전기자동차용 유냉식 인휠 모터의 방열 특성 연구

임 동 현 · 김 성 철*

자동차부품연구원 그린카파워시스템연구본부

Thermal Characteristics of Oil-cooled In-wheel Motor in Electric Vehicles

Dong Hyun Lim · Sung Chul Kim*

Green Car Power System R&D Division, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon,
Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 12 September 2013 / Revised 9 March 2014 / Accepted 14 March 2014)

Abstract : Cooling the in-wheel motor in electric vehicles is critical to its performance and durability. In this study, thermal flow analysis was conducted by evaluating the thermal performance of two conventional cooling models for in-wheel motors under the continuous rating base speed condition. For conventional model #1, in which cooling oil was stagnant in the lower end of the motor, the maximum temperature of the coil was 221.7°C; for conventional model #2, in which cooling oil was circulated through the exit and entrance of the housing and jig, the maximum temperature of the coil was 155.4°C. Therefore, both models proved unsuitable for in-wheel motors since the motor control specifications limited the maximum temperature to 150°C.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), Heat dissipation(방열), In-wheel motor(인휠 모터), Thermal performance(열성능), Cooling oil(냉각유)

Nomenclature

B	: magnetic flux density, T	P_{cu}	: copper loss, W
C_p	: specific heat at constant pressure, J/kg·K	P_{iron}	: iron loss, W
D	: outside diameter, m	P_{mec}	: mechanical loss, W
I_{eff}	: effective phase current, A _{rms}	R	: electrical resistance, Ω
i_{max}	: maximum current, A	S_c	: spire section, m ²
K	: thermal conductivity, W/m·K	T	: temperature, K
L	: length, m	t	: time, sec
m	: mass, kg	u_i	: velocity of flow in x_i direction, m/s
N	: rotational speed, RPM	x_i	: coordinates, m
n_{sp}	: number of spire by phase	β	: Steinmetz constant
n_r	: number of bearing	ρ	: density, kg/m ³
P	: energy loss, W	ω_s	: angular frequency, rad/s

Subscripts

cu : copper

*Corresponding author, E-mail: sckim@katech.re.kr

e	: eddy current
fr	: friction
h	: hysteresis
mec	: mechanical
ph	: phase
rot	: rotor
sp	: coil spire

1. 서 론

최근, 환경오염 및 에너지고갈 문제가 전 세계적으로 많은 관심을 받으면서 기존의 내연기관 차량을 전력기반 자동차로 대체하려는 노력들이 활발하게 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 전기구동 방식의 한 종류인 인휠 시스템은 차량의 휠에 구동 모터를 장착하여 바퀴를 직구동 시키는 방법으로, 최적화된 질량 배분을 통하여 운동성능이 향상되며 차량 레이아웃이나 디자인의 자유도가 향상되는 장점을 가지고 있다.⁴⁾ 반면에 인휠 시스템은 휠이라는 제한된 공간에 여러 부품들이 복잡한 구조의 형태로 장착되기 때문에 부품의 소형화가 요구되며, 그 중 핵심 부품인 모터는 소형화 및 고효율, 그리고 내구성 확보를 위하여 원활한 냉각이 필요하다.⁵⁻⁷⁾

전기자동차용 구동 모터의 냉각방식은 작동유체에 따라 공랭식,⁷⁾ 유냉식,⁸⁾ 수냉식⁹⁾으로 나눌 수 있으며, 모터의 용량 및 장착환경을 고려하여 적합한 방식을 사용한다. 공랭방식의 경우 냉각시스템 구성이 간단한 장점이 있으나 냉각용량이 다른 방법에 비하여 작아서 소형화된 대용량 모터에는 적용이 어렵다. 본 연구의 대상인 인휠 모터는 35 kW급의 대용량으로 유냉식 냉각방식을 채택하였다. 일반적으로 유냉식은 수냉식에 비하여 다소 냉각용량이 낮지만 냉각과 윤활을 동시에 수행할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 2가지 인휠 모터 냉각 모델을 대상으로, 수치해석을 이용하여 연속적격 기저속도 구동조건에서의 방열 성능을 평가하였다.

2. 수치 해석

2.1 해석 기법

인휠 모터의 유냉식 방열 성능을 평가하기 위하

여, 2가지 냉각모델에 대하여 열유동 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 지배방정식은 질량보존, 운동량보존, 에너지보존 방정식이며, 에너지보존 방정식은 식 (1)에 표시하였다.

