design target population; however, the *BZ* method has a practical limitation because it requires a large scale anthropometric database on the design target population. **Method:** The *EBZ* method developed in the present study consisted of 3 steps. In the first step, the boundary zone of accommodating a designated percent(e.g., 90%) is formed under the assumption of normal distributions for anthropometric sizes. In the second step, cases that fall within the boundary zone are estimated using descriptive statistics(mean, standard deviation, and covariance) on the design target population. In the last step, K-mean cluster analysis is conducted for the cases, and representative humanoids are selected from each of clusters. **Results:** Evaluation results showed that mean accommodation percent of the *EBZ* method was 90.9%(range: 90.8~91.1%) which is similar to the target percent(90%). In addition, standard deviation of accommodation percent for 100 repetitions was 0.1%. Lastly, the number of representative humanoids generated by the *EBZ* method( $n = 20$ ) was similar to the *BZ* method( $n = 16$ ). **Conclusion:** The *EBZ* method can generate representative humanoids which accommodate a designated percent of the design target population using descriptive statistics. **Application:** The *EBZ* method can be utilized in the generation of humanoids for ergonomic design and evaluation of products when the large scale anthropometric database on the design target population is not existed.

Keywords: Representative humanoid, Digital human simulation, Estimated boundary zone method, Multivariate accommodation

## 1. Introduction

가상환경상 인간공학적 평가 기술(digital human simulation; 이하, *DHS*)은 제품의 사용성을 향상시키고 설계 과정의 효율성을 제고시킬 수 있다. *DHS*는 대표인체모델과 설계 대상 제품 간의 상호작용을 컴퓨터 상에서 평가하여 설계상의 문제를 조기에 발견 및 보완할 수 있게 한다(Ryu et

al., 2004; Nelson, 2001; Jimmerson, 2001; Thompson, 2001). 그로 인해, *DHS*는 순환적 설계 과정을 단축시킴으로써 신속하고 경제적으로 사용자 친화적인 제품을 개발할 수 있게 한다(Chaffin, 2001).

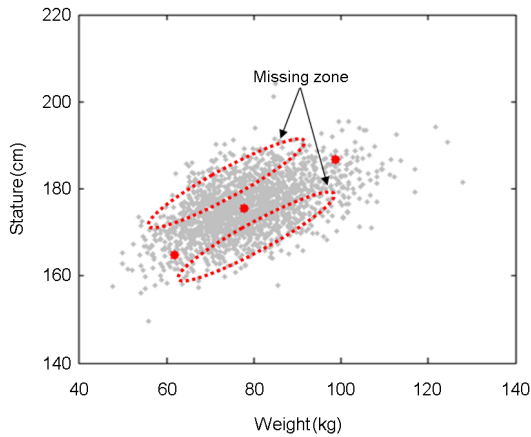
가상환경상 평가를 위한 대표인체모델은 백분위 기법(percentile method)을 이용해 생성되고 있다. 백분위 기법은 백분위(예: 95<sup>th</sup> percentiles)로 대표인체모델의 크기를 결정하기 때문에 대표인체모델 생성 절차가 간단하고 생성

Corresponding Author: Kihyo Jung, School of Industrial Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 680-749.

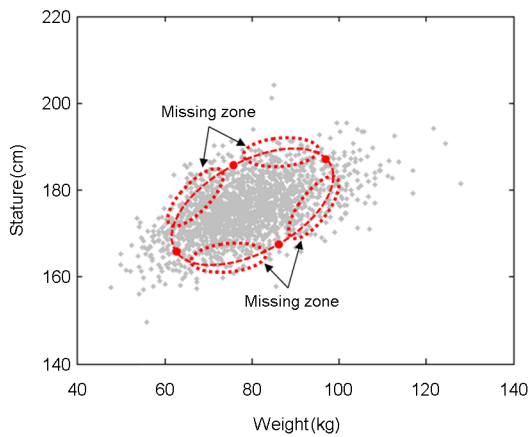
Mobile: +82-10-5526-6381, E-mail: [kjung@ulsan.ac.kr](mailto:kjung@ulsan.ac.kr)

Copyright©2013 by Ergonomics Society of Korea(pISSN:1229-1684 eISSN:2093-8462). All right reserved.

