

병렬기구 공작기계의 개발 현황과 전망

김 종 원

서울대학교 기계항공공학부 부교수

1. 공작기계의 새로운 개념

1775년 영국의 John Wilkinson에 의하여 수평형보링 머신이 개발된 이래로, 금속절삭을 위한 공작기계는 현대 기계공업의 가장 중요한 생산요소로 자리잡고 있다. 이는 선진국에서 생산되는 기계의 약 10%가 공작기계이며, 기계공업 인력의 약 10%가 공작기계 분야에 종사하는 데서 알 수 있다.

현대의 공작기계는 작업 종류에 따라 밀링머신, 선반, 연삭기, 플레이너 등의 여러 종류로 세분화되어 있는데, 그 기본적인 기계 구조로서 직렬기구(serial mechanism)를 이용하고 있다. 직렬기구는 베드에서부터 공구까지가 각 축 이송부의 직렬형태로 연결된 외팔보 구조로 되어있다. 공작기계의 기구 구조로서의 직렬기구는 넓은 작업공간과 제어의 용이함, 그리고 제작 및 조립이 간단하다는 장점을 가지고 있어, 공작기계 뿐만 아니라 로봇 등의 기구 구조로 널리 채택되어 왔다.

1994년 미국에서 열린 국제공작기계전시회(IMTS'94)에서는 기존의 공작기계의 개념을 완전히 바꾼 새로운 개념의 공작기계들이 출품되어 사람들의 커다란 주목을 받았다. 미국 및 유럽의 회사들에 의해 개발된 이 공작기계들은 스텐워드 플랫폼(Stewart platform)이라 불리는 병렬기구(parallel mechanism)를 기계의 구조로 이용한 것들이다. 기존의 공작기계가 기계 베이스에서 공구까지 직렬의 연쇄 구조로 이루어져 있는데 반하여, 이 기계들은 복수개의 링크들의 조합으로 연결되어 있는 것을 특징으로 한다. 대표적 병렬기구인 스텐워드 플랫폼은 기계 베이스인 상판과 공구가 장착되는 하판이 여섯 개의 링크로 연결된 구조로 되어있다. 스텐워드 플랫폼은 각 링크의 길이를 독립적으로 변화시킴으로써 주축의 6자유도 운동을 얻을 수 있는 기구로서, 1965년 미국의 Stewart에 의하여 비행기의 운동시뮬레이터로 개발된 기구이다. Stewart의 1965년 논문에는 이미 이 기구의 절삭기계로서의 가능성이 지적되어 있는바, 제작 및 제어의 어려움으로 인하여 그 동안 주로 비행기 운동 시뮬레이터 및 놀이공원의 운동 시뮬레이터로 사용되어 왔다.

지금까지의 공작기계의 발전이 주로 이송부, 주축부, 제어부 등의 요소기술의 발전에 의지하여 왔던 것을 생각한다면, 공작기계의 구조 자체를 병렬기구로 바꾼

것은 공작기계의 개념을 완전히 바꾸는 새로운 발상의 전환이라 할 수 있다. 병렬기구가 미래의 공작기계 구조로 주목받는 것은 직렬기구에 비하여 다음과 같은 장점을 가지고 있기 때문이다.

첫째, 병렬기구는 직렬기구에 비하여 우수한 강성 특성을 가지고 있다. 기존의 직렬기구형 공작기계는 외팔보 구조의 형태로서 공구에 절삭력이 인가되었을 때, 각 이송부는 인장 압축력뿐만 아니라 굽힘력의 하중이 걸리게 되어 변형하게 된다. 따라서 절삭기계로서의 강성을 높이기 위하여 각 이송부는 매우 육중한 구조로 제작되고 있는 실정이다. 이에 반하여 병렬기구는 공구가 설치되는 운동부와 기계 베이스가 복수개의 링크로 연결됨으로써 절삭력이 각 링크로 분산될 뿐만 아니라, 각 링크는 인장 압축력만을 받게 되어 가벼운 링크 구조로 큰 힘을 전달 수 있는 구조적 장점을 가지고 있다. 미국의 Giddings & Lewis사에 의하여 제작된 병렬기구 공작기계인 VARIX는 $175N/\mu m$ 의 강성을 보유하고 있는 바 이는 기존 머시닝센터의 5배에 해당하는 값이다.

둘째, 병렬기구는 직렬기구에 비해 고속, 고가속도 운동에 유리한 기구 구조이다. 직렬기구의 각 이송부는 강성을 고려하여 매우 육중할 뿐만 아니라, 베이스에 가까운 이송부일수록 상위 이송부 질량을 감당하기 위하여 더욱 크게 제작되어야 하는 구조적 단점이 있다. 병렬기구의 각 이송부는 주축부의 질량만을 감당하면 되기 때문에 작은 출력의 모터로서도 큰 속도 및 가속도를 얻을 수 있다. VARIX는 최대가공속도 $66m/min$, 최대가속도 $1g$ 의 성능으로서, 기존 머시닝센터의 최대가공속도 $16.5m/min$, 최대가속도 $0.5g$ 와 좋은 비교가 된다.

