

## 동적 특성을 고려한 휴머노이드 하체 부품의 구조최적설계

홍을표\* · 이일권\*\* · 유범재\*\*\* · 김창환\*\*\* · 박경진†

(2008년 8월 18일 접수, 2008년 9월 22일 수정, 2008년 9월 23일 심사완료)

### Structural Optimization of the Lower Parts in a Humanoid Considering Dynamic Characteristics

Eul-Pyo Hong, Il-Kwon Lee, Bum-Jae You, Chang-Hwan Kim and Gyung-Jin Park

**Key Words :** Humanoid(휴머노이드), Structural Optimization(구조최적설계), Equivalent Static Load(등가정하중), Multibody Dynamics(다물체동역학)

#### Abstract

A humanoid is a robot with its overall appearance based on that of the human body. When the humanoid moves or walks, dynamic forces act on the body structure. Although the humanoid keeps the balance by using a precise control, the dynamic forces generate unexpected deformation or vibration and cause difficulties on the control. Generally, the structure of the humanoid is designed by the designer's experience and intuition. Then the structure can be excessively heavy or fragile. A humanoid design scenario for a systematic design is proposed to reduce the weight of the structure while sufficient strength is kept. Lower parts of the humanoid are selected to apply the proposed design scenario. Multi-body dynamics is employed to calculate the external dynamic forces on the parts and structural optimization is carried out to design the lower parts. Because structural optimization using dynamic forces directly is fairly difficult, linear dynamic response structural optimization using equivalent static loads is utilized. Topology and shape optimizations are adopted for two steps of initial and detailed designs, respectively. Various commercial software systems are used for analysis and optimization. Improved designs are obtained and the design results are discussed.

#### 1. 서론

휴머노이드는 인간의 행동과 지적 능력을 모방한 로봇이다. 휴머노이드는 친숙한 외형과 이동의 유연성 등을 토대로 인간과 동일한 생활 환경에서 인간의 활동을 돕는 역할을 수행하는데 중요한 역할을 할 것이라 기대된다.<sup>(1)</sup> 이러한 목적을 실현하

기 위하여 휴머노이드는 두 다리와 두 팔을 가진 인간과 유사한 형태를 가지도록 설계하는 경우가 많다. 2족 보행을 하는 휴머노이드는 바퀴를 이용하여 이동하는 휴머노이드에 비해 장애물이 많고 거친 지형에서도 용이한 이동성을 갖는다.<sup>(2)</sup> 하지만 2족 보행 휴머노이드는 보행이 진행되면서 닫힌 사슬 구조(closed loop system)와 열린 사슬 구조(open loop system)가 반복되는 불안정한 다물체동역학 시스템이다.<sup>(3)</sup>

2족 보행 휴머노이드의 이런 불안정한 특성 때문에 대부분의 연구들은 휴머노이드의 안정적인 제어에 관해서 수행되어왔다.<sup>(4,5)</sup> 그러나 휴머노이드의 다양한 동작으로 인해 발생하는 복잡한 하중은 휴머노이드를 구성하는 부품들의 변형과 진동

\* 한양대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 삼성엔지니어링 기술본부  
\*\*\* 한국과학기술연구원 인지로봇연구단  
† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부  
E-mail : gjpark@hanyang.ac.kr  
TEL : (031)400-5246 FAX : (031)407-0755

을 유발하며, 이러한 변형과 진동은 휴머노이드의 안정성에 영향을 줄 수 있다. 그러나 휴머노이드의 변형과 진동을 감소시키기 위하여 구성 부품들을 임의로 보강하는 경우, 질량과 비용이 증가하는 경우가 많다. 또한, 질량을 감소시켜 구동부의 부하를 최소화 하기 위해서 구성 부품을 임의로 설계하는 경우, 상대적으로 강성이 저하되어 휴머노이드가 동작을 할 때 심한 진동을 일으키게 된다. 그러므로 휴머노이드의 구조는 강성과 질량을 동시에 고려하여 설계되어야 한다. 이러한 휴머노이드의 이런 특성을 고려하기 위해서는 휴머노이드의 제어적 관점에서의 연구뿐만 아니라, 체계적으로 휴머노이드의 구조를 설계할 수 있는 설계 기법에 관한 연구가 필요하다.

