

## 직접구동방식 수평다관절형 로봇의 최소 사이클시간을 갖는 로봇팔의 단면설계

강봉수, \* 박기환, \*\* 김수현, \* 곽윤근\*

### Design of an Arm Section for a Direct Drive SCARA Robot having the Minimum Cycle Time

B.S. Kang\*, K.H. Park\*\*, S.H. Kim\*, Y.K. Kwak\*

#### ABSTRACT

Many algorithms to enhance a speed performance of a robot have been studied, but it's rare to consider design aspect of a robot arm for time optimal problem. In this paper, section dimensions of a robot arm and a velocity profile of an end-effector were optimally designed to minimize the cycle time. Capacity of actuators, deflections of end-effector, and a fundamental natural frequency of the robot arm were constrained in optimal design. For a given path with a trapezoidal velocity profile, torques of each joint were calculated using the inverse kinematics and dynamics. For the SCARA type robot which is mainly used for assembly tasks, the time optimal design of each robot arm is presented with the above constraints.

**Key Words** : Cycle Time(사이클 시간), Optimal Design(최적 설계), Velocity Profile(속도 선도), End-Effector(말단효과장치), Section Dimension (단면 치수)

#### 1. 서 론

수평다관절형 로봇은 전자 부품과 같은 비교적 가벼운 재료의 자동조립에 많이 쓰이고 있으며, 조립과정에서 제품의 생산성을 증대시키기 위해서는 조립에 필요한 정밀도를 유지한 상태에서 실제 조립작업이 이루어지는 로봇 말단효과장치(end-effector)에서의 작업속도를 증가시켜야 한다.

작업속도를 향상시키기 위해서는 로봇설계과정에서 로봇팔의 질량과 관성모멘트를 가능한 작게 하거나, 로봇팔을 구동하는 모터의 용량을 크게 하면 된다. 로봇팔의 질량을 작게 하면, 로봇팔의 강성이 작아지게 되어 로봇팔의 처짐이 커지게 되며, 모터의 용량을 크게 할 경우 모터의 가격이 상승하고 모터가 차지하는 부피도 커지게 된다. 한편 컴퓨터 성능의 향상으로 많은양의 계산이 빠른 시간안에 이루어짐으로써, 주어진 경로

\* 한국과학기술원 기계공학과(정회원)

\*\* 광주과학기술원 기전공학과

를 빠른 시간안에 도달하도록 하는 제어알고리즘<sup>(1)(2)</sup>의 적용이 가능하게 되었다. 그러나 기존의 연구는 로봇의 형상이 먼저 결정되고 난 후에 각 조인트를 구동하는 모터의 제어입력을 계산하기 때문에 로봇의 형상이 비효율적으로 설계되었다면 작업속도를 향상시키는데 한계에 도달하게 된다. 따라서 주어진 작업을 반복적으로 수행하는 조립작업에 있어서 최적의 로봇 형상설계가 필요하게 된다.

로봇을 설계하는 과정을 살펴보면 첫번째로 우리가 원하는 작업을 수행하기 위해서 로봇이 움직이는 작업 공간을 설정한 후, 각 구동부의 위치와 각 로봇팔의 길이를 결정한다. 두번째로 로봇에 가해지는 힘을 해석하여 각 팔에 걸리는 굽힘력과 비틀림력을 계산한다. 이러한 굽힘 및 비틀림에 견디기 위해서 각 로봇팔의 단면 형태 및 단면을 이루는 치수를 결정하게 된다. 특히 정밀한 위치제어에 적합한 직접구동방식 로봇의 경우 감속장치가 없이 로봇팔의 관성항이 직접 모터의 부하로 작용함으로, 로봇팔의 단면치수가 로봇 말단효과장치의 작업속도를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 세번째로 필요한 로봇 말단효과장치의 작업속도를 얻기 위하여 모터의 용량을 결정하고 마지막으로 로봇을 구동하기 위한 제어알고리즘을 선택하여 적용하게 된다.

