

엔진룸 내의 열유체 유동의 2차원 수치시뮬레이션 A Two-Dimensional Numerical Simulation of the Thermal and Fluid Flow in Engine Room

유 정 열*, 윤 흥 열**, 이 훈 구***
J. Y. Yoo, H. Y. Yoon, H. G. Lee

ABSTRACT

The complex geometry of the engine room of a passenger car has been modelled two-dimensionally and the thermal and fluid flow therein have been analyzed by using a commercially available code, PATRAN/FLOTRAN. FLOTRAN adopts a finite element method with streamline upwind formulation for convective terms and the k-ε turbulence model to solve the three dimensional turbulent flow and heat transfer problems. Velocity vectors, pressure and temperature distributions have been obtained for various cases with different arrangements of license plates, underbody-covers and air dams. The results show that the numerical analysis using PATRAN/FLOTRAN can predict qualitatively well the practical phenomena.

1. 서 론

고성능 고회력 엔진의 출현에 따라 엔진 냉각은 더욱 중요한 문제로 대두되고 있으며, 엔진 주위를 통과하는 공기 유동에 관한 열유체역학적 분석이 엔진룸의 설계에 매우 필요하게 되었다. 근래에 와서 자동차의 외형미를 중시하는 디자인 때문에 엔진룸의 크기가 제한되고, 승객이 이용할 차내부 공간의 확장고성능 고회력 엔진의 설치로 인하여 엔진룸 내의 공기 유동 공간은 부족하여지고 있는 실정이다. 따라서 엔진룸을 통과하는 공기의 유동이 순조롭지 못하고 엔진의 라디에이터와 냉각 콘덴서에서 방출되는 열로 인하

여 고무, 플라스틱 부분과 전자 장치가 손상당하기 쉽다. 또한 엔진룸 내의 공기 온도증가는 엔진의 흡입 공기 온도를 증가시켜 엔진의 효율을 떨어뜨린다. 이미 신형 차종에 대한 실험으로 엔진룸 내의 공기 유동 속도와 온도가 부분적으로 측정되어 왔으나, 실험적인 데이터는 복잡한 열전달과 유체의 흐름에 대한 일부분의 정보 밖에 제공하지 못한다.^{1,2,3,4)} 더욱이, 대부분의 실험과 수치해석적 방법은 외형과 관련되어 공기 저항의 감소를 목적으로 하고 있다.^{5,6,7)} 공기 저항을 감소시키기 위한 외형의 변화는 엔진 냉각효율을 떨어뜨리기 쉬우며, 이에 따라 엔진룸 내의 공기 유동해석을 위한 연구가 더욱 필

* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과
** (주)금성사 가전연구소
*** 서울대학교 대학원 기계공학과

요하게 되었다.^{8,9)} 본 연구의 목적은 기존의 상용 열유체 유동해석 코드를 이용하여 엔진룸 내의 공기 유동 및 열전달 현상을 해석함으로써 실제 현상에 대한 이해를 증진시키고 그 결과를 실제로 설계 단계에서 참고할 수 있는 방안을 제시하는데 있다.

2. 수치해석방법

엔진룸 내의 복잡한 기하학적 형상을 모델링하고 입출력 자료처리를 위하여는 PATRAN¹⁰⁾을 이용하며, 엔진룸 내의 열전달과 공기 유동을 해석하기 위하여는 FLOTTRAN¹¹⁾을 사용한다. FLOTTRAN은 열전달이 있는 3차원 점성 난류유동을 해석할 수 있는 유한요소법 코드로서 지배방정식의 대류항에 대하여 유선상류기법을 적용하며, 유한차분법과 유한체적법의 장점을 선택하여 개발되었다.

2.1 지배방정식

FLOTTRAN에서는 난류모델로서 $k-\epsilon$ 모델을 채택한다. 잘 알려진 바와 같이 $k-\epsilon$ 모델은 와점도 개념에 근거한 것으로서 별도의 전달방정식(transport equation)들에 의하여 계산되는 난류운동에너지 k 와 난류운동에너지 소산율 ϵ 의 관계로부터 레이놀즈 응력을 구한다. 유동장에 대한 지배방정식들은 다음과 같다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0$$

운동량 방정식 :

$$\rho v_i \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = \rho g_j - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu_e \frac{\partial v_j}{\partial x_i})$$

$$\mu_e = \mu_t + \mu = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} + \mu$$

난류운동에너지 방정식 :

$$\rho v_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t G - \rho \epsilon$$

난류운동에너지소산율 방정식 :

$$\rho v_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

여기서, ρ 는 밀도, v_i 는 속도성분, x_i 는 직각좌표계, g_j 는 중력가속도, p 는 압력, μ_e 는 유효점성계수, μ_t 는 와점성계수, μ 는 점성계수, Γ_k 는 k 의 확산계수, Γ_ϵ 는 ϵ 의 확산계수, G 는 k 의 생성항이며, C_μ, C_1, C_2 는 모델상수들로서 $C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$ 의 표준적인 값을 사용하였다.

