

햅틱보조설계 기법과 요추각도의 예측을 이용한 의자등판의 인간중심적인 설계[§]

이상덕* · 이해아* · 송재복*† · 채수원*

*고려대학교 기계공학부

Human-Oriented Design of Backrest of Office Chair Using Haptic-aided Design and Lumber Angle Prediction

Sang-Duck Lee*, Hae-A Lee*, Jae-Bok Song*† and Soo-Won Chae*

*School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received January 12, 2010 ; Revised September 16, 2010 ; Accepted September 16, 2010)

Key Words : Haptics-Aided Design (햅틱보조설계), Haptic profile (햅틱 프로파일), Chair design (의자설계)

초록: 인체와의 물리적인 접촉이 수반되는 제품의 설계 및 개발에서 필요한 시제품을 햅틱 시뮬레이터로 대체하는 설계 기법을 햅틱보조설계(Haptics-Aided Design, HAD)라 하는데, 이를 통하여 개발 비용 및 시간을 감소시킬 수 있다. 제품설계에 있어서 사용자의 감성적인 요소뿐만 아니라 제품이 사용자의 신체에 미치는 영향이 중요함에도 불구하고, 기존의 HAD 는 사용자의 감성적인 평가만을 설계에 반영하였다. 그 결과, 사용자가 편하게 느끼는 설계와 인체공학적 측면에서 권장하는 설계 사이에 차이가 발생하였다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 기존의 HAD 과정에 제품의 사용 시에 사용자의 신체 변화를 관찰하는 단계를 추가하여 인간중심의 설계를 구현할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 설계방식을 검증하기 위하여, 등판의 강성을 조절할 수 있는 햅틱의자 시뮬레이터를 사용하여 사무용 의자 등판의 틸트구조 설계에 HAD 를 적용하였고, MADYMO 를 이용한 시뮬레이션을 통하여 인체공학적 측면에서 제품이 올바르게 설계 되었는지 검증하였다. 이를 바탕으로 제안한 설계방법이 감성적인 요소와 신체적인 요소를 모두 실시간으로 설계에 반영할 수 있음을 확인하였다.

Abstract: Haptic-aided design (HAD) involves the use of a haptic simulator in place of physical prototypes in the design and development of products with which human beings interact physically. The development time and cost can be significantly reduced by adopting this HAD scheme. Although both physical and emotional factors are equally important, only the emotional factors were taken into consideration in the previous HAD process. Consequently, the design of the products was sometimes unsatisfactory from the viewpoint of ergonomics, even though users were emotionally satisfied with the products. To overcome this problem, in this study, we propose a new human-oriented design methodology that is enhanced by taking the physical factors into consideration. The HAD scheme was verified by using a haptic chair simulator to design a tilt mechanism of an office chair for which the stiffness of the backrest can be adjusted; then, the design was simulated using MADYMO. The results show that the proposed method can reflect both the physical and emotional factors to modify the design in real-time.

- 기호설명 -

F : 사용자가 의자의 등판에 가하는 힘
 θ : 햅틱의자 등판의 기울임 각도
 r : 햅틱의자 등판의 회전축과 힘 F 의 작용점 사이의 거리
 τ : 모터토크

k : 틸트구조와 관련된 스프링 상수
 a : 스프링의 중심축에서 등판의 회전축까지의 거리
 h : 예압조절을 위한 스프링의 압축길이
 θ_{eq} : 의자등판의 반발력과 사용자의 하중이 평형을 이루었을 때의 등판각도

§ 이 논문은 대한기계학회 2009 년도 추계학술대회(2009.

11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, jbsong@korea.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

제품의 품질을 향상시키고 사용자의 만족감을 높이기 위해서 다양한 제품 설계 방법이 연구되고

있으며, 최근 인간중심의 설계방법(human-oriented design)이 주목을 받고 있다. 인간과 접촉이 빈번하거나 신체에 많은 영향을 주는 제품은 특히 인간 중심적인 설계가 요구된다. 인간 중심적인 설계를 하기 위해서는 안락감과 같은 사용자의 감성적인 평가뿐만 아니라, 제품이 사용자의 신체에 미치는 영향 또한 제품의 설계단계에서 고려되어야 한다.

