하이브리드 차량용 ISG(Integrated Starter Generator)의 방열 설계를 위한 해석적 연구

김 대 건 · 김 성 철*

자동차부품연구원 그린카파워트레인연구본부

An Analysis Study for Thermal Design of ISG (Integrated Starter & Generator) for Hybrid Electric Vehicle

Dae Geon Kim · Sung Chul Kim*

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

(Received 14 September 2012 / Revised 4 December 2012 / Accepted 1 January 2013)

Abstract : Hybrid electric vehicles have applied electric parts for saving fuel consumption and reducing levels of environmental pollution. Electrification of automobiles is indispensable for entering into global market because of enhanced environment restriction. ISG (Integrated Starter & Generator) system is one of main electric parts and can improve fuel efficiency more than other components by using Idle Stop & Go function and regenerative braking system. However, if ISG motor and inverter work under the continuously high load condition, it will make them the decrease of performance and durability. So the ISG motor and inverter need to properly design the cooling system of them. In this study, we suggested the enhancement points by modifying the thermal design of ISG motor and then confirmed the improvement of the cooling performance.

Key words : ISG motor(아이에스지 모터), Cooling performance(냉각 성능), Thermal design(방열 설계), CFD (Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)

1. 서 론

최근 들어, 산업 전반으로 고갈되어가는 화석연료와 온실가스 배출로 인한 기후변화로 저탄소/녹색성장이 새로운 모델로 부각되고 있다. 이러한 패러다임에 맞춰 자동차 산업 분야에서는 전기, 전자 시스템을 적용하여 차량의 연비 성능을 향상시켜 나가고 있으며, 그 중에서도 다양한 모터의 적용이 대표적이라 할 수 있다. 차량에서 모터의 적용 사례는 하이브리드자동차 및 전기자동차에 사용되는 구동모터뿐만 아니라 기존의 엔진구동력에 의존하던

조향, 제동 및 공조 시스템에도 적용이 되어 차량의 연비를 개선시키고, 운전자에게는 보다 쾌적한 운전 환경을 제공하고 있다.¹⁾ ISG (Integrated Starter Generator) 시스템은 두 개의 부품(스타터, 제너레이터)을 하나로 결합시켜 경량화가 가능하며, 제동구간에서 회생제동을 이용해 버려지는 에너지를 회수하여 차량의 효율을 높여줄 수 있는 부품이다. 특히 아이들 스탑 앤 고(Idle Stop & Go) 기능을 사용하여 정차구간에서는 엔진을 멈춰줌으로써 공회전으로 인한 연료 소모를 줄여 우수한 연비향상을 나타낸다. Kim 등²⁾은 하이브리드 차량용 42 V ISG (Idle Stop & Go) 시스템 개발을 통하여 CVS-75 모드에서

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

6%의 연비가 개선되었으며, 극심한 정체지역의 경우 최대 20%이상의 연비 개선효과를 확인하였다. Simopoulos 등³⁾은 42 V SUV 차량에 ISG (Integrated Starter Generator) 시스템을 적용하여 FTP-75, Japan 10/15 및 NYCC (New York City Cycle) 운전모드에서 최대 5%까지 연비 개선효과를 얻었다.

운전자의 편의와 더불어 차량의 성능 향상을 위해 적용되는 각종 전장품들은 일반적으로 온도, 습도 및 충격 등에 취약하며, 모터의 효율/내구성은 차량의 동력성능 및 주행거리 등에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 효과적인 열관리(냉각) 기술개발이 필수적이다.⁴⁾ 모터의 영구자석(Permanent magnet)은 고온의 환경에 노출될 경우 고온감자 특성으로 인하여 성능이 급격히 떨어져 모터의 효율에 직접적인 영향을 줄 수 있고, 코일 절연체(H중, N중 등)는 종류별로 내열한도가 정해져 있으며, 고온으로 인해 권선의 절연이 파괴되어 소손되는 것을 방지할 필요가 있다. 따라서 차량용 모터 개발에 있어 방열특성을 파악하고 냉각성능을 개선시키기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다.^{5,6)} Kimotho 등⁷⁾은 전기자동차의 BLDC 모터를 대상으로 CFD 해석을 이용한 적절한 하우스징 핀 형상을 적용하여 최대 15%의 냉각성능을 향상시켰다. Li⁸⁾는 전기 모터에 설치된 냉각팬 블레이드의 각도를 변경해가면서 유동 해석을 진행하였고, 유량과 효율이 최대가 되는 설계 값을 도출하였다.

