

## 스튜워트 플랫폼 구조를 이용한 병렬 3-자유도 병렬 메커니즘의 기구학 특성 분석

이석희(고려대 대학원), 김희국\*(고려대 제어계측공학과), 이병주(한양대 전자컴퓨터공학부)

Analysis on Kinematic Characteristics for a Translational 3-DOF Parallel Mechanism with Constrained Stewart Platform Structure

S. H. Lee(CIE. Dept., KU), W. K. Kim(CIE. Dept., KU), B. J. Yi(School of Elec. & Comp. Eng., HU)

### ABSTRACT

A novel translational 3-dof parallel mechanism is proposed and analyzed. The mechanism consists of three  $\widehat{RRPS}$  serial subchains and an additional passive 3-dof  $PPP$  type serial subchain. Three  $\widehat{RRPS}$  serial subchains alone may form a structure of the 6-DOF Stewart Platform mechanism. However, in the proposed mechanism, an additional passive serial subchain acts as constraints to restrict the output motion of the mechanism in 3-DOF translational space. The closed form position solutions of the proposed mechanism and its first-order kinematic model are derived. Then its workspace size and kinematic characteristics are examined via kinematic isotropic index.

**Key Words** : Stewart Platform(스튜워트 플랫폼), Parallel Mechanism(병렬 메커니즘), Closed-form Solution(해석 해), Kinematic Analysis(기구학 해석), Kinematic Isotropic Index(기구학 등방성 지수)

### 1. 서론

병렬형 구조는 직렬형 구조에 비하여 높은 강성을 가지므로 정밀도의 측면에서 우수한 특성을 가진다. 또한, 구동 액추에이터들의 설치 위치도 상대적으로 지면에 가깝게 장착할 수 있는 이점이 있으므로 동역학 측면에서도 비교 우위의 특성을 나타낸다. 그러나, 병렬 메커니즘은 다양한 구속 체인으로 형성되는 구조로 인하여 위치해석 또는 기구학 해석 그리고 동역학 해석의 경우 상대적으로 매우 복잡하거나 기구학 해석해가 존재하지 않는 경우가 많다. 그럼에도 불구하고 병렬형 구조를 가지는 스투워트 플랫폼과 같은 메커니즘은 초기 비행 모의실험기(flight simulator)로 활용되기 시작하여 많은 힘이 요구되거나 적은 관성력이 요구되는 다양한 작업에 많이 활용되어 오고 있다.[1-3]

한편, 이러한 직렬형 구조와 병렬형 구조를 각 메커니즘의 장점을 작업요건에 맞추어 적절히 혼합하여 활용하는 혼합형 메커니즘 구조도 많이 활용되고 있다. 특히, 혼합형 메커니즘은 다양한 형태의 직렬형 또는 병렬형 모듈이 혼합되어 구성되므로 다양한 자유도 또는 구조를 가지는 우수한 모듈의 개발은

매우 중요하다. 특히, Cartesian 공간에서 decoupled된 자유도를 가지는 모듈이 사용되는 경우 일반적으로 작업자에게 편리할 뿐 만 아니라 이러한 모듈이 혼합형 메커니즘의 모듈로서 사용되는 경우 기구학 해석이 상대적으로 편리하다.

기존에 소개된 병렬형 3 자유도 메커니즘들의 출력 변수 벡터는 대부분 Cartesian 공간을 나타내는 여섯 개의 Cartesian 좌표 변수 중 특정한(dominant) 세 개의 출력 변수로 표현되게 되며 나머지 세 개의 Cartesian 변수는 종속되는 구조를 가지고 있다.[4,5] 따라서, 혼합형 모듈로서 활용되는 경우 이러한 종속변수들의 운동은 다른 모듈에 의해 상쇄되어야 하는 문제가 발생하여 기구학 및 동역학 해석을 더욱 더 복잡하게 한다.[6,7]

본 논문에서 스투워트 플랫폼 구조를 가지는 메커니즘에 추가로 Cartesian 출력 공간을 구속시키는 수동 직렬형 체인을 부착된 새로운 메커니즘을 제시하고 위치해석, 기구학 해석 및 특성 해석을 수행한다. 본 논문의 내용은 다음과 같이 요약된다. 먼저 제시된 메커니즘에 관해 기술하고 역위치 해석 및 정위치 해석을 수행한다. 그리고 일차 기구학 해석

을 수행하고 기구학 등방성 지수를 이용하여 제시된 메커니즘의 기구학 특성을 분석한다.

