

공작기계용 고속주축계의 공기냉각특성에 관한 연구

최 대 봉*, 김 석 일**, 송 지 복***

Air Cooling Characteristics of a High Speed Spindle System for Machine Tools

Dae-Bong Choi*, Suk-Il Kim**, Ji-Bok Song ***

ABSTRACT

A high speed spindle system for machine tools can be used to reduce the machining time, to improve the machining accuracy, to perform the machining of light metals and hard materials, and to unite the cutting and grinding processes. In this study, a high speed spindle system is developed by applying the oil-air lubrication method, angular contact ball bearings, injection nozzles with dual orifices, cooling jacket and so on. And an air cooling experiment for evaluating the performance of the spindle system is carried out. Especially, in order to establish the air cooling conditions related to the development of a high speed spindle system, the effects of cooling air pressure, oil supply rate, air supply rate and rotational spindle speed are studied and discussed on the bearing temperature rise and frictional torque. Also the effects of cooling air pressure, rotational spindle speed and spindle system structure is investigated on the bearing temperature distribution. The experiment on the test model reveals the usefulness of the air cooling method.

Key Words : 공작기계 (Machine Tool), 고속주축계 (High Speed Spindle System), 오일에어윤활 (Oil-Air Lubrication), 공기냉각특성 (Air Cooling Characteristics), 냉각자켓 (Cooling Jacket), 이중 분사노즐 (Injection Nozzle with Dual Orifices), 앵글러콘택트 볼베어링 (Angular Contact Ball Bearing)

1. 서 론

최근 생산성과 가공정밀도의 향상, 경합금과 난삭재의 고능률절삭, 그리고 절삭과 연삭의 복합화 등을 구현하기 위한 노력의 결과로서, 머시닝센터를 중심으로 한 공작기계 주축계의 고속화는 눈부시게 발전하고 있다(1-

3). 이와 같이 주축계가 고속화될 수록 증가하는 베어링에서의 발열은 베어링의 수명단축, 주축계의 열변형 증대 등을 초래하고, 궁극적으로 공작기계의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 고속으로 회전하는 베어링에서의 발열을 효과적으로 억제할 수 있는 윤활방법에 대한 연구들(4-11)이 활발히 진행되고 있다.

* 한국기계연구원 공작기계연구실
 ** 한국항공대학교 기계설계공학과
 *** 부산대학교 정밀기계공학과

그러나 아무리 우수한 윤활방법을 사용하더라도 고속 회전에 따른 베어링 내부에서의 발열을 완전하게 억제한다는 것은 불가능하다. 특히 그리이스윤활, 오일미스트윤활, 오일에어윤활 등과 같은 미량급유윤활방법은 윤활기구 자체의 냉각작용이 작기 때문에, 미량급유윤활방법을 사용하는 고속주축계에서는 보조적인 냉각기구를 사용할 필요가 있게 된다. 지금까지 발표된 주축계의 고속화에 대한 연구들은 대부분 윤활특성과 관련된 것으로, 냉각특성에 대한 구체적인 연구결과는 찾아보기 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는, 오일에어윤활방법을 사용하고 있는 공작기계용 고속주축계의 냉각특성을 규명하기 위한 노력의 하나로, 압축공기를 냉매로 이용한 고속주축계의 공기냉각실험을 수행하였다. 특히 냉매(압축공기) 압력, 공급유량, 공급공기량, 주축회전수 등이 베어링의 온도상승, 베어링의 온도분포, 그리고 고속주축계의 마찰토크에 미치는 영향을 해석하였으며, 고속주축계의 구조적 특성이 베어링의 온도분포에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 본 연구에서 적용한 공기냉각방법의 유용성은 고속주축계의 실험모델에 대한 일련의 실험결과들로 부터 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 오일에어윤활방법이 적용된 고속주축계의 실험모델을 보여주고 있다. 고속주축계의 전반부 베어링과 후반부 베어링으로는 앵글러콘택트 볼베어링인 B71916C와 B71914C를 2개씩 사용하였으며, 스텝슬리브에 의한 정위치 예압방법을 이용해서 베어링을 주축에 고정하였다. 또한 베어링들은 T-O-T배열을 하고 있고, 경예압용으로 제작된 베어링을 사용하고 있기 때문에, 베어링 예압은 약 440N 정도이다(12). 오일에어윤활에 관한 윤활유로는 40℃에서 점도가 10cSt는 스피들오일 #60을, 그리고 윤활유와 압축공기를 베어링에 공급하는 배관으로는 내경과 길이가 각각 2mm와 4m인 나이론튜브를 이용하였다. 특히 윤활유와 압축공기의 베어링 관통률을 향상 시키기 위해서 Fig. 2에서 볼 수 있는 이중분사노즐을 사용하였다(11). 또한 하우징부분에 설치한 냉각자켓에 냉매(압축공기)를 공급함으로써 고속주축계를 강제냉각시켰다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 구성된 실험장치를 이용하여 고속주축계의 공기냉각특성을 실험적으로 해석하였

