

〈논문〉 SAE NO. 943702

저 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모형에 의한
 축대칭 모형포트 유동의 수치해석적 연구
 A Numerical Study on the Flow of a Model Intake
 Port Using Low Reynolds Number

홍 용 주*, 김 철 수**, 최 영 돈***
 Y. J. Hong, C. S. Kim, Y. D. Choi

ABSTRACT

In this study, flow of a model intake port/valve system is analyzed by using low Reynolds number $k-\epsilon$ model. Discharge coefficient was obtained from computational results for the various cases of valve lifts. Discharge coefficient becomes maximum when the valve lift is 20mm, and does not increase or decrease in proportional to valve lift. Most of pressure drop and production of turbulent kinetic energy occur at the edge points of the valve and the valve seat. Thus, in order to improve discharge coefficient, rounding of edge points in valve and valve seat is recommended. As valve lift is increased, the velocity of the intake jet in the valve passage decreases, and the direction of the jet is more inclined toward the valve seat.

주요기술용어 : Low Reynolds Number $k-\epsilon$ Turbulence Model(저레이놀즈 $k-\epsilon$ 난류모형), Intake Port/Valve Model(축대칭모형포트), Body-Fitted Non-orthogonal Grids(경계고정비좌표격자계), Finite Volume Method(유한체적법)

기 호 설 명			
$A^{(i)}$: 면적벡터	D_v	: 밸브의 지름
a	: 이산화방정식의 계수	d	: 속도수정식에서의 압력이산화항계수
C_d	: 유량계수	f_1	: 난류모형상수의 수정계수
C_p	: 압력계수	f_2	: 난류모형상수의 수정계수
C_{e1}, C_{e2}	: 난류모형상수	f_μ	: 난류모형상수의 수정계수
C_ν	: 난류모형상수	G	: 난류운동에너지 생성항
D	: 확산의 세기	$g^{\bar{ij}}$: Contravariant 좌표 변환 텐서
		$g_{\bar{ij}}$: Covariant 좌표 변환 텐서
		\sqrt{g}	: Jacobian

* 한국기계연구원
 ** 정회원, 대우자동차 기술연구소
 *** 정회원, 고려대학교 기계공학과

- I : 총유동률(total flux)
- I^i : 유효 총유동률(effetive total flux)
- \hat{I}^i : 유효 총유량
- i, j, k : 단위벡터
- J : 경계 고정 좌표계의 유속항
- k : 난류운동에너지
- L_v : 밸브의 리프트(lift)
- L^+ : 무차원 밸브리프트
- L_D : 길이척도(length scale)
- P : 압력
- P' : 압력 수정항
- R_T : 난류 레이놀즈수
- r : 반경
- S : 원천항
- S_c : 선형화된 원천항의 상수부
- S_p : 선형화된 원천항의 변수부
- U, V : 축방향및 반경방향 속도
- U' : 국부평형속도
- \hat{U}_i : 직각유동률(normal flux)
- u_i, u_j : 속도의 요동성분 텐서
- U, V : 속도 벡터
- x, y, z : Cartesian 좌표계
- y^+ : 무차원 거리

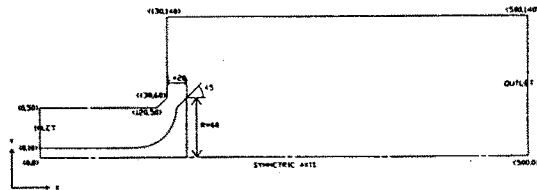
<그리스 문자>

- ξ, η, ζ : 곡률좌표계
- ϵ : 난류운동에너지 소산율
- γ : 비열비
- Γ : 확산계수
- ϕ : 종속변수
- ρ : 밀도
- μ : 점도
- ν : 와점도
- $\sigma_k, \sigma_\epsilon$: 난류모형상수
- ϵ_w : 벽에서의 난류에너지소산율

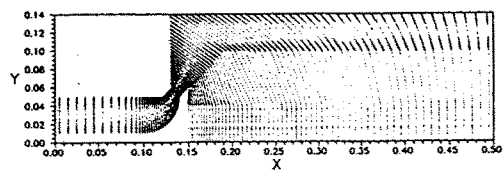
1. 서 론

내연기관의 성능에 가장 중요한 영향을 미치는 요인은 기관의 연소특성이며, 기관의 연소특성을

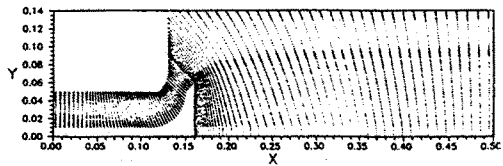
향상시키기 위해서는 연소특성에 영향을 미치는 인자의 특성을 이해하는 것이 필수적이다. 연소실내의 유동특성은 유동이 복잡한 난류유동이며 비정상 상태, 3차원 유동이기 때문에 흡기관과 연소실을 포함하는 기관 전체를 해석의 대상으로 하는 것은 엄청난 전산 용량과 전산시간을 요구하게 된다. 따라서 많은 연구에서 모형 기관이나 실제 기관의 일부를 해석의 대상으로 하는것이 일반적이다. Gosman과 Ahmed¹⁾는 모형 흡기 포트내의 유동을 표준 k-ε 모형을 이용하여 해석하여 Bicen등²⁾의 실험결과와 비교하였다. 본 연구에서는 비교적 계산시간이 적게 드는 Fig.1(a)의 형상을 지닌 축대칭 모형포트를 해석의 대상으로 하였다. 이 형상은 피스톤 운동을 고려하지 않는 정상상태로 해석을 하여 전산시간이 비교적 적게 들면서 포트의 형상이 실린더 유동에 어떤 영향을 주는 가를 연구하였다. 본 연구에서 사



