

자동차 냉각장치를 통하는 유동에 의한 항력 변화 예측

Prediction of Drag Increase Due to Flow Through Automobile's Cooling System

최 도 형*, 이 응 호**
D. H. Choi, E. H. Lee

ABSTRACT

Using a commercial flow-analysis code VSAERO, a method to predict the drag of an automobile induced by the intake air of the cooling system has been devised. Given the pressure loss coefficient across the radiator, which varies with the radiator shape and the local Re , a simplified model of the internal flow is coupled with VSAERO to find the mass-flow rate through the car. The flow rate is obtained iteratively and that, in turn, gives the drag associated with this flow, which essentially is the momentum carried by the drained air. The results of a few sample cases are presented for two front-end shapes in combination with varying radiator frontal area.

1. 서 론

자동차의 외형을 잘 설계하는 것은 차의 미관 및 구조역학적인 측면 이외에도 주행중 공기압력에 의해 발생하는 저항, 모멘트 등이 성능 및 안정성 등에 큰 영향을 미쳐 매우 중요하다. 따라서 차량의 외형설계시 공력특성에 대한 고려는 이미 필수적인 사항이 되었으며 이에 관한 이론 및 실험적인 해석방법들이 발전을 거듭해 오고 있는 실정이다. 공력특성을 개선시키기 위해 실험적으로 접근하는 것은 원인과 결과가 분명히 드러나지 않아 최적의 결과를 얻기가 쉽지 않고, 또 시간 등 제작원의 제약으로 각 부분의 상호 영향을 다

밝히는 데에도 부적합하다고 할 것이다. 이에 대해 최근 괄목할만한 발전을 계속하고 있는 컴퓨터를 이용한 해석은 유동장의 모든 부분을 상세히 관찰할 수 있는 동시에 각 부분의 영향을 손쉽게 분리 해석할 수 있어 설계도구로서 무한한 잠재력을 갖고 있으며 실제로 실험의 많은 부분을 대체해 가고 있다.^{1,2)} 그러나 복잡한 형상을 갖는 3차원 물체의 유동 해석 정도가 아직 불완전해 저항계수 등 공력계수를 정확히 예측하지는 못하고 있는 상황이다. 전산 유체(CFD) 해석을 통한 유동장의 정밀한 예측이 아직 실용적이지 못하다해도 실제 설계에 CFD가 이용될 수 없다는 것은 물론 아니다. 국부형상에 따른 공력특성의 변

* 한국과학기술원 기계공학과, 정회원

** 한국과학기술원 기계공학과

화 등은 현재 가능한 해석범주에 속하며 이를 잘 적용할 경우 CFD는 매우 실용적일 수 있으므로 설계도구로서의 역할 또한 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 저항 등 공력특성에 직·간접으로 영향을 미치는 주요인자 중 냉각장치로 흡입되는 공기유동으로 인한 저항을 다루고자 한다. 이 저항은 크게 유입공기가 갖고 있던 운동량의 손실과 또 바깥공기가 흡입됨으로 인해 야기되는 외부 유동장의 변화(경계층 발달, 박리 등)에 따른 항력 변화로 나눌 수 있는데, 그 크기는 주로 운동량 손실 즉 전자에 의해 지배되며 전체저항의 10%에 달하기까지해 매우 중요한 저항요소라 할 수 있다. 이 저항을 최소화하기 위해서는 냉각공기의 유입량을 최소화하여야 하는데 이는 냉각효율과 연관되어 있어 전체시스템을 동시에 다루지 않고서는 해결할 수 없는 문제이다.

본 연구는 이중에서 열전달 문제를 제외한 냉각공기의 유동만을 고찰하고자 하는데 차체 모양이 주어지고 radiator 통과시의 수두손실(압력손실)에 관한 관계식을 알 때 이 내부를 통과하는 유량을 예측하여 전체저항의 변화를 유추해 내려고 한다. 이와 같은 해석은 저항을 최소화시키는데 도움이 될 뿐 아니라, 유입유량의 예측은 water pump 용량, 냉각 fan 및 radiator 크기 등 냉각장치를 설계하는데 필요한 정보도 제공할 것이다.

