

등판 조절이 가능한 햅틱의자를 이용한 햅틱 보조 설계

Haptic-Aided Design Using a Haptic Chair Capable of Adjusting Backrest

허석행¹, 이상덕¹, 송재복[†]

Seok-Haeng Huh¹, Sang-Duck Lee¹, Jae-Bok Song[†]

Abstract In modern society, people spend most of their time on various types of chairs. However, it is not easy for a designer to design a comfortable chair because satisfaction with the chair depends not only on the quantitative elements such as size, but also on the qualitative element such as the user's feeling. To deal with these problems, there have been many studies on designing ergonomic chairs. This paper proposes the haptic-aided design (HAD) system to design an ergonomic chair. Based on the HAD system, the designer can experience whether the chair is comfortable or not through the haptic device, and also can modify the design parameters instantaneously. The haptic chair capable of controlling the design parameters in real time was proposed as a haptic simulator. The controllable parameters, such as seat height, reclining angle, stiffness of the backrest, and so on were selected based on the previous research related to ergonomic chairs. The proposed methodology will help reduce the development cost and time by replacing the process of making the real mock-ups and prototypes with the haptic chair.

Keywords : Haptic-Aided Design, Active Impedance Control, Haptic Chair

1. 서론

사람이 직접 조작하는 제품 또는 인체의 힘/촉감이 전달되는 제품을 제작할 때 사용자가 느끼는 감각 등을 설계에 반영하는 것은 매우 중요하다. 기존의 그래픽 위주 CAD 시스템을 사용한 제품개발은 시각적 정보만을 제공하여 제품 개발 과정에 있어 시제품을 만들고, 여러 단계의 설계변경 등 많은 재작업이 필요하게 되었다. 이것은 제품 개발 기간 및 비용을 증가시키고, 효율성을 저하시키는 중요한 이유가 된다. 따라서 기존의 3D CAD 기반의 설계 방식 이외에도 개발자가 설계 및 개발 단계에서 제품의 메커니즘과 직접 상호작용을 통해 힘 및 촉감을 느끼고, 이를 설계에 반영하는 기술의 개발이 필요하게 되었다. 즉 인간의 감각을 직접 설계 단계에 적용함으로써 보다 인간 친화적인 제품 개발을 할 수 있도록 하며, 개발비용을 줄이고자 하는 시도가 진행되고 있다.

이러한 시도의 일환으로, 햅틱장치를 제품의 설계 및 개발에 반영하고자 하는 다양한 연구들이 진행되어 왔다. Immersion사는 자사에서 개발한 햅틱장치를 3D CAD 패키지인 CATIA와 연동하여 CAD 화면상에서 3차원 모델들을 직접 조립해 볼 수 있는 VirtualHand를 출시하였다¹⁾. Sensable사는 자사의 햅틱장치인 Phantom을 이용하여 사람의 직관적인 정보를 이용한 디지털 프로토타입의 제작에 활용하였다²⁾. 또한, 항공기 제작업체인 보잉사는 상용 햅틱장치인 Phantom을 사용해 항공기의 부품을 조립할 때 부품간의 간섭현상을 확인하는 용도로 활용하였다^{3, 4)}. 이외에도 Tideman은 FCS사의 HapticMaster를 사용하여 다양한 사용자의 취향에 맞는 기어레버를 설계하기 위한 장치를 만들었다. 이를 통해 가상공간 상에 구현된 다양한 기어레버를 통해 개개인의 특성에 맞는 레버의 강도 및 위치 등을 찾고자 하였다⁵⁾. 그러나 이러한 햅틱장치는 범용으로 사용되기 때문에 특정한 제품의 설계에 반영하는 데는 어느 정도 한계가 존재한다. Tan은 HAD를 목적으로 하지는 않았지만, 의자에 압력분포센서를 장착하여 착석자의 움직임 등을 입력도구로 활용하기 위한, 일종의 햅틱 입력장치에 대한 연구를 수행하였다^{6, 7)}.