(a) model geometry



(b) valve lift=10mm



(c) valve lift=30mm

Fig.1 Geometry of axisymmetric port/valve assembly and grid node point.

용한 난류 모형은 고레이놀즈수 영역은 표준 k-ε 모형을 저레이놀즈수 구역인 벽 근방은 확장한 저레이놀즈수 k-ε 모형을 사용하였다.

등의 해석도 비교적 정확한 장점이 있다. 저레이놀즈수 k-ε 모형의 경우 레이놀즈응력은 표준 k-ε 모형과 같이 식(2-3)으로 모형화되며

2. 지배 방정식

$$\overline{u_i u_j} = -\mu \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (2-3)$$

2.1 지배 방정식

이를 식 (2-1)에 대입하면

본 연구에서 해석하고자 하는 모형흡기포트는 축대칭 조건을 만족하므로 2차원 해석이 가능하다. 따라서 좌표계는 대칭축방향을 x축, 반경방향을 y(또는 r)축으로 하는 직교좌표계를 선택하였다. 유체의 유동을 지배하는 방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식이며 정상 상태, 비압축성 유동에 대하여 시간 평균화된 지배방정식들을 텐서 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2-4)$$

연속 방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

가 된다. 와점성 계수 μ_t 는 난류운동에너지 k와 난류에너지소산율 ϵ 으로 부터 다음과 같이 정해진다.

운동량 방정식

$$\mu_t = \rho f_\mu C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \end{aligned} \quad (2-2)$$

난류운동에너지(k)와 난류운동에너지소산율(ϵ) 방정식을 텐서 형태로 나타내면 다음과 같다.

위의 식들을 풀기 위해서는 운동량 방정식의 레이놀즈 응력항 ($-\rho \overline{u_i u_j}$)을 모형화해야 한다.

$$\begin{aligned} U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ &\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon \end{aligned} \quad (2-6)$$

2.2 난류 모형

본 연구에서는 고레이놀즈수에 대한 표준 k-ε 모형을 벽 근방의 저레이놀즈수 영역까지 적용이 가능하도록 확장한 김³⁾의 저레이놀즈수 k-ε 모형을 사용하였다. 이 모형은 재순환 유동이 강한 유동장이나 유동 박리와 재부착이 있는 유동장

$$\begin{aligned} U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + f_1 C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \\ &\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - f_2 C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (2-7)$$

여기서 사용된 저레이놀즈수 k-ε 모형의 계수는 다음과 같다.

$$R_T = \frac{k^2}{\nu \epsilon} \quad (2-8)$$

$$y^+ = \text{MAX} \left\{ 2.31 R_T^{1/3} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{47.9}{R_T}} \right)^{1/3}, \right. \\ \left. 0.1125 \left[1 + \sqrt{1 + \frac{47.4}{R_T}} \right] R_T \left[1 - \exp\left(-\frac{R_T}{115}\right) \right] \right\} \quad (2-9)$$

$$f_{1u} = \frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{47.4}{R_T}} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{y^+}{50.52}\right) \right] \quad (2-10)$$

$$f_1 = 1 \quad (2-11)$$

$$f_2 = \left\{ 1 - 0.3 \exp(-R_T^2) \left[1 - \exp\left(-\frac{y^+}{5.32}\right) \right]^2 \right\} \quad (2-12)$$

여기서 R_T 는 난류레이놀즈수를 나타내며 $C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 는 난류모형상수로 0.09, 1.0, 1.22, 1.44, 1.92이다.

3. 좌표계 및 지배방정식의 변환

3.1 격자 생성

임의의 기하학적 형상을 가진 유동 문제를 해석하기 위해서는 형상의 경계면에 부합하는 격자를 생성하여야 한다. 본 연구에서는 경계조건의 적용을 용이하게 하기 위하여 Fig.1(a)의 전체 유동장을 2개의 구역으로 나누어 타원형법⁴⁾에 의한 격자생성을 하고 2구역의 격자생성 결과를 선형적으로 접합하였다. 또한 벽근방에서는 미세 격자를 사용하였다. 해석형상과 격자생성결과를

Fig.1에 나타내었다.

