

◆특집◆ 공작기계의 열변형

고속 주축의 열변형 특성 및 보정

이찬홍*

Thermal Deformation Characteristics and Compensation of High Speed Spindle Unit

Chan Hong Lee*

Key Words : High Speed Spindle Unit(고속주축), Thermal Deformation(열변형), Thermal Deformation Compensation(열변형 보정), Heat Generator(발열기구), Temperature Distribution(온도분포), Cooling Unit(냉각장치)

1. 서론

현대식 가공시스템은 자동화의 레벨이 점점 높아지면서 담당 작업자의 수가 급격히 감소하고, 급기야 부인화 시스템으로 향하고 있다. 이런 환경 하에서 소수의 작업자는 다수의 가공기를 관리하게 되고 갑작스러운 기계고장에 항상 즉각적인 대응을 하는 것은 무리가 있게 된다. 실제 통계에서도 기계의 가동불능사태가 자주 발생하고, 공작물의 가공정도도 불안정 상황이 나타난다. 그래서 가공시스템의 안정화를 위해 돌발사태에 대한 경고시스템이나 자동보수, 보정장치를 부착하여 가공장비의 신뢰성을 개선하고 있다. 그러나 지금까지도 문제가 되고 있는 것은 작업자가 느낄 수 없이 매우 서서히 미소하게 변화하는 기계의 열변위로서, 기계운전과 함께 초기에는 비정상적인 열변위가 급격히 일어나고 정상상태가 되는 수 시간 뒤까지도 구조물의 열변위가 가공물의 기하학적 정도에 영향을 계속 미치게 된다. 특히 차세대 공

작기계의 설계방향이 Fig.1 과 같이 고강성화와 고속화로 집중되고 있어서 고속, 고하중의 상대 접촉운동으로 마찰발열이 증가하고 구조물의 열변위 크기가 증가하는 추세에 있다. 이 열변위 문제는 정적이나 동적 변형에서 다루어 지는 수 μm 와는 차원을 달리하여 수십 μm 에 달함으로서 공작기계의 정도개선에 있어서 우선적으로 다루어져야 할 문제로 알려져 있다. 주축시스템은 고속회전을 하면서 기하학적 위치정도를 유지해야 하고 큰 동력전달도 해야하는 중요한 요소 유니트로서, 이곳에서의 열적 불안정은 바로 공작물의 가공오차

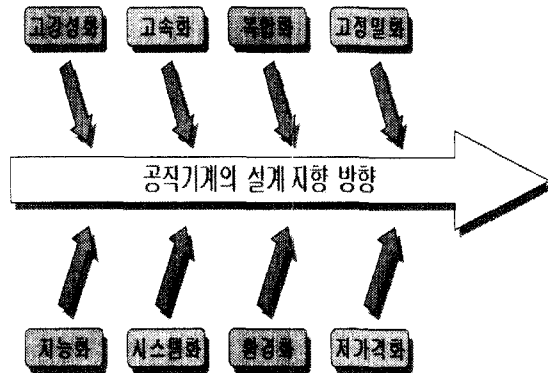


Fig. 1 Design Trend of Machine Tools

* 한국기계연구원 공작기계그룹
Tel. 042-868-7120, Fax. 042-868-7180
Email: chlee@kimm.re.kr

공작기계의 주축 시스템 최적설계, 초정밀 위치결정 시스템 및 진자빔 응용 마이크로 가공분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

확대로 직결된다. 주축시스템의 열적 안정화는 한 두 가지 부품의 설계개선으로는 이룩되지 않고 관련 부품의 재질, 공차, 배치, 조립, 열용량 안내 등 총체적 균형에 의해서만 가능하다.

본 논문에서는 고속주축의 발열원인과 개선방안 그리고 열전달 패턴을 분석하고 주축대에서의 온도분포에 따른 열변형 특징을 분류하였다. 또한 열적 안정화를 위한 냉각장치의 제어, 열변위 보정을 위한 구조적 설계방안을 다루었다.

