

병렬기구형 틸팅 테이블 및 RAD Tool 프로그램 개발에 관한 연구 Study on Development of Parallel-Typed Tilting Table and RAD Tool Program

김태성*, 박성민*, 원동희*, 이민기**, 박근우**

*창원대학교 대학원(Tel : +82-055-275-7553, tskim@sarim.changwon.ac.kr),

**창원대학교 메카트로닉스 공학부(Tel : +82-055-279-7553, minkilee@sarim.changwon.ac.kr)

Abstract

In this paper, we develop a six-axes machining center tool(MCT) and CAD/CAM system based RAD Tool Program. The MCT consists of two mechanical parts, i.e., a X-Y-Z Cartesian coordinate typed MCT and a parallel-typed tilting table. Kinematics and singularity are accomplished to design the parallel-typed tilting table, and RAD Tool Program is developed for the six-axes MCT, which requires the commands of position as well as orientation for machining of complex shape. In RAD Tool, the CAD/CAM system has a tool path generator, NC code generator and a graphic simulator. This paper designs the parallel-typed tilting table to meet the desired specification and presents the results of CAD/CAM system based RAD Tool Program.

Key Words : Six-axes machining center tool(6축 공작기계), Parallel-typed tilting table(병렬기구형 틸팅 테이블), Machining of complex shape(난 형상 가공), CAD/CAM system(설계/가공 시스템)

1. 서론

기계 가공작업은 대부분 직교좌표형 공작기계에 의해서 행해진다. 그러나 난 형상 가공을 하기 위해서는 가공 툴이 절삭부위에 자유롭게 접근할 수 있도록 툴의 위치뿐 아니라 자세도 조

절되어야 한다. 따라서 툴의 위치와 자세를 동시에 생성할 수 있는 병렬기구형 공작기계가 차세대 공작기계로 부각되고 있다[1]. 병렬기구는 여러 링크가 툴을 지지하므로 강성이 크고, 조인트의 오차가 누적되지 않아 정밀도가 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 링크와 플랫폼 및 베이스가 공간상에서 조립되므로 조립 공차가 크고, 보정할 기구학적 변수의 수(스튜워트 플랫폼의 경우 42개)가 많아 일반 공작기계에 크게 못 미친다[2]. 또한 툴의 위치와 자세를 생성하는 상용 5축 가공기가 개발되어 있으나 대형이고 고가의 장비로 일반 중소기업에서 보유하기 어려우므로 가공업체에서는 지그를 설치해 절삭각을 만들거나 베드에 회전 테이블 또는 경사 테이블을 설치하여 자세제어를 구현한다. 그러나 경사 테이블은 편심 회전축의 조합에 의해 구동됨으로 툴의 접근을 막는 작업공간이 많고, 대형 가공물을 탑재할 수 없으며, 특이점(불연속 운동점)을 가져 난 형상 가공에 적용하기는 어렵다. 따라서 위치와 자세를 동시에 생성할 수 있는 테이블 자세 제어형 공작기계는 난 형상 가공에 적합한 공작기계가 될 것이다.

본 연구는 난 형상 가공을 위해 일반 공작기계에 테이블의 자세를 제어할 수 있는 병렬기구형 틸팅 테이블에 관한 것이다. 제안된 테이블 자세 제어형 공작기계는 일반적인 X-Y-Z 3축 직각좌표 공작기계와 가공물의 회전과 경사각을 생성할 수 있는 3축 병렬기구형 틸팅 테이블로 구성된다.

본 논문에서는 병렬기구형 틸팅 테이블의 최적 설계 및 제어를 위한 기구학 해석 및 특이점해석을 수행한다. 또, 제안된 테이블 자세 제어형 공

작기계는 일반 공작기계와는 달리 6개의 구동 축을 가지고 있어 기존의 가공 프로그램 및 CAD/CAM 프로그램을 적용할 수 없다. 그러므로 CAD/CAM[3]의 기능을 가지는 가공 운용 프로그램을 RAD Tool 방식으로 개발하고자 한다. CAD/CAM 시스템은 AutoCAD를 이용하여 가공 도면을 작성하고 DXF 데이터의 형상 모델링[4,5]으로부터 NC코드를 생성하여 그래픽 시뮬레이터를 통해 가공 경로를 검증한다. RAD Tool은 사용자의 편의를 위해서 그래픽 사용자 인터페이스 방식으로 개발하여 간략화된 아이콘으로 가공 명령을 표현함으로써 빠른 편집작업이 가능하다.