## 2. 위치해석

### 2.1 메커니즘의 구조

먼저  $(x_b, y_b, z_b)$ 와  $(x_i, y_i, z_i)$ 이 각각 기저판의 중앙에 위치한 기저좌표계와 상판의 중앙에 위치한 지역좌표계를 나타낸다고 하자. 세 개의 2자유도 관절(universal joint)이 기저판의 중앙을 원점으로 하며 반경  $R$ 을 가지는 원상에  $120^\circ$ 간격으로 서로 떨어져 위치한다고 한다. 그리고 각 미끄럼 관절의 한쪽 끝은 2-자유도 관절에 그리고 다른 한쪽 끝은 그림 1에 보인바와 같이 상판에 고정된 구형관절에 연결되어 있다. Grubler의 모빌리티 공식으로부터 이 메커니즘은 3 자유도를 가짐을 아래와 같이 확인할 수 있다:

$$M = d(l-1) - \sum_i c_i \quad (1)$$

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

$$= 3$$

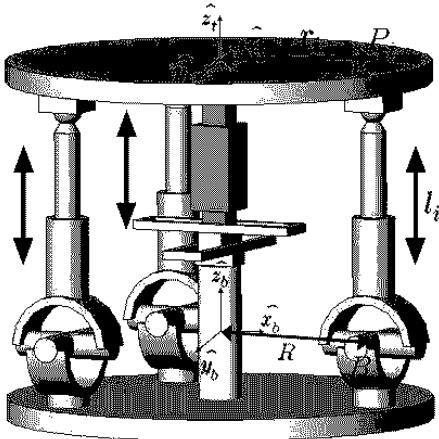


Fig. 1 A novel 3-dof translational mechanism

여기서  $d$ 는 관절의 허용운동 공간의 크기,  $l$ 은 지면을 포함한 링크의 수, 그리고  $c_i$ 는 관절  $i$ 의 구속조건 수를 나타낸다.

메커니즘을 구성하는 각 세 개의 직렬 부속체인이 동일한 인자로 이루어지며 이들 세 개의 직렬 부속체인이 대칭으로 설치되었다고 가정한 경우, 각 직렬 부속체인의 D-H(Denavit Hartenberg) 링크 인자들은 Table. 1과 같이 표현된다. 그리고 나머지 추가로 설치된 메커니즘의 중앙부분에 있는 수동 관절로 이루어진 직렬 부속체인에 대한 인자는 쉽게 알 수 있으며 여기서는 생략한다.

Table. 1 Denavit Hartenberg Link Parameters of a serial RRPS subchain

link	${}_i^a \alpha_{jk}$	$a_{jk}$	${}_i^s s_j(L_j)$	${}_i^s \phi_j$
Base Plate	$0^\circ$	$R$	$0$	$\gamma_{bi}$
link # 1	$-90^\circ$	$0^\circ$	$0$	${}_i^s \phi_1$
link # 2	$90^\circ$	$0^\circ$	$0$	${}_i^s \phi_2$
link # 3	$-90^\circ$	$0^\circ$	$l_i$	${}_i^s \phi_3$
link # 4	$90^\circ$	$0^\circ$	$0$	${}_i^s \phi_4$
link # 5	$90^\circ$	$0^\circ$	$0$	${}_i^s \phi_5$
link # 6	$90^\circ$	$0^\circ$	$0$	${}_i^s \phi_6$
Top Plate	$0^\circ$	$-r$	$0$	$\gamma_{ti}$

먼저 기저좌표계의 원점에서부터  $i^{th}$  번째 직렬 부속체인의 universal 관절까지의 절대 위치벡터를  $R_i (i=1,2,3)$ 로 나타내자. 이 경우, 위치벡터  $R_i$ 는 표 1에 주어진 인자들을 이용하면 바로 다음과 같이 표현된다.

$$R_i = [R \cos(\gamma_{bi}) \ R \sin(\gamma_{bi}) \ 0]^T, \quad (2)$$

여기서  $\gamma_{bi}$ 는  $x_b$ 와  $R_i$  사이의  $z_b$ 축에 대한 오프셋 각을 나타낸다. 또한,  $P_i (i=1,2,3)$ 는 기저좌표계의 원점에서부터  $i$  번째 직렬 부속체인의 구형관절까지의 절대 위치벡터를 나타낸다고 하자.

