

〈논 문〉 SAE NO. 953761

엔진 냉각수 유동통로 모델에 대한 수치해석 : Lotus 모델의 실험 결과와의 비교 및 유량제어

A Study on Flow Analysis of Model Engine Coolant Flow Passage : Comparison with Experimental Data of Lotus Model and Flow Rate Control

조 원 국*, 허 남 건**
W. K. Cho, N. Hur

ABSTRACT

A numerical analysis on engine coolant is made by the use of FVM based general purpose 3 dimensional Navier-Stokes solver, TURB-3D. Numerical solutions are verified by comparison with the experimental data of Lotus model. The results show a good qualitative as well as quantitative comparison. Coolant flow rate control is attempted through adjusting the cross section area of passage base on the results of an original coolant passage. It is concluded from the results that the flow rate control is possible as attempted, and thus can be used in the real engine design.

주요기술용어 : CFD(전산유체역학), Cooling Passage(냉각수 유동통로), Gasket Hole(개스킷 구멍), Flow Distribution(유동 분배), Flow Rate Control(유량 제어)

1. 서 론

최근 자동차 엔진의 고출력화에 따라 엔진 실린더의 열부하는 증가되는 추세이며, 이러한 열부하의 증가에 따라 엔진 냉각성능의 중요성이 커지고 있다. 엔진의 냉각성능은 엔진의 피로 및 마모 등에 의한 엔진의 성능과 수명을 결정하는 중요한 인자이며 이의 향상으로 노킹현상이 억제되므로 결과적으로 압축비를 높여 엔진의 효율과 출력을 높일 수 있다.¹⁾

이에 따라 세계 유수의 자동차 회사와 연구소 등에서 엔진 냉각 성능의 향상을 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 이는 대부분 엔진의 균일한 냉각, 냉각유로의 형태 변화에 따른 유동특성 파악 및 냉각 유로내의 유동해석 등의 연구이다. V8형 디젤엔진 냉각을 대상으로 Yuzo등²⁾은 투명용기의 직접관찰과 Oil Film 방법에 의한 실험 및 상용 유동해석 프로그램인 FIDAP을 이용하여 실린더 내의 유동해석을 통하여 주유동에 관하여 서로 일치하는 결과를 구하여 엔진 냉각유로내의 유동해석시 수치해법의 적용 가능성을 확인하였다. 이들은 냉각 유로설계시 냉각수의 유

* 한국과학 기술연구원, 터보기계 연구팀

** 정희원, 한국과학 기술연구원, 터보기계 연구팀

동이 용이하며, 유동에 불필요한 면적을 최소화할 수 있는 형태를 갖도록 설계하여야 유동의 정체에 따른 냉각수 비등을 억제할 수 있음을 보였다. 허남건 등³⁾은 4기통 일렬 엔진의 냉각유로 모델에 대하여 수치해석을 수행하여 냉각수의 출구방향에 따라 각 개스킷 구멍으로 통과하는 유량의 변화를 예측함으로써 엔진설계시 수치해석에 의한 유동해석의 결과를 설계자료로 응용할 수 있음을 보였다.

최근 Malcolm 등⁴⁾은 1.6L 4기통 일렬 가솔린 엔진(Lotus Model)에 대하여 WLI(White Light Imaging), PIV(particle Image Velocimetry) 및 LDA(Laser Doppler Anemometry)에 의한 유동가시화와 유한체적법 상용 유동해석 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 주요 단면에서의 실험과 수치해석에 의한 속도 및 난류강도의 비교를 통하여 결과가 잘 일치함을 보였고 내연기관의 엔진 냉각유로 내의 유동해석에 비교적 적은 격자수의 수치해석 모델에 대한 수치해석 결과로도 정량적 유동특성 파악에 유용함을 보였다.

수치해석을 통한 엔진 냉각성능의 예측이 비용과 시간 등의 측면에서 실용성이 매우 높을뿐 아니라 실험에 의해 관찰하기 어려운 부분에서도 상세한 유동정보를 제공하므로 수치해석의 응용가능성은 매우 높다. 그러나 이러한 잇점에도 불구하고 수치해석에 의한 엔진냉각 성능에 관한 연구는 실험 등 다른 방법에 의한 연구에 비하여 국내에서는 상대적으로 적게 진행되어왔다. 따라서 본 연구에서는 실제 엔진의 특징적 형상을 갖춘 모형 엔진냉각 유로인 Lotus의 모델⁴⁾에 대하여 수치해석을 수행하고 실험결과와의 비교 검토를 통하여 TURBO-3D를 통한 수치해석의 신뢰성을 보이고, 이에 대한 결과로부터 엔진 냉각유로내의 유동이 균일해지도록 유동통로를 변형하여 실제 설계 변경에의 응용 가능성을 보이고자 한다.

2. 계산 방법

수치계산을 위하여 본 연구실에서 개발한

TURBO-3D를 사용하였으며 본 프로그램은 경계밀착 좌표(Body fitted coordinate system)를 채택하여 비엇물림 격자(Non-staggered mesh, Collocated mesh)를 사용하는 유한체적법(FVM, Finite Volume Method) 프로그램이다. 또한, 난류의 계산을 위하여서는 표준 k-ε 모델을 사용하고 벽면에서는 벽함수를 사용하고 있다. TURBO-3D의 상세한 내용은 참고문헌⁵⁾를 참조하기 바람에 그 간단한 특징만 여기에 기술한다.

사용한 지배방정식은 비압축성 유체에 대한 정상상태의 Navier-Stokes 방정식으로 이를 직교좌표계 y와 일반좌표계 x와의 좌표변환 $y' = y'(x')$ 의 Jacobian J를 구성하는 행렬 $\partial y'/\partial x'$ 의 cofactor β_{ij} 를 사용하여 일반 경계밀착 좌표계에서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} (\rho u_m \beta^{mj}) = s_m \quad (1)$$

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [(\rho u_m u_i - T_{mi}) \beta^{mj}] = s_i^u \quad (2)$$

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [(\rho u_m \phi - q_m) \beta^{mj}] = s_\phi \quad (3)$$

여기서 u_i 는 속도, ρ 는 밀도를 나타내며, 사용된 다른 변수는 다음과 같다.

$$T_{mi} = -p\delta_{mi} + \frac{1}{J} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x^n} \beta_m^n + \frac{\partial u_m}{\partial x^1} \beta_i^1 \right)$$

$$q_m = \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x^n} \frac{1}{J} \beta_m^n$$

$$s_k = G - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$s_\epsilon = C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

윗식에서 μ 는 난류의 효과를 포함하는 유효점성계수, Γ_ϕ 는 스칼라양의 확산계수를 나타낸다.

s_k 와 s_ϵ 는 각각 난류운동에너지와 난류소산률의 생성항을 나타내고 난류강도의 생성률은 $G = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial y^j}$ 이다.

