

## 위상최적화를 이용한 수직 다관절 로봇의 경량 설계<sup>§</sup>

홍성기\* · 홍정기\* · 김태현\*\* · 박진균\*\* · 김상현\*\* · 장강원\*\*\*†

\* 세종대학교 대학원 기계공학과, \*\* 현대중공업(주), \*\*\* 세종대학교 기계항공우주공학부

## Lightweight Design of a Vertical Articulated Robot Using Topology Optimization

Seong Ki Hong\*, Jung Ki Hong\*, Tae Hyun Kim\*\*, Jin Kyun Park\*\*, Sang Hyun Kim\*\*  
and Gang-Won Jang\*\*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Sejong Univ.,

\*\* Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

\*\*\* Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Sejong Univ.

(Received May 23, 2012 ; Revised October 24, 2012 ; Accepted October 25, 2012)

**Key Words:** Topology Optimization(위상최적화), Vertical Articulated Robot(수직 다관절 로봇), Lightweight Design(경량 설계)

**초록:** 수직 다관절 로봇의 세 가지 주요 부품인 베이스프레임, 하부프레임, 상부프레임의 경량화를 위하여 위상최적화를 적용하였다. 위상최적화를 위한 설계 영역은 기존 모델을 포함시키는 단순 영역으로 설정하고 이를 삼차원 솔리드 요소로 이산화하였다. 설계 변수들은 SIMP 법을 사용하여 각각의 요소의 물성치를 파라미터화 시켰다. 로봇의 다물체 동역학 해석으로부터 얻어진 하중들을 로봇의 하중조건으로 부여하였으며 최적화의 목적 함수는 구조의 정적, 동적 강성의 조합으로 설정하고 제한조건은 질량제한 조건을 부과하였다. 위상최적설계로 얻은 결과는 주조 제조에 용이한 설계로 후처리하였다. 최종 최적화 모델은 기존 모델과 비교하여 비슷하거나 큰 정적, 동적 강성을 가지면서 베이스프레임은 11.0%, 하부프레임은 12.0%, 상부프레임은 10.0% 경량화시킬 수 있었다.

**Abstract:** Topology optimization is applied for the lightweight design of three main parts of a vertical articulated robot: a base frame, a lower and a upper frame. Design domains for optimization are set as large solid regions that completely embrace the original parts, which are discretized by using three-dimensional solid elements. Design variables are parameterized one-to-one to the material properties of each element by using the SIMP method. The objective of optimization is set as the multi-objective form combining the natural frequencies and mean compliances of a structure for which load steps of interest are selected from the multibody dynamics analysis of a robot. The obtained results of topology optimization are post-processed to designs favorable to manufacturability for casting process. The final optimized results are 11.0% (base frame), 12.0% (lower frame) and 10.0% (upper frame) lighter with similar or even higher static and dynamic stiffnesses than the original models.

### 1. 서론

고강성, 고강도, 경량화는 기계구조물을 설계할 때 가장 중요하게 고려해야 할 성능들이다. 최근에는 이러한 성능들의 향상을 위하여 CAE 기반의

구조최적화 기법을 적용한다. 그 중에서 위상최적화는 기존 모델을 포함하는 단순화된 설계영역을 사용하고, 이산화된 요소마다 설계변수를 부여함으로써 기존 설계와는 다른 새로운 레이아웃의 설계를 가능하게 한다.<sup>(1)</sup> 위상최적화의 이러한 장점은 1990년대 중반 이후 부품 레벨의 설계에 적용되었고 최근에는 그 쓰임새가 매우 활발하다.<sup>(2-6)</sup>

본 연구는 유한요소해석 기반 위상최적화 기법을 로봇의 주요부품의 경량 설계에 적용하고자 한다. 자동차 부품 설계에 구조최적화 기술의 적용이 활발한데 비하여 증장비 및 로봇 분야에 적용한 사

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012. 5. 10.-12., 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임.

