

고속전철 견인전동기 열해석에 관한 연구

장기찬\*, 방덕제\*, 이기호\*\*, 김남해\*\*\*  
 \*한국전기연구소, \*\*대우중공업, \*\*\*현대중공업 마북리연구소

A Study on the Thermal Analysis of High-Speed Rail Way Traction Motor

K. C. Chang\*, D. J. Bang\*, K. H. Lee\*\*, N. H. Kim\*\*\*  
 \*KERI, \*\*Daewoo Heavy Industries Ltd, \*\*\*Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

**Abstract** - In this paper, to analyse the temperature rise of the traction motor the methods evaluating the heat sources and heat transfer coefficients are represented. And the results of temperature analysis of the 3- designed cases of traction motor also are represented. In case of KERI01, the temperature rise of the rotor is higher than DW01 and DW02. In the stators, case of DW01 is presented higher temperature rise than DW02 and KERI01.

1. 서 론

사회·경제구조가 고도화되고 국민의 생활수준이 향상되어감에 따라 지상교통의 고속화가 지속적으로 이루어져 왔다. 지상교통의 고속화는 고속도로와 철도에서 실시되어 왔다. 좁은 국토사정으로 고속도로의 고속화는 어렵고 철도의 고속화가 추진되어 왔으며 미래의 국내 지상교통의 선두역할을 담당할 경부 고속전철이 건설중이다. 고속전철의 구동력은 견인전동기로부터 얻고 있다. 견인전동기는 고속전철에 장착되는 차상설비이기 때문에 경량화, 고출력화, 소형화가 필수적이다. 전력기기의 소형·경량화하면 비교적 효율이 나빠지고 냉각되는 표면적이 작아지기 때문에 온도상승이 과다해진다. 따라서 견인전동기의 소형·경량화하기 위하여 효율적인 냉각과 견인전동기의 온도상승 해석이 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 견인전동기 소형·경량화의 요소 기술인 견인전동기의 온도상승의 원인인 손실을 열원으로 산정하는 기법을 논하고, 차기 고속전철용으로 설계된 3가지 유도견인전동기에 대해서 이 열원을 이용하여 견인전동기를 2차원으로 모델링하고 열해석을 수행하여 그 결과에 대한 검토를 논한다.

2. 견인전동기 열해석

2.1 열원

견인전동기에서 열원은 전동기의 손실에 관계된다. 견인전동기의 온도상승에 주로 영향을 주는 손실은 크게 동손과 철손이다. 동손은 고정자 권선 및 회전자 바의 저항에 의한 주열이고, 철손은 자성체의 자속이 시변일 때 발생하는 손실로 히스테리시스(hysteresis) 손실과 와전류(eddy current) 손실로 발생한다. 동손  $P_{cu}$ 와 철손  $P_c$ 를 계산하는 식은 식 (1)과 식 (2)에 각각 나타내었다.

$$P_{cu} = \rho \int_V J^2 dV \text{ [W]} \quad (1)$$

$$P_c = 4.97 \left( \frac{B_p}{B_0} \right)^{1.942} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1.45} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 권선의 저항율,  $J$ 는 권선의 전류밀도,  $B_p$ 는 철심내부의 최대자속밀도,  $f$ 는 철심내부자속의

주파수,  $B_0, f_0$ 는 기준 자속과 주파수이다.

2.2 열전달

2.2.1 전도에 의한 열전달

정상상태인 경우 전동기내의 회전자와 고정자의 동손 등에서 발생하는 열의 비율은 통풍구와 전동기 표면으로부터 대류에 의해 제거되는 열의 비율과 같다. 전동기에서의 온도분포를 구하기 위해 미소검사체적에 에너지 평형을 적용하여 열방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} (k \frac{\partial T}{\partial \phi}) + q = 0 \quad (3)$$

상기 식을 적분하고 적절한 경계조건을 적용하여 적분상수를 산출하면 온도분포를 구할 수 있다.

2.2.2 대류에 의한 열전달

대류에 의해 냉각되는 표면온도를 산출하기 위해 총합 에너지 평형을 사용하면 다음과 같다.

$$q \times V_{\text{체적}} = h \times A_{\text{표면}} \times (T_{\text{표면}} - T_{\infty}) \quad (4)$$

여기서,  $h$ 는 열교환 계수이고,  $T_{\infty}$ 는 대기온도이다.