이 논문은 직접구동방식 수평다관절형 로봇의 작업속도를 최대로 향상시키기 위해서, 로봇팔의 단면치수와 실제 공구가 장착되는 로봇 말단효과장치의 속도함수를 함께 고려하여 최적설계문제에 수식화한 후 그 해를 수치적으로 구하였다. 최적설계의 목적함수를 사이클 시간(cycle time)으로 하고, 로봇 말단효과장치의 처짐과 로봇팔의 기본 고유진동수에 대한 허용값으로 최적해를 구하기 위한 부동 제한식을 정의하였다. 또한 로봇이 경로를 따라 이동할 경우 로봇 말단효과장치에서의 속도선도는 가속, 정속, 감속을 가지는 사다리꼴의 형태를 가지며 로봇의 역기구학식으로 각 조인트의 변위, 속도, 그리고 가속도를 구하였다. 그리고 이를 이용하여 로봇 동역학식에 의해서 조인트의 토크값을 계산한 후 이 값이 모터의 허용용량내에 있도록 제한하였다. 그리고 제안된 최적설계알고리즘의 적용을 위한 시뮬레이션 대상으로 본 실험실에서 설계, 제작한 직접구동방식 수평다관절형 로봇인 KIRO-3을 선택하였다. 따라서 실제 KIRO-3로봇의 설계치수를 초기치로 하여 최적화를 수행한 후 각 팔의 단면치수와 질량의 변화 그리고 사이클 시간의 향상정도를 고찰하였다.

## 2. KIRO-3 로봇

Fig. 1은 본 연구실에서 설계, 제작한 4자유도를 가지는 직접구동방식 수평다관절형 로봇이다. KIRO-3 로봇은 빠른 작업속도를 내기 위해서, 산업용 로봇에 주로 사용되는 알루미늄에 비하여 비강성이 5배 이상 크고 구조감쇠가 10배 정도가 높은 탄소섬유 에폭시 복합재료로 로봇팔을 제작하였으며, 정확한 위치제어를 수행하기 위해서 마찰 및 백래쉬의 문제점을 일으키는 감속장치를 생략한 직접구동방식이다.<sup>(3)</sup> 로봇의 1, 2축은 수평운동을, 3축은 손목부분의 수직운동을 그리고 4축은 3축에 대해서 회전운동을 하게 된다.

직접구동방식 로봇은 1983년 Asada와 Kannade가 Carnegie-Mellon 대학에서 처음 시도하였고 1984년 M.I.T에서 처음으로 직립형 직접구동방식 로봇의 개발<sup>(4)</sup>에 성공하였으나 직접구동방식으로 인한 모터의 과도한 부하로 인한 과열현상으로 실제 응용은 극히 제한되었다. 그러나 고토르크 모터의 출연으로 인하여 1987년 Adept사에서 처음으로 직접구동방식 로봇의 시제품 제작에 성공하였고 그 후로 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다.

팔의 재료로 사용된 복합재료는 구조물의 경량화와 높은 강성이 요구되는 우주선, 항공기 등에 주로 사용되어 왔다. 복합재료는 무게를 가볍게 하는 특성 외에도 재료의 고유진동수가 높고 감쇠특성도 우수하기 때문에 빠른 운동이 요구되는 정밀한 기계부품으로도 많이 쓰이고 있다. 그러나 복합재료는 적층각도에 따라 방향에 따른 기계적 강성이 달라지기 때문에, 로봇팔에 적용할 경우 굽힘과 비틀림을 고려하여 섬유적층각도를 결정해야 한다.

Table 1은 KIRO-3 로봇팔의 치수와 각 팔의 기계적 특성을 나타내고 있다. 로봇팔을 복합재료로 제작시 탄소섬유는 Celion G-50 그리고 에폭시(epoxy)는 Fiber 9481를 사용하였고 레진(resin)의 함량은 40%로 하였다. 팔의 단면은 팔에 작용하는 굽힘과 비틀림에 강한 속이 빈 박스형으로 하였으며, 선행연구<sup>(5)</sup>를 통해서 팔의 강성을 고려하여 로봇팔의 적층각도는 첫번째 팔의 경우에는 20°, 두번째 팔은 10°로 제작하여 말단효과장치가 부착되는 손목부분에서의 처짐을 최소가 되도록 하였다. 첫번째 팔의 적층각도가 큰 이유는 두번째 팔에 비하여 첫번째 팔이 비틀림을 많이 받기 때문에 이에 대한 강성을 증가시키기 위해서이다.