3.2 경계 고정 좌표계

복잡한 형상에서의 유동을 수치해석하기 위해서는 보통 경계고정좌표계를 사용한다. 따라서 좌표계의 변환에 따라 변수와 지배 방정식을 변환하여야 한다. 본 연구에서는 지배 방정식의 형태가 간단하고 곡률이 심한 기하학적 형상의 문제에 적용이 쉬운 Covariant 속도 성분을 종속 변수로 사용하였다. 일반적인 스칼라량 ϕ 에 대한 미분 형태의 보존법칙을 텐서 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x^i} (\rho U^i \phi) = \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x^i} \right) + S \\ \rightarrow \frac{\partial}{\partial x^i} (I) = S \quad (3-1)$$

식(3-1)을 경계고정좌표계로 변환하면

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (\sqrt{g} I^i) = S \\ \rightarrow \frac{\partial}{\partial \xi^i} (\sqrt{g} I^i) = \sqrt{g} S \quad (3-2)$$

이고 I^i 는 다음과 같다.

$$I^i = \rho U^i \phi - \Gamma g^{ij} \frac{\partial \phi}{\partial \xi^j} \quad (3-3)$$

식(3-3)을 풀어 쓰고 본 연구에서 다루는 기하학적 형상은 축대칭이므로 메트릭 텐서(Metric tensor) $g^{13} = g^{23} = g^{31} = g^{32} = g^{33} = 0$ 이 되고 이를 식(3-3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho U^i \phi - \Gamma \sqrt{g} g^{11} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\rho U^{\eta} \phi - \Gamma \sqrt{g} g^{22} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)$$

$$= \sqrt{g} S + \frac{\partial}{\partial \xi} (\Gamma \sqrt{g} g^{12} \frac{\partial \phi}{\partial \eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Gamma \sqrt{g} g^{21} \frac{\partial \phi}{\partial \xi}) \quad (3-4)$$

Table 1은 경계고정좌표계로 변환된 식(3-1)의 원천항을 정리한 것이다.

	SOURCE TERM
CONTINUITY EQUATION	0
MOMENTUM EQUATION (U)	$-\partial(\sqrt{g} \xi_x P)/\partial \xi + \partial(\sqrt{g} \eta_x P)/\partial \eta$ $+ \partial[\sqrt{g} \mu_{eff}(\xi U_x + \xi V_x)]/\partial \xi$ $+ \partial[\sqrt{g} \mu_{eff}(\eta_x U_x + \eta V_x)]/\partial \eta$
MOMENTUM EQUATION (V)	$-\partial(\sqrt{g} \xi_y P)/\partial \xi + \partial(\sqrt{g} \eta_y P)/\partial \eta$ $+ \partial[\sqrt{g} \mu_{eff}(\xi U_y + \xi V_y)]/\partial \xi$ $+ \partial[\sqrt{g} \mu_{eff}(\eta_x U_y + \eta V_y)]/\partial \eta$
k	$\sqrt{g} (G - \rho \epsilon)$
ϵ	$\sqrt{g} [(C_{e1} G - C_{e2} \rho \epsilon) \epsilon / k]$
	$G = 2\mu_t [(\partial U/\partial x)^2 + (\partial V/\partial y)^2 + 0.5(\partial V/\partial x + \partial U/\partial y)^2]$

3.3 국부적으로 고정된 좌표계에서의 운동량 방정식

Covariant 속도를 종속변수로 하면 격자점에 따라 속도의 방향이 변화하므로 정확한 압력구배를 계산하기 위해서는 압력수정방정식의 원천항이 매우 복잡하여지고 수렴성을 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Karki⁹⁾가 제안한 국부적으로 고정된 좌표계를 사용하여 압력수정방정식의 복잡한 원천항을 단순화하였다. 국부적으로 고정된 좌표계에서의 운동량 방정식은 다음과 같다.

U_x 방정식

$$\frac{\partial}{\partial \xi} (\rho \hat{U}^i U_x^i - \Gamma \sqrt{g} g^{11} \frac{\partial U}{\partial \xi}) +$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} (\rho \hat{U}^i U_x^i - \Gamma \sqrt{g} g^{22} \frac{\partial U}{\partial \eta})$$

$$= \frac{\partial}{\partial \xi} (\Gamma \sqrt{g} g^{12} \frac{\partial U}{\partial \eta}) +$$

$$= \frac{\partial}{\partial \eta} (\Gamma \sqrt{g} g^{21} \frac{\partial U}{\partial \xi}) +$$

$$- [\sqrt{g} (\partial P / \partial \xi) / (g_{11})^{1/2}]_p,$$

$$+ \frac{x_i}{\sqrt{g_{11}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\xi_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right) \right. \right.$$

$$\left. \left. + \xi_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\eta_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right) \right.$$

$$\left. \left. + \eta_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right] \right\}$$

$$+ \frac{y_i}{\sqrt{g_{11}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\xi_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right) \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \xi_v \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \Bigg] \\
 & \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\eta_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \eta_v \left(\xi_v \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \Bigg\} \quad (3-5)
 \end{aligned}$$

