

◆ 특집 ◆ 고유연 머시닝센터의 설계기술

병렬구조 머시닝센터 설계기술

Design of a Machine Tool containing a 3-strut Parallel Kinematic Structure

김태정^{1,✉}, 김석일², 나승표³, 김기태³
Taejung Kim^{1,✉}, Suk-il Kim², Seung-Pyo Nah³ and Ki-Tae Kim³

¹ 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook Univ.)

² 한국항공대학교 항공 우주 및 기계공학부 (school of aerospace and mechanical engineering, Korea Aerospace Univ.)

³ 화천기공 기술개발연구소 (R&D Center, Hwacheon Machine Tool Company)

✉ Corresponding author: taejungkim@dankook.ac.kr, Tel: 031-8005-3499

Manuscript received: 2011.6.13 / Accepted: 2011.6.28

A kinematically-hybrid 5-axis machine tool is analyzed from the perspective of machine tool design. Its kinematic characteristics are pointed out, which should be considered during the conceptual design process. A result of the structural analysis of the machine is presented, which is performed during the detailed design process. It is also presented how we improve the thermal characteristics of the machine tool by changing the installation position of the actuators.

Key Words: 5-axis Machine Tool (5축 공작기계), Stiffness (강성), Structural Analysis (구조 해석), Parallel-Kinematic Machine Tool (병렬기구형 공작기계)

1. 서론

대부분의 공작기계에서 주된 운동 축이 서로 수직하도록 배열된다. 이러한 ‘직교축 구조’를 기구학적 관점에서 직렬연쇄(serial kinematic chain)로 간주할 수 있다. 3 개의 직교축에 2 개의 회전축을 부착한 형태로 통상의 5 축 기계가 설계된다. 이론적으로, 5 자유도 로봇팔로도 5 축 절삭이 가능하지만, 상당한 속도로 회전하는 무거운 스피ن들을 움직이며 절삭에 필요한 강성을 유지하기에는 회전축 위주로 구성된 로봇팔이 적합하지 않다. 설계, 생산 및 조작을 위해 직교축 구조의 운동을 파악하는 것이 용이하다. 제작에 있어서도 축 사이의 직교성과 평행도를 유지하는 것이 기타 축 배치 형태를 유지하는 것에 비해 상대적으로 수월하다. 이러한 ‘직관적’ 직교축 제어를 위해 수십 년에 걸쳐 최적화 과정을 거친 상용 제어기가 공급되고

있다. 동일한 운동 능력을 유지하는 넓은 작업 공간의 확보가 용이할 뿐만 아니라, 상당한 수준의 공작기계용 요소기술이 그 구현을 지원하고 있는 점 또한 직교축 직렬 기구가 공작기계의 구조로 널리 채택되는 이유이다. 현재 직교축 직렬구조에 바탕을 둔 공작기계 산업이 적절한 비용으로 다양한 산업의 생산력을 뒷받침하고 있다.

상술한 장점에도 불구하고, 절삭력이 가해지는 운동을 유지하면서, 강성과 정밀도를 유지하려고 하면, 직렬 구조가 상당히 육중해지는 경향이 있다. 프레임에 가까운 관절일수록 타 링크의 운동에 의한 관성력 및 공구로부터 전달되는 절삭력을 지탱하여 정밀도를 유지하여야 하므로 더욱 강력한 -결과적으로, 무거운- 액츄에이터를 필요로 한다. 링크의 입장에서도 프레임에 가까울수록 좀더 큰 힘을 지탱하여야 하므로, 그 몸체가 육중해진다.

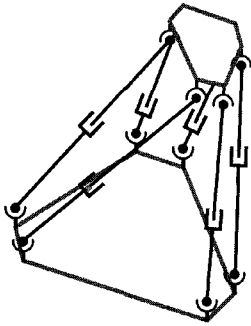


Fig. 1 A hexapod structure

가벼운 링크를 사용하면서도 적절한 강성을 유지함으로써 직렬기구의 구조적 약점을 보완할 목적으로 병렬기구가 공작기계에 도입되었다. 관절과 관련된 제작 상의 문제점을 고려하지 않는다면, 강성을 유지하면서 상대적으로 날랜 운동이 가능한 작업영역을 확보할 수 있는 대안으로 병렬기구가 효율적임을 이론적 계산을 통해 알 수 있다.

