

〈논 문〉 SAE NO. 96370075

엔진룸내 방열기 전단면 유동 불균일도 측정에 관한 연구

Experimental Study of the Non-Uniform Mean Flow at the Front of a Radiator in Engine Room

류 명 석*
M. S. Lyu

ABSTRACT

The recent trend of higher output engines with more auxiliary parts is resulting in greater heat generation in the engine compartment. In order to maximize the heat dissipation and eliminate the inefficient flow in the engine compartment, it is necessary to understand the flow field under the hood. In this respect, experimental study as well as numerical analysis should be conducted. The automated measuring system was constructed to obtain three dimensional mean flow data with high accuracy. The measurements have been made on a vehicle with a steady incoming air flow. The result shows that there exists a high degree of non-uniformity in the mean flow velocity at the front of radiator.

주요기술용어 : Engine room(엔진룸), Non-uniformity(불균일도), 5-hole pitot tube(5공피토포관), Cooling performace(냉각 성능), Front opening area(개구면적)

1. 서 론

엔진의 고성능화로 인한 엔진룸내의 공기온도 상승은 엔진 및 부품을 열손상시키며 성능저하를 초래한다. 따라서 공기 흐름을 조절하는 효율적인 냉각이 엔진설계시 중요한 인자가 된다. 이에 따라 본 논문에서는 차의 냉각성능을 높이기 위해 열유동을 해석할 수 있는 3차원 실험연구를 수행하였다. 실차 내부의 3차원 평균 유동분포를

자동화(On-line)된 이송시스템을 사용하여 측정했다. 특히 위치 선정의 정확도를 위해 정밀 이송시스템을 특수 제작하고 5개의 압력신호를 동시에 처리하여 기존의 Scanning 시스템에 의한 순차적인 신호처리 방법을 개선했다. 이를 통해 차 개구형상(Front Opening Area)이 유동에 미치는 영향을 고찰하였으며, 이 결과는 엔진룸내 냉각성능 향상을 위한 열유동 데이터 베이스로 활용될것으로 기대된다.

최근 GM, 닛산^{1),2)}등의 자동차 연구소에서 엔진룸내 3차원 해석을 통한 냉각성능 개선을 위

* 고등기술연구원, 자동차기술연구실

한 연구가 활발히 수행되었으나 국내에서는 이에 대한 연구가 미흡하다. 엔진룸내 유동에 관한 대표적인 실험연구로서는 William et al²⁾은 3/8 축소 모델에서 물을 사용하여 상이성(Similarity)에 의해 엔진룸내 유동장을 해석 함으로써 냉각효과에 미치는 영향을 고찰하였다. 특히 유동 가시화(Flow visualization)를 통하여 엔진룸내 라디에이터, 엔진 주위의 재순환 영역 및 정체점 등을 고찰하여 열상승 원인이 되는 부분을 제시하였다. 이밖에도 LDV³⁾, Hot-wire anemometer⁴⁾ 등을 사용하여 엔진룸내 공기 유동을 측정하는 연구가 수행되고 있다. 한편 본 연구원, KIST, 현대자동차⁵⁾,⁶⁾,⁷⁾ 이미 단순모델 및 실차에 가까운 모델에 대한 수치해석을 수행한 바 있으나 이는 엔진룸같은 복잡한 형상에 대해서는 격자생성기간등으로 인해 신차개발 초기에 적용하기는 어려우므로 기존 차모델에 대한 개선 방안을 제시하는 수준으로 그치고 있다. 또한 Nobuhiro et al⁸⁾은 엔진주위의 3차원 열유동 현상을 수치 해석하였다. 격자생성을 용이하게 하기 위하여 자동적으로 직교격자 모델을 만드는 "Pre. M"이라는 소프트웨어를 만들어 상용코드인 "STREAM"을 사용하여 실제 실험과 비교하였다. 고속에서는 주로 엔진밀로 빠져나가는 유동이 저속에서는 위아래, 옆으로 나누어지면서 라디에이터 상단 및 엔진 후미에서 재순환 영역 및 정체점등의 비효율적인 유동현상을 고찰하였다. 그리고 라디에이터 상단 Air vent 크기 및 Air-dam의 부착위치가 라디에이터 통과유량을 최대로 하는 최적형상을 T. Han et al⁹⁾ 등이 단순모델에서 3차원 해석을 하였다. 이들 연구 대부분이 단순모델에서 수행되었다.

