

## Strain Response of Motor Axis as Variation of Shrink Fitting

禹炳哲\* · 鄭然鎬\* · 姜道鉉\*\*

(Byung-Chul Woo · Yeon-Ho Jeong · Do-Hyun Kang)

**Abstract** - Shrink fitting is often a conventional mechanical fasteners and fastening methods with temperature difference. Localized heating of the material surface provides temporary expansion and allows slip fit assembly. The resulting interference fit exhibits exceptional strength without surface deformation at ambient temperatures. We studied an analysing method to find out a deformation of motor axis as variation of constrained method with shrink fitting.

**Key Words** : Simulation, Thermal Expansion, Shrink Fitting, Motor Axis, Mechanical Deformation, ANSYS

### 1. 서 론

발전소 터빈 및 전동기의 회전축에서 오래전부터 많이 사용하고 있는 열박음은 두 재료사이의 온도차를 이용한 대표적인 구속방법으로 심할 경우 깨어지거나 비틀림이 발생할 수 있으며 적절하지 못한 열박음은 회전 중 회전자의 일부가 파손되는 사고가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 일반적으로 사용하고 있는 전동기에서 사용되는 회전축을 대상으로 열박음의 온도를 적절히 조절하여 열박음 결과에서 발생하는 잔류응력의 크기를 적절히 조절하고 또한 회전 시 얻어지는 변형과 초기 열박음으로 인해서 얻어진 변형을 적절히 조절하고자 하였다 특히 열박음과 회전에서 발생하는 변형특성을 고려하여 회전부의 외부 피막의 두께와 형상을 변화시켰을 때 최적의 설계조건을 확인하였다.

이러한 결과로부터 회전자의 모서리부의 각진 부위의 형상 변화가 필요함을 알 수 있었으며 또한 열박음에서 얻어질 수 있는 변형과 응력의 특성에 대비한 설계가 중요함을 알아보았다.

특히 외피와 내부 코어부의 열박음 온도차에 의해서 얻어지는 열팽창의 차이로 인해서 내부에는 아주 심한 잔류응력의 편차를 가지게 되고 이러한 초기 형상에서 모터가 회전하게 되면 내부의 잔류응력과 더불어 원심력에 의해서 발생하는 응력이 발생하게 되며 코어와 외피의 강성 차이로 인해서 코어부에 큰 응력이 작용하게 된다. 이러한 응력편차로 인해서 발생하는 변형 편차는 측면 모서리 부위에서 반복적인 하중을 받게 되어 응력완화를 고려한 설계가 필수적

이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 응력특성을 파악하여 내부 코어와 외피사이에서 발생하는 여러 특성을 평가하여 최적의 특성을 파악하고자 하였다.

### 2. 해석방법

#### 2.1 축의 열응력 특성 방정식

모터의 축은 일반적으로 원심으로 인한 성분이 가장 큰 응력으로 작용하고 있다고 알려져 있다. 그리고 원심력으로 인해서 발생하는 응력은 각속도의 곱에 비례하며 원심력 특성상 반경에 비례하는 관계를 가지고 있다.

그러나 이러한 정상상태의 특성보다는 제조공정에서 발생하는 열응력 특성이나 초기 가속구간에서 발생할 수 있는 가속도의 영향과 가속도로 인해서 발생하는 반경의 변화에 의해서 발생하는 코리올리 가속도 등 여러 성분으로 작용할 수 있다.

본 연구에서는 초기 제조공정에서 열박음으로 인해서 발생하는 열응력 특성과 정상속도에 발생하는 원심력 특성을 고려하여 모터 축에서 발생하는 거동을 알아보았으며 이러한 특성의 기초가 되는 방정식을 다음과 같이 정리할 수 있었다.

$$\sigma_{ij} = 2G \left( \epsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \left( \epsilon_{kk} - \frac{1+\nu}{\nu} \alpha T \right) \right) \quad (1)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) + \alpha T \delta_{ij}$$

여기서 각 성분은 다음과 같다.

