

스튜워트 플랫폼 구조를 이용한 공간형 3자유도 병렬 메커니즘의 기구학 특성 분석

이석희*, 이정현*, 김희국#, 이병주**

Analysis on Kinematic Characteristics for Spatial 3-DOF Parallel Mechanisms Employing Stewart Platform Structure

Seok Hee Lee*, Jung Hun Lee*, Whee Kuk Kim#, Byung Ju Yi**

ABSTRACT

A spatial 3 degrees-of-freedom mechanism employing Stewart Platform structure is proposed: the mechanism maintains the 3-RRPS structure of Stewart Platform but has an additional passive PRR serial sub-chain at the center area of the mechanism in order to constrain the output motion of the mechanism within the output motion space of the added PRR serial subchain. The forward and reverse position analyses of the mechanism are performed. Then the mechanism having both the forward and the reverse closed-form solutions is suggested and its closed form solutions are derived. It is confirmed, through the kinematic analysis of those two proposed mechanisms via kinematic isotropic index, that both the proposed mechanisms have fairly good kinematic characteristics compared to the existing spatial 3-DOF mechanisms in literature¹⁻⁶.

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

1. 서론

문헌에 출력공간에서 두 개의 회전 자유도(pitch and yaw)와 하나의 병진 자유도(z-direction)를 가지는 3자유도 메커니즘으로서 Fig. 1과 같이 세 개의 RPS형(즉, Revolute 관절(R), Prismatic 관절(P) 그리고 Spherical 관절(S))로 구성된 직렬형 다리를 가지며 세 개의 미끄럼 관절에 의해 구동되는 구조

를 가지는 병렬 메커니즘이 제안되었으며, 그 기구학/동적 해석이 수행되었다.^{1, 2} 또한, 이러한 3 자유도 메커니즘 모듈을 이용한 10 자유도 혼합형 매니플레이터가 제작되었다.³ 그러나, 이러한 모듈은 특히, 정위치 해석해가 존재하지 않으며 따라서 이들 모듈의 위치해석은 계산하중으로 인한 부담이나 수치해석 계산상의 오차가 존재하는 수치해석방법에 의해 수행되어야 한다. 이러한 단점을 보완하기 위

1. 접수일: 2004년 12월 28일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

* 고려대학교 대학원

교신저자: 고려대학교 제어계측공학과

E-mail : wheekuk@korea.ac.kr Tel. (041) 860-1443

** 한양대학교 전자컴퓨터공학부

하여 Fig. 2 와 같은 정위치 해석해가 존재하는 PSP형 3자유도 병렬 메커니즘이 제안되었다.⁴

그러나 이 두 가지 형태의 3자유도 병렬형 메커니즘들(RPS형과 PSP형)의 출력공간은 6차원 Cartesian 공간 내에서 독립적인 3 자유도 Cartesian 출력공간으로 제한되지 않는다. 즉, 6개의 Cartesian 변수 중에서 3개의 변수가 메커니즘의 출력변수로 선정될 수 있으나 나머지 3개의 Cartesian 변수는 종속변수로 결정된다. 따라서 이러한 두 메커니즘이 혼합형 매니플레이터의 모듈로서 사용되는 경우 전체 혼합형 매니플레이터의 해석이 불필요하게 매우 복잡하게 된다.⁵

한편, 스트루트 메커니즘은 높은 강성과 정밀도를 가지는 특성으로 인하여 현재 비행기 시뮬레이터나 그 밖의 다양한 응용분야에서 그 우수성이 입증되고 있다.⁷ 따라서, 본 논문에서는 메커니즘의 출력공간이 독립된 3개의 변수만으로 표현되는 또는 출력공간이 PRR 직렬부속체인의 출력공간으로 제한되는 Fig. 3과 같은 스트루트 구조를 이용한 새로운 공간형 3자유도 병렬 메커니즘을 제안하고 메커니즘의 구조와 모빌리티에 관하여 기술한 후, 역위치 해석 및 정위치 해석을 수행한다. 특히, Fig. 3의 메커니즘을 구성하는 네 개의 다리 중 한 개의 RRPS 직렬 부속체인을 제거하는 경우 Fig. 4와 같이 메커니즘은 비대칭구조를 가지지만 출력공간이 PRR 직렬부속체인의 출력공간으로 제한되는 공간형 3 자유도를 유지할 뿐 만 아니라 정위치 해석해가 존재한다. 이 메커니즘의 정위치 해석해를 구하고 제시된 두 메커니즘의 기구학 해석을 통하여 작업 공간 내에서의 기구학 특성을 조사한다.

