

◆특집◆ 금형가공용 초고속 지능형 절삭 시스템

압전형 부하 센서링이 장착된 5축 절삭가공기의 고속 주축시스템 설계

최현진*, 박철우*, 장은실*, 김충현**, 최성대#

Design of High Speed Spindle for 5-Axis Machining Equipment Equipped with Piezo-Electric Load Sensoring

Hyun-Jin Choi*, Chul-Woo Park*, Eun-Sil Jang*, Chung-Hyun Kim**, Seong-Dae Choi#

(Received 30 September 2011; received in revised form 5 October 2011; accepted 6 October 2011)

ABSTRACT

In this paper, we reviewed the spindle system's motor and bearing and its mode safety for optimal design of a high speed spindle system that exceeds DmN value of 1,500,000. We could verify that it has a separation margin during critical speed by performing critical speed analysis. Also, we have selected an optimal sensoring installation location and actually manufactured & installed the sensor by identifying the stress concentration position in the axial load through finite element analysis to install the built-in piezo electric type load sensor to the spindle housing that can measure and monitor the machining load during high speed rotation of the spindle. Reproducibility is also verified by calibrating the error through the sensor's sensitivity adjustment after comparing the output between the plate dynamometers and the load sensor to confirm the reproducibility of the load sensor.

Key Words : Load Sensor(부하센서), Piezo-Electric(압전), High Speed Spindle(고속주축), Machining Tool(가공기), Critical Speed Map(위험속도선도)

1. 서 론

현재 절삭가공기계는 초고속, 고정밀화, 다기능화, 복합화, 고유연 지능화의 글로벌 트렌드로 진행 중이며 IT, 반도체, 광산업 등의 신수요 산업에서 요구되는 정밀 부품의 생산분야에 있어서도 절삭가공기계의

공정집약형 고정밀 다기능 복합가공의 필요성이 점차적으로 확대되고 있다. 이러한 절삭가공기계의 고속화와 지능화의 핵심 유니트가 주축시스템이다^[1,3].

주축유니트는 공작기계 혹은 금속 절삭 전용기 등의 가공 시스템에서 공구를 주체로 직접 회전함으로써 가공을 행하며 가공제품에 영향을 가장 크게 미치는 핵심 공작기계 회전류 요소로 고속가공을 위한 용도에 사용되고 있다. 최근 제조업의 급격한 환경에 요구되는 부품의 고정도화에 더하여 고품위화에 따른 주축 성능에 다양한 변화요구가 이어지고 있어 일반적인 주축으로는 만족될 수 없는 실정이다^[2]. 특히 글로벌

* 대구기계부품연구원

교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : sdchoi@kumoh.ac.kr

** 디엠씨 주식회사

환경 아래 속도 경쟁에서 고속가공에 따른 생산성 차이로 인하여 소비자의 요구가 고속가공에서 필수 요소인 주축의 고속화와 더불어 지능화, 하이테크화에 이르고 있다. 지능형 주축시스템은 실제 주축부하를 바탕으로 NC프로그램의 이송속도를 실시간 제어하고 공구의 마모와 파손 등 절삭공구 상태를 지속적인 감시로 한계값에 이르렀을 때 알람 발생 및 긴급 정지시키는 시스템을 국외에서는 개발을 진행하고 있으며 2008 동경국제공작기계전시회에서 SKF사는 상용 주축유닛을 위해 3축 진동센서, 파손감지센서(Crash Sensor), 온도센서 등을 내장한 주축 파손감지 시스템(Crash Detection System for Spindle)을 소개하였다^[1,3].