셋째, 6자유도의 운동을 하는 직렬기구와 비교했을 때 병렬기구의 기계 정밀도가 매우 우수하다. 이는 직렬기구는 각 이송부 제작 오차가 누적하여 공구에 반영됨에 비하여, 병렬기구는 평균화하여 나타나기 때문이다.

넷째, 병렬기구의 각 링크 부는 모두 동일한 모듈화 구조로 되어 있어 대량생산시 기계의 가격을 크게 낮출 수 있다. 이는 각 링크에 동일한 기계 구조 및 서보시스템을 사용함으로써 가능한 것이다.

이상과 같은 장점에도 불구하고 병렬기구를 미래의 공

작기계로 사용하기 위해서는 아래와 같은 단점을 극복하여야 한다. 우선 병렬기구에는 같은 크기의 직렬기구에 비하여 매우 좁은 작업공간을 가지고 있는데, 이는 각 링크 부 상호 간섭과 운동부와 연결되는 볼 관절 또는 유니버살 관절의 작동 한계 때문이다. VARIAX는 6,550×6,700×4,000mm의 기계 크기에 비해 겨우 700×700×750mm의 작업공간을 확보하고 있다. 또한, 병렬기구의 기구학적 특징 및 동역학적 특성은 직렬기구에 비하여 매우 복잡하고, 따라서 CNC부의 고난도 보간 기술 및 제어 기술이 요구된다.

이러한 단점이 병렬기구 공작기계를 상용화 단계로 이끄는 데 걸림돌로 작용하고 있음이 사실이나, 앞으로의 활발한 연구 개발을 통하여 이를 극복한다면, 미래의 공작기계 구조로 병렬기구를 꼽는 것에는 큰 무리가 없을 것이다.

2. 선진국의 연구 개발 현황

미국에서는 현재 공작기계 업체 및 국립연구소들이 주축이 되어 병렬기구 공작기계를 활발히 연구하고 있다. 공작기계 제작업체인 Ingersoll사와 Giddings & Lewis사는 세계 최초로 IMTS'94에서 병렬기구를 이용

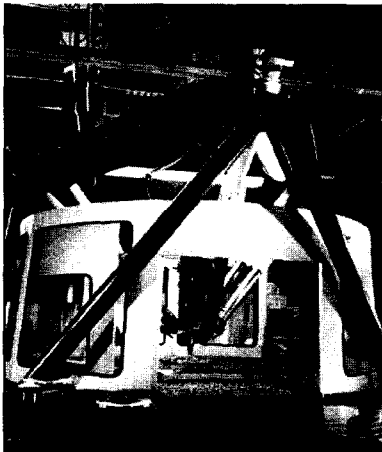


그림 1. Hexapod 전경.



그림 2. Tornado2000 내부.

한 공작기계를 선보였다. 그림 1은 Ingersoll사의 병렬기구 공작기계 Hexapod의 모습이다. Hexapod는 Ingersoll사와 NIST와의 공동연구를 통하여 개발된 기계로서 스튜어트 플랫폼을 기계 구조로 채택한 공작기계이다. 이 기계의 주축은 공간상에서 6자유도의 운동을 할 수 있으며 30°까지의 경사 운동이 가능하다. Hexapod의 외부는 8면체 트러스 구조(octahedron)로 둘러싸여 있는데, 이는 경량을 유지하며 기계의 강성을 크게 하기 위한 것이다. 기계의 작업공간은 1,000×1,000×1,000mm이고 최대속도 20mm/min, 최대가속도 1g 정도이다. Hexapod는 수직형 이외에 수평형도 제작되고 있으며, MIT를 비롯한 미국의 각 대학에서 공작기계로서의 가능성이 활발히 연구되고 있다. Giddings & Lewis사의 VARIAX 역시 스튜어트 플랫폼을 이용한 기계로서 Hexapod를 뒤집어 놓은 구조이다. Hexel사는 스튜어트 플랫폼형 공작기계 Tornado2000(그림 2)을 개발하였다. 이 기계는 작업영역 600×600×600mm, 위치이송정밀도 25μm, 최대급속이송 5mm/min의 성능을 보유한 기계이다. 미국의 국립연구소인 Sandia는 자체 제작한 Hexapod의 test-bed를 이용하여 관련연구를 진행하고 있다.

