

# 여유구동형 병렬 로봇의 최적설계를 통한 기구학적 분석 및 제어에 관한 연구

## The Study of Kinematic Analysis and Control by Optimum Design of Redundantly Actuated Parallel Robot

김병수<sup>1,✉</sup>, 이재원<sup>2</sup>, 김영석<sup>3</sup>, 김진대<sup>1</sup>, 이혁진<sup>2</sup>  
Byeong Soo Kim<sup>1,✉</sup>, Jeh Won Lee<sup>2</sup>, Young Suk Kim<sup>3</sup>, Jin Dae Kim<sup>1</sup> and Hyuk Jin Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 대구기계부품연구원 (Daegu Mechatronics and Materials Institute)

<sup>2</sup> 영남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

<sup>3</sup> 경북대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyungpook national Univ.)

✉ Corresponding author: bs-kim@dmi.re.kr, Tel: 053-608-2075

Manuscript received: 2011.11.17 / Accepted: 2011.12.9

*In this study, kinematic analysis of forward kinematic, inverse kinematic and jacobian for 6-bar parallel robot was analyzed. In order to analyze the maximum workspace of 6-bar parallel robot, maximum revolution range of active joint was calculated. Also, to analyze forward dynamics and inverse dynamics of 6-bar parallel robot, recurdyn and simmechanics was utilized. Using a PI controller and Feedforward controller make an experiment with square motion of end\_effector. The reference value of active joint and trace of end\_effector were compared with actual experimental value.*

Key Words: Parallel Robot (병렬 로봇), Workspace (작업 영역), Feedforward Control (피드포워드 제어), Motion Control (모션 제어), Redundant Actuator (여유도 구동기)

### 1. 서론

로봇 시스템에서 기구자유도 보다 많은 수의 구동장치를 적용한 것을 여유구동형 로봇이라 정의한다.<sup>1</sup> 여유 구동 시스템을 적용함으로써 로봇 끝단(End\_effector)에서 큰 힘과 빠른 가속도를 낼 수 있으며, 병렬 로봇의 최대 단점인 특이점을 제거 하여 넓은 작업 영역의 확보가 가능하다.<sup>2</sup>

기존의 선행되었던 병렬 로봇(5-bar, 3-RRR, 4-RRR)에 관한 연구는 로봇의 이송부 및 구동부가 복수개의 링크로 연결된 폐회로(closed loop)구조이며, 링크와 구동부 사이의 간섭이나 충돌로 인한 작업 영역이 제한적인 단점이 있다.<sup>3,4</sup> 병렬구조의 로봇은 작업영역 범위에서 링크가 서로 일직선이

되거나 겹침으로 발생하는 특이점때문에 운동제어에 있어 어려움을 겪는다.<sup>5</sup>

과거의 병렬로봇 연구에서 여유자유도를 활용하여 장애물회피 및 작업성능의 향상을 위한 여유자유도 및 여유구동 시스템에 대한 연구는 비교적 활발하게 진행되었지만 6 개의 링크와 4 개의 구동기를 직접 연결한 병렬구조 타입의 연구는 비교적 활발히 이루어 지지 않았다.<sup>6</sup>

본 연구에서는 페루프 구조를 가지는 여유구동 병렬 로봇이 최대의 작업 영역을 확보하기 위한 최적 설계 방안을 제시하고, 기구학 분석을 통해 자코비안을 정의하여 힘과 토크와의 관계를 분석한다. 동역학 해석 프로그램 Recurdyn 활용하여 기구부의 구현가능성 및 기구 설계 검증 과정을 거

친다. 기구 설계를 바탕으로 병렬로봇을 제작하고 제어 실험을 위한 제어 알고리즘을 구성하고 제어기 종류에 따른 입력과 출력의 오차 범위를 분석을 통해 여유구동형 병렬로봇 개발에 관한 전반적인 연구를 진행한다.

