

# 스트리트 플랫폼 구조를 구속하여 얻어지는 병진형 3 자유도 병렬 메커니즘의 정위치 해석해와 기구학 해석 및 구현

## A Forward Closed-Form Position Solution, Kinematic Analysis And Implementation of a Translational 3-DOF Parallel Mechanism Formed by Constraining a Stewart Platform Structure

신 동 민, 김 희 국\*, 정 재 현, 오 세 민, 이 병 주  
(Dong-Min Shin, Whee-Kuk Kim, Jae-Heon Chung, Se-Min Oh, and Byung-Ju Yi)

**Abstract :** In this study, a translational 3-DOF parallel mechanism formed by constraining the Stewart Platform Mechanism is investigated. The translational 3-DOF parallel mechanism has three struts(3-UPS type serial subchains) and in addition, has a PPP type serial subchain in the middle of the mechanism. Firstly, the closed-form forward and reverse position solutions are derived for this mechanism. And analysis on kinematic characteristics using isotropic index of the Jacobian is conducted to examine effects of design parameters for the mechanism. Lastly, a prototype mechanism is implemented and the kinematic performance of the translational 3-DOF parallel mechanism was verified through experimental work.

**Keywords :** closed-form position solution, kinematic analysis, parallel mechanism, stewart platform

### I 서론

병렬 메커니즘은 높은 정밀도와 강성, 그리고 무거운 액츄에이터들을 지면에 가까이 설치할 수 있는 장점 등으로 인하여 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 병렬 메커니즘의 활용사례는 매우 다양하지만 대표적인 병렬 메커니즘으로서 문헌에 자주 언급되는 6 자유도를 가지는 스트리트 플랫폼 메커니즘의 경우만 하더라도 처음 소개된 이래로 비행기 시뮬레이터, 초정밀용 마이크로 매니퓰레이터, 척추 수술형 또는 뇌수술용 로봇 등과 같은 높은 하중이 요구되거나 높은 정밀도가 요구되는 작업에 매우 효과적으로 활용되고 있으며 아직까지도 그 활용범위가 점차 넓혀지고 있는 상황이다[1-8].

그러나, 병렬 메커니즘은 본질적으로 직렬 체인을 구속하는 구조를 갖게 되므로 기구학 및 동역학 해석은 직렬형 메커니즘에 비하여 상대적으로 매우 복잡하게 되는 단점이 있다. 특히, 정위치 해석해가 알려져 있지 않은 병렬 메커니즘의 경우 수치 해석해에 의존하거나 여분의 센서를 배치하여 해를 구하는 방법이 시도되고 있으나[9-14] 특이형상 부근에서의 비선형성은 이러한 방법들로부터 얻어지는 해들에 대한 신뢰성을 저하시킬 뿐 만 아니라 전체 시스템의 정밀도를 저하시키게 되어 이에 대한 개선이 요구되고

있다. 따라서, 이러한 단점을 극복하고 병렬 메커니즘이 가지고 있는 여러 우수한 특성을 최대한 활용할 수 있기 위해서 정위치 해석해를 가지는 새로운 병렬 메커니즘의 구현에 관련된 많은 연구시도 및 결과가 제시되고 있다 [15-17,21-24].

최근에는 6자유도 병렬 메커니즘에 국한되지 않고 3, 4, 5 자유도를 가지는 다양한 구조 및 형태의 병렬 메커니즘의 설계 및 해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [3-5,16-20]. Lee 등은[3] RPS 체인 구조를 가지는 공간형 3 자유도 병렬 메커니즘을, Tsai 등은 UPU 체인 구조를 가지는 공간형 3 자유도 병렬 메커니즘[4]과 평형사변형 four-bar 루프를 활용하는 병진형 3 자유도 메커니즘을 제시하였다[16]. 이러한 연구에 이어 Joshi와 Tsai는 세 개의 부속 체인과 하나의 추가 지지체인을 가지는 3 자유도 메커니즘과 [17]을 제시하였다. 이 밖에 세 개의 PS 형태의 직렬체인을 활용한 공간형 3 자유도 메커니즘[18]과 메커니즘의 중앙부분에 하나의 직렬 부속지지체인을 부착한 다양한 3, 4 자유도 메커니즘들이 다수의 연구자들에 의해 제시되었다[5]. 또한, Yi 등은 Tsai 등[4]이 활용한 four-bar 구조의 지역 관절을 가지는 네 개의 직렬체인을 이용하여 다양한 모양의 물체를 파지할 수 있을 뿐 만 아니라 xyz 방향으로의 병진 운동을 가지는 4 자유도 파지 메커니즘을 제시하였다[19]. 그러나 이러한 메커니즘들의 경우 대부분 정위치 해석해와 역위치 해석해가 동시에 존재하지 않는 단점이 존재한다.

최근에 Kim 등은 스트리트 플랫폼 구조와 유사한 구조로서 중앙에 PRR 형태의 직렬부속체인과 하판과 상판위에 서로 90° 간격으로 설치된 두 개의 UPS 형태의 다리(strut)로 구성되는 메커니즘으로서 출력으로서는 1 자유도의 병진운동과 2 자유도의 회전운동을 가지는 공간형 3 자

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 6. 12., 채택확정 : 2006. 8. 16.

신동민 : 고려대 제어계측공학과 대학원(kucira\_98dm@hanmail.net)

김희국 : 고려대 제어계측공학과(wheekuk@korea.ac.kr)

정재현, 오세민 : 한양대 전자컴퓨터공학부 대학원

(mudung@empal.com/xerom\_7@hanmail.net)

이병주 : 한양대 전자컴퓨터공학부(bj@hanyang.ac.kr)

※ 이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-202-D00171).

유도 메커니즘을 제시하고 이에 대한 정위치해석 및 기구학 해석을 수행하였다[20]. 이러한 연구에 이어 본 연구에서는 세 개의 UPS 다리를 가지고 있으며 추가로 메커니즘의 중앙부분에 PPP 직렬부속체인이 부착되어 상판의 회전 운동을 구속하는 구조를 가지고 있는 스트위트 플랫폼의 구조를 구속하여 얻어지는 병진형 3 자유도 메커니즘의 역위치 해석을 수행하고 정위치 해석해를 제시한다. 그리고 메커니즘의 기구학 해석과 기구학 등방성 지수를 활용한 기구학 특성 분석을 수행한다. 끝으로 스트위트 플랫폼 메커니즘을 구속하여 얻어지는, 다양한 형태의 3 자유도 기능을 나타낼 수 있도록 메커니즘의 중앙에 추가로 부착된 직렬 부속체인을 수동으로 구속할 수 있는 구조를 가지는 메커니즘을 제작하고 메커니즘의 성능을 조사하기 위한 기초적인 성능실험을 수행하였다.

