

# 가변형 병렬기구에 대한 작업공간과 힘/모멘트 전달 특성 해석

## Workspace and Force-Moment Transmission of a Parallel Manipulator with Variable Platform

이 세 한\*, 김 병 창  
(Se-Han Lee and Byoung-Chang Kim)

**Abstract** : Kinematic and dynamic characteristics of a Stewart platform based parallel manipulators are fixed once they are constructed. Thus parallel manipulators with various configurations are required to meet a variety of applications. In this research a parallel manipulator with variable platform (PMVP) has been developed, in which the length of the arm linking the platform center to the platform-leg contact point can be varied by an actuator. The workspace of the PMVP is larger than that of a traditional Stewart platform and especially the range in which the maximum orientation angles can be maintained is significantly expanded. Furthermore, the characteristics of force and moment transmission between the legs and platform can be adjusted to meet the requirements of various tasks. Kinematic and dynamics analysis was performed to verify the usefulness of the PMVP and the actual hardware was built to demonstrate the feasibility.

**Keywords** : Stewart-Gough parallel manipulator, variable platform, condition number, moment transmission

### I. 서론

스튜어트 플랫폼(Stewart platform) 형태의 병렬기구[1]는 높은 강성, 높은 정밀도, 고속 동작 등 여러 장점으로 인해서, 많은 응용 사례들이 발표되고 있다. 대표적인 응용 사례로, 비행 시뮬레이터, 고정밀 공작 기계, 채광 기계[2], 운동 감각 평가용으로 제안된 운동 시뮬레이터[3] 등이 있다. 그리고 이론에 관련된 연구들로, 특정 형태의 병렬기구에 한정하여, 병렬기구의 특징인 페루프 형태의 관절 구조로 인해서 발생하는 해석의 어려움에 따라서 효율적인 병렬기구의 기구학 해석에 관한 연구[4,5], 병렬기구의 동역학 해석에 관한 연구로 구동장치의 동역학 영향까지 모두 고려한 연구들으로써, Euler-Lagrange 기법을 이용한 Lebret의 연구[6], Newton-Euler 기법을 이용한 Dasguta의 연구[7], 가상일 원리를 이용한 Zhang의 연구[8] 등이 있다.

새로운 형태의 기구를 갖는 병렬기구의 개발에 관한 연구로써, 무거운 구동장치 부분을 고정된 베이스에 옮겨 부착함으로써 동작 부분의 관성을 감소시켜 기구 동작의 고속화를 달성한 Pierrot의 DELTA 기구에 대한 연구[9], Honegger의 HEXAGLIDE 기구 연구[10], 전체 6자유도 중에서 3자유도는 직렬형 기구로, 나머지 3자유도는 병렬형 기구로 구성된 혼합 형태의 기구를 개발한 Waldron의 연구[11], 기구의 강성을 개선하기 위하여 병렬기구를 다단으로 연결한 형태의 새로운 병렬기구를 개발한 Lee의 연구[12], 기존에 개발된 병렬형 기구의 성능 개선을 위하여 구체적인 새로운 제원 제시에 관한 Arai의 연구[13] 및 구동장치 배치 각도 및 구조를 수정하여 성능을 개선한 Stoughton의 연구[14] 등이 있다.

스튜어트 플랫폼 형태의 병렬기구의 경우에 기구학적 성능을 결정하는 요인으로 플랫폼의 크기, 구동장치와 플랫폼

의 연결 위치 등을 들 수 있다. 특히, Arai[13]의 연구에서 저자는 특이값 분해 기법을 이용하여 힘 및 모멘트 전달 특성 성능 지수를 기준으로 종래의 스튜어트 플랫폼이 최적 제원을 갖지 않음을 보이고 최적의 새로운 병렬기구 제원을 제시하였다.

본 연구에서는 기존의 스튜어트 플랫폼에 플랫폼의 중심과 플랫폼-구동장치의 연결부를 연결하는 암(Arm) 기구를 장착하여, 이 암의 길이를 별도의 구동장치로 가변 시킴으로써 기구의 형상을 가변 시킬 수 있는 가변형 병렬기구를 개발하였다. 암 길이의 가변에 의해서 플랫폼의 작업공간이 확장될 수 있으며, 특히 최대 회전각을 유지할 수 있는 작업공간의 범위도 확대된다. 또한, 각 구동장치의 발생력으로부터 플랫폼으로의 힘 및 모멘트 전달 특성도 변화시켜서 다양한 작업에 신축성 있게 대처할 수 있다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 개발된 가변형 병렬기구의 구조 및 가변암 장치의 작동원리에 대하여 설명한다. 3장에서는 가변형 병렬기구의 기구학 해석 및 작업공간에 대하여 설명하며, 4장에서는 힘-모멘트 전달 특성에 관하여 논한다. 마지막으로, 5장에서 결론을 도출한다.

### II. 가변형 병렬기구

본 연구에서는 스튜어트 플랫폼 형태에 기초한 가변형 병렬기구를 제안하고자 한다. 스튜어트 플랫폼은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 지면에 고정된 하판(base)과 말단장치에 해당하는 플랫폼을 직선 운동이 가능한 6개의 구동장치로 연결하는 구조를 갖는다. 작업공간 및 플랫폼이 발생시킬 수 있는 힘/모멘트 등 병렬기구의 특성은 구동장치와 플랫폼 또는 구동장치와 하판 연결부의 위치에 의해서 영향을 받게 된다. 따라서 이들 연결부의 위치를 가변 시킬 수 있다면 병렬기구의 형상을 작업의 특성에 맞게 조절할 수 있게 된다. 그러나 하판-구동장치 연결부의 위치 가변은 안정성의 문제를 발생시킬 수 있고, 가변을 위해서는 플랫폼과 구동장치 전체를 이동시켜야 하므로 비교적 큰 힘을 제공하는 별도의 구동장

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 1. 10., 채택확정 : 2005. 11. 1.