U_n 방정식

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho \hat{U}^n U_n - \Gamma \sqrt{g} g^{11} \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) + \\
 & \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\rho \hat{U}^n U_n - \Gamma \sqrt{g} g^{22} \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \\
 & = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\Gamma \sqrt{g} g^{12} \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\Gamma \sqrt{g} g^{21} \frac{\partial U}{\partial \xi} \right) + \\
 & - \left[\sqrt{g} (\partial P / \partial \eta) / (g_{22})^{1/2} \right]_v \\
 & + \frac{x_t}{\sqrt{g} z} \left\{ \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\xi_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. + \xi_v \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \\
 & \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\eta_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \eta_v \left(\xi_v \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \\
 & + \frac{y_t}{\sqrt{g} z} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\xi_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right. \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left. \left. + \xi_v \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \Bigg\} \\
 & \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\eta_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \eta_v \left(\xi_v \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \Bigg\} \quad (3-6)
 \end{aligned}$$

4. 수치해석

4.1 이산화 방정식의 유도

격자계는 스칼라 변수가 검사체적의 중앙에 위치하고 속도 성분들은 검사체 적면상에 위치하는 엇갈림 격자계⁶⁾를 사용하여 비 엇갈림 격자계를 사용할 때 발생할 수 있는 체크보드(Checkboard) 형태의 압력 분포를 방지하였다. 검사체적에 대하여 지배방정식을 적분한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \left[\rho \hat{U}^e \phi - \Gamma \sqrt{g} g^{11} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right]_e - \left[\rho \hat{U}^e \phi - \Gamma \sqrt{g} g^{11} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right]_w \\
 & + \left[\rho \hat{U}^n \phi - \Gamma \sqrt{g} g^{22} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right]_n - \left[\rho \hat{U}^n \phi - \Gamma \sqrt{g} g^{22} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right]_s \\
 & = \left[\Gamma \sqrt{g} g^{12} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right]_e - \left[\Gamma \sqrt{g} g^{12} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right]_w \\
 & + \left[\Gamma \sqrt{g} g^{21} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right]_n - \left[\Gamma \sqrt{g} g^{21} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right]_s + \sqrt{g} S \quad (4-1)
 \end{aligned}$$

원천항을 선형화($S = S_e + S_p$)하고 Patankar⁶⁾에 의해서 제안된 먹송도식을 이용하여 지배방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$a_F \phi_F = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (4-2)$$

$$a_E = A(P_e)D_e \quad (4-2-a)$$

$$a_W = A(-P_w)D_w \quad (4-2-b)$$

$$a_N = A(P_n)D_n \quad (4-2-c)$$

$$a_S = A(-P_s)D_s \quad (4-2-d)$$

$$A(P) = \text{MAX}(0, (1 - 0.1 \text{ ABS}(P))^5) + \text{MAX}$$

$$(-P, 0.0) \quad (4-2-e)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - \sqrt{g} S_p \quad (4-2-f)$$

$$b = \sqrt{g} S_c + B_{NO} \quad (4-2-g)$$

$$b_{NO} = J_{s, e} - J_{s, w} + J_{s, n} - J_{s, s} \quad (4-2-h)$$

국부적으로 고정된 속도로 이산화된 운동량 방정식은 다음과 같다.

U_ξ 방정식

$$a_P U_{\xi, P} = a_E U_{\xi, E} + a_W U_{\xi, W} + a_N U_{\xi, N} +$$

$$a_S U_{\xi, S} + b_{\xi} \quad (4-3)$$

$$b_{\xi} = b_{NO} - [\sqrt{g} (\partial P / \partial \xi) / (g_{11})^{1/2}]_p$$

$$+ \frac{x_{\xi}}{\sqrt{g_{11}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\xi_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + \xi_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\eta_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + \eta_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \right\}$$

$$+ \frac{y_{\xi}}{\sqrt{g_{11}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\xi_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) + \xi_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\eta_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + \eta_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \right\}$$

U_η 방정식

$$a_P U_{\eta, P} = a_E U_{\eta, E} + a_W U_{\eta, W} + a_N U_{\eta, N} +$$

$$a_S U_{\eta, S} + b_{\eta} \quad (4-4)$$

$$b_{\eta} = b_{NO} - [\sqrt{g} (\partial P / \partial \eta) / (g_{22})^{1/2}]_p$$

$$+ \frac{x_{\eta}}{\sqrt{g_{22}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\xi_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + \xi_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\eta_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + \eta_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \right\}$$

$$+ \frac{y_{\eta}}{\sqrt{g_{22}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\xi_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + \xi_r \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[\sqrt{g} \mu_{eff} \left(\eta_r \left(\xi_r \frac{\partial U}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) \right. \right.$$

$$+ \eta_v \left(\xi_r \frac{\partial V}{\partial \xi} + \eta_v \frac{\partial V}{\partial \eta} \right) \Bigg\}$$

4.2 압력수정방정식

본 연구에서 유도된 압력수정방정식은 다음과 같다.

