

# 스카라 로봇 암의 최적화 설계 및 시뮬레이션

## Optimal Design and Simulation of SCARA Robot Arm

이 종 신\*  
(Jong Shin Lee)

**Abstract:** This study is concerned about the optimal design of the arm 1 and arm 2 in the SCARA robot. The mass and inertia moment of the arm 1 and arm 2 in a SCARA robot is greatly affected on the performance such as a cycle time, and torques loaded on 1<sup>st</sup> axis and 2<sup>nd</sup> axis. To reduce the mass and inertia moment, this study carried out optimal design by FEM analysis using parametric variables, which is a width, a height of the rib and a thickness of arm in the arm. The rib is adapted instead of reducing the thickness in the arm. And the simulation by computer was conducted on two given paths in X direction and Y direction. After optimal design, the result showed that maximum torque of 1<sup>st</sup> axis and 2<sup>nd</sup> axis reduced to maximum 9.5% on a given path.

**Keywords:** SCARA robot, arm 1, arm 2, quill, optimization, simulation

### I. 서론

전자부품 조립, 이형부품 삽입, 나사체결, 부품 이송 등 많은 자동화 공정에 스카라 로봇이 이용되고 있다. 부품의 정밀도가 높아짐에 따라, 스카라 로봇의 경우 가능한 한 사이클 타임을 단축하고 정밀도를 높일 수 있도록 개발하려고 지속적으로 노력하고 있다. 이를 위해서는 경량화된 고강성의 암 구조를 개발하는 것이 매우 중요한 인자가 된다. 강성을 만족하는 범위 내에서 암을 경량화함으로써 동일한 용량의 구동모터를 사용하는 경우 로봇 속도 증대로 생산성을 향상시킬 수 있게 된다.

본 연구에서는 스카라 로봇의 암 1과 암 2에 대한 최적화 설계 모델을 개발하고, 기존 암과 최적화 설계모델인 새로운 암을 사용할 때 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에 사용된 모델은 S사에서 개발된 스카라 로봇을 대상으로 하였다[1].

암의 구조를 변경하는 방법으로 암을 경량화하기 위해 전체적으로 암의 두께를 감소시키고, 강성 보안을 위해 리브를 추가하는 방법으로 하였으며 리브의 두께와 폭을 파라메트릭 변수로 하여 최적화를 실시하였다. 또한, 로봇에서는 강도보다는 강성이 매우 중요한 요소로 본 연구에서는 암 끝 단에서의 처짐량을 제한하고 최적화 설계를 수행하였으며, 검증방법은 임의의 경로를 선정하여 경로의 중간 지점까지 가속한 후 감속하여 주어진 시간 내에 목표지점까지 도달하도록 할 때, 1축 모터와 2축 모터의 부하 토크의 변화량을 시뮬레이션을 통해 그 결과를 비교하는 것으로 하였다.

임의 경로는 X 방향으로 300mm를 이동하는 경우의 첫 번째 경로와, Y 방향으로 300mm 이동하는 경우의 두 번째 경로를 선정하였다. 사이클 타임을 만족하기 위한 조건을 고려하여 0.2초에 도달하도록 제한 조건을 설정하였다. 또한, 암 1과 암 2의 경량화 설계가 1축 및 2축 토크에 미치는 영향을 분석하고 그 중요성을 검증하였다.

### II. 모델링, 동역학 및 기구학

#### 1. 모델링

그림 1과 그림 2는 본 연구에 사용된 스카라 로봇으로 형상 및 치수 기호를 나타내고 있다. 그림 1에서 베이스에 내장된 암 1 구동용 모터의 중심과 암 1의 무게 중심 사이의 수직거리를  $h_1$ , 수평거리를  $x_{c1}$ 으로 표시한다. 또, 암 1의 무게 중심에서 암 2의 무게 중심까지의 수직거리를  $h_2$ , 2축 중심에서 암 2 무게 중심까지의 수평 거리를  $x_{c2}$ , 암 2의 무게 중심과 핸드의 무게 중심까지의 수직거리를  $h_3$ 로 표시하고, 1축과 2축의 수평거리를  $l_1$ , 2축과 핸드의 중심까지의 수평거리를  $l_2$ 로 나타낸다.

또한, 베이스에 장착된 기준 프레임의 X 축과 1축과 2축을 연결하는 직선이 이루는 각도를  $\theta_1$ , 1축과 2축을 연결하는 직선과 2축과 핸드의 중심선이 이루는 각도를  $\theta_2$ 로 나타

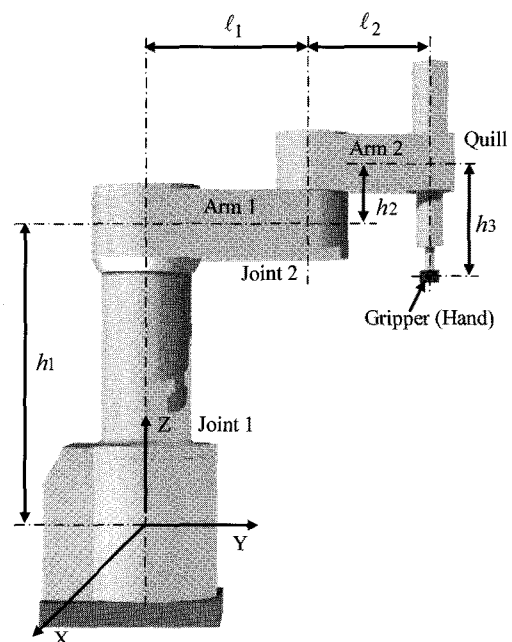


그림 1. 스카라 로봇의 정면투시 및 파라미터 기호  
Fig. 1. Front view and dimension parameters of SCARA robot.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 2. 1., 채택확정: 2009. 4. 15.

