보행자 보호용 프론트 엔드 모듈(FEM)의 냉각성능에 관한 연구

신 윤 혁 · 김 성 철*

자동차부품연구원 그린카파워트레인연구본부

Studies on the Cooling Performance of Front End Module for Pedestrian Protection

Yoon Hyuk Shin · 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 26 October 2011 / Revised 3 January 2012 / Accepted 26 January 2012)

Abstract : Novel Front End Module(FEM) with improved pedestrian protection is very important to reduce the severity of pedestrian injury. The FEM needs to have enough space from hood to absorb the energy from any pedestrian collision. In this study, the cooling performance of the FEM to cool the engine was investigated under 25% height reduction. The results indicated that the cooling performance analysis was about 86% level compared to that of the conventional FEM. Also, good qualitative agreement between CFD predictions and experimental measurements was found. This FEM needs the cooling performance enhancement for changed air flow path at the frontal part of vehicle. Therefore, we showed an improved performance using air guide setup and shape modification under the high load condition.

Key words : Front end module(프론트 엔드 모듈), Pedestrian protection(보행자 보호), Height-downsized(높이 축소형), Cooling performance(냉각 성능)

1. 서 론

전세계의 자동차 업체들은 고안전/지능형 자동차 분야에서 최근 차량 충돌시의 승객 안전성 뿐만 아니라, 보행자 안전성능을 확보하기 위하여 관련 기술을 활발하게 연구 개발하고 있다. 보행자보호 기준은 크게 나누어, 유럽, 일본 및 세계기술규제(Global Technology Regulation, GTR)로 나눌 수 있다. 유럽은 2005년 하반기부터 1단계 기준을 적용하고 있으며 2012년경부터는 세계기술규제(GTR)를 근거로 한 2단계 기준을 채택할 예정이다. 일본은 2005년부터 IHRA의 연구 결과를 바탕으로 한 평가 기준을 채택하였다. 또한 국내에서도 자동차 개발

단계부터 보행자 안전을 고려하도록 자동차안전기준에 관한 규칙 개정안을 2013년에 시행하기로 확정하였다.

이러한 규제를 만족하기 위해서, 보행자 성인의 상부다리 또는 어린이의 머리 상해를 줄이기 위한 방안으로는 차량의 전방에 위치한 Front End Module(FEM)의 냉각 모듈을 컴팩트하게 설계하여 높이를 낮춤으로써, 보행자 충돌 시 충격에너지를 흡수하고 동일한 냉각 성능을 확보할 수 있는 보행자 보호용 높이 축소형 FEM 개발이 절실히 필요하다(Fig. 1).

Knaus 등¹⁾은 FEM의 냉각시스템 성능 향상을 위하여 일부 형상 변경에 따른 CFD 해석을 수행하였고, 실험을 통하여 모델에 대한 검증을 하였다. Kim 등²⁾은 FEM 냉각시스템의 성능 및 각 부품별 냉각수

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

Fig. 1 Schematic view of pedestrian impact tests

와 유입 공기의 유동 예측을 위한 CFD 해석과 더불어 FEM의 엔진냉각 성능에 가장 큰 영향을 미치는 유입 공기의 유로저항 예측이 가능한 툴(Tool) 개발을 하였고, 실험을 통한 해석검증을 하였다. Carluccia 등³⁾은 고효율의 컴팩트한 열교환기 개발을 위한 모델 고안 및 성능 해석을 수행하였다. Scott 등⁴⁾은 FEM의 유동 저항에 영향을 미치는 회복계수(Recovery coefficient)와 내부손실계수(Internal loss coefficient)를 예측하기 위해 운전 조건별 CFD 해석을 수행하였고, 각 영향 인자들을 살펴보았다. 또한, Kim 등⁵⁾은 본 연구에 앞서 보행자 보호를 위한 높이 축소형 냉각 모듈의 핵심 기술인 고효율 열교환기 기술과 고효율 냉각팬 및 모터를 개발 적용하여, 기존 제품에 비해 높이 25% 축소에도 불구하고, 높이 축소형 고효율 냉각모듈의 전열성능이 기존과 비교하여 94% 수준까지 성능이 향상됨을 실험적으로 평가하였다.

