

모터내장형 주축의 냉각특성에 관한 연구

송영찬 · 이득우* · 최대봉** · 김수태***

창원대학교 대학원, *부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소
한국기계연구원 공작기계그룹 *창원대학교 기계공학과

Study on the Cooling Effect of Motor Integrated Spindle

Young-Chan Song, Deug-Woo Lee*, Dae-Bong Choi** and Soo-Tae Kim***

Department of Mechanical Engineering Graduate School, Changwon National University,
*Engineering Research Center for Net shape & Die Manufacturing, Pusan National University

**Mechine Tools Research Group, Korea Institute of Mechnery & Metals

***Department of Mechanical Engineering, Changwon National University

Abstract – Generally, A motor integrated spindle is selected to perform the high speed machining, to improve the machining flexibility, and to simplify the structure of machine tools. The thermal deformation caused by heat generation of the integrated motor is, however, serious problem in motor integrated spindle system. In this study, cooling characteristics for the several kinds of cooling systems (such as, oil-jacket cooling, air cooling) are investigated and more efficient cooling method is presented. The results show that the shaft cooling by the air cooling system is effective to improve the thermal characteristic of motor integrated spindle.

Key word – motor integrated spindle, machine tool, oil-jacket cooling, air cooling.

1. 서 론

최근 산업이 급속하게 발달함에 따라 제품의 생산성 및 품질 향상을 위하여, 공작기계에 대한 연구는 고정밀화 기술에 관한 연구와 함께 고속화 기술에 대한 연구가 머시닝센터를 중심으로 활발히 진행되고 있다[1, 2, 3]. 공작기계의 고속화에 적합한 주축시스템으로는 모터내장형 주축이 많이 응용되고 있으며, 앞으로 더욱 수요가 증대될 것이 예상되어 독일, 일본 등의 선진국에서도 활발히 연구개발이 이루어지고 있다.

모터내장형 주축은 구조가 간단하고 일반공작기계에서 문제가 되는 외부 구동에 따른 벨트 및 풀리 등에 의한 진동 및 마찰손실 등에 잇점이 있으므로 정밀 및 고속특성에 유리하다. 또한 주축유닛트가 운동하는 구조에 적합하여 유연성을 추구하는 공작기계에 사용할 수 있으며, 권선절환방식이 채용됨에 따라 저속에서 고속으로의 사용이 용이하게 되어 활용폭도 매우 넓게

되었다. 그러나 모터내장형 주축의 가장 큰 문제점은 모터에서 발생하는 열에 의한 열변형, 열손상 및 고속화에 따른 베어링의 이상발열, 예하중의 증대에 의한 베어링의 소착발생 등의 열관련 문제이다[4]. 따라서 모터내장형 주축에 관한 연구로는 이러한 문제점을 해결을 위한 냉각시스템이 주요과제로 되고 있다.

모터내장형 주축계의 발열문제의 해결을 위해서는 효율적인 냉각방법의 채택이 필수적이며, 이에 관하여 여러 가지의 냉각방법들이 검토되고 있다[5, 6, 7]. 모터하우징에 냉각자켓을 설치하여 공냉 또는 유냉으로 강제냉각하는 방법이 설치가 간단하고 가격이 저렴하여 일반적으로 채택되는 냉각방법이다[5]. 이 방식은 설치가 간단하지만 외륜측만을 냉각하기 때문에 베어링 내·외륜의 온도구배가 생겨 베어링 내부하중 증가에 따른 고속회전에 문제가 발생할 수도 있다. 따라서 축과 하우징과의 온도차이를 최대한 제어할 목적으로 최근에는 축에 냉각자켓, 냉각핀 또는 히트파

이프(Heat Pipe)를 직접 설치하는 방법과 펠티어효과(Peltier Effect)를 이용한 전자냉각방법[7] 등이 연구되고 있다.

