ISG 구동용 인버터의 열유동 해석에 관한 연구

김 대 건 · 김 성 철*

자동차부품연구원 그린카파워트레인연구본부

A Study on the Thermo-flow Analysis of ISG (Integrated Starter and Generator) Driving Inverter

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 15 November 2012 / Revised 20 December 2012 / Accepted 1 January 2013)

Abstract : Recently, many vehicles have applied electric parts for saving fuel consumption and reducing levels of environmental pollution. ISG (integrated starter & generator) is one of main electric parts and can improve fuel efficiency by using idle stop & go function and regenerative braking system. However, if ISG driving inverter works under the continuously high load condition, it will make the performance and durability of the inverter decreased with rising temperature. In this study, we carried out the analysis on the fluid flow and thermal characteristics of the inverter. As a result, we found the MOSFET of the air cooled inverter was increased up to 116°C over the limit temperature. On the other hand, the liquid cooled type inverter's MOSFET was decreased by about 17°C compared to that of the air cooled inverter. Therefore, we verified the feasibility of the liquid cooled type using the present cooling structure.

Key words : ISG(아이에스지), Inverter(인버터), MOSFET(모스펫), Heat dissipation(방열), Thermo-flow(열유동)

Nomenclature

P_{on}	: switching loss at switching on, W
P_{off}	: switching loss at switching off, W
P_c	: conduction loss, W
V	: input voltage, V
I	: input current, A
t_r	: current rising time, sec
t_f	: current falling time, sec
t_{on}	: turn-on time, sec
f	: frequency, Hz
ρ	: specific resistance, Ωm
L	: length, m
S	: cross sectional area, m^2

1. 서 론

오늘날 제한된 석유자원과 온실가스 배출로 인한 기후변화로 고효율·고성능의 차량이 요구되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전기, 전자 시스템을 적용하여 차량의 연비성능을 향상시켜 나가고 있으며, 차량용 각종 모터의 적용이 대표적이라 할 수 있다. 그 중 ISG (integrated starter & generator)는 시동모터와 발전기를 하나로 결합한 부품으로 idle stop & go 시스템을 적용하여 정차 구간에서는 엔진을 멈춰줌으로써 공회전으로 인한 연료 소모를 줄여주고, 제동구간에서는 회생제동을 이용한 에너지 회수를 통하여 차량의 우수한 연비향상 성능을 나타낸다.^{1,2)} ISG의 효율적인 제어를 위해서는 구동용 인버터가 필요하며, 이러한 모터 시스템의 효율을

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

결정하는 중요한 요인이다. 인버터는 초기 시동 구간이나 운전 중 다량의 전력 사용으로 장시간 발전 구동이 지속될 경우 인버터에 큰 발열이 발생하여 시스템의 효율을 떨어뜨리거나 작동불능 상태에 이를 수 있다. 또한 고성능, 소형화가 요구되는 전기자동차 및 하이브리드 자동차가 증가함에 따라 방열 설계에 대한 연구가 필히 중요하다. Lee 등³⁾은 4 kW 급 ISG 모터 및 인버터에 대한 연구를 진행하여 인버터의 방열 성능을 평가하였고, 초기 엔진구동 구간과 지속적인 발전 구간에서의 많은 발열량으로 인해 팬을 이용한 공랭식보다는 수냉식 방식이 유리함을 확인하였다. 수냉식 인버터는 구성부품의 적층구조나 유로형상(쿨링 채널)에 따라 방열 성능이 크게 변할 수 있으며, 이와 관련된 연구가 다양하게 진행되고 있다.^{4,7)} Lee 등⁸⁾은 40 kW급 구동시스템용 인버터의 냉각유로 내부의 핀 높이, 핀 형상 그리고 입구형상 등에 따른 방열 성능의 영향을 살펴 보았으며, 방열목표를 만족할 수 있는 냉각시스템을 설계하였다.

본 연구에서는 하이브리드 차량용 5 kW급 ISG 구동용 인버터의 공랭식 모델의 열유동 해석을 통하여 열전달 특성 파악 및 단순화된 해석 모델을 개발하였다. 또한 현 냉각 구조를 갖는 수냉식 인버터 모델의 적용 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 수치 해석

