

◎ 논문

중형 차량 엔진룸에서의 유동해석에 관한 연구

이 동 렬*

Study of Flow Analysis
of a Mid-size Vehicle in an Engine Room

Dong-Ryul Lee

Flow distribution of a mid-size vehicle in engine room was investigated numerically to analyze the flow performance of given design cases in a front body of the mid-size vehicle. The data analyzed are the mass flow rate at the upper and lower openings, in the radiator, and the degree of non-uniformity of the velocity field at the inlet of the radiator. It is presented that the shape of the front end and the presence of the undercover greatly affect the flow fields, therefore, the flow performance.

Key Words: 유동해석(Flow Analysis), 엔진룸(Engine Room), 전산유체역학(CFD), 비균일도(Non-uniformity), 다공성 물질(Porous Media)

1. 서 론

낮은 차체 전반부 형상, 소형 라디에이터 그릴 개구부, 상승된 엔진 작동온도 등과 같은 차량 스타일링 및 설계와 저항력(low drag)차체 외부의 유동해석에 대한 최신 경향과 관심은 엔진룸내의 열환경의 효율적인 관리를 점점 더 까다롭게 만들고 있다. 자동차 엔지니어들은 라디에이터와 응축기를 통해 적절한 공기 유입을 제공하고 효과적인 팬 작동을 위한 라디에이터 후부의 충분한 공간을 허용하고 온도에 민감한 엔진 후드밑의 엔진룸내의 부품들을 보호하고, 연료 탱크 가열 및 아이들링 조건하의 냉각시스템을 통한 재순환으로 이를 수 있는 과다의 차체 밑의 열흡수를 제한하는 작업에 관심을 쏟고 있다.^[1,2,3,4,5]

미래의 차량 디자인은 낮은 외부 공기저항과 관련된 낮은 후드의 엔진룸 구조로 강조될 것이다. 동시에, 응답이 빠른 차량 성능을 원하는 운전자의 구매 욕구를 충족시키기 위해 더 크고 힘 좋은 엔

진이 장착될 것이다. 작은 엔진룸, 더 크고 힘 좋은 엔진의 이런 디자인 경향은, 부품들의 내구성, 수리 비용, 및 고객들의 불만에 직접적으로 영향을 끼치는 엔진룸내의 부품들의 더 높은 온도의 발생을 초래한다.

일반적으로 중형 차량 엔진룸내의 유동해석은, 유동 분포 문제, 열전달 문제, 복잡한 경계조건, 비정규적 형상, 지배 방정식의 비선형성 등의 동시 발생 조건으로 인해 매우 까다롭다. 이런 연유로 인해 엔진룸내의 부품배열(packaging)의 설계는 대개 실험적인 결과에 근거하고 있다. 비록 실험적인 결과가 엔진룸내의 유동해석에 정성적, 정량적인 정보를 제공하는 데 핵심적인 역할을 수행할 지라도 이는 시간과 비용적인 측면에서 매우 불리하다. 엔진룸 유동해석기술의 이용 가능성은 실험적 도구장치를 설치하기 전에 근사한 결과를 제공함으로써 개발시간과 비용을 크게 절약할 수 있을 것이다.^[6,7]

엔진룸은 다양한 기능을 하는 부품들로 아주 복잡하게 구성되어있다. 특히 응축기, 라디에이터, 냉각팬, 엔진, 조향장치들은 엔진룸내의 유동장에 커

* 2004년 7월 29일 접수

* 정회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

다란 영향을 미치게 되는데 이 중 냉각팬과 라디에이터는 냉각계통에서 매우 중요한 부품으로서 라디에이터에서의 냉각효율만으로도 전체 냉각성능을 대략적으로 파악하는 것이 가능하다.^[8,9]

기존의 연구결과^[4,9]에서는 엔진룸 내에서의 유동 특성만을 고려하였으나 본 연구에서는 실제 차량의 엔진룸 내부를 포함하여 엔진룸 밑의 지면에서부터 범퍼 아래의 개구부까지 유동 특성을 고려하고 또한 실제 차체의 외부의 유동 현상까지도 고려 대상으로 삼고 있다. 그러므로 엔진룸 밑 범퍼 아래의 개구부의 공간의 크기를 변경하여 그로 인한 기존의 연구와의 유동 현상의 정량적인 차이점을 조사하려 한다.

