

특 집

원격운용 초고속 HMC 개발



김기태

□화천기공(주)
기술개발연구소 이사
□kkt@hwacheon.co.kr



최재우

□화천기공(주)
기술개발연구소
□cjw@hwacheon.co.kr



주혁

□화천기공(주)
기술개발연구소
□jh@hwacheon.co.kr

관심분야	■초정밀 가공분야(Nano 이상 및 가공)	■초정밀 가공분야(Nano 이상 및 가공)	■초정밀 가공분야(Nano 이상 및 가공)
	■복합 가공분야(5축 금형 가공)	■복합 가공분야(5축 금형 가공)	■복합 가공분야(5축 금형 가공)
	■Agile System 분야(원격운용 초고속가공기)	■Agile System 분야(원격운용 초고속가공기)	■Agile System 분야(원격운용 초고속가공기)

1. 서론

1.1 기술개발의 필요성 및 국내·외 기술개발 현황

우리나라의 주력산업인 자동차, 조선, 반도체 및 컴퓨터 산업제품이 세계시장에서의 품질을 인정받기 위해서는 공작기계산업의 기술적 뒷받침이 필수적이며, 국가 안보를 좌우하는 방위산업 및 항공우주산업도 공작기계산업에 의존하기 때문에 공작기계산업은 국가전략산업으로서 그 역할이 지대하다고 할 수 있다.

이와 같이 공작기계산업은 모든 산업의 원동력 역할을 하는 주요 기반산업임에도 불구하고 국내 공작기계산업은 전반적인 기술적 낙후로 국제경쟁력을 상실하고 있으며, 최근에는 경제불황의 주 업종으로 까지 간주되고 있다.

그러나 선진국의 경우에는 끊임없는 신기술 개발로

첨단 산업화하여 국제경쟁력을 유지하고 있으며, 수출 전략산업으로 육성시키고 있다. 특히 선진국에서는 21세기 제조업의 모습을 현재와 다른 형태로 바꾸기 위한 제조시스템에 대한 연구가 Intelligent Manufacturing Systems, Autonomous Agent Architecture, Holonic Manufacturing Systems, Agile Manufacturing 등과 같은 명칭으로 진행되고 있다.

이러한 연구의 성공조건 중 하나가 초고속 머시닝센터와 같은 고성능 공작기계의 개발이다. 머시닝센터의 고속화 목적은 절삭시간과 비절삭시간의 단축을 통한 생산성의 향상이며, 절삭시간의 단축은 고속가공기술의 연구성과에 힘입은 바 크다. 이와 더불어 고속가공에 의한 가공품질의 고품위화, 고정도화 효과도 기대할 수 있다.