이종신: 주성대학 컴퓨터응용기계과(leejs@jsc.ac.kr)

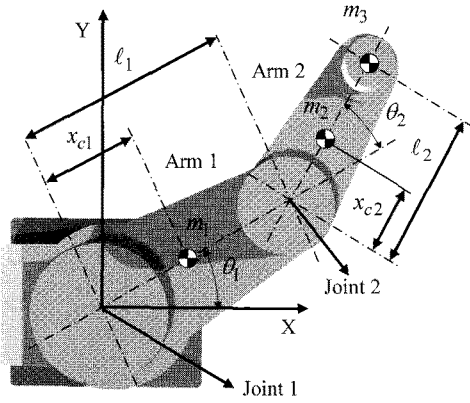


그림 2. 스카라 로봇의 상부투시 및 파라미터 기호.  
Fig. 2. Top view and dimension parameters of SCARA robot.

내고, 암 1의 질량을  $m_1$ , 암 2의 질량을  $m_2$ , 켈부의 질량 (축 3과 축 4의 질량)을  $m_3$ 로 표시한다.

2. 동역학 및 기구학

암 1과 암 2의 구동모터의 토크 계산식을 유도하기 위하여 Lagrange 방정식을 이용하였다[2-6].  $L = K - P$ 라고 할 때, Lagrange 방정식은 다음과 같다.

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (1)$$

여기서,  $Q_i$ 는  $q_i$ 와 관련된 힘,  $K$ 는 Kinetic 에너지,  $P$ 는 Potential 에너지를 나타낸다. 먼저 일반 좌표계  $q_1 = \theta_1$ ,  $q_2 = \theta_2$ 로 나타내고 각 링크에 대해 Kinetic 에너지와 Potential 에너지를 구한다.

링크 1 즉, 암 1에 대한  $K_1$ ,  $P_1$ 을 구하면 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 x_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} {}^{1c}I_{1zz} \dot{\theta}_1^2$$

$$P_1 = m_1 \hat{g} h_1$$

여기서  $\hat{g}$ 는 중력가속도를 나타낸다.

또, 링크 2 즉, 암 2에 대해  $K_2$ ,  $P_2$ 을 구하면 다음과 같다. 링크 2의 질량중심을  $s_2 = [s_{2x}, s_{2y}]^T$ 라고 하면,

$$s_{2x} = l_1 \cos \theta_1 + x_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$s_{2y} = l_1 \sin \theta_1 + x_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

이 되고, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\dot{s}_2^T \dot{s}_2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + x_{c2}^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

$$+ 2l_1 x_{c2} \cos \theta_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2)$$

여기서,

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 \dot{s}_2^T \dot{s}_2 + \frac{1}{2} {}^{2c}I_{2zz} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

$$P_2 = m_2 \hat{g} (h_1 + h_2)$$

이 된다. 같은 방법으로 켈부에 대해  $K_3$ ,  $P_3$ 을 구하면 다음과 같다. 켈부의 질량중심을  $s_3 = [s_{3x}, s_{3y}]^T$ 라고 하면,

$$s_{3x} = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$s_{3y} = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

이 되고, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\dot{s}_3^T \dot{s}_3 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

$$+ 2l_1 l_2 \cos \theta_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2)$$

여기서,

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 \dot{s}_3^T \dot{s}_3$$

$$P_3 = m_3 \hat{g} (h_1 + h_2 - h_3)$$

이 된다.  $L = K_1 + K_2 + K_3 - P_1 - P_2 - P_3$ 을 계산하고, (1)에 대입하면 다음과 같이 암 1과 암 2의 구동 토크식을 구할 수 있다.