2. 해석방법

2.1 외부 유동장 해석

냉각 공기량을 예측하려면 radiator 그릴 등 흡입구와 radiator의 면적 등 제원이외에도 입구와 출구에서의 압력값이 필요한데 이 값을 얻기 위해 본 연구에서는 범용 computer 프로그램인 VSAERO code^{3,4)}를 사용하기로 한다. 이 해석 code는 점성에 의한 비선형효과가 고려된 panel 해석법으로 항공기 및 자동차 등의 공력해석에 상당히 성공적으로 이

용되어 왔는데, 그 이론은 다음과 같이 요약해 설명할 수 있다. 자동차(물체) 표면에 potential ϕ 를 분포시켜 Green 정리를 사용하면 아래의 적분방정식이 얻어진다.

$$\phi(P) = \frac{1}{2\pi} \int_S \left\{ \phi(Q) \frac{\partial}{\partial n_Q} \left(\frac{1}{R_{PQ}} \right) - \frac{1}{R_{PQ}} \frac{\partial \phi}{\partial n_Q} \right\} dS_Q \quad (1)$$

여기서 P와 Q는 물체표면 위의 점들이며, R_{PQ} 는 그 거리, \vec{n}_Q 는 법선벡터, 그리고 \int 는 Cauchy principal value를 나타낸다. 이 적분방정식에서 표면이 유면이라는 경계조건

$$\frac{\partial \phi}{\partial n_Q} = -\vec{U}_\infty \cdot \vec{n}_Q \quad (2)$$

을 사용해 ϕ 를 구하는데, 물체표면을 작은 4각 panel의 집합으로 표시해 각 panel에서의 ϕ 값을 일정하게 놓으면 식(1)의 적분은 해석적으로 수행될 수 있어 적분방정식은 panel의 ϕ 값을 미지수로 하는 연립방정식으로 변환되고 이로부터 ϕ 가 얻어지는 것이다.

유동장에서 점성의 영향은 경계층의 배제 두께로 또는 이 경계층의 박리로 인한 vortical 유동 및 후류의 형태로 나타나는데 본 code에서는 배제두께 영향은 표면에 수직한 속도성분으로 나타내고, 후류영향은 박리선에서 시작되는 와면으로 표시한 후류모델을 사용해 고려해 준다. 이때 필요한 경계층 발달과 박리에 관한 정보는 경계층 해석을 통해 구하는데 유선좌표계에서의 적분해법을 이용하고 있다. VSAERO code에 관한 더 자세한 사항은 참고문헌에 돌리기로 한다.

2.2 냉각공기 유동장의 단순화

Radiator를 냉각시키는 공기는 radiator 그릴과 bumper 밑에 있는 유입구를 통해 내부로 들어와 radiator 면을 통과해 차체내부로

그리고 궁극적으로는 엔진 밑을 통해 다시 외부유동과 합치게 된다. 차가 주행중일 때에는 입구와 출구의 압력차에 의해 유동이 발생하고 저속운행 중이거나 정지시에는 냉각 fan을 작동해 강제로 순환을 시킨다. 이 유동은 매우 복잡하여 엔진실내의 자세한 유동장은 최근에야 비로소 실험등을 통해 연구되고 있으며,^{5,6)} 2차원 형상을 수치적으로 해석한 연구⁷⁾도 있으나 결과는 만족스럽지 못한 형편이다.

비교적 정밀하게 결과를 예측하는 동시에 계산시간이 짧아 실제 설계에 실용적으로 이용될 수 있게 하기 위해 본 연구에서는 이 유동을 다음과 같이 단순화하여 해석하고자 한다. 자동차 외부를 단면 1로 표시하고 이때의 단면적 A_1 은 radiator 그릴과 bumper 밑의 공기 흡입구 면적을 합한 것으로 한다. 여기서 u_1 은 유입되는 공기의 평균속도이고 p_1 은 유입부의 정압력을 나타낸다. 유입된 공기는 Fig. 1에서 처럼 확대관을 지나 radiator를 통과하게 되는데 radiator 면에서의 단면적과 유속을 각각 A_2 와 u_2 , 그리고 radiator 통과 전후의 압력을 p_2 와 p_3 로 표시한다. Radiator 통과후의 압력 p_3 는 엔진실 내의 압력인데 이 압력을 편의상 엔진 밑의 차체 면에서의 압력과 같다고 가정하기로 한다.

