

# 평면형 3 자유도 병렬 메카니즘의 정밀도 특성에 관한 연구

## Study on the Precision Characteristics of a Planar 3 Degrees-of-Freedom Parallel Mechanism

김재섭(고려대 대학원), 김희국(고려대 제어계측공학과), 조황(광운대 제어계측공학과)  
Jae Seoub Kim(Graduate School, Korea Univ.), Whee Kuk Kim(Korea University),  
Whang Cho(Kwangwoon Univ.)

### ABSTRACT

In this paper, output precision characteristics of planar 3 and 6 degree-of-freedom parallel mechanisms are investigated. The 6 degree-of-freedom mechanism is formed by adding an additional small link along with an actuated joint in each of serial subchain of the 3 degree-of-freedom mechanism. First, kinematic analysis for two parallel mechanisms are performed, then their first-order kinematic characteristics are examined via isotropic index and minimum velocity transmission ratio of the mechanisms. It can be concluded that the planar 6 degrees-of-freedom parallel mechanism can be very effectively employed as a high-precision macro-micro manipulator from the analysis results when its link lengths are properly chosen.

**Keywords** : Planar(평면의), Mechanism(메카니즘), Isotropic Index(등방성지수), Micro-manipulator(극소형 로봇), Precision Characteristics(정밀도특성)

### 1. 서론

일반 산업용 또는 상용 로봇 매니플레이터의 대부분은 외팔보 형태의 직렬구조를 가지고 있으며 이로 인한 로봇 끝단에서의 변형(deformation)을 최소화하기 위하여 로봇 링크들의 관성중량은 매우 크게 제작된다. 그러므로, 로봇 말단에서 발생하는 위치 오차를 수정하기 위해서는 고중량의 구동액츄에이터들과 로봇링크들을 구동하게 됨으로써 많은 구동전력이 요구될 뿐만 아니라 고정밀도를 유지하기가 매우 어렵다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 로봇(대형) 말단에 소형 로봇을 부착하고 이를 활용하여 로봇말단에서의 미세한 운동을 제어하는 방안이 활용되고 있다. 특히, 소형 로봇 매니플레이터는 독자적으로 미세한 운동의 제어에 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 대형 매니플레이터의 끝단에 부착되어 미세한 운동을 제어함으로써 전체 로봇 매니플레이터의 정밀도를 향상시키기 위한 목적으로 많이 활용되고 있으므로 극소형 매니플레이터(micro-manipulator)라고 불리운다. 이러한 극소형 로봇에 요구되는 주요특성은 작업공간의 크기는 적을 지라도 대형 로봇과 동일한 크기의 적재하중을 제어할 수 있어야 하며 대형 로봇보다 빠르고 정밀한 운동을 수행할 수 있어야 한다. 그러므로, 이러한 극소형 매니플레이터는 주로 piezoelectric 액츄에이터를 사용하거나,<sup>(1)</sup> magnetic field를 이용하고 있다.<sup>(2)</sup>

한편, 극소형 로봇의 구조는 주로 병렬형 구조가 활용되고 있다. 이것은 병렬형 로봇의 경우 여러개의 구속체인으로 인하여 직렬형 로봇에 비하여 작업공간은 적지만 큰 적재하중용량과 높은 강성을 가지

므로 고정밀도를 필요로 하는 작업에 더 적합하기 때문이다. 한 예로서, 최근에 비행 시뮬레이터로서 활용되고 있는 스텔트 플랫폼 구조를 활용하는 소형의 매니플레이터가 안과시술에 사용될 수 있도록 제작되었으며 성공적인 성능을 보이는 것으로 문헌에 보고되고 있다.<sup>(3)</sup>

그러나, 이러한 극소형 매니플레이터들은 주로 직렬구조 또는 병렬구조 로봇의 끝단에 부착되어 활용되고 있다. 이러한 매크로-마이크로 로봇의 가장 간단한 구조인 두개의 링크로 이루어진 직렬 매니플레이터의 말단에서의 최대가속도를 내기 위한 소형 로봇과 대형로봇의 링크길이비( $l/l$ )의 선택에 관한 연구가 Salisbury와 Abramowitz에 의해 수행한 바 있다.<sup>(4)</sup> 그리고 최근에는 대형 로봇으로부터 발생하는 진동으로 인한 오차를 보완하기 위해 로봇말단에 부착된 소형의 매니플레이터를 활용하는 연구가 발표되었다.<sup>(5)</sup>

이상과 같이 대형 로봇에 의해 발행된 오차를 소형 로봇이 수정하는 이러한 형태의 제어를 국소적 제어(control in the small)라 부르며 본 연구에서는 이러한 제어에 적합한 로봇의 구조와 그 기구학적 성능에 관하여 조사한다.