$${}^1\tau_{1z} = \{ {}^{1c}I_{1zz} + m_1 x_{c1}^2 + {}^{2c}I_{2zz} + m_2 x_{c2}^2$$

$$+ m_2 [l_1^2 + 2l_1 x_{c2} \cos \theta_2]$$

$$+ m_3 [l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2] \} \ddot{\theta}_1$$

$$+ \{ {}^{2c}I_{2zz} + m_2 x_{c2}^2 + m_2 l_1 x_{c2} \cos \theta_2$$

$$+ m_3 (l_2^2 + l_1 l_2 \cos \theta_2) \} \ddot{\theta}_2$$

$$- l_1 \sin \theta_2 (m_2 x_{c2} + m_3 l_2) \dot{\theta}_2^2$$

$$- 2l_1 \sin \theta_2 (m_2 x_{c2} + m_3 l_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad (2)$$

$${}^2\tau_{2z} = \{ {}^{2c}I_{2zz} + m_2 x_{c2}^2 + m_2 l_1 x_{c2} \cos \theta_2$$

$$+ m_3 l_2 (l_2 + l_1 \cos \theta_2) \} \ddot{\theta}_1$$

$$+ \{ {}^{2c}I_{2zz} + m_2 x_{c2}^2 + m_3 l_2^2 \} \ddot{\theta}_2$$

$$+ \{ m_2 l_1 x_{c2} \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 \} \dot{\theta}_1^2 \quad (3)$$

여기서,  ${}^1\tau_{1z}$ 는 1축 구동모터의 토크이고,  ${}^2\tau_{2z}$ 는 2축 구동모터의 토크이다.

위의 (2)에서 두 번째 항은 2축의 가속에 의한 간섭토크, 세 번째 항은 2축의 원심력에 의한 간섭토크, 네 번째 항은 Coriolis Force에 의한 간섭토크를 의미한다.

또한, 역기구학을 간단히 정리하면 다음과 같다[2,3,4,5,6].

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

만일  $(l_1 - l_2)^2 \leq x^2 + y^2 \leq (l_1 + l_2)^2$ 의 관계를 만족하면 적어도 한 개의 해가 존재하며,  $x^2 + y^2 \neq 0$ 이면 다음과 같이  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 를 구할 수 있다.

$$\theta_1 = a \tan 2(y, x) \mp a \tan 2(k, x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \pm a \tan 2(k, x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2) \quad (5)$$

여기서  $k$ 는

$$k = \sqrt{(x^2 + y^2 + l_1^2 + l_2^2)^2 - 2[(x^2 + y^2)^2 + l_1^4 l_2^4]}$$

이다.

3. 부품 사양

암 1과 암 2를 최적화 하기 전의 로봇 각 부품의 질량, 관성모멘트, 질량중심은 표 1과 같다[1]. 각 데이터는 측정 및

표 1. 로봇 부품의 질량, 모멘트 및 질량중심.

Table 1. Mass, inertia moment and mass center of robot parts.

	질량 (Kg)	모멘트(Kg m <sup>2</sup> )	질량중심(m)
$D_{1,1}$	71.350	0.4549000	0.000
$D_{1,2}$	7.634	0.2284543	0.140
$D_{2,1}$	5.550	0.0258000	0.350
$D_{2,2}$	3.550	0.0051956	0.457
$D_{q,1}$	0.310	0.0000196	0.600
$D_{q,2}$	0.130	0.0000531	0.600
$D_{q,3}$	0.050	0.0000190	0.600
$D_{q,4}$	0.190	0.0000093	0.600
$D_{q,5}$	0.360	0.0001813	0.600
$D_{q,6}$	0.030	0.0000077	0.350
$D_{q,7}$	0.310	0.0000196	0.600
$D_{q,8}$	0.130	0.0000531	0.600
$D_{q,9}$	0.050	0.0000190	0.600
$D_{q,10}$	0.190	0.0000093	0.600
$D_{q,11}$	0.360	0.0001813	0.600

표 2. 로봇 부품의 축 별 전체 질량, 모멘트 및 질량중심.

Table 2. Total mass, inertia moment and mass center of each axis.

	질량(Kg)	모멘트(Kg m <sup>2</sup> )	질량중심(m)
1축	78.984	1.0385	0.0136
2축	9.101	0.0450	0.0402
휠부	2.110	-	-

분석에 의한 것으로, 여기서  $D_{1,1}$ 은 암 1을 제외한 1축 전체 부품을,  $D_{1,2}$ 는 암 1을 나타낸다.  $D_{2,1}$ 은 암 1을 제외한 2축 전체 부품을,  $D_{2,2}$ 는 암 2를 나타낸다.  $D_{q,i}$ 는 휠부(3축과 4축)의  $i$  번째 부품을 나타낸다.

표 1을 이용하여 각 축의 질량, 관성모멘트 및 질량중심을 구하면 표 2와 같다.

### III. FEM 해석 및 최적화

#### 1. 모델링

그림 4는 암 1과 암 2를 최적화하기 위한 3D 모델링을 나타내며, 그림 5와 그림 6은 암 1과 암 2의 최적화를 위해 리브를 추가한 2차원 형상을 나타낸다. 그림 5(a)에서  $t'_{11}$ 는 기존 암 1의 두께를, 그림 5(b)에서  $t_{11}$ 은 최적화 모델의 암 1 두께를, 그리고  $t_{12}$  및  $t_{13}$ 는 각각 최적화를 위한 암 1의 리브 폭과 높이를 나타낸다. 또한, 그림 6(a)에서  $t'_{21}$ 은 기존 암 2의 두께를, 그림 6(b)에서  $t_{21}$ 은 최적화 모델의 암 2 두께를, 그리고  $t_{22}$  및  $t_{23}$ 는 각각 최적화를 위한 암 2의 리브 폭과 높이를 나타낸다.