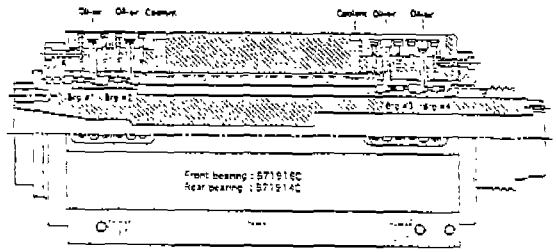


Fig. 1 Test model of high-speed spindle system

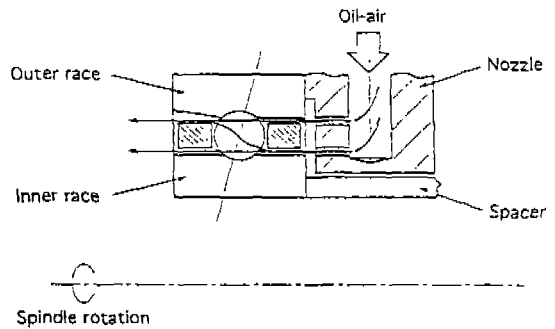


Fig. 2 Configuration of nozzle with dual orifices

다. 베어링의 온도분포는 30° 간격으로 베어링 외륜에 설치한 12개의 C-C형 열전대들을 이용해서 측정하였고, 회전하는 고속주축계의 마찰토크를 측정하기 위해서 AC스핀들모터와 고속주축계 사이에 토크미터를 설치하였다. 베어링에 공급되는 압축공기의 양(공급공기량)은 오일에어윤활장치에서 측정하였으며, 냉각자켓을 통

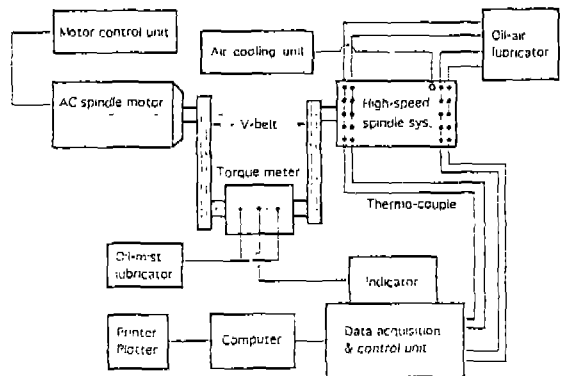


Fig. 3 Experimental setup

과하는 냉매(압축공기)의 압력은 냉각자켓 입구에서 측정하였다. 또한 실험에서 사용된 압축공기는 온도제어를 별도로 하지 않았지만, 분사시점에서의 온도가 주변온도보다 약 8~9°C 정도 낮은 것으로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

표현상의 편의를 위하여 Fig. 4~11에 대한 내용설명에서는 주축회전수를 N , 공급유량을 V_o , 공급공기량을 V_a , 그리고 냉매(압축공기) 압력을 P_a 로 각각 나타내었다. 또한 오일에어윤활조건으로 주어지는 공급유량과 공급공기량은 베어링 하나에 대한 값들을 의미한다.

3.1 공급공기량의 영향

Fig. 4는 주축회전수가 6,000rpm, 공급유량이 0.053cc/h, 냉매(압축공기) 압력이 0.4MPa일 때, 오일에어윤활에서의 공급공기량이 베어링의 온도상승과 고속주축계의 마찰토크에 미치는 영향을 보여주고 있다.

공급공기량이 12ℓ/min에서 30ℓ/min로 증가함에 따라서 온도상승값이 전반부 베어링은 2.9°C, 후반부 베어링은 2.4°C 정도 낮게 측정되었다. 이를 공급공기량이 12ℓ/min인 경우와 비교하면, 베어링의 온도상승은 전반부 베어링이 21%, 후반부 베어링이 24% 정도 낮아진 것이다. 이 결과로부터 공급공기량은 윤활유의 베어링 관통률(III)과 베어링의 냉각효과에 큰 영향을 주고 있다는 사실을 알 수 있다. 그러나 공급공기량이 24ℓ/min 이상인 경우에는 그 영향이 작게 나타나고 있다.