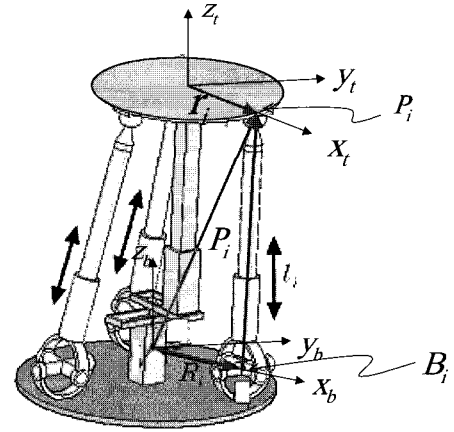


그림 1. 병진형 3 자유도 병렬 메커니즘.  
Fig. 1. A Translational 3-Dof parallel mechanism.

II. 위치해석

1. 메커니즘의 구조

그림 1에 보인 바와 같이 메커니즘은 세 개의 UPS 직렬 부속체인과 메커니즘의 중앙에 위치한 하나의 추가적인 PPP 형태의 직렬 부속체인으로 구성된다. 메커니즘의 구동 관절인 세 개 미끄럼 관절 각각의 한 끝은 기저좌표계에 반경이 R인 원상에 대칭구조를 갖도록 120° 간격으로 고정된 RR 관절과 연결되어 있다. 그리고 각 미끄럼 구동관절의 다른 한끝은 상판에 반경이 r 인 원상위에 대칭구조를 갖도록 120° 간격으로 고정된 구형관절과 연결되어 있다. 이와 같은 메커니즘의 자유도는 이미 잘 알려진 Grubler's 모빌리티 공식으로부터 아래와 같이 3 자유도를 가지는 것을 확인할 수 있다:

$$M = d(l-1) - \sum_i c_i \tag{1}$$

$$= 6(10-1) - (3 \times 3 + 4 \times 3 + 6 \times 5) = 3$$

위 식에서 d는 메커니즘의 운동을 허용하는 모든 관절의 허용 운동공간의 크기로서 위 메커니즘의 경우는 6의 값을 가지며 l과 c<sub>i</sub>는 각각 지면을 포함한 메커니즘의 모든 링크의 수 그리고 i 번째 관절에 부가된 구속 조건의 수를 나타낸다.

하판의 중앙에 위치한 기저좌표계와 상판의 중앙에 놓인 상판좌표계를 각각 (x<sub>b</sub>, y<sub>b</sub>, z<sub>b</sub>)와 (x<sub>t</sub>, y<sub>t</sub>, z<sub>t</sub>)로서 표기한다. 그리고 하판에 고정된 기저좌표계의 원점으로부터 i 번째( for i=1,2,3) 직렬부속체인의 RR 관절의 중심까지의 위치벡터를 R<sub>i</sub>로 표기한다. 위치벡터 R<sub>i</sub>는 고정된 값으로 다음과 같이 표현된다.

$$R_i = (R_{ix}, R_{iy}, R_{iz})^T \tag{2}$$

$$= (R \cos(\gamma_{bi}^b), R \sin(\gamma_{bi}^b), 0)^T$$

위 식에서 γ<sub>bi</sub><sup>b</sup>는 z<sub>b</sub> 축에 대한 x<sub>b</sub> 와 R<sub>i</sub> 사이의 오프셋 각을 나타낸다. 그리고 그림 1에서와 같이 기저좌표계의 원점으로부터 i 번째 직렬부속체인의 구형관절까지의 위치벡터를 P<sub>i</sub>(i=1,2,3)로 표기한다. 이때, 상판의 중앙에

위치한 출력좌표계의 원점으로부터 구형 관절이 위치한 점 P<sub>i</sub>까지의 지역위치벡터 r<sup>(i)</sup>(i=1,2,3) 또한 고정된 값으로 아래와 같이 표현된다.

$$r_i^{(i)} = (r_{ix}^{(i)}, r_{iy}^{(i)}, r_{iz}^{(i)})^T \tag{3}$$

$$= (r \cos(\gamma_{ii}^t), r \sin(\gamma_{ii}^t), 0)^T$$

여기서 γ<sub>ii</sub><sup>t</sup>는 z<sub>t</sub> 축에 대한 x<sub>t</sub> 와 r<sub>i</sub> 사이의 오프셋 각을 나타낸다. 그리고 그림 1에서 보인 바와 같이 점 B<sub>i</sub>에서 점 P<sub>i</sub>까지의 위치벡터를 l<sub>i</sub>로 표기한다. l<sub>i</sub>는 i 번째 직렬부속체인의 미끄럼관절변수로서 그 크기를 나타낸다.

메커니즘의 출력위치는 출력좌표계의 원점과 일치하며 P=(x, y, z)<sup>T</sup>로 나타낸다. 한편, 본 논문에서 다루는 병진형 3 자유도 메커니즘의 구조는 6 자유도를 가지는 스트위트 플랫폼 메커니즘을 구속하여 얻어지는 구조를 가지고 있으며 스트위트 메커니즘의 출력이 임의의 방위각을 가지는 형태에서도 병진형 3 자유도를 가지게 될 수 있으므로 이를 표현하기 위해 메커니즘의 출력 방위를 아래와 같이 정의한다. 병진형 3 자유도 메커니즘의 출력방위행렬은 xyz 오일러 각 셀을 이용하여 표기하며 이에 대한 방향 코사인 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[R_b^t] = [Rot(x, \alpha)][Rot(y, \beta)][Rot(z, \gamma)] \tag{4}$$

$$= \begin{bmatrix} C_\beta C_\gamma & -C_\beta S_\gamma & S_\beta \\ S_\alpha S_\beta C_\gamma & -S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma & -S_\alpha C_\beta \\ -C_\alpha S_\beta C_\gamma & C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma & C_\alpha C_\beta \end{bmatrix}$$

2. 메커니즘의 역위치 해석

기저좌표계의 원점으로부터 출력좌표계의 원점까지의 위치벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$P = R_i + l_i \gamma_i - r_i \text{ for } i=1,2,3. \tag{5}$$

여기서 r<sub>i</sub>는 r<sup>(i)</sup>와 [R<sub>b</sub><sup>t</sup>]가 알려진 경우 아래와 같은 관계를 가진다.

$$r_i = (r_{ix}, r_{iy}, r_{iz})^T = [R_b^t] r_i^{(t)} \quad (6)$$

본 논문에서는  $[R_b^t]$ 가 고정된 형상에서의 병진형 3 자유도를 가지는 메커니즘에 대한 위치해석을 수행하게 되므로

$r_i$ 는 알려진 값이 된다.