본 연구에서는 5kW급 42V용 ISG 모터의 열유동 해석을 수행하여 열전달 특성을 파악하고, 이를 통해 방열 설계를 위한 인자설정 및 개선점을 제시하였다. 또한 얻어진 열전달 특성 자료를 바탕으로 하여 내부 유로 및 냉각팬 형상 등의 성능 개선을 수행하였다.

2. 수치 해석

2.1 해석 모델

ISG 모터의 열유동 해석에 사용된 지배방정식은 질량 보존, 운동량 보존, 에너지 보존 방정식이며, 난류 모델은 Kato-Launder 모델을 수정한 MP (Modified Production) k- ϵ 모델을 사용하였다. 이것은 표준 k- ϵ 난류 모델이 정체점 부근에서의 과다한 예측을

(a) Radial-cross section

(b) Axial-cross section

Fig. 1 Grid model of whole configuration

보상하기 위해 수정된 모델이다. 또한 해석 프로그램으로는 상용 SC/Tetra가 사용되었다.⁹⁾

ISG 모터는 로터, 영구자석 및 축 등으로 구성된 회전자와 스테이터, 코일 등으로 구성된 고정자로 되어 있다. 모터부 양쪽으로는 하우스징이 설치되어 양단의 원심형 팬과 베어링 그리고 레줄버 등의 부품들을 보호하며 방열판 역할을 하고 있다. 하우스징 내부의 원심형 팬이 모터부와 함께 회전을 하여 발생하는 강제대류에 의한 공랭식 냉각방식을 이용하고 있다. 열유동 해석에 불필요한 홀, 간극 및 형상 등을 수정하였고, 이를 바탕으로 생성한 격자는 Fig. 1을 통해 확인할 수 있다. 또한 모터부의 스테이터와 로터 사이의 공극이 0.5 mm로 좁아 많은 격자가 밀집되어 있어 총 격자수는 약 2000만개가 사용되었다. 유체영역에는 프리즘 격자를 적용하여 모터 표면 주위의 해석 정확도를 높이고자 하였으며, 해석

격자의 변화를 줄여주기 위하여 기본 모델에서 형상이 변경된 부분을 제외한 곳은 동일한 격자 형상을 이용하였다.

2.2 경계 조건

ISG 모터의 방열 설계를 위한 열유동 해석은 크게 2단계로 진행하였다. 우선 상온 20°C인 일반 조건 및 실차(하이브리드 차량) 엔진룸의 최대 온도인 95°C를 가혹 조건으로 설정하여 각각 수행하였고, 또한 모터 다이내믹의 실험 환경에 맞추어 지그에 장착된 모터의 해석 모델에 대한 검증을 하였다. 다음으로는 ISG 모터의 형상 개선 모델의 다양한 설계 파라미터들을 변경해가면서, 냉각 성능의 향상 정도를 파악하였다.

본 연구에서는 ISG 모터의 열유동 해석을 위하여 ISG 모터 주위 공기 유체의 흐름은 3차원 정상상태 비압축성 난류유동이며, 구성부품의 물성치는 온도에 관계없이 일정한 것으로 가정하였다. 모터 발열량은 전자기 해석 프로그램인 모터프로 (MotorPro)¹⁰⁾를 통해 산정된 값을 사용하였으며, 가혹조건에서는 온도의 상승에 의한 영향을 반영하여 동손(coil) 및 철손(stator core) 발열량이 다시 계산되었다. 하지만 기계손(bearing)은 온도에 의한 영향이 미비하여 동일한 값을 사용하였다. 모터의 회전속도는 일반적으로 구동되는 엔진 회전속도 2000 rpm을 바탕으로 한 3682 rpm을 정격구동 속도로 설정하였다. 이와 같이, ISG 모터의 열유동 해석에 적용된 경계 조건은 Table 1에 나타내었다.

모터부는 회전을 모사하기 위해 MRF(Multiple Reference Frame)기법과 Moving wall 조건을 함께 사용하였다. 냉각팬에는 MRF 기법을 사용하여 가상의 회전 체적을 만들어줌으로써 회전효과를 나타내었고, 원통형인 로터 코어와 축 등은 Moving wall 조건을 통해 회전을 구현해 주었다. 그 이외의 고정자

Table 1 Boundary conditions

Condition	Normal temp.	Harsh high-temp.
Ambient temp. (°C)	20	95
Heat source (W)	Coil 430, Stator core 306, Bearing 18	Coil 557, Stator core 307, Bearing 18
ISG speed (rpm)	3682	

부분과 외벽은 정지된 벽 조건을 적용하여 해석을 진행하였다. 반복 계산 시 종속 변수들의 수렴 정도는 상대 오차의 최대값이 연속방정식, 운동량방정식, 난류방정식 및 에너지방정식의 경우 10^{-6} 이하일 때 수렴된 것으로 판단하였다.

