

〈 논문 〉

동적 특성을 고려한 휴머노이드 펠비스의 구조최적설계

홍을표* · 유범재** · 김창환** · 박경진†

Structural Optimization of the Pelvis in a Humanoid Considering Dynamic Characteristics

Eul-Pyo Hong, Bum-Jae You, Chang-Hwan Kim, Gyung-Jin Park

Key Words : Humanoid(휴머노이드), Structural Optimization(구조최적설계), Equivalent Static Load(등가정하중)

Abstract

Biped humanoids maintain their stability through precise controls during locomotion or operation. Dynamic forces are applied to the humanoid structure during locomotion or operation. If the humanoid has weakness from a structural viewpoint, these forces cause severe deformation or vibration of the structure, which can make the humanoid unstable. In this research, a design scenario is proposed to design a robust humanoid structure under the dynamic loads. The pelvis part is selected for design practice. Multibody dynamics is adopted to calculate the dynamic loads and a structural optimization technique is employed to design the pelvis structures. Since it is extremely difficult to directly consider the dynamic loads in the optimization process, equivalent static loads are evaluated from the dynamic loads and the design results are discussed.

1. 서론

휴머노이드 로봇은 친근한 외형과 자유로운 이동성 등을 토대로 인간과 동일한 생활 환경에서 인간의 활동을 돕는 역할을 수행하는데 그 목적이 있다⁽¹⁾. 이런 목적을 달성하기 위하여 휴머노이드는 두 다리와 두 팔을 가진 인간과 유사한 형태를 가지도록 설계되는 경우가 많다. 이족 보행을 하는 로봇은 바퀴를 이용하여 이동하는 기존의 로봇들에 비해 거친 지형이나, 계단이 있거나, 장애물이 많은 지역에서 훨씬 큰 이동성을 가지고 있다

(2). 휴머노이드는 두 다리를 통해 높은 이동성이라는 장점을 가지는 동시에 외력이나 예측하기 어려운 변수들에 의한 불안정성이라는 단점을 가지게 된다.

휴머노이드에 관한 대부분의 연구들은 휴머노이드의 안정적인 제어에 관하여 수행되어왔다⁽³⁻⁵⁾. 그러나, 휴머노이드 구조의 변형과 진동은 휴머노이드의 안정성에 영향을 미치기 때문에 휴머노이드의 구조에 관한 연구 또한 중요하다. 휴머노이드의 다양한 동작은 복잡한 하중을 발생시키고, 이런 하중들이 휴머노이드 구조의 변형과 진동을 야기한다. 변형과 진동을 감소시키기 위하여 구조물을 임의로 보강하는 경우, 질량과 비용이 증가하는 경우가 많다. 그러므로 휴머노이드의 구조는 적당한 강성과 질량을 동시에 가질 수 있도록 설계되어야 한다. 이번 연구에서는 이런 문제점을 극복하고 체계적으로 휴머노이드 구조를 설계할

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한국과학기술연구원 인지로봇연구단

† 책임저자, 회원, 한양대학교

E-mail : gjpark@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5246 FAX : (031)400-1234

수 있도록 구조최적설계 기법을 이용하는 설계 시나리오를 제안하였다.

휴머노이드에 발생하는 실제 하중은 동하중이다. 동하중이 작용하는 경우, 시간중속 구속조건이나, 민감도 해석에 대한 처리가 매우 어렵기 때문에 동하중을 직접 이용한 최적설계는 어렵다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 일반적으로 동하중이 작용하는 경우, 동하중의 최대값에 동적계수를 곱하여 정하중으로 변환하는 방식이 사용된다⁽⁶⁾. 그러나, 이 경우 진동이나, 관성에 의한 효과를 고려할 수 없다. 이런 어려움을 극복하기 위해 등가정하중(Equivalent Static Loads, ESLs)이 사용되었다. 이 방법은 최우석 등에 의해 제안되었다⁽⁷⁾.

이번 연구에서는 한국과학기술연구원에서 개발된 휴머노이드인 마루 1 을 대상으로 하였으며, 휴머노이드의 직선 보행에 대한 연구가 수행되었다. 마루 1 의 펠비스 부품을 설계 대상으로 선정하였으며, 펠비스에 작용하는 동하중을 계산하기 위하여 다물체동역학 소프트웨어인 RecurDyn(8), 휴머노이드 시뮬레이터인 SimStudio(9)가 사용되었다.