국소적 제어에 적합한 구조는 두 가지 형태의 구조를 고려할 수 있는 데, 첫째는, 이미 앞에서 언급한 바와 같이 대형 로봇의 말단에 소형 매니플레이터를 부착하는 직렬 또는 혼합구조의 형태이며, 둘째는, 병렬구조를 가지는 대형 로봇 매니플레이터의 각 직렬 부속체인에 또 하나의 소형 구동 관절과 링크를 부착하는 병렬구조의 형태를 고려할 수 있다.

최근에, 평면형 3 자유도 병렬구조 로봇의 각 부속관절에 매우 짧은 크기의 링크와 구동관절을 추가

로 부착함으로써 매니플레이터의 정밀도를 향상시키기 위한 기초적인 연구가 동역학적 특성을 중심으로 수행된 바 있으며<sup>(6)</sup> 이로부터 이러한 시스템이 정밀도의 측면에서 매우 향상된 성능을 가질 수 있다는 사실을 보였다. 그러나, 기구학적 특면에서의 보다 심도 깊은 연구가 보완되어야 한다. 그러므로, 본 연구에서는 이러한 미비점을 보완하고자 국소적 제어에 적합한 매니플레이터의 기구학적 설계에 관한 연구를 수행하고자 한다.

본 논문의 내용은 다음과 같이 요약된다. 먼저, Fig. 1과 같은 직렬구조를 가지는 국소적 제어 특성을 가지는 로봇에 관한 해석을 수행한다. 그리고, Fig. 2와 같은 평면형 3 자유도 병렬 메카니즘의 각 직렬부속체인에 소형의 잉여 구동관절과 링크를 부착하면 Fig. 3과 같은 평면형 6 자유도 병렬 메카니즘이 얻어지는 데 이 메카니즘의 기구학 해석과 기구학 특성에 관한 분석을 수행한다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 국소적 제어특성에 적합한 소형 메카니즘 구동 관절의 위치 및 추가적인 소형 구동관절의 링크길이에 따른 메카니즘의 일차 기구학적 특성에 관하여 조사한다.

## 2. 직렬구조 메카니즘의 국소적 제어 특성

Figure 1은 대형의 직렬구조 로봇의 끝단에 소형의 직렬구조 매니플레이터가 부착된 국소적 제어 특성을 가지는 평면형 6-자유도 로봇시스템을 나타낸다. 입력 관절  $n$ (관절변수  $\phi_n$ )에 대한 로봇 끝단에서의 선형속도에 대한 일차영향계수는<sup>(7)</sup>

$$[G'_{\phi}]_{;n} = (P_e - R_n) \times s_n \quad (1)$$

$s_n$  : 미끄럼관절  $n$

로 표현되며 회전속도에 대한 일차 영향계수는 다음과 같이 표현된다.

$$[G''_{\phi}]_{;n} = \begin{matrix} s_n & \text{회전관절 } n \\ 0 & \text{미끄럼관절 } n \end{matrix} \quad (2)$$

여기서  $[G'_{\phi}]_{;n}$ 와  $[G''_{\phi}]_{;n}$ 는 각각 선형운동방향과 회전운동방향의 일차영향계수(자코비안)의  $n$ 번째 열의 모든 요소들을 나타낸다.  $s_n$ 은  $n$ 번째 회전관절축 방향으로의 단위벡터를,  $P_e$ 와  $R_n$ 은 각각 기준좌표계의 원점에서부터 로봇 말단위치까지의 위치벡터와  $n$ 번째 링크에 고정된  $n$ 번째 국부 좌표계 원점까지의 절대위치벡터를 나타낸다. 그러므로  $(P_e - R_n)$ 은  $n$ 번째 국부좌표계의 원점으로부터 로봇 말단위치까지의 절대위치벡터를 나타낼 수 있다.

이 식들로부터 로봇 말단의 위치에서 회전속도에 대한 일차영향계수는 메카니즘의 링크길이의 함수가 아니므로 회전운동의 경우는 이러한 직렬형 구조로서는 효과적인 국소적 제어특성을 얻을 수 없다는 것을 알 수 있다. 반면에, 선형속도에 대한 일차영향계수는 입력관절이 회전관절인 경우에  $(P_e - R_n)$ 의 함수로 표현되므로, 링크길이를 조절함으로써 변화될 수 있다는 것을 알 수 있다.

