

모터분리형 초고속 머시닝센터 주축계의 열특성 해석

김석일*, 권태균, 나상준 (한국항공대학교)

Thermal Analysis of a Motor-Separated Spindle System for High-Speed HMC

S. I. Kim*, T. K. Kweon and S. J. Na (Hankuk Aviation Univ.)

ABSTRACT

This paper presents the thermal characteristics analysis of a high-speed HMC spindle system with angular contact ball bearings, built-in motor, oil-jet lubrication method, oil jacket cooling method, and so on. The spindle system is composed of the main spindle and sub-spindle which are mechanically connected by a flexible coupling. The spindles are supported by two front and rear bearings, and the built-in motor is located between the front and rear bearings of the sub-spindle. The thermal analysis model of spindle system is constructed by the finite element method, and the thermal characteristics in the design stage are estimated based on temperature distribution, heat flow and thermal deformation under the various testing conditions related to material of bearing ball, spindle speed and coolant temperature.

1. 서론

공작기계 주축계의 기본적인 요구 성능들은 저진동, 고정도, 고강성, 고감쇠, 장수명, 저온도상승 등이 있다. 최근에는 이러한 기능들과 함께 고속절삭을 통한 생산성 및 가공정밀도의 향상, 경합금 및 난삭재의 고효율가공 등을 도모하기 위해서, 그리고 절삭과 연삭의 복합화 등을 구현하기 위해서 머시닝센터를 중심으로

한 공작기계 주축계의 고속화가 활발히 진행되고 있다.

최근 공작기계 주축계의 고속화를 위해서 적극적으로 채용되고 있는 모터내장형 주축계는 모터와 주축이 억지끼워맞춤으로 조립되어 있기 때문에 동력전달요소를 줄일 수 있어 그 구조가 단순하고, 소음, 진동 등을 감소시킬 수 있다. 그리고 주축계가 운동하는 구조에 적합하기 때문에 공작기계의 가공유연성을 크게 향상시킬 수 있다는 특징을 가지고 있다. 그러나 고속화에 따른 베어링에서의 발열 외에도 모터에서의 발열은 주축, 베어링, 하우징 등으로 전달되어 베어링의 수명 단축, 공작기계의 열변형 증대를 초래하게 된다. 따라서 주축계의 열특성은 주축계의 고속화를 도모하기 위해서 파악해야 할 중요한 문제로 대두되었으며, 이와 관련된 연구로서 베어링 예압이 주축계의 온도상승에 미치는 영향,⁽¹⁾ 주축계의 발열특성과 축심냉각의 효과,⁽²⁾ 오일에어유탈조건 및 공기냉각량이 주축계의 온도상승에 미치는 영향^(3,4) 등이 보고되고 있다.

본 연구에서는 화천기공(주)이 앵글러콘택트 볼베어링, 내장형 모터, 오일제트유탈법, 오일자켓냉각법 등을 적용해서 개발하고 있는 $\phi 65\text{mm} \times 30,000\text{rpm}$ 급 모터분리형 초고속 HMC 주축계에 대한 열특성을 설계단계에서 해석 및 평가하였다. 주축계의 열해석 모델은 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 5.5를 이용하여 구축하였고, 열적 문제의 검토 및 열적 설계자료의 도출을 위해서 모터와 베어링에 대한 열전달률

해석과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각효과를 고려하였다. 특히 초고속 HMC 주축계의 열특성은 베어링 볼의 재질, 주축회전수, 냉각유의 급유온도 등이 온도분포, 온도상승, 열전달률, 열변형, 열응력 등에 미치는 영향을 토대로 분석하였다.

2. 초고속 HMC 주축계의 구조 및 열원

2.1 초고속 HMC 주축계의 구조

본 연구의 해석대상인 모터분리형 초고속 HMC 주축계의 구조적인 특징은 통상적인 모터내장형 주축계와는 달리 공구 회전을 담당하는 메인 스피ndl과 모터가 장착된 서브 스피ndl로 분리되어 있고, 서브 스피ndl로부터 메인 스피ndl로의 동력전달은 커플링에 의해서 이루어진다는 데 있다. 그리고 메인 스피ndl은 전반부와 후반부에 각각 2개씩 설치한 앵귤러콘택트 볼베어링 65BNRX10과 55BNRX10에 의해서 지지되고 있고, 서브 스피ndl은 전반부와 후반부에 각각 2개씩 설치한 앵귤러콘택트 볼베어링 40BNRS10과 35BNRS10에 의해서 지지되면서 내장형 모터가 그 중간에 위치하는 구조로 되어 있다.