$$a_P P_P = a_E P_E + a_W P_W + a_N P_N + a_S P_S + b + b_{NO} \tag{4-5}$$

$$a_E = (\rho \sqrt{g_{11}} A^{(1)} \cdot A^{(1)} / \sqrt{g} d)_e \tag{4-5-a}$$

$$a_W = (\rho \sqrt{g_{11}} A^{(1)} \cdot A^{(1)} / \sqrt{g} d)_w \tag{4-5-b}$$

$$a_N = (\rho \sqrt{g_{22}} A^{(2)} \cdot A^{(2)} / \sqrt{g} d)_n \tag{4-5-c}$$

$$a_S = (\rho \sqrt{g_{22}} A^{(2)} \cdot A^{(2)} / \sqrt{g} d)_s \tag{4-5-d}$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \tag{4-5-e}$$

$$b = -(\rho^* \sqrt{g_{11}} A^{(1)} \cdot A^{(1)} / \sqrt{g} U^*_i)_e + (\rho^* \sqrt{g_{11}} A^{(1)} \cdot A^{(1)} / \sqrt{g} U^*_i)_w - (\rho^* \sqrt{g_{22}} A^{(2)} \cdot A^{(2)} / \sqrt{g} U^*_n)_n + (\rho^* \sqrt{g_{22}} A^{(2)} \cdot A^{(2)} / \sqrt{g} U^*_n)_s \tag{4-5-f}$$

$$b_{NO} = -(\rho^* \sqrt{g_{22}} A^{(2)} \cdot A^{(2)} / \sqrt{g} U^*_i)_e + (\rho^* \sqrt{g_{22}} A^{(2)} \cdot A^{(2)} / \sqrt{g} U^*_i)_w - (\rho^* \sqrt{g_{11}} A^{(1)} \cdot A^{(1)} / \sqrt{g} U^*_n)_n + (\rho^* \sqrt{g_{11}} A^{(1)} \cdot A^{(1)} / \sqrt{g} U^*_n)_s \tag{4-5-g}$$

4.3 계산알고리즘

본 연구에서는 과도한 전산시간의 소모를 피하기 위하여 계산 알고리즘은 가장 간단한 형태인

SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 방정식 해법으로는 기존의 해석에서는 TDMA가 많이 사용되어 왔으나 본 연구에서는 수렴을 촉진시키기 위하여 압력수정방정식에 대해서는 TDMA와 Block 수정과정(Block Correction Procedure)을 사용하였고 그 외의 지배방정식의 해법으로는 SIP(Strongly Implicit Procedure)⁷⁾를 사용하였다.

4.4 경계조건 및 계산순서

4.1.1 경계조건

벽면에서 U_i , U_n , k 에 대해서는 Non-Slip 조건을 사용하였고, ϵ 에 대해서는 식(4-6)의 조건을 사용하였다. 출구와 대칭축에서는 Neumann조건인 식(4-7)을 사용하였다.

1) 벽면

$$U_i = 0, U_n = 0, k = 0$$

$$\epsilon = 2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \right)^2 \tag{4-6}$$

2) 대칭축

$$\frac{\partial U_i}{\partial \eta} = 0, U_n = 0, \frac{\partial k}{\partial \eta} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial \eta} = 0, \tag{4-7}$$

3) 출구 조건

$$\frac{\partial U_i}{\partial \xi} = 0, U_n = 0, \frac{\partial k}{\partial \xi} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial \xi} = 0, \tag{4-8}$$

4.4.2 계산 순서

- 1) 압력장 P^* 을 가정한다.
- 2) 운동량 방정식을 풀어 U^* , V^* 를 구한다.
- 3) P^* 에 P 를 더하여 P 를 계산한다.
- 4) 속도 수정식을 이용하여 U , V 를 구한다.
- 5) 난류운동에너지(k)와 난류운동에너지 소산율(ϵ) 방정식을 풀어 외점성계수 μ_t 를 구한다.
- 6) 수정된 압력 P 를 다시 새로운 예측값 P^* 로

하여 순서 2로 돌아가서 수렴해가 얻어질 때까지 전체 과정을 반복한다. 수렴의 판정은 계산과정의 압력장을 이용하여 식(4-9)의 오차가 10^{-4} 보다 작을 때와 질량잔류항이 10^{-4} 보다 작을 때로 하였다.

$$\text{Error} = \frac{\text{MAX } |P - P_{\text{old}}|}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \quad (4-9)$$

여기서 P 는 현재 계산 단계에서의 압력 값이고, P_{old} 는 이전 계산단계의 값이다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 흡기포트의 유동조건으로 입구부의 레이놀즈수를 50,000으로 고정하였고 작업 유체는 15°C 의 순수한 공기로 하였다. 밸브는 폭 10mm, 시트(seat) 각도는 45° 로 하였으며 밸브 리프트는 10mm, 20mm, 30mm의 경우를 해석하였다. 이 경우에 대한 실험결과는 Bicen[®]등에 의해 발표되어 있다.

Fig2~Fig4은 밸브 리프트의 변화에 따른 속도장을 나타낸 것이다. 전체적으로 밸브 리프트의 변화에 의한 유동장은 큰 변화는 없으나 밸브 리프트가 10mm일 때와 밸브 리프트가 30mm일 때의 유동장을 비교해 보면 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구의 해석 대상인 모형 흡기포트의 입구 단면적과 밸브 리프트가 20mm일 때의 밸브 출구 단면적이 같으며 밸브 리프트가 10mm일 때는 입구의 면적이, 밸브 리프트가 30mm일 때는 출구의 단면적이 크기 때문에 생각된다. 재순환 유동은 밸브 리프트의 변화에 관계 없이 3곳에서 관찰되며 연소실 좌측 상단부의 재순환 유동은 밸브 리프트가 커짐에 따라 재순환 속도의 크기가 감소하며 그 영역이 점차 커지며 밸브 리프트가 30mm의 경우에는 밸브 시트(seat)면까지 확장되고 있음을 알 수 있다.