또한, universal 관절이 배치된 바와 같은 방식으로 세 개의 구형 관절이 상판에 반경  $r$ 인 원상에  $120^\circ$ 의 동일한 간격으로 배치되는 경우 하판과 마찬가지로 상판좌표계의 원점에서부터 점  $P_j$ 까지의 지역위치벡터  $r_i^{(t)} (i=1,2,3)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$r_i^{(t)} = (r_{ix}^{(t)}, r_{iy}^{(t)}, r_{iz}^{(t)})^T$$

$$= (r \cos(\gamma_{ti}^{(t)}), r \sin(\gamma_{ti}^{(t)}), 0)^T \quad (3)$$

여기서  $r$ 과  $\gamma_{ti}^{(t)}$ 는 각각 상판의 중앙에서부터 점  $P_i$ 까지의 거리와  $x_i$ 축과  $r_i$ 사이의 오프셋 각을 나타낸다. Fig. 2에서와 같이 점  $B_i$ 에서부터 점  $P_i$ 까지의 위치벡터를  $l_i$ 로 나타내자. 그리고  $l_i$ 는  $i$  번째 직렬 부속체인의 미끄럼 관절 변수로서  $B_i$ 점에서  $P_i$ 점까지의 거리를 나타낸다.

한편, 메커니즘의 출력위치벡터로서 기저좌표계의 원점에서부터 상판좌표계의 원점까지의 위치벡터인  $R_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 로 나타내고 출력방위를 나타내기 위해 아래와 같이 표현되는 Euler각에 의해 표현되는 회전행렬  $[R_b^i]$ 을 선정한다.

$$[R_b^i] = [Rot(x, \alpha)][Rot(y, \beta)][Rot(z, \gamma)]$$

$$= \begin{bmatrix} c_\beta c_\gamma & -c_\beta s_\gamma & s_\beta \\ s_\alpha s_\beta c_\gamma + c_\alpha s_\gamma & -s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & -s_\alpha c_\beta \\ -c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma & c_\alpha s_\beta s_\gamma + s_\alpha c_\gamma & c_\alpha c_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2.1 메커니즘의 위치해석

### 2.1.1 역위치 해석

기저좌표계의 원점에서부터 상판좌표계의 원점까지의 절대 위치 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}_i + l_i \hat{\mathbf{k}}_i - \mathbf{r}_i \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_i &= [R_0^i] \mathbf{r}_i^{(t)}, \\ \mathbf{P} &= (x, y, z)^T, \\ \mathbf{R}_i &= (R_{ix}, R_{iy}, R_{iz})^T, \\ \mathbf{r}_i^{(t)} &= (r_{ix}^{(t)}, r_{iy}^{(t)}, r_{iz}^{(t)})^T. \end{aligned}$$

특히, 그림 1에서와 같이 중앙에 위치한 수동 PPP 형태의 3 자유도 직렬부속체인은 메커니즘이 고정된 방위각을 유지하도록 구속하므로 편의상 다음과 같이 단위행렬을 유지한다고 가정한다.

$$[\mathbf{R}_0^i] = [\mathbf{I}_{3 \times 3}]$$

따라서, 식 (5)는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}_i + l_i \hat{\mathbf{k}}_i - \mathbf{r}_i^{(t)}. \quad (6)$$

식(6)을  $l_i \hat{\mathbf{k}}_i$ 에 관하여 정리하면

$$l_i \hat{\mathbf{k}}_i = \mathbf{P} - \mathbf{R}_i + \mathbf{r}_i^{(t)} \quad (7)$$