2. 고속 주축에서의 발열기구

고속주축의 정의는 공작기계의 종류에 따라 달라진다. 선반의 경우는 8,000 rpm 이상만 되어도 고속주축에 속하는데 이것은 공작물과 주축이 연결되어 회전하기 때문에 공작물의 이탈 가능성이 크고 불평형 상태로 회전하기 때문에 지지베어링과 주축대에 진동을 주며, 척 자체도 8,000 rpm 이상이 되면 원심력을 고려해서 설계해야 하는 등 고난도 기술이 요구되기 때문이다. 그러나 일반적으로 머시닝센터나 연삭기같은 균형이 잘 잡힌 공구를 Chucking 해서 사용하는 주축은 15,000 rpm 이상을 고속주축이라 할 수 있다. Fig. 2a 에 나타난 고속주축은 벨트에 의해 구동되는 형태로서 부하가 적게 걸리는 조건에서 주로 사용되고 모터를 증속해서 사용한다. 고속회전의 특성 때문에 베어

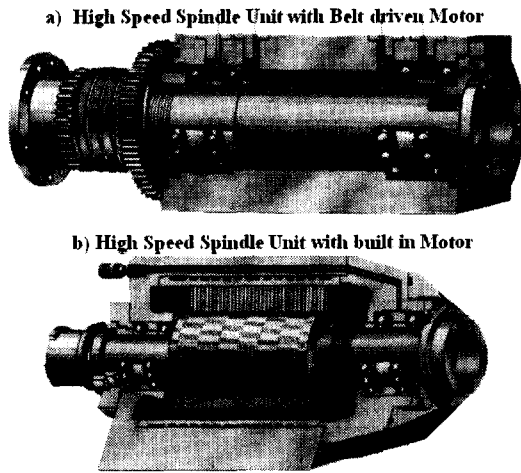


Fig. 2 High Speed Spindle Units with Ball Bearings

링은 주로 구름마찰이 적은 앵글러콘택트 베어링을 좌우대향형으로 배치한다. 베어링의 윤활은 발열을 극소화할 수 있는 Air-Oil 방식을 사용한다. 그러나 고부하용인 경우 벨트가 12,000 rpm 상회하면 진동이 심해지므로 사용하기 어렵기 때문에 구동모터가 주축대 내부에 들어간 일체형 주축을 설계한다.

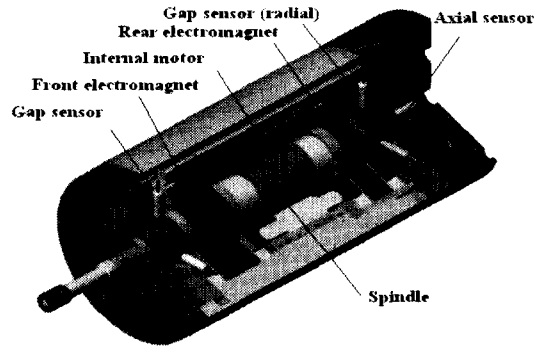


Fig. 3 High Speed Spindle Unit with Magnetic Bearings

Fig. 2b 은 모터 내장형 고속주축으로서 일반적으로 회전속도가 20,000 rpm 짜리를 많이 사용하고 40,000 rpm 이 현재 상품화되어 있다. 이 형태의 주축에서는 발열량의 비율로 보아 지지베어링보다는 내장형 구동모터에서 발열이 심하게 일어나므로 절대적으로 이 부위의 냉각이 필요하다. 비냉각의 경우 국부적으로 150℃까지 상승해서 모터 Stator 의 코일 절연상태를 파괴해서 작동불능상태를 야기한다. 모터의 Rotor 는 열적으로 Stator 로부터 대류와 복사열을 통해 열을 전달받아 축적함으로써 주축을 급격히 열팽창시키는 역할을 한다. 지지베어링에서의 발열은 (a)의 경우와 다르게 주위에 발열부품이 많아 시간적으로 베어링 예압상태가 변화하기 때문에 급격한 발열변화가 많다.