**2. 병렬 로봇 최적 설계**

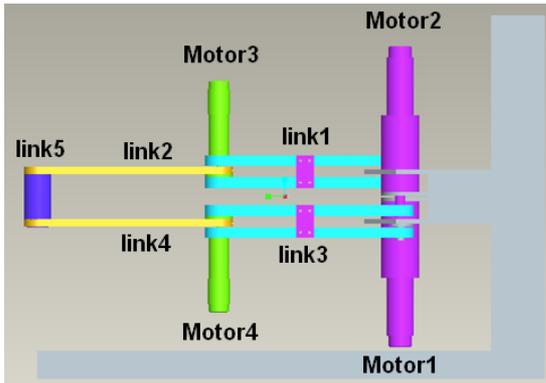


Fig. 1 6-bar robot structure with difference height and motor placement

6-bar 병렬 로봇의 최적설계의 핵심은 끝단의 넓은 회전 범위를 확보하는 것과, Fig. 1 과 같이 모터와 링크 사이에 간섭 및 충돌을 제거하여 최대의 작업 영역을 확보하는데 있다. 모터 1,4 및 모터 2,4 의 치부 방향을 같게 하고 각 링크 사이에 높이차를 두어 왼쪽 체인과 오른쪽 체인의 충돌을 제거하여 로봇 끝단이 최대의 작업 영역을 확보할 수 있게 설계하였다.

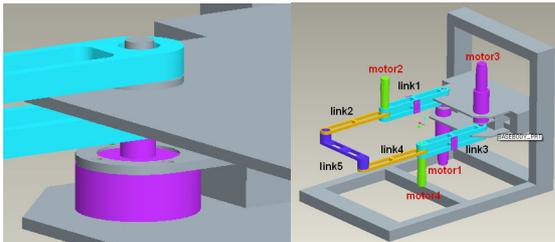


Fig. 2 Axis reinforcement for the prevention of end\_effector deformation

로봇 끝단의 처짐방지 및 가반하중을 증가시키기 위해서 Fig. 2 와 같이 링크 1,3 을 더블 링크 구조로 축 보강을 하였다. 기구부의 전반적인 경

량화를 위해서 알루미늄 소재를 사용하였으며 회전조인트에는 오일레스 베어링을 적용하였다.

각 축방향의 최대 작업 영역을 확인하기 위해서 Fig. 3 과 같이 기구를 지지하는 베이스 부와 충돌하지 않는 범위 내에서 양의 X 축과 음의 Y 축 방향으로 최대의 작업영역을 가지는 워킹모드를 분석하였다.

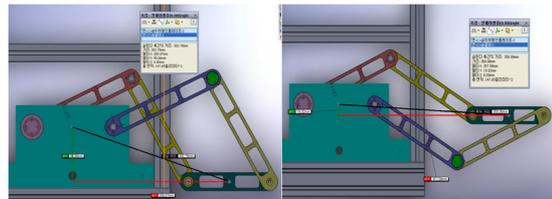


Fig. 3 Maximum workspace by working mode

**3. 병렬 로봇의 기구학 해석**

**3.1 기구학 해석**

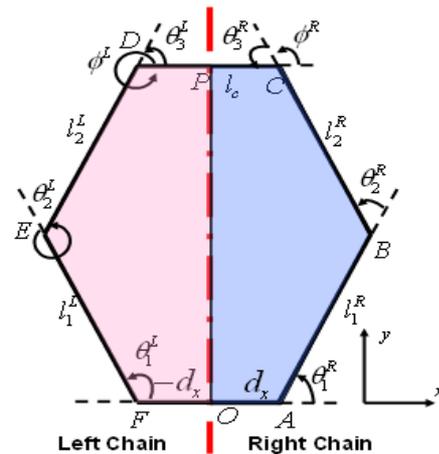


Fig. 4 Schematic and coordinate of 6-bar parallel robot

Fig. 4 는 6-bar 병렬 로봇의 전체적인 구조 및 구성요소를 기호화 하였으며, 4 개의 구동모터와 2 개의 수동회전조인트를 포함하고 가운데 점선을 기준으로 왼쪽체인과 오른쪽 체인으로 구성된다.