냉각공기의 유입과 배출로 표시되는 이 유동의 유량은 단면적 A_1 과 A_2 또 외부유동장 계산에서부터 얻어지는 압력 p_1, p_3 이외에도 공기가 radiator를 통과할 때 수반되는 압력 손실에도 크게 의존하게 되는데 이 손실계수는 국부 Re 수 ($= \frac{u_2 d}{\nu}$: d 는 radiator core 두께)에 따라 변하며 전형적으로 Fig. 2에서와 같은 변화를 보인다. Fig. 2의 변화곡선을 log-log 평면에서 직선으로 근사화하면 손실계수 ζ ($= \frac{p_2 - p_3}{\frac{1}{2} \rho u^2}$)는 다음의 모양이 된다.

$$\zeta = A Re^B \quad (3)$$

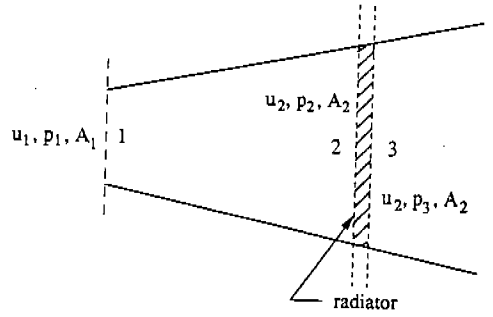


Fig. 1 Schematic of cooling air flow

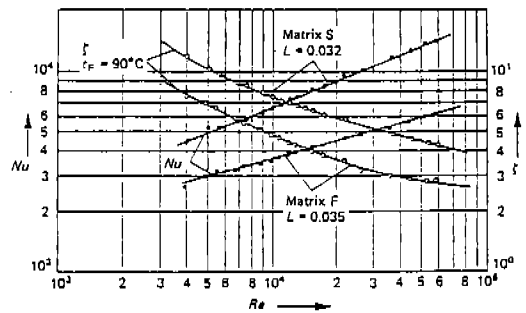


Fig. 2 Typical air pressure loss through radiator [Ref. 1]

여기서 A와 B는 radiator 형상에 따라 결정되는 상수들이다.

2.3 냉각 공기량의 결정

앞 절에서 설명한 외부유동계산 code인 VSAERO를 사용하여 radiator를 지나는 유동의 유량을 다음과 같은 반복계산을 이용해 구할 수 있다.

1. Radiator 그릴과 bumper 밑 공기유입구를 통과하는 공기의 유속 u_1 을 가정한다.
2. 위 1항과 여타 표면을 통해서도 유동이 없다는 경계조건으로 VSAERO의 해를 구해 p_1, p_3 를 포함한 표면 압력분포를 구한다.
3. Fig. 1의 단면 1과 2에 연속 방정식과 Bernoulli 정리를 사용해 단면 2에서의 압력 p_2 를 구한다.

$$u_2 = \frac{A_1}{A_2} u_1 \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \rho u_2^2 + p_2 = \frac{1}{2} \rho u_1^2 + p_1 - h_L$$

$$\rightarrow p_2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 - \frac{1}{2} \rho u_2^2 - h_L \quad (5)$$

여기서 h_L 은 단면 1과 2 사이에서 발생하는 손실을 나타내며 통상 $\frac{1}{2} \rho u_1^2$ 에 비례한다고 놓을 수 있다. 이 압력손실계수를 K_{Loss}

라 하면 $h_L = K_{Loss} \cdot \frac{1}{2} \rho u_1^2$ 로 된다.