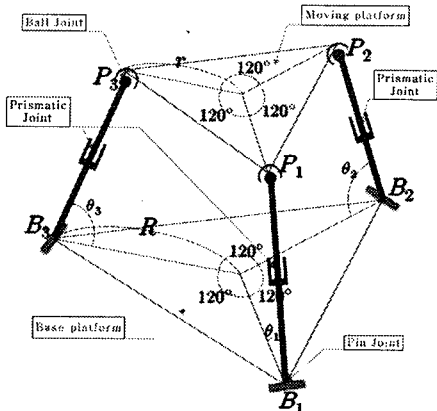


Fig. 1 A RPS type parallel manipulator

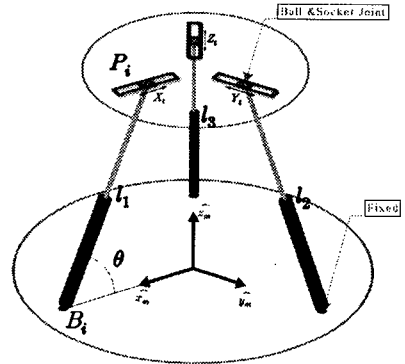


Fig. 2 A PSP type parallel manipulator

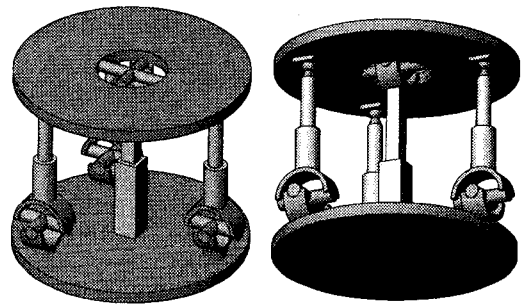


Fig. 3(a) A three-degree-of-freedom mechanism

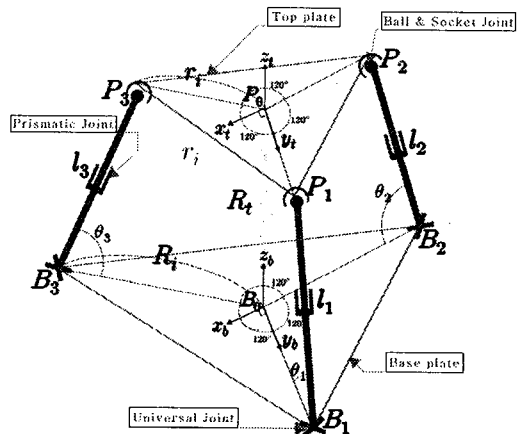


Fig. 3(b) A schematics of the proposed 3-DOF mechanism

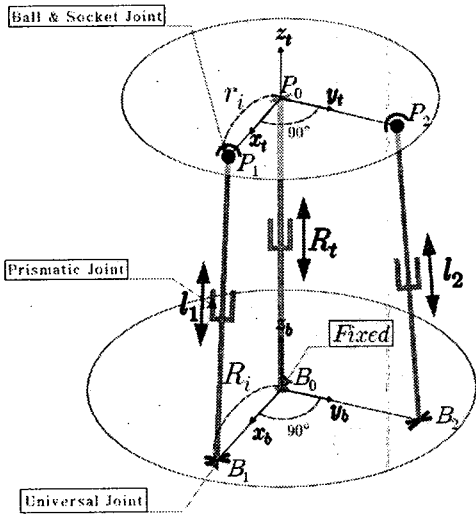


Fig. 4 A three-DOF mechanism

2. 3자유도 병렬 Mechanism

2.1 Mobility

제안된 메커니즘은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 각각 하나의 상판과 하판, 그리고 이러한 두 개의 판을 연결하는 네 개의 부속체인(세 개의 RRPS 부속체인과 하나의 PRR 부속체인)으로 구성된다. 메커니즘의 자유도(M)는 Grubler의 모빌리티 (mobility) 공식으로부터 아래와 같이 얻어진다:

$$M = d(l-1) - \sum_{i=1}^N C_i \quad (1)$$

$$= 6(9-1) - 4 \times 4 - 4 \times 5 - 3 \times 3 = 3,$$

여기서 d 는 관절의 허용운동 공간의 크기, l 은 지면을 포함한 링크의 수, 그리고 C_i 는 관절 i 의 구속 조건 수를 나타낸다.

2.2 Mechanism의 구조

좌표계 $B_0(x_b, y_b, z_b)$ 와 $P_0(x_t, y_t, z_t)$ 을 각각 기저판과 상판의 중앙에 원점을 둔 기저좌표계와 출력좌표계라 하자. 전체 메커니즘은 가능한 대칭형상을 가지도록 구성한다. 세 개의 Universal 관절들은 하판에 반경 R 인 원상에 120° 간격으로 놓여있다.

그리고 각 미끄럼 관절은 Fig. 3과 같이 기저판위에 위치한 Universal 관절과 상판에 설치된 구형관절 (Ball&Socket Joint)을 연결하도록 놓여있다.

$R_i (i=1, 2, 3)$ 을 기저좌표계의 원점으로부터 i 번째 직렬부속체인의 Universal 관절까지의 절대위치벡터라 하자. 이때 절대 위치벡터 R_i 는 다음과 같이 표현된다.