이런 최근 차량설계의 추세로 비추어 볼 때 본 연구의 목적은 중형 차량의 엔진룸에 대한 수치적 해석 접근방식을 통해서 차 전반부의 형상이 엔진룸내의 유동장과 라디에이터의 냉각성능에 미치는 영향을 살펴본 후 설계에 필요한 기초 자료를 제공하고 엔진룸 내로 공기 유입후 가열되는 라디에이터에 공기 유동이 어떤 영향을 미치는 가에 대한 올바른 개념을 정립하고 엔진룸 내의 공기유동에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하는 데 있다. 이런 기반 설계 자료의 제공으로 엔진룸내의 공기유동에 관련된 불필요한 요소들을 제거하고 엔진룸내의 열환경을 향상시키는 기술을 개발하는 것이 가능하다고 생각된다. 또한, 본 연구에서는 유동 수치모사 해석기술을 통하여 전고가 낮은 최신 경량의 차량의 적절한 유동 배분의 향상을 위한 다양한 설계 변경에 목적을 두었다.

2. 이론적 배경

2.1 수치해석방법

실제 중형 차량(S자동차 KPQ1모델) CATIA 데이터를 전처리(preprocessor)소프트웨어인 ICM/CFD에서 읽어 들여 격자를 생성한 후 CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학 기술) 전용 소프트웨어인 Fluent/uns에서 수치해석을 수행하였다.^[10]

2.2 지배방정식

중형 차량 엔진룸의 유동장을 해석하기 위하여

비압축성 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식과 k-ε 난류모델을 사용하였다.^[11,12,13]

- 연속 및 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u_i}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_j u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l}] \quad (2)$$

$$-\rho \overline{u_j u_i} = \mu_t(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l}) \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\epsilon} \quad (4)$$

- 난류 k-ε 모델 방정식

난류 k 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) - \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} = -\rho \epsilon + G_k + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial k}{\partial x_i}) \quad (5)$$

난류 ε 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) - \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$G_k = -\rho \overline{u_j u_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

여기에 사용된 모델상수들의 값은 Table 1에 표시되어 있다.

Table 1. Modeling coefficients of turbulent dissipation rate equation

$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ϵ
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

2.3 라디에이터, 응축기, 냉각팬의 모델링

라디에이터와 응축기의 유동통로를 상세하게 모델링하는 것은 무척 어렵고 많은 시간이 소요된다.

그러나 본 연구에서는 상세한 유동장보다는 라디에이터 및 응축기 입, 출구사이에서의 압력손실등 엔진룸내의 주요 부품들의 해석에 초점을 두었으므로 응축기와 라디에이터를 다공성 물질로 모델링하였으며 이 때 다음식과 같이 엔진룸 내를 통과하는 유체의 속도에 비례하는 압력손실과 유량의 관계를 나타내었다.

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \alpha_i u_i^2 + \beta u_i \quad (8)$$

여기서 α 와 β 는 실험데이터로부터 구한다.

냉각팬은 무한히 얇고 냉각팬을 통과한 유동의 압력은 불연속적으로 상승한다는 가정하에 팬을 모델링을 하였으며 냉각팬의 특성은 압력상승과 유량과의 관계식으로 나타내었다.

$$\Delta p = \sum_{n=0}^N f_n u^n \quad (9)$$

여기서 f_n 은 냉각팬의 회전수가 1610 rpm 일 때의 실험데이터로부터 구한다.