Fig5~Fig7은 밸브 리프트의 변화에 따른 유선을 나타낸 것이다. 밸브 리프트가 변화함에 따라 Annand¹⁰⁾이 지적한 바와 같이 밸브 출구

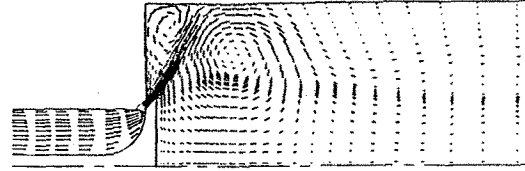


Fig.2 Predicted flow-field vector plot at the 10 mm lift of valve.

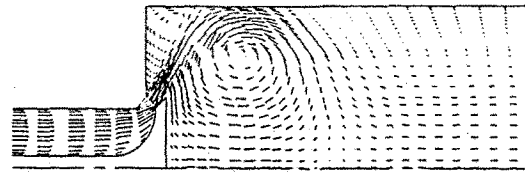


Fig.3 Predicted flow-field vector plot at the 20 mm lift of valve.

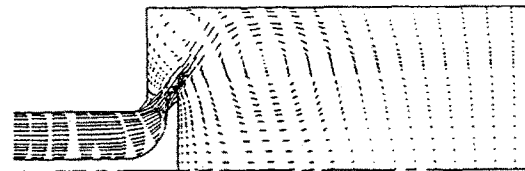


Fig.4 Predicted flow-field vector plot at the 30 mm lift of valve.

부근의 유동이 저 밸브 리프트(1=10mm)일 때에는 밸브의 면과 시트의 면에 완전히 밀착되어 있고 중간 밸브 리프트(1=20mm)의 영역에서는 유동박리가 발생하나 다시 재부착이 되며 밸브 리프트가 더 큰 영역(1=30mm)에서는 이러한 유동박리와 재부착이 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig8~Fig10은 밸브 리프트의 변화에 따른 압력장을 나타낸 것이다. 세 경우 모두 밸브 주변에서 상당한 압력의 저하가 발생하며 밸브 리프트가 커짐에 따라 압력의 감소가 적어진다. 유동이 밸브에 근접해 가면서 약간의 압력의 상승 즉 역압력 구배가 존재하고 밸브 통로의 하단부의 압력이 통로의 상단부보다 높다. 밸브 리프트에 관계 없이 압력 저하는 밸브와 시트의 날카로운 모서리 부근에서 가장 크게 발생하였다. 연소실 내의 압력장은 밸브 리프트에 관계 없이 그 형

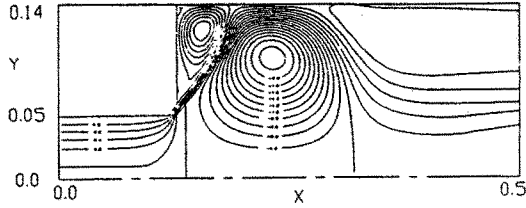


Fig.5 Predicted streamlines contours at the 10 mm lift of valve.

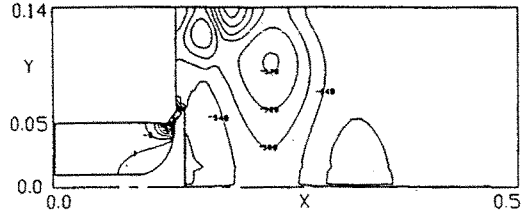


Fig.8 Predicted pressure contours at the 10 mm lift of valve(Pa).

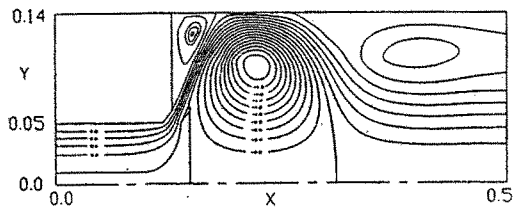


Fig.6 Predicted streamlines contours at the 20 mm lift of valve.

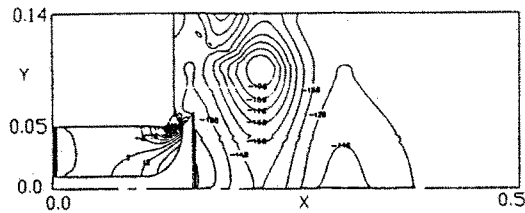


Fig.9 Predicted pressure contours at the 20 mm lift of valve(Pa).