휴머노이드는 인간의 행위를 모방하면서 다양한 동작을 하게 된다. 이러한 동작을 수행할 때 휴머노이드에 발생하는 하중은 동하중이다. 기존의 연구에서는 휴머노이드 부품을 설계하기 위하여 부품에 작용하는 최대하중을 이용한 유한요소해석을 통해 설계를 수행하였다.<sup>(6)</sup> 이 방법은 구조물에 작용하는 동하중을 정하중으로 변환하여 설계하는 방법 중의 하나로 동하중이 작용하는 구조물의 설계를 위하여 경험적으로 얻은 동적 계수(dynamic factor)를 동하중의 최대값에 곱하여 얻어진 정하중을 이용하여 응력해석이나 정적최적설계를 수행하는 방법이다.<sup>(7)</sup> 그러나 정확한 동계수를 구하기 어려울 뿐만 아니라, 이렇게 변환한 정하중은 구조물의 동적 특성을 표현하지 못한다는 단점이 있다. 이런 문제점은 동하중을 직접 이용한 구조최적설계 기법을 이용하여 합리적으로 부품을 설계함으로써 극복될 수 있다. 그러나, 구조최적설계 시 동하중을 직접 이용하는 것은 시간중속 구속조건이나 민감도 해석에 대한 처리가 매우 어렵기 때문에 실제 문제에 적용하기 힘든 것으로 알려져 있다.

이러한 단점을 보완하고자 이전 연구에서는 동적 특성을 고려한 휴머노이드의 설계 시나리오를 제안하였고, 설계 시나리오를 바탕으로 휴머노이드의 골반(pelvis) 부품을 설계하였다.<sup>(8)</sup> 이전 연구에서 제안한 설계 시나리오는 동적 특성을 고려하기 위해서 등가정하중(Equivalent Static Loads, ESL)을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계(linear dynamic response structural optimization) 기법을 적용하였다. 등가정하중을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계 기법은 최우석<sup>(9)</sup> 등이 1999 년에 처음 제안하였고, 그 후로 지속적인 발전이 이루어져왔

다.<sup>(10-12)</sup> 등가정하중을 이용하여 휴머노이드 부품을 설계하는 경우, 부품의 설계 변경이 휴머노이드에서 발생하는 동적 하중에 영향을 주는 순환적인 구조를 갖게 되지만, 이전 연구에서 제안한 설계 시나리오는 이러한 순환적 특성을 고려하지 못하였다.

이번 연구에서는 이러한 문제점들을 극복하고 동적 특성을 고려하여 휴머노이드 부품을 설계하기 위한 개선된 설계 시나리오를 제안하였다. 연구를 위하여 한국과학기술연구원(KIST, Korea Institute of Science and Technology)에서 개발한 휴머노이드 마루 1(Mahru1)을 대상으로, 휴머노이드 보행과 관련하여 중요한 요소인 다리를 구성하고 있는 부품을 설계하는 연구를 수행하였다. 휴머노이드의 동작 시 각 부의 동작정보를 얻기 위하여 휴머노이드 시뮬레이터, SimStudio<sup>(13)</sup>를 이용하였으며, 얻어진 각 조인트의 각도정보와 다물체동역학 해석 프로그램 RecurDyn<sup>(14)</sup>을 이용하여 동하중을 추출하였다. 추출한 동하중을 입력값으로 사용하여 NASTRAN<sup>(15)</sup>을 통해 과도응답해석을 수행하였고, 구조최적설계 기법인 위상최적설계와 형상최적설계를 이용하여 휴머노이드 부품의 설계를 수행하였다. 구조최적설계 시 동적 효과를 고려하기 위하여 등가정하중을 사용하였으며, 구조최적설계 소프트웨어, GENESIS<sup>(16)</sup>를 사용하였다.

## 2. 등가정하중

등가정하중은 과도응답해석으로부터 얻어지는 임의의 시간에서의 응답과 동일한 응답을 발생시키는 정적해석에서의 하중을 의미한다.<sup>(12)</sup> 등가정하중을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계 기법은 이미 잘 개발되어 있는 정적 반응 최적화 알고리즘을 이용함으로써 동적 반응 최적화 문제를 직접 다루는 것과 유사한 효과를 거둘 수 있다.<sup>(11)</sup> 여기서는 등가정하중을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계에 대하여 간략하게 기술한다.

### 2.1 등가정하중의 정의 및 산출

유한요소법을 이용한 진동이론에 따르면 구조물의 동적 거동은 식 (1)과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있다.

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

여기서  $\mathbf{M}$  은 질량행렬,  $\mathbf{d}$  는 동하중에 의한 변위 벡터,  $\mathbf{K}$  는 강성행렬,  $\mathbf{b}$  는 설계변수,  $\mathbf{f}$  는 동하중 벡터,  $t$  는 시간이다. 한편 정적해석의 유한요소방정식은 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{x} = \mathbf{s} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{x}$ 는 정적 변위이고  $\mathbf{s}$ 는 정적하중을 의미한다. 식 (1)과 (2)로부터 동하중하의 과도응답 계산시 임의의 시간  $t_q$ 에 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 발생시키는 등가정하중  $\mathbf{f}_{eq}$ 는 식 (3)과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{d}(t) = \mathbf{s} = \mathbf{f}(t) - \mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{d}}(t) \quad (3)$$

이며, 여기서 등가정하중  $\mathbf{f}_{eq}$ 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{f}_{eq} = \mathbf{K}\mathbf{d}(t_q) \quad (q=1,2,\dots, \text{number of time steps}) \quad (4)$$

