

오일제트윤활방식의 25,000rpm급 모터내장형 고속주축계의 윤활특성에 관한 연구

A Study on the Oil-Jet Lubrication Characteristics
of a Motor-Integrated High-Speed Spindle System with $\phi 65\text{mm} \times 25,000\text{rpm}$

이용희, 김석일 (한국항공대학교 기계설계학과), 김태형, 박보선 (대우중공업 공작기계연구소)
Yong-Hee Lee, Seok-Il Kim (Mechanical Design & Engineering Dept., Hankuk Aviation Univ.),
Tae-Hyung Kim, and Bo-Sun Park (Machine Tool Lab., Daewoo Heavy Industries)

Abstract

In this study, a motor-integrated high-speed spindle system with $\phi 65\text{mm} \times 25,000\text{rpm}$ is developed by introducing the oil-jet lubrication method, ceramic angular contact ball bearings, a built-in motor and so on. And oil-jet lubrication experiments for evaluating the system performance are performed under various operation conditions. Especially, in order to establish the oil-jet lubrication conditions related to the development of a high-speed spindle system, the effects of oil supply rate and rotational spindle speed are investigated on the temperature rise, temperature distribution, motor current and so on.

Keyword : 공작기계(Machine Tool), 모터내장형(Motor-Integrated), 고속주축계(High-Speed Spindle System), 오일제트윤활(Oil-Jet Lubrication), 세라믹 앵글러콘택트 볼베어링(Ceramic Angular Contact Ball Bearing), 내장형 모터(Built-In Motor)

1. 서론

최근 공작기계는 다기능화의 개념을 구현할 수 있는 복합가공기능이 많이 요구되고 있다. 이러한 추세에 따라서 공작기계의 핵심 구성요소인 주축계도 저속영역부터 고속영역까지 사용 가능한 형태로 개발될 필요가 높아졌고, 특히 생산능률 향상을 위한 고속화의 필요성이 증대되고 있다.^(1,2,3)

현재 국내외적으로 모터내장형 고속주축계가 많은 주목을 받고 있는데, 그 이유는 구조가 단순하고, 기계적 진동기구(기어, 벨트 등)의 진동문제 및 파손문제가 발생하지 않는 관계로 고속화와 고정밀화에 유리하기 때문이다. 그러나 고속회전시에 발생하는 베어링에서의 발열 외에도 내장형 모터에서의 발열이 주축계의 열변형에 큰 영향을 준다는 문제점을 가지고 있다.

지금까지 알려진 고속주축계의 윤활방법으로는 오일미스트윤활(oil-mist lubrication), 오일에어윤활(oil-air lubrication)⁽⁴⁾, 오일제트윤활^(5,6), 그리고 언더레이스윤활(under-race lubrication) 등을 들 수 있다. 안개화된 미량의 윤활유를 베어링에 공급하는 오일미스트윤활은 공해문제와 불균일한 윤활특성 때

문에 현재는 그다지 많이 사용되지 않는 방법이다. 미량의 윤활유를 연속적인 흐름상태로 베어링에 공급하는 오일에어윤활은 D_mN 값 2,000,000 정도까지의 고속회전이 가능한 방법으로 국내에서도 1980년대 말부터 그 연구가 많이 진행되어 있다. 오일제트윤활은 베어링 측면에서 노즐을 이용하여 다량의 윤활유를 고속분사시키는 방법으로 D_mN 값 3,000,000 정도까지의 고속회전이 가능한 것으로 알려져 있다. 특히 오일제트윤활은 비교적 큰 규모의 윤활장치와 윤활유의 교반작용에 의한 동력손실이 단점으로 지적되고 있지만, 고속/고온 회전상태에서도 신뢰성이 높기 때문에 고속주축계, 제트엔진, 가스터빈 등과 같은 각종 고속회전장치에 폭넓게 사용되고 있다.

