

고속·고정밀 금형가공센터 개발

Development of High Speed & Precision Mould/Die Machining Center

주임연구원 최원선* (Research Engineer, Won-sun Choi) / 대우종합기계
수석연구원 김태형* (Research Manager, Tae-Hyoung Kim) / 대우종합기계
수석부장 이재윤* (Director, Jae-Yoon Lee) / 대우종합기계

ABSTRACT

In order to manufacture a precision mold/die by machining, users need high speed & precision mold/die machining center. So, for development of this machine, we intend to use linear motor that is instead of ball-screw, servo-motor and coupling, high-speed spindle of pressurized air journal bearing and composite materials. In this paper we research column moving type and table moving type. The former is mainly piling 3 axes on one moving body, the latter is consist of two independent carriages. Both types are available to high speed & precision machine, but we finally draw a conclusion column moving type due to an advantage of high-speed control of linear motor.

1. 서론

급격하게 변화하고 있는 IT산업과 전자 통신산업 그리고 자동차부품산업 등의 정밀 금형제작에서 고속가공에 의한 가공품질의 고품위화, 고정도화 요구가 증가하고 있다.

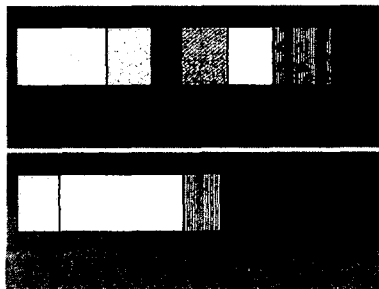


그림 1 일반가공 v.s. 고속가공

그러나 현재 대부분의 금형제작은 수작업에 의한 마무리 공정을 기술자의 숙련도에 절대적으로 의지하고 있다.

한편, 국내의 금형가공기는 기존의 범용 Milling 또는 일반 머시닝센터를 이용한 일반 금형가공용 장비가 주류를 이루고 있다. 그러나, 이러한 장비는 고정밀 금형 가공기로 부적합하여, 최근에는 고속 이송계, 고속주축, 공작기계의 고속제어, 적응 제어 등에 대한 연구가 국내 대학 및 연구기관에서 활발히 이루어지고 있으나, 국내에서는 그 개발 사례가 없다. 선진 공업국의 고속 가공 장비의 개발 사례를 살펴보면, 현재까지 가장 안정적이고 경제적인 이송방식인 볼스크류를 이용하여 60m/min의 고속 이송속도를 갖는 머시닝센터는 이미 상용화되었다. 그리고, 미국 Ford社가 제시한 고속가공 요구사항을 볼 스크류를 통해서 달성할 수 없다고 판단한 Ingersoll社는 미국 Anorad社가 개발한 리니어 모터를 사용하여 절삭 및 급속이송 76.2m/min를 발휘하는 “High Velocity Machine (HVM)”이라는 고속 가공기를 세계 최초로 개발하여 자동차회사(Ford社, Chrysler社, Benz社)에 납품하였다.

주철 및 알루미늄의 고속가공에 초점이 맞추어져 있는 이 장비를 기점으로 리니어 모터를 이용한 고속/고정밀 금형가공기가 유럽 및 일본을 중심으로 개발 및 상품화가 진행되고 있는 실정이다. 그리고 금형산업 특성상 가공기, Application 그리고 가공기술을 Package형태로 공급하는 경우가 많으므로 그 주변기술의 연구도 동시에 활발히 진행되고 있으며, 특히 최근에는 고속/고정밀을 동시에

달성하기 위한, 열변형 보정 기술 및 고속 이송체의 제어성에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

2. 고속·고정밀 금형가공기의 설계

최근의 공작기계 고속화의 첫째 목적은 고속가공기술의 구현이라고 할 수 있다. 이것은 이미 고속가공기술의 장점에 대한 인식이 일반화되고 있고, 일부 산업계에서 그 효용성이 검증되고 있는 것과 무관하지 않다. 고속가공은 기본적인 생산성 향상 외에도 고품위절삭, 부품수 절감 등의 직접적인 효과와, 종래의 인선을 이용한 절삭가공 영역을 뛰어 넘어 방전가공 등을 대체할 수 있는 기술로 인정받고 있다. 연질 대형소재 중심의 항공산업과 자동차, 가전 등의 고정밀 금형 가공 산업에서 이러한 고속가공에 거는 기대는 남다르다고 할 수 있다. 이것은 고속가공의 효과를 가장 누릴 수 있는 분야라고 생각되기 때문이다.