본 연구의 3차원 평균 유동 측정 시스템의 한 단면(10×10)을 기준으로 할때 이송 및 데이터 환산등을 포함하여 60분 정도의 측정 시간이 소요된다. 향후 신차개발 초기에 차 입구 유량분배, 방열기 전단면 유량 및 유동 불균일도, 차내 유동분포 및 엔진룸의 열정체를 유발하는 유동의 비효율적인 부분을 개선하여 냉각성능을 향상시킬 수 있는 방향을 제시할 수 있을 것이다.

2. 실험방법

3차원 평균유속을 측정하기위해서 5공피토관을 사용하였으며, 차 내부에서 위치제어 및 이송을 원활하게 하기위해서 이송시스템을 제작하였다[Fig.1].

2.1 실험장치

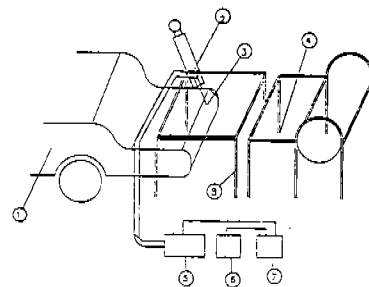
2.1.1 모델

현재 대우자동차에서 양산중인 차종을 택했으며 후드 일부를 전단하여 그부분에 투명 아크릴판을 부착하였다. 이부분에 구멍을 일정간격으로 가공한후 5공 피토관을 삽입하여 유속측정을 수행하였다[사진 1].

2.1.2 5공피토관 및 3차원 이송장치

엔진룸내 3차원 속도 분포를 측정하기위해 5공 피토관(United Sensor사, DAT-250)을 사용하였으며, 온도를 측정하기위하여 피토관 안에 열전대를 삽입시켰다[Fig.2].

5공 피토관의 정확한 위치선정 및 이송을 위하여 사용된 3차원 이송장치는 x, y, z 축 방향으로 좌표는 1/100mm까지 제어할 수 있으며, 최대 이송거리는 60cm 이다. 이들 절대 좌표값을 입력하여 원하는 위치까지 정확히 이송할 수 있도록 하였으며 편의를 위해 수동조작 가능하도록 하였다.



- | | |
|----------------------|-------------------------------|
| 1. experimental car | 5. cressure transducer |
| 2. 3-O traverser | 6. 3-O tranerser control unit |
| 3. 5-hale pitot tube | 7. computer |
| 4. wind tunnel | 8. frame |

Fig.1 The on-line system to measure three dimensional mean velocity

그리고 피토판과 압력 차압기(Pressure Transducer)를 연결부위의 요동을 방지하기 위해 실리콘 관을 제작하여 연결하였다. 고속유동시 이 송장치의 프레임과 손잡이를 고정시켜 흔들림을 방지하였다.

2.1.3 압력 측정장치

5공피토판에서 얻어진 압력 측정을 위하여 측

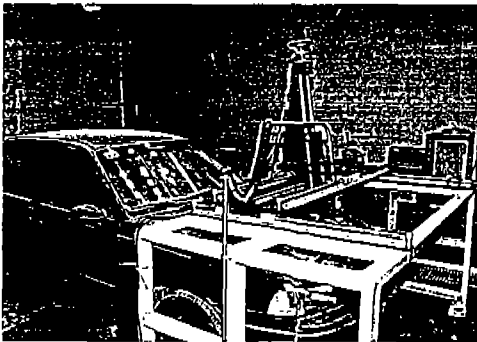
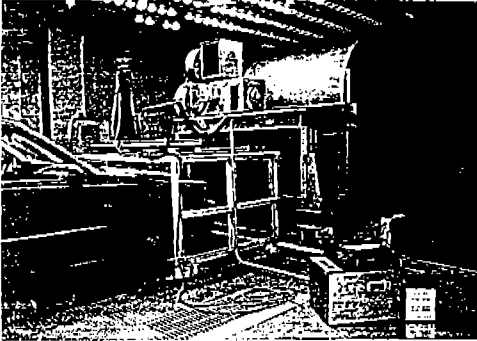


Photo 1 The experimental equipment around a car

정 범이가 0~20mmH₂O인 FCC44를 사용하였다.