고속 주축시스템의 기술적 중요성은 제조업이 글로벌 경쟁 아래 처해져 있는 단기납기, 코스트다운 압박과 부품의 고정도와 고품위가공을 위한 고속, 고정도 가공에 일반 주축으로서 만족시킬 수 없는 엄격해진 부분에 고속 주축이 그 역할을 다하여 요구기능을 완벽하게 구사할 수 있기 때문이다. 또한 경제적 중요성으로는 점점 치열해지는 근년의 주변 환경이 속도경쟁을 요구하고 있다. 이러한 글로벌 시대의 경쟁 속에 진보한 성능과 기능을 적극적 이용하고 고속가공법으로 리드타임의 단축과 코스트 절감에 큰 효과를 발휘하여 경쟁력 향상에 유효한 무기로 작용하고 있기 때문이다^[1].

본 연구에서는 DmN값이 150만이 넘는 고속 주축시스템의 최적 설계를 위하여 축계의 고유진동수와 위험속도해석을 수행하여 안정성을 분석하였다^[4]. 또한 주축의 실 절삭구동 부하의 상태를 모니터링하여 절삭조건을 제어할 수 있도록 주축 일체형으로 장착할 수 있는 센서링을 제작하여 센서링 시스템의 재현성을 확인하였다^[5].

2. 고속 주축시스템 설계

범용기계에 사용되는 주축은 모터와 분리하여 벨트나 커플링을 사용하여 동력을 전달시키고 주축회전이 고속화 되면 벨트와 커플링의 속성상 파형운동이 발생하여 심한 진동이 발생한다. 이로 인해 주축계는 데미지를 받게 된다. 이러한 점을 고려하여 해결한 방식이 바로 AC 서보모터를 직접 스피들 축에 부착

시키는 방법 즉, 빌트인 모터를 적용하는 추세이며^[6], 이 형태는 구조가 콤팩트하고 외부구동에 따른 벨트 및 풀리 등에 의한 진동문제, 고속 회전 시 벨트파손 등의 문제가 없으므로 정밀 고속 회전에 적합하고 저속에서 고속으로 회전이 변속될 때 유연성이 요구되는 머시닝센터에 매우 적합하다^[7]. Fig. 1은 주축의 고속화에 필요한 기술을 보여준다. 실제 고속 주축계 설계를 하기 위해서는 베어링, 윤활, 냉각, 밸런스, 축계의 고유진동수 및 위험속도를 검토해야 한다^[8].

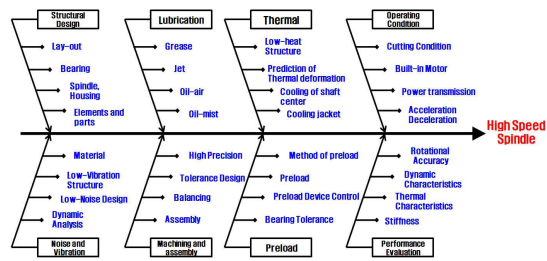


Fig. 1 High speed spindle technology

주축시스템은 1, 2차에 걸쳐 Lay-out 설계를 진행하였으며 Table 1은 1, 2차 Lay-out 설계 사양 비교분석표이며 Fig. 2는 최종 완료된 2차 주축 모델 Lay-out을 보여준다.

Table 1 Comparison table of design specifications

Description	1st Model	2nd Model
Max.Speed	30,000rpm	40,000rpm
Bearing	Ceramic angular contact ball bearing Ø50, Ø45	Ceramic angular contact ball bearing Ø45, Ø35
Preload	Constant pressure preload	Constant pressure preload
Lubrication	Oil-mist	Oil+Air
Built-In Motor	Fanuc Bil 80S/40000 13kw/5.9Nm	IBAG HF120A136HK 12.6kw/5Nm
Cooling	Oil coolant	Water coolant
External Dia.	210mm	153mm
Spindle Length	591mm	541mm
Tool Type	HSK-E40	HSK-E40