따라서, 고속 가공을 구현하기 위한 머시닝센터에 대한 수요자의 기대심리도 급격히 상승하고 있다. 이러한 고속 장비는 단순히 회전속도와 이송속도의 증가뿐만 아니라, 일정수준의 고정밀도가 동시에 요구되므로, 많은 기술적 난제를 갖고 있다 하겠다. 예를 들면, 이송계의 가감속 등에 의한 진동 요인을 배제할 수 있을 정도의 동강성에 대한 요구와 더불어 고속화를 위한 경량화 및 저 마찰력, 그리고 우수한 감쇠능력이 동시에 요구된다. 여기에 열변형 오차의 최소화 및 오차보상 기술의 적용 등이 주요 기술로 대두되고 있으며, 특히 근자에 들어 구조물 및 이송계의 동적특성에 따른 추종오차의 최소화를 위한 제어성에 대한 연구 등 새로운 접근이 시도되고 있다.

이러한 경향을 고려하여, 본 연구에서 개발하고자 하는 고속·고정밀 금형가공기는 공기베어링을 이용한 최고회전수 50,000rpm 주축과 최대 급속이송속도 120m/min, 최대 가속도 2g를 목표로 결정하였다.

2.1 고속·고정밀 금형가공기의 기본 구조

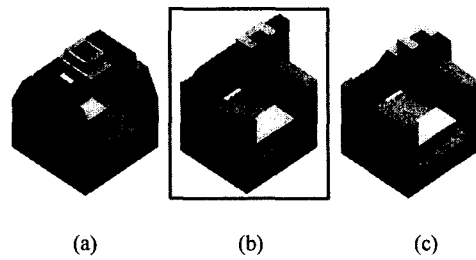


그림 2. Column Moving Type

위 그림 2와 같은 기본 구조는 컬럼이 움직이는 방식(Column Moving Type)으로, 3축이 집적되고 테이블은 고정되는 형태이다. 이 구조의 특징은 3축이 집적되어 있으므로 고정밀도 확보가 어렵고 가동중량이 크므로 고속 가감속시 충격량이 크고, 이에 따른 동적 안정성에는 불리하나, 공작물과 가공치구 등의 형상과 크기에 관계없이 가동부의 질량이 일정하므로 모든 절삭가공시 운동특성의 예측이 용이하며, 이에 따른 절삭 안정성 확보가 쉽다. 특히 공작물 설치위치에 관계없이 이송계를 구성하기 때문에 칩 및 절삭유 배출이 용이하고, 서보 특성에 변화가 없어 고속 제어에 유리하다.

그림 2의 (a) 그림은 형태가 Box-In-Box 구조이다. 이는 리니어 모터를 사용하는 공작기계에 많이 적용되는 형태로 리니어 모터가 가지는 자기흡인력을 고려해 볼 때 가장 안정적인 구조로 알려져 있다. 그러나 장비 크기에 제약 조건이 따른다. 그리고 다시 Z축을 구성하는 X축 이송시스템의 형태에 따라 다음 그림과 같이 (b), (c) 두가지로 나눌 수 있다. 중간에 위치한 (b) 그림 형태는 X축 이송계 방향을 중력축에 평행하게 구성하는 방식으로 경량화, 소형화, 접근성, 제작성에 잇점이 있다. 그리고 마지막에 위치한 (c) 그림 형태는 X축 이송계 방향을 중력축에 수직으로 구성하는 방식으로 비교적 큰 장비에 유리하다.