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

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

여기서 γ_{bi}^b 는 x_b 축과 벡터 R_i 사이의 z_b 축에 대한 오프셋 회전각을 나타낸다. $P_i (i=1, 2, 3)$ 을 기저좌표계의 원점으로부터 상판의 i 번째 직렬부속체인의 구형관절까지의 절대위치벡터라 하자. Universal 관절과 마찬가지로, 각 구형관절들도 상판에 반경 r 인 원상에 120° 간격으로 놓여 있다. 그러므로 출력 좌표계의 원점으로부터 점 P_i 까지의 국부위치 벡터 $r_i^{(t)} (i=1, 2, 3)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$r_i^{(t)} = (r_x^{(t)} \ r_y^{(t)} \ r_z^{(t)})^T \quad (3)$$

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

여기서 r 과 γ_{ti}^t 는 각각 상판의 중앙으로부터 점 P_i 까지의 거리와 x_t 축과 벡터 r_i 사이의 오프셋 각을 나타낸다. 벡터 $r_i^{(t)}$ 는 출력좌표계의 단위벡터이다. Fig. 3에 보여진 바와 같이 벡터 l_i 는 점 B_i 로부터 점 P_i 까지의 위치벡터를 나타낸다. 그리고 l_i 는 i 번째 직렬부속체인의 미끄럼 관절변위로서 점 B_i 에서부터 점 P_i 까지의 거리를 나타낸다.

2.3 위치 해석

출력좌표계의 위치벡터 $R_t = (x_t \ y_t \ z_t)^T$ 를 기저좌표계의 원점으로부터 출력좌표계의 원점까지의 위치벡터를 나타낸다고 하자. 그리고 출력좌표계의 방위행렬 $[R_t^b]$ 는 xyz Euler angle set을 이용하여 다음과 같이 표현한다.

$$[R_t^b] = [Rot(x, \alpha)][Rot(y, \beta)][Rot(z, \gamma)] \quad (4)$$

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

특히, 제시된 메커니즘의 경우, Euler angle set의 각 γ 는 메커니즘의 출력변수중의 하나로서 항상 0° 으로 구속 된다($\gamma=0^\circ$). 따라서 메커니즘의 출력방위를 나타내는 식 (4)의 방위 행렬 $[R_b^A]$ 는 다음과 같이 나머지 두 개의 Euler 각들(α, β)로서 표현된다.

$$[R_b^A] = \begin{bmatrix} c_\beta & 0 & s_\beta \\ s_\alpha s_\beta & c_\alpha & -s_\alpha c_\beta \\ -c_\alpha s_\beta & s_\alpha & c_\alpha c_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3.1 역위치 해석

역위치 해석은 메커니즘의 출력위치/방위가 주어졌을 때 구동입력 변수벡터를 구하는 것이다. 메커니즘의 중앙에 위치한 PRR 직렬부속체인이 \hat{x} 방향과 \hat{y} 방향으로의 회전운동과 \hat{z} 방향으로의 병진운동만을 가지므로, 메커니즘의 기구학적 구속조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_i = y_i = 0, \quad \gamma = 0^\circ. \quad (6)$$

그러므로 전체 메커니즘의 출력벡터는 일반적인 Cartesian 공간의 여섯 개 변수 중 다음과 같이 세 개만으로 구성 된다: $u = [z_i \ \alpha \ \beta]^T$. 편의상, 식 (6)에서 PRR부속체인이 기저좌표계의 원점에서 하판에 수직으로 세워져 있으며 $\gamma = 0^\circ$ 일때 출력좌표계의 방위가 기저좌표계와 일치한다는 것이 가정되었다. z_i 의 위치가 R_i 와 일치 되므로 $u = [R_i \ \alpha \ \beta]^T$ 로 표현된다.

기저좌표계로부터 i 번째 Universal 관절까지의 위치벡터 P_i 는 다음과 같이 표현되어 진다:

$$P_i = R_i + l_i = R_i + r_i \quad (7)$$

여기서

$$r_i = [R_b^A] r_i^{(t)}. \quad (8)$$

이 식을 l_i 에 대하여 정리하여 표현하면

$$l_i = R_i + r_i - R_i \quad (9)$$

와 같다. 입력벡터 l_i 의 크기의 곱은 내적을 이용하여 다음과 같이 구해 진다:

$$l_i \cdot l_i = l_i^2 = R_i^T R_i + r_i^T r_i + R_i^T R_i + 2R_i^T r_i - 2R_i^T R_i - 2R_i^T r_i \quad (10)$$

위 식 (10)을 다음의 기하학적인 구속 관계식들

$$\begin{aligned} R_i^T R_i &= z_i, \\ r_i^T r_i &= r^2, \\ R_i^T R_i &= R^2, \\ R_i^T R_i &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

을 사용하여 l_i 에 대하여 간단히 정리 해보면 아래와 같이 표현된다.

$$l_i^2 = z_i^2 + r^2 + R^2 + 2R_i^T r_i - 2R_i^T r_i \quad (12)$$

다시, 식 (12)에 식 (2), (3), (5), (8)을 대입하여 정리하면 아래와 같이 표현된다.

$$l_i^2 = z_i^2 + r^2 + R^2 + 2(s_\alpha r_{iy}^{(t)} - c_\alpha s_\beta r_{ix}^{(t)}) z_i - 2c_\beta r_{ix}^{(t)} R_{ix} - 2(s_\alpha s_\beta r_{ix}^{(t)} + c_\alpha r_{iy}^{(t)}) R_{iy} \quad (13)$$

식 (13)에서 α, β 그리고 z_i 는 메커니즘의 출력변수로서 역위치 해석에서는 주어지므로 각 입력 미끄럼관절 변위 l_i 는 식 (13)으로부터 바로 구해진다.

