



## DCT용 자속집중형 동기전동기의 회전자 형상 증가화를 통한 열 해석

Thermal Analysis using Equivalent Rotor Model of Concentrated Flux-type Synchronous Motor for DCT

---

저자 (Authors)	손동균, 진준우, 홍정표 Dong-Kyun Son, Jun-Woo Chin, Jung-Pyo Hong
출처 (Source)	<a href="#">한국자동차공학회 춘계학술대회</a> , 2017.5, 1102-1106 (5 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국자동차공학회</a> The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07205064">http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07205064</a>
APA Style	손동균, 진준우, 홍정표 (2017). DCT용 자속집중형 동기전동기의 회전자 형상 증가화를 통한 열 해석. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1102-1106.
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.148 2018/10/17 09:54 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# DCT용 자속집중형 동기전동기의 회전자 형상 등가화를 통한 열 해석

손 동 균\* · 진 준 우 · 홍 정 표  
한양대학교 미래자동차공학과

## Thermal Analysis using Equivalent Rotor Model of Concentrated Flux-type Synchronous Motor for DCT

Dong-Kyun Son\* · Jun-Woo Chin · Jung-Pyo Hong

*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

**Abstract** : This paper presents a thermal model of Concentrated Flux-type Synchronous Motor(CFSM) for Dual Clutch Transmission(DCT) applying the equivalent rotor model. In order to perform the thermal analysis of CFSM using Lumped Parameter Thermal Network(LPTN), the shape of motor is reflected as hollow cylinder. Especially for the rotor of CFSM, the area, outer and inner diameter of the permanent magnet were constantly equalized. Conduction and convection thermal resistances were calculated by using dimensions of the equivalent rotor model. Then, the losses such as copper loss, iron loss, and mechanical loss are calculated and applied to the LPTN as heat sources. The heat capacity, which enables the transient thermal analysis, is calculated by using dimensions and the material properties. Finally, the temperature characteristics of each part of the CFSM are predicted using LPTN.

**Key words** : Concentrated Flux-type Synchronous Motor(자속집중형 동기전동기), Dual Clutch Transmission(듀얼 클러치 변속기), Lumped Parameter Thermal Network(집중정수열회로망)

### Nomenclature

$L$  : stack length, m  
 $r$  : hollow cylinder diameter, m  
 $T$  : hollow cylinder temperature, °C  
 $k$  : thermal conductivity, W/m°C  
 $r$  : permanent magnet diameter, m  
 $l_m$  : permanent magnet thickness, m  
 $t_m$  : permanent magnet width, m  
 $\theta_m$  : permanent magnet angle, deg  
 $P_{copper}$  : copper loss, W

$I_a$  : phase current, A<sub>rms</sub>  
 $R_a$  : phase resistance, Ω  
 $R$  : thermal resistance, °C/W

### Subscripts

$1, 2, 3, 4$  : radial outer, radial inner, axial front, axial behind  
 $a, r$  : axial, radial  
 $mo, mi$  : outer, inner  
 $1r, 2r, mr$  : radial outer direction, radial inner direction, correction

\* 손동균, thsehdrbs92@hanyang.ac.kr.

## 1. 서 론

최근 수동 변속기의 장점과 자동 변속기의 장점을 접목하여 효율을 높이고 변속감을 향상시킨 Dual Clutch Transmission(DCT)의 상용화가 가속화되고 있다.<sup>1)</sup> DCT에는 전동기가 이용되는데 주로 회토류 자석을 이용한 전동기가 사용된다. 하지만 회토류 영구자석의 경우, 수급 불안정으로 인하여 탈 회토류 영구자석 전동기에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>2)</sup> 탈 회토류 영구자석의 대표적인 예로는 Ferrite 영구자석이 있으며 회토류 영구자석에 비해 낮은 잔류자속밀도와 보자력을 가진다. 따라서, 회전자에 Ferrite 영구자석의 형상과 배치를 조정하여 회토류 영구자석을 이용한 전동기와 동등한 성능을 만족하는 Concentrated Flux-type Synchronous Motor(CFSM) 설계에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.<sup>3)</sup>

DCT는 엔진에 맞물려 있으므로 동작 온도가 매우 높으며 동작 시 손실로 인하여 온도가 상승하게 된다. 이러한 온도 상승은 영구자석의 잔류자속밀도를 감소시켜 전동기의 성능을 저하시킨다. 또한 고전자 권선의 소손을 발생시켜 고장으로 이어질 수 있으므로 전동기의 열 해석을 통한 온도 예측이 필요하다. 열 해석을 위한 방법에는 3D-FEA(Finite Element Analysis)와 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 기반으로 한 해석방법이 사용되고 있지만 상당히 긴 해석시간으로 인해 보다 빠른 시간 내에 열 특성을 살펴볼 수 있는 열 해석방법이 필요하다. 그 방법으로 전동기의 열 전달을 등가 회로망으로 구성하여 해석하는 Lumped Parameter Thermal Network(LPTN)가 있다.<sup>4)</sup>

