

원격운용 초고속 HMC 개발

김기태, 최재우, 주혁 / 화천기공(주) 기술개발연구소

Abstract

Nowadays, there are required more speed and accurate machining in order to improve the productivity through the reduction of cutting and non-cutting time. In this study, the high-speed HMC is specially designed to do remote control and high-speed mechanism with 30000rpm, 50000rpm, 40m/min, 100m/min and bridge type structure. Every structural deformation and vibration that is generated from all of factor is analyzed being based on the virtual manufacturing technologies: thermal characteristic analysis, machine-ability, tool wear measuring system, driving characteristic of linear motor and so on. As the application of these results had been consisted of three axes to move slight and rigid finally. Therefore, table errors that are resulted in change of work weight can be removed.

1. 서론

우리 나라의 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 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 System, Autonomous Agent Architecture, Holonic or Agile Manufacturing System 등과 같은

명칭으로 진행되고 있다. 이러한 연구의 성공조건 중 하나가 초고속 HMC와 같은 고성능 공작기계의 개발이다.

본 연구는 절삭시간과 비절삭시간의 단축을 통한 생산성의 향상을 추구함과 동시에 국내 공작기계산업의 발전과 활성화를 도모하고, 고부가가치를 창출할 수 있는 주축회전수 30,000/50,000 rpm (볼베어링/자기베어링), 급이송/절삭속도 100/40m/min 급의 실용화와 완성도를 높인 원격운용 초고속 HMC를 개발하는데 그 목표가 있다. 이를 위하여 초고속 HMC의 구조/요소설계 기술, 고속 주축계와 이송계의 설계/제작 기술, 성능평가기술, 원격운용기술, 고속가공 기술 등에 대한 연구를 수행하고 있다. 특히 1단계에서는 원격운용 초고속 HMC의 설계 제작, 30000rpm과 50000rpm 주축계, 이송계의 설계 제작, 주축계의 성능해석, 대형 구조물의 구조해석, 이송계의 열해석, 고속가공성 평가 및 가공상태 모니터링 기술 등에 대한 연구결과를 도출하여 이에 대한 전반적인 개발의 과정에 초점을 두고 그 결과를 정리하였다.

2. 30,000/50,000rpm급 주축 설계 및 제작

주축은 세라믹 베어링을 이용하여 DmN치 247만의 30000rpm 성능을 갖는 고속영역에서 강성, 진동의 안정성, 정밀도, 열적 안정성을 중점을 두어 설계하였다. 이러한 요소들 중 가장 큰 요소가 열이라는 것을 판단하고 발열을 최대한 억제함과 동시에 효율적으로 제거할 수 있는 구조인 오일 제트

윤활 시스템으로 Built In Motor(내장형 모터)와 Spindle Unit를 Coupling으로 연결한 직결방식으로 제작하였다. Coupling으로 내장형 모터를 외장형 모터 형식으로 연결하는 것은 Motor 자체의 발열이 Spindle로 전도되는 것을 차단하여 가공에 영향을 주지 않기 위함이다. Fig. 1에서는 이러한 경로를 볼 수 있고 발생열에 대한 정보를 알 수 있었다.

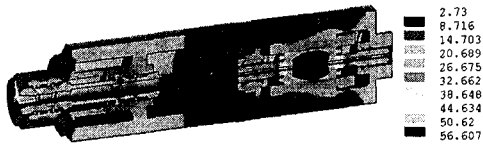


Fig.1 30000rpm 주축의 온도 분포(25000rpm)

이러한 정보를 바탕으로 발생 열을 제거하기 위해 베어링부에 냉각오일을 노즐을 통하여 직접분사하고 모터부와의 오일량을 각기 달리 공급하였다. 그리고 열 제거를 신속하게 제거 위하여 열의 출입이 비교적 자유로운 저 점도오일(2Cst 이하)을 사용하고 Oil Controller를 이용하여 냉각을 하였다.