공작기계의 고속화 기술의 대표적인 적용분야는 주

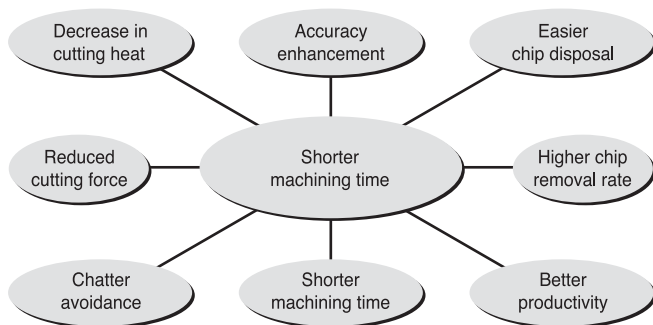


그림 1. 고속가공기가 가공공정에 미치는 효과

축과 이송계 및 분할장치와 위치 결정 장치이다. 머시닝센터의 주축 고속화는 Darmstadt 60,000rpm, Matsuura 60,000rpm, Mikron 42,000rpm, DMG 30,000rpm 등에서 발표한 바가 있으며 이 들에서 사용된 주요기술은 고속화와 고강성화의 관점에서 베어링 설계에 극소량의 윤활법 채용과 관성 부하를 감소시키는 구조설계와 재료의 선택의 기술 등을 주요 설계인자로 채택하고 있다, 또한 고속가공기는 이송계의 구동 방식에 따라 볼스크류 구동방식과 리니어모터 구동방식으로 분류할 수 있다. 근래 공작기계의 고속화 기술의 요구를 충족시키려고 이송속도와 가속도를 크게 하면서 볼스크류의 발열 및 이로 인해 정밀도 악화, 볼 귀환구조에서의 소음, 긴 스트로크에서의 관성모멘트 문제 등 여러 가지 해결해야 할 문제가 제기되어 새로운 구동 방식으로 관성부하를 감소시키고 고속화를 가능하게 하는 리니어 모터를 채용한 이송속도 80-120m/min, 가속도 1-2G를

발휘하는 머시닝센터가 개발되어지고 있다. 리니어모터 구동방식을 적용한 선진 메이커로는 미국의 Ingersoll을 선두로 일본의 MAZAK, Mori-seiki, Toyoda, Matsuura 등이 있고 유럽의 제조 메이커 중에는 Thyssen Kruppe 산하의 Hüller Hille GmbH 와 DMG 등 유수의 회사들이 개발하였거나 개발중이다. 이러한 고속 가공기들은 주로 자동차 주철 및 알루미늄의 고속 강력 절삭가공, 항공기용 알루미늄 주요부품을 가공 목표로 두고 있고 고속 주축 분야에서도 HSK40과 HSK-A63을 채택하여 주축 회전수가 20,000rpm에서 40,000rpm에 이르고 있다. 이상과 같이 리니어모터 구동방식을 채용한 고속 머시닝센터의 대표적인 개발사례는 표 2에서 볼 수 있다.

해외 선진 공작기계업체의 고속화 연구개발 추세에 따라서 국내 공작기계 관련 연구실에서의 고속화 연구개발도 활발히 추진되고 있다. 특히 한국기계연구

표 1. 리니어 모터를 이용한 고속 이송의 사례

업 체	모 델	주축속도 (rpm)	주축모터 (KW)	급이송(X/Y/Z) (m/min)	가속도(G) (X/Y/Z)
MAZAK	Hypersonic1400L	20,000	75	120/120/40	0.7
MAZAK	F3-660L	20,000	33	120/120/120	1.8/1.8/2.0
MORI SEIKI	HVM630	20,000	56	80/80/80	10/1.0/1.5
MASUURA	LX-1	60,000	4.5	90/90/90	1.5
CINCINNATI	Hyper Mach	40,000	22	100/100/100	2.0
DMG	DMG85V	18,000/30,000	15	120/120/120	2.0
Huller Hille GmbH	SPECHT 500L	16,000		100/100/120	1.4
LMT연구회	LMT96	30,000		80/80/80	1.0/1.0/2.0



원은 2단계 차세대 가공시스템 개발과제의 “고속·고정도 위치결정기술(공작기계 이송계의 설계기술에 관한 연구)”에서 LMBG 이송계의 고속화(급속이송 50m/min), 리니어 모터 응용 이송계 (급속이송 100m/min)에 관한 연구를 수행 중에 있다. 또한 고속 이송계, 고속 주축계, 공작기계의 고속제어, 적응 제어 등에 대한 연구가 국내 대학 및 연구기관에서 활발히 이루어지고 있지만, 60m/min 이상의 이송속도를 갖는 고속 고정밀 머시닝센터의 개발사례는 아직 보고되지 않고 있다. 본 과제의 주관기관인 화천기공(주)에서는 1998년 2월에 최대 주축회전수 20,000rpm인 DmN 2,150,000급 머시닝센터용 주축을 개발하였다. 또한 본 과제를 통하여 개발된 원격운용 초고속 HMC의 Prototype I 모델은 구조를 가볍고 이송이 쉽도록 설계, 제작되어져 있고 이송계 40/40/30m/min을 이루고 있고 주축은 30,000rpm

으로 구성되어진 초고속 HMC이다. 이렇듯 국내에서도 초고속 공작기계의 개발에 많은 관심을 나타내고 있다.