이며 (7)의 양변에 내적을 취하면

$$\begin{aligned} l_i \hat{\mathbf{k}}_i \cdot l_i \hat{\mathbf{k}}_i &= l_i^2 \\ &= (\mathbf{P} - \mathbf{R}_i + \mathbf{r}_i^{(t)})^T (\mathbf{P} - \mathbf{R}_i + \mathbf{r}_i^{(t)}) \\ &= \mathbf{P}^T \mathbf{P} + \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i + \mathbf{r}_i^{(t)T} \mathbf{r}_i^{(t)} - 2\mathbf{R}_i^T \mathbf{P} - 2\mathbf{R}_i^T \mathbf{r}_i^{(t)} \\ &\quad + 2\mathbf{P}^T \mathbf{r}_i^{(t)} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i &= R_i^2, \\ \mathbf{P}^T \mathbf{P} &= x^2 + y^2 + z^2, \\ \mathbf{r}_i^{(t)T} \mathbf{r}_i^{(t)} &= r_i^2, \\ \mathbf{R}_i^T \mathbf{P} &= R_{ix}x + R_{iy}y + R_{iz}z, \\ \mathbf{R}_i^T \mathbf{r}_i^{(t)} &= R_{ix}r_{ix}^{(t)} + R_{iy}r_{iy}^{(t)} + R_{iz}r_{iz}^{(t)}, \\ \mathbf{P}^T \mathbf{r}_i^{(t)} &= xr_{ix}^{(t)} + yr_{iy}^{(t)} + zr_{iz}^{(t)}. \end{aligned}$$

(8)을 풀어 정리하면 아래와 같은 최종 역위치 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned} l_i^2 &= x^2 + y^2 + z^2 + R_i^2 + r_i^2 - 2(R_{ix} - r_{ix})x \\ &\quad - 2(R_{iy} - r_{iy})y - 2(R_{iz} - r_{iz})z \end{aligned} \quad (9)$$

(9)로부터 출력위치벡터  $\mathbf{P} = (x \ y \ z)^T$ 가 주어지는 경우 구동 입력관절 변수 값을 계산할 수 있다.

### 2.1.2 정위치 해석

(9)는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + z^2 + R_i^2 + r_i^2 - l_i^2 - 2(R_{ix} - r_{ix})x \\ - 2(R_{iy} - r_{iy})y - 2(R_{iz} - r_{iz})z = 0 \end{aligned}$$

$$\text{for } i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

또는

$$\begin{aligned} [x - (R_{ix} - r_{ix})]^2 + [y - (R_{iy} - r_{iy})]^2 + [z - (R_{iz} - r_{iz})]^2 \\ = l_i^2 - R_i^2 - r_i^2 - (R_{ix} - r_{ix})^2 - (R_{iy} - r_{iy})^2 \\ - (R_{iz} - r_{iz})^2 \\ \text{for } i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (11)$$

(11)의 첫 번째 식으로부터 각각 두 번째와 세 번째 식을 빼 후 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} 2[(R_{1x} - r_{1x}) - (R_{2x} - r_{2x})]x + 2[(R_{1y} - r_{1y}) \\ - (R_{2y} - r_{2y})]y = D_1 - D_2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} 2[(R_{1x} - r_{1x}) - (R_{3x} - r_{3x})]x + 2[(R_{1y} - r_{1y}) \\ - (R_{3y} - r_{3y})]y = D_1 - D_3 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} D_i &= l_i^2 - R_i^2 - r_i^2 - (R_{ix} - r_{ix})^2 - (R_{iy} - r_{iy})^2 \\ &\quad - (R_{iz} - r_{iz})^2 \end{aligned} \quad (14)$$

특히, (14)에서  $\mathbf{R}_i$ 와  $\mathbf{r}_i^{(t)}$ 는 고정된 알려진 벡터이므로  $D_i$ 값은 이미 알고 있는 값을 알 수 있다.