본 연구에서는 오일제트윤활방법, 세라믹 앵글러콘택트 볼베어링, 내장형 모터 등을 사용해서 $\phi 65\text{mm} \times 25,000\text{rpm}$ (D_mN 값 2,060,000)의 모터내장형 고속주축계를 개발하였다. 고속주축계의 고강성화를 도모하기 위해서 주축 전반부에 세라믹 앵글러콘택트 볼베어링 4개를 병렬배면조합으로 배치하였고, 주축 후반부에 세라믹 앵글러콘택트 볼베어링 2개를 배면조합으로 배치하였다. 그리고 개발된 모터내장형 고속주축계에 대한 성능을 평가하기 위해서 일련

의 윤활실험을 수행하였으며, 특히 모터내장형 고속 주축계에 대한 오일제트윤활조건을 정립하기 위하여 실험결과를 토대로 공급유량, 주축회전수 등이 주축계의 온도상승, 온도분포, 그리고 모터의 소비전류에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 수평형 머시닝센터용으로 개발한 $\phi 65\text{mm} \times 25,000\text{rpm}$ 의 모터내장형 고속주축계에 대한 제원은 Table 1에 제시하였다.⁽⁷⁾ 그리고 Fig.1은 모터내장형 고속주축계의 오일제트윤활특성을 파악하기 위해서 구성한 실험장치의 계통도를 보여주고 있으며, Fig.2에는 그 실험장치의 모습을 나타내었다. 이 실험장치에서의 주요 구성요소들은 모터내장형 고속주축계와 오일제트윤활장치이다.

모터내장형 고속주축계에는 Fig.1에서 볼 수 있는 바와 같이 주축 전반부에 내경 $\phi 65\text{mm}$ 인 세라믹 앵글러콘택트 볼베어링(65BN) 4개가 병렬배면조합으로 배치되었고, 주축 후반부에 내경 $\phi 55\text{mm}$ 인 세라믹 앵글러콘택트 볼베어링(55BN) 2개가 배면조합으로 배치되었다. 일반적으로 고속주축계는 회전속도를 높이기 위해서 주축 전반부에 2개의 베어링만을 사용하고 있는데, 이러한 방식의 설계는 주축계의 강성 저하를 초래하고, 결과적으로 저속영역에서의 고능률가공을 어렵게 하는 요인으로 작용하고 있다. 본 연구에서는 이러한 기존의 고속주축계가 가지고 있는 단점을 극복하기 위해서 일반적인 머시닝센터용 주축계와 같이 주축 전반부에 4개의 베어링을 사용하는 고강성화 구조를 채택하였다.

또한 베어링의 축방향 고정방법으로는 베어링 예압을 균일하게 부가할 수 있는 스텝슬리브(step-sleeve)에 의한 정위치 예압방법을 적용하였으며, 주축 중앙부에는 최대 회전수와 최대 출력이 각각 25,000rpm과 22kW인 권선전환방식의 내장형 모터를 위치시켰다.

오일제트윤활장치는 Fig.1에서 볼 수 있는 바와 같이 1개의 급유펌프, 5개의 배유펌프, 3개의 유량조절밸브, 오일탱크(oil tank), 오일쿨러(oil cooler) 등으로 구성되어 있다. 그리고 베어링의 윤활상태와 냉각상태가 보다 균일하게 유지되도록 윤활유는 1개의 베어링에 대해서 120° 간격으로 설치한 3개의 노즐(nozzle)을 이용하여 베어링 내륜과 리테이너(retainer) 사이로 분사시키는 방법을 사용하였다. 실험시에 사용한 윤활유는 40°C 에서 점도가 10cSt인 스피indle 오일(spindle oil) #60이며, 베어링으로 공급되는 윤활유의 온도는 대기온도보다 약 2.5°C 정도 낮게 되도록 제어하였다.

