

## 초고속 전동기의 특성해석

**최길선\***, 정중현\*, 홍도관\*\*, 우병철\*\*, 정연호\*\*  
(주)디엔디이\*, 한국전기연구원\*\*

### Characteristics Analysis of High Speed Motor

Gil-Sun Choi\*, Jong-Hyun Jeong\*, Do-Kwan Hong\*\*, Byung-Chul Woo\*\*, Hyun-Ho Jung\*\*  
DNDE Inc.\*, KERI\*\*

**Abstract** - 초고속 전동기는 일반 전동기보다 높은 주파수로 인해 철손이 증가하게 된다. 철손의 증가는 더 높은 온도상승을 야기하게 되고, 전동기를 냉각시키지 못하면 열응력과 열화등으로 수명을 단축시킨다. 본 논문에서는 초고속 전동기의 자계-열 연성해석을 통해 전동기의 특성을 해석, 예측하고자 한다.

$$T_e = \frac{P_m}{\left(\frac{\omega_r}{P/2}\right)} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (2)$$

#### 1. 서 론

최근 지구온난화, 기상이변, 오존층 파괴 등 환경문제와 석유 에너지 자원의 고갈위기에 따라 신재생에너지, 친환경 차량, 고효율 전기기기 등의 개발을 위한 노력이 계속되고 있다. 특히 초고속 전동기는 최근 공장기계 및 신재생 에너지 분야에서 매우 주목받고 있는 연구 분야이다. 초고속 전동기는 고속 회전을 이용한 고회출력의 동력 구동장치로 일반 산업용 전동기보다 소형, 경량, 고회출력, 고효율 성능을 얻을 수 있어 그 응용이 점차 확대되고 있다.

초고속 전동기는 초고속 구동이라는 특성에 의해 높은 주파수의 전류를 갖기 때문에 저속 전동기에 비해 손실에 의한 온도상승이 높다. 때문에 손실해석을 통한 전동기 온도상승의 해석 및 예측을 통한 전동기 설계가 필요하다.

일반적으로 초고속 전동기에서는 동손보다 철손의 비중이 높으며, 철손 중에서 Eddy loss를 줄이기 위해 0.2t의 강판을 적층하여 설계하였다.

본 연구에서는 철손 해석을 위해 Steinmetz method를 이용하였고, 각 손실분포를 해석하기 위해 Finite Element Method도 사용하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 초고속 전동기 사양

본 논문에서는 3상 2극 영구자석 전동기를 설계하고, <표 1>에 전동기 사양을 나타내었다. 또한 <그림 1>은 초고속 전동기 모델을 나타내었다.

**<표 1> 초고속 전동기 사양**

전동기 항목	전동기 사양
극 수	2
회전자 외경/ 내경	8 / 6.4 [mm]
고정자 외경 / 내경	44 / 9 [mm]
적층 길이	15 [mm]
슬롯 수	6

전동기의 전기적 입력 $P_m$ 은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

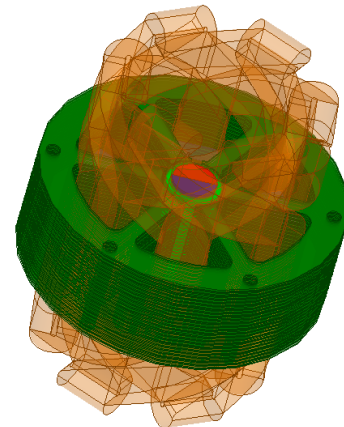
$$P_{in} = \frac{3}{2} [R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \frac{d}{dt} (\lambda_{ds} i_{ds} + \lambda_{qs} i_{qs}) + \omega_r (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})] \quad (1)$$

여기서,  $R_s$ 는 고정자 상저항,  $\omega_r$ 는 동기 전기 각속도,  $i_{ds}, i_{qs}$ 는 d-q 축 전류,  $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 는 d-q축 고정자 쇄교자속을 의미하고, 첫 번째 항은 동손, 두 번째 항은 자기 에너지의 시간에 대한 변화율, 그리고 마지막 항은 기계적 출력으로 표현할 수 있다. 따라서 발생 토크  $T_e$ 는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

한편, d-q축 쇄교자속 계산은 다음 식 (3)과 같이 각 권선 단면적의 벡터포텐셜 A 평균값으로 계산한다.