Computer-aided design (CAD) 시스템을 설계에 이용함으로써 설계단계에서 부품 사이의 간섭이나 조립 가능성 등을 확인할 수 있으며, 이로 인하여 제품의 설계과정이 간소화되었다. 그러나 CAD 시스템은 사용자의 감성적인 평가를 실시간으로 제품의 설계단계에서 반영하는 데에는 한계가 있으며, 실제 시제품을 여러 차례 제작하여 성능평가 등을 수행하여야 한다. 하지만 시제품을 제작하는 과정은 많은 시간과 비용이 요구 되므로, 제품의 개발 시간과 비용을 증가 시킨다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 설계단계에 햅틱 시뮬레이터를 적용하는 기법이 제시되었으며, 이와 같은 설계 기법을 haptics-aided design (HAD) 라고 한다.⁽¹⁾ 햅틱장치는 컴퓨터로 구현한 가상현실의 물체를 실제 현실세계에서 사용하는 것과 같은 감각을 사용자에게 제공하는 장치이다. 햅틱장치로 시제품의 기능을 구현하고 다양한 평가를 실시간으로 수행함으로써, 시제품 제작에 소요되는 시간 및 비용을 크게 단축시킬 수 있다.

제품의 설계에 HAD를 적용하기 위해서는 실제 제품의 설계변수와 햅틱장치의 제어변수 사이의 관계를 알아야 한다. 그러나 이들 사이의 상관관계는 복잡하여 명확히 규정하기 어려우며, 이에 대한 연구는 아직 초기단계에 머물러 있다.⁽²⁾ 또한, 기존의 HAD는 사용자의 감성적인 평가만을 바탕으로 설계를 수정하고, 감성적인 만족감을 최대화할 방향으로 설계가 진행되므로, 제품이 사용자의 신체에 미치는 영향이 설계 단계에서 반영되지 않는다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 따라서 기존의 HAD를 통해 개발된 제품은 감성적으로는 우수한 평가를 받았지만, 인체공학적으로 권장되지 않는 설계가 수행될 가능성이 있다.

본 연구에서는 제품이 사용자의 신체에 미치는 영향을 고려하는 단계를 기존의 HAD에 추가하여 보다 인간친화적인 설계 방법을 제시한다. 제시한 설계방법의 타당성을 검증하기 위하여 우선 HAD를 이용하여 의자 등판의 틸트 시스템을 설계하였다. 이 때, 사용자의 감성적인 평가를 실시간으로

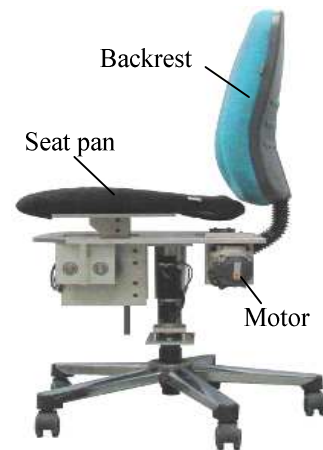


Fig. 1 Haptic chair

설계에 반영하였다. 다음으로 다물체 동역학 프로그램인 MADYMO를 이용하여 사용자가 의자에 앉을 때 사용자 요추의 각도 변화를 살펴보았다. 이로부터 기존의 HAD를 이용한 설계가 인체공학적인 측면에서 충분하지 않음을 살펴보고, 신체 변화를 관찰하는 단계를 추가함으로써 보다 인간 중심적인 설계가 이루어질 수 있음을 검증하였다.