임의의 시간의 동적변위장  $\mathbf{d}(t_q)$ 는 식 (1)에서 계산한다. 이를 식 (2)의  $\mathbf{x}$ 에 대입하면 식 (4)를 얻을 수 있다. 식 (4)에 의해 계산한 정하중  $\mathbf{f}_{eq}$ 는 동하중에 의해 임의의 시간에 구조물에 발생하는 변위장과 정적해석 시 동일한 변위장을 유발하는 등가정하중이다. 식 (3)으로부터 등가정하중은 외력과 관성력을 포함하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 여기서 구한 등가정하중은 동적효과를 포함하고 있는 정하중이라고 할 수 있다.<sup>(11,12)</sup>

일반적으로 구조해석이나 이에 기초한 설계 시 유한요소모델을 생성한다. 유한요소모델을 완성하면 식 (4)의 전체강성행렬을 얻을 수 있다. 해석 범위의 각각의 시간단계에 대한 변위장은 과도응

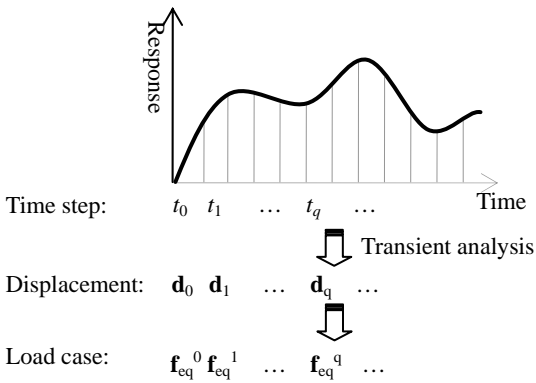


Fig. 1 Transformation from the dynamic loads to the equivalent static loads at every time step

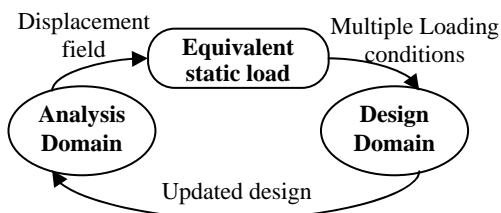


Fig. 2 The analysis domain and the design

답해석을 통해 계산한다. 이를 전체 강성행렬과 곱하여 시간단계의 개수만큼의 등가정하중 집합을 계산한다. Fig. 1은 해석시간 전체에 대하여 모든 자유도에 작용하는 등가정하중을 산출하는 과정을 나타낸다. 이렇게 계산한 등가정하중 집합은 설계 영역의 정적최적설계 단계에서 다중하중조건으로 사용한다.

2.2 등가정하중의 최적설계로의 적용

등가정하중을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계 과정은 Fig. 2와 같이 해석영역(analysis domain)과 설계영역(design domain)으로 나누어진다. 해석영역에서의 결과를 바탕으로 설계영역에서 사용될 하중조건을 계산하고, 설계영역에서의 결과값으로 개선된 설계에 대하여 다시 해석을 수행하여 제한조건의 만족을 검증한다. 이러한 과정을 설계주기(design cycle)라고 하며 이는 설계값이 수렴할 때까지 반복적으로 수행한다. 등가정하중을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계과정을 단계별로 Fig. 3에 나타내었으며 각 절차는 다음과 같다.

- 단계 1. 초기값을 설정한다.  $p=0, \mathbf{b}_p = \mathbf{b}_0$
- 단계 2. 설계변수  $\mathbf{b}_p$ 에 대한 과도응답해석을 수행한다. (해석영역)
- 단계 3. 식 (4)와 같이 모든 시간절점에 대한 등가정하중을 계산한다.
- 단계 4.  $p=0$  이면 단계 5로 이동한다.

$p > 0$  일 때  $\sum_{i=1}^q \|\mathbf{f}_{eq}^i(p) - \mathbf{f}_{eq}^i(p-1)\| < \epsilon$  이면 종료하고, 그렇지 않은 경우는 단계 5로 이동한다. 여기서  $\mathbf{f}_{eq}^i(p)$ 는  $i$ 번째 시간절점에서의  $p$ 번째 반복횟수에서 계산한 등가정하중이고  $\epsilon$ 는 충분히 작은 수이다. 개선된 설계에서의 등가정하중과 이전 설계

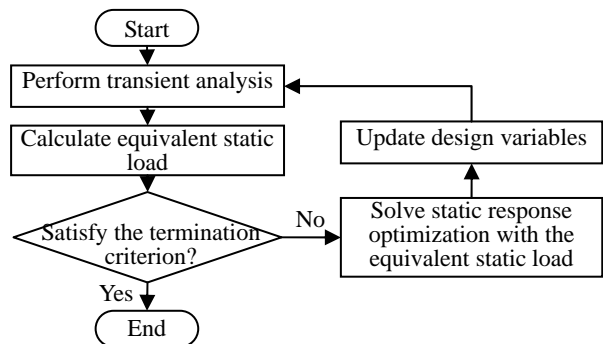


Fig. 3 The optimization process using equivalent static load

에서의 등가정하중의 차이가 허용오차 내에 있으면 수렴한 것으로 한다. 이전 설계와 차이가 없다는 것은 마지막 설계주기의 설계영역에서의 초기값과 개선 해의 값이 동일함을 의미한다.<sup>(17,18)</sup>