본 연구에서는 우선 가·감속 제어 특성에 민감한 리니어 모터의 특성을 최대한 살리기 위해 3축이 집적되는 형태(Column Moving Type)를 선택하였고, 그리고 장비의 경량화, 소형화, 접근성, 제작성 등에 상대적으로 유리한 그림 2의 중간에 표시되어 있는 (b) 형태로 확정하였다. 아래 그림 3은 개념설계 단계에서 확정된 형태에서 구체화된 레이아웃이다. 이 레이아웃은 각 이송체는 용접구조

물이며 X/Z 축은 한 개, Y축은 두 개의 리니어모터로 구성되어 있으며, 이송가이드는 롤러 방식을 고려했다.

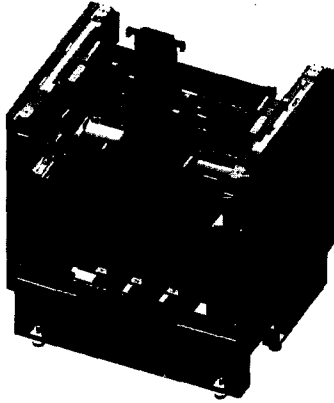


그림 3 금형가공센터의 Lay-out

2.2 이송 시스템의 구성

리니어모터 구동 머시닝센터 개발의 필요성은 리니어모터를 사용할 경우 동력 전달계에 존재하는 마찰력이 감소되고, 변형 및 백래쉬가 없어지고 강성이 향상되어, 고속 운전시의 정밀도 향상을 기대할 수 있게 된다. 또 높은 강성은 종래의 회전형 모터로는 곤란했던 서보계의 고 게인(GAIN)화를 가능케 한다. 그 외에 마모부품을 거의 사용하지 않아 종래와 같은 정기보수가 불필요하고, 대형 장비에 필요한 긴 스트로크의 구성이 용이하며, AC 서보 모터와 같은 동기모터이므로 매끄럽고 안정된 구동특성을 보유하고 있다. 그렇다고 Linear Motor의 적용이 장점만을 갖는 것은 아니다. 특히 감속기구가 없으므로 외부의 절삭력 변화에 민감하고, 따라서 운동정도가 악화되기 쉬우며, 구동력에 비해 Coil과 자석판사이에서 작용하는 Attraction Force가 크게 작용함으로 구조물의 대변형을 일으킬 가능성이 높은 단점도 있다. 본 연구에서는 이러한 리니어 모터의 단점을 보완하기 위해 구조물의 강성을 고려하여, 고강성에 중점을 두고 표2에 제시된 독일의 INA사 롤러형식의 Linear Motion Guide를 선정하였고, 리니어 모터는 독일의 Siemens사 제품으로 그 규격을 표1에 나타내었다. 특기할 사항으로는 리니어 모터 구동계의 경우 볼스크류 구동과는 달리, 별도의 브레이크 시스템을

갖고 있지 못하므로, 안내면에 별도의 브레이크 시스템이 요구됨과 동시에 급 가감속을 고려하여 충분한 안전장치에 대한 고려 역시 요구된다. 그림 4는 INA에서 제공하는 브레이크 시스템의 개략도이다

Max Force	Motor Mounting Height	Motor Mounting Width	Primary Section		Secondary Section	
			mm	kg	mm	kg
13,800	86	257	704	43.5	184	5

표 1 리니어 모터 규격

Model	Width	Height	Basic Load Rating	
			C	Co
	mm	mm	kN	kN
RUE45D	45	70	92	205
RUE45H	45	60	92	205

표 2 안내면의 규격 (INA)



그림 4 안내면에 설치한 브레이크

2.3 이송체의 최적설계

금형가공센터의 고속, 고정도화를 위해서는 경량화와 고강성의 확보가 필수적이다. 이를 달성하기 위해서 유전자 알고리즘을 이용한 다목적함수 최적화 설계를 수행하였고, 또한 정적인 힘에 의한 정강성과 동적인 힘에 의한 동강성을 모두 최적화시키기 위하여 2단계에 걸쳐서 다단계 최적화를 수행하였다.