평면운동을 하는 로봇팔을 구동하기 위한 두개의 모터는 무접점 직류모터(blushless DC motor)로 정상 상태에서 최대연속토크는 14.2 Nm를 가진다. 손목 부분의 구조는 수직운동을 위한 볼스크류와 회전운동을 위한 볼부쉬(ball bush)로 구성되어 있고 구동모터는 무접점 직류모터로 최대연속토크는 9.7 Ncm를 가진다.

### 3. 로봇팔의 형상설계

#### 3.1 싸이클 시간

로봇의 작업속도를 향상시키는 것은 곧 주어진 경로를 빠른 시간안에 도달함을 의미한다. 따라서 주어진 경로를 가는데 필요한 시간인 싸이클 시간을 줄이는 것이 작업속도의 향상을 나타내는 지표가 된다.

수평다관절형 로봇이 두 팔을 가졌다고 했을때 특별한 제한이 없다면 수평운동을 하는 두 팔의 작업영역은 Fig. 2와 같이 두팔을 최대로 벌렸을 때의 길이를 반경으로 하는 원이 된다. 그리고 이러한 원안에서 로봇이 운동할 수 있는 경로는 무수히 많이 존재하기 때문에 모든 경로에 대해서 싸이클 시간을 최소로 하는 최적설계를 수행한다는 것은 불가능하다.

따라서 기준이 되는 몇가지 경로에 대해서 최적설계를 수행해야 하는데, 본 연구에서는 로봇의 성능평가에 많이 쓰이는 Makino<sup>(6)</sup>가 제안한 기준작업영역(standard working area)의 대각선을 따라서 움직일때 걸리는 시간을 싸이클 시간(cycle time)으로 정의하고

Table 1 Mechanical Properties of KIRO-3 Robot Arm

		First Arm	Second Arm
Length	(cm)	32	32
Thickness	(cm)	0.5	0.5
Width	(cm)	12	9
Height	(cm)	7	7
Elastic Modulus	(GPa)	120.80	188.47
Shear Modulus	(GPa)	24.43	10.13
Poisson's Ratio		1.96	0.95
Masc	(Kg)	1.171	0.926

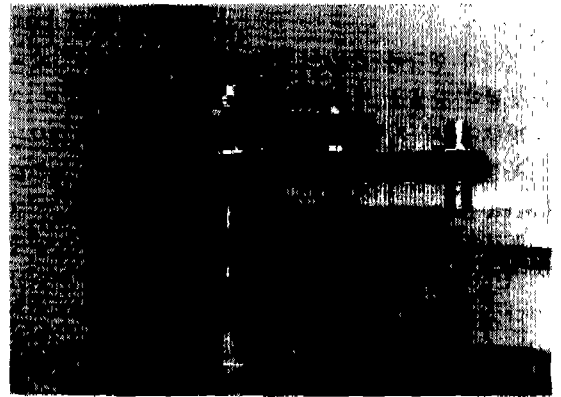
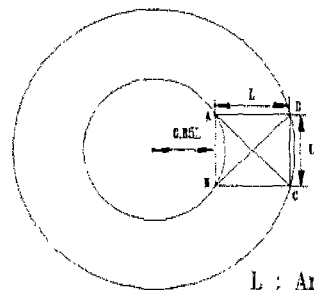


Fig. 1 Photograph of KIRO-3 Robot

이를 최소화하기 위한 로봇팔의 단면설계를 수행하였다.