Merlet¹ 에 다수의 병렬기구가 정리되어 있는데, 그 중 10 여 종이 공작기계에 응용된 것이다. 그 외, 의학, 가상현실 운동 시뮬레이터, MEMS, 조립로봇 등의 분야에서 병렬기구가 활용되고 있다. 병렬기구가 공작기계 구조로 사용되기 위해서는 현재 직렬기구가 만족시키고 있는 정밀도와 가공속도에 관한 까다로운 요구사항을 만족시켜야 한다. 신뢰할만한 요소기술과 ‘비선형적’ 운동을 제어할 효과적인 제어기의 개발이 이론적으로 주장되는 병렬기구의 구조적 장점을 살리기 위해 필수적으로 요구된다. Merlet 은 요소기술의 문제점에 추가하여 병렬구조 기계 설계에 있어 역학적 고려가 거시적 관점에서 충분히 이루어지지 않고 있다고 하여, 구체 치수설계 단계의 문제점도 지적하고 있다. Merlet 의 이 지적은 주로 기구학과 구조설계에 관련된 문제로 해석된다.

병렬기구가 공작기계에 도입된 대표적인 사례로 Fig. 1 에 제시된 헥사포드 구조를 들 수 있다. 6 개의 스트럿(strut)이 무빙플랫폼(moving platform)과 프레임에 볼조인트로 연결되어 있고, 구동장치가 헥사포드 구조의 스트럿을 구성하는 미끄럼관절(prismatic joint)을 움직여 그 길이를 조절한다. 마찰과 열변형 및 적용된 관절의 정밀도 등 현실적 문제를 무시한다면, 개별 스트럿에 굽힘모멘트가 작용하지 않게 하는 구조적 강점을 제공하므로, 길이가 조절되는 스트럿과 볼조인트를 사용하는 것

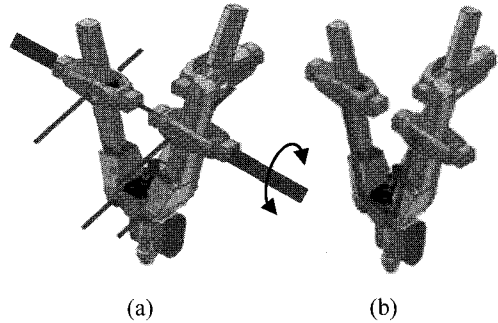


Fig. 2 Exechon structure and its over-constraints

이 공학적으로 매우 현명한 선택이 될 것이다. 이론적 우아함에도 불구하고, 현 단계의 요소기술 수준이 마찰에 의한 열변형 및 관절 운동의 불확실성을 완벽하게 제한하지 못하고 있어,² 헥사포드 구조로 만족할 만한 수준의 강성을 구현하기에 어려움이 있다.

볼조인트의 ‘불안정성’에 주목하여 수동관절과 볼조인트의 개수를 줄이는 방향의 개념설계가 주목 받기 시작하였다.²⁻⁴ 본 논문에서 분석하는 소위 Exechon 구조(fig. 2) 또한 이러한 설계 방향을 택하고 있다. Exechon 구조는 Neumann³ 의 특허에 기반한 Tricept 구조를 변형하여 볼조인트의 개수를 줄이고 있다. Fig. 3 에 제시된 Son et. al.² 의 구조 또한 볼조인트를 사용하지 않고 있는데, 평면기구를 포함하여 과구속이 내재되어 있는 직·병렬 하이브리드 구조라는 공통점을 Exechon 구조와 공유하고 있다. Exechon 구조가 통상적 의미에서의 로봇에 가까운 반면, Son et. al 의 구조는 강성과 정밀도에 보다 강조점을 두고 있다. 절삭작업에 특화되어 있는 Son et. al 의 구조와 달리, Exechon 구조를 거대 구조물의 조립에도 응용하려는 시도가 최근에 이루어지고 있다.

구조해석을 위한 자세결정, 오차보정 및 액튜에이터 위치 제어를 위해, 기구 위치 관계의 효과적인 해법이 필요하다. 제시된 Exechon 구조에 관한 상용 제어기가 이미 공급되고 있으나,⁴ 관련 업체에서 운동에 관한 수학적 분석 결과나 제어기의 계산 알고리즘을 공개한 바 없다. 반면, Son et. al 의 구조는 위치관계를 파악하는 것이 용이하며, 관련 저자들이 위치관계를 공개하고 있다. Exechon 구조에 관한 기구식의 수치적 해법과 분석이 Ko 와 Kim^{5,6} 에 의해 진행된 바 있으며, 최근에 이르러서야 Bi 와 Jin⁷ 의 연구가 보고된 바 있다. Bi 와 Jin 은

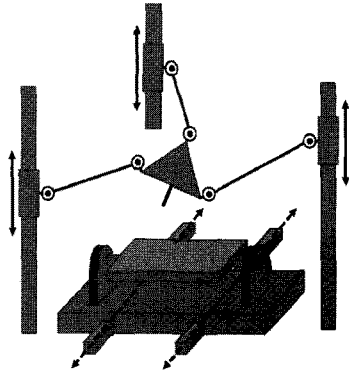


Fig. 3 A hybrid structure by Son et. al

관련 변수들을 적절히 소거하여 일원 비선형 대수 방정식을 수립하였는데, 제작 과정에 발생할 수 있는 오차 변수들을 고려하여 연립 대수 방정식의 해를 구하는 Ko 와 Kim 의 접근법과 대비를 이룬다. 특히, Bi 와 Jin 의 역기구 위치 결정 해법을 오차 파라미터를 포함하도록 확장하는 것이 불가능할 것으로 예측된다.