2.2 다공성 매질(Porus Medium)과 분포저항(Distributed Resistance)

본 연구에서는 라디에이터를 지나는 공기의 유동 방향이 일정한 것으로 가정하는 분포저항모델을 사용하였다. 이 모델은 다공성 매질이나 필터를 통과하는 유동 등의 문제 해석에서 흔히 채택되는 방식이다.¹¹⁾ 이 경우에 운동량방정식은 원래의 방정식에 분포저항 R_j 가 첨가된 형태로서 다음과 같이 쓰여지는데,

운동량 방정식 :

$$\rho v_i \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = \rho g_j - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu_e \frac{\partial v_j}{\partial x_i}) + R_j$$

$$R_j = K \rho v_j |v| + [f/D_h] \rho v_j |v| + C_\mu v_j$$

여기서, K 는 손실계수(loss coefficient), C 는 투과성(permeability), f 는 마찰계수(friction factor), D_h 는 수력직경(hydraulic diameter)을 나타낸다. 변수값은 시행 오차

범으로 결정하며 PFEG이라는 명령어를 사용하여 수치해석에 도입한다.

2.3 기하학적 형상 모델링

PATRAN을 이용하여 엔진룸의 형상을 구성하고, 여기에 계산에 필요한 요소를 생성한다. 지나치게 모델이 복잡해지지 않도록 냉각팬(pan)을 무시하고 2차원 형상입을 감안하여 엔진의 크기를 다소 축소하였다. 라디에이터는 실제와 같이 기울어지게 모델링하였다. 차체는 단열 조건으로 처리하였다. 자동차가 시속 60 km로 주행할 경우를 가정하여 입구와 자동차의 위, 아래의 경계에 초속 17m의 속도를 주었다. 차체와 엔진 표면 근처의 유동조건으로는 벽조건을 적용하였으며, 출구 부분은 노이만조건(Neumann condition)을 주었다. 엔진의 표면 온도는 섭씨 100 도로 입력하되 엔진 배기 매니폴더(exhaust manifold)부분은 섭씨 500 도로 하였다. 유입되는 공기의 온도는 섭씨 27도로 하였다. 라디에이터는 열유속 조건으로 처리하였는데, 연구 대상 자동차의 실제 발산 열량값을 단위

길이당의 에너지로 환산하여 143500 W/m의 값을 주었다.

3. 결과 및 검토

Fig.1은 모델의 형상을 나타낸다. 벽 사이에는 가능한 많은 요소를 두어 벽조건에 의한 오류를 방지하고자 하였다. 사용한 모델은 번호판의 효과를 고려했는지 여부에 따라 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 번호판의 유무 여부는 모델링 관점에서 중요한 분석 대상이 된다. 2차원 해석 과정에서 3차원 모델링의 예비 작업으로서 번호판의 효과를 확인하고자 하였다. 모델 S, V는 번호판의 크기가 고려된 것을 의미하며, 모델 OF, SF, VF는 번호판을 모델링하지 않은 것을 의미한다. 모델 OF는 언더바디커버를 없애고 아무런 장치를 하지 않은 경우, 모델 S, SF는 언더바디커버 대신에 경사진 에어댐(air dam)을 설치한 경우, 모델 V, VF는 언더바디커버 대신에 지면에 수직인 에어댐을 설치한 경우를 의미한다.