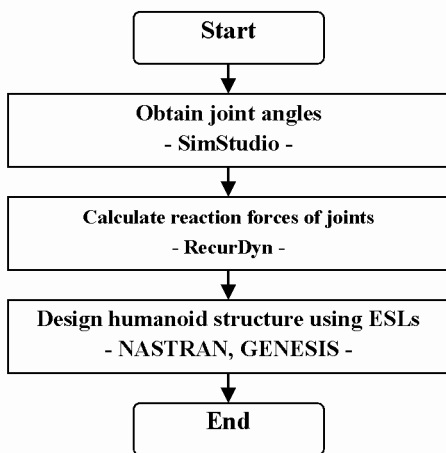


Fig. 1 Design procedure of the design scenario

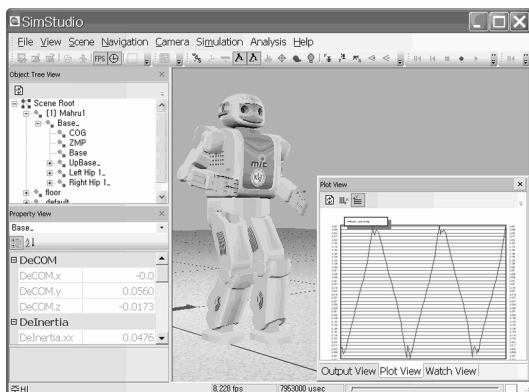


Fig. 2 Humanoid simulator, SimStudio⁽⁹⁾

얻어진 동하중을 이용하여 등가정하중을 계산하였으며, 구속 조건을 만족하는 상태에서 질량을 최소화하도록 펠비스에 대한 최적설계를 수행하였다. 위상최적설계와 형상최적설계를 위하여 구조해석 및 구조 최적설계 소프트웨어인 GENESIS⁽¹⁰⁾와 NASTRAN⁽¹¹⁾을 사용하였다.

2. 설계 시나리오

2.1 설계 시나리오의 절차

휴머노이드는 동작과 무게 중심, 하드웨어의 장착성 등의 여러 요소를 고려하여 설계를 수행한다⁽¹²⁾. 이 때, 체계적인 설계 방법을 사용하지 않고 설계자의 기존 지식에 의존하여 설계를 수행하는 경우가 많다. 이 경우, 휴머노이드의 구조가 과도하게 설계나, 구조적으로 불안정한 설계가 발생할 확률이 높다. 기존의 연구에서는 구조물에 작용하는 최대하중을 이용한 유한요소법을 통하여 얻어진 응력을 고려한 설계가 수행되었다⁽¹³⁾. 이 방식은 동하중이 작용하는 구조물을 정하중으로 변환하여 설계하는 일반적인 방법 중의 하나이다. 이렇게 변환된 정하중은 동적인 상태를 정확히 표현하지 못한다는 문제점을 가지고 있다. 이런 단점을 극복하기 위하여 동하중을 고려한 휴머노이드 구조 설계를 위한 체계적인 설계 시나리오가 제안되었다.

설계 시나리오의 절차는 Fig. 1 과 같이 나타낼 수 있으며, 각 단계는 다음과 같다.

- Step 1. 휴머노이드 시뮬레이터를 통하여 휴머노이드 각 조인트에서 작동각을 얻는다.
- Step 2. 다물체동역학 기법을 이용하여 각 조인트에서의 반력을 구한다. 휴머노이드 시뮬레이터에서 얻어진 각 조인트의 작동각이 다물체동역학 소프트웨어의 입력으로 사용된다.
- Step 3. 구조최적설계 기법을 이용하여 휴머노이드 구조들을 설계한다.
 - i. 위상최적설계기법을 통하여 구조의 개략적인 형상을 얻는다.
 - ii. 형상최적설계기법을 이용하여 상세 형상 및 치수를 결정한다.

Step 3에서는 동하중 상태에서의 변위장과 동일한 변위장을 나타내는 등가정하중(Equivalent Static Loads, ESLs)이 적용된다.

2.2 휴머노이드에 작용하는 동하중

보행하는 동안 휴머노이드의 구조에서는 매우

복잡한 형태의 동적 하중이 발생한다. 휴머노이드의 설계를 위해서는 보행 시 각 부품에 발생하는 하중을 정확히 알아야 하지만, 이 하중을 직접 측정하는데 어려움이 있다. 이 경우, 다물체동역학기법을 이용하여 실제 휴머노이드의 보행을 시뮬레이션하고 이를 통해 각 부품에 작용하는 하중을 구하는 방법을 이용할 수 있다.