#### 3.2 로봇 말단효과장치의 처짐 및 로봇팔의 진동

로봇의 실제 작업시에는 로봇 말단효과장치에 작업공구가 장착되어 작업을 수행하게 된다. 따라서 로봇말단효과장치에서의 처짐은 곧 작업을 올바르게 수행하지 못하게 하는 원인이 된다. 로봇 말단효과장치의 처짐을 크게 두가지로 나누면, 첫번째로 로봇팔의 자중 및 로봇 말단효과장치에 작용하는 가반하중과 공구무게 등으로 인하여 로봇 말단효과장치의 수직방향으로 처짐이다. 이러한 수직방향으로의 처짐은 수직운동을 하는 3축이 기울어지게 되어 평면에 대한 위치편차를 초래하게 된다. 두번째로 빠른 싸이클 시간을 가지기 위해서는 빠른 가속 혹은 감속이 요구되며 대부분의 경로가 이러한 감.가속 구간에서 운행되는데<sup>(7)</sup> 이러한 빠른 감.가속시 팔의 관성에 의하여 수평방향으로 처짐이 일어나게 되며 이러한 처짐은 곧 작업공구의 위치오차를



L : Arm Length

Fig. 2 Standard Working Area

일으킨다.

앞에서 언급한 로봇팔의 처짐을 작게 하기 위해서는 로봇팔의 강성을 크게 해야 한다. 주어진 재료에서 수직방향으로의 처짐에 대한 강성을 크게 하기 위해서는 로봇팔의 단면에서 수평방향에 대한 면적관성모멘트 (area moment of inertia)가 커져야 한다. 그리고 목표점에서 빠른 감속시 수평방향으로의 처짐은 로봇팔의 단면에서 수직방향에 대한 면적관성모멘트가 커져야 한다. 따라서 수직방향에 대한 처짐을 작게 하기 위해서는 박스형 단면을 가진 로봇팔에서 너비에 비해 높이가 상대적으로 커야 하고, 수평방향으로의 처짐을 작게 하기 위해서는 높이에 비해 너비가 상대적으로 커져야 한다.

그리고 로봇이 빠르게 왕복운동을 할 경우나 외부로부터 가해지는 진동에 의해서 로봇팔의 진동이 일어날 수 있다. 만약 이러한 가진주파수가 로봇팔의 기본 고유진동수에 가까워지면 공진이 일어나게 되어, 로봇팔 뿐만 아니라 로봇팔이 접합된 조인트를 구성하는 각 부품에 파손을 야기할 수도 있다. 따라서 가능한 로봇팔의 기본 고유진동수는 가진주파수보다 높은 영역에 있어야 한다.

전체적으로 로봇의 강성을 크게 하면 로봇의 말단효과장치에서의 처짐도 감소하고 기본 고유진동수도 높은 값을 가지므로 로봇의 작업정밀도를 향상시킬 수 있다. 그러나 강성을 크게 한다는 것은 곧 로봇팔의 무게가 커지고 따라서 모터에 부가되는 부하가 커지게 되므로 결국은 싸이클 시간이 길어지는 단점이 생긴다. 그러므로 위치정밀도를 향상시키는 일과 싸이클 시간을 작게 하는 일은 서로 상충적인 관계를 가지게 된다.

### 3.3 최적설계

필요한 로봇의 위치정밀도 즉 로봇의 허용처짐과 허용고유진동수가 정해졌을 때 이러한 값을 유지하면서 가능한 싸이클 시간을 작게 하는 로봇팔의 단면치수를 결정하는 것이 본 연구의 목적이 되며 이를 위해서 최적설계기법을 도입하였다.

먼저 최적화를 수행하기 위한 목적함수로 로봇의 작업속도의 지표인 싸이클 시간으로 하여 이 값을 최소화 하였다. Fig. 3과 같이 로봇 말단효과장치에서의 속도함수가 가속, 정속, 감속의 사다리꼴의 형태를 가지고 움직인다고 가정하였을 때 목적함수인 싸이클 시간(T)을 수식으로 쓰면 다음과 같다.

$$T = S/V + \Delta T \tag{1}$$

여기서 V는 정속구간의 속도를 나타내고  $\Delta T$ 는 가속 또는 감속구간의 시간간격을 나타내며, S는 기준작업영역에서 대각선의 길이로 싸이클 시간 동안 이동한 거리를 나타낸다. 그리고 목적함수를 최소화 하기 위한 설계변수로는 속이 빈 사각단면을 가진 로봇 팔에서 각 팔의 높이와 너비, 그리고 정속구간의 속도와 가속 또는 감속 구간의 시간간격으로 하였다.

