

전동기 회전축의 열박음 형상에 따른 변형 특성

우병철 정연호 강도현 김종문  
한국전기연구원 Mechatronics 그룹

Strain Response of Motor Axis as Variation of Shrink Fitting

Byung-Chul Woo, Yeon-Hoo Jeong, Do-Hyun Kang and Jong-Mun Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract.** - Shrink fitting is often used to constrain a conventional mechanical fasteners and fastening methods with temperature difference. 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 as variation of constrained method with shrink fitting.

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 외부파파의 두께와 형상을 변화시켰을 때 최적의 설계조건을 확인하였다.

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

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 내부 코어부와 외부부를 감싸고 있는 강도 유지층의 형상변화에 따라 초기 제조공정에서 축의 고정을 위해 사용하는 열박음으로 인해서 발생하는 열응력 특성과 정상속도에 발생하는 원심력 특성을 고려하여 모터축에서 발생하는 거동을 알아보았다. 다음 식들은 이러한 특성의 기초가 되는 방정식 정리하였다.

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

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

여기서 각 성분은 다음과 같다.

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

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 적용하고 있는 실정이다.

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 고정되는 얇은 조건으로 인해서 발생하는 Hoop stress와의 차별성을 적용하였다.

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

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

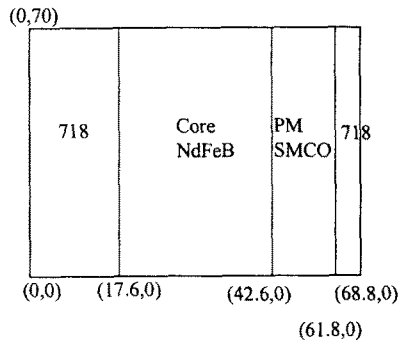


그림 1 여자전동기 회전축의 형상

표 1 본 해석에서 사용한 재료의 물성치

재료	Inconel718	SMCO	NdFeB
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	8190	8400	7400
modulus(GPa)	205	120	160
열팽창율(1/K)	13x10 <sup>-6</sup>	8x10 <sup>-6</sup>	4x10 <sup>-6</sup>
인장강도(MPa)	1200	80	
압축강도(MPa)	1200	160	

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 담근 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.

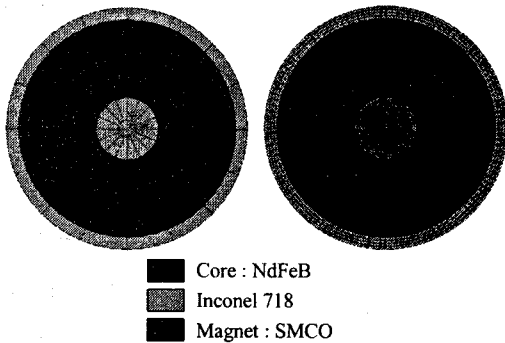


그림 2 해석에서 사용한 모델의 형상

## 2.2 열박음 온도차에 따른 특성

일반적으로 열박음으로 인해서 내부에는 압축응력이 내부 재료의 경계부에서는 인장응력이 작용하게 되고 외부층에서는 인장응력이 작용하게 된다. 이러한 열박음은 너무 강하게 하면 외부와 내부층에서 밀착되어 소성변형을 초래할 수 있게 되며 취성재료일 경우 파손되는 결과를 초래하기도 한다.

본 논문에서는 회전시에 이탈되지 않는 조건에서 회전에 따른 강도유지와 가감속에 따른 영향을 건널 수 있는 조건에서 다소 강도가 약한 코어소재나 마그넷 소재에서 발생하는 최대발생 응력과 허용변형이내에서 설계될 수 있도록 열박음 온도차에 따른 특성을 알아보았다.

그림 3은 열박음 온도차를 변화시키기에 따라 얻어지는 최대변형량을 특성을 알아보았다. 본 해석에서 사용된 축의 직경은 137.6mm이고 회전수는 30000rpm인 조건이며 열박음 조건은 완전히 밀착된 조건에서 온도차에 따라 팽창되는 온도차의 조건으로 설정하여 각각의 조건으로 계산하여 사용하였다.

일반적으로 사용하는 방법은 액체질소 내에 넣고 수축된 직경을 측정하여 외부층의 내경과 차이로써 열박음의 정도로서 사용하는 것이 일반적이나 정확한 값은 경우에 따라 약간의 오차가 발생할 수 있어 온도차로서 설정하였다.

