

FEA 기법을 이용한 40kw급 HEV용 Traction 모터 Magnet Eddy Current Loss 저감 설계

김경수*, 이성호**, 차현록**, 박성준*, 이규석**, 전승규**
 전남대학교 전기공학과*, 한국생산기술연구원**

Reduction of Magnet Eddy Current Loss in 40kW HEV Traction motor by using FEA method

Kyung-Su Kim*, Sung-Ho Lee**, Hyun-Rok Cha**, Sung-Jun Park*, Kyu-Seok Lee** Seung-Kyu Jeon**
 Chonnam National University*, Korean Institute of industrial technology**

Abstract - 본 논문은 FEA 기법을 이용하여 40kW급 HEV용 Traction 모터의 설계 및 고효율화를 위한 회전자 영구자석의 Eddy Current loss 저감 방안에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 FEA 기법을 이용하여 40kW급 HEV용 Traction 모터 설계 및 특성해석을 수행하여 FEA 해석기법의 타당성을 확보하였다. 또한 Traction 모터의 손실 저감을 위해 magnet부분의 eddy current loss 저감방안에 대해 논의했으며, FEA 기법을 이용하여 회전자 magnet이 Solid, 1/2, 1/4, 1/14 segments로 나눈 타입에 따른 결과를 비교 분석하였다. 그 결과 magnet형태를 기존의 Solid 타입에서 14segments 타입으로 분할 시, magnet 내부의 current path가 줄어들어 eddy current loss가 가장 많이 저감됨을 알 수 있었으며, 이를 통해 HEV용 traction 모터의 고효율, 고성능화 설계방안을 도출 할 수 있었다.

1. 서 론

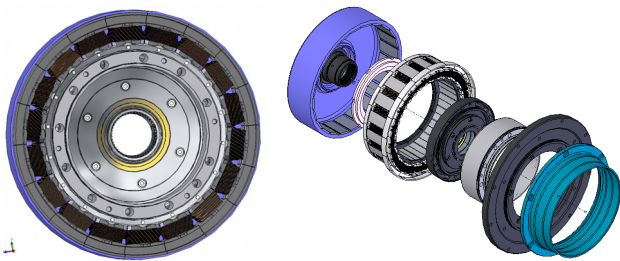
현재 고효율 자동차를 필두로 친환경 자동차 개발이 전 세계 자동차 산업의 화두로 부각되고 있으며, 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 자동차에 특화된 HEV용 Traction 모터의 개발은 최근에 들어서야 그 중요성이 인식되었고, 국내에선 현재 설계 및 시제품 제작에 관한 연구개발이 시작단계로 이루어지고 있다. 그중 고효율 자동차의 핵심 부품인 traction모터의 경우 고출력, 고효율 기술 개발이 요구되고 있으며 이러한 기술 개발을 위하여 모터 해석 및 설계/제조 기술의 개발에 대한 요구가 증대되고 있다.

따라서 우리는 FEA 기법을 이용하여 HEV용 40kW Traction모터의 설계 방법 및 magnet eddy current loss 저감에 따른 고효율 모터 설계 기술 개발에 관한 연구를 실시하였다.

2. 본 론

2.1 40kW급 HEV용 Traction 모터 제원

영구자석형 동기모터의 설계 및 해석방법에는 크게 퍼미언스 모델법(Permeance Model Method)과 유한요소 해석법(FEA: Finite Element Analysis)이 있으며, 본 논문에서는 40kW급 HEV Traction 모터 설계를 위해 FEA기법을 이용하였다. 그림 1은 FEA 해석에 사용될 Traction모터 모델이며, 표 1은 Traction 모터의 구체적인 설계 사양을 나타내었다. 우리는 최적 설계를 위하여 이론식, 경험식, 실험식, 통계식 및 독창적인 설계식을 조합하여 수치해석을 통한 파라미터 서베이법(Parameter Survey)을 적용한 정량적인 설계제원을 도출하였으며, 또한 FEA 해석을 이용하여 traction 모터의 특성을 해석하였다.