대류항의 계산에 사용되는 검사면에서 값의 선택은 수치해의 안정성과 정확도에 큰 영향을 미치며, 여러가지 Scheme이 개발되었지만 본 연구에서는 현재 가장 널리 쓰이고 있으며 안정성이 뛰어난 상류 차분법(Upwind Differencing Scheme)을 사용하였다. 압력장을 풀기 위해서는 연속방정식으로부터 압력을 계산할 수 있는 방정식을 유도하여 속도와 압력을 서로 연관시켜 계산하는 Algorithm이 필요하며, 본 연구에서는 그 형태가 간단하고 가장 많이 사용되는 SIMPLE Algorithm을 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 비엇물림 격자계(Non-staggered mesh, Collocated mesh)를 사용하였으므로 속도장과 압력장의 Decoupling을 없애기 위해 Rhie & Chow의 운동량 보간법을 사용하였다. 선형 대수 방정식의 Solver로는 속도 및 스칼라량의 계산에는 SIP(Strongly Implicit Procedure)을, 압력에는 CGM(Conjugate Gradient Method)을 사용하였다.

단열상태의 유동장해석으로 얻은 결과로부터 유동에 의한 열전달 특성을 예측하기 위하여 Reynolds analogy에 의해 난류 운동에너지 강도로 열전달율을 계산하였으며 다음과 같이 Jayatillaka⁶⁾가 준식을 사용하였다.

$$h = C_p C / ((U^+ + FPR) Pr_t) \quad (5)$$

위의 식에서 사용된 변수는 다음과 같다.

$$C = \rho C_u^{0.25} \sqrt{k}$$

$$FPR = 9.24 [(Pr/Pr_t)^{0.75} - 1]$$

$$[1 + 0.28 e^{-0.007 Pr/Pr_t}] \quad (6)$$

$$U^+ = \ln(EY^+) / \kappa$$

$$Y^+ = Y_N C / \mu$$

여기서, C_p , Pr_t , Y_N , μ , ρ 는 각각 정압비열, 난류 Prandtl 수, 벽면과의 수직거리, 점성계수,

밀도이고 사용된 경험상수는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에서 사용하는 값인 $C_\mu=0.09$, $\kappa=0.42$, $E=9.0$ 이다.

3. 결과 및 고찰

수치해석에 사용된 유동 모델을 Fig.1에 나타내었으며, 냉각유로의 격자계는 $60 \times 26 \times 26$ (40,560)개의 미소체적으로 이루어져 있다 (Coarse Grid). 이중 17712개만이 유체의 모델링에 사용되어 Malcolm 등⁴⁾의 유동모델 (50,000 cell)에 비하면 약 1/3의 적은 격자를 사용하였다. 본 연구에서는 격자수의 변화에 따른 해의 변화 정도를 알기 위하여 각 방향으로 2배씩의 격자(약 14만개의 미소체적, Refined Grid)를 사용하여 계산하였다. 실린더와 헤드를 연결하는 유동통로(이후로는 Leg라 표기함)와 실린더의 위치를 Fig.2에 나타내었다. 편의상 유입부 방향을 Front로 유입부의 반대방향을 Rear로 정하

