Proceedings of
The 5th National Congress on Fluids Engineering
March 26-28. 2008, Jeju, Korea

차량용 열제어 관리 시스템의 성능 시뮬레이션 프로그램 개발

배석정*·허형석**·김현철***

Development of Simulation Program of Vehicle Thermal Managements System

Sukjung Bae*, Hyungseok Heo** and Hyunchul Kim***

Key Words : *Vehicle Thermal Management System(차량용 열제어 관리 시스템), Engine Cooling System(엔진 냉각 시스템), Air Conditioning System(에어컨 시스템), Flow Maldistribution(불균일 유동), Wind tunnel(풍동), Simulation(시뮬레이션), Arrangement(배치 구조)*

Abstract

The computer-aided performance simulation can reduce periods for development of products and cut down on the cost comparing with former trial-and-error procedures. This study has developed a simulation program for a vehicle thermal management system integrating an engine cooling system and an air conditioning system considering interactions and arrangement of air side heat exchangers such as power steering oil cooler, air-cooled transmission oil cooler, condenser, and radiator. The program may be also used for the system performance analysis according to the configuration of the engine coolant side heat exchangers such as water-cooled transmission oil cooler, EGR cooler, and heater core. Experiments utilizing an environmental wind tunnel has been conducted to assess the performance of the system according to the arrangement of air side heat exchangers. Some modification of the coolant loop layout can enhance the heat core performance up to 7% according to the results of the simulations.

1. 서 론

자동차 기술개발에 있어서 차량의 고출력화를 위한 엔진의 터보차저화 및 배기가스 재순환 시스템의 적용으로 차지에어쿨러, EGR 쿨러 등과 같은 열교환기가 계속 증가하는 추세이다. 이러한 다양한 열교환기의 추가 장착과 엔진 룸 공간 부족으로 인하여 응축기 및 라디에이터의 방열환경은 점차 악화되고 있다. 또한, 차량 개발기간 단축에 따라 향후에는 충분한 실차 평가가 어려워질 것으로 예상된다. 이에 따라 설계 단계에서 실차 탑재 상태에서의 에어컨 시스템과 엔진 냉각 시스템을 통합한 자동차 열제어 관리 시스템(VTMS, vehicle thermal management system, Fig. 1 참조)에 대한 성능 예측 기술이 필요 불가결하게 되었다.

최근 선진국에서는 자동차 열제어 관리 시스템 각 부품의 단품 성능뿐만 아니라 시스템에 적용했을 때의 배치 구조에 따른 상호 작용을 고려한 성능 예측에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. V. Melisurgo[1]와 S. Rahman 등[2]은 자동차용 에어컨 시스템의 성능 예측을 위한 1차원 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 실험 자료와 비교하였고, T. Sudo 등[3]은 실차 탑재 상태의 자동차 에어컨 시스템의 성능 예측 기법을 개발하였다. P. White 등[4]은 냉각 공기 유로 측의 라디에이터 전면 열교환기 배치 구조에 의한 공기 속도 분포를 계산하였으며, R.D. Chalgren Jr[5]은 저유량의 열제어 시스템에서의 열적 쾌적성과 엔진 웜업을 최적화할 수 있는 방안을 제시하였다.

본 연구에서는 자동차 열제어 관리 시스템의 구성 요소 형상 제원과 부품 간 배치 구조에 따른 냉각 공기 유동 분포 및 부품 상호작용을 고려한 시스템 성능 예측 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 운전 조건에 따른 각 부품들의 입, 출구 상태량과 총괄 성능을 예측하는 1차원 해석 코드를 기본으로 하였고, 응축기와 라디에이터를 포함한 전면 공기 측 열교환기에 대해서는 배치 구조에 따른 성능 시뮬레이션을 위하여 2차원 격자 모델을 구축하였으며, 냉각수 순환 회로 상의 열교환기 배치 구조를 변경하여 시스템 성능 최적화를 위한 계산을 수행할 수 있도록 하였다.