2. 테이블 자세 제어형 공작기계

테이블 자세 제어형 공작기계는 Fig. 1과 같이 X-Y-Z 직각좌표 공작기계와 3 자유도의 병렬기구형 틸팅 테이블로 구성된다. 본 논문에서는 병렬기구형 틸팅 테이블의 설계에 관하여 다룬다.

병렬기구형 틸팅 테이블은 가공물을 놓는 플랫폼, 이를 지지하는 3개의 선형 액추에이터 그리고 운동을 구속하기 위한 3 자유도의 볼-소켓 조인트를 가지는 중앙축으로 구성된다.

플랫폼의 운동을 생성하기 위한 선형 액추에이터는 주어진 각도로 삼각베이스에 설치되어 있고 삼각베이스 상의 슬라이더가 직선운동을 생성한다. 생성된 직선운동은 볼-소켓 조인트를 슬라이더 상의 임의의 위치로 이동시킨다. 볼-소켓 조인트는 3 자유도의 운동으로 로드 하단부를 슬라이더에 연결시키고 로드의 상단부는 2 자유도의 핀 조인트에 의해 플랫폼과 연결된다.

3개의 액추에이터는 플랫폼 하단에 설치되는데 6 자유도를 가지는 액추에이터만으로는 플랫폼의 운동을 구속할 수 없다. 따라서 중앙축을 두어 구속운동을 생성하는데 이는 3 자유도의 볼-소켓 조인트로 플랫폼 중앙과 연결되어 있다. 따라서 슬라이더의 직선 운동이 슬라이더와 연결된 볼-소켓 조인트를 이동시키면 플랫폼은 중앙축의 볼-소켓 조인트를 중심으로 회전운동을 생성하게 된다. 작업공간 내에서 플랫폼의 회전운동을 생성하기 위한 슬라이더 상의 볼-소켓조인트 위치, 슬라이더 설치 각도 및 삼각 베이스 각도 등을 최적의 조건으로 구하기 위한 해석을 수행해야 한다.

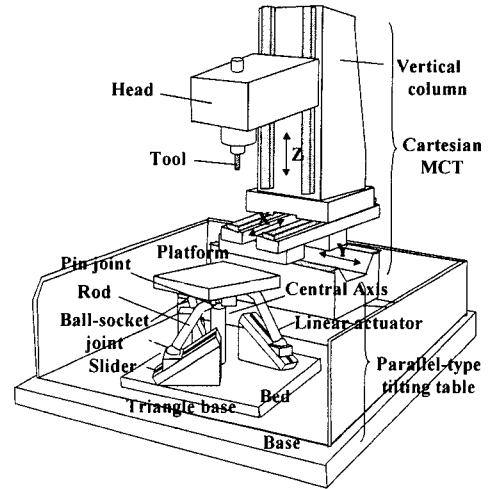


Fig. 1 Six-axes machining center tool

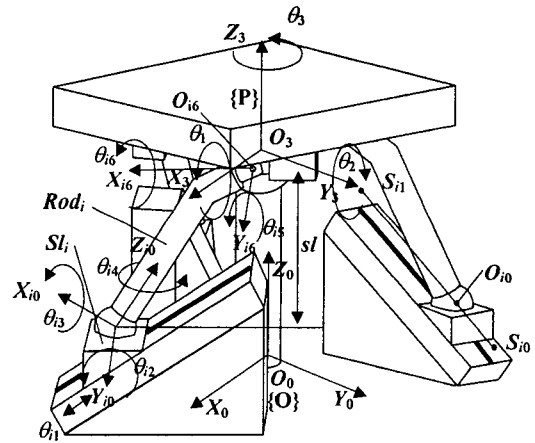


Fig. 2 Parallel-typed tilting table

3. 병렬기구형 틸팅 테이블의 해석

3.1 기구학 해석

병렬기구형 틸팅 테이블의 역방향기구학은 Fig. 2와 같이 테이블의 좌표계 $\{O\}$ 에 대한 $\{P\}$ 의 자세 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 가 주어질 때 각 선형 액추에이터의 제어 파라미터 $(\theta_i, i=1,2,3)$ 를 구하는 것이다. 자세 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 가 주어질 때 플랫폼 하단의 핀 조인트 위치 벡터 $\overrightarrow{O_0O_6}$ 는

$$\overrightarrow{O_0O_6} = R_{03}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \cdot \overrightarrow{O_3O_6} + \overrightarrow{O_0O_3} \quad (1)$$