4. 2항, 3항의 p_2, p_3 가 구해지면 정의에 의해 손실계수 ζ 를 얻을 수 있다.

$$\zeta = \frac{p_1 - p_3}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} = 1 + (1 - K_{Loss}) \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \quad (6)$$

한편 실험식 (3)으로부터 손실계수 (ζ')를 구할 수 있는데 해로 수렴될 때까지는 ζ 와 ζ' 값이 일치되지 않을 것이다.

$$\zeta' = A \left(\frac{u_2 d}{\nu} \right)^B \quad (3)$$

5. 식(6)에서 구한 ζ 를 식(3)의 ζ' 과 비교하여 두 값의 차이가 허용오차 범위안에 있으면 계산을 끝마치고, 허용오차를 벗어나는 경우 ζ 가 ζ' 보다 크면 u_1 을 더 크게 가정하여 제 2항으로 돌아가 계산을 반복수행한다.

3. 계산결과 및 고찰

냉각공기 흡입구의 유동장 계산을 실제 상황에 가깝게 하기위해 실제에 근접한 자동차 모양을 선택하였는데 이 차량의 제원은 Table 1에 주어져 있으며 외부유동해석을 위한 차체면의 panel 분포와 공기흡입구의 위치는 Fig.3에 표시되어 있다.

앞절에서 설명한 바와 같은 냉각공기의 계산에는 표면압력분포 p_1 과 p_3 가 필요한데 이는 VSAERO code를 이용해 얻는다. 자동차 주위의 유동은 심한 3차원 특성과 점성영

Table 1 계산에 사용된 차량의 제원

전 장	(L)	4.3	m
폭	(W)	1.36	m
고	(H)	1.65	m
전면 투영 면적	(A _S)	1.633	m ²
radiator 그릴 면적	(A _{1,upp})	0.0325	m ²
bumper 밑 흡입구 면적	(A _{1,low})	0.0392	m ²
냉각공기 흡입구 면적	(A ₁)	0.0717	m ²

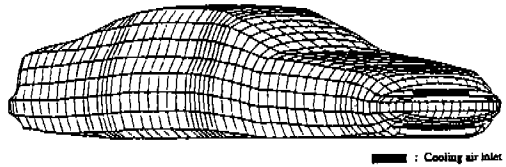


Fig.3 Panel representation of the vehicle surface and the cooling air inlet

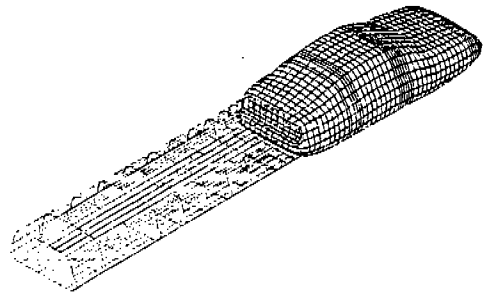


Fig.4 Position and profile of the rigid wake

향으로 매우 복잡하며 박리로 인해 발생하는 후류의 효과 또한 계산시 고려가 되어야 할 것이다. VSAERO code 내에 있는 경계층해로부터 박리의 위치를 구할 수도 있으나 본 연구에서는 후류보다 차체 앞부분 유동에 많은 관심이 있어 Fig.4에서와 같이 박리의 위치를 차체 후미에 가정하여 후류모델을 적용 유동을 해석하였다. Fig.5에는 냉각공기 흐름이 없을 때 자동차 중앙 대칭단면에서의 압력 분포를 순수포텐셜유동의 경우와 후류모델을 적용한 경우를 함께 비교하였는데 포텐셜유동시 자동차 뒷부분의 낮은 압력이 후류모델을

사용한 경우에 많이 증가되고 또 후류영역내의 압력이 거의 일정치를 유지하는 것을 볼 수 있어 후류모델에 의해 계산이 많이 개선되었음을 알 수 있다. 한편 뒷부분의 압력분포에 큰 변화가 있음에도 불구하고 앞부분 압력은 크게 달라지지 않아 다소간의 후류위치 변화는 냉각공기 흡입구를 포함한 앞부분의 유동에 별 영향을 미치지 않으리라는 것을 유추할 수 있어 박리의 위치를 고정해 계산한 본 방법에 별 무리가 없음을 간접적으로 뒷받침하고 있다.