특히 초고속 HMC 주축계는 메인 스피ndl과 서브 스피ndl을 지지하는 베어링의 윤활방법으로서 오일제트윤활방법을 채용하고 있으며, 냉각자켓을 메인 스피ndl의 전반부 베어링 부분과 서브 스피ndl의 내장형 모터 부분에 각각 설치하여 주축계의 온도상승을 억제하도록 설계되어 있다.

2.2 내장형 모터의 발열

초고속 HMC 주축계는 내장형 모터가 서브 스피ndl에 장착되어 있기 때문에 주축계의 열원은 베어링과 모터로 나누어진다. 그리고 베어링과 모터에서 발생하는 열들이 상호 영향을 주기 때문에 모터에서 발생하는 열은 베어링의 특성에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 모터의 전체 발열량은 모터의 소비동력을 측정함으로써 추정이 가능하지만, 스피ndl과 하우징을 통해

서 동작기계 구조로 열을 전달하는 초고속 HMC 주축계의 열특성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 동손 및 철손에 의한 모터의 발열량을 로터와 스테이터로 구분해서 해석해야 한다.

2.3 베어링의 발열

구름베어링의 온도상승은 베어링 내부의 마찰동력손실과 비례하는 관계를 갖으며, 베어링의 마찰동력손실은 베어링의 미끄럼모멘트에 의해서 결정된다. 초고속 HMC 주축계의 베어링으로 사용되고 있는 앵귤러콘택트 볼베어링과 같이 접촉각을 갖는 베어링에서는 스피ndl미끄럼과 자이로스코픽미끄럼에 의한 미끄럼모멘트가 발생하고, 또한 베어링 하중과 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트가 존재하게 된다. 따라서 주축회전수, 베어링 하중, 윤활유 점도 등의 영향을 받게 되는 베어링의 전체 열발생률 H_b 는 식 (1)과 같이 스피ndl미끄럼에 의한 열발생률 H_s , 자이로스코픽미끄럼에 의한 열발생률 H_g , 베어링 하중에 의한 열발생률 H_p , 윤활유 점성에 의한 열발생률 H_v 의 합으로 표현할 수 있다.

$$H_b(n, p, \nu) = H_s + H_g + H_p + H_v \quad (1)$$

여기서 n 는 회전수, p 는 베어링 하중, ν 는 윤활유의 점도를 의미한다.

초고속 HMC 주축계와 같이 주축회전수가 높은 경우, 식 (1)과 같이 주어지는 열발생률 중에서 스피ndl미끄럼에 의한 열발생률은 다른 열발생률에 비해서 매우 작기 때문에 본 연구에서는 그 영향을 무시하였다.

오일제트윤활방법이 적용된 초고속 HMC 주축계의 경우에는 식 (1)과 같이 주어지는 베어링의 열발생률 H_b 가 모두 스피ndl이나 하우징으로 전달되는 것이 아니라 윤활유에 의한 베어링의 냉각효과 때문에 스피ndl이나 하우징으로 전달되는 베어링의 열전달률은 식 (1)의 값보다 작게 된다. 초고속 HMC 주축계에서 윤활유의 급유온도와 배유온도의 차이를 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$

라고 하면, 윤활유에 의한 베어링의 냉각효과 때문에 발생하는 열제거율 H_r (W)은 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$H_r = 51.59 \cdot s \cdot q \cdot \Delta T \quad (2)$$

여기서 s 는 윤활유의 비열(kcal/kg°C), q 는 윤활유의 급유량(kg/min)이다.