본 연구에서는 모터발열을 억제하기 위한 냉각방법으로 자켓유 냉각방식을 채택하여 모터부에 자켓을 설치·운전함으로써 모터내장형 주축에 대한 자켓유 냉각방식의 냉각특성을 알아보고, 또한 모터부의 자켓유 냉각과 함께 몇 가지 방법으로 압축공기 냉각을 추가하였을 때의 냉각특성을 고찰하여 보다 효율적인 냉각방법을 제시하고자 한다.

2. 실험장치

고속 모터내장형 주축의 냉각특성을 해석하고자

DmN값이 100만인 시험주축을 실험장치로 구성하였으며 Fig. 1과 같다.

실험에 사용한 모터내장형 주축의 제원은 Table 1에 제시하였다. 이 주축에 사용된 모터는 저속에서부터 고속까지 출력이 가능하도록 권선절환 방식을 채택하고 있고, 베어링은 반경방향 강성 및 축방향 강성이 우수하면서 고속회전이 가능한 접촉각 15°인 고속용 정밀 앵글러콘택트 볼베어링을 사용하였다. 베어링의 윤활방식은 압축공기에 극히 미량의 윤활유를 분사시켜 베어링에 공급함으로써 베어링의 발열이 비교적 적은 오일-에어윤활 방식을 채택하였으며, 공급 오일유량은 0.265 cc/hr로 하였다. 주축계의 냉각방식은 자켓유 냉각방식을 채택하였으며 자켓에 공급되는 오일은 10 cSt (40°C)의 오일을 사용하여 2160 ml/min를

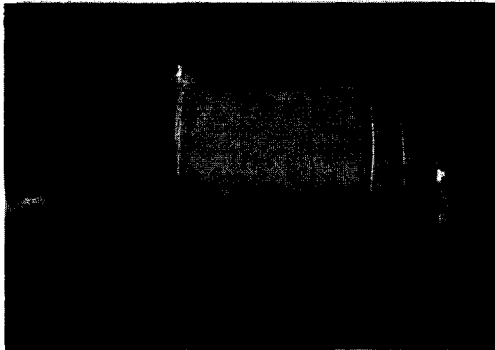


Fig. 1. Test model of motor integrated spindle.

Table 1. The specification of motor integrated spindle

항 목		내 용
목표 DmN 값		100만
축	직 경	80 mm
	전 장	723 mm
모터출력	최대 회전수	10000 rpm
	연속정격	15 kW
	단시간정격	18.5 kW (30분)
베 어 링	내 경	80 mm (전반부), 65 mm (후반부)
	배열방법	병렬 배면조합
	정압압량	74 kgf

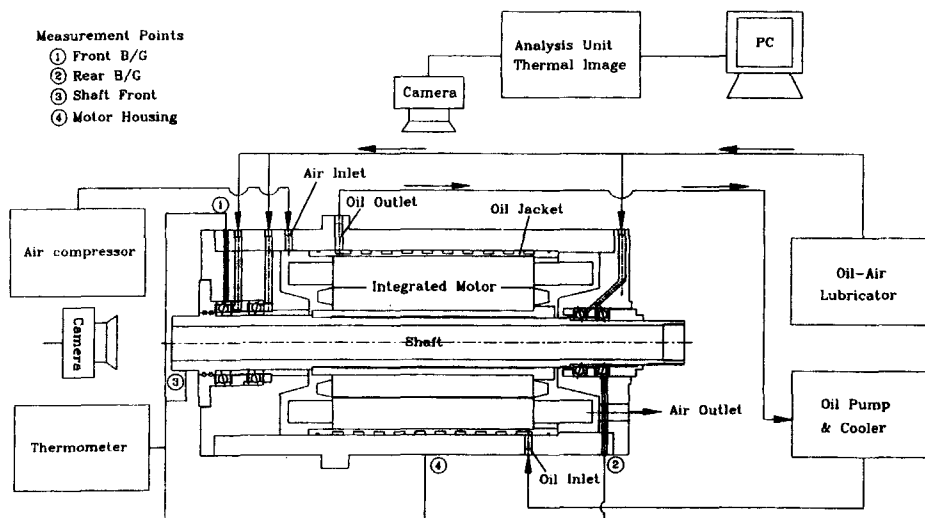


Fig. 2. Structure of test system.