2.3.2 정위치 해석

정위치 해석에서는 미끄럼 관절 변수 벡터 $l = (l_1 \ l_2 \ l_3)^T$ 가 주어졌을 때 출력위치벡터를 구한다. 식 (13)은 다음과 같이 정리 될 수 있다.

$$0 = z_i^2 + r^2 + R^2 - l_i^2 + 2(s_\alpha r_{iy}^{(t)} - c_\alpha s_\beta r_{ix}^{(t)}) z_i - 2c_\beta r_{ix}^{(t)} R_{ix} - 2(s_\alpha s_\beta r_{ix}^{(t)} + c_\alpha r_{iy}^{(t)}) R_{iy} \quad \text{for } i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

역 위치해석과는 달리 위 식은 세 개의 출력변수에 관한 매우 복잡한 비선형식으로 표현되므로 정위치 해석해가 존재하지 않는다. 그러므로 이 경우 정위치 해석은 수치해석에 의하여 수행될 수 있다.

그러나 중앙부분에 위치한 PRR 직렬부속체인의 미끄럼 관절의 변수(R_i)와 두개의 RRPS 직렬부속체인의 미끄럼 관절의 변수(l_1, l_2)를 입력 벡터로 선정하였을 경우 정위치 해석해가 존재한다. 특히, 이 경우 세 번째 다리의 모든 관절은 수동 관절로

서 이를 제거하게 되면 Fig. 4와 유사한 형태의 메커니즘이 된다.

먼저, 중앙에 위치한 직렬부속체인의 미끄럼판 절변위(R_i)는 메커니즘 출력변위와 동일함을 알 수 있다. 즉,

$$z_i = R_i. \quad (15)$$

특히, Fig. 3에서와 같이 각 직렬 부속체인의 배치를 식 (16)과 (17)에서와 같이 90° , 210° , 330° 로 배치한다.

$$\gamma_{bi}^b = (i-1) \times 120^\circ + 90^\circ, \text{ for } i = 1, 2, 3, \quad (16)$$

$$\gamma_{ii}^i = (i-1) \times 120^\circ + 90^\circ \text{ for } i = 1, 2, 3. \quad (17)$$

이 경우, R_1 과 r_1 은 각각 γ_{b1}^b 과 γ_{i1}^i 의 값을 식 (2)와 (3)에 대입함으로써 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R_1 &= (R_{1x} \ R_{1y} \ R_{1z})^T \\ &= (R \cos(\gamma_{b1}^b) \ R \sin(\gamma_{b1}^b) \ 0)^T \\ &= (0 \ R \ 0)^T, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} r_1^{(1)} &= (r_{1x}^{(1)} \ r_{1y}^{(1)} \ r_{1z}^{(1)})^T \\ &= (r \cos(\gamma_{i1}^i) \ r \sin(\gamma_{i1}^i) \ 0)^T \\ &= (0 \ r \ 0)^T. \end{aligned} \quad (19)$$

식 (18)과 (19)를 첫 번째 직렬부속체인과 메커니즘의 중앙부분에 위치한 PRR 직렬부속체인으로 이루어지는 루프에 대한 구속관계식을 나타내는 식 (14)에 대입하면 다음과 같이 정리 할 수 있다:

$$l_1^2 - z_i^2 - r^2 - R^2 = -2rRc_\alpha + 2rz_i s_\alpha. \quad (20)$$

편의상 식 (20)을 아래와 같이 표현한다.

$$C = Ac_\alpha + Bs_\alpha, \quad (21)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= -2rR, \\ B &= 2rz_i, \\ C &= l_1^2 - z_i^2 - r^2 - R^2. \end{aligned} \quad (22)$$

식 (21)으로부터 α 에 대한 해는 tangent half angle 표현을 이용하면 아래와 같이 구해진다 :

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left(\frac{B \pm \sqrt{B^2 + A^2 - C^2}}{A + C} \right). \quad (23)$$

마찬가지 방법으로 두 번째 직렬 부속체인에 대해서 식 (14)를 정리하면

$$\begin{aligned} l_2^2 &= z_i^2 + r^2 + R^2 + 2(s_\alpha r_{2y}^{(t)} - c_\alpha s_\beta r_{2x}^{(t)})z_i \\ &\quad - 2c_\beta r_{2x}^{(t)}R_{2x} - 2(s_\alpha s_\beta r_{2x}^{(t)} + c_\alpha r_{2y}^{(t)})R_{2y}. \end{aligned} \quad (24)$$