원점에서 시작하여 두 체인의 끝점 P 는 동일한 구속조건에 의해서 정기구학 수식은 식(1),(2)로 표현된다.

$$P_x = d_x + l_1^R c_1^R + l_2^R c_2^R + \frac{l_2^R}{2} c_\phi^R = -d_x + l_1^L c_1^L + l_2^L c_2^L + \frac{l_2^L}{2} c_\phi^L \quad (1)$$

$$P_y = l_1^R s_1^R + l_2^R s_{12}^R + \frac{l_c}{2} s_\phi^R = l_1^L s_1^L + l_2^L s_{12}^L + \frac{l_c}{2} s_\phi^L \quad (2)$$

로봇 끝점을 알 때 각 회전 조인트의 각도를 계산하는 역기구학 해를 구하기 위해서 식(1)과 식(2)에서  $c_{12}$  와  $s_{12}$  을 삼각함수 덧셈공식에 의해서 전개하여  $c_1, s_1$  로 묶어 정리하면 식(3),(4)로 표현된다. 식(5)같이 치환 후 식(7)~(11)을 과정으로 역기구학 해를 구할 수 있으며 기호  $i$  는 왼쪽체인과 오른쪽 체인을 의미한다.

$$P_x - d_x - \frac{l_c}{2} c_\phi^i = (l_1^i + l_2^i c_2^i) c_1^i - (l_2^i s_2^i) s_1^i \quad (3)$$

$$P_y - \frac{l_c}{2} c_\phi^i = (l_1^i + l_2^i c_2^i) s_1^i + (l_2^i s_2^i) c_1^i \quad (4)$$

$$A = l_1^i + l_2^i c_2^i, \quad B = l_2^i s_2^i \quad (5)$$

$$E = P_x - d_x - \frac{l_c}{2} c_\phi^i, \quad F = P_y - \frac{l_c}{2} c_\phi^i$$

$$s_1^i = \frac{AF - BE}{A^2 + B^2}, \quad c_1^i = \frac{AF + BE}{A^2 + B^2} \quad (6)$$

$$\theta_1^i = A \tan 2(s_1^i, c_1^i) \quad (7)$$

$$c_2^i = \frac{(P_x - d_x - \frac{l_c}{2} c_\phi^i)^2 + (P_y - \frac{l_c}{2} c_\phi^i)^2 - l_1^{i2} - l_{12}^{i2}}{2l_1^i l_2^i} \quad (8)$$

$$s_2^i = \sqrt{1 - c_2^{i2}} \quad (9)$$

$$\theta_2^i = A \tan 2(s_2^i, c_2^i) \quad (10)$$

$$\theta_3^i = \phi^i - \theta_1^i - \theta_2^i \quad (11)$$

6-bar 병렬 로봇은 하나의 로봇 끝점 ( $x=0, y=300$ )에 대해 역기구학 해석으로 Fig. 5 와 같이 4 가지의 다양한 자세를 가질 수 있으며, 이를 활용하여 장애물 회피 및 로봇의 작업 분야에 맞는 적합한 로봇자세를 구현할 수 있다.

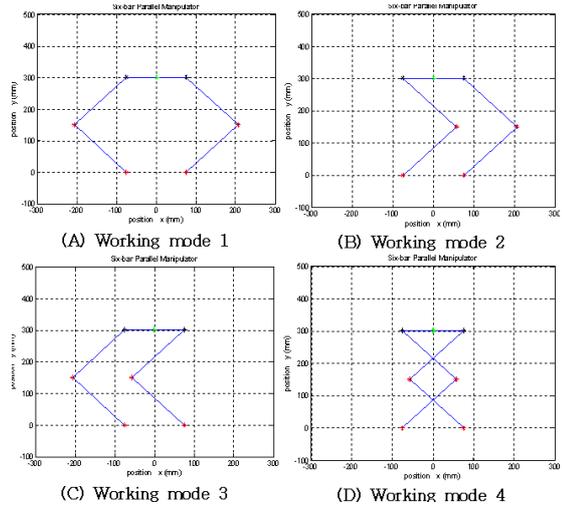


Fig. 5 Working mode of 6-bar parallel robot

### 3.2 작업영역 분석

병렬 로봇의 가장 큰 단점은 페루프 구조와 링크 간의 간섭 및 충돌로 인한 협소한 작업 영역이다. 비슷한 병렬 로봇 형태를 가지는 5-bar 와 6-bar 타입의 로봇을 Fig. 6 에 나타냈으며 끝단의 작업 영역을 Fig. 7 과 같이 비교 분석하였다.