본 논문에서는 LPTN을 통하여 CFSM의 열 해석을 진행한다. LPTN은 전동기를 Hollow cylinder 형태로 등가화하여 구성하기 때문에 Fig. 1과 같이 CFSM 회전자 구조의 형상 등가화에 대한 방안을 제시하고 전동기의 LPTN을 구성하여 동작 시의 온도를 예측한다.

## 2. 대상 모델

대상 모델은 Fig. 1과 같은 CFSM 전동기 이며 과 같은 사양을 가진다. 대상 모델은 BLDC 구동

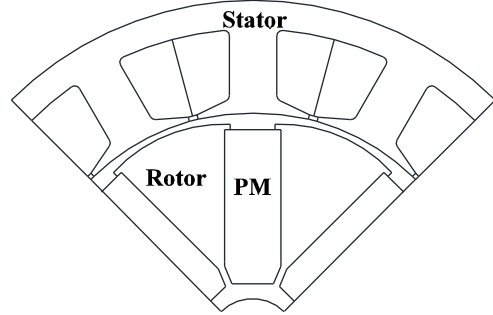


Fig. 1 Configuration of proposed CFSM

방식으로 구동되므로 입력 전압은 12V, 정격출력은 120W이며 8극 12슬롯이다. 동작 온도는 120°C로 매우 높으며 냉각방식은 자연공랭식이다.

## 3. 열 등가회로를 통한 열 해석

### 3.1 열 등가회로

전동기의 열 등가회로는 전동기의 손실로 인한 발열을 열원으로 하여 전동기 내부, 외부로의 열 전달을 집중정수 회로망으로 구성을 한다. 전도 및 대류 열 전달의 경우, 열 저항을 통하여 회로가 구성되고 열 에너지를 저장할 수 있는 능력을 나타내는 열 용량은 전동기의 각 부분의 형상 및 물성치에 따라 결정된다. 전동기의 각 부분의 Fig. 2 (a)와 같이 등가화한 Hollow cylinder 형상을 축 방향으로 대칭인 구조를 가정해 Fig. 2 (b)와 같은 회로로 구성한다. 축 방향 전도 열 저항  $R_a$ , 반경 방향 전도 열 저항  $R_{1r}$ ,  $R_{2r}$ ,  $R_{mr}$ 은 다음 식을 통해 결정된다.

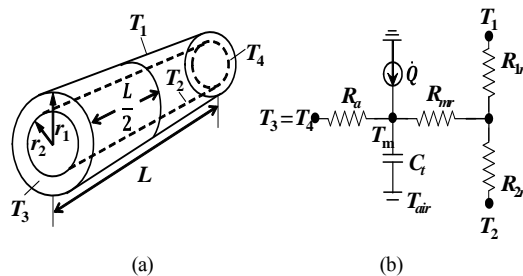


Fig. 2 Thermal network of hollow cylinder

$$\begin{aligned}
R_a &= \frac{L}{6\pi k_a (r_o^2 - r_i^2)} \\
R_{1r} &= \frac{1}{2\pi k_r L} \left[ 1 - \frac{2r_i^2 \ln(\frac{r_o}{r_i})}{r_o^2 - r_i^2} \right] \\
R_{2r} &= \frac{1}{2\pi k_r L} \left[ \frac{2r_o^2 \ln(\frac{r_o}{r_i})}{r_o^2 - r_i^2} - 1 \right] \\
R_{mr} &= \frac{-1}{4\pi k_r L (r_o^2 - r_i^2)} \left[ r_o^2 + r_i^2 - \frac{4r_o r_i \ln \frac{r_o}{r_i}}{r_o^2 - r_i^2} \right]
\end{aligned}
\tag{1} \tag{2} \tag{3} \tag{4}$$

### 3.2 회전자 형상 등가화

CFSM 회전자의 영구자석을 Hollow cylinder로 형상 등가화를 하기 위하여 영구자석의 면적과 외경, 내경을 일정하게 두고 영구자석의 Pole-arc에 변화를 주어 형상 등가화 시킨다.