특히, 소형 3자유도 매니플레이터의 링크길이가 대형 3자유도 메카니즘의 링크길이에 비하여 대단히 적도록 설정하고 소형 매니플레이터의 모든 관절이

회전관절인 경우에, 로봇 말단위치에서의 미소변위는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_e = [G'_{\phi}]_L \Delta \phi_L + [G'_{\phi}]_S \Delta \phi_S \quad (3)$$

위 식에서  $\Delta \phi_L$ 과  $\Delta \phi_S$ 는 각각 대형 구동관절의 미소변위벡터와 소형 구동관절의 미소변위벡터를 나타내며  $[G'_{\phi}]_L$ 과  $[G'_{\phi}]_S$ 는 이들 각각의 변수에 대한 선형운동에 관한 일차영향계수들을 나타낸다. 여기서, 대형 매니플레이터의 링크길이는 모두 비슷한 크기를 가지며 소형 매니플레이터의 링크길이는 모두 비슷한 크기를 가진다고 가정하자. 그리고 이때  $L$ 과  $l$ 을 각각 대형 그리고 소형 매니플레이터의 링크길이를 나타낸다고 할 때, 식 (3)에서의 일차영향계수들의 놈(norm) 사이의 관계는 대략 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\|[G'_{\phi}]_S\|}{\|[G'_{\phi}]_L\|} \approx \frac{l}{L} \quad (4)$$

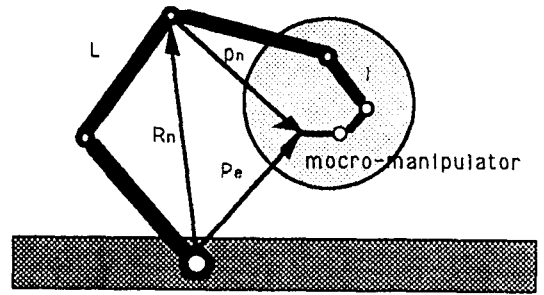


Fig. 1. A planar 6 degree-of-freedom manipulator

## 3. 병렬구조 메카니즘의 기구학적 해석

Figure 2는 병렬형 매니플레이터에 관한 연구에 많이 활용되는 전형적인 3 자유도 평면형 병렬 메카니즘을 나타낸다. 그리고 Fig. 3은 Fig. 2의 각 직렬 부속체인에 또 하나의 회전관절과 링크를 부착한 메카니즘을 나타내며 세개의 대형 구동관절과 세개의 소형 구동관절을 가지고 있다. 그러나, 이 메카니즘은 Fig. 2의 메카니즘과는 달리 3 개의 여유자유도를 가지는 평면형 6 자유도 메카니즘이 된다. 본 절에서는 이러한 두 메카니즘의 기구학적 해석을 수행한다.

### 3.1 평면형 3 자유도 메카니즘의 기구학 모델링<sup>(8)</sup>

본 연구에서 조사하려는 메카니즘은 Fig. 2와 같이 지면과 플랫폼 사이에 세 개의 관절과 두 개의 링크로 구성되는 세 개의 직렬형 부속체인으로 이루어진다.  $r$ 번째 직렬형 부속체인에서 지면으로부터  $n$ 번째 관절변수를  $\phi_n$ 이라고 하자. 그리고  $r$ 번째 직렬형 부속체인의  $n$ 번째 링크의 길이를  $l_n$ 이라고 하자. 이 때 플랫폼 중앙의 위치를 나타내는 출력벡터를  $u = (x \ y \ \psi)^T$ , 그리고  $r$ 번째 부속체인

의 관절변수벡터를  $r\phi = ({}^r\phi_1, {}^r\phi_2, {}^r\phi_3)^T$ 라고 할 때, 이들 사이의 일차 미분관계식은 다음과 같다.

$$\dot{u} = [{}_rG_\phi^u] {}^r\dot{\phi}, \quad r=1,2,3. \quad (5)$$

각 부속체인의 일차 미분계수  $[{}_rG_\phi^u]$ 가 비특이 할 때 역관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$${}^r\dot{\phi} = [{}_rG_\phi^u]^{-1} \dot{u}, \quad r=1,2,3. \quad (6)$$

이 식으로부터 각 체인의 첫번째 관절변수들로 이루어진 벡터  $\phi_b = ({}^1\phi_1, {}^2\phi_1, {}^3\phi_1)^T$ 를 입력관절 변수 벡터라고 할 때 출력벡터와의 입출력 미분관계식은 다음과 같이 주어지며

$$\dot{\phi}_b = [G_u^b] \dot{u}, \quad (7)$$

여기서

$$[G_u^b] = \begin{bmatrix} [{}_1G_\phi^u]^{-1} \\ [{}_2G_\phi^u]^{-1} \\ [{}_3G_\phi^u]^{-1} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$[{}_iG_\phi^u]^{-1}$ 는  $[{}_iG_\phi^u]$ 의 첫번째 행을 의미한다. 식 (8)의 역관계식은 아래와 같이 구해진다.

$$\dot{u} = [G_b^u] \dot{\phi}_b \quad (9)$$

여기서

$$[G_b^u] = [G_u^b]^{-1}. \quad (10)$$

이와 동일한 방법으로 각 체인의 두번째 관절변수들로 이루어진 벡터  $\phi_m = ({}^1\phi_2, {}^2\phi_2, {}^3\phi_2)^T$ 와 각 체인의 세번째 관절변수들로 이루어진 벡터  $\phi_t = ({}^1\phi_3, {}^2\phi_3, {}^3\phi_3)^T$ 의 일차 기구학적 영향계수 (자코비안)는 위와 같은 방법으로 구할 수 있다.