Fig. 3 에는 고속 자기베어링 주축을 보여주고 있다. 이 주축은 비접촉식 자기베어링을 사용해서 일반적인 회전속도가 약 100,000 rpm 에 달해서 공작기계에서는 내면 연삭기용 주축으로 사용된다. 자력에 의해서 연삭휠의 위치를 조절할 수 있는 장점이 있다. 내부구조에서 알 수 있듯이 내장형 모터, 자기베어링 코일이 발열체로서 작용을 하기 때문에 주축전체가 발열체로 가득 차 있다고

해도 과언이 아니다. 냉각 없이는 주축운전이 불안정하고 위험하다.

주축계는 고속이건 저속이건 주된 발열원이전, 후부 지지베어링과 내장형 모터로서 발생된 열이 주축대의 환을 따라 대부분 전도가 되고, 일부는 환에서 외부공기에 의한 대류를 통해 외부로 배출된다. 이 과정에서 환에 전도된 열을 주변으로 계속적으로 확산시키지 못할 경우 국부적인 열축적상태가 발생하여 온도가 상승한다. 결국 주축로 만들어진 주축대에서는 해당 선 팽창계수에 따라 열변형이 생겨난다. 이 열변형은 하중으로 변화시켜 생각해보면 Ton 단위이상의 하중이 주위부품에 작용하는 것과 같아 일반적인 구조물에서는 물론 고강성 구조물에서도 열변위의 영향을 피할 수는 없다.

Fig. 4 에는 주축의 고속화를 위해서 필수적으로 결정해야할 설계변수를 분야별로 표시하였다.

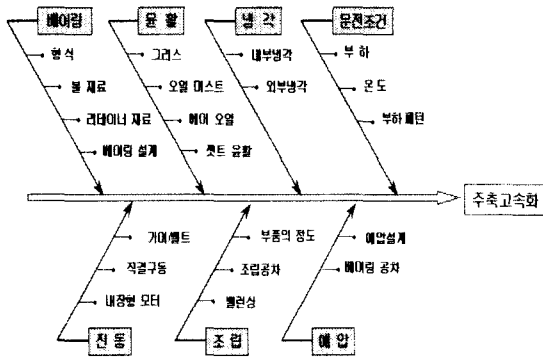


Fig. 4 Heat sources in High Speed Spindle Unit

이중에서 진동분야를 제외한 나머지가 주축의 발열기구와 관계있는 것으로, 주축의 고속화에는 열문제가 가장 심각한 문제임을 알 수 있다. 베어링은 중요 발열기구로서 베어링의 형태중에서 구름마찰이 가장 적고 회전정밀도가 우수한 앵글러 콘택트 베어링을 많이 사용한다. 볼은 8,000 rpm 이상에서 자이로스코픽 운동과 원심력으로 인하여 마찰이 증가해서 갑작스럽게 발열이 증가한다. 고속화를 위해서는 큰 제약이므로 볼의 재료를 가볍고 강한 재료로 바꾸면 효과가 크다. 세라믹 볼을 사용하면 질량이 작아 원심력이 작아지고 볼의 크기도 작게 만들 수 있어 고속에서는 큰 효과를 나

타낸다. 또한 열 전도율이 나빠서 열전달을 억제하는 역할도 한다. 세라믹 재료는 볼뿐만 아니라 주축의 재료로 사용하면 효과가 큰 것을 Fig. 5 을 통해서 알 수 있다. 실험결과에 따르면 세라믹 주축의 열변위는 일반 주축에 비해 1/6 정도밖에 되지 않는다.