그리하여 본 연구에서는 대상 적용차량의 고부하 조건인 저속 등판 운전 및 A/C 작동 여부에 따라, FEM 기본 모델과 비교하여 시제품 모델의 성능을 예측하고, 실험을 통하여 검증하고자 한다. 또한, 차량 단위에서의 보행자 보호용 높이 축소형 FEM에 대한 열전달 및 압력강하 특성을 파악함으로써, 전면부 공기유로 저항 인자들의 영향을 줄이고자 한다.

2. 해석 방법 및 장치

2.1 해석 방법

차량 엔진룸 내 3D 열유동 해석⁶⁾을 위한 지배방정식은 정상상태, 비압축성 유동에서의 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식이고, 압력장을 얻기

Table 1 Driving condition for vehicle and cooling system simulations

Parameter	Unit	Value
Driving speed	km/h	50
Driving slope	%	8
Ambient temp.	°C	40
Radiator heat dissipation	kW	31
Condenser heat dissipation	kW	0 @A/C off 6 @A/C on
Coolant flow rate	L/min	56
Fan speed	rpm @12V	2000

(a) Upper parts (A, B, C)

(b) Side parts (A', B', C')

Fig. 2 Design of FEM with air guides

위해서는 SIMPLE 방법을 사용하였다. 또한, 차량 엔진룸 내부의 난류에 의한 영향을 고려하기 위해 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델 벽법칙(wall function)을 사용하였다. FEM 내의 냉각모듈을 구성하고 있는 컨덴서, 라디에이터 등의 열교환기들과 팬모듈의 성능 특성을 반영하기 위해서, 단품 열교환기 모델과 냉각팬 모델이 각각 사용되었다. 냉각모듈의 기본 모델 및 시제품 모델에 대한 컨덴서, 라디에이터 및 냉각팬의 단품 성능데이터를 해석 모델의 입력 데이터로 적용하였다. 해석을 위한 경계 조건으로는 차량의 저속 등판 운전조건인 차속 50 km/h, 등판 경사 8%, 외기온도 40°C, 엔진 발열량 31 kW이며, 이에 대한 상세한 내용을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 2에는 FEM 시제품의 냉각공기 누설 방지와

방향성 유지를 위한 에어가이드 형상 설계안을 나타내고 있다. 우선, 냉각모듈 상·하 틸새를 막기 위하여 실링을 하였고, 냉각모듈 위쪽과 라디에이터 그릴을 연결하는 상부 에어가이드를 각도별로 3가지를 제안하였다. 또한, 측면 에어가이드는 냉각모듈을 통과하지 않고 캐리어 좌·우 틸새로 새어 나가는 공기를 막아주며 유입 공기의 방향성을 유지하도록 하였다. A'에서 C'로 갈수록 유입 공기의 누설을 최대한 줄여주는 형상이며, 일반적인 형상인 A', 범퍼빔 쪽과 접촉하도록 한 B', 그리고 상부 에어가이드 쪽으로 길이를 늘린 C'로 각각 구성하였다.

2.2 실험 장치 및 방법

Fig. 3에서 보여지는 바와 같이, 보행자 보호용 FEM의 냉각 성능을 평가하기 위한 장비는 온·습도 조절용 환경 챔버, FEM 전면에서의 풍량을 공급 제어하기 위한 블로워와 풍량 측정을 위해 7개의 멀티노즐을 이용한 푸쉬 타입의 풍동, 라디에이터에 냉각수(물)를 공급하기 위한 온수 공급장치 등으로 구성된다. 풍동 시험부에 FEM 시제품을 장착하고, 냉각수 유량 및 풍량 조절을 위한 제어가 각각 설치되었고, 측정된 값들은 데이터 수집 장치를 이용하여 컴퓨터에 저장할 수 있도록 구성하였다. 환경 챔버의 온도 설정은 -35°C ~ 60°C 까지 가능하며, 최대 냉각 용량은 114 kW이다. 또한 온수 공급시스템은 100°C 의 물을 300 L/min까지 공급 가능하며, 풍량 공급은 푸쉬 타입의 블로워를 사용하였고 최대 풍량은 333 CMM이다.

