

# 매입형 영구자석 전동기의 열 등가 회로 해석

## Thermal Network Analysis of Interior Permanent Magnet Machine

임재원\*                  서장호\*                  이상엽\*                  정현교\*\*\*  
Lim, Jaewon              Seo, Jang-Ho              Lee, Sang-Yub              Jung, Hyun-Kyo

---

### ABSTRACT

Recently, Interior Permanent Magnet Machine(IPM) is widely used for traction motor in the high speed train. Due to the high efficiency and high power density of the IPM, it has lots of heat sources such as iron loss and copper loss. These heat sources can cause the demagnetization of permanent magnet, losses in output power and even irreversible defect of the IPM. To prevent the power loss caused by heat sources, the accurate thermal analysis has to be carried out.

For the thermal analysis of the IPM, the thermal network is designed for this traction motor. The thermal analysis has executed at rated speed operation. The result of thermal network analysis can be used for the IPM design process.

---

### 1. 서 론

최근 높은 효율과 출력밀도를 갖는 매입형 영구자석 전동기가 고속 전철용 견인전동기로 응용되고 있다. 매입형 영구자석 전동기는 운전 특성상 고속 동작에 의한 많은 철손과 마찰손의 발생, 고 출력밀도에 의한 많은 동손의 발생이 불가피 하다. 이러한 많은 열원의 발생은 회전자에 위치하는 영구자석의 열감자 문제와 고정자의 저항증가에 따른 동손의 증가를 유발할 수 있으며 냉각이 정상적으로 이루어지지 않을 경우 전동기의 출력의 감소가 발생할 수 있고, 심하게는 전동기의 영구적인 손상으로 이어질 수 있다. 이러한 전동기의 출력 감소 및 손상을 막기 위해서는 정확한 손실 및 열원의 계산이 선행되어야 하며 계산된 열원을 바탕으로 전동기의 정밀한 열해석 수행이 이루어져야 한다.

매입형 영구자석의 열해석을 위한 방법으로는 유한요소법을 이용한 해석과 열등가 회로망을 이용한 해석법등 다양한 방법이 존재하는데 본 논문에서는 해석시간이 빠르고 다양한 해석 조건에 대해 적용이 가능한 열 등가회로망을 이용한 열해석을 수행하였으며 정상상태 해석을 수행하였다. 이러한 해석 결과를 통해 전동기 설계의 기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

---

\* 서울대학교, 전기역학 연구실, 박사과정, 정희원  
E-mail : [einses@elecmech.snu.ac.kr](mailto:einses@elecmech.snu.ac.kr)  
TEL : (02)880-7262 FAX : (02)878-1452  
\*\*\* 서울대학교, 전기역학 연구실, 교수

## 2. 해석 모델

매입형 영구자석 전동기(IPM)의 형상을 그림 1에 나타내었다. 회전자의 영구자석에 의한 자화방향은 반경방향의 중심축에 평행한 방향으로 자화되어 있다.

IPM은 영구자석이 회전자에 매입되어 있어 d-q축 자기 저항차이에 의한 릴럭턴스 토크성분을 부가적으로 가지므로 단위체적당 큰 토크를 얻을 수 있는 장점을 지닌다.

또한 유효공극이 작아 고정자의 인덕턴스가 크기 때문에 전기자 반작용 효과가 현저하여 고정자 전류에 의하여 공극자속을 감소시킬 수 있으므로 일정 출력 영역에서 약계자 운전이 가능하여 매우 높은 속도까지의 운전이 가능하다. 아울러, 영구자석이 매입된 구조로 회전자의 기계적 견고함이 우수하여 견인 전동기로써의 그 응용범위가 확대되고 있다.

표 1은 해석 모델의 설계 사양을 나타낸다. 권선의 절연 등급이 H종이기 때문에 주변 온도를 고려하였을 때, 권선의 최고 온도는 180도를 넘기면 안 된다.

