

냉각유동이 자동차 항력과 방열기 성능에 미치는 영향에 관한 연구

정 형 호*

A Study on the Effect of Cooling Air Flow on Drag and Performance of Radiator of Vehicle

H. H. Jung

Abstract

This paper presented results of experiment and numerical method about vehicle aerodynamics and engine cooling system. Drag coefficients by experiment were compared with momentum theorem and heat transfer coefficient of radiator was obtained by wind tunnel experiment. And the effects of maldistribution of frontal air velocity on heat transfer rate were predicted by thermal analysis method using elements.

1. 서 론

최근 생산되고 있는 자동차의 외형을 살펴보면, 전반부에 곡률로 이루어지고 있는 부분이 많아지고 있으며, 차체가 낮아지고 있다. 이러한 외형적인 차체의 수정은 공기 역학적인 관점에서는 바람직한 점이 되지만 엔진 냉각계 중 방열기에서는 새로운 문제가 발생되는데, 방열기에서 냉각수와 열교환하는 신선한 외기의 유입량이 제한을 받는다는 것이다. 엔진룸으로 유입되는 공기는 자동차가 주행시 그릴과 범퍼 등 전반부에서 작용하는 정압과 자동차의 하체(underbody)에서의 압력 차이에 의해 유입되며, 많은 공기가 유입되어야 방열기에서의 열전달량이 증가한다. 그러나 공기 유입량은 공기역학적인 관점에서 단점으로 작용하는데, 이는 유입량에 따라 자동차에 작용하는 항력이 증가하기 때문이다. 이와 같이 공기역학과 엔진냉각계는 상호작용에 의해 이루어지지만 정반대의 영향으로 나타나므로 이 양자에 대한 체계적인 검토

* 한국해양대학교 냉동공조공학과

와 연구가 필요로 한다.

또한 자동차 외형은 전반부에 있는 그릴의 형태와 에어댐의 부착으로 수정 변화하고 있다. 이러한 형상의 변화는 엔진룸 내에서 유동 형태에 영향을 주게 되며 이는 방열기 성능에 직접적인 영향으로 작용된다. 자동차의 그릴과 에어댐을 통과하면서 공기의 유동형태는 비균일하게 되고 이어서 방열기를 통과하면서 냉각수와 열교환되는데 유동의 교란이 방열기의 성능을 저하시킨다고 알려져 있다. 그러므로 자동차의 항력, 방열기의 성능 그리고 엔진룸 내에서의 유동에 대한 기존 연구에 대한 고찰이 필요로 하다.

첫째로 항력은 자동차 주행에 반대방향으로 작용하는 힘을 일컬으며, 실제 자동차가 주행할 때 작용하는 항력은 크게 2 가지의 형태로 나타난다¹⁾. 첫째 형태는 자동차의 차체와 차체에서 돌출된 백미러, 안테나 등의 부착물에 의한 것으로 외부항력(external drag) 이라 한다. 둘째 형태로는 방열기에서 냉각수를 식히기 위하여 엔진룸으로 유입되는 공기, 승객 탑승부의 공조를 위한 공기와 부품을 냉각하기 위한 공기 등 차체 내로의 공기 유입에 의한 것으로 내부항력(internal drag) 이라 한다. 이 내부항력에 대한 연구로는 최근에 Garrone 과 Masoero²⁾와 안 이기, 정 형호 등³⁾에 의한 것들이 있다.

둘째로는 방열기의 성능에 관한 것으로 방열기에서는 공기 측의 열저항이 물 측에 비해 아주 크므로 공기 측의 열저항을 감소시키는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 또한 차체의 경량화에 대한 요구로 핀과 튜브의 두께가 얇아지고 있으며 열교환기가 콤팩트해 지고 있다. 제한된 공간에서 열교환량을 최대화하기 위해서는 핀을 튜브에 부착하여 전열면적을 크게 하거나 핀을 여러가지 형태로 개조하여 루우버의 초기 경계층효과를 이용하여 평균열전달계수를 증가시켜 공기 측의 열저항을 감소시키고 있다. 특히 자동차 방열기에서는 대량 생산의 편리성에 의해 다중루우버가 이용되고 있으며, Davenport⁴⁾가 이 다중루우버에 대한 열전달 특성을 체계적으로 연구하였다. Davenport는 핀 높이, 핀 피치, 루우버 피치, 루우버 길이 그리고 루우버 각도 등 방열기의 핀과 루우버의 형상에 관한 열전달과 마찰저항에 대한 상관관계식을 구하였으며 이 경험식이 현재 까지 많이 이용되고 있다. 최근 핀피치에 의한 열전달 계수의 영향에 관한 연구가 보고되고 있다. Hiramatsu 등⁵⁾은 루우버가 부착된 핀의 형상을 2 차원으로 가정하고, 유선함수와 와도방법을 이용하여 루우버 사이에서의 유동에 대한 수치해석을 수행하였으며, 이와 병행하여 물을 이용한 유동을 가시화하였다. Hiramatsu 등은 핀피치에 대해서 최대의 열전달 계수 값이 존재한다고 보고한 바 있다.