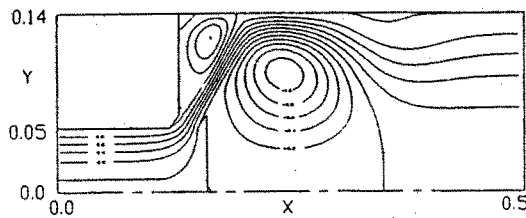


Fig.7 Predicted streamlines contours at the 30 mm lift of valve.

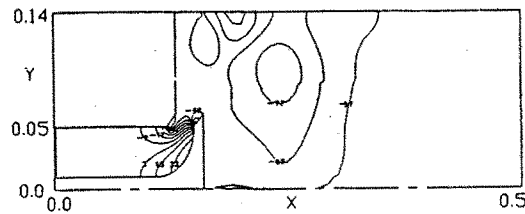


Fig.10 Predicted pressure contours at the 30 mm lift of valve(Pa).

태가 유사하지만 저 밸브 리프트 즉 10mm 밸브 리프트의 경우가 가장 낮은 압력장을 형성하고 있다.

Fig.11~Fig.13은 밸브 리프트의 변화에 따른 난류운동 에너지 k의 분포를 나타낸 것이다. 밸브 리프트가 커짐에 따라 평균 난류운동 에너지는 작아지며 밸브의 끝에서 가장 큰 난류운동 에너지가 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig.13의 밸브 리프트가 30mm의 경우 밸브 시트면 부근의 난류운동에너지는 그 구배가 급격히 감소하였음을 보여준다.

Fig.14~Fig.16은 밸브 리프트의 변화에 따른 길이 척도 L_0 의 분포를 나타낸 것이며 본 연구

에서 다음과 같은 정의를 사용하였다.

$$L_0 = \frac{C_0 k^{3/2}}{2\varepsilon} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{4C_{1d}^2}{C_0^2} \frac{1}{R_T} \right)^{1/2} \right\} (5-1)$$

여기서 $C_0 = C_\mu^{3/4}$, $C_{1d} = (2k)^{1/2}$ 이다. 이 길이척도는 난류강도와 함께 연소실 유동의 특성을 나타내고 결국은 연소에 중요한 영향을 미친다. 재순환 유동이 발생하는 연소실의 좌측 상단부, 우측 상단부와 연소실의 하단부에서 밸브 리프트와 관계 없이 길이척도가 커지고 있음을 알 수 있다.

Fig.17은 본 연구의 해석 결과로부터 구해진 유량계수를 나타낸 것이다. 유량계수는 Heywood

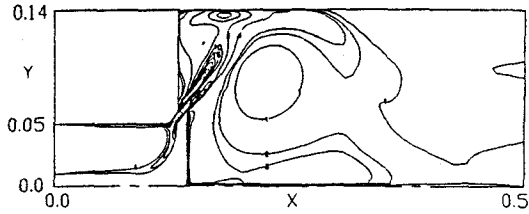


Fig.11 Predicted turbulent kinetic energy contours at the 10mm lift of valve(m²sec²).

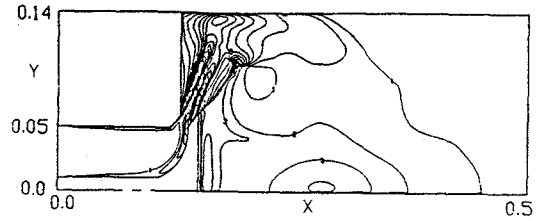


Fig.12 Predicted turbulent kinetic energy contours at the 20mm lift of valve(m²sec²).

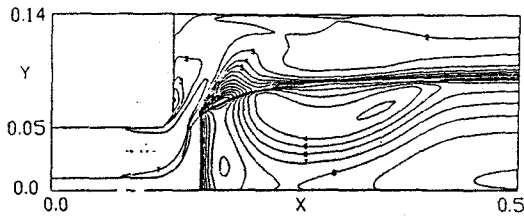


Fig.13 Predicted turbulent kinetic energy contours at the 30mm lift of valve(m²sec²).

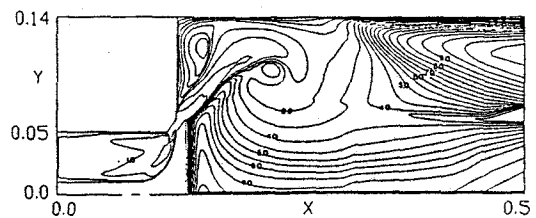


Fig.14 Predicted length scale contours at the 10mm lift of valve(10⁻³ m).

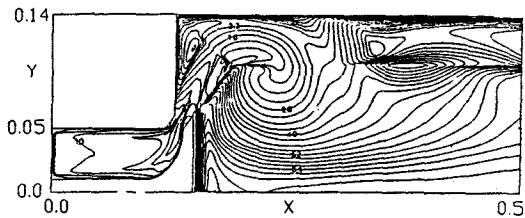


Fig.15 Predicted length scale contours at the 20mm lift of valve(10⁻³ m).

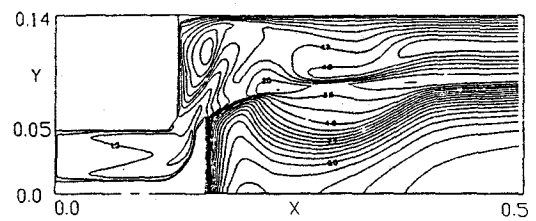


Fig.16 Predicted length scale contours at the 30mm lift of valve(10⁻³ m).