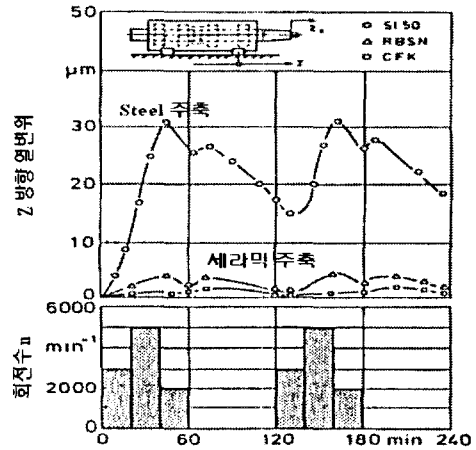


Fig. 5 Comparison of Thermal Deformation with respect to Spindle Material

베어링은 조립공차에 따라 발열량의 차이가 매우 심하게 차이가 난다. Fig. 6 왼쪽에는 호칭지름 70mm 되는 베어링이 온도상승량이 증가할수록 내외륜의 지름차이가 커지는 것을 나타내고 있는데, 이것은 온도상승량이 30℃ 증가하면 베어링 조립상태가 10 μm 틈새가 생긴다는 것을 보여주고 있다.

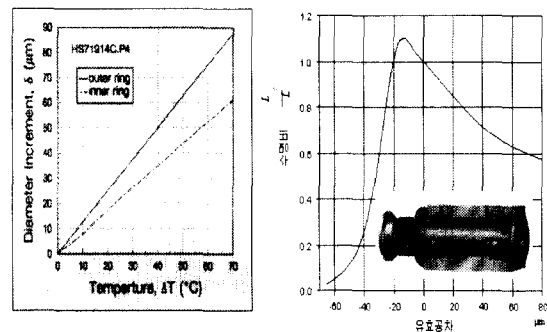


Fig. 6 Thermal Deformation and Assemble Tolerance in Ball Bearing

오른쪽 그림에는 베어링의 조립공차가 $-13 \mu\text{m}$ 일때 수명이 가장 긴 것을 나타내고 있다. 이 공차보다 더 큰 마이너스 공차는 발열 때문에 수명이 급격히 짧아지고 플러스 공차는 틱새에서의 진동현상 때문에 수명이 작아짐을 의미한다. 그래서 베어링의 예압을 적절히 조절해야 발열과 수명에 유리함을 알 수 있다. 베어링의 운전상태도 발열에 영향을 많이 미쳐서 회전속도의 변화가 급격하면 열충격 현상이 나타나 베어링을 파손시키기도 한다. Fig. 7 에는 단시간에 500 rpm 을 상승시키면 온도가 갑자기 상승해서 전기스파크와 같은 효과를 나타낸다.

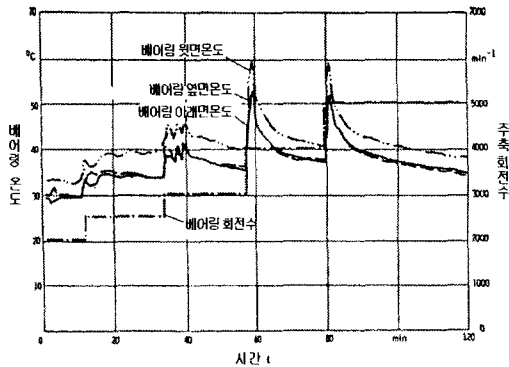


Fig. 7 Temperature Rise according to Drive Condition

베어링의 윤활은 저속에서 기름을 어느정도 넣어주면 고부하에서도 유막파단을 막아 주어서 발열이 적지만 고속회전에서는 기름간의 교반작용 때문에 기름이 많아질수록 발열이 많아진다.