결과적으로 초고속 HMC 주축계에서 스피indle들이나 하우징으로 전달되는 베어링의 열전달률 H_i 는 식 (1)의 열발생률 H_b 와 식 (2)의 열제거율 H_r 의 차이로 표현할 수 있다.

$$H_i = H_b - H_r \quad (3)$$

3. 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석

3.1 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석모델

초고속 HMC 주축계의 열특성 해석을 위해서 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 5.5를 사용하였다. Fig. 1은 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석모델을 단면도 형태로 보여주고 있는데, 유한요소 해석모델은 14,512개의 솔리드요소(Solid 70)와 41,296개의 절점으로 이루어졌다. 그리고 Table 1과 2는 초고속 HMC 주축계를 구성하는 요소들의 물성값과 윤활유 및 냉각유로써 사용된 기름의 물성값을 각각 보여주고 있다. 또한 베어링과 냉각자켓으로의 급유량은 Table 3에 제시하였다.

주축 모터에 대한 발열량은 제작사의 자료를 토대로 회전수별 로터와 스테이터의 발열량으로 분리해서 Fig. 2와 같이 정리하였는데, 발열량은 로터가 스테이터보다 매우 크다는 것을 알 수 있다.

3.2 베어링의 열전달률

초고속 HMC 주축계의 열원은 내장형 모터와 베어링으로 구분된다. 그리고 내장형 모터로부터의 열전달률은 Fig. 2에서 볼 수 있는 열발생률과 같지만, 베어링으로부터의 열전달률은 식 (3)과 같이 열발생률과 열제거율의 차이로 주어져야 한다.

Fig. 3은 세라믹 볼베어링 65BNRX10의 열

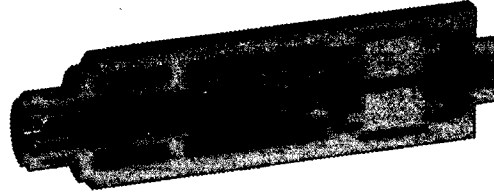


Fig. 1 Analysis model of spindle system (section view)

Table 1 Material properties of spindle elements

GC300	Density	7,300 kg/m ³
	Thermal conductivity	55.8 W/m°C
SCM440	Density	7,860 kg/m ³
	Thermal conductivity	42.7 W/m°C
Cu	Density	8,930 kg/m ³
	Thermal conductivity	393.1 W/m°C
SUJ2	Density	7,860 kg/m ³
	Thermal conductivity	41.9 W/m°C
Si ₃ N ₄	Density	3,200 kg/m ³
	Thermal conductivity	29.3 W/m°C

Table 2 Material properties of oil

Dynamic viscosity	1.5 cSt
Specific heat	0.47 kcal/kg°C
Density	900 kg/m ³

Table 3 Flow rate of oil

65BNRX10	1.5 l/min/EA
55BNRX10	1.5 l/min/EA
40BMRS10	0.75 l/min/EA
35BNRS10	0.75 l/min/EA
Oil jacket of main spindle	3 l/min
Oil jacket of sub-spindle	15 l/min

