그린카용 인휠 모터의 냉각 성능에 관한 연구

정 정 훈¹⁾ · 김 성 철^{*1)} · 홍 정 표²⁾

자동차부품연구원 그린카 파워트레인연구본부¹⁾ · 한양대학교 자동차공학과²⁾

A Study on Cooling Performance of In-wheel Motor for Green Car

Jung Hun Jung¹⁾ · Sung Chul Kim^{*1)} · Jung Pyo Hong²⁾

¹⁾Green Car Powertrain R&D Division, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-ri, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 12 January 2011 / Revised 18 March 2011 / Accepted 20 March 2011)

Abstract : The in-wheel motor used in green car was designed and constructed for an electric direct-drive traction system. It is difficult to connect cooling water piping because the in-wheel motor is located within the wheel structure. In the air cooling structure for the in-wheel motor, a outer surface on the housing is provided with cooling grooves to increase the heat transfer area. In this study, we carried out the analysis on the fluid flow and thermal characteristics of the in-wheel motor under the effects of motor speed and heat generation. In order to check the problem of heat release, the analysis has been performed using conjugate heat transfer (conduction and convection). As a result, flow fields and temperature distribution inside the in-wheel motor were obtained for base speed condition (1250 rpm) and maximum speed condition (5000 rpm). Also, the thermo-flow characteristics analysis of in-wheel motor for vehicles was performed in consideration of ram air effect. Therefore, we checked the feasibility of the air cooling for the housing geometry having cooling grooves and investigated the cooling performance enhancement.

Key words : In-wheel motor(인휠 모터), Green car(그린카), Motor cooling(모터 냉각), Thermal analysis(열해석), Performance(성능), Housing(하우징)

1. 서 론

최근에 내연기관을 대체할 수 있는 미래의 친환경 자동차로서 전기자동차, 플러그인 하이브리드 자동차 및 연료전지자동차에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 그린카를 구성하는 공통 부품 중에 구동모터는 내연기관에서의 파워트레인 역할을 담당하는 핵심부품이다. 구동모터는 장착위치에 따라 크게 두 가지 종류로 나누어지는데, 첫 번째로 단일 모터(Coaxial Motor)는 중앙에 설치되어 구동축을 통하여 바퀴로 동력을 전달하는 방식이며, 차동장치를 필요로 한다. 두 번째로 인휠 모터

(In-Wheel Motor)는 휠 내에 존재하며 구동축이 없이 바퀴를 직구동시키는 방식으로, 동력전달효율이 높고 차량 실내 공간을 추가로 확보할 수 있는 장점이 있다. 또한, 구동 시 각 휠 모터 동력 분배 및 제동 시 회생제동으로 인한 제동에너지 회수를 극대화함으로써 연비 개선의 효과를 얻을 수 있다.¹⁻³⁾

이러한 신개념의 구동시스템인 인휠 모터의 설계 핵심 기술 중의 하나인 냉각 기술은 모터의 고효율, 고성능화, 시스템 소형화 및 내구성 확보에 밀접한 관련이 있다. 모터 냉각 기술은 전기자동차 및 플러그인 하이브리드 자동차에서 강하게 요구되고 있는데, 이는 엔진 없이 모터에서 그 만큼의 토크와 출력을 얻고자 하는 요구가 점점 더 커지고 있기 때문이다

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

다.⁴⁾ 하지만 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, 모터의 하우징 방열 설계가 더욱 중요하다.⁵⁾ 모터의 자체 발열을 줄이기 위한 노력으로는 철심 두께 축소, 소재 변경, 영구자석 배치변경 등이 있는데, 이는 모터 손실을 줄여서 열 발생을 감소시키는 것이다. 이와 더불어 발생된 열을 효과적으로 제거하기 위한 방법으로는 배관을 연결하여 모터 내부에 냉각 유체를 이용하거나(수냉식/유냉식), 하우징 표면에서 외기와 강제 대류현상(공랭식)을 이용하는 것이 일반적이다. Wang⁶⁾ 등은 하이브리드 자동차용으로서 최대 출력 25 kW급 영구자석 매입형 전동기의 열유동 해석에 대한 연구를 하여, 모터의 열전달 특성을 파악하였고 실험과의 비교 평가를 통하여 해석 정확도를 검증하였다. 또한, 가혹조건에서의 성능을 예측하기 위하여 비정상상태로 해석하여 모터의 온도를 예측하였으며, 설계 개선을 위한 근거 자료로서 활용하였다.