이세한, 김병창 : 경남대학교 기계자동화공학부

(leesehan@kyungnam.ac.kr/bckim@kyungnam.ac.kr)

※ 본 연구는 경남대학교 학술연구비지원에 의해 수행되었음.

치를 필요로 한다는 문제점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 실제로 작업을 수행하는 말단장치에 해당하는 플랫폼을 대상으로, 플랫폼-구동장치 연결부의 위치를 가변 시키는 방식의 가변형 병렬기구를 개발하였다. 본 연구의 가변형 병렬기구는 플랫폼에 복잡한 장치를 부가하여 플랫폼의 관성이 증가되므로 제어기에서 사용되는 로봇의 모델에 감안될 필요가 있다.

1. 가변형 병렬기구의 구조

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 가변형 병렬기구의 구조를 나타내는데, 전체적인 외형은 종래의 스튜어트 플랫폼과 유사하다. 이 때, 플랫폼과 구동장치는 구 조인트(spherical)를 통해서 연결되는데, 연결부  $B_j(j = 1, 2, 3)$ 의 위치가 기존의 병렬기구에서는 고정되어 있는 반면에, 본 연구에서 제안하는 가변형 병렬기구에서는 가변압 장치에 의해서 연결부 위치가 가변될 수 있는 구조를 갖는다.

가변형 병렬기구의 가변압 장치의 자세한 구조는 Fig. 2에 나타내고 있으며, Fig. 3은 최대 가변압 길이인 경우와 최소 가변압 길이의 경우에 해당하는 가변형 병렬기구의 사진을 나타내고 있다. 가변압 장치에서는 플랫폼 중심  $P$ 에서 플랫폼-구동장치 연결부  $B_j$ 를 연결하는 3개의 가상의 암(arm)으로 구성되어 있다. 가변압 장치는 암의 길이  $r$ 을 최소 암 길이  $r_{min}$ 에서 최대 암 길이  $r_{max}$ 까지 가변 시킬 수 있다. 이 때,  $B_1, B_2, B_3$ 에 연결되는 3개의 암은 항상 동일한 길이를 가지도록 움직이게 됨에 유의하여야 한다. 또한, 최대 암 길이를 갖는 형상은 고정형 스튜어트 플랫폼에 해당한다.

가변압 장치에서는 플랫폼-구동장치 연결부가 슬라이딩 카트(sliding cart) 위에 장착되며, 이 슬라이딩 카트는 방사상으로 배치된 리니어 가이드 상에서 정밀하게 직선 운동을 하게 된다. 별도의 구동 모터가 모터와 타이밍 벨트로 연결된 웜을 회전시키면, 웜과 맞물려 있는 웜휠 및 이와 연결된 구동휠이 회전하게 된다. 구동휠의 회전은 연결봉(connecting rod)을 통해서 슬라이딩 카트가 리니어 가이드 상에서 연속적으로 이동할 수 있도록 한다.

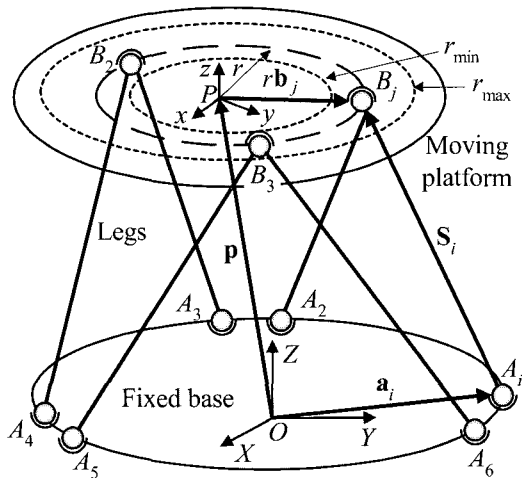


그림 1. 스튜어트 플랫폼.  
Fig. 1. Schematic of parallel manipulator with variable platform (PMVP).

가변압 장치의 구동에 웜기어를 사용하므로 모터의 회전을 통해서 암의 길이를 가변할 수는 있지만, 연결부에 작용하는 힘에 의해서는 반대로 모터를 회전시킬 수는 없다. 따라서 웜기어의 사용을 통하여 일종의 잠금 효과를 얻을 수 있는데, 이는 어떠한 상황에서도 구동모터에 의해서만 암의 길이가 변할 수 있도록 하여 가변형 병렬기구의 안정성을 보장하는 역할을 할 수 있다.

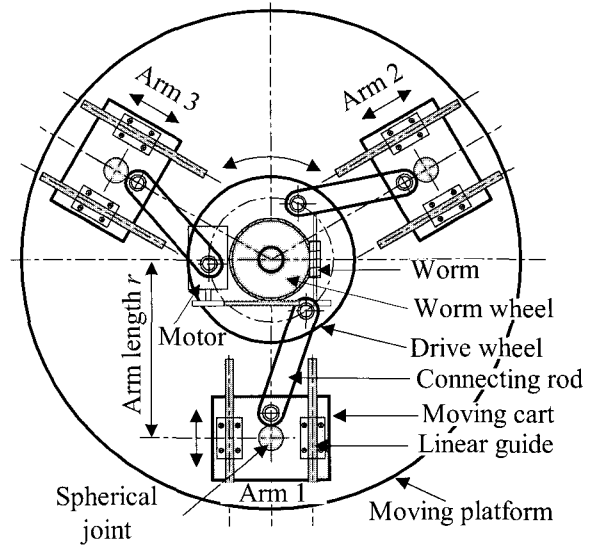
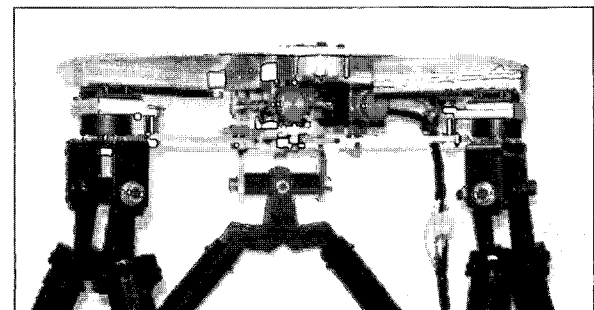
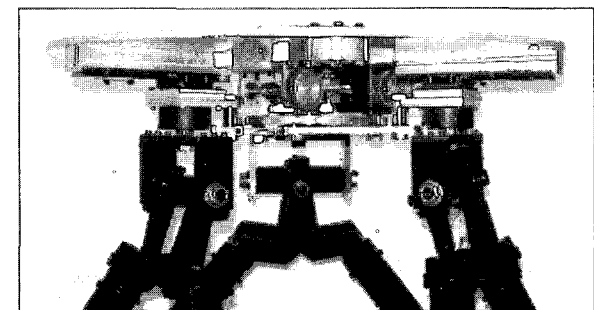