셋째로는 자동차 전반부의 외형을 부분적으로 수정할 때, 이로 인하여 그릴과 에어 댐으로 유입하는 공기는 방해 받을 뿐 아니라 유속은 교란을 받게 된다. 같은 유량 조건하에서 공기 속도의 불균일성에 의해 방열기의 성능이 저하된다는 연구가 발표되었다. Jung⁶⁾은 엘리먼트를 이용한 열정산 방법을 적용하여, 방열기 전방에서 공기 속도 분포에 의한 방열량의 저하를 예측하였다.

이와 같이 자동차에서 작용되고 있는 유체역학과 열전달 현상은 한가지로 해결할 수 없는 복합적인 문제에 의해 이루어지고 있으며, 본 논문에서는 이 현상에 대해 직접 수행한 연구 결과를 밝히고자 한다.

2. 관련된 이론과 관계식

2.1 운동량 이론에 의한 냉각항력

엔진룸으로 유입하는 유동에 의한 냉각항력을 이론적으로 고찰하기 위하여 자동차와 유사한 형상 주위

의 유동 형태를 Fig. 1 에 표시하였다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 물체의 전반부에는 공기 유입구가 있어 공기가 물체 내로 유입하고 x-z 평면에 수직인 y 방향으로 빠져나간다고 가정하면 유입량에 해당하는 운동량 싱크가 발생한다. 운동량 이론을 적용하면 엔진룸으로 유입하는 유동에 의한 냉각 항력계수는 이 그림에서와 같이 계산될 수 있다.⁷⁾

Fig. 1 에서 계산된 냉각항력계수, c'_{DC} 는 유입면적을 기준으로 계산되어 있다. 자동차 전체에 대한 항력계수의 증가는 식 (1)과같이 자동차 전체의 전면 면적으로 환산하여야 한다.

$$\Delta C_D = C'_{DC} A_R / A \quad (1)$$

2.2 방열기 열전달 관계식

방열기의 열전달 연구에 이용된 식은 다음과 같다.

$$\text{열관류율} : \frac{1}{U} = \frac{1}{h_a^*} + \frac{1}{h_w \phi} \quad (2)$$

$$\text{면적평균열전달계수} : h_a^* = h_a \{1 - \phi(1 - \eta_f)\} \quad (3)$$

$$\text{핀효율} : \eta_f = \frac{\tanh(mb)}{mb}, \quad m = \sqrt{\frac{2h_a}{k_f \delta_f}} \quad (4)$$

2.3 엘리먼트를 이용한 열교환기 성능 예측

엘리먼트를 이용한 열교환기 열정산 방법은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 열교환기를 미소한 엘리먼트로 분할하고 각각의 미소 엘리먼트에서 에너지 균형을 만족하도록 하는 방법이다. 이 방법의 장점은 열교환 유체의 물성치 등이 국소적으로 변하는 경우와 상변화가 일어나는 경우에 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 열교환기의 국소적인 부분에서 열교환량과 온도도 정확히 예측할 수 있다. 각각의 엘리먼트에서 유도되는 선형식과 이의 해석법에 대해서는 Jung의 논문을 참조하기 바란다.