- |                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| $\epsilon$ : Strain         | $\nu$ : Poison ratio          |
| $\sigma$ : Stress           | $\alpha$ : Thermal expansion  |
| $\delta$ : Kronecker delta  | $T$ : Temperature             |
| $\mu$ : Lamé's constant     | $G$ : Shear stiffness modulus |
| $\lambda$ : Lamé's constant | $E$ : Tensile modulus         |

\* 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹 선임연구원

E-mail : bcwoo@keri.re.kr

\* 正會員 : 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹 선임연구원

\*\* 正會員 : 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹 Group장

接受日字 : 2004年 2月 28日

最終完了 : 2004年 6月 28日

전동기의 회전축의 응력특성의 해석에서 널리 사용되고 있는 방법이 Hoop stress 계산이며 원통 내부에 균일한 압력이 가해질 경우 원통의 길이방향과 수직방향의 파손을 가정한 계산이다. 이러한 방법은 수압과 같이 균일성을 가진 경우에 널리 사용되는 방법이지만 회전축의 열박음에서 널리 애용하고 있는 실정이다.

**2.2 해석 모델의 특성**

본 연구에서는 균일한 압력이 작용한다고 가정한 Hoop stress를 이용하는 방법과 달리 실제 발생하는 원심력과 열팽창으로 인해서 팽창되는 거동을 그대로 적용하여 해석하였으며 회전축에서 작용하고 있는 형상을 그대로 적용하였다. 또한 상부와 하부에 고정되지 않은 조건으로 인해서 발생하는 Hoop stress와의 차별성을 적용하였다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 영구자석 여자전동기 회전축의 형상이며 본 형상에서 사용한 재료는 표 1에 나타내었다.

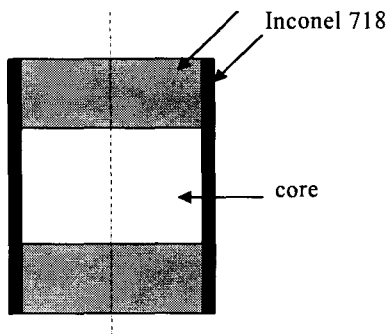


그림 1 일반전동기 회전축의 형상  
Fig. 1 Configuration of motor axis

표 1 재료 물성치  
Table 1 Material properties

material Properties	Inconel 718	Sm2Co17
Density(kg/m <sup>3</sup> )	8190	8400
Modulus(GPa)	205	120
Expansion(/K)	13x10 <sup>-6</sup>	8x10 <sup>-6</sup>
T.Strength(MPa)	1200	80
C.Strength(MPa)	1200	160

표 1에서 알 수 있듯이 core부를 지지하고 있는 인코넬 718 재료는 강도가 거의 10배 이상이며 지지재료로 사용되고 있다.

또한 그림 1에서와 같이 지지구조의 형상에서 원심력을 고려한 표면의 일정 두께와 상, 하부에서 코어재료를 지지하고 있는 부위에서 Inconel 718을 사용하고 있는 실정이다. 또한 열박음 이전에 코어의 상, 하부에 Inconel 718 재료를

부착하여 고정된 뒤 액체 질소와 같은 낮은 온도대의 액체 속에 담군 다음 열박음을 하는 것이 일반적이다.

본 연구에서도 액체질소를 사용하여 열박음을 하였으며 열박음에서 사용하는 공극을 적절히 조정하여 최적의 조건에서 열박음 되도록 해석하였다.

그림 2는 해석에서 사용한 모델의 형상이며 ANSYS plane 42 element 방정식을 사용하여 해석하였다. 본 해석에서 사용한 element 수는 12340개이며 회전으로 인한 원심력, 중력으로 인한 힘, 열박음으로 인한 힘 등을 고려하여 해석하였다.