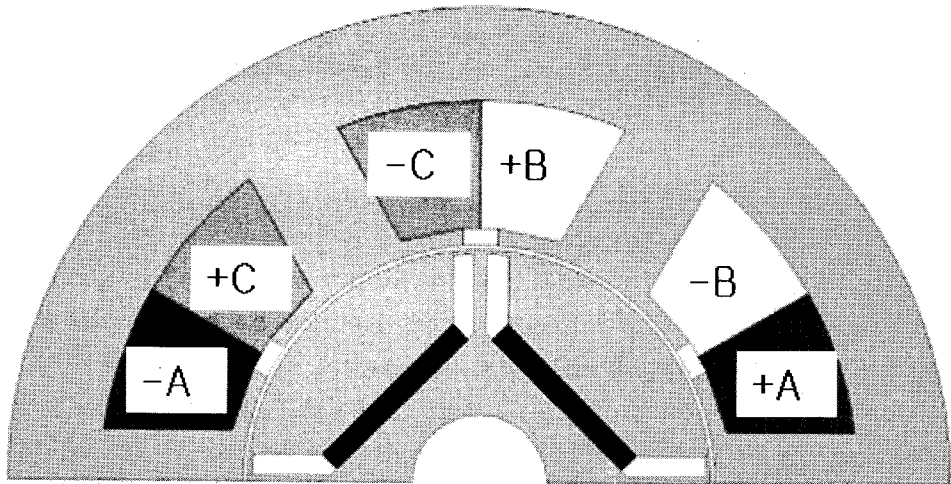


그림 1. 해석 모델의 2차원 단면도

표 1 해석 모델의 설계 사양

극수	4	
상수	3	
정격 전류	2A	
정격 주파수	80Hz	
코일	권선	집중권
	턴수	35
	저항	3.5 ohm
권선 절연등급	H종	
정격 속도	2400 rpm	
공극길이	0.5 mm	

전동기의 열 해석 시 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 전동기의 형상은 축을 중심으로 대칭이다.
2. 비대칭적 온도분포의 영향은 무시한다.

3. 각 실린더는 열적인 측면에서 반경방향 대칭이다.
4. 전동기 내부의 열원은 균일하게 분포한다.
5. 축방향 열흐름은 전동기의 축을 제외하고 무시한다.

전동기의 열원은 동손으로만 한정하였다. 전동기의 코일에서 발생하는 동손은 다음 과 같은 식을 이용하여 계산한다.

$$W_{copper} = 3 \times I_{max}^2 \times R_{phase} \quad (1)$$

여기서,  $I_{max}$ 는 상전류 값이고  $R_{phase}$ 는 상 저항을 나타낸다.

### 3. 해석 과정

열이 전달되는 방법은 크게 전도, 대류, 복사 등의 세 가지로 분류된다. 본 논문에서는 전동기의 열이 주로 전도와 대류에 의해서만 전달되므로 복사에 의한 열전달은 무시하였다.

#### 3.1 전도 열전달

한 물체 안에 온도 구배가 존재한다면 고온부에서 저온부으로 에너지가 전달된다. 이때 에너지는 전도에 의해서 전달되고, 단위 면적당 열전달률은 면적에 수직인 방향의 온도구배에 비례하므로 다음과 같이 표현한다[1], [2].

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

여기서,

$q$ 는 열 전달률이고, 단위는  $kW/m^2$ 이다.

$T$ 는 온도이고 단위는  $^{\circ}C$ 이다.

$\frac{\partial T}{\partial x}$ 는 열이 전달되는 방향으로의 온도구배이며 단위는  $^{\circ}C/m$ 이다.

$k$ 는 물질의 열전도 계수(thermal conductivity)이고 단위는  $kW/(m \cdot ^{\circ}C)$ 이다.

음의 부호는 열이 고온에서 저온으로 흐른다는 열역학 제 2법칙을 만족시키기 위해 붙인 것이다.

전동기 열해석에 사용한 대표적인 물질의 열전도 계수는 다음과 같은 간단한 수식을 이용하여 사용하였다.

$$k_{ir} = -0.024 T + 65.552 [W/(m \cdot ^{\circ}C)] \quad (3)$$

$$k_{cu} = -0.058 T + 400.925 [W/(m \cdot ^{\circ}C)] \quad (4)$$

$$k_{air} = 0.0000795 T + 0.00246 [W/(m \cdot ^{\circ}C)] \quad (5)$$

온도가 시간에 따라 변하고 물체 내에 열원이 있는 경우를 생각하면, 두께가  $dx$ 인 요소(element)에 대해서 에너지퍼형 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [1], [2].

$$E_{IN} + E_{generated} = \Delta U + E_{out} \quad (6)$$

여기서,

$E_{IN}$ 는 검사체적에 유입되는 에너지이고, 단위는 joules(J) 또는  $kWh$ 이다.

$\Delta U$ 은 저장에너지의 변화량이고, 단위는  $kWh$ 이다.