Table 1 Specification of spindle system

Item	Specification
Spindle Speed	3,500~25,000rpm
D_mN Value	Max. 2,062,500
Tool	HSK63 (DIN69893)
Built-In Motor	18.5/22kW
Bearing	Front Ceramic Angular Contact Ball Bearing ($\phi 65$, 4EA)
	Rear Ceramic Angular Contact Ball Bearing ($\phi 55$, 2EA)
Lubrication Method	Oil-Jet Lubrication
Bearing Preload	Constant Position
Cooling Method	Oil Cooling Jacket for Motor Housing
Clamping Force	2,000kgf
Runout	$\pm 3 \mu\text{m}$ Below
Position Sensor	Position Coder

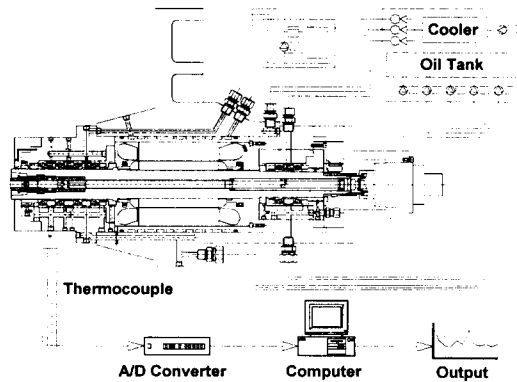


Fig.1 Schematic diagram for oil-jet lubrication testing



Fig.2 Experimental apparatus for oil-jet lubrication testing

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 모터내장형 고속주축계의 오일제트 유회특성을 분석하기 위해서 베어링으로의 공급유량을 2, 3, 4 l/min/Brg로 변화시켰고, 주축회전수는 10,000rpm부터 25,000rpm까지 2,500rpm씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 특히 유회조건에 따른 주축계의 온도변화를 측정하기 위해서 Fig.3과 같이 4개의 열전대(thermocouple)를 90° 간격으로 하우징 선단부에 설치하였으며, 주축회전시의 소모동력을 추정하기 위해서 모터의 소비전류를 측정하였다.

Fig.4는 모터내장형 고속주축계의 온도상승이 정상상태에 도달하는 데 소요되는 시간을 평가하기 위해서 수행한 실험결과를 보여주고 있다. 이 때의 공급유량은 4 l/min/Brg이고, 주축회전수는 25,000rpm이었다. 실험결과로부터 주축계의 온도는 주축회전시킨 후 약 15분 정도가 경과하면 정상상태에 도달한다는 사실을 보여주고 있다. 이러한 결과는 주축회전수가 다른 실험에서도 거의 동일한 것으로 확인되었다. 이와 같이 주축계의 온도상승에 대한 세틀링타임(settling time)이 비교적 짧은 이유는 베어링으로 공급되는 유회유의 온도가 일정하게 제어되는 오일제트유회방법을 적용하였기 때문인 것으로 판단된다.

또한 열전대의 부착위치에 따라서 온도상승값이 최대 8.3°C 정도의 차이를 보이고 있는데, 이러한 현상은 유회유의 공급노즐 주위에서는 온도가 낮고, 유회유의 배출구멍 주위에서는 온도가 높다는 점에 기인한 것이다. 따라서 주축계의 열변형 측면에서 보면 오일제트유회방법을 적용하는 경우에도 주축계의 온도상승이 모든 부위에서 균일하게 되도록 베어링 하우징의 냉각장치를 설치할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig.5, 6, 7에는 베어링으로의 공급유량이 각각 2,

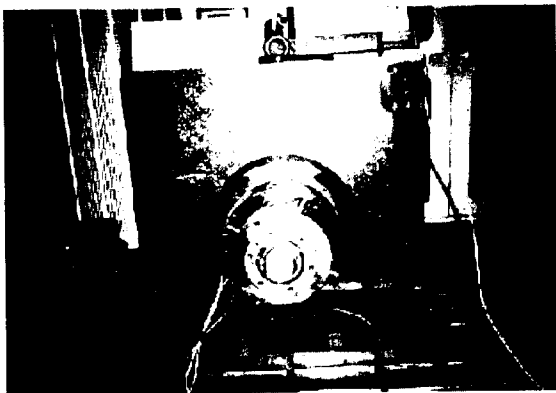


Fig.3 Setup of thermocouples

3, 4 l/min/Brg인 경우에 대한 주축계의 온도상승값들을 제시하였다. 이 실험에서는 정상상태에 도달한 주축계의 최대 온도상승값이 대기온도에 대해서 +26.5°C인 온도를 그 한계값으로 설정하였다. 주축계의 온도상승에 대한 한계값을 초과하지 않는 공급유량별 최대 주축회전수는 공급유량이 2 l/min/Brg인