공급하였고, 오일의 온도를 일정온도로 유지하기 위하여 오일냉각기를 사용하였다.

Fig. 2는 이번 실험에 채택한 모터내장형 주축 및 그 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

실험대상인 모터내장형 주축의 냉각특성을 해석하기 위하여 주축의 각 부분에, 즉 전반부·후반부 베어링의 외륜, 본체하우징의 표면 등에, 그 부위의 온도를 측정할 수 있도록 열전대를 설치하였고, 자켓에 공급되는 오일의 온도 조건을 알기 위하여 오일탱크의 내부에도 추가적으로 열전대를 설치하였다.

3. 실험방법

본 연구에서는 모터내장형 주축계의 냉각특성을 파악하기 위하여 회전수의 영향과 냉각방법에 따른 영향에 대해 실험적으로 살펴보았다.

먼저 회전수에 따른 주축계의 열특성은 2000 rpm, 4000 rpm, 6000 rpm, 8000 rpm으로 회전수를 증가시키며, 무부하·자켓유 냉각 상태에서 150분까지 연속 운전하여 베어링부, 축선단, 하우징 등 주축계 각 부분의 온도를 10분 간격으로 측정하여 조사하였다. 또한 온도분포는 각각의 회전수에 따라 주축계 정면과 측면에서 열상장치로 촬영·저장하였다.

다음으로 여러 가지 냉각방법에 따른 주축계의 열특성은 8000 rpm에 대하여 주축계의 냉각방법을 자켓유 냉각만 수행할 경우, 자켓유 냉각과 함께 모터의

스테이터와 로터사이의 간극에 주축의 앞쪽에서 12°C의 압축공기를 공급 할 경우, 자켓유 냉각과 함께 중공축의 내부에 동일 조건의 압축공기를 앞·뒤에서 각각 공급할 경우 등의 조건에 대하여 150분까지 무부하 연속운전하여 주축계 각 부분의 온도를 10분 간격으로 측정하여 조사하였다.

4. 실험결과 및 고찰

모터내장형 주축에 오일자켓 냉각만을 행하여 실험한 결과를 Fig. 3에서 Fig. 7까지에 나타내었다.

Fig. 3, 4, 5는 주축의 회전수를 2000, 4000, 6000, 8000 rpm으로 증가시킬 경우, 모터내장형 주축의 각 부위에 있어서 시간에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 결과에서 보듯이 운전초기에는 급격한 온도상승이 이루어지나, 60분 후부터는 점차적으로 서서히 열적 평형상태에 도달하고 있다. 또한 회전수가 증가함에 따라 온도상승량은 커지고 있다.

Fig. 3은 축 선단부의 실험결과로 회전수가 증가할수록 온도상승률은 증가하고 있으며, 8000 rpm인 경우 운전 후 150분에서의 온도상승량은 13°C를 넘어서고 있다. 실제적으로 공작기계의 가공정도 및 주축베어링의 예압에 직접적인 영향을 주는 것은 축의 온도상승에 따른 열변형으로 보아지며, 따라서 축의 온도상승을 최소화하는 방향으로의 주축냉각기술이 요구된다.

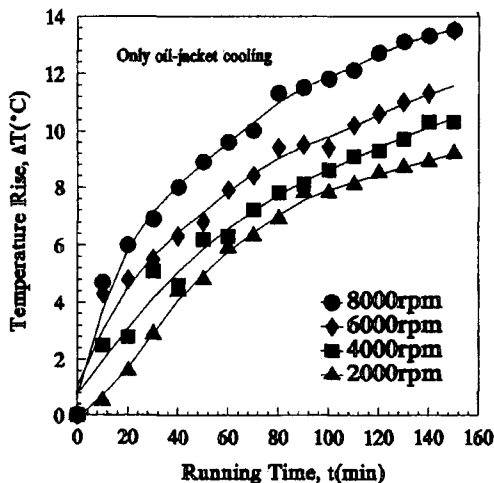


Fig. 3. Temperature rise of shaft ending point according to rotational speed (rpm).