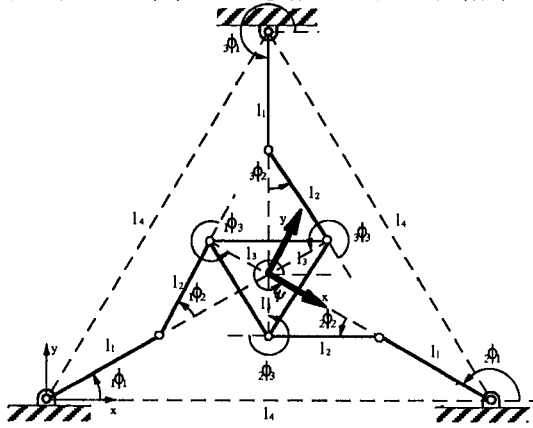


Fig. 2. A planar 3-degree-of-freedom manipulator

한편, 입력토크벡터와 출력힘벡터를 각각  $\tau_b = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ 와  $f_u = [f_x, f_y, \tau_\phi]^T$ 라고 할 때 가상 일의 정리에 의하여 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\tau_b = [G_b^u]^T f_u \quad (11)$$

식 (9)와 식 (11)에 Rayleigh's 정리를 이용하면 출력속도와 출력힘과는 역관계가 존재한다는 사실을 확인할 수 있다.

### 3.2 평면형 6 자유도 메카니즘의 기구학 모델링<sup>(9)</sup>

먼저 Fig. 3에 도시된 평면형 6 자유도 메카니즘에서  $\phi_b$ 와  $\phi_s$ 가 각각 다음과 같이 대형 구동관절 벡터와 소형 구동관절벡터를 나타낸다고 하자.

$$\phi_b = [{}^1\phi_1, {}^2\phi_1, {}^3\phi_1]^T, \quad (12)$$

$$\phi_s = [{}^1\phi_3, {}^2\phi_3, {}^3\phi_3]^T \quad (13)$$

이 때, 이 메카니즘의 전체 입력벡터는

$$\phi_a = [\phi_b^T, \phi_s^T]^T \quad (14)$$

로 표현된다.

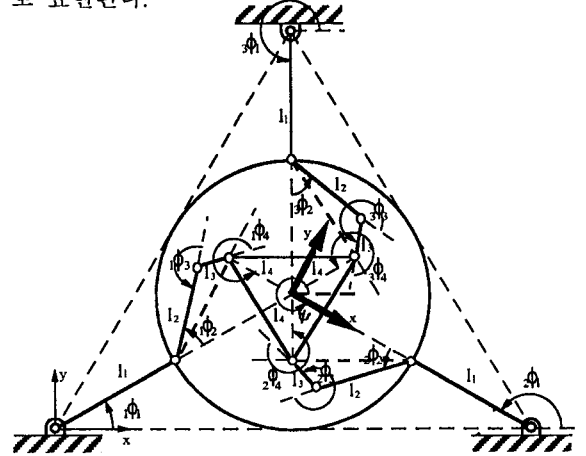


Fig. 3. A planar 6-degree-of-freedom parallel manipulator

평면형 6 자유도 메카니즘의 출력속도벡터와  $r$ 번째 직렬 부속체인의 관절속도벡터와의 관계식은 각각

$$\dot{u} = [{}_rG_\phi^u] {}^r\dot{\phi}, \quad r=1,2,3 \quad (15)$$

로 표현되며 이 식들은 다음과 같이 관절속도변수들에 대한 두 개의 구속관계식으로 나타내어진다.

$$[{}_1G_\phi^u] {}^1\dot{\phi} = [{}_2G_\phi^u] {}^2\dot{\phi} \quad (16)$$

$$[{}_1G_\phi^u] {}^1\dot{\phi} = [{}_3G_\phi^u] {}^3\dot{\phi} \quad (17)$$

$r$ 번째 직렬부속체인의 관절벡터를 각각 독립속도벡터와 비독립속도벡터로 다음과 같이 나타낸다고 할 때,

$${}^r\dot{\phi} = \begin{bmatrix} {}^r\dot{\phi}_a \\ {}^r\dot{\phi}_d \end{bmatrix} \quad (18)$$

식 (16)과 식 (17)은 다음과 같이 표현된다.

$$[{}_1G_d] {}^1\dot{\phi}_a + [{}_1G_d] {}^1\dot{\phi}_d = [{}_2G_d] {}^2\dot{\phi}_a + [{}_2G_d] {}^2\dot{\phi}_d \quad (19)$$

$$[{}_1G_d] {}^1\dot{\phi}_a + [{}_1G_d] {}^1\dot{\phi}_d = [{}_3G_d] {}^3\dot{\phi}_a + [{}_3G_d] {}^3\dot{\phi}_d \quad (20)$$