한편, (12)와 (13)은 하나의 행렬 형태로 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$[A] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 - D_2 \\ D_1 - D_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$A_{11} = 2[(R_{1x} - r_{1x}) - (R_{2x} - r_{2x})]$$

$$A_{12} = 2[(R_{1y} - r_{1y}) - (R_{2y} - r_{2y})]$$

$$A_{21} = 2[(R_{1x} - r_{1x}) - (R_{3x} - r_{3x})]$$

$$A_{22} = 2[(R_{1y} - r_{1y}) - (R_{3y} - r_{3y})]$$

행렬  $[A]$ 의 역행렬이 존재하는 경우 출력변수  $x, y$ 의 값을 (15)의 역관계식을 구함으로서 아래와 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} D_1 - D_2 \\ D_1 - D_3 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

나머지 출력변수  $z$ 의 값은 이상에서 얻어진  $x, y$ 의 값을 (11) 중 하나의 식에 대입함으로써 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} [z - (R_{iz} - r_{iz})]^2 &= l_i^2 - R_i^2 - r_i^2 - (R_{ix} - r_{ix})^2 \\ &\quad - (R_{iy} - r_{iy})^2 - (R_{iz} - r_{iz})^2 - [x - (R_{ix} - r_{ix})]^2 \\ &\quad - [y - (R_{iy} - r_{iy})]^2 \end{aligned} \quad (18)$$

(18)로부터  $z$ 값에 대한 해는 두 개가 존재한다. 그러나 이들은 각각  $x, y$  평면에 대해 비친 상을 나타낼 수 있다.

## 3. 일차 기구학 해석 및 특성 분석

### 3.1 일차 기구학 해석

(9)를 시간에 관해 미분한 후 그 결과를 정리하면 입출력 속도간의 역관계식이 다음과 같이 얻어진다:

$$\dot{\mathbf{i}} = [G_v^i] \dot{\mathbf{u}} \quad (19)$$

여기서

$$[G_u^l] = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

그리고  $i = 1, 2, 3$ 에 대하여

$$g_{i1} = \frac{2x - 2(R_{ix} - r_{ix})}{2l_i}$$

$$g_{i2} = \frac{2y - 2(R_{iy} - r_{iy})}{2l_i}$$

$$g_{i3} = \frac{2z - 2(R_{iz} - r_{iz})}{2l_i}$$

행렬  $[G_u^l]$ 이 미분가능할 때, 입출력간의 정속도 관계식은 (19)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{u}} = [G_u^u] \dot{\mathbf{i}} \quad (21)$$

여기서

$$[G_u^u] = [G_u^l]^{-1} \quad (22)$$

한편, (20)로부터 모든 세 개의 다리에 해당되는 즉,  $i = 1, 2, 3$ 에 대해  $R_i = r_i$  일때  $[G_u^l]$ 은 영행렬이 되어 특이형상을 가지게 됨을 알 수 있다.

### 3.2 일차 기구학 특성 분석

본 절에서는 제시된 메커니즘의 작업공간의 크기와 일차 기구학 특성을 조사한다. 기구학 특성을 분석하기 위해 아래와 같이 정의되는 기구학 등방성 지수를 활용한다.

$$\sigma_{KI} = \frac{\sigma_{\min}([G_u^u])}{\sigma_{\max}([G_u^u])} \quad (23)$$

다음의 모의실험에서는 기전판의 반경  $R$ 은 단위 크기를 가지며 각 미끄럼 관절의 행정길이  $l_i$ 는  $0.5 \leq l_i \leq 2$ 와 같이 제한된다고 가정하였다. 그리고 메커니즘의 기하학적 대칭특성을 유지하기 위하여 이미 앞에서 언급한 바와 같이 오프셋 각들은 아래와 같이 선정하였다.

$$\gamma_{bi}^0 = (i-1) \times 120^\circ, \text{ for } i=1,2,3 \quad (24)$$

$$\gamma_{ti}^1 = (i-1) \times 120^\circ, \text{ for } i=1,2,3. \quad (25)$$

그리고 하나의 설계인자  $r$ 과 하나의 출력 변수  $z_f$ 를 단계적으로 변화하면서 기구학 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 2는 상판의 반경이  $r = 0.75$ 로 고정되었을 때  $x-y$ 평면상에서 메커니즘의 출력변수  $z_f$ 의 최대값과 최소값(즉, 최대 출력 변위  $z_{f_{\max}}$ 와 최소 출력 변위  $z_{f_{\min}}$ )에 대한 3-차원 그림과 등고선 그림을 나타낸다. 편의상, 이 그림에서 나타난 작업 공간은 구동 관절의 제한으로 얻어지는 작업 공간내에서 등방성 지수 값  $\sigma_{KI}$ 이 0.01 이상인 공간을 나타내었다. 두 그림으로부터 제시된 메커니즘의 작업 공간은 상당한 크기를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3(a)-3(c)는 상판의 반경  $r = 0.25$ 이고  $z_f = 0.5, 1.0, 1.5$ 일 때  $x-y$ 평면상에 메커니즘의 기구학 등방성지수에 대한 등고선 그림을 나타낸다.