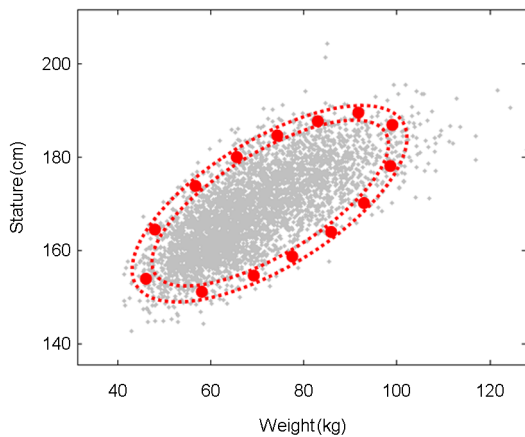
©This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. <http://www.esk.or.kr>



(a) Percentile representative humanoids



(b) Boundary representative humanoids



(c) Boundary zone representative humanoids

**Figure 1.** Comparison of representative humanoid generation methods (large dot: representative humanoids, small dot: design target users, source of raw data: Gordon et al. (1988))

개수(예: 3명)가 적은 장점이 있다(HFES 300, 2004). 그러나 백분위 기법은 Figure 1.a에 나타난 것과 같이 사용자의 다양한 인체크기를 대표하지 못하는 한계점이 있다(Roebuck et al., 1975; Porter et al., 2004).

백분위 기법의 한계점을 보완하기 위해 목표 비율(예: 90%)의 설계 대상 사용자를 포함하는 경계선에서 대표인체 모델을 생성하는 기법(boundary method; 이하, *Boundary* 기법)이 개발되고 있다(Bittner et al., 1987; Meindl et al., 1993; Kim and Whang, 1997; Bittner, 2000). Boundary 기법은 Figure 2에 나타난 것과 같은 3단계 절차를 통해 대표인체 모델을 생성한다. 첫째 단계는 효율적으로 대표인체 모델을 생성하기 위해 자료 축약 기법(예: factor analysis)을 이용하여 인체변수를 소수(예: 2~3개)의 공통요인으로 축약한다. 둘째 단계는 선정된 공통요인 공간에서 목표 비율의 사용자를 포함하는 사각형의 경계선을 형성하고, 경계선의 모서리에 위치한 사용자를 대표인체모델로 결정한다. 마지막 단계는 공통요인 공간에서 정의된 대표인체모델의 크기를 공통요인과 인체변수 간의 통계적 연관관계를 나타내는 요인적재량을 이용하여 인체크기로 변환한다.

Boundary 기법은 2가지 측면의 한계점이 있다. 첫째, Boundary 기법은 효율적인 대표인체모델 생성을 위해 자료 축약 기법을 이용하여 설계 대상 사용자의 인체크기 분포를 대부분 설명(예: variance explained = 80%)하는 소수의 공통요인을 추출한다. 그러나 자료 축약 과정에서 인체크기의 손실(예: 20%)이 발생하여 사용자의 인체크기 다양성을 대표인체모델 생성에 반영하지 못하는 한계점이 있다(Jung et al., 2009a; Meunier, 1998). 둘째, Boundary 기법은 Figure 1.b에 나타난 것과 같이 대표인체모델이 부채된 경계선 상의 영역이 존재한다. 그로 인해, 설계 대상 사용자의 다양한 인체크기 특성을 대표하지 못하는 한계점이 있다(Jung et al., 2009a).

최근 들어 Boundary 기법의 한계점을 보완하기 위해 경계 영역에서 대표인체모델을 생성하는 기법(boundary zone method; 이하 *BZ* 기법)이 개발되었으나 방대한 인체측정 원시자료가 필요한 한계점이 있다(Jung et al., 2009a). BZ 기법은 Figure 1.c와 같이 목표한 비율을 포함하는 경계 영역을 통계적 이론에 근거하여 설정한 후 경계 영역 내부에 포함된 사용자 중에서 대표인체모델을 선발한다. BZ 기법은 목표한 비율을 이상적으로 충족하고 경계 영역 전반에 균형 분포된 대표인체모델을 생성함으로써 다양한 사용자의 인체 크기를 대표할 수 있다. 그러나 경계 영역 내부의 사용자 중에서 대표인체모델을 선발해야 하기 때문에 경계 영역 내부에 충분한 사용자가 포함될 수 있도록 인체측정자료가 방대(예:  $n \geq 3,000$ )해야 하는 한계점이 있다.