본 논문은 기구학적 뼈대(skeleton)가 주어진 상황에서 설계 및 제작을 위한 기구학적 분석, 구체 설계를 위한 구조해석 및 제작 후의 보정과 제어를 위한 기구 운동의 수치해석에 주안점을 두어 Son et. al 의 구조와 비교하여 Exechon 구조를 분석한다. 이를 통해, 볼조인트를 사용하지 않는 병렬부를 가지는 구조를 공작기계에 적용함에 있어 설계 및 제작 과정에서 고려할 사안을 알아보고자 한다.

2. 기구학적 관점으로 본 볼조인트 없는 공작기계용 병렬기구의 개념설계

공구의 대칭성에 의해 공구 축에 대한 공구의 스핀 운동이 절삭 작업을 위한 공구 위치 결정에 영향을 미치지 못한다. 공구축에 대한 스핀 자유도를 제외하고 공구의 위치(자세)를 결정하기 위해, 공구 기준점의 위치를 나타내기 위한 3 개의 좌표와 공구축 방향을 나타내는 2 개의 독립 좌표가 필요하다. 그러므로, 5 축 이상의 동시 제어를 제공하는 머시닝센터에 의해 절삭에 필요한 충분한 자유도가 공급될 수 있다. Fig. 4-(a)에 보인 바와 같이 Exechon 구조는 병렬부와 직렬부로 구성된 하이브리드 구조이다. 병렬부에 3 개의 구동축이 배치되고, 2 개의 구동축이 A-C 축 회전 방식의 5 축 직렬

기계와 유사한 형태로 무빙플랫폼과 공구를 연결하고 있어, 총 5 개의 관절이 구동되고 있다.

Fig. 4-(b)에 병렬부를 도시하고 있다. 병렬부의 3 개의 다리가 무빙플랫폼과 베이스를 연결하고 있다. 세 다리 중 대칭을 이루는 것을 1, 3 번, 중앙부에 위치한 것을 2 번이라 칭하자. Fig. 4-(c)에 1, 3 번 다리를 통한 베이스와 무빙플랫폼 간의 연결관계를 나타내었다. 1 번, 3 번 다리는 각기 두 개의 회전관절로 베이스와 연결되어 있으며, 무빙플랫폼과는 회전관절 하나로 연결되어 있다. 즉, 두 다리가 구동관절을 포함하여 각기 4 자유도의 관절을 가지는데, 이는 무빙플랫폼 운동의 6 자유도 중 $2(=6-4)$ 자유도를 각기 구속함을 의미한다. 한편, fig. 2-(d)에 보인 바와 같이 5 개의 관절로 이루어진 2 번 다리가 무빙플랫폼 운동의 6 자유도 중 $1(=6-5)$ 자유도를 제한한다. 결국, 1, 3 번 다리에 의해 2 자유도씩 총 4 자유도, 2 번 다리에 의해 1 자유도가 구속되므로 특별한 주의를 기울이지 않는다면 병렬부가 1 자유도를 가지게 될 것이다. 이는 치수를 고려하지 않고 구르블러(Grubler)의 식을 단순히 적용한 결과이다. 앞서 밝힌 바와 같이 병렬부가 3 자유도를 가지도록 Exechon 구조가 설계되어 있는데, 다음의 치수상의 특징을 가지기 때문이다.

(1) 1 번 다리와 3 번 다리만 연결된 상태에서, 공통된 축을 중심으로 무빙플랫폼이 회전한다. (공통 회전 축이 Fig. 2-(a)에 표시되어 있다.)

(2) Fig. 2-(b)에 보인 바와 같이 1 번 다리-무빙플랫폼-3 번 다리로 구성된 기구학적 연쇄가 평면 기구를 이룬다.

위와 같은 치수 특성에 의해, 1, 3 번 액츄에이터와 공통 회전축을 고정시킨 상태에서 언급된 기구학적 연쇄(1 번 다리-무빙플랫폼-3 번 다리)가 평면 4 절 기구를 구성하여, 무빙플랫폼에 1 자유도의 평면운동이 허용된다. 여기에 1 번, 3 번 다리에 있는 구동관절의 운동을 포함시키면 3 자유도의 운동을, 공통된 축에 대한 회전 운동까지 고려하면, 2 번 다리가 분리된 상태에서 총 4 자유도의 운동이 발생한다. 여기에 5 개의 관절로 이루어진 2 번 다리가 부착되면 무빙플랫폼 운동의 $1(=6-5)$ 자유도를 추가로 구속하여 무빙플랫폼의 자유도가 $3(=4-1)$ 이 된다. 결과적으로 Exechon 구조가 3 자유도의 병렬부와 2 자유도의 직렬부로 이루어진 5 축

기계를 구성함을 알 수 있다.