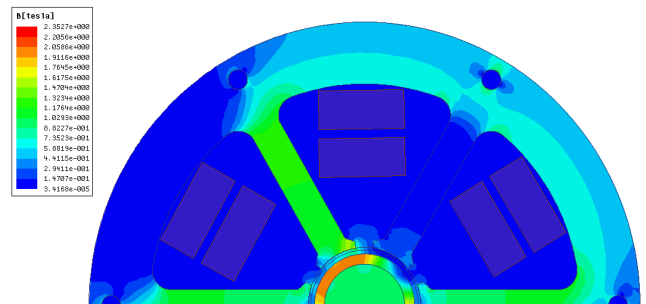
$$\lambda = \left( \frac{\iint_{S_1} A_1 dS}{S_1} - \frac{\iint_{S_2} A_2 dS}{S_2} \right) l \quad (3)$$

여기서,  $l$ 은 축 방향 길이,  $S_1$ 과  $S_2$ 는 전류방향별 N번 감긴 권선의 총 단면적을 의미한다.



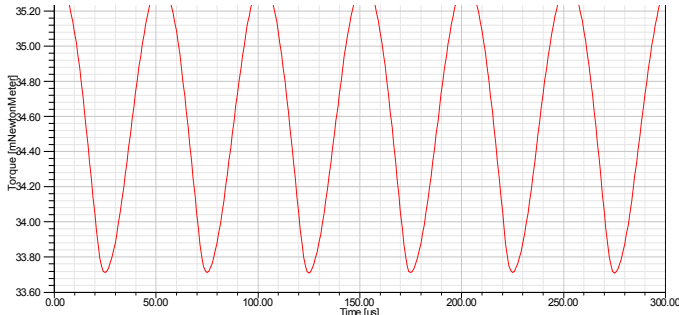
**<그림 1> 초고속 전동기 3D모델**

<그림 2>는 설계된 전동기의 자속밀도를 보여주고 있다.



**<그림 2> 자속밀도 특성(t=0s)**

<그림 3>은 전동기 출력 토크를 나타내고 있다.



〈그림 3〉 토크 특성

## 2.2 전동기 손실

초고속 전동기의 열원은 손실과 관계있으며, 크게 철손과 동손으로 나눌 수 있다. 철손은 Hysteresis loss와 Eddy loss로 나눌 수 있고, 동손은 저항에 의한 Joule Heat로 표현할 수 있다.

### 2.2.1 철손

일반적으로 철손은 자성체의 자속이 시변일 때 발생하는 손실로 Hysteresis loss와 Eddy loss로 나눌 수 있으며, Steinmetz method를 이용하여 다음 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$P_c = P_k + P_e + P_a \quad (4)$$

$$= k_h f B^n + k_e (fB)^2 + k_a (fB)^{1.5}$$

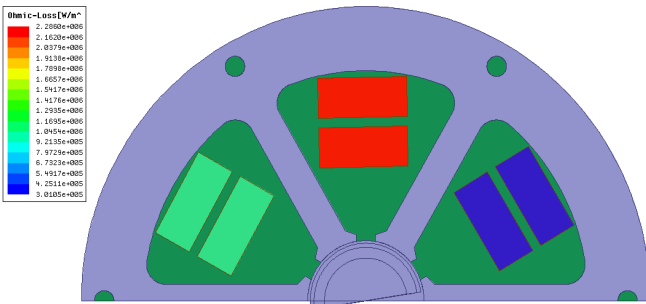
여기서,  $P_h$ 는 Hysteresis loss coefficient,  $P_e$ 는 Eddy loss coefficient,  $P_a$ 는 Anomalous coefficient, n은 Steinmetz constant를 의미한다.

### 2.2.2 동손

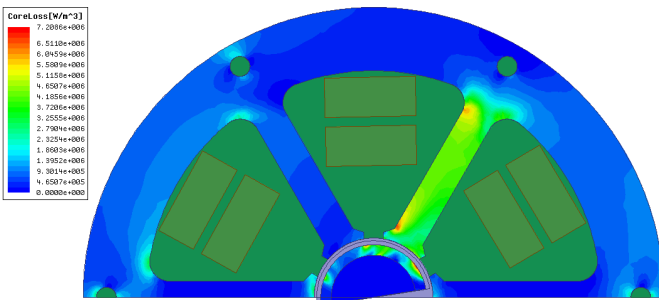
동손은 저항에 의한 Joule Heat로 초고속 전동기의 경우 높은 주파수로 인한 침투깊이를 고려하여 얇은 소선을 사용한다. 동손은 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$P = 3I^2R \quad (5)$$

〈그림 4〉와 〈그림 5〉은 초고속 전동기 모델의 손실 분포를 나타내었다.