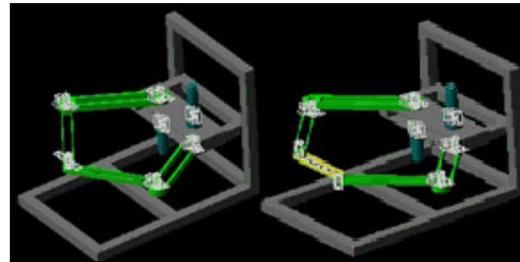


Fig. 6 5-bar and 6-bar type parallel robot

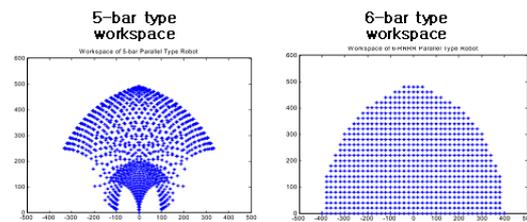


Fig. 7 Workspace analysis of 5-bar and 6-bar parallel robot

5-bar 구조의 병렬 로봇은 원점 부근 및 왼쪽과 오른쪽 영역은 링크간의 구속과 충돌로 인해 로봇의 끝단이 도달할 수 없는 영역이 존재한다. 반면

링크 간의 높이 차와 구동기의 최적 배치로 설계된 6-bar 구조는 링크길이의 제한 범위 안에서 로봇 끝단의 도달할 수 있는 작업 영역의 범위가 5-bar 구조보다 작업범위가 더 넓다.

6-bar 구조의 병렬 로봇은 구동부와 링크 간의 간섭을 제거하여 각 구동조인트의 회전 각도를 최대한 확보 함으로서 넓은 작업 영역을 확보하였다.

### 3.3 자코비안 해석

자코비안 해석을 통해 로봇의 힘과 토크와의 관계 및 로봇 자세 및 위치에 따른 조작성을 파악할 수 있으며, 로봇의 운동 해석과 제어에 중요한 요소 중의 하나이다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{l_c}{2} s_{123}^R \\ \frac{l_c}{2} c_{123}^R \\ \frac{l_c}{2} s_{123}^L \\ \frac{l_c}{2} c_{123}^L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(l_1^R s_1^R + l_2^R s_{12}^R) - l_2^R s_{12}^R & 0 & 0 \\ l_1^R c_1^R + l_2^R c_{12}^R & l_2^R c_{12}^R & 0 \\ 0 & 0 & -(l_1^L s_1^L + l_2^L s_{12}^L) - l_2^L s_{12}^L \\ 0 & 0 & l_1^L c_1^L + l_2^L c_{12}^L & l_2^L c_{12}^L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^R \\ \dot{\theta}_2^R \\ \dot{\theta}_1^L \\ \dot{\theta}_2^L \end{bmatrix} \quad (12)$$

왼쪽 체인과 오른쪽체인의 정기구학 수식에 양변을 미분하여 구동조인트와 수동조인트를 항을 분리하여 정리하면 식(12)로 표현된다.

$$\begin{aligned} J_P \dot{P} &= J_q \dot{q} \\ \dot{q} &= J_q^{-1} J_P \dot{P} \\ J &= J_q^{-1} J_P \end{aligned} \quad (13)$$

수식(13)에서  $J_P$  는  $4 \times 3$ ,  $J_q$  는  $4 \times 4$  행렬로서 최종 자코비안  $J$  는 식(14)와 같다.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{c_{12}^R}{l_1^R s_2^R} & \frac{s_{12}^R}{l_1^R s_2^R} & \frac{l_c s_3^R}{2 l_1^R s_2^R} \\ -\frac{(l_1^R c_1^R + l_2^R c_{12}^R)}{l_1^R l_2^R s_2^R} & -\frac{(l_1^R s_1^R + l_2^R s_{12}^R)}{l_1^R l_2^R s_2^R} & -\frac{(\frac{l_c}{2} l_1^R s_{23}^R + \frac{l_c}{2} l_2^R s_3^R)}{l_1^R l_2^R s_2^R} \\ \frac{c_{12}^L}{l_1^L s_2^L} & \frac{s_{12}^L}{l_1^L s_2^L} & \frac{l_c s_3^L}{2 l_1^L s_2^L} \\ -\frac{(l_1^L c_1^L + l_2^L c_{12}^L)}{l_1^L l_2^L s_2^L} & -\frac{(l_1^L s_1^L + l_2^L s_{12}^L)}{l_1^L l_2^L s_2^L} & -\frac{(\frac{l_c}{2} l_1^L s_{23}^L + \frac{l_c}{2} l_2^L s_3^L)}{l_1^L l_2^L s_2^L} \end{bmatrix} \quad (14)$$