† Corresponding author, gwjang@sejong.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

레는 아직까지 많지는 않다. 구조최적화 기법을 이용한 로봇의 경량화를 통하여 동력 성능 향상 및 구동 에너지의 절감 효과를 기대할 수 있고 정적, 동적 강성을 최적화시킴으로써 타사 모델에 대한 우월한 경쟁력을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 위상최적설계를 이용하여 수직 다관절 로봇의 주요부품인 베이스프레임, 하부프레임, 상부프레임 구조에 대한 경량화된 초기 레이아웃을 선정한다. 이를 후처리를 통하여 부드러운 표면을 가진 구조로 근사화하며 필요 시 형상최적설계를 추가로 수행하도록 한다. 위상최적화는 부품의 주물 제작성을 고려하여 사출 방향 등을 정의하도록 한다. 유한요소해석은 상용 소프트웨어인 HyperMesh의 Radioss 모듈을 사용하였고, 위상최적화 및 형상최적화는 상용 최적설계 소프트웨어 프로그램인 HyperMesh의 Optistruct 모듈을 사용하여 구현하였다.<sup>(7,8)</sup>

수직 다관절 로봇은 Fig. 1에서 보이듯 베이스프레임, 하부프레임, 상부프레임이 직렬로 연결된 형태로서 각각 부품의 구조 변화는 그 부품뿐만 아니라 다른 부품들의 하중 변화를 유발한다. 따라서 구조 최적설계를 부품별로 수행하기보다는 로봇 구조 시스템 전체에 대하여 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 이 경우 FE 모델의 크기가 매우 크게 되어 최적화에 소요되는 시간 비용은 부품별로 최적화를 수행하는 경우에 비해서 작게는 수배에서 많게는 열 배 이상 증가할 수 있으며 이는 초기 설계단계에서 적합하지 않다. 본 연구에서 제시한 부품별 최적설계 방법은 부품 레벨의 경량화가 시스템 레벨에 미치는 성능 변화를 고려하지는 않았지만 위상최적설계를 이용하여 부품별로 초기 구조 설계 레이아웃을 효율적으로 도출할 수 있음을 보여준다.

## 2. 수직 다관절 로봇의 최적설계

Fig. 1에 본 연구의 최적화 대상인 수직다관절 로봇을 나타내었다. 그림에 표시된 베이스프레임, 하부프레임, 상부프레임은 로봇의 주요 부품으로써 로봇의 대부분의 질량과 강성 비중을 차지한다. 본 연구에서는 베이스프레임, 하부프레임, 상부프레임이 주조 공정을 통하여 제작된다는 것을 염두에 두고 최적설계를 수행하였다. 이를 위하여 Optistruct에서 최적화 대상을 구성하는 부재들의 방향성을 설정하는 기능(draw direction constraint)을 활용하여 주조의 방향을 부여하였다.

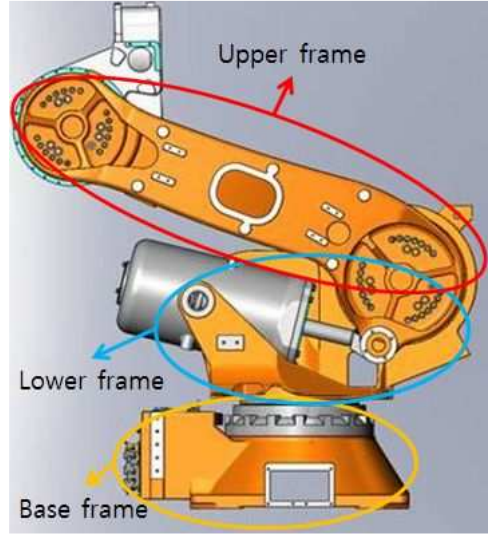


Fig. 1 Vertical articulated robot

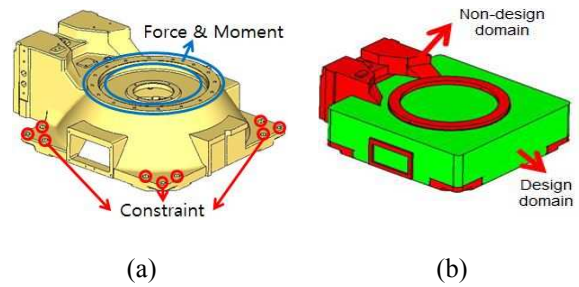


Fig. 2 Base frame: (a) boundary condition of initial model and (b) design domain for topology optimization (red: non-design domain, green: design domain)