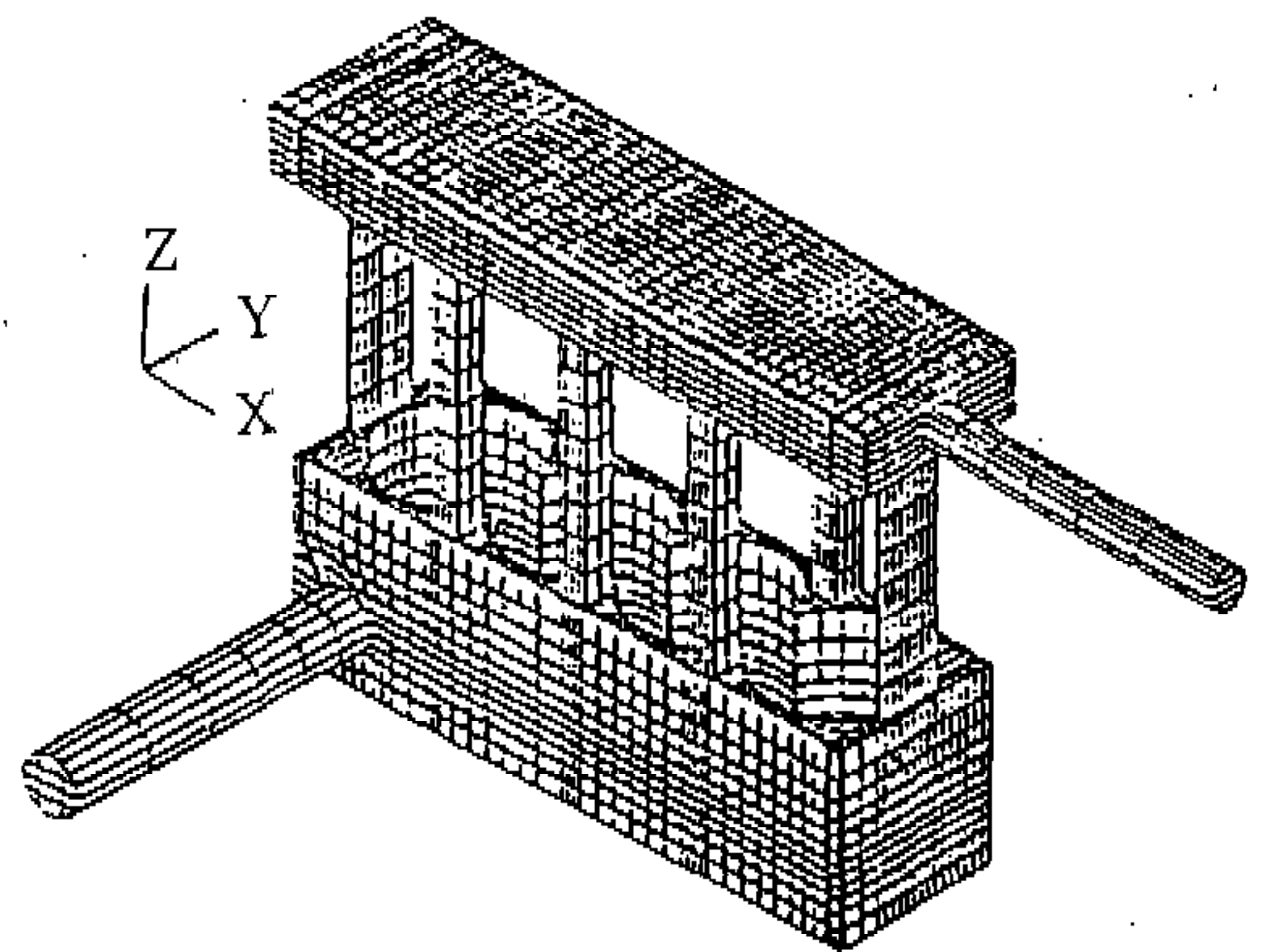


Fig.1 Computational Grid for Engine Coolant Simulation

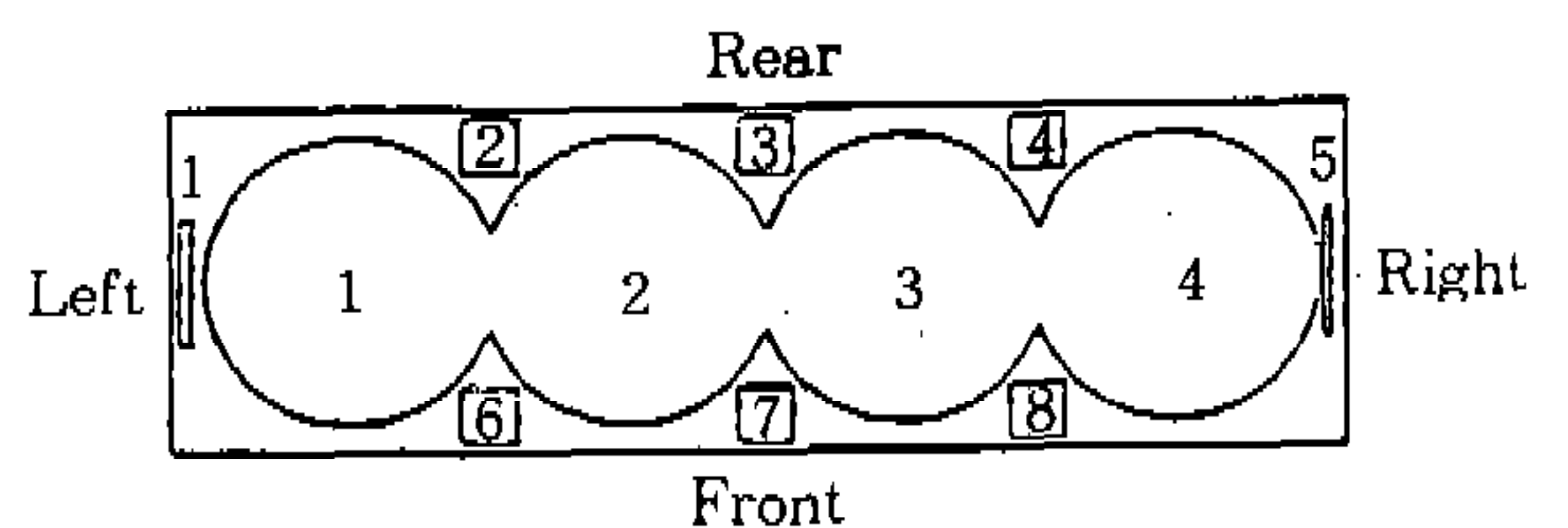


Fig.2 Locations of Legs and Cylinders

였고 유입부 방향에서 보았을때 좌우를 각각 Left, Right로 정하였다. 결과 비교를 위한 냉각 통로의 각 단면을 Fig.3에 표시하였으며 각 단면의 위치는 실험에서 사용한 벽면으로 부터 4mm 내부이다.

입구에서의 유입 유량은 실험에서와 같이 $2.46 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ 이며 이때의 유속은 $u_{in} = 2.347 \text{m/s}$ 으로 주었다. 작동 유체는 상온의 물로 점성계수 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{NS/m}^2$, 밀도 $\rho = 998.2 \text{kg/m}^3$ 이며, 입구에서의 난류강도는 유속의 1%를 사용하였고 이때의 난류소산률은 식 $\epsilon_{in} = C\mu^{0.75}k^{1.5}/\ell$ 를 사용하였고 혼합거리 ℓ 은 입구관 직경의 10%를 사용하였다. coarse Grid의 경우 수렴된 해를 얻기위하여 약 200번의 반복계산이 필요하였고 INDIGO2 Workstation(24 MFLOPS)을 사용하여 34분의 CPU시간이 소요되었고 Refined Grid의 경우 약 500번의 반복계산에 206분의 CRAY-C90 CPU 시간이 사용되었다.

냉각 통로 각 단면에서의 속도벡터를 Fig.4에 나타내었다. 각 단면에서의 결과는 실험결과와 유사한 유동 특성을 보이며 따라서 수치해석 결과의 정성적 특성을 신뢰할 수 있음을 알 수 있다. 또한, x방향과 z방향의 속도 및 난류에너지를 각각 u, w와 k로 표시하였으며 plane 1의 중간 높이에서의 이들 분포를 Axial방향(x방향,

