인휠 모터의 냉각 구조 개선에 관한 연구

김 대 건 · 김 성 철*

자동차부품연구원 그린카파워트레인연구본부

A Study on the Enhancement of the Cooling Structure for In-wheel Motor

Dae Geon Kim · Sung Chul Kim*

Green Car Powertrain R&D Division, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon,
Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 1 November 2011 / Revised 18 January 2012 / Accepted 15 February 2012)

Abstract : Recently, the automobile of the future will be able to substitute an electric vehicle for an internal combustion engine, so the following research is actively in the process of advancing. A traction motor is one of the core parts which compose the electric vehicle. Especially, it is difficult to connect cooling water piping to an in-wheel motor because the in-wheel motor is located within the wheel structure. This structure has disadvantage for closed type and air cooling, so the cooling design of motor housing and internal in-wheel motor is important. In this study, thermo-flow analysis of the in-wheel motor for vehicles was performed in consideration of ram air effect. In order to improve cooling efficiency of the motor, we variously changed geometries of housing and internal shape. As a result, we found that the cooling efficiency was most excellent, in case the cooling groove direction was same with air flow direction and arranged densely. Furthermore, we investigated the cooling performance enhancement with respect to variable geometries of internal in-wheel motor.

Key words : In-wheel motor(인휠 모터), Cooling structure(냉각 구조), Performance(성능), Housing(하우징), Cooling groove(냉각 홈), Internal shape(내부 형상)

1. 서 론

최근에 내연기관을 대체할 수 있는 미래형 자동차로서 전기자동차(Electric Vehicle)에 대한 연구 개발이 활발히 진행 중에 있다. 전기자동차를 구성하는 부품 중에 특히, 구동모터는 내연기관에서의 파워트레인 역할을 담당하는 핵심부품이다. 구동모터는 장착위치에 따라 크게 두 가지 종류로 나누어지는데, 첫 번째로 단일 모터(In-line Motor)는 차량 중앙에 설치되어 구동축을 통하여 바퀴로 동력을 전달하는 방식이며, 차동장치를 필요로 한다. 두 번째로 인휠 모터(In-wheel Motor)는 휠 내에 위치하며

구동축이 없이 바퀴를 직구동시키는 방식으로, 동력전달효율이 높고 차량 실내 공간을 추가로 확보할 수 있는 장점이 있다. 인휠 모터는 구조상 차륜 내에 위치하기에 냉각수 배관을 연결하기가 어렵고, 외부로부터 보호되어야 하는 이유로 인해 공랭식 밀폐형 구조를 채택하고 있다. 이러한 구조는 냉각에 매우 불리한 요인이기 때문에, 인휠 모터의 방열 설계가 더욱 중요하다.^{1,2)}

Turnbull 등³⁾은 하이브리드 자동차용으로 최대 출력 25 kW급 영구자석 매입형 모터의 열유동 해석에 대한 연구를 하여, 모터의 열전달 특성을 파악하였고 실험과의 비교 평가를 통하여 해석 정확도를 검증하였다. 또한, 가혹조건에서의 비정상상태로

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

해석하여 모터의 온도를 예측하였으며, 설계 개선을 위한 근거 자료로서 활용하였다. Zhang 등⁴⁾은 자동차용 유도 모터의 냉각 구조에 대하여 하우징 내부에 형성된 나선형 유로의 최적화 연구를 수행하였다. 또한 Farsane 등⁵⁾은 일반용 유도 모터의 하우징 외부에 방열핀 형상을 변경하여 열교환 면적 및 유동 분배를 향상시킴으로써, 기존 보다 냉각성능을 10°C 가량 개선하였다. Lee 등⁶⁾은 구동모터를 냉각하기 위한 방법으로 히트파이프와 냉각팬을 조합하여 다양한 유동조건에 변화에 따른 열전달 성능을 측정하였고, 기존 모터 방열기의 냉각성능과 비교 분석하였다. 히트파이프와 냉각팬이 동시에 작용하였을 때 전도와 강제대류가 크게 발생하여 우수한 방열성능을 나타내는 것을 확인하였다. Choi 등⁷⁾은 고주파 모터 내장형 주축계의 열특성을 파악하기 위하여, 냉각 자켓과 중공축 냉각유량에 따른 주축 각부의 온도상승 및 열변위를 측정하였고, 유한요소 해석기법을 이용한 수치해석 결과와 비교함으로써 고속 주축계의 열적거동을 밝히고자 하였다.