본 실험장치의 특징은 5개의 압력을 5개의 FCC44를 사용하여 동시에 압력을 측정할 수 있도록 하여 Scannivalve를 사용한 순차적인 방법보다 정확도를 높이며, 측정시간을 단축 하였다.

2.1.4 자동자료처리장치

차압기에서 입력된 압력은 전압을 20mmH₂O 일때 최대 10V로 출력한다. 이 출력된 전압은 PC에 내장된 PC-Lab Card에 의해 정수형 데이터로 저장되며 컴퓨터 프로그램에 의해 자동으로 통계처리 되도록 하였다. 원하는 데이터양 및 샘플링율을 컴퓨터로 조절할 수 있도록 하였으며, 5개의 압력 차압기에서 각기 2048개씩 추출하여 필요한 물리량을 계산하였다.

2.1.5. 실험 방법

본 실험에서는 Non-nulling 방법을 사용하여 자유 유동 속도가 10m/sec인 풍차에서 보정한 5공 피토판의 보정표를 사용하였다. 이때 유동장의 공기온도는 상온을 유지하였다.

보정 실험을 위하여 사용된 풍동은 KANO-MAX사(한양대, 안산캠퍼스) 아음속 풍동으로 최대 50m/sec, 비균일도 0.5%, 난류량 0.3%이다[사진 2]. 풍속은 10.8m/sec로 일정한 상태에서 수행하였으며, 5공피토투브의 미세한 각도 변환을 위하여 아크릴 판으로 변환기구를 제작하였다. 프로브의 받음각인 요우잉각은 10도 간격으로 -40도에서 40도까지 변화해가면서 측정

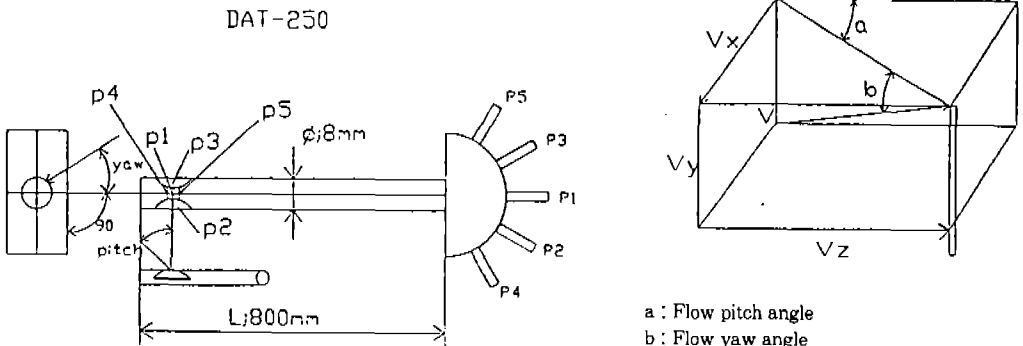


Fig.2 5-hole pitot tube and coordinate system

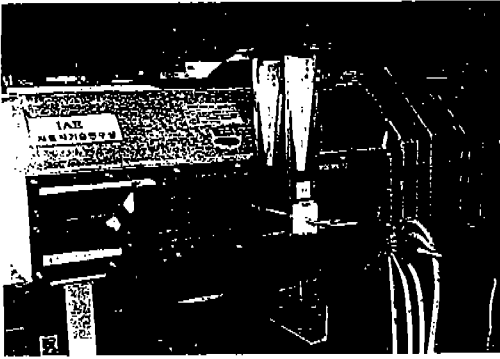


Photo 2 kanomax's subsonic wind tunnel and Calibration system (Hanyang university at Ansan)

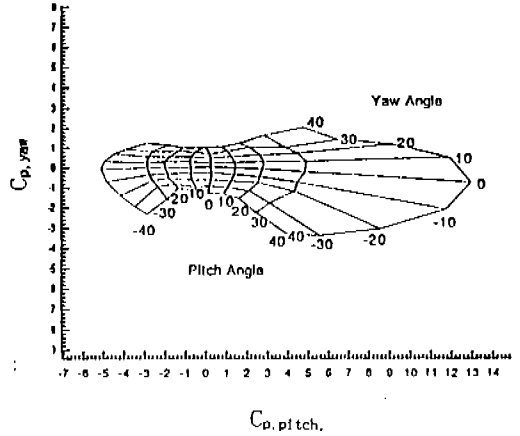


Fig.3 Calibration curve

할 수 있다.