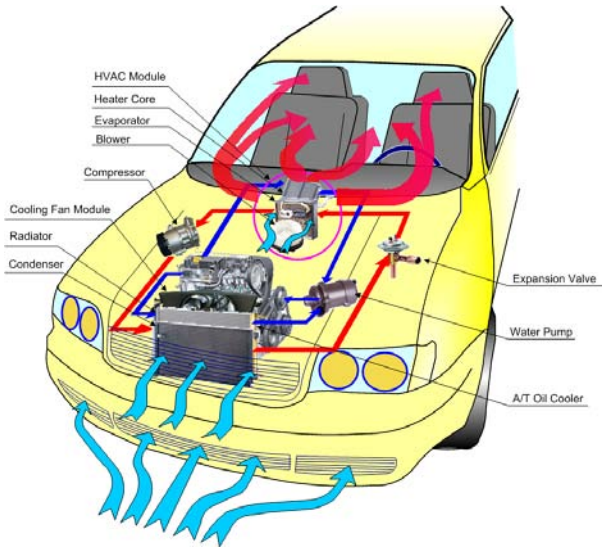


Fig.1 Schematic of vehicle thermal management system

* 자동차부품연구원, sjbae@katech.re.kr
** 자동차부품연구원, hsheo@katech.re.kr
*** 자동차부품연구원, hckim@katech.re.kr.

2. 시스템 구성

자동차용 엔진 냉각 시스템의 냉각수 순환 유로와 에어컨 시스템 냉매 유로의 일반적인 구성은 Fig.2에 나타낸 바와 같으며, 시스템 설정에 따라 배치할 수 있다. 에어컨 응축기와 라디에이터는 공랭식 오일쿨러와 같은 열교환기 후류에 배치되며, 이러한 배치 구조를 Fig.3에 간략히 나타내었다.

2.1 공기 측 열교환기 모델

다수의 열교환기로 인하여 발생하는 불균일 유동을 해석하기 위하여, 라디에이터 및 전면 열교환기를 통과하는 유동에 대해 가상의 평행 덕트 몇 개를 설정하면 각 부분에서의 속도 및 온도를 계산할 수 있다.[4] 각 열교환기의 손실계수와 공기 유로에서의 압력 손실을 고려하여 각 부분을 통과하는 공기 속도를 계산하였다.

공랭식 열교환기 모델

공랭식 오일쿨러, 응축기, 라디에이터의 외부 유체는 냉각 공기이며, 내부 유체는 각각 변속기 오일, 냉매, 냉각수이다. 이들 열교환기를 구성하는 핀과 튜브의 설계 제원에 대하여 이론식 및 실험식을 적용하여 열전달 계수, 마찰 계수, 유체의 물성치 등을 계산하도록 하였다.

열교환기 전후 유동의 2D 모델링

공기 측 열교환기 배치 구조에 따른 상호 작용을 계산하기 위하여 라디에이터 크기의 가상의 덕트에 대하여 공기 측 열교환기에 대한 2차원 격자를 생성하여 모델링하였다.