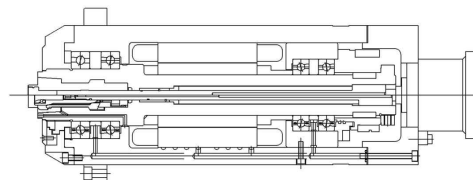


Fig. 2 Lay-out of the spindle system

고속 주축의 구조는 모터가 내장된 빌트인 형태이며 주축 베어링은 앵글러 콘택트 볼베어링을 조합하여 스피들의 전, 후반부에 각각 설치하였다. 스피들 모터는 1차 모델에서는 화낙사의 모터를 2차 모델에서는 화낙사의 모터보다 내외경이 작은 IBAG사의 모터를 주축 중간부에 장착되는 구조로 설계하였다. 2차 모델이 1차 모델보다 모터의 내외경이 작고 전·후 베어링부 간격이 작아 주축의 모드 안전도가 Table 2와 같이 증가 되었다. 또한, 주축의 가공정밀도를 높이기 위해 테이퍼 2면구속형 HSK-40E를 적용하였다.

Table 2 Mode shape of spindle system

Mode	1st Model	2nd Model	Mode shape
1st	498.7 Hz	1284.6 Hz	
2nd	707.6 Hz	2172.7 Hz	
3rd	1363.8 Hz	2195.6 Hz	
4th	1835.1 Hz	2195.6 Hz	

3. 로터-다이나믹 해석

개발대상인 40,000rpm의 주축 시스템의 저진동 운동 신뢰성 확보를 위한 시스템의 위험속도선도 (critical speed map) 도출을 통한 진동발생량을 해석하였다. Fig. 3은 고속 회전부인 Spindle의 단순화된 FE모델로서 로터는 등가 질량과 관성으로 베어링은 스프링요소로 등가 치환된 FE모델을 생성하였다.

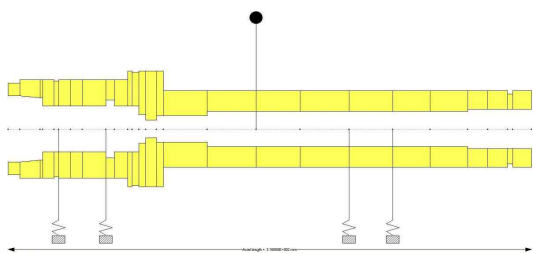


Fig. 3 Rotor dynamic FE model of spindle

해석조건은 시스템의 감쇠를 고려하지 않았으며, 베어링 지지부의 영향 및 온도에 따른 스피들 축의 탄성계수 변화를 무시하고 해석을 수행하였다. 해석 결과 고유진동수는 Table 3과 같이 발생하였다.

Table 3 Natural frequency of spindle system

Mode	Freq.(Hz)
1	1,337.1
2	1,342.3
3	1,805.1

시스템의 감쇠를 고려하지 않은 상태에서 베어링 강성변화에 따른 위험속도(critical speed) 해석을 수행 하여 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. 시스템의 정격속도는 위험속도와 충분한 분리여유를 가지도록 설계되어야 한다. 스피들의 경우 정격속도 내에는 위험속도가 존재하지 않음을 알 수 있으며, 위험속도는 80,000rpm으로 최고속도와 분리 여유를 가짐을 판단할 수 있었다.

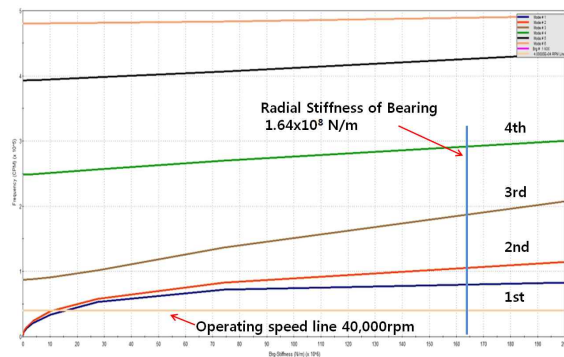


Fig. 4 Critical speed map of spindle

3. 센서링 시스템

현재의 주축시스템은 대부분이 직접 구동되는 모터 스피들을 갖추고 칩쇠로 고정하거나 플랜지로 기계구조와 연결되는 구조로 설계된다. 이러한 주축시스템의 절삭력을 측정하기 위하여 스피들 구조에 적절하게 센서를 설치하여 동적 베어링의 힘 또는 장치의 프리로딩 힘을 측정할 수 있다. 이는 최적의 가공

절삭조건을 분석하고 산출하기 위한 방법론 중 하나이다. 센서링 시스템을 주축에 장착하여 절삭부하 모니터링을 하는 목적은 공구의 파손 및 마모를 감지하고 주축 베어링의 상태에 대한 신속한 대응이라 할 수 있다^[5,6,9].