2.3 열교환 계수

2.3.1 무차원 파라미터

열교환 계수  $h$ 는 고체표면에서 주위의 냉매인 기체나 액체로 열에너지 교환을 결정하는 변수로서 다음의 무차원 파라미터 인 Nusselt 수  $Nu$ , Prandtl 수  $Pr$ , Reynold 수  $Re$  등으로부터 구할 수 있다.

$$Nu_x = \frac{hx}{k} \quad (5)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (6)$$

$$Re_x = \frac{\rho u x}{\mu} \quad (7)$$

단,  $k$  : 열전도도

$c_p$  : 비열

$\mu$  : 점성

$\rho$  : 밀도

$x$  : 거리

2.3.2 평판에서의 열교환 계수

견인전동기의 외표면에서 대기로 빠져나가는 열량을 계산하기 위하여 다음의 무차원 식을 사용한다. 대기의 유동종류에 따라 적절히 무차원 식을 선택하여 열교환계

수  $h$  값 결정에 사용해야 한다. 층류(laminar flow)에서 식 (8), (9), (10) 중에서 냉매의 종류에 따라 선택하면 된다. 그리고 냉매가 난류(turbulent flow)인 경우 Reynolds 수에 따라 식 (11), (12) 중에서 선택한다.

$$Nu_x = 0.332Pr^{1/3}Re_x^{1/2} \quad (8)$$

$$0.6 < Pr < 10, Re_x < 5 \times 10^5$$

$$Nu_x = 0.339Pr^{1/3}Re_x^{1/2} \quad (9)$$

$$Pr \rightarrow \infty, Re_x < 5 \times 10^5$$

$$Nu_x = 0.564Re_x^{1/2} \quad (10)$$

$$Pr \rightarrow 0, Re_x < 5 \times 10^5$$

$$Nu_x = 0.0296Pr^{1/3}Re_x^{0.8} \quad (11)$$

$$5 \times 10^5 < Re_x < 5 \times 10^6$$

$$Nu_x = 0.185Pr^{1/3}(\log Re_x)^{-2.584} \quad (12)$$

$$10^7 < Re_x < 10^9$$

### 2.3.3 냉각구에서의 열교환 계수

견인전동기의 고정자나 회전자의 온도를 냉각하기 위하여 냉각구를 둔다. 견인전동기의 냉각구에서 열교환 계수는 난류유동에 대한  $Nu$ 는 여러 연구자의 제안식이 있으나 본 연구에서는 Prandtl수가  $0.7 \leq Pr \leq 160$ 인 범위 내에서 적용되는 다음의 Dittus-Boelter 식을 사용하였다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (13)$$

원형 관내의 유동에 대한  $Re$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (14)$$

Prandtl수는 속도경계층과 온도경계층에서의 확산에 의한 운동량수송과 에너지수송의 상대적인 유효척도를 보여주는 것으로 아래의 식과 같다.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (15)$$

일반적으로 기체들의  $Pr$ 는 거의 1에 가깝고 기름종류에서는  $Pr \gg 1$ , 액체금속류에서는 반대로  $Pr \ll 1$ 이다.

전동기내 유입공기의 대류열전달계수  $h$ 는 2.3.1의 무차원 파라미터들을 사용하여 결정할 수 있다. 그리고 내경이  $d$ 인 원형 관내에서의 Nusselt수는 아래와 같이 정의되고 이 식에서 열교환 계수  $h$ 를 구할 수 있다.

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (16)$$

## 3. 견인전동기 열해석 결과

### 3.1 해석 조건

본 연구에서 열해석을 수행한 견인전동기의 모델은 표 1에 나타난 DW01, DW02, KERI01 3가지이며 전동기의

통풍구로 유입되는 공기( $T=300K$ )의 물성치는 표 2와 같다. 그리고 표 3에 열해석 조건인 열원값과 견인전동기 표면의 열교환 계수를 정리하여 나타내었다. 표 4에 공극과 고정자 냉각구 및 회전자 냉각구의 표면 열교환 계수를 전 장에서 서술한 적절한 식을 선택하여 구한 값을 나타내었다.

표 1 견인전동기 열해석 모델

구분	670/400	670/400	670/400
외경	60	60	60
내경	10	10	14
외측면	2	2	2
내측면	4	4	2
회전자 외측면	52	74	52
회전자 외측면	430	360	380

표 2 유입공기의 물성치

구분	단위	물성치
밀도 ( $\rho$ )	[kg/m <sup>3</sup> ]	1.1614
비열 ( $c_p$ )	[J/kg °C]	1007
동점성계수 ( $\nu$ )	[m <sup>2</sup> /s]	15.89e-6
열전도율 ( $k$ )	[W/m °C]	26.3e-3
열확산계수 ( $\alpha$ )	[m <sup>2</sup> /s]	22.5e-6

표 3 전동기의 열해석 조건

구분		DW01	DW02	KERI01
해석 영역		1/8	1/4	1/4
공기속도 [m/s]		8	8	8
주파수 [Hz]		75	75	75
고정자 전류 [A]		364	378	362
열원 [W]	고정자 동손	1,310	2,233	2,841
		철손	191	295
	회전자 동손	400	762	961
		철손	-	-
h [W/m <sup>2</sup> °C]	고정자 외측면	20	20	20

표 4 통풍구의 열전달계수

구분		h [W/m <sup>2</sup> °C]				
		DW01	DW02	KERI01		
고정자	냉각구	45	41	φ 12	46	
	내측면	55	55	φ 16	44	
회전자	냉각구	41	φ 14	45	φ 16	44
	외측면	226	226	φ 28	40	φ 22

### 3.2 해석 결과

전 절의 조건하에서 상용 열해석 소프트웨어를 사용하여 열해석을 수행한 결과 중 DW01 모델의 온도분포를 그림 1에 나타내었다. 그림 2는 각 모델의 회전자의 온도 해석결과를 보여 주고 있다. 그림 3은 각 모델의 고정자의 치부분에서 철심 요크 외경까지 반경방향으로 온도분포를 나타내고 그림 4는 권선 중심부에서 온도분포를 나타내고 있다.