### 2.1 베이스프레임 최적설계

Fig. 2(a)는 기존 베이스프레임을 나타내고 있으며 정적 해석을 위한 경계 조건으로는 밑바닥과 볼트로 체결되는 부분의 변위를 구속하였으며 하중은 다물체 동역학 해석 결과로부터 대표적인 3가지 하중 조건을 추출하여 부여하였다. Fig. 2(b)는 이를 단순화시킨 위상최적화의 설계 영역이다.

베이스프레임의 위상최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Minimize } F = w_1U_1 + w_2U_2 + w_3U_3 + \frac{w_4}{f_1} + \frac{w_5}{f_2} + \frac{w_6}{f_3} \quad (1a)$$

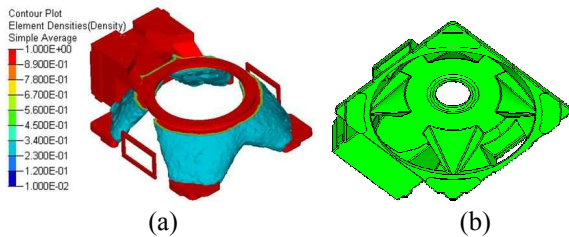
$$(w_1 = w_2 = w_3 = 1/3, w_4 = w_5 = w_6 = 0)$$

$$\text{Subject to } m_{\text{opt}} \leq m_0 \times 0.25 \quad (1b)$$

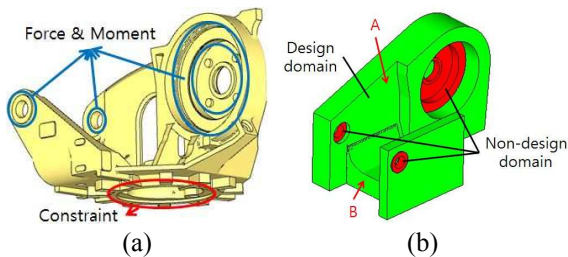
식 (1a)에서  $U_1, U_2, U_3$ 은 각 정적 하중조건에 의해 계산된 컴플라이언스 값들이고  $f_1, f_2, f_3$ 은 모달해석으로 얻은 1, 2, 3 차 고유진동수들이다. 식 (1a)에

**Table 1** Comparison of system performances between the initial base frame and the optimized base frame

	Initial base frame in Fig. 2(a)	Optimized base frame in Fig. 3(b)
Mass[kg]	138.9	124.3
Compliance1	2.92e2	2.57e2
Compliance2	6.54e2	6.60e2
Compliance3	1.09e3	9.33e2



**Fig. 3** (a) The topology optimization result of the base frame, and (b) its post-processed design



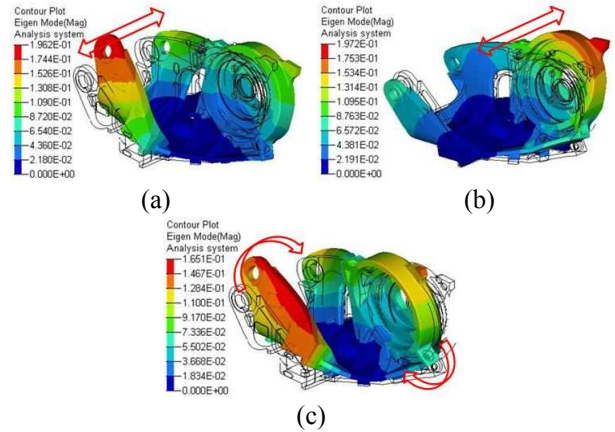
**Fig. 4** Lower frame: (a) boundary conditions and (b) design domain for topology optimization (red: non-design domain, green: design domain)