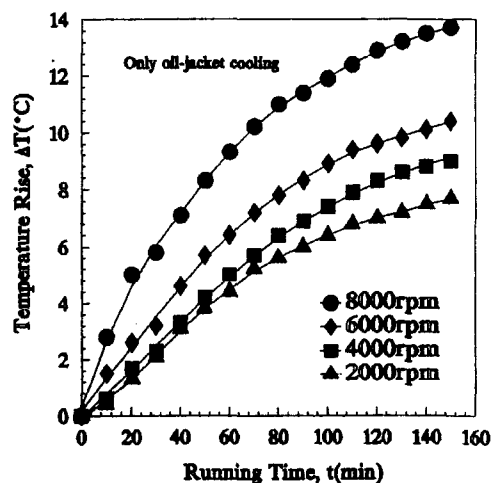


Fig. 4. Temperature rise of front B/G according to rotational speed (rpm).

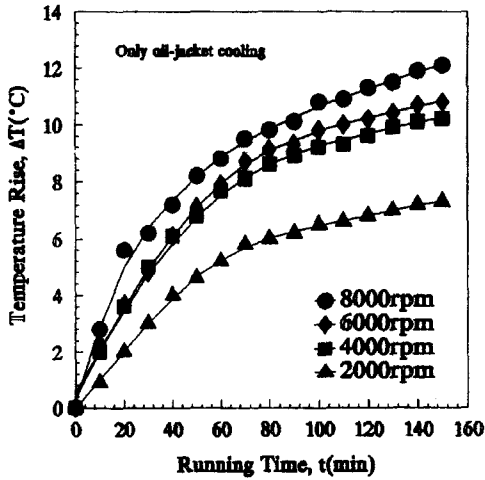


Fig. 5. Temperature rise of rear B/G according to rotational speed (rpm).

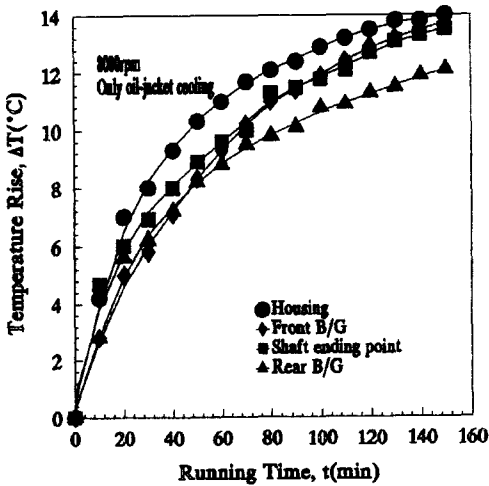
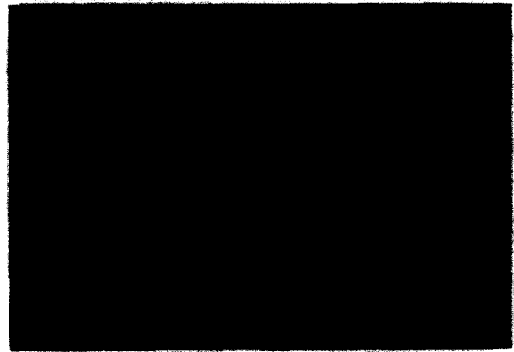
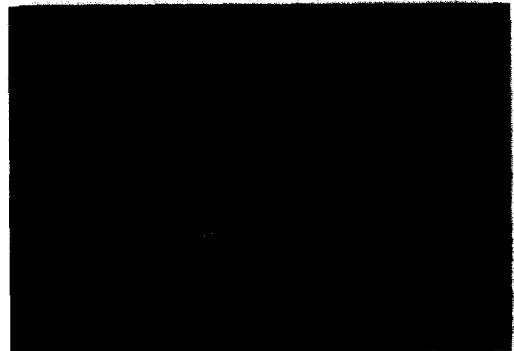


Fig. 6. Temperature rise of Spindle for oil-jacket cooling (rotational speed; 8000 rpm).