그림 2. 가변 플랫폼 메커니즘 구조.  
Fig. 2. Structure of the variable platform mechanism.



(a)



(b)

그림 3. 최대 (a) 최소 암 (b) 경우의 가변형 병렬기구 사진.  
Fig. 3. Photos of parallel manipulator variable platform (a) maximum arm length, and (b) minimum arm length.

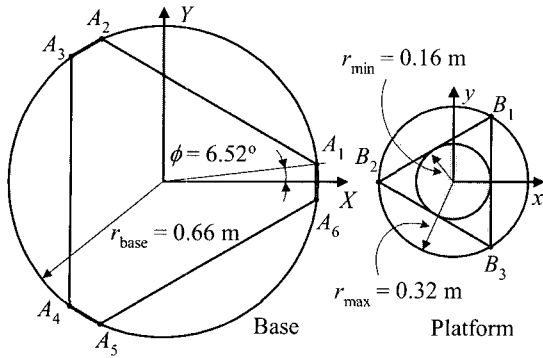


그림 4. 베이스와 플랫폼의 기구 제원.  
Fig. 4. Physical dimensions of fixed base and platform.

개발된 가변형 병렬기구의 물리적인 치수를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 플랫폼의 중심과 구동장치 연결점의 위치 사이의 거리는 0.16m에서 0.32m까지의 범위에서 조정될 수 있다. 한편, 구동장치의 작동 범위는  $L_{min} = 0.735m$  and  $L_{max} = 0.985m$  이다.

III. 가변형 병렬기구의 특성

가변형 병렬기구는 가변압 장치용으로 별도로 부착된 구동장치 때문에 여유 자유도를 갖는 기구로 분류될 수도 있다. 그러나 대부분의 경우에 실제 작업 중에 실시간으로 연결부를 가변 시키는 것은 아니며, 작업 개시 전에 작업의 특성에 따라서 적절하게 연결부의 위치를 가변 시키므로 여유 자유도를 갖는 것은 아니다. 그러므로 6자유도 스투어트 플랫폼에 관련된 기존의 기구학 및 동역학 방정식을 그대로 적용할 수 있다. 만약, 실시간 가변을 수행한다면 7자유도를 갖게 되므로, 새로운 해석이 필요하게 될 것이다.

1. 가변형 병렬기구의 기구학

본 절에서는 가변압 장치의 기구 해석 및 가변형 병렬기구의 전체적인 기구학 해석에 대해서 간략히 다루기로 한다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, 하판의 중앙에 기준 좌표계 XYZ를, 플랫폼의 중심에 이동 좌표계인 플랫폼 좌표계 xyz를 설정한다. 플랫폼의 방위(orientation)는 다음과 같이 Z-Y-X 오일러 각에 의하여 기술하기로 한다. 즉, z축에 대하여  $\alpha$ 만큼 회전하고, 새로 생성된 현 좌표계의 y축에 대하여  $\beta$ 만큼 회전한 다음에, 마지막으로 생성된 좌표계의 x축에 대하여  $\gamma$ 만큼 회전하여 생성되는 회전행렬 **R**을 사용한다.

Fig. 5는 가변형 병렬기구의 구동휠의 회전각인 구동각  $\theta$ 에 따른 연결봉의 변화를 보여준다. 이 때, 연결봉의 길이  $l_c$ 와 구동휠 반경  $r_d$ , 그리고 구동각  $\theta$  사이의 관계는 다음과 같이 삼각함수를 이용하여 얻을 수 있다.

$$l_c^2 = r^2 + r_d^2 - 2rr_d \cos \theta \tag{1}$$

한편, Fig. 1로부터 플랫폼과 구동장치의 연결부  $B_j$ 의 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{a}_i + \mathbf{S}_i = \mathbf{p} + r\mathbf{R}\mathbf{b}_j, \quad i = 1, \dots, 6 \tag{2}$$

( $j = 1$  for  $i = 1, 2, j = 2$  for  $i = 3, 4, j = 3$  for  $i = 5, 6$ )

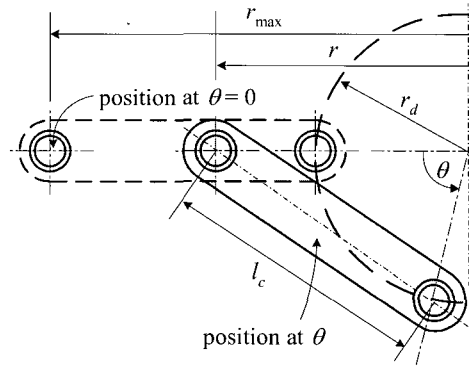


그림 5. 가변형 플랫폼 기구학.  
Fig. 5. Kinematics of variable platform.