3.1 압전 부하센서 선정

압전형식의 부하센서는 큰 강성도에 높은 감도를 겸비하고 있기 때문에 주축 스피들의 정적 및 동적 특성에 거의 영향이 없다는 것이 장점이 있으며 동시에 폭넓은 범위의 힘에 대해서도 측정범위를 전기적으로 전환할 수 있는 특징이 있다. 압전 부하센서는 SlimLine 센서라고 불리는 Kistler사의 표준센서를 사용하였으며 Table 4는 센서의 사양이며 Fig. 5는 센서의 치수 및 형상을 보여준다^[10].

Table 4 Load sensor's spec.

Type	SlimLine 9131B
Measuring range	0-2.5Fz[kN]
Overload	3Fz[kN]
Sensitivity	-4.0[pC/N]
Dimensions	7.0mm×3.0mm

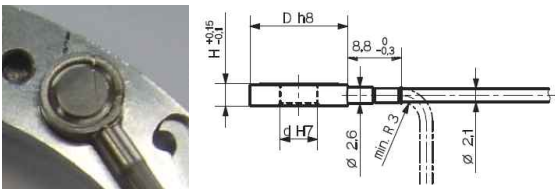


Fig. 5 Shape and dimensions of the load sensor

3.2 압전 부하센서 설치

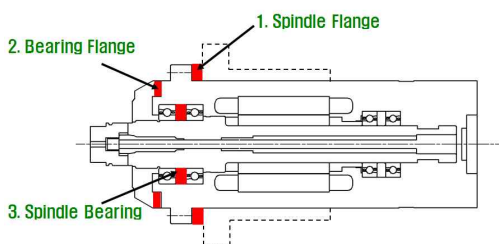


Fig. 6 Available position for installation of load sensor

센서링은 일반적으로 아주 평평한 압전 부하센서가 부착된 지지링으로 절삭부하를 측정하기 위해 주축 구조에 적절하게 설치하거나 베어링에 직접 설치하여 하중이 작용할 때 전달되는 힘을 최적으로 감지할 수 있도록 해야 한다. Fig. 6은 주축구조에서 부하센서의 설치 가능위치를 나타내고 있다^[5].

3.3 유한요소 해석

주축의 구조설계 도면을 바탕으로 축방향의 부하에 따른 응력집중 되는 부분을 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 유한요소법을 기반으로 하는 상용프로그램인 Msc.Marc를 사용하였으며, Fig. 7은 주축시스템 프론트부의 유한요소모델을 보여준다.

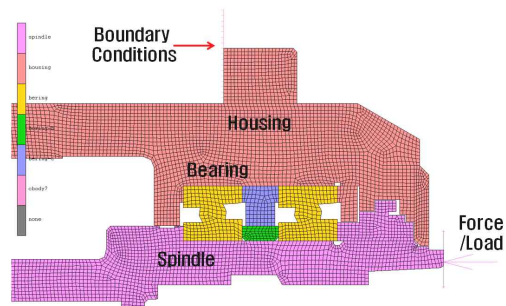


Fig. 7 Finite element model of the front part of spindle system

해석결과 Fig. 8과 같이 축방향의 부하에 따라 응력집중이 높은 곳은 베어링 후면(1)이며 그 다음은 주축 하우징(2) 부분임을 알 수 있었다. Fig. 9는 응력이 집중되는 부분의 각 Node를 추출하여 시간에 따른 응력집중값을 보여준다.