6-bar 병렬 로봇에서 모터 4 개에서 의해서 발생된 토크는 에너지 손실이 없다는 가정하에서 로

봇끝단에 힘과 회전력으로 변환되어 나타나며, 식(15) 과 같이 표현된다.

$$dw = F dx - \tau d\theta = 0 \quad (15)$$

$$dw = F^T dx - \tau^T d\theta = 0 \quad (16)$$

식(16)에서 좌변항  $F^T$  는 로봇끝단은  $1 \times 3$  행렬  $[F_x F_y \tau_\phi]$  로 표현되고  $x$  는  $3 \times 1$  행렬로  $x$  축  $y$  축으로 각각 움직인 거리와 로봇 끝단의 회전 각도  $[p_x p_y \theta_\phi]^T$  이며, 우변항에서  $\tau$  는  $1 \times 4$  행렬로  $[\tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4]$  이고 조인트의 회전각도  $\theta$  는  $4 \times 1$  행렬로  $[\theta_1^R \theta_2^R \theta_1^L \theta_2^L]^T$  를 의미한다. 식(16)에 자코비안 수식  $d\theta = J dx$  를 대입하면 식(17)이 되며 좌우변항에  $dx$  로 약분한 후 트랜스포즈를 식(18)처럼 해주면 힘과 토크와의 관계가 식(19)로 표현된다.

$$F^T dx - \tau^T J dx = 0 \quad (17)$$

$$(F^T)^T dx - (\tau^T J)^T \quad (18)$$

$$F = J^T \tau \quad (19)$$

## 4. 동역학 해석 및 제어시뮬레이션

### 4.1 동역학 해석

새로운 로봇 메커니즘을 설계 후 제작함에 있어 동역학 해석을 통해 시행 착오를 줄여 개발 기간을 단축할 수 있다.

3 차원 설계 프로그램으로 모델링 된 모델에 대해서 구동부와 비구동부를 구분하고 구동부의 운동 특성에 따른 구속 조건을 부여하여 해석을 진행한다. 작업 환경이나 사용자의 조건에 따른 로봇 끝단에 필요한 속도나 힘을 입력하였을 때 각 구동 조인트에 요구되는 회전속도나 토크를 산출 하고, 이를 바탕으로 구동부의 모터 및 감속기의 사양을 선정하여 설계에 반영한다.

6-bar 병렬 로봇의 3 차원 모델을 recurdyn 으로 불러와 구동부와 비구동부를 나누고 구속조건을 정의한 뒤 로봇 끝단에 Fig. 8 과 같이 가로 100mm, 세로 100mm 의 정사각형을 그리는 모션을 입력을 주었으며, 이송 최대속도는 75mm/s 로 정의한다.

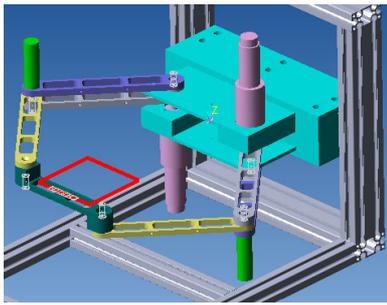


Fig. 8 Dynamic analysis by recurdyn program,

로봇 끝단에 주어진 입력을 바탕으로 각 구동 조인트 움직임 각도를 추출하여 spline 형태로 다시 각 구동조인트에 입력으로 넣으면 로봇 끝단에는 동일한 형태의 사격형이 구현이 되며, 이때 필요한 구동 토크는 Fig. 9 와 같으며 수치적인 결과는 Table 1 에 나타내었다.