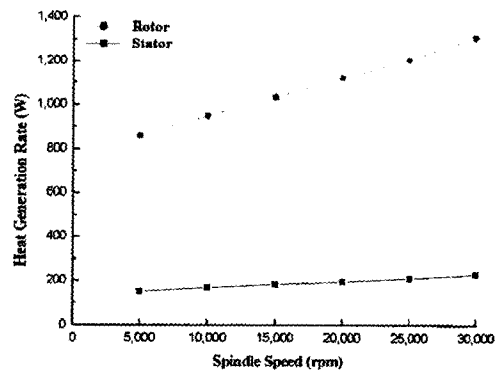


Fig. 2 Heat generation rate of built-in motor

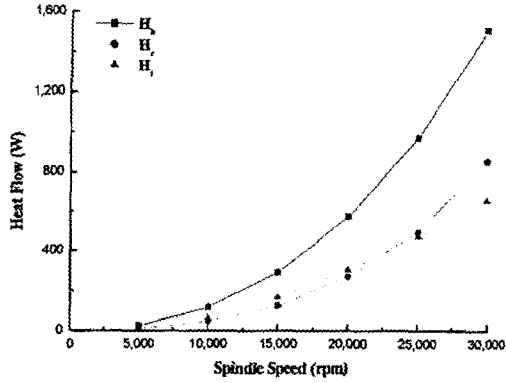


Fig. 3 Heat flow of ceramic ball bearing 65BNRX10

발생률, 열제거율 및 열전달률을 보여주고 있다. 주축회전수가 증가할수록 베어링의 온도상승도 증가하기 때문에 동일한 급유량에 대해서 윤활유의 열제거율도 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 특히 윤활유의 열제거율은 베어링의 온도, 공급유량, 급유온도 등에 의해서 달라지게 되는데, 초고속 HMC 주축계의 윤활/냉각조건에서 윤활유의 열제거율은 베어링의 열발생률에 대해서 65BNRX10이 20~30%, 55BNRX10이 50~60%, 45BNRS10이 50~70%, 35BNRS10이 30~60% 정도인 것으로 나타났다.

3.3 초고속 HMC 주축계의 온도상승

초고속 HMC 주축계의 열특성을 해석하기 위해서 내장형 모터와 베어링에 대한 열전달률 해석결과들과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각효과를 고려하였다. 특히 대기온도는 20℃로 일정하다고 가정하였고, 베어링과 냉각자켓으로의 급유온도는 대기온도와 같다고 설정하였다.

Fig. 4는 주축회전수 30,000rpm일 때 해석된 초고속 HMC 주축계의 온도분포, Fig. 5는 주축회전수에 따른 베어링들의 외륜, 주축 선단부, 로터 및 스테이터에서의 온도상승값을 보여주고 있다.

온도상승값은 로터에서 가장 크게 나타나고 있는데, 특히 주축회전수 30,000rpm에서의 온도상승은 약 61℃에 달하고 있다. 이에 비해서 스



Fig. 4 Temperature distribution of spindle system (spindle speed : 30,000rpm)

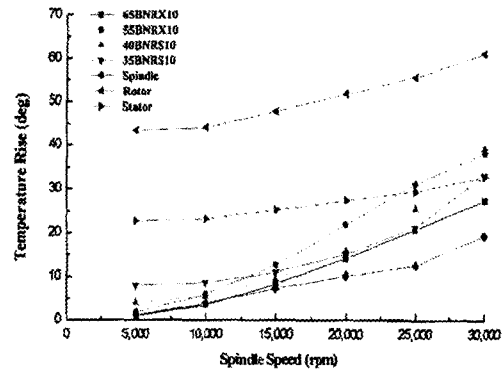


Fig. 5 Temperature rise of spindle system

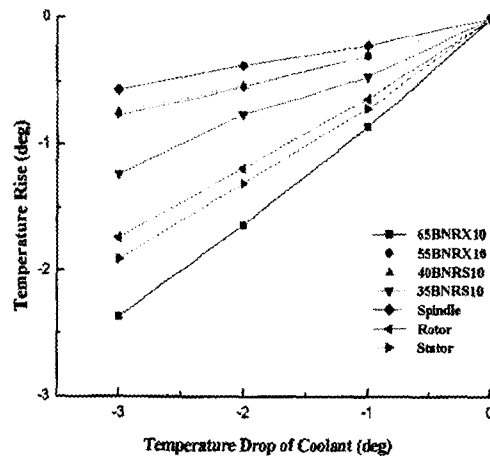


Fig. 6 Effect of coolant on temperature rise

테이터는 온도상승이 약 33℃로 로터의 54% 정도인 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 스테이터의 온도상승은 스테이터 부위에 설치된 냉각자켓에 의해서 효과적으로 억제되고 있음을 알 수 있다.

주축 선단부는 메인 스핀들의 전반부 베어링과 인접한 위치에 있기 때문에 주축 선단부

의 온도상승은 메인 스피ndl의 전반부 베어링과 유사한 것을 알 수 있는데, 주축 선단부의 온도 상승값이 약 0~8℃ 정도 낮게 나타났다. 그리고 메인 스피ndl의 후반부 베어링 55BNRX10은 구조적으로 열을 방출하기 어려운 위치에 있기 때문에 냉각자켓에 의해서 열방출이 용이한 전반부 베어링보다 온도상승값이 약 1~11℃ 정도 높으며, 이러한 경향은 주축회전수가 높을수록 더욱 두드러지게 나타나고 있다.

