

이단 원추형 오리피스를 지나는 압력장과 유동장에 관한 수치적 연구

김 연 수* · 김 유 곤†

(2001년 7월 27일 접수, 2001년 11월 19일 심사완료)

Numerical Analysis for the Pressure and Flow Fields past a Two-Stage Conical Orifice

Yeon-Soo Kim and You-Gon Kim

Key Words : Conical Orifice(원추형 오리피스), Pressure Drop(압력감소), FLUENT Code, PISO Algorithm, k - ε Model, Recirculation Region(재순환 영역), Separation Phenomenon(박리현상), Cavitation(공동현상)

Abstract

The objective of the paper was to calculate the pressure drop and to investigate the recirculation region of the conical orifices used in Kwang-yang Iron & Steel Company. The flow field with water used as a working fluid was the turbulent flow for Reynolds number of 2×10^4 . The effective parameters for the pressure drop and the recirculation region were the conical orifice's inclined angle (θ) against the wall, the interval(S) between orifices, the relative angle of rotation(α) of the orifices, the shape of the orifice's hole(circle, rectangle, triangle) having the same area, the number(N) of the orifice's holes having the same mass flow rate, and the thickness(t) of the orifices. It was found that the shape of the orifice's hole, the number of the orifice's holes and the thickness of the orifice affected the total pressure drop a lot and that the conical orifice's inclined angle against the wall, the relative angle of rotation of the orifices, the number of the orifice's holes and the thickness of the orifices affected the center location of the recirculation region. The PISO algorithm with FLUENT code was employed to analyze the flow field.

기호설명	($\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 15^\circ$, $\alpha_3 = 30^\circ$, $\alpha_4 = 45^\circ$)
D : 관의 지름(= 10 cm)	t : 오리피스의 두께(= 0.0d, 0.5d, 1.0d, 1.5d)
d : 구멍의 지름(= 0.6 cm)	S : 두 오리피스 사이의 간격 ($S_1 = 25$ cm, $S_2 = 30$ cm, $S_3 = 35$ cm)
L : 오리피스의 전체 관의 길이(= 90 cm)	C_p : 무차원 압력 상수(= $\Delta P / (1/2 \rho U_{o,max}^2)$)
θ : 관과 오리피스 사이의 경사각 ($\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_3 = 60^\circ$)	N : 동일한 유량을 가지는 오리피스의 수 (= 2개, 3개, 4개, 5개, 6개)
α : 두 오리피스의 상대 회전각	$U_{o,max}$: 기준 최고 속도(= 21.6 m/s) ($\theta = \theta_3$, $\alpha = \alpha_1$, t = 0.0d , S = S_2)

* 회원, 전남대학교 대학원 kysoo@orgio.net

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계공학과

E-mail : ygkim@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1676 FAX : (062)530-1689