Fig. 4(a)-4(c)는 반경  $r = 0.5$ 이고  $z_f = 0.5, 1.0, 1.5$ 일 때  $x-y$ 평면상에 메커니즘의 기구학 등방성지수에 대한 등고선 그림을 나타낸다. 그리고 Fig. 5(a)-5(c)는 반경  $r = 0.75$ 이고  $z_f = 0.5, 1.0, 1.5$ 일 때  $x-y$ 평면상에 메커니즘의 기구학 등방성지수에 대한 등고선 그림을 나타낸다.

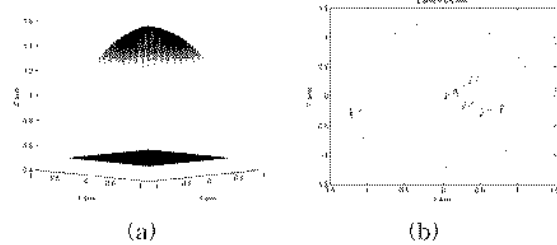


Fig. 2 a) 3-D work space plot showing  $z_{\max}$  and  $z_{\min}$  b) contour plot for  $z_{\max}$  and  $z_{\min}$

이들 그림들로부터 메커니즘의 작업공간을 형태 및 크기를 예측할 수 있으며 그 크기는 하판과 상판의 반경비 값에 따라 변화하므로 원하는 작업환경에 적합한 설계기준에 따라 메커니즘의 설계가 가능함을 확인할 수 있다. 특히, 제시된 메커니즘이 상판과 하판의 방위각이 같다고 할때( $[R_b^t] = [I]$ ) 메커니즘의 작업 공간 내에서 세 개의 구동일력 벡터가 정사면체의 모서리를 따라 위치할 때 즉, 중앙 부분에서 가장 기구학 등방성 특성은 큰 값을 가짐을 쉽게 예측할 수 있다.

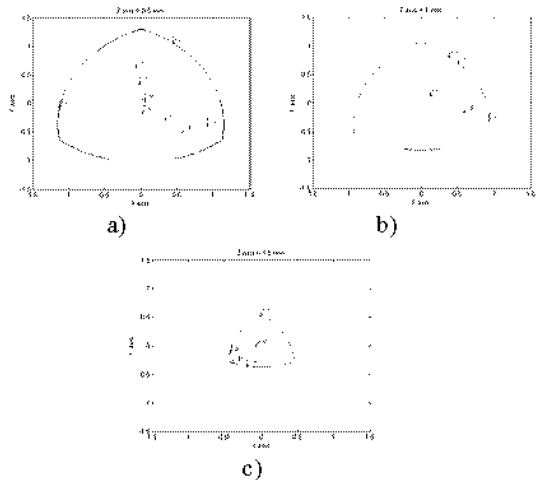


Fig. 3 Control plots when  $r = 0.25$  and  
a)  $z_f = 0.5$  b)  $z_f = 1.0$  c)  $z_f = 1.5$

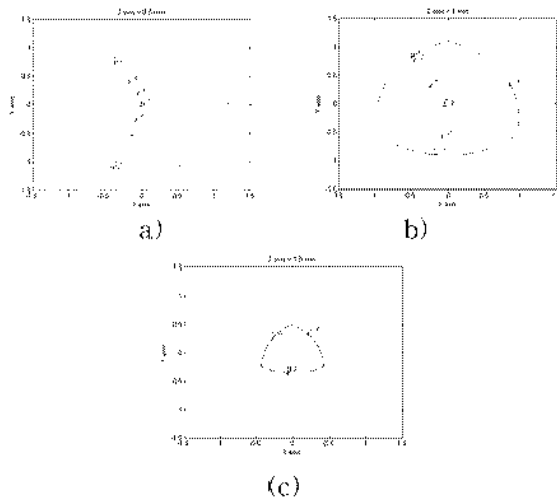


Fig. 4 Control plots when  $r = 0.5$  and  
a)  $z_t = 0.5$  b)  $z_t = 1.0$  c)  $z_t = 1.5$