이다. 여기서 $R_{03}(\cdot)$ 는 회전행렬이다. 이때 로

드($Rod_i, i=1,2,3$)의 운동은 점 O_0 을 중심으로 구 운동을 생성하므로

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 = s^2 \quad (2)$$

을 만족한다. 이때 ${}^0O_0O_0 = \{x, y, z\}$ 이고, s/l 은 로드의 길이이다.

따라서 각각의 로드가 생성하는 구와 슬라이더가 생성하는 직선을 동시에 만족하는 슬라이더 위의 점을 선택하여

$$\theta_{i1} = \|\overrightarrow{S_0O_{0i}}\| \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

를 구함으로써 기구학 해석이 수행된다.

3.2 힘/모멘트 및 특이점 해석

직렬 기구와 병렬기구의 쌍대성(dualities)[6]에 의해서 플랫폼에 작용하는 힘/모멘트는 역 자코비안에 의해서 액추에이터의 힘/토크로 변환된다. 그러나 이 변환은 중력과 관성 부하를 포함하지 않고 피동 조인트에 작용하는 힘/모멘트를 계산할 수가 없다. 이러한 피동 조인트를 포함하고 있는 병렬기구의 힘/모멘트 분석은 Lee와 Park[7,8]에 의해서 연구되었고 본 논문에서는 그 결과를 병렬기구형 회전 테이블의 힘/모멘트 해석에 적용하였다. 유도된 힘/모멘트는

$$\Gamma = J^{-1}(\Theta)C \quad (4)$$

로 외부의 힘 C 가 주어질 때, 각 선형 액추에이터 및 모터에 부과되는 힘을 구할 수 있다. 이때 자코비안 $J(\cdot)$ 는 테이블의 자세, $\Theta(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 에 대한 함수로 나타난다. 유도된 $J(\cdot)$ 으로 특이점을 해석한다. 식 (4)에서 외부의 힘을 지지할 수 없는 특이점은 $\det(J(\cdot)) = 0$ 인 경우이므로 작업공간 내에서 특이점이 발생하지 않도록 조인트 및 슬라이더의 설치 각을 결정해야 한다.

4. 공작기계용 운용 프로그램

4.1 RAD Tool 프로그램

테이블 자세 제어형 공작기계의 구동을 위한 제어 시스템은 기존의 공작기계 전용 제어기로는

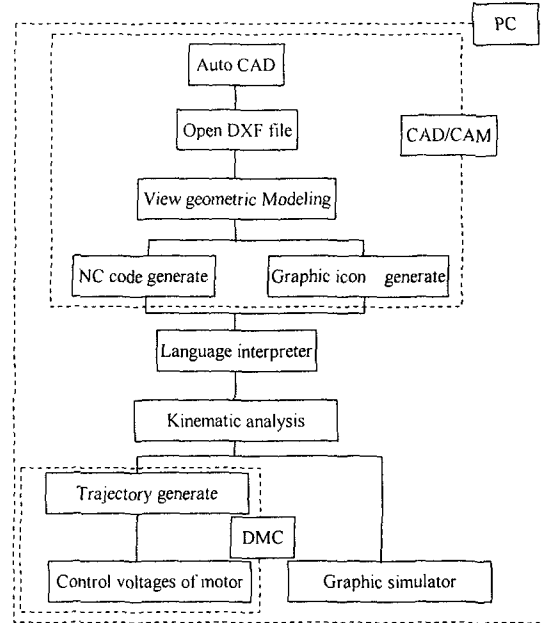


Fig. 3 Control scheme

제어하기 어려우므로 외부 센서들과 원활한 통신, 하드웨어 확장 그리고 운용 프로그램의 개발을 위해 PC와 DSP Motion Controller (DMC)로 Fig. 3과 같이 구성한다. 그러므로 운용 프로그램은 "C/C++"-언어를 사용하여 다양한 함수를 개발할 수 있고, 사용자의 편의를 위해서 그래픽 사용자 인터페이스 방식의 RAD Tool 프로그램으로 개발하였다. 또한 실제 가공작업을 수행하기 전에 OpenGL로 구현된 그래픽 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션 해볼 수 있다.