암의 경량화를 위해 암의 두께를 줄이고 암의 처짐을 보완하기 위해 암 1의 경우 1 개의 리브를, 암 2의 경우 2 개의 리브를 추가하였다. 암 1은  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ 를, 암 2는  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{23}$ 를 각각 파라메트릭 변수로 FEM 해석을 통해 다양하게 변화시켜가며 최적화 설계를 수행하였다.

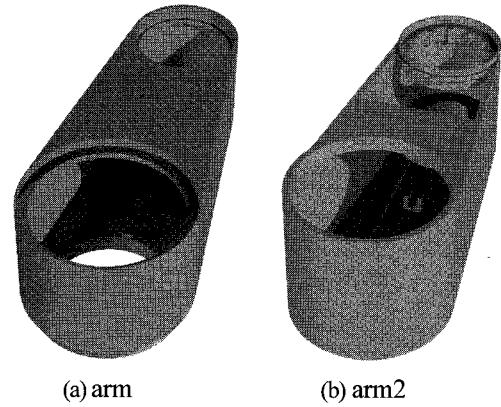


그림 4. 최적화를 위한 3차원 모델링.

Fig. 4. 3D modeling for optimization.

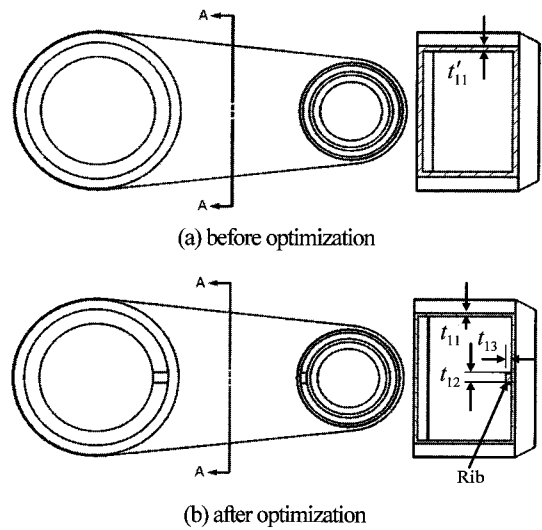


그림 5. 암 1의 파라미터.

Fig. 5. Parameters of arm 1.

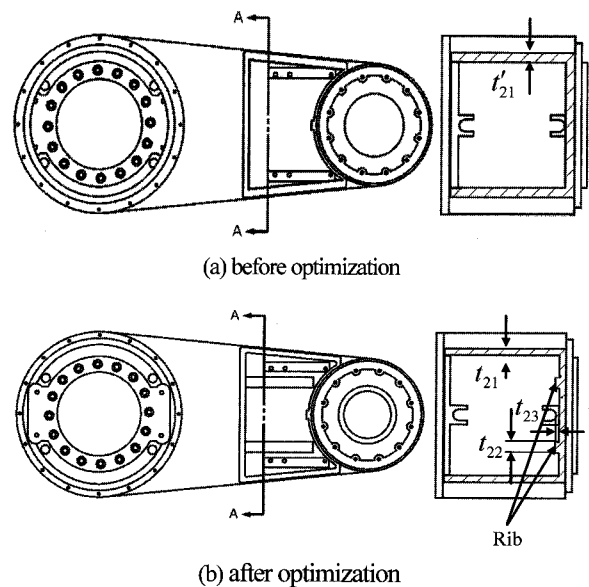


그림 6. 암 2의 파라미터.

Fig. 6. Parameters of arm2.

2. 해석 및 최적화

최적화 실계를 위해 압을 최대한 경량화시켜야 하며, 처짐량이 허용범위에 들도록 제한하여 가장 경량화된 모델을 개발하는 것이 필요하다. 이와 같은 경량화를 위해 본 연구에서는 기존 압의 두께를 줄이는 대신에 처짐량을 줄일 수 있도록 강성 증대를 위해 압의 하부에 리브로 보강하는 방법을 채택하였다. 리브로 하부를 보강하는 것은 처짐량을 적게하기 위해 단면 2차모멘트를 증대시키기 위한 것이다. 압 1은  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  를, 압 2는  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{23}$  를 파라메트릭 변수로 하여 해석을 실시하였다. 그림 7에서와 같이 압 1의 1축 하단 부위를 고정하고 가반하중  $W=1.0Kg$ 과 압 1, 압 2의 자중에 의한 처짐량( $\delta_z$ )을 해석하였다. 최적화 전의 압을 이용해 해석한 결과 처짐량은  $6.93 \mu m$ 이며, 최적화를 수행한 압을 사용한 경우  $10.5 \mu m$ 으로 나타났다. 최적화 수행전의 모델을 이용해 실제 측정된 결과는  $8 \mu m$ 으로 나타났으며 이는 로봇 조립 상태 및 주물 두께 등의 오차에 기인한 것으로 판단된다. 타사의 경우  $14 \mu m$  정도로 측정되어[1] 이는 과도한 강성설계가 이루어진 것으로 본 연구에서는  $10 \mu m$  내외를 목표치로 설정하여 최적화를 실시하였다.