자동차 앞부분의 형상변화가 이 근처 유동에 미치는 영향을 보기위해 bumper 밑에 air dam을 설치해 그 결과를 비교하였다. Air dam은 부착된 앞부분의 압력을 높여 냉각장치로의 공기유입을 도울 뿐 아니라 차체 밑부분에 박리를 유발시켜 그곳 압력을 떨어뜨리며 따라서 유입구와 유출구의 압력차는 더욱 커져 공기흐름이 촉진된다. 차체 앞부분의 panel 분포를 Fig. 6에 도시하였으며, 흡입구를 통한 공기유입이 없을 때 대칭단면상의 압력분포를 Fig. 7에 나타내었는데 air dam이 있는 경우 bumper 밑 흡입구에서의 압력이 높음을 알 수 있다. 각 위치에서의 평균 압력값이 Table 2에 주어져 있는데 air dam으로

인한 압력변화는 bumper 밑의 유입구($C_{pt,low}$)와 차체 밑(C_{ps})에서 크게 일어나며 radiator grill ($C_{pt,upp}$)에서는 별 차이가 없음을 볼 수 있다.

다음은 냉각공기의 유입이 있는 경우인데 먼저 air dam이 있을 때 흡입구 면적 A_1 을 고정하고 radiator 면적 A_2 를 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 손실계수식 (3)의 상수 A, B 는 각각 140, -0.29 그리고 radiator core 두께 d 는 3.2 cm, 공기 점성계수 ν 는 $4.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ (20°C 에서 값)로 주었으며 또

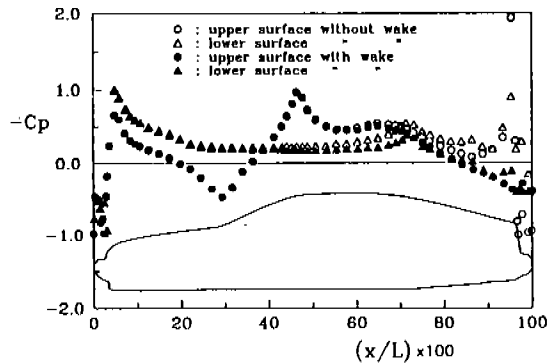
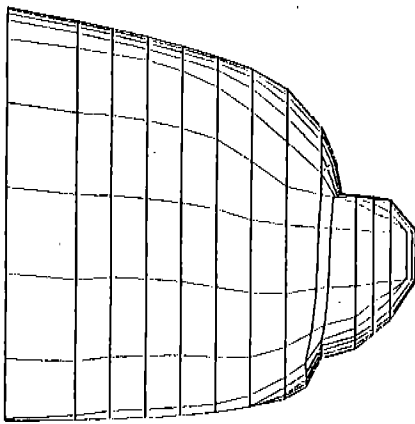
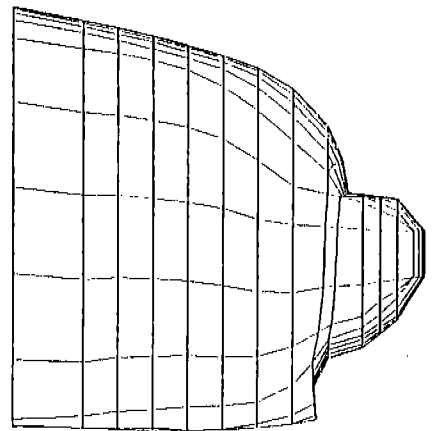


Fig. 5 Pressure distributions along the plane of symmetry



(a) without air dam



(b) with air dam

Fig. 6 Geometry and panel distribution of the front-end region (side view)