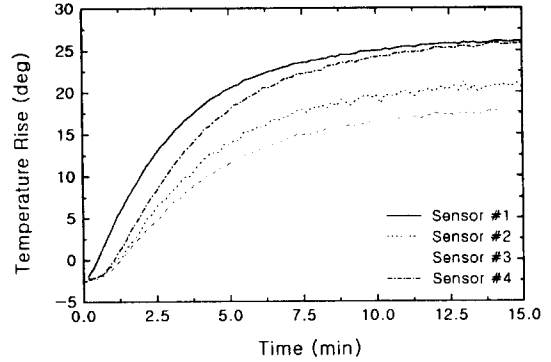


Fig.4 Temperature rise of spindle system (25,000rpm, 4 l/min/Brg)

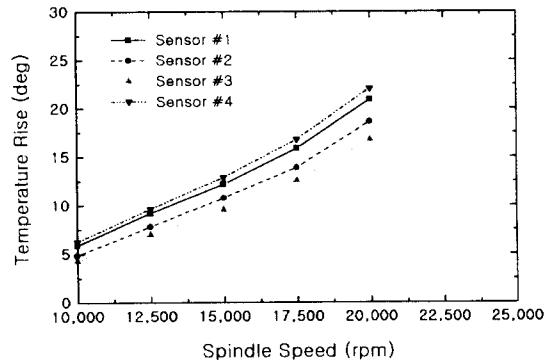


Fig.5 Temperature rise of spindle system (2 l/min/Brg)

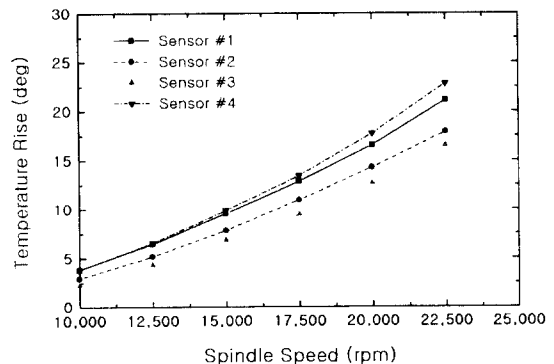


Fig.6 Temperature rise of spindle system (3 l/min/Brg)

경우에는 20,000rpm, 공급유량이 3 l/min/Brg인 경우에는 22,500rpm, 공급유량이 4 l/min/Brg인 경우에는 25,000rpm인 것으로 확인되었다. 따라서 주축계의 온도상승에 대한 한계값이 대기온도에 대해서 +26.5℃이고, 별도로 베어링 하우징을 생각하지 않는다면 현재 제작된 고속주축계로 25,000rpm의 주축회전수를 얻기 위해서 요구되는 공급유량은 약 4 l/min/Brg인 것으로 판단된다.

그리고 베어링으로의 공급유량이 증가할수록 윤활유에 의한 부위별 냉각효과의 차이도 증대되기 때문에 측정부위별 주축계의 온도상승 차이도 커짐을 실험결과로부터 알 수 있다.

Fig.8은 공급유량과 주축회전수가 모터내장형 고속주축계의 온도상승에 미치는 영향을 보여주고 있다. 온도상승에 대한 기울기는 약 17,500rpm 전후의 주축회전수를 경계로 두드러진 변화가 나타나는데, 특히 고속영역에서의 온도상승의 증가율이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 앵글러콘택트 볼베어링이 고속회전할수록 증가하는 베어링 볼의 자이로스코픽모멘트(gyroscopic moment)가 베어링 볼의 마

찰모멘트보다 큰 경우에 발생하는 베어링 볼의 미끄럼운동에 의해서 베어링에서의 발열이 증대된 결과라고 추정된다. 따라서 본 연구에서 개발한 모터내장형 고속주축계는 약 17,500rpm 정도의 주축회전수에서 자이로스코픽모멘트에 의한 베어링 볼의 미끄럼운동이 발생하기 시작하는 것으로 보여진다.