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j} + \dot{q} \quad (1)$$

여기서 $\dot{q}$ 는 발열량을 나타낸다. 인휠 모터의 발열은 코일의 동손, 로터/스테이터 코어의 철손 및 베어링 등에서의 기계손에 의해 발생하며, 식 (2)~(7)을 통하여 구할 수 있다. 동손은 상전류 및 전기적 저항에 의하여 결정되며 식 (2)와 같다.¹⁰⁾ 여기서 코일의 저항은 식 (3)을 통하여 계산된다.

$$P_{cu} = 3R_{ph} I_{eff}^2 = 3R_{ph} \left(\frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$R_{ph} = R_{cu} (T_{cu}) \frac{n_{sp} L_{sp}}{S_c} \quad (3)$$

철손(P_{iron})은 히스테리시스 손실(P_h)과 와전류 손실(P_e)의 합으로 이루어져 있으며 식 (4)의 Steinmetz 공식과 같다.¹¹⁾ k_h 과 k_e 는 각각 히스테리시스 상수와 와전류 상수를, β 는 Steinmetz 상수를 나타내며 로터/스테이터 코어의 재료 및 구조에 따라 결정된다. 각 상수들은 실험을 통하여 구해지며, 일반적으로 $k_h=44\sim55$, $\beta=1.8\sim2.2$, $k_e=0.04\sim0.07$ 의 범위를 가진다. 본 연구의 철손은 전자기 해석을 통해서 구해진 값을 사용하였다.

$$P_{iron} = P_h + P_e = k_h B^\beta \omega_s + k_e B^2 \omega_s^2 \quad (4)$$

기계손은 식 (5)와 같이 마찰손(P_{fr})과 풍손(P_{wind})으로 나누어진다. 베어링에 인가되는 마찰손은 식 (6)에 따라 결정되며, 풍손은 식 (7)과 같이 나타난다. 풍손은 다른 손실에 비하여 상대적으로 매우 적은 양으로서, 본 연구에서는 베어링에 마찰손 값을 인가하여 해석에 기계손을 반영하도록 하였다.

$$P_{mec} = P_{fr} + P_{wind} \quad (5)$$

$$P_{fr} \approx \frac{3}{2} n_r m_{rot} N \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$P_{wind} \approx 2 D_{rot}^3 L_{rot} N^3 \times 10^{-6} \quad (7)$$

Table 1 Values of generated heat

Component	Heat generation (W)	
	Low load condition	Continuous base speed condition
Coil	69.3	287.5
Stator core	34.4	176.7
Rotor core	1.6	17.3
Bearing	24.6	119.0

인휠 모터의 운전 조건에 따른 발열량을 Table 1에 나타내었다. 또한, 냉각유의 거동과 로터의 회전에 따른 내부 공기의 유동 및 열전달을 보다 정확하게 표현하기 위하여 MP(modified Production) $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. MP $k-\epsilon$ 난류모델은 Kato-Laundar modification으로 알려져 있으며 standard $k-\epsilon$ 난류모델이 정체점 부근에서 과하게 예측하는 것을 보상해 주는 장점을 가지고 있다.¹²⁾

2.2 해석 모델 및 조건

Fig. 1(a)와 같이, 인휠 모터의 열유동 해석 모델을 생성하였다. 본 연구 대상인 인휠 모터는 크게 모터부(코일, 스테이터 코어, 로터 코어, 영구자석)와 기계부(샤프트, 하우징, 베어링, 지그)로 나눌 수 있다. 원활한 해석을 위하여 모터의 형상을 단순화시켰으며 볼트 및 너트 등과 같은 해석에 불필요한 부품들을 제거하거나 통합하였다. 또한, 모터 내부에 고여있는 냉각유 영역을 지정하도록 하였다. 생성된 해석 모델을 기반으로 해석격자를 형성하였으며, 격자의 수는 약 300만개 수준으로 Fig. 1(b)와 같다. 해석 모델의 형상을 실제와 유사하게 구현하기 위하여 사면체 격자를 형성하였으며, 격자의 수는 약 300만개 수준으로 Fig. 1(b)와 같다. 해석 모델의 형상을 실제와 유사하게 구현하기 위하여 사면체 격자를 사용하였으며, 벽과 접하는 유체의 면에 프리즘 격자를 삽입하여 해석 정확도를 확보하고자 하였다.