2.4 수치해석에 사용된 형상

차량이 60km/h의 속력으로 주행할 때 라디에이터 그릴과 범퍼 아래 개구부, 언더 커버를 사용하여 각 부위가 엔진룸의 냉각 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 냉각성능을 나타내는 척도로써 라디에이터 입구에서의 비균일도와 통과유량을 사용하였다. 수치 해석에 사용된 여러 가지 경우의 형상은 Table 2에 나타내었다. 수치해석을 위해 정렬격자 (Fig. 1, 2)를 사용하였고 Table 2의 각 case에 해당하는 형상은 Fig.3에 나타내었다.

Table 2. Front shape of a vehicle

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
언더커버부	X	X	O	O	O
범퍼 위 개구부	O	O	X	O	O
범퍼 아래 개구부	O	O	O	X	O

(O : 개방, X : 폐쇄)

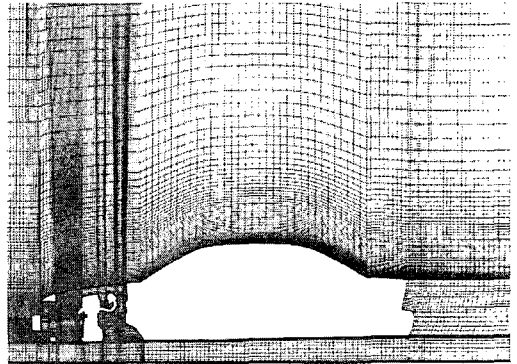


Fig.1 Total grid of vehicle body

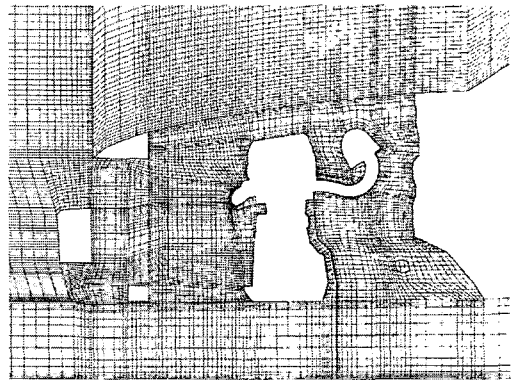


Fig.2 Grid of engine room

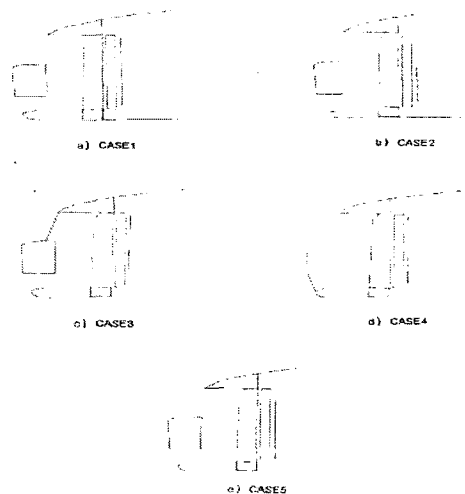


Fig.3 Schematic of front shape of a vehicle

2.5 경계조건 및 입력값

- 속도경계조건 : 차량 전장의 1.5배 정도되는 전방에서의 유동의 난류강도는 0.6%, 난류점성과 층류점성의 비가 10^{10} 이라는 가정을 하였으며 $k-\epsilon$ 난류모델과 표준 벽함수(standard wall function)를 사용하였다. 유동속도는 60km/h로 하였고 외부의 대기온도는 30℃로 가정하였다.

라디에이터와 응축기의 점성저항 및 관성저항계수는 각각 Eq.(8), (9) 및 실험값으로부터 구하였고 Table 3 및 4에 표시되어 있다. 이때 x방향은 차의 전장방향이며 y방향은 전고방향이다.