위 식에서  ${}^r\dot{\phi}_a$ ,  ${}^r\dot{\phi}_d$  그리고  $\dot{u}$ 의 크기가 각각  ${}^rN_a \times 1$ ,  ${}^rN_d \times 1$ ,  $N_u$ 라고 할 때  $[{}_rG_a]$ 와  $[{}_rG_d]$ 는  $N_u \times {}^rN_a$ 과  $N_u \times {}^rN_d$ 의 크기를 갖는 행

렬들로 표현된다. 식 (19)와 식 (20)은 다음과 같은 하나의 행렬식으로 표현할 수 있으며

$$[G_d] \dot{\phi}_d = [G_a] \dot{\phi}_a \quad (21)$$

여기서

$$\dot{\phi}_a = ( {}_1\dot{\phi}_a \quad {}_2\dot{\phi}_a \quad {}_3\dot{\phi}_a )^T, \quad (22)$$

$$\dot{\phi}_d = ( {}_1\dot{\phi}_d \quad {}_2\dot{\phi}_d \quad {}_3\dot{\phi}_d )^T \quad (23)$$

$$[G_a] = \begin{bmatrix} [{}_1G_a] & -[{}_2G_a] & 0 \\ [{}_1G_a] & 0 & -[{}_3G_a] \end{bmatrix}, \quad (24)$$

그리고

$$[G_d] = \begin{bmatrix} -[{}_1G_d] & [{}_2G_d] & 0 \\ -[{}_1G_d] & 0 & [{}_3G_d] \end{bmatrix} \quad (25)$$

이다. 그러므로 식 (21)로부터 비독립관절 속도벡터

$\dot{\phi}_d$ 와 독립관절 속도벡터  $\dot{\phi}_a$ 사이의 관계식은

$$\dot{\phi}_d = [G_a^d] \dot{\phi}_a \quad (26)$$

로 표현되며, 여기서

$$[G_a^d] = [G_a]^{-1} [G_d] \quad (27)$$

이다. 한편, 식 (26)에서 각 부속체인의 비독립관절 속도벡터가 각각

$${}_r \dot{\phi}_d = [{}^r G_a^d] \dot{\phi}_a, \quad r=1,2,3 \quad (28)$$

로 나타낼 수 있으므로  $[G_a^d]$ 는

$$[G_a^d] = \begin{bmatrix} [{}^1 G_a^d] \\ [{}^2 G_a^d] \\ [{}^3 G_a^d] \end{bmatrix} \quad (29)$$

로 표현될 수 있다. 그러므로 식 (18)과 (29)를 이용하면

$${}_r \dot{\phi} = [{}^r G_a^d] \dot{\phi}_a \quad (30)$$

을 얻을 수 있으며 여기서

$$[{}^r G_a^d] = \begin{bmatrix} \delta_{1r}[I] & \delta_{2r}[I] & \delta_{3r}[I] \\ [{}^r G_a^d] \end{bmatrix} \quad (31)$$

으로 표현되며  $\delta_{ir}$ 은

$$\delta_{ir} = \begin{cases} 0 & \text{for } i \neq r \\ 1 & \text{for } i = r \end{cases} \quad (32)$$

로 정의되는 Dirac Delta 함수를 나타낸다. 최종적으로 입출력 속도 관계식은 식 (15)에 식 (30)을 대입함으로써 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{u} &= [{}_r G_a^d] {}_r \dot{\phi} \\ &= [{}_r G_a^d] [{}^r G_a^d] \dot{\phi}_a \\ &= [G_a^d] \dot{\phi}_a \end{aligned} \quad (31)$$

식 (31)를 대형 구동입력과 소형 구동입력으로 구분하여 표현하면

$$\dot{u} = [G_p^d] \dot{\phi}_p + [G_s^d] \dot{\phi}_s \quad (32)$$

로 정리되며 여기서 국소적 제어특성을 만족하기 위하여서는 다음의 조건을 만족시키야 한다.

$$\sigma_{\max}([G_s^d]) \ll \sigma_{\min}([G_p^d]) \quad (33)$$

이 조건은 대형 구동입력과 소형 구동입력으로 인한 출력에서의 속도 전달 특성이 서로 다르며 소형 구동입력과 출력의 최대 속도 전달비가 대형 구동입력과 출력의 최소 속도 전달비보다 매우 작어야 함을 나타낸다. 이러한 조건이 성립될 때 대형 구동입력

이 매크로 운동을 수행하고 소형 구동입력은 세밀한 운동을 수행할 때 매우 효과적인 성능을 발휘할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 힘과 속도의 dual 관계로부터 이러한 경우 소요되는 소형 구동입력의 크기는 대형 구동입력에 비해 상대적으로 매우 작다는 것을 알 수 있으며 이로 인해 동역학적 성능에 커다란 저하를 가져오지 않을 것이라 사실을 예측할 수 있다.