단계 5. 다수 개의 등가정하중을 이용하여 다음의 정적최적설계를 수행한다. (설계영역)

$$\begin{aligned} & \text{Find} && \mathbf{b} \\ & \text{to minimize} && F(\mathbf{b}) \\ & \text{subject to} && \mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{d}_i = \mathbf{f}_{\text{eq}}^i \\ & && (i=1, \dots, \text{number of time steps}) \\ & && g_j(\mathbf{b}, \mathbf{d}) \leq 0 \\ & && (j=1, \dots, \text{number of constraints}) \end{aligned}$$

여기서  $F$ 는 목적함수이고  $g_j$ 는  $j$  번째 구속조건함수이다.  $\mathbf{f}_{\text{eq}}$ 는 분할된 시간의 개수만큼 계산한 등가정하중으로 정적최적설계 시 다중하중조건(multiple loading conditions)으로 적용한다. 정적최적설계에서는 비교적 간단하게 다중하중조건을 처리할 수 있다.<sup>(19)</sup>

단계 6.  $p = p + 1$ , 설계 결과를 갱신하고 단계 2로 돌아간다.

### 3. 휴머노이드 구조설계를 위한 설계 시나리오

#### 3.1 설계 시나리오의 개요

휴머노이드의 설계를 위해서는 먼저 휴머노이드가 보행 시에 받는 동하중을 정확히 파악해야 한다. 이를 위하여 다물체동역학 해석 기법을 이용하여 휴머노이드의 보행 시 각각의 조인트에 걸리는 동하중을 계산하였다. 계산된 동하중은 과도응답해석 시 하중 데이터로 사용하였다. 휴머노이드의 설계는 위상최적설계와 형상최적설계의 두 단계로 나뉘는데, 위상최적설계는 개략적인 기하학적 형상을 얻기 위해 사용하였고 형상최적설계는 위상최적설계의 결과를 바탕으로 세부적인 형상이나 치수를 결정하기 위해 사용하였다. 위상최적설계와 형상최적설계 시 동하중을 직접적으로 고려하기 위해서 등가정하중을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계 기법을 적용하였다.

휴머노이드 구조최적설계의 결과로 설계 부품의 형상이 변하게 되면 설계 부품의 기계적 제원도 같이 변하게 된다. 이로 인해 휴머노이드에서 발생하는 동하중을 구하기 위해서 사용했던 다물체

동역학 시스템 모델의 정보가 변하게 되므로, 휴머노이드가 보행 시 받는 동하중 또한 변하게 된다. 이렇게 변한 동하중을 이용하여 휴머노이드 설계 과정을 다시 수행하게 되면 그 결과 역시 다를 가능성이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 전체 설계 과정을 반복적으로 수행하는 방식을 적용하였다. 이러한 과정을 통하여 설계에 의한 구조물의 변경과 동적 하중의 변화에 의한 어려움을 해결할 수 있다.

#### 3.2 설계 시나리오의 절차

설계 시나리오의 절차는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있으며, 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다.

단계 1. 휴머노이드 시뮬레이터를 통해 보행 시 각 조인트의 각도정보를 얻는다.

단계 2. 다물체동역학 시스템 모델을 생성하고, 단계 1에서 얻은 각도정보를 이용한 다물체동역학 해석 기법을 통해 휴머노이드의 각 조인트에 작용하는 동하중을 구한다.

단계 3.  $\|\mathbf{f}^i_{\text{reaction}}(n) - \mathbf{f}^i_{\text{reaction}}(n-1)\| \leq \varepsilon_1$  이면 설계를 종료하고 그렇지 않은 경우는 단계 4로 이동한다.  $\mathbf{f}^i_{\text{reaction}}(n)$ 는  $i$  번째 시간절점에서의  $n$  번째 설계사이클에서의 동하중이고  $\varepsilon_1$ 는 충분히 작은 수이다. 개선된 설계에서의 동하중이 바로 전 단계의 동하중과 같다는 것은 구조최적설계를 통하여 얻어질 설계 결과가 이전 단계의 결과와 동일하다는 것을 의미한다. 즉, 이는 설계가 수렴했다고 볼 수 있다.

단계 4. 단계 2에서 얻어진 동하중을 이용하여 휴머노이드 부품의 개략적인 형상을 설계하기 위하여 등가정하중을 이용한 위상최적설계 기법을 적용하였다.