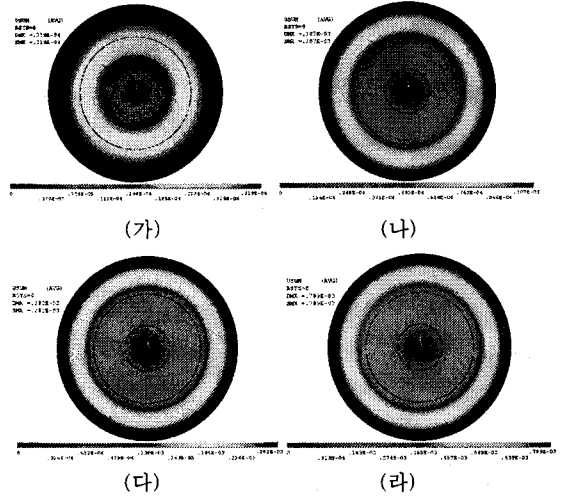


그림 3 열박음 온도차에 따른 총변형 특성 변화

- (가) 열박음이 없는 경우
- (나) 열박음온도차가 30K인 경우
- (다) 열박음 온도차가 100K인 경우
- (라) 열박음 온도차가 300K인 경우

또한 그림 4는 그림 3에서 얻은 총변형에 따라 발생하는 최대발생 응력을 나타내었다.

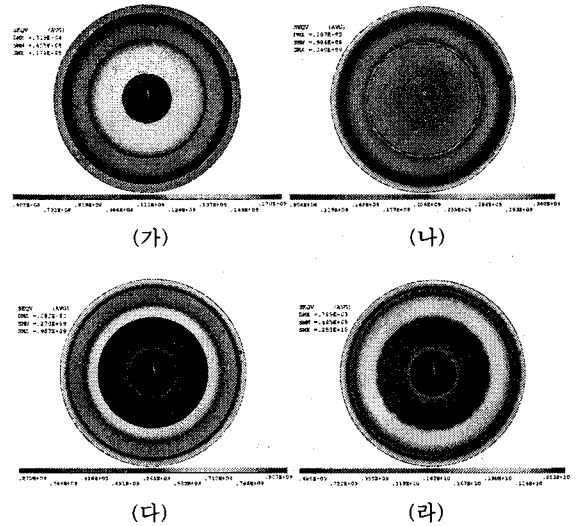


그림 4 열박음 온도차에 따른 최대 발생응력 특성

- (가) 열박음이 없는 경우
- (나) 열박음온도차가 30K인 경우
- (다) 열박음 온도차가 100K인 경우
- (라) 열박음 온도차가 300K인 경우

그림 3에 나타낸 것과 같이 열박음과 30000rpm의 회전으로 인해 발생하는 변형특성은 내부보다 외부로 가면서 커지는 양상을 보이지만 이로 인해서 발생하는 최대 발생 응력 값은 열박음 온도차에 따라 현저히 달라지는 결과를 얻을 수 있었다. 먼저 그림 4의 (가)와 같이 열박음 온도차가 전혀 없는 경우에서는 내부와 외부의 강도차로 인해서 중심부에서 가장 큰 응력이 발생하고 외부 강도 보상층에 다소 약한 응력이 발생하고 있음을 알

수 있다. 그러나 열박음 온도차가 30K인 (나)의 경우에는 외부 보상층에서 가장 큰 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 더욱이 그림 4의 (다), (라)와 같이 열박음 온도차가 100K, 200K로 증가함에 따라 발생되는 최대 응력의 크기가 점점 증가하는 경향을 나타내게 되고 (라)와 같이 열박음 온도가 일정값 이상이 되면 외부 강도 보상층 뿐만 아니라 코어와 마그넷의 경계층에서도 최대응력에 가까운 응력이 발생하게 된다.

### 2.3 Air gap이 존재하는 경우

일반적인 전동기의 경우 코어의 방열과 코일의 연결 등의 목적으로 air gap을 두는 경우가 많이 있는데 본문에서는 코어의 유무에 따른 특성변화를 평가하기 위해서 균일한 형상의 air gap 형상에서 얻어지는 결과와 air gap이 없는 경우와 비교하여 특성을 평가하였다.

그림 5는 air gap이 있는 형상의 특성과 modeling 형상을 나타내었다.