또한 고속주축계의 마찰토크는 공급공기량이 증가할

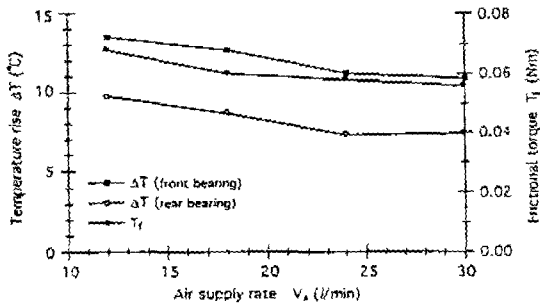


Fig. 4 Effect of air supply rate on the temperature rise of bearings and frictional torque of spindle system for $V_o=0.053\text{cc/h}$, $P_a=0.4\text{MPa}$ and $N=6,000\text{rpm}$

수록 감소하고 있는데, 이 현상은 공급공기량의 증가에 의해서 윤활유의 베어링 관통률이 향상되기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다.

3.2 냉매(압축공기)압력의 영향

주축회전수가 6,000rpm, 공급유량이 0.053cc/h, 공급공기량이 24ℓ/min일 때, 냉각자켓에 공급되는 냉매(압축공기)의 압력이 베어링의 온도상승과 고속주축계의 마찰토크에 미치는 영향은 Fig. 5에 표시하였다.

냉매의 압력이 0MPa에서 0.5MPa로 증가함에 따라서 온도상승값이 전반부 베어링은 2.6°C, 후반부 베어링은 5.4°C 정도 낮게 측정되었다. 이 값들은 고속주축계를 냉각하지 않았을 때, 즉 냉매의 압력이 0MPa일 때의 온도상승값보다 전반부 베어링이 19%, 후반부 베어링이 43% 정도 낮은 것이다. 이 결과는 냉매의 압력이 증가할수록 냉각자켓을 통과하는 냉매의 유량도 증대되기 때문에 냉각효과가 향상된다는 점을 보여주고 있다. 그러나 냉매의 압력이 0.4MPa 이상이 되면, 그 효과가 작아지고 있다.

또한 위의 실험조건에서는 고속주축계를 냉각한 경우의 마찰토크가 냉각하지 않은 경우보다 더 크게 측정되었으며, 특히 고속주축계를 냉각한 경우에는 냉매의 압력과 관계없이 마찰토크가 거의 일정한 것으로 나타났다.

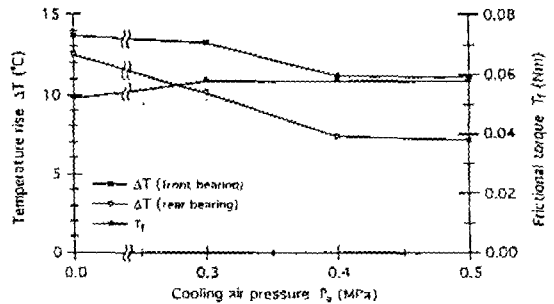


Fig. 5 Effect of cooling air pressure on the temperature rise of bearings and frictional torque of spindle system for $V_o=0.053\text{cc/h}$, $V_a=24\text{l/min}$ and $N=6,000\text{rpm}$

3.3 공급유량의 영향

Fig. 6과 7에는 주축회전수가 6,000rpm과 10,000rpm인 경우들에 대해서 공급유량이 베어링의 온도상승에

미치는 영향을 나타내었다. 고속주축계를 냉각하지 않은 경우에는 베어링의 온도상승이 공급유량 0.053cc/h부터 급격히 증가하고 있지만, 고속주축계를 냉각한 경우에는 공급유량 0.105cc/h부터 완만히 증가하고 있다. 이러한 사실은 베어링에서의 발열을 억제하는 최적공급유량의 영역이 고속주축계의 냉각에 의해서 확대되고 있다는 것을 의미한다. 또한 베어링의 온도상승에 대한 고속주축계의 냉각효과는 전반부 베어링보다 크기가 작은 후반부 베어링에서, 그리고 주축회전수가 높을 수록 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 특히 주축회전수와 공급유량이 10,000rpm과 0.053cc/h일 때, 고속주축계의 냉각효과에 의해서 온도상승이 전반부 베어링은 5.7℃, 후반부 베어링은 10.6℃ 정도 낮아지고 있다. 이 값들