본 연구는 기술통계자료를 이용하여 설계 대상 사용자의

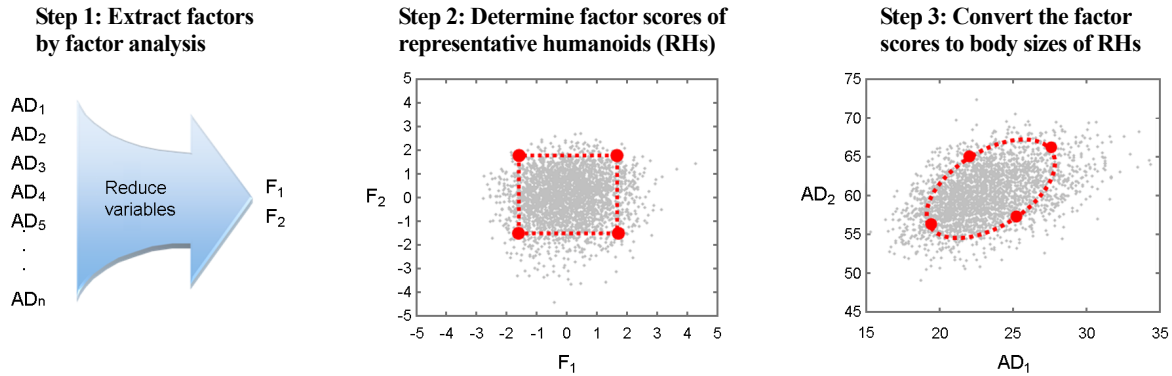


Figure 2. Generation process of boundary representative humanoids using Factor Analysis(AD: anthropometric dimension, F: factor, n: number of anthropometric dimensions; small dot: design target population, large dot: representative humanoids)

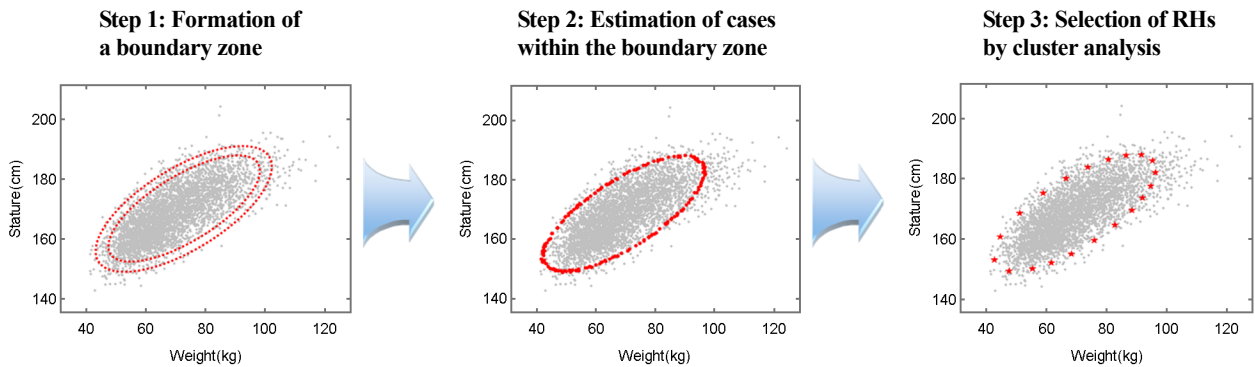


Figure 3. Generation process of estimated boundary zone representative humanoids(dotted line: boundary line, small dot: design target users, large dot: estimated users, star: representative humanoids)

다양한 인체크기를 대표하는 경계 영역 인체모델을 추정하는 기법(estimated boundary zone method; 이하, EBZ 기법)을 개발하였다. EBZ 기법은 설계 대상 사용자의 인체크기에 대한 평균, 표준편차, 그리고 공분산을 이용하여 목표한 비율을 이론적으로 충족하는 대표인체모델을 생성한다. 본 연구는 3가지 척도(수용률, 이상치 비율, 그리고 대표인체모델 개수)를 이용하여 EBZ 기법의 성능을 정량적으로 평가하였다.