2.1 해석 모델

ISG 구동용 인버터는 Fig. 1(a), (b)에서 나타낸 바와 같이, 전력모듈과 제어모듈로 구성되어 있고 전력모듈에는 24개의 파워소자(MOSFET)가 설치되어 방열판을 통해 냉각시키는 구조를 갖고 있다. 전자장비 전용해석 코드인 Flotherm⁹⁾에서 제공하는 툴을 통해 모델링된 파워소자를 사용하였으며, 발생하는 열이 전도되는 특성을 정확하게 구현하기 위하여 메탈 PCB의 적층구조를 상세 모델링하였다. 이러한 전력모듈 및 방열판의 적층 구조를 Fig. 1(c)에 나타내었다. 따라서 공랭식 구조가 적용된 모델은 히트싱크 하부에 구성된 방열핀에 의해 열이 방출되고, 수냉식 모델에서는 쿨링채널 내부로 공급되는 냉각수(물 50%, 에틸렌글리콜 50%)에 의해 냉

Fig. 1 Geometry of ISG driving inverter

각된다. 수냉식 모델의 경우 유로부의 압력강하 및 유동 분배량을 보다 정확히 예측하고자 CFDSC/Tetra¹⁰⁾를 사용하여 유동해석을 진행하였다.

해석 모델링은 파워소자, 버스바 및 방열판 등 주요부품 주위에 조밀한 격자가 적용되어 해석 정확도를 높이고자 하였으며, 이렇게 하여 생성된 격자를 Fig. 2에 나타내었다. 해석 격자는 Flotherm에서의 공랭식 모델과 수냉식 모델에 각각 약 100만개와 약 200만개를 각각 사용하였고, SC/Tetra를 이용한 냉각유로 내 유동해석에서는 약 1000만개가 사용되었다.

2.2 경계 조건

ISG 구동용 인버터의 해석 조건은 공랭식 모델과 수냉식 모델에서 동일한 외기 온도 25°C를 적용하였으며, 수냉식 모델의 경우 65°C의 냉각수가 4 L/min

(a) Grid model for SC/Tetra

(b) Grid model for flotherm

Fig. 2 Grid models of liquid cooled inverter

으로 공급되도록 설정하였다. 인버터의 구성부품에 대한 발열량 및 재질물성이 각각의 입력 값으로 사

Table 1 Boundary condition

Cooling type		Air cooled		Liquid cooled	
Ambient temp. (°C)		25		25	95
Ambient pressure		Atmospheric pressure			
Coolant inlet temp. (°C)		-		65	
Coolant flow rate (L/min)		-		4	
Motor speed (rpm)		3682		7000	
Inverter current (A)		133		150	
Heat source (W)	MOSFET	150.8		179.7	
	Busbar	4.21		5.47	

용되었으며, 발열량의 경우 공랭식 모델은 1차 모델인 ISG 모터가 최대 효율 3682 rpm에서 정격으로 구동되어 133 A의 전류가 흐를 때 발생하는 손실이 적용되었고, 수냉식 모델인 경우에는 2차 개발된 ISG 모터의 회전수가 최대 출력 7000 rpm 정격 조건에서 150 A의 전류가 인가될 때 발생하는 손실을 적용하였다. 파워소자는 도통 손실(식 (1))과 스위칭 손실(식 (2))을, 버스바에는 도통 손실(식 (3))을 반영하였다. 이러한 ISG 구동용 인버터의 경계조건 및 재질물성은 Table 1과 Table 2에 자세히 나타내었다.

$$P_c = I^2 \times R \times t_{on} \times f \quad (1)$$

$$P_{on} + P_{off} = 1.5(0.5V \times I \times t_r \times f) + 1.5(0.5V \times I \times t_f \times f) \quad (2)$$

$$P_c = I^2 \times R, \quad R = \rho \frac{L}{S} \quad (3)$$

Table 2 Properties of inverter parts

Part		No.	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg·°C)	Thermal conductivity (W/m·K)
MOSFET	Silicon	24	2330	700	117
	Solder		1450	134	1500
	Die		1000	1000	271
	Case		7870	106	80
Metal PCB	Cu foil	1	8930	385	128
	Insulation		1200	880	0.3
	Al plate		2700	963	180
Capacitor PCB	Cu foil	1	8930	385	128
	Insulation		1200	880	0.3
Heat sink		1	2700	963	180
Busbar		5	8930	385	128
Connector		18	8930	385	128
Case		1	7860	420	63

3. 공랭식 모델 해석 결과

3.1 인버터 온도특성 및 분석

열유동 해석을 통하여 인버터의 구성 부품별 평균체적 온도를 예측하였고, Table 3에서 알 수 있는 바와 같이, 최대 온도는 파워소자인 MOSFET에서 116°C까지 상승하였다. 하이브리드 차량 엔진룸의 온도가 95°C까지 올라갈 수 있는 가혹한 조건에서는 공랭식 냉각구조를 적용한 모델의 파워소자 온도가 150°C 이상 될 수 있고, 일반적인 파워소자의 내열한계 온도가 100°C 내외임을 고려하면 인버터의 냉각방식 변경이 필요하다고 판단된다.

