

### 3상 유도 전동기에서의 열손실 사상법을 이용한 열전달-전자기장 연계 수치 해석 모델 개발

김동희\*, 김치원\*, 정혜미\*, 이주\*\*, 엄석기\*  
 한양대 기계공학과\*, 한양대 전기공학과\*\*

### The Model Development of Coupled Thermo-Electromagnetic Analysis in Three-phase Induction Motors by using Heat loss Mapping Method

Donghee Kim\*, Chiwon Kim\*, Hye-Mi Jung\*, Ju Lee\*\*, Sukkee Um\*\*  
 Hanyang University\*, HanYang University\*\*

**Abstract** - A comprehensive thermo-electromagnetic model has been developed to estimate temperature and electromagnetic distribution in an three-phase induction motor under steady state operation. Electromagnetic modeling enables us to predict thermal dissipation rates by eddy-current loss and copper loss in induction motors. Non-uniform temperature distributions are investigated to account for the strong effect of local temperature build-up on the motor performance and expected life-span. For more accurate thermal modeling purpose, Heat loss mapping method, which is matched up with electromagnetic losses and volumetric heat source, is developed and performed analysis. Heat loss mapping method can be greatly used as a design or diagnostic tool for three-phase induction motors with complex structural electromagnetic fields.

〈표 1〉 3kW급 3상 유도 전동기 제품 사양

|       |              |
|-------|--------------|
| 종 류   | 유도 전동기       |
| 출 력   | 3 kW         |
| 전 압   | 380V, 1000Hz |
| 속 도   | 30,000 rpm   |
| 토 크   | 0.9 Nm       |
| 냉각 방식 | 수냉식          |

$$\dot{Q}_{copper} = \frac{W_{coil}}{V} = \frac{I^2 \left( \rho \frac{l_{coil}}{A_{coil}} \right)}{A_{coil} \times l_{coil}} = \rho \left( \frac{I}{A_{coil}} \right)^2 = \rho J^2 \quad (1)$$

#### 1. 서 론

최근 세계적으로 에너지 문제가 대두되면서 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가정용·산업용 에너지원으로 많이 사용되고 있는 유도 전동기 분야에서도 기존의 전동기 효율을 개선하기 위한 연구가 수행중이다. 산업용 3상 유도 전동기의 경우 100kW 이상의 고용량 전동기로서 효율이 높아져도 많은 손실이 열에너지의 형태로 에너지 소산이 발생하게 된다. 따라서 효과적인 열전달은 3상 유도 전동기의 효율 증대로 이어지기 때문에 전동기 열유동 해석은 중요하다. 전동기 내부의 온도 분포는 제품의 내구성 및 수명과 연관되며, 결국 제품의 신뢰성에 큰 영향을 미치기 때문에 전동기에 대한 열해석은 지속적으로 진행되었다. 초기 전동기 열해석은 전기 회로 이론과 열전달의 사상성을 이용하여 등가 회로를 이용하여 수행되었다. [1-2] 하지만, 단순화 열해석엔 도움이 되지않은 정확한 예측이 힘들었다. 이후 FEM에 기반을 두고 전자기장 해석 후, 열원을 균일하게 한 요소에 적용하는 집중 열용량법에 대한 연구가 진행되었다. [3-4] 본 연구에서는 기존의 집중 열용량법에 비해 정확도가 높은 열손실 사상법(Heat loss Mapping Method, HMM)을 개발하고, 이를 이용하여 3상 유도 전동기의 열유동 해석을 수행하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 수치 모델 개발

3상 유도 전동기의 전자기장 해석은 전동기 구동 시 발생하게 되는 손실이 열유동 해석에서 열원으로 사용되기 때문에 매우 중요하다. 본 연구에서는 산업용으로 사용되는 3kW급 3상 유도 전동기를 기준 모델로 선정하고 이를 Maxwell<sup>®</sup>을 이용하여 전자기장 해석을 수행하였다. 전자기장 해석을 수행 후 열손실 사상법(HMM)을 이용하여 열유동 해석을 수행하였다.