- Oil Controller Capacity: 7800 kcal/h
 - 온도 제어: 실온동조 / -1℃ Closed Loop
 - 운전 조건 : 0 rpm에서 25000rpm로 회전
- 아래의 그림은 열변형의 측정과 각 부분의 온도를 측정하기 위한 실험장치이다

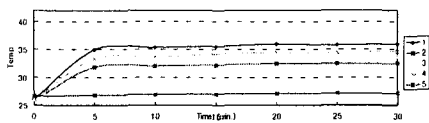


Fig.2 Oil controller 7800kcal/h(-1℃)의 실험결과

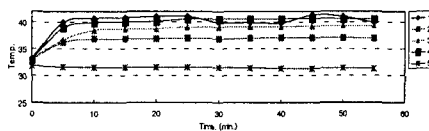


Fig.3. 30000rpm급 주축의 열변위

위의 결과에서 볼 수 있듯이 5분이내에 안정화를 이룸으로써 오일온도 제어 냉각기는 7800 kcal/h의 용량을 선정하였다. 오일제트 윤활은 회전축에서 베어링 주변 공기가 에어커튼을 형성하는데 이를 통과하기 위해서는 유량과 속도의 변수를 갖게된다. 관계식은

$$Q = 0.03H / \Delta t$$

로서 Q는 유량(l/min), H는 발생열(W), Δt 오일의 온도차로 다량의 오일이 공급됨에 따라 마찰저항이 커지게되고 동력손실이 가장 큰 단점이다. 아래의 그래프는 개선 전과 개선 후의 동력손실을 나타낸 것이다.

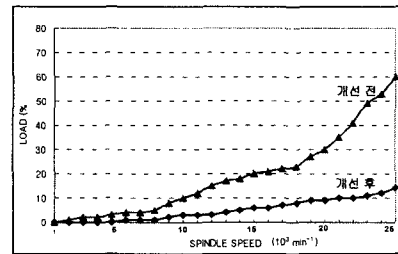


Fig.4 30000rpm 주축의 동력손실률 모터에서 발생하는 동력을 100%로 볼 때 9000rpm까지 2%, 25000rpm에서 14% 이내의 소비동력이다.

자기베어링으로 이루어진 50000rpm 주축을 제작한 자율대응 주축을 이용하여 주축시스템을 구성하고 원격운용 개방형 제어기를 이용하여 호환이 가능하도록 하였다. 주축의 사양은 최고회전수 50000rpm, 공구의 홀더는 HSK40E, 모터의 동력은 13.75/11.5KW이고 베어링과 모터의 열 발생을 고려한 결과 냉각용 콘트롤러는 3000Kcal/h로 적용하여 설계, 제작하였다.



Fig.5 50000rpm급 초고속 주축

구조상 툴링 시스템과 내장형 모터인 빌트인 모터를 냉각하는 자켓, 액츄에이터와

센서로 구성된 유닛으로 구성되고 자기베어링의 강성은 Front 750N, Rear 250N, Axial 750N을 갖추고 비상시에 안전을 위하여 보조베어링을 설치 하였다. 주축의 발열에 대해서는 내장형모터와 자기베어링의 발열량에 관한 자료를 제작업체로부터 제공받았으며 모터 600W, 앞, 뒷베어링50W으로 아래와 같이 열 해석을 하였다.

열해석은 최고속도 50,000rpm을 기준하여 해석하였고 Fig. 6에서 나타난 결과는 내장형 모터가 37.8℃로 가장 높고 스테이터가 21.9℃, 그리고 축방향 베어링이12.3℃, 자기 베어링은 비교적 적은 상태이다. 모터는 외부의 냉각에 의해 충분히 온도를 낮출 수 있어 효과적으로 제어된다. Fig. 15에서는 주축선단은 아래로 끝단은 위로 열적이 변형이 일어나고 있으나 결과는 적은 편이어서 우려할 정도는 아니라는 결론을 내렸다.



