

◆특집◆ 병렬기구

병렬기구형 로봇 및 공작기계에 관한 연구

이민기\*, 김태성\*\*, 이원철\*\*

Study on Parallel-Typed Robot and Machining Tool

Min Ki Lee\*, Tae Sung Kim\*\*, and Won Chul Lee\*\*

**Key Words** : Double Parallel Mechanisms Robot (2단 병렬기구형 ), Parallel-Serial Hybrid Robot (병렬-직렬 조합형 로봇), Stewart-Gough typed CNC Machining Tool (SGP형 CNC 공작기계), Complex Shape Machining Tool (난 형상 가공기)

1. 서론

일반 산업용 로봇이 공장자동화에 큰 역할을 하고 있으나 기계가공분야 (연삭, 밀링, 절삭 등)에서는 아직 적용이 미비한 실정이다. 이러한 작업은 일반 직렬기구 로봇이 만족시킬 수 없는 높은 강성을 요구한다. 그러나 일반 산업용 로봇에서 사용하는 직렬기구는 베이스와 엔드 이펙터 사이를 하나의 링크 트레인이 연결하는 외 팔보 형태로 큰 작업공간과 높은 유연성은 보유하고 있으나 강성이 낮다. 직렬기구와 대조적인 기구로 1965년 Stewart<sup>(1)</sup>는 6개의 링크 트레인이 베이스와 플랫폼 사이에 연결된 병렬기구를 발표했다. 이 기구는 1962년 Gough<sup>(2)</sup>가 이미 타이어 실험용으로 개발한 것으로 이들이 발표한 병렬기구 타입을 Stewart-Gough Platform (SGP) 이라 부른다. 병렬기

구 관련 논문에서 주장하는 병렬기구의 장·단점은 대략 아래와 같이 요약할 수 있다. 즉

- 1) 플랫폼을 여러 링크 트레인이 지지하므로 플랫폼에 부과되는 부하가 분산되어 가반 중량이 크고,
- 2) 넓은 공간에서 플랫폼을 지지하므로 강성이 높으며,
- 3) 오차가 누적되지 않아 정밀도가 높고,
- 4) 관성이 작아 동특성 응답이 좋다는 것이다.

단점으로는

- 1) 링크의 간섭으로 작업공간이 작고,
- 2) 구동방식이 간접구동으로 순방향 기구학 해석이 난해하며,
- 3) 많은 링크와 조인트가 포함되므로 보정이 어렵고,
- 4) 특이점이 작업공간 내에 존재한다는 것이다.

따라서 병렬기구에 대한 연구는 위 단점을 보완하는 기구설계와 그 특징을 분석하는 하는 내용이 주류를 이루고 있다. 그러나 병렬기구를 변형한 어떠한 기구도 강성을 떨어뜨리며<sup>(3)</sup> 컴퓨터 기술의 발달로 복잡한 순방향 해석은 더 이상 문제가 되지 않는다. 근래에 와서 순수한 SGP 형태를 채택한 공작기계가 차세대 공작기계로 부각된 적이 있었으나 국내·외적으로 부정적인 시각이 많아 지금은 담보

\* 창원대학교 제어계측공학과

Tel. 055-279-7553, Fax. 055-262-5064

Email minkilee@sarim.changwon.ac.kr

병렬기구형 로봇 및 공작기계 연구에 관심을 두고 있으며, 주물귀 제거 작업, 프로펠러 블레이드 연삭 작업, 수중 항만공사 등에 적용시키고 있다.

\*\* 창원대학교 제어계측공학과 대학원

상태에 있다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 우리 연구실이 병렬기구와 관련해 연구된 내용을 소개하고, 향후 해결해야 할 과제를 제시하고자 한다.

우리는 병렬기구형 로봇을 기계가공 분야에 적용해 열악한 작업환경을 개선하고 있다. 이것은 주물의 주물귀 제거, 프로펠러 블레이드 표면 연삭 등과 같은 황삭 작업으로 공작기계와 같이 고 강성과 고 정밀을 요하는 작업은 아니다. 정밀도는 1-2 mm, 가공부하는 10kw를 요하는 (직렬기구 로봇으로는 수행할 수 없는) 병렬기구 로봇에 적합한 분야라 할 수 있다. 위 작업은 분진과 소음으로 작업환경이 열악하여 작업자들이 기피하는 대표적인 3D 작업에 속한다. 이러한 기계가공 작업의 자동화를 위해 2단 병렬기구형 로봇을 설계했다<sup>(4)</sup>. 2단 병렬기구는 각단의 운동이 서로 분리되어 행해지므로 기구해석이 용이하고, 각 단에 선형 액추에이터가 2개 또는 3개 밖에 설치되지 않아 링크간섭이 적다. 따라서 병렬기구의 단점인 작은 작업공간<sup>(5)</sup>과 복잡한 기구학 및 동특성 해석<sup>(6)</sup> 문제를 해결할 수 있다. 2단 병렬기구를 주물귀 제거작업에 적용하는데 있어 가장 큰 문제는 주물귀의 크기를 알 수 없어 불안정한 절삭작업이 이뤄진다는 것이다. 즉, 주물귀의 크기에 따라 절삭부하의 변동이 크며 극단적인 경우 톨이 끼어 회전하지 않거나 파손된다. 또한, 과중한 힘으로 지그에 변형이 일어나 가공정밀도를 벗어나는 난제 등이 있다. 따라서 미지의 형상을 인식해 디버링 작업을 지능적으로 할 수 있는 제어·계측 시스템<sup>(7)</sup>도 개발되었다.

2 단 병렬기구의 작업공간이 넓다고 하나 자세 작업공간은 40° 이내로 프로펠러 블레이드 면을 따라 연속적으로 디버링 하기에는 부족하다. 따라서 프로펠러 블레이드 연삭작업을 위한 병렬-직렬 조합형 로봇을 개발했다<sup>(8)</sup>. 즉, 로봇의 몸체는 병렬기구로 구성하고 손목은 직렬기구로 구성하여 서로 취약점을 보완토록 설계·제작하였다. 주조공정에서 생산된 주물 상태의 블레이드 높이를 측정하고, 모델링하여 연삭 깊이를 결정해 작업을 자동으로 수행하는 시스템을 개발하였다.