본 연구에서의 인휠 모터는 공랭방식이므로, 모터를 냉각하는 주요 인자인 차량 주행풍을 고려하여 열유동 해석을 수행하였다. 모터의 냉각 성능을 향상시키기 위하여, 주요 방열 부위인 하우징과 더불어 내부 형상을 다양하게 변경하면서 이에 대한 영향을 살펴보았다.

2. 수치 해석

2.1 해석 모델

Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, 인휠 모터의 구성은 크게 고정자와 회전자로 이루어져 있다. 고정자를 이루는 부품들은 스테이터 코어(Stator core), 코일(Coil), 하우징(Housing), 커버(Cover), 절연체(Insulation), 베어링(Bearing) 등이며, 스테이터 코어는 분할 방식을 적용하였고 절연체는 N종 절연등급이 사용되었다. 회전자는 네오디뮴(Nd) 계열의 영구자석(Permanent magnet)과 이를 둘러싸고 있는 로터 코어(Rotor core), 감속기(Reduction gear), 축(Shaft), 로터와 축의 결합 구조물(Fixing part)로 이루어진다. 로터의 회전은 축으로 바퀴와 연결되어 차량을 구동하는 동력이 되고, 하우징은 외부의 이물질로부

Fig. 1 Geometry of in-wheel motor

Table 1 Specifications of in-wheel motor

Item	Value
Housing diameter	350 mm
Stator outer diameter	300 mm
Rotor outer diameter	221 mm
Stack length	50 mm
Air-gap	0.8 mm
Number of poles	12
Cooling method	Air cooling
DC link voltage	320 V
Maximum current	200 Arms
Maximum/rated output power	25/10 kW
Base/maximum speed	1250/5000 rpm

터 모터를 보호하는 역할과 동시에 모터 손실에 의하여 발생된 열을 외부로 방출시킨다. 이 때문에 공랭식 냉각 구조를 채택하는 모터의 하우징에는 다수의 냉각홈이 존재한다. 사용된 인휠 모터는 영구자석 매입형 전동기로서 상세 체원을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 인휠 모터가 차량에 장착되었을 경우를 가정하여 주행풍을 고려한 열유동 해석을 수행하였다. 또한, 전체 열유동 해석 영역을 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 4 m × 8.5 m × 2.35 m으로 설정하

Fig. 2 Whole analysis area considered ram air effect (4 m × 8.5 m × 2.35 m)

Fig. 3 Grid model of whole configuration

였다. 하우징 개선을 위한 해석 모델은 Fig. 3에서와 같이 하우징과 모터 커버만을 단순 모델링하였고, 고체영역은 실제 형상과 유사하게 하기 위하여 사면체 격자를 사용하였으며, 고체 표면과 접하는 유체영역에는 프리즘 격자를 삽입하였다.

모터의 냉각 성능을 향상시키기 위하여 주요 방열 부위인 하우징의 형상을 다양하게 변경하면서 해석을 진행하였다. 이러한 하우징 모델들에 대하여는 Fig. 4 및 Table 2에 나타내었다. 모델 A와 B는 각각 원주방향과 축방향으로 냉각홈을 생성하였으며, 모델 C(기준 모델)는 원주방향 및 축방향 홈을 결합한 형태이고, 모델 D는 모델 C와 홈의 폭이 같지만 홈 간의 간격을 줄였다. 모델 E는 하우징 주변 공기의 유동 방향을 차량 공력해석을 통하여 얻은 유입 속도의 방향에 따라 홈을 생성하였고, 모델 F는 이러한 실제 유동에서의 정체점(Stagnation point)을 반영하여 상하 대칭구조를 채택하였다.

