

영구자석 여자전동기 회전부 축의 열박음에 따른 변형특성

우병철 정연호 강도현  
한국전기연구원

Distortion Response of Motor Axis with Permanent Magnet as Shrink Fitting

Byung-Chul Woo Yeon-Ho Jeong Do-Hyun Kang  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - Shrink fitting is often used to replace conventional mechanical fasteners and fastening methods. Localized heating of the mating 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 with shrink fitting of thermal expansion.

여기서 각 성분은 다음과 같다.

- ε : Strain
- σ : Stress
- δ : Kronecker delta
- μ : Lamé's constant
- λ : Lamé's constant
- ν : Poison ratio
- α : Thermal expansion
- T : Temperature
- G : Shear stiffness modulus
- E : Tensile modulus

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 영구자석 여자전동기에서 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 외부피막의 두께를 적절히 설계하였다.

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

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.

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

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

2. 본 론

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 가속으로 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 모터축에서 발생하는 거동을 알아보았으며 이러한 특성의 기초가 되는 방정식을 다음과 같이 정리할 수 있었다.

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

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

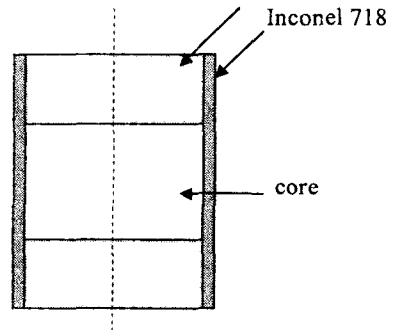


그림 1 여자전동기 회전축의 형상

표 1 본 해석에서 사용한 재료의 물성치

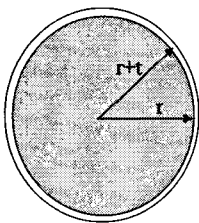
재료	Inconel 718	Sm2Co17
특성치		
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	8190	8400
modulus(GPa)	205	120
열팽창율(1/K)	13x10 <sup>-6</sup>	8x10 <sup>-6</sup>
인장강도(MPa)	1200	80
압축강도(MPa)	1200	160

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.



r = 21.5mm  
t = 3.5mm  
h = 158mm  
 $\omega = 7330.4$

그림 2 해석에서 사용한 모델의 형상

### 2.2 50K의 열박음에 따른 특성

본 연구에서 사용한 모터의 정속 회전수는 70000rpm 이며 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 발생한 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 나타내

고 있다.

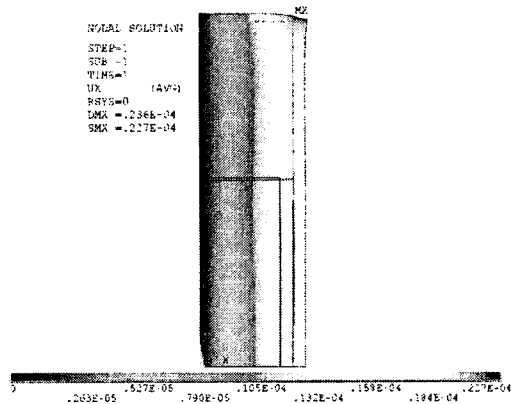


그림 3 50K의 열박음에 따른 반경방향의 변위

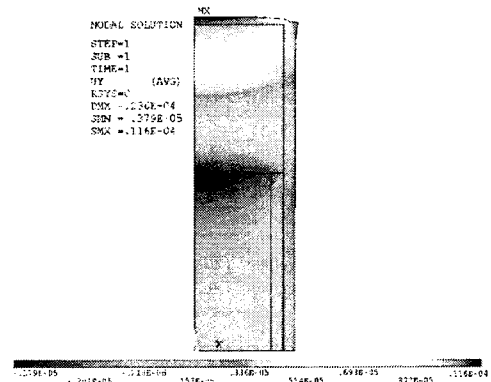


그림 4 50K의 열박음에 따른 축방향의 변위

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.