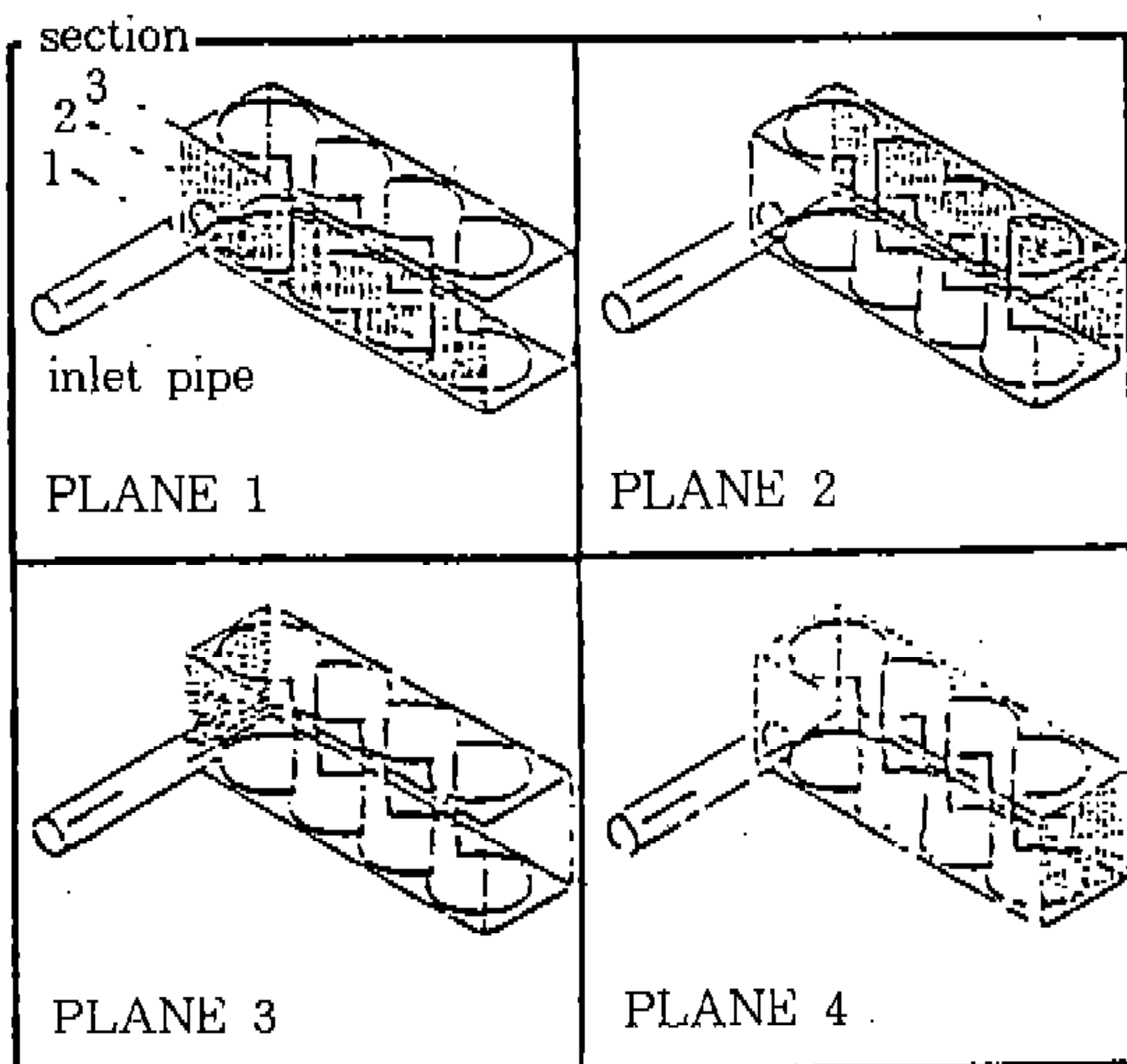


Fig.3 Locations of Results Planes

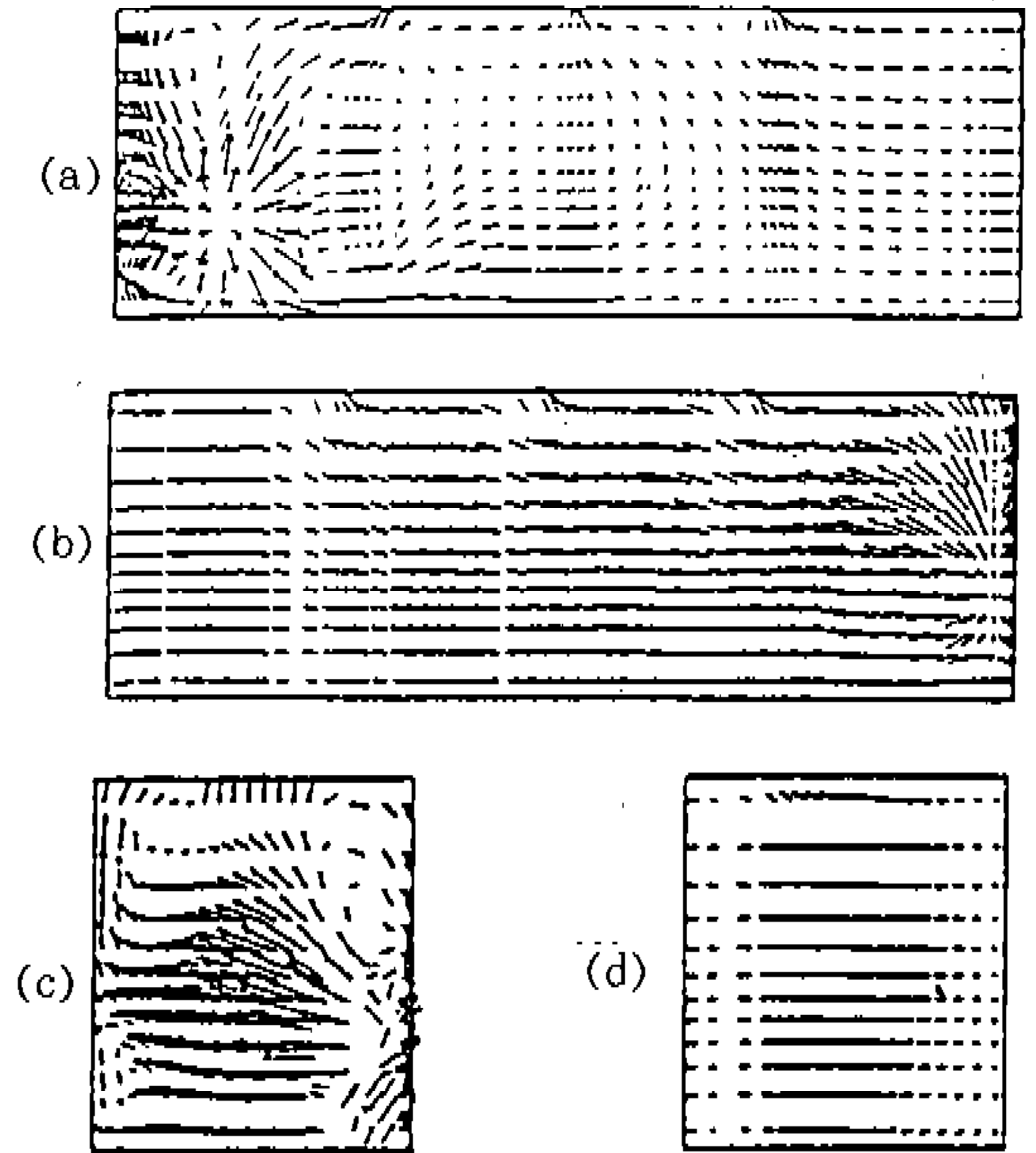


Fig.4-1 Velocity Vectors(Present Computation)