서  $w_4 \sim w_6$ 는 0 이므로 목적함수로서 컴플라이언스만을 고려하였는데 이는 베이스프레임이 움직이지 않는 부재로서 관심 하중들에 대한 정적 강성이 중요하기 때문이다. 하부프레임과 상부프레임의 경우에는  $w_4 \sim w_6$ 를 0 이 아닌 값을 사용하여 고유진동수를 고려하였다. 식 (1b)는 질량 제한 조건으로서 설계 영역의 25% 이하의 질량을 사용하여 최적화를 수행한다. 이는 기존 모델인 Fig. 2(a)와 비슷한 질량을 질량제한 조건으로 부여하였을 경우의 값이다. 다만 최종 최적화된 구조물의 질량은 위상최적화된 결과가 Fig. 3 과 같이 후처리를 거쳐야 하므로 이와 다르다.

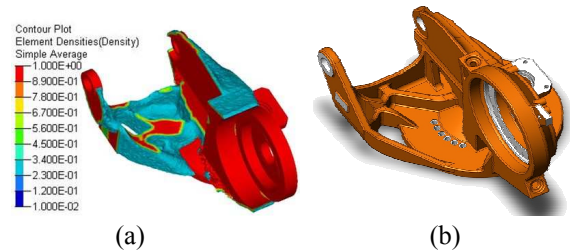
Table 1 은 최적화된 베이스프레임의 성능을 나열하였다. 각 하중 조건에 의한 컴플라이언스 값들은 최적화 결과 원 모델에 비하여 감소하거나 비슷한 값을 유지하였다.

2.2 하부프레임 최적설계

Fig. 4(a)는 기존 하부프레임을 나타내고 있으며



**Fig. 5** Lower frame: (a) 1<sup>st</sup> mode shape, (b) 2<sup>nd</sup> mode shape and (c) 3<sup>rd</sup> mode shape



**Fig. 6** (a) The topology optimization result of the lower frame and (b) its post-processed design

Fig. 4(b)는 이를 단순화시킨 위상최적화의 설계 영역이다. 정적 해석을 위한 경계 조건으로는 베이스프레임과 결합되는 부분의 모든 자유도에 대해 구속하였으며 감속기와 상부프레임과 결합되는 부분은 하중으로 다물체 동역학 해석으로부터 대표적인 3 가지 조건으로 설정하였다. 제작을 고려하여 주조 방향을 문제에 부여하였는데 수직 방향의 부재(Fig. 4(b)의 A 부재)는 수평 방향으로, 수평 방향의 부재(Fig. 4(b)의 B 부재)는 수직 방향으로 주조 방향성을 부여하였다. 최적화 문제는 앞서 베이스 프레임의 경우와 동일하게 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Minimize } f_{\text{total}} = w_1 U_1 + w_2 U_2 + w_3 U_3 + \frac{w_4}{f_1} + \frac{w_5}{f_2} + \frac{w_6}{f_3}$$

$$(w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0.2, w_5 = 0.12, w_6 = 0.08) \tag{2a}$$

$$\text{Subject to } m_{\text{opt}} \leq m_0 \times 0.25 \tag{2b}$$

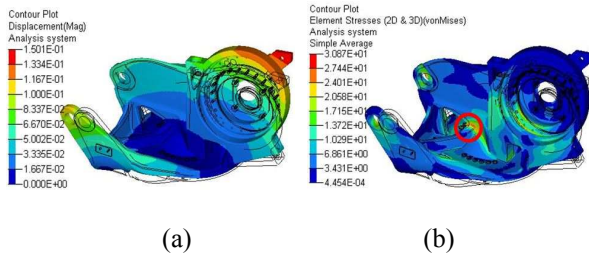
하부프레임의 고유모드에서 1 차, 2 차 모드는 굽힘 모드, 3 차 고유모드는 비틀림 모드이다 (Fig. 5 참조).