Received: 30.June.2009, Reviewed: 19.August, Accepted: 25.August

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2009-0063175)

¹ 고려대학교 기계공학부 석사과정(gazago125@korea.ac.kr)

[†] 교신저자: 고려대학교 기계공학부 교수(jbsong@korea.ac.kr)

본 연구에서는 기존의 3D CAD 기반의 설계방식에 햅틱기술을 접목하여 범용 햅틱장치로는 얻기 어려운 제품과 개발자의 직접적인 상호작용을 통해서 설계영역의 한계성을 보완하고자 하였다. 즉, 햅틱기술에 기반한 설계기법(haptic-aided design, 이하 HAD라 칭함)을 제품의 개발단계에 적용함으로써, CAD 등을 이용한 시각정보 외에 촉감 및 역감 정보를 통해서 설계하고자 하는 제품의 물리적인 특성(관성, 강성, 감쇠 등)을 제품 개발자 및 사용자에게 실시간으로 전달할 수 있는 시스템을 구성하고자 한다. 이를 통해 설계자는 개발 대상이 되는 제품과의 직접적인 상호작용을 통해 물리적인 특성을 피드백 받고, 실시간으로 설계에 반영할 수 있도록 하였다.

2. 의자 설계를 위한 햅틱보조설계 시스템

의자의 설계는 작업의 성질이나 개인차에 따라 매우 다양하여 개개인의 체형에 적합한 의자를 만들기가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 체형에 따른 적합한 의자를 설계하기 위해 햅틱기법을 적용한 의자 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 이를 위해 의자의 형상을 실시간으로 조절할 수 있으며, 능동 임피던스 제어를 통하여 의자 등판 등의 물리적인 특성(관성, 강성, 감쇠 등)을 제품의 설계자 및 사용자에게 전달할 수 있는 시스템을 구성하였다. 전체적인 시스템은 크게 햅틱의자와 제어기, 그리고 GUI로 구성되어 있다.

2.1 설계요소의 선정

의자의 여러 설계요소 중 햅틱의자를 통해 표현 가능한 설계요소들을 선정하였다. 의자 설계에 있어서 일반적인 설계요소로^{8,9)}는 의자의 형상 및 특성 등에 관련된 정량적인 요소와 디자인 만족감 등과 같은 정성적인 요소로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 이러한 설계변수들 중에

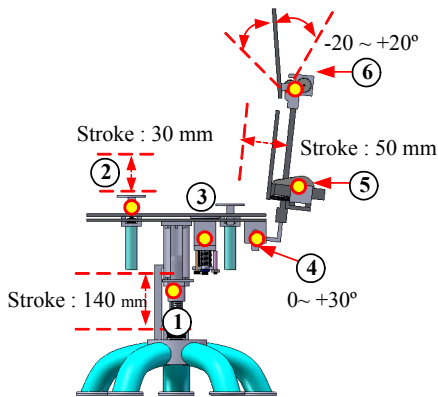


그림 1. Overview of haptic chair

서 아래의 그림 1과 같이 의자 높이, 등판 각도/강성 등과 같은 정량적인 요소들에 초점을 맞추어 햅틱의자의 설계요소로 선정하였다.

2.2 기구부 설계

그림 2는 표 2.1에서 설명한 햅틱의자의 각 부분을 구성하는 요소들의 부착 위치 및 세부 사항을 보여준다. 전부 6개의 부분으로 구성되어 있고, 각 부위마다 요구하는 이동범위, 허용토크, 역구동성(back-drivability) 등이 다르다. 또한, 사용자의 몸무게를 100kg이라고 가정하였을 때 각 부분에 걸리는 하중을 고려하여¹⁰⁾ 필요 토크 등을 산출하고 그림 2와 같이 기구부를 설계하였다.

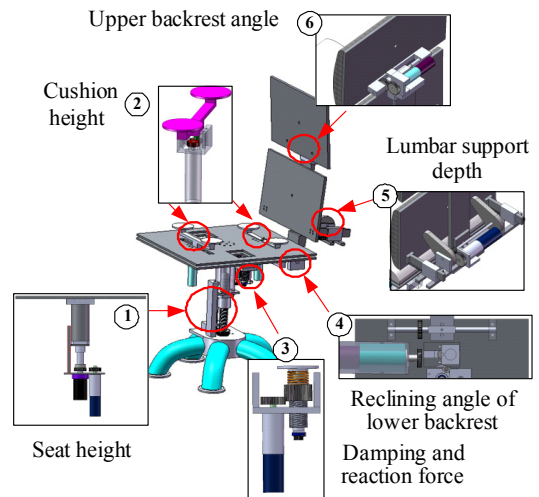


그림 2. Adjustment mechanism of haptic chair.