병렬기구 적용분야로 가장 매력적인 분야는 공작기계라 될 것이다. 미국, 일본, 독일 등에서 병렬기구를 적용한 공작기계를 개발했으며 국내에서도 몇몇 대학과 연구소가 시도했다. 그러나 병렬기구형 공작기계가 일반 직각좌표형 공작기계와 비해 강성, 정밀도, 보정 등에서 뒤지고 있다. 지금은 병

렬기구 공작기계의 효율성에 부정적인 시각이 많아 연구가 답보상태에 이르렀다. 그러나 국내 공작기계의 생산이 몇몇의 대표적 기종에 집중되어 있어 사용자의 다양한 요구에 부응하지 못하고있는 실정에서 병렬기구형 공작기계는 대안이 될 수 있다. '97-'99년도 공작기계 수입 동향에 따르면 NC 선반, NC 머신닝 센터보다 이외의 전용기계 공작기계의 수요가 더 큼을 보여주고 있다. 그 원인은 기존 공작기계의 운동방식에 따른 작업공간의 한계도 주된 원인이 될 것이다. 복잡한 난 형상 가공을 위해 톨의 위치와 자세를 생성하는 5면 가공기가 개발되고 있으나 대형·고가로 일반 중소기업에서 갖출 수 있는 장비가 못 된다. 일반적으로 지그를 설치해 절삭각을 만들거나 베드에 Rotary 테이블 또는 Tilting 축을 부가해 자세제어를 구현한다. 그러나 테이블 구동이 편심 회전축의 조합에 의해 행해지므로 톨의 접근을 막는 작업공간이 많고, 대형 가공물을 탑재할 수 없으며, 특이점 (불연속 운동 점) 을 가져 진정한 의미의 3차원 난 형상 가공에는 미흡한 실정이다. 따라서 위치와 자세를 동시에 생성할 수 있는 병렬기구형 공작기계는 이상과 같은 난 형상 가공에 가장 적합한 공작기계라 될 것이다.

우리는 병렬기구의 고 강성을 유지하면서 고 정밀도를 유지하기 위해 6-개의 다리가 플랫폼을 지지하는 SGP 형으로 CNC 공작기계를 개발했다<sup>(9)</sup>. 본 공작기계의 가장 큰 문제는 것은 보정작업과 가공 프로그램이다. 보정작업은 가공 및 조립 시 발생하는 오차를 줄이기 위해 실제 기구학적 변수 값을 찾아내는 것으로 병렬기구가 고 정밀 기계가공 작업에 적용되기 위해서는 꼭 필요한 작업이다. 그러나 병렬기구의 보정작업은 찾아야 할 변수의 수가 많고, 각 방향의 운동이 각 액추에이터로 분리되지 않아 운동과 변수의 관계식이 고차 비 선형방정식으로 표현된다. 우리는 병렬기구의 보정을 위해 톨의 운동을 평행이동으로 구속하고, 디지털 인디케이터로 데이터를 측정하는 자동 보정 시스템을 개발하고 있다. 가공 프로그램은 Windows 운영체제 하에서 GUI(Graphic User Interface)의 형식으로 개발되었고, 사용자의 편리를 극대화할 수 있는 RAD (Rapid Application Development) 방식을 취하고 있다.

실제 적용문제에 있어서 병렬기구형 공작기계는 보정의 한계로 정밀도에 취약점을 보이고 있다. 이러한 문제의 대안으로 일반 직교좌표형 공작기계

와 병렬기구형 Titring Table를 조합한 6-축 CNC 공작기계가 좋은 아이디어가 될 수 있다. 병렬기구형 Titring Table은 로터리형 Titring Table의 문제점을 해결할 뿐 아니라 일반 직각좌표형 공작기계의 장점을 잘 살릴 것이다.

병렬기구의 또 다른 적용분야로 무거운 중량물을 다루는 수중 항만공사도 좋은 적용분야가 될 수 있다. 방파제 피복작업에서는 현재 2-3톤의 피복석을 기중기가 들어올려 해저로 운반하면 잠수부가 이를 밀고 당겨 원하는 위치에 내려놓는다. 무거운 중량물을 다루는 과정에서 손가락을 다치는 산재와 잠수병 공포에 시달리고 있으며, 밀고 당기는 작업만으로는 정교한 작업을 할 수 없다. 그러나 병렬기구를 사용할 경우 2-3 톤의 중량물이라 할지라도 6-개의 선형 액추에이터가 그립퍼를 지지하므로 과중한 부하가 아니며 중량물의 위치와 자세를 자유자재로 조절할 수 있으므로 정교한 작업이 가능할 것이다.

본 논문에서 수중 항만공사용 로봇을 제외한 상기 4-가지 타입의 로봇 및 공작기계 (2단 병렬기구형 주물귀 제거 로봇, 병렬-직렬 조합형 프로펠러연삭 로봇, SGP형 CNC 공작기계, 일반 직각좌표 공작기계에 병렬기구형 Titring Table을 첨가한 난형상 가공기)에 대해서 기술한다.