(5)를 아래와 같이 정리한 후

$$l_i \gamma_i = P - R_i + r_i \quad (7)$$

양변에 대해 각각의 내적을 취하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$l_i \gamma_i \cdot l_i \gamma_i = l_i^2 = (P - R_i + r_i)^T (P - R_i + r_i) \\ = P^T P + R_i^T R_i + r_i^T r_i - 2R_i^T P - 2R_i^T r_i + 2P^T r_i \quad (8)$$

여기서

$$R_i^T R_i = R_i^2, \\ P^T P = x^2 + y^2 + z^2, \\ r_i^T r_i = r_i^2, \\ R_i^T P = R_{ix}x + R_{iy}y + R_{iz}z, \\ R_i^T r_i = R_{ix}r_{ix} + R_{iy}r_{iy} + R_{iz}r_{iz} \\ P^T r_i = xr_{ix} + yr_{iy} + zr_{iz}. \quad (9)$$

위 식을 단순화하면 다음과 같은 역위치 해석을 위한 관계식이 얻어진다.

$$l_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + R_i^2 + r_i^2 - 2(R_{ix} - r_{ix})x \\ - 2(R_{iy} - r_{iy})y - 2(R_{iz} - r_{iz})z \\ - 2(R_{ix}r_{ix} + R_{iy}r_{iy} + R_{iz}r_{iz}) \quad (10)$$

위 식으로부터 출력위치벡터  $P=(x, y, z)^T$ 가 주어지면 미끄럼 관절에서의 변위 값이 구해진다. 실제로 (10)으로부터 스트리트 메커니즘의 여섯 개의 출력공간중 임의의 3개의 공간을 구속하여 얻어지는 모든 3 자유도 메커니즘에 대한 역관계식이 구해짐을 쉽게 확인할 수 있다.

### 3. 메커니즘의 정위치 해석

세 개의 구동 미끄럼 관절변위가 주어졌을 때 플랫폼의 출력위치가 얻어질 수 있으며 그 과정은 다음과 같다. (10)을 플랫폼의 출력 좌표 변수에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$x^2 + y^2 + z^2 + r_1^2 - l_1^2 - A_1x - B_1y - C_1z - D_1 = 0 \quad (11)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 + r_2^2 - l_2^2 - A_2x - B_2y - C_2z - D_2 = 0 \quad (12)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 + r_3^2 - l_3^2 - A_3x - B_3y - C_3z - D_3 = 0 \quad (13)$$

여기서 각  $i=1, 2, 3$ 에 대하여

$$A_i = 2(R_{ix} - r_{ix}), \\ B_i = 2(R_{iy} - r_{iy}), \\ C_i = 2(R_{iz} - r_{iz}), \\ D_i = 2(R_{ix}r_{ix} + R_{iy}r_{iy} + R_{iz}r_{iz}). \quad (14)$$

(11)에서 (12)와 (13)을 뺀 후 정리하면

$$r_1^2 - r_2^2 - (l_1^2 - l_2^2) + (D_2 - D_1) \\ = (A_1 - A_2)x + (B_1 - B_2)y + (C_1 - C_2)z \quad (15)$$

$$r_1^2 - r_3^2 - (l_1^2 - l_3^2) + (D_3 - D_1) \\ = (A_1 - A_3)x + (B_1 - B_3)y + (C_1 - C_3)z \quad (16)$$

와 같이 얻어지며 이를 다시 정리하면

$$A_{12}x + B_{12}y + C_{12}z = E_{12} \quad (17)$$

$$A_{13}x + B_{13}y + C_{13}z = E_{13} \quad (18)$$

와 같이 얻어진다. 여기서

$$E_{1i} = r_1^2 - r_i^2 - (l_1^2 - l_i^2) + (D_i - D_1) \quad (19)$$

$$A_{1i} = (A_1 - A_i) \quad (20)$$

$$B_{1i} = (B_1 - B_i) \quad (21)$$

$$C_{1i} = (C_1 - C_i), \quad i=2, 3. \quad (22)$$

위 식으로부터  $x$ 와  $y$ 는  $z$ 의 함수로서 Cramer's rule에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$x = \frac{(B_{12}C_{13} - B_{13}C_{12})z + B_{13}E_{12} - B_{12}E_{13}}{A_{12}B_{13} - A_{13}B_{12}}, \quad (23)$$

$$y = \frac{(A_{13}C_{12} - A_{12}C_{13})z + A_{12}E_{13} - A_{13}E_{12}}{A_{12}B_{13} - A_{13}B_{12}}. \quad (24)$$

위 식을 (11) 또는 (12) 또는 (13)에 대입하여 정리하면 아래와 같은  $z$ 에 관한 2차식을 얻을 수 있다.

$$az^2 + bz + c = 0 \quad (25)$$

이 식으로부터 얻어진  $z$ 값을 (23)과 (24)에 대입함으로써  $x$ 와  $y$ 값이 구해진다.

## III. 기구학 해석

### 1. 일차기구학 모델링

(10)을 시간에 관해 바로 미분한 후 입력변수벡터  $l=(l_1, l_2, l_3)^T$ 와 출력 변수벡터  $u=(x, y, z)^T$ 에 관해 정리하면 다음과 같은 입출력 속도 관계식이 얻어진다.

$$\dot{l} = [G_u^t] \dot{u}, \quad (26)$$

여기서

$$[G_u^t] = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, 3, \quad (27)$$

$$g_{i1} = \frac{\partial l_i}{\partial x} = \frac{x - (R_{ix} - r_{ix})}{l_i}, \quad (28)$$

$$g_{i2} = \frac{\partial l_i}{\partial y} = \frac{y - (R_{iy} - r_{iy})}{l_i}, \quad (29)$$

$$g_{i3} = \frac{\partial l_i}{\partial z} = \frac{z - (R_{iz} - r_{iz})}{l_i}. \quad (30)$$

행렬  $[G_u^t]$ 이 특이하지 않은 경우 입출력 변수사이의 정속도 관계식은 다음과 같이 위 식의 역행렬을 이용하여 얻어진다.

$$\dot{u} = [G_u^i] \cdot l, \tag{31}$$

여기서

$$[G_u^i] = [G_u^i]^{-1}. \tag{32}$$

한편, (27)-(30)으로부터 메커니즘의 특이형상은 어떤 하나의 구동입력변수의 값이 0 ( $l_i=0, i=1,2,3$ )이거나 모든  $i=1,2,3$  값에 대해  $R_{ix}-r_{ix}, R_{iy}-r_{iy}, R_{iz}-r_{iz}$ 인 세 개의 항들 중에 두 개 이상의 항들의 값들이 모두 같을 경우에(즉,  $R_{ix}-r_{ix}=R_{iy}-r_{iy}$ ) 존재하는 것은 쉽게 확인할 수 있다. 이러한 특이형상은 두 개 이상의 미끄럼 관절축이 평행을 이루는 형상으로서 특히,  $R_{ix}-r_{ix}=R_{iy}-r_{iy}=0$ 인 경우는 세 개의 구동 미끄럼 관절축이 모두 평행하여  $z$  방향 모션만 생성하게 되어, 두 방향으로의 자유도를 상실하게 됨을 쉽게 알 수 있다.