본 연구에서는 인휠 모터의 각 부품별 온도 분포 및 열전달 특성을 파악하였고, 이를 실험결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한 차량 주행풍을 고려하여 실차상태에서의 모터 성능을 예측하였다. 그리하여 복합형 냉각함을 갖는 인휠 모터에 대한 공랭 방식의 적용가능성을 살펴보고, 냉각 성능을 향상시키기 위한 연구 방향을 설정하였다.

2. 수치 해석

2.1 해석 모델

사용된 인휠 모터는 영구자석 매입형 전동기로서 상세 제원을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, 구조적으로는 크게 고정부와 회전부로 구분된다. 고정부는 코일(Coil), 스테이터 코어(Stator core), 절연체(Insulator), 하우징(Housing), 커버(Cover), 베어링(Bearing) 등으로 구성되며, 스테이터 코어는 분할 방식을 적용하였고 절연체는 N중 절연등급이 사용되었다. 하우징은 모터 내부를 보호하는 역할과 더불어 발생 열을 대류 열전달에 의해 외부로 방출시키는 주요 수단이다. 이러한 이유

Table 1 The specifications of in-wheel motor

Item	Value
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 A _{rms}
Maximum/rated output power	25/10 kW
Base/maximum speed	1250/5000 rpm

(a) Outside

(b) Inside

Fig. 1 Geometry of in-wheel motor

로 공랭식 냉각 구조에서는 다수의 냉각홈 또는 방열핀이 존재한다. 회전부는 네오디뮴(Nd) 계열의 영구자석(Permanent magnet)과 이를 둘러싸고 있는 로터 코어(Rotor core), 축(Shaft), 로터와 축의 결합 구조물(Fixing part)로 이루어진다. 실제로 인휠 모터는 감속기가 내부에 포함되지만 단품 해석에서는 실험결과와의 비교 평가를 위해 감속기를 제외하였다.

코일부는 실제로 구리선이 여러 가닥이 겹겹이 감겨 있으나, 해석 모델에서는 이것을 하나의 고체

Fig. 2 Grid model of whole configuration

형상으로 가정하고 모델링을 단순화하였다. 해석 모델 형상을 실제와 유사하게 하기 위하여 격자는 사면체 격자를 사용하였고, 유체영역의 벽 근처에서 프리즘 격자를 삽입하여 전체 격자수는 약 3천만 개이다. 이렇게 생성된 격자의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 해석 격자 모델링은 전체 모델을 열유동 해석영역으로 정하고, 격자수와 해석 시간을 충분히 확보하여 해석 정확도를 향상시켰다.

2.2 경계 조건

본 연구에서는 열유동 해석을 위하여 다음과 같은 기본적인 가정을 하였다. 인휠 모터 주위의 공기 유체 흐름은 3차원, 정상, 비압축성 및 난류유동이다. 또한 이는 밀폐형이므로 내/외부의 공기는 서로 유출입이 없으며, 각 부품의 물성은 온도에 관계없이 일정하다. 해석을 위한 경계조건은 Table 2에 상세히 나타내었다.

외기 온도는 상온 20°C로 설정하였고, 인휠 모터의 연속정격 10 kW 운전조건으로 기저속도인 1250 rpm과 최대속도 5000 rpm에서 해석을 각각 수행하였다. 모터의 회전을 모사하기 위하여 MRF(Multiple moving reference frames) 기법을 활용하였고, 고정자와 외곽 경계는 정지된 벽(Stationary wall) 조건을 주었다. 모터에서 발생하는 열원으로는 구리로 만든 권선의 저항 때문에 생기는 동손, 외부 자계의 변화로 인한 히스테리시스 손실과 전자기유도 현상에 의해 변화하는 자계가 철심에서 전류를 발생시켜