##### 2.1.1 전자기장 해석 모델

3kW급 3상 유도 전동기를 기준 모델로 선정하여 정격 구동 상태에 대하여 전자기장 해석을 수행하였다. 기준 모델로 선정된 3kW급 3상 유도 전동기에 대한 제원을 표1에 정리하였다. 3상 유도 전동기의 전자기장 해석은 자속 밀도(B field)와 자계(H field)를 유한요소법을 이용하여 계산하게 된다. 이를 통하여 고정자 및 회전자 등 각 영역에 대해 철손(core loss)를 계산하게 된다. 해석의 신뢰성을 높이기 위하여 동손(copper loss)의 경우, 식 (1)에 의해 이론적으로 계산하게 된다. 식 (1)에 의하면 단위 부피당 동손을 계산할 수 있으며, 해석 결과로 검증도 가능하다. 열유동 해석을 위하여 열원이 단위 부피당 발열이 계산되어야 하기 때문에 식 (1)과 같이 계산하는 것이 더 적절하다고 판단한다.

##### 2.1.2 열유동 해석 모델

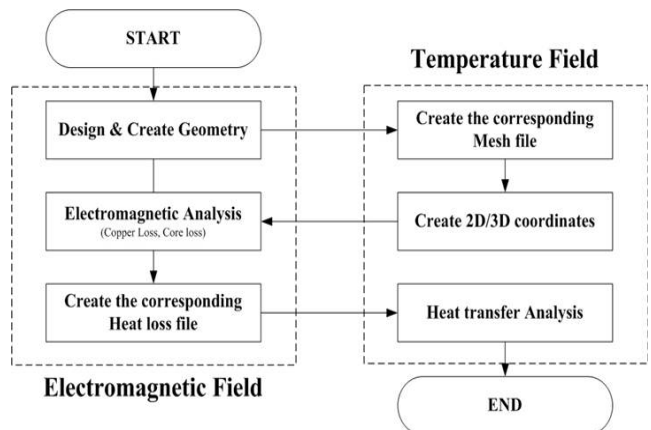
3kW급 3상 유도 전동기의 열유동 해석은 Fluent를 이용하여 열해석을 수행하였다. 식 (2)는 에너지 보존 방정식을 나타낸 것으로써 단위 부피당 발열량이 전자기적 손실에 의한 것으로 계산이 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (u_i T) = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) + S_T \quad (2)$$

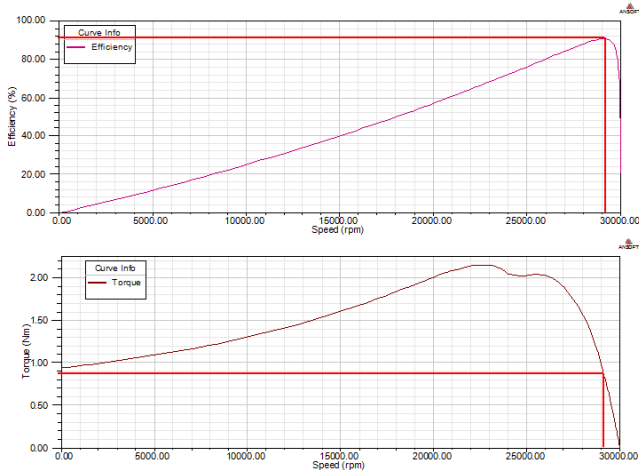
여기서 T는 온도,  $u_i$ 는 속도,  $\alpha$ 는 열확산계수, 그리고  $S_T$ 는 단위부피당 발열량을 나타낸다. 초기 온도는 상온(25℃)을 기준으로 하였으며, 외부 프레임의 경우 프레임의 운동이 없기 때문에 자연 대류 경계 조건을 설정하였다.