우선 회전자 영구자석의 외경과 내경 이용하여 면적을 산정한다. 그리고 식 (5), (6)과 같이 형상 등가화 후의 면적을 같게 만드는 영구자석의 Pole-arc를 구한다. 그리고 회전자의 철심의 치 끝 부분의 형상은 Hollow cylinder형태 이므로 공극 둘레에 대한 회전자 철심 치 끝의 비 형태로 LPTN에 반영한다. Fig. 3은 등가화 전/후의 회전자 형상을 나타낸다.

$$l_m \cdot t_m = (r_{mo}^2 - r_{mi}^2) \pi \cdot \frac{\theta_m}{360} \tag{5}$$

$$\theta_m = \frac{t_m \cdot 360}{(r_{mo} + r_{mi}) \pi} \tag{6}$$

### 3.3 열원 산정

전동기에서 발생하는 열원은 동손, 철손, 영구자석 와전류손과 기계손으로 구분된다.

동손은 출력을 내기 위해 코일에 전류가 흐를 때 따라 저항에서 발생하는 손실이다. 그리고 철손은 전기강판의 히스테리시스 성질로 인한 히스

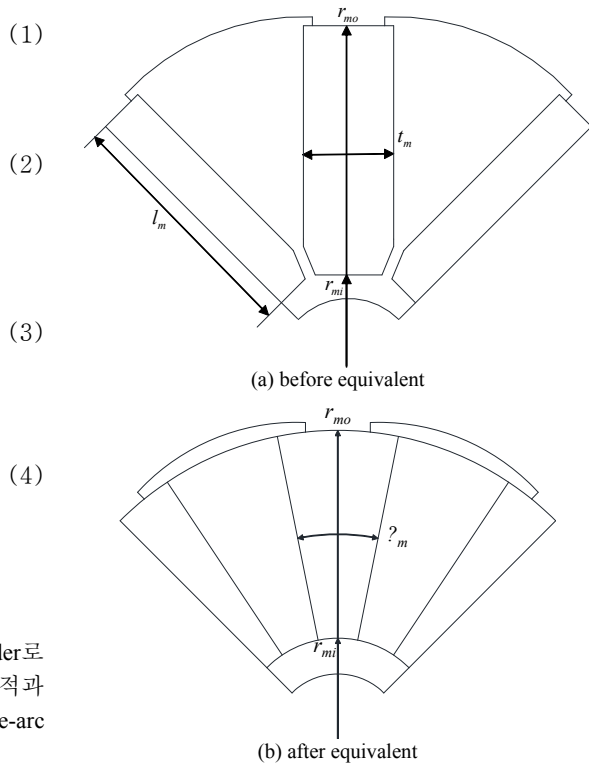


Fig. 3 Equivalent rotor model for thermal analysis

테리시스 성질로 인한 히스테리시스손실과 자속의 시간변화율로 인한 와전류손실 그리고 원인을 알 수 없는 표류부하손으로 구분된다. 영구자석 와전류손은 영구자석에서의 자속의 시간변화율로 인한 와전류손이다. 해당 모델의 경우, 도전율이 낮은 Ferrite 영구자석을 사용하므로 영구자석 와전류손의 영향은 무시한다. 손실은 LPTN을 통한 열 해석에서 열원에 해당하므로 손실의 정확한 평가 및 손실의 위치 별 반영이 중요하다. 이를 위해 철손의 경우 고정자의 요크와 치, 치 끝, 그리고 회전자의 치, 치 끝 부분에서 발생하는 철손을 나누어 반영한다.

#### 3.3.1 동손

DCT용 CFSM의 동작온도는 120°C이므로 해당 온도의 역기전력, 인덕턴스 및 임피던스를 이용하

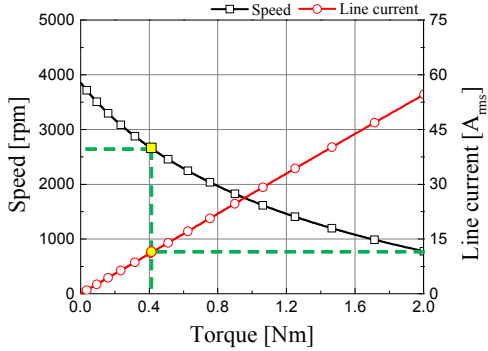


Fig. 4 TNI curve of proposed CFSM

여 Fig. 4의 특성곡선을 도출한다. 이때 출력토크 0.42Nm일 때의 속도 및 전류를 구하고 식 (7)을 통해 동손을 구한 결과 18.48W이다.