휴머노이드의 동작은 Fig. 2 와 같이 Sim-Lab 에서 개발된 SimStudio⁽⁹⁾를 이용하여 얻어졌다. SimStudio 는 휴머노이드의 시뮬레이션을 위한 다양한 기능을 가지고 있지만, 현재 버전에서는 각 조인트에서 발생하는 하중을 제공하지는 않는다. 동하중을 얻기 위하여 다물체동역학 소프트웨어인 RecurDyn⁽⁸⁾을 이용하여 Fig. 3 과 같은 시뮬레이션이 실행되었다. 각 부품들은 집중질량과 링크들로 구성되었으며, SimStudio 에서 얻어진 각 조인트의 작동각을 입력으로 이용하여 동적 하중을 얻었다.

2.3 등가정하중을 이용한 구조최적설계^(7, 14-17)

2.3.1 등가정하중

등가정하중은 동적인 하중이 작용할 때 임의의 시간에 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 만들어내는 정하중으로 정의된다. 유한요소법의 진동이론에 의해, 구조물의 동적인 특성은 다음과 같은 미분 방정식으로 표현된다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{z}(t) = \mathbf{r}(t) \quad (1)$$

여기에서 \mathbf{M} 은 질량행렬, \mathbf{K} 는 강성행렬, \mathbf{b} 는 설계변수, \mathbf{r} 는 동적하중벡터, \mathbf{z} 는 동하중에 의한 변위벡터이다. 감쇠효과는 무시한다. 식 (1)과 정적상태에서의 유한요소 방정식을 고려하면, 등가정하중은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{z}(t) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{z}}(t) \quad (2)$$

또는

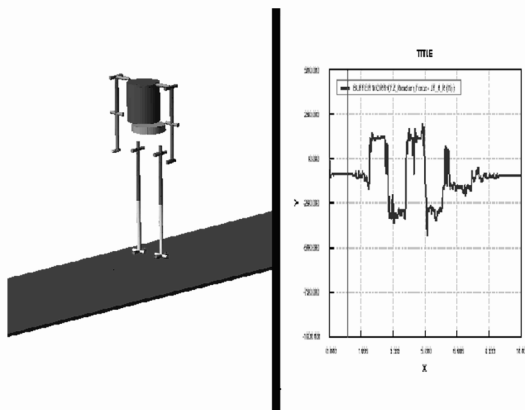


Fig. 3 Multi-body dynamics model and calculated reaction forces using RecurDyn⁽⁸⁾

$$\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{z}(t) = \mathbf{f}_{eq} \quad (3)$$

따라서,

$$\mathbf{f}_{eq} = \mathbf{r}(t) - \mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{z}}(t) \quad (4)$$

식 (4)로부터 등가정하중은 모든 자유도(DOFs)와 이산화된 시간영역에 대한 외력과 관성력을 포함하고 있음을 알 수 있다. 식(1)의 해는 이산화된 시간영역에서 구하므로 등가정하중 역시 이산시간영역에서 산출된다. 식 (1)의 해는 과도응답해석을 통하여 얻을 수 있다. 이산화된 시간영역의 u 번째 시간 절점에서의 등가정하중은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{f}_{eq}^u = \mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{z}_u = \mathbf{r}(t_u) - \mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{z}}_u, \quad u = 1, \dots, q \quad (5)$$

여기서, q 는 과도응답해석에서의 시간 절점(time grid point)이다.

2.3.2 알고리즘

등가정하중을 이용한 최적설계의 알고리즘은 Fig. 4 와 같으며, 각 단계에서는 아래와 같은 작업이 수행된다.

- Step 1. 초기값을 설정한다. $p=0, \mathbf{b}_p = \mathbf{b}_0$.
- Step 2. 설계변수 \mathbf{b}_p 에 대한 과도응답해석을 수행한다.
- Step 3. 식 (3)을 이용하여 모든 시간 절점에 대한 등가정하중을 계산한다.
 $p=0$ 이면 단계 5 로 이동한다.
 $p > 0$ 일때, $\sum_{i=1}^q \|f_{eq}^i(p) - f_{eq}^i(p-1)\| < \epsilon$ 이면 알고리즘을 종료하고, 그렇지 않은 경우, 단계 5 로 이동한다.
 $f_{eq}^i(p)$ 는 p 번째 반복수행에서의 i 번째 시간 절점에 대한 등가정하중이다.
- Step 4. 얻어진 등가정하중을 이용하여 다음의 정적 구조최적설계문제를 푼다.