표 1. Design parameters of haptic chair.

No.	Adjustment mechanism	Range	Parameters
1	Seat height	0~135mm	Height
2	Seat front side height	0~30mm	Height
3	Cushion damping and reaction force	0~600N	Damping, reaction force
4	Lower backrest	0°~ +30°	Angle, damping and stiffness
5	Lumbar support	0~50mm	Depth
6	Upper backrest	-20°~ +20°	Angle

2.3 제어기의 구성

상위제어기는 DSP를 기반으로 구성되어 있다. TI사의 DSP(TMS320F2812 및 TMS320F2811)를 사용하였고, 그림

3과 같이 전류제어 및 위치제어를 위한 2가지 상위제어기로 구성하였다. 의자의 높이 등을 조절하기 위한 위치제어용 상위제어기는 UCMC-DC-240W를 사용하였고, 전류제어용 상위제어기는 DSP(TMS320F2812) 칩으로 구성된 제어기를 설계하여 사용하였다.

강성 및 감쇠에 따른 다양한 등판의 느낌을 표현하기 위하여 복합 능동 임피던스(active impedance)를 구현하였다. 이를 위하여 전류제어를 사용하였고, 제어에 관한 개략도는 그림4와 같다.

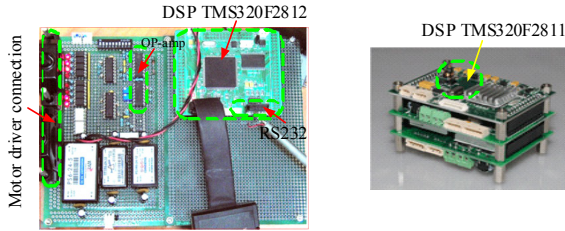


그림 3. High-level controller.

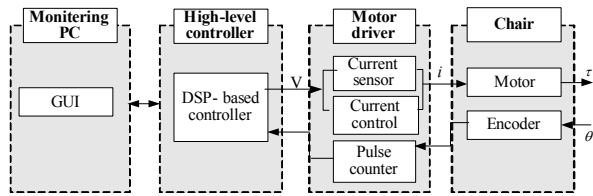


그림 4. Control scheme for current control.

3. 의자 설계에의 능동 임피던스의 적용

사용자가 의자에서 느끼는 안락감은 등판의 강성에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 햅틱의자를 이용하여, 적절한 강성을 갖는 등판을 설계하기 위하여 등판을 구동하는 모터에 능동 임피던스 제어기법을 적용하였다. 관성, 강성 및 감쇠 등을 갖는 기계시스템에 힘을 가하면 반력을 느끼게 되며, 이 때 느끼는 반력이 의자에서는 사용자에게 안락감을 제공하는 주요 요인이 된다. 따라서 햅틱의자 등판의 관성, 강성 및 감쇠 효과를 모터를 이용하여 임의로 조절할 수 있다면 실제로 다양한 제품을 만들지 않고도 적절한 등판의 강성을 찾을 수 있다. 햅틱의자에 임피던스 제어를 적용할 경우, 실제 시스템의 구성요소를 변경하지 않고, 모터 제어를 통해 등판의 강성 및 감쇠 효과를 임의로 조절할 수 있다.

3.1 임피던스 제어

임피던스 제어는 모터의 토크 제어를 통해서 구현된다.

모터의 토크상수를 K_T 라고 하면, 모터에 흐르는 전류 i_m 과 모터 토크 τ_m 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\tau_m = K_T \cdot i_m \quad (1)$$

일반적으로 의자의 등판과 좌판은 적절한 강성을 제공하기 위해서 비틀림 스프링(torsion spring), 압축스프링, 또는 판스프링 등을 사용한다. 비틀림 스프링의 사용 시에 등판의 강성이 k 라고 하면, 사용자가 등판을 $\Delta\theta_B$ 만큼 뒤로 젖힐 때 강성효과에 의하여 발생하는 토크는 다음과 같다.