Table 2 Boundary condition

		Base speed	Max. speed
Rotating speed (rpm)		1250	5000
Heat source (W)	Coil	257.4	262.9
	Stator core	86.9	300
	Rotor core	8	266.6
	Magnet	15.2	192.7
	Bearing	38.9	295.9
	Reduction gear	268	262
T_{amb} (°C)		20	
P_{amb}		Atmospheric pressure	

나타나는 와전류 손실을 포함하는 철손, 베어링 부위의 마찰에 의한 기계손 등으로 나눌 수 있다. 보다 정확한 해석을 위한 발열량으로 동손 및 마찰손은 실험을 통하여 산출하였으며, 철손은 유한요소 해석 결과를 반영하였다. 특히, 철손은 로터에서 공극에 가까운 부위와 이외의 영역에서 손실 분포가 현저히 다르므로 이를 고려하여 모델링을 하였다. 열원에 의한 각 부품간의 전도 열전달, 내부 회전체에 의하여 발생하는 강제대류 열전달 및 모터 외곽 하우징과 외기와의 자연대류 열전달 현상을 정상상태로 가정하여 해석하였다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 모터 기저속도 조건

모터가 1250 rpm으로 회전하는 기저속도 조건의 결과로서 주요 부품별 평균 체적 온도를 Table 3에 나타내었으며, 이들 중에서 고정자의 코일, 회전자의 로터와 영구자석에서 온도가 높게 형성된 것을 알 수 있다. 특히 최대 온도는 코일임을 알 수 있는데, 이러한 이유로는 해당조건에서 고토크 특성을 요구함으로써 코일에 흐르는 전류가 약 45 A로 높아 동손이 크게 발생하기 때문에 나타난 결과로 여겨진다. 결과적으로 코일부의 열집중은 절연체를 손상시킬 수 있고, 영구자석부인 경우는 자속밀도를 감소시켜 모터 출력을 저하시킬 수 있으므로 이를 개선할 필요가 있다.

Fig. 3에서는 모터 축 중심 단면에서의 온도 분포 및 속도 벡터를 나타내었다. Fig. 3(a)에서 알 수 있는 바와 같이, 모터에서 발생 열의 흐름을 살펴보면

Table 3 Temperature values of each part at base speed

	Name	T_{ave} (°C)
Fixed parts	Housing	136.9
	Stator core	142.3
	Coil	147.7
	Insulator	146.1
Rotating parts	Rotor core	144.1
	Magnet	143.8
	Shaft	119.1

(a) Temperature contours (°C)

(b) Velocity vectors (m/s)

Fig. 3 Axial cross-section of the in-wheel motor at base speed

고정부에서는 코일의 발열이 스테이터를 거쳐 하우징으로 전도되고 이는 다시 외부 공기와의 자연대류를 통하여 열방출이 이루어지는 반면에, 회전부는 영구자석 및 로터의 발열이 회전구조물을 거쳐 축으로 이동하거나, 내부 공기를 통해 하우징으로 전달되며, 특히 로터의 회전을 통해 발생되어지는

(a) Temperature contours (°C)

(b) Velocity vectors (m/s)

Fig. 4 Radial cross-section of the in-wheel motor at base speed

강제 대류가 중요한 냉각 인자가 된다. Fig. 3(b)의 속도장을 보면 공극 부위에서 가장 빠른 속도를 나타내고 있으며, 로터 및 회전구조물 주위에서 유동이 발달하고 공기가 하우징 내·외부 벽에 부딪혀 와류가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서는 로터의 회전 방향에 수직인 부분의 단면 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)의 온도 분포에서 알 수 있듯이 모터 외부가 주로 자연대류로 인하여 냉각되므로 축을 제외한 모터 구성 부품들의 온도가 높게 형성되고 있다. Fig. 4(b)는 스테이터와 로터 사이의 유동 분포를 확대하여 나타낸 것으로, 이 영역은 고온부 간에 가까이 접하고 있으며 로터 회전에 의하여 강제대류 효과가 크지만 서로의 온도차가 작아 열전달은 활발하게 이루어지지 않는다. 코일과 코일 사이에도 공기 유동영역이 존재하지만 속도가 낮아 열 흐름이

거의 없고, 스테이터 끝단 사이에서 유동체순환 영역이 존재하지만 이 또한 낮은 속도로 인하여 열전달 효과가 없는 것으로 파악된다.

