

매입형 영구자석 동기 전동기 회전자에 응력해석

김용재*, 김성진*, 정상용**
 조선대학교*, 동아대학교**

Stress Simulation of Rotor Core in the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Yong-Jae Kim*, Sung-Jin Kim*, Sang-Yong Jung**
 Chosun University*, Dong-A University**
 E-mail : kimsj641@hanmail.net

Abstract - 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기 회전자의 원심력에 따른 응력 분포를 분석하였다. 수치 해석 방법 중 유한요소법(FEM)을 이용하여 전동기의 응력 분포를 파악하였으며, 각각의 회전속도에 따른 Principal Stress와 Mises Stress를 비교하였다.

1. 서 론

최근 지구 온난화 방지를 위한 CO2 배출량의 삭감과 고유가에 대응하는 연비 절감의 대책으로 하이브리드 자동차 및 전기자동차의 개발이 이루어지고 있으며 현재는 전 세계적으로 수요가 크게 증가하고 있다.[1] 전기자동차 및 하이브리드 자동차는 대용량의 배터리를 탑재하여야 하고 충분한 실내공간을 확보하여야 하므로 체적 제약조건이 매우 심각하게 요구되며 또한 연비 향상을 위해서 고효율화가 요구된다. 따라서 건인 전동기에서 요구되고 있는 성능은 고 토크화, 고속화, 고 출력화, 소형화, 고효율화라고 할 수 있다.[3] 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 단위 체적 당 출력이 증가하는 장점이 있는 반면, 전동기의 회전자는 부하기계와 직결되어 고속으로 회전하기 때문에 안정적인 응력이 분포하여야 하며 위험 속도에서도 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 또한, 기동 혹은 운전 시 온도 상승 및 원심력에 의해 회전자가 원주 방향으로 팽창 이완될 수 있으므로 강성을 보장할 수 있는 재질 선택과 용접, 제작, 가공 등의 문제가 무엇보다도 중요하지만 이에 대한 연구가 현재까지 국내에서는 미미한 상황이다.[4]

고정자와 회전자에 주로 쓰이는 제질인 무 방향성 전기 강판(Non Oriented electrical steel :NO)은 전동기 제작 시 절단, 펀칭, 조립, 적층, 열처리 등의 과정에서 기계적, 열적 응력에 의해 전기 강판 자성 열화로 전동기 성능이 저하될 수 있다. 특히 전기 강판의 경우 압축 및 인장 응력에 따라 자화 및 철손 특성이 바뀐다.[5]

본 논문에서는 전동기가 회전할 때 발생하는 원심력에 의한 응력이 전동기의 회전자에 미치는 영향을 분석하고 회전속도에 따른 응력분포를 비교하였다.

2. EV용 IPMSM의 제원 및 응력 해석

2.1 전동기 응력 해석

전동기 응력 해석은 적층 철심만으로 할 수 있다. 또한, 회전자에서 원심력이 생기기 때문에 고정자를 제외하고 회전자와 영구자석만을 가지고 응력 해석을 수행하였다. 그림 1과 같이 전동기 응력 해석 모델을 2차원으로 하고 해석 시간 단축을 위하여 반경방향으로 1/4로 모델링하였다. 본 연구에서 사용된 전동기는 4극 24슬롯 모터로써, 제원은 표 1과 같으며, 재료의 물성값을 표 2에 나타내었다.

2.2 Young's modulus와 Poisson rate

응력 해석을 하기 위해 전동기 회전자 재료의 Young's modulus와 Poisson rate, 밀도가 필요하다. Young's modulus는 물질의 늘어나는 정도를 나타내는 각 물질의 고유한 특성이다.

Young's modulus는 물질의 변형력을 변형률로 나눈 값으로 표현할 수 있다. 식 (1)에 물질의 변형률 식을, 식 (2)에 물질의 변형력 식을 나타내었다. 그리고 식 (3)에 Young's modulus의 계산식을 나타내었다.

$$S = \frac{L_n - L_0}{L_0} \quad (1)$$

〈표 1〉 IPMSM의 제원

구 분	제 원
상수/극수/슬롯수	3상/4극/24슬롯
고정자 외경	56[mm]
회전자 외경	27.5[mm]
공극길이	0.5[mm]
적층 Thickness	1[mm]

〈표 2〉 재료의 물성값

	회전자	영구자석
Young's modulus	2.10×10^{11} [Pa]	1.50×10^{11} [Pa]
Poisson rate	0.30	0.30
Mass density	7,850[kg/m ³]	7,600[kg/m ³]