여기서, 윗식의 좌우변은 모두 고정 좌표계의 원점에서 플랫폼-레그의 연결부  $B_j$  까지의 위치 벡터를 나타낸다. 이 때, **R**은 기준 좌표계 XYZ에 대한 이동 좌표계 xyz의 회전(즉, 플랫폼의 방위)을 나타내는 회전행렬로, **Rb<sub>j</sub>**는 이동 좌표계에 대하여 기술된 단위벡터 **b<sub>j</sub>**를 고정 좌표계의 향으로 기술한 것이다. (2)는 구동장치의 개수만큼 존재하며, 병렬기구의 기구학적 구속을 나타내는 기본 방정식이 된다.

플랫폼의 위치/방위에 대하여 각 구동장치의 길이를 결정하는 역기구학 문제는 (2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{p} + r\mathbf{R}\mathbf{b}_j - \mathbf{a}_i \tag{3}$$

여기서 플랫폼의 위치/방위 정보로부터 (3)의 우변이 결정되어, 구동장치의 길이를 나타내는 벡터  $\mathbf{S}_i$ 를 구할 수 있다. 이 때,  $\mathbf{S}_i$ 는 레그의 길이  $L_i$ 와 단위 벡터  $\mathbf{s}_i$ 의 곱으로  $\mathbf{S}_i = L_i\mathbf{s}_i$ 로 나타낼 수 있으므로, 구동장치의 길이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_i = \|\mathbf{S}_i\| = \|\mathbf{p} + r\mathbf{R}\mathbf{b}_j - \mathbf{a}_i\| \tag{4}$$

주어진 위치 벡터 및 회전행렬 **p**, **R**에 대하여 구동장치의 길이  $L_i$ 는 유일하게 결정된다는 점에 주목하여야 한다. 주어진 구동장치의 길이에 대하여 플랫폼의 위치/방위를 결정하는 순기구학과 병렬기구의 순기구학 문제는 (2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_i\mathbf{s}_i - \mathbf{p} - r\mathbf{R}\mathbf{b}_j + \mathbf{a}_i = 0 \quad (i = 1, \dots, 6) \tag{5}$$

(5)로 표현되는 6개의 방정식은 서로 결합되어 있으며, 음함수(Implicit function)의 형태이므로 수학적으로 다수의 해가 존재할 수 있으며[15], 예외적인 특별한 경우를 제외하고는 대부분 수치 해석을 통해서 구해진다[16].

2. 가변형 병렬기구의 작업공간

작업공간은 로봇의 말단장치가 도달할 수 있는 범위를 의미한다. 기존의 병렬기구에서는 일단 제작이 완료된 후에는 작업공간이 고정되어 버린다. 그러나 본 연구에서 제안한 가변형 병렬기구에서는 형상의 일부를 변경하여 작업공간을 가변 할 수 있다.

먼저, 플랫폼의 방위각이  $\alpha = \beta = \gamma = 0^\circ$ 인 상태에서 플랫폼

의 중심이 병진이동을 통해서 운동할 수 있는 병진 작업공간을 살펴보았다. Fig. 6 및 Fig. 7은 가변형 병렬기구가 최대 및 최소 암의 길이를 갖도록 가변되었을 때, XZ 평면 및 YZ 평면 상에서 플랫폼의 중심이 도달할 수 있는 최대 영역의 경계를 나타낸다. 두 경우에 병진 작업공간의 차이는 거의 없음을 알 수 있다.

암의 길이를 연속적으로 변화시켰을 때, 각 좌표축 방향에 대하여 도달 가능한 거리의 범위를 Fig. 8에 나타내었다. X축 및 Y축 방향의 경우에는 가변암 길이가 변화하더라도 플랫폼 중심의 최대 도달 거리는 거의 변화가 없다. Z축 방향의 경우에는 가변암 길이가 감소할수록 최대 도달 거리가 전체적으로 감소되는 경향이 있지만, +Z와 -Z 방향의 최대 도달 거리의 차이 이동 가능 범위는 최대 암 길이에서 0.323m, 최소 암 길이에서 0.344m로 암 길이가 감소할수록 다소 증가하는 현상을 보였다. 종합적으로 암 길이의 변화에 대해서 플랫폼 중심의 병진이동 가능 범위는 거의 변하지 않는다.

다음은 암의 길이 변화에 따라서 플랫폼의 회전이동을 통해서 운동할 수 있는 작업공간을 살펴보기로 한다. 먼저, Fig. 9 및 Fig. 10은 최대 및 최소 암 길이에 대해서 플랫폼이 Z축을 따라서 이동할 때, 플랫폼이 회전할 수 있는 최대 방위각  $\alpha, \beta, \gamma$ 의 변화를 보여준다. Fig. 9에 의하면, 고정형 병렬기구

에 해당하는 최대 암 길이의 경우에  $Z = 0.65m$ 인 지점에서 Z축에 대한 회전각은  $\alpha = 38.4^\circ$ 로 최대가 되며,  $\beta, \gamma$ 는 이보다 다소 작은 회전각을 갖는다. 그러나 Fig. 10에 나타난 최소 암 길이의 경우에는  $\alpha, \beta, \gamma$  모두가 최대  $58.8^\circ$ 의 회전각을 가지게 되는데, 이 각도는 최대 암 길이의 경우에 비하여 약 1.5배 이상이 증가된 각도이다. 뿐만 아니라, 최대 암 길이의 경우에는 달리  $\alpha$ 의 경우 Z가 약 0.55m에서 0.65m의 비교적 큰 범위에 걸쳐서 최대 회전각을 유지할 수 있다. 또한,  $\beta, \gamma$ 의 경우에도 범위는  $\alpha$ 에 비해서 다소 작지만, 역시 비교적 큰 범위에 걸쳐서 최대 회전각을 유지할 수 있다.