4.2 CAD/CAM 시스템

CAD/CAM 시스템의 개발은 자유곡선 궤적을 추적하기 위한 CAD/CAM 시스템을 설계하고, 그 소프트웨어를 개발하기 위하여 다음 사항을 고려하여 시스템 알고리즘을 적용하였다. 1) PC를 이용하고 2) 확장성이 용이한 Visual C++을 사용하여 3) DXF 형상 데이터를 CAD와 CAM간에 공유할 수 있도록 하였다. 이 시스템은 다음과 같이 6단계로 구성된다.

1단계 : 일반적인 범용 프로그램인 Auto CAD를 사용하여 자유곡선 형상 모델을 생성한다.

2단계 : 생성된 기하학적 형상 모델을 DXF 파일로 저장한다. 이것은 C.L 데이터의 기초가 된다.

3단계 : 작업하고자 하는 DXF 파일을 선택하여

확인한다.

4단계 : EXECUTION 명령을 주면 DXF 파일을 OpenGL로 렌더링시켜 가상의 병렬기구형 공작기계 작업대 위에 C.L 데이터를 그려준다.

5단계 : 기구학 해석을 통해 계산되어 그려진 가상의 병렬형 공작기계의 툴(Tool)이 C.L 데이터를 따라 동작한다.

6단계 : 동작 순서는 Auto CAD에서 작성했던 도형의 생성순서에 따라서 툴(Tool)이 순차적인 모의가공을 수행한다.

5. 연구결과

5.1 병렬기구형 틸팅 테이블의 최적설계

개발하고자 하는 기구의 사양을 다음과 같다.

- 테이블 크기 : 600 × 600 (mm)
- 테이블 높이 : 800 (mm)
- 최대 적재 중량 : 500 (kg)
- 테이블 경사/분할 각도 : ± 45/0.001 도
- 테이블 회전/분할 각도 : ± 45/0.001 도

이를 만족하기 위해 다음의 조건을 고려해야 한다.

5.1.1 삼각 베이스의 경사각 결정

삼각 베이스의 각도에 따라서 틸팅 테이블이 작업공간 내에서 회전할 때 특이점을 가지게 된다. Fig. 4는 삼각 베이스의 각도에 따라 특이점에 도달되는 테이블의 회전각을 나타낸 것이다. 삼각 베이스의 각도가 28° 이하인 경우는 테이블의 회전운동을 만족할 수 없고, 40°의 경우 55°에서 특이점이 발생하고, 40°이하의 경우에는 특이점에 가까워져 45°의 테이블 회전각도를 만족시키지 못한다. 또한 40°이상의 경우에는 슬라이더의 스트로크가 길어지고 Rod의 길이가 길어지게 되므로 테이블의 높이를 만족시키지 못한다. 그러므로 삼각 베이스의 경사각은 40°로 선정하였다.

5.1.2 로드와 조인트 설계

각 슬라이더의 최단 및 최장 길이 부분에 근접 센서를 설치하여 이를 벗어났을 때 운동을 정지시킨다. 그러나 간섭은 감지할 수 있는 센서가

Table's angle at singularity(°)

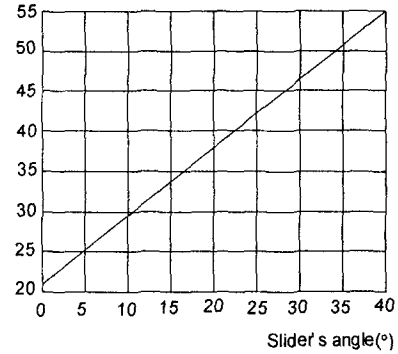


Fig. 4 Table's angle at singularity vs. Slider's angle

없으므로 리니어 액추에이터의 작동 범위 내에서 모든 간섭이 일어나지 않도록 로드와 피동 조인트를 설치해야 한다. 이를 위해 간섭을 판별하는 알고리즘으로 간섭을 피하면서 최대의 작업공간을 확보[9]할 수 있는 설계치수를 결정하였다. 그 결과로 핀 조인트는 120° 등 간격으로 플랫폼 하단에 설치하고 로드는 핀 조인트와의 간섭을 피하기 위해 45°의 각을 가지고 핀 조인트와 연결된다. 또한 로드상단과 플랫폼하단의 간섭을 피하기 위해 간섭 부위의 플랫폼 두께를 줄여 설계하였다. 또한 작업공간 내에서 볼-소켓 조인트의 요구 각을 만족시키기 위해 슬라이드 면에 대해 60°의 경사각으로 설치하였다.