이를 만족하는 최적화 설계 결과, 최적화 전 및 최적화 후 압 1의 중량은 각각  $7.634Kg$  과  $5.672Kg$ 으로 25.7%, 압 1의 관성은  $0.2284543Kg m^2$ 과  $0.1718849 Kg m^2$ 으로 24.8% 감소되는 효과를 얻을 수 있었다. 또한, 압 2의 중량은 각각  $3.551Kg$  과  $2.494Kg$ 으로 29.8%, 압 2의 관성은  $0.051956Kg m^2$ 과  $0.037768 Kg m^2$ 으로 27.3% 감소되었다. 그림 8과 그림 9는 압 1과 압 2의 최적화 전후 질량, 모멘트, 질량중심까지의 거리를 분석한 결과를 보여준다.

최대 처짐량을 허용치로 하여 최적화 설계를 수행한 결과 표 3과 같은 모델 치수가 가장 적절한 것으로 나타났다. 표 3에서 최적화 전의 모델에 대한 해석은 본 연구에 이용된 스카라 로봇의 실측 치수를 적용[1]하여 해석한 결과를 나타내며, 최적화 후의 모델에 대한 해석은 최적화를 위해 리브로 보강한 후의 해석 결과를 나타낸다. 표 4는 상기 스카라 로봇의 몸체 중에서 압 1과 압 2를 최적화된 모델로 교체했을 때의 각 축에 대한 질량, 관성모멘트 및 질량중심을 나타내며, 본 연구의 모의 실험에 데이터로 사용하였다. 그림 8과

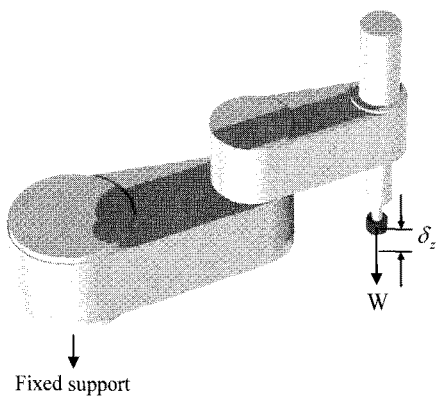
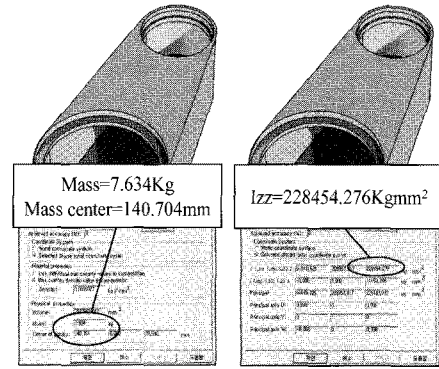
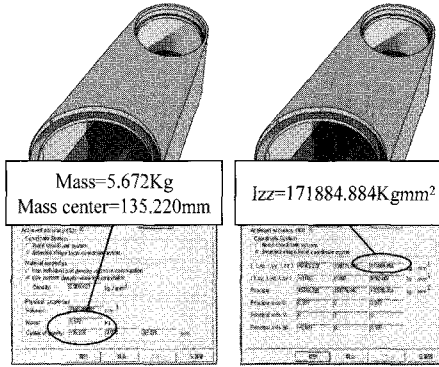


그림 7. 해석 조건.  
Fig. 7. Analysis conditions.



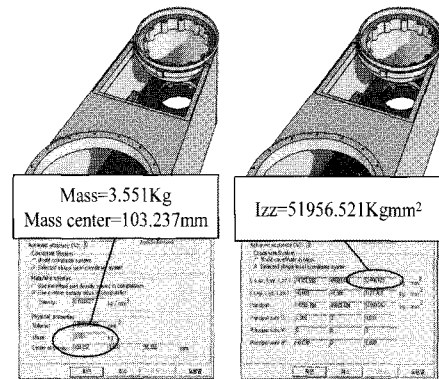
(a) before optimization



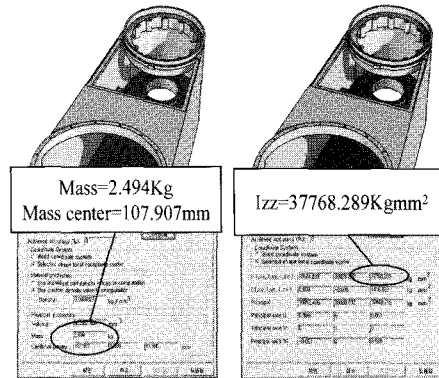
(b) after optimization

그림 8. 압 1의 질량, 모멘트 및 질량중심.

Fig. 8. Property analysis results of arm 1.



(a) before optimization



(b) after optimization

그림 9. 압 2의 질량, 모멘트 및 질량중심.

Fig. 9. Property analysis results of arm 2.