$$\tau_{stiff} = k \cdot \Delta\theta_B \quad (2)$$

햅틱 의자를 이용하여 이와 같은 등판의 강성효과를 구현하기 위해서는 등판의 변위에 비례하는 전류 i_{stiff} 를 모터에 흘려 주어야 하는데, 이 때 모터에 흐르는 전류는 식 (1)과 (2)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{stiff} = \tau_{stiff} / K_T = -k \cdot \Delta\theta_B / K_T \quad (3)$$

위 식에서 음의 부호는 사용자가 등판을 뒤로 미는 방향과 반대 방향으로 토크를 가하여야 한다는 점을 의미한다. 이와 같은 방법으로, 등판의 감쇠효과 및 강성효과를 구현하기 위하여 모터에 흘려주어야 할 전류 i_{damp} 과 $i_{inertia}$ 는 각각 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$i_{damp} = \tau_{damp} / K_T = -b \cdot \Delta\dot{\theta}_B / K_T \quad (4)$$

$$i_{inertia} = \tau_{inertia} / K_T = -m \cdot \Delta\ddot{\theta}_B / K_T \quad (5)$$

여기서, i_{damp} 와 $i_{inertia}$ 는 감쇠 및 관성 효과를 나타내는데 필요한 토크이며, b 와 m 은 등판의 감쇠계수 및 질량을 각각 의미한다. 또한, $\Delta\dot{\theta}_B$ 와 $\Delta\ddot{\theta}_B$ 는 등판의 속도 및 가속도 변화를 나타낸다.

일반적으로 의자 등판에는 강성, 감쇠 그리고 관성에 의한 효과가 복합적으로 존재한다. 이와 같은 복합 임피던스 효과는 등판의 강성, 감쇠 및 관성에 의한 임피던스를 각각 더하여 구현할 수 있다. 따라서 복합 임피던스를 구현하기 위한 토크 τ_d 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_d &= \tau_{inertia} + \tau_{damp} + \tau_{stiff} \\ &= -m\Delta\ddot{\theta}_B - b\Delta\dot{\theta}_B - k\Delta\theta_B \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 τ_d 를 발생시키기 위해 모터에 인가해야 하는 전류 i_d 는 식 (3), (4), (5)로부터 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} i_m &= i_{inertia} + i_{damp} + i_{stiff} \\ &= -m\Delta\ddot{\theta}_B / K_T - b\Delta\dot{\theta}_B / K_T - k\Delta\theta_B / K_T \\ &= -(m\Delta\ddot{\theta}_B + b\Delta\dot{\theta}_B + k\Delta\theta_B) / K_T \end{aligned} \quad (7)$$

지금까지 의자 등판의 임피던스를 조절하기 위한 구체적인 예를 살펴 보았다. 이를 바탕으로 복합 능동 임피던스를 일반적인 경우에 대해서 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_d \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + B_d \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + K_d \begin{bmatrix} x \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_d \\ \tau_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\tau = J^T F \quad (9)$$

여기서 M_d , B_d , K_d 는 각각 질량, 감쇠 및 강성을 나타내는 행렬이며, τ_d 는 회전축의 토크 벡터, F_d 는 선형 스프링에 가해지는 엔드 이펙터에서의 힘 벡터이다. 따라서 이 식을 통하여 비틀림 스프링뿐만 아니라, 선형스프링에 대한 힘/토크를 바로 이에 대응하는 각 모터의 전류로 변환하는 것이 가능하다. 이를 통해 다양한 설계변수를 햅틱장치에 적용하여 제품에 대한 사람의 반응을 바로 확인함으로써 설계에 반영할 수 있다.

3.2 등판 설계에의 적용

압축스프링을 사용하는 여러 구조들 가운데, 현재 설계에서 가장 많이 활용되고 있는 두 가지 구조에 대하여 위에서 언급한 임피던스 제어 기술을 적용시켜 보았다. 하나는 그림 5(a)와 같이 압축스프링이 지면에 대해서 수직 방향으로 장착되어 있는 구조이고, 다른 하나는 (b)와 같이 스프링이 수평 방향으로 장착되어 있는 구조이다. 사람이 등판에 기대게 될 때 등판이 밀리는 각도에 비례하여 스프링이 선형적으로 압축하게 되고 등판의 회전축을 기준으로 사람에게 반력을 제공해 주게 된다.