2. 일차기구학 특성 지수

본 절에서는 메커니즘의 작업공간의 크기와 일차 기구학 특성에 관한 분석을 수행한다. 기구학 특성 분석 방법으로는 다음과 같이 정의되는 기구학 등방성지수를 활용한다.

$$\sigma_{KI} = \frac{\sigma_{\min}([G_u^i])}{\sigma_{\max}([G_u^i])}, \tag{33}$$

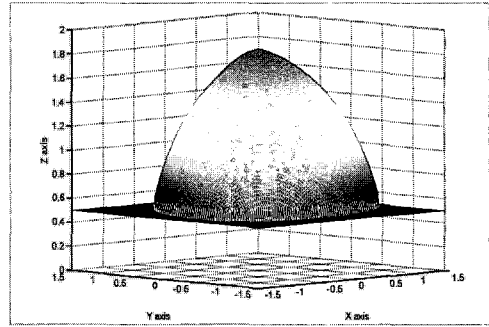
여기서  $\sigma_{\min}([G_u^i])$ 와  $\sigma_{\max}([G_u^i])$ 은 각각 행렬  $[G_u^i]$ 의 최소 특이값과 최대 특이값을 나타낸다. 이들 지수는 메커니즘의 형상에서 모든 방향으로의 입출력 속도간의 전달비의 균일도를 나타낸다. 특히, 이 지수 값의 범위는 정의에 따라 0에서 단위크기 값 사이로 제한되며 0값에 가까워짐에 따라 메커니즘은 특이형상에 근접함을 의미하며 역으로 단위 값을 가지는 경우는 모든 방향으로 입출력 속도 전달비가 균일하다는 특성을 의미한다.

3. 일차기구학 특성 분석

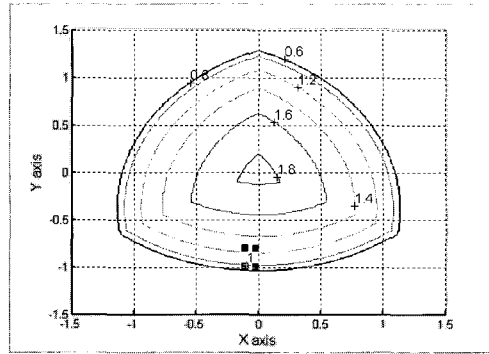
다음의 모의실험에서는 앞에서와 마찬가지로 해석의 편의상 메커니즘의 RRPS 인 관절을 가지는 세 개의 직렬부속체인이 대칭으로 배치되었다고 가정한다. 그리고 하판에 고정된 RR 관절은 단위 값을 가지는 반경  $R=1$ 인 원상에  $120^\circ$  간격으로 위치하며 미끄럼 관절의 변위는  $0.5 \leq l_i \leq 2.0$ 로 제한된다고 가정한다. 이 경우, 하판과 상판과 관련된 오프셋 각은 각각 다음과 같은 값을 가진다.

$$\begin{aligned} \gamma_{bi}^b &= (i-1) \times 120^\circ, \quad \text{for } i=1,2,3, \\ \gamma_{hi}^t &= (i-1) \times 120^\circ \quad \text{for } i=1,2,3. \end{aligned} \tag{34}$$

하판의 반경에 대한 상판의 반경비(즉, 하판 좌표계의 원점으로부터 하판에 위치한 RR 관절중심까지의 거리 대 상판좌표계의 원점으로부터 상판에 위치한 구형관절 중심까지의 거리비)를 변화할 때 메커니즘의 작업공간내에서의 기구학 특성에 대한 영향을 조사하였다. 그림 2(a)는 상판의 반경  $r$ 이 0.25일 때 메커니즘의 작업공간을 나타내는 3차원 그림이며 그림 2(b)는  $z_{\max}$ 에 대한  $(x,y)$  평면에서의 등고선도를 나타낸다. 여기서  $z_{\max}$ 는 주어진 각  $x, y$  위치



(a) Boundary of 3-D workspace for z-max(top) and z-min (bottom)



(b) Contour plot for z-max

그림 2. 작업공간의 3차원 그림 및 등고선도.

Fig. 2. Workspace 3-D plot and contour plot.

에서 도달할 수 있는 최대의  $z$  값을 나타낸다. 그림에서 나타난 작업공간의 크기 및 형태는 뒤 따르는 모의실험에서의 다양한  $r$  값들에 대한 메커니즘의 개략적인 작업공간의 형태 및 크기를 대표할 수 있음을 유의하자.

등고선 선도의 경우 최대 두 개 변수들에 대한 특성을 효과적으로 나타낼 수 있으므로 적절한 간격의  $z$  값 ( $=0.5, 1.0, 1.5$ )을 가지는  $(x, y)$  평면상의 작업공간에서의 기구학적 특성을 조사하였다. 그림 2는 상판의 반경이  $r=0.25$ 일 때 메커니즘이 가질 수 있는 작업공간의 크기를 3차원 그림 및 등고선 선도로 나타낸 그림이다. 이 그림에서는 메커니즘의 작업공간 크기를 나타내는 데 있어 설계과정에서 요구되는 충분한 작업공간의 크기에 대한 정보를 얻을 수 있도록 기구학 등방성 지수의 값이 0.01보다 적은 값을 작업공간의 경계로 나타내었다. 필요에 따라 이러한 등방성지수의 크기를 조절함으로써 더 세밀한 작업공간의 경계를 확인할 수 있다. 이들 그림은 주어진  $x-y$  평면상에서  $z$  축 방향으로 어떠한 크기의 작업공간을 가지는 지에 대한 정보를 각각  $z=z_{\min}$ 일 때 그리고  $z=z_{\max}$ 일 때를 3 차원 그림 및 등고선 선도로 나타낸 것이며 이 그림으로부터 병진형 3 자유도 메커니즘은 상당한 크기의 작업공간을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 3은  $r=0.25$ 이고  $z$ 가 각각 0.5, 1.0, 1.5인 값을 가지는 경우에, 그림 4는  $r=0.5$  이고  $z$ 가 각각 0.5, 1.0, 1.5인 값을 가지는 경우에, 그리고 그림 5는  $r=0.75$ 이고