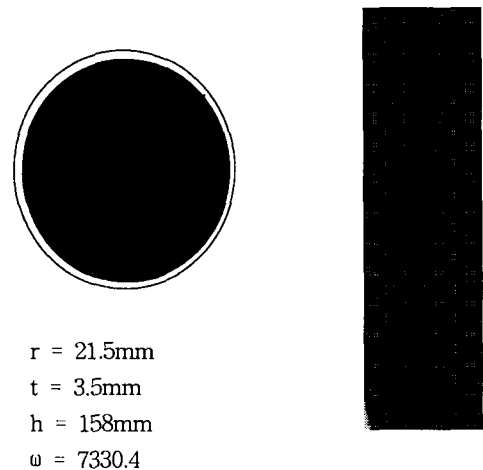


그림 2 해석에서 사용한 모델의 형상  
Fig. 2 Configuration of simulation model

**3. 해석 결과 및 고찰**

**3.1 50K 온도차 조건의 열박음에 따른 특성**

본 연구에서 사용한 모터의 정속 회전수는 70000rpm이며 직경이 50mm이다. 또한 모터의 열박음 온도는 액체질소의 온도에서 적용하지만 유지시간에 따라 내부는 완전히 액체질소의 온도까지 떨어지지 않는 상태이다. 또한 공극을 1.5mm, 2mm 등으로 정하고 있지만 정확한 치수의 보정은 제조공정에서 가변성을 가지고 있다고 할 수 있다.

본 연구에서 적용한 열박음은 열팽창 계수를 적용하여 열팽창으로 인해서 발생하는 공극을 적용하였으며 온도대를 0K에서 200K까지 온도를 변화시키면서 발생하는 응력과 변형특성을 해석하였다.

그림 3은 열박음 온도가 50K인 경우에 얻어진 변형거동으로서 반경방향의 특성을 나타내고 있으며 그림 4는 원심력이 작용하는 방향인 축의 방향 성분을 나타내었다.

그림 3에서 알 수 있듯이 원심력으로 인해서 코어가 위치한 중심부에서 더 큰 변형이 작용하고 있음을 확인할 수 있으며 이것은 열팽창 계수의 차이로 인해서 발생하는 결과라고 할 수 있다. 또한 이러한 경향은 제조공정상 상온에서 일정 반경만큼 유격을 두고 제작하고 있어 실제 공정과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 그러나 반경방향과 수직인 축

방향의 성분을 보면 원심력으로 인해서 발생된 팽창으로 인해서 수축하는 경향을 가지고 있으며 이것은 축방향의 중심부를 기준으로 상, 하부선상을 따라서 거의 선형적인 증가하는 거동을 보이고 있다. 그러나 코어와 지지부의 연결부와 끝 부분에서는 원심력과 수축의 차이로 인해서 상당히 큰 차이를 나타내고 있다.

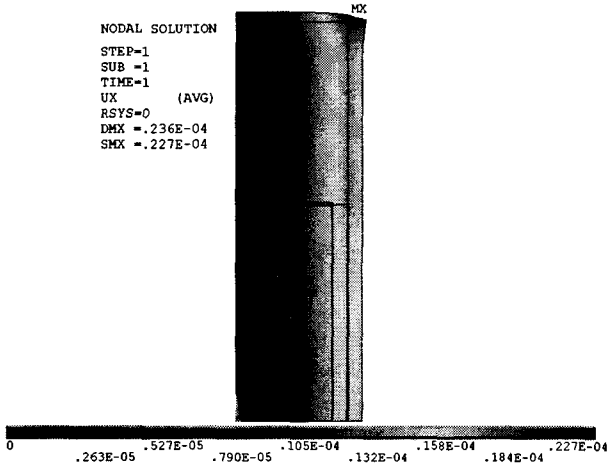


그림 3 50K의 열박음에 따른 반경방향의 변위  
Fig. 3 Radial displacement as a temperature difference, 50K

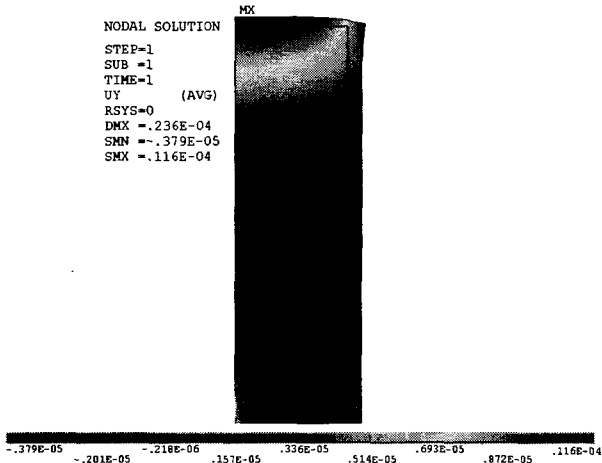


그림 4 50K의 열박음에 따른 축방향의 변위  
Fig. 4 Axial displacement as a temperature difference, 50K