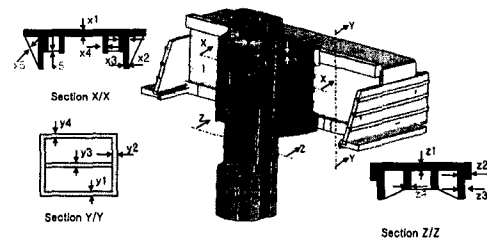


그림 5 설계변수 (13개)

그림 5에는 최적의 강판 두께를 찾아 내기 위해 설계변수를 13개로 설정하였다. 그리고 표 3와 표 4에는 유전자 알고리즘의 파라미터와 최적화 과정전,후의 비교표를 각각 나타내었다.

단 계	정적	동적
Population Size	50	50
Generation	100	60
Chromosome length	30 X 13	
Crossover probability	85%	
Mutation probability	0.01%	

표 3 유전자 알고리즘의 탐색 파라미터 조건

	Static comp. ($\mu\text{m}/\text{N}$)	Dynamic comp. ($\mu\text{m}/\text{N}$)	Weight (kg)
초기모델	0.0310	0.3800	1,026
최적모델	0.0260	0.1770	1,006
감소율	16%	47%	2%

표 4 최적화 전,후 비교

2.4 공기 주축

고속, 고정밀 금형가공센터에서는 모터내장형 공기주축을 사용한다. 일반적인 구름요소 베어링 대신 공기 베어링을 사용하는 이유로는, 정밀한 회전운동과 장수명을 들 수 있다. 그리고 유체베어링은 평균화 효과에 대한 정숙한 운동특성을 갖고 있다. 본 연구에서 추구하는 회전수는 최종 50,000 rpm으로 일반 구름요소 베어링으로 달성하기 힘든 값이며, 무엇보다 구름요소 베어링의 운전수명이 고속화로 갈수록 극단적으로 짧아진다는 점이 고려되었다. 여기에 공기베어링의 회전 정밀도는 정밀한 금형가공과 우수한 표면품질의 달성을 가능하게 한다. 공기 베어링의 최대 단점으로는 낮은 강성과 고속회전시에 발생하는 공기 충격에 의한 회전수 제한 등을 들 수 있다. 그림은 공구동력계를 이용한 주축 베어링 강성을 측정하는 장치다.

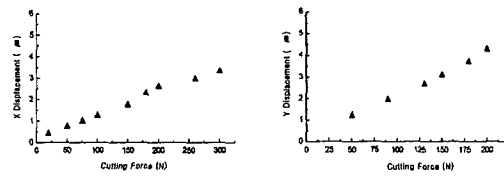
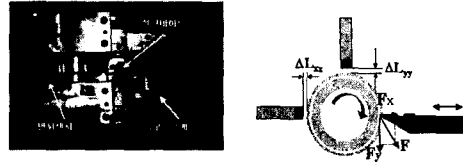


그림 6 절삭력에 따른 변위량

그림 6은 실험으로 구한 공기주축 베어링의 강성 값으로 X 방향 강성은 $90.9 \text{ N}/\mu\text{m}$ ($=300\text{N}/3.3\mu\text{m}$) 이고, Y 방향 강성은 $46.5 \text{ N}/\mu\text{m}$ ($=200\text{N}/4.3\mu\text{m}$) 으로 나타났으며, 주강성은 $102.1 \text{ N}/\mu\text{m}$ 로 나타났다.

2.5 구조물

고속, 고정밀 가공용 공작기계는 정적 강성이 높고 감쇠 효과가 뛰어나며 열적으로 안정화된 구조를 가져야만 한다. 공작기계의 정적 강성은 높은 강성을 갖는 재료를 사용함으로써 구현 가능하지만, 정적 강성이 높은 재료는 일반적으로 낮은 감쇠 성능을 갖기 때문에 진동에 취약하다는 문제점을 가지는데, 장비의 진동은 공작물의 표면품위를 저해할 뿐만 아니라, 제어시스템의 고Gain화를 어렵게 하는 요소가 되기도 한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 철구조물을 이용하여 장비의 강성을 확보하는 한편, 내부에 레진 콘크리트를 주입하여 감쇠성능을 동시에 확보하고자 하였다. 또한, 고속 장비에 있어서 고정부의 고질량화는 장비의 제어루프의 안정화를 위해서도 필수적으로 검토되어야 할 사항이다.