Fig. 6. 50000rpm주축의 온도분포 해석

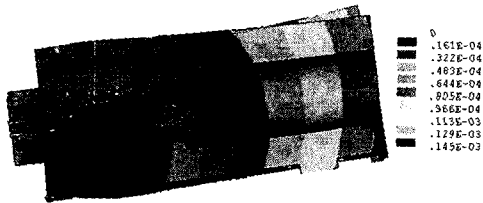


Fig. 7. 50000rpm주축의 열변형 해석

3. 초고속 HMC의 구조물 설계 및 제작

원격운용 초고속 HMC는 볼스크류, 서보모터를 이용한 40m/min이송계와 리니어 모터를 적용한 100m/min급으로 설계 및 제작으로 이루어 졌다. 먼저 볼스크류를 적용한 구조이다. 구조물의 구조해석을 보면 3차, 4차, 10차 진동모드에서 Column(X Base) 상단에 뒤틀림 현상 발생하는 것을 볼 수가 있는데, 이것은 컬럼의

강성을 보강할 필요가 있는 것으로 여겨진다. 이에 따라 현실적으로 문제가 있을 것으로 판단되는 곳에 대한 개선 설계를 하여 시제품의 프레임을 제작하였다

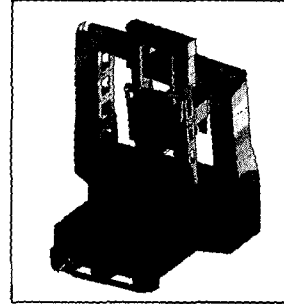


Fig. 8 시제품의 4차 진동

시제품으로 위탁기관을 통해 구조해석을 완료하여 Fig.8과 같이 해석결과를 기초로 구조형상 등을 고려하여 컬럼(X Base)부분의 두께를 15mm에서 25mm로 늘려 강성을 보강하였으며 시제품을 개선, 설계 제작을 수행하였다. 초고속 원격운용 HMC의 구조적인 특징은 X,Y,Z축의 구성이 주축부에서 이루어지므로 가공물의 중량에 의한 영향을 받지 않아 이송계 시스템이 안정적이고 모터의 부하가 일정한 상태를 이룬다. 그리고 가공물을 고정하는 테이블부는 □500mm로 4연 자동공작물 교환장치를 갖고 있고 이 구조는 유연한 생산 시스템을 갖게 구성되어 있다. 아래의 Fig. 9는 구조와 시스템 대응능력을 보여준다.

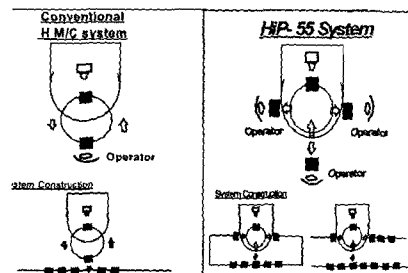


Fig.9 가공시스템 비교

4개의 파레트중에 주축측은 가공이 이루어지고 나머지 3개의 파레트는 공작물의 Loading이 되는 영역으로 1개의 공작물을 가공하는 상태에서 다른 공작물을 설치하고

프로그램을 작동시키면 가공현장에 작업자가 없더라도 가능하여 원격제어 시스템과 연계되어 있고 공작물 설치과정에 임의의 방향으로 회전시키거나 면을 수정할 수 있는 장치를 부가하였고 자동공구 교환장치는 매거진에 공구가 40개 장착될 수 있게 설계하여 이송계의 원점 복귀 후 별개의 기구를 이용하지 않고 주축이 X축으로 공구 위치로 이동하여 Y축으로 전진하며 공구를 착탈하는 메카니즘으로 설계 및 제작하였다