3.2 모터 최대속도 조건

영구자석 매입형 모터는 특성상 고속에서의 높은 주파수로 인하여 철손, 특히 영구자석 와전류손이 많이 발생하여 회전자에 매입된 영구자석의 감자 위험이 높고 효율 저감의 위험성도 가진다. 모터 최대속도 5000 rpm인 경우에 대한 각 부품의 온도 결과를 Table 4에 정리하였다. 모터의 전체적인 온도가 기저속도인 경우와 비교하여 상당히 높게 나타났고, 특히 열원이 집중되어 있는 영구자석과 로터 코어에서 가장 높은 온도를 나타내었는데 이는 모터의 고속 운전 시 발생하는 열손실 특성 때문이다.

Fig. 5의 온도 분포에서도 알 수 있는 바와 같이, 회전자에 열이 집중되어 있는데 이것은 고정자의 발열이 최종적으로 하우징에 전도되어 외기와 자연대류로 냉각되는 반면에, 회전자의 발열은 회전에 의한 외부 강제대류로 인하여 일부의 열이 축을 통해 방출되고, 나머지는 밀폐형인 모터의 구조적인 한계로 인하여 내부 공기가 모터 안에서만 낮은 속도로 순환되므로 하우징으로의 열전달 효과는 미비한 것으로 판단된다.

3.3 실차 주행풍 조건

앞 절에서는 인휠 모터의 외부 공기를 자연대류 현상으로만 가정하였기 때문에 과도한 온도가 예측되었지만, 실제 차량에 장착되어 주행풍에 의한 효과를 감안하면 전반적으로 이보다 훨씬 낮은 온도를 나타낼 것이다. 이러한 실차 주행풍의 영향을 살펴보기 위하여, 인휠 모터가 최대 회전속도인 5000

(a) Axial cross-section

(b) Radial cross-section

Fig. 5 Temperature contours of the in-wheel motor at max. speed (°C)

Fig. 6 Stream line velocity at in-wheel motor outside

rpm으로 운전되고 있을 경우에 주행풍 속도 및 방향을 고려하여 해석을 수행하였다. 입구 공기의 온도는 상온 20°C, 속도 및 방향은 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 13.2 m/s, 35°로 각각 설정하였다. 이는 인휠 모터의 회전 속도 5000 rpm에 해당하는 장착 차량의 주행 속도 120 km/h일 때, 모터 하우징 주변 입구공

Table 4 Temperature values of each part at max. speed

	Name	T _{ave} (°C)
Fixed parts	Housing	275.5
	Stator core	286.7
	Coil	293.9
	Insulator	292.6
Rotating parts	Rotor core	333.9
	Magnet	332.8
	Shaft	226.4

Table 5 Temperature values of each part at max. speed considered ram air effect

	Name	T_{ave} (°C)
Fixed parts	Housing	85.2
	Stator core	94
	Coil	101.2
	Insulator	99.9
	Reduction gear	102.4
Rotating parts	Rotor core	139.1
	Magnet	140.2
	Shaft	109.2
	Oil	110.8

(a) Axial cross section

(b) Radial cross section

Fig. 7 Temperature contours of in-wheel motor considered ram air effect (°C)

기의 평균 유속 및 방향으로 실차 공력해석을 통하여 계산되었다. 이 때, 유입 공기의 난류 강도 영향은 미비한 것으로 판단되어 일반적인 수준 5%를 기준으로 삼았다. Table 5는 주요 부분에서의 온도 결

과를 나타낸 것으로 영구자석에서 최대 140.2°C를 나타낸 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 인휠 모터의 축방향 및 원주방향 단면에서의 온도 분포를 나타내고 있으며, 회전자 부위에서의 온도가 높게 형성됨을 확인할 수 있다. 앞에서와 마찬가지로 이유로, 매입형 영구자석 전동기의 특성상 고속에서는 높은 주파수 특성으로 인하여 철손, 특히 와전류손이 많이 발생하기 때문이다. 따라서 인휠 모터 냉각을 위한 공랭방식의 적용 가능성이 확인되었고, 방열 성능을 더욱 높이기 위해서는 외부 하우징과 더불어 내부 유로 형상의 개선이 필요하다.