이와 더불어, 기본 모델의 내부 형상 변경을 통하여 로터 코어 및 영구자석 등 회전자에서 발생하는

Fig. 4 Variable geometries of in-wheel motor housing

Table 2 Specifications of motor housing

Model	Circumferential groove (mm)	Axial groove (mm)	Number of axial groove	Tilting angle from axial groove (°)
A	W10 × D9	-	-	90
B	-	W5 × D11	80	0
C*	W10 × D9	W5 × D11	80	0
D	W10 × D9	W5 × D11	120	0
E	W10 × D9	W5 × D11	120	35
F	W10 × D9	W5 × D11	120	35

* Standard model

열을 좀 더 원활하게 방출하기 위한 구조 개선안에 대해서는 Fig. 5에 나타내었다. 해석 모델 G는 회전 구조물(Fixing part)에 단순 형상의 블레이드를 설치하여 내부 유동 속도 및 난류 효과를 증가시키려 하였고, 모델 H에서는 회전 구조물의 형상을 수정하

Fig. 5 Variable geometries of internal in-wheel motor

여 내부 중앙 공기가 열집중 영역으로 잘 퍼질 수 있도록 하였으며, 모델 I는 회전자에서 주요 발열원 중에 하나인 로터 코어에 블레이드를 직접 설치하여 마찬가지로, 냉각 효과를 증대시키고자 하였다.

2.2 경계 조건

본 연구에서는 인휠 모터의 열유동 해석을 위하여, 모터 주위 공기 유체의 흐름이 3차원, 정상, 비압축성, 난류유동이며, 구성 부품의 물성은 온도에 관계없이 일정한 것으로 가정하였다. 난류 모델은 Kato-Launder 모델을 수정한 MP(Modified Production) $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 이것은 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델이 정제점 부근에서의 과도한 예측을 보상하기 위해 수정된 모델이다. 또한 해석 프로그램으로는 상용 SC/Tetra⁸⁾가 사용되었다. 인휠 모터 열유동 해석의 경계조건을 Table 3에 나타낸 바와 같이, 입구 공기의 온도는 상온 20°C, 속도는 13.2 m/s로 설정하였다. 이는 인휠 모터의 회전 속도 5000 rpm에 해당하는 장차 차량의 주행 속도 120 km/h일 때, 모터 하우징 주변 공기의 평균 유속으로 실차 공력해석을 통하여 계산되었다. 또한 출구의 경계조건에는 대기압을 적용하였다. 모터 및 감속기의 발열은 모두 내부의 고정자와 회전자에서 발생하며, 내부 부품간

Table 3 Boundary condition

Rotating speed (rpm)		Max. speed
		5000
Heat source (W)	Coil	262.9
	Stator core	300
	Rotor core	266.6
	Magnet	192.7
	Bearing	295.9
	Reduction gear	262
Inlet air velocity (m/s)		13.2
Ambient temp. (°C)		20
Ambient pressure		Atmospheric pressure

의 열전도 및 외부 공기와의 대류 열전달을 통하여 열방출이 이루어진다. 각 요소별 발열량은 열유동 해석 결과에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서, 모터 단품의 성능 실험값과 FEM 전자기 해석을 통하여 구한 결과를 반영하였다.

인휠 모터 하우징의 방열 성능에 대한 해석 시간을 단축하도록 하우징과 내부 부품들과의 경계면에서 모터 발열을 모사하기 위하여, 인휠 모터의 전체 모델 해석 결과²⁾의 열유속(Heat flux) 값을 반영함으로써 단순화 해석 모델을 적용하였다. 이러한 방법이 가능한 이유는 적용 대상인 인휠 모터가 공랭식 밀폐형이므로, 내부 발열이 거의 하우징과 리어커버를 통하여 외부로 방출되는 구조를 갖기 때문이다. 하우징 단순 모델은 인휠 모터의 전체 모델 해석 결과와 오차가 0.2°C로 거의 일치하였으며 단순 모델로 해석하여도 타당함을 확인하였다. 사용된 격자 수가 대략 800 만개이었고, 해석 소요 시간은 10시간 정도 걸렸으며 수렴 조건으로는 온도와 압력 등이 10^{-6} 에 도달하면 수렴된 것으로 설정하였다.