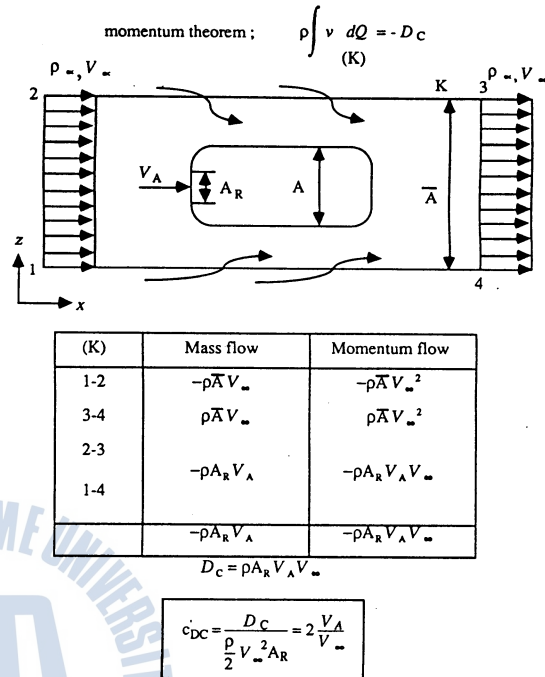


Fig. 1 Calculation of cooling drag with momentum theorem.

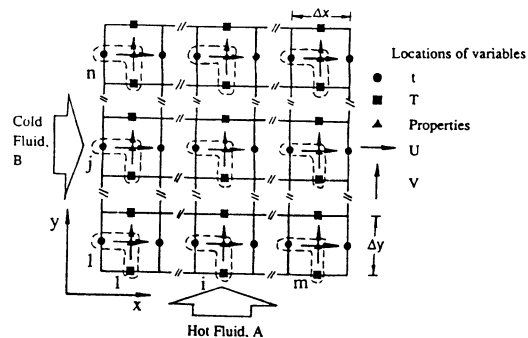


Fig. 2 Illustration of element and location of variables for cross-type heat exchanger.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 풍동 및 실험 모델

실험대상의 모델로는 Ahmed body 모델과 1/5 크기의 실차 모델을 사용하였는데, Ahmed body 모델은 측정부의 길이의 제한 때문에 원 Ahmed body 를 축소하여 아크릴로 제작 내부 유로가 보이도록 하였다. 본 실험을 위하여 제작한 외형 데이터를 Table 1에 나타냈으며, 본 모델을 측정부에 장착했을 때의

Table 1 Geometric data of model of Ahmed body.

Height(mm)	146.4	Width of inlet(mm)	86.4
Width(mm)	200	Height of inlet(mm)	32.8
Length(mm)	353.2	Slant angle	30°

blockage ratio는 2.03 % 이다. 자동차의 모델은 H 자동차회사의 1/5 축소모델을 이용하여 FRP 로 복사하였다. 풍동 내에서 장착된 자동차 모델과 제작한 Ahmed body 모델을 Photo 1 에 나타내었다.

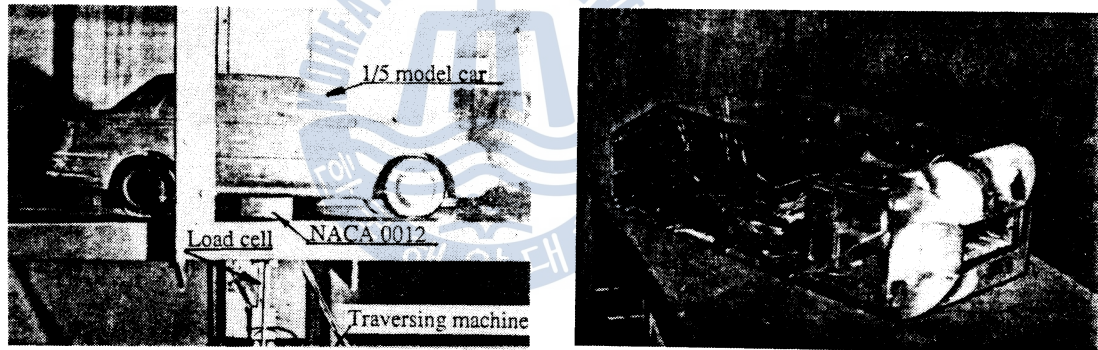


Photo 1 Photographs of 1/5 model car and Ahmed body with internal flow passage.