이 경우와 같이, 기구의 자유도가 구르블러의 식에 의한 값보다 큰 값을 가지게 될 때, 해당 기구가 과구속되었다고(over-constrained) 한다. 일반적으로, 병렬구조의 다리를 구성하는 관절의 자유도가 줄어들수록 무빙플랫폼에 가해지는 구속조건의 수가 늘어나며 기구의 자유도가 줄어드는 경향이 있다. 과구속이 독립적인 구속조건의 개수를 줄이는 효과가 있으므로, 관절의 개수를 제한하면서 필요한 자유도를 확보하는 효과적 방법이다. 평면기구가 공간기구로 다루어 질 때, 평면 운동 유지에 필요한 구속조건들이 서로 의존하게 되므로 평면기구는 본질적으로 과구속된 구조이다. 다수의 공간기구가 과구속을 포함하게 되는데, 평면기구를 변형하여 공간기구를 고안하는 일이 흔한 것이 일차적 이유이지만, 제시된 구조의 경우에는 볼조인트와 수동관절의 개수를 줄이는 설계 방향의 자연스런 귀결이기도 하다.

과구속된 기구는 제작과정이 정밀하지 않다면, 운동 중 내력이 발생하게 되므로 주의가 필요한 것으로 알려져 있다. 설계 단계에서 고려된 이상의 내력이 발생하면 베어링의 파손으로 이어질 수 있으며, 그 이전에 기계가 정밀도를 상실하게 된다. 베어링이 지탱할 수 있는 내력이 발생하더라도 조립상태와 기계 운행 중에 발생하는 외력을 예측하는 것이 불가능하므로 그에 의해 발생한 부정확성을 교정(calibration)하는 것이 현실적으로 불가능하다. 그러므로, 정확한 제작을 통하여 과구속에 의한 부정확성을 제한하고 기구학적 교정만으로 원하는 정밀도를 달성하는 것이 바람직하다. 즉, 과구속과 관련된 운동의 불확성이 기구학적 교정 이전에 일정한 값 이하로 관리되어야 한다. 이를 위해 관절의 강성 및 여유 등을 고려한 재료 역학적 분석이 설계단계에서 수행되어 공차가 명시되어야 하며, 명시된 공차를 유지하기 위한 제작 및 측정기법을 사용하여야 한다.

Exechon 구조를 제작함에 있어 평행도에 주의를 요하는 축을 Fig. 2-(a)에 나타내었다. 특히, 1, 3 번 다리가 공유하도록 설계된 공통 회전축을 관리하는 것이 까다롭다. Fig. 3 에 제시된 Son et. al 의 구조도 3-PRR 평면기구를 포함하고 있어 수동관절의 평행도를 관리하여야 한다. 특히, 무빙플랫폼과 연결된 3 개의 직선 축을 동일 평면에 위치시키는 것이 평면운동을 유지하기 위해 중요하다. Son et. al 의 구조에서 미끄럼 관절이 보다 많이 쓰이며,

서로 평행하거나 직교하도록 배열되는데, 직교축 기계의 정밀도 유지에 사용된 제작 및 측정 기술을 활용하고자 함이다. 병렬부 전체가 평면기구를 이루므로, Son et. al 의 구조가 상대적으로 강한 과구속을 포함하고 있으며, 그로 인해 수동 관절도 적게 포함하고 있다. 또한, 다리의 길이가 변하지 않도록 하여 가변 스트럿에 의한 열변형의 문제를 피한 것이 Exechon 구조와 다른 점이다.

개념 설계적 관점에서 보면, Exechon 구조와 Son et. al 의 구조 모두 관절의 수를 줄임으로써 강성을 확보하는 대신에 과구속으로 인한 제작 문제를 받아들이고 있다. 대신 과구속을 평면기구와 관련된 것으로 한정하고 있는데, 평면기구의 설계와 제작이 일반적인 과구속 구조의 제작보다 상대적으로 쉽기 때문인 것으로 추측할 수 있다.

3. 위치 결정을 위한 수치 해법

제작오차를 포함하여 기구식을 수립하면 오차 교정에 활용할 수 있다. 설계 단계에서는 오차가 포함되지 않은 기구식을 사용하여 구조해석에 필요한 위치관계를 파악하게 된다. 또한, 기구식과 자코비 행렬을 이용하여 특이점을 포함한 기구의 운동성을 파악하고, 가용 작업 영역을 파악하는 작업이 설계 단계에서 이루어져야 한다. A-C 축을 사용하는 직렬기계의 경우와 마찬가지로 Exechon 구조의 작업영역 중앙에 특이점이 생길 수 있음에 주의하여야 한다.