단계 4-1. 위상최적설계 모델의 과도응답해석을 수행한다. 과도응답해석의 하중정보는 단계 2에서 구한 휴머노이드의 각 조인트에 작용하는 동하중을 사용한다. 이를 통해 위상최적설계 모델의 전체 강성행렬과 전체시간절점에 대한 동적 변위벡터에 대한 정보를 얻는다.

단계 4-2. 단계 4-1의 결과를 이용하여 등가정하중을 계산한다.

단계 4-3.  $\sum_{i=1}^q \|\mathbf{f}_{\text{eq}}^i(p) - \mathbf{f}_{\text{eq}}^i(p-1)\| < \varepsilon_2$  이면 단계 5로 이동하고 그렇지 않은 경우는 단계 4

4 로 이동한다. 여기서  $f_{eq}^i(p)$  는  $i$  번째 시간절점에서의  $p$  번째 반복횟수에서 계산한 등가정하중이고  $\epsilon_2$  는 충분히 작은 수이다.

단계 4-4. 단계 4-2 에서 구한 등가정하중을 다중하중조건으로 적용하여 위상최적설계 기법을 통해 설계 부품의 개략적인 형상을 결정한다.

단계 4-5. 위상최적설계 모델의 물성치를 갱신하고 단계 4-1 로 이동한다.

단계 5. 단계 4 를 통하여 얻어진 개략적인 형상을 기반으로 휴머노이드 부품의 상세 치수 및 형상을 설계하기 위하여 등가정하중을 이용한 형상최적설계 기법을 적용하였다.

단계 5-1. 형상최적설계 모델의 과도응답해석을 수행한다. 과도응답해석의 하중정보는 단계 2 에서 구한 휴머노이드 각 조인트에 작용하는 동하중을 사용한다. 이를 통해 형상최적설계 모델의 전체강성행렬과 전체시간절점에 대한 동적변

위벡터에 대한 정보를 얻는다.

단계 5-2. 단계 5-1 의 결과를 이용하여 등가정하중을 계산한다.

단계 5-3.  $\sum_{i=1}^q \|f_{eq}^i(p) - f_{eq}^i(p-1)\| < \epsilon_2$  이면 단계 6 로 이동하고 그렇지 않은 경우는 단계 5-4 로 이동한다.

단계 5-4. 단계 5-2 에서 구한 등가정하중을 다중하중조건으로 적용하여 형상최적설계 기법을 통해 설계 부품의 상세한 형상을 결정한다.

단계 5-5. 형상최적설계 모델의 절점 좌표를 갱신하고 단계 5-1 로 이동한다.

단계 6. 휴머노이드의 각 조인트에 작용하는 동하중을 다시 계산하기 위해서 다물체동역학 시스템 모델의 정보를 갱신하고 단계 1 로 이동한다.

#### 4. 설계 시나리오를 이용한 휴머노이드 하체 부품의 구조최적설계

2 족 보행 시, 휴머노이드의 구조는 왼쪽, 양 다리, 오른쪽 다리의 순서로 순차적이며 반복적으로 지지된다. 이와 함께 이동으로 인해 발생하는 상체의 관성 또한 함께 견딜 수 있도록 설계 하여야 한다. 따라서 하체 부품은 강성이나 강도 측면에서 우선적으로 고려하여야 할 부품으로 간주할 수 있고, 구조적인 안정성에 대한 필요성이 다른 부품에 비해 상대적으로 크다고 할 수 있다.

이러한 이유로 휴머노이드의 하체를 구성하는 부품 중 다른 부품에 비해 비교적 큰 응력이 작용하는 허벅지 부품(thigh part)과 종아리 부품(shin part)에 대하여 설계를 수행하였다. Fig. 5 는 휴머노이드 프레임 구조를 나타낸 그림이다.

##### 4.1 휴머노이드의 동적 특성

동적 특성을 파악하기 위해 직선보행, 측면보행, 방향전환의 3 가지 보행조건에 대한 다물체동역학 해석기법을 이용하여 휴머노이드의 각 조인트에 걸리는 동하중을 계산하였다. Fig. 6 은 휴머노이드가 직선보행을 할 때 휴머노이드 하체 부품을 구성하는 조인트에 걸리는 반력을 나타낸 그래프이다. 그래프를 통하여 시간에 따른 하중의 변화 폭이 상당히 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 휴머노이드에서 발생하는 하중이 동적인 특성이 매우 강하