3. 기본 열전달 특성

3.1 일반 조건

일반 조건에서의 주요 부품별 평균 체적 온도를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 해석 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 코일과 스테이터 코어에서 각각 137°C로 동일하게 가장 높게 나타났다. Fig. 2의 각 단면에서의 온도 분포를 통해서도 코일과 스테이터 코어가 가장 높은 온도를 나타내는 것을 알 수 있다. 베어링의 경우 기계손(마찰손, 풍손)에 의한 발열이 있지만 그 양이 적고 다른 부품과의 접촉면을 통한 열전달로 인해 영향은 미비함을 확인할 수 있다. 각 부품간의 열유속은 Table 3에 나타내었으며, 좌측 향이 우측 향으로부터 열을 받은 경우에는 (+)로, 열을 주는 경우에는 (-)로 표현하였다(식 (1)). 스테이터 코어와 플랜지, 브래킷 사이의 전도에 의한 열유속이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서, 열유속을 증가시키거나 하우징과 모터부의 접촉면적을 늘려서 열전달 경로를 개선한다면 ISG 모터의 냉각성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

$$\begin{array}{c} \text{heat flux (+)} \\ \text{Left entry} \longleftrightarrow \text{Right entry} \\ \text{heat flux (-)} \end{array} \quad (1)$$

Table 2 Temperature values of each part

Part name	Temp. (°C) @base (20°C, 3682 rpm)
Flange	117
Stator	137
Coil	137
Front bearing	105
Rear bearing	102
Rotor	100
Shaft	99
Magnet	100
Bracket	119

(a) Radial-cross section

(b) Axial-cross section

Fig. 2 Temperature contours (°C)

Table 3 Heat flux of surface regions

Surface regions	Heat flux (W/m^2) @base (20°C, 3682 rpm)
Air vs. flange	2920
Air vs. stator	2619
Air vs. coil	1077
Air vs. shaft	1170
Air vs. bracket	2545
Air vs. rotor	-3945
Coil vs. stator	-4241
Stator vs. flange	-58758
Stator vs. bracket	-56784

ISG 모터는 양단에 각각 설치된 원심형 팬으로 발달시킨 유동이 모터부를 냉각시키게 된다. 원심 팬에 의해 흡입된 공기가 팬의 바닥에 부딪히고 블레이드를 따라 출구 홀을 통해 배출되는 내부유동 특성을 확인하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다. 이때 입·출구에서의 유동은 사선방향으로 흐르고 있으며 팬과 하우징 사이의 공간과 코일, 스테이터 주

Fig. 3 Internal flow of ISG cooling fan (m/s)

Fig. 4 Pressure contours (Pa)

변에서 팬 방향으로 재순환되는 유동이 존재하여 유동 및 압력손실이 발생하고 있는 것으로 판단된다. 또한 원활한 배출 구조를 갖지 못하는 이유로, 원심형 팬에 의해 형성된 내부유동이 하우징 벽면에 부딪혀 출구 홀 근처에서 높은 압력분포가 나타나는 것을 Fig. 4를 통하여 알 수 있다. 따라서 ISG 모터 하우징의 입출구 홀 위치, 출구 홀의 각도와 개수 등을 변경하여 내부유동 저항을 개선할 필요가 있다.

3.2 가혹 조건

실제로 ISG 모터가 구동되는 하이브리드 차량 엔진룸의 가혹 환경온도인 95°C에서 열유동 해석을 진행하였다. 이 때 외기 온도의 증가에 따라 모터의 발열량도 변화하므로 이를 계산정하여 입력값으로 주었다. 발열량의 증가로 인해 모터 각 부품의 온도는 전반적으로 외기온도 변화치인 75°C보다 15°C 정도 더 상승하였음을 Table 4에서 알 수 있다. 외기

Table 4 Temperature values of each part

Part name	Temp. (°C) @harsh-high (95°C, 3682 rpm)
Flange	204
Stator	227
Coil	228
Front bearing	187
Rear bearing	191
Rotor	184
Shaft	184
Magnet	185
Bracket	206

온도 95°C에서의 결과도 20°C에서와 마찬가지로, 스테이터 코어 및 코일에서 가장 높은 온도를 나타내었다. 코일의 경우 H중 절연 등급으로 제한 온도인 180°C를 넘는 228°C의 온도를 보여, 냉각 개선이 필요한 것을 확인하였다.