3.4 온도 측정 실험

인휠 모터의 해석결과에 대한 타당성을 검증하고, correlation을 하기 위한 온도 실험을 수행하였다. Fig. 8에서는 온도 측정을 위한 장치 구성도이며, 이는 인휠 모터, 장착용 지그, 모터 제어기, 부하 모터, 토크 센서 및 온도 계측기 등으로 이루어져 있다. 인휠 모터의 운전은 10 kW의 연속 정격운전 1250 rpm 조건으로, 전압 140 V, 전류 45 A, 역률 95%, 토크 76.5 Nm의 상태로 모터의 온도가 포화될 때까지 연속 운전을 하였다. 온도 측정을 위해 사용한 열전대는 T-type을 사용하였고, 온도 데이터를 저장하기 위한 계측기는 요코가와사의 MV100이다. 온도 측정 위치는 동손에 의하여 최대 온도가 예상되는 코일 엔드 표면에 90° 등간격으로 부착하였다. 그리하

Fig. 8 Experimental apparatus of in-wheel motor

여 모터의 온도가 10분 동안에 온도측정 변화가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이하를 정상상태로 간주하여 포화된 후의 측정 결과로서, 코일의 온도는 131.4°C 까지 상승하였다. 동일 조건에서의 해석 결과는 코일 온도가 147.7°C 로 약 10%의 오차를 나타내었다. 그러나 오차의 요인은 실험 장비의 한계로 인한 것으로 하우징에서 방출되는 일부 열이 지그로 전달되어진 것으로 추정되는 바, 이를 고려한다면 해석 정확도가 만족할 만한 수준으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기를 동력원으로 사용하는 자동차에 적용되는 새로운 개념의 구동시스템인 인휠 모터의 열유동 해석을 통하여 단품 및 실차상태에서의 각 부품별 온도가 예측되었고, 냉각 성능 특성을 파악하였다. 이를 바탕으로 하여 공랭식 냉각 방식의 적용가능성을 확인하였고, 냉각 성능 향상을 위한 연구 방향을 설정하였다.

- 1) 복합형 냉각홈 구조의 하우징을 갖고 있는 인휠 모터의 정격 기저속도(1250 rpm) 운전 조건에서는 코일부의 온도가 147.7°C 로 가장 높았으나, 정격 최대속도(5000 rpm)에서는 영구자석 및 로터 코어에서 온도가 집중되는 것을 알 수 있었다.
- 2) 정격 최대속도 조건에서 실제 차량의 주행풍에 의한 냉각 효과를 고려하게 되면, 단품 상태에서와 비교하여 전체적으로 훨씬 낮은 온도 분포를 얻을 수 있었으며, 특히 최대 온도는 영구자석에서 140.2°C 를 나타내었다.
- 3) 인휠 모터에 대한 냉각 구조(외부 하우징 및 내부 유로 형상)에 대한 개선 방향을 설정하였으며, 냉각 성능 최적화를 위하여 다양한 구조설계 인자들에 대하여 연구를 지속할 예정이다.

후 기

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

References

- 1) T. Lee and D. Kim, "Technical Trend of In-wheel System," Auto Journal, KSAE, Vol.31, No.4, pp.21-25, 2009.
- 2) Y. Hori, "Future Vehicle Driven by Electricity and Control-research on Four-wheel-motored "UOT Electric March II"," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.51, No.5, pp.954-962, 2004.
- 3) S. Sakai, H. Sado, and Y. Hori, "Novel Skid Detection Method without Vehicle Chassis Speed for Electric Vehicle," JSAE Review (Elsevier Science), Vol.21, No.4, pp.503-510, 2000.
- 4) E. Wall and S. Rogers, Thermal Control for Power Electronics and Motors, FY 2006 Progress Report, pp.7-140, 2006.
- 5) J. Jung, S. Kim, H. Kim, J. Won and W. Kim, "A Study on Cooling Performance Analysis of In-Wheel Motor," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.3034-3038, 2009.
- 6) P. Turnbull, J. Kuo, R. Schultz and B. Turner, "Thermal Analysis of an Electric Machine for a Hybrid Vehicle," SAE World Congress, 2004-01-0565, 2004.