그리고 제한부등식을 유도하기 위해서, 먼저 로봇팔의 수직방향으로의 처짐  $\delta_z$  와 수평방향으로의 처짐  $\delta_y$  은 로봇팔의 설계시 로봇이 수행할 작업의 정밀도를 고려하여 각각 미리 설정한 허용처짐  $\delta_{za}$ ,  $\delta_{ya}$  이내에 있어야 한다면 다음과 같은 제한부등식을 유도할 수 있다.

$$\delta_z - \delta_{za} \leq 0 \tag{2}$$

$$\delta_y - \delta_{ya} \leq 0 \tag{3}$$

그리고 로봇의 기본 고유진동수  $\omega$ 는 허용고유진동수  $\omega_a$  보다 커야하므로 다음과 같은 제한부등식을 부가할 수 있다.

$$\omega_a - \omega \leq 0 \tag{4}$$

만약 우리가 정밀한 작업을 수행하기 위해 허용처짐을 작게 하고 허용고유진동수를 크게 한다면 강성이 큰 로봇팔을 얻을 수 있겠지만 목적함수인 싸이클시간이 길어지게 된다.

이러한 제한부등식(2), (3), (4)을 사용하기 위해서 로봇 말단효과장치에서의 처짐 과 로봇팔의 기본 고유진동수를 수치적으로 유한요소법 (finite element method)으로 구하였다.<sup>(8)</sup> 각 로봇팔은 빔요소 (beam element)로 가정하였고 Timoshenko's Beam The-

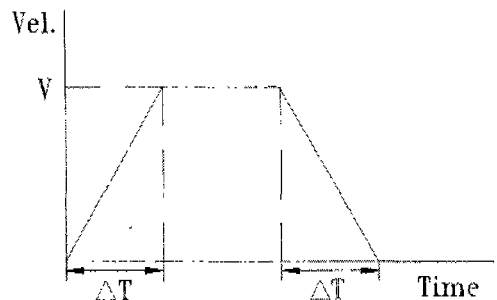


Fig. 3 Velocity Profile of End-Effector

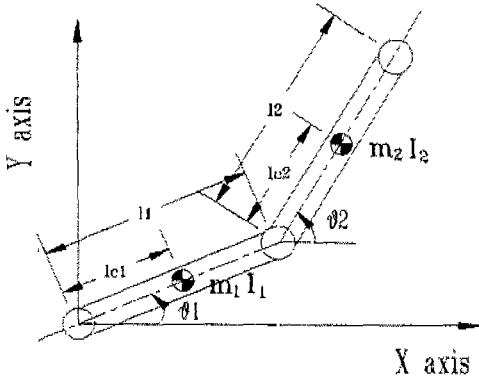


Fig. 4 Dynamic Model of the SCARA Robot

ory<sup>(9),(10)</sup>를 적용하여 해를 구하였다.

수평다관절형인 KIRO-3 로봇은 두팔과 손목부분이 동적으로 비연성(decouple)되어 있기 때문에 손목 부분을 두번째 팔 끝에 부착된 정적하중으로 간주하였다. Fig. 4와 같이 각 팔의 무게를  $m_1$ ,  $m_2$  그리고 팔의 무게중심에서 질량관성모멘트를  $I_1$ ,  $I_2$  라 하면 각 조인트에 작용하는 토크  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\tau_2 = m_2 l_1 l_{c2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_1 + (I_2 + m_2 l_{c2}^2) \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1^2 \quad (5)$$

$$\tau_1 = (I_2 + m_2 l_1^2 + m_1 l_{c1}^2) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_2^2 \quad (6)$$

$l_{c1}$ ,  $l_{c2}$ 는 각각 조인트에서 무게중심까지의 거리를 나타내며  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  은 각각 로봇 말단효과장치의 운동 경로와 속도함수가 주어졌을 때 역기구학을 통해서 구해지는 각변위, 각속도, 그리고 각가속도를 나타낸다. 따라서 운동경로와 속도함수가 주어지게 되면 식(5), (6)에 의해서 각 조인트에 걸리는 토크를 구할 수 있다. 만약 모터가 정상적인 상태에서 낼 수 있는 최대연속토크가  $\tau_m$  라 하면 각 조인트에 걸리는 토크가 실제 운동 중에 모터의 최대연속토크보다 클 수 없으므로 모터의 용량에 대한 부등 제한식은 다음과 같다.

$$|\tau_i| \leq \tau_m \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

종합적으로, 본 최적설계의 문제는 목적함수인 식(1)의 사이클 시간을 최소화 하기 위하여 식(2), (3), (4), (7)의

제한부등식이 성립하는 범위내에서 각 팔의 단면치수와 최적의 속도함수를 구하게 것으로 정의되며 이를 순차적으로 나타내면 Fig. 5와 같다.