2. 햅틱의자 시스템 개발

HAD를 설계에 적용하기 위해서는 시제품의 기능을 구현할 수 있는 햅틱장치가 필요하다. 본 연구에서는 사무용 의자를 설계하기 위하여 Fig. 1과 같이 햅틱의자 시뮬레이터를 사용하였다. 햅틱의자는 좌판과 등판으로 구성되어 있으며, 등판에 힘이 작용하면 회전축을 중심으로 등판이 회전하게 된다. 이 때, 회전축에 연결되어 있는 모터가 적절한 토크를 제공하여 등판의 다양한 강성효과를 구현할 수 있으며, 사용자에게 실제 의자에 앉는 것과 유사한 느낌을 제공할 수 있다.

햅틱장치는 제품에 대한 촉감 및 역감 정보의 형태로 사용자에게 제품의 특징과 기능을 전달하는 장치이므로, 자연스러운 느낌을 사용자에게 제공하기 위해서는 사람이 촉감으로 구별할 수 있는 자극의 주기보다 빠른 속도로 햅틱장치를 제어할 수 있어야 한다. 사람의 촉각은 최대 320Hz의 자극을 구별해 낼 수 있으므로, 햅틱의자의 제어신호 주파수는 320Hz보다 높은 것이 바람직하다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 DSP(TMS320 F2812) 기반의 제어기를 이용하였으며, 등판 강성을 1kHz의 제어주기로 제어하였다.

본 연구에서는 모터의 제어를 통하여 실제의자

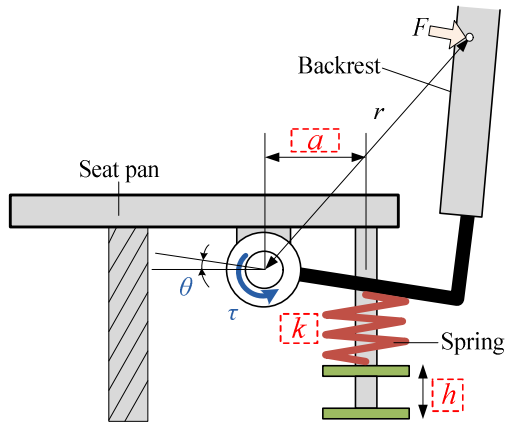


Fig. 2 Tilt system of haptic chair

와 같은 등판의 반발력을 햅틱의자에 구현하였다. 햅틱의자의 모터와 모터 드라이버는 안정적인 성능구현을 위하여 상용제품인 Panasonic사의 AC 서보모터와 모터 드라이버를 사용하였다. 그리고 DSP를 이용하여 모터 드라이버에 공급되는 전류를 제어함으로써 모터의 토크를 제어하였다.

3. HAD 기반의 등판 설계

3.1 의자등판의 틸트구조

HAD를 이용하여 제품을 설계할 때, 햅틱장치는 실제 제품의 기능과 관련된 특성을 표현할 수 있어야 하며, 제품의 특성은 제품의 구조를 결정하는 설계변수에 의해 결정된다. 본 연구에서 다루는 HAD의 대상은 사무용의자 등판의 틸트구조며, 기존의 사무용의자 등판의 틸트구조 중에서 가장 많이 사용되는 Fig. 2와 같은 틸트구조를 설계 대상으로 선정하였다.

Fig. 2의 r 은 등판의 회전축에서부터 힘이 작용하는 지점 사이의 거리이며, a 는 스프링의 중심축에서 등판의 회전축까지의 거리이고, k 는 스프링 상수이다. h 는 스프링의 예압을 조절할 수 있는 거리를 의미한다. 이러한 틸트구조는 사용자가 의자에 착석한 후 등판에 몸을 기대어 힘 F 를 가하면 등판은 θ 만큼 회전하고, 동시에 스프링은 압축된다. 이 때, 스프링의 탄성력은 등판의 반발력으로 사용자에게 작용하여 상체의 하중을 지지하게 되고, 사용자는 안락감을 느끼게 된다.

햅틱의자를 이용하여 의자의 틸트 기능을 모사하기 위해서는 모터를 이용하여 스프링의 탄성력을 제공해야 하며, 이를 위하여 모터에 필요한 토크 τ 는 다음과 같다.