여기서 U 는 사용자의 등이 등판에 가하는 힘이다. 따라서 회전축에 작용하는 토크는 스프링에 가해지는 힘의 작용점과 회전축 사이의 거리를 알면 구할 수 있다.

설계에 반영하고자 하는 스프링 상수를 식 (10)에 대입하면 등판을 뒤로 젖힐 때 스프링에 의해 발생하는 반력을 알 수 있다.

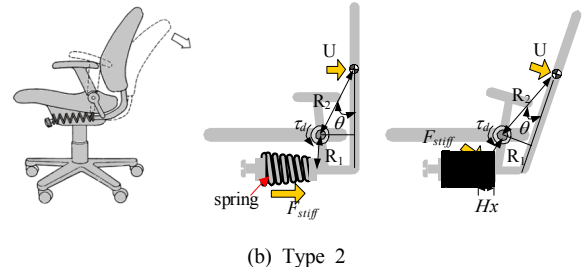
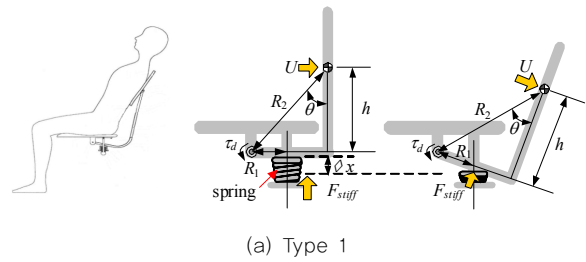


그림 5. Backrest design using a coil spring.

$$F_{stiff} = -k \Delta x \quad (10)$$

여기서 k 는 코일 스프링의 스프링 상수를, Δx 는 스프링의 압축량을 나타낸다. 이때 회전 중심축에서 스프링에 의한 힘이 작용하는 점까지의 거리를 R_1 , 회전 중심축에 연결된 프레임에 스프링에 의해 수직으로 작용하는 힘을 F_{stiff} 이라고 하면, 회전 중심축에서 발생하는 토크는

$$\tau_d = (R_2 \cos \theta)U = R_1 F_{stiff} \quad (11)$$

이 된다. 따라서 압축스프링에 의해 발생하는 토크를 식 (1)에 대입하면 원하는 전류를 계산할 수 있고, 이를 모터에 인가해 줌으로써 원하는 반력을 생성할 수 있게 된다. 즉, 주어진 강성에 대하여 스프링의 압축량에 비례하는 반력이 생성되고, 회전축을 중심으로 등판을 미는 힘의 반대 방향으로 토크를 발생시키게 된다. 이와 같은 방법을 통하여 다양한 모델에 대한 등판의 여러 강성을 설계자 및 사용자가 느낄 수 있게 된다.

4. 햅틱보조설계에 기반한 통합환경 구성

본 실험의 구성은 다음과 같이 햅틱의자와 제어기 및 PC 기반의 GUI로 구성되어 있다. 실험에서 사용된 햅틱의자는 그림 6과 같이 PC 기반의 GUI를 통해서 의자의 높이, 좌판 및 등판의 물리적인 특성(강성, 감쇠 등) 및 각도 등을 조절할 수 있다. 적용단계는 그림 7과 같다. 본 실험에서는 햅틱의자의 여러 조절요소 중, 등판의 강성변화에 대

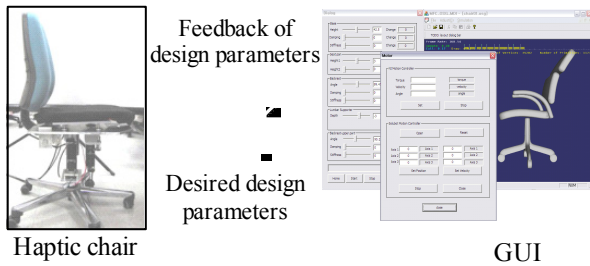


그림 6. Experimental setup for backrest design.