## 2. 2단 병렬기구형 로봇 머니플레이터 (Double Parallel Mechanism Robot : DPM)

DPM은 2개의 병렬기구와 중앙축으로 이루어져 Fig. 1과 같이 제작되었다. 첫째 단에는 3-개의 선형 액추에이터  $LA_i(i=1,2,3)$ 가 Base-1과 Platform-1 사이에 상·하 유니버설조인트에 의해 각각 연결되어 있다. 둘째 단에는 2-개의 선형 액추에이터  $LA_i(i=4,5)$ 가 Base-2와 Platform-2 사이에 설치되어 있다. 각 병렬기구의 운동은  $LA_i$ 의 길이 조절로 제어된다. 운동범위를 넓히기 위해 첫째 단의 상위 유니버설조인트와 둘째 단의 하위 유니버설조인트에 각각 편심 링크(offset-link)가 삽입되어 있다. 중앙축은 피동 조인트로 이루어져 있으며 첫째 단을 구속하면서 Platform-1을 임의 공간에 위치시키고 둘째 단을 구속시켜 Platform-2의 자세를 생성한다. DPM은 위치와 자세를 동시에 생성시켜 Fig. 2와 같은 주물의 디버링 작업에 적용하고 있다. DPM의 특징은 작업공간이 넓고, 특이점이 작업공간 밖에

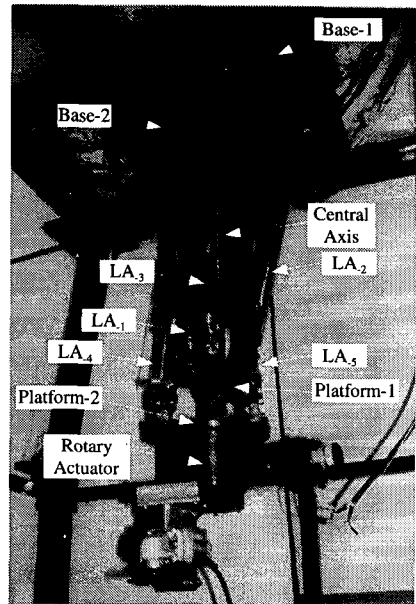


Fig. 1 Double Parallel Mechanism Robot

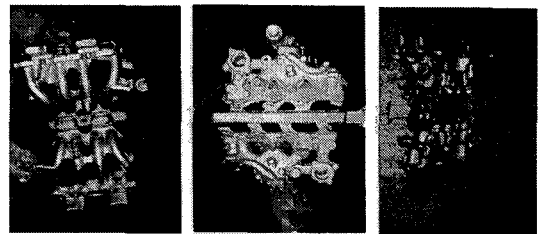


Fig. 2 Casting

있으며, 가공부하가 골고루 분산된다는 것이다. 그러나 중앙축이 모든 비틀림 하중을 감당해야하는 비틀림 부하에 취약한 구조이다. 이러한 특징들이 아래와 같이 해석되어 입증되었다.

### 2.1 작업공간 해석

각  $LA_i$ 를 최단에서 최장까지 움직일 때 Platform-1이 도달할 수 있는 위치공간과 Platform-2가 회전할 수 있는 자세공간을 분리해서 구한다<sup>(6)</sup>. Platform-1이 도달하는 위치는 첫째 단의  $LA_i(i=1,2,3)$ 에 의해서 생성된다. 자세 작업공간은 Platform-2가 이루는 각도로 정의하고, 둘째 단의 페루프에서  $LA_i$ 의 길이에 의해 결정된다. Fig.3은 플랫폼의 높이가 800, 900, 1000, 1100일 때 X-Y 평면에서 DPM과 SGP의 작업공간을 나타낸 것이다.

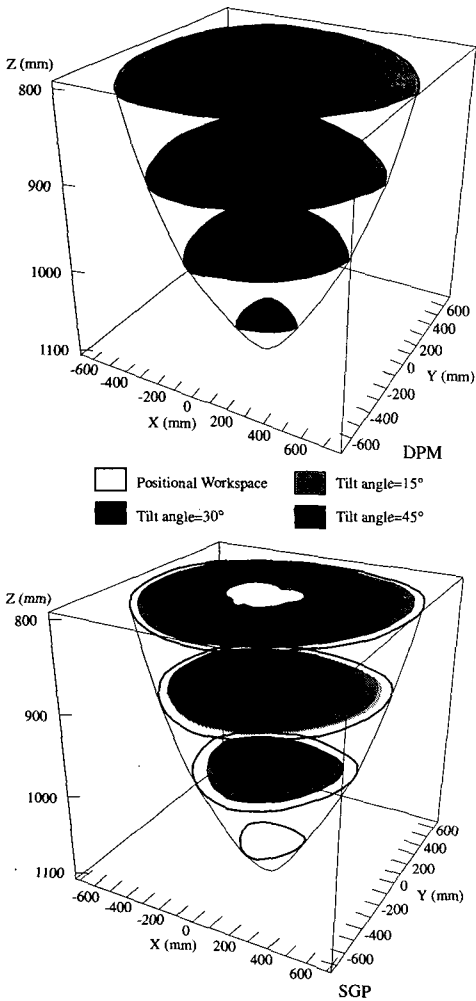


Fig. 3 Workspace in a X-Y plane

DPM의 경우 모든 위치 공간에서  $15^\circ$ 의 자세를 가질 수 있으며 각 높이에서 중앙으로 갈수록 자세는 점점 커져  $45^\circ$ 까지 가능하다. 그러나 SGP는 위치뿐만 아니라 자세 작업공간도 아주 작음을 알 수 있다. DPM은 둘째 단이 분리되므로 높이에 상관없이 자세공간을 갖으나 SGP는 위치와 자세를 동시에 생성해야 하므로 중간 높이에서만 큰 각도가 가능할 뿐 위와 아래 부분은 링크 길이의 제한 때문에 큰 각도를 생성할 수 없다.