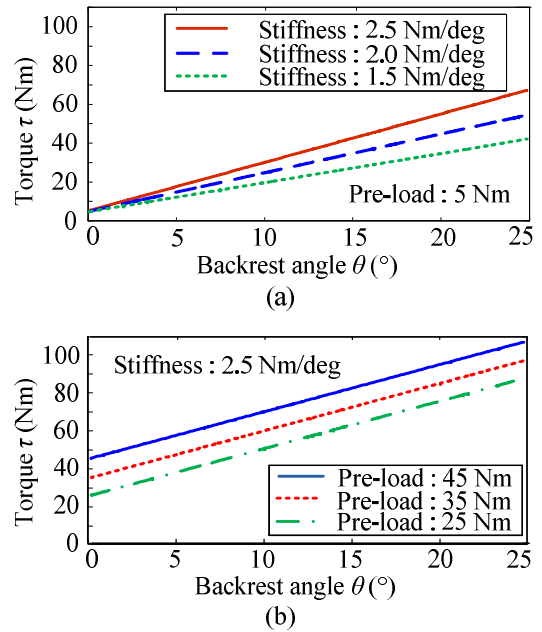


Fig. 3 Experimental results for verification of performance of the haptic chair: (a) torque for various stiffnesses of the spring of tilt mechanism, and (b) torque for various preloads of the spring of tilt mechanism

$$\tau = r \times F = ka^2 \tan \theta + kah \tag{1}$$

θ 가 작다고 가정하면 $\tan(\theta)$ 를 θ 로 선형화할 수 있다. 따라서 식 (1)에 의해서 Fig. 3에 도시된 그래프의 기울기는 ka^2 과 같고, kah 는 등판의 초기 예압력을 의미한다. a, k, h 의 값에 의해서 틸트구조의 특징이 결정되므로, 설계변수는 Fig. 2에 표시된 a, k, h 의 값이다.

3.2 햅틱의자의 성능검증

햅틱의자는 모터제어를 통해 사용자에게 반발력을 제공한다. 따라서 사용자에게 설계자가 의도한 정확한 반발력을 제공하기 위해서는 햅틱의자 등판과 연결된 모터의 성능이 검증되어야 한다. 이를 위하여 틸트구조의 설계변수 a, k, h 값의 변화에 따라 출력되는 모터토크 τ 를 실험을 통해 검증하였다. 모터의 출력토크 τ 는 모터의 회전축에 길이 0.2m의 링크를 채결하여 로드셀을 이용하여 측정하였다.

Fig. 3은 설계변수 a, k, h 값을 변화시켜 햅틱의자에 구현한 모터의 출력토크 τ 의 측정값이다. 여러 강성 및 예압에 대하여 출력토크 τ 를 측정하였다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 햅틱의자 모터의

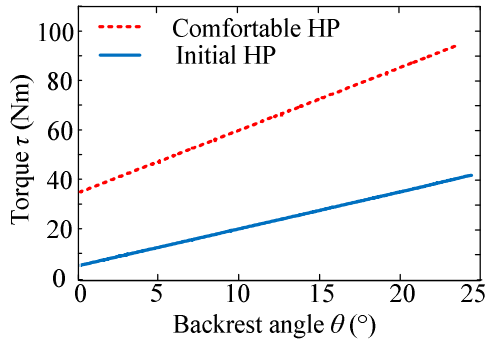


Fig. 4 Plot of HP

출력토크는 식 (1)을 통해 계산된 토크 τ 와 같은 값을 갖는다. 이는 햅틱의자의 모터를 구동하여 사용자에게 가하는 반발력이 설계자가 설계하고자 하는 실제 의자의 틸트구조가 사용자에게 가하는 반발력과 같다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 햅틱의자는 의자의 설계에 HAD를 적용하기에 알맞은 성능을 보장한다.