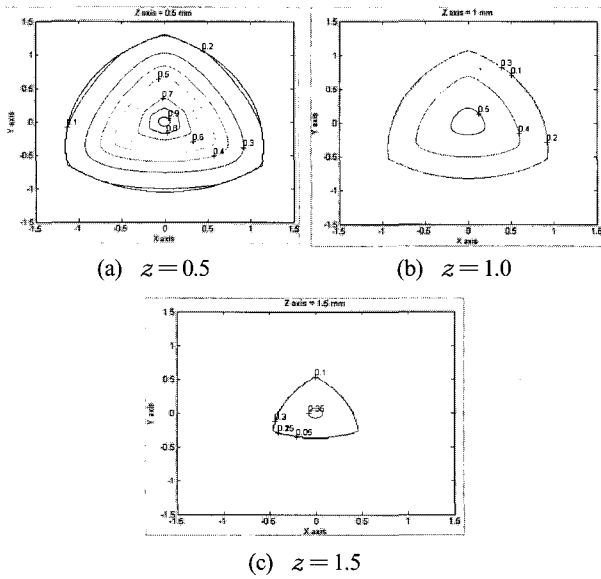


그림 3.  $r=0.25$ 일 때의 등고선도.

Fig. 3. Contour plots when  $r=0.25$ .

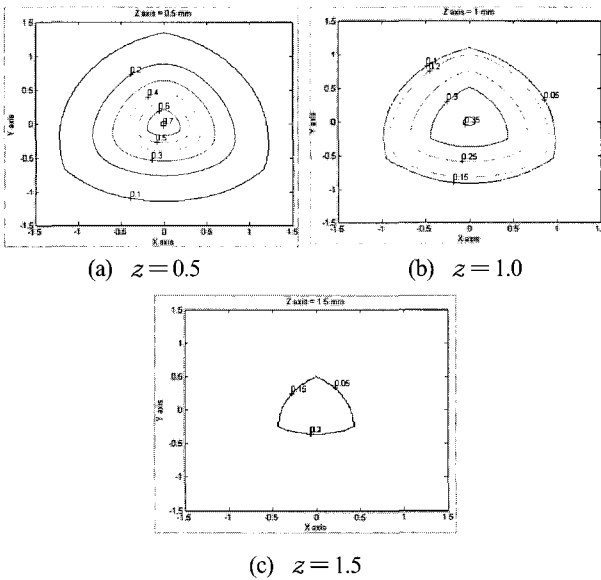


그림 4.  $r=0.5$ 일 때의 등고선도.

Fig. 4. Contour plots when  $r=0.5$ .

$z$ 가 각각 0.5, 1.0, 1.5인 값을 가지는 경우에 ( $x-y$ ) 평면상의 기구학 등방성 지수 등고선 그림들을 나타내고 있다. 또한, 이상과 유사한 모의실험 결과들로부터 다양한 미끄럼 관절의 이동범위와 다양한 하판과 상판의 반경비에 따른 메커니즘의 개략적인 작업공간의 크기는 물론 기구학적 등방성 특성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 한편, 본 모의실험을 통하여 병진형 3 자유도 메커니즘의 경우 기구학적 등방성지수의 최대값은 항상 메커니즘의 중앙에 위치하며 따라서,  $r=0.25$ 인 경우의 개략적인 작업공간의 형태와 크기를 나타내는 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이  $z=1.0$ 부근이 작업공간의 중심에 위치하도록 메커니즘의 설계인자

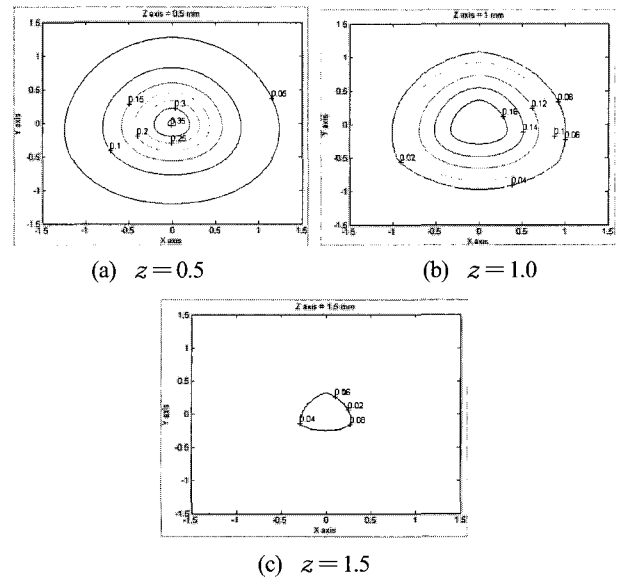


그림 5.  $r=0.75$ 일 때의 등고선도.

Fig. 5. Contour plots when  $r=0.75$ .

를 설정하는 경우 상대적으로 큰 메커니즘의 작업공간을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

#### IV. 메커니즘 제작 및 기초성능실험

##### 1. 메커니즘 설계

메커니즘을 제작하는 데 있어 주 목적은 스트럿 구조를 구축하여 얻어지는 다양한 3 자유도 메커니즘들을 시험할 수 있는 시험대(tedbed)를 구현하는 것이었다. 그림 6은 실제 제작된 메커니즘으로서 그림 7은 이러한 메커니즘의 측면도, 정면도, 평면도 그리고 strut의 상세 설계도를 보여주고 있다. 메커니즘의 제작 목적에 맞추어 메커니즘의 중앙에 위치한 6자유도 수동 관절인 PPPRRR을 제작함에 있어 각 미끄럼 관절은 물론 구형(ball & socket)관절 대신 회전관절과 김벌(Gimbals)이 연결된 구조를 이용하여 항시 각각의 관절을 수동으로 잠글 수 있도록 하여 항시 임의의