2. 연구 내용

2.1 연구개발의 목표

국내 공작기계산업의 발전과 활성화를 도모하고, 생산성의 극대화를 통한 고부가가치를 창출할 수 있는 주축회전수 70,000rpm(HSK40), 급속/절삭이송속도 120/60m/min급의 원격운용 초고속 HMC의 실용화 기술 개발에 있다.

- 원격운용 초고속 HMC의 실용화 기술 및 상품화 확립
- 50,000rpm급 고속 주축계 및 이송계(120m/min급) 설계/제작의 실용화 기술

표 2. 원격운용 초고속 HMC 개발사양

요 소		기 능	제 원	
이송계	X축	스트로크	500 mm	
		최대이송속도	120 m/min	
		가속도	1.2 G	
		구동방식	Linear Motor	
	Y축	스트로크	450 mm	
		최대이송속도	120 m/min	
		가속도	1.2 G	
		구동방식	Linear Motor	
	Z축	스트로크	450 mm	
		최대이송속도	40 m/min	
		가속도	0.6 G	
		구동방식	roller bearing+ballscrew+AC servomotor	
B축	스트로크	360°		
	최대회전속도	10°/sec		
	분해능	0.001° with encoder feedback		
	구동방식	roller bearing+curvic coupling+AC servomotor		
주축계	베어링형식	magnetic bearing	ball bearing (ceramics)	
	최대회전수	70,000 rpm(성립제공)	50,000 rpm	
	모터출력	11kw	10kw	
	주축 테이퍼	HSK32E	HSK40E	
테이블	크기	500×500 mm		
	허용하중	400 kgf		





- 70,000rpm급 고속 주축계 (성림 제공) 적용의 실용화 기술
- 초고속 HMC의 성능평가기술 확립

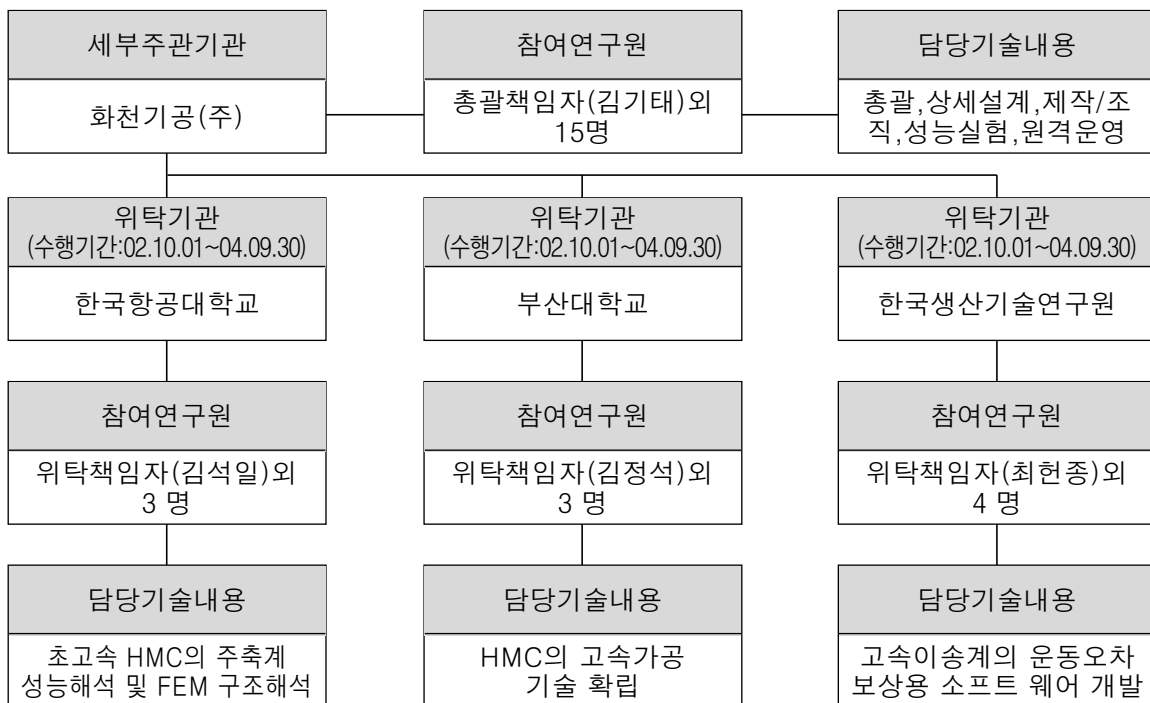
- 초고속 HMC의 원격운용기술 확립
- 고속가공기술 및 제어기술 확립
- 원격운용 초고속 HMC 2단계 최종시작품의 주요제원