## 2. Estimation Method of Boundary Zone Representative Humanoids

본 연구는 Figure 3에 나타난 것과 같은 3단계 절차로 구성된 EBZ 기법을 개발하였다. 첫째 단계는 인체크기에 대한 정규분포 가정에 근간하여 목표 비율을 수용하는 경계 영역

을 형성한다. 둘째 단계는 기술통계자료를 이용하여 경계 영역 내부에 포함되는 사용자를 무작위로 추정한다. 마지막 단계는 경계 영역 내부에 포함된 사용자에 대한 군집분석을 통해 군집의 중앙에 위치한 사용자들을 대표인체모델로 선명한다.

### 2.1 Formation of a Boundary Zone

경계 영역은 목표 비율에 허용 비율을 가감하여 결정되는 2개의 경계선으로 형성된다. 예를 들면, 90% 경계 영역은 목표 비율(90%)에 허용 비율(1%)을 가감하여 결정된 89%와 91% 경계선으로 설정된다. 목표 비율의 사용자를 포함하는 경계선은 정규분포를 따르는 인체크기의 표준화된 제곱 거리(식 1)가 Chi-square 분포를 따른다는 기존 연구(Jung et al., 2009a; Jung et al., 2009b; Johnson and Wichern, 1988)를 적용하여 파악된다. 예를 들면, 인체변수가 2개인 경우 사용자의 89%와 91%를 포함하는 경계선은

식 1에 의해  $\chi^2_2(1-0.89) = 4.41$ 과  $\chi^2_2(1-0.91) = 4.82$ 으로 설정된다.

$$D = (AD - \mu)^T \Sigma^{-1} (AD - \mu) \leq \chi^2_n(1-p) \quad (1)$$

where:  $D$  = normalized squared distance  
 $AD$  =  $n$ -by-1 body size matrix  
 $n$  = number of anthropometric dimensions  
 $\mu$  =  $n$ -by-1 average body size matrix  
 $\Sigma$  =  $n$ -by- $n$  covariance matrix  
 $\chi^2_n(1-p)$  = Chi-squared value for  $n$  degree of freedom and  $p$  probability  
 $p$  = target accommodation percent

## 2.2 Estimation of cases within the Boundary Zone

경계 영역 내부에 포함된 사용자의 추정은 3단계 절차를 통해 이루어진다. 첫째 단계는 설계 대상 사용자에 대한 기술통계자료(평균, 표준편차)를 이용하여 사용자의 인체크기를 무작위로 추정한다. 둘째 단계는 추정된 사용자가 경계 영역 내부에 포함되는지 여부를 기술통계자료(평균, 표준편차, 공분산)와 추정된 사용자의 인체크기를 식 1에 대입하여 판단한다. 예를 들면, 설계 대상 집단의 평균 신장 169cm(표준편차: 9.0), 평균 체중 69kg(표준편차: 13), 그리고 신장-체중 공분산 85일 때 신장과 체중이 170cm와 61kg인 사용자는 표준화된 제곱거리가 2.40로서 경계 영역의 범위(4.41~4.82)를 벗어난다. 반면, 신장과 체중이 180cm와 63kg인 사용자는 표준화된 제곱거리가 4.58로서 경계 영역 내부에 포함된다. 마지막 단계는 경계 영역 내부에 포함된 사용자를 지정된 수(예: 1,000명)에 도달할 때까지 반복적으로 생성한다.

## 2.3 Selection of representative humanoids by cluster analysis

경계 영역 내부에 포함된 사용자들은 Figure 3에 나타난 것과 같이 유사한 인체크기를 가질 수 있다. 따라서 경계 영역 내부의 사용자에 대한 군집분석을 통해 대표인체모델 생성 개수를 최적화하는 것이 필요하다. EBZ 기법은 K-mean cluster 기법을 이용하여 군집 개수를 다양하게 변화시켜 가면서 사용자의 인체크기를 적합하게 집단화하는 최적의 군집 개수를 결정한다. 최적 군집 개수는 Figure 4에 예시적으로 나타난 것과 같이 군집의 중심과 군집에 소속된 사용자 간의 평균 거리가 수렴하는 수준(예: 20개 군집)에서 결정된다(Lattin et al., 2003)

EBZ 기법은 군집 분석을 통해 설정된 최적 군집에서 1명씩의 사용자를 대표인체모델로 선정한다. 본 연구는 군집에 소속된 사용자 중에서 군집의 중심에 가장 가까운 사용자를 해당 군집의 대표자로 선정하였다. 예를 들면, 군집에 소속된 사용자가 군집의 중심으로부터 3cm, 5cm, and 10cm 떨어져 있으면, 군집 대표자는 군집의 중심에 가장 가까운 3cm 차이를 보인 사용자로 선정된다.