3.2 항력 측정과 밸런스의 검정

모델에 작용하는 항력을 측정하기 위하여 굽힘 모멘트 형의 로드셀을 이용, 항력 측정용 밸런스를 제작

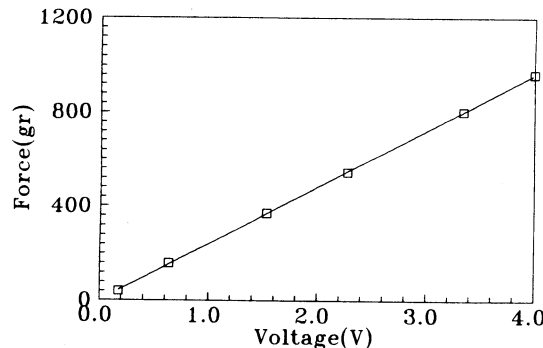


Fig. 3 Calibration curve of balance.

하였다. 실험 대상 모델은 지지대를 통하여 항력을 측정하는 로드셀과 연결되도록 하였으며, 공기와 접하는 부분의 항력을 줄이기 위해 지지대를 코드 길이가 10cm 인 NACA 0012 날개 형상으로 제작하였다. 지지대에 장착된 로드셀은 측방향이 모델에 작용하는 항력 방향과 직각이 되도록 배치하여 로드셀에서 항력 성분만 측정되도록 하였다.

그리고 기반 부에서는 공기 유동에 의한 진동을 줄이기 위하여 지지대를 보강하였다. 본 연구에서 구성한 항력 측정 시스템을 검정하였으며, 힘과 출

력 전압과의 관계는 Fig. 3에 나타내었으며, 아주 좋은 선형성을 보여주고 있다.

3.3 방열기 전열 실험

방열기의 전면 크기는 349.5mm×300mm 이고 실험은 (주) 만도 기계에서 행하여졌다. 핀 높이, 핀 피

치와 열 수가 다른 방열기에 대해서 물 유량과 공기 속도를 변화시키면서 수행한 많은 실험 데이터 중에서 핀 피치에 의한 열전달 성능에 효과가 대표적으로 나타나는 파라메타는 Table 2와 같다. 열전달 면적 중 핀과 튜브의 접합부, 핀과 루우버 선단부의 면적은 고려하지 않았으며, 핀은 사각 형상을 갖는다고 가정하였다.

Table 2 Parameters of experiment.

Fin height(nominal)	7.5mm
Fin pitch	2.2-5.01mm
Air velocities	6, 8, 10 m/sec
Water flow rates	30, 42, 52 l/min
Number of row	1

4. 결과 및 검토

4.1 Ahmed body 모델에 관한 실험

기존의 발표 결과⁸⁾는 모델 내부로의 공기 유입이 없는 경우에 관한 것이었으며, 본 연구에서는 이미 제작된 Ahmed body의 유입구와 유출구를 막고 실험하였다. 속도를 10m/sec 에서 풍동에서 최대로 낼 수 있는 속도인 20m/sec까지 변화시키면서 측정된 항력계수의 값을 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 항력계수는 조금씩 차이를 보이고 있는데, 이는 로드셀의 자체 전압 요동과 유동의 진동에 의한 것이라고 생각된다. Table 3은 본 실험과 기존의 연구 결과를 비교한 것이다. 이때 슬랜트 각도는 30도이

Table 3 Comparison of drag with Ahmed's experiment.

Ahmed's result ¹⁾	present ²⁾
0.378	0.38-0.4

Note 1) Free stream velocity is 60 m/sec

2) Free stream velocity is 20 m/sec

며, 이 Table 에서 보는 바와 같이 기존의 실험 보다 약 3.2 %에서 5.8 % 정도 높게 나왔으며, 풍동 실험의 오차를 감안하면 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

4.2 냉각유량에 의한 효과

내부 유로의 평균 유속 변화에 의한 항력변화를 실험의 결과와 운동량 이론에 의한 항력과 비교하여

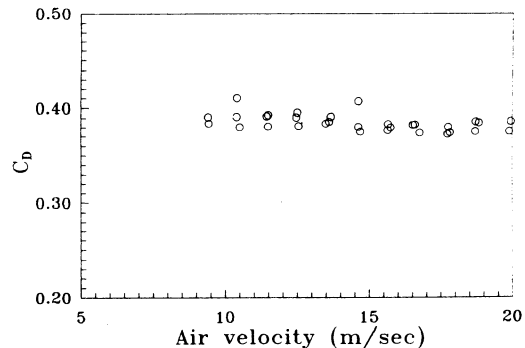


Fig. 4 Drag coefficients versus air velocities.