2.2 연구내용

◇ 2단계 (2003-2004)

구 분	최종개발목표	세 부 목 표
1차년도 (2003년)	초고속 HMC의 개념 설계/ 상세설계 / 제작	<ul style="list-style-type: none"> • 실용화를 위한 고강성 구조의 최적설계 및 해석 • 50,000rpm 주축 개발 및 시제품 상세설계안 도출 • 리니어모터 이송시스템 설계 및 부품제작 (120m/min) • 주축/이송계/기계요소 분석 시험시스템 구성 • 고속가공(50,000rpm) 성능평가 기반 구축 • 원격제어(원격진단 원격 서비스) 체계구축
2차년도 (2004년)	초고속 HMC의 제작 및 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> • 70,000rpm급(성림 제공) 주축 적용 제작 개발 • 원격운용 초고속 HMC 시제작 / 조립 • 고속 주축 및 이송시스템 성능 평가 • 원격제어(원격진단 원격 서비스) 적용 • 이송계의 위치/자세오차보정 및 제어기술 적용 • 고속가공기의 성능 평가

◇ 주관기관 및 위탁기관 연구내용



3. 연구수행 결과

3.1 개념설계

초고속 원격운용 HMC는 개발을 위한 3차 년도까지의 연구개발과정을 토대로 주어진 과제를 수행하면서 제품 실용화의 완성도를 높이는데 주안점을 갖는 새로운 개념의 기계를 설계하고자 하였다.

고속 고가속의 요건 충족을 위한 고강성의 경량구조와 기계의 콤팩트화, 고속화구동기구의 채택, 열적인 제어기술, 해석기술등을 고려하여 그림 2와 같은 개념의 수평형 머시닝 센터를 도안하였다.

3.2 50,000rpm급 주축

머시닝 센터의 핵심 기술인 고속 주축은 50,000rpm급 주축의 자체 제작과 연계과제를 통한 70,000rpm급 주축으로 구성되고 주축단 HSK-E40을 채용한 주축으로 세라믹 볼베어링을 이용하여 최고속도 50,000rpm을 목표로 DN값(베어링 내경x회전수)가 225만에 이면구속 주축단을 구성하고 있어 주축의 회전수가 높아감에 따라 베어링으로부터 전도된 열이 원심력에 의해 주축단의 변형을 일으

켜 결과적으로 공구 선단의 변화를 최소화하고자 하였다.

주축의 각 부분에 공급되는 윤활유와 냉각유의 유량을 선정하고 오일 냉각기를 채택하여 그림 3, 4에서와 같이 열 해석을 수행한 결과 Front Bearing>Rear Bearing>내장형 모터의 순으로 열의 분포가 일어나고 있음을 알 수 있고 전반적으로 46℃이내의 매우 안정적인 수준을 나타내었다.

3.3 구조계

구조 부문은 주축측에서 X,Y,Z의 구성이 이루어지는 BOX IN BOX구조로서 정밀도 및 작업성 등에서 어렵고 가동중량의 관리가 아주 중요하지만 설계의 정확성 및 예측되는 요인들만 적절히 고려한다면 가동중량의 변화가 없고 공작물의 크기나 중량에 변화 등의 요인에 의한 변형요소가 없어 절삭의 안정성이 우수하다.