Fig.2, 3, 4는 각각 모델 OF, SF, VF의 속

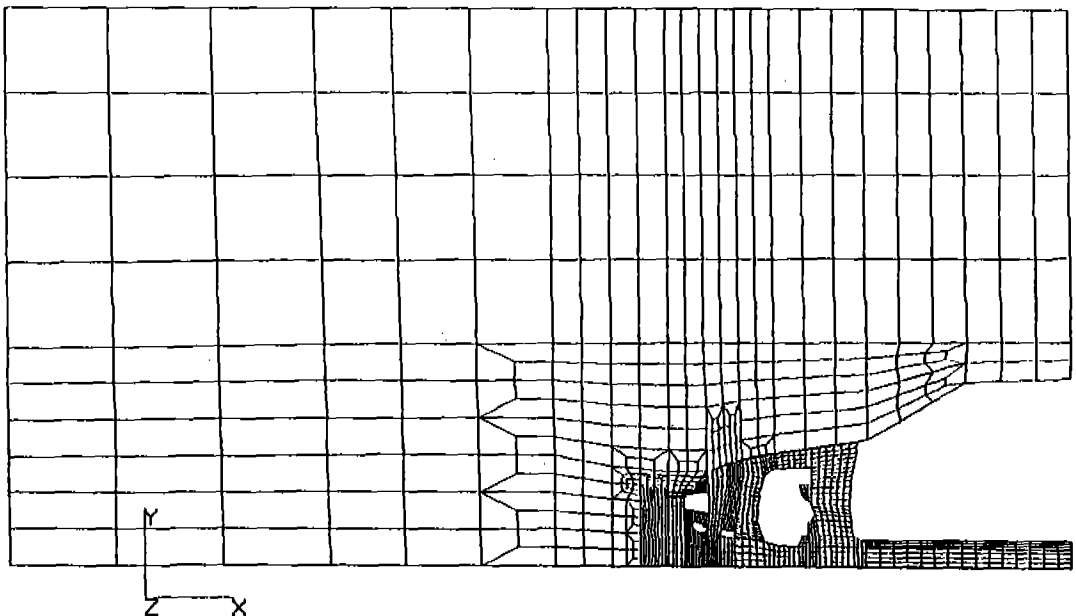


Fig.1 Mesh generation for the present model(hard copy)

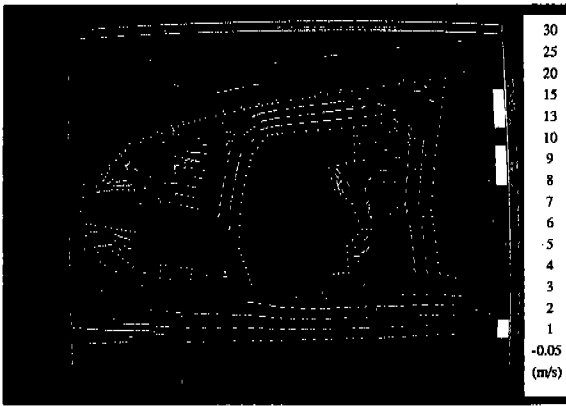


Fig.2 Velocity vectors in the engine compartment of Model OF (photo copy)

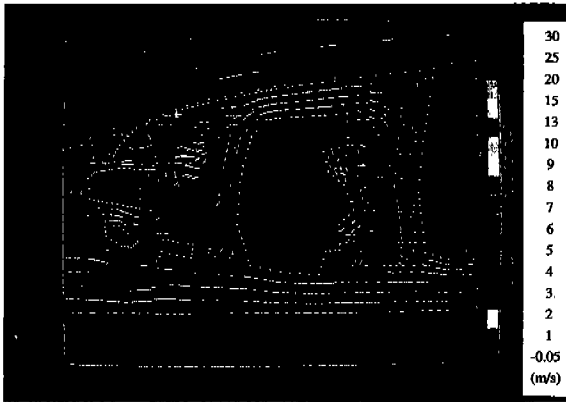


Fig.3 Velocity vectors in the engine compartment of Model SF (photo copy)



Fig.4 Velocity vectors in the engine compartment of Model VF (photo copy)

도벡타를 나타낸다. 라디에이터의 윗부분과 범퍼 위의 공기 유입부 사이에서 재순환 영역이 나타나고 있다. 이것은 차체의 형상 때문에 발생하는 것으로서, 라디에이터 위로 공기 유동을 제한하는 장치를 둔다면 더 많은 공기가 더욱 빨리 라디에이터로 유입할 것이다. 실제로 라디에이터를 지나는 공기의 속도가 자동차 속도의 20~25%임을 고려할 때 계산 결과로 나타난 속도는 어느 정도 적절함을 알 수 있다. 라디에이터를 지나는 공기의 속도는 많은 격자점에서 2~3m/s 이상으로 나타나 있다. 에어댐이 설치된 경우가 언더바디커버가 있거나 없는 경우보다 유리하다. 지면에 수직인 에어댐을 사용한 경우에 비하여 경사진 에어댐을 사용한 경우에 라디에이터 하단부를 지나는 공기의 최대속도가 더 큰 대신에 라디에이터 상단부에서 정체부분이 발생하여 냉각 효과는 덜 좋은 것으로 나타난다. 이러한 차이는 에어댐의 부착 각도가 유동장에 중요한 영향을 미치는 것을 의미한다. 모델 SF는 라디에이터에서의 공기 속도가 최고 6~7m/s 까지 이르고 있다. 즉 변호관을 모델링 작업에서 완전히 무시할 경우 속도값이 실제보다 커짐을 알 수 있다.