일반적으로, 병렬기구는 역기구 위치 관계를, 직렬기구는 정기구 위치 관계를 파악하기 용이하다. Exechon 구조와 Son et. al 의 구조 모두 직·병렬 구조가 혼합된 하이브리드 구조이다. 두 기구 모두 정기구 위치 관계의 결정을 위해서 반복 계산 과정이 필요하여 병렬기구의 특성을 나타내는데, 필요하다면 일원방정식의 형태로 그 관계를 표현할 수 있다. 제작오차를 고려한 Exechon 구조의 역기구 위치 결정 문제가 Son et. al 의 구조와 비교하여 복잡한데, 이는 공구축 방향을 결정하는 독립변수가 Exechon 구조에서 4 개이기 때문이다. Exechon 구조의 기하학적 파라미터가 특별한 값일 때, 역기구 문제가 단순화될 수 있음을 보일 수 있다. Son et. al 의 구조에서는 공구축 방향을 결정하는 독립변수를 2 개까지로 줄일 수 있으므로, 오차변수를 고려하더라도 역기구 위치 결정문제에서 공구축 방향에 관계된 방정식을 분리할 수 있다.

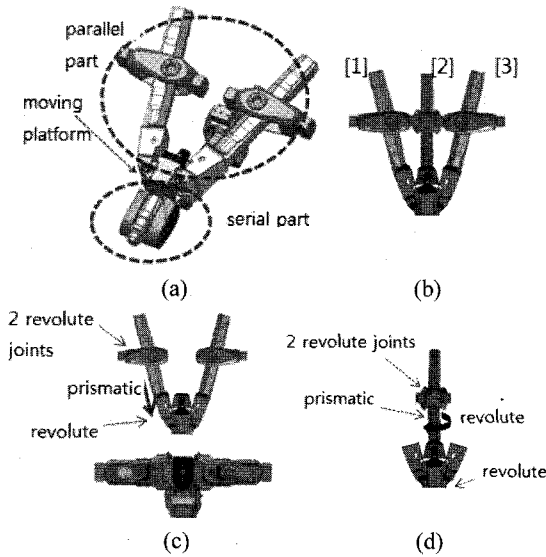


Fig. 4 Configuration of the Exechon structure

본 절에서는 제작오차를 포함하여 Exechon 구조의 역기구 위치관계를 결정하기 위한 수치적 해법의 개요를 보인다. 정기구 위치관계도 비슷한 방법으로 표현할 수 있으므로, 본 논문에서 제시하지 않는다. 이는 Ko 와 Kim^{5,6}에 제시된 것으로 보다 자세한 분석이 추후 별도의 논문으로 발표될 예정이다. 저자의 지식 범위 안에서 오차파라미터를 포함한 Exechon 구조의 위치관계식의 해가 폐형식(closed form)으로 알려진 바 없다.

Fig. 4의 (a)와 (d)를 참조하면, 1번 다리와 3번 다리를 제거한 상태에서 2번 다리, 무빙플랫폼, 직렬부로 이어지는 기구적 연쇄를 7-자유도 직렬기구로 간주할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로, 루프폐쇄식(loop closure equation)을 연립하여 구속조건들로 구성된 연립방정식을 해결함으로써, 병렬기구의 위치관계를 파악하게 된다. 과구속을 포함한 기구의 경우, 구속조건들이 서로 종속적이므로 구속조건을 위치에 따라 선택하게 된다. Exechon 구조의 경우, 과구속이 평면기구의 사용으로부터 기인하므로 과구속 조건을 파악하기 용이하다. 예를 들어, 무빙플랫폼이 Fig. 4-(a)와 같이 1, 3번 다리에 공통된 축을 중심으로 회전한다는 조건을 사용함으로써, 2개의 독립적 구속조건을 구성할 수 있는데, 언급된 7-자유도 직렬기구에 부착된 점과 벡터만을 매개로 하여 표현할 수 있다. \mathbf{E} 를 오차파라미터, \mathbf{X} 를 언급된 7-자유도 직렬기구의 관절변수들로 이루어진 행렬이라 하자. 선택된 관

절변수 \mathbf{X} 에는 2번 다리의 능동 관절변수와 직렬부의 능동 관절변수 2개가 포함되게 된다. 직렬기구의 정기구식을 유도하는 것은 간단한 것으로 알려져 있으므로, 주어진 공구 기준점의 위치 \mathbf{r}^{given} 과 공구축 방향벡터 \mathbf{t}^{given} 에 대하여, 다음의 위치관계를 즉각적으로 수립할 수 있다.