표 3. FEM 해석결과.

Table 3. FEM analysis results.

	압 1 변수값	압 2 변수값	최대 처짐량( $\mu m$ )	안전 계수
최적화 전	$t'_{11} = 7.5mm$	$t'_{21} = 7.5mm$	6.93	15
최적화 후	$t_{11} = 5.5mm$ $t_{12} = 8mm$ $t_{13} = 8mm$	$t_{21} = 5.5mm$ $t_{22} = 5mm$ $t_{23} = 10mm$	10.05	15

표 4. 로봇 부품의 축 별 전체 질량, 모멘트 및 질량중심 (최적화 후).

Table 4. Total mass, inertia moment and mass center of each axis (after optimization).

	질량(Kg)	모멘트(Kg m <sup>2</sup> )	질량중심(m)
1축	77.0220	0.8953	0.0100
2축	8.0440	0.0431	0.0332
컬부	3.26	-	-

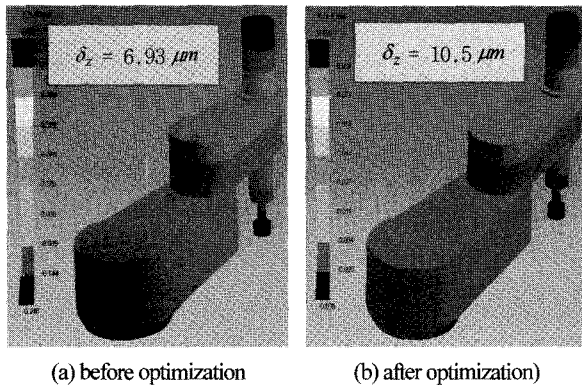


그림 10. W=1Kg 작용시 처짐량.

Fig. 10. Deflection contour in case of W=1Kg.

그림 9는 최적화 전·후의 압 1 및 압 2에 대한 질량, 모멘트 및 질량중심에 대한 분석 결과를 나타내며, 표 4의 데이터를 구하는 데 사용하였다. 또한, 그림 10은 가반하중 W=1.0Kg가 작용할 때 최적화 전·후의 처짐량  $\delta_z$ 에 대한 해석 결과를 보여준다.

IV. 컴퓨터를 이용한 모의실험

1. 시뮬레이션

시뮬레이션은 로봇이 직선 경로를 따라 가속하는 것으로 그림 11과 같이 2개의 경로를 임의로 선정하여 실시하였다. 제 1경로는 좌표 (150, 150, 700)에서 (450, 150, 700)까지 X 축 방향으로 이동하는 경우와, 제 2경로는 (450, 0, 700)에서 (450, 300, 700)까지 Y 축을 따라 이동하는 경우를 시뮬레이션 하였다. 본 연구에서는 압 1과 압 2가 1축 및 2축 토크에 미치는 영향을 파악하는 것으로 3축과 4축은 구동하지 않는 것으로 하였다.

위의 두 경로 300mm를 이동하는데 소요되는 시간은 0.2sec로 하였다. 각 축의 모터에 걸리는 토크는 (2)와 (3)을

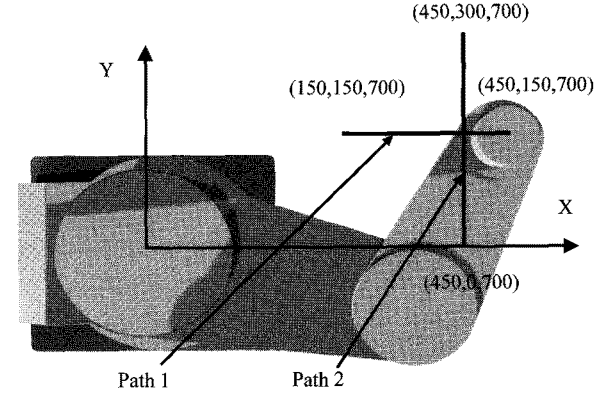


그림 11. 모의실험을 위한 경로.

Fig. 11. Path for simulation.

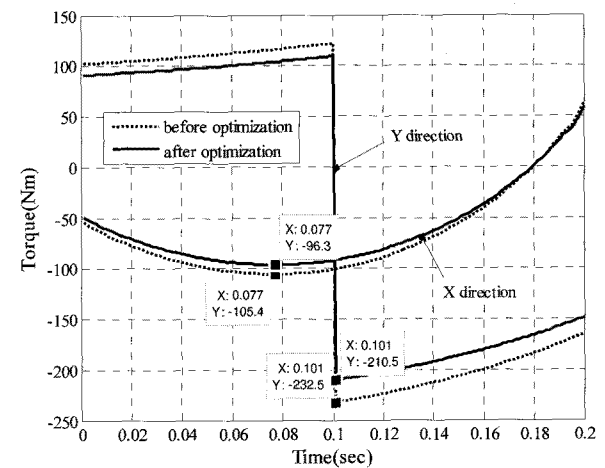


그림 12. X 방향과 Y 방향 경로에 대한 1축 토크.

Fig. 12. 1st axis torque for X and Y direction path.