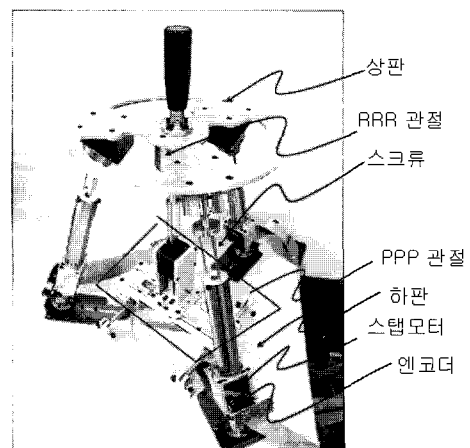
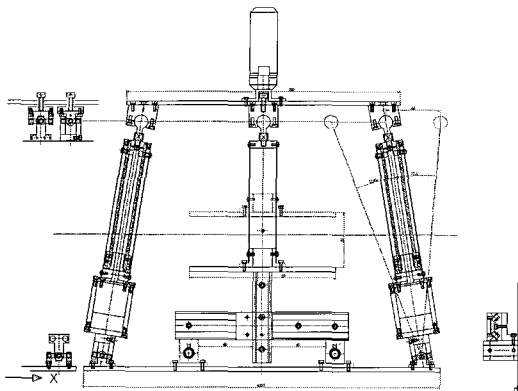
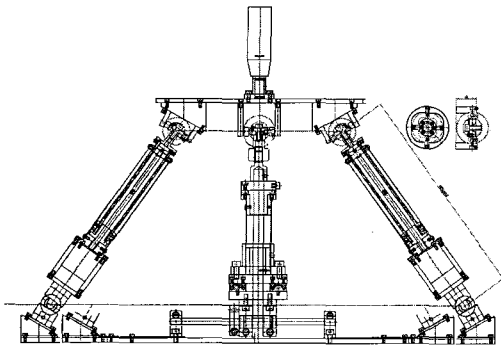


그림 6. 제작된 메커니즘.

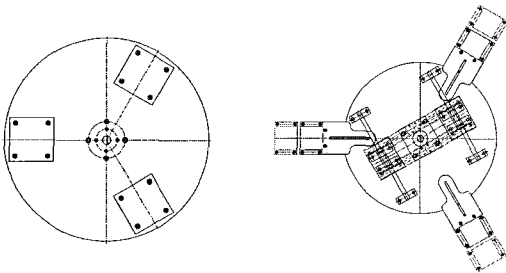
Fig. 6. Implemented mechanism.



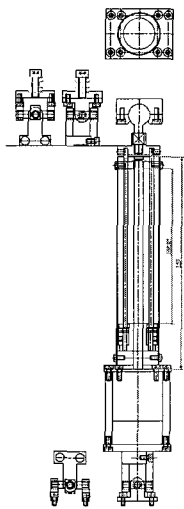
(a) Side view



(b) Front view of the mechanism



(c) Top view of the upper and the lower plates



(d) A size view of a strut

그림 7. 메커니즘의 설계도면.

Fig. 7. Design drawing of the mechanism.

표 1. 메커니즘의 하드웨어 사양.

Table 1. Specifications of mechanism hardware.

Components	specifications/functions	
Mechanism hardware	upper plate radius	10cm
	lower plate radius (adjustable)	20 ~ 25cm
	total weight	20kg
	manual locks installed on every joint of the serial subchain	
three prismatic actuators	HSI linear stepping motor with 4.75mm lead screw	E35H4R-05 external linear actuator
	stroke length	10cm
	screw pitch	0.98cm
	travel step	0.0508mm
	power driver	bipolar chopper driver #40105
	encoder	size 14 E5 35000 1600 pulse/rev
Motor Controller	PCI 8136 driving board	stepper/encoder driver
Processor /Language	Pentium PC	Window XP /Visual C

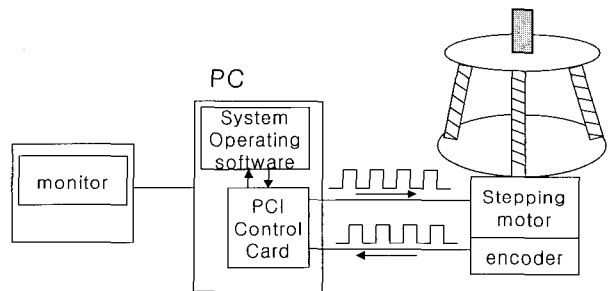


그림 8. 메커니즘의 인터페이스.

Fig. 8. Mechanism interface.

여러 형태의 출력 3 자유도를 가지는 메커니즘으로 활용될 수 있도록 하였다. 그리고 제작된 메커니즘 상판과 하판의 크기는 모터 및 제작의 편의를 고려하여 결정하였으며 상판의 실제 반경은 10cm로 고정한 반면 하판의 반경은 20cm와 25cm사이로 고정할 수 있도록 가변 구조로 제작되었다. 그림 6에서와 같이 미끄럼 구동 관절의 구동을 위해서는 나선형의 스크류가 연결된 HSI 사의 스텝모터가 활용되었으며 선형 구동 범위는 316.23mm에서 416.23mm로 100mm를 가지도록 제작되었다. 스텝모터의 구동을 위해 PCI 8136 제어보드가 활용되었으며 스텝모터에 엔코더를 부착하여 항상 스텝모터의 위치 정보를 활용할 수 있도록 하였다. 표 1은 제작된 메커니즘 및 사용된 구동액츄에이터에 관련된 사양을 나타낸다. 그림 8은 제작된 3 자유도 메커니즘의 제어와 관련된 인터페이스 그림이다.

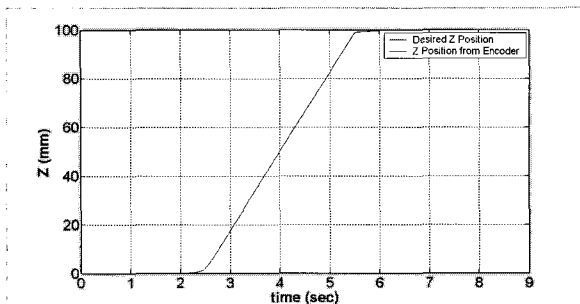
2. 메커니즘의 구동실험

제작된 메커니즘의 가운데 위치한 직렬 부속체인과 상판

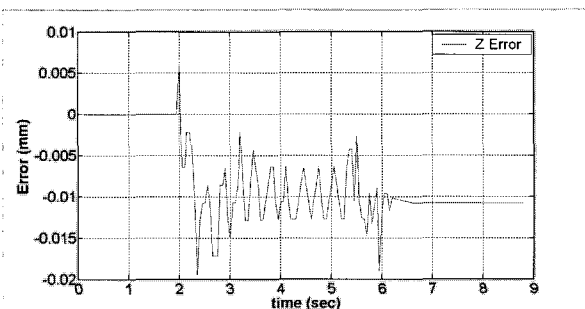
을 연결하는 구형 관절에 해당하는 RRR 관절을 앞에서 언급한 바와 같이 상판의 출력 방향코사인행렬이 기저좌표계와 일치하도록 잠금으로서 PPP 형태의 병진형 3 자유도 출력을 가지는 메커니즘으로 고정하여 실험을 수행하였다. 특히, 아래의 실험은 엔코더로부터의 feedback 정보를 활용하지 않은 개루프(open loop) 제어방식으로 수행되었다.