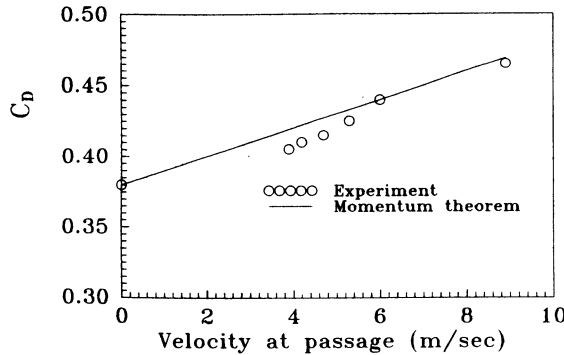


Fig. 5 Comparison of C_D with momentum theorem.

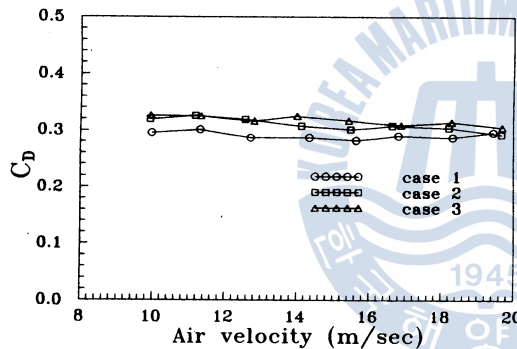


Fig. 6 Variation of C_D on configuration of engine room.

와 같이 유입구의 개폐에 따라 항력 계수 값은 약 10% 이상 차이가 남을 알 수 있었다. 또한 case 2 와 case 3 의 경우 항력의 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며, 실험오차, 유동에 의한 진동, 항력측정시스템의 고유진동수 등의 복합적인 문제에 의해 명확한 차이를 보여주고 있지 않다. 앞으로 이에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

4.4 방열기의 열전달 특성

피치 변화에 따른 효과를 보기 위해서는 레이놀즈수가 450, 600, 750 일 때 유로형상비에 대한 Nu 수를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 핀 피치의 변화에 의한 Nu 수는 2 개의 최대값을 보이고 그 사이에 최소값이 존재하고 있다. 핀 피치의 효과에 대한 기존의 연구, Davenport, Hiramatsu의 연구를 종합하여 본 연구에

Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 내부 유로의 속도가 큰 경우에는 운동량 이론과 실험의 결과가 잘 일치하는 것을 보여주고 있다. 그러나 속도가 작은 곳에서는 약간의 차이가 남을 알 수 있었는데, 이는 내부 유로 내에서의 속도를 측정할 때 저속인 경우 실험의 불확실성에 기인한다고 사료된다. 또한 항력계수의 변화는 입구를 막은 경우를 기준으로 22%의 증가를 보여주고 있다.

4.3 1/5 크기의 실차 모델의 실험

모델을 이용한 풍동의 실험에는 몇 가지의 제약이 있는데, 축소모델에서만 가능하다는 것이며, 팬의 송풍 능력 한계로 실제 자동차 주행 속도 만큼 풍속을 낼 수 없으며, 그리고 가장 큰 제한 조건으로는 실제 엔진룸 내의 유로를 정확히 묘사할 수 없다는 것이다. 유입구를 완전히 막은 경우를 case 1, 유입구는 열려 있으나 엔진 형상 블록이 없는 것을 case 2, 엔진 형상의 블록이 있는 것을 case 3 라고 하고, 자동차 축소모델을 풍동 내에 장착하여 공기속도를 변화시키면서 항력을 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바

Table 4 Comparison of fin pitch and type of Heat exchanger.

	$P_1/p_1 \tan\theta$	Remark
Davenport	0.186-0.234	radiator(40×1.5 tube)
Hiramatsu	0.1-0.9	radistor, 2D
Kim et. al.	0.156-0.267	circular tube
Present	0.115-0.263	radiator(13×2 tube)

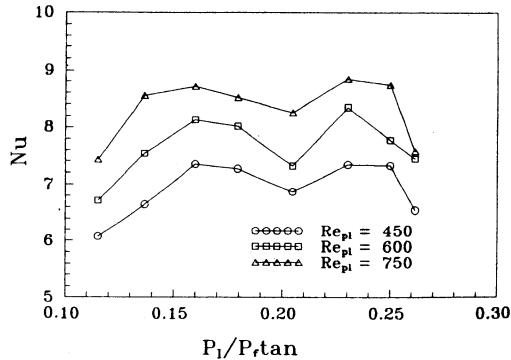


Fig. 7 Effect of fin pitch on Nu number.