〈그림 4〉 동손 특성 (t = 7.497e-6s)



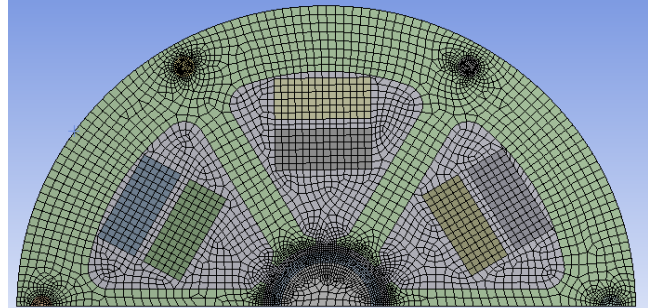
〈그림 5〉 철손 특성 (t = 7.497e-6s)

## 2.3 전동기 열해석

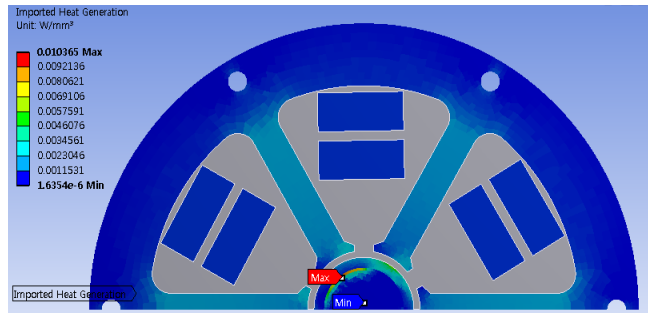
초고속 전동기는 저속 전동기에 비해 손실에 의한 온도상승이 높기 때문에 손실해석을 통한 전동기 온도상승의 해석 및 예측을 통한 전동기 설계가 필요하다.

전동기의 공극부분에서의 높은 속도와 온도를 고려하여 격자를 밀집시켰다.

〈그림 6〉는 열해석을 위해 생성된 격자를 나타내었다. 〈그림 7〉은 전동기 각 부분의 손실분포를 나타내고 있다.

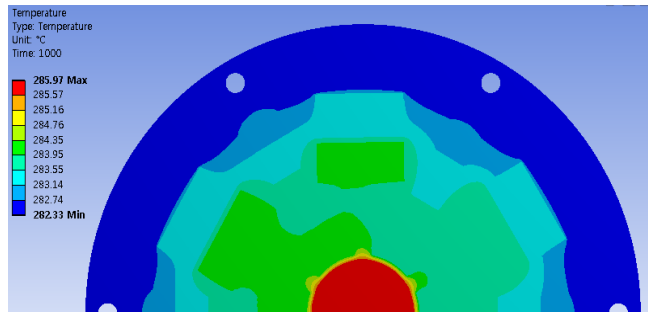


〈그림 6〉 열해석 모델의 격자



〈그림 7〉 전동기 손실(열원)분포

〈그림 8〉은 열해석 결과를 나타내었다.



〈그림 8〉 전동기 온도분포

〈그림 7〉에서 보듯 회전체 부분의 손실이 크고, 그로인해 〈그림 8〉에서 확인할 수 있듯 회전체 부분의 온도상승이 극심함을 확인할 수가 있다.

## 3. 결 론

전동기의 손실해석 결과 값을 전동기의 열원으로 사용하여 전동기 온도상승 해석을 하였다. 이때 회전자부분의 열이 극심함을 확인할 수 있었다. 하지만 초고속 전동기의 경우 냉각을 고려하여 전동기의 온도상승을 예측이 필요하다. 따라서 냉각방식에 따른 유동해석과 냉각에 따른 온도분포, 전동기에서의 열전도도를 동시에 고려한 복합열전달 해석의 수행이 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 김태균, “초소형 압축기용 초고속 전동기 내부의 복합 열전달 해석”, 유체기계저널, 제1호, PP.14-21, 2001.
- [2] 정연호, “초고속 전동기의 기술동향”, 전력전자학회지, 제6호, PP.21-24, 2006.