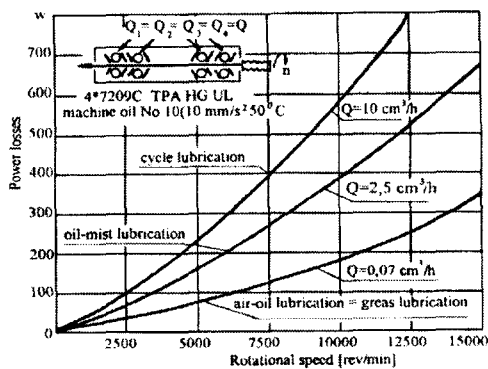


Fig. 8 Power Losses with respect to Input Oil Volume

그래서 최소한 유막유지에 필요한 기름양만을 공급하는 것이 유리하다(Fig.8).

3. 고속 주축의 온도분포 및 열변형 특성

고속 주축에서 발열기구들은 회전수의 변화에 따라 발열의 증감을 하면서 어느 정도 시간이 지나면 주변 부품들과 열적으로 평형을 이루게 된다. Fig. 9 는 고속 주축의 평형상태를 열상장치로 촬영한 사진이다. 왼쪽사진에서 주축의 베어링과 벨트 부위가 타워치보다 온도가 높고 주축대를 지지하는 베드부분의 온도는 나타나지 않는 것으로 보아 열용량이 큰 베드에서는 온도변화가 거의 없음을 알 수 있다. 그래서 공작기계에서의 열변형은 주축대와 이송시스템이 주된 요인임을 알 수 있다

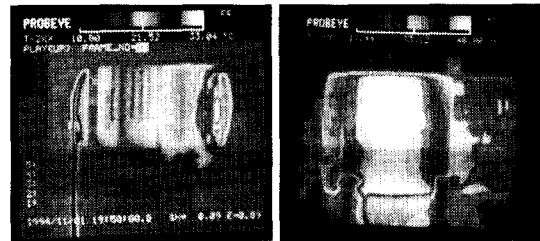


Fig. 9 Thermal Vision in High Speed Spindle Units

공작기계 전체를 촬영한 열상사진에서도 베드 구조물의 내부 발열에 기인한 온도변화는 장시간의 관찰에서도 상대적으로 보이지 않고, 다만 외부 온도 변화에 민감한 것으로 나타났다. 공작기계의 구조물은 얇고 열용량이 작은 Rib 로 구성되어 있기 때문에 외부 공기와 접촉하면 온도변화가 쉽게 일어나고 내부의 접촉면적이 외부 노출면적보다 매우 커서 베드와 컬럼 구조물은 외부온도의 영향을 많이 받는다.

고속 주축대에서의 온도분포는 일반적으로 좌우면은 기하학적으로 대칭을 이루고 있지만 상하에 있어서는 기능상 대칭관계를 성립시키기가 어렵고, 상하의 열전달 조건이 판이하게 달라서 상하면에 있어서는 열적으로 비대칭성이 뚜렷이 나타난다. Fig. 10 은 열실험과 FEM 을 통해서 주축대의 열적 파라미터를 규명하고 실험을 대신하여 열적 Simulation 을 실행한 것이다. 주축대 전부의 온

도분포를 관찰하면 시간이 지날수록 상하 비대칭성이 나타나고 베어링과 조립되는 베어링 하우스의 온도분포가 편심현상을 보이고 있어서 열변형도 타원이 될 것이 예상된다. 정확한 계산에 의하면 타원의 좌우 지름이 26 μm 이고 상하 지름이 23 μm 로서 좌우가 3 μm 커진것을 알 수 있다. 주축대의 전후부 베어링 부위에서 온도가 높아 중간부위의 온도가 상대적으로 낮게 나타나므로 열변형은 말안장같이 굽어지는 모양을 하게된다. 또한 전부와 후부판의 Center 를 잇는 선이 수평을 이루지 못하고 경사를 나타내게 된다.