Find \mathbf{b}

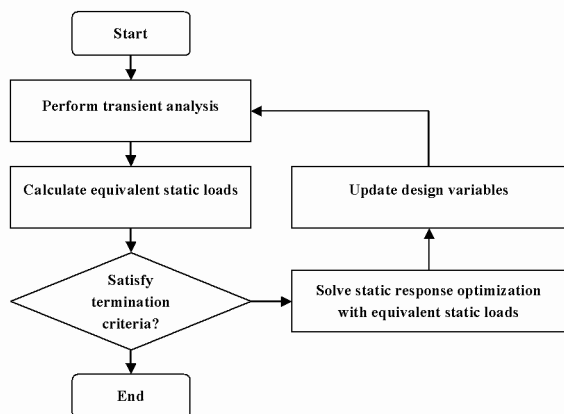


Fig. 4 Optimization process using equivalent static loads

to minimize $F(\mathbf{b})$
 subject to $\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{z}_i = \mathbf{f}_{\text{eq}}^i \quad (i=1, \dots, q)$
 $\mathbf{g}(\mathbf{b}, \mathbf{z})_j \leq 0$
 $(j = 1, \dots, \text{no. of constraints})$

Step 5. 설계 결과를 갱신하고, 단계 2 로 돌아간다. $p = p+1$

여기서 F 는 목적함수, \mathbf{f}_{eq} 는 등가정하중벡터, \mathbf{g}_j 는 j 번째 구속조건함수이다. 최적설계 단계에서 이산 시간 절점의 수만큼의 등가정하중이 다중하중조건(multiple loading condition)으로 적용된다. 그

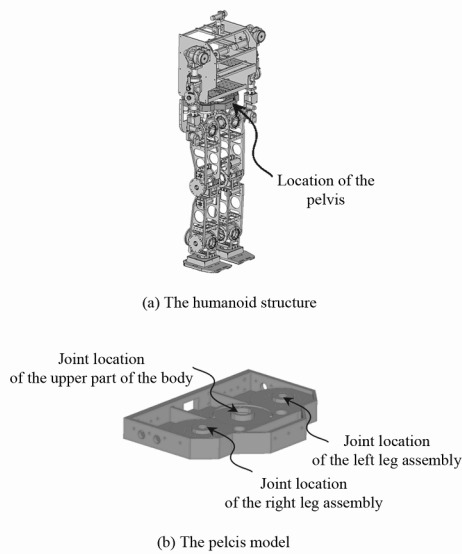


Fig. 5 The humanoid structure and the pelvis model

러나, 구조최적설계에서는 비교적 간단하게 다중하중조건을 처리할 수 있다⁽¹⁴⁾.

3. 펠비스의 구조 설계

휴머노이드가 보행하는 동안에는 하체 부분에서 상대적으로 큰 동작이 발생하기 때문에, 상대적으로 큰 하중이 하체 부분에서 발생한다. 펠비스는 Fig. 5 와 같이 상체와 하체를 연결하는 부품이다. 펠비스는 보행 중에 상체를 지지하면서, 두 다리에서 생성되는 하중을 동시에 받기 때문에 상대적으로 큰 하중을 받게 된다. 이런 이유로, 이번 연구에서는 펠비스를 설계대상으로 선정하였다. 또한 직선 보행 시에 발생하는 동적 하중을 고려하여 펠비스를 설계하였다.

3.1 펠비스의 동적 특성

발과 지면 사이에서 발생하는 하중과, 상체의 흔들림으로부터 발생하는 변위가 펠비스로 동시에 전달된다. 2.1 장에서 설명된 것처럼 펠비스에 작용하는 하중은 휴머노이드 시뮬레이터인 SimStudio⁽⁹⁾ 로 얻어진 조인트 각도에 대한 정보를 입력으로 사용하여, 다물체동역학 소프트웨어인 RecurDyn⁽⁸⁾ 을 통하여 계산되었다. 펠비스에 작용하는 하중은 Fig. 6 에서 보여지는 것과 같이 동적인 특성이 매우 강한 것을 볼 수 있다.