**Table 2** Comparison of system performances between the initial lower frame and the post-processed lower frame in Fig. 6(b)

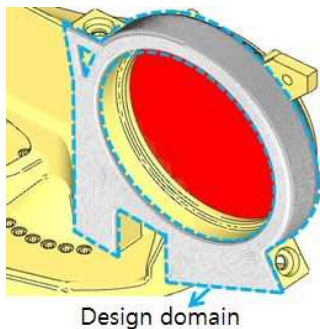
	Initial lower frame in Fig. 4(a)	Post-processed lower frame in Fig. 6(b)
Mass[kg]	242.5	211.4
Compliance1	2.35e2	2.06e2
Compliance2	1.76e3	1.82e2
Compliance3	1.87e3	1.79e2

**Table 3** Comparison of system performances between the initial lower frame and the optimized lower frame

	Initial lower frame in Fig. 4(a)	Optimized lower frame in Fig. 8(b)
Mass[kg]	242.5	213.5
Compliance1	2.35e2	2.03e2
Compliance2	1.76e3	1.75e3
Compliance3	1.87e3	1.76e3
1 <sup>st</sup> Mode[Hz]	9.2	7.9
2 <sup>nd</sup> Mode[Hz]	9.6	9.7
3 <sup>rd</sup> Mode[Hz]	11.4	12.4

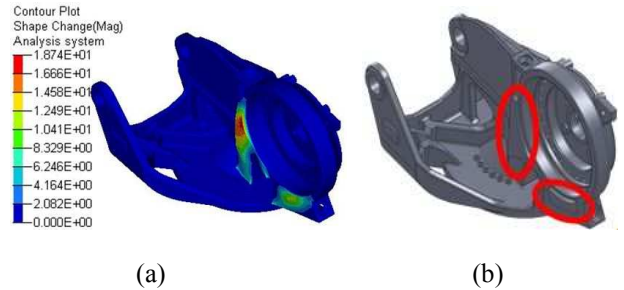


**Fig. 7** Analysis results of the post-processed lower frame in Fig. 6(b) by the second load case: (a) deformation contour and (b) Von Mises stress contour



**Fig. 8** Design domain for free shape optimization

Fig. 6(a)는 위상최적설계의 결과를 나타내고, Fig. 6(b)는 위상최적설계의 결과를 바탕으로 후처리를 수행한 모델이다. 하지만 Table 2 에서 알 수 있듯이 최적화된 모델의 두 번째 하중 조건에 대한 강성이 기존 모델에 비해 약하게 평가되었다. Fig. 7 은 Fig. 6(b)의 최적화된 모델이 두 번째 하중조건에 의해서 변형된 형상과 응력 분포를 보여준다. Fig. 7(a)에서 하부프레임의 우측 상부의 원형 부분이 굽힘 변형으로 좌우 변위가 많이 발생하는 것을 확인할 수 있고 이의 결과로 Fig. 7(b)의 원형 부분에 높은 응력이 부과되는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 8 에 표시된 원형 주위 부분의 형상(또는 두께)를 변경함으로써 해당 하중조건에 대한 강성을 높이도록 한다. 이를 위하여 Optistruct 의 자유형상최적화(Free shape optimization) 기능을 사용하였다.

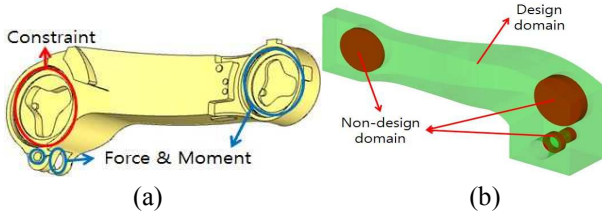


**Fig. 9** (a) The shape-optimized lower frame and (b) the final design

Fig. 9(a)는 하부프레임의 형상최적화 결과를 나타내고 있다 (그림에서 색깔은 형상의 변화 정도를 나타낸다.) 이 결과를 바탕으로 후처리를 수행한 모델은 Fig. 9(b)와 같다. 원으로 표시된 곳이 Fig. 6(b)에 비하여 보강되었다. 최종으로 최적화된 하부프레임의 성능을 Table 3 에 나열하였다. 제안한 위상 및 형상최적화법을 이용하여 기존 모델보다 경량화된 질량으로 정적인 강성 및 저차 고유진동수를 높인 하부프레임의 구조를 얻을 수 있었다. Table 3 에서 첫 번째 고유진동수의 감소가 관찰되었는데 상세설계 과정에서 위상최적화된 부품들을 결합하여 동역학 및 구조 해석을 수행함으로써 그것이 시스템 구조 강성에 끼치는 영향이 로봇의 작동 조건 하에서는 크지 않음을 확인하였다.