와 같이 표현된다. 여기서 β 를 제외한 모든 변수들은 이미 알려져 있으므로 이 식을 β 에 관하여 아래와 같이 정리 한다:

$$\begin{aligned} 2(c_\alpha r_{2x}^{(t)}z_i + s_\alpha r_{2y}^{(t)}R_{2y})s_\beta + 2r_{2x}^{(t)}R_{2x}c_\beta \\ = z_i^2 + r^2 + R^2 - l_2^2 + 2s_\alpha r_{2y}^{(t)}z_i - 2c_\alpha r_{2y}^{(t)}R_{2y}. \end{aligned} \quad (25)$$

식 (25)로부터 β 는 편의상 다음과 같이 표현한다.

$$F = Dc_\beta + Es_\beta, \quad (26)$$

여기서

$$\begin{aligned} E &= 2(c_\alpha r_{2x}^{(t)}z_i + s_\alpha r_{2x}^{(t)}R_{2y}), \\ D &= 2r_{2x}^{(t)}R_{2x}, \\ F &= z_i^2 + r^2 + R^2 - l_2^2 + 2s_\alpha r_{2y}^{(t)}z_i - 2c_\alpha r_{2y}^{(t)}R_{2y}. \end{aligned} \quad (27)$$

위 식 (26)으로부터 tangent half angle 표현을 이용하면 β 는 아래와 같이 구해진다:

$$\beta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{E \pm \sqrt{E^2 + D^2 - F^2}}{D + F} \right). \quad (28)$$

2.4 일차 기구학 해석 및 특성 분석

2.4.1 일차 기구학 해석

입력벡터와 출력벡터사이의 역속도관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$i = [G_{ii}^i] \dot{u}. \quad (29)$$

그리고 역위치 해석의 식 (13)을 바로 시간에 관하

여 미분함으로서 행렬 $[G_w^i]$ 은 다음과 같이 얻어진다.

$$[G_w^i] = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix}, \quad (30)$$

여기서

$$g_{1i} = (z_i - r_{ix}^{(t)} c_{\alpha} s_j + r_{iy}^{(t)} s_{\alpha}) / l_i \quad i = 1, 2, 3, \quad (31)$$

$$g_{2i} = (r_{ix}^{(t)} s_{\alpha} s_j z_i + r_{iy}^{(t)} c_{\alpha} z_i + R_{xy} r_{iy}^{(t)} s_{\alpha} - R_{xy} r_{ix}^{(t)} c_{\alpha} s_j) / l_i \quad (32)$$

$$g_{3i} = (R_{ix} r_{ix}^{(t)} s_j - R_{iy} r_{ix}^{(t)} s_{\alpha} c_j - r_{ix}^{(t)} c_{\alpha} c_j z_i) / l_i. \quad (33)$$

그러므로, 입출력 정속도 관계식은 식 (29)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{u} = [G_I^i] \dot{i}, \quad (34)$$

여기서

$$[G_I^i] = [G_w^i]^{-1}. \quad (35)$$

2.4.2 일차 기구학 특성 분석

본 절에서는 메커니즘의 작업공간과 기구학 특성에 관하여 조사한다. 성능지수로서는 다음과 같이 정의되는 기구학 등방성지수를 사용한다;

$$\sigma_{KI} = \frac{\sigma_{\min}([G_I^i])}{\sigma_{\max}([G_I^i])}. \quad (36)$$

여기서 σ_{\min} 와 σ_{\max} 은 각각 자코비안 행렬 $[G_I^i]$ 의 최소 특이 값과 최대 특이 값을 나타내며 이들은 입력속도(힘)과 출력속도(힘)과의 전달 비를 나타낸다. 특히, 기구학 등방성 지수의 값은 입출력속도(힘) 전달비가 출력공간에서 임의의 방향으로 어느 정도의 균일한 분포를 가지는 가를 나타내며 특히 이 값이 단위 값을 가지는 경우 출력공간에서 모든 방향으로 균일한 입출력 전달속도(힘)비를 가지는 것을 의미한다. 그러나 위 식 (36)에서 회전운동과 병진운동의 경우 사용되는 단위가 다르므로 사용되는 단위에 따라 기구학 등방성지수 값이 변화한다. 그리고 출력운동방향으로 다른 작업속도가 요구될 때, 위 행렬을 정규화하면 역시 다른 등방

성 지수 값이 얻어진다. 그러므로 다른 메커니즘과 특성을 비교할 때 식 (36)에서 행렬 $[G_I^i]$ 는 항상 동일한 가중치가 사용되거나 동일한 단위가 일관되게 사용되어야 그 의미를 가질 수 있다. 다음의 모의실험에서는 편의상 가중치는 모두 단위 값을 가지는 것으로 일원화하여 분석을 실행하였다.