구조해석의 결과 관성력에 의한 변형은 X,Y,Z축 모두의 관성력이 타축의 이송 정밀도에 영향을 주지 않는다는 결과를 도출하였다.구조계에 재질은 저팽창 주물로서 열팽창계수가 4.4 -4.8로서 일반 SM45C의 1/2수준으로 열적인 변형에 우수하여 실험결과

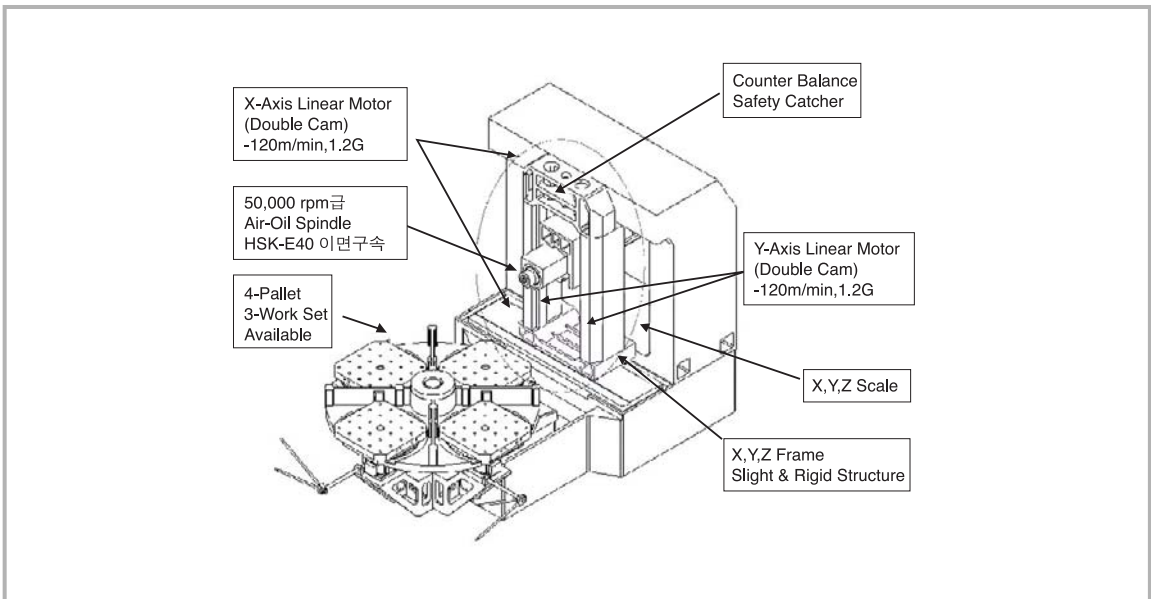


그림 2. 원격운용 초고속 HMC의 구성



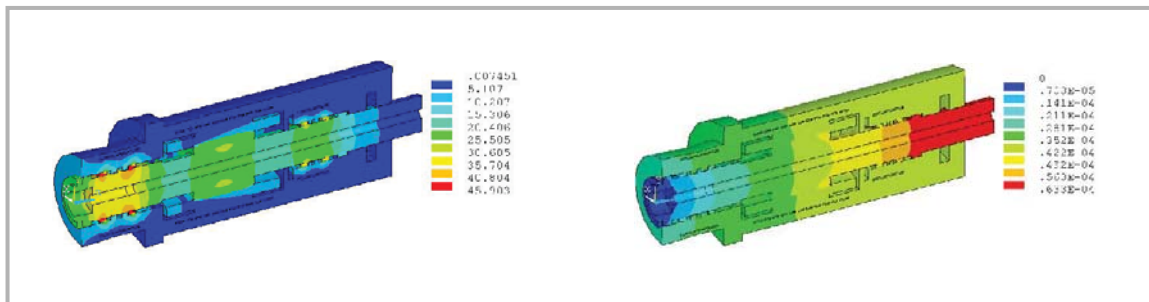


그림 3. 50,000rpm주축의 온도분포 및 열변형

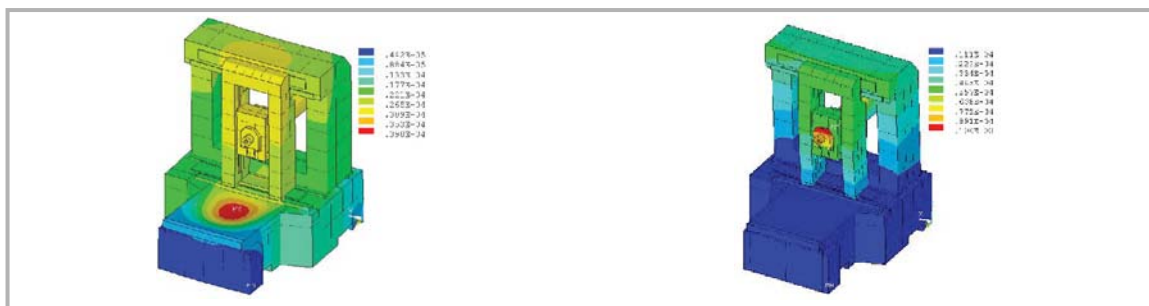


그림 4. 자중(좌)과 관성력(우:X축 관성력)에 의한 변형

SM45C의 재질을 사용한 것보다 1/3 수준의 열적인 변형을 나타내었다.

3.4 안내계, 브레이크, 밸런스

안내면은 작용하는 힘에 대해 동.정적인 강성과 수명을 토대로 판단하였고 여기에 충분한 안전계수를 고려하여 X, Y축은 롤러 가이드와 Z축은 볼 가이드를 선정하였다. X축 배열은 이송시의 안정성을 충분히 확보하고 가공중 발생하는 추력에 대한 강성도 갖는 형태로 롤러 가이드 45와 35로 상하로 구성하였다. 또한 Y축과 Z축은 균일하게 힘의 분포가 나타나 비례와 대칭을 이루도록 구성하였다.