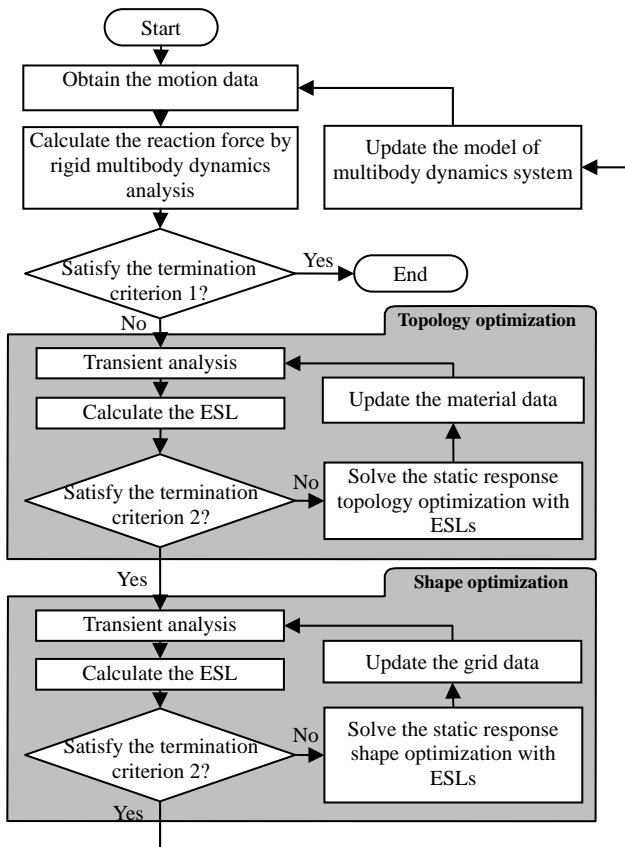


Fig. 4 The procedure of the design scenario for the optimization

다는 것을 의미한다. 따라서 휴머노이드의 동적 특성을 고려한 설계를 위하여 등가정하중을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계 기법을 적용하는 것이 타당하다는 것을 확인할 수 있다.

4.2 하체 부품의 구조적 특성

구조최적설계 과정 중 위상최적설계 및 형상최적설계 문제의 정식화에서는 목적함수, 설계변수, 제한조건 등이 필요하다. 이를 위하여 현재 휴머노이드 하체 부품의 구조적 특성을 파악할 필요가 있다. 즉, 현재의 휴머노이드 하체 부품과 비교하여 응력과 강성은 같은 수준을 유지하면서, 질량을 줄일 수 있는 설계를 하기 위해서 현재 부품의 응력과 강성을 먼저 파악해야 한다.

Fig. 7 은 허벅지 부품과 종아리 부품의 과도응답해석의 결과로써 휴머노이드가 직선보행 시 각 부품이 받는 응력 분포를 나타낸 그림과 시간에 따른 최대 von-Mises 응력 값에 대한 그래프이다. Fig. 8 은 허벅지 부품과 종아리 부품의 고유진동수해석 결과를 나타낸 그래프이다.

4.3 하체 부품의 위상최적설계

위상최적설계는 구조물의 주어진 설계 영역 내에서 목적 값을 최소화하거나 최대화하는 질량의 분포 상태를 결정하는 최적설계 기법이다.<sup>(19)</sup> 위상최적설계를 위해서는 먼저 초기 설계 영역을 설정

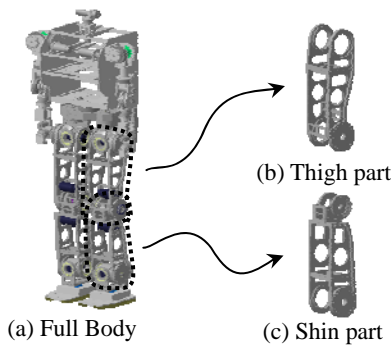


Fig. 5 Structure of the humanoid Mahru1

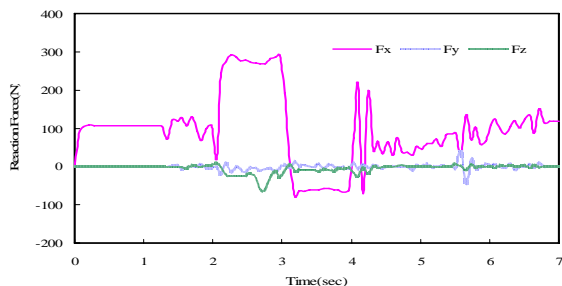


Fig. 6 Reaction forces at the hip joint

하여야 한다. 초기 설계 영역은 상대 부품과의 간섭이나 기계적 특성을 고려하여 선정하였다.

휴머노이드의 프레임은 액추에이터, 회로기판, 센서 및 배터리 등을 장착해야 하므로 허벅지 부품과 종아리 부품의 내부를 설계 영역으로 설정할 수는 없다. 그리고 각 부품과 부품이 연결되는 조인트 부분도 하모닉 드라이버를 체결해야 하기 때문에 설계 영역으로 설정할 수가 없다. 하지만 허벅지 부품과 종아리 부품의 옆면은 질량을 줄이기 위해서 임의적으로 설계된 부분이기 때문에 재설계가 가능하다. 따라서 허벅지 부품과 종아리 부품의 옆면을 설계 영역으로 설정하였다.