여기서 L_n 은 물체에 힘을 주어 늘어난 길이, L_0 은 물질의 처음 길이이다.

$$T = \frac{F}{A} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2)$$

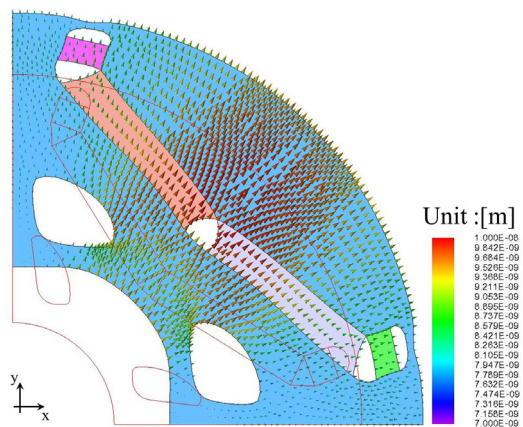
여기서 F는 물질을 잡아 늘린 힘, A는 물질의 단면적이다.

$$\text{Young's modulus} = \frac{T}{S} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (3)$$

Poisson rate는 측면 변형률을 길이 변형률로 나눈 값으로 0.30~0.35의 범위 내에 값을 가진다.

2.3 전동기 변위 해석

그림 1에 전동기 회전자의 변위 분포를 나타내었다. 변위 응력의 최대값은 9.93E-6[mm]로 회전자의 센터포스트 부근에서 집중됨을 확인하였다.



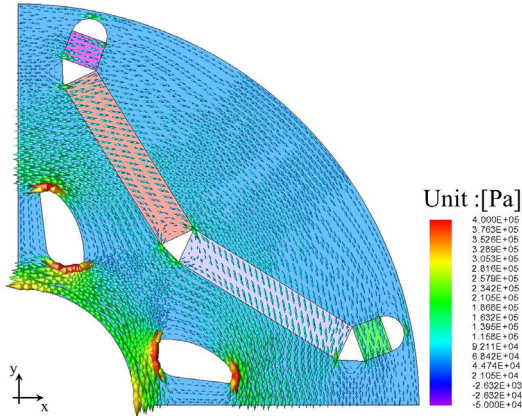
〈그림 1〉 변위 Stress Vector(1800rpm)

2.4 전동기 Principal Stress 해석

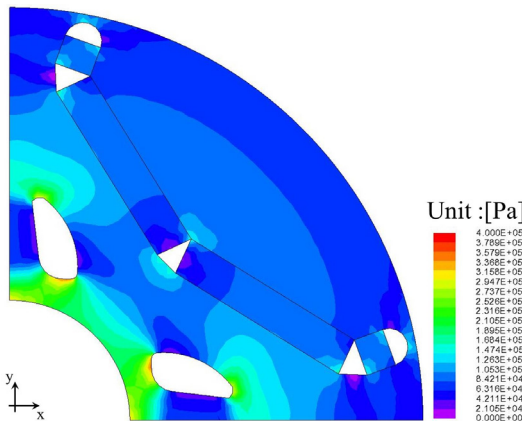
그림 2와 3에 1800rpm 영역에서 전동기 회전자자의 Principal Stress 분포를 Vector와 Contour로 나타내었다. 그림 2에서 보면 알 수 있듯이 Principal Stress는 응력의 크기와 그 응력이 인장응력인지, 압축응력인지 알 수 있다.

Principal Stress의 인장응력은 0.393[Mpa]으로, Shaft에 가까운 Air barrier에서 집중되는 것을 알 수 있다. 응력 분포에서 Air barrier의 위치는 매우 중요하다. Air barrier가 응력을 분산시키는 역할을 하기 때문이다.

또한, 압축응력은 0.00640[Mpa]으로 영구자석 Air barrier 부근에서 발생하였다.