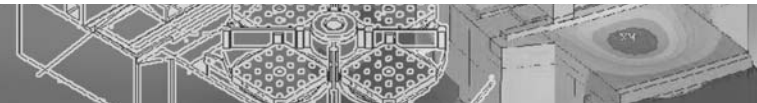
이송 메카니즘이 고속으로 이루어지고 가동부와 고정부의 연결이 되지않아 충돌의 위험이 있으므로 완충장치가 필요하고 전원의 OFF시 비상정지시스템이 구축되어야 한다. 따라서 비상정지 시스템은 일반적으로 사용되는 롤러가이드에 설치되는 브레이크 시스템을 사용하지 않고 카운터 밸런스 실린더에 설치되어 작용하도록 구성하였다. 제동거리에 대한 보완과 이송에 대한 카운터 밸런스를 사용하기 위하여 실

린더에 대한 응답성이 고려되어야 한다. 이를 위해 대용량의 어큐뮬레이터와 관로를 구성하여 설계하였다.

3.5 원격제어

제어 기술에 있어 형상이 복잡한 가공을 수행 할 때 대부분 선독 기능을 사용하고 이에 따라서 가공이 이루어지므로 정도중심 즉 사상가공을 목적으로 가공하면 황삭에서는 많은 시간이 소요되어 비효율적이고 시간을 효율적으로 사용하기 위해 시간중심으로 가공하면 황삭가공의 시간은 짧아지나 사상가공의 정도는 좋지 않게 된다. 이러한 비효율적인 가공시스템을 가공목적에 따라 가공모드를 선택하여 사용함으로써 황삭, 중삭, 정삭 가공시간을 최적화하여 가공시간의 단축 및 공구 수명을 연장할 수 있었다.