이용하였으며, 경로제어는 역기구학 식 (4)와 (5)을 이용하여 구하였다. 직선경로를 따라 중간지점까지 비례하여 가속 후 감속하는 것으로 하여 하였으며, 이 때, 각 축에 걸리는 최대 토크의 값을 비교하였다. 또한, 경로 이동시간은 상용화되어 출시되는 스카라 로봇의 사이클타임을 기준으로 하여 결정 하였다. 스카라 로봇의 사이클 타임은 수직방향 상향으로 25mm이동하여 수평방향으로 300mm 이동한 후 다시 수평방향 하향으로 25mm 이동하고, 반대로 처음의 위치로 이동하여 되돌아 오는 시간으로 측정된다. 수직방향 이동시간을 0.15sec, 수평방향 이동시간을 0.2sec로 하였을 때 만족하는 수치로 이를 기준으로 시뮬레이션을 실시하였다.

그림 12는 압 1과 압 2를 최적화 하기 전과 후의 각 경로에 대한 1축 토크의 변화를 나타내며, 그림 13은 2축 토크의 변화를 나타낸다. 또한, 그림 14와 그림 15는 압 1과 압 2를 최적화 하기 전과 후에 2축의 가속력, 코리올리력, 원심력이 1축 부하토크에 미치는 영향을 파악하기 위한 시뮬레이션 결과를 보여준다.

2. 결과 분석

동일 조건 즉, X 축 방향 및 Y 축 방향으로 300mm를 직선 이동 시의 시뮬레이션 결과를 분석하면 다음과 같다.

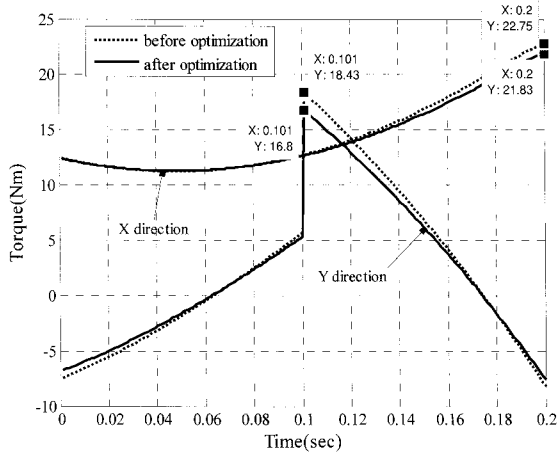


그림 13. X 방향과 Y 방향 경로에 대한 2축 토크.  
Fig. 13. 2<sup>nd</sup> axis torque for X and Y direction path.

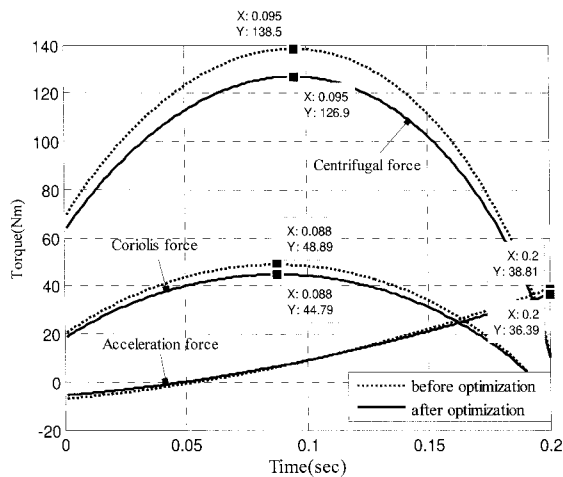


그림 14. 암 2의 가속, 코리올리스 및 원심력에 의한 1축 토크(X 방향 경로).  
Fig. 14. 1<sup>st</sup> axis torque by acceleration, coriolis and centrifugal force of arm 2(X direction path).

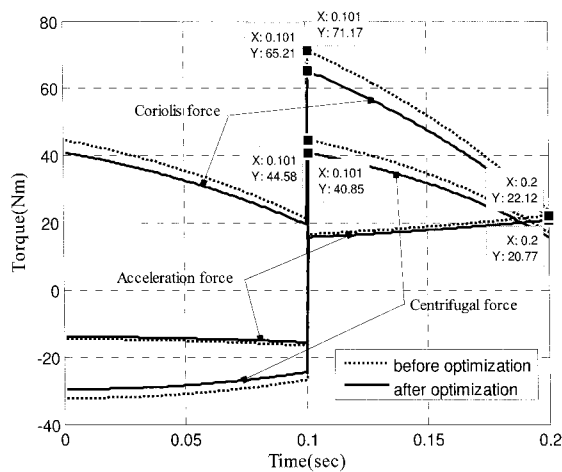


그림 15. 암 2의 가속, 코리올리스 및 원심력에 의한 1축 토크(Y 방향 경로).  
Fig. 15. 1<sup>st</sup> axis torque by acceleration, coriolis and centrifugal force of arm 2(Y direction path).

표 5. 1축과 2축의 최대 토크.