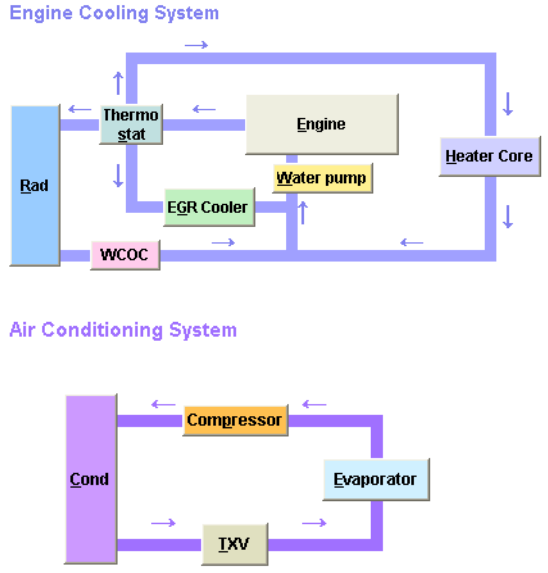


Fig.2 Configuration of an engine cooling system and an air conditioning system

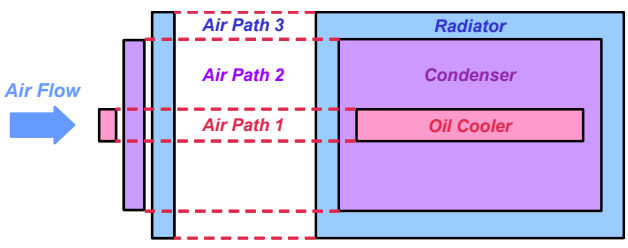


Fig.3 Arrangment of air side heat exchangers

최전방의 열교환기 전면에서 냉각 공기 열유동 데이터를 입력하면, 외부 및 내부 유체 사이에 열교환이 이뤄진 후의 후류 유동이 다음 열교환기 전면의 열유동 데이터가 되어 다음 계산을 수행하게 된다. 공기 속도와 온도 데이터는 풍동 및 실차 실험 결과 또는 상용코드 해석 결과를 이용하여 입력할 수 있다.

2.2 에어컨 시스템 구성요소 모델

건조기 일체형 응축기의 유한 차분 해석 모델을 통하여 냉매와 외부공기의 열교환 과정을 모사하였으며, 팽창밸브를 지나서 적층형 증발기에서 기화되어 압축기를 통해 고온고압 상태로 다시 응축기로 유입되는 사이클을 계산하도록 하였다.

2.3 냉각수 순환 유로 구성요소 모델

워터 펌프에서 엔진 워터 재킷을 통과한 냉각수는 써모스탯을 통하여 히터코어 측, 라디에이터 측, 엔진 바이패스 측으로 분기하며, 수냉식 오일쿨러 방식일 경우 라디에이터 출구 측 헤더에서 오일쿨러를 지나고, 바이패스 측에 EGR 쿨러가 장착될 경우 이를 통과하게 된다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험 장치

Fig.4에 나타낸 환경 풍동 시험 장치에서 라디에이터 전면에 공랭식 오일쿨러와 에어컨 응축기를 배치할 수 있도록 하였다. Fig.5에 나타낸 바와 같이 공기 유동 속도는 응축기 전면의 코어 영역을 16개 구간으로 분할하여 최대 오차 0.01 m/s의 16채널 다점 풍속계(multi-channel anemometer)를 사용하여 측정하였으며, 공기 온도는 유동 속도를 측정하는 지점과 같은 위치에 16개, 추가 위치에 4개의 열전대를 장착하여 자동차 냉각모듈 데이터 획득 장치로 측정하였다.

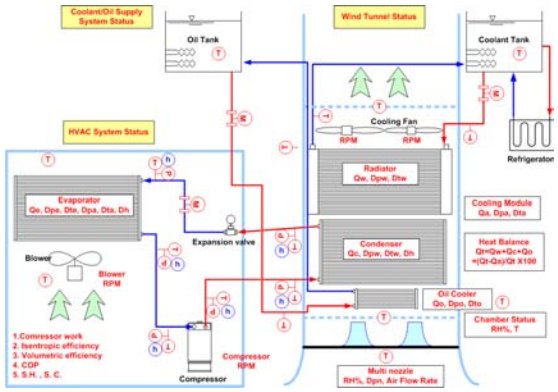


Fig.4 Configuration of apparatus for vehicle thermal management system performance test

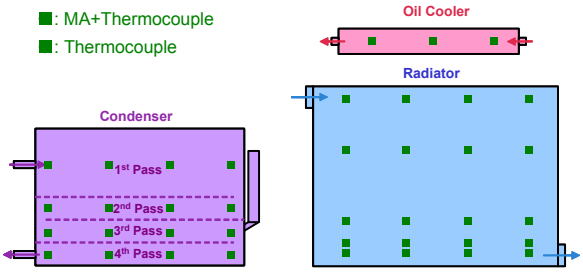


Fig.5 Allocation of measurement points of downstream air temperatures and velocities

Table 1 System test condition

Variable	Value
Air Flow Velocity [m/s]	1, 3, 5, 7
Coolant Flow Rate [ℓ/min]	20, 40, 60
Oil Flow Rate [ℓ/min]	3, 12
Inlet Air Temperature [℃]	35
Inlet Coolant Temperature [℃]	85
Inlet Oil Temperature [℃]	110
Refrigerant	R-134a
Degree of Subcool [℃]	3~5

4. 해석 결과

본 연구에서 개발한 자동차 열제어 관리 시스템 종합 성능 해석 프로그램을 이용하여 Table 1과 같은 실험 조건에서 시스템 성능 해석을 수행하였다.