### 3.2 대류 열전달

유체와 접촉하고 있는 전도체에서 열전달이 발생한다면, 그 유체는 외적인 펌프작용(강제대류)에 의하거나 내부 온도차에 의해 유체 내부에서 생성되는 부력(자연대류 또는 자유대류)에 의해 운동할 것이다. 대류 열전달의 효과를 수학적으로 나타내기 위해 Newton의 냉각법칙을 이용하면 다음 식과 같다 [1], [2].

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (7)$$

이 식에서 열전달율은 벽과 유체간의 온도차와 표면적 A에 관계된다. h를 대류 열전달 계수라고 한다. 본 논문에서는 자연 냉각방식에 의한 온도해석을 수행하므로 자연대류(natural convection)만 고려한다.

### 3.3 열 저항 모델

열 회로망을 이용하여 열 저항 모델을 구성하기 위해서는 먼저 진동기 각 부분에 열 저항계산을 위한 제어 체적을 설정하여 나누어 주어야 한다. 본 논문에서는 제어 체적을 나눈 뒤 각 제어 체적의 중심에 절점을 부여하는 방법을 사용하였다. 각각의 절점 사이에는 열 저항이 위치하게 되며 위와 같은 방법으로 구성된 열 저항은 다음과 같은 방법으로 계산할 수 있다.[3]

#### 3.3.1 고정자 치

고정자 치의 경우는 진동기의 주된 열원이 존재하는 권선부와 연결되어있는 부분과 공기와 맞닿아 있는 부분의 저항을 나누어 생각해 주어야 한다. 권선부와 닿아있는 부분은 권선부가 절연지에 의해 쌓여 있기 때문에 절연지의 특성을 모의하여 접촉 저항의 형태로 나타내 주어야 한다. 또한 내기와 닿아있는 부분의 저항은 다음식과 같이 생각해 줄 수 있으며  $A_{t-air}$ 는 치와 내기와의 접촉 면적이다.

$$R_{t-air} = \frac{1}{h \times A_{t-air}} \quad (8)$$

#### 3.3.2 고정자 요크

고정자 요크는 안쪽으로는 고정자 치와 연결이 되어있고 바깥쪽으로는 외기와 접촉하고 있다. 또한 고정자의 안쪽 표면의 경우는 내기와 맞닿아 있기도 하기 때문에 이를 고려한 저항의 열 계산이 필요하다. 먼저 고정자 치와 고정자 요크 간의 저항은 두 절점 사이의 유효 길이  $L_{t-sy}$ 와 유효 단면적  $A_{t-sy}$ 를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다. 그리고

$$R_{t-sy} = \frac{L_{t-sy}}{k \times A_{t-sy}} \quad (9)$$

그리고 고정자 표면과 외기와의 열 저항, 고정자 내부 표면과 내기와의 열 저항은 각각의 유효 단면적  $A_{sy-air}$ ,  $A_{sys-air}$ 를 계산하여 식 (8)과 같이 계산할 수 있으며 고정자 내부에서 외부까지의 열 저항은 실린더 형태의 열 저항 계산식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{sy-sys} = \frac{1}{2\pi \times L_{sy-sys}} \log\left(\frac{D_o}{D_i}\right) \quad (10)$$

### 3.3.3 공극

공극은 치의 표면과 회전자의 표면 사이의 공기 층으로 각 절점의 위치가 공극의 중앙부, 치의 표면, 회전자 표면 사이에 위치하고 있기 때문에 치 표면과 공극사이의 유효단면적  $A_{tags-ag}$ , 공극과 회전자 사이의 유효 단면적  $A_{ag-roy}$ 를 고려하여 식(8), 식(10)을 이용하여 계산하면 된다.

### 3.3.4 영구 자석

이동자의 자석의 경우 본 영구자석 전동기는 매입형의 영구자석을 사용하고 있기 때문에 매입형의 자석을 형상 그대로 등가회로로 구성하는 것은 쉽지 않다. 따라서 등가적인 방법으로 날개 모양의 매입형 자석을 링 형태의 영구자석으로 단순화 하여 해석 하였으며 이 과정에서 해석상의 오차를 줄이기 위해 영구자석의 단면적과 두께를 기존의 형상과 유사하게 근사 하였다. 영구자석은 회전자의 외부 요크와 내부 요크 사이에 위치하고 있으며 각각의 열저항 모델은 앞에서 보인 고정자 요크에서의 열저항 계산처럼 실린더 형태의 열저항 계산식을 이용하면 된다.

### 3.3.5 열 저항 회로도

위의 열 저항 계산을 바탕으로 구성된 열 저항 회로도는 다음과 같다.