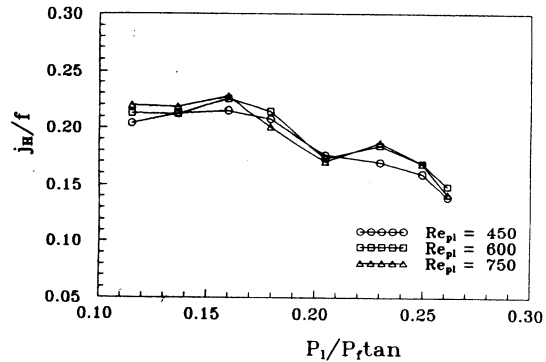


Fig. 8 Effect of fin pitch on j_H/f .

서의 유로형상비 범위와 열교환기의 종류에 대한 것을 Table 4에 비교하였다.

Davenport는 유로형상비의 변화가 적어 핀 피치의 효과를 고려하지 못하였다고 사려되며, 그의 논문에서도 핀 피치의 효과에 대해서는 언급하지 않았다. 그러나 Hiramatsu 등의 결과를 고찰하면 그들은 유로형상비 변화에 따라 2 개의 최대값과 그 사이에 최소값이 존재하는 것을 설명하였다. 본 연구에서도 Hiramatsu의 결과와 정성적으로 동일하게 나타났으나, 그 범위가 다름을 알 수 있었다. Hiramatsu는 0.35와 0.75에서 Nu 수의 최대값을 보이고 있으나 본 연구에서는 0.157과 0.23에서 최대 값을 0.2에서 최소값이 나타나고 있다. 본 연구에서는 실험의 결과가 튜브와 튜브사이에서의 2 차원 유동으로 대표된다고 가정하면 최대값 유로 형상비는 0.314와 0.46이 된다. Hiramatsu 등의 결과 Nu 수가 최대인 유로 형상비 중 작은 값은 거의 일치한다.

본 연구에서 Nu 수가 최대값을 갖는 핀 피치의 간격은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 1.11 mm인데 2차원으로 가정하면, 핀의 간격은 0.555로 생각할 수 있다. 루우버의 유로 사이에서 속도가 최대인 위치가 주기적으로 존재한다고 가정하고, 핀 피치를 줄이면서 반복적으로 루우버 선단이 속도가 최대인 곳을 만나는 간격을 계산하면 $Pe \tan\theta$ 으로 되며, 이 값은 0.577이 된다.

Fig. 8은 열전달과 열교환기의 표면마찰계수와의 관계를 표시한 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유로형상비가 0.165에서 열전달량에 대한 팬의 동력이 가장 최적인 것을 알 수 있다.

4.5 전면 풍속의 비균일성에 의한 방열기 성능 저하

실제 자동차가 주행할 때, 방열기 전방에서의 속도는 불균일하게 되는데 이는 그릴과 에어 댐에 의해서 유동이 방해받기 때문이다. 이와 같은 유동형상을 모사하기 위하여 전면에서의 속도가 Fig. 9에서 보는 바와 같이 선형적으로 변한다고 하였으며, 각 경우에 대해서 유량은 동일하게 하였다.

그리고 속도의 불균일성을 의미하는 변수로 속도의 표준편차로 택하였으며, Fig. 10은 전면속도의 불균일성에 의한 방열량의 감소를 보여주고 있다. 또한 방열기가 엔진룸에 장착될 때 요구 방열량을 얻기 위해서는 Fig. 10에서 보여주는 만큼 열량을 보충해야 함을 알 수 있다. 그리고 자동차의 전반부를 부분적으로 수정할 때, 가능하면 방열기 전방에서 속도가 균일하도록 하여야 적은 공기의 유입으로 방열기 성능이 제

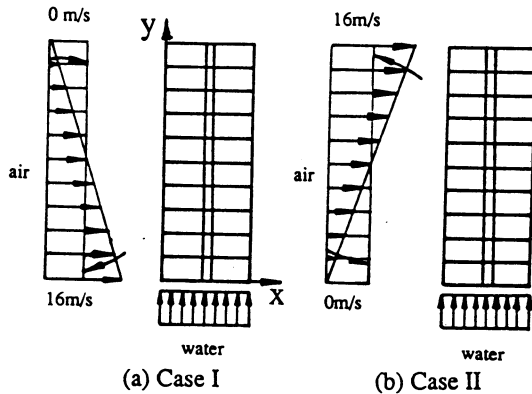


Fig. 9 Flow patterns of frontal air velocities.