Fig. 4, 5는 전단베어링 및 후단베어링에서의 회전수에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 이들을 비교해보면 후반부 베어링이 전반부 베어링에 비해 온도상승이 낮게 나타나며, 온도의 평형상태(Steady state)에 빨리 도달함을 볼 수 있다. 또한 전반부 베어링의 경우, 회전수 증가에 따라 온도상승률이 비례적으로 증가하고 있는 경향을 보이고 있으나, 후반부 베어링의 경우 오히려 회전수의 증가에 대해 증가폭이 줄어들고 있다. 이는 전반부 베어링이 후반부 베어링에 비해 베어링직경이 1.2배 이상 크기 때문에 회전속도에 따른 베어링에서의 발열이 베어링 부위를 지배하고 있



(a) The front side of spindle



(b) the flank of spindle

Fig. 7. Temperature distribution of spindle at 8000 rpm (working time: 120 minute).

는 반면에, 후반부 베어링의 경우 회전속도에 따른 베어링에서의 발열에 약간의 모터에서의 전열이 일어난다고 있음을 알 수 있다. 그렇지만 전·후반베어링부 모두 회전수에 따라 온도상승률이 일정 비율로 증가하고 있어 모터부에서의 전열량은 그다지 크지 않고, 모터에서의 열은 자켓유 냉각을 통해 거의 냉각이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 회전수 8000 rpm에서 주축계 각 부위의 시간에 따른 온도변화를 나타내고 있다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 150분 후의 온도차를 비교해 보면 각 부위에서의 온도차가 1~2°C정도로 근소한 차이를 나타낸다. 이것은 모터부에 채택한 자켓유 냉각방식이 모터부의 발열을 효과적으로 억제하여, 모터부와 베어링부의 온도상승률이 비슷하여졌기 때문이다. 이것은 주축계 각 부위의 온도차에 의한 상대적인 열변형이 적어졌다고 표현할 수 있으며, Fig. 7의 열상장치에서 측정된 주축의 정면과 측면의 온도분포에서도 예측할 수 있다.

Fig. 7에서 보듯이 축면의 온도분포는 전 영역에서 거의 일정하며, 정면에서의 온도분포에서도 축심을 제외하고는 거의 일정함을 볼 수 있다. 그러므로 모터 내장형 주축에서 지배적인 발열원인 모터부에 자켓유 냉각만을 수행하고 베어링은 오일-에어순환방식을 채택함으로써 DmN 80만까지는 주축계의 발열을 잘 억제할 수 있을 것으로 보여지며, 단지 축심부분의 냉각이 문제점으로 생각된다.

Fig. 8, 9, 10은 회전수 8000 rpm에서 냉각방법으로 자켓유 냉각과 함께 몇 가지 압축공기 냉각방법들을

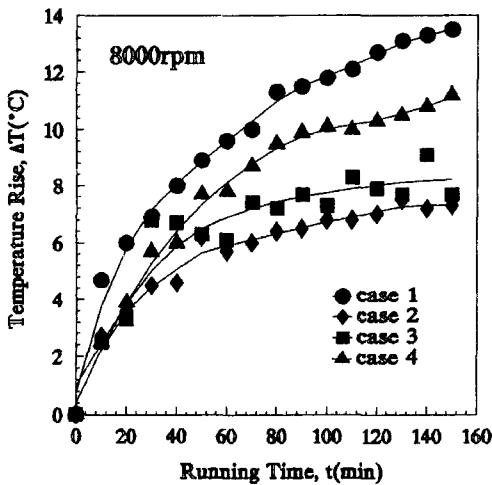


Fig. 8. Temperature rise of shaft ending point according to cooling methods.