KIRO-3 로봇 말단효과장치에 단위 하중이 수직방향으로 작용했을 때의 수직방향의 처짐은  $0.565 \mu\text{m}/\text{N}$ 이며, 최대 각가속도  $33 \text{ rad}/\text{sec}^2$ 로 수평 방향으로 급제동시 관성에 의한 처짐은  $6.78 \mu\text{m}$ 이며, 그리고 로봇팔의 기본 고유진동수는  $455 \text{ Hz}$ 이다. 따라서 위의 세가지 값들을 각각  $\delta_{za}$ ,  $\delta_{ya}$ ,  $\omega_a$ 로 사용하면 로봇의 위치정밀도와 팔의 강성을 그대로 유지한 상태에서 사이클 시간을 최소화 하는 로봇팔의 높이와 너비의 최적치를 구할 수 있으므로 식(2), (3), (4)에서 위의 세 값을 허용값으로 사용하였다. 또한 제작된 KIRO-3 로봇의 단면치수를 초기값으로 하면, 최적 설계시의 단면치수와 비교할 수 있으며 더욱이 사이클 시간의 향상정도를 알 수 있다.

최적의 해를 찾아가는 과정을 살펴보면 먼저 초기 설계치를 가지고 첫번째로 제한부등식(2), (3), (4)가 성립하는 범위에서 팔의 단면치수를 결정하고, 두번째로 제한부등식(7)이 만족하는 범위에서 Fig. 3에서 보여준 속도함수가 가급적 가속시간( $\Delta T$ )을 줄이고 정속속도(V)가 커지도록 조정된다. 만약 가속시간을 너무 줄이게 되면 그만큼 가속력을 크게 해야 하기때문에, 모터에 작용되는 토크가 모터의 허용용량을 넘어서게 되므로 제한부등식(7)을 만족하지 않게 된다. 따라서 설계변수인 가속시간을 다시 선정한 후 첫번째 과정 및 두번째 과정을 계속해서 반복한다. 이러한 과정을 걸쳐서 제한부등식이 위배되지 않는 범위에서 최소의 사이클 시간을 갖는 최적해를 구한다. 최적해를 찾아가는 알고리즘은 Vanderplaats<sup>(11)</sup>가 제시한 Modified Feasible Direction For Constrained Minimization 방법을 사용하였다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 토의

로봇 말단효과장치가 Fig. 2에서 A에서 C로 움직일 때 그리고 B에서 D로 움직일 때, 이 두 경우에 대하여 사이클 시간을 최소화 하는 최적화 결과를 Table 2에 나타내었다. 사이클 시간을 줄이기 위해서는 초기치에 비해 첫번째 팔의 높이는 커지고 두번째 팔의 높이와 너비는 작아짐을 알 수 있다. 그리고 첫번째 팔의 질량은 초기치에 비해 각각 10%, 14% 증가하였고 두번째

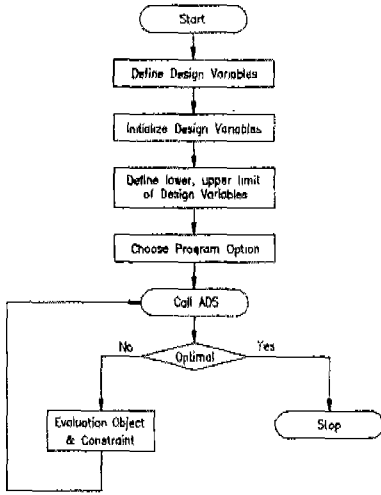


Fig. 5 Flow Chart

팔의 경우는 각각 48%, 51% 감소하였다. 이는 주어진 모터의 용량내에서 로봇 말단효과장치의 빠른 감, 가속을 위해서는 가급적 두번째 팔의 질량을 줄이는 것이 효율적이기 때문이다. 그리고 두팔의 전체질량은 각각 16%, 9% 줄어들었다.