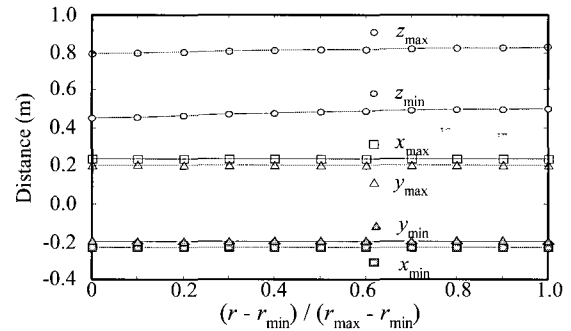


그림 8. 연속적 암 변화에 대한 병진작업 공간 변화.

Fig. 8 Changes in translational workspace for continuously varying arm length.

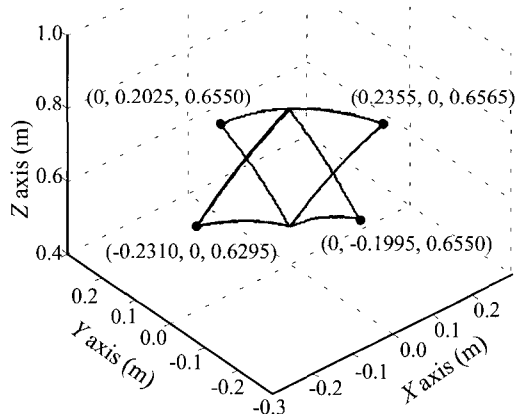


그림 6. 최대 반경에 대한 병진 작업 공간.

Fig. 6. Translational workspace for max. arm length ( $r = r_{max}$ ).

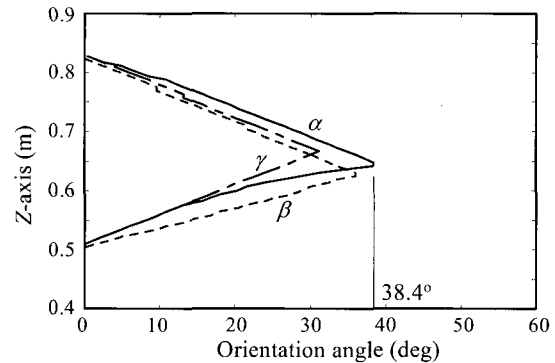


그림 9. 최대 암 길이에 대한 방위각 변화.

Fig. 9. Rotational workspace for maximum arm length.

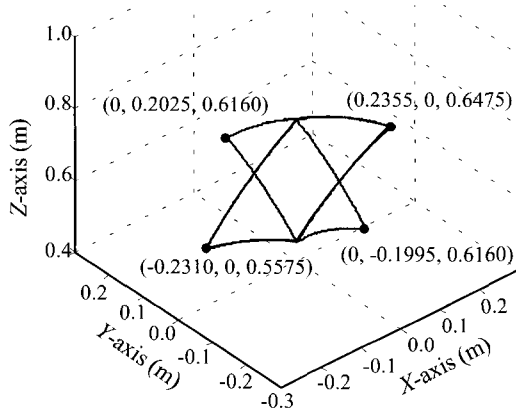


그림 7. 최소 반경에 대한 병진 작업 공간.

Fig. 7. Translation workspace for min. arm length ( $r = r_{min}$ ).

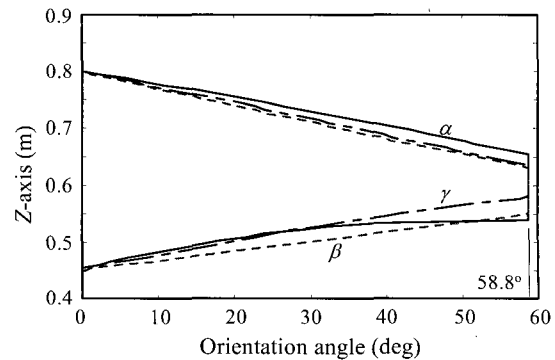
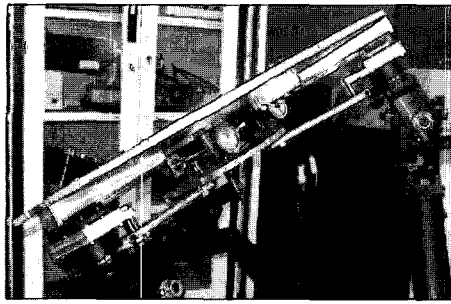
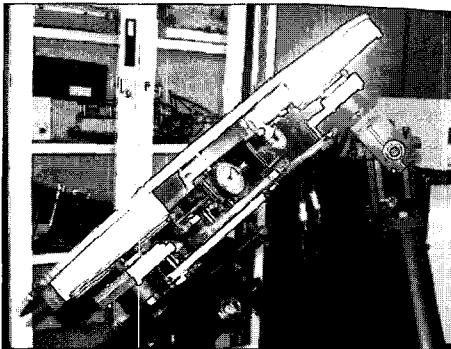


그림 10. 최소 암 길이에 대한 방위각 변화.

Fig. 10. Rotational workspace for minimum arm length.



(a)



(b)

그림 11. 최대 (a) 및 최소 (b) 암 길이에 대한 회전 각도.  
Fig. 11. A rotational angle for max. (a) and min. (b) arm length.

Fig. 11은 구현된 실험장치를 이용하여 최대 암 길이 및 최소 암 길이에 대한 최대 방위각을 나타내고 있다. 이 때, 실험 장치의 구 조인트의 회전 한계 때문에 Fig. 11에 나타난 각도는 계산 결과와 다름을 알 수 있다.