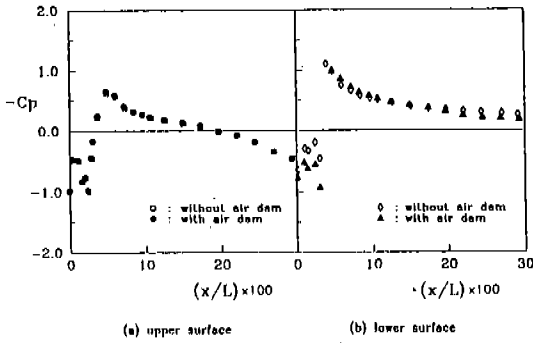


Fig.7 Pressure distributions along the plane of symmetry in the front-end region

Table 2 냉각공기 유입이 없을 때의 압력계수

	with air dam	without air dam
$C_{p1, \text{upp}}$	0.962	0.964
$C_{p1, \text{low}}$	0.820	0.585
C_{p3}	-0.678	-0.624

단면 1 과 2 사이의 손실 h_L 은 없는 것으로 가정하였다. 여기서 상수값 A, B 그리고 radiator 두께는 어떤 특정한 radiator 나 duct 모양에 대한 실제자료가 아니라 가상적인 경우임을 밝혀둔다. 또한 2.3절에서 서술된 냉각 공기량 결정을 위한 반복계산은 $|\zeta - \zeta'| / \zeta < 0.01$ 로 하였을 때 5회 이내로서 충분하였다.

Fig. 8에 차량속도 (U_∞)에 따른 단면 1에서의 무차원화된 평균 흡입속도 (u_1/U_∞)와 radiator 면에서의 속도 u_2/U_∞ 를 도시하였는데 단면적비 A_2/A_1 이 클수록 u_1/U_∞ , 즉 유량이 커지는 것을 알 수 있다. 반면 u_2/U_∞ 는 차량속도에 따라서 증가하는 것은 같으나 단면적비에는 무관함을 보여 대조적이다. 이는 ζ 이 식 (6)에서 A_2/A_1 에 따라 변화하지만 Fig.9에 도시된 바와 같이 단면 1과 3에서의 압력변화가 $p_1 - p_3$ 를 통해 이를 상쇄시키고 있기 때문이다. 즉 흡입속도가 감소하면 p_1 이 증가하고 또 차체 하부로의 유동이 증가하여 p_3 가 감소하기 때문에 $p_1 - p_3$ 는 A_2/A_1 가 감소할 때 더 커져 ζ 값에는 변화가

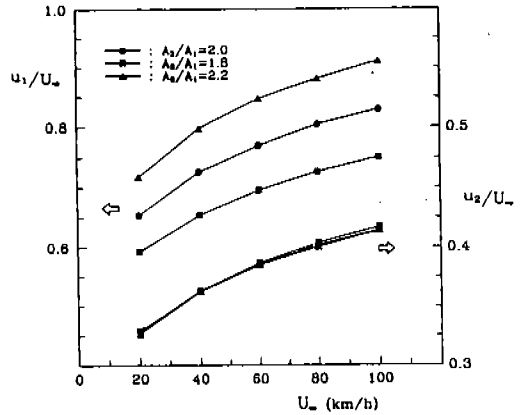


Fig.8 Average inlet velocity (u_1) and the velocity at the radiator surface (u_2)

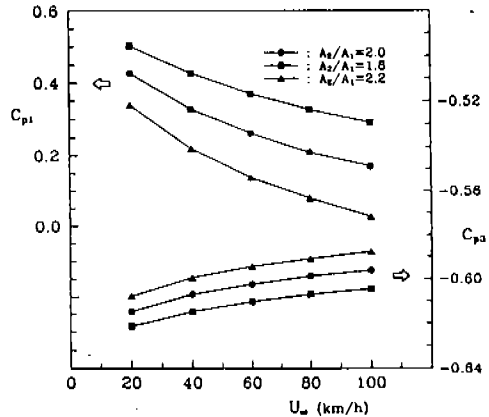


Fig.9 Average pressure coefficient at the cooling air inlet and the outlet (i.e., bottom surface of the vehicle)

없게 되며 따라서 일정한 u_2/U_∞ 값을 주게 되는 것이다.