3.3 초기 설계변수 설정

Fig. 2의 틸트구조를 갖는 등판은 설계변수 a , k , h 의 값을 조절함으로써 다양한 기울임 특성을 구현할 수 있다. 등판의 기울임 특성은 사용자가 느끼는 안락감을 결정하는 요소이고, 안락감은 제품의 우수성을 판단하는 중요한 기준이다. 따라서 위의 세 가지 설계변수를 어떻게 설정하느냐에 따라 제품의 성능이 결정된다. 본 연구에서는 초기 설계변수를 임의로 설정한 후, HAD 기법을 사용하여 설계변수들을 수정하는 과정을 반복하여 최적의 안락감을 제공할 수 있는 설계변수들을 결정하였다.

우선, 햅틱의자를 이용하여 의자의 특성을 구현하기 위하여 haptic profile(HP)을 적용하였다. HP는 제품의 주요한 특성에 영향을 주는 물리 변수들 사이의 상관 관계를 의미하며, 제품의 사용 시에 사용자가 느끼는 감성적인 요소와 HP는 매우 밀접한 관계가 있다. 따라서 HP를 사용하여 햅틱장치에 제품의 감성적인 요소를 구현할 수 있다. 본 연구에서 사용한 햅틱의자의 HP는 Fig. 4에 도시된 등판의 τ 와 θ 의 관계로 정의할 수 있다.

시중에 판매되고 있는 사무용 의자의 등판 기울임 강성은 대부분 0.3 - 1.4Nm/deg이고, 등판의 초기 기울임 예압은 0 - 40Nm이다.⁽⁷⁾ 이를 참조하여 본 연구에서는 의자의 초기 기울임 강성과 등판의 초기 기울임 예압을 각각 1.5Nm, 5Nm로 설정하고,

Fig. 4의 Initial HP를 생성하였다. 그래프의 기울기는 등판의 강성을 의미하며, 그래프의 절편은 초기 예압을 의미한다. 따라서 식 (1)의 ka^2 과 kah 에 각각 초기 기울임 강성과 초기 예압을 대입하여 설계변수의 초기값을 결정할 수 있다. 결정된 초기 설계변수는 $a = 90\text{mm}$, $k = 10.62\text{N/mm}$, $h = 5.23\text{mm}$ 이다.

3.4 안락감이 최대인 설계변수 설정

설계변수를 조절하기 위하여 햅틱의자에 초기 HP를 적용한 후, 사용자는 햅틱의자 등판에 기대어 업무자세를 취하며 등판에 힘을 가하였다. 그리고 다양한 자세에서 안락감을 평가하였다. 이러한 안락감의 평가결과를 바탕으로 설계자는 사용자가 편안함을 느낄 때까지 HP를 조절하였고, 이로부터 사용자의 안락감이 최대인 Fig. 4의 Comfortable HP를 얻었다. Comfortable HP의 경우, 등판의 기울임 강성은 2.5Nm/deg이고, 예압은 35Nm이다. 햅틱의자의 안락감은 성인남성 11명이 평가하였으며, 다양한 HP를 구성하여 가장 안락한 HP에 투표하는 방법으로 Comfortable HP를 선정하였다.

식 (1)의 ka^2 과 kah 에 수정된 HP의 기울기와 절편을 대입하여 등판 틸트 시스템의 최종 설계변수인 a , k , h 를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 틸트 시스템의 크기를 고려하여 $a = 90\text{mm}$, $k = 17.7\text{N/mm}$, $h = 22\text{mm}$ 로 각각 결정하였다.

4. 시뮬레이션을 통한 요추각도 예측

사무용 의자와 같이 장시간 동안 사용자와 접촉을 하는 제품의 설계에서 제품이 사용자의 근골격계에 미치는 영향은 사용자가 느끼는 안락감만큼 중요하다. 특히, 요추는 사용자가 의자에 착석하여 있는 동안 상체의 무게를 지지하는 부분이고, 평소보다 큰 변화량만큼 구부러진 상태로 힘이 가해지게 된다. 그러므로, 본 연구에서는 사무용 의자의 설계 단계에서 요추의 변화를 관찰하여 설계에 반영하였다. 요추의 변화는 주로 요추 전만각을 통하여 측정할 수 있으며, 요추 전만각은 1번 요추의 상면과 천추의 상면이 이루는 각으로 정의된다. 의학적으로 권장되는 요추 전만각은 인간이 직립 자세를 취하였을 때의 각으로 60°로, 사무용 의자에 착석한 사용자의 요추 전만각이 60°에 가까운 값일수록 요추에 부담이 작다는 것을 의미한다.⁽⁸⁾