## 2.2 특이점 해석

병렬기구의 특이점은 일정한 영역에 한정되어 있지 않기 때문에 작업공간과 어떤 상관관계를 갖

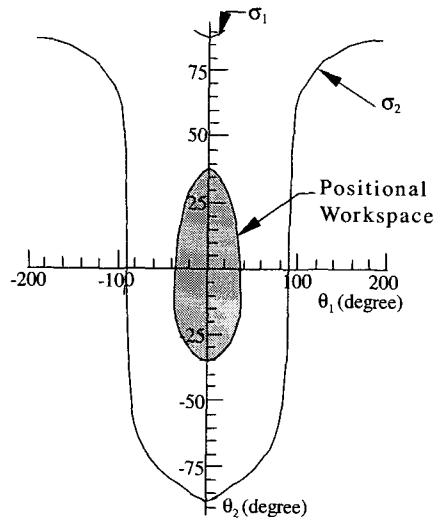


Fig. 4 The singularity loci of the first PM

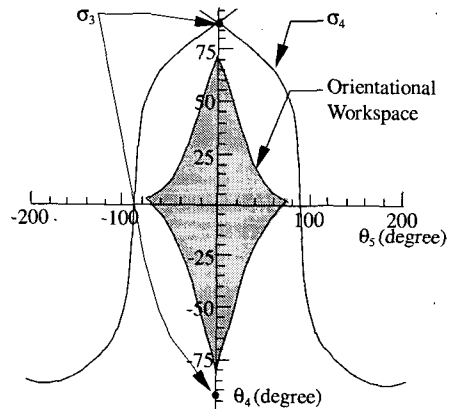


Fig. 5. The singularity loci of the second PM

는지 단정하기 어렵다<sup>(10)</sup>. 또한 자코비안 행렬식이 여러 변수로 되어있으므로 명확한 기하학적형상을 찾기도 어렵다. 플랫폼을 지탱하는 선형 액추에이터의 형상뿐만 아니라 운동을 구속하는 피동 조인트의 형상까지 분석함으로써 DPM의 특이점을 찾아내고 그 영역이 작업공간밖에 있음을 증명한다. 모터 벡터의 원리를 이용하여 각 단의 구속운동을 포함한 자코비안을 유도하고 유도된 자코비안 행렬식으로부터 특이점을 분석하였다. 결과적으로 중앙축은 피동조인트의 조건에 의하여 특이점이 발생하지 않고, 첫째 단의 특이점은 Fig.4의  $\sigma_i$  ( $i=1,2$ )이고, 둘째 단의 특이점은 Fig.5의  $\sigma_i$  ( $i=3,4$ )

이다. DPM은 첫째 단과 둘째 단에 의해서 각각 위치 및 자세 작업공간이 생성되는데 각 공간의 가장 자리에 도달하기 위한 조인트의 궤적은 Fig.4와 5의 작은 폐곡선으로  $\sigma_i(i=1,2,3,4)$ 는 항상 작업공간 밖에 존재하여 특이점은 항상 작업공간 밖에 존재한다고 단정할 수 있다.

또한 특이 형상은 각단에 부과되는 힘과 모멘트의 평형관계를 적용함으로써 분리해서 찾을 수 있다. 첫째단과 둘째 단에 적용하여 보면 자코비안에서 유도된 것과 동일한 결과를 얻을 수 있어 특이 형상이 작업공간 내에서 존재하지 않음을 확인할 수 있다<sup>(11)</sup>.

### 2.3 동특성 해석

2단 병렬기구는 일반 병렬기구와 달라 동특성 해석에서 2가지 문제를 일으킨다. 즉, 1) 첫째 단과 둘째 단이 3-개 또는 2-개의 선형 액추에이터로만 구동되므로 플랫폼에 부과되는 하중을 구동 액추에이터에 직접 변환시킬 수 없고, 2) 중앙축과 같이 피동 조인트로만 이뤄진 링크 트레인이 있어 능동 조인트뿐만 아니라 피동 조인트의 동특성도 해석되어야 한다. 우리는 DPM이 보유하고 있는 모든 링크 트레인의 속도, 가속도를 모타 벡터를 이용하여 구하고 모타 벡터에 작용하는 힘/모멘트의 구속조건을 구했다. 외부에서 작용하는 힘/모멘트는 platform-1, platform-2 와 중앙축의 링크 트레인에 의하여 지지 되므로 Fig. 6과 같이 등가원리로 일반화했다<sup>(12)</sup>.

해석 결과 가공부하 300N, 가반중량 30kg의 조건에서 선형 및 회전 액추에이터의 모타에 부과되

는 토오크는 12.5kg-cm 이하로 400W급 모타로 충분히 담당할 수 있었다. 그러나 중앙축 혼자 platform-1과 -2에 부과된 모든 비틀림 하중을 담당해야하므로 850N-m의 강성을 갖는 보울-스플라인으로 설계했다.

### 2.4 미지형상 가공 시스템

DPM을 디버링 작업에 적용하는 방법으로 버어의 크기에 따라 일정한 가공 부하를 유지하는 가공 시스템을 구현하였다. 제작된 시스템은 Fig. 7과 같이 DPM 로봇, 비전 카메라 및 부하 센서, 그라인더 등으로 구성되어있다<sup>(7)</sup>.

미지의 형상에 나있는 버어를 추적하기 위해 3차원 형상을 X-Y 수평면과 X-Z 수직면으로 분리하고 가공 경로를 측정 및 예측한다. 비전 및 부하 센서에 의한 버어의 측정방법과 예측 알고리즘을 개발하여 접선, 축선 및 법선 방향의 속도제어를 융합한 제어를 설계했다. Fig. 8은 설계된 제어를 적용하여 가공작업을 수행하는 장면이다.