- 냉각팬의 입력값 : 냉각팬이 1610의 rpm으로 회전할 때 얻은 실험값으로부터 계산되었고 Table 5에 나타내었다. 이 값들로부터 유량이 증가할 때 냉각팬에서의 압력상승값은 감소하는 것을 알 수 있다.

Table 3. Coefficients of Viscous and Inertia Resistance on a Condenser

	점성저항계수	관성저항계수
주방향(x방향)	9×10^5	30
부방향(y방향)	9×10^7	3000

Table 4. Coefficients of Viscous and Inertia Resistance on a Radiator

	점성저항계수	관성저항계수
주방향(x방향)	2.3×10^5	30
부방향(y방향)	2.3×10^7	3000

Table 5. Input data on a cooling fan

	f_0	f_1	f_2
입력값	92.4	-9.54	-1.546

3. 결과 및 토의

차량의 전반부에서 유입되는 공기는 범퍼 부위에 상, 하방향으로 분리되어 엔진룸에 유입된다. 이때 범퍼 윗부분(라디에이터 그릴 부위)으로 흐르는 유동은 범퍼형상의 영향으로 큰 유동박리영역이 발생해 엔진룸으로 들어가려는 유동의 흐름을 방해하는 역할을 하는 것을 Fig.4에서 보인 모든 Case(1, 2, 3, 4, 5)에서 알 수 있다.

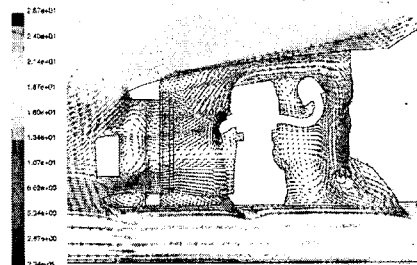


Fig. 4a Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude(m/s) (Case1)

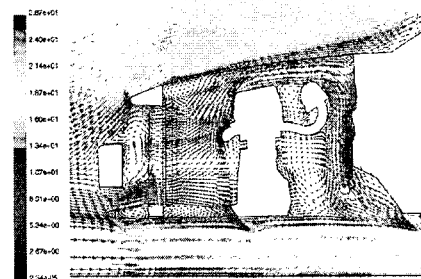


Fig. 4b Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude(m/s) (Case2)

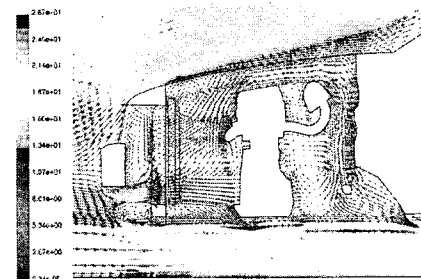


Fig. 4c Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude(m/s) (Case3)

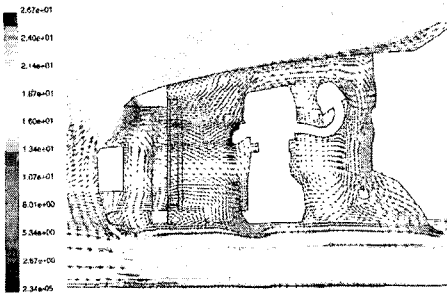


Fig. 4d Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude(m/s) (Case4)

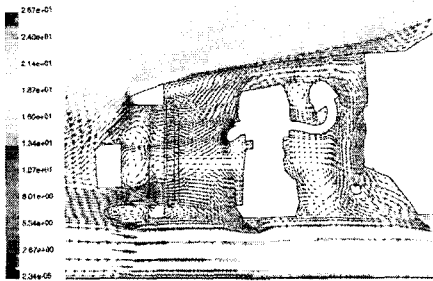


Fig. 4e Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude(m/s) (Case5)

라디에이터 그릴과 언더 커버 부위, 범퍼하단 유입구를 통과한 유량은 응축기와 범퍼사이에서 2차 유동의 크게 3방향으로 분리가 되는데 라디에이터 아래 부분을 통과한 유동은 차량의 밑부분으로 빠져나가고 상부를 통과한 유동은 재순환 영역을 형성하면서 엔진블럭상부를 빠져나간다. 또한 엔진블럭 뒤쪽에서는 정체영역이 발생되면서 냉각성능을 떨어뜨리는 현상을 보이는데 이것은 엔진에 열 부하를 주게되므로 가급적 피해야 한다.