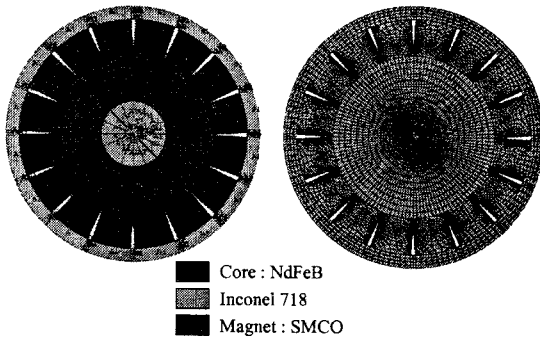


그림 5 air gap이 있는 형상과 요소 분할 특성

그림 6은 열박음 온도차가 30K인 경우 발생되는 최대 변형량과 Von Mises Equivalent Stress를 나타내었다.

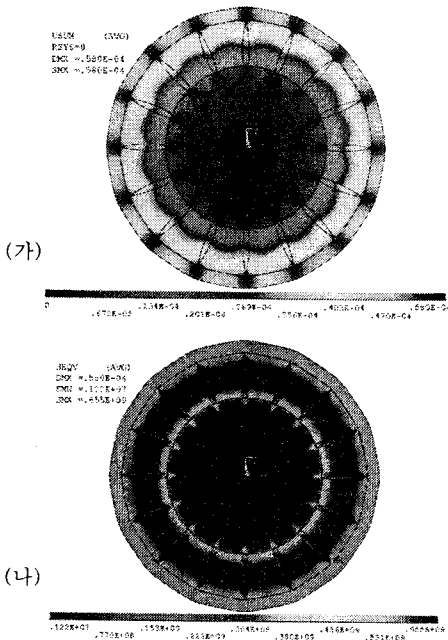


그림 6 air gap이 존재하는 경우의 강도 특성  
(가) 최대 변형량  
(나) Von Mises Equivalent Stress

그림 7과 8은 air gap의 유무에 따른 최대 발생 변형량과 최대 발생 응력을 비교하여 나타내었으며 단순히 회전 없는 경우에서도 air gap이 없는 경우가 낮은 변형량과 낮은 최대 응력값을 가지며 회전이 있는 경우에도 마찬가지로의 특성을 나타내었다

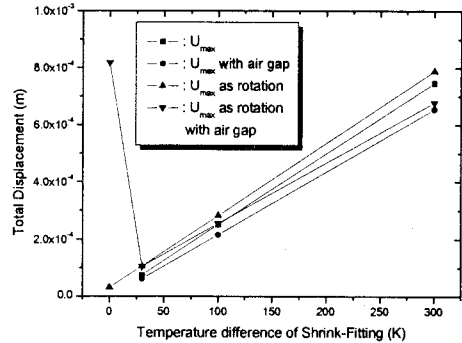


그림 7 air gap 유무에 따른 최대 변형특성

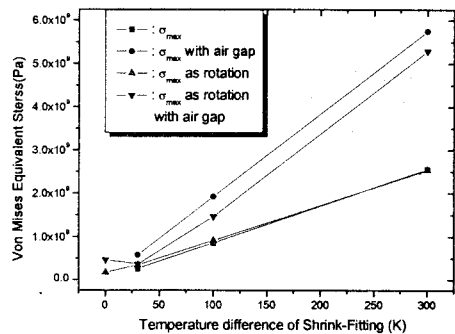


그림 8 air gap 유무에 따른 최대 응력 특성

### 3. 결 론

열박음 온도차에 따른 변형과 응력특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열박음 온도차가 100K보다 작은 경우에는 외부 보강층에서 최대응력이 발생하였으나 300K 이상이 되면 코어 어부위까지 높은 응력이 발생하였다.
- (2) air gap의 유무에 따른 특성 평가 결과 air gap이 있는 경우가 없는 경우에 비해서 더 높은 응력과 변형이 발생하고 있음을 확인할 수 있었으며 열박음 온도차가 50K 이하인 경우에는 거의 유사한 특성을 나타내었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] K.J.Binns, et al, "Permanent magnet AC generators", Proc. IEE, Vol.126, No.7, pp.690-696, July 1979.
- [2] K.J.Binns, et al, "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, et al, "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
- [5] 우병철 정연호 강도현, 영구자석 여자전동기 회전부 축의 열박음에 따른 변형특성, 전기학회학술대회 논문집, pp.1451-1453, 2003