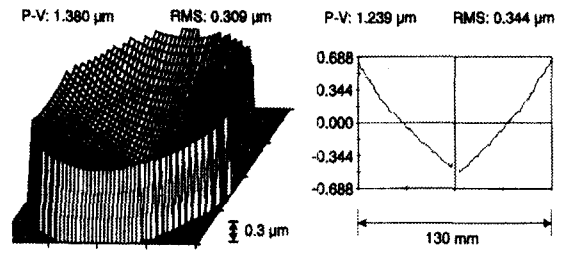


Fig. 11 Cutting Shape in Ultra Precision Machine

4. 고속 주축의 냉각 및 보정

고속주축에서 발열요인을 개선했음에도 불구하고 아직 발열량이 많이 남아 있으므로 냉각장치를 사용하여 잔여 발열을 상쇄해야 한다. 적어도 온도는 다소 높아도 좋으나 주축대의 온도분포가 시간에 따라 변화하지 않도록 냉각장치로 제어해야 한다. 온도분포가 변화하지 않는다는 것은 열변형이 변화없이 유지되는 상태이고 보정 소프트웨어로 쉽게 보정할 수 있다. Fig. 12 에는 냉각자켓으로 사용되는 슬리브의 냉각효율 최적화를 위해서 자켓 골의 폭을 결정하는 분석결과이다. 골의 폭이 작을수록 열교환이 많아 효율이 좋은 것으로 나타나고 있다.

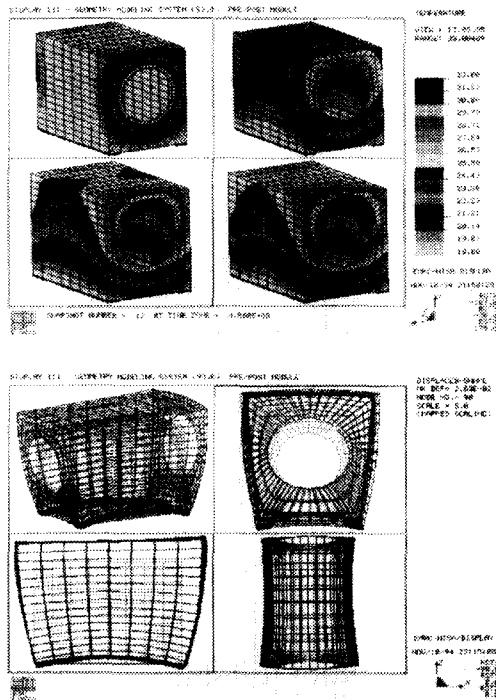


Fig. 10 Thermal Deformation and Temperature Distribution in High Speed Spindle Unit

다른 예로 Fig. 11 에 초정밀 가공기 주축의 열적 팽창으로 평탄도가 높아야 할 가공물이 파라보라 형태로 가공이 된 것을 볼 수 있다. 열적인 영향은 가공기의 정밀도가 높을수록 더욱 더 크게 나타나서 나노소자 가공기의 경우는 열적 영향을 받지 않도록 주위환경에 대한 고려가 철저히 검토되어야 한다.

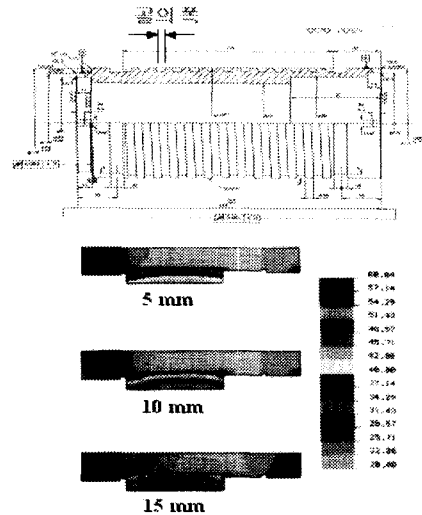


Fig. 12 Comparison of Cooling Effect with respect to Cooling Jacket Groove Width

냉각장치에 의한 주축대의 온도 안정화도 효과가 크기는 하지만 최종적으로는 열적 보정을 소프트웨어적이나 설계상에서 실행을 해야 한다.