또한 제시된 측정결과로부터 베어링으로의 공급유량이 증가할수록 주축계의 온도상승값은 낮아지는 것을 알 수 있는데, 이는 공급유량에 비례하는 베어링의 냉각효과에 기인한 것이다.

Fig.9에는 공급유량과 주축회전수가 오일탱크내의 윤활유 온도에 미치는 영향을 제시하였다. 오일탱크내의 윤활유 온도는 대기온도보다 약 2.5℃ 정도 낮도록 제어하였지만, 주축회전수가 증가할수록 오일탱크내의 윤활유 온도도 전반적으로 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 오일쿨러의 냉각성능과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다.

Fig.10은 무부하상태에서 모터내장형 고속주축계를 운전시키기 위해서 필요한 모터의 소비전류를 보여주고 있다. 베어링으로의 공급유량이 증가할수록

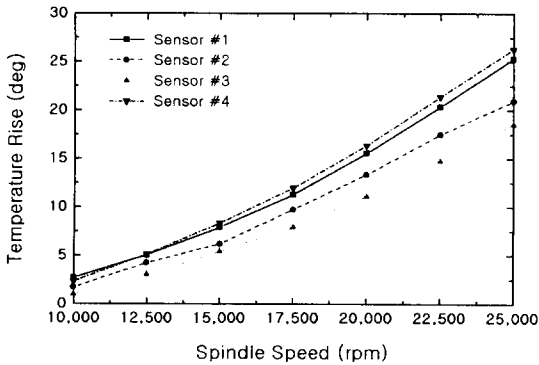


Fig.7 Temperature rise of spindle system (4 l/min/Brg)

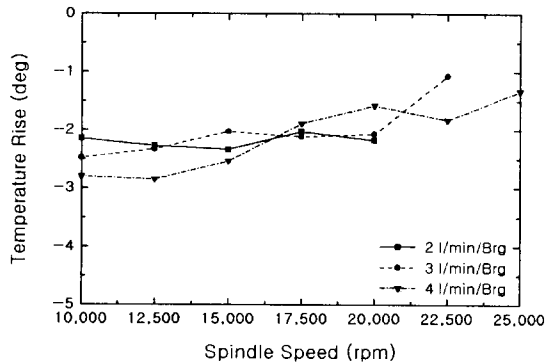


Fig.9 Temperature rise of oil tank

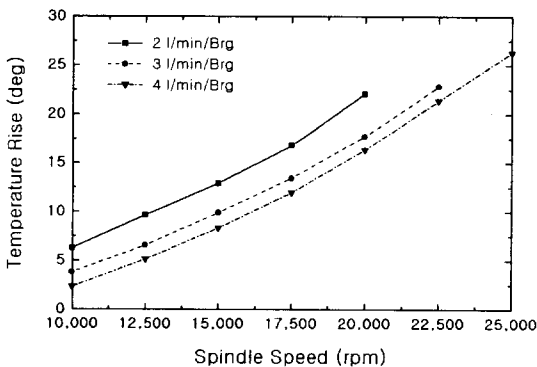


Fig.8 Temperature rise of spindle system (Sensor #1)

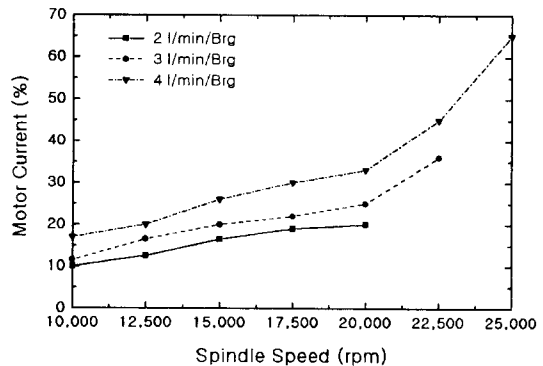


Fig.10 Motor current

모터의 소비전류는 높아지고 있는데, 이러한 사실은 윤활유의 교반작용과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 특히 베어링으로의 공급유량에 관계없이 주축회전수가 약 20,000rpm 이상인 영역에서는 모터의 소비전류가 급증하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 앞서도 언급한 베어링 볼의 자이로스코픽모멘트에 의한 미끄럼운동과 매우 밀접한 관계가 있을 것으로 추정된다.