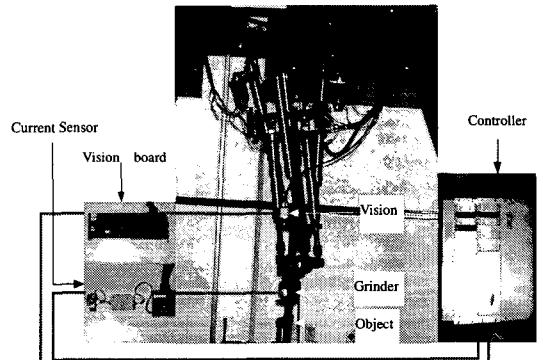


Fig. 7 Robot control and measurement system constructed for deburring work

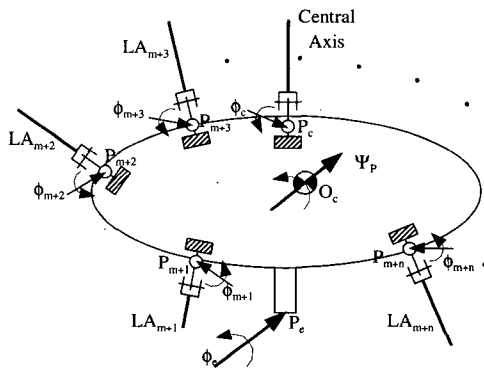


Fig. 6 Force and moment equilibrium in a platform

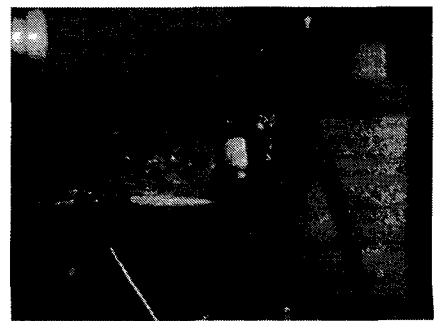


Fig. 8 Deburring work

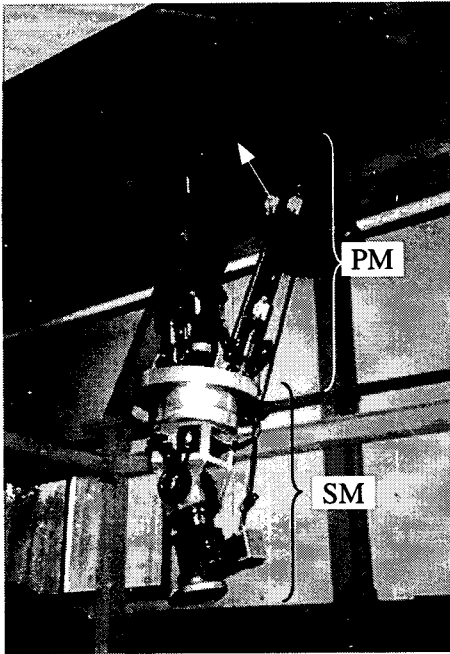


Fig. 9 Constructed HPSM

### 3. 병렬-직렬 조합형 머니플레이터(Parallel-Serial Hybrid typed Manipulator, PSHM)

프로펠러의 주조 공정으로는 형상의 정밀도를 맞출 수 없으므로 주조 공정이 끝난 블레이드 주물을 설계도면과 비교하면서 표면을 연삭하는 작업이다. 대형 블레이드의 경우 15일 이상이나 걸리는 인력소모가 많은 작업으로 일부에서는 전용기를 사용하고 있으나 가공자국을 없애는 표면 연삭작업은 아직도 인력에 의존하고 있다. 프로펠러는 다품종 소량 생산으로 다양한 형상과 크기에 따라 작업이 용이하게 이뤄지도록 병렬-직렬기구 조합형 로봇 시스템을 설계·제작했다.

HPSM은 Fig.9와 같이 첫 단은 병렬기구(PM)로 되어있어 강성을 크게 해주고 둘째 단은 직렬기구(SM)로 되어있어 작업공간을 크게 해준다. 첫 단의 역할은 포지션 구동부로 오리엔테이션 구동부인 둘째 단을 임의 공간에 위치시키고 둘째 단은 로봇의 손목운동인 오리엔테이션 (요오, 피치, 롤)을 생성한다.

연삭 전 프로펠러 블레이드 주물의 형상을 알 수 없으므로 연삭 깊이와 궤적을 결정할 수 없다. 따라서 Fig. 10과 같이 접촉 probe로 블레이드 표면

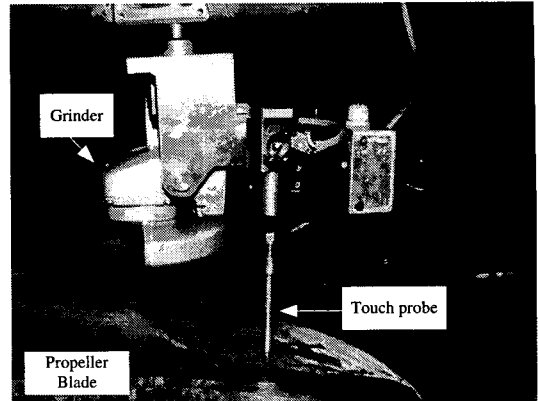


Fig. 10 Propeller blade measured by a touch probe

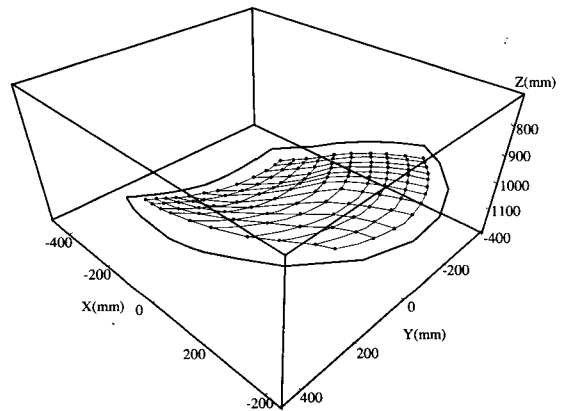


Fig. 11 Modeling in 3D space

의 높이를 측정하고 이를 설계형상과 비교함으로써 연삭 깊이를 결정한다. Fig. 11과 같이 높이가 측정되어 블레이드가 형상화되면 연삭 깊이에 따라 작업을 실시한다. 연삭 작업은 위치 제어로 실시되는데 각 점 사이를 곡선으로 보간한 후 모든 데이터를 한 궤적으로 인식하여 이를 따라 그라인더를 이동시킨다<sup>(13)</sup>.