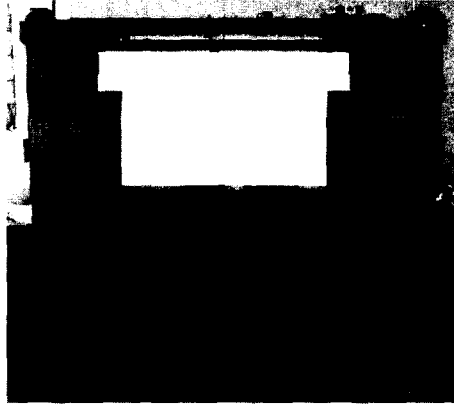


그림 7 레진 콘크리트 적용 구조물

그림 7에서 보는 바와 같이, 공작물을 설치하기 위한 장비 테이블이 고정되는 고정 구조물에 레진 콘크리트를 적용하여 감쇠성능을 확보함으로써, 장비의 가감속에 의한 진동 및 장비 외부로부터의 진동이 공작물에 미치는 영향을 최소화하도록 설계되었다.

2.6 피드백 시스템

위치 피드백 시스템으로는 표 5와 같은 리니어 스케일을 사용한다. 통상의 공작기계에서는 회전형 엔코더에 의한 위치 및 속도 검출 또는 회전형 엔코더에 의한 속도 검출과 동시에 리니어 스케일로부터 위치검출을 하는 형태가 많이 사용되고 있는데, 리니어 구동 공작기계의 경우에는 위치 및 속도 신호를 모두 리니어 스케일로부터 얻어야 한다. 이를 위해서는 2개의 리니어 스케일을 이용하여 각각 속도 및 위치신호를 검출하는 방법과 1개의 리니어 스케일로부터 속도 및 위치 신호를 동시에 검출하는 방법을 고려해볼 수 있다. 정밀 고속제어를 위해서는 2개의 리니어 스케일을 적용하는 것이 안전하나, 본 개발과제에서는 공간상의 제약과 재료비 상승 등의 문제점으로 인하여 1개의 리니어 스케일을 이용하여 두 가지 신호를 검출하도록 하였다. 이렇듯 1개의 리니어 스케일을 사용하는 경우에는 기능 배분이 힘들므로 신호검출의 위치 선정이 주요한 기술적인 검토사항이 된다. 즉, 위치 신호 검출을 위해서는 Abbe오차를 최소화하는 위치선정이 요구되는 반면, 속도 검출을 위

해서는 제어 루프상에서 Negative Feedback이 가능토록 스케일의 위치를 선정해야 한다는 문제점이 생긴다. Positive Feedback의 경우 장비의 동적 강성에 따라, 제어 루프의 불안정성이 발생할 수 있으며, 이것은 즉각 구동속도의 한계로 연결되기 때문이다. 통상 고속 장비에 있어서 위치 신호 검출 위치보다는 속도 신호 검출위치를 우선으로 리니어 스케일의 위치를 선택하게 되는데, 이것은 고속 장비의 기본 특성에서 연유하는 것으로, 고속 이송시의 운동정도를 높이기 위한 것으로 생각할 수 있다.

Type	Measuring Standard	Measuring Step	Max. Speed
Absolute	Glass scale	1 μ m	120m/min

표 5 리니어 피드백 시스템

2.7 주변 기술

고속· 고정밀 금형 가공을 위해서는 가공특성에 대한 사전 검토가 요구된다. 이는 고속 장비에서 직접 가공을 통해서 고속 절삭에 대한 이점과 단점을 파악해야하며, 또한 각 기계마다 고속 가공 특성이 다르기 때문에 이들 데이터를 체계화 시켜야 한다. 그리고 실제 금형가공에서 어려운 부분은 날카로운 모서리 처리부분(Sharp edge)과 3차원 형상에 대한 정확한 컨투어링이다. 이러한 기술을 확보하기 위해서 CAD/CAM, 빠른 DATA 전송, 가공에 적합한 공구선정 그리고 실제 제어 파라미터 값에 대한 연구가 동시에 진행되어야 하며, 이를 뒷받침할 수 있는 장비의 요구 강성에 대한 목표 설정이 필요하다.