〈그림 2〉 Principal Stress Tensor(1800rpm)



〈그림 3〉 Principal Stress Contour(1800rpm)

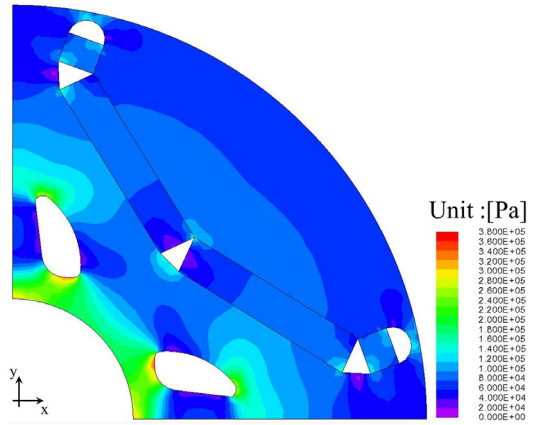
2.5 전동기 Mises Stress 해석

그림 4에 1800rpm 영역에서 전동기 회전자자의 Mises 응력 분포를 나타내었다. 응력의 크기 값은 주응력의 크기 값과 거의 일치한다. Mises 응력은 인장, 압축과 관계없이 어느 부분에 응력이 많이 작용하는지 한 눈에 알 수 있다. 하지만 인장응력이 작용하는지 압축응력이 작용하는지는 구별하기가 어렵다.

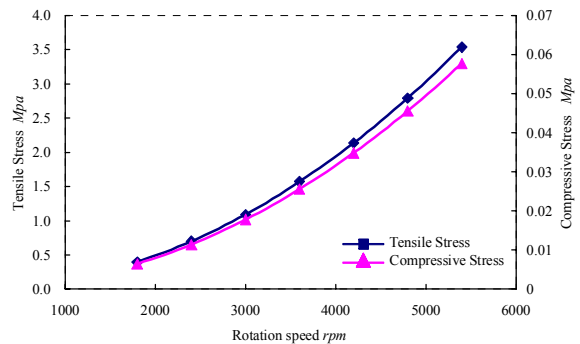
그림 3과 4에서 최대 응력은 Shaft 부근의 Air barrier에서 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 여기서 발생하는 응력보다 회전자 외경의 Rib에서 발생하는 응력에 주목할 필요가 있다. Rib에서 발생하는 응력 역시 비교적 높게 발생되고 있다. Rib은 매입형 영구자석 동기 전동기에서 구조적으로 매우 중요한 부분이다. Rib의 두께를 충분히 두껍게 하여 전동기의 안정성을 확보하여야 한다. 하지만 Rib의 두께를 두껍게 하면 영구자석에서 나오는 누설자속을 줄일 수 없고, Rib부분을 쉽게 포화시킬 수 없어 돌극비를 높일 수 없다.[6] 그러므로 응력해석을 통해 안전한 범위 내에서 Rib의 설계가 필요하다.

그림 5에 회전속도에 따른 인장 응력과 압축 응력의 비교를 나타내었다. 회전속도는 1800[rpm]~5400[rpm]까지 변화시켰다. 회전 속도에 비례하여 인장 응력과 압축응력의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

무 방향성 전기 강판은 압축 응력의 크기에 따라 자화 및 철손 특성이 변하게 되므로, 전동기 철심 설계 시 철손증가를 줄이기 위해 응력집중을 최소화 할 필요가 있다.



〈그림 4〉 Mises Stress Contour(1800rpm)



〈그림 5〉 회전속도에 따른 인장응력과 압축응력의 비교

3. 결 론

본 연구에서는 IPMSM의 회전자에 작용하는 응력해석을 수행하였다. 해석 수행 결과를 바탕으로 전동기 설계 시 최대 응력을 허용응력 이내에 존재하게 함으로써, 회전자의 속도를 최대화 할 수 있다. 또한 응력 해석을 통해 Rib의 설계나 Air barrier의 위치를 고려 해 볼 수 있어 전기 자동차의 요구 성능에 더욱 만족하는 전동기의 설계 기술을 확립할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 심재동, “전기자동차용 전기강판의 최근의 동향”, 2009
- [2] 김기남, 양해원, “병렬형 하이브리드 구동용 매입형 영구자석 동기전동기 설계에 대한 연구”, 전기학회 논문지, 제 53권 제12호, pp. 718-724, 12. 2004
- [3] 김미정, 김광수, 함상환, 조수연, 이주, “트랙션용 매입 자석형 동기 전동기와 유도전동기의 특성 비교”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 105-107, 10. 2010
- [4] 이경수, “열팽창 및 원심력을 고려한 고속전동기 회전자축의 최적설계” 한양대학교 석사학위논문 2010
- [5] K.Fujisaki, “Jmag User’s Conference”, 2003
- [6] 이태근, 김도진, 홍정표, “IPMSM의 Hole에 의한 Rib의 두께 감소와 전자기적 성능 향상”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 867-868, 07. 2009
- [7] 임채영, 손주완, 정상용, “EV 버스 구동용 매입형 영구자석 동기전동기의 고속 운전 특성 해석”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 97-99, 04. 2011