Fig. 5, 6, 7에는 모델 S, SF, VF의 압력 분포 결과가 주어져 있다. 차의 앞부분에서 공기의 정체 현상이 일어나고 있으며 에어댐의 앞에서 매우 높은 압력을 나타낸다. 범퍼 끝과 엔진의 전면부와 차체 사이에서 막리 현상이 일어나고 있다. 라디에이터를 중심으로 엔진의 앞영역이 엔진의 뒷영역보다 압력이 높음을 알 수 있다. 경사진 에어댐의 앞부분의 압력분포는 수직인 에어댐의 앞부분의 압력분포와 비교할 때 엔진룸 방향으로 구배가 크게 나타나 있다. 그러므로 경사진 에어댐에 의해서 엔진룸으로 유입되는 공기량이 수직인 에어댐에 의해 유입되는 공기량보다 많다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8, 9, 10에는 모델 V, SF, VF의 온도 분포가 나타나 있다. 라디에이터를 통과한 공기는 열유속에 의해 온도가 상승되고 엔진 주위를 돌아 나감에 따라 온도가 변하고 있다. 라

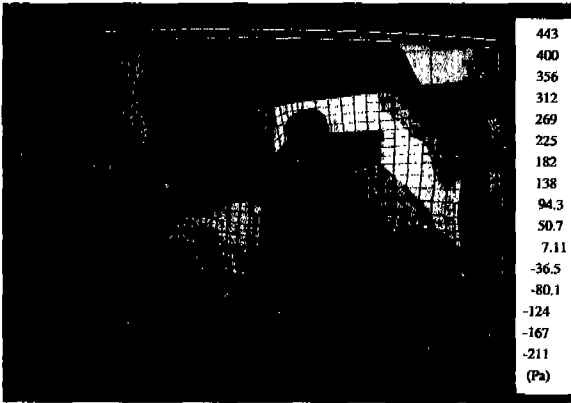


Fig.5 Pressure distribution in the engine compartment of Model S(photo copy)



Fig.8 Temperature distribution in the engine compartment of Model V(photo copy)

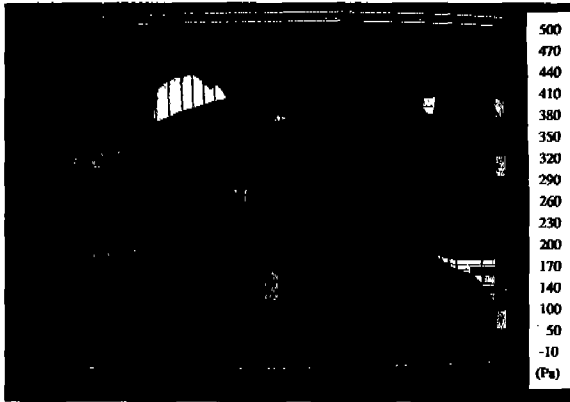


Fig.6 Pressure distribution in the engine compartment of Model SF(photo copy)

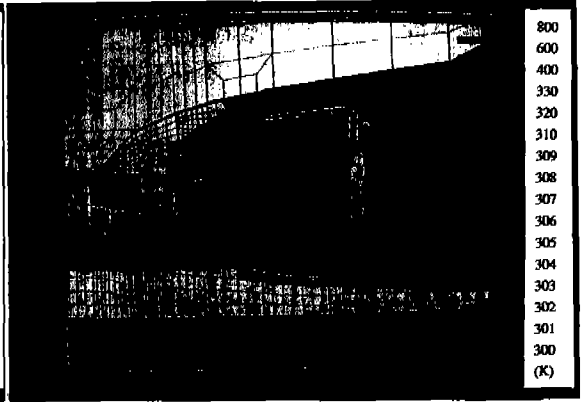


Fig.9 Temperature distribution in the engine compartment of Model SF(photo copy)



Fig.7 Pressure distribution in the engine compartment of Model VF(photo copy)

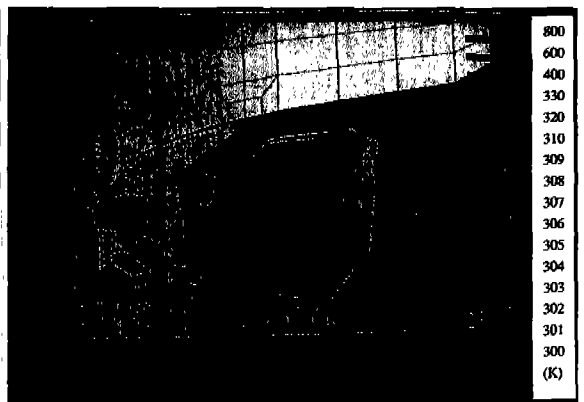


Fig.10 Temperature distribution in the engine compartment of Model VF(photo copy)