- (a) Plane 1 (b) Plane 1
- (c) Plane 3 (d) Plane 4

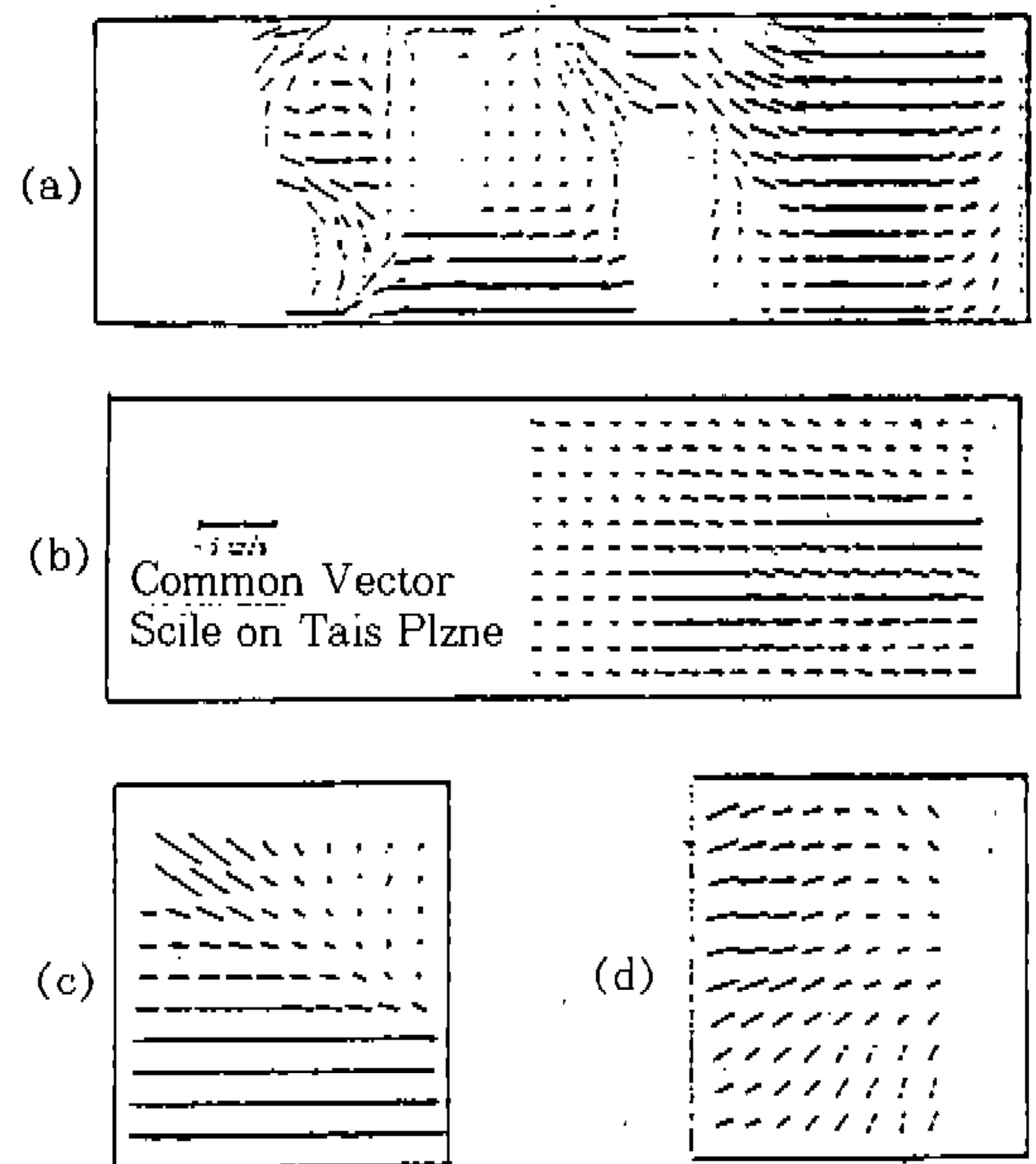


Fig.4-2 Velocity Vectors(Experiment⁴⁾)