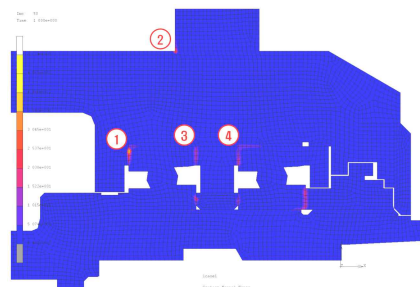


Fig. 8 Analysis results

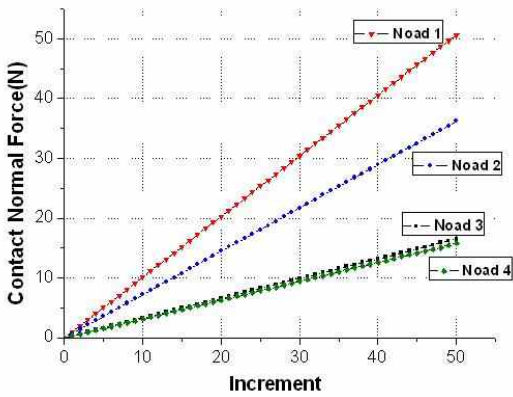


Fig. 9 Stress concentration value

유한요소해석 결과로 센서링 설치에 최적인 위치는 베어링 후면인 것을 알 수 있지만 센서링을 장착하려면 주축 조립 초기에 베어링과 센서링을 동시에 장착해야 하며 조립 후 베어링 예압과 상관관계를 최적화해야 하는 어려움이 있다. 따라서 센서링의 장착과 유지보수의 용이성을 위해 주축 하우징부분(Fig. 8의 2)에 링형식으로 장착하여 센서 시스템이 통합된 주축구조로 설정하였다. Fig. 10은 제작된 센서링이며, Fig. 11은 실제 센서링이 장착된 주축시스템을 보여준다.

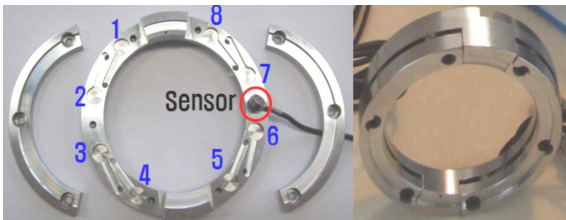


Fig. 10 Manufactured piezo-electric load sensor

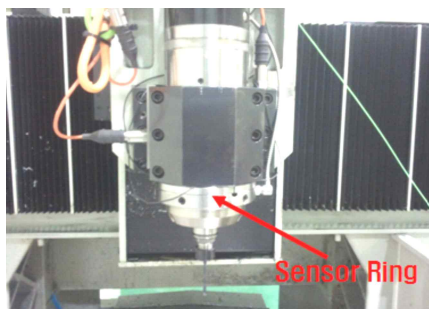


Fig. 11 Spindle system where load sensor ring is attached

3.4 센서링 시스템 재현성 실험

주축에 통합된 센서링 시스템의 재현성을 확인하기 위하여 기존 판형 공구동력계(kistler9257B)를 사용하여 가압력을 측정하고 동시에 센서링으로부터의 신호를 측정하여 가압력과 출력되는 신호의 오차를 보정하기 위해 전하 증폭기의 민감도(Sensitivity)를 조정할 수 있도록 실험을 하였다. Fig. 12, 13은 오차보정 전·후 출력 결과를 나타내고 있다. 실제 판형 공구동력계와 센서링의 출력값은 40% 정도 차이를 보였으나 부하센서의 민감도를 조정하여 판형공구동력계의 출력과 거의 일치하도록 보정하여 주축시스템에 장착된 부하 센서링 시스템의 재현성을 확인할 수 있었다.