그림 9는 상판의 중앙점이  $x=0.0\text{cm}$ ,  $y=0.0\text{cm}$ ,  $z=0.0\text{cm}$ 의 위치에서  $x=0.0\text{cm}$ ,  $y=0.0\text{cm}$ ,  $z=10\text{cm}$ 인 위치로 이동하되 출발시간과 도착시간은 각각 2.0sec와 6.0sec이며 시종착지점부근에서는 관성의 영향을 최소화하기 위해 등가속 및 등감속되는 계획된 경로를 따라 이동하는 궤적을 보여주고 있다. Feedback 제어가 적용되지 않은 개루프(open loop) 구동 형태임에도 불구하고 그림에서와 같이 출발점에서 종착지점까지는 0.02mm를 크게 초과하지 않는 범위내의 오차를 보이며 궤적을 잘 추적하고 있는 것을 확인할 수 있다.

한편, 그림 10은 상판의 중앙점  $x=0.0\text{cm}$ ,  $y=0.0\text{cm}$ ,  $z=0.0\text{cm}$ 에 위치한  $x-y$  평면상의 반경이 3cm인 원의 궤적을 따라 이동하는 계획된 경로와 실제 메커니즘의 궤적을 나타내고 있다. 본 실험에서는 개루프 제어방식으로 인한 오차의 범위를 최소화 하기 위해 편이상 메커니즘을 비교적 낮은 속도(주기 60sec)로 이동하도록 하였는데 그림 10(b), (c)에서와 같이 메커니즘이 모든 경로에서 주어진 궤적을  $\pm 0.1\text{mm}$ 범위 내에서 추적하고 있음을 확인할 수 있었다. 마찬가지로, 이와 유사한 여러 실험을 통하여 메커니즘의 속도를 향상시킴에 따라 약간의 오차 범위가 증가됨을 확인하였으며 이는 엔코더 위치 정보를 활용한 제어 알고

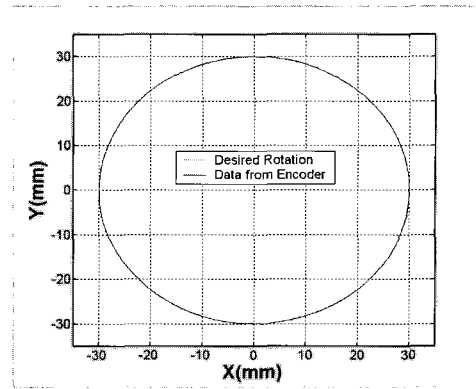


(a)

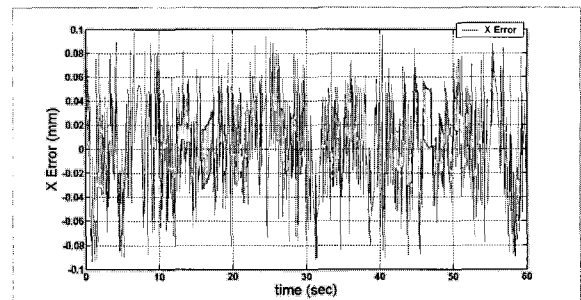


(b) trajectory error

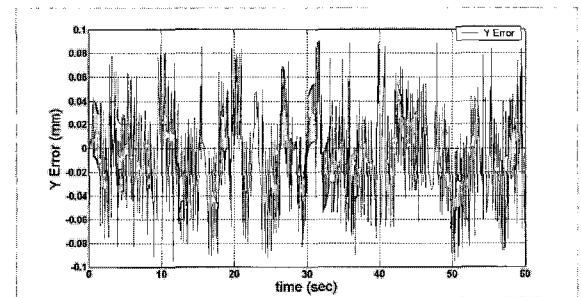
그림 9. 메커니즘의 직선경로추적 실험.  
Fig. 9. Line trajectory following experiment of the mechanism.



(a) trajectory on the x-y plane



(b) trajectory error in x



(c) trajectory error in y

그림 10. 원경로추적 실험.

Fig. 10. Circle trajectory following experiment.

리즘을 적용함으로써 최소화할 수 있을 것이다. 이상에서와 같이 본 실험을 통하여 제작된 메커니즘은 병진형 3 자유도 메커니즘으로서 뿐 만 아니라 향후 다양한 출력 3 자유도 메커니즘의 운동을 실험할 수 있는 메커니즘으로서의 충분한 기능을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

### V. 결론

본 논문에서는 스트리트 플랫폼 메커니즘의 출력운동을 구속할 수 있는 직렬부속체인을 부착하여 얻어지는 병진형 3 자유도 메커니즘의 구조에 관하여 기술한 후, 메커니즘의 정위치 해석해와 역위치 해석해를 제시하였으며 기구학 등 방성지수를 활용하여 메커니즘의 일차 기구학 특성분석을 수행하였다. 이러한 연구를 통하여 병진형 3 자유도의 경우 정위치 해석해는 물론 역위치 해석해를 가지며 충분한 크기의 작업공간과 우수한 기구학 등방성 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

특히, 제작된 메커니즘은 메커니즘의 중앙에 위치한 6자유도 수동 관절이 부착되어 있어 필요시 수동으로 임의의 세 관절을 잠글 수 있도록 잠금장치가 되어 세 개의 미끄럼 관절을 이용하여 모든 6 자유도의 형상에 도달할 수 있도록 구조로 제작되었다. 그리고 제작된 메커니즘을 병진행 3 자유도 메커니즘으로 선풍한 후 경로추적실험을 수행함으로써 다양한 3-자유도 메커니즘의 시험대로서 충분한 성능을 보유하고 있음을 확인하였다.

현재 이러한 여섯 개의 수동 관절에 자동 제동장치를 설치하여 잠금과 풀음을 제어함으로써 세 개의 미끄럼 구동관절로서 임의의 3 자유도 공간을 순차적으로 제어함으로써 3 자유도 메커니즘은 특성을 유지함은 물론 6자유도 공간의 임의의 형상에 도달할 수 있는 메커니즘의 해석 및 소프트웨어 구성에 관련된 연구를 진행하고 있다.