- (a) Plane 1 (b) Plane 1
- (c) Plane 3 (d) Plane 4

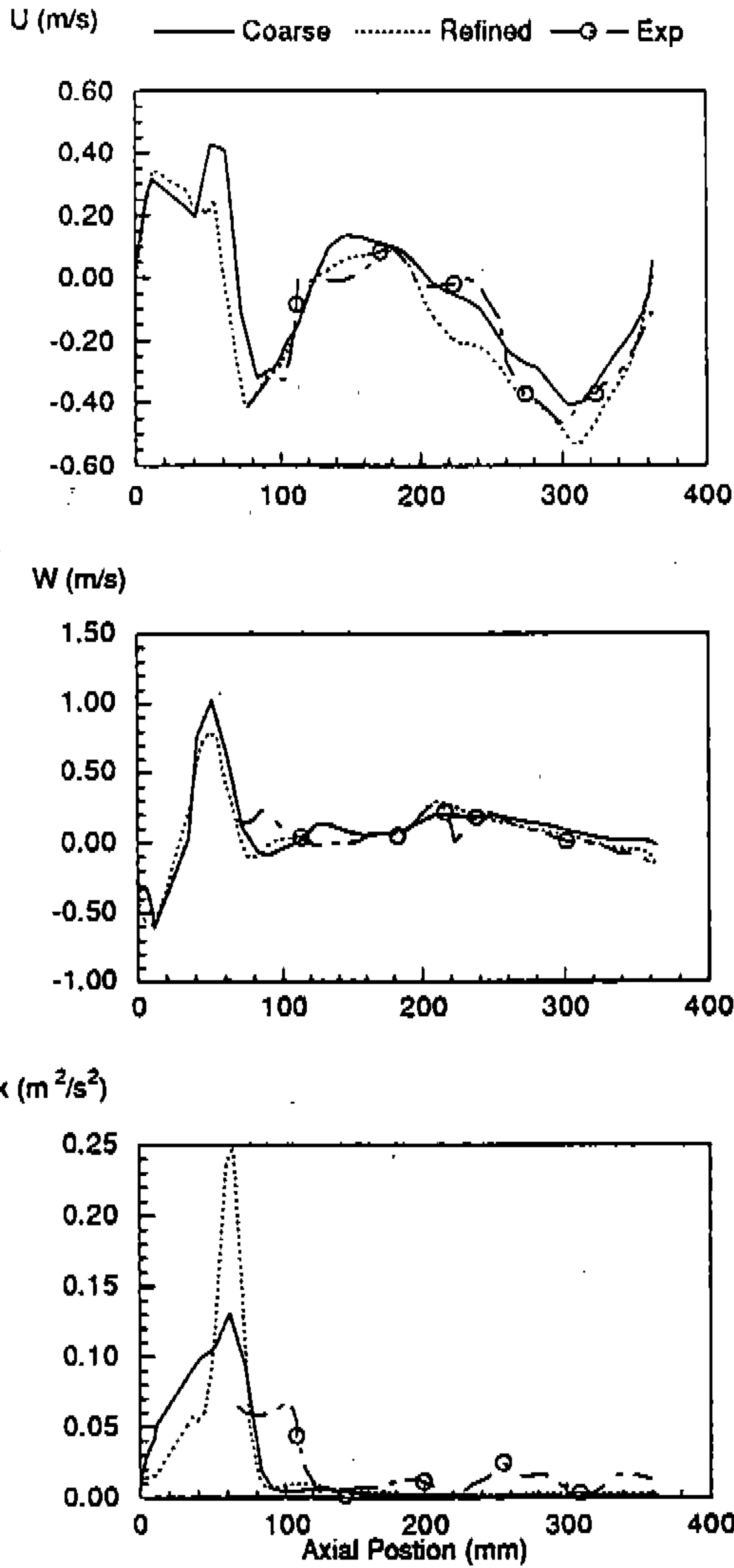


Fig.5 Flow Comparison at Plane 1, Section 2

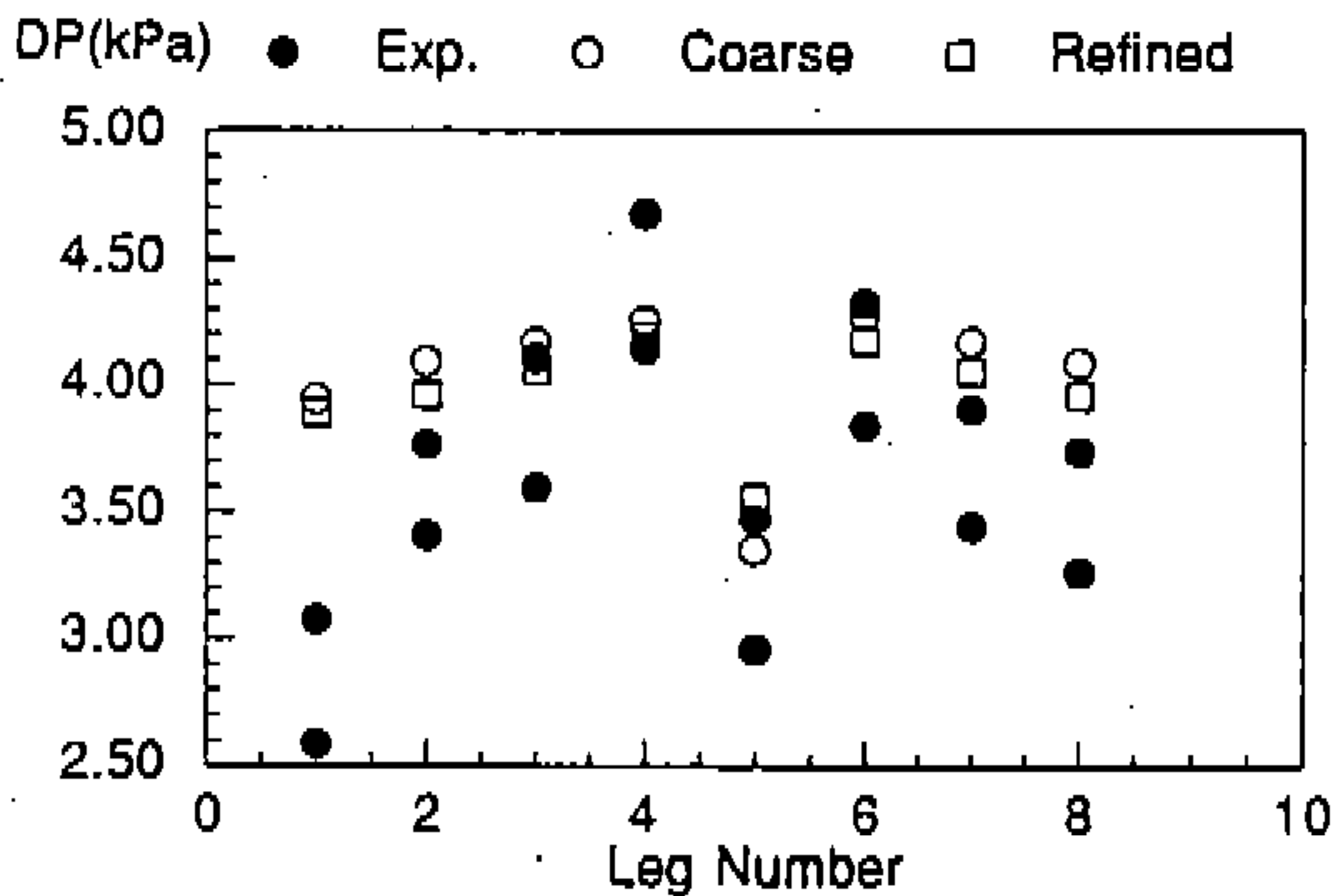


Fig.6 Pressure Loss across Block

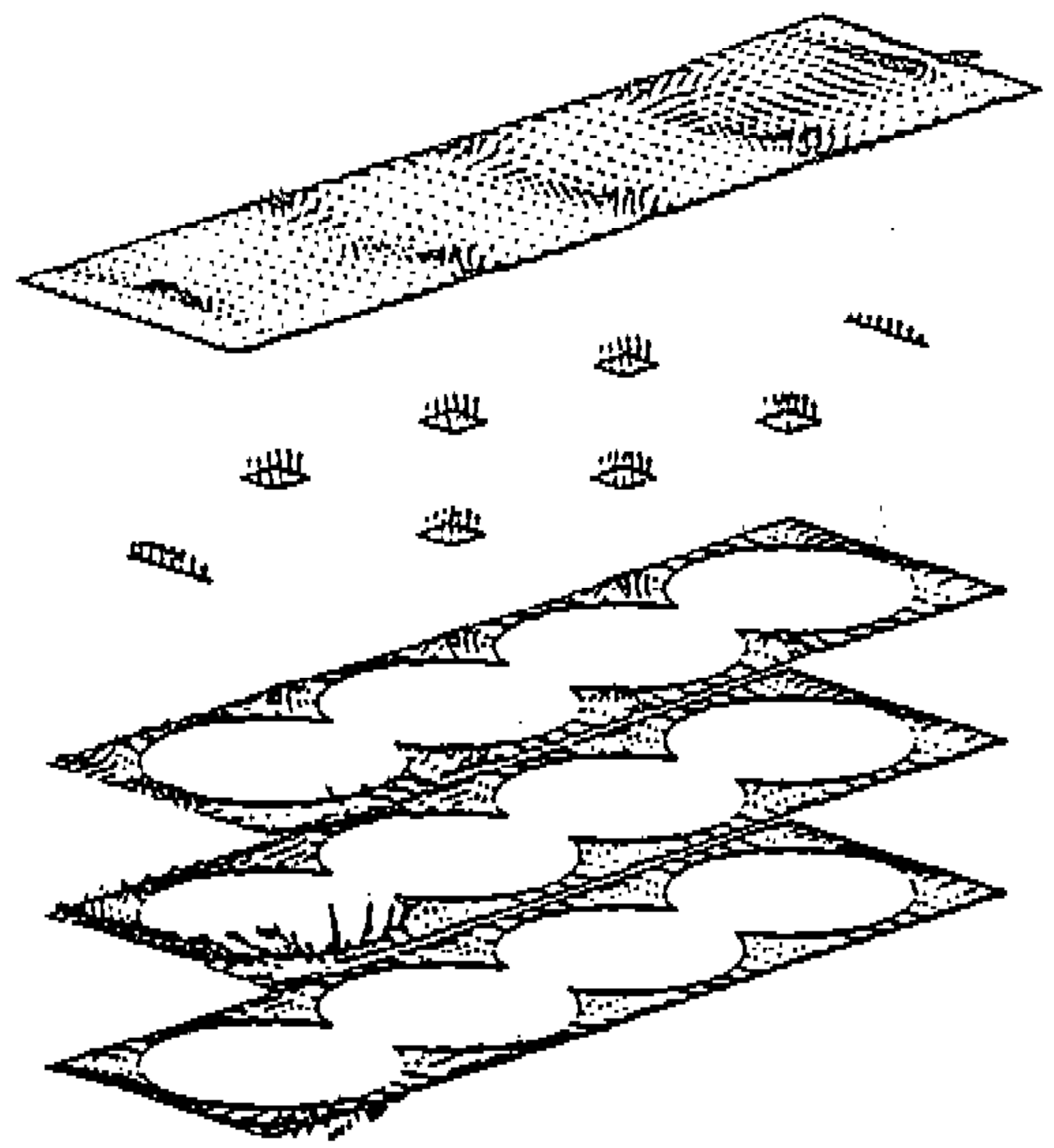


Fig.7 Velocity Vectors at z=constant Plane

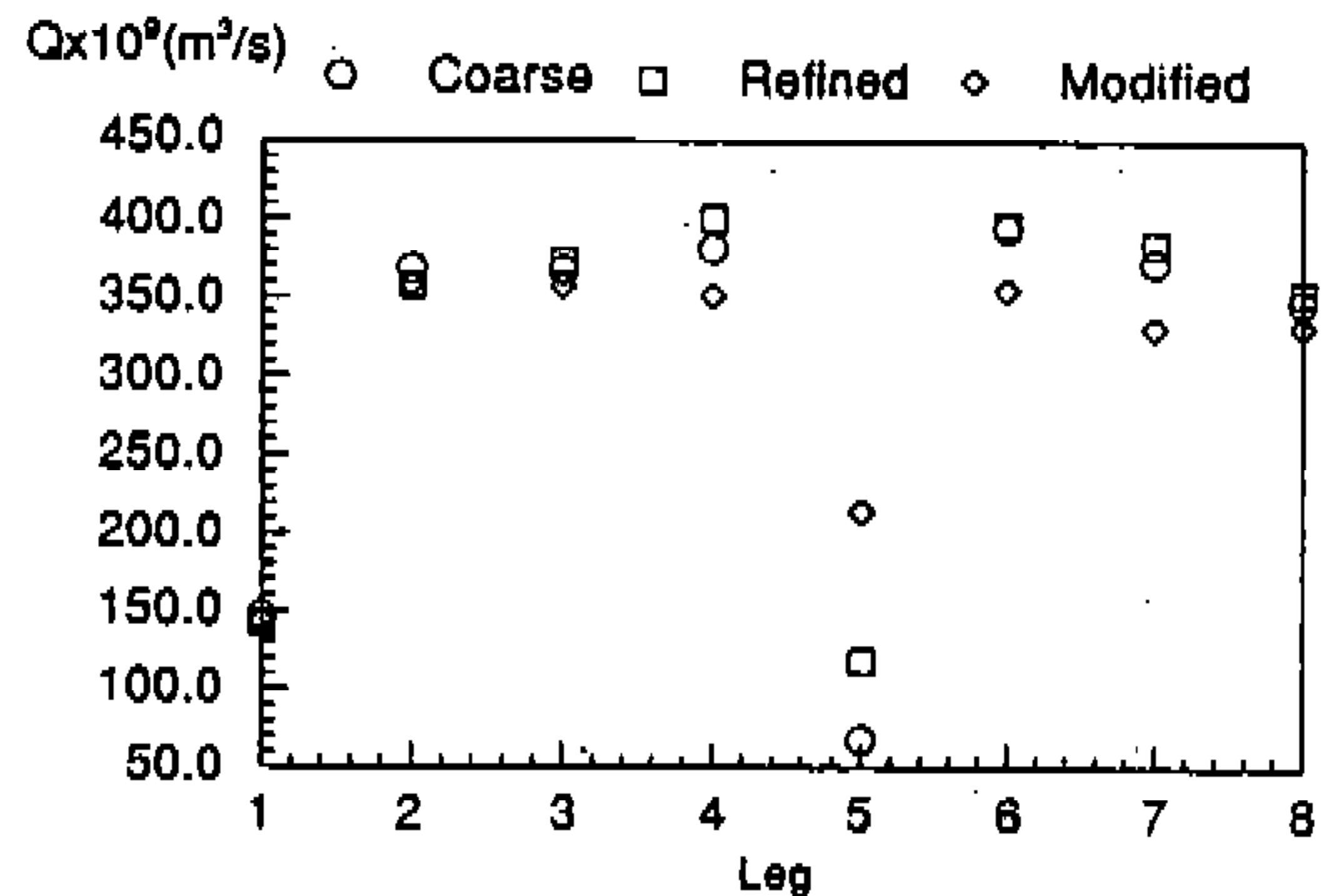


Fig.8 Flow Rate Distributions through Legs

원점은 엔진 냉각수로의 x방향 시작점임)에 따라 나타낸 Fig.5의 결과로부터 수치해석 결과가 정량적으로도 실험결과와 일치함을 알 수 있다. 난류에너지는 유입부 부근에서 약간의 차이를 보이나 속도 u, w는 매우 정확한 결과를 보인다. 유입부에서 난류에너지가 실험치와 비교하여 차이를 보이는 것은 본 계산에서 사용한 모델이 실험모델과 정확하게 동일한 것이 아님에 의한 것과 입구 유동조건에 의한 차이 및 난류모델의 부정확성 등에 의한 것으로 사료된다. Fig.6은 유입부에서부터 각 Leg까지의 압력손실로 실험에 의한 압력 손실은 점선 사이의 값을 가진다. 수치

해석 결과 본 해석에 의한 결과가 대부분의 영역에서 실험 결과와 유사한 값을 가지나 Leg 1, 2, 8에서는 다소의 차이를 보임을 알 수 있다. 