Table 5. 1<sup>st</sup> axis and 2<sup>nd</sup> axis maximum torque.

항목	X 축 방향 경로		Y 축 방향 경로	
	전	후	전	후
1축 최대토크 (Nm)	105.4	96.3	232.5	210.5
2축 최대토크 (Nm)	22.75	21.83	18.43	16.8

표 6. 암 2의 가속력, 원심력 및 코리올리스력에 의한 1축 최대 토크.

Table 6. 1<sup>st</sup> axis maximum torque by acceleration, centrifugal and coriolis force of arm 2.

항목	2축 가속력		2축 원심력		코리올리스력	
	전	후	전	후	전	후
X 방향경로 (Nm)	38.81	36.39	138.5	126.9	48.89	44.79
Y 방향경로 (Nm)	22.12	20.77	44.58	40.85	71.17	65.21

그림 12와 그림 13에 의하면 최적화를 통해 1축 부하토크는 X 방향 경로의 경우 약 8.6% 감소하며, Y 방향 경로의 경우 부하토크가 9.5% 감소하는 것으로 나타났으며, 2축 부하토크는 X 방향 경로의 경우 약 4.0% 감소하며, Y 방향 경로의 경우 8.8% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 1축 부하토크가 적어도 8.6%, 그리고 2축 부하토크가 4.0% 감소하는 것으로 나타났으며 예상대로 1축에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

또한, 그림 14와 그림 15에 의하면 X 방향 경로에 대해 2축 가속에 의한 1축의 부하토크는 38.81 Nm에서 36.39 Nm으로 6.2%, 2축의 원심력에 의해 1축에 미치는 부하토크는 138.5 Nm에서 126.9 Nm로 8.4%, 1축과 2축의 코리올리스력에 의한 1축 부하토크는 48.89 Nm에서 44.79 Nm로 8.4% 각각 감소하였으며, Y방향 경로의 경우에 대해 2축 가속에 의한 1축의 부하토크는 6.1%, 2축의 원심력에 의해 1축에 미치는 부하토크는 8.4%, 1축과 2축의 코리올리스력에 의한 1축 부하토크는 8.4% 각각 감소하는 것으로 나타났다. 모의실험 결과 원심력과 코리올리스력에 의한 영향이 비교적 큰 것으로 나타났다.

표 5는 암 1과 암 2를 최적화하기 전과 후의 1축과 2축에 걸리는 최대토크를 나타내며, 표 6은 암 2가 가속력, 원심력, 코리올리스력에 의해 1축에 미치는 최대 토크를 나타낸다.

V. 결론

로봇 암의 형상을 변경하여 로봇에 요구되는 강성은 유지하고 중량을 감소시키기 위해 스카라 로봇의 암 1과 암 2에 대한 최적화 설계를 수행하였으며, 임의의 경로에 대해 시뮬레이션을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

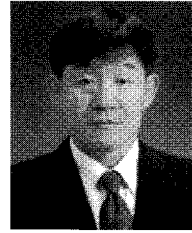
1. 암의 형상 변경을 통해 중량을 감소시키고, 요구되는 강성을 목표 값으로 설정하여 최적화를 수행한 결과 로봇 공구단의 최대 처짐량이 3.57  $\mu$ m 증가하나, 암 1 및 암 2의 중량과 관성이 각각 25.7%, 24.8%와 29.8%, 27.3% 감소하는 것으로 나타나 암의 형상에 대한 최적화 설계가 매우 중요함을 확인할 수 있었다.
2. 임의로 2개의 직선경로를 설정하여 목표 시간 내에 도달

할 수 있도록 모의 실험을 실시한 결과, 1축 및 2축에 걸리는 부하 토크가 각각의 경로에 대해 최대 9.5% 및 8.8% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 압의 최적화 설계를 통해 모터 부하절감 및 사이클 타임 감축 등 성능 향상 효과가 매우 크다는 것을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] 이관형, 이종신 외, “직접구동형 고속스카라 로봇개발 보고서 II,” 삼성종합기술원, 1990.
- [2] J. J. Craig, *Introduction to ROBOTICS Mechanics & Control*, Addison-Wesley, pp. 159-190, 1995.
- [3] R. P. Paul, “Robot manipulators: mathematics, programming, and control,” The MIT Press, 1982.
- [4] P. G. Ranky, C. Y. Ho, *Robot Modeling: Control and Applications with Software*, IFS Ltd, UK Springer-Verlag, 1985.

- [5] H. Asada and J.-J. E. Slotine, *Robot Analysis And Control*, John Wiley & Sons, 1985.
- [6] T. Yoshikawa, “Foundation of robotics: analysis and control,” The MIT Press, 1988.



#### 이종신

1981년 부산대학교 기계공학과(공학사). 1985년 연세대학교 기계공학과(공학석사). 2000년 고려대학교 기계공학과(공학박사). 1986년~1995년 삼성종합기술원, 삼성중공업 중앙연구소. 1995년~현재 주성대학 컴퓨터응용기계과 교수. 관심분야는 로봇, 자동화 장비 설계 및 제어.