2.4.3 모의실험

먼저, 중앙에 위치한 PRR 직렬부속체인은 수동관절로 출력공간을 제한하기 위한 목적으로 사용되는 경우인, 나머지 세 개의 직렬부속 체인의 미끄럼 관절들 각각이 구동되는 경우에 대한 메커니즘의 기구학 특성을 조사한다. 모의실험에서는 비교 분석의 편의상 기저 판의 반경 R 이 단위 값을 가지며 미끄럼관절의 행정변위 l_i 의 범위가 $1 \leq l_i \leq 2$ 로 제한된다고 가정한다. 반면에 Universal 관절의 최대허용회전변위는 제한이 없다고 가정한다. 또한 기저 판의 반경 R 은 단위 값을 가지는 것으로 가정한다. 오프셋 각들은 각각 다음과 같이 선정되었다고 가정한다:

$$\gamma_{bi} = (i-1) \times 120^\circ + 90^\circ, \quad \text{for } i = 1, 2, 3, \quad (37)$$

$$\gamma_{ti} = (i-1) \times 120^\circ + 90^\circ, \quad \text{for } i = 1, 2, 3. \quad (38)$$

그리고 두 개의 변수 (즉, 설계 변수 r 과 출력변수 z_i)가 변화하면서 기구학 특성에 어떠한 변화를 주는가에 관하여 조사하였다.

Fig. 5는 상판의 반경 $r=0.75$ 일 때 나머지 두 개의 출력 변수($\alpha-\beta$ 평면)위에서 z_i 가 각각 1.25, 1.5, 1.75일 때 메커니즘의 기구학 등방성지수의 등고선 그림을 나타내고 있다.

Fig. 6는 상판의 반경 $r=1.0$ 일 때 나머지 두 개의 출력 변수($\alpha-\beta$ 평면)위에서 z_i 가 각각 1.25, 1.5, 1.75일 때 메커니즘의 기구학 등방성지수의 등고선 그림을 나타내고 있다.

Fig. 7은 상판의 반경 $r=1.25$ 일 때 나머지 두 개의 출력 변수($\alpha-\beta$ 평면)위에서 z_i 가 각각 1.25, 1.5, 1.75일 때 메커니즘의 기구학 등방성지수의 등고선 그림을 나타내고 있다.

이상의 모의실험 결과로부터 제안된 메커니즘은 병렬 메커니즘의 구조를 가짐에도 불구하고 기존에 제시된 병렬 메커니즘들^{1,2,4,6}과 비교하여 유사하거나 비교적 넓은 작업공간을 가지고 있으며 기구학 특성도 우수한 것으로 나타났다. 전반적으로

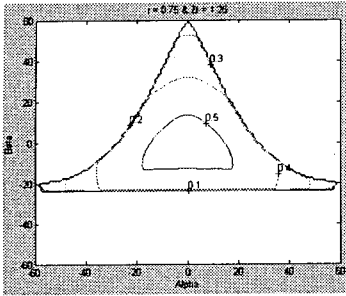


Fig. 5(a) Contour plots of σ_{KI} when $r=0.75$; $z_t=1.25$

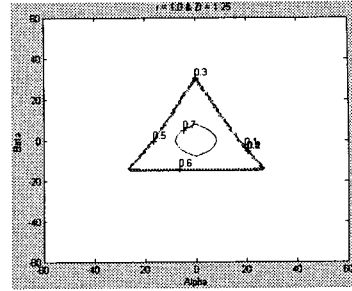


Fig. 6(a) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.0$; $z_t=1.25$

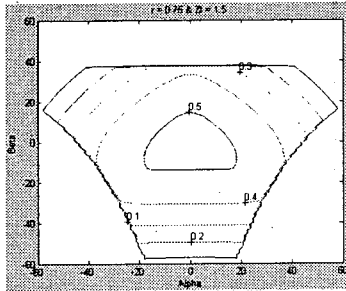


Fig. 5(b) Contour plots of σ_{KI} when $r=0.75$; $z_t=1.5$

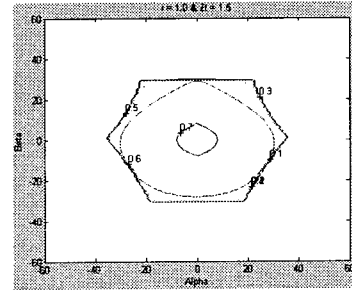


Fig. 6(b) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.0$; $z_t=1.5$

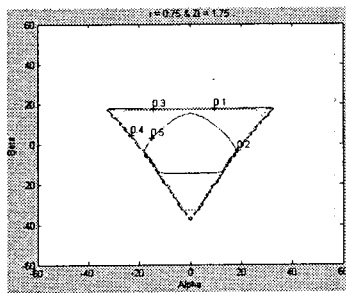


Fig. 5(c) Contour plots of σ_{KI} when $r=0.75$; $z_t=1.75$

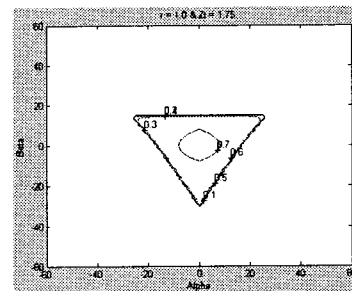


Fig. 6(c) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.0$; $z_t=1.75$

상판의 반경 r 이 감소 될 때, $\alpha-\beta$ 평면상의 작업 공간의 크기는 증가하는 경향을 나타내었으나 기구학 등방성지수 값은 다소 적어지는 경향을 나타내었다. 한편, Fig. 9의 결과들은 정위치 해석해가 존재하는 메커니즘을 나타내는 Fig. 8에서의 입력 벡터