서브 스피ndl의 전반부 베어링 40BNRS10과 후반부 베어링 35BNRS10은 로터로부터 전달되는 열에 의해서 그 온도상승 형태가 로터와 유사한 것으로 나타나고 있다. 특히 저속 영역에서는 냉각유의 유입구쪽에 위치한 전반부 베어링 40BNRS10이 후반부 베어링 35BNRS10보다 약 4℃ 낮지만, 고속 영역에서는 열 발생량이 많은 전반부 베어링 40BNRS10이 후반부 베어링 35BNRS10보다 약 4℃ 높게 나타나고 있다.

Fig. 6에는 메인 스피ndl과 서브 스피ndl에 설치한 냉각자켓으로 공급되는 냉각유의 온도가 초고속 HMC 주축계의 온도상승에 미치는 영향을 나타내었다. 냉각유의 급유온도가 낮아질수록 온도상승값들도 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 메인 스피ndl의 전반부 베어링과 스테이터는 냉각자켓과 인접한 위치에 있는 관계로 냉각유의 급유온도에 대한 영향을 직접 받지만, 로터는 공기층을 통한 스테이터로의 열전도 현상에 의해서 온도상승이 낮아지는 것으로 판단된다,

3.4 초고속 HMC 주축계의 열변형

초고속 HMC 주축계에 대한 온도상승 해석 결과를 토대로 열변형 해석을 수행하였다. 열변형 해석의 관점은 주축의 축방향 열변형과 베어링의 반경방향 열변형, 그리고 베어링에 작용하는 열응력을 파악하는 데 있다.

Fig. 7은 주축회전수가 30,000rpm일 때 해석된 초고속 HMC 주축계의 열변형 분포, Fig. 8, 9 및 10은 주축회전수에 따른 주축의 축방향 열변형, 베어링의 반경방향 열변형 및 열응력

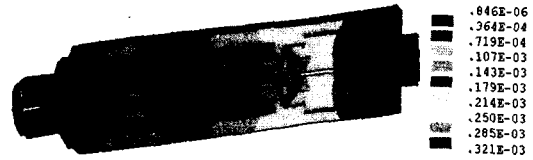


Fig. 7 Thermal deformation of spindle system (spindle speed : 30,000rpm)

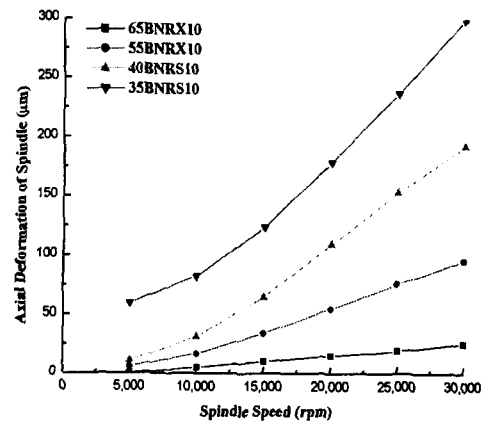


Fig. 8 Effect of spindle speed on axial deformation

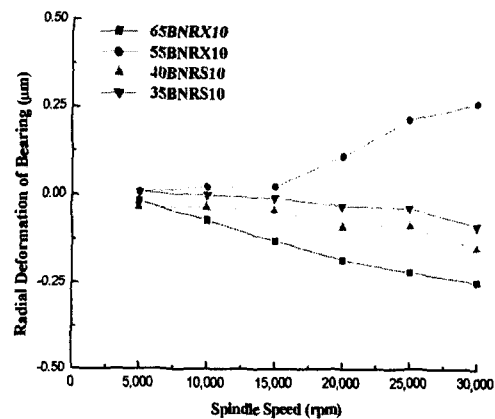


Fig. 9 Effect of spindle speed on radial deformation

(외륜)을 보여주고 있다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 메인 스피ndl의 베어링 위치에서는 주축의 축방향 열변형이 주축회전수와 선형적인 비례관계에 있는 것으로 나타났다으며, 특히 메인 스피ndl의 전반부 베어링 위치에서의 축방향 열변형은 주축회전수 30,000