##### 2.1.3 열손실 사상법(Heat loss Mapping Method, HMM)

3상 유도 전동기에서 기존 열해석은 집중 열용량법을 많이 사용하였다. 하지만 기존 집중 열용량법이 각 영역별 손실이 동일하다고 가정했기 때문에 정확도가 높지 않았다. 전자기적 해석과 열유동 해석에 사용하는 격자를 공유하여 전자기적 손실이 열유동 해석에서의 단위 부피당 발열량에 정확히 일치시키는 열손실 사상법은 기존의 방법으로 계산 시간은 기존 방법과 유사하나 정확도가 높은 장점을 지니고 있다. 열손실 사상법의 해석 흐름도를 그림 1에 나타내었다. 전자기장 해석 영역과 열유동 해석 영역의 1:1로 일치함으로써 영역별로 국부적인 손실 분포를 정확하게 반영하여 열유동 해석에 사용할 수 있게 되었다.



〈그림 1〉 열손실 사상법 해석 흐름도



〈그림 2〉 3상 유도 전동기 속도에 따른 효율 및 토크 특성

## 2.2 수치 모델 해석 결과

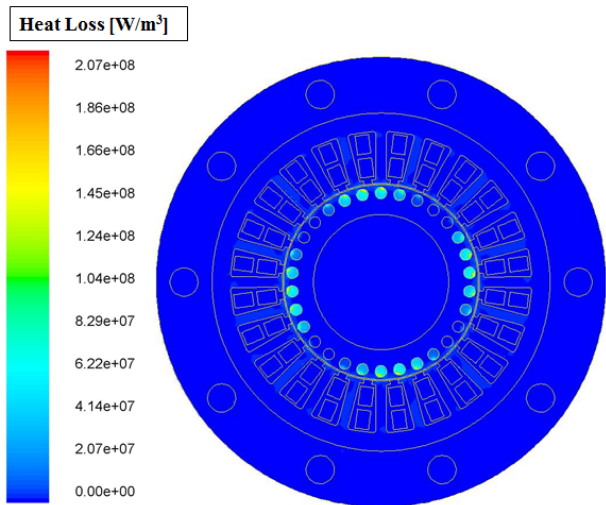
본 연구에서는 열손실 사상법을 이용하여 3상 유도 전동기의 전자기장 및 열유동 해석을 수행하였다. 3kW급 기준 모델에서의 효율은 약 90.5% 정도로 예측되었으며, 모든 전자기적 손실은 열에너지로 소산되었다. Maxwell<sup>®</sup>을 이용하여 예측한 전자기적 손실과 열손실 사상법(HMM)을 이용하여 Fluent<sup>®</sup>에서 열원으로 사상한 결과를 비교함으로써 전자기장 계산 영역(domain)과 열유동 계산 영역이 일치함을 확인하였다.

### 2.2.1 3상 유도 전동기의 전자기장 해석 결과

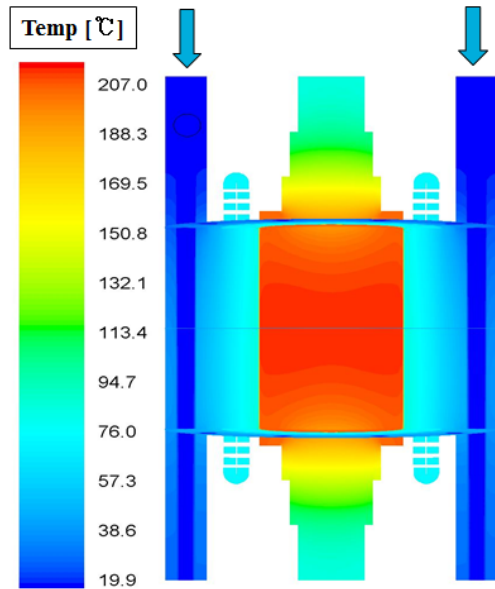
본 연구에서 기준 모델로 선정된 3kW급 3상 유도 전동기는 정격 속도 30,000rpm에서 구동하는 스피들 전동기로서 0.9Nm의 토크로 구동하는 전동기이다. 그림 2는 정격 속도에서의 효율과 토크 특성을 나타낸 그림이다. 설계 기준에 일치하는 FEM 해석 결과를 도출하였다. 효율 특성에서 약 10% 정도의 손실이 생기게 됨을 알 수 있다. 그림 3은 전자기장 해석을 통하여 계산된 철손 분포를 나타낸 그림이다. 권선부에 손실이 나타나지 않은 이유는 이론적인 계산을 통하여 손실을 계산하였기 때문에 전자기장 해석 영역으로부터의 사상을 하지 않았기 때문이다. 또한 식 (2)에서 보듯이, 에너지 방정식의 생성항이 단위 부피당 생성 및 소멸량을 나타내기 때문에 그림 3에서 손실량이 크게 나타나게 된다.