5.1.3 기구의 특이점 해석

3.2절에서 언급한 것과 같이 작업공간 내에서 외부의 힘을 지지할 수 없는 특이점을 해석하였다. 기구의 자세가 작업공간 내에서 변함에 따라 피동조인트의 회전축방향, 위치 그리고 능동조인트의 위치가 바뀐다. 이와 같은 형상은 식 (4)의 $J(\cdot)$ 으로 대변할 수 있다. 특이점을 해석하는 방법으로 작업공간 내에서 $\det(J(\cdot))$ 를 Fig. 5와 같이 구하였다. Fig. 5에서 보듯이 플랫폼의 자세($-45^\circ < \theta_1, \theta_2 < 45^\circ$)를 변화시킬 때 $\det(J(\cdot))$ 의 값이 특이점을 지나지 않으므로 작업공간 내에서 특이점은 없다.

위의 결과를 이용하여 병렬기구형 틸팅 테이블은 Fig. 6과 같이 제작되었다.

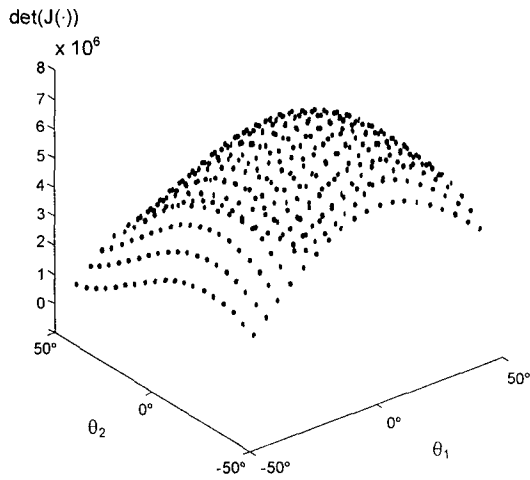


Fig. 5 Singular analysis in work space

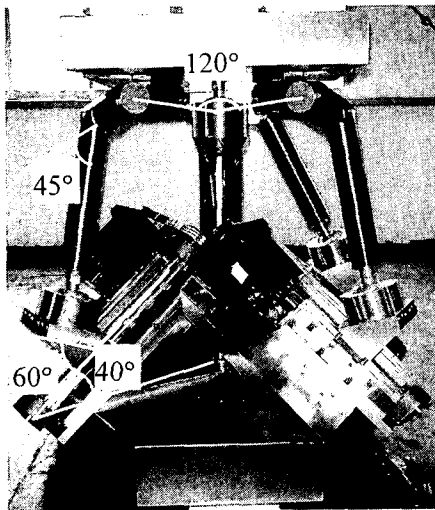


Fig. 6 Constructed parallel-typed tilting table

5.2 개발된 RAD Tool 프로그램

Fig. 7은 개발된 CAD/CAM 프로그램으로 2차원 윤곽 가공을 위해 가공명령을 생성하고 있는 장면이다. 도면은 Auto CAD에서 그려진 dxf 파일을 읽어들이는 것이다. 읽어들이는 도면의 Object를 마우스로 클릭하여 가공명령을 자동 생성하게 되는데 이는 좌측 윈도우에 나타나고, 이 에디터 창에서 키보드를 이용해 가공명령을 직접 입력할 수도 있다. 기존의 공작기계 사용자도 쉽게 이해할 수 있도록 G-Code 표현 방식을 이용하였다. Fig. 8은 그래픽 사용자 인터페이스 방식으로 개발된 RAD Tool이다. CAD/CAM의 기능을 이용하여 가공명령을 그래픽 아이콘 형식으로