2가지 형태의 일반적인 오일 냉각구조를 적용한 인휠 모터 모델을 대상으로 열유동 해석을 실시하였다. Fig. 2와 같이, 하나는 냉각유가 모터 외부로의 순환 없이 내부 하단에 고여있는 방식(conventional model #1)으로서, 냉각유가 코일 및 스테이터 코어

Fig. 1 Geometry of thermal-flow simulation model

Fig. 2 Conventional oil cooling systems with/without oil flow

의 발생열을 자연대류를 통하여 하우징이나 지그로 전달해 방열시킨다. 다른 하나는 하우징 및 지그에 형성되어있는 입·출구를 통하여 냉각유가 순환하는 방식(conventional model #2)으로서, 모터의 발생열을 냉각유가 직접 외부로 전달하게 하여 강제 방열하는 구조이다. 해석은 모터 연속정격, 기저속도인 4400 RPM, 37.5 N·m 구동조건을 적용하여 수행하였으며, 냉각유는 냉각설계 기준 조건인 입구 유량 1.5 L/min, 온도 65°C로 설정하였다.

3. 해석 결과

모델 별 온도분포를 Fig. 3에 나타내었으며, 각 모델의 부품별 평균 온도는 Table 2와 같다. 부품별 평균온도가 Conventional #2 모델이 Conventional #1 모델에 비해 약 48°C ~ 75°C 더 낮은 분포를 보이며, 특히 모터부인 코일에서 74.5°C, 스테이터 코어에서 68.3°C의 큰 차이를 나타내었다. 이는 Conventional #2 모델에서 냉각유의 순환을 통하여 모터 발생열

(a) Conventional model #1

(b) Conventional model #2

Fig. 3 Temperature distribution of conventional models (°C, @ 4400 RPM, 37.5 N·m)

Table 2 Average temperature of parts in the conventional models (@ base speed condition)

Parts	Temperature (°C)	
	Conventional model #1	Conventional model #2
Coil	220.9	146.4
Stator core	201.4	133.1
Rotor core	177.3	120.3
Magnet	177.5	120.5
Bearing	159.0	106.1
Shaft	170.1	115.3
Housing	152.4	98.0
Jig	121.3	73.2

을 보다 효과적으로 외부로 방출하기 때문이다. 또한, 냉각유가 모터 하단을 통하여 순환하므로 Fig. 3 (b)와 같이 모터 부분의 하단 온도가 상단에 비하여

낮게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

본 연구의 in-wheel 모터는 코일의 절연성능 및 모터 내구성을 고려하여 최대 코일온도를 150°C 이내로 규정하고 있다. Conventional model #1,2의 코일부 최고온도(국소 부위)는 각각 221.7°C, 155.4°C인 것으로 나타났다. 따라서, 기존에 사용되던 일반적인 오일 냉각구조는 본 연구에서 대상으로 한 대용량 인휠 모터에 적용하기에 부적절하다고 판단할 수 있으며 내부 유로를 통한 분사유동과 같은 보다 효과적인 냉각 방식의 적용이 필요함을 알 수 있다.

4. 해석 검증

동일 모델에서의 해석과 실험을 실시하여 그 결과들을 비교함으로써 타당성을 확인하였다. Conventional model #1을 대상으로 선정하였으며, 저부하 조건인 회전속도 2000 RPM, 인가토크 20 N·m 구동조건에서 수행하였다. 실험에는 인휠 모터 시제품을 다이내모미터에 연결하여 구동환경을 조성하였으며, 코일(Point 1 ~ 4, 원주방향으로 90°방향), 스테이터 코어(5 ~ 8, 원주방향으로 90°방향), 하우징(9)의 포화온도를 측정하였다. 모터 다이내모미터에서 토크 20 N·m를 인가하였으며, 전용 인버터를 통하여 회전속도 2000 RPM을 제어하였다. 온도 측정에는 T-type 열전대를 사용하였으며 약 ±0.1°C 이내의 오차를 갖는다. 측정 온도들이 10분간 0.5°C 이내의 변화일 때(실험 시작 후 약 200분)를 포화된 것으로 간주하였으며, 외부 온도는 약 20°C로 유지시켰다.