### 4. 병렬기구형 CNC 공작기계

기계 가공작업은 대부분 직각좌표형 공작기계에 의해서 행해진다. 그러나 직선 운동만 하는 공작기계로 수행할 수 없는 작업이 있다. 즉, 주조과정에서 형성된 주물 귀를 제거하는 페틀링(Fettling), 가공물의 안팎에 형성된 버(bur)를 제거하는 디버링, 복합형상을 가공하는 밀링(milling) 등

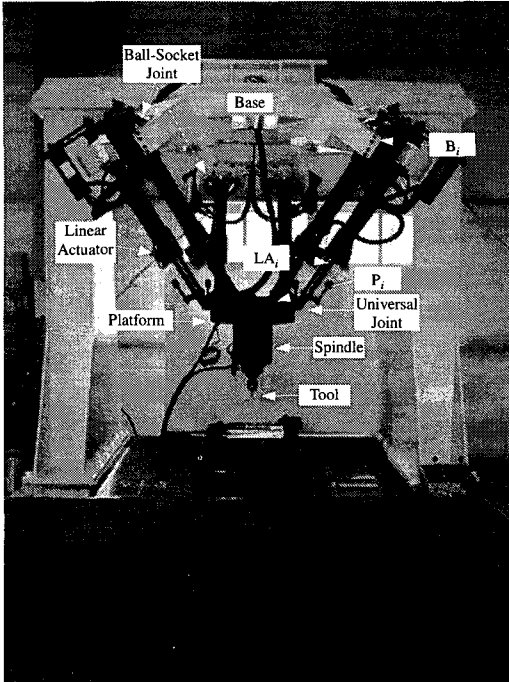


Fig. 12 SGP typed manipulator constructed for a CNC machining center

은 가공 툴이 절삭부위에 자유롭게 접근할 수 있도록 툴의 자세가 제어되어야 한다. 따라서 위치와 자세를 동시에 생성할 수 있는 병렬기구형 공작기계가 차세대 공작기계로 부각되고 있다. 많은 종류의 병렬기구가 제안되었으나 SGP 형태를 변경한 어떤 경우도 강성을 떨어뜨린다. 따라서 고 강성을 유지하기 위해 6개의 다리가 플랫폼을 지지하는 SGP형 병렬기구로 CNC 공작기계를 개발하였다.

병렬기구형 공작기계는 Fig. 12와 같이 베이스, 플랫폼, 그리고 그 사이에 설치된 6개의 선형 액추에이터,  $LA_i$ , for  $i=1,2,\dots,6$ 로 이루어져 있다.  $LA_i$ 의 직선운동이 플랫폼을 밀고, 당겨 원하는 위치와 자세를 갖게 한다.  $LA_i$ 의 상단은 볼-소켓 조인트에 의해 베이스 상의 점  $B_i$ 에 연결되어 있고, 하단은 유니버설 조인트에 의해 플랫폼 상의 점  $P_i$ 에 연결되어 있다. 강성을 높이기 위해 볼-소켓 조인트가 중간에서  $LA_i$ 의 하우징을 감싸므로 액추에이터의 거리를 줄였다. 각  $LA_i$ 는 링크 트레인을 형성하는데 5개의 회전 조인트 (볼-소켓, 유니버설)는 피동 조인트들이고, 1개의 슬라이딩 조인트만 능동으

로  $LA_i$ 의 길이를 늘이고, 줄인다. 6개의  $LA_i$ 와 6개의 볼-소켓 및 유니버설 조인트에 의해 병렬기구형 공작기계는 6자유도를 갖게 된다.

#### 4.1 병렬기구형 공작기계의 보정

볼-소켓 및 유니버설 조인트가 공간상에서 조립되고, 이들의 조립 공차가 커 병렬기구형 공작기계의 기구학적 실제 값은 설계 값과 많은 차이가 있다. 제어기에서 설정한 기구학적 변수가 실제 값과 다를 경우 원하는 위치/자세를 생성할 수 없다. 따라서 정교한 작업을 요하는 공작기계에서 실제 변수 값을 정확히 찾는 보정은 매우 중요한 작업이다. 직선 운동만 하는 일반 공작기계는 찾아야 할 변수가 작고 (3개 이하), 각 축의 기구학적 변수가 그 축 방향의 운동만 관여하므로 보정 작업이 용이하다. 그러나 병렬기구는 찾아야 할 변수로 총 42개로 많고, 출력운동이 각 축의 구속운동으로 생성되고 또한 공간상에서 움직이므로 측정이 어려워 보정 작업이 어렵다.

보정을 위해 디지털 인디케이터와 정반을 이용한 운동구속으로 보정 데이터를 획득하였다. 데이터의 획득은 측정오차를 최소화하고 백래시를 고려한 자동 보정 데이터 획득 알고리즘을 적용하였다. 획득된 데이터로 최적화 알고리즘을 이용해 실제 기구학적 변수를 찾으면 Table 1과 같다. 결과에서 보듯이 설계 값과 보정 결과 값 사이에 2.5 mm 이상의 오차가 있음을 알 수 있다. 이는 보정 작업이 이뤄지지 않고는 공작기계에 적용할 수 없을 말해 주고 있다.

보정의 결과를 점검하기 위해 기구의 출력단에 디지털 인디케이터를 Z-축 방향으로 설치하여 정반 면에 닿게 하고 Y-축 방향으로 200mm 이동했을 때 높이의 오차를 측정했다. Fig. 13은 기구학적 변수 값을 설계 값(a)과 보정 값(b)으로 적용했을 때 결과로 (a)의 경우 2.5mm의 높이오차를 가졌고, (b)의 경우 0.13mm의 오차로 향상된다. 결과적으로 보정된 변수 값이 설계 값 보다 약 95% 향상되고 있으나 공작기계에 적용하기에는 미비한 결과이다. 따라서 병렬기구가 공작기계에 적용되기 위해서는 백래시, 측정 노이즈, 컴플라이언스 등을 고려한 보정 방법이 연구되어야 한다.