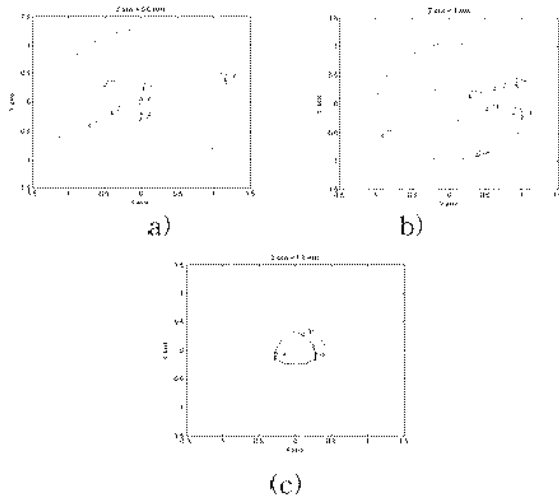


Fig. 5 Control plots when  $r = 0.75$  and  
a)  $z_t = 0.5$  b)  $z_t = 1.0$  c)  $z_t = 1.5$

#### 4. 결론

스튜워트 메커니즘 구조를 가지는 병진형 3 자유도 병렬 구조의 메커니즘을 제시하였다. 메커니즘의 역위치 해석해 및 정위치 해석해를 제시하였으며 일차 기구학 모델과 기구학 등방성 지수를 이용하여 메커니즘의 기구학 특성을 조사하였다. 제시된 메커니즘은 병렬 구조와 스트루트 구조에 추가적인 구속 직렬체인을 부착한 구조를 가짐으로서 병렬 메커니즘의 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 모의 실험을 통하여 비교적 넓은 작업공간과 우수한 기구학 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 특히, 병렬 구조임에도 불구하고 위치 해석해가 존재하여 정밀성이나 안전성이 요구되는 다양한 분야에서의 활용이 가능하

다고 하겠다. 특히 Tsai et al. [8]에 의해 제시된 병진형 3 자유도 메커니즘은 많은 회전관절은 물론 회전관절을 구동입력으로 가지고 있음에 비하여 본 메커니즘은 스트루트 구조와 같은 미끄럼 구동입력을 활용할 수 있는 구조로서 높은 강성은 물론 강한 유압을 이용한 높은 구동입력의 활용이 가능하여 그 실용화 가능성이 크다고 하겠다.

#### 참고문헌

1. D. Stewart, "A Platform with six degree of freedom," Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering, Vol. 180, Part 1, no. 15, 1965-66, pp. 371-386.
2. W.K. Kim, K.K.Huh, B.J. Yi, "Kinematic/Dynamic Optimal Design of A Stewart Platform Mechanism," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 2, No. 1, March, 1996, pp. 45-52.
3. Whee Kuk Kim, Yong Kyu Byun, Hyung Suk 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, Jan. 2001, pp. 85-99.
4. K. M. Lee, D. K. Shah, "Kinematic Analysis of a Three Degrees of Freedom In-Parallel Actuated Manipulator, Proceedings of IEEE Int'l conf. of Robotics and Automation, 1987, pp. 345-350.
5. K.M. Lee, and D.K. Shah, "Dynamic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, no. 3, June, 1988, pp. 361-367.
6. W.K. Kim, S. Tosunoglu, B.J. Yi, "Geometric/Kinematic Characteristics of 6 Degree-of-Freedom Hybrid Mechanisms with Forward Closed-Form Position Solutions," '98 WAC conf. 1998.
7. ZHao Mingayng, et. al., "Development of A Redundant Robot Manipulator Based on Three DOF Parallel Platforms," IEEE Int'l conf. on Robotics and Automation, 1995, pp. 221-226.
8. 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.