Fig. 10은 흡입공기가 갖고 있던 운동량의 손실로 발생한 저항을 보이는데 그림의 저항계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta C_d = \frac{\rho A_1 u_1 U_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_S} \quad \text{전면 투영면적} \quad (7)$$

이 저항계수는 u_1/U_∞ 에 비례하므로 Fig.8과 동일한 경향 즉 차량속도와 면적비의 증

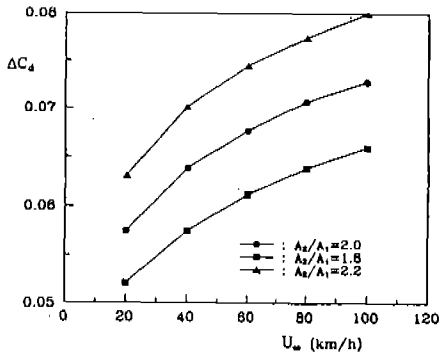


Fig. 10 Increment of drag coefficient due to cooling air flow

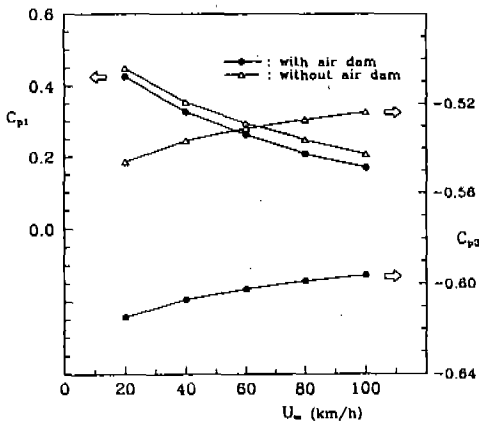


Fig. 11 Average pressure coefficient at the cooling air inlet and the outlet with $A_2/A_1 = 2$ for two different front-end shapes

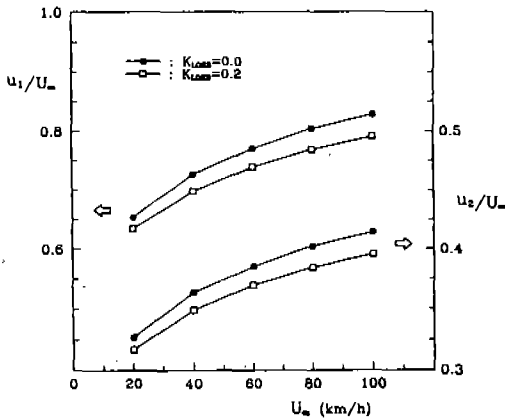


Fig. 12 Average inlet velocity and the velocity at the radiator surface with $A_2/A_1 = 2$ for two different front-end shapes

가에 따라 커지는 경향을 보이며 0.05~0.08 범위의 값을 갖는다.

다음은 A_2/A_1 을 2.0 으로 일정하게 고정하고 air dam의 유무에 따른 유량변화를 살펴 보았다. 앞에서 언급한 바와 같이 air dam은 냉각공기의 흐름을 촉진시키는 역할을 하는데 Fig. 11에 표시된 압력분포로부터 그 효과를 명백히 볼 수 있다. 즉 air dam 앞부분의 압력은 이 장치가 없는 경우에 비해 상대적으로 큰 흡입유량 때문에 다소 감소되고 있지만 air dam 하류의 압력 p_3 는 반대로 인체 크게 낮아져 $\Delta p (= p_1 - p_3)$ 는 크게 증가하고 있다. 이에 따라 유량도 증가하게 되는데 차량속도에 따른 단면 1에서의 속도 u_1/U_∞ 와 radiator 단면에서의 유속 u_2/U_∞ 의 변화가 Fig. 12에 보여진다. 그림에서 볼 수 있듯이 같은 양의 냉각공기를 유입시키기 위해 air dam이 없는 경우 더 빠른 주행속도가 필요하게 되며 이러한 정보는 fan 등을 포함한 냉각 시스템 integration에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

끝으로 앞에서 다뤘던 이상화된 냉각공기유동을 좀더 현실화시켜 공기흡입구와 radiator 단면 사이에서 손실을 고려한 경우를 계산하였다. 이 손실을 동압 ($\frac{1}{2} \rho u_1^2$)의 20%라 가정하여 air dam이 있고 단면적비 (A_2/A_1)가