종합적으로, 가변 길이의 조정을 통해서 최대 암 길이에 해당하는 고정형 가변기구에 비해서 상당히 넓은 작업공간을 확보할 수 있으며, 최대 회전각이 어느 특정한 점이 아닌 넓은 범위에 걸쳐서 얻어질 수 있음을 나타낸다. 이로부터 가변형 병렬기구가 고정형 병렬기구에 비해서 기하학적으로 우수하다는 점을 알 수 있다.

**IV. 가변형 병렬기구의 힘-모멘트 전달 특성**

병렬기구에서 힘 및 모멘트 전달 특성을 고찰하기 위해서는 관절 공간과 작업 공간 사이의 미세 변위 관계를 기술하는 자코비안 행렬이 필요하다. 자코비안 행렬을 이용하여 관절 공간상에서의 각 구동장치의 속도와 플랫폼 중심의 속도 간의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{L}} \tag{6}$$

이 때,  $\dot{\mathbf{X}} = \{\mathbf{v}_p^T \ \omega_p^T\}^T$ 는 플랫폼 중심  $P$ 의 선속도 및 각속도 벡터,  $\dot{\mathbf{L}} = \{\dot{L}_1, \dots, \dot{L}_6\}^T$ 는 레그, 즉 구동장치의 구동속도 벡터를 각각 나타낸다. 한편, 자코비안 행렬  $\mathbf{J}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 & \dots & \mathbf{s}_6 \\ r(\mathbf{Rb}_1 \times \mathbf{s}_1) & \dots & r(\mathbf{Rb}_6 \times \mathbf{s}_6) \end{bmatrix}^T \tag{7}$$

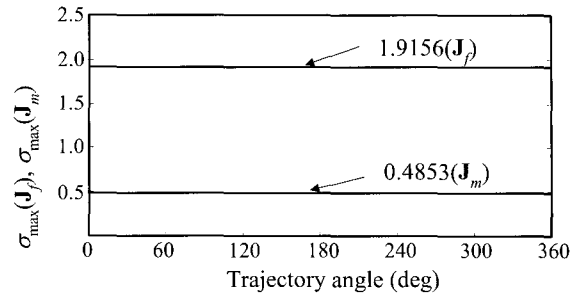


그림 12. 최대 암 길이에 대한 힘/모멘트 전달.  
Fig. 12. Force-moment transmission gains for maximum arm length.

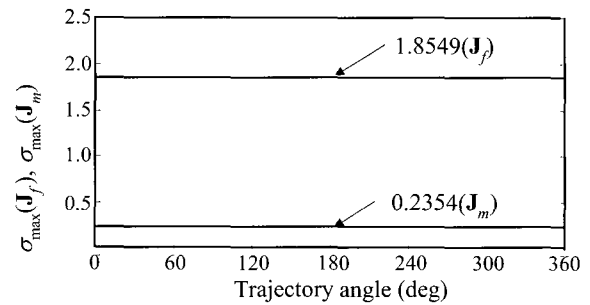


그림 13. 최소 암 길이에 대한 힘/모멘트 전달.  
Fig. 13. Force-moment transmission gains for minimum arm length.

여기서 자코비안 행렬의 요소에 가변암 길이  $r$ 이 포함되어 있으므로 반경  $r$ 을 변경하여 자코비안 행렬의 특성을 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

한편, 구동장치에서 발생하는 힘  $\mathbf{F}_L$ 과 플랫폼에서의 힘/모멘트  $\mathbf{F}_X$ 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\mathbf{F}_X = \mathbf{J}^T \mathbf{F}_L \tag{8}$$

플랫폼의 힘/모멘트 벡터  $\mathbf{F}_X$ 는 다음과 같이 힘  $\mathbf{F}$ 와 모멘트  $\mathbf{M}$ 으로 분리하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{J}_f \\ \mathbf{J}_m \end{Bmatrix} \mathbf{F}_L \tag{9}$$

$$\mathbf{J}_f = [\mathbf{s}_1 \ \dots \ \mathbf{s}_6] \tag{10.1}$$

$$\mathbf{J}_m(r) = r[(\mathbf{Rb}_1 \times \mathbf{s}_1) \ \dots \ (\mathbf{Rb}_6 \times \mathbf{s}_6)] \tag{10.2}$$

(9)는 다음과 같이 분리되어 나타낼 수도 있다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_f \mathbf{F}_L, \mathbf{M} = \mathbf{J}_m(r) \mathbf{F}_L \tag{11}$$

이 때, 구동장치에서의 힘과 플랫폼의 모멘트 사이의 이득 행렬인  $\mathbf{J}_m$ 은 암 길이  $r$ 의 함수이다. 이는 암 길이의 변화는  $\mathbf{J}_m$ 에는 직접 영향을 주지만,  $\mathbf{J}_f$ 에는 암 길이의 변화, 즉 형상의 변화에 의한 단위 벡터  $\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_6$ 의 방향의 변화에 의해서 간접적으로만 영향을 받게 된다.

Fig. 12와 Fig. 13은 플랫폼의 중심점  $P$ 가 특정한 위치(수직 방향 범위의 중간 위치)를 중심으로 반경 0.1m인 원 궤적을 추종할 때, 가변형 병렬기구가 각각 최대 및 최소 암 길이를

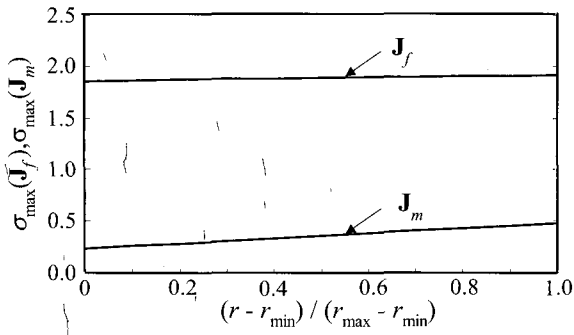


그림 14. 연속적 암 변화에 대한 힘/모멘트 전달 변화.  
 Fig. 14: Changes in force-moment transmission gains for continuously varying arm length.