펠비스의 초기 상태를 확인하기 위하여

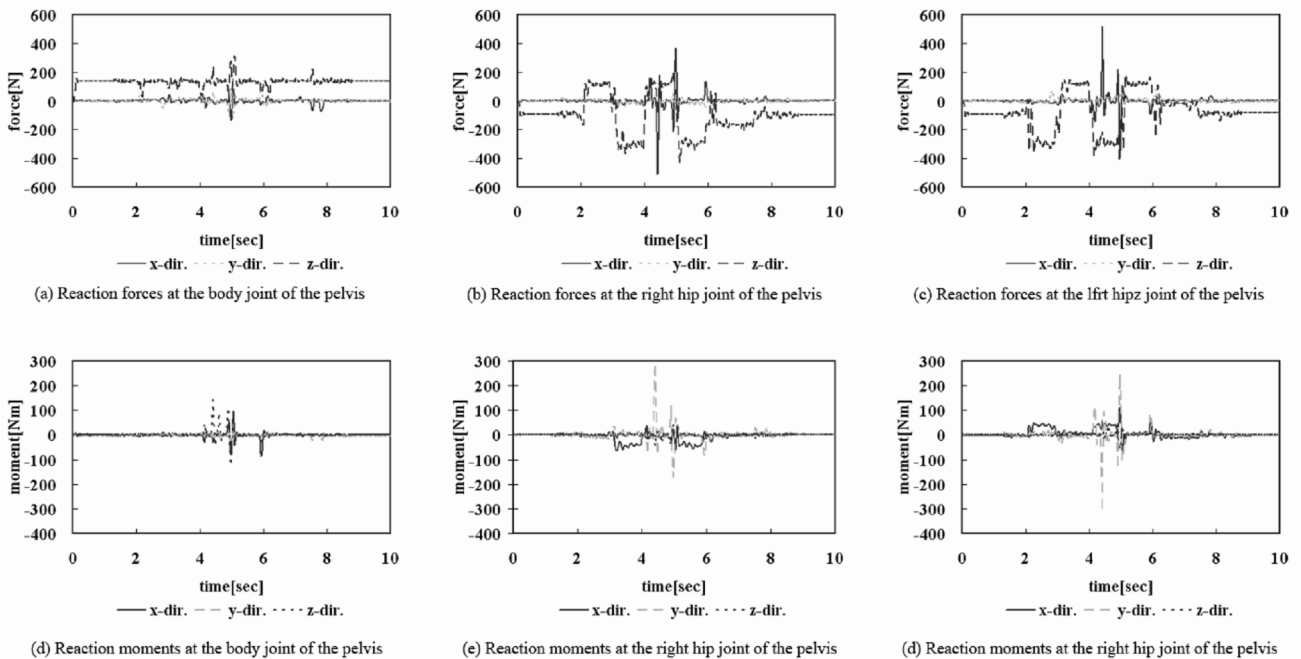


Fig. 6 Dynamic forces and moments of the pelvis part

NASTRAN⁽¹¹⁾을 이용하여 과도응답해석이 수행되었다. 응력분포와 최대응력이 발생하는 점에서의 응력값의 변화를 Fig. 7 에서와 같이 얻었다. 최대응력은 휴머노이드의 발이 바뀌는 4.4 초에서 발생하고, 78.4MPa 의 크기를 가지는 것을 확인하였다. 펠비스 재료의 항복응력이 약 103.0 MPa 임을 감안하면, 이는 응력의 관점에서는 안정적인 구조이지만, 개선할 여지가 충분히 남아 있다.

3.2 위상최적설계를 통한 초기 설계

펠비스의 초기 형상을 설정하기 위하여 위상최적설계 기법을 이용하였다. 위상최적설계를 위해 Fig. 8 과 같이 세 종류의 초기설계를 이용하였다. Type (a)와 Type (b)는 두께가 일정한 평판의 형태로 모델링 하였고, Type (c)는 강성을 보강해 줄 수 있을 것이라 판단되는 평판 가운데 부분에 재료를 추가하여 모델링 하였다.

가장 강성이 큰 개략적인 기하학적 형상을 얻을 수 있도록 최적 설계 문제를 정식화하였다. 펠비스의 질량이 현재의 모델보다 작거나 같도록 하는 구속조건을 적용하여 아래와 같이 설계문제를 정식화 하였다.