부등제한식중에서 처짐에 대한 식(2), (3) 그리고 첫번째 팔을 구동하는 모터의 최대 토크에 대한 제한식(7)이 능동제한식(active constraint)으로 작용하였다. 최적의 단면치수를 가질 경우 싸이클 시간은 각각 15%, 16% 감소하였고, 속도함수에서의 최고속도는 각각 14%, 26% 증가하였다. Fig. 6은 말단효과장치의 경로를 A에서 C로 잡았을 때, 초기치를 가진 로봇과 최적치를 가진 로봇을 구동할 경우 최적의 속도함수를 보여주고 있다. 최적화를 수행한 후 속도함수의 감, 가속 성능이 좋아졌으며 따라서 빠른 시간에 목표치에 도달함을 알 수 있다. Fig. 7은 각 조인트에 걸리는 토크를 나타내고 있다. 첫번째 조인트에 걸리는 최대토크는 모터의 최대토크 14.2 Nm와 일치하며, 첫번째 조인트에 걸리는 토크값이 두번째 조인트에 걸리는 토크값보다 훨씬 큼을 알 수 있다. 그리고 초기치를 가졌을 때는 가속에서 정속으로 넘어가는 지점에서, 최적치를 가졌을 때는 정속에서 감속으로 넘어가는 지점에서 최대토크를 가졌다. Fig. 8 과 Fig. 9 는 B에서 D를 따라 움직일 시 최적의 속도함수와 각 조인트에 걸

Table 2 Optimal Output (\* : Active Constraint)

		A⇒C		B⇒D	
		initial	optimal	initial	optimal
1st Arm	width (cm)	12.00	10.96	12.00	14.40
	height (cm)	7.00	9.86	7.00	8.89
	mass (Kg)	1.171	1.288	1.171	1.449
2nd Arm	width (cm)	9.00	3.97	9.00	3.31
	height (cm)	7.00	4.75	7.00	5.02
	mass (Kg)	0.926	0.477	0.926	0.453
Velocity Profile	v (m/s)	3.94	4.46	3.02	3.82
	ΔT (sec.)	0.101	0.081	0.107	0.098
Constraint	vertical deflection (μm/N)	0.565	0.565*	0.565	0.565*
	lateral Deflection (μm)	6.78	6.78*	6.78	6.78*
	1st natural frequency (Hz)	455	489	455	499
Cycle Time (sec.)		0.215	0.182	0.257	0.216

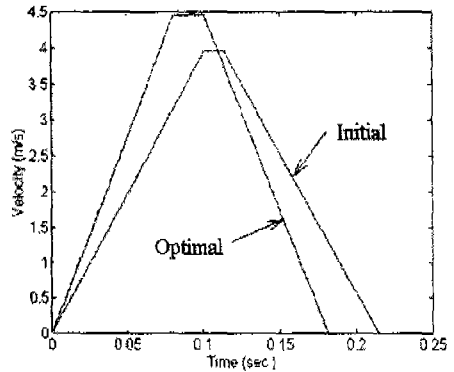


Fig. 6 Velocity Profile (A⇒C)

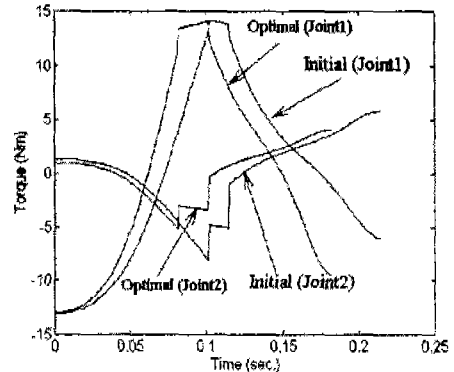


Fig. 7 Torque of each Joint (A⇒C)