Fig. 3의 온도 분포에서도 알 수 있는 바와 같이, 파워소자의 발열이 방열판으로 전도를 통해 전달되고 있으나 자연 냉각만으로는 온도 구배가 크게 형성되지 않았으며, 밀폐구조를 가진 특성상 뜨거운 내부 공기가 외부로 배출되기에 매우 불리한 구조이다.

Table 3 Temperature values of each part

Part	Temperature (@ 25°C)
MOSFET	116
Metal PCB	97
Heat sink	96

Fig. 3 Temperature contours of the air cooling inverter

3.2 온도 측정 및 해석 검증

사용된 인버터 해석모델의 적용 타당성을 검증하기 위해 ISG 모터/인버터의 온도측정 시험을 진행하였고, 열유동 해석결과와 비교 평가하였다. Fig. 4는 포화온도 측정을 위한 장치 구성도이며, 모터 다이

Fig. 4 Experimental apparatus of ISG motor / inverter

Table 4 Boundary condition for analysis verification

Ambient temperature (°C)		25
Motor speed (rpm)		4000
Motor torque (N·m)		6
Inverter current (A)		68
Heat source (W)	MOSFET	67.5
	Busbar	1.3

나모, 장착용 지그, ISG 모터/인버터, 컨트롤러 등으로 이루어져 있다.¹¹⁾ 인버터의 파워소자와 방열판 표면에 T-type 온도센서를 부착하여 온도를 측정하였으며, 측정된 온도변화가 10분 내에 0.5°C 이내로 들어왔을 때 포화된 것으로 간주하였다. 또한 온도 측정 시험은 모터 다이내모에서의 구동안정성 확보를 위해, 2차 모델의 ISG 모터가 저부하 영역인 4000 rpm, 6 Nm (ISG/엔진의 폴리비 2.5:1을 고려한 엔진 회전수 1600 rpm, 정격토크 12 Nm의 반으로 토크값을 가정)로 구동되고, 인버터에 68 A의 전류가 인가되는 조건으로 설정하였다. 이러한 경계조건은 Table 4에 자세히 나타내어 있다. 앞서 해석에 반영된 인버터 발열량의 정확도를 알기 위해, 모터/인버터 시스템의 측정된 효율 및 산정된 효율은 각각 88.0%와 89.8%로 허용할 수 있는 오차수준이었다.

파워소자 내부 칩의 접촉면적 (3.75 ~ 6.1 mm²) 및 PCB 적층구조의 절연층 두께 (0.05 ~ 0.1 mm)를 변경하면서 시험결과와의 correlation을 수행하였고, 이를 통해 개발된 인버터 모델의 해석 결과는 측정값과 비교하여 Table 5에서 알 수 있는 바와 같이, 파

Table 5 Temperature values for analysis verification

Part	Measurement (°C)	Analysis (°C)
MOSFET	59.6	61.2
Heat sink	53.8	53.3

위소자와 방열판의 각 부위별 온도가 1.6°C 이내로 잘 일치하였다.

4. 수냉식 모델 해석 결과

수냉식 방식이 적용된 모델의 경우 예측된 부품별 평균체적 온도를 Table 6에 정리하였으며, 외기온도가 25°C인 조건에서 파워소자의 최대온도는 98.8°C로 기존 공랭식 모델에서 보다 인가 전류가 더 클에도 불구하고 약 17°C 정도 감소하였다. 또한 하이브리드 차량 엔진룸의 95°C 가혹 조건에서도 파워소자의 최대 온도가 99.4°C로 일반 조건과 거의 차이가 없었다. Fig. 5를 통해서도 알 수 있듯이 발열부 및 방열부의 온도가 외기 온도의 변화와 상관없이 거의 일정하게 유지되었다. 하지만 메탈 PCB를 전후로 하여 큰 열저항으로 인해 온도차가 다소 크게 발생한 것으로, 예를 들면 파워소자가 위치한 메탈 PCB에 높은 열전도도의 재질로 구성된 다수의 홀이 절연체를 관통하도록 구성하여 열의 통로 역할을 수행하는 서멀 비아(thermal via)와 같은 구조의 적용을 통한 열저항 저감 설계가 필요할 것으로 판단된다.¹²⁾

Fig. 6은 인버터 전력모듈에서의 온도단면 분포를 나타낸 것으로 파워소자 간의 온도가 1°C 이내로 균일하게 나타났다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이, 상단 유로 중심부에서 일부 유량이 집중되나 발열부의 온도 균일성에 영향을 주는 정도는 아니었고, 유로 곡선부를 지나 하부 유로에서는 대체적으로 고른 유량 분배가 이루어짐을 확인하였다. 냉각 유로의 압력강하도 0.0125 bar로 유로부의 설계는 만족할만한 성능 수준으로 생각된다.