3.3 해석 검증

ISG 모터의 해석결과에 대한 타당성을 검증하고, Correlation을 하기 위해 Fig. 5와 같이 포화 온도 실험을 수행하였다. ISG 모터의 실험 환경에 의한 열손실을 고려하여 지그에 장착된 형상 모델(단, 축에 의한 열손실 무시)을 사용함으로써, 모터 다이내믹 실험과 동등한 조건(모터 회전수 3682 rpm, 외기온도 20°C)으로 해석을 하였다. 지그의 재질은 철이며, 플랜지의 상단에 부착되어있는 형태이다.

모터의 온도가 10분 동안에 온도측정 변화가 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이하를 정상상태로 간주하여 포화된 후의 측정 결과로서, Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 코일의 온

Fig. 5 Experimental apparatus of ISG

Fig. 6 Comparison of analysis and experiment results at coil (@increased temperature of 99°C)

도는 119°C까지 상승하였다. 동일 조건에서의 해석 결과는 코일 온도가 126°C로 약 7% (상승 온도 99°C 기준)의 오차를 나타내었다. 이는 해석 정확도가 만족할 만한 수준인 것으로 판단된다.

4. 방열 설계 개선

4.1 입/출구 홀 위치 변경

플랜지부 및 브라켓부에서 각각 입구 홀을 저압이 형성되는 중심부로 이동시키고, 출구 홀은 유동 형태가 개선될 수 있도록 아랫방향으로 이동시키면 내부 유동 개선으로 인한 유량 증대 효과가 있을 것으로 예상하고(Fig. 3), 이를 고려한 설계 변경 가능한 위치를 설정하여 열유동 해석을 진행하였다. Fig. 7에는 기본모델과 홀 위치를 변경한 모델 단면의 속도 벡터를 나타내었다. 출구 홀의 위치를 이동시킴으로써 냉각팬을 통과하는 유동이 아랫방향으로 이동한 것을 알 수 있으며 코일과 스테이터 주변에서 재순환하던 유동이 다소 줄어든 것을 확인할 수 있다. Table 5를 통해서 코일 기준 온도가 9°C 내외로 낮아졌으며, 이는 내부 유동 개선에 의한 온도 저감 효과인 것으로 판단된다.

4.2 출구 홀 각도 조절

기본 열유동 해석 결과를 통하여 원심형 팬에 의해 형성된 유동이 팬의 회전방향으로 기울어져 배출되는 것을 확인하였고, 이러한 토출 유동이 수직으로 뚫려있는 출구 홀에 부딪혀 유동 저항이 발생

Fig. 7 Velocity vectors with respect to position change of inlet/outlet holes of ISG cooling fan

Table 5 Temperature values of each model

Part name	Base (°C)	Hole position change (°C)	Hole angle change (°C)	Hole number addition (°C)	Blade angle change (°C)
Flange	117	106	104	101	101
Bracket	119	108	106	104	103
Stator	137	127	127	125	122
Rotor	100	90	87	85	85
Coil	137	128	127	125	123
Shaft	99	90	87	84	85

Fig. 8 Velocity vectors with respect to angle change of outlet holes of ISG cooling fan (m/s)

되므로 Fig. 8과 같이 출구 홀 각도를 회전방향으로 35° 기울인 모델을 대상으로 해석을 진행하였다. 출구홀 각도 변경 모델은 코일을 기준으로 하여 평균 온도가 약 10°C 낮아졌다(Table 5). 이는 출구 홀에서의 재순환 유동이 줄어들고 압력강하도 감소하였기 때문으로 판단되며 개선된 압력분포는 Fig. 9를 통해 알 수 있다.

4.3 출구 홀 추가 설치

유동면적 증대 방안으로 하우징의 고정용 암(Arm)의 간섭이 없는 부분에 출구 홀을 추가하였다. 브라켓에는 고정용 암과 간섭되는 부분이 없어 전

체 방향에 6개의 홀을 설치하였고, 플랜지의 경우 고정용 암의 간섭으로 인해 일부(4개)를 추가하였다. Fig. 10은 플랜지에 출구 홀을 추가한 형상에서의 속도 벡터를 보여주고 있다. Table 5를 통해 스테이터와 코일이 약 12°C, 하우징(플랜지, 브라켓)의 경우 약 15°C의 온도가 감소하여 냉각성능이 상당히 개선된 것을 확인하였다.