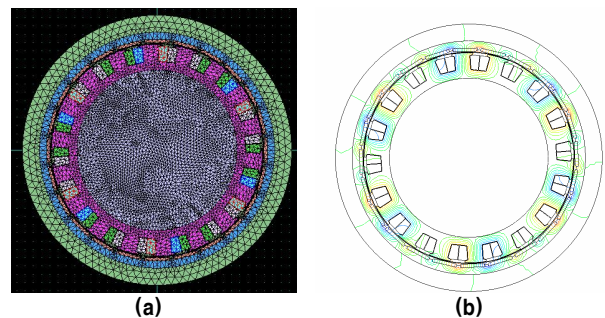
〈그림 1〉 40kW급 HEV Traction 모터 설계 모델

Phase and poles	3phase, 24 poles
DC voltage	220 V
Carrier frequency	100Hz
Rotational speed	1800 rpm
Diameter of stator and rotor	1425mm, 1280mm
Core length	56mm
Number of stator slot	16
Magnet	Nd-Fe-B(Remanent = 1.04T)
Steel plat for core	S09 (Silicon steel)

〈표 1〉 Traction 모터 구체적인 설계 사양

2.1.1 FEA 해석 결과

그림 2(a)는 해석하고자 하는 모델에 대한 FEA 해석 영역의 요소 분할도를 나타낸 것이다. 전자기 해석의 정밀도를 높이기 위하여 에너지가 전달되는 공극부분에 요소를 조밀하게 분할하였으며 모터 바깥부분의 누설자속 유무를 확인하기 위한 요소 분할을 시행하여 모델링하였다. 그림 2(b) FEA 해석결과 나타난 Traction모터의 등자속선을 나타낸 것으로 자속선이 회전자 밖으로 나오지 않으며 고정자 코어는 자기적인 포화가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 표 2는 이렇게 나타난 FEA해석결과를 정격상태와 최대상태로 비교 분석하였다. 분석결과 최대 상태의 출력은 설계 목표치에 도달하였으며, 이를 토대로 traction모터의 기본 설계사양을 수립할 수 있었다.

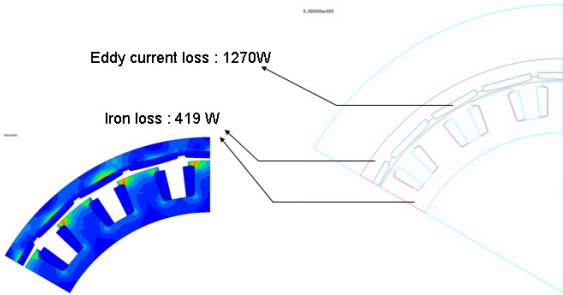


〈그림 2〉 (a) 해석 모델 요소 분할도 (b) 해석 모델 등자속선

항목		설계결과
정격상태	출력(kW)	20.9
	토크(Nm)	116.87
	효율(%)	91.3
최대상태	상전류(Arms)	75
	출력(kW)	41.55
	토크(Nm)	220.4
	상전류(Arms)	150

〈표 2〉 설계 모델 FEA 해석 결과

2.2 설계된 모델 손실 분포 분석을 통한 손실 저감 방안 분석



〈그림 3〉 설계된 Traction 모터 손실 분포

그림 3은 설계된 traction 모터 stator 코어의 철손 및 자석부의 eddy current loss를 나타내었다. 계산 결과 stator코어의 손실은 약 419W인 반면에 magnet부분의 eddy current loss는 약 1270W로 더 크게 나타나며, 결국 전체 모터 효율을 떨어트리는데 더 큰 영향을 주는 요소임을 알 수 있었다. 이와 같이 magnet의 eddy current loss가 크게 발생하는 이유는 회전자-고정자 치 슬롯간 자기회로의 Reluctance 변화에 의한 Magnet의 자속밀도 변화로 인한 공간고조파로 Eddy current loss가 발생하기 때문이다. 이와 같은 Eddy current loss는 다음과 같은 수식에 의해 결정된다[1-2].