Table 1 Kinematic parameters assigned by design model (unit : mm)

Axis no.	bx	by	bz	px	py	pz	l i
1	544.47	-544.47	0	251.14	-67.29	0	850
2	199.29	-743.76	0	-67.29	-251.14	0	850
3	-743.76	-199.29	0	-183.84	-183.84	0	850
4	-743.76	199.29	0	-183.84	183.84	0	850
5	199.29	743.76	0	-67.29	251.14	0	850
6	544.47	544.47	0	251.14	67.29	0	850

Kinematic parameters obtained by calibration process (unit : mm)

Axis no.	bx	by	bz	px	py	pz	l i
1	544.47	-544.47	0	251.14	-67.29	0	850.12
2	199.07	-743.26	-1.44	-68.47	-252.03	1.30	848.04
3	-742.91	-200.47	1.04	-185.88	-183.56	-0.18	851.93
4	-742.46	199.24	1.19	-185.35	184.44	-1.09	848.44
5	200.017	743.37	-1.10	-70.05	251.35	0.48	851.75
6	543.84	544.55	-2.74	251.63	66.65	2.53	850.55

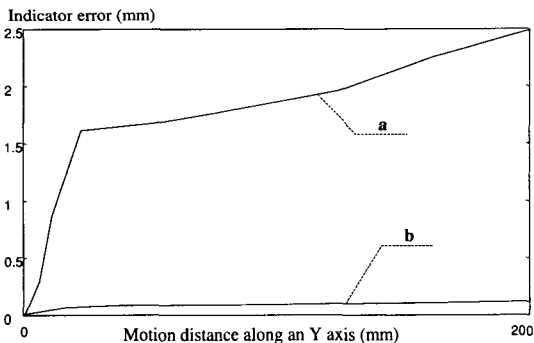


Fig. 13 Accuracy

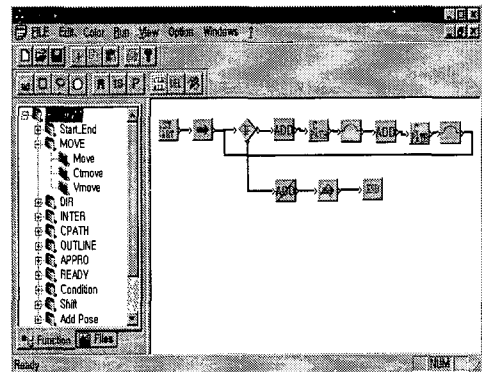


Fig. 14 GUI program built by graphic icons

#### 4.2 병렬기구형 공작기계의 프로그램

기존 공작기계 컨트롤러는 병렬기구형 공작기계에 적용될 수 없다. 그러므로 GUI 방식의 가공 프로그램을 개발하였다. Fig. 14와 같이 왼쪽 윈도우에 나타나있는 명령들을 선택해 오른쪽 에디터 윈도우에 배열하고, 아이콘 형태의 명령들을 흐름도를 그리듯 서로 연결하여 프로그램을 작성하므로 초보자라도 쉽게 작성할 수 있다. 명령의 종류에는 G코드에서 제공하는 직선가공, 원호가공, 조건 등의 모든 명령에 구 가공 등의 복합형상의 가공을

위한 명령이 추가되었다. 가공프로그램은 파일로 저장되고, 읽기 명령으로 재사용이 가능하다. 또한, 그래픽 시뮬레이터가 포함되어 작업 전에 복잡한 병렬기구의 운동을 미리 보며, 작업과정, 링크 간섭 등을 확인할 수 있다. Fig. 15는 개발된 가공 프로그램을 이용하여 구를 가공한 결과이다<sup>(14)</sup>.





Fig. 15 The manufactured workpiece

### 5. 테이블 자세제어형 난 형상 가공기

이상 병렬기구형 로봇 및 공작기계를 연구하면서 여러 논문에서 언급하고 있는 병렬기구의 장점이 실제와 다를 것을 발견하게 된다. 이들을 나열하면

- 1) 여러 링크와 조인트 연결로 이뤄진 병렬기구는 다 관절기구에 비해 강성이 크나, 기계가 공작업에는 충분치 못하다.
- 2) 6-개의 링크가 집중적으로 설치된 병렬기구는 위치와 자세를 동시에 생성하나 링크 간섭으로 자세 작업 공간이 매우 작다 ( $20^\circ$  이하).
- 3) 조인트의 백래시와 컴플라이언스 (compliance) 등으로 구속운동이 이론과 같이 발생하지 않아 정밀도가 낮다.
- 4) 구속운동에 참여하는 기구학적 변수가 많아 보정 작업이 어렵다.

위 문제들은 병렬기구 활용에 치명적인 저해 요소라 할 수 있다. 그러나 일반 공작기계가 갖지 못한 장점을 가지고 있으므로 차세대 공작기계로 적용시키기 위해서는 위 과제들을 해결해야 한다. 우리는 일반 직각좌표와 병렬기구를 조합한 위치/자세 분리구동형 공작기계를 하나의 대안으로 제시했다. 강성, 정밀도 등에서 우수성이 입증된 직각좌표 기구를 일반 공작기계와 같이 사용해 툴의 위치(X, Y, Z)를 구동하고, 난 형상 가공을 위한 필요한 자세 (요오, 피치, 롤)는 병렬기구가 테이블을 기울이도록 한다. 로터리형 테이블은 축 수에 따라 로터리 액츄에이터를 쌓는 타입으로 축 수가 증가함에 따라 높이가 높아지고, 회전 조인트의 조합으로 자세를 생성하는 과정에서 불연속 궤적이 나타나 완전한 난 형상 가공을 할 수 없다. Fig. 16은 테이블 자세 제어형 난 형상 가공기의 개념도를 나타낸 것으로 직각좌표형 몸체와 병렬기구형 테이블을 조합한 구조이다. 몸체는 툴을 3축으로 직선 운동시키