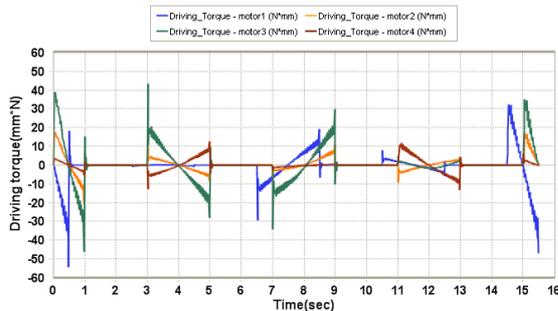


Fig. 9 6-bar parallel robot driving torque

Table 1 Result of dynamic analysis

Division	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Max angular velocity (deg/sec)	21.72	27.63	21.68	27.57
Max driving torque (Nmm)	54.26	20.39	46.44	16.19

해석 결과를 바탕으로 모터 1,3 은 maxon motor EC-MAX 30 의 60w 모터와 감속비 230:1 를 적용하였으며 모터 2,4 는 maxon motor RE-MAX 24 11w 모터와 감속비 285:1 로 선정하였다.

## 5. 제어 실험 및 결과

### 5.1 제어 실험

동역학 해석 결과를 바탕으로 모터와 감속기를

구성하여 실제 6-bar 병렬 로봇을 Fig. 10 과 같이 제작하고 전원 및 모터 드라이브를 포함하는 로봇 전장 시스템도 구성하였다.

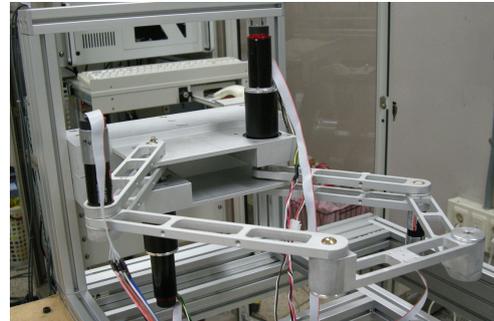


Fig. 10 manufactured 6-bar parallel robot

Fig. 11 은 6-bar 병렬 로봇의 제어 흐름도이다. Motion Control Board 는 Dspace 1103 모델을 사용하였으며, 입력 값으로 로봇 끝단의 위치와 각도를 입력값으로 넣으면 simulink 의 embedded function 블록의 역기구학 수식에 의해 각 구동기의 입력 각도 값으로 변환되어, 현재 모터위치와 오차 값이 제어기를 거쳐 모터로 입력된다.

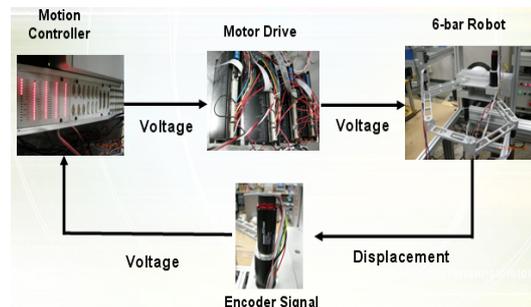


Fig. 11 Control loop of 6-bar parallel robot

피드백 제어 시스템에서는 추종 오차가 발생하기 때문에 로봇 끝단을 정밀하게 제어하는데 한계가 있으며, 이를 극복하기 위해서 피드포워드 제어를 추가한 제어 알고리즘을 Fig. 12 와 같이 구성하였다.

### 5.2 제어 실험 결과

로봇 끝단에 정사각형의 모션프로파일을 입력하여 비례제어기, 비례적분제어기, 비례적분 및 피드포워드 제어기를 각각 사용하여 실험한 결과를 Fig. 13-18 에 나타냈다. 각 실험에서의 제어기 게인값은 동일하게 설정하여 제어 실험을 진행하였다.