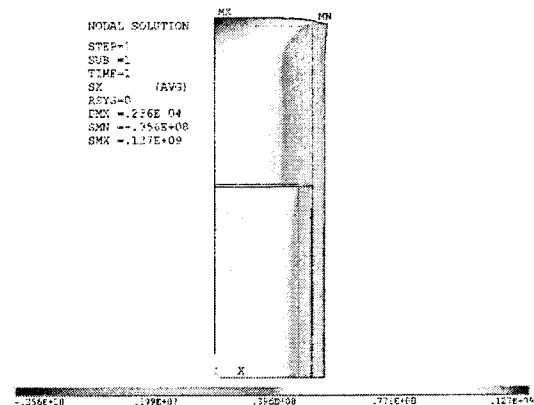


그림 5 50K의 열박음에 따른 반경방향의 응력

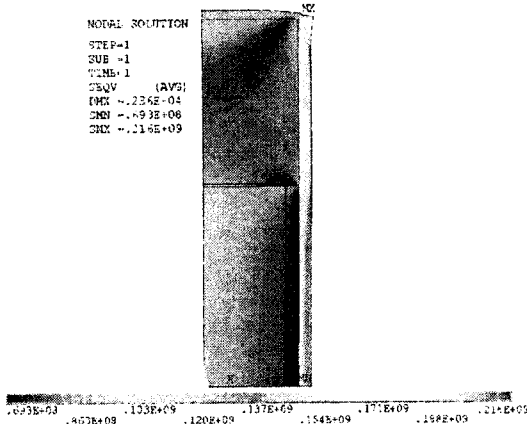


그림 6 50K의 열박음에 따른 Von Mises 상당응력

### 2.3 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 7000rpm의 회전 유무에 따른 특성을 비교하였으며 그 특성을 깊이 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.

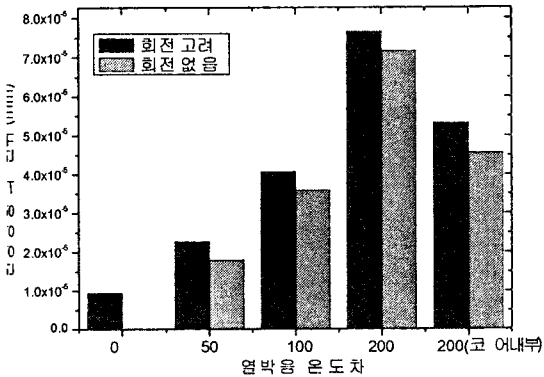


그림 7 열박음 온도차에 따른 반경방향의 최대변위

그림 8은 전체 총 변위 특성을 나타내고 있으며 200K의 열박음인 경우 전체 최대변위값과 코어내부의 최대변위값을 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 9는 이러한 변위에 따

른 Von Mises 상당응력을 나타내고 있으며 유사한 결과를 나타내고 있다.

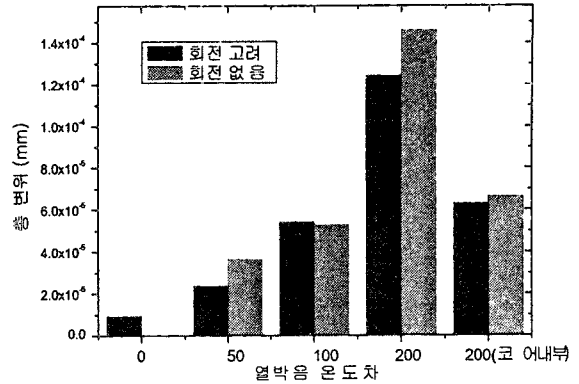


그림 8 열박음 온도차에 따른 변위의 합

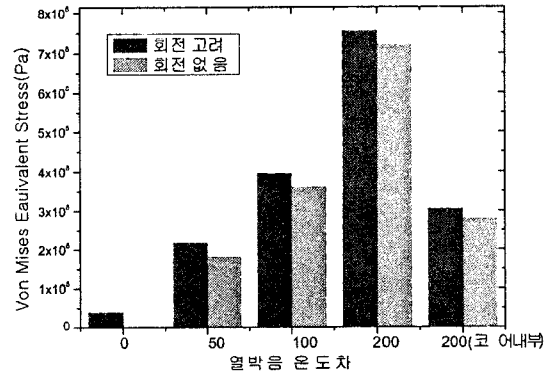


그림 9 열박음 온도차에 따른 전체 상당 응력

### 3. 결 론

(1) 50K의 열박음으로 인해 발생하는 Von Mises 상당응력을 해석한 결과 코어보다는 외피 지지층인 Inconel 718 재료에서 최대값을 나타내고 있음을 확인하였다.

(2) 열박음에 따른 전동기 회전축의 응력과 변형특성을 해석한 결과 지지부의 응력의 약 50%에 해당되는 응력이 코어 내부에 작용하고 있음을 확인하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] K.J.Binns, el1, "Permanent magnet AC generators", Proc. IEE, Vol.126, No.7, pp.690-696, July 1979.
- [2] K.J.Binns, el 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, el1, "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, 1191, 2002