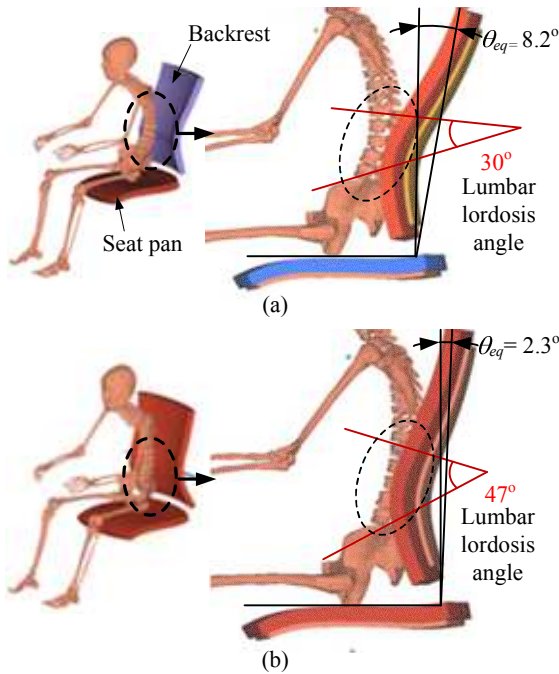


Fig. 5 Angle of lumbar: (a) lumbar lordosis angle with HAD, and (b) lumbar lordosis angle with human oriented design

본 연구에서는 사용자가 의자에 앉아서 Fig. 5와 같이 업무 자세를 취하였을 때, 사용자의 요추 전만각을 살펴보았다. 이 때, 업무 자세는 사용자가 자연스럽게 의자에 몸을 기대어 등판의 반발력과 사용자의 하중이 평형을 이루었을 때의 자세로 가정하였다. 이와 같은 업무 자세는 흔히 사무용 의자의 사용자가 가장 많은 시간 동안 취하게 되는 자세이므로, 의자 등판의 강성 설계는 사용자의 요추 건강에 큰 영향을 미칠 것이다.

사용자가 햅틱의자에서 업무 자세를 취하였을 때의 햅틱의자 등판의 각도를 θ_{eq} 라 하였다. 업무 자세는 θ_{eq} 에 영향을 받는다. 따라서 요추 전만각은 θ_{eq} 의 변화에 따라 바뀔 수 있으며, Comfortable HP를 적용한 햅틱의자에서 업무 자세를 취하였을 때 θ_{eq} 는 8.2°이며, 이는 실험적으로 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 Fig. 5와 같이 햅틱의자의 CAD 모델을 구현하였으며, 의자에 인체모델을 착석시켰을 때 인체모델의 요추 전만각을 MADYMO를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위하여 MADYMO에서 제공하는 50th percentile Hybrid-III dummy의 인체모델을 사용하였다.

HAD로부터 설계한 의자를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과, Fig. 5의 (a)와 같이 30°의 요추 전만각을 얻을 수 있었다. 따라서 HAD 기법을 사용하여 설계된 의자의 등판을 사용자가 장기적으로 사

용할 경우, 사용자의 척추 건강에 부정적인 영향을 미칠 것이란 것을 예측할 수 있다. 이를 개선하기 위해서는 θ_{eq} 가 좀더 감소하도록 틸트구조를 설계하여 요추 전만각을 증가시켜야 한다. θ_{eq} 는 의자의 기울임 강성과 초기 예압에 의해서 결정되며, 기울임 강성과 초기 예압이 증가할수록 θ_{eq} 는 감소한다. 설계를 수정하기 위하여 사용자는 햅틱 의자를 이용하여 안락감이 유지되는 범위 내에서 최대한 의자의 초기 예압을 증가시켰다. 이로부터 45Nm의 초기 예압을 얻을 수 있었으며, 이 때 θ_{eq} 는 2.3°이다.