#### 4. 기구학적 성능지수

입출력 속도 전달비는 메카니즘의 정밀제이에 직접적인 연관이 있으므로, 본 연구에서는 작업공간의 크기, 최대/최소 입출력 속도전달비, 그리고 기구학적 등방성지수와 같은 몇가지의 기하학적/기구학적 성능지수에 근거하여 메카니즘의 기구학적 성능을 판별하고자 하며 이들 각각은 다음과 같이 정의된다.

##### 4.1 최대/최소 입출력 속도 전달비

로봇 매니플레이터의 임의의 위치에서의 최대/최소 입출력속도 전달비는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\sigma_{MXV} = \sigma_{\max} [G_a^u] \quad (34)$$

$$\sigma_{MNV} = \sigma_{\min} [G_a^u] \quad (35)$$

여기서  $[G_a^u]$ 는 입력변수벡터와 출력변수벡터사이의 일차 기구학적 영향계수를 나타내고  $\sigma_{\max}$ 와  $\sigma_{\min}$ 는 각각  $[G_a^u]$ 의 최대, 최소 특이값을 나타낸다.

##### 4.2 기구학적 등방성지수

작업공간내에서 기구학적 등방성특성을 조사하기 위하여 다음과 같이 정의되는 기구학적 등방성지수를 사용한다.

$$\sigma_{KI} = \frac{\sigma_{\min}([G_a^u])}{\sigma_{\max}([G_a^u])} \quad (36)$$

이러한 정의로부터  $\sigma_{KI}$ 의 값은 항상 단위값보다 작으며 단위값에 가까울 수록 모든 출력 방향으로 균일한 속도 전달 특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 식 (34)-(36)에서  $[G_a^u]$ 에서 아래첨자  $a$ 는 대형구동관절벡터에 관련된 경우에는  $p$  그리고 소형구동관절벡터에 관련된 경우에는  $s$ 를 각각 나타낸다.

#### 5. 시물레이션

Fig. 3에서 각 직렬체인의 링크길이  $l_3$ 는 모두 같으며(즉,  $l_3 = l_3$  for  $r=1,2,3$ ),  $l_3$ 를 제외한 모든 링크길이의 크기가 각각 단위값을 갖는다고 가정한다. 그리고 각 직렬부속체인의 기저 관절축으로부터 유동관의 중앙점까지의 거리를 2로 고정한다. 이 메카니즘이 여유자유도를 가지므로 편의상,

출력위치벡터가 매카니즘의 중앙에 위치하며 ( $x=y=0$ ) 출력방위각( $\psi$ )이 0의 값을 갖는 형상에 관하여 해석을 수행하였다. 이상과 같은 조건을 만족시키는 형상에서 Fig. 4a)와 4b)는 각각 링크길이  $l_3$ 의 크기를 변화할 때 대형구동입력과 소형구동입력에 대한 최소 출력 속도 전달비와 등방성지수 값을 나타내는 그림이다. 이 그림으로부터  $l_3$ 의 크기가 감소할수록 대형 구동입력에 비하여 소형구동입력으로 인한 출력력 속도전달비가 매우 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 대형 구동입력에 비하여 소형 구동입력을 이용하여 출력위치에서의 높은 정밀도를 얻어낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

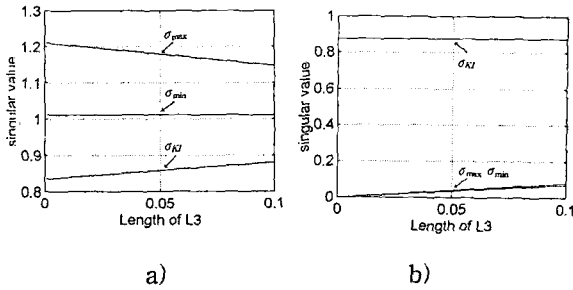


Fig. 4. Kinematic index plots

- a)  $\sigma_{max}([G_p^u]), \sigma_{min}([G_p^u]), \sigma_{KK}([G_p^u])$
- b)  $\sigma_{max}([G_s^u]), \sigma_{min}([G_s^u]), \sigma_{KK}([G_s^u])$

한편, Fig. 2의 매카니즘에 있어서 각 직렬부속체인 기저 관절축으로부터 유동판의 중앙점까지의 거리를 2로 고정하고  $l_3$ 가 단위 값을 갖는다고 가정한다. Fig. 5는  $l_2$ 의 변화에 따른 작업공간의 크기를 나타내는 등고선 그림이다. 편의상 회전편위  $\psi=0^\circ$ 에 대한 선형변위( $x, y$ )의 작업공간을 나타내었다. Fig. 6a)와 6b)는 링크길이비( $l_2/l_1$ )가 0.01 일 때 이에 해당하는 매카니즘의 작업공간의 크기를 나타낸다. 이 그림에서  $x$ 축과  $y$ 축은 각각 매카니즘의 출력위치( $x, y$ )를,  $z$ 축은 출력회전각  $\psi$ 를 나타내며 각 출력위치( $x, y$ )에서의 최대 회전각과 최소회전각을 각각 3차원그림으로 나타내었다. 이 두 그림들을 함께 연결함으로써 매카니즘의 작업공간의 형태와 크기를 쉽게 확인할 수 있다. 다른 링크길이비( $l_2/l_1$ )의 경우도 이와 유사한 형태의 작업공간을 가지며 그 크기는 링크길이비가 단위값인 경우에 최대의 크기를 가지며 링크길이비가 적어지거나 커지는 경우에는 감소하는 경향을 가지고 있다.