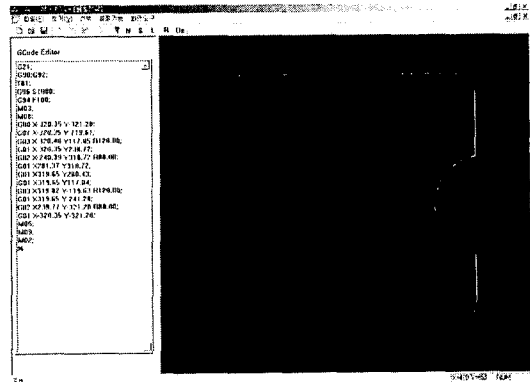


Fig. 7 CAD/CAM program

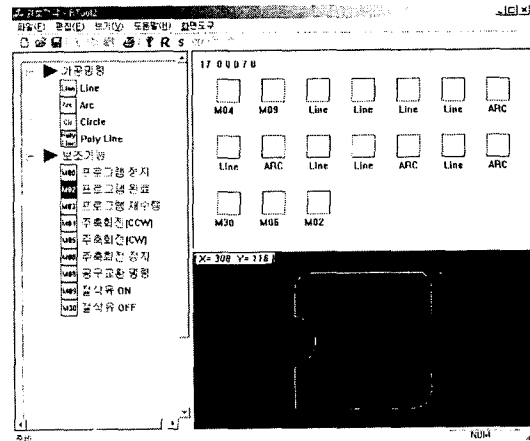


Fig. 8 RAD Tool program

표현하고 있다. 또한 좌측의 트리 윈도우에서 가공아이콘을 직접 선택하여 편집할 수 있으므로 보다 빠른 편집작업이 가능하다.

6. 결론

테이블 자세 제어형 공작기계의 개발을 위해 병렬기구형 톨링 테이블을 설계·제작하였다.

기구의 최적설계를 위해 기구학해석, 힘/모멘트 해석 그리고 특이점해석을 수행하였다. 제작된 톨링 테이블을 구동하여 제안된 기구의 사양을 만족할 수 있음을 확인하였고, 작업공간 내에는 특이점 및 간섭현상이 없을 확인하였다.

운용 프로그램은 기존의 공작기계 사용자가 쉽게 접할 수 있도록 G-Code를 이용하여 가공명령을 표현하는 방법과 윈도우 환경에 익숙한 사용자가 보다 편리하게 운용할 수 있는 그래픽 사용

자 인터페이스 방식인 RAD Tool방식으로 개발되었다. 향후과제로 병렬기구형 킬팅 테이블이 공작기계로서 적용되기 위해 기구의 보정작업을 통한 정밀도가 검증되어야 하고, 개발된 운용 프로그램 또한 3차원 도면의 CAM 기능 개발, 형상에 따른 가공함수의 개발 등이 수행되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계 기술 연구센터의 지원에 의한 것입니다. 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이민기, 최병오, 김태성, 박근우, 2000, "병렬기구형 CNC 공작기계의 개발," 한국공작기계학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 535-540.
- [2] J. M. Hollerbach, 1989, "A survey of kinematic calibration," The Robot Rev. I.O. Khatib et al., Eds. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 207-242.
- [3] 변문현, 김태규, 1992, "CAD/CAM 시스템에 의한 3차원 NC 가공 Programming 기법 개발연구," 충남대학교 산업기술연구소 논문집 제7권 제2호 pp. 11~17.
- [4] C.M Hoffmann, K.-J. Kim, 2001, " Toward valid parametric CAD models," Journal of Computer Aided Design, Vol. 33, No. 1, pp. 81-90.
- [5] S. I. Sangolli, S. Sawar, S. Aralikatti, S. Sarode and P. Manvi, 1998, "Computer-Aided CNC Part Program Generation and Tool Path Simulation for Rotational Parts," Proceedings of the 14th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, Nov. pp. 151-157.
- [6] Kurtz, R., Hayward, V. , 1992, "Mutilpe -Goal Kinematic Optimization of a Parallel

Spherical Mechanism with Actuator Redundancy." IEEE Trans. Robot. Automat., Vol. 8, pp. 644-651.

- [7] Lee, M. K. and Park, K. W., 1999, "Kinematic and Dynamic Analysis of a Double Parallel Manipulator for Enlarging Workspace and Avoiding Singularities," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.15, No.6, pp. 1024- 1034.
- [8] Lee, M. K. and Park, K. W., 2000, "Workspace and Singularity Analysis of a Double Parallel Manipulator," IEEE/ASME Transaction on Mechtronics, Vol. 5, No. 4, pp. 367-375.
- [9] 이민기, 최병오, 이성학, 박근우, "2단 병렬 머니플레이터의 작업공간 해석," 대한 기계학회 논문집 A권, 제 22권 12호, pp.2247-2255, 1998년 12월