이의 원인은 실험모델과 정확하게 일치하지 않는 유동 모델을 사용함에 따른 것으로 유입부에서 약간의 모델 차이가 압력손실에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 따라서 실험모델과 동일한 유동 모델을 사용한다면 이러한 오차는 줄어들 것으로 예상되나 본 연구의 목적이 수치해석결과를 이용하여 유동 통로내의 유동을 제어하고자하는 것이므로 실험결과와의 비교는 수치해의 신뢰성을 확보하는 수준으로 충분하다 하겠다.

z가 일정한 단면에서의 속도벡터를 Fig.7에 나타내었다. 실린더 4의 Front에서 유동이 정체되는 것을 알 수 있으며 전 영역의 고온 냉각을 위해서는 이러한 부분의 유량 통과를 증가시켜야 한다. Fig.8은 각 Leg를 통과하는 유량을 보여주고 있으며 계산 격자수의 변화에 따른 유량 예측의 변화는 미미하므로 적은 수의 격자로도 유

량의 분포를 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다. 실제 엔진 냉각의 경우 실린더 부위의 냉각보다 헤드부위의 냉각이 더욱 중요하므로 각 Leg를 통과하는 유량을 균일하게 할 필요는 없으나 본 연구에서는 수치해석 결과를 이용한 유량 제어 목적으로 하므로 Leg 1과 Leg 5의 유량을 균일하게 하고 나머지 Leg 2, 3, 4, 6, 7, 8을 통과하는 유량을 균일하게 조절하기 위하여 각각 Leg 1과 Leg 2의 유량을 기준으로 Leg 5와 Leg 3, 4, 6, 7, 8의 단면적을 확대 또는 축소하여 유동 모델을 변경하여 유동해석을 실행하였다. 이에 따른 유량의 변화를 Fig.8에서 알 수 있으며 각 Leg를 통과하는 유량은 그 Leg의 단면적 뿐만 아니라 다른 Leg의 단면적과의 상호관계에 의하여 결정되므로 본 연구에서와 같이 단순히 단면적으로 변경한 경우 Leg5를 통과하는 유량은 오히려 Leg1보다 커졌음을 알 수 있다. 그러나 이러한 모델 변경에 의해서 원하는 대로 Leg에서의 유량이 균일화된 것을 확인할 수 있었다. 따라서