4.1 냉각 모듈 성능 해석 결과 및 검증

공랭식 오일쿨러, 에어컨 응축기, 라디에이터로 구성된 냉각 모듈의 성능 해석 시뮬레이션 결과를 Fig.6 ~ 9에 나타내었다. 오일 유량 3, 12 ℓ/min에서의 오일 쿨러 방열 성능 해석 결과를 환경풍동 열유동 시험 결과와 비교하여 Fig.6에 나타내었다. 전체 속도 영역 및 오일 유량에 걸쳐 평균 3% 내외에서 일치하는 결과를 보여준다. Fig.7에는 냉각수 유량 40 ℓ/min에서의 냉각 모듈 전면 공기 속도에 따른 공랭식 오일쿨러 및 에어컨 응축기 후방의 라디에이터 방열 성능 해석 결과를 나타내었다. 전체 속도 영역에 걸쳐 최대 오차 4.4% 이내에서 매우 잘 일치하는 결과를 나타낸다.

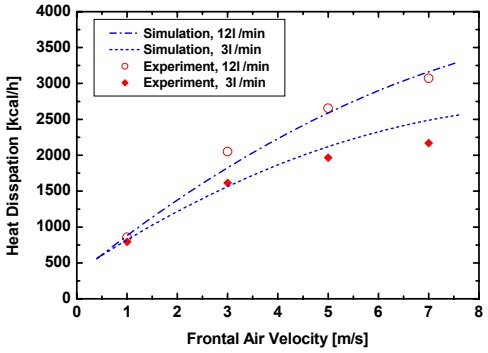


Fig.6 Heat dissipation from the air-cooled oil cooler

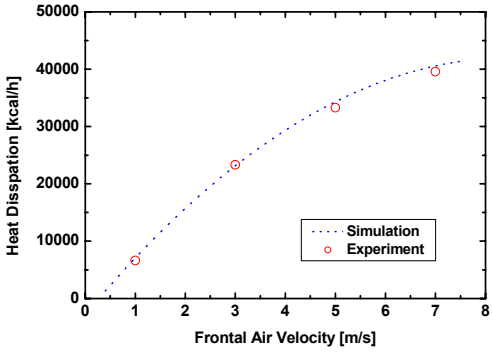


Fig.7 Heat dissipation from the radiator, 40 ℓ /min

오일쿨러가 응축기 전면에서 냉매 유로 2번째 패스에 해당하는 지점에 장착되었을 때의 냉각 모듈 전면 공기 속도 1, 5m/s에서의 응축기 후류의 공기 온도 계산 결과를 Fig.8에 나타내었다. Fig.8의 노드번호는 응축기 튜브 내부 냉매의 유동을 따라 정해진 온도 측정 위치를 나타낸다. 냉매 온도의 하강에 따라 응축기 후류 온도 역시 하강하는 경향을 보이지만, 냉매의 2번째 패스를 지날 때, 즉 5~8 번째 노드 점에서는 전면의 오일쿨러 후류 공기 온도의 영향을 받아서 일시적으로 상승하는 모습을 보인다. 공기 속도 1 m/s, 5 m/s에서 전체적으로 평균 1~2 ℃내외에서 비교적 잘 일치하는 모습을 보여준다.

Fig.9에는 응축기 전면의 오일쿨러 배치에 따른 응축기 방열 성능 해석 결과를 나타내었다. 실험과 해석 결과에서 1번째 패스 전면에 장착할 경우의 방열량이 3번째 패스의 경우보다 모두 약 3% 높게 나타난다. 이는 전면 오일쿨러의 영향을 먼저 받는 경우에 응축기 방열 성능 면에서 다소 유리하기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 실험과 해석 결과에서 모두, 응축기의 4번째 패스 전면에 오일쿨러가 장착될 경우에는 응축기 방열 성능이 산출되지 않는다. 이것은 응축기 튜브 유로를 통하여 충분히 열교환이 되어 과냉 상태이거나 건도가 0에 가까운 냉매가, 오일쿨러 후류의 고온의 공기에 의해 다시 가열되어 포화 상태로 변화하기 때문으로 판단된다. 따라서, 적절한 위치에 오일쿨러를 장착하는 것이 필요하다.