그림 5는 그림 3과 4의 결과로 인해서 얻어지는 반경방향의 응력거동을 나타내고 있으며 그림 6은 각 방향의 성분을 조합한 Von Mises 상당응력을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 반경방향의 응력은 열박음으로 인해 끝 부위에서 최대값을 나타내고 있음을 확인할 수 있으나 실제 작용하는 응력은 열응력으로 인한 압축응력이 크다고 할 수 있다. 또한 전체 상당응력은 반경방향의 응력과 수직방향의 응력의 조합으로 나타나며 지지역할을 하고 있는 외피 층에서 가장

큰 값을 나타내고 있음을 확인하였다.

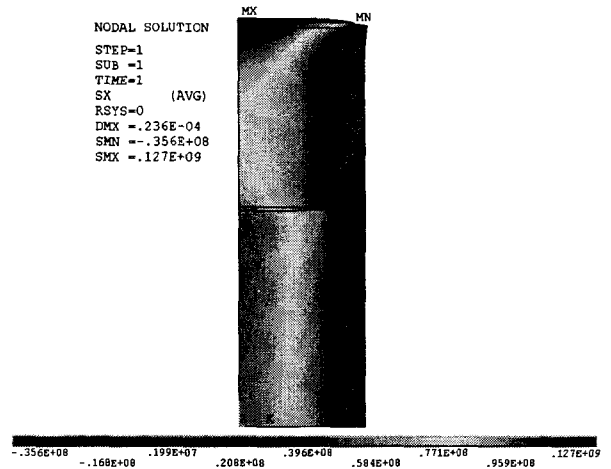


그림 5 50K의 열박음에 따른 반경방향의 응력  
Fig. 5 Radial stress as a temperature difference, 50K

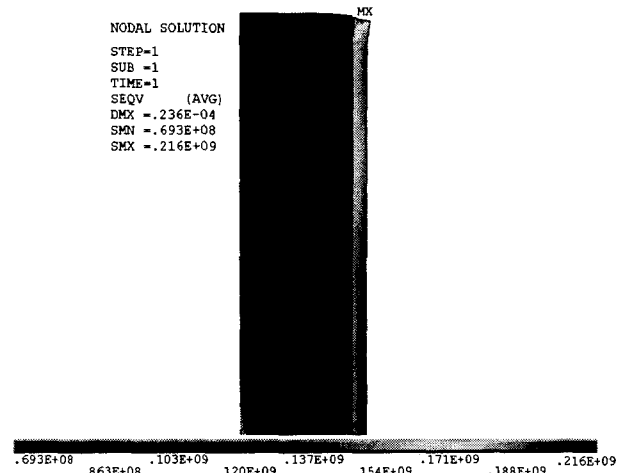


그림 6 50K의 열박음에 따른 축방향의 응력  
Fig. 6 Axial stress as a temperature difference, 50K

### 3.2 열박음 온도차에 따른 거동

그림 3에서 그림 6의 결과는 열박음 온도가 50K인 경우의 결과로서 전체적인 경향을 알 수 있었으며 이러한 특성을 기준으로 열박음 온도를 변화시키면서 그 특성을 비교하였다.

그림 7은 열박음이 없는 경우에서 열박음 온도가 200K인 경우에 대해서 7000rpm의 회전이 작용하는 경우 반경방향의 변위를 알아보았다. 그림에서 알 수 있듯이 열박음 온도가 증가됨에 따라 거의 선형적으로 반경방향의 변위가 증가됨을 알 수 있으며 이 값은 전체에서 얻어진 최대값을 나타내고 있다. 또한 코어 내부에서 작용하는 변위를 고려해 보면 전체의 약 70%정도의 최대 변위비를 가짐을 알 수 있다.

또한 그림 7에서는 70000rpm의 회전 유무에 따른 특성을 비교하였으며 그 특성을 값이 비교하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 열박음과 회전 시 발생하는 원심력을 고려할 경우 순수한 회전성분은 34K의 열박음 온도차에 해당하는 반경방향의 변위특성과 유사함을 확인할 수 있었다.