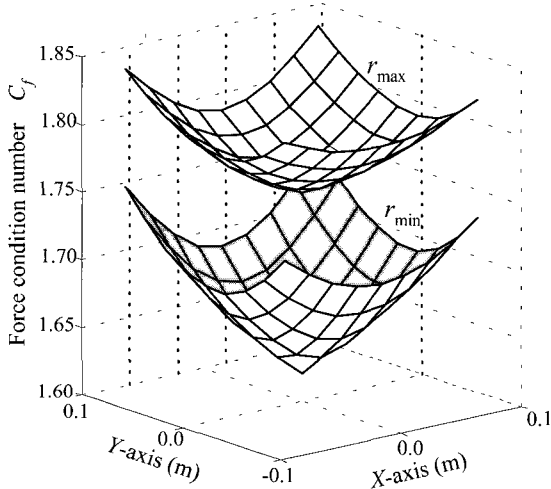


그림 15. XY 평면에 대한 최대 및 최소 암 길이에 해당하는 힘 조건수  $C_f$  분포.  
 Fig. 15. Force condition number  $C_f$  at the maximum and minimum arm lengths on the XY plane.

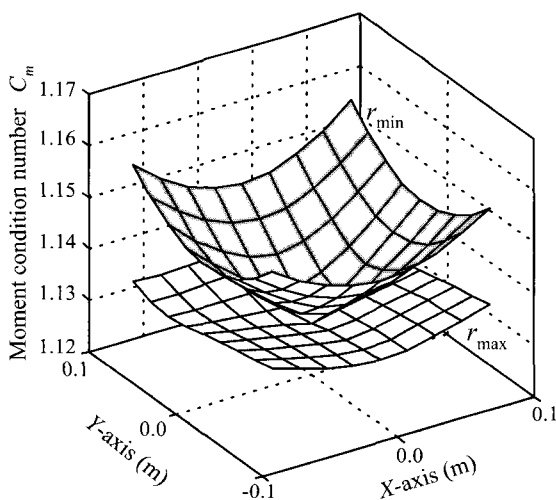


그림 16. XY 평면에 대한 최대 및 최소 암 길이에 해당하는 모멘트 조건수  $C_m$  분포.  
 Fig. 16. Moment condition number  $C_m$  at the maximum and minimum arm lengths on the XY plane.

가지는 경우에 대하여 해당 궤적을 따라서 계산되는 힘 전달 최대 이득과 모멘트 전달 최대 이득(즉, 자코비안 행렬  $J_f$  및  $J_m$  의 최대 특이값)을 나타내고 있다. Fig. 12에서 나타난 최소 암 길이에서 각 자코비안 행렬  $J_f$ 와  $J_m$ 의 최대 특이값은 각각 1.8549와 0.2354으로 Fig. 14에 나타난 최대 암 길이에서의 최대 특이값 1.9156과 0.4853에 비하여 각각 약 0.97배 및 0.49배 정도이며, 모멘트 전달의 경우 전달 성능은 감소될 수 있는 것으로 평가될 수 있다.

Fig. 14는 암의 길이가 최소에서 최대로 연속적으로 변화할 때, 힘-모멘트 전달 최대 이득( $J_f, J_m$ 의 최대 특이값)의 변화를 나타낸 것이다.  $J_f$ 의 최대 특이값은 완만하게 변화되는 반면에,  $J_m$ 의 최대 특이값은 연속적으로 급격히 변화됨을 알 수 있다. 이로부터 암 길이의 가변을 통해서 힘 전달 이득을 거의 변화시키지 않으면서, 모멘트 전달 이득을 최대 약 2배까지 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

한편, 자코비안 행렬  $J_f, J_m$  은 힘 및 모멘트 생성이 얼마만큼 균일한가에 대한 정보를 줄 수 있다. 일반적으로 매니퓰레이터는 말단장치인 플랫폼에 가능한 균일하게 힘 및 모멘트를 발생시킬 수 있어야 한다. 만일 힘 및 모멘트가 어떤 특정한 방향에 대하여 충분히 발생되지 않는다면 충실한 작업이 이루어 질 수 없으며, 그 충분하지 않은 방향에 대해서는 어떤 보상법이 존재해야 한다. 힘 및 모멘트 전달의 균일도의 척도로써 자코비안 행렬의 조건수를 도입한다. 자코비안 행렬  $J_f$  and  $J_m$ 에 대한 조건수  $C_f, C_m$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_f = \frac{\sigma_{\max}(J_f)}{\sigma_{\min}(J_f)} \tag{12.1}$$

$$C_m = \frac{\sigma_{\max}(J_m)}{\sigma_{\min}(J_m)} \tag{12.2}$$

조건수는 1에서부터 무한대까지의 값을 가지는 특징이 있다. 조건수가 1에 접근하게 되면, 힘 및 모멘트는 더욱 균일하게 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 균일성은 거의 모든 분야에 바람직한 특징이 될 수 있다. 한편, 어떤 메커니즘이 특이점에서 동작되고 있다면, 최소 특이값이 0 혹은 매우 작은값이 되기 때문에 조건수는 무한대 값으로 접근할 것이다.