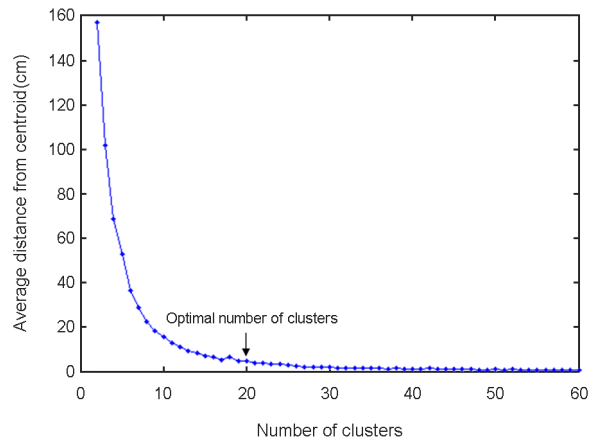


Figure 4. Illustration of an optimal number of clusters

## 3. Performance Evaluation

### 3.1 Evaluation methods

#### 3.1.1 Anthropometric data and variables

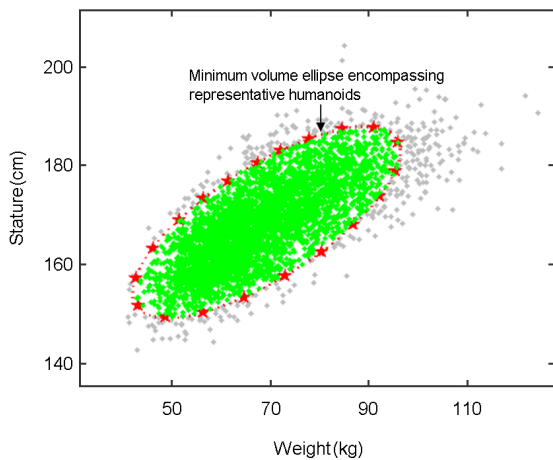
본 연구는 EBZ 기법의 성능을 평가하기 위해 원시자료 확보가 용이한 US Army 인체측정자료(Gordon et al., 1988)를 사용하였다. US Army 자료는 1988년에 미군 3,982명(남: 1,774명, 여: 2,208명)을 대상으로 138개 인체변수의 치수를 체계적으로 측정된 자료로서, 측정자료가 방대하고 측정 신뢰성이 높다(Jung et al., 2009a). 그리고, US Army 자료는 인터넷에 공개되어 있어(<http://mreed.umtri.umich.edu/mreed/downloads.html>) 인체측정 원시자료를 쉽게 확보할 수 있는 장점이 있다. 본 연구는 EBZ 기법을 적용한 대표인체모델 생성에 US Army 자료로부터 계산된 기술통계자료를 이용하였으며, 생성된 대표인체모델의 성능 평가에 US Army 원시자료를 활용하였다.

EBZ 기법의 성능 평가를 위한 인체변수는 현용 DHS 시스템의 적용성을 고려하여 2개의 인체변수(키와 몸무게)가 사용되었다. 대표적 DHS 시스템인 JACKO®은 키와 몸무게

를 입력 받아 가상환경상 3차원 인체모델을 생성한다(UGS, 2006). 본 연구는 EBZ 기법을 이용하여 생성된 대표인체모델을 JACK<sup>®</sup>에 연동시켜 사용할 수 있도록 키와 몸무게를 인체변수로 선정하였다.

### 3.1.2 Performance measures

본 연구는 3가지 척도를 적용하여 EBZ 기법의 성능을 정량적으로 평가하였다. 첫째, 수용률은 생성된 대표인체모델의 인체크기가 설계 대상 사용자의 인체크기를 통계적으로 대표하는 정도를 나타낸다. 수용률은 Figure 5에 예시적으로 나타낸 것과 같이 대표인체모델이 포함하는 영역 내부에 위치한 사용자의 비율로 계산되었다. 본 연구의 수용 영역은 대표인체모델을 모두 포함하는 최소 면적의 타원을 찾아주는 최적화 모델(식 2; Moshtagh, 2006)을 이용하여 정의되었다. 둘째, 이상치 비율은 대표인체모델의 인체크기가 설계 대상 사용자의 인체크기 범위를 벗어나는 비율로 계산된다(Jung et al., 2009a). 마지막으로, 인체모델 개수는 대표인체모델의 설계 적용 용이성을 나타내는 척도로서, 인체모델의 개수가 적을수록 설계 및 평가에 적용이 용이함을 나타낸다.