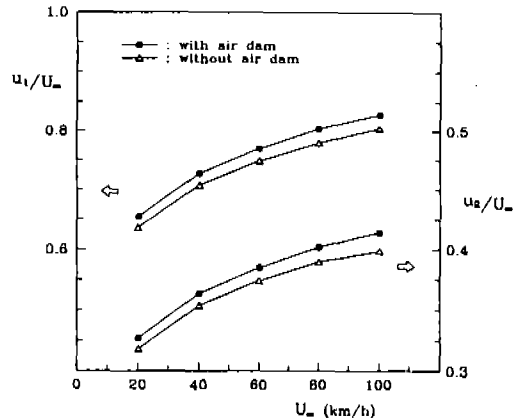


Fig. 13 Effect of ram recovery factor ($1-K_{Loss}$) on the cooling air flow for $A_2/A_1 = 2$

2인 경우를 해석하여 그 결과를 Fig.13에 도시하였다. 관의 손실이 있을 경우 유량의 감소는 당연한데 그림에서 볼 수 있듯이 손실계수 K_{Loss} 가 0.2 (즉 ram air recovery factor = 0.8)인 경우 약 5%의 유량감소를 초래하므로 효율적인 냉각을 위해서는 흡입구부터 radiator 면까지의 설계 또한 중요하다 는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

범용 유동해석 code VSAERO와 단순화시킨 냉각장치를 통하는 유동모형을 결합하여 흡입공기의 유량 및 이에 따른 저항의 증가를 유추하였다. 흡입공기속도를 변화시켜가며 반복적인 계산을 통해 어렵지 않게 유량을 수립시킬 수 있었다. 계산과정에 초점을 맞추었기에 매우 단순화된 내부유동모형을 사용하였는데 필요에 따라 보다 복잡하고 고차적인 모델의 적용 또한 힘들지 않을 것이라 생각된다. Radiator와 흡입구의 단면적비가 증가함에 따라 유량이 증가하고 radiator 면에서의 속도는 이에 영향을 받지 않고 일정함을 알 수 있었고, 또 air dam의 부착은 예상한 바와 같이 유량의 증가를 유도하여 해법의 정당함을 정성적으로나마 확인케 하였다. 실험을 병행·수행하여 결과의 정량적인 비교를 통해 해법의 신뢰도를 밝히는 것이 앞으로 필요한 과제라 할 것이다.

본 연구는 유동해석에 중점을 두어 주어진 조건하에서 radiator 단면에서의 유속을 구한 것이나 이 방법은 전체 냉각장치 즉 냉각 부하를 고려하여 radiator, pump, fan 등의 용량을 산출하는 등 전체 시스템 설계에 유용하게 쓰일 수 있으리라 사료된다.

후 기

이 연구는 첨단유체공학연구센터의 과제 (AFR-91-A 06)로 수행되었으며 그 지원에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Hucho, W.-H.(ed.), "Aerodynamics of Road Vehicles," Eng. ed., Butterworth & Co., 1987.
2. Shaw, C.T., "Predicting Vehicle Aerodynamics Using Computational Fluid Dynamics—A User's Perspective," SAE paper 880455
3. Summa, J.M. and Maskew, B., "Predicting Automobile Aerodynamic Characteristics Using an Iterative Viscous/Potential Flow Technique," SAE paper 830303
4. Program VSAERO, A Computer Program for Calculating the Nonlinear Aerodynamic Characteristics of Arbitrary Configurations, User's Manual, Analytical Methods, Inc., Redmond, WA, USA, 1991
5. Williams, J.E., Hacket, J.E., Oler, J.W., and Hammar, L., "Water Flow Simulation of Automotive Underhood Airflow Phenomena," SAE paper 910307
6. Cogotti, A. and Berneburg, H., "Engine Compartment Airflow Investigation Using a Laser-Doppler-Velocimeter," SAE paper 910308
7. Willoughby, D.A., Williams, J.E., Carroll, G.W., Sun, R.L., and Maxwell, T.T., "A Quasi-Three-Dimensional Computational Procedure for Prediction of Turbulent Flow Through the Front-End of Vehicle," SAE paper 850282