5. 결 론

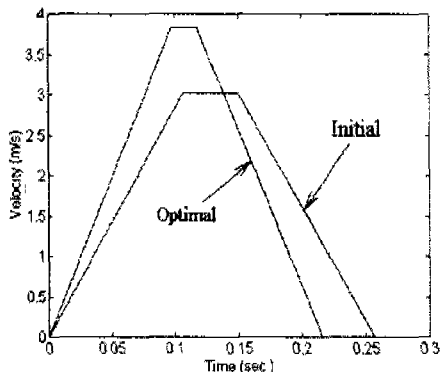


Fig. 8 Velocity Profile (B⇒D)

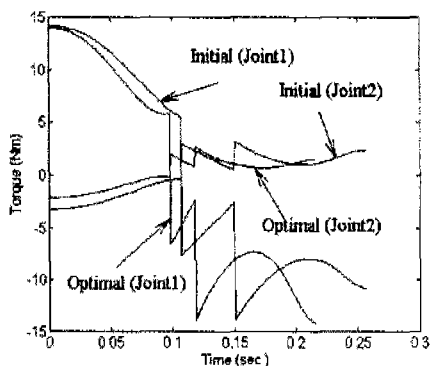


Fig. 9 Torque of each Joint (B⇒D)

리는 토크값을 나타낸다. 이 경로에서는 초기치를 가졌을 경우에는 정속에서 감속으로 넘어가는 지점에서, 최적치를 가졌을 때는 마지막 즉 D지점에서 최대토크를 나타냈다. Fig. 6 과 Fig. 8를 살펴보면 속도함수의 모양이 삼각형이 아닌 사다리꼴의 형태를 가지며, 이러한 원인은 경로를 따라 감, 가속시 모터의 최대 토크의 제한으로 인하여 더 큰 감, 가속을 하지 못하고 로봇 말단효과장치에서의 속도가 정속구간으로 넘어가기 때문이다.

복합재료로 이루어진 속이 빈 사각단면을 가진 수평 다관절형 로봇에 대해서 싸이클 시간을 최소화 하기 위하여 각 로봇팔의 높이와 너비를 최적설계하였고 이때의 로봇 말단효과장치의 속도함수를 구하였다. KIRO-3 로봇의 초기 설계치를 가지고 로봇 말단효과장치에서의 동일한 처짐 및 동일한 로봇팔의 기본고유진동수 허용범위내에서, 두가지 경로에 대해서 최적설계를 수행한 결과 싸이클 시간은 각각 15%, 16% 감소하였고 팔의 전체질량은 각각 16%, 9% 줄어들었다.

참고문헌

1. H. A. Park and P. J. Turner, "Optimal Tracking Controller Design for Invariant Dynamics Direct-Drive Arms," ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol.108, pp. 360-365, 1986
2. Hans P. Geering, Lino Guzzella, Stephan A. R. Hepner and Christopher H. Onder, "Time Optimal Motion of Robots in Assembly Tasks," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-31, No.6, pp. 512-518, 1986
3. 박윤근, 이대길 외 9명, 직접 구동 방식 로봇의 개발과 그 응용에 관한 연구(III), 과학기술처, TR-01-89, 1989
4. Haruhiko Asada, Kanal Youcef-Toumi, Direct-Drive Robotics, The MIT Press, 1987
5. D. G. Lee, K. S. Kim and Y. K. Kwak, "Manufacturing of a SCARA type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Material," Robotica, Vol.9, pp. 219-229, 1991
6. H. Makino, "Standard Performance Test Methods for Planar Positioning Assembly-Robots," Am.CIRP, Vol. 34, pp. 33-36, 1985
7. R. P. Paul, Robot Manipulators, MIT

- Press, 1981
8. Maurice Petyt, Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Press, 1990
  9. G. R. Cowper, "The Shear Effect in Timoshenko's Beam Theory," Journal of Applied Mechanics, Trans. of The ASME, Vol. 88, pp. 335-340, 1966
  10. D. L. Thomas, J. M. Wilson and R. R. Wilson, "Timoshenko's Beam Finite Element," Journal of Sound and Vibration, 31(3), pp. 315-330, 1973
  11. G. N. Vanderplaats, "An Efficient Feasible Directions Algorithm for Design Synthesis," AIAA J., Vol. 22, No. 11, pp. 1633-1640, 1984