Fig. 3 Photo of FEM performance tester

Fig. 4에서는 기존 제품 및 높이 축소형 고효율 냉각모듈에 대한 각각의 사진을 보여준다. 여기서, 공기측 온도를 측정하기 위하여 컨덴서 전면 12개, 라디에이터 전면 20개, 라디에이터 후면에 20개의 T-type 온도 센서를 각각 설치하였다. 또한 냉각모듈 전면의 유속 측정을 위하여 12개의 측정 포인트를 갖는 열선 풍속계를 설치하였다.

FEM에 장착되어진 냉각모듈의 상세 제원은 시제품과 기존 제품을 비교하여 Table 2에 각각 나타내었다. Table 3은 실차 운전조건에 근거한 FEM의 냉각성능 실험 조건이며, 차속별 냉각수 유량은 실차 조건에서 측정된 값이고 라디에이터 전면 풍속은 열유동 해석값을 반영하였다. 본 실험의 목적은 기존 제품과 비교하여 FEM 시제품의 성능을 파악하고자 하는 것이므로, 편의상 전면 유입 공기 온도가 20°C 이고, 라디에이터 입구 냉각수(물) 온도는 80°C 로 설정하여 차속과 관계없이 환산방열량 조건

Fig. 4 Photo of conventional and downsized cooling module

Table 2 The specifications of cooling module components

Component		Specification
Radiator	Conventional	Core size(mm): 636×480×14 Fin pitch: 75 Number of tube: 65
	Downsized	Core size(mm): 636×357×18.5 Fin pitch: 75 Number of tube: 47
Condenser	Conventional	Core size(mm): 679×383.6×12 Fin pitch: 83 Number of tube: 54
	Downsized	Core size(mm): 679×355.6×16 Fin pitch: 75 Number of tube: 50
Fan	Conventional	Diameter(mm): 460 Number of blade: 7 Motor power(W): 170
	Downsized	Diameter(mm): 370 Number of blade: 7 Motor power(W): 170

Table 3 FEM performance test conditions

Vehicle speed (km/h)	Frontal air velocity(m/s)		Engine coolant flow rate (L/min)	Air inlet temp. (°C)	Engine coolant inlet temp. (°C)
	Conventional	Prototype			
Idle	2.37	1.73	13	20	80 (ITD: 60)
50	2.66	2.33	56		
100	3.33	3.36	77		
140	3.99	4.22	75		

인 ITD(Inlet Temperature Difference)를 60°C로 맞추어 주었다. 또한 FEM에서 에어컨(HVAC) 시스템의 작동 유무에 따라 라디에이터가 컨덴서와의 열간섭을 고려하기 위해서는 컨덴서 방열량을 7.5 kW로 고정하였다. 이러한 운전조건에서의 실험 결과로 얻고자 하는 FEM 방열량은 라디에이터 입·출구 물 온도와 유량을 측정하여 계산되었고, FEM 압력강하는 공기측과 물측에 대하여 각각 측정하였다.

3. 해석 결과 및 토의

본 연구에서는 대상 차량의 FEM 기본 모델 및 시제품 모델에 대하여, 차량의 고부하 조건인 저속 등판 및 A/C 작동 여부에 따른 엔진룸 내 열유동 해석을 수행하였다. 이러한 결과를 바탕으로 하여, 보행자 보호용 FEM 시제품의 엔진룸 내 열유동 특성을 파악하였고, FEM 시제품의 캐리어 형상 및 자동차 전면부 공기 유로 등 냉각 성능을 개선하기 위한 방향을 설정하였다.

3.1 저속 등판 및 A/C 미작동

차량의 고부하 조건에 해당되는 저속 등판 50 km/h, 8% 운전에서의 FEM 기본 및 시제품 모델의 열유동 해석을 수행하였고, 그 결과를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 저속 운전조건인 50 km/h에서는 고속 운전조건과는 달리 냉각팬의 영향이 지배적이기 때문에 상부 그릴과 범퍼홀을 통하여 유입되는 공기의 유량이 비슷하게 분배되어, 냉각모듈의 높이 축소에 따라 라디에이터 그릴로 유입되는 냉각 유량의 손실이 커지게 된다(Fig. 5). 이러한 이유로 인해 시제품에서의 전면 풍속이 기본 모델보다 감소하게 되며, 또한 유입 공기는 라디에이터

(a) Conventional model (b) Prototype model
Fig. 5 Velocity streamline at the frontal part of vehicle