Fig. 13 에는 설계상에서 열변형을 최대한 보정하는 방법을 보여주고 있다. 선반 주축대에서 열변형이 고정핀을 중심으로 좌우로 이루어지므로 고정핀의 위치를 주축대의 중심에 놓되 주축대의 전부에 위치하는 것이 제안되었다. 이렇게 함으로써 열변위가 발생해도 공작물의 가공위치 상에는 영향을 주지 않게 된다. 주축대의 양쪽 고정볼트의 고정 힘은 열응력에 비하면 큰 것이 아니므로 고정핀의 위치가 중요하다. 또한 Fig. 14 에는 열변위로 인한 주축대 중심점의 위치변동을 전후부 벽면의 열발생에 대응한 열용량을 증감함으로써 수평을 잡는 것을 제안하였다. 즉 전면의 벽면두께는 두껍게 하고 후면은 얇게 하는 것을 제안하였다.

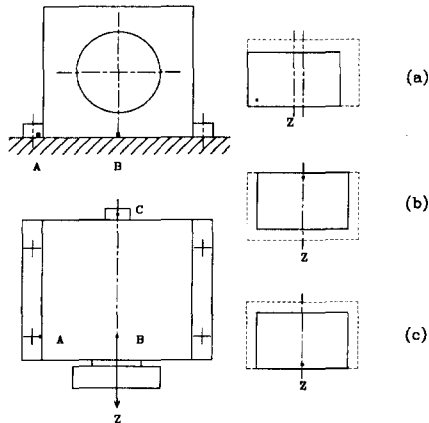
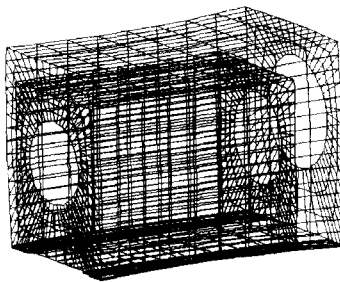


Fig. 13 Thermal Deformation according to Location of Position Pin

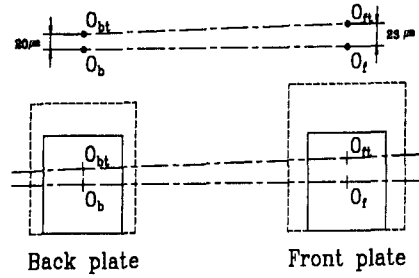


Fig. 14 Geometry Error of Center Line in Headstock

5. 결론

본 논문에서는 고속주축의 발열원인과 개선방안, 발열추이, 그리고 열전달 패턴을 분석하고 주축대에서의 온도분포에 따른 열변형 특징을 분류하였다. 또한 열적 안정화를 위한 냉각장치의 제어, 열변위 보정을 위한 구조적 설계방안을 다루었다. 고속 주축의 발열은 개선이나 억제할 수는 있지만 완전히 없앨 수는 없으므로 단계별로 발열 원인분석, 운전조건 최적화, 온도안정화를 위한 냉각제어, 소프트웨어적 열변위 보상, 실험을 바탕으로 한 구조 설계상 열변위 보상 등으로 열변위를 보정해야 한다.

참고문헌

1. J. Jedrzejewski, "Thermal Behaviour Intelligent Diagnostics," 7th Workshop CIRP Karpacz Poland, 1996.
2. U. Goeke, "Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Oel-Luftschmierung," TU-Berlin Dissertation, 1994.
3. 이찬홍, "고속 주축 Housing 의 열거동 억제에 관한 연구," 한국정밀공학회 '94 년도 추계학술대회, pp. 613-616, 1994.
4. 이찬홍, "고속 주축 베어링의 조립공차에 관한 연구," 한국정밀공학회 '94 년도 추계학술대회, pp. 177-180, 1994.
5. 이찬홍, "공작기계의 열변형 억제를 위한 불안정 대류경로 차폐," 한국정밀공학회 '98 년도 추계학술대회, pp. 822-825, 1998.