그리고 원격운용의 개념을 상세화 시키고자 인터넷을 이용하여 감시 및 원격제어를 가능하게 하는 시스템을 구축하여 가공 상태감시를 함으로써 기계정지상태의 조기 발견이 가능하고 원격지에서 동영상을 통하여 제어 조치를 할 수 있도록 하는 프로그램을



설계하였다.

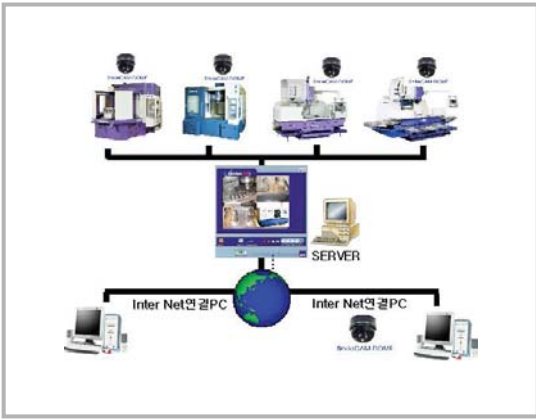


그림 5. 원격제어 체계 구성

가공을 실행한 후 원격지에서 동영상을 통하여 가공의 상태를 감지하도록 한 시스템의 기능 및 제어용 화면이다. 채널상태모드는 여러 채널중 실행 채널의 번호를 가리키고 머신부분은 제어하고자 하는 기계를 선택한다. 그리고 사이클 스타트, 멈춤 기능의 피드 홀드, 비상정지, 피드와 주축의 오버라이드기능, 제어권의 설정을 현재위치 혹은 기계로의 전환기능 등을 갖추고 원격운용을 구축하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원격운용 초고속 HMC 상세 설계를 완료하고 제작을 수행하고 있으며 그에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 주축은 세라믹 볼 베어링을 이용하여 에어 오일 윤활방법과 내장형 모터를 채용한 50,000rpm 급(DmN= 2,250,000) 고속주축의 설계, 제작을 수행하여 해석을 수행한 결과 열적인 안정성이 매우 뛰어나고 축방향 열변위가 10 - 20 μ m이내의 우수한 주축을 설계, 제작하였다.
- (2) 고속 이송구조로서 X,Y,Z의 3축을 공작물과 분리하고 안정성을 갖게하는 BOX IN BOX구조를 적용하여 구조적 강성을 유지하고 기하학적 정도를 고려하여 진동흡수를 위해 간결하고 비례와 대칭을 이루는 설계구조와 열적안정과 진동 감쇄가

유리한 소재를 적용하여 구조물을 설계하고 제작하고 있다.

(3) 구조계에서 각축의 관성력은 다른 축의 이송 특성에 영향을 주지 않는다는 결과를 도출하였고 이론상 1.4G에 도달하는 우수한 결과를 보였다.

(4) 이송시스템은 병렬구조 및 대향구조로서 자력에 의한 변형을 최소화하고 동기제어를 실행하였다.

(5) 이송 안내면은 고 강성을 유지하는 안내구조를 적용하여 안정적인 절삭이 가능하도록 하였고 충돌에 대비한 안정장치 및 카운터 밸런스를 적용하고 비상시의 낙하방지를 위해 브레이크 시스템을 설계하였다.

(6) 황삭, 중삭, 정삭 가공시간을 최적화하여 가공시간의 단축 및 공구 수명을 연장할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 원격운용의 개념을 상세화 시켜 인터넷을 이용하여 감시 및 원격제어를 가능하게 하는 시스템을 구축하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김기태외 “원격운용 초고속 HMC 개발” 산업자원부 연구보고서 (1단계 최종 보고서) 2003.
- [2] 김석일외, “최신 공작기계 설계기술,” 반도출판사, 1995.
- [3] 한동철외, “고강도 고정밀 고속 주축 기술 개발에 관한 연구”,통상산업부 연구보고서 1996, pp. 15-32
- [4] 森正 外. “工作機械用 under race 潤滑 軸受 開發”, NTN Technical Review, pp. 41-47
- [5] A.E. Slocum, “Precision Machine Design,” Prentice