각각의 case에서 얻은 엔진룸내 유동장(Fig. 4)을 비교해 보면 범퍼에서 냉각팬까지의 유동장은 차 전반부의 형상에 의해 크게 영향을 받으나 냉각팬 이후 영역은 거의 영향을 안 받는 것을 알 수 있다.

Fig.5는 엔진룸에서의 정압 분포를 보이고 있다. 모든 Case는 범퍼 앞부분에서 서로 비슷한 압력분포를 보이고 있으나 엔진블럭 뒤쪽에서는 Case1, 2, 5와 Case3, 4가 서로 다른 압력분포를 보이고 있다. 또한 Case4의 정체점은 다른 Case와 달리 범퍼 중앙부가 아닌 범퍼 하단부에서 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6.a는 Case1의 차 전반부 형상을 가지는 차

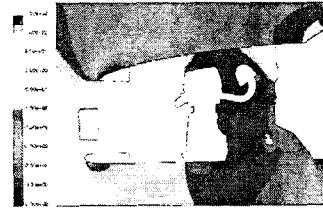


Fig. 5a Contours of Static Pressure (pa) (Case1)

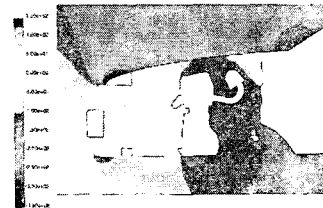


Fig. 5b Contours of Static Pressure (pa) (Case2)

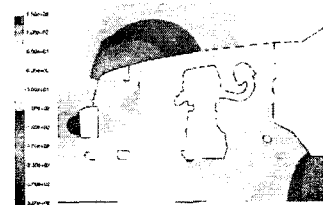


Fig.5c Contours of Static Pressure (pa) (Case3)

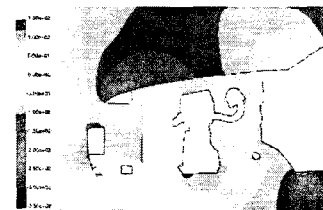


Fig. 5d Contours of Static Pressure (pa) (Case4)



Fig. 5e Contours of Static Pressure (pa) (Case5)

량의 외부 유동장을 보이고 있다. 이 Fig.6.a 로부터 차의 루프와 뒤 트렁크사이에서 발생하는 유동 박리와 차 뒤쪽에 생기는 와류를 발견할 수 있다. Fig. 6.b는 Case1의 외부 압력장이며 Fig. 7.a 및 7.b는 각각 Case5의 외부 유동장과 압력장이다.

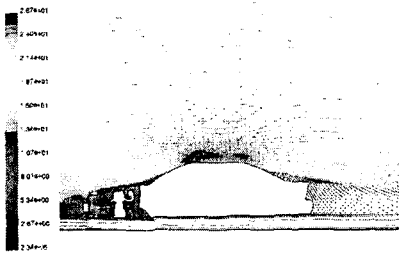


Fig. 6a External flow field : Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Case1)

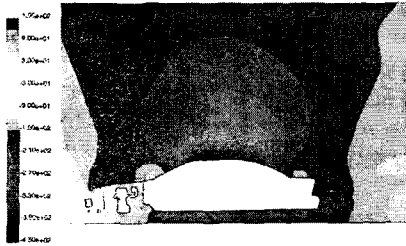


Fig. 6b External pressure field : Contours of Static Pressure (pa) (Case1)