각 압력공의 압력으로부터 무차원 압력계수는 다음과 같이 계산된다.

$$C_{p, pitch} = (P_5 - P_4) / A$$

$$C_{p, yaw} = (P_2 - P_3) / A$$

$$C_{p, total} = (P_1 - P_t) / A$$

$$C_{p, static} = (P_1 - P_3) / A - 1$$

$$(A = P_1 - (P_2 + P_3 + P_4 + P_5) / 4)$$

여기서,

$C_{p, pitch}$, $C_{p, yaw}$: 압력 피칭계수와 압력 요우잉계수

$C_{p, total}$, $C_{p, static}$: 전압력계수와 정압력계수

P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 : 각 압력공의 압력

각각의 프로브 받음각과 요우잉각에 대하여 얻은 $C_{p, pitch}$, $C_{p, yaw}$, $C_{p, total}$, $C_{p, static}$ 를 가지고 보정 곡선을 작성한다. 보정곡선은 [Fig.3]에 나타나 있다.

위의 프로브 보정실험을 통해 얻은 곡선을 이용하여 실험하고자 하는 유동장의 유동특성을 알고자 하는 영역에 대하여 5공 피토투브를 위치

시키고 5개의 압력공으로부터 얻은 압력 데이터를 가지고 무차원 압력계수 $C_{p, pitch}$, $C_{p, yaw}$ 를 계산한다. 계산된 이 계수는 구해놓은 곡선으로부터 프로브의 받음각과 요우잉각으로 변환한다.

여기서 결정된 프로브의 받음각과 요우잉각을 이용해서 프로그램에 이미 입력된 데이터베이스로부터 전압력 계수와 정압력계수를 구하고, 다음식에 대입하여 전압력과 정압력을 구한다.

$$P_t = P_1 - AC_{p, total}$$

$$P_s = P_2 - A(1 + C_{p, static})$$

Bernoulli eq. 에서

$$V = (2(P_t - P_s) / \rho)$$

이로부터 3차원 속도 성분을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_x = V \cos\alpha \cos\beta$$

$$V_y = V \cos\alpha \sin\beta$$

$$V_z = -V \sin\alpha$$

(α : 유동 받음각, β : 유동 요우잉각)

3. 냉각해석 이론 및 실험결과

차 냉각성능은 엔진 발열량 중 냉각수로 전달된 열량이 방열기에서 방열되는 율에 따라 정의된다. 방열량 Q는 일반적으로 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$Q=f(U, A, T, \phi) \quad (1)$$

여기서

U : 총괄 열전달계수

A : 전열면적

T : 냉각수와 공기평균온도차

ϕ : 기하학적 형상에 의존하는 효과(ex : 방열기 종류, 비균일도, 난류강도, etc.)

유동이 균일하며 난류강도를 무시할 수 있는 경우 방열량을 정의하며

$$Q=UA\Delta T_m$$

(ΔT_m : 냉각수와 공기 평균온도차)

식 (1)에서 총괄 열저항에 해당되는 $1/(UA)$ 는 다음과 같다.

$$(1/UA) = \underbrace{(\delta_r/K A)}_I + \underbrace{(1/\eta h_1 A)}_II + \underbrace{(1/h_2 A)}_III \quad (2)$$

(δ_r : 튜브의 두께, K : 튜브의 열전도율, A : 냉각수측 전열면적, η : 핀의 효율, h_1 : 공기측 대류 열전달계수, h_2 : 냉각수측 대류 열전달계수)

식(2)의 각항은 다음과 같다.