4.4 원심형 팬 형상 변경

팬 블레이드의 직경 증대가 유량에 미치는 영향을 파악하기 위하여, Fig. 11과 같이 기본 모델에서 수직으로 설계된 원심형 팬의 블레이드 각도를

Fig. 9 Pressure contours with respect to angle change of outlet holes of ISG cooling fan (Pa)

Fig. 10 Velocity vectors with respect to added outlet holes of ISG cooling fan (m/s)

Fig. 11 Modified geometry of fan blade

높히는 방향으로 변경하여 팬 반경을 5.47 mm 만큼 증가시켰다. 팬의 블레이드 깃 각도를 변경함으로써

플랜지부 및 브라켓부에서 유량이 17% 정도 증가하였고, 코일을 기준으로 약 15°C 내외의 온도 감소 효과를 나타내었다(Fig. 12). 이러한 설계 파라미터에 따른 전체 해석 결과는 Table 5에 비교 정리하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 차량용 5 kW급 42 V ISG 모터의 냉각 성능을 향상시키고자 모터 내부의 열전달 특성과 유동 현상을 분석하였고, 다양한 방

Fig. 12 Velocity vectors with respect to blade angle change of ISG cooling fan (m/s)

열설계 개선안을 도출하여 각각에 대해 냉각 효과를 살펴보았다.

- 1) 일반(외기 20°C) 및 가혹(외기 95°C) 조건에서 주 발열원인 스테이터 코어와 코일의 온도가 최대 임을 확인하였고, 열유속에 따른 열전달 경로에 의하여 모터에서 발생된 열이 대부분 플랜지와 브래킷으로 전도 열전달이 이루어짐을 알 수 있었다.
- 2) 가혹조건에서는 외부 고온 환경에 의한 모터 손실 변화 값을 적용함에 따라, 전체적으로 온도가 90°C 정도 증가하여 일반조건과 비교하여 15°C 추가 상승하였다.
- 3) 현 냉각팬에 의한 공기유동 특성으로 볼 때, 플랜지 및 브래킷 홀 형상 등에서 저항이 커 유동을 방해하였다. 따라서 ISG 모터 하우징의 입출구 홀 위치, 출구 홀의 각도와 개수 등을 변경함으로써 재순환 유동 및 압력손실을 줄여 내부유동 저항을 개선하였다.
- 4) 모터의 코일부 온도를 기준으로, 기본모델과 비교하여 출구 홀의 위치 변경 모델의 경우 9°C, 홀 각도를 변경한 모델은 10°C, 그리고 홀의 개수를 추가한 모델에서는 12°C가 각각 감소하는 냉각 효과를 나타내었다.
- 5) ISG 모터 내부의 레이아웃을 고려한 원심팬 블레이드 각도를 20° 정도 낮혀 직경을 증대시키는 방법으로, 유량이 약 17% 상승하여 코일부에서는 14°C 정도 추가로 냉각되었다.

후 기

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

References

- 1) K. Y. Kim, Eco-friendly Technology for Improving Fuel Economy, Auto Journal, KSAE, pp.32-38, 2012.
- 2) S. J. Kim, J. Y. Yu, C. A. Gwon and H. J. Kim, "Idle Stop & Go System Development for Automatic Transmission Vehicle," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.647-652, 2011.
- 3) G. Simopoulos, J. Macbain, E. Schneider and E. Wingeier, "Fuel Economy Improvements in a SUV Equipped with an Integrated Starter Generator," SAE 2001-01-2825, 2001.
- 4) M. Y. Lee, Thermal Management of the Motor/Battery System for Electric Driven Vehicle (VTMS), Auto Journal, KSAE, pp.36-41, 2011.
- 5) J. H. Jung, S. C. Kim and J. P. Hong, "A Study on Cooling Performance of In-wheel Motor for Green Car," Transactions of KSAE, Vol.20, No.1, pp.61-67, 2012.
- 6) S. C. Kim and H. G. Song, "A Study on Thermo-flow Characteristics Analysis of Electric Water Pump," Transactions of KSAE, Vol.20, No.5, pp.95-101, 2012.
- 7) J. Kimotho and P. Hwang, "Thermal Management of Electric Vehicle BLDC Motor," SAE 2011-28-0134, 2011.
- 8) H. M. Li, "Flow Driven by a Stamped Metal Cooling Fan Parametric Study on Blade Angles," Engineering Applications of Computation Fluid Mechanics, Vol.4, No.2, pp.222-236, 2010.
- 9) SC/Tetra Ver.7 User's Guide Solver Reference, 2007.
- 10) MotorPro Ver.2.6.B User's Guide Solver Reference, 2004.