설계를 수정한 의자가 사용자의 요추에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 다시 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5(b)와 같이 설계를 수정한 의자에서 작업을 할 경우, 사용자의 요추 전만각은 47°로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이 값은 HAD만을 이용하여 설계한 값 30°보다 60°에 가까운 값이므로, 허리 건강에 보다 좋은 영향을 미칠 것이란 것을 예상할 수 있다. 즉, 새로운 설계방법을 통하여 설계된 사무용 의자 등판의 틸트구조가 사용자에게 안락감을 제공할 뿐만 아니라, HAD만을 이용하여 설계된 틸트구조와 비교하여 인체공학적인 측면에서 요추의 건강에 도움이 되는 것이다. 이를 바탕으로 최종적으로 설계하고자 하는 의자의 기울임 강성은 2.5Nm/deg로, 예압은 45Nm으로 결정하였고, 이러한 의자의 기울임 강성과 예압을 만족하는 설계변수 a , k , h 의 값은 식 (1)에 의하여 각각 90mm, 17.7N/mm, 28mm로 결정하였다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 HAD에 사용자의 신체 변화를 관찰하는 단계를 추가하여 사용자의 감성적 요소와 육체적 요소를 모두 실시간으로 설계에 반영하였고, 이러한 과정을 통하여 HAD의 단점이 보완된 새로운 설계기법을 제시하였다. 이를 위하여 사무용 의자의 등판 설계에 HAD만 적용하였을 때 바람직하지 않은 제품설계가 이루어질 수 있다는 점을 확인하였고, 요추의 변화를 관찰하는 단계를 추가하여 HAD의 단점을 보완하여 인간중심적인 설계를 하였다.

본 연구에서 제시한 새로운 설계방법을 다양한 제품의 설계에 적용함으로써, 시제품 대체 효과, 사용자의 평가의 실시간 반영과 같은 HAD의 장점을 유지하면서, 동시에 제품 사용으로 인한 신체적 변화에 따른 질병 또는 후유증 발생의 가능

성과 같은 HAD의 단점은 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국과학재단(No. R11-2007-028-01002-0)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) Jin, Y. and Song, J.-B., 2009, "Design of Chair's Tilt System Using Haptic Chair," *Proc. of KSPE Spring Annual Meeting*, pp. 285~286.
- (2) Otaduty, M. A. and Lin M. C. , 2005, "Introduction to Haptic Rendering," *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques archive ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, pp. A45~A71.
- (3) Huh, S.H., Jin, Y. and Song, J.B., 2008, "Design of Haptic Chair Based on Haptic-Aided Design Capable of Design Parameter Adjustment," *Proc. of KSME Autumn Annual Meeting*, pp. 860~864.
- (4) Jin, Y., Lee, S. D. and Song, J.B., 2010, "Design of Backrest and Seat Pan of Chairs on the Basis of Haptics-Aided Design Method," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 34, No. 5, pp. 527~533.
- (5) Huh, S.H., Lee, S. D. and Song, J.-B., 2009, "Haptic-Aided Design Using a Haptic Chair with Adjustable Backrest," *Trans. of the KROS*, Vol. 4, No. 3, pp. 243~249.
- (6) Burdea, G. C. , 1996, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, Wiley-Interscience, pp. 35~39.
- (7) Faiks, F. S. Allie, P. and Reinecke, S. M., 1999, "Supporting the Torso Through Seated Articulation," *43rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, pp. 574 -578.
- (8) Adams, M. A. and Hutton, W. C., 1985, "The Effect of Posture on the Lumbar Spine," *British Editorial Society of Bone and Joint Surgery*, Vol. 67-B, No. 4, pp. 625~629