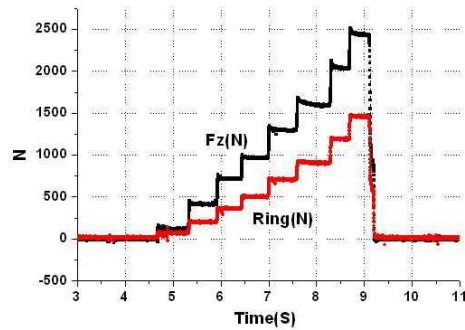


Fig. 12 Output signal before error correction

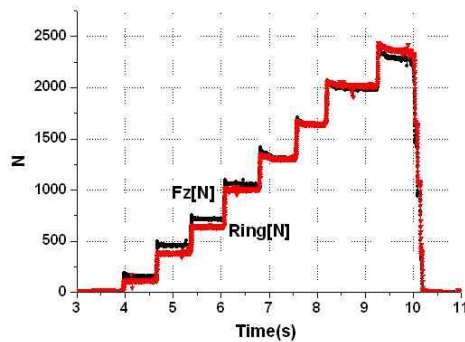


Fig. 13 Output signal after error correction

4. 결론

본 연구에서는 40,000rpm급 고속 주축시스템의 최적 설계를 위하여 주축계의 고유진동수와 위험속도

해석을 수행하여 주축의 모드 안전도 및 위험속도에
서 분리여유를 가지고 있음을 판단 하였으며, 주축의
고속회전 가공시 절삭부하를 측정하고 모니터링이
가능할 수 있도록 압전형 부하센서가 내장된 센서링
을 스피들 하우징에 장착하였다. 또한 부하 센서링의
출력 오차값을 센서의 민감도 조정을 통하여 보정을
행하여 부하 센서링의 재현성을 확인하였다. 향후에
는 절삭가공시 실시간 모니터링이 가능하도록 시스
템을 구축하여 부하 센서링이 장착된 주축시스템의
성능을 평가할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지역전략기획기술개발사
업의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여
러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 지식경제부 생산시스템 전략기술지원단, "IT 부품
가공용 유연성 머시닝센터", 전략기술 생산시스템
연구기획 최종보고서, pp. 37-48, 2008.
2. C.H Park, H.J Choi, E.S. Jang, Y.H. Koh and C.H.
Kim, "Design technique of high speed spindle system
for mold machining", KSMPE Spring Conference,
pp. 85-90. 2009.
3. H.J. Choi, "Development of High-Speed and
Intelligent Machine Tools used for Cutting Mold",
Daegu Machinery Institute of Components &
Materials, 2008.
4. Yuzhong Cao, Yusuf Altintas, "A General Method
for the Modeling of Spindle-Bearing Systems",
Journal of Mechanical Design, ASME, Vol. 126, pp.
1089-1102, 2004.
5. A. kirchheim, G. Schaffner and N. Jeck, "Cutting
Force Monitoring with Spindle Integrated Force
Sensors", Kistler Instrumente AG Winterthur, 20.
209e, pp. 1-5, 2009.
6. E. Abele, Y. Altintas and C. Brecher, "Machine tool
spindle units", CIRP Annals - Manufacturing
Technology, 59, pp. 781-802, 2010.

7. S.I. Kim, J.W. Jo, W.J. Lee and Y.H. Lee,
"Static/Dynamic Characteristics Analysis of a
High-Speed Spindle System with 50,000rpm",
KSMTE Spring Conference, pp. 494-499, 2003.
8. B.O. Kim, S.A. Lee, D.H. Lee and Y.C. Kim,
"Rotating machinery for ensuring the reliability of
the rotor dynamic analysis procedures", Journal of
Fluid Machinery, Vol. 10, No. 5, pp. 64-73, 2007.
9. F. Klocke, R. Schmitz, Dr. A. Kirchheim and J.
Stirmimann, "Advanced Machining Process Analysis",
Industrial Tooling Conference, KISTLER, pp. 1-16,
2003.
10. "SlimLine Sensors Catalog", Kistler, pp. 1-5, 2009.