Figure 7a)와 7b), Fig. 8a)와 8b)는 각각 Fig. 2와 같은 매카니즘에서 링크길이의 비( $l_2/l_1$ )를 각각 1과 0.01로 고정하였을 때 매카니즘의 중앙점에서의 최소 특이값과 등방성지수값을  $l_1$ 과  $\psi$ 에 관하여 나타낸 그림이다. 그리고 또한, 최소 특이값과 등방성지수를 나타내는 이상의 그림들로부터 매카니즘의 길이비( $l_2/l_1$ )가 감소할수록 작업공간의 크기가 감

소되며 또한 입출력 속도 전달비도 감소된다는 것을 확인할 수 있으며 이는 역으로 높은 입출력 힘/토크 전달비를 가진다는 것을 의미한다. 그러므로, 매카니즘의 길이비( $l_2/l_1$ )가 적은 매카니즘이 높은 적재하중용량을 가질 뿐만 아니라 높은 정밀도를 가진다는 사실을 확인할 수 있다. 또한, 이상의 시뮬레이션에서는 구동입력관절의 위치가 두 번째 관절에 있는 경우에 한하여 기술하였으나, 각각 첫 번째와 세 번째 관절에 있는 경우도 조사하였으며 특히, 세 번째 관절에 있는 경우는 모든 기구학적 특성이 두 번째 관절에 있는 경우와 대체로 유사한 경향을 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 첫 번째 관절에 있는 경우는 상대적으로 매우 큰 최소 속도 전달비를 가지는 것으로 나타났으며 이는 고정밀도를 갖는 매니플레이터의 구조에 적합치 않은 것을 의미한다. 이와 같은 시뮬레이션의 결과는 편의상 본 논문에서는 생략하였다.

마지막으로, 이상의 모든 시뮬레이션에서는 각각의 모든 출력방향으로의 가중치가 동일하다고 가정하였으나, 실제 시스템의 설계에 있어서는 각 출력공간에서 요구되는 최대 하중의 크기에 따라 적절한 가중치가 설정되어야 하며 이에 해당하는 매카니즘의 최적인자들을 설정하면 된다.<sup>(10)</sup>

## 6. 결론

본 연구에서는 국소적 제어를 수행할 수 있는 로봇 매니플레이터의 구조로서 기존의 대형 로봇 매니플레이터의 끝단에 소형의 병렬형 매니플레이터를 부착하는 형태와는 달리 병렬형 구조의 각 직렬부속체 내에 소형의 잉여 구동관절과 링크를 부착하는 형태를 고려하였다. 한 예로서, 평면형 3자유도 병렬구조의 매카니즘에 추가적인 링크와 구동입력을 설치한다고 가정하고 이 매카니즘의 기구학적 해석과 링크길이와 구동입력의 위치변화에 관한 기구학적 특성을 조사하였다.

이상과 같은 연구는 국소적 제어가 가능한 매니플레이터 매카니즘의 구조를 활용함으로써 정밀도를 향상시킬 수 있다는 것을 보였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 평면형 3자유도 병렬매카니즘의 각 직렬부속체 내에 아주 짧은 링크와 소형 구동 입력을 가함으로서 구성된 병렬구조의 매크로-마이크로 로봇은 아주 우수한 국소적 제어 특성을 나타낸다.
- 2) Fig.2와 같은 매카니즘은 링크길이의 비를 적절하게 설정함으로써 로봇말단에 부착되는 극소형 매니플레이터로서(micro manipulator) 고정밀 조립작업이 요구되는 자동화 작업에 유효하게 활용될 수 있다.

한편, 병렬구조로 인한 높은 강성은 매카니즘의 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있기 때문에 이러한 병렬구조의 매크로-마이크로 로봇 매카니즘은 매우 우수한 매크로-마이크로 로봇의 특성을 나타낼 것으로 기대된다. 마지막으로, 본 연구에서는 평면형 3자유도 병렬구조의 매니플레이터에 국한하여 연구를 수행하였지만 이러한 연구결과는 일반적인 병렬구조를 갖는 매니플레이터에도 적용될 수 있다.