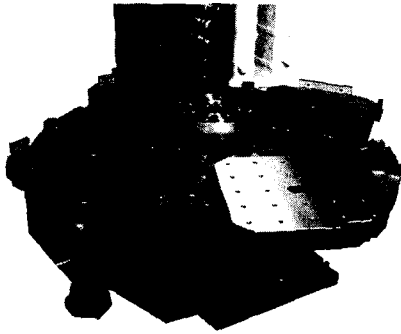


Fig.10 4연 A.P.C System

리니어 모터는 변환기구가 없는 작동으로 변환기구를 갖는 볼스크류 시스템과 비교하여 볼스크류 시스템의 단점들이 장점으로 나타난다. 리니어 모터를 사용하여 고속 고가속의 이송이 이루어져 비가공 시간을 단축함으로써 절삭시간의 비율을 높일 수 있고 고속 윤곽가공 정밀도를 향상시켜 엔드밀 가공의 비율을 높여 공구 교환 횟수를 저감하여 사이클 타임을 줄이는 장점을 갖는다.

- Thrust Force: 6000 N
- Max. Thrust force: 12000 N
- Peak force: 9000 N
- Magnetic force: 40000 N
- Max. speed: 120 m/min
- Resolution: 1 μ m

위의 자료는 리니어 모터의 사양으로 보는바와 같이 모터의 자기 흡인력은 모터 추력의 3.3 배에 이르므로 자기흡인력에 의한 변형이 우려되었고 구조 해석 결과 또한 자기흡인력에 의해 설계가 변경되어야 되었다

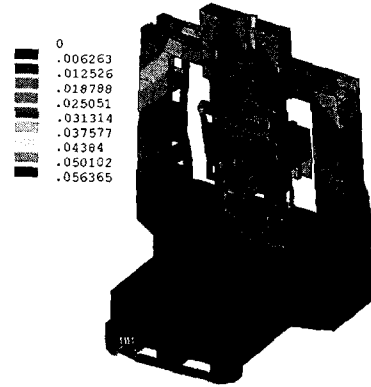


Fig.11 초고속 HMC의 15차 진동

해석의 결과 Fig.11,을 통하여 하여 알 수 있듯이 나타나는 변형은 Y축의 Head 프레임의 강성 부족으로 전후 방향으로 고정자가 진동 및 변형을 일으켰고 X 베이스의 형태에서 좌우의 뒤틀림 현상을 알 수 있어 개선 설계하여 제작하였다.

원격운용 시스템과 관련하여 개방형 CNC를 채용하여 네트워크 환경에 적합한 체제를 구축함으로써 원격감시 및 고장진단 기술인 지능형 원격 진단기술(FDS)과 원격 서비스(RSS)의 기능을 갖게 하였다. FDS는 개방형 CNC에 내장되어 고장이 발생한 요소를 찾아내고 사용자가 RSS를 이용하여 가공상태, 고장진단 내역, 기타 서비스를 원격으로 정보를 얻을 수 있어 실시간의 지원이 가능한 체제를 갖추었다.

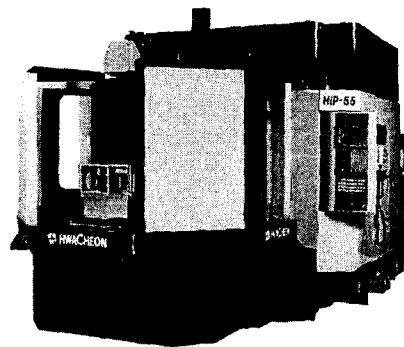


Fig.12 원격운용 초고속 HMC

4. 가공실험 및 가공성 평가

본 연구를 통해 가공성 평가와 관련한 내용은 아래와 같다.