I : 튜브벽에서의 열전도에 따른 열저항

II : 공기측 열저항

III : 냉각수측 열저항

각기항의 크기(Order)를 비교해보면 튜브벽 δ_r 가 얇으며 열전도율 K가 큰 재질인 알루미늄이므로 I 항은 무시될 수 있다. 또한 II 항은 III 항에 비해 한 Order(10배)정도 크다.

따라서 방열기의 방열량을 증가시키기 위해서는 방열기의 위의 I, II, III의 세가지 열저항중 가장 큰 공기측 열저항을 감소 시키는 것이 가장

효율적이다. 그 방법으로는 II 항의 요소인 방열기의 크기(A)를 증대, 핀효율증대(η), 대류열전달계수(h)를 증대시키는 방법이 있다. 실제 차량 냉각장치 설계시에는 부품업체의 방열기 사양이 단순하고 엔진룸 PACKAGE 제한으로 설계 유연성 및 용이성등으로 대류열전달계수를 증대시키는것이 효율적이다.

대류열전달계수를 증대시키기 위해서는 우선적으로 방열기 통과 풍량을 향상시켜야 한다. 이를 위해서는 크게 유입부분 형상, 냉각팬(Cooling Fan)의 용량 및 위치변경, 에어덤과 같은 보조장치에 의한 냉각 풍량증대를 시켜야한다. 특히 유입부분의 냉각풍량은 스타일 및 공기역학적 관점이 같이 고려되어야 하므로 어느정도 제한이 있으나 방열기 통과풍량에 가장 큰영향을 준다.

앞에서 식(2)는 가정이 들어있는데, 실제로는 방열기 중심부분을 통과하는 유동의 불균일도 정도가 열교환기 성능에 큰영향을 준다는 것이 널리 알려져있다¹⁰⁾.

유동의 불균일도 z는 통계학의 분산과 표준편차의 개념에 기초를 두고 있으며, 공기유동의 균일한 정도를 나타내기위해서 도입되었다.

유동의 불균일 인자 z는

$$z = \left[\frac{\sum_{i=1}^{MN} (\phi_{avg} - \phi_{i,j})^2 / MN}{\phi_{avg}^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$(\phi_{avg} = (\sum_{i=1}^{MN} \sum_{j=1}^{MN} \phi_{i,j}) / MN = 1)$$

여기서 ϕ 는 각위치에서 주유동 방향의 속도를 전체단면의 주방향 평균속도로 나눈값이다. 만약 이상적으로 균일한 유동이라면 z값은 0이다.

유동 불균일도가 열성능 저하에 미치는 영향을 설명하기 위해서 다음과 같은 열성능 저하인자를 도입한다.

$$z = (\Delta \epsilon / \epsilon) \quad (4)$$

$$= \frac{(\epsilon_{uniform flow} - \epsilon_{nonuniform flow}) / \epsilon_{uniform flow}}{= \frac{(Q_{total, uniform flow} - Q_{total, nonuniform flow}) / Q_{total, uniform flow}}$$

(ϵ : Heat transfer effectiveness,

Q : Heat transfer rate)

이 저하인자는 각 모델의 설계 및 작동변수에 의해 결정된다. 즉 불균일도에 따라 앞에서 이론적으로 구한 대류열전달계수가 크게 달라져 전체 성능 저하에 영향을 준다. 결론적으로 각기 시스템에 따른 방열량 성능 저하율 대비 유동불균일도의 상관관계곡선을 구할 필요가 있다. 본연구에서는 우선적으로 3차원 측정시스템을 기존차 모델에 적용하여 앞에서 언급한 유동 불균일도 인자를 구하였다.

차는 정지상태에서 차속 60km/h에 해당하는 풍속을 풍동을 통하여 얻었다.

본연구의 실험은 3가지 영역으로 나눌 수 있다[Fig.4].