## 참고문헌

1. Y. Yamagata, T.Higuchi, "A Micropositioning Device

for Precision Automatic Assembly Using Impact Force of Piezoelectric Elements," IEEE Int'l conf. Robotics & Automation, 1995, pp. 666-671.

2. T. Inoue, K. Iwatani, I. Shimoyama, H. Miura, "Micromanipulation Using Magnetic Field," IEEE Int'l conf. Robotics & Automation, 1995, pp. 679-684.
3. K.W. Grace, et. al., "A Six Degree of Freedom Micromanipulator for Ophthalmic Surgery," IEEE Int'l conf. Robotics & Automation, 1993, pp. 630-635.
4. Salisbury, J.K. and Abramowitz, J.D., "Design and Control of a Redundant Mechanism for Small Motion," IEEE Int. Conf. Robotics and Automations, 1985, pp. 323-328.
5. J.Y. Lew, et. al. "Micro Manipulator Motion Control to Suppress Macro-Manipulator Structural Vibration," IEEE Int'l conf. Robotics & Automation, 1995, pp. 3116-3120.
6. Whang Cho, "Development of a Dynamic Modeling Technique and Its Application To the analysis and Control of A High Precision Robotic Manipulator," Ph.D. dissertation, Univ. of Texas, at Austin, 1989.
7. Thomas, M. and Tesar, D., "Dynamic Modeling of Serial Manipulator Arms," Trans. ASME 1982, Sep. Vol.104, pp 218-227.
8. Freeman, R.A., "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mecnanisms/Robotic System: Part I-Methology, Part II-Applications," Proc. 20th ASME Mechanisms Conf., Orlando, FL.
9. H.J.Kang, B.J.Yi, W.Cho, R.A. Freeman, "Constraint-embedding Approaches for General Closed-Chain System Dynamics in Terms of A Minimum Coordinate Set," 1990, ASME Conf. Proceedings of Flexible Mech. Dyn. and Robot Trajectories, DE-Vol.24, pp. 125-132.
10. Whee-kuk Kim, K.K. Huh, B.J. Yi, and Whang, Cho, "Optimal Synthesis of a Wrist-Type 6 Degree-of-Freedom Force/Torque Sensor Using Stewart Platform Structure," KSME Journal, Vol. 9, No. 4, 1995, pp. 462-471.

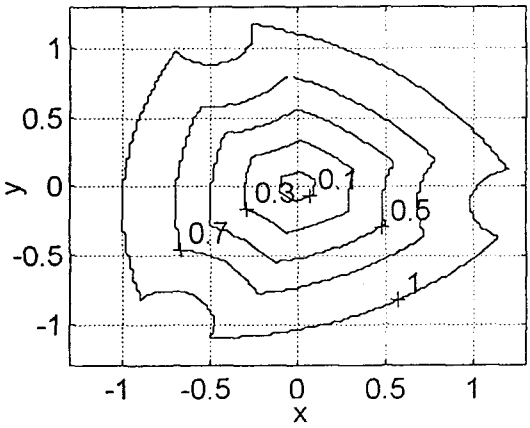
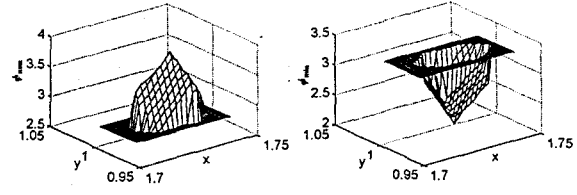
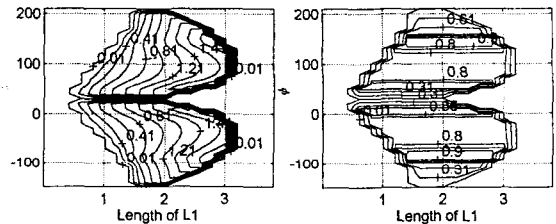


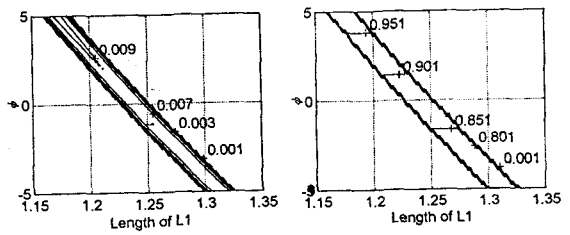
Fig. 5. Workspace contour in  $x-y$  plane for  $\psi=0^\circ$



a)  $\psi_{\max}$  contour b)  $\psi_{\min}$  contour  
Fig. 6. Workspace contour for  $l_2/l_1=0.01$



a)  $\sigma_{\min}$  b)  $\sigma_{KI}$   
Fig. 7.  $\sigma_{\min}$  and  $\sigma_{KI}$  plots for  $l_2/l_1=1$



a)  $\sigma_{\min}$  b)  $\sigma_{KI}$   
Fig. 8.  $\sigma_{\min}$  and  $\sigma_{KI}$  plots for  $l_2/l_1=0.01$