- 40,000 rpm급 주축의 고속가공성 평가
- 고속가공 데이터베이스 구축
- 고속가공 가공변질층 시뮬레이션 기술개발
- 공구상태 및 실시간 공구마멸 측정시스템

그러나 다음에 열거되는 내용은 실제 현장에서 사용되는 가공을 주로하여 측정된 것이다.

| Process | Tool | N(min^{-1}) | F(m/min) | Ad | Rd |
|---------|----------------|------------------------|----------|------|-----|
| Rough | $\phi 50$ Face | 8000 | 15000 | 1.0 | 30 |
| Rough | $\phi 50$ Face | 5000 | 6000 | 1.0 | 40 |
| Rough | $\phi 10$ Flat | 8000 | 6000 | 3.0 | 5.0 |
| Rough | $\phi 10$ Flat | 15000 | 1000 | 0.2 | 5.0 |
| Rough | $\phi 10$ Flat | 18000 | 6000 | 10.0 | 0.2 |
| Rough | $\phi 0.3$ | 20000 | 200 | | |

가공은 수평형 머시닝센터에서 일반적으로 실행하는 검사의 방법을 사용하여 고속 가공에서의 실험으로 아래와 같이 가공한 결과이다.

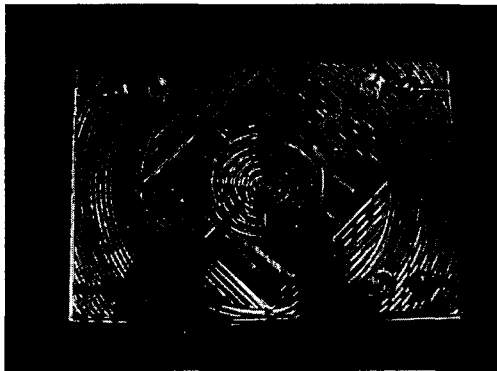


Fig. 13 샘플 High Speed Cutting

가공결과로서 4곳의 Hole간 거리의 편차는 $\pm 2 \mu\text{m}$ 로 매우 우수하고 2축을 동시에 이송하여 수행한 사각가공의 폭의 편차도 $5 \mu\text{m}$ 를 나타내었고 평행도도 $5 \mu\text{m}$ 이하의 결과를 나타내었다 단면별 가공의 결과는 다소문제가 있는 상태인 $8 \mu\text{m}$ 를 나타내었다.

컴퓨터의 cooling pin의 가공인 박판 가공의 실험을 수행하였다. 재질은 알루미늄으로 $40 \times 40 \times 15 \text{mm}$ 의 소재를 Axial depth 0.05 Radial depth 1.0, Feed 2000m/min, 주축의 회전수 20000rpm에서 A.B.C를 가공하였다.

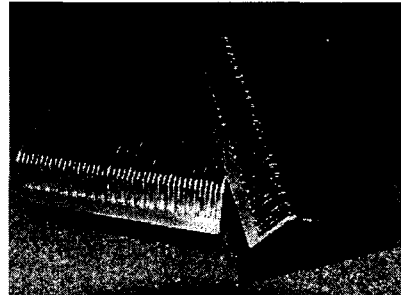
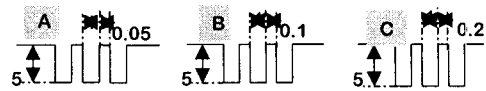


Fig.14 박판가공(Cooling Pin)

고속가공에서 요구되어지는 가공중의 하나가 금형가공이다. 이러한 가공을 위해 병의 바닥면을 가공하였다. 전체시간은 2시간 48분으로 고속가공에서의 장점을 충분히 발휘 할 수 있었다. 재질은 알루미늄7075를 사용하고 $\phi 120 \times 70$ 의 가공물용 절삭유와 오일 미스트를 유체로 하였다 가공공정은 황삭과 중삭, 그리고 사상으로 나뉘고 황삭공정은 R3 볼 엔드밀로 12000rpm에서 3600mm/min으로 가공하여 1시간 2분이 걸렸고 중삭은 R3 볼 엔드밀로 15000rpm에서 3600mm/min으로 가공하여 6분, 사상은 R3 볼 엔드밀로 16000rpm에서 2400mm/min으로 가공하여 1시간 40분이 소요되었다.