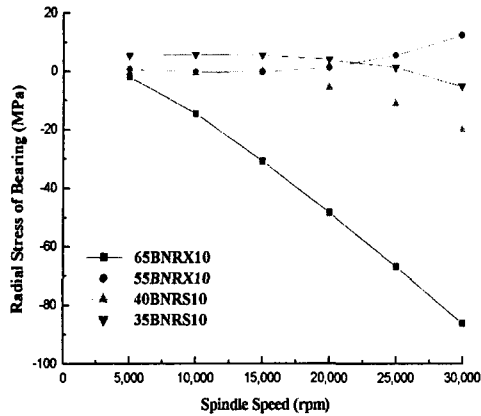


Fig. 10 Effect of spindle speed on radial stress

rpm에서 약 $26\mu\text{m}$ 정도인 것으로 예측되었다.

Fig. 9로부터 주축회전수가 증가할수록 메인 스피ndl들의 전반부 베어링은 반경방향 휨쇄가 증가하지만, 메인 스피ndl들의 후반부 베어링은 감소함을 알 수 있다. 특히 15,000rpm 이상의 주축회전수에서 반경방향 휨쇄가 급격히 감소하는 현상을 보여주고 있는데, 이러한 현상은 메인 스피ndl들의 후반부 베어링의 경우 주축으로의 열방출보다 하우징으로의 열방출이 오히려 적어서 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 메인 스피ndl들의 전반부 베어링의 경우, 외륜의 열용력은 압축응력으로 주축회전수와 선형적 비례관계에 있으며, 특히 고속영역에서는 그 값이 크기 때문에 베어링 예압이 크게 증가될 가능성이 많다. 그러나 후반부 베어링은 고속영역에서 열용력이 인장응력으로 나타났기 때문에 베어링 예압을 저하시킬 것으로 판단된다. 이러한 현상은 베어링의 반경방향 휨쇄에서도 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 오일제트유회환방식의 $\phi 65\text{mm} \times 30,000\text{rpm}$ 급 모터분리형 초고속 HMC 주축계의 열특성을 설계단계에서 해석 및 평가하였다. 그리고 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 초고속 HMC 주축계에서의 온도는 로터에서 가장 높으며, 주축회전수 30,000rpm일 때의 온도상승값은 약 61°C 이다. 또한 동일한 조건에서 스테이터의 온도상승값은 약 33°C 이기 때문에 냉각자켓에 의한 스테이터의 열방출은 효과적이라고 판단된다.
- (2) 주축 선단부의 온도는 구조적인 이유로 메인 스피ndl들의 전반부 베어링과 유사하지만, 약 $0\sim 8^\circ\text{C}$ 정도 낮다.
- (3) 메인 스피ndl들의 후반부 베어링은 구조적으로 열을 방출하기 어려운 위치에 있기 때문에 전반부 베어링보다 온도상승값이 약 $1\sim 11^\circ\text{C}$ 정도 높으며, 이러한 경향은 주축회전수가 높을수록 더욱 두드러진다.
- (4) 주축의 축방향 열변형은 대체적으로 주축회전수와 비례하고 있으며, 서브 스피ndl들의 베어링 위치에서는 주축의 축방향 열변형이 주축회전수 15,000rpm 근처부터 급격히 증가한다.
- (5) 메인 스피ndl들의 전반부 베어링은 주축회전수가 증가할수록 반경방향 휨쇄가 증가하지만, 후반부 베어링은 감소한다. 특히 후반부 베어링의 휨쇄는 15,000rpm 이상의 주축회전수에서 급격히 감소한다.

참고문헌

1. 中村晋哉 外 1人, "豫壓切換スピンドルの性能평가," 日本精密工學會誌, 60/5, 1994.
2. A. Muramatsu, S. Nakamura, H. Yoneyama, and O. Iwasaki, "Heat Conduction Analysis for Motor Integrated Spindle," NSK Technical Journal, No. 658, pp.32-39, 1994.
3. 김석일, 최대봉, 박경호, "공작기계용 고속주축계의 오일에어유회환특성에 관한 연구," 대한기계학회, 제17권 제2호, pp.351-358, 1993.
4. 김석일, 최대봉, 송지복, "공작기계용 고속주축계의 공기냉각특성에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제11권 제1호, pp.123-128, 1994.