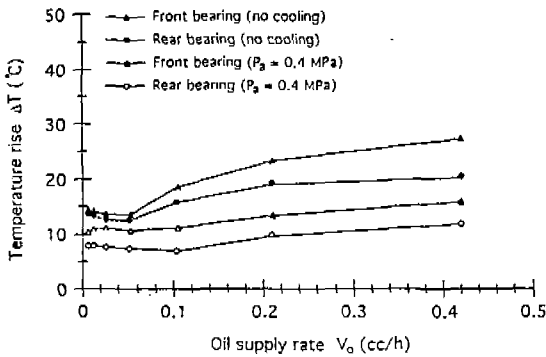


Fig. 6 Effect of oil supply rate on the temperature rise of bearings for $V_a=24\ell/\text{min}$ and $N=6,000\text{rpm}$

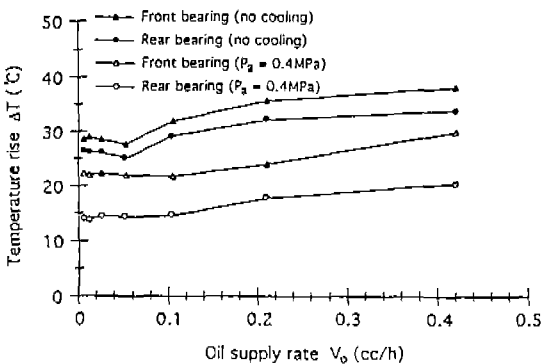


Fig. 7 Effect of oil supply rate on the temperature rise of bearings for $V_a=24\ell/\text{min}$ and $N=10,000\text{rpm}$

은 고속주축계를 냉각하지 않았을 때의 온도상승값보다 전반부 베어링이 20%, 후반부 베어링이 42% 정도 낮아진 것이다.

또한 고속주축계의 마찰토크에 대한 공급유량의 영향은 Fig. 8에 나타내었다. 주축회전수가 10,000rpm일 때에는 공급유량에 관계없이 고속주축계를 냉각한 경우가 마찰토크가 작았지만, 주축회전수가 6,000rpm일 때에는 공급유량 0.105cc/h 이상에서만 고속주축계를 냉각한 경우가 마찰토크가 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 주축회전수가 높거나, 공급유량이 많은 경우에는 고속주축계의 냉각에 의해서 마찰토크가 감소될 수 있음을 알 수 있다.

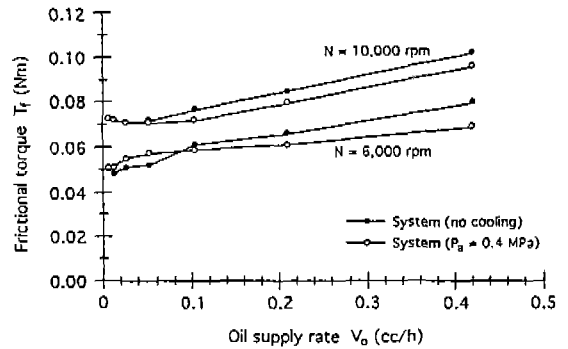


Fig. 8 Effect of oil supply rate on the frictional torque of spindle system for $V_a=24\ell/\text{min}$

3.4 주축회전수의 영향

주축회전수가 베어링의 온도상승과 고속주축계의 마찰토크에 미치는 영향은 Fig. 9에서 볼 수 있다.

6,000rpm 이상의 주축회전수 영역에서는 베어링의 온도상승이 보다 급격한 것으로 나타나고 있는데, 이 현상은 고속회전할 때 나타나는 베어링의 볼의 자이로스 코픽 미끄럼에 의해서 베어링에서의 발열이 증대된 결과라고 판단된다⁽¹¹⁾. 또한 실험결과로부터 베어링의 온도상승에 대한 고속주축계의 냉각효과는 전반부 베어링보다 후반부 베어링에서, 그리고 주축회전수가 높을 수록 크게 나타나고 있다는 앞서의 결과를 다시 확인할 수 있다.