냉각 모듈 전면의 공기 온도 5m/s에서 오일쿨러를 응축기 전면 2번째 패스에 장착한 경우의 라디에이터 후류 공기 온도 분포를 Fig.10에 나타내었다. 전체 영역에 걸쳐서 약 ±2℃내외의 오차를 보이고 있다. 이것은 온도 측정 위치가 20개에 불과하며 각 위치에서의 온도 측정값이 그 면적에서의 평균값과 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

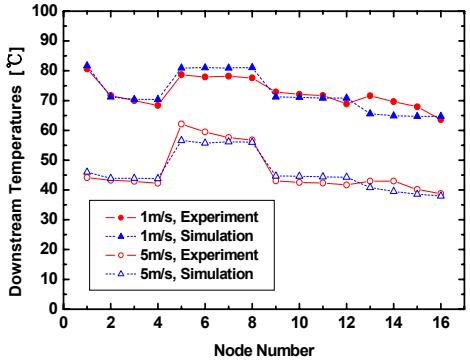


Fig.8 Downstream air temperature after condenser

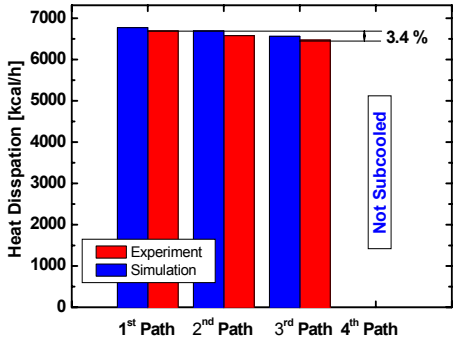
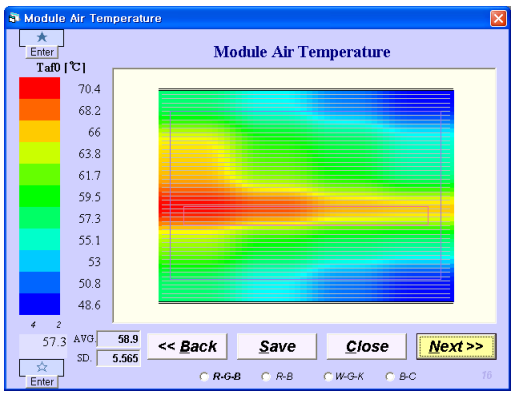
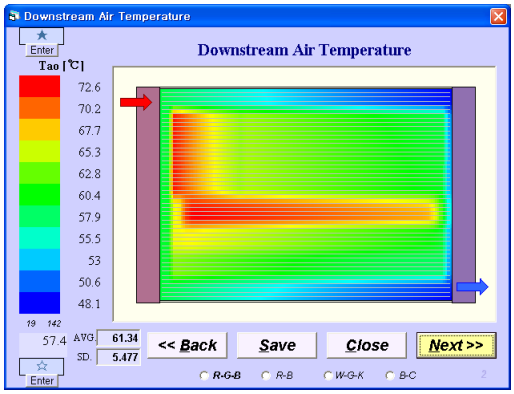


Fig.9 Heat dissipation from the condenser



(a) Distribution of measured temperatures



(b) Distribution of calculated temperatures

Fig.10 Comparison of air temperatures after radiator, 5m/s

전반적인 온도 분포 경향은 유사하게 나타나고 있으며, 2차원 열전달 해석을 통하여 실험보다 많은 격자에서 유동 분포 및 경향을 계산해낼 수 있다.

4.2 냉각수측 열교환기 배치 구조 해석

공기측에 공랭식 오일쿨러가 없는, 즉 수랭식 오일쿨러가 존재하는 시스템에서, 냉각수 순환 유로 상의 열교환기 배치 구조에 따른 히터코어의 방열 성능에 대하여 해석하였다.