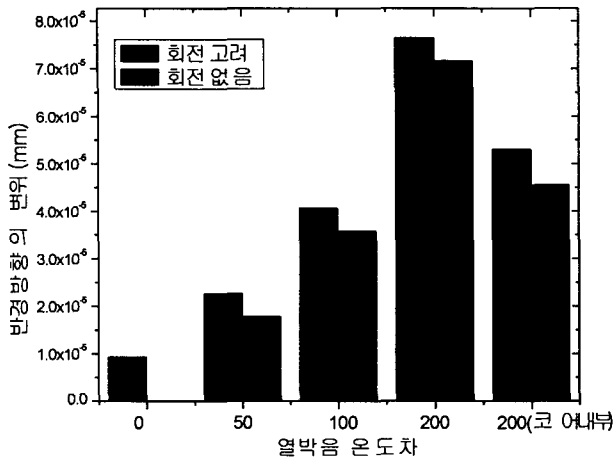


그림 7 열박음 온도차에 따른 축방향의 변위  
Fig. 7 Axial displacement as a temperature difference

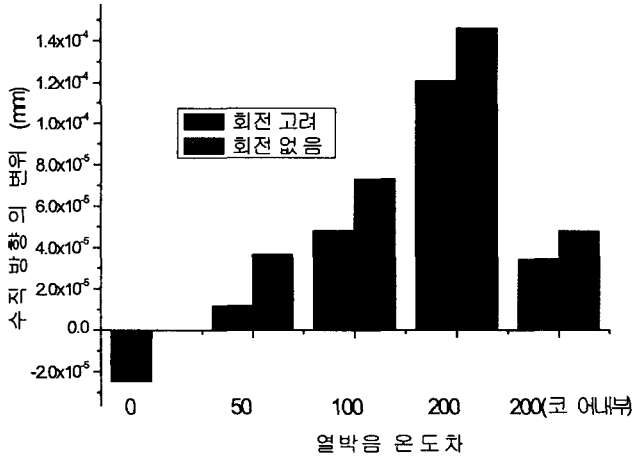


그림 8 열박음 온도차에 따른 수직방향의 변위  
Fig. 8 Vertical displacement as a temperature difference

그림 8은 그림 7의 축 방향, 즉 반경방향의 변위와 반대 방향인 수직방향의 변위특성으로서 반경방향과 같이 열박음 온도차가 커짐에 따라 수직방향의 변위도 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 그러나 초기 상태인 회전만 있고 열박음이 전혀 없는 경우를 비교해 볼 때 반경방향의 변위는 인장방향으로 작용하지만 수직 방향의 변위는 압축으로 작용하게 되며 이로 인해서 초기상태에서 코어 내부에서 응력 변화를 가지게 된다. 이러한 응력편차를 줄이기 위해서 적절한 표면의 보강설계와 열박음 온도차가 필요하며 본 논문에서도 가장 최적의 열박음 온도차를 설정하고자 하였다.

그림 9는 전체 총 변위 특성을 나타내고 있으며 200K의 열박음인 경우 전체 최대 변위값과 코어내부의 최대 변위값을 비교한 결과 최대변위의 약 50%에 해당됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Inconel 718로 지탱하고 있는 외벽의 변위의 50%에 해당되는 변위가 코어내부에 작용한다고 할 수 있다.