$$P = \frac{2d}{\sigma} \int_0^b \int_0^a |J|^2 dx dy = \frac{2bd}{\sigma} |H|^2 \frac{\sinh \frac{2a}{\sigma} - \sin \frac{2a}{\sigma}}{\cosh \frac{2a}{\sigma} + \cos \frac{2a}{\sigma}} \quad (1)$$

$$- \frac{128a^4 d r^2 H^2}{\pi^5 \sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda_n^2 - 2\beta^2) \beta_{nr} \lambda_n^3 \sinh 2\beta_{nr} b}{(2n+1)^5 |\beta_n|^6 (\cosh 2\beta_{nr} b + \cos 2\beta_{nr} b)}$$

$$- \frac{128a^4 d r^2 H^2}{\pi^5 \sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda_n^2 + 2\beta^2) \beta_{nr} \lambda_n^3 \sinh 2\beta_{nr} b}{(2n+1)^5 |\beta_n|^6 (\cosh 2\beta_{nr} b + \cos 2\beta_{nr} b)}$$

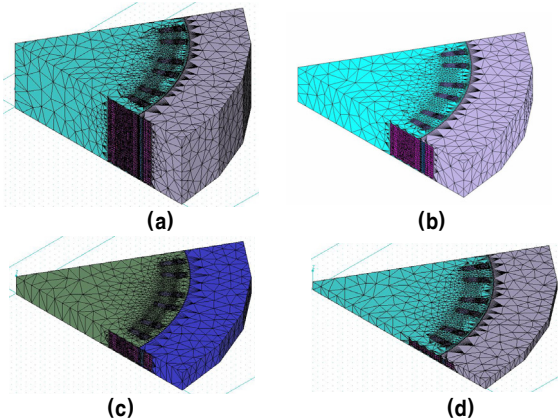
여기서 a, b, d는 magnet의 각각 가로, 세로, 높이 길이의 반경이며 δ 는 표면깊이(skin depth)라고 할 수 있다. 여기서 표면깊이 δ 가 a, b, d값에 비해 충분히 크다고 한다면 (1)식은 다음과 같이 정리할 수 있다

$$P \approx \frac{2a^3 b d \sigma}{3} |\mu H|^2 + \frac{128a^4 d \sigma}{\pi^5} |\mu H|^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tanh \lambda_n b}{(2n+1)^5} \quad (2)$$

반면에 δ 가 a, b, d값에 비해 충분히 작다고 한다면 (2)식은 다음과 같이 정리할 수 있다

$$P \approx \frac{2bd}{\sigma \delta} |H|^2 + \frac{2ad}{\pi^2 \sigma \delta} |H|^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2} = \frac{2bd}{\sigma \delta} |H|^2 \frac{b+a}{b} \quad (3)$$

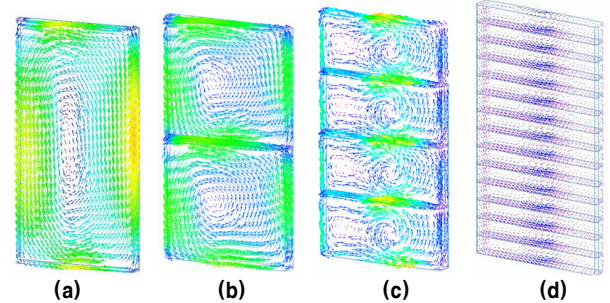
위와 같은 식에서 $2bdH^2/\sigma\delta$ 가 크면 클수록 magnet의 eddy current loss가 증가함을 알 수 있다. 결국 magnet의 current path 길이가 증가함에 따라 eddy current loss는 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 따라서 우리는 모터 효율 상승을 위해 magnet의 형태를 기존의 Solid 타입에서 1/2, 1/4, 1/14로 segments를 나눈 설계를 하였으며, 이는 magnet의 current path 길이 저감에 따른 eddy current loss를 저감하는 효과가 있으리라 예상하였다. 그림 5는 magnet의 타입을 크게 Solid, 1/2 segments, 1/4 segments, 1/14 segments로 분할하였을 때 magnet의 eddy current loss의 FEA 해석을 위한 3D 모델링 그림이다.