궁극적으로 모터의 소모동력을 낮추기 위해서는 베어링으로의 공급유량을 작게 설정하는 것이 바람직하지만, 현재 상태와 같이 베어링 하우징을 별도로 생각하지 않는다면 25,000rpm의 주축회전수를 얻기 위해서는 베어링으로의 공급유량을 4ℓ/min/Brg 이상으로 설정해야 하고, 아울러서 주축 자체의 회전에 약 65% 정도의 동력을 소모해야 할 것으로 추정된다.

4. 결론

본 연구에서는 오일제트윤활방법, 세라믹 앵귤러 콘택트 볼베어링, 내장형 모터 등을 사용해서 $\phi 65\text{mm} \times 25,000\text{rpm}$ 의 모터내장형 고속주축계를 개발하였다. 특히 고속주축계의 고강성화를 도모하기 위해서 주축 전반부에 세라믹 앵귤러콘택트 볼베어링(65BN) 4개를 병렬배면조합으로 배치하는 구조를 채택하였으며, 모터내장형 고속주축계에 대한 오일제트윤활조건을 정립하기 위하여 공급유량, 주축회전수 등이 주축계의 온도상승, 온도분포, 그리고 모터의 소비전류에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 통해서 얻은 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- ① 오일제트윤활방법을 적용한 고속주축계는 베어링으로 공급되는 윤활유의 온도가 일정하게 제어되기 때문에 주축계의 온도상승에 대한 세틀링 타임이 약 15분 정도로 비교적 짧다.
- ② 세라믹 앵귤러콘택트 볼베어링(65BN)을 정위치 예압상태로 설치한 고속주축계는 약 17,500rpm 이상의 주축회전수에서 자이로스코픽모멘트에 의한 베어링 볼의 미끄럼운동이 발생하고, 그 결과로 베어링에서의 발열이 증대된다.
- ③ 베어링으로의 공급유량이 증가할수록 윤활유의 교반작용 때문에 모터의 소비전류는 증가한다. 특히 베어링 볼의 자이로스코픽모멘트에 의한 미끄럼운동이 발생하는 주축회전수 영역에서는 모터의 소비전류가 급증한다.
- ④ 세라믹 앵귤러콘택트 볼베어링(65BN) 4개를 병렬배면조합한 고속주축계로 25,000 rpm의 주축회전수를 얻기 위해서는 약 4ℓ/min/Brg 정도의

공급유량이 필요하다. 그리고 이러한 조건에서는 주축 자체의 회전에 약 65% 정도의 동력을 소모한다.

참고문헌

1. 澤本毅, 正田義雄, “工作機械主軸用ころがり軸受の高速化”, 應用機械工學, 1月號, 1986, pp.78-84
2. 森脇俊道, “工作機械の高速化技術の現状”, 日本精密工學會誌, 第53卷, 第7號, 1987, pp.1001-1004
3. 김석일 외, “최신 공작기계 설계기술”, 반도출판사, 1995
4. 김석일, 최대봉, 박경호, “공작기계용 고속주축계의 오일여유윤활특성에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집, 제17권 2호, 1993, pp.351~358
5. 宮川行雄, 關勝美, 横山正辛: 高 dn 値における玉軸受の性能に關する研究(第1-3報), 潤滑, 第17卷, 第10號, 1972, pp.622-653
6. 宮川行雄, 關勝美, 横山正辛: 高 dn 値における玉軸受の性能に關する研究(第4-5報), 潤滑, 第17卷, 第12號, 1972, pp.831-839
7. 이재운, 김태형, 김석일 외, “머시닝센터용 고속주축 개발에 관한 연구(I)”, 통상산업부 연구보고서, 1996