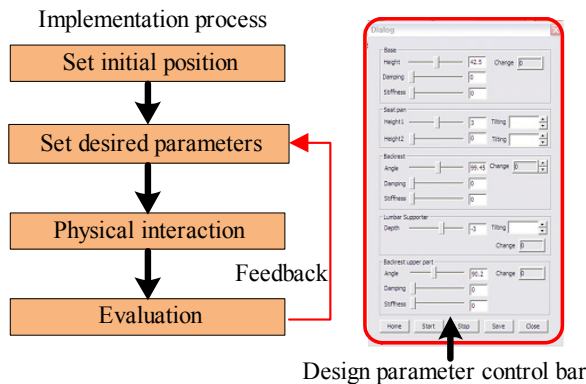


그림 7. Design process

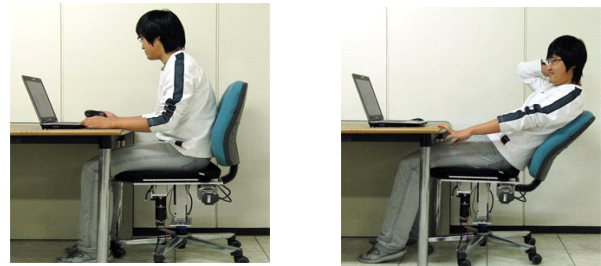
한 실험을 통해 의자설계에의 적용 가능성을 알아보고자 하였다.

4.1 강성변화에 대한 실험

의자설계에의 적용 가능성을 알아보기 위하여, 설계요소 중 등판의 강성을 실시간으로 변화시켜 가면서 이에 대한 사람들의 만족도를 조사하였다. 강성에 의한 영향만을 알아보기 위해 의자의 높이, 등판의 각도 등은 다른 요소들은 전부 고정하였다. 7명의 성인 남성을 대상으로 작업시의 동작과 휴식시의 동작에 대하여 강성을 각각 $k = 2, 5, 7, 9, 12$ Nm/deg로 주었을 때 각각의 경우에 대한 사용자의 선호도를 조사하였다. 실험자의 몸무게나 키가 실험에 주는 영향을 줄이기 위해 키 175~179cm, 몸무게는 72~76kg, 나이는 25~30세 사이의 성인 남성을 실험대상으로 선정하였다.

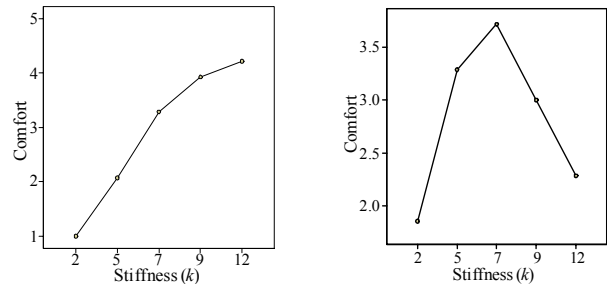
- (a) 작업동작(at work): 등판에 등을 살짝 기댄 상태로 작업을 수행함.
- (b) 휴식동작(at rest): 등판에 몸을 기댄 상태로 휴식을 취함.

그림 9와 같이 작업 시에는 등판의 강성이 클수록 전반적



(a) At work (b) At rest

그림 8. Experimental setup: (a) at work, and (b) at rest.



(a) At work (b) At rest

그림 9. Subject responses for various stiffnesses.

으로 높은 점수를 받았으며, 휴식 시에는 등판의 강성이 $k = 7$ Nm/deg 부근에서 대체적으로 좋은 점수를 얻었다. 위에서 얻은 결과가 어느 정도 유의미한지를 알아보기 위해 일원배치 분산분석 및 Tukey 사후검증을 실시하였다.

결과는 표 2와 같이 F 값은 작업동작과 휴식동작인 상태에서 각각 24.8, 6.3으로 F 임계값(기각치)보다 크고, p -value는 설정한 유의수준인 0.05보다 매우 작기 때문에 이 데이터가 유의미하다고 판단할 수 있다. 또한, 표 3으로부터 의미 있는 강성끼리 모여 있는 집단을 구분할 수 있는데, 작업시

표 2. One-way ANOVA results (at work and at rest).

Trial	Sum of squares	Mean square	F	p-value	Critical values of F
At work	50.61	12.65	24.83	3.8e-09	2.68
At rest	15.82	3.95	6.36	0.00078	2.68

표 3. Post hoc multiple comparisons (Tukey B) results.