- (1) 기본 형상 — Case 1
- (2) 그릴부분 개구면적을 막을때 — Case 2
- (3) Bumper 하단부분 개구면적을 막을때 — Case 3

이때 방열기 전단면 유동분포를 고찰하면 엔진룸내의 기하학적 형상의 복잡성에 의해 3차원

현상을 가지며 유동이 불균일하다[Fig.5]. 또한 개구면적 형상 및 범퍼, 에어댐등에 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

유동의 불균일도를 방열기 전단면에서 재정의 하면 다음과 같다.

$$Z = \left(\frac{1}{N} \sum_i^N |u_i - U| \right) / U, \quad (U = (\sum_{i=1}^N u_i) / N) \quad (5)$$

본 연구에서는 상하부 개구면적이 냉각성능에 미치는 영향을 보기위해서 Case 2와 Case 3를 비교해 볼 필요가 있으며, 세가지 경우에 대한 방열기 전단면의 불균일도를 각기 경우에 따라 하면 [표1]과 같다.

Case1, Case2, Case3의 경우 Case1이 균일도가 좋으며 Case2, Case3의 같은 유량에 대하여 방열기 전단면의 균일도는 Case2가 좋다. Fan/On시 Case2, Case3의 개구면적에 따른 균일도

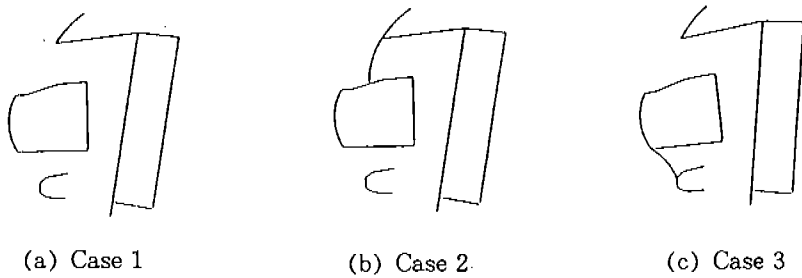


Fig.4 Research model

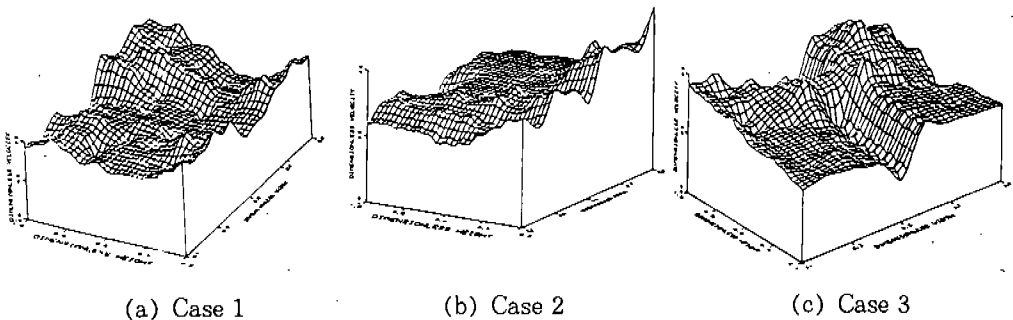
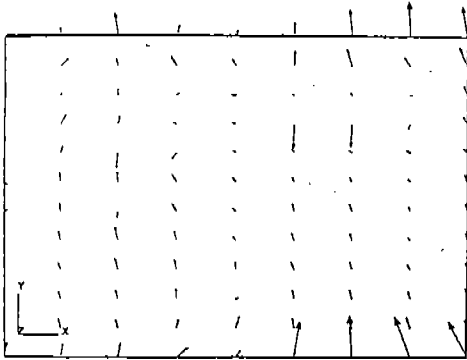


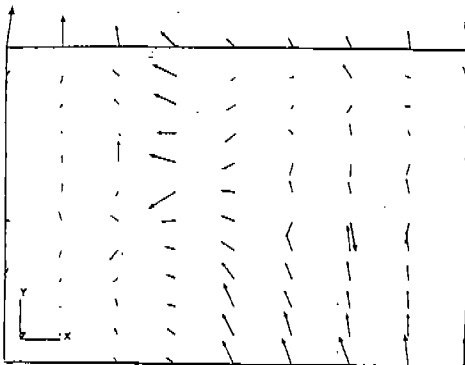
Fig.5 The axial velocity distribution at the front of a radiator (FAN/OFF)

표 1 방열기 전단면 불균일도

	불균일도(Z)	
	실험 Fan Off(On)	수치해석
Case 1	0.149(0.162)	0.113
Case 2	0.160(0.230)	0.297
Case 3	0.216(0.210)	0.342



(a) FAN/OFF



(b) FAN/ON

Fig.6 The secondary flow at the front of a radiator
(max. : 6.5m/sec, min : 0.05m/sec)

차이가 없는 것으로 보아 콘덴서 앞 및 방열기 뒤의 Fan부착 효과가 나타난다.