즉 $l^* = (R, l_1, l_2)^T$ 에 대한 기구학 등방성 특성을 나타낸다. 특히, 이 경우 Fig. 3에서 세 번째 직렬부속체인이 제거되어도 공간형 3 자유도를 유지할 수 있으며 Grubler의 모빌리티 공식을 통하여 다음과 같은 사실을 확인할 수 있다:

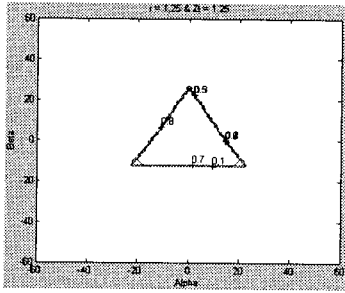


Fig. 7(a) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.25$; $z_t=1.25$

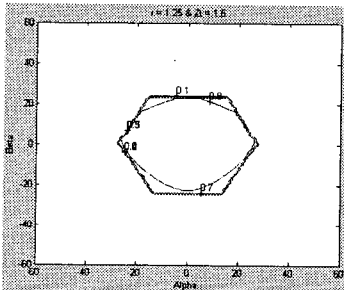


Fig. 7(b) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.25$; $z_t=1.5$

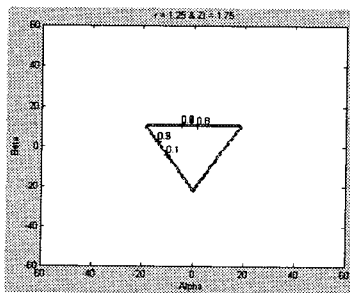


Fig. 7(c) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.25$; $z_t=1.75$

$$M = 6(7-1) - (2 \times 3 + 3 \times 4 + 3 \times 5) = 3. \quad (39)$$

다음 시뮬레이션에서도 앞의 경우와 마찬가지로

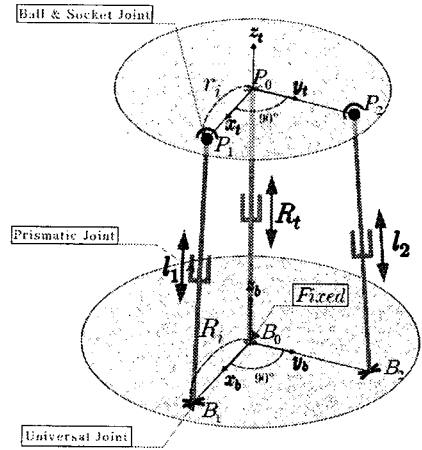


Fig. 8 three-DOF mechanism

로 편의상 기저 판의 반경 R 이 단위 값을 가진다고 가정하였다. 그러나 미끄럼 관절의 행정변위 l_i 의 범위는 메커니즘의 우수한 등방성 특성을 나타내는 영역이 포함되도록 $2.5 \leq l_i \leq 7.5$ 로 설정하였으며 Universal 관절의 최대허용회전변위는 제한이 없다고 가정하였다. 그리고 상판과 하판에 위치한 Universal 관절과 구형관절들의 위치를 나타내는 오프셋 각들도 메커니즘의 우수한 기구학 등방성 특성을 얻기 위하여 아래와 같이 설정하였다:

$$\gamma_{hi}^b = (i-1) \times 90^\circ, \quad \text{for } i=1, 2, \quad (40)$$

$$\gamma_{hi}^a = (i-1) \times 90^\circ, \quad \text{for } i=1, 2. \quad (41)$$

Fig. 9(a)~9(e)는 각각 상판의 반경 $r=1$ 로 가정하였을 경우 두 개의 출력 변수($\alpha-\beta$) 평면위에서 출력변수 z_t 가 각각 3, 3.5, 5, 6.5, 7일 때 메커니즘의 기구학 등방성지수의 등고선 그림을 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 z_t 의 값이 대략 4~6 부근에서 비교적 넓은 작업공간에 걸쳐 매우 우수한 기구학 등방성 특성을 나타냄을 알 수 있다.