$$\mathbf{r}(\mathbf{X}, \mathbf{E}) = \mathbf{r}^{given} \quad (1)$$

$$\mathbf{t}(\mathbf{X}, \mathbf{E}) = \mathbf{t}^{given} \quad (2)$$

여기서, $(\mathbf{X}, \mathbf{E}) \rightarrow \mathbf{r}(\mathbf{X}, \mathbf{E})$ 와 $(\mathbf{X}, \mathbf{E}) \rightarrow \mathbf{t}(\mathbf{X}, \mathbf{E})$ 는 선택된 직렬기구의 정기구 위치 결정식으로 각기 공구 기준점의 위치와 공구축 방향벡터를 결정한다. 이 때, 식 (2)의 3 성분 중 2개만이 독립임에 유의하라. 일반적으로, 5축 기계의 공구 축 방향에 대한 식을 수립하면, 식 (2)와 같이 종속적 형태가 나타나게 되는데, 평면에 투영된 두 개의 성분만을 사용하는 것이 독립적인 식을 추출하는 가장 간단한 방법이다. 하지만, Fig. 5에 보인 바와 같이, 대척점에 있는 공구 축 방향을 동일하게 다루게 되어, 초기 설정 값에 따라 해가 대척점에 수립할 수 있음에 주의하여 수치해법을 구성하여야 하는데, 이를 피하는 다양한 해법이 있을 수 있다.

식 (1)과 (2)로부터 독립적인 5개의 식을 얻고, 과구속을 완화하여 표현한 구속조건 2개와 합하여 총 7개의 독립적인 식을 구성할 수 있다. 이를 연립하여 선택된 직렬구조에 있는 7개의 관절변수와 무빙플랫폼의 자세를 수치적으로 결정할 수 있다. 결정된 관절변수에는 2번 축과 직렬부를 구성하는 4, 5번 축이 포함된다. 결정된 관절변수로부터 무빙플랫폼의 자세를 결정한 후, 1, 3번 다리의 길이를 결정함으로써 역기구 위치 결정문제가 해결되게 된다.

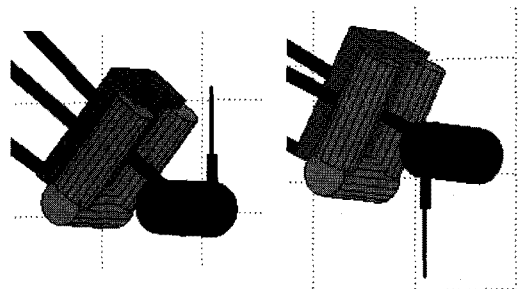


Fig. 5 Ambiguity in tool orientation

수립된 연립방정식에 뉴튼류의 수치해법을 적용하는 것이 일반적인데, 이 때, 자코비 행렬이 빈번히 계산되게 된다. 위와 같이 관련된 식이 직렬 기구에 부착된 점과 벡터를 매개로 하여 표현되면 속도 기구식을 이용하여 자코비 행렬의 값을 쉽게 결정할 수 있는 장점이 있다. 반면 적절한 소거를 통해 식의 개수를 줄임으로써 계산 시간을 단축시키는 것을 시도해 볼 수도 있을 것이다.

4. 구조 해석

정밀도를 유지하기 위해 기계가 적절한 강성을 유지할 수 있는지 설계단계에서 점검하여야 한다.

주된 변형이 베어링에 의해 발생하므로, 링크를 강체로 설정하고, 베어링을 적절한 스프링으로 대체하여 단순화한 모델을 구성하고, 소변형 이론을 적용하여 주어진 외력에 대한 변형을 계산함으로써 기계의 강성을 어림할 수 있다. 이 작업을 주어진 뼈대와 기구식만 이용하여 수행할 수 있다. 설계 단계에서 이 작업을 반복적으로 수행하여 원하는 작업영역을 가공할 수 있는 기구의 치수를 결정하여야 한다. Exechon 구조가 과구속을 포함하므로 부정정계 문제를 다루어야 하는데, 가상일의 정리를 활용할 수 있다. 또한, 가공 오차를 가정한 시뮬레이션을 수행하여 과구속으로 인한 문제를 피하는 범위 내로 가공 오차를 설정하여야 한다. 이 작업이 기구의 운동성 해석과 병행하여 수행되어야 한다.

기구 뼈대의 어림 치수가 결정되면 재료를 선정하고 링크를 적절한 모양으로 설정하여 구체설계에 들어간다. 이 때, 3 차원 모델을 구성하고, 유한요소 해석 기법을 활용할 수 있다. Fig. 6에 유한요소해석을 위해 구성한 모델의 한 예를 보이고 있는데, 대략 19 만개의 절점, 77 만 개의 솔리드요소(Solid 45), 30 개의 매트릭스요소(Matrix27), 5 만개의 컨택요소(Contact174, Target170)를 사용하고 있다. 선정된 재료의 물성치가 Table 1에 제시되어 있다.