실험 결과와 해석결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나

Fig. 4 Experiment results for simulation validation (@ low load condition)

Fig. 5 Temperature distribution of validation model (°C, @ 2000 RPM, 20 N·m)

Table 3 Comparison result between simulation and experiment (@ low load condition)

Measurement point		Temperature (°C)		
		Simulation	Experiment	Error
Coil	1	104.7	107.6	-2.9
	2	104.8	106.6	-1.8
	3	103.7	105.3	-1.6
	4	104.5	107.3	-2.8
Stator core	5	90.8	88.7	2.1
	6	90.5	87.6	2.9
	7	86.2	84.9	1.3
	8	90.0	87.1	2.9
Housing	9	79.5	77.3	2.2

타내었으며, 해석 결과와는 Table 3에서 직접 비교하였다. 해석에서는 코일부 온도가 약 103~105°C, 스테이터 코어 온도가 약 86~91°C, 하우징 온도가 약 79.5°C의 분포를 나타내었다. 실험에서도 각각 약 105~108°C, 약 84~89°C, 약 77.3°C의 유사한 온도 분포를 나타내었으며, 전체 측정 지점에서 $\pm 3^\circ\text{C}$ 이내의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 대용량 인휠 모터를 대상으로 하여, 일반적인 오일 냉각구조들의 적용 가능성을 파악하고, 이들의 방열 성능을 비교 평가하였다. 이로 부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 냉각유 순환이 없는 모델(Conventional model #1)과 단순 순환하는 모델(Conventional model

#2)의 경우, 두 모델에서 코일의 최고 온도가 각각 221.7°C, 155.4°C이며 온도 상한치인 150°C를 초과하므로, 인휠 모터에 그대로 적용하기에는 두 모델 모두 부적합하여 사용할 수 없음을 확인하였다.

- 2) 모터 냉각구조들의 방열성능 평가를 위한 인휠 모터의 열모델을 개발하였으며, 실험을 통하여 3°C 이내의 신뢰도를 갖는 것을 확인하였다.

향후에는 방열 성능을 향상시키기 위한 추가 연구가 필요함을 알 수 있으며, 보다 높은 방열 성능을 보이는 오일분사 냉각기법이 적용된 인휠 모터의 열모델을 개발할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부가 지원하는 산업융합원천 기술개발사업의 일환으로 수행되었다. 도움을 주신 현대모비스 관계자 여러분께 감사하는 바이다.

References

- 1) A. Foley, B. Tyther and P. Calnan, "Impacts of Electric Vehicle Charging under Electricity Market Operation," Appl. Energy, Vol.101, pp.93-102, 2013.
- 2) S. Brown, D. Pyke and P. Steenhof, "Electric Vehicles: The Role and Importance of Standards in an Emerging Market," Energy Policy, Vol.38, No.7, pp.3797-3806, 2010.
- 3) B. O. Varga, "Electric Vehicles, Primary Energy Sources and CO₂ Emissions: Romanian Case Study," Energy, Vol.49, pp.61-70, 2013.
- 4) R. Wang, Y. Chen, D. Feng, X. Huang and J. Wang, "Development and Performance Characterization of an Electric Ground Vehicle with Independently Actuated In-wheel motors," J. Power Sources, Vol.196, No.8, pp.3962-3971, 2011.
- 5) A. H. Bonnett, "Operating Temperature Considerations and Performance Characteristics for IEEE 841 Motors," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.37, No.4, pp.1120-1131, 2001.
- 6) M. S. Kim, K. S. Lee and S. Um, "Numerical Investigation and Optimization of the Thermal

- Performance of a Brushless DC Motor,” *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.52, No.5, pp.1589-1599, 2009.
- 7) D. G. Kim and S. C Kim, “A Study on the Enhancement of the Cooling Structure for In-wheel Motor,” *Transactions of KSAE*, Vol.21, No.1, pp.36-42, 2013.
 - 8) Z. Huang, F. Marquez, M. Alakula and J. Yuan, “Characterization and Application of Forced Cooling Channels for Traction Motors in HEVs,” *Int. Conf. Electric Machines*, pp.1212-1218, 2012.
 - 9) Y. Zhang, Y. Shen and W. Zhang, “Optimized Design of the Cooling System for an Articulated Dump Truck's Electric Drive System,” *SAE 2010-01-0504*, 2010.
 - 10) M. A. Fakhfakh, M. H. Kasem, S. Tounsi and R. Neji, “Thermal Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles,” *J. Asian Electric Vehicles*, Vol.6, No.2, pp.1145-1151, 2008.
 - 11) C. Mi, G. R. Slemon and R. Bonert, “Modeling of Iron Losses of Permanent-magnet Synchronous Motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol.39, No.3, pp.734-742, 2003.
 - 12) M. Kato and B. E. Launder, “The Modeling of Turbulent Flow around Stationary and Vibrating Square Cylinders,” *Proc. 9th Symposium on Turbulent Shear Flow*, pp.10-14, 1993.