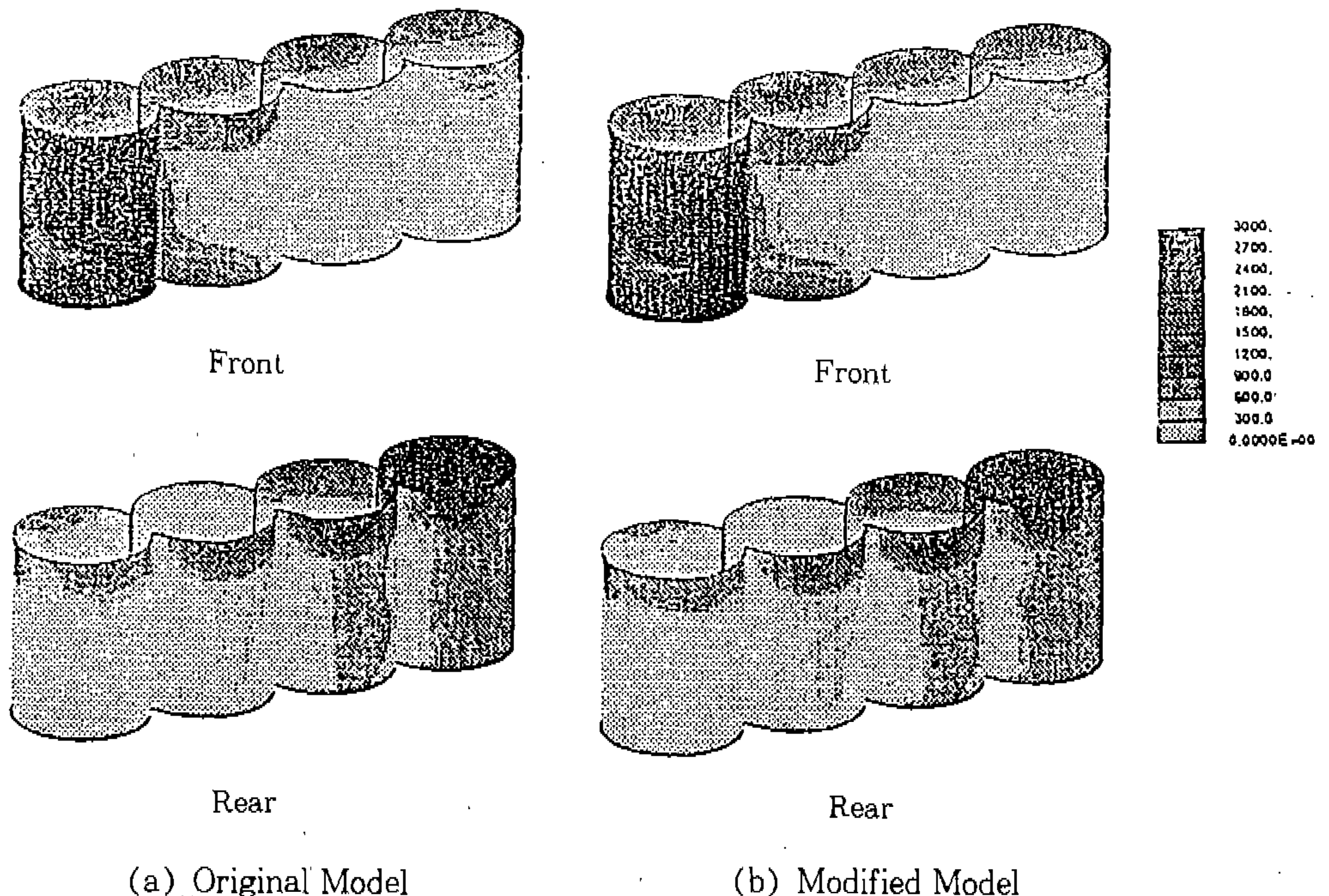


Fig.9 Heat Transfer Coefficients at the Cylinder Surface

본 연구의 목적인 수치해석 결과를 이용하여 엔진 냉각 유로내의 유동을 성공적으로 조절하는 것이 가능함을 보였다.

실제 엔진의 설계에서 꼭 필요한 중요한 정보 중의 하나는 냉각 통로 표면에서의 열전달 계수이며 이는 엔진의 열해석 및 구조해석에 유용하게 사용된다. 그러므로, 본 연구에서는 난류 유동 해석 결과로부터 벽면과의 열전달률을 예측하여 실린더 주위의 열전달률을 Fig.9에 나타내었다. 대부분의 영역에서는 모델 변경전과 비슷한 열전달률 분포를 보이나 실린더 4의 오른쪽 상단부의 열전달률이 다소 상승하였음을 알 수 있으며, 이는 Leg5를 통과하는 유량의 증가에 따른 것으로 엔진 각 부분의 열전달을 고르게 하는 것 또는 원하는 특정 부분의 열전달을 향상시키는 것이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

모형 엔진의 냉각유로에 대하여 본 연구실에서 개발한 3차원 난류 유동해석 프로그램 TURBO-3D를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구의 수치해석 결과는 기존의 실험결과와의 비교를 통하여 정성적으로 정확한 유동 특성을 가질 뿐 아니라 입구에서 부터 각 Leg까지의 압력손실과 각 방향의 속도 및 난류운동 에너지의 일치를 보여 정량적으로도 정확함을 확인하였다. 또한 수치해석에 의한 결과로부터 유동모델을 변경하여 냉각수의 유동을 성공적으로 제어할 수 있음을 보였고 이에 따라 엔진의 냉각유로 설계시 수치해석에 의하여 냉각 특성을 정확히 예측하여 수정할 수 있으며 필요한 특정부위의 중점적 냉각을 실행할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 1994년도 한국과학기술연구원의 기본 연구 개발사업의 일환으로 과제번호 N1125A에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. 민병순, 최재권, "엔진내 냉각수 유동형태가 연소실 온도에 미치는 영향에 관한 연구", 한국자동차공학회 92년도 추계학술대회논문집, pp. 131~136, 1992.
2. Y. Aoyagi, Y. Takenaka, S. Niino, A. Watanabe, and I. Joko, "Numerical Simulation and Experimental Observation of Coolant Flow Around Cylinder Liner in V-8 Engine", SAE Paper No. 880109, 1988.
3. 허남건, 윤성영, 조원국, 김광호, "엔진 냉각 유로 내의 유동에 관한 수치해석", 한국자동차공학회논문집, Vol. 1, No.1, pp. 32~40, 1993.
4. M. H. Sandford and I. Postlethwaite, "Engine Coolant Flow Simulation A Correlation Study", SAE Paper No. 930068, 1993.
5. 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, "3차원 범용 유동해석 프로그램의 개발", 대한기계학회 '92 추계학술대회 논문집(II), pp. 181~186, 1992.
6. C. L. V. Jayatillaka, "The Influence of Prandtl Number and Surface Roughness on the Resistance of the Laminar Sublayer to Momentum and Heat transfer," Prog. Heat & Mass Transfer, Vol. 1, p. 197, 1969.