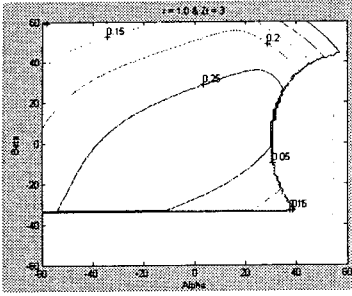


Fig. 9(a) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.0$; $z_t=3$

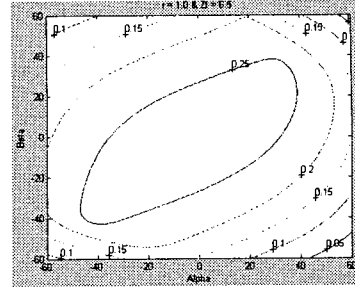


Fig. 9(d) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.0$; $z_t=6.5$

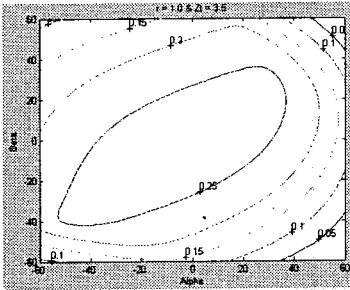


Fig. 9(b) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.0$; $z_t=3.5$

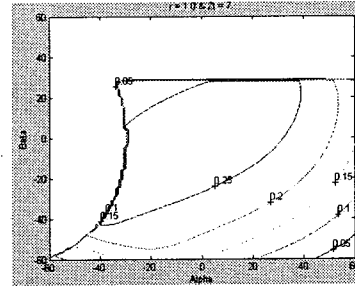


Fig. 9(e) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.0$; $z_t=7$

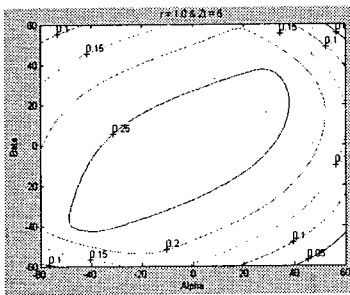


Fig. 9(c) Contour plots of σ_{KI} when $r=1.0$; $z_t=5$

3. 결론

본 논문에서는 스트리트 플랫폼과 유사한 구조를 이용하는 새로운 공간형 3자유도 병렬 메커니즘을 제안하였다. 먼저, 제시된 메커니즘의 위치해석을 수행하고 정위치 해석해를 가지는 구조를 제시하였다. 그리고 이들 두 메커니즘의 작업 공간 내에서의 기구학특성을 등방성 지수를 사용하여 조사하였으며 이를 통하여 본 논문에서 제시된 공간형 3자유도 메커니즘들이 기존의 RPS형 또는 PSP형 3자유도 메커니즘들^{4,6}과 비교하여 유사한 크기의 작업공간과 기구학 등방성 특성을 가지고 있는 것을 확인하였다.

결론적으로, 본 논문에서 제시된 메커니즘은 기존의 공간형 3 자유도 병렬 메커니즘과는 달리 정위치 해석해가 존재하는 구조를 가질 뿐 만 아니라 출력공간이 PRR 직렬형 3자유도 메커니즘의 출력공간으로 한정(하나의 병진운동(z_t))과 두 개의 회전

운동(α, β)되는 특성으로 인하여 다양한 혼합형 로봇의 모듈로서 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 현재 본 연구자들은 본 논문에서 제시된 공간형 3 자유도 메커니즘과 유사한 개념의 스튜워트 구조를 활용하는 출력공간이 선형 3 자유도 공간을 가지는 구조와 구형 3 자유도 공간을 가지는 구조를 포함한 다양한 3 자유도 병렬 메커니즘의 구조 및 그 활용에 대한 연구를 수행하고 있다.

Mechanism Platform," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 7, pp.19-26, 2001.

후 기

“고려대학교 특별 연구비에 의하여 수행되었음”

참고문헌

1. Lee, K. M. and Shah, D. K., "Kinematic Analysis of a Three Degrees of Freedom In-Parallel Actuated Manipulator," Proceedings of IEEE Int'l conf. of Robotics and Automation, pp345-350, 1987.
2. Lee, K.M. and Shah, D.K., "Dynamic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 3, pp.361-367, 1988.
3. Zhao, M., Gui, T., Chao, G., LI, Q. and Tan, D., "Development of A Redundant Robot Manipulator Based on Three DOF Parallel Platforms," IEEE Int'l conf. on Robotics and Automation, pp. 221-226, 1995.
4. Kim, W.K., Yi, B.J. and Tosunoglu S., "Study on the Kinematic Characteristics of A New 3 Degree-of-Freedom Parallel Mechanism," '98 WAC conf. 1998.
5. Kim, W.K., Tosunoglu S. and Yi, B.J., "Geometric/Kinematic Characteristics of 6 Degree-of-Freedom Hybrid Mechanisms with Forward Closed-Form Position Solutions," '98 WAC conf. 1998.
6. Kim, W.K., Lee, J.Y. and Yi, B.J., "Analysis on Kinematic Characteristics of Two Types of 3 Degree-of-Freedom Parallel Manipulators," '96 Conf. on Robotics. System & Automation, Korea, April, 1996.
7. Kim, J.S and Kim, J.W., "Eclipse:A New Parallel