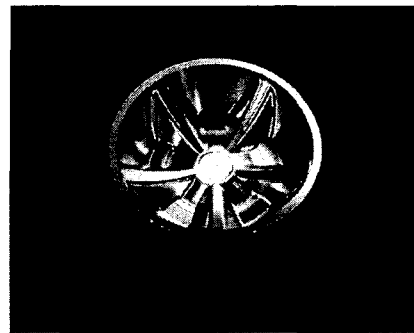


Fig.15 초고속 HMC의 금형가공

5. 결론

본 연구에서는 원격운용 초고속 HMC 상세 설계 및 제작을 수행하였으며 조립 및 특성실험을 수행하였고 그에 대한 결과는 다음과 같다.

(1) 30000rpm급볼베어링 적용 주축, 50000rpm급 자기 베어링을 탑재한 고속주축을 설계 및 제작을 수행하였다.

(2) 볼스크류와 서보 모터를 이용한 이송계(40m/min)와 리니어 모터(100m/min) 적용 이송계를 구조해석/진동해석/열 해석을 통하여 강성 부족에 의해 나타난 변형들을 구조개선하고 설계하여 제작하였다.

(3) 30000rpm 주축은 세라믹 베어링을 이용하여 최고속도 30000rpm으로 DmN치로는 200만을 상회하는 성능을 갖고 고속영역에서 주축의 강성, 진동의 안정성, 정밀도, 열적 안정성 및 장시간 운전에도 적합한 주축의 개발하였다.

(4) 주축 Unit의 구조는 주축과 주축 모터를 분리형으로 직결하는 구조를 취하여 발열과 발열대책에 대해 대응이 쉬운 구조이며 주축의 동력손실률이 매우 적은 우수한 주축을 제작하였다.

(5) 30000rpm급 주축의 온도 변화를 파악하였으며, 주축에서 발생하는 발열에 대한 제어를 2종류의 냉각능력이 다른 Spindle Oil Temperature Controller로 실험하였고 초고속 HMC 주축에 맞는 Oil Temperature Controller를 선정하였다.

(6) 증기거점 제 4 과제에서 설계, 제작한 과제 6과제의 개방형 CNC Controller를 적용하여 원격운용 초고속 HMC를 설계 및 제작하였다.

(7) X,Y,Z축의 구성이 주축부에서 이루어지므로 가공물, 즉 중량의 변화가 일어나지 않아 이송계 시스템이 안정적이고 리니어 모터의 부하가 일정한 상태를 갖게 한다. 그리고 가공물을 고정하는 테이블부는 Auto pallet changer로 이루어져 유연한 생산 시스템을 갖도록 구성되어 있고 자동공구 교환이 가능한 설계와 제작이 이루어졌다.

(8) 알루미늄과 Steel을 대상으로 부품가공과 금형가공의 결과 생산성의 향상을 이룰 수 있었다.

(9) 50000rpm 초고속 주축에서의 온도는 내장형 모터의 회전자에서 가장 높으며, 주축회전수 50,000rpm일 때의 로터의 온도가 가장 높고 스테이터, 그리고 자기베어링류 등으로 주축의 온도 분포는 양호한 상태로 외부의 자켓 냉각에 의해 효과적으로 제어되었다.

(10) 자기베어링 지지방식은 구름베어링 지지방식에 비해서 온도상승이 낮기 때문에 열적 안정성이 우수한 주축계를 구성하는데 효과적이다.

(11) 리니어모터 구동방식은 볼스크류-서보모터 구동방식에 비해서 온도상승이 낮아 열적 안정성이 우수한 이송계를 구성하는데 유리하다.

참고문헌

1. 김기태 외, "원격운용 초고속 HMC 개발," 산업자원부 연구보고서(1단계 2차년도 보고서), 2001.
2. 김석일 외, "최신 공작기계 설계기술," 반도출판사, 1995.
3. 한동철외 "고강도 고정밀 고속 주축 기술개발에 관한 연구", 통상산업부 보고서, 1996. pp54-55
4. A.E. Slocum, "Precision Machine Design," Prentice Hall,
5. 森正 外. "工作機械用 under race 潤滑 軸受 開發", NTN Technical Review pp 41-47