세계 최대의 공작기계 및 로봇 생산국인 일본은 병렬기구 공작기계의 개발에 있어서 미국에게 선수를 빼

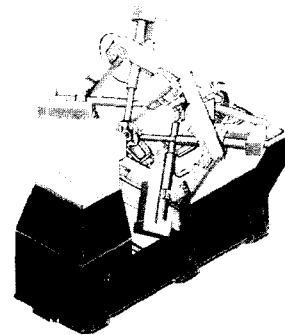


그림 3. Hexact 전경.

앗겼지만, 조금 늦은 1996년 일본공작기계전시회(JIMTOF'96)에 두 가지 병렬기구 공작기계를 출품하였다. 미국이 스튜어트 플랫폼 형태의 병렬기구 공작기계를 주로 개발하고 있는데 반하여, 후발주자인 일본 및 프랑스는 스튜어트 플랫폼과 완전히 다른 구조의 3자유도 병렬기구인 Delta를 이용 또는 변형한 구조를 채택하고 있다. Delta는 프랑스에서 고속의 조립공정에서의 이용을 위해 개발된 3자유도 직각좌표 운동 병렬기구이다. Toyota Koki사가 선보인 HexaM은 스튜어트 플랫폼의 링크가 길이를 가변하여 주축의 운동을 만드는 구조를 개선하여, 일정한 길이 링크를 경사면을 따라 움직이게 하는 구조를 채택하였다. 이는 밀링 기계로서의 강성을 크게 하기 위한 구조 변형이다. Hitachi Seiki사가 출품한 PXA는 이 기계는 고속의 드릴링 작

업을 위하여 고안된 것으로서 최대이송속도 100m/min, 최대가속도 1.5g, 위치이송정밀도 25 μ m, 반복위치정밀도 3 μ m의 성능을 보유하고 있는 것으로 발표되었다. Geodetics사는 병렬기구 공작기계를 세계 최초로 개발한 영국의 소규모 벤처회사이다. 이 회사의 기계 GPM1000-04X는 스튜어트 플랫폼 형태의 병렬기구 공작기계로서, 최대이송속도 30m/min, 최대가속도 6g의 성능을 보유하고 있다. Geodetics사는 기계의 볼 관절 내부에 서보모터를 내장하는 방식을 사용하였으며, CNC부의 보간 알고리즘은 Cambridge 대학에 의뢰하여 개발하였다. 스위스의 연구소 ETHZ는 HexaM과 유사한 구조의 병렬기구 공작기계 Hexaglide를 개발 중에 있다. 이 기계의 각 링크는 상판부의 리니어모터에 의해 고속으로 이송되며, 특히 가로 방향으로 긴 형태의 공작물을 가공하기 위한 것이다. 독일의 Achen 대학은 Ingersoll사의 Hexapod를 이용하여 연구를 수행하고 있으며, 자체적으로 3자유도 병렬기구 공작기계 Dynamill을 개발 중에 있다. 독일의 INA사와 Siemens사는 Stuttgart 대학과 공동으로 Hexact(그림 3)를 개발하였다. 이 기계는 주축의 양 끝단을 각각 3개의 링크가 지지하게 함으로써 기계의 강성을 높이는 구조로 되어있다. 특히 INA는 병렬기구 전용 볼 관절 및 링크를 판매하고 있기도 하다.

이상에서 살펴본 바와 같이 1994년 미국에서 최초로 개발된 이래로 병렬기구를 이용한 공작기계는 미국, 일본, 유럽 선진국들에 의해 활발히 연구되고 있으며, 그 종류도 스튜어트 플랫폼에서 벗어나 여러 가지 새로운 병렬기구와 공작기계가 개발되고 있는 실정이다. 특히 이 분야의 연구는 대학 및 연구소와 회사들간의 활발한 공동연구를 통하여 진행되고 있다.

3. 국내 연구 개발 현황

선진국의 병렬기구 공작기계 관련 연구가 주로 국립 연구소 및 업체 중심으로 이루어지고 있는데 반하여, 국내의 관련 연구는 대학이 중심이 되어 추진되고 있다.

서울대학교에서는 1997년부터 자체적으로 고안하여 개발한 6자유도 병렬기구를 이용하여, ECLIPSE라고 부르는 병렬기구 공작기계를 연구 개발 중에 있다. ECLIPSE의 가장 큰 특징은 기존의 병렬기구 공작기계의 주축이 최대 30° 까지의 경사가 가능한데 비하여, ECLIPSE의 주축은 90도까지 가능하며, 소재 주위를 360도 선회 할 수도 있다는 점이다. 이는 공작물을 한번 셋업하여 소재의 5면을 한번에 가공함으로써, 전체 가공소요시간(lead-time)을 획기적으로 줄여서 쾌속 가공을 하기 위한 것이다. 또한, ECLIPSE는 소재를 고속 회전시키는 주축을 별도로 부착하여, 단일 기계로 밀링뿐만 아니라 선삭, 연삭 등의 복합 공정을 수행할 수 있는 구조이다. 서울대에서는 ECLIPSE의 시작품을

개발 완료하여, 기구학적인 운동 실험을 성공적으로 수행하였다. 현재 ECLIPSE를 본격적인 상용화 기계로 만들기 위한 설계 단계에 있으며, 특히 절삭기계로서의 강성 확보를 위한 구조 개발에 주력하고 있다. 새로이 개발될 ECLIPSE 상용화기는 1999년 유럽공작기계전시회(EMO'99)에 출품될 예정이며, 기계의 개발은 벤처회사인 (주)세나테크놀로지사가 주관하고 있다.