구성된 모델을 사용하여 다양한 외력을 가정하여 각 부분의 응력과 변형을 계산할 수 있다. 예를 들어, Fig. 7과 같이 두 가지 설치각도에 대해 자중에 의한 처짐을 알아 볼 수 있다. 계산된 공구 끝점의 변위가 Table 2에 정리되어 있다. 1번, 3번 축이 중력 작용 방향에 대해 대칭을 이루는 경우 힘이 각 다리에 좀더 분산됨을 알 수 있지만,

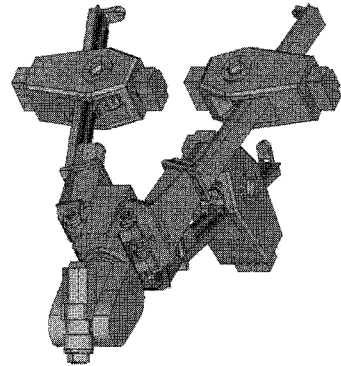


Fig. 6 3D geometric model for a finite element analysis and material property used

Table 1 Material property used in the initial design

	Density kg/m ³	Elasticity GPa	Poisson's ratio
GCD300	7,400	149	0.27
SNCM420	7,850	205	0.29
SM45C	7,817	209	0.28
SS440	7,870	205	0.28

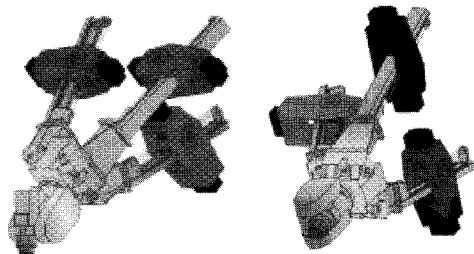


Fig. 7 Deflection at the tool tip for two configurations of the designed machine tool

Table 2 Deflections in the two configurations

	Symmetric	Vertical
x	2.2 μm	0.4 μm
z	329.8 μm	578.5 μm
y	229.0 μm	2.9 μm
Magnitude	411.2 μm	578.5 μm

두 경우 모두 초기설계에 주어진 치수를 유지하면 처짐이 심함을 알 수 있었고, 베어링에서뿐만 아니라 부재 자체의 변형도 크게 파악되었다. 설치각도의 영향이 크지 않다면, 제어기 설계와 서보 모터 선정 시의 편의를 위하여 기계 구조의 대칭성을 유지하는 것이 유리하다. 대칭을 유지하도록

설치각도를 정한 후, 강성을 강화하도록 설계를 변경하였다. 이를 위해, 베어링의 강성을 강화하고 링크 및 프레임의 ‘두께’와 재질을 변경한 후, 해석하는 과정을 반복하여, Fig. 8 에 보인 것과 같이 링크와 프레임 및 관절부의 강성을 개선하였다.

이와 같은 유한요소 해석을 수행함에 있어, 상세설계가 상당히 진행되었다고 하더라도 해석에 소요되는 시간을 고려하여 모델을 단순화할 필요가 있다. 필렛, 챔퍼 및 곡면 정보를 다수 가지고 있는 3 차원 모델을 그대로 해석 소프트웨어에 사용할 경우 다수의 요소가 생성되어 한정된 계산 자원을 소진하는 경우가 생길 수 있다. 따라서, 해석 결과를 왜곡하지 않는 한도 내에서 필렛과 챔퍼를 제거하고, 곡선을 직선화하여 모델을 가볍게 하는 것이 필수적이다. 상세 설계가 상당히 진행된 3 차원 모델과 구조해석을 위해 단순화한 모델을 비교하여 Fig. 9 에 제시하고 있다.

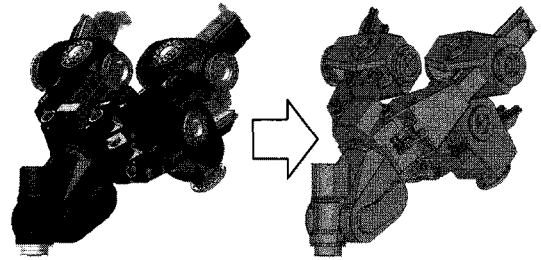


Fig. 9 Model simplification for analysis

5. 열변형을 고려한 축 설계

장시간 구동하더라도 기계의 정밀도를 유지하기 위해서는 구동장치에서 발생하는 열을 기계로부터 효율적으로 제거하여야 한다.

직렬부의 유니버설헤드의 설계가 Fig. 10 에 제시되어 있는데, 서보모터가 외부로 개방되어 장착되도록 하여 열 변형을 줄이고 있다. 이와 같은 설계는 모터를 헤드 내부에 설치하는 것에 비해 모터 구동으로 인한 진동을 감소시키고, 유지보수를 용이하게 할 수 있다는 장점도 가지고 있다. 마찬가지로 이유로 모터를 개방한 선형 이송축의 설계를 Fig. 11 에 제시하고 있다. 이를 통해 설치 위치를 프레임에 가깝게 함으로써 모터의 자중으로 인한 처짐을 경감시키는 효과를 가질 수도 있다.