고속주축계의 마찰토크는 베어링의 온도상승과 같이 주축회전수와 선형적인 관계에 있으며, 고속주축계의 냉각에 의해서 마찰토크에 대한 주축회전수의 영향이 다소 감소되고 있음을 알 수 있다. 특히 주축회전수

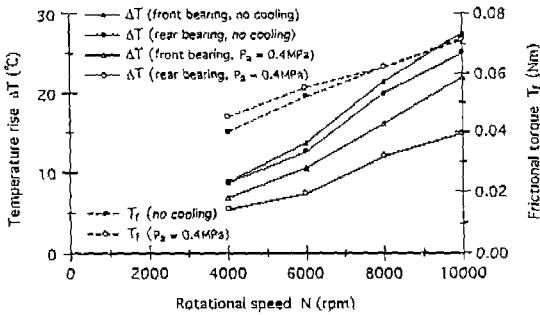


Fig. 9 Effect of rotational speed on the temperature rise of bearings and frictional torque of spindle system for $V_o=0.053\text{cc/h}$ and $V_a=24\ell/\text{min}$

8,000rpm 이하에서는 고속주축계를 냉각하지 않은 경우가, 그리고 8,000rpm 이상에서는 고속주축계를 냉각한 경우가 마찰토크가 작은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 주축회전수가 높은 경우에 고속주축계를 냉각하게 되면 마찰토크가 감소된다는 앞서의 결과와 일치하는 것이다.

3.5 베어링의 온도분포

Fig. 10과 11에는 전반부 베어링과 후반부 베어링의 온도상승분포를 표시하였다. 두 경우 모두 베어링의 온도는 분사노즐의 우측 부분이 좌측 부분보다 더 높게 나타나고 있다. 이러한 현상은 분사초기의 윤활유의 교반저항에 의한 국부적인 온도상승효과, 분사노즐의 반대방향에 위치한 하우징과 베드의 접촉면에서의 열전도효과, 그리고 분사노즐로부터 윤활유와 함께 공급되는 압축공기에 의한 베어링의 냉각효과 등에 기인하는 것으로 판단된다(11). 특히 주축회전수가 10,000rpm일 때 고속주축계를 냉각하지 않은 상태에서 측정된 베어링의 최대온도차는 전반부 베어링이 약 5.2°C, 후반부 베어링이 약 4.2°C 정도로 나타났으며, 냉각한 상태에서 측정된 베어링의 최대온도차는 전반부 베어링이 약 4.8°C, 후반부 베어링이 약 4.3°C 정도로 나타났다. 이러한 사실로부터 고속주축계의 냉각은 베어링의 온도상승을 전체적으로 낮추고 있지만, 그 온도분포 자체에 대해서는 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 베어링의 온도분포형태는 베어링 원주상에서의 분사노즐 위치와 고속주축계의 구조적 특성에 의해서 큰 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

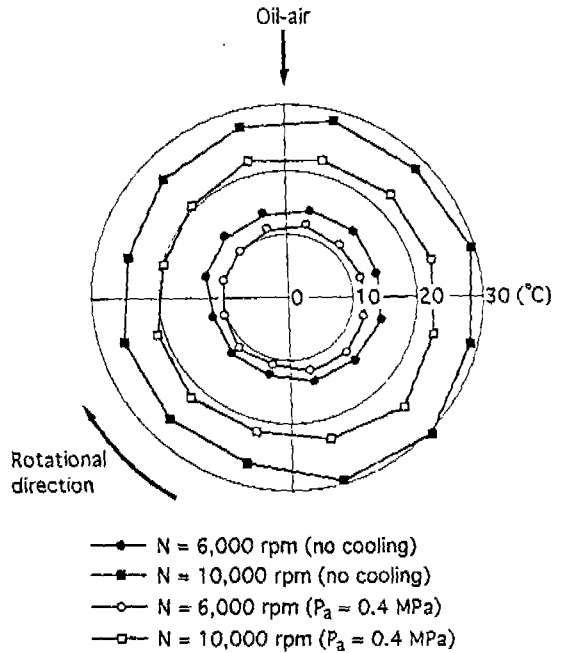


Fig. 10 Temperature rise distribution of front bearing for $V_o=0.053\text{cc/h}$ and $V_a=24\ell/\text{min}$