**Figure 5.** Illustration of a minimum volume ellipse encompassing representative humanoids (small dot: target users, dotted line: accommodation boundary line, star: representative humanoids)

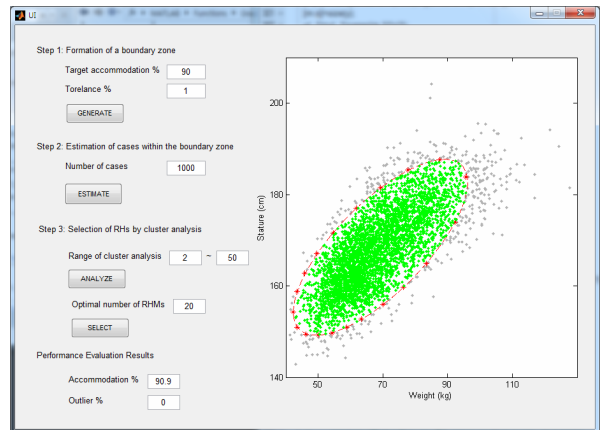
$$\begin{aligned} &\min \log(\det(A)) \\ &s.t. (p - c)'A(p - c) \leq 1 \end{aligned} \quad (2)$$

where:  $A$  = n-by-n matrix of ellipse equation in the center form  
 $p$  = d-by-n matrix of body sizes of ebzRH  
 $c$  = n-by-1 matrix of the center of the ellipse

### 3.1.3 Evaluation procedure and program

본 연구는 3단계 절차를 통해 EBZ 기법의 성능을 체계적으로 평가하였다. 첫째 단계는 US Army 자료의 키와 몸무게에 대한 기술통계자료를 계산하였다. 둘째 단계는 계산된 기술통계자료를 EBZ 기법에 적용하여 대표인체모델을 100회 반복 생성하였다. 마지막 단계는 생성된 100개의 대표인체모델 집단별 성능을 US Army 원시자료를 이용하여 평가하였다.

본 연구는 효율적인 평가 진행을 위해 Figure 6에 나타낸 것과 같은 평가용 소프트웨어를 Matlab으로 개발하여 사용하였다. 개발된 소프트웨어는 US Army 인체측정자료에서 기술통계자료를 계산한 후 본 연구의 EBZ 기법을 적용하여 대표인체모델을 생성해준다. 또한, 개발된 소프트웨어는 US Army 인체측정자료에 기반하여 생성된 대표인체모델의 수용률과 이상치 비율을 자동으로 계산해준다.



**Figure 6.** Generation and evaluation system of estimated boundary zone representative humanoids (small dot: target users, dotted line: accommodation boundary line, star: representative humanoids)

### 3.2 Evaluation Results

EBZ 기법의 수용률은 평균 90.9% (범위: 90.8~91.1%)로 목표 수용률인 90%를 충족하는 것으로 분석되었다. EBZ 기법의 수용률은 Table 1에 나타낸 것과 같이 BZ 기법(91.0%)과 유사한 것으로 나타났다. 또한, 반복에 따른 EBZ 기법의 수용률 표준편차는 0.1%로 나타나 BZ 기법(표준편차: 0.6%)과 유사한 것으로 파악되었다.

EBZ 기법의 이상치 비율은 BZ 기법과 동일하게 0%인 것으로 분석되었다(Table 1 참조). 따라서 EBZ 기법은 설

**Table 1.** Performance comparison between two generation methods of representative humanoids(RH)

Measure		Method	
		EBZ	BZ*
Accommodation percent(%)	Mean	90.9	91.0
	SD	0.1	0.6
Outlier proportion(%)		0.0	0.0
Number of RH	Mean	20.0	16.0
	SD	1.5	2.7

\*Source of data: Jung et al.(2009a)

계 대상 사용자의 인체크기 범위에 포함되는 대표인체모델을 생성한다. 이러한 EBZ 기법의 속성은 목표 수용률(90%)과 허용률(1%)을 이용해 형성된 경계 영역의 내부에 포함된 사용자 중에서 대표인체모델을 선정하기 때문이다.