위상최적설계는 현재의 설계와 비교하여 질량은 작거나 같으면서 강성을 높일 수 있도록 정식화를 하였다. 일반적으로 강성은 변형에너지와 반비례하기 때문에 강성이 큰 설계를 얻기 위해서 구조물의 변형에너지를 최소화하였다. 위상최적설계 정식화는 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && \text{optimal topology} && (5a) \\
 &\text{to minimize} && \text{strain energy} && (5b) \\
 &\text{subject to} && \text{mass} \leq \text{mass}_{\text{initial}} && (5c)
 \end{aligned}$$

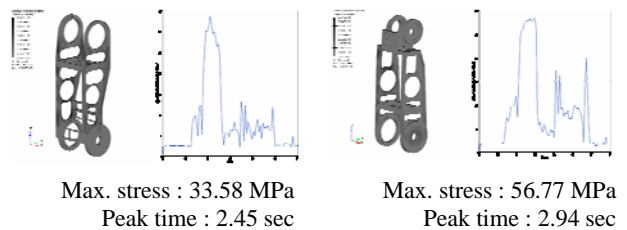


Fig. 7 Stress contour and graph of the original lower parts



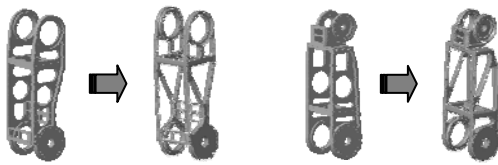
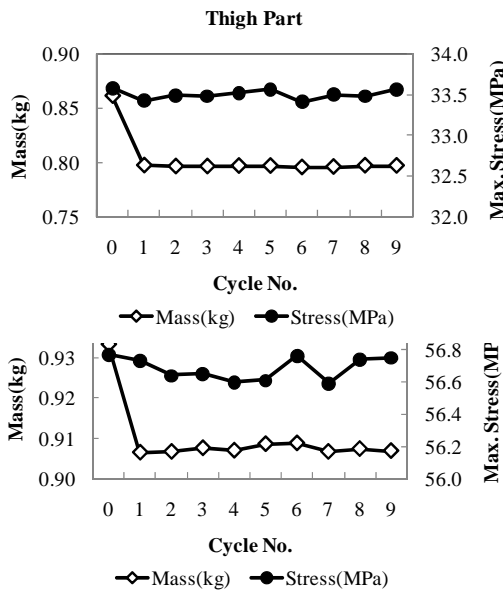
Fig. 8 Stress contour and graph of the lower parts



Fig. 9 The results of the lower parts for topology optimization

**Table 1** Optimization results of the lower parts

		Current Design	Modified Design
Thigh	Mass [kg]	0.86	0.79
	Max. Stress [MPa]	33.58	33.54
	1 <sup>st</sup> Natural Frequency [Hz]	148.9	149.0
Shin	Mass [kg]	0.93	0.90
	Max. Stress [MPa]	56.77	56.40
	1 <sup>st</sup> Natural Frequency [Hz]	103.1	103.1

**Fig. 10** The current designs and the modified designs of the lower parts**Fig. 11** The history of the objective function and the constraint of the lower parts

위상최적설계의 결과로 Fig. 9 와 같은 형상을 얻었다. 두 부품 모두 조인트 에 재료가 추가적으로 배치가 되었고 전체적으로 대각선 방향으로 재료가 배치되는 모습을 관찰할 수 있었다.

#### 4.4 하체 부품의 형상최적설계

위상최적설계는 개략적인 기하학적 형상을 얻을 수 있지만, 상세한 형상이나 치수를 결정해 주지는 않는다. 구조물의 최종적인 설계를 위해서는

정확한 형상과 치수가 필요하기 때문에 위상최적설계를 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 형상최적설계를 수행하였다.

형상최적설계는 질량을 최소화하면서 현재 설계보다 응력은 줄이고 강성을 높이기 위해서 식 (6) 과 같이 최적설계 문제를 정식화 하였다.

$$\text{Find optimal shape} \quad (6a)$$

$$\text{to minimize mass} \quad (6b)$$

$$\text{subject to } \sigma \leq \sigma_{\text{initial}} \quad (6c)$$

$$\text{natural frequency} \geq \text{natural frequency}_{\text{initial}}$$

형상최적설계를 통해 Fig. 10 과 같은 결과를 얻었다. 두 부품 모두 프레임의 두께가 전체적으로 얇아진 모습을 관찰할 수 있었다.

#### 4.5 설계 시나리오에 따른 반복설계

설계 시나리오의 절차에 따라 휴머노이드 설계 과정을 설계가 수렴할 때까지 반복적으로 수행하였다. 허벅지 부품과 종아리 부품의 최종적인 설계를 도출하기 위해서 총 9 번의 반복설계를 수행하였으며 반복과정을 Fig. 11 에 나타내었으며, 설계 결과는 Table 1 과 같다. 초기모델과 비교하면 허벅지 부품은 질량이 약 7.5%, 종아리 부품은 질량이 약 3.0% 감소한 개선된 설계를 얻을 수 있었다.