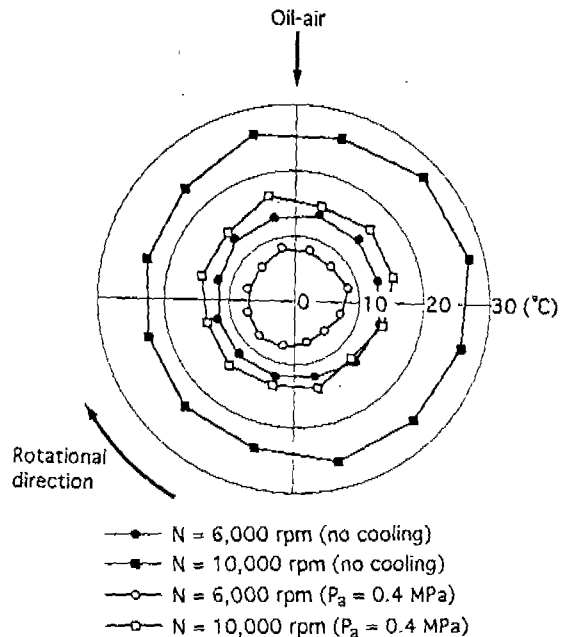


Fig. 11 Temperature rise distribution of rear bearing for $V_o=0.053\text{cc/h}$ and $V_a=24\ell/\text{min}$

4. 결 론

본 연구에서는 오일에어윤활방법을 적용한 고속주축계의 공기냉각특성을 실험적으로 해석하였다. 고속주축계의 냉각실험은 하우징에 설치된 냉각자켓에 냉매인 압축공기를 통과시킴으로써 수행하였으며, 특히 일련의 실험 결과들은 고속주축계에 대한 공기냉각방법의 유용성과 함께, 다음과 같은 사실들을 보여주었다.

- (1) 오일에어윤활에서 공급공기량이 증가하면, 베어링의 온도상승과 고속주축계의 마찰토크가 작아진다.
- (2) 고속주축계를 냉각하면, 베어링의 온도상승이 작아지고, 최적공급유량의 영역이 확대된다. 특히 베어링의 온도상승에 대한 고속주축계의 냉각효과는 베어링의 크기가 작을 수록, 그리고 주축회전수가 높을수록 크게 나타난다.
- (3) 주축회전수가 높거나, 공급유량이 많을 때, 고속주축계를 냉각하면 마찰토크가 감소된다.
- (4) 베어링의 온도분포형태는 고속주축계의 냉각효과에 의한 영향을 거의 받지 않는다.

후 기

본 연구논문은 한국기계연구원 공작기계실에서 수행하는 첨단요소연구개발사업 「머시닝센터용 초고속 주축유니트 개발」에 대한 연구결과의 일부를 토대로 작성한 것임을 밝힌다.

참고문헌

1. 近藤英夫, “マシニングセンターオイルとエア潤滑, 高周波モータで高速高精度をはかる”, 應用機械工學, 8月號, 1985, 76~81
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, 1001~1004
3. 中澤弘 外 16人, “工作機械の最先端技術”, ㈱工業調査會, 1988
4. 小野瀬喜章, 工作機械主軸の高速化に對應した軸受とオイルエア潤滑の効果”, 應用機械工學, 2月號, 1985, 159~164
5. 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, 78~84
6. 正田義雄, 小野瀬喜章, “オイルエア潤滑による工作機械主軸の高速化”, 潤滑, 第32卷, 第3號, 1987, 175~178
7. 中川淨, 青山藤詞郎, 稻崎一郎, 清水哲, “工作機械用高速主軸のオイルエア潤滑特性”, 日本機械學會論文集, C編, 53卷, 485號, 1987, 144~150
8. 宮原忠干, “軸受のオイルエア潤滑”, ベアリングエンジニア, 第53號, 1987, 36
9. S. Tsutsui, T. Aoyama and I. Inasaki, “Development of a Spindle System with an Adjustable Preload Mechanism using a Piezoelectric Actuator”, JSME Int. J., Series III, Vol. 31, No. 3, 1988, 593~597
10. T. Aoyama, I. Inasaki, S. Tsutsui and T. Shimizu, “Development of an Oil-Air Lubrication System with a Piezoelectric Nozzle for Machine Tool Spindles”, JSME Int. J., Series III, Vol. 32, No. 2, 1989, 259~263
11. 김석일, 최대봉, 박경호, “공작기계용 고속주축계의 오일에어윤활특성에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집, 제17권, 제2호, 1993, 351~358
12. “FAG 공작기계용 스피들 베어링”, FAG Catalogue WL41119/4KA