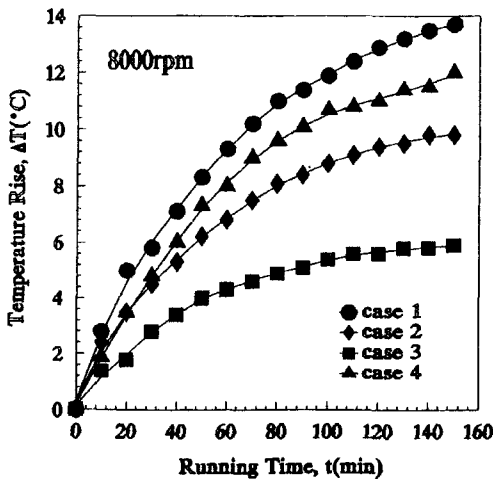


Fig. 9. Temperature rise of front B/G according to cooling methods.

추가하여 적용하였을 경우에 대하여 주축계 각 부분의 시간에 따른 온도변화를 나타내고 있다. 냉각방법은 자켓유 냉각만 할 경우(Case 1), 자켓유 냉각과 함께 12°C의 압축공기를 주축계의 앞쪽에서 중공축 내부에 공급할 경우(Case 2), 주축계의 앞쪽에서부터 모터의 스테이터와 로터사이의 간극사이로 동일 조건의 압축공기를 공급할 경우(Case 3), 주축 뒤쪽에서 중공축 내부에 동일 조건의 압축공기를 공급할 경우(Case 4) 등 4가지 방법에 대해 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 축 선단에서의 결과를 나타내고 있으며, 냉각효율은 Case 2가 가장 높으며, 다음으로 Case 3, Case 4, Case 1의 순으로 나타나고 있다. 이는 냉각공기가 축의 선단으로부터 축심으로 공급되기 때문에 축 선단의 냉각효과가 가장 크게 얻어진 결과로 자켓유 냉각만을 한 경우에 비해 2배 이상의 냉각특성효과를 얻고 있다. 여기서 축 선단의 큰 냉각효과를 볼 수 있으나 실제적으로 축심냉각은 냉각유의 공급에 매우 어려운 문제점을 가지고 있어 실제로 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 요구된다. 한편 Case 3의 경우가 또한 축심의 냉각에 비교적 큰 효과가 있음을 볼 수 있는데, 이 경우 모터내장형 주축계 냉각시스템에 실제로 적용할 수 있어 잇점이 큰 것으로 생각된다.

Fig. 9는 전반부 베어링에서의 냉각특성을 보여주고 있으며, 냉각효과는 Case 3의 경우가 특이 큰 냉각효과를 나타내고 있다. Fig. 10의 후반부 베어링에서의 결과에서는 여러 가지 방법으로 압축공기를 공급

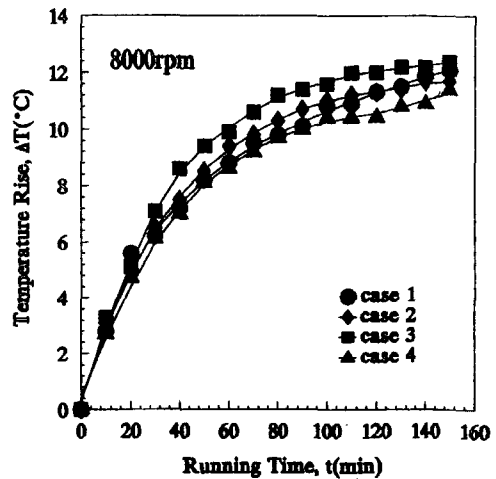


Fig. 10. Temperature rise of rear B/G according to cooling.