Stiffness (k)	At work			At rest		
	A	B	C	A	B	C
2	1.0			1.85		
5		2.07		2.28	2.28	
7			3.28		3.0	3.0
9			3.92		3.28	3.28
12			4.21			3.71

는 C 집단이, 휴식시에는 B 집단이 가장 선호되는 강성이 모여 있는 집단임을 판단할 수 있다. 이와 같이 햅틱 의자를 의자의 개발에 사용하면, 실시간으로 강성을 변화시키면서 사용자들의 만족도 등을 바로 파악하여 설계에 반영시킬 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 CAD 기반의 설계 방식에 햅틱 기술을 접목시켜, 개발자가 설계 및 개발 단계에서 개발 대상이 되는 메커니즘과 직접 상호작용을 하여 관련되는 힘을 느끼고, 이를 설계에 반영하는 햅틱 기반 설계 (HAD) 기술을 개발하였다. 또한, 이 개념을 의자설계에 적용하기 위하여 의자의 다양한 설계요소를 실시간으로 반영할 수 있는 햅틱의자를 제작하였다. 능동 임피던스 제어기법을 이용하여 물리적으로 실제 시스템의 강성이나 감쇠를 변화시키지 않고, 이러한 물리적인 특성들을 소프트웨어적으로 조절할 수 있어 효율적인 의자 설계가 가능하였다.

참고문헌

- [1] Immersion, <http://www.immersion.com>
- [2] Sensable, www.sensable.com
- [3] Boeing, http://boeing.com/phantom/math_infow/
- [4] William A. McNeely, Kevin D. Puterbaugh, James J. Troy, "Advances in Voxel-Based 6-DOF Haptic Rendering," International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques archive ACM SIGGRAPH, 2005
- [5] M. Tideman, M. C. van der Voort, and F. J. A. M. van Houten, 2004, "Design and Evaluation of a Virtual Gearshift Application," IEEE Intelligent Vehicles Symposium
- [6] Lynne A. Slivovsky and Hong Z. Tan, "A real-time static posture classification system," In Proceedings of the 9th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Vol. 69-2, Orlando, FL, pp. 1049-1056, 2000
- [7] Hong Z. Tan, Lynne A. Slivovsky, and Alex Pentland, "A sensing chair using pressure distribution sensors," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 6, No. 3, pp. 261-268, 2001.
- [8] Park, S. C., Lee, Y. S., 1999, "A Study on the

Ergonomic Parameter for Design of Office Chair", Journal of Korean Furniture Society, Vol. 10, No. 1, pp. 13~21.

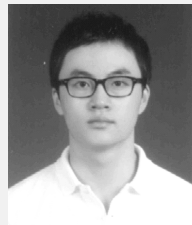
- [9] Kwak, W. M., Hong, S. S., Jung, S. G., Lee, S. D., Lee, D. C., Yoon, H. Y., 1999, "Ergonomic Design of Office Chair", Journal of Korean Society of Design Science, Vol. 12, No. 3, pp. 74~80
- [10] Park, S. C., Park, S. J., Hwang, M. C., 1995, "Research on Biomechanics of Korean Body Segments", Ergonomics Society of Korea, Vol. 1, pp. 291-300.
- [11] Shin, D. Y., Chung, W. C., Song, J. B., Kim, Y. I., 1998, "Bilateral Control of Arm Motion Generator Based on Linear Motor in Virtual Environment", KSPE conference, pp. 376~379
- [12] Huh, S. H., Jin, Y. J., Song, J. B., "Design of Haptic Chair based on Haptic-Aided Design Capable of Design Parameter Adjustment," Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 840 - 860, 2008



허석행

2009 고려대학교 기계공학부
(공학석사)
2009~현재 LIG넥스원 연구원
관심분야 : haptics, mobile
robotics

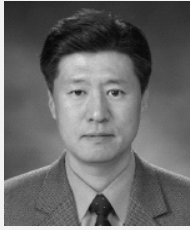
E-mail : gazago125@korea.ac.kr



이상덕

2009 고려대학교 기계공학과
(공학사)
2009~현재 고려대학교 기계
공학부 석박사통합과정
관심분야 : haptics, manipulator
design

E-mail : ysdchris@korea.ac.kr



승재복

1992 MIT 공과대학 기계공학과(공학박사)

1993~현재 고려대학교 기계공학부 교수

관심분야 : robot design and control, mobile robotics,

E-mail : jbsong@korea.ac.kr