마지막으로, EBZ 기법의 대표인체모델 생성 개수는 평균 20명(SD: 1.5명)으로 나타나 BZ 기법의 16명과 유사한 것으로 분석되었다(Table 1 참조). 또한, EBZ 기법으로 생성된 대표인체모델의 표준편차는 1.5명으로 BZ 기법의 표준편차(2.7명)와 유사한 것으로 파악되었다.

## 4. Discussion

본 연구는 기술통계자료를 이용하여 경계 영역 대표인체 모델을 추정하는 EBZ 기법을 개발하였다. BZ 기법(Jung et al., 2009a)은 목표한 비율을 통계적으로 수용하는 대표인체모델을 생성할 수 있으나, 방대한 인체측정 원시자료를 필요로 하기 때문에 적용이 제한적이다. 본 연구는 BZ 기법의 이론적 장점을 유지하면서 적용상의 한계점을 보완할 수 있는 EBZ 기법을 개발하였다. EBZ 기법은 다양한 인체크기를 가지는 사용자를 수용하는 것이 중요한 자동차 운전석, 비행기 조종석, 그리고 작업 공간의 가상환경상 설계 및 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

EBZ 기법은 인체크기의 정규분포 가정에 근간하여 목표 비율을 수용하는 경계 영역을 통계적으로 설정한다. 인체측정 관련 연구들(Roebuck et al.(1975; Fernandez and Uppugonduri, 1992; Schoor and Konz, 1996)은 일반적으로 인체크기의 분포를 정규분포로 가정하고 있다. 그러나 Vasu and Mital(2000)은 12개의 인체변수에 대한 정규성 검정을 통해 4개(약 33%) 인체변수가 정규분포를 따르지 않는다고 보고하였다. 따라서 EBZ 기법의 이론적 타당성을 검증하기 위해 정규분포 가정의 위배에 따른 영향을 평가하

는 후속 연구가 필요하다.

본 연구의 EBZ 기법은 다수의 대표인체모델을 생성하는 것으로 나타났다. EBZ 기법은 경계 영역의 내부에 포함된 다양한 크기의 대표인체모델을 생성한다. 그로 인해, EBZ 기법은 평균 20명의 대표인체모델을 생성하는 것으로 나타났다. 대표인체모델의 개수가 많을 경우 사용자의 인체크기 다양성을 보다 적합하게 대표할 수 있으나 DHS를 이용한 제품 평가에 투입되는 시간과 노력을 증가시키는 한계점이 있다(Blome et al., 2006).

EBZ 기법의 활용성을 제고하기 위해서는 대표인체모델 개수가 많아도 효율적으로 가상환경상 설계 및 평가가 가능한 DHS 시스템 개발이 필요하다. 대표적 DHS 시스템인 Jack<sup>®</sup>은 수작업으로 대표인체모델 각각에 대한 평가를 수행한다(Blome et al., 2006). 그로 인해, 대표인체모델 개수가 증가하면 선형적으로 설계 및 평가에 소요되는 시간이 증가하게 된다. 따라서 대표인체모델 증가에 따른 분석 시간을 줄이기 위해서는 대표인체모델 1명에 대한 분석 과정을 기록하여 다른 대표인체모델에도 동일하게 적용시킬 수 있는 반자동 분석 기능을 개발하는 것이 요구된다. 이러한 반자동 분석 기능은 대표인체모델 개수가 증가하더라도 설계 및 평가에 소요되는 시간이 선형적으로 늘어나는 한계점을 효과적으로 보완할 수 있을 것이다.

## Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government (NRF-2012R1A1A1011373).

## References

- Bittner, A.C., Glenn, F.A., Harris, R.M., Iavecchia, H.P. and Wherry, R.J. Cadre: A family of manikins for workstation design. In S.S. Asfour (Ed.) *Trends in Ergonomics/Human Factors IV* (pp. 733-740). North Holland: Elsevier Science Publishers, 1987.
- Bittner, A.C. A-CADRE: Advanced family of manikins for workstation design. *Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress*, 6, 774-777, 2000.
- Blome, M., Hanson, L., Lämkuil, D., Nielsen, E. and Stam, E., Identifying time-consuming human modeling tool activities. *SAE Technical Paper Series* (2006-01-2312), 2006.
- Chaffin, D.B., *Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design*.