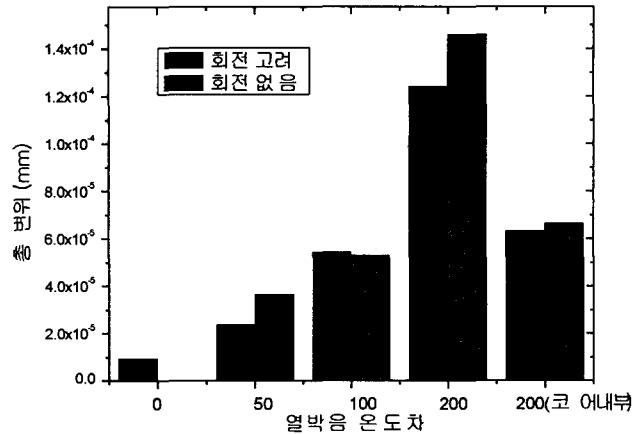


그림 9 열박음 온도차에 따른 총 변위  
Fig. 9 Total displacement as a temperature difference

그림 10은 열박음 온도차에 따른 축방향의 응력 특성으로서 그림 7과 같은 축방향의 변위특성으로 인해서 축의 내부에서 발생하는 반경방향의 응력이다. 그림에서 알 수 있듯이 열박음 온도차에 따른 축방향의 응력과 거의 유사한 특성을 나타내고 있으나 열박음 온도차가 200K인 경우 코어 내부의 응력은 다소 작은 결과를 나타내고 있다.

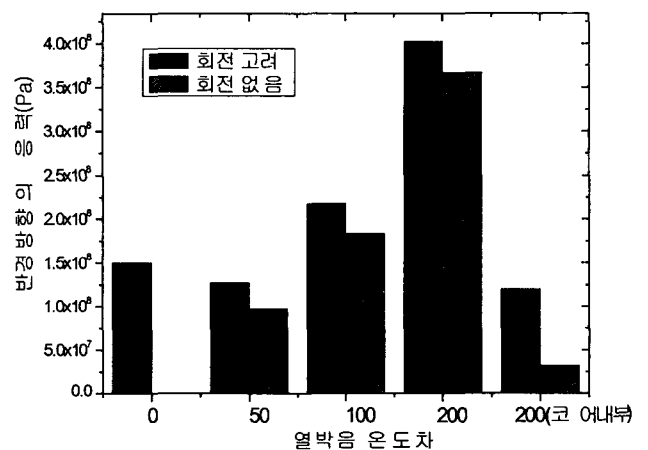


그림 10 열박음 온도차에 따른 반경방향의 응력  
Fig. 10 Axial stress as a temperature difference

이는 코어 내부의 변위가 Inconel 718 재료에 발생하는 변위와 비교하여 최대치의 약 60% 변위가 발생하였지만 응력특성은 작용하는 변위를 강성으로 곱한 값에 비례하기 때

문에 최대치의 약 60%를 갖은 코어내부의 변위에서 발생하는 축방향 응력이 Inconel 718 재료에 작용하는 응력에 비해서 약 30%선으로 다소 작은 응력이 작용함을 알 수 있다. 이것은 Inconel 718과 코어 재료의 강성의 차가 약 2배이므로 비례하여 작아지는 결과를 초래하였다. 그림 10과 마찬가지로 그림 11은 수직방향의 응력을 나타내고 있으며 그림 12는 최대 발생할 수 있는 내부응력의 합을 나타내고 있다.

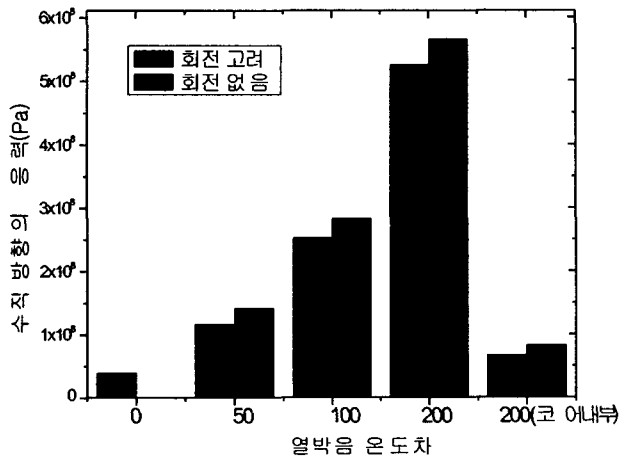


그림 11 열박음 온도차에 따른 수직방향의 응력  
Fig. 11 Vertical stress as a temperature difference

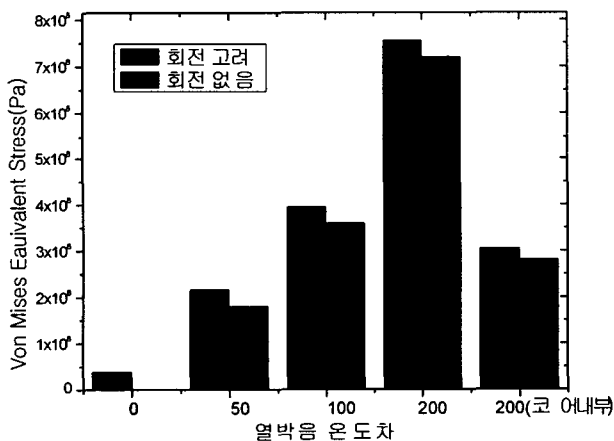


그림 12 열박음 온도차에 따른 최대 응력  
Fig. 12 Von Mises equivalent stress as a temperature difference