휴머노이드의 허벅지 부품과 종아리 부품은 액추에이터, 회로기판, 센서, 배터리, 하모닉 드라이버 등 수 많은 부품들과 서로 조립되어 있다. 이러한 이유로 인해 다른 부품과의 연관성을 고려하기 위해서 설계영역을 크게 설정할 수가 없었다. 만약 설계영역을 더 크게 설정할 수 있다면 휴머노이드 부품의 질량을 더욱 감소시킬 수 있을 것이다.

## 5. 결론

휴머노이드의 구조를 보다 체계적으로 설계하기 위해서 동적 하중조건을 고려한 개선된 설계 시나리오를 제안하였다. 제안된 설계 시나리오에서는 다물체동역학 해석 기법과 구조최적설계 기법을 적용하였다. 구조최적설계 시 동적 하중조건을 고려하기 위해서 등가정하중을 이용한 선형 동적 응답 구조최적설계 기법을 적용하였다.

설계 시나리오의 절차에 따라 먼저 휴머노이드 시뮬레이터와 다물체동역학 소프트웨어를 이용하여 휴머노이드에 작용하는 동하중을 계산한다. 그리고 계산한 동하중을 등가정하중으로 변환하고 이를 이용하여 휴머노이드의 선형 동적 응답 구조

최적설계를 수행한다. 선형 동적 응답 구조최적설계 단계는 크게 위상최적설계와 형상최적설계의 두 단계로 구성이 되어있다. 먼저 위상최적설계 기법을 이용하여 초기 형상을 결정하고 형상최적설계 기법을 이용하여 상세 형상을 결정한다.

설계 시나리오는 순환적인 특성을 갖고 있기 때문에 설계가 수렴할 때까지 위의 과정을 반복한다. 이러한 설계 시나리오를 휴머노이드 설계에 적용하여 휴머노이드의 하체 부품에 대한 구조최적설계를 수행하였다. 이를 통해 응력과 강성의 제한 조건을 만족하면서 질량을 약 3~8% 가량 줄일 수 있는 새로운 설계를 얻을 수 있었다. 이번 연구는 기존의 설계를 개선하는 과정에 적용하였다. 그러나, 만약 설계 초기 단계에서 제안된 설계 시나리오를 적용할 수 있다면 보다 합리적으로 휴머노이드 구조를 설계 할 수 있을 것으로 기대된다.

최근 휴머노이드의 2 축 보행에 관한 연구 동향을 살펴보면 대부분의 연구자들이 휴머노이드의 안정적인 제어에 초점을 맞추어 연구를 진행하여 왔다. 그리고 아직까지는 휴머노이드의 구조적인 특성에 초점을 맞춘 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 하지만 안정적인 제어를 하기 위해서는 휴머노이드의 구조적 특성에 대한 연구가 뒷받침이 되어야 할 것이다. 향후에는 휴머노이드의 구조적 특성에 대한 연구가 보다 많이 진행되어야 할 것이며, 구조적인 특성과 더불어 제어적인 특성을 함께 고려한 연구가 필요할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R01-2008-000-10012-0)이며, 2008 년도 2 단계 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

## 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, 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) Youm, Y., 2002, "Multibody Dynamics of Closed, Open, and Switching Loop Mechanical Systems,"

*Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 237~254.

(4) 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*, September 4-6, Tsukuba, Japan.

(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) You, B. J., 2006, "A Study on the Development of Network-based Humanoid Technologies," Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea. (in Korean)

(7) Haftka, R. T. and Gürdal Z., 1991, *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

(8) Hong, E. P., You, B. J., Kim, C. H., Park, G. J., 2007, "Structural Optimization of the Pelvis in a Humanoid Considering Dynamic Characteristics," *Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Meeting*, May 30-June 1, Busan, Korea, pp. 291~296.

(9) 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.

(10) 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*, March, Vol. 191, No. 19, pp. 2077-2094.

(11) 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.

(12) Kang, B. S. and Park, G. J., 2003, "Optimization of Flexible Multibody Dynamic Systems using Equivalent Static Loads Method," *The Fifth World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, May 19-23, Lido di Jesolo, Italy, pp. 319-320.

(13) SimStudio S/W Manual, 2006, Simlab. Ltd. (in Korean)

(14) RecurDyn/Solver Theoretical Manual, 2005, Function Bay Inc.

(15) MSC NASTRAN User's Manual; Version 2004, 2003, MSC Software Corporation.

(16) GENESIS User's Manual, Version 7.0, 2001, Vanderplaats Research and Development Inc.

(17) Haug, E. J. and Arora, J. S., 1979, *Applied Optimal Design*, Wiley & Sons, New York, U.S.A.

(18) Arora, J. S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGRAW-HILL, New York, U.S.A.

(19) Park, G. J., 2007, *Analytic Methods for Design Practice*, Springer-Verlag, Germany.