Table 6 Temperature values of each part

Part	Temperature (°C)	
	25	95
MOSFET	98.8	99.4
Metal PCB	94.2	94.8
Water jacket outlet	68.4	69.0

(a) Temperature contours at 25°C

(b) Temperature contours at 95°C

Fig. 5 Temperature contours of liquid cooling inverter

Fig. 6 Temperature contours at power module parts

5. 결론

본 연구에서는 ISG 구동용 인버터의 공랭식 및 수냉식 모델에 대한 열유동 해석을 각각 진행하여 각 부품별 온도와 열전달 특성을 파악하였고, 이러

Fig. 7 Velocity contour at inverter cooling channels

한 방열 설계의 적용가능 여부 및 개선점을 살펴보았다.

- 1) 공랭식 모델 인버터의 주요 발열부인 파워소자가 116°C까지 상승하는 것을 확인하였고, 일반적인 파워소자의 내열한계 온도인 100°C 보다 훨씬 높아 냉각 방식의 변경이 필요함을 알 수 있었다.
- 2) 온도측정 시험과 해석 검증을 통해 인버터의 방열 해석 모델을 개발하였으며, 이는 발열부 및 방열부의 해석 온도가 실험값과 비교하여 1.6°C 이내로 잘 일치하였다.
- 3) 수냉식 방식이 적용된 모델인 파워소자의 온도가 외기 일반 조건 및 가혹 조건에서 각각 98.8°C, 99.4°C까지 상승하였으며, 이는 파워소자의 내열한계보다 다소 낮은 것으로 방열 성능을 만족하였다.

향후 인버터의 사이즈 저감 및 출력 밀도를 증가시키기 위해, 방열부의 열저항 감소 및 유로 개선 등의 추가적인 성능향상 방안에 대해 지속적으로 연구할 예정이다.

후 기

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

References

- 1) S. Kim, J. Yu, C. Gwon and H. Kim, "Idle Stop & Go System Development for Automatic Trans-

- mission Vehicle," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.647-652, 2011.
- 2) N. George, A. John, D. Eric and W. Elwood, "Fuel Economy Improvements in an SUV Equipped with an Integrated Starter Generator," SAE 2001-01-2825, 2001.
- 3) G. Lee, G. Choi and W. Choi, "Design Considerations for Low Voltage Claw Pole Type Integrated Starter Generator (ISG) System," Journal of Power Electronics, Vol.11, No.4, pp.527-532, 2011.
- 4) G. Scott, "Cooling Options and Challenges of High Power Semiconductor Modules," Electronics Cooling Magazine, Vol.12, No.4, pp.20-27, 2006.
- 5) K. Chen, S. Ahmed, D. Maly, S. Parkhill and F. Flett, "Comparison of Thermal Performance of Different Power Electronics Stack Constructions," SAE 2002-01-1917, 2002.
- 6) G. M. Kim, B. G. Woo, C. H. Kang, S. J. Cho, Y. D. Yun and T. W. Chun, "A Study of the Cooling Effect for a Water-cooled Heat Structure of the Electric Vehicle Inverter System," Journal of KIPE, pp.343-344, 2010.
- 7) I. R. Oh, K. H. Lee and Y. D. Choi, "Study on Design of Inverter Water Cooling Heat Removal System," Journal of SAREK, pp.731-736, 2010.
- 8) K. H. Lee, J. W. Kim and E. Y. Ahn, "Optimal Design for Cooling System of Driving Units for Hybrid Vehicles," Transactions of KSCFE, Vol.14, No.1, pp.62-69, 2009.
- 9) Flotherm Version 9.3 Introductory Training for Vol.9, pp.14-19.
- 10) SC/Tetra Version 7 User's Guide Solver Reference, Chapter 2.3, pp.2-10.
- 11) D. G. Kim and S. C. Kim, "An Analysis Study for Thermal Design of ISG (Integrated Starter & Generator) for Hybrid Electric Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.21, No.4, pp.120-127, 2013.
- 12) J. W. Kim, S. Gao, J. P. Hong, C. Y. Chung, S. M. Choi and S. Yi, "Thermal Via Design for Heat Dissipation in PCB," Proceedings of KSPE, pp.195-196, 2008.