2.3 해석 검증

인휠 모터의 해석 결과에 대한 타당성을 확인하기 위하여, 단품 실험과 동일한 조건에서 지그를 포함한 모델 해석을 수행하였다. Fig. 6에서와 같이 인휠 모터의 장착용 지그로의 열손실을 고려하였으며, 내부 코일에서의 해석 결과는 132.7°C이었고 동일 위치에서 열전대를 이용한 실험치와는 대략 1.3°C의 오차를 나타내었다.

Fig. 6 Temperature contours of the in-wheel motor with jig for correlation analysis (°C)

3. 해석 결과 및 분석

3.1 하우징 구조 변경

하우징의 냉각 성능을 개선하기 위하여 형상 변수들을 다양하게 변화시켜가면서, 요구 방열량이 같은 조건에서의 모델별 평균 체적 온도, 열전달 계수 및 표면적 결과를 Table 4에 정리하였다. 모델 A와 B의 결과 비교는 축방향으로 냉각홈이 생성된 모델 B가 더 좋은 성능을 나타내는데, 이는 열전달 계수가 작지만 축방향 홈이 외부 공기와 접촉하는 표면적을 늘려주었기 때문이다. 모델 C는 복합형 냉각홈이므로 일반적으로 표면적이 모델 B보다 클 것으로 생각될 수 있지만, 이 경우는 오히려 모델 B보다 작아지고 대신 열전달계수가 다소 증가하여 온도는 동일하게 나타났다. 냉각홈 배열 간격을 좁게 한 모델 D는 표면적이 증가하여 성능이 향상되었고, 상부의 냉각홈 배열 방향을 주행풍과 일치시킨 모델 E는 열전달계수가 낮아졌으나 표면적 증가로 인하여 기본 모델 대비 4.4°C 낮은 결과를 나타내었다. 모델 E의 경우 주행풍을 반영하기 위한 냉각홈이 원주방향을 따라서 일정하게 생성되었지만, 모델 F는 하우징 전면 유입 공기의 정체점(Stagnation point)을 고려하여 냉각홈의 상하를 대칭으로 설계하였다. 그리하여, 모델 F의 하우징 온도는 기본 모델보다 4.8°C 감소하였고 냉각 성능은 약 1.3% 향상되었으며, 이는 열전달 표면적 증가와 더불어 모델 E보다 유동의 흐름이 다소 나아졌기 때문으로 생각된다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 유동의 흐름을 최대한 반영하기 위하여 상하 냉각홈을 대칭으로 하

Table 4 Results of each model with respect to geometry of in-wheel motor housing

Model	Temperature (°C)	Surface area (m ²)	Heat transfer coefficient (W/m ² ·°C)
A	98.2	0.226	57
B	85.5	0.354	44.5
C*	85.5	0.347	45.4
D	83.0	0.393	42.3
E	81.1	0.453	38
F	80.7	0.449	38.5

*Standard model

였는데, 실제로의 냉각홈 방향과 해석 유동의 흐름이 잘 일치하는 것으로 보여진다.

3.2 내부 형상 변경

모터의 내부 형상 변경에 따른 해석 결과는 Table 5에 정리되었다. 모델 G, H의 경우, 기본 모델과 비교하여 Fixing Part에 블레이드 설치 및 형상 개선을 통하여 회전자인 로터 코어와 영구자석의 온도가 약 2.5°C, 0.9°C 각각 감소시킨 효과를 나타내었고, 특히 모델 I에서는 로터 코어에 블레이드를 직접 설치함으로써 냉각 효과가 가장 두드러져 이들 부위에서의 온도가 약 5.5°C 감소하였다. Fig. 8에서는 형상 변경 모델별 축방향에서의 속도 분포를 확대 가시화한 것이며, 모델 G와 I의 블레이드 설치 영역에서 유속이 증가된 것을 확연히 볼 수 있다. 이러한 유속의 증가는 로터 표면에서의 대류열전달계수를 향상

Fig. 7 Streamline around in-wheel motor housing (m/s)

Fig. 8 Velocity contours with respect to geometry of interior in-wheel motor (m/s)

Table 5 Temperature values of each part with respect to geometry of interior in-wheel motor