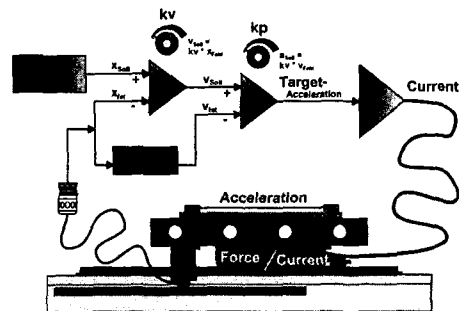


그림 8 이송시스템 제어 개념도

그림 8은 리니어 모터의 이송 개념도로 앞에서 설명한 것과 같이 리니어 스케일로 신호를 받아 리니어 모터를 제어 하게 된다. 이를 위해 최적 파라미터 찾아 수치제어 장치를 기계 특성에 맞게 바꿔주는 작업이 필요하다. 본 과제에서는 실제 제어 파라미터 튜닝을 실시하여, 리니어 모터의 안정된 제어를 하기 위한 최적의 기계 조건을 찾았다.

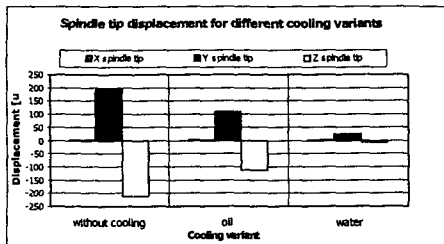
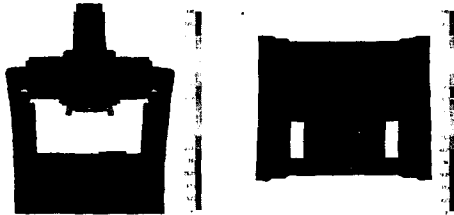


그림 9 금형기 열변형 및 콜런터 영향

또한, 정밀 금형의 가공시간이 수시간을 초과하는 것은 일반적인 경향으로, 특정 정밀도를 달성하기 위해서는 최소한 가공시간내에 장비의 특성이 변화되는 일이 없어야 한다. 주로 영향을 미치는 인자로는, 내부의 열원과 외부의 온도변화를 들 수 있는데, 이러한 환경변화에 따른 장비의 정밀도 변화를 억제하기 위해서는, 단순히 구조물의 열변형 대응 설계만으로는 부족하며, 보다 적극적인 대응 방법이 요구된다.

그림 9는 50,000 rpm 무부하 운전으로 주위온도 20°C 일때 Oil 냉각을 할때의 열변형과 냉각 조건에 따른 스피들 끝단의 변위를 계산한 결과이다. Oil 냉각일때는 스피들 끝단의 최대 변위는 약 100 ~ 110 μ m으로 나타나고, Water 냉각일때의 최대 변위는 약 20 ~ 30 μ m으로 나타난다. 본 연구에서는 상대적으로 냉각능력이 뛰어난 Water 냉각을 채택하였다.

3. 금형 가공센터 조립

앞에 서술한 기술들을 이용하여 고속 고정밀 이송계를 아래 그림 10과 같이 구성하였다. 동작기계 조립에 있어서도 아주 많은 차이를 보인다. 볼스크류를 이용한 동작기계의 조립은 모터(로터리 모터)와 볼 스크류 그리고 이 둘을 이어주는 커플링(혹은 벨트류)으로 구성된 시스템에 이송 구조물을 부착하게 된다. 그러나 리니어 모터를 이용한 이송계의 조립은 모터(리니어 모터)만 있는 경우에 해당된다. 즉, 볼스크류와 커플링 없이 모터에 직접 이송구조물을 부착하여 이송시스템을 구성하므로 조립 및 정도 측면에서 크게 유리하다.