Find optimal topology
to minimize strain energy
subject to mass ≤ mass₀

여기서, mass₀ 는 현재 펠비스 모델의 질량이다. 위상최적설계를 통하여 Fig. 9 와 같은 결과를 얻었다. (a) 모델의 경우에는 상체와 하체가 연결되는 부분에 재료들이 배치되어있는 전형적인 형태

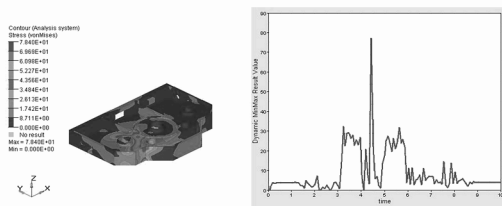


Fig. 7 Stress contour and maximum stress of the current pelvis design

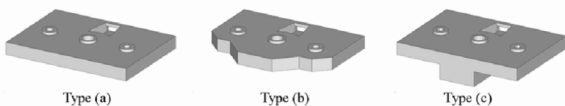


Fig. 8 Optimization process using equivalent static loads

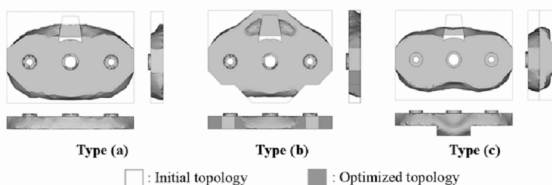


Fig. 9 Topology optimization results

를 가지는 것을 확인할 수 있다. (b) 모델의 경우에는 장착 부 뒤쪽의 재료가, (c) 모델의 경우에는 새롭게 추가된 바닥 면의 재료가 강성에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 각 모델의 질량은 현재 모델의 질량과 같다.

3.3 형상최적설계를 이용한 상세설계

펠비스의 상세 형상 과 치수를 결정하기 위하여 형상최적설계를 수행하였다. 형상최적설계를 위한 초기 모델은 위상최적설계를 통하여 얻어진 모델들의 특성을 잘 반영할 수 있도록 Fig. 10 과 같이 다시 모델링하였다. 형상최적설계는 질량을 최소화하면서, 안정성을 고려하여 최대응력이 50 MPa 을 넘지 않도록 정식화되었다.

Find optimal shape
to minimize mass
subject to $\sigma_{max} \leq 50 \text{ MPa}$

형상최적설계를 통하여 Fig. 11 과 Table 1 과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 각 모델의 질량은 현재

Table 1 Results of the redesigns of the pelvis

	Original model	Type (a)	Type (b)	Type (c)
Mass [kg]	1.59	1.44	1.49	1.23
Max. Stress [MPa]	78.4	50.7	46.2	50.3

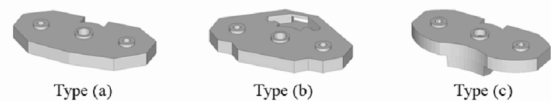


Fig. 10 Initial design model for shape optimization

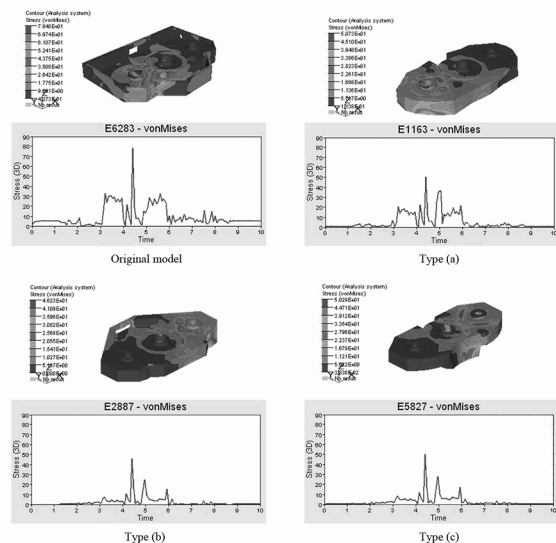


Fig. 11 Stress contour and maximum stress of the design results

재 모델과 비교하여 0.10 ~ 0.36 kg 감소하였으며, 최대응력은 대부분 50 MPa 정도인 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