Part	Vol. Temp. (°C)	Base	Model G	Model H	Model I
Fixed Part	Housing	85.5	85.7	85.4	85.1
	Reduction gear	104.1	105.0	104.0	103.9
	Rear cover	82.1	82.6	81.8	82.5
	Stator core	95.0	95.1	95.2	94.3
	Coil	102.8	102.7	103.0	101.9
	Insulator	101.4	101.4	101.6	100.5
	Front bearing	112.8	113.8	112.8	112.7
	Center bearing	124.2	125.8	124.2	124.5
Rotating Part	Rear bearing	103.5	104.8	103.1	104.3
	Rotor	151.8	149.4	150.9	146.4
	Magnet	153.1	150.6	152.1	147.5
	Fixing part	141.8	140.8	141.9	138.4
	Input shaft	115.2	116.5	115.2	115.5
	Output shaft	111.2	112.4	111.3	111.3
	Inner air	110.9	110.0	109.1	108.9
	Reduction gear oil	116.6	117.7	116.5	116.6

시켰고, 특히 모델 I의 경우 열이 집중되는 위치인 로터 코어 측에 블레이드를 직접 설치하여 냉각 효과를 극대화시켰다.

4. 결 론

본 연구에서는 인휠 모터의 냉각 성능을 향상시키고자 방열설계 개선 모델을 도출하기 위하여, 실차 주행풍을 고려한 모터 하우징 및 내부의 다양한 형상 모델에 대하여 열유동 해석을 수행함으로써, 운전조건에서의 인휠 모터 내·외부 구조 변경을 통한 열전달계수 및 열교환면적 증대가 방열성능 향상에 미치는 영향을 파악하였고, 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 실차 주행풍을 고려한 다양한 형상의 하우징에 대하여는 인휠 모터의 최대 속도인 5000 rpm에서 냉각흡의 배열이 원주방향보다는 축방향, 그

리고 더욱 주행풍 방향으로 이루어지는 것이 냉각 성능에 유리하였다.

- 2) 인휠 모터 하우징의 냉각홈이 주행풍 방향과 일치하고 최대한 홈 간격을 조밀하게 배치한 모델이 열교환 표면적 증가와 더불어 열전달계수가 향상(유동 흐름 개선)되어 하우징 온도는 기본 모델보다 4.8°C 감소되었고, 냉각 성능이 1.3% 향상되었다.
- 3) 인휠 모터 내부의 Fixing Part에 블레이드 설치 및 이의 형상 변경을 통하여 냉각 효과를 얻을 수 있었고, 특히 로터 코어에 블레이드가 직접 설치된 모델의 경우, 로터 표면에서의 대류열전달계수가 가장 증대되어 냉각 성능이 우수하였으며 주요 발열원인 로터 코어 및 영구자석 부위에서의 온도가 약 5.5°C 감소하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부가 지원하는 산업원천기술 개발사업의 일환으로 수행되었다. 도움을 주신 관계자 여러분께 감사하는 바이다.

References

- 1) J. H. Jung, S. C. Kim, H. C. Kim, J. P. Won and W. Kim, "A Study on Cooling Performance Analysis of In-Wheel Motor," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.3034-3038, 2009.
- 2) J. H. Jung, S. C. Kim and J. P. Hong, "A Study on Cooling Performance of In-wheel for Green Car," Transactions of KSAE, Vol.20, No.1, pp.61-67, 2012.
- 3) P. Turnbull, J. Kuo, R. Schultz and B. Turner, "Thermal Analysis of an Electric Machine for a Hybrid Vehicle," SAE 2004-01-0565, 2004.
- 4) 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.
- 5) K. Farsane, P. Desevaux and P. K. Panday, "Experimental Study of the Cooling of a Closed Type Electric Motor," Applied Thermal Engineering, Vol.20, No.14, pp.1321-1334, 2000.
- 6) D. R. Lee, "Investigation of Cooling Performance of the Driving Motor Utilizing Heat Pipe," Transactions of KSPSE, Vol.10, No.4, pp.11-16, 2006.
- 7) D. B. Choi, S. T. Kim, S. H. Jung, J. H. Kim and Y. K. Kim, "Thermal Characteristics of the High Frequency Motor Spindle according to the Bearing Preloads and Cooling Conditions," Transactions of KSMTE, Vol.14, No.6, pp.31-36, 2005.
- 8) SC/Tetra Version 7 User's Guide Solver Reference, 2007.