#### 참고문헌

- [1] D. Stewart, "A platform with six degree of freedom," *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering*, vol. 180, Part 1, no. 15, pp. 371-386, 1965.
- [2] W. K. Kim, K. K. Huh and B.-J. Yi, "Kinematic/Dynamic optimal design of a Stewart platform mechanism," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 45-52, March, 1996.
- [3] K. M. Lee and D. K. Shah, "Dynamic analysis of a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulator," *IEEE Trans. on Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 3, pp. 361-367, June 1988.
- [4] L. W. Tsai, "Robot analysis : the mechanics of serial and parallel manipulators," *John Wiley & Sons Inc.*, 1999.
- [5] J. P. Merlet, "Parallel robots," *Kluwer Academic Publishers*, 2000.
- [6] M. Shoham, M. Burman, E. Zehavi, L. Joskowicz, E. Bathilin, and Y. Kunicher, "Bone-mounted miniature robot for surgical procedures: Concept and clinical applications," *transaction on robotics and automation*, vol. 19, no. 5, Oct. 2003.
- [7] J. H. Chung, S. Y. Ko, D. S. Kwon, J. J. Lee, Y. S. Yoon, and C. H. Won, "Robot-assisted femoral stem implantation using an intramedullar gauge," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, pp. 885-892, 2003.
- [8] J. S. Kim and J. W. Kim, "Eclipse : A new parallel mechanism platform," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol 18, no. 7, 2001, pp. 19-26.
- [9] J. P. Merlet, "Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensors data," in *Proc. of IEEE Int'l Conf. on robotics and automation*, vol. 1, pp. 200-204, 1993.
- [10] V. Parenti-Castelli and R. Di Gregorio, "A new algorithm based on two extra-sensors for real-time computation of the actual configuration of the generalized Stewart-Gough manipulator," *ASME Journal of Mech. Des.*, vol. 122, no. 3, pp. 249-256, 2000.
- [11] I. A. Bonev, J. Ryu, S. G. Kim, and S. K. Lee, "A closed-form solution to the direct kinematics of nearly general parallel manipulators with optimally located three linear extra sensors," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 2, pp. 148-156, 2001.
- [12] M. L. Husty, "An algorithm for solving the direct kinematics of a general Stewart-Gough platforms," *Mech. Mach. Theory*, vol. 31, no. 4, pp. 89-95, 1995.
- [13] C. S. Yee and K. B. Lim, "Forward kinematics solution of Stewart platform using neural networks," *Neurocomputing*, vol. 16, no. 4, pp. 333-349, 1997.
- [14] J. P. Merlet, "Solving the forward kinematics of a Gough-type parallel manipulator with interval analysis," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 3, pp. 221-235, 2004.
- [15] W. K. Kim, Y. K. Byun, and H. S. Cho, "Closed-form solution of forward position analysis for a 6-DOF 3-PPSP parallel mechanism and its implementation," *International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 1, pp. 85-99, Jan. 2001.
- [16] L.-W. Tsai, G. C. Walsh, and R. E. Stamper, "Kinematics of a novel three DOF translational platform," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3446-3451, 1996.
- [17] S. Joshi and L.-W. Tsai, "A comparison study of two 3-DOF parallel manipulators: One with three and the other with four supporting legs," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3690-3697, 2002.
- [18] W. K. Kim, J. Y. Lee, and B.-J. Yi, "Analysis on kinematic characteristics of two types of 3 degree-of-freedom parallel manipulators," *Proc. of Robotics. System & Automation Conf.*, Korea, April 1996.
- [19] 이석희, 이정현, 김희국, 이병주, "스튜워트 플랫폼 구조를 이용한 공간형 3자유도 병렬 메커니즘의 기구학 특성 분석," *한국정밀공학회 논문집*, vol. 22, no. 8, pp. 118-127, 2005.
- [20] D. Yi, B.-J. Yi, and W. K. Kim, "Design of a new grasper mechanism having XYZ translational motions," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 690-695, 2003.
- [21] C. Zhang and S. M. Song, "Forward position analysis of nearly general Stewart platforms," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 116, pp. 54-60, 1994.
- [22] S.-K. Song and D. S. Kwon, "New methodology for the forward kinematics of 6-DOF parallel manipulators using tetrahedron configurations," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1307-1312, 2001.
- [23] P. Ji and H. Wu, "A closed-form forward kinematics solution for the 6-6p Stewart platform," *IEEE Trans. on*



*Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 522-526, 2001.

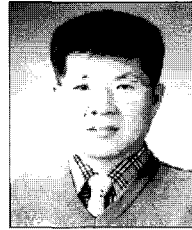
[24] 김희국, 이병주, “정위치 해석해를 가지는 병렬 메커

니즘에 관한 분석과 혼합구조 매니플레이터로의 활용,” 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제5권, 제3호, pp. 324-337.



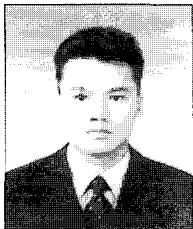
**신 동 민**

2005년 고려대학교 제어계측공학과 졸업. 2005년~현재 동 대학원 석사과정. 관심분야는 마이크로프로세서 제어 및 응용, 병렬형 로봇 기구학 모델링 및 해석.



**김 희 국**

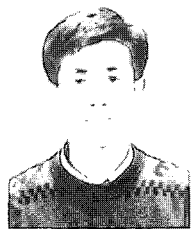
1980년 고려대학교 기계공학과 졸업. 1985년 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사. 1990년 동 대학원 박사. 1991년~현재 고려대학교 제어계측공학과 조교수/부교수/교수. 관심분야는 병렬형 로봇/모바일 로봇/보행 로봇/여유자유도/여유구동 로봇의 기구학/동역학 모델링 및 해석 등.



**정 재 현**

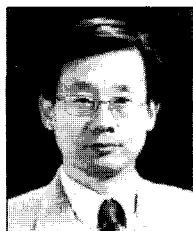
1976년 1월 17일생. 1998년 조선대학교 제어계측공학과 졸업. 2003년 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사. 2003년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 병렬형 메커니즘 모델링 및 해석. 수술 로봇 시스템, Micro dual

manipulation.



**오 세 민**

1974년 9월 29일생. 1999년 한국 기술교육대학교 제어공학과 졸업. 2005년~현재 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사과정. 관심분야는 수술 로봇 시스템 디자인, Haptic device 디자인, Finger mechanism 디자인.



**이 병 주**

1960년 6월 7일생. 1984년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1986년 텍사스 주립대(오스틴)기계공학과 석사. 1991년 동 대학원 박사. 1992년~1995년 한국기술교육대학교 제어공학과 조교수. 1995년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부

교수. 관심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and controls, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.