(a) Conventional (b) Prototype
Fig. 6 Velocity distribution in front of radiator (m/s)

(a) Conventional (b) Prototype
Fig. 7 Temperature distribution behind radiator (°C)

를 지나면서 훨씬 높은 52.5°C 정도 상승하였다. 특히 시제품의 라디에이터 입구 냉각수 온도는 119.7°C로 기본 모델 대비 12.3°C 상승된 결과이고, 요구되는 온도 상한치 115°C 보다도 4.3°C 초과한 것이다. 이는 기본 모델과 비교하여 86% 수준이기 때문에, 시제품의 냉각 성능을 향상시키기 위해서 차량 전면부의 공기 유로 개선이 필요함을 의미한다. Fig. 6, 7에서는 기본 및 시제품 모델의 라디에이터 전/후면에서의 속도 및 온도 분포를 비교하여 나타내었다.

3.2 저속 등판 및 A/C 운전

차량의 저속 등판 50 km/h, 8% 운전 조건에서 컨덴서와의 열간섭에 의한 라디에이터 방열성능 변화를 살펴보기 위하여, 실제 A/C 작동 상황을 고려한 열유동 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Table 4에

Table 4 Analysis results of cooling performance with/without A/C operation at vehicle speed of 50 km/h and ambient temp. of 40°C

Item		Frontal air velocity (m/s)	Air temp. increase (°C)	Coolant inlet temp. (°C)
Condenser @A/C off	Conventional	2.21	-	-
	Prototype	2.06	-	-
Condenser @A/C on	Conventional	2.21	9.4	-
	Prototype	2.01	11.0	-
Radiator @A/C off	Conventional	2.61	34.9	107.4
	Prototype	2.33	52.5	119.7
Radiator @A/C on	Conventional	2.61	35.6	114.9
	Prototype	2.33	54.3	131.9

나타난 바와 같이, 시제품 적용 시에 컨덴서 방열량에 의해 라디에이터 전면에서의 유입 공기 온도가 11°C 가량 증가되었으며, 이는 기본 모델과 비교하여 약 1.6°C 증가된 값이다. 기본 모델의 라디에이터 입구 냉각수 온도는 A/C를 작동하게 되면 A/C 미작동시 보다 컨덴서의 방열로 인하여 7.5°C 증가하였다. 시제품 경우에도 마찬가지로 A/C 미작동시 보다 온도가 상승하였으며, 증가폭은 기본 모델보다 더 큰 12.2°C이었다. 그리하여 시제품의 라디에이터 입구 냉각수 온도는 131.9°C이었고 온도 상한치 115°C 보다도 16.9°C 초과하였으므로, 이를 반영하여 라디에이터 그릴을 포함한 FEM 단위에서의 냉각 개선 설계를 하여야 한다.

3.3 에어가이드 적용 및 형상 변경

FEM 시제품의 냉각 성능을 향상시키기 위한 방안으로, 에어가이드 적용 및 다양한 형상 안에 대하여 해석을 각각 수행하였고, 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 기본적으로 FEM 시제품의 틈새에 상하 실링으로 인하여 라디에이터 전면 풍속이 FEM 시제품 기본 대비 0.05 m/s 증가하였고, 이의 영향으로 라디에이터 입구 냉각수 온도가 1.2°C 감소하였다. FEM의 캐리어 상부에 에어가이드를 설치한 경우에는 A ~ C 모델 중에서 B가 가장 우수한 냉각 성능을 나타내었다. 또한 측면 에어가이드는 최대한 냉각 공기의 유실을 줄일 수 있는 형상인 C'에서 라디에이터 전면 풍속이 FEM 시제품 기본 대비 0.14 m/s

Table 5 Analysis results of air guide setup and shape modification

Case		Frontal air velocity (m/s)	Coolant inlet temp. (°C)
Baseline		2.33	119.7
Upper part	A	2.38	118.3
	B	2.40	117.2
	C	2.38	118.2
Side part	A'	2.42	117.3
	B'	2.44	116.5
	C'	2.47	115.8
Optimum		2.50	114.3

증가하였고, 라디에이터 냉각수 입구 온도는 3.9°C 감소하였다. 그리하여 FEM 캐리어 상부 에어가이드와 측면 에어가이드의 최적 조합인 B+C'를 적용함으로써 라디에이터 입구 냉각수 온도가 FEM 시제품 기본 대비 5.4°C 감소하는 효과를 나타내었다.