연세대학교에서는 스튜어트 플랫폼을 이용한 공작기계 및 기구부 설계를 활발히 진행하고 있으며, 현재 완성되어 가동중인 시작품은 Hexapod와 유사한 구조이다. 창원대학교와 광주과학기술원에서는 각각 HexaM과 유사한 병렬기구 공작기계의 시작품을 제작하였다. 이외에 KIMM, KIST, 생산기술연구원 등에서도 관련 연구가 진행 중에 있다.

병렬기구를 이용한 공작기계의 연구는 세계적으로 초기 단계에 있는 바, 현 시점에서 국내에서 연구를 활발히 진행한다면, 선진국과의 대등하게 경쟁할 수 있는 가능성이 있다. 특히, 선진국에서 이미 개발된 병렬기구 이외에 새로운 종류의 병렬기구를 창안하여, 선진국과의 특허 문제를 피할 수 있을 뿐만 아니라, 여러 가지 새로운 용도를 갖는 새로운 기계를 개발할 가능성이 있는 분야이다.

4. 관련 핵심기술

병렬기구를 본격적인 공작기계로서 이용하기 위해서는 기존의 공작기계에서 볼 수 없는 새로운 기술을 개발하여야 한다. 이를 간단히 정리하면 아래와 같다.

- 병렬기구의 작업공간(workspace), 특이점(singularity), 작업성(manipulability), 강성(stiffness) 등의 기구학 연구
- 병렬기구의 동역학 모델 개발 동특성 해석
- 기구의 위치 추적오차를 최소화하는 다축동시제어 기술의 개발
- 기구의 제작, 조립 오차를 보상할 수 있는 보정기술
- 관절요소, 링크요소, 등의 병렬기구 공작기계 관련 핵심 요소 기술 개발
- 병렬기구를 위한 경로생성기를 포함한 CNC제어장치의 개발
- 기존 공작기계 사용자를 고려한 편리한 사용자 기능의 개발
- 병렬기구 공작기계의 성능평가 기준의 개발

5. 미래의 기계구조로서의 병렬기구

지금까지 미래의 공작기계로 주목받고 있는 병렬기구 공작기계에 연구 개발 현황에 대하여 알아보았다. 병렬기구 공작기계는 1994년 처음 개발된 이래로 선진국에서 활발히 연구하고 있는 분야로서, 지금의 시점에서 이와 관련된 핵심기술을 확보한다면 미래의 공작기계 분야에 있어서 우위를 점할 수 있을 것이다.

앞으로의 제조기술의 방향이 소재의 투입에서부터

최종 제품까지의 제조시간을 극단적으로 줄이는 소위 '쾌속제조'의 방향으로 나아가고 있음을 고려할 때, ECLIPSE와 같은 병렬기구 공작기계의 가능성도 매우 크다 할 것이다. 또한, 새로운 병렬기구를 고안하여, 절삭기계 뿐만 아니라 쾌속성형기, 삼차원측정기, 레이저가공기, 워터젯가공기 등에 응용한다면 새로운 개념의 제조 기계가 많이 출현할 수 있을 것이다.

병렬기구 관련 연구는 선진국의 기계관련 전시회에서 매년 가장 뜨거운 관심을 받고 있는 중요한 분야이면서도, 그 연구 개발은 세계적으로 아직 초기 단계에 있다고 할 수 있다. 따라서 국내에서 현시점에서 활발한 연구를 진행한다면, 선진국과 대등한 기술력을 보

유할 수 있는 분야이다. 그리고, 무엇보다도 새로운 것을 창안해내는 창의력이 필요한 분야이기 때문에, 후발주자로서도 새로운 아이디어만 있으면 전혀 새로운 시장을 개척할 수도 있다.

이와 관련하여 현재 국내 각 대학에서 개별적으로 진행되고 있는 병렬기구 관련 연구를 이제는 국가적인 연구 사업으로 확장할 필요가 있다고 본다. 또한, 공작기계 관련 국내 기업과의 합작 연구를 진행하여 개발할 필요가 큰 분야이기도 하다. 즉 대학은 이론 해석 부분을 담당하고, 회사에서 실제 기계 제작관련 기술을 담당한다면 연구 개발 효율을 크게 높일 수 있을 것이다.