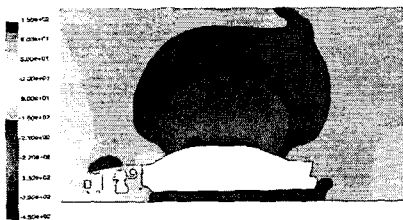


Fig. 7a External flow field : Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Case5)

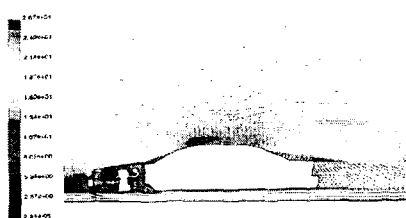


Fig. 7.b External pressure field : Contours of Static Pressure (pascal) (Case5)

라디에이터 전단면에서의 유동은 차 전반부의 범퍼, 라디에이터 그릴, 범퍼 하부 개구부등의 영향으로 매우 복잡하고 비균일한 분포를 보이고 있다. 일반적으로 엔진룸의 냉각성능은 라디에이터에서의 냉각성능에 의해 크게 좌우되므로 라디에이터를 통과한 유량과 라디에이터 전단면에서의 비균일도로 엔진룸의 냉각성능을 나타내었다. 이때 한 단면에서의 비균일도를 다음과 같이 정의한다.[14]

$$Z = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |u_i - U| \right) / U, \quad \left\{ U = \left(\sum_{i=1}^N u_i \right) / N \right\} \quad (10)$$

이 파라미터는 설계의 중요한 인자로 사용되어질 수 있으며 차 앞면부 각각의 형상에 대하여 구한 Z값은 Table 6에 나타나 있다.

Table 6로 부터 Case1 과 5의 결과를 비교해 보면 언더커버가 라디에이터를 통과하는 유량과 전단면에서의 비균일도 모두를 감소시키고 있다. 범퍼상단 개구부(라디에이터 그릴)와 하단 개구부가 동시에 개방되어 있는 경우(Case1, 2, 5) 상단부로 유입되는 유량은 하단으로 유입되는 유량보다 대략 30~40%정도 적은 것을 알 수 있다.

Case 2의 결과로부터는 범퍼 아래 개구부의 크기가 커질수록 라디에이터 통과유량 및 비균일도가 모두 감소함을 알 수 있다. Case3 및 4의 결과로부터 범퍼 위 개구부나 아래 개구부중의 하나를 폐쇄할 경우 엔진룸으로 유입되는 총 유량은 Case1에 비하여 대략 20~30%정도 감소를 하고 비균일도는 2배 가량 커지는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과를 종합해보면 비균일도면에서는 Case1 및 Case2가, 라디에이터를 통과하는 유량면에서는 Case1 및 Case5이 엔진냉각에 있어서 본 연구에서 이용된 다른 Case보다 적합한 형상임을 알 수 있었다.

Table 6. Final results of flow analysis in a vehicle engine room

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
범퍼위 개구부를 통과하는 유량	1 (0.664)	0.716 (0.475)	0	2.155 (1.430)	1.298 (0.862)
범퍼아래 개구부를 통과하는 유량	1 (1.060)	1.173 (1.243)	1.405 (1.489)	0	1.184 (1.256)
라디에이터를 통과하는 유량	1 (1.587)	0.972 (1.543)	0.818 (1.298)	0.873 (1.386)	1.141 (1.811)
엔진룸내로 유입되는 총유량	1 (1.724)	0.955 (1.718)	0.735 (1.489)	1.028 (1.430)	1.239 (2.118)
비균일도	0.274	0.253	0.589	0.572	0.333

(괄호안의 수치는 유량이며 단위는 kg/sec)

4. 결 론

- 1) 차 전반부의 형상은 범퍼에서 라디에이터 전 단면까지의 유동장에 크게 영향을 주나 그 후의 영역에서는 거의 영향을 주지 않는다.
- 2) 모든 경우에 있어서 엔진블럭 뒷면에 정체영역이 발생한다.
- 3) 범퍼위의 개구부를 통과하는 유량은 아래 개구부를 통과하는 유량보다 대략40%가량 정도 적다.
- 4) 언더커버는 라디에이터 전단면에서의 비균일도 값을 감소시킬 수 있다.
- 5) 범퍼 위나 아래 개구부의 폐쇄는 엔진의 냉각 성능을 떨어뜨린다.