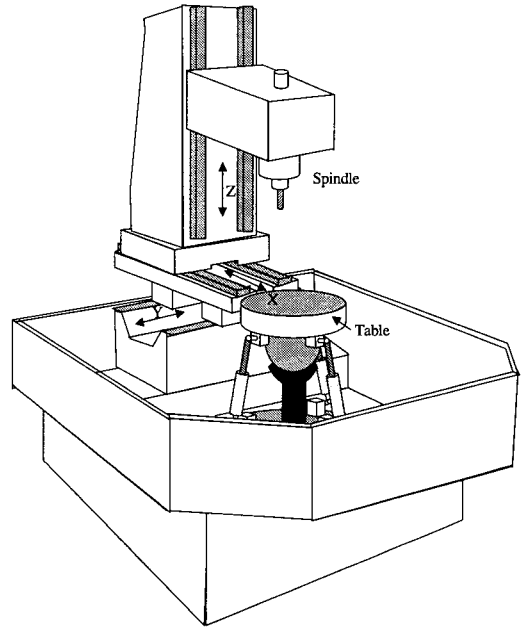


Fig. 16 Complex shape machine using table orientation control

고, 테이블은 가공물의 자세를 3축으로 제어해 가공 툴이 절삭부위에 자유롭게 접근할 수 있는 6축 난 형상 가공기를 개발하고 있다. PC-Based Motion Controller를 구성하고, 그래픽 창으로 모듈화된 RAD(Rapid Application Development) 툴과 CAD / CAM 프로그램을 개발하여 운용 프로그램에 적용시키고자 한다.

### 6. 결론

기계 가공작업의 영역을 확대하기 위해 병렬기구를 이용한 로봇 및 공작기계를 개발하고 있다. 2단 병렬기구 로봇을 제작해 황삭 작업인 주물귀 제거에 적용하고 병렬-직렬 조합형 로봇을 개발해 프로펠러 블레이드 연삭에 적용하고 있다. 제안된 기구의 특성을 정량적으로 나타내기 위해 작업공간, 특이점, 동특성 등의 해석이 수행되었으며 일반 병렬기구의 취약점을 보완했다 할 수 있다. 그러나 위 로봇은 황삭 작업에 적합할 뿐 정밀을 요하는 기계가공에는 강성과 정밀도가 미치지 못한다.

병렬기구를 공작기계로 적용하기 위해 SGP 형태의 공작기계를 개발했다. 조립작업이 3차원 공간 상에서 이뤄지므로 기준면 또는 기준선을 설정하기

어려워 설계치수와 실제치수 사이에 큰 오차를 가지고 있었다. 이를 보정하기 위해 구속운동에 의한 보정작업 결과 95%의 정밀도 향상을 얻었으나 아직 공작기계에 적용하기에는 미비한 실정이다. 병렬기구를 연구하면서 단원 5에서 언급한 바와 같은 문제를 발견하게 된다. 병렬기구가 차세대 공작기계, 로봇 등으로 각광 받기 위해서는 당면한 문제들을 해결하기 위한 기초 연구가 이뤄져야겠다. 병렬기구의 장점을 살릴 수 있는 적용분야를 찾는 것도 중요한 연구 분야라 할 수 있다. 그런 면에서 본 연구실이 개발하고 있는 병렬기구를 이용한 “자세제어형 난 형상 가공기”와 “수중 항만공사용 로봇”은 병렬기구의 적용확대에 계기가 될 것이라 생각한다.

### 참고문헌

1. D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," in Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 180, part 1, No. 5, pp. 371-386, 1965-1966.
2. V. E. Gough, "Universal tire test machine," in Proc. of Ninth International Technical Congress F.I.S.I.T.A. Vol. 117, May 1962.
3. C. Gosselin, "Kinematic analysis, optimization and programming of parallel robotic manipulators," Ph. D. dissertation, Dept. of Mechanical Eng., McGill Univ., Montreal, Canada, 1988.
4. 이민기, "기계 가공작업을 위한 강성이 큰 2단 평행구조 로봇 암 설계," 대한 기계학회논문집, 제 19권 1호, pp. 22-37, 1995. 1월
5. 이민기, 최병오, 이성학, 박근우, "2단 병렬 머니플레이터의 작업공간 해석," 대한 기계학회 논문집 A권, 제 22권 12호, pp. 2247-2255, 1998년 12월
6. 이민기, "2단 평행구조 로봇 암의 동특성 해석," 대한 기계학회 논문집, 제 19권 11호, pp. 2912-2926, 1995년 11월
7. 박근우, 이중훈, 최병오, 이민기, "미지형상 표면의 연삭 작업을 위한 로봇 제어·계측 시스템 개발," 대한 기계학회 논문집 A권, 제 24권 4호, pp. 1039-1046, 2000년 4월
8. 이민기, 최병오, 박근우, "고 강성 로봇을 이용한 프로펠러 연삭에 관한 연구," 한국정밀공학회 논문집, 제 14권 12호, pp. 56-65, 1997년 12월
9. Min Ki Lee, Tae Sung Kim and Kun Woo Park, "Development of a CNC Machining Tool with Stewart Platform," Proceedings of the ISIM 2000, Kyongnam, Korea, pp. 270~274. Oct. 2000.
10. Min Ki Lee and Kun Woo Park, "Singularity Analysis with respect to the Workspace of a Double Parallel Manipulator," KSME International Journal, Vol. 13, No. 4, pp. 368-375, Apr. 1999.
11. Min ki Lee and Kun Woo Park, "Workspace and Singularity Analysis of a Double Parallel Manipulator," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pp. 367-375, Vol. 5, No. 4, Dec. 2000.
12. Min Ki Lee and Kun Woo Park, "Kinematic and Dynamic Analysis of a Double Parallel Manipulator for Enlarging Workspace and Avoiding Singularities," IEEE Transaction on Robotics and Automation, pp. 1024- 1034, Vol. 15, No. 6, Dec. 1999.
13. Min Ki Lee, Kun Woo Park, Byung Oh Choi, "Kinematic and Dynamic Models of Hybrid Robot Manipulator for Propeller Grinding," Journal of Robotic Systems, Vol. 16, No. 3, pp. 137-150, Mar. 1999.
14. 박근우, 김태성, 최병오, 이민기, "병렬기구 공작기계의 프로그램 개발 (development of a CNC Machine using a Parallel Mechanism)," 한국공작기계학회 2000년도 춘계학술대회 논문집 pp. 679 ~ 684. 2000년 4월.