그림 10에서 알 수 있듯이 반경 방향의 응력만 고려할 경우 회전을 고려하고 열박음 온도차가 없는 경우가 50K의 열박음 온도차가 있는 경우보다 높은 응력을 가지게 되며 이러한 특성을 기준으로 할 때 최저가 되는 응력을 유추할 수 있게 된다. 이러한 경우 최소자승법을 적용할 경우 34K의 열박음 온도차일 때 반경방향의 응력이 최소값을 가지게 되며 반경방향이 문제가 되는 회전축에서는 가장 중요한 요

소라고 할 수 있다.

그러나 열박음으로 인해서 코어내부에는 반경방향의 큰 압축응력과 수직방향의 인장응력이 작용하고 있으며 Inconel 재료와 코어재료 사이의 큰 전단응력이 발생함으로 인해서 파손의 원인으로 작용하게 되므로 편차응력이 중요하게 고려되어야 한다.

### 3. 결 론

50K의 열박음으로 인해 발생하는 Von Mises 상당응력을 해석한 결과 코어보다는 외피 지지층인 Inconel 718 재료에서 최대값을 나타내고 있음을 확인하였다.

열박음에 따른 전동기 회전축의 응력과 변형특성을 해석한 결과 지지부의 응력의 약 50%에 해당되는 응력이 코어 내부에 작용하고 이것은 강성의 차이로 발생함을 확인하였다.

또한 7000rpm으로 회전하는 축일 경우 반경방향의 응력을 고려할 경우 열박음이 없는 경우보다 열박음 온도차가 34K일 경우가 가장 작은 응력이 발생함을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. J. Binns, ed1, "Permanent magnet AC generators", Proc. IEE, Vol. 126, No. 7, pp. 690-696, July 1979.
- [2] K. J. Binns, ed 2, "The Use of Canned Rotors in High Speed Permanent Magnet Machines", 5th Int. Conf. on Electrical Machines & Drives, pp. 21-25, 1991.
- [3] T. Alasuvanto, ed1, "Comparison of Four Different Permanent Magnet Rotor Constructions", Int. Conf. on Electrical Machines, pp. 1034-1039, 1990
- [4] J. F. Gieras, M. Wing, "Permanent Magnet Motor Technology", Marcel Dekker, Inc., 1997 Conference on Electrical Engineering 2002, Vol. 3, p. 1191, 2002.
- [5] 강도현, Herbert Weh, "철도 차량용 고회전력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제48권, 제 6호, B권, pp.301-308, 1999.
- [6] 우병철, 정연호, 강도현, "전동기 회전축의 열박음 형상에 따른 변형특성", 전기학회 추계학술대회논문집, pp. 57-59, 2003.

저 자 소 개



**우 병 철 (禹炳哲)**

1963년 7월 22일생. 1989년 영남대 기계공학과 졸업. 2000년 경북대학교 기계공학과 졸업(박사), 1991년~현재 한국전기연구원 Mechatronics그룹 선임연구원  
Tel : 055-280-1632, Fax : 055-280-1547  
E-mail : bcwoo@keri.re.kr



**강도현 (姜道鉉)**

1958년 9월 21일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 독일 Braunschweig 대학 졸업(박사), 1986~현재 한국전기연구원 Mechatronics그룹장  
Tel : 055-280-1480, Fax : 055-280-1547  
E-mail : dhkang@keri.re.kr



**정연호 (鄭然鎬)**

1968년 3월 10일생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업 (석사), 1996~현재 한국전기연구원 Mechatronics 그룹 선임연구원  
Tel : 055-280-1488, Fax : 055-280-1547  
E-mail : yhjeong@keri.re.kr