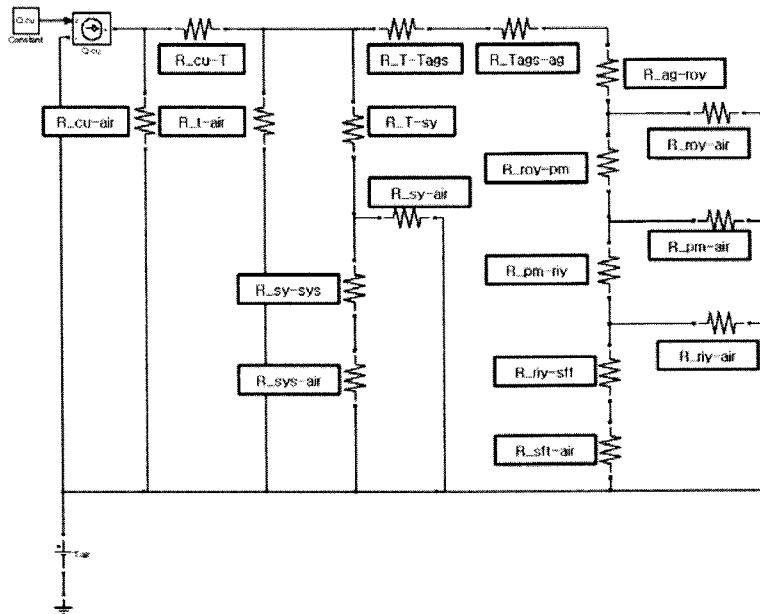


그림 2. 해석 모델의 열 저항 회로도

## 4. 해석 결과

해석 모델에 대한 3차원 열 해석 결과는 그림 2에 표시 하였으며 열 저항 회로도를 이용하여 해석한 결과는 표2에 나타내었다. 전동기의 각부를 등가적으로 환산하여 계산한 열 등가 회로의 특성상 약간의 오차는 불가피 하다. 하지만 표에서 보이는 바와 같이 각 부분의 온도 분포는 최대 약 2.7도의 온도 차이가 존재 하지만 전반적으로는 그 추이가 비슷하다고 할 수 있다.

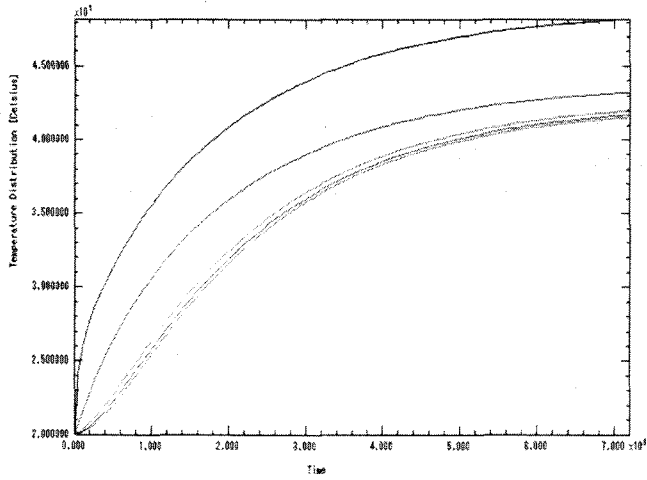


그림 2. 해석 모델의 3차원 열 해석 결과

표 2 열 저항 회로도의 열 해석 결과

부분	3차원 해석 온도	열 등가 회로 해석 온도
권선 부	48.2	50.8
고정자	43.1	42.5
회전자	41.5	38.8

## 5. 결론

본 논문에서는 매입형 영구자석형 전동기의 열 해석을 위한 열 등가 회로해석을 수행하였다. 기존의 3차원 열 해석 결과와 비교하여 불 때 열 등가 회로 해석은 해석시간이 짧고 다양한 해석 조건에 대해 적용할 수 있다는 장점이 있다. 해석 결과에서 보이는 것처럼 열 등가 회로 해석을 통해 3차원 열 해석 결과와 유사한 해석 결과를 얻을 수 있었으며 추후, 실험을 통한 계수의 보정 및 열 등가 회로의 수정을 통하여 보다 정밀한 열 해석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. J. P. Holman (2005), "Heat Transfer", 경문사.
2. Daryl L. Logan (2006), "Logan의 유한요소 첫걸음", 시그마프레스
3. 이양수 (1998), "고정자와 회전자에 축방향 냉각 채널이 있는 유도전동기의 열해석", 서울대학교 대학원