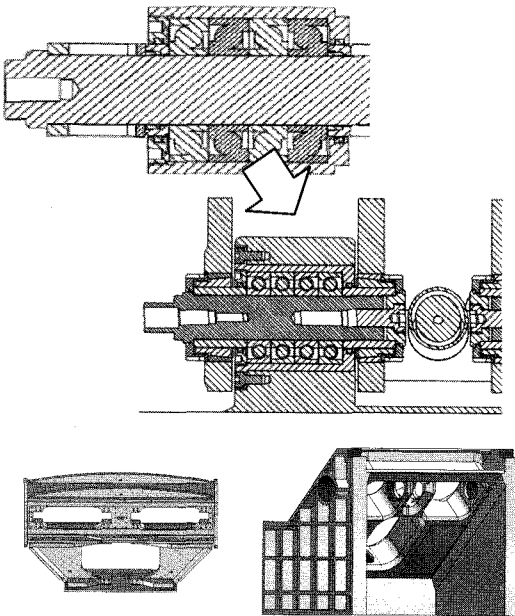


Fig. 8 An improved design for stiffness

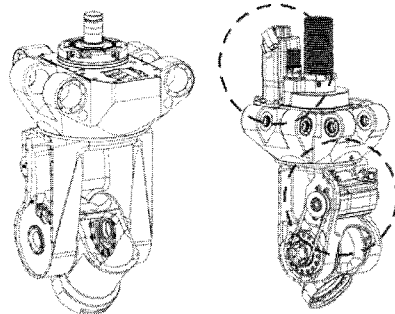


Fig. 10 Design of the universal head reducing heat deformation

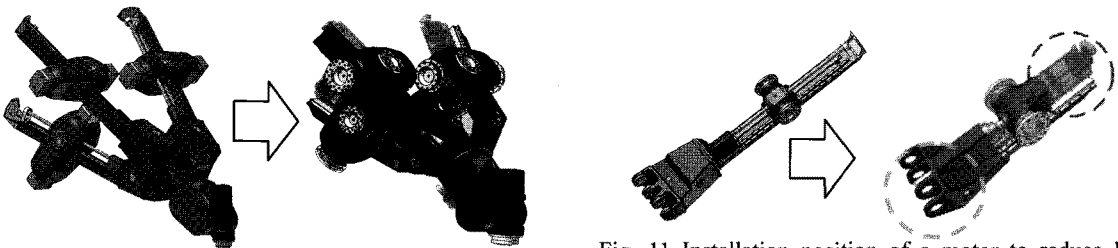


Fig. 11 Installation position of a motor to reduce heat deformation

6. 결론

직·병렬 구조가 혼합된 하이브리드 구조인 Exechon 구조 공작기계의 개념설계부터 상세설계에 이르는 과정을 검토함으로써 하이브리드 구조 공작기계의 설계에 있어 고려하여야 할 사항을 알아 보았다. 기구학적 고려가 개념설계 단계에서 특히 중요하며, 설계과정 전반에 관여한다. 구조해석을 통한 상세설계 과정을 예를 들어 설명하였으며, ‘고전적’ 병렬기구에 쓰이는 볼조인트와 구동관절의 발열문제를 해결하는 대안을 제시하고 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “IT 부품가공용 고유연성 머시닝센터 개발 사업” 및 단국대학교 대학원 연구보조장학금의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Merlet, J.-P., “Parallel Robots,” Springer, pp. 80-86, 2006.
2. Son, S., Kim, T., Sarma, S. E. and Slocum, A., “A hybrid 5-axis CNC milling machine,” Precision Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 430-446, 2009.
3. Neumann, K., “Adaptive in-jig high load Exechon machining & assembly technology,” Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Paper No. 2008-01-2308, 2008.
4. Documentation Siemens, “Description of Functions, Kinematic Transformation: Tripod with Hybrid Kinematics,” 2007
5. Ko, D., Kim, T. and Na, S., “Kinematic Analysis of 5-DOF Parallel Machine Tool,” Proc. KSPE Autumn Conference, pp. 565-566, 2009.
6. Ko, D. and Kim, T., “Proper Choice of Unknown Variables for Kinematic Analysis of a 5-DOF Hybrid Machine Tool,” Proc. KSPE Spring Conference, pp. 137-138, 2010.
7. Bi, Z. M. and Jin, Y., “Kinematic modeling of Exechon parallel kinematic machine,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27, No. 1, pp. 186-193, 2011.
8. Murray, R. M., Li, Z. and Sastry, S. S., “A

Mathematical Introduction to Robotic Manipulation,” CRC Press, 1994.