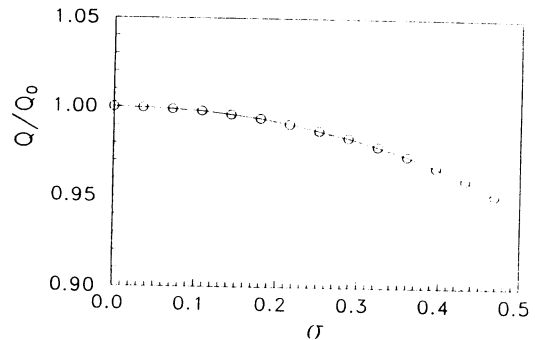


Fig. 10 Effect of σ on heat transfer rate.

대로 발휘되며, 냉각유동에 의한 공기 저항계수가 감소한다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 주행시 자동차에 작용하는 유동 저항, 냉각 유동에 의한 항력의 변화 그리고 엔진룸 내에 장착할 때 방열기의 열전달 성능의 저하 등 자동차의 항력과 엔진방열기의 상호 작용에 관하여 실험과 시뮬레이션을 병용하여 연구하였으며, 연구 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 냉각유동에 의한 항력의 증가는 간단한 운동량 이론으로 예측해도 된다. 그리고 자동차 모델 실험에서 항력은 10 %의 증가를 보였다.
- 2) 피치 변화에 의한 Nu 수가 최대, 최소값을 갖는 것은 루우버 선단이 상류에 있는 루우버 후류의 유동 중 최대속도인 점과 최소속도인 점이 반복하면서 접하기 때문이다.
- 3) 유효형상비 0.16이 방열기의 팬 동력에 의한 열전달량의 최적값이 된다.
- 4) 방열기가 엔진룸에 장착되었을 때, 전면에서의 속도의 불균일성에 의해서 성능은 4 % 감소되며, 이 만큼 보상해야 한다.

향후의 연구 과제로는 탑승부에서의 환기, 가열, 제습, 공조에 관련된 히터, 에어컨에 관한 연구와 공기 역학을 포함한 자동차의 엔진냉각계를 최적화하는 시스템 연구로 진행되어야 한다.

참고문헌

- 1) Wiedemann, J., 1990, "Theoretical and Experimental Optimization of Internal Flow," Automotive Technology International '90, pp. 407-409
- 2) Garronem A. and Masoero, M., 1987, "Car Underside, Upperside and Engine Cooling System Interaction and Their Contribution to Aerodynamic Drag," SAE Paper 860212.
- 3) 안 이기, 정 형호, 김 광호, 1994, "냉각 유동이 자동차 항력에 미치는 영향에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집 94 년도 2월호 게재 예정.

- 4) Davenport, C. J., 1983, "Correlations for Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Louvered Fin," AIChE Symposium Series No. 225, Vol. 79, pp. 19-27.
- 5) Hiramatsu, M., Ishimau, T. and Matsuzaki, K., 1989, "Research on Fins for Air Conditioning Heat Exchangers(1st Report, Study of the Heat Transfer-Characteristics of Louvered Fins)," Trans. of Japan Soc. mech. Engrg.(B), Vol. 55, No. 519, pp. 3457-3461.
- 6) Jung, H. H., 1993, "A Study on Effect of Maldistribution of Frontal Air Velocity on Heat Transfer Rate of Vehicle Radiator," The 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, Vol. III, pp. 433-438.
- 7) Hucho, W., 1987, "Aerodynamics of Road Vehicle," Butterworth & Co.(Publishers) Ltd, pp. 188-189.
- 8) Ahmed, S. R., Ramm, G. and Faltin, G., 1985, "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake," SAE Paper, 840300.