[Fig.6a, b]는 방열기 전단면에서의 이차유동 (Secondary Flow)을 나타낸것으로 Fan/On시는 Fan 효과에 Fan/Off시에 비해 정성적으로 상이하며 복잡한 유동형태를 나타낸다. 그러나

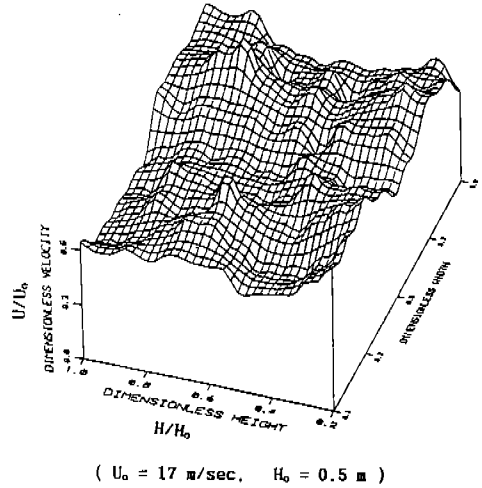


Fig.7 The axial mean velocity distribution (FAN/ON)

이들 이차유동은 주방향 평균속도에 비해 평균 (5~25%)정도의 크기로 3차원 해석의 필요성을 보여준다. [Fig.7]은 Fan/On시 주방향 평균 속도 분포이며 Fan효과에 의해 유량은 각기 Case[1-3]에 대해 평균 15%정도 증가 하였다.

4. 결 론

- 1) 본 연구에서는 실차 엔진룸내 3차원 평균 유속을 측정할 수 있는 시스템을 구축하였다. 5공 피토투관 신호처리시 기존의 5개의 신호를 순차적으로 처리하는 방법을 개선하여 동시에 처리하여 한단면(10×10) 실험시간을 60분내로 단축하였다.
- 2) 방열기 전단면 주방향 평균속도의 큰 불균일도를 얻었으며, 개구형상에 따른 불균일도인자를 제시하였다. 이는 향후 냉각성능 해석에 데이터로 활용 될 것이다.
- 3) 방열기 전단면 2차유동은 주방향 평균속도의 5~25% 정도로 3차원 해석의 필요성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 고등기술연구원 과제명 “엔진룸내 3차원 열유동연구(GF94-024)”의 일부이다.

참 고 문 헌

1. Airflow Thermal Analysis of Underhood Engine Enclosure, Sami D., Habchi & Simon Y. M., SAE940316, 1994
2. Water Flow Simulation of Automotive Underhood Airflow Phenomena, J. E. Williams, J. E. Hackett, et al., SAE910307, 1991.
3. Engine Compartment Airflow Investigations using a Laser-Doppler Velocimeter, A. Cogotti et al., SAE910308, 1991.
4. Optimization of the Heat Flow Distribution in the Engine Compartment Hitoshi Shimonosono et al., SAE930883, 1993.
5. Numerical and Experimental Study of Three Dimensional Flow in Engine Room, Hyung-Seok Lyu et al., SAE960270, 1996.
6. 엔진룸 내부 유동해석 허남건, 조원국, 이경현, G7 차세대 자동차기술 Workshop, 1994.
7. 엔진룸내 2차원 열유동연구 유정열, 자동차 공학회지, 1992
8. Numerical Simulation on the Three Dimensional Flow and Heat Transfer in the Engine Compartment, Nobushiro Katoh et al., SAE910306, 1991.
9. Three-Dimensional Navier-Stokes Analysis of Front End Air Flow for a Simplified Engine, Compartment T. Han et al., SAE921091, 1992.
10. The effect of the flow nonuniformity on the sizing of the engine radiator, J. P. Chiou, SAE800219, 1980.