〈그림 5〉 Magnet의 형태에 Eddy current loss 해석을 위한 3-D modeling (a) solid (b) 1/2 (c) 1/4 (d) 1/14

2.4 Magnet type에 따른 magnet의 eddy current loss 결과

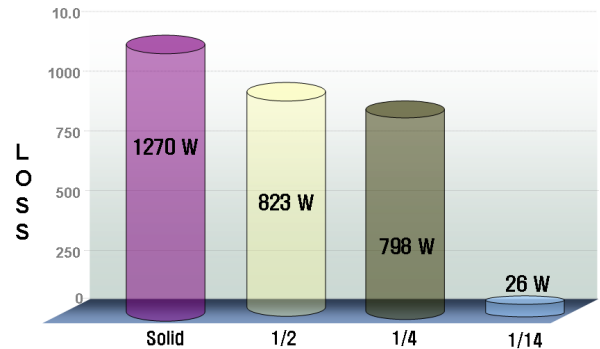
그림 6은 FEA 해석결과 나타나는 magnet부분의 eddy current path를 보여주고 있다. 그림 6(a)는 magnet이 기존의 Solid 타입 경우 결과이며, 분석결과 magnet 양 부분에 전류밀도가 포화 및 eddy current loss의 증가가 예상되었다. 하지만 그림 6(d)의 경우 1/14 segments로 분리되어 eddy current path가 짧아짐에 따라, magnet 양단의 전류밀도 포화가 나타나지 않았으며 그 결과 eddy current 저감을 예상할 수 있었다



〈그림 6〉 Magnet type에 따른 eddy current path (a) solid (b) 1/2 (c) 1/4 (d) 1/14

그림 7은 FEA 해석결과 나타나는 magnet부분의 eddy current loss를 비교 분석하였다. 해석결과, 기존의 Solid 타입은 eddy current loss의 분포가 1270W로 나타났지만, 1/14로 segments로 나누어진 모델은 약 26W로 크게 저감됨을 알 수 있었다. 이는 공간고조파로 나타나는 magnet의 자속밀도 변화에 Solid 타입보다 1/14 segments 타입이 eddy current loss 측면에서 더 유리하다는 걸 알 수 있었다. 따라서 우리는 magnet을 1/14로 변경하였을 때 고효율, 고성능의 traction 모터 설계가 가능하리라 판단할 수 있었다.

Unit : W



〈그림 7〉 Magnet type에 따른 magnet eddy current loss 결과

3. 결 론

우리는 FEA 기법을 이용하여 40kW급 HEV Traction 모터의 설계 및 magnet의 형태에 따른 eddy current loss 저감 방안에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 Traction 모터의 회전자 magnet을 각각 1/2, 1/4, 1/14 segments로 나눈 타입에 따른 Eddy current loss를 FEA 기법을 통해 비교 분석하였다. 그 결과 magnet 형태를 기존의 Solid 타입보다 14 segments 타입으로 분할 시, magnet 내부의 current path가 줄어들어 공간고조파로 나타나는 eddy current loss가 14 segments 타입에서 더 유리하다는 걸 알 수 있었다. 향후 위와 같은 magnet segments 분할 기법이 실제 설계에 적용된다면 보다 고효율, 고성능의 모터 설계가 가능하리라 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Katsumi Yamazaki, Atsushi Abe, "Loss Analysis of Interior Permanent Magnet Motors Considering Carrier Harmonics and Magnet Eddy Currents Using 3-D FEM", IEMDC '07. IEEE International Volume 2, Page(s):904 - 909.
- [2] S. Wakao, K. Fujiwara, T. Tokumasu and A. Kameari, "Useful formulas of analytical investigation in electromagnetic field computation (part6)", The Paper of Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, SA 0515, 2005