디에이터를 통과하는 공기의 온도는 최고 310 K정도까지 올라간다. 계산 결과는 라디에이터의 윗부분, 즉 냉각수의 유입부 근처의 온도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이 계산 결과에 따르면 이 부분의 냉각 효과가 떨어진다는 결론에 이르게 된다. 그러나, 실제로 라디에이터를 흐르는 냉각수의 온도 저하는 3도 이상 되기 어렵다는 것을 감안하면 계산 결과에서 나타난 온도차는 크다고 할 수 있다. 모든 모델에 대한 결과를 비교할 때, 언더바디커버가 있는 경우에 냉각효과가 가장 떨어짐을 알 수 있다. 번호판을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다 대체로 더 좋은 냉각효과를 나타냈는데, 이는 예상했던 것과는 다른 결과이다. 그 이유는 라디에이터 부분을 다공성 매질로 처리할 때 사용한 PFEG 명령이 제공하는 모델 유형(Type 1, 2, 3)에 한계가 있으므로¹¹⁾ 일부 격자점에서의 유동이 분포저항을 이기지 못하고 정체하거나 역류하기 때문이며, 이를 수정하기 위하여는 PATAN 수행시 해당 격자점에서의 PFEG 명령이 개선된 모델을 제공할 수 있어야 할 것으로 생각된다.

4. 결론 및 전망

승용차 엔진룸의 복잡한 기하학적 형상을 2차원으로 모델링하고 수치 계산을 위한 입출력 데이터를 생성하기 위하여 PATRAN을 이용하였으며, 엔진룸 내의 유동과 열전달 현상을 해석하기 위하여는 FLOTRAN을 이용하였다. 번호판과 언더바디커버 및 에어댐의 배열을 다양하게 변화시키고 각각의 경우에 대한 속도벡터, 압력분포, 온도분포를 고찰하였다. 언더바디커버를 없애고 에어댐을 설치한 경우에 엔진룸으로 더 많은 유량이 흐르면서 엔진의 냉각 효율을 높이며, 지면에 수직인 에어댐이 경사진 에어댐보다 효과적일 것으로 보인다. 이 결과들로부터 PATRAN/FLOTRAN을 이용한 수치 해석 방법은 실제 현상을 정성적으로 잘 예측한다는 것을 알 수 있다.

후 기

이 연구는 대우자동차주식회사와 한국과학기술원 지정 터보동력기계연구센터의 지원에 의하여 수행되었으므로 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. H. China and J. Kameyama, "A Two Dimensional Computational Procedure for Prediction of Engine Cooling Air Flow," JSAE Review, Vol.9, pp.94-95, 1988.
2. K. Aoki, Y. Hanaoka and M. Hara, "Numerical Simulation of Three Dimensional Engine Compartment Air Flow in FWD Vehicles," SAE Paper 900086, 1990.
3. T. Han, "Three Dimensional Navier-Stokes Simulation for Passenger Compartment Cooling," GMR-6426, 1989.
4. M.M. Dugand and D.F. Vitali, "Vehicle Internal Thermo-Fluid Dynamics : Experimental and Numerical Evaluation," SAE Paper 905234, 1990.
5. A. Garrone and M. Masoero, "Car Underside, Upperbody and Engine Cooling System Interaction and Their Contributions to Aerodynamic Drag," SAE Paper 860212, 1986.
6. R. Himeno, M. Takagi, K. Fujitani and H. Tanaka, "Numerical Analysis of the Airflow around Automobiles Using Multi-block Structured Grids," SAE Paper 900319, 1990.
7. I.R. Hawkins, A. Honecker, H. Krus, C.T. Shaw and S. Simcox, "Numerical Studies of Vehicle Aerodynamics," SAE Paper 905129, 1990.
8. H.J. Emmelmann and H. Berneburg, "Aerodynamic Drag and Engine Cooling... Conflicting Goals?," SAE Paper 905128, 1990.
9. T. Kyriyama, "Numerical Simulation on Three Dimensional Flow and Heat Transfer in the Engine Compartment Using 'STREAM'".
10. "FLOTRAN Overview," Compuflo, Inc., Charlottesville, Virginia, 1988.
11. "Introduction to PATRAN Plus," PDA Engineering, Costa Mesa, California, 1989.