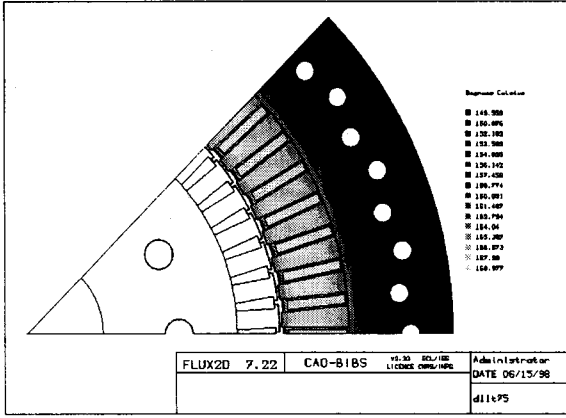


그림 1 DW01의 고정자 온도분포 해석결과

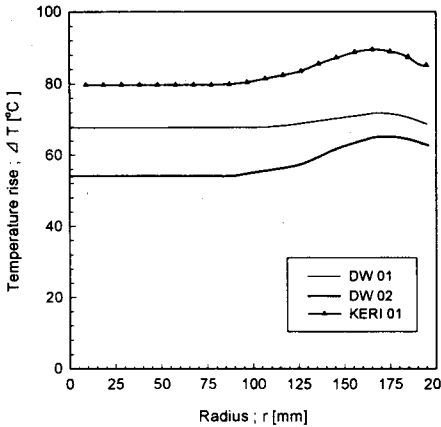


그림 2 회전자의 온도상승

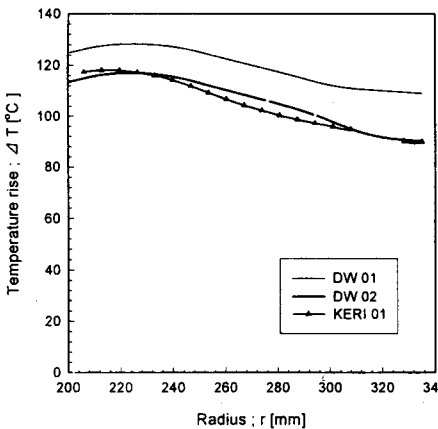


그림 3 고정자의 온도상승(치중심)

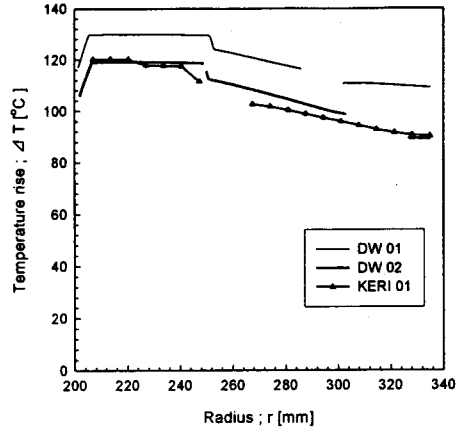


그림 4 고정자의 온도상승(권선부)

### 3.2 해석 결과 분석

견인전동기의 3가지 모델에 대하여 열해석한 결과 모델별로 각 부분의 온도상승치를 정리하면 표 5와 같다. 표 6은 각 모델의 무게를 비교하여 보여주고 있다.

표 5 온도해석결과와 비교

구분	단위	DW01	DW02	KERI01	
고정자	권선	℃	130	119	120
	내표면	℃	117	106	110
	외표면	℃	109	90	91
회전자	바	℃	71	65	89
	표면	℃	67	61	83
	축	℃	67	54	79

표 6 각 모델의 무게 비교

	608	464	512	철심
	58	51	76	
	312	220	252	내부
	45	38	50	
	9	12	10	중량
	1,032	785	900	
	0.63	0.72	0.68	+800kg (기타)

### 3. 결론

견인전동기의 경량화 관점에서 동일출력 전동기의 무게를 감소하면 냉각표면의 감소로 인하여 전동기의 온도가 과도하게 된다. 각 모델에 대하여 온도해석결과 DW02 모델의 온도가 가장 적게 상승하였고 또한 무게당 출력비도 DW02이 가장 크다. 그러나 DW02의 정격주파수가 다른 두 모델에 비하여 높게 설정되었기 때문에 사료된다.

### [참고 문헌]

- [1] J. P. Holman, "Heat transfer", 7th edition, McGraw-Hill Pubic Co., pp. 13~325, 1990.
- [2] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Introduction to heat transfer", 2nd edition, John iley & Sons Inc., pp. 1~425, 1990.