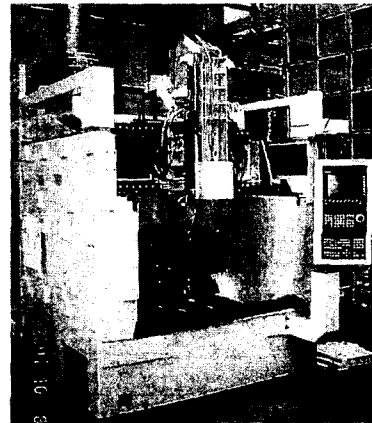


그림 10 금형가공센터 이송계 조립

그림 11는 본 연구에서 개발한 1차 Proto 장비의 최종 조립 사진이다. 본 장비는 12개의 공구를 수용할 수 있는 매거진을 가지고 있으며, Armless 형식의 자동공구교환이 가능하며, 최대 이송속도 120m/s 달성하였으며, 이송시스템의 가감속 성능은 최고 3g를 달성하였다.

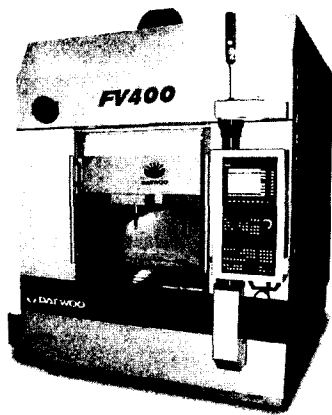


그림 11 금형가공센터

아래 표 6은 본 연구에서 개발한 장비의 사양이다.

이송속도	X / Y / Z	120	m/min
이송범위	X / Y / Z	600/400/400	mm
가/감속도	X / Y / Z	2 / 2 / 3	g (=9.8m/s ²)
주축	회전수	50,000	rpm
공구형식	-	HSK-40E	공기베어링

표 7 금형가공센터 개발사양

4. 결론

리니어 모터를 이용한 고속 고정밀 금형가공센터에 대한 기본 개념의 정립과 관련 요소기술을 개발하고, 상세설계를 완료하였으며, 1차 Proto 개발에 성공하였다.

1. 장비의 기본 축구성은 3축 구동체를 집적하여, 고속제어에 유리하고, 공작물과 구동체가 완벽하게 분리되는 구조로 하였으며, 가동체의 지지부에 레진 콘크리트를 적용함으로써 장비의 감쇠특성을 개선하였다.
2. 이송 시스템으로는 고효율 리니어모터를 적용하고, 안내면은 고강성 시방을 채택하여 이송축의 강성저하를 방지함과 동시에 안정적인 절삭이 가능토록 하였으며, 동시에 안내면상에 브레이크를 설치하여, 리니어 모터 구동의 단점을 보완하였다. 위치제어 및 속

도제어를 위한 피드백 장치로는 리니어 스케일을 사용한다.

3. 이송 구조물은 유전자 알고리즘을 이용한 다단계 최적화를 통하여, 질량대비 정적, 동적 강성을 최적화하여, 고속 가공에 적합한 강성을 유지토록 하였다.
4. 주축으로는 공기베어링을 이용한 모터내장형 주축을 사용하며, 이를 위해 공기베어링의 강성확보를 위한 실험연구 결과, 101N/μm의 강성치를 얻었다.
5. 가동체 지지부의 레진 콘크리트 적용을 위하여 기본적인 해석을 수행하고, 소재의 적절한 배합비율과 작업 공정을 개발하였다.
6. 최적의 기계 운전을 위한 파라미터 튜닝을 수행하였고, 금형가공기의 열변형 해석을 통하여 Water 냉각방식을 채택하였다.
7. Armless 형식의 자동공구교환 장치를 제작했으며, 각 이송축의 가속도는 X/Y는 2g, Z축은 3g를 달성하였다.

참고문헌

1. 이재윤, 김태형, 이득우, 최영휴 외 “고속·고정도 금형가공센터 개발”, 산업자원부, 1차년도 연구보고서, 2000년
2. Z. Pandilov, H. Schulz, B. Bork, H. Gao, "Dynamic Stiffness of a HSC Linear Motor Machine", Proceedings of the 2000 Japan.USA Flexible Automation Conference, 2000
3. M. Weck, P. Kruger, C. Brecher, "Limits for Controller Settings with Electric Linear Direct Drives", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, Vol 41, PP65-88
4. J. Jedrzejewski, W. Modrzycki, "Supervision of Thermal Displacements in Machine Tools Based on Predictive Model", VII Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining System, 1996, pp 104-110