5. 향후의 계획

중형 차량의 엔진룸의 열유동을 해석하는데 있어서는 라디에이터, 응축기, 엔진블록, 조향기구등의 부품과 엔진룸 내, 외부의 형상을 정확하게 구현하는 데이터가 있어야 한다. 또한 해석에 있어서 각종 실험값 및 경험값들이 요구된다.

특히 본 연구에서는 엔진, 라디에이터등에서의 온도분포가 유동장 및 냉각성능에 미치는 영향을 전혀 고려하지 않았으므로 한정된 결과만을 얻을 수가 있었다.

차후의 연구에서는 엔진룸을 구성하는 각 부분의 온도와 3차원 형상을 이용하여 본 연구에서 얻은 결과와 비교하고 보다 정확히 엔진룸의 냉각성능을 예측하는 것을 목표로 연구가 이루어질 것이다.

참고문헌

- [1] Williams, J., "An automotive Front-End Design Approach for Improved Aerodynamics and Cooling", SAE paper 850281, USA, (1985).
- [2] Garrone, A. and Masoero, M., "Car Underside Upperbody and Engine Cooling System Interactions and Their Contributions to Aerodynamics Drag", SAE Paper 860212, USA, (1986).
- [3] China, H. and Kameyama, J., "A Two Dimensional Computational Procedure for Prediction of Engine Cooling Air Flow", JSAE Review, Vol 9, No 2, (1988), p.94-95.
- [4] 유정열, "엔진룸내 2차원 열유동연구", 자동차공학회지, (1992).
- [5] Williams, J.E., Oler, J., Hackett, J. and Hammer, L., "Automotive Underhood Airflow Patterns", Automotive Technology International' 92, (1992)p.401-444.
- [6] Williams, J.E. and Hackett, J.E., "Water flow Simulation of Automotive Underhood Air flow Phenomena", SAE paper 910307, USA, (1991).
- [7] Cogotti, A. and Berneburg, H. "Engine Compartment Airflow Investigations Using a Laser-Doppler-Velocimeter", SAE paper 910308, USA, (1991), p.33-41.
- [8] Ono, K., "Prediction of the Airflow Rate Through Automotive Radiators Using 3-Dimensional Analysis", JSAE 912223, Japan, (1991).
- [9] 류명석, 이은준, "엔진룸내 3차원 열유동에 관한 수치적 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회, (1994) p.229-234.
- [10] Hajiloo, A. and Williams, J. "Limited Mesh Refinement Study of the Aerodynamic FlowField Around a Car-Like Shape: Computational Versus Experimental Fluid Dynamics", SAE paper 960677, USA, (1996).
- [11] Van Doormal, J. P. and Raithby, G. D. "Enhancement of the SIMPLE Method for Predicting Impossible Fluid Flows, Numerical Heat Transfer, Vol 7, (1984), p.147-163.
- [12] Aoki, A., Hanaoka, Y. and Hara, M. "Numerical Simulation of Three Dimensional Engine Compartment Airflow in FWD", SAE paper 900086, USA, (1990).
- [13] Han, T. and Skynar, M. "Three-Dimensional Navier-Stokes Analysis of Front End Air Flow for a Simplified Engine Compartment", SAE paper 921091, USA, (1992).
- [14] Chiou, J.P. "The Effect of the Flow Nonuniformity on the Sizing of the Engine Radiator", SAE paper 800219, USA, (1980).