동적인 하중조건을 고려하여 휴머노이드 구조를 설계하기 위한 구조적 관점에서의 설계 시나리오를 제안하였다. 먼저 휴머노이드 시뮬레이터와 다물체동역학 소프트웨어를 이용하여 휴머노이드에 작용하는 동하중을 계산한다. 그리고, 등가정하중을 이용하여 휴머노이드의 구조를 설계한다. 위상 최적설계 기법을 이용하여 초기 설계를 결정하고, 형상최적설계 기법을 이용하여 상세 설계를 수행하는 과정을 통하여 동적 하중을 고려하여 휴머노이드 구조를 설계할 수 있다. 제안된 설계 시나리오를 이용하여 펠비스 부품을 재설계하였다. 이를 통해 질량이 6~23% 감소하고, 최대 응력이 약 36% 감소한 새로운 설계들을 얻었다. 3장에서 얻어진 모델 중, 가장 질량이 작으면서 충분한 강성을 가지고 있다고 판단되는 (c) 모델을 이용하여 추가적인 연구가 진행 중이다.

휴머노이드의 구조가 변경되면 이 구조에 작용하는 동하중 또한 바뀌게 되고, 경우에 따라 관련된 구조들 또한 이에 맞게 변경되어야 한다. 향후 연구에서는 이런 관점을 고려한 반복적인 설계 시나리오에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 정통부 및 정보통신연구진흥원의 정보통신선도기반기술개발사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Wang, G., Huang, Q., Geng, H. and Li, K., 2003, "Cooperation of Dynamic Patterns and Sensory Reflex for Humanoid Walking," *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, September 14-19, 2003, Taipei, Taiwan.
- (2) Huang, Q., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. and Tanie, K., 2001, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 280-289.
- (3) Takanishi, A., Tochizawa, M., Karaki, H. and Kato, I., 1989, "Dynamic Biped Walking Stabilized with Optimal Trunk and Waist Motion," *IEEE/RSJ*

- International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Tsukuba, Japan.
- (4) Nakazawa, A., Nakaoka, S., Ikeuchi, K. and Yokoi, K., 2002, "Imitating Human Dance Motions through Motion Structure Analysis," *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2002, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- (5) Setiawan, S. A., Hyon, S. H., Yamaguchi, J. i. and Takanishi, A., 1999, "Physical Interaction between Human and a Bipedal Humanoid Robot - Realization of Human-follow Walking," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, May 1999, Detroit, Michigan.
- (6) Haftka, R. T. and Gürdal, Z., 1992, "Elements of Structural Optimization," Kluwer Academic Publishers, Dordrecht ; Boston.
- (7) Choi, W. S. and Park, G. J., 1999, "Transformation of Dynamic Loads into Equivalent Static Loads Based on Model Analysis," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, No. 1, pp. 29-43.
- (8) 2005, "RecurDyn/Solver Theoretical Manual," Function Bay, Inc., Seoul, Korea.
- (9) 2006, "SimStudio S/W Manual," SimLab., Ltd., Seoul, Korea. (in Korean)
- (10) 2001, "GENESIS User's Manual, Version 7.0," Vanderplaats Research and Development, Inc., Colorado Springs, CO.
- (11) 2003, "MSC NASTRAN User's Manual, Version 2004," MSC Software Corporation, Stanta Ana, CA.
- (12) Furuta, T., Tawara, T., Okumura, Y., Shimizu, M. and Tomiyama, K., 2001, "Design and Construction of a Series of Compact Humanoid Robots and Development of Biped Walk Control Strategies," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 37, No. pp. 81-100.
- (13) You, B. J., 2006, "A Study on the Development of Network-based Humanoid Technologies," Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea. (in Korean)
- (14) Park, G. J., 2007, "Analytic Methods for Design Practice," Springer-Verlag, London.
- (15) Kang, B. S., Park, G. J. and Arora, J. S., 2005, "Optimization of Flexible Multibody Dynamics Systems Using the Equivalent Static Loads," *Journal of American Institute Aeronautics and Astoronautics*, Vol. 43, No. 4, pp. 846-852.
- (16) Kang, B. S., Choi, W. S. and Park, G. J., 2001, "Structural Optimization Under Equivalent Static Loads Transformed from Dynamic Loads Based on Displacement," *Computers & Structures*, Vol. 79, No. 2, pp. 145-154.
- (17) Choi, W. S. and Park, G. J., 2002, "Structural Optimization Using Equivalent Static Loads at All the Time Intervals," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, No. 19, pp. 2077-2094.