Fig. 15와 Fig. 16은 높이  $Z = 0.667m$ 의 XY 평면( $-0.1m \leq X \leq 0.1m, -0.1m \leq Y \leq 0.1m$ )에 플랫폼이 이동할 때, 해당하는 힘 및 모멘트 전달 조건수의 분포를 나타내고 있다. Fig. 15는 가변 암 길이가 감소함에 따라서 힘 전달 조건수는 4.8%에서 7.6% 범위로 감소하고 있음을 나타내고 있으며, 이것은 균일성 개선을 의미한다. 반면에, Fig. 16은 가변암 길이가 감소함에 따라서 모멘트 전달 조건수가 미미하게 증가하고 있음을 나타내고 있다. Fig. 15와 Fig. 16은 공통적으로 가변암 길이의 크기에 관계없이 플랫폼의 중심이 작업공간의 가운데로 이동할수록 조건수가 양호해짐을 나타내고 있다.

**V. 결론**

본 연구에서는 기존의 스튜어트 플랫폼 형태의 병렬기구를 기반으로 플랫폼의 형상을 가변할 수 있는 가변형 병렬기구를 개발하였다. 가변형 병렬기구는 플랫폼-레그의 연결부

의 위치를 조절함으로써, 전체적으로 병렬기구의 기구학 및 역학적 특성을 변화시킬 수 있다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고정형 병렬기구에 비해서 플랫폼의 병진 작업공간의 거의 변화하지 않지만, 회전 작업공간은 1.5배 이상 가변시킬 수 있다.
- 2) 플랫폼의 최대 방위를 유지한 채로 움직일 수 있는 운동 범위가 크게 개선시킬 수 있다.
- 3) 병렬기구의 형상을 변화시킴으로써 자코비안 행렬을 변화시킬 수 있고, 이를 통하여 구동장치로부터 플랫폼으로의 힘 및 모멘트 전달 이득을 작업의 특성에 따라서 적절하게 가변시킬 수 있다.
- 4) 기존의 고정형 병렬기구는 기구학적 성능이 고정되어 버리는 반면에, 추가의 장치를 필요로 하는 가변형 병렬기구는 상호 배치되는 회전 작업공간의 향상과 모멘트 전달 성능 감소라는 조건을 교환할 수 있어서 기존 고정형의 스튜어트 플랫폼의 변형기구와 차별성을 가질 수 있다.

#### 참고문헌

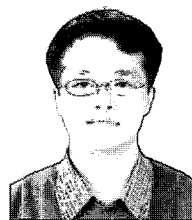
- [1] D. Stewart "A platform with six degrees of freedom," *Proc. of Inst. Mech. Engr.*, vol. 180, no. 1, pp. 371-386, 1965.
- [2] K. Nakashima, etc., "Development of the parallel manipulator," *Robotics, Mechatronics and Manufacturing systems*, Elsevier Science Pub., pp. 27-32., 1993.
- [3] N. Mimura, Y. Funahashi, "A new analytical system applying 6 DOF parallel link manipulator for evaluating motion sensation," *Proc. of ICRA* 1995, pp. 227-233, 1995.
- [4] K. Liu, J. M. Fitzgerald, F. L. Lewis, "Kinematic analysis of a Stewart platform manipulator," *IEEE transaction on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, pp. 282-293, 1993.
- [5] D-M Ku, "Direct displacement analysis of a Stewart platform mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 34, pp. 453-465, 1999.
- [6] G. Lebret, K. Liu, F. L. Lewis, "Dynamic analysis and control of Stewart platform manipulator," *Journal of Robotic Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 629-655, 1993.
- [7] B. Dasgupta, T. S. Mruthyunjaya, "Closed-form dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton-Euler approach," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 33, no. 7, pp. 993-1012, 1998.
- [8] C.-D. Zhang, S. M. Song, "An efficient method for inverse dynamics of manipulators based on the virtual work principle," *Journal of Robotic Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 605-627, 1993.
- [9] F. Pierrot, A. Fournier, P. Dauchez, "Towards a fully parallel 6-dof robot for high speed applications," *Proc. of ICRA*, 1991, pp. 1288-1293, 1991.
- [10] M. Honegger, A. Codourey, E. Burdet, "Adaptive control of the Hexaglide, a 6-dof parallel manipulator," *Proc. of ICRA* 1997, pp. 543-548, 1997.
- [11] K. J. Waldron, M. Raghavan, B. Roth, "Kinematics of a hybrid series-parallel manipulation system," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 111, pp. 211-221, 1989.
- [12] M. K. Lee, "Design of a high stiffness machining robot arm using double parallel mechanisms," *Proc. of ICRA*, pp. 234-240, 1995.
- [13] T. Arai, K. Cleary, T. Nakamura, H. Adachi, K. Homma, "Design, analysis and construction of a prototype parallel link manipulator," *Proc. of IROS* 1990, pp. 205-212, 1990.
- [14] R. S. Stoughton, T. Arai, "A modified Stewart platform manipulator with improved dexterity," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 2, pp. 166-173, 1993.
- [15] M. Raghavan, "The stewart platform of general geometry has 40 configurations," *Journal of Mechanical Design*, pp. 277-280, 1993.
- [16] E.-M. Dafaoui, Y. Amirat, J. Pontnau, C. Francois, "Analysis and design of a six-dof parallel manipulator; modeling, singular configurations and workspace," *IEEE transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no.1, pp.78-92, 1998.
- [17] J. J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, 2nd Ed., Addison-Wesley, 1989.



이 세 한

1968년 4월 22일생. 1989년 고려대학교 기계공학과(공학사). 1991년 고려대학교 기계공학과(공학석사). 2002년 고려대학교 기계공학과(공학박사). 2004년~현재 경남대학교 기계자동화공학부 전임강사. 관심분야는 자동화 로봇 시스템의 설계

및 제어, 모터 제어 시스템, 생산자동화, 메카트로닉스.



김 병 창

1971년 1월 10일생. 1996년 부산대학교 기계공학과(공학사). 1998년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 2003년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 2005년~현재 경남대학교 기계자동화공학부 전임강사. 관심분야는 삼차원 형상 측

정, 시스템 설계 및 보정, 메카트로닉스.