Table 2. The comparison of cooling effect of each part according to cooling methods

냉각방법	온도 측정점	축	전반부	후반부
		선단	베어링 외륜	베어링 외륜
오일자켓냉각 (CASE 1)		D	D	B
오일자켓냉각+주축계의 앞쪽에서 중공축에 압축공기 공급 (CASE 2)		A	B	A
오일자켓냉각+모터의 스테이터와 로터 사이 간극에 압축공기 공급 (CASE 3)		B	A	D
오일자켓냉각+주축계의 뒤쪽에서 중공축에 압축공기 공급 (CASE 4)		C	C	C

*알파벳 순서는 상대적인 냉각효과의 순서이다(A>B>C>D).

하여도 뚜렷한 냉각효과는 나타나지 않았다. 오히려 Case 3의 경우와 Case 2의 경우는 Case 1의 경우보다 더 높은 온도상승폭을 나타내고 있다. 이것은 냉각공기가 주축계 내부를 지나는 동안 온도가 상승한 데다 발열량이 매우 큰 모터부위를 통과함에 의해 큰 온도상승을 일으켜 후반부 베어링부에 열전달이 이루어지기 때문으로 보여진다. 그러나 운전시간이 90분을 경과한 이후부터는 오일자켓냉각만 할 경우의 온도상승기울기가 압축공기를 공급하였을 경우의 온도상승기울기보다 큼을 알 수 있으며 이것은 후반부 베어링에서도 압축공기를 공급하는 것이 효과가 있다고 해석할 수 있다. 그리고 주축계 후반부에서 중공축에 압축공기를 공급할 경우에는 약간의 냉각효과를 볼 수 있으나 효과는 별로 크지 못했다. 이상의 결과를 냉각효과의 순으로 Table 2에 제시하였다.

5. 결 론

모터내장형 주축의 냉각방법에 따른 열특성을 파악

하기 위한 실험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 모터내장형 주축의 오일자켓냉각 및 압축공기에 의한 냉각에 따른 열거동에 관한 자료를 제시하였다.
2. 모터내장형 주축에서 발열원인 모터부에 오일자켓냉각과 오일-에어유회방식을 채택하면 DmN 80만까지는 축심을 제외한 주축계의 발열을 잘 억제할 수 있었다.
3. 주축은 회전수가 증가할 수록 온도상승률은 증가하고 있으며, 주축베어링의 예압에 직접적인 영향을 주는 축심의 온도상승을 최소화하는 방향으로의 주축냉각기술이 필요하다.
4. 주축냉각방식으로 오일자켓냉각, 주축내부에 강제 공기냉각 및 축심에의 압축공기 냉각 등에 따른 효율적인 냉각방법을 제시하였다.
5. 주축냉각방식으로 오일자켓냉각과 주축내부에 강제 공기냉각을 수행하는 경우가 가장 효과적임을 알 수 있었으며, 열적으로 안정된 모터내장형 주축시스템을 실현하였다.

참 고 문 헌

1. 森脇 俊道, "공작기계의 고속화기술의 상태," 日本精密工學會誌, 제53권 7호, pp.1001-1004, 1987
2. 中村晋哉, "工作機械主軸スピンドルの高性能化," 日本精密工學會誌, 제57권 4호, pp.605, 1991
3. 田島清和 외 1명, "스핀들 고속화 기술동향," MA-CHINIST, 1989-11.
4. 村松 明의 3명, "모터내장형 주축의 발열해석," NSK Technical Journal No. 658, pp.32-39, 1994.
5. 이득우 외 2명, "모터내장형 주축계의 열거동에 관한 연구," 韓國精密工學會誌, 1993.
6. 최대봉 외 2명, "공작기계용 고속주축계의 공기냉각 특성에 관한연구," 韓國精密工學會誌, 1994.
7. 是田規之 외 3명, "工作機械の電子冷却," 日本精密工學會誌, 65/4, 1994.