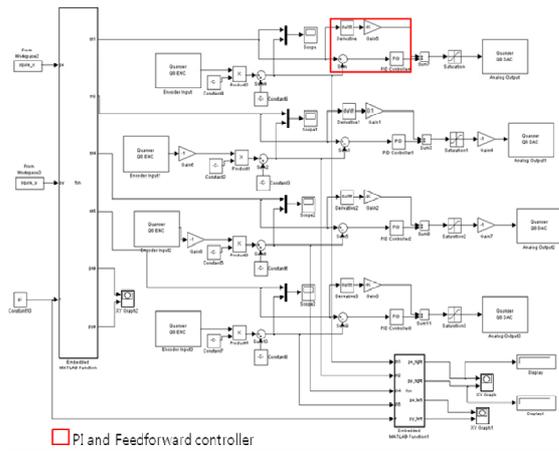


Fig. 12 Control algorithm of PI and feedforward controller to 6-bar parallel robot

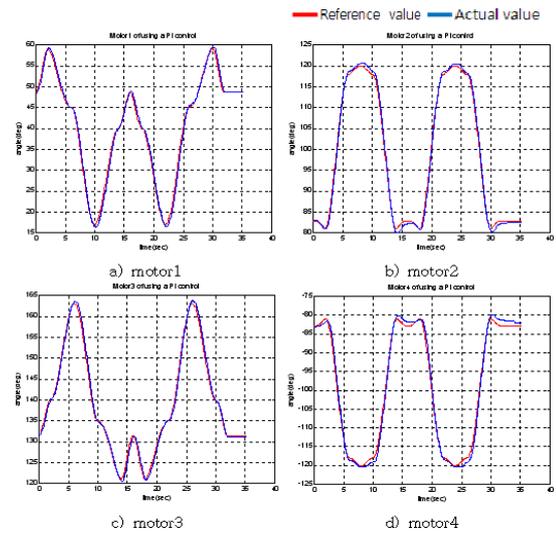


Fig. 15 Error of between reference and motor with PI controller

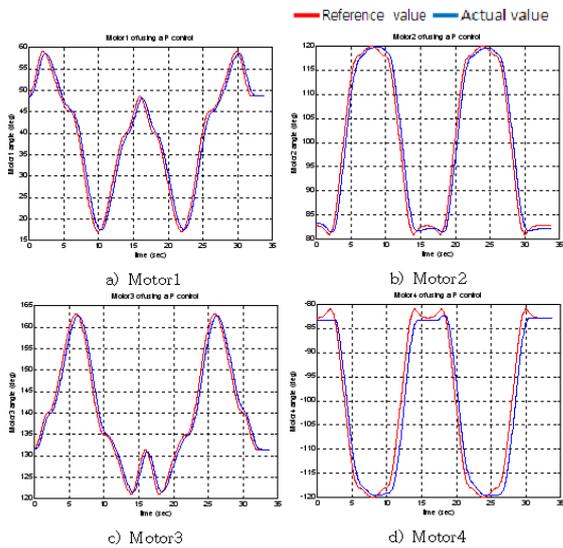


Fig. 13 Error of between reference and motor with P controller

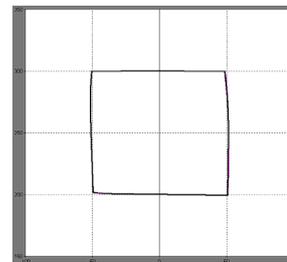


Fig. 16 End\_effector trace with PI controller

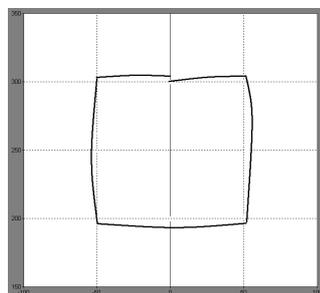


Fig. 14 End\_effector trace with P controller

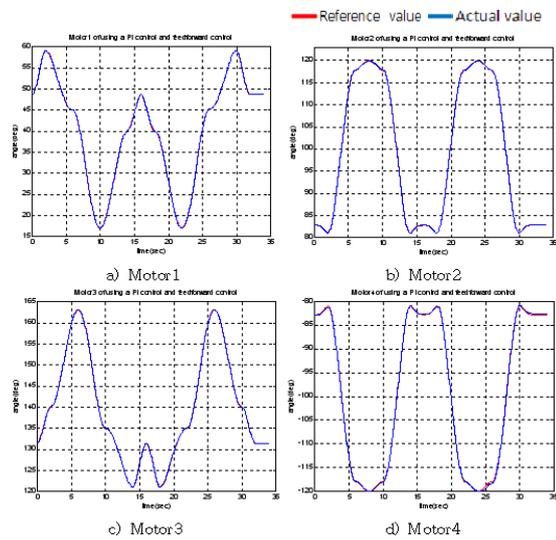


Fig. 17 Error of between reference and motor with PI and Feedforward controller

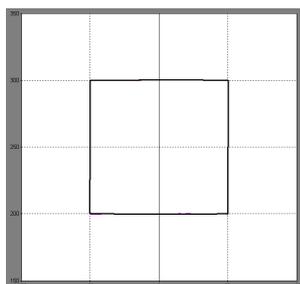


Fig. 18 End\_effect trace with PI and Feedforward controller

실험 결과 그래프 및 로봇 끝단의 사각형 궤적을 보면 비례적분 제어기와 피드포워드 제어기를 동시에 적용하였을 때 오차가 가장 적었으며, 모터 1~4 의 명령과 실제 모터가 작동한 각도의 오차 값을 Table 2 에서 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison error of application controller

Division	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
P controller error	1.78 °	2.42 °	1.89 °	3.32 °
PI controller error	0.83 °	0.78 °	0.95 °	1.12 °
PI+Feedforward controller error	0.11 °	0.09 °	0.08 °	0.15 °

### 6. 결론

본 연구에서는 병렬 로봇의 단점인 협소한 작업영역을 극복하기 위해 여유구동을 적용한 6-bar 병렬 로봇을 제안하였다. 3D Cad 로 설계 후 동역학 해석을 통한 설계 검증을 바탕으로 실제 기구를 제작하였다. 기구의 링크와 모터의 최적으로 배치함으로써 충돌 및 간섭을 줄여 병렬 로봇임에도 불구하고 직렬 로봇과 흡사한 작업 영역을 확보할 수 있었다. 또한 6-bar 병렬 로봇의 위치 및 각도 제어 실험을 통해 작업 툴이 장착될 끝단에 정밀한 제어가 가능성을 확인하였다. 역기구학 수식을 통해 산출된 지령값을 실제 모터가 잘 추종하여 오차값을 줄이기 위해 PI 제어기와 feedforward 제어기를 적용하였으며, PI 제어기만 적용하였을 때 보다 2 개의 제어기를 같이 적용하였을 때 모터의 실제 추종 오차 값이 줄어들어 로봇 끝단에 정밀 제어가 가능하였다.