$$P_{copper} = 3I_a^2 R_a \quad (7)$$

### 3.3.2 철손

전동기에서의 철손 해석 프로세스는 다음과 같다. 먼저 2D-FEA를 통해 전기적 한 주기에 대한 과도해석을 진행한다. 각 요소에서 반경 방향과 접선 방향의 자속 밀도 파형을 고조파 분석한다. 실험을 통한 철심의 주파수와 자속 밀도에 대한 철손 데이터를 이용해 각 고조파에 대한 철손을 구한 후 합산하여 각 요소 별 철손을 산정한다. 마지막으로 모든 요소의 철손을 합산하여 철손을 산정한다. 위 방법을 통해 구한 해당 모델의 철손은 5.34W이다. 앞서 언급한 바와 같이 철손은 고정자 및 회전자의 요크와 치 등을 나누어 반영한다.

### 3.4 열 해석 결과

본 논문에서는 DCT용 CFSM의 회전자 형상을 Hollow cylinder 형태로 등가화 하여 열 해석을 진행 하였다. 엔진에서의 발열을 고려하여 CFSM 운전 시 동작 온도는 120℃ 이며 정격 출력인 0.42Nm, 2635rpm 에서 90분 동안 연속 구동을 가정하였다.

열 해석 결과, 약 60분 구동 이후 온도가 포화됨을 알 수 있다. 엔드 코일, 영구 자석, 고정자 철심, 하우징의 순서로 온도가 높다. 손실 중, 동손이 가장 크고 또한 엔드 코일에서 외부로 전도가 아닌

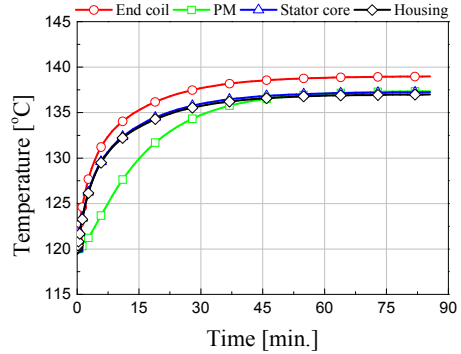


Fig. 5 Thermal analysis results

Table 1 Saturation temperature of CFSM

@ 90 min	단위	값
엔드 코일	°C	139.0
영구 자석		137.4
고정자 철심		137.2
하우징		136.9

대류로 열 전달이 되기 때문에 위의 두 가지 이유로 엔드 코일의 온도가 높다. 이를 통해 전동기 설계 시 절연계급은 최고 허용 온도 140℃ 이상의 F등급(155℃), H등급(180℃) 이상으로 선정하여야 함을 알 수 있다.

그리고 Ferrite 영구자석의 경우 온도가 136.9℃에서 온도가 포화되었다. 120℃에서 136.9℃로의 온도 상승을 고려했을 때, Ferrite 영구자석의 성능은 약 4%가량 저하되므로 온도 상승에 의한 성능 저하가 크지 않음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 DCT용 CFSM의 회전자를 형상 등가화를 하여 LPTN을 통하여 열 해석을 진행하였다. 회전자의 형상 등가화에 대한 방안은 여러 가지가 있으며 본 논문에서는 회전자 영구자석의 각을 조정하는 등가화를 실시하였다.

그리고 TNI곡선을 통하여 정격 출력에서의 전류를 통해 동손을 산정하고 2D-FEA를 통해 철손을 산정하였다. LPTN을 통한 열 해석 결과, 초기 동작 온

도에 비해서 CFSM의 온도 상승 폭이 크지 않으므로 전동기의 전체적인 성능 저하는 크지 않을 것으로 예측된다.

### **Acknowledgement**

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2017-2012-0-00628)

### **References**

- 1) Jae-Duk Jang, Woong-Cheol Lee, “Developing Trends of Dual Clutch Transmissions” , AUTO JOURNAL vol.37, 22-28, 2015
- 2) J.G-Lee, J.H-Yu, H.J-Kim, T.S-Jang, “Trend in Research and Development Related to Motors and Permanent Magnets for Solving Rare-earth Resources Problem” , Journal of Korean Magnetics Society vol.22, 58-65, 2012
- 3) Kwon-Il Park, Young-Hoon Jung, Myung-Seop Lim, Jung-Pyo Hong, “Design of Rare-Earth Free Permanent Magnet Synchronous Motor For Dual Clutch Transmission” , KSAE Spring Conf., 559-564, 2016
- 4) Byeong-Hwa Lee, Kyu-Seob Kim, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong, Young-Kyoun Kim, “Temperature Estimation of IPMSM using Thermal Equivalent Circuit” , IEEE Transactions on Magnetics vol.48, , 2012