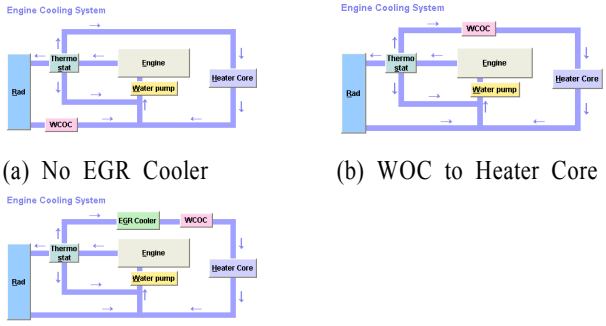
수냉식 오일쿨러와 EGR 쿨러의 배치 혹은 유무 여부에 따라 Fig.11과 같이 3가지 경우의 배치 구조를 설정하였다. Case (a)은 일반적인 엔진 냉각 시스템으로서 수냉식 오일쿨러가 라디에이터의 냉각수 유로 후류에 장착되며, Case (b)에는 히터코어 측 유로에 수냉식 오일쿨러가 장착된다. Case (c)에는 EGR 쿨러 후류에 오일쿨러가 장착된다.

이러한 Case들에 대한 히터코어의 성능 해석 결과를 Fig.12에 나타내었다. Case (a)에 대하여 히터코어 측에 오일쿨러가 장착된 Case (b)에서는 열전달 성능이 2.7% 증가하며, EGR 쿨러가 오일쿨러 앞에 장착되는 casee (c)에서는 7.2%.0%의 방열량이 증가한다.

5. 결론

본 연구를 통하여 자동차 열제어 관리 시스템의 종합 성능 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 시스템 성능 해석과 병행하여 환경 풍동 열유동 실험을 통한 검증을 수행하였다.

1) 열제어 관리 시스템 부품의 배치 구조에 따른 냉각 공기 유동 분포를 고려한 2차원 격자 모델을 구축하여 실험과의 오차



(a) No EGR Cooler (b) WOC to Heater Core

(c) WOC + EGR Cooler

Fig.11 Arrangement of heat exchangers on coolant loop

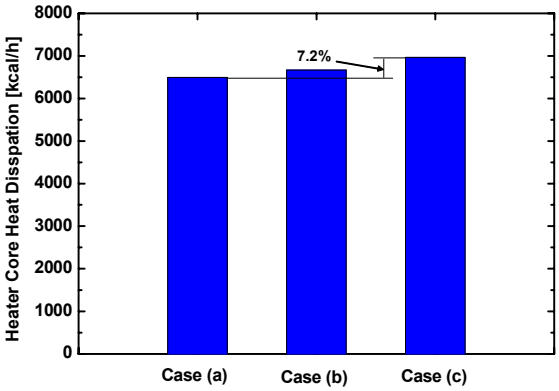


Fig.12 Heat dissipation from the heater core

범위 5% 이내에서 성능을 예측할 수 있으며, 열교환기들의 방열 환경을 반영한 최적 배치 구조 설계가 가능하다..

2) 엔진 냉각수 순환 유로 상의 열교환기 배치 구조에 따라 히터코어의 방열 성능이 7% 이상 증가할 수 있다.

3) 실차 실험 결과 혹은 3차원 CFD 코드의 해석 결과를 이용하여 공기 측 열교환기 전면의 냉각 공기 열유동 분포를 본 프로그램에 입력하여 시스템 종합 성능을 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 자동차기반기술개발사업의 연구비에 의해 수행된 연구결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

[1] V. Melisurgo, "Stationary Model to Predict Performance of the Car Air Conditioning System Using Only Standard Components Data", SAE Paper 2001-01-0589.

[2] S. Rahman, F. Ragazzi, R. Sun, P. Bathla, "Modeling of an Automotive Air Conditioning System and Validation with Experimental Data", SAE Paper 2003-01-0735.

[3] T. Sudo, M. Kitada, H. Asano, T. Mizuno, "Development of the A/C Performance Prediction on the Actual Vehicle Condition", JSAE Trans. 20045555, No. 116-04.

[4] P. White, J. Smith, I. Murdoch, "Cooling System Performance Evalution", SAE 980431.

[5] R.D. Chalgren Jr, "Thermal Comfort and Engine Warm-Up Optimization of a Low-Flow Advanced Thermal Management System", SAE Paper 2004-01-0047.