### 2.2.2 3상 유도 전동기 내부의 열유동 해석 결과

그림 3과 같이 전자기장 해석을 통한 손실과 열유동 해석 영역으로 사상된 손실량은 컨투어 뿐만 아니라 수치적으로도 일치하게 나타남으로써 두 해석 영역간의 사상(mapping)이 원활하게 진행됨을 확인하였다. 그림 4는 사상된 철손과 식 (1)에 의해 계산된 동손을 이용하여 정상 상태에서 구동하는 3상 유도 전동기의 온도 분포를 나타낸 결과이다.



〈그림 3〉 열유동 해석 영역에 사상된 3상 유도 전동기의 철손 분포



〈그림 4〉 3상 유도 전동기의 온도 분포

그림 4에서 화살표 부분은 프레임 외부에 냉각을 위한 유로를 나타낸 그림이다. 이로 인하여 유로의 온도는 거의 변하지 않음을 알 수 있는데 이는 이론적으로도 검증이 되었다. 회전자 중심 부분이 고온임을 알 수 있는데 이는 회전자와 고정자 사이의 공극(air-gap)으로 인하여 열전달이 원활하지 않아서 나타난 결과이다. 권선에서의 온도는 약 80°C 정도임을 알 수 있는데 이는 주변의 냉각 유로에 의한 냉각 효과가 크다는 것을 의미한다. 따라서 3상 유도 전동기의 경우 공극으로 인하여 단열 효과가 생기게 되는 회전자 중심 및 샤프트의 온도를 낮춰야 하는 문제가 발생함을 알 수 있다.

## 3. 결 론

본 연구를 통하여 3상 유도 전동기의 전자기적 손실을 예측하고 온도 분포를 파악할 수 있는 열손실 사상법(HMM)의 수치 모델을 성공적으로 개발하였다. 본 연구에서 선정된 3상 유도 전동기 기준 모델의 경우 약 90.5%의 효율을 나타내었으며, 전자기적 손실은 열에너지의 형태로 소산되었다. 전자기장 해석을 통하여 계산된 철손 및 이론적인 계산을 통한 동손을 열유동 해석장에 사상하는 열손실 사상법으로 3상 유도 전동기의 열해석을 수행하였다. 그 결과, 회전자와 고정자 사이의 공극에 의해 회전자와 샤프트의 온도가 높게 나타났다. 이는 공기에 의한 열전달이 거의 발생하지 않았음을 의미하게 된다. 전자기장 해석의 경우 회전자의 속도와 토크를 설계 기준에 만족하였다. 이론적인 예측 값과 거의 유사한 양상을 보이며, 향후 온도 측정 실험 및 전동기 효율을 측정하여 전자기장 해석 및 열유동 해석 각각의 신뢰성을 확보할 예정이다. 본 연구에서 개발한 열손실 사상법은 향후 전동기 설계 단계에서부터 온도에 대한 부분도 고려할 수 있기 때문에 많이 활용될 것으로 판단한다.

## [참 고 문 헌]

- [1] P. H. Mellor, D. Roberts and D. R. Turner, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design", Inst. Elect. Eng. Proc. B, Vol. 138, pp. 205-218, 1991
- [2] N. Mezani, N. Takorabet and B. Laporte, "A combined electromagnetic and thermal analysis of induction motors", IEEE Trans. Magn., Vol. 41, pp. 1572-1575, 2006
- [3] L. Alberti and N. Bianchi, "A coupled thermal-electromagnetic analysis for a rapid and accurate prediction of IM performance", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, pp. 3575-3582, 2008
- [4] D. G. Dorrell, "Combined thermal and electromagnetic analysis of permanent-magnet and induction machines to aid calculation", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, pp. 3566-3574, 2008