4. 실험 결과 및 고찰

FEM 기존 제품 및 보행자 보호용 시제품에 대한 방열량 및 압력강하를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)에서 알 수 있는 바와 같이, 차량의 고부하 조건인 저속 등판 50 km/h에서 FEM 시제품의 경우 기존 제품과 비교하여 각 조건에서 16.6%의 방열량이 감소하였다. 이러한 차이는 차량 전면부의 기존 레이아웃 적용과 FEM 시제품의 캐리어 및 냉각모듈 사이에 존재하는 틈새 등으로 인하여 발생하는 유동 손실이 주된 영향인 것으로 판단된다. 또한 기존 제품 및 시제품에서 에어컨을 작동하게 되면, 컨덴서의 토출 공기온도가 상승하여 라디에이터 입구로 유입되는 공기온도를 증가시키는 이유로, 각각의 방열량이 약 15.4%, 12.3% 감소되었다. Fig. 8(b)에서는 각 차속 변화에 따른 FEM의 공기측 압력강하를 나타내고 있으며, 시제품이 기존 제품에 비하여 압력강하가 다소 증가한 것은 FEM을 구성하는 높이 축소형 고효율 냉각모듈의 핀 밀도가 증가하였기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 대상 차량의 라디에이터 높이를

(a) Heat dissipation

(b) Pressure drop at th air side

Fig. 8 FEM cooling performance

약 25% 줄었을 경우, 고부하 조건인 저속 등판 및 A/C 작동 여부에 따라 FEM 기존 모델과 보행자 보호용 FEM 모델의 엔진룸 내 열유동 해석을 수행하고 방열 성능을 측정하였다. 이를 통해 냉각성능 저하의 원인을 파악하고 FEM에 에어가이드의 최적 조합을 적용하여 냉각성능을 개선하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) FEM 시제품의 경우 고부하(저속 등판) 운전에서는 라디에이터 입구 냉각수 온도가 119.7°C를 나타내었고, 더군다나 A/C를 작동하게 되면 온도 상한치 115°C 보다도 16.9°C 정도 초과한 131.9°C이었으므로, 이에 대한 냉각 성능 개선이 필요함을 알 수 있었다.
- 2) FEM의 CFD 해석결과 저속 등판 운전에서 시제품의 방열 성능이 기존 모델 대비 약 86% 수준이었다. 또한 방열 성능 평가에서는 16.6%의 방열량이 감소하였다.
- 3) 저속 등판 운전에서, FEM 시제품은 캐리어 상부 에어가이드와 측면 에어가이드의 최적 조합을 적용함으로써 라디에이터 입구 냉각수 온도가 에어가이드 미적용의 경우와 비교하여 5.4°C 감소하였다.

후 기

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

References

- 1) K. Knaus, C. Ottosson, F. Brontz and W. Kuhnel, "Cooling Module Performance Investigation by Means of Underhood Simulation," SAE 2005-01-2013, 2005.
- 2) H. J. Kim and C. Kim, "A Numerical Analysis for the Cooling Module Related to Automobile Air-conditioning System," Applied Thermal Engineering, Vol.28, No.14-15, pp.1869-1905, 2008.
- 3) E. Carluccio, G. Starace, A. Ficarella and D. Laforgia, "Numerical Analysis of a Cross-flow Compact Heat Exchanger for Vehicle Applications," Applied Thermal Engineering, Vol.25, No.13, pp.1995-2013, 2005.
- 4) T. C. Scott and D. S. Joshi, "Engine Cooling Module Sizing Using Combined 1-dimensional and CFD Modeling Tools," SAE 2009-01-1177, 2009.
- 5) J. H. Jung, Y. H. Shin, S. W. Park, S. A. Jeong and S. C. Kim, "Studies on the Performance Evaluation of Downsized High-efficiency Cooling Module," Transactions of KSAE, Vol.19, No.6, pp.61-67, 2011.
- 6) UH3D Reference Manual Ver.3.1, Chapter 9 Heat Exchangers & Chapter 10 Fan Models, CMSTECH Co., 2007.