2.3 상부프레임 최적설계

Fig. 10(a)는 기존 상부프레임의 모델을 나타내며, Fig. 10(b)는 이를 단순화시킨 위상최적설계의 설계 영역이다. 정적 해석을 위한 경계 조건으로서 하부프레임과 결합되는 Fig. 10(a)의 좌측 부분은 모든 자유도를 구속하였고, 우측 부분은 로봇의 다른 부재와 결합되는 부분과 감속기와 결합되는 부분으로서 다물체 동역학 해석에서 얻은 3 가지의



**Fig. 10** Upper frame: (a) boundary condition of initial model and (b) design domain for topology optimization (red: non-design domain, green: design domain)

하중 조건을 부여하였다.

상부프레임의 위상최적화 문제는 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Minimize } M_{\text{total}} = \text{Mass of the Upper frame} \quad (3a)$$

$$\text{Subject to } U_1 \leq 2250 \text{ Nmm} \quad (3b)$$

$$U_2 \leq 2730 \text{ Nmm} \quad (3c)$$

$$U_3 \leq 5490 \text{ Nmm} \quad (3d)$$

$$f_1 \geq f_1^{\text{initial}} \quad (3e)$$

$$f_2 \geq f_2^{\text{initial}} \quad (3f)$$

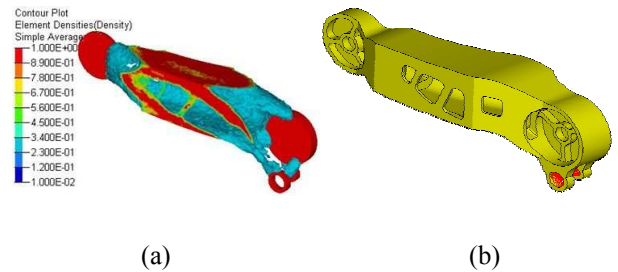
$$f_3 \geq f_3^{\text{initial}} \quad (3g)$$

위 문제에서는 앞의 최적화 문제들과는 다르게 질량을 목적함수로 설정하고 정적 강성들과 동적 강성들을 초기 모델의 강성 값들보다 작지 않도록 제한하였다. 위와 같이 강성을 제한조건으로 부여할 경우에는 질량 감소를 위하여 강성을 희생시킬 수 없다는 것을 의미한다. 즉, 앞의 최적화 문제들에서는 정적 강성들과 동적 강성들이 다중 목적함수 형태로 결합되었기 때문에 강성들의 합은 증가하더라도 Table 3 에서 확인할 수 있듯이 일부 강성 값들은 성능이 나빠질 수 있다. 반면에 위의 문제 정의는 최적화된 모델이 지니는 모든 강성 값들이 초기 모델의 강성 값들에 비해서 나빠지지 않는다는 것을 보장한다. 하지만 질량 감소 효과는 그만큼 줄어들 수 있다. 식 (3e)-(3f)에서 제한한 모드들의 순서가 최적화 도중 바뀔 수 있는데 이를 방지하기 위하여 MAC (Modal Assurance Criterion)<sup>(9)</sup> 값을 비교함으로써 모드를 추적할 수 있으며 Optistruct 에서도 모드추적 기능을 제공하고 있다.