- Pennsylvania, USA: SAE, 2001.
- Fernandez, J.E. and Uppungouri, K.G., Anthropometry of south Indian industrial workmen. *Ergonomics*, 35, 1393-1398, 1992.
- Gordon, C.C., Bradtmiller, B., Churchill, T., Clauser, C., McConville, J., Tebbets, I. and Walker, R., 1988 anthropometric survey of U.S. Army personnel [Data file]. Retrieved from <http://www.ntis.gov>, 1988.
- HFES 300 Committee. *Guidelines for Using Anthropometric Data in Product Design*. Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society, 2004.
- Jimmerson, D.G., 2001. Digital human modeling for improved product and process feasibility studies. In: Chaffin, D.B. (Ed.), *Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design* (pp. 127-135). SAE International, Warrendale, PA, 2001.
- Johnson, R.A. and Wichern, D.W., *Applied Multivariate Statistical Analysis*. New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- Jung, K., Kwon, O. and You, H., Development of the boundary zone method for generation of representative human models. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 53<sup>rd</sup> Annual Meeting*. Santa Monica, CA: The Human Factors and Ergonomics Society, 2009a.
- Jung, K., Kwon, O. and You, H., Development of a digital human model generation method for ergonomic design in virtual environment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 744-748, 2009b.
- Kim, J. and Whang, M., Development of a set of Korean manikins. *Applied Ergonomics*, 28, 407-410, 1997.
- Lattin, J.M., Carroll, J.D. and Green, P.E., *Analyzing Multivariate Data*. Pacific Grove, CA: Thomson Brooks/Cole, 2003.
- Meindl, R.S., Hudson, J.A. and Zehner, G.F., *A Multivariate Anthropometric Method for Crew Station Design* (AL-TR-1993-0054). Wright-Patterson Air Force Base, OH: Armstrong Laboratory, Air Force Material Command, 1993.
- Meunier, P., Effects of a data reduction technique on anthropometric accommodation. *Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Human Factors and Ergonomics Society*, 727-731, 1998.
- Moshtagh, N. (2006). Minimum volume enclosing ellipsoid. Retrieved from <http://www.mathworks.co.kr/matlabcentral/fileexchange/9542-minimum-volume-enclosing-ellipsoid>.
- Nelson, C., Anthropometric analyses of crew interfaces and component accessibility for the international space station. In: Chaffin, D.B. (Ed.), *Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design* (pp. 17-36). SAE International, Warrendale, PA, 2001.
- Porter, J.M., Case, K., Marshall, R., Gyi, D. and Oliver, R.S., Beyond Jack and Jill: designing for individuals using HADRIAN. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33, 249-264, 2004.
- Roebuck, J.A., Kroemer, K.H.E. and Thomson, W.G., *Engineering Anthropometry Methods*. New York: Wiley-Interscience, 1975.
- Ryu, T., Jung, I., You, H. and Kim, K., Development and application of a generation method of human models for ergonomic product design in virtual environment. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 951-955, 2004.
- Schoor, H.V. and Konz, S., Males/females: An anthropometric comparison for modeling missing data. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 437-440, 1996.
- Thompson, D.D., The determination of the human factors/occupant packaging requirements for adjustable pedal systems. In: Chaffin, D.B. (Ed.), *Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design* (pp. 101-111). SAE International, Warrendale, PA, 2001.
- UGS., *Jack User Manual* (Ver. 5.1). Unigraphics Corp, 2006.
- Vasu, M. and Mital, A., Evaluation of the validity of anthropometric design assumptions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26, 19-37, 2000.

## Author listings

**Kihyo Jung:** [kjung@ulsan.ac.kr](mailto:kjung@ulsan.ac.kr)

**Highest degree:** Ph.D., Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

**Position title:** Assistant Professor, School of Industrial Engineering, University of Ulsan

**Areas of interest:** Ergonomic product design, Digital human simulation, Usability testing, Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) Prevention

Date Received : 2013-02-12

Date Revised : 2013-05-01

Date Accepted : 2013-05-15