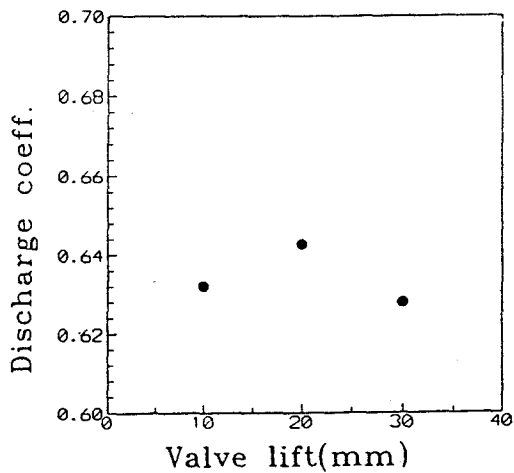


Figure 17 Predicted discharge coefficient w.r.t. the valve lifts

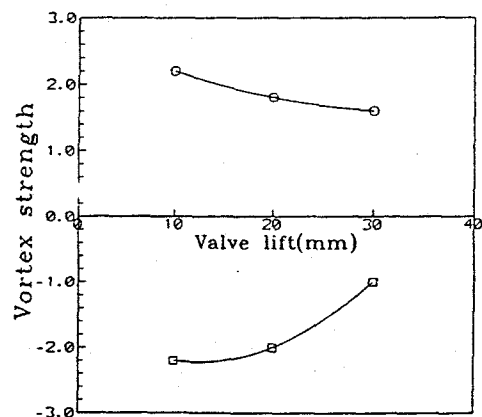


Figure 18 Strength of primary and secondary vortex with various valve lift
 (□ : primary vortex
 ○ : secondary vortex)

9)의 식을 사용하였다. 유량 계수는 밸브 리프트가 10mm일 때 보다는 밸브 리프트가 20mm일 때가 증가하나 밸브 리프트가 30mm일 때는 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 유량계수의 이러한 경향은 앞에서 지적한 바와 같이 밸브 선단의 유동박리와 유동박리의 재부착으로 인한 것으로 알려져 있다.

Fig.18은 밸브 리프트의 변화에 따라 연소실 하단부의 주 재순환 유동과 연소실 좌측 상단부의 2차 재순환 유동의 강도 즉 유동함수의 값을 나타낸 것이다. 주 재순환 유동과 2차 재순환은 밸브리프트가 증가함에 따라 그 강도가 감소하였다.

6. 결 론

축대칭 모형 흡기포트내의 유동을 저레이놀즈수 k-ε 난류모형과 경계고정좌표계를 사용하여 밸브 리프트의 변화에 대한 흡기모형포트를 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 밸브 리프트의 변화에 따른 유속의 분포는 밸브 리프트의 변화에 관계 없이 3곳에서 관찰되었고 이는 기존의 실험결과와 잘 일치하였다.
2. 밸브 리프트의 변화에 따른 유량계수는 리프트가 20mm일 때 최대의 값을 나타내었으며 유량계수는 밸브 리프트의 변화에 비례하지 않는다.
3. 밸브 선단과 밸브 시트의 날카로운 모서리 부근에서 큰 압력 저하와 난류에너지 생성이 관찰되었다. 따라서 유량계수를 개선하기 위해서는 이 날카로운 모서리의 라운딩 등의 처리가 요구된다.

4. 밸브 리프트의 변화에 따라 압력장은 밸브 주변에서 상당한 압력의 저하가 발생하였고 밸브 리프트가 커짐에 따라 압력의 감소가 적어졌다.
5. 밸브 리프트가 커짐에 따라 연소실로 유입되는 제트 유동의 속도는 감소하며 유입각은 커진다.

참 고 문 헌

1. A.D.Gosman and A.M.Y. Ahmed, 1987, "Measurement and Multidimensional Prediction of Flow in an Axisymmetric Port/Valve Assembly", SAE 870592
2. A.F.Bicen, C.Vafidis, and J.H.Whitelaw, 1985, "Steady and Unsteady Airflow Through the Intake Valve of a Reciprocating Engine", J Fluid Eng.107, pp413-420
3. 김명호, 1991, "저 레이놀즈수 난류 모형 개발에 관한 연구", 고려대학교 박사학위 논문
4. J.F.Thompson, Z.U.A. Warsi and C.Wayne Martin, 1985, "Numerical Grid Generation", North-Holland
5. K.C.Karki, 1988, "A Calculation Procedure For Viscous Flows at All Speeds in Complex Geometries", Ph.D. Thesis, Minnesota
6. S.V.Patankar, 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill
7. C.A.J. Fletcher, 1987, "Computational Techniques for Fluid Dynamics", Springer-Verlag
8. John B. Heywood, 1987, "Fluid Motion Within the Cylinder of Internal Combustion Engine-The 1986 Freeman Scholar Lecture", J Fluid Eng. 109, pp3-35