실제는 최종적으로 최적화된 모델은 후처리를 거쳐야 하고 경우에 따라서는 후처리 시에 적지 않은 성능 변화가 일어나기 때문에 목적함수로서

**Table 4** Comparison of system performances between the initial upper frame and the optimized upper frame

	Initial upper frame in Fig. 9(a)	Optimized upper frame in Fig. 11(b)
Mass[kg]	214.9	193.3
Compliance1	2.40e2	2.34e2
Compliance2	4.90e2	4.79e2
Compliance3	2.43e2	2.41e2
1 <sup>st</sup> Mode[Hz]	47.5	53.8
2 <sup>nd</sup> Mode[Hz]	66.4	76.7
3 <sup>rd</sup> Mode[Hz]	175.9	196.2



**Fig. 11** (a) The topology optimization result and (b) final design of the upper frame

강성 값들의 다중 목적함수 형태를 사용하는 경우와 질량을 사용하는 경우의 효과는 크게 다르지 않다. Fig. 11(a)는 위상최적설계 결과를 나타내며, Fig. 11(b)는 위상최적설계 결과를 바탕으로 후처리를 수행한 모델이다. 상부프레임의 최적화된 성능들은 Table 4 에 나타냈다.

### 3. 결 론

수직 다관절 로봇의 주요부품의 경량화를 위하여 위상최적화 기반의 구조최적설계를 적용하였고 최적화 결과 베이스프레임은 약 11%, 하부프레임은 약 12%, 상부프레임은 약 10%의 경량화된 설계를 얻을 수 있었다. 베이스프레임은 위상최적설계를 수행하여 내면의 형상을 새롭게 설계할 수 있었고, 하부프레임은 위상최적설계와 형상최적설계를 수행하여 취약 부분이 보강된 새로운 레이아웃을 얻을 수 있었다. 상부프레임은 위상최적설계를 수행하여 외면의 구멍 위치와 내면의 형상을 최적화시켰다. 본 연구에서 제시한 CAE 기반의 최적설계 기법은 이론적으로 완성된 검증된 기술이다. 이는 산업용 로봇 설계 분야를 비롯하여 거의 모든 기계 분야에서 산업체 연구인력들이 짧은

개발 기간에 효과적으로 사용할 수 있는 설계 기술로서 그 기술적 쓰임새가 크다. 본 연구에서 제시한 부품별 최적설계 방법은 부품 레벨의 경량화가 시스템 레벨에 미치는 성능 변화를 고려하지는 않았지만 위상최적설계를 이용하여 효율적인 초기 설계 레이아웃의 도출이라는 성과를 얻는 데는 충분하다는 것을 보여준다. 물론 시스템 레벨 성능 해석 및 보강은 상세 설계단계에서 수행되어야 한다. 실제로 본 연구의 연구 결과는 설계에 반영이 되었고 제작된 로봇의 경량화 효과 및 구조강성이 검증되었다. 현재 시스템 레벨의 최적 성능을 부품 레벨 최적화에서 구현하는 방법에 대하여 후속 연구를 수행하고 있다.

## 후 기

본 연구는 2011 년 현대중공업 산학협동 연구과제로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Bendsøe, M. P. and Sigmund O., 2004, *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, Springer.
- (2) Leiva, J. P., Watson, B. C. and Kosaka, I., 1999, "Modern Structural Optimization Concepts Applied to Topology Optimization," *40<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference*, St. Louis, MO, pp. 1589-1596.
- (3) Pedersen, C. B. W. and Allinger, P., 2006, "Industrial Implementation and Applications of Topology Optimization and Future Needs," *IUTAM Symposium on Topological Design Optimization of Structures, Machines and Materials*, pp. 229~238, Springer.
- (4) Schramm, U. and Zhou, M., 2006, "Recent Developments in the Commercial Implementation of Topology Optimization," *IUTAM Symposium on Topological Design Optimization of Structures, Machines and Materials*, pp. 239~248, Springer.
- (5) Yang, R. J. and Chahande, A. I., 1995, "Automotive Applications of Topology Optimization," *Structural Optimization*, Vol. 9, pp. 245~249.
- (6) Jang, G. W., Yoon, M. S. and Park, J. H., 2010, "Lightweight Flatbed Trailer Design by Using Topology and Thickness Optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 41, No. 2, pp. 295~307.
- (7) Altair Engineering, 2010, *HyperMesh Basic Training Manual*.
- (8) Altair Engineering, 2010, *Optistruct Training Manual*.
- (9) Kim, T. S. and Kim, Y. Y., 2000, "Mac-Based Mode-Tracking in Structural Topology Optimization," *Computers and Structures*, Vol. 74, pp. 375~383.