실제 제어실험에서 적용된 제어기의 최적의 게인값을 설정하는 부분에서 많은 시행 착오를 겪었다. 시스템에 적합한 제어기를 설계를 위해서는 6-

bar 병렬 로봇의 시스템 규명(system Identification) 통한 제어기를 설계한다면 게인값 설정을 위한 시간 단축 및 보다 정밀한 제어가 가능할 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 안전방재용 IT 융합 지능형로봇산업화 기반구축 사업의 지원으로 수행된 연구임.

### 참고문헌

1. Nakamura, Y. and Ghodoussi, M., "Dynamic Computation of Closed-Link Robot Mechanisms with Nonredundant and Redundant Actuators," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 5, No. 3, pp. 294-302, 1989.
2. Kumar, V. and Gardner, J. F., "Kinematic of Redundantly Actuated Closed Chains," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 6, No. 2, pp. 269-273, 1990.
3. Lee, S. M., Lee, J. W. and Shim, H. S., "Torque Distribution Control of 3RRR Parallel Robot," Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 72-79, 2008.
4. Bicchi, A. and Prattichizzo, D., "Manipulability of Cooperating Robots with Unactuated Joints and Closed-Chain Mechanisms," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 16, No. 4, pp. 336-345, 2000.
5. Park, J., Chung, W. and Youm, Y., "Weighted Decomposition of Kinematics and Dynamics of Kinematically Redundant Manipulator," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 480-486, 1996.
6. Ropponen, T. and Nakamura, T., "Singularity-free parameterization and performance analysis of actuation redundancy," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 806-811, 1990.
7. Kim, B. S., Kim, J. D., Cho, C. S., Kim, K. H. and Park, K. J., "A study on redundantly actuated 6-bar parallel robot," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 351-352, 2011.