1. 서 론

오리피스⁽¹⁾는 높은 압력의 유체를 낮은 압력의

유체로, 유체 흐름을 제한하기 위한 목적의 제한용 오리피스와 유량 측정을 목적으로 차압(differential pressure)을 발생시키는 유량측정용 오리피스로 구분한다. 유체가 오리피스의 교축부에 통과 할 때, 단면적의 변화로 유속의 변화는 압력변화를 일으킨다. 이러한 압력 손실량을 계량적으로 이용하는 방법이 오리피스를 이용한 유량 측정용인 것이다. 그리고 압력 손실량을 유체흐름에 직접적으로 이용하는 것이 제한용 오리피스이다. 본 연구는 실제 광양제철소에서 사용되어 지는 제한용 오리피스의 원추형 오리피스(conical orifice)를 이용하여 압력감소와 후류유동⁽²⁾에 대하여 해석하였다. 열연 공장에서는 후판(slab)에 열을 가할 때에 생기는 산화물의 박편(scale)을 제거하기 위하여, 펌프에서 고압수를 만들어 후판 표면에 분사한다. 여기서 오리피스는 펌프 토출 부분의 by-pass line에 설치되어, 무부하(unloading)때에 고압수인 박편제거용물(descaling water)을 감압하여 수로로 배출시킬 때 사용되어진다. 이와 같이, 실제로 오리피스는 발전소, 냉동 장치 기기, 의료 연구 등에서 사용되어지기 때문에 오래 전부터 많은 연구의 대상이 되어왔다. 또한 원관내 오리피스 링이 부착된 기하학적 형상은 유체역학 부분에서 많이 사용되어지고 있는 유량 측정 장치의 하나이다. 그래서 유동 박리 및 그 이후의 유체 유동 발달과정을 해석하는 것은 매우 흥미 있는 일이라 할 수 있다. 일반적으로, 오리피스 링을 지나는 유동은 박리와 더불어 링 하류로 크게 변형이 이어진다. 그리고 박리 점과 재부착점 주위에서 유동이 정체되며, 속도는 노리나 벽을 따른 역방향 유동이 발생한다. 또한 주 유선과 재순환 영역 사이의 경계에 혼합 층이 생기며, 혼합층내에서는 매우 강한 박리진단유동이 발생한다. 이러한 영역에서는 난류량들이 급격히 증가하고, 하류로 감에 따라 서서히 감소하면서 안정된 난류 경계층으로 발달하게 된다. 유동 박리 및 재순환 영역에 대한 연구는 Minh⁽³⁾ 등이 축대칭 급확대관에서 실험 및 수치 해석을 하였고, Eaton⁽⁴⁾ 등은 후향 계단에서의 유동현상을 규명하였다. 이러한 오리피스의 다양한 현상들은 여러 가지 요소(parameter) 등에 의한 영향을 받음을 알 수가 있다. 이에 따른 많은 연구가 있었는데 먼저 일정 β ratio(= d / D)⁽⁵⁾에 대해서 Re수가 난류인 경우에 압력손실계수에 영향이 없

음이 여러 실험을 통해서 증명되어졌다. 그리고 수직 유동시에 측면 오리피스가 동일면적에 대한 다양한 형태를 가질 때 두 오리피스 사이 간격과 배치에 따른 감압과 유동 현상에 대해서 조사되어 졌다.⁽⁶⁾ 또 오리피스의 두께가 압력감소에 미치는 영향⁽⁷⁾과 높은 압력차에 의해 발생된 공동현상(cavitation)이 파이프나 펌프날개에 미치는 손실 등이 연구 되어졌다.⁽⁸⁾ Two-phase의 경우에는 1959년 Richardson⁽⁹⁾에 의해 확·축소관과 오리피스에 대해 조사되어졌고, Giot⁽¹⁰⁾와 Delhaye⁽¹¹⁾에 의해서 급확·축소관에 대한 연구결과가 제시되어졌다. 이와 같이 본 연구에서는 실제 열연 공장에서 사용되어지고 있는, 원추형 오리피스에서의 압력 감소와 유동 해석을 하기 위하여 상용 프로그램인 FLUENT code⁽¹²⁾를 이용하였다. 그리고 작동 유체인 물에 대한 Re수를 2.0×10^4 에 대해서 계산하였다. 연구 요소로는 벽면과 원추형 오리피스와의 사이각(θ)에서의 효과와 두 오리피스 사이의 거리(S) 또 앞 오리피스와 뒤 오리피스를 상대적으로 회전시킨 각도(α)에 따른 변화를 조사하였다. 그리고 위의 여러 가지 요소들에 대해서 단면적이 같은 오리피스 구멍의 형상을 원형, 정사각형, 정삼각형으로 하여 조사하였다. 또 오리피스 단면적의 갯수(N)를 2개 ~ 6개로 다양하게 하여 조사하였고, 마지막으로 오리피스 두께(t)를 0.0d, 0.5d, 1.0d, 1.5d로 변화를 주어 이에 따른 압력강하와 유동현상에 대한 영향을 조사하였다.

2. 이론해석

2.1 계산 모델

본 연구에서 원추형 오리피스에 대한 영향을 주는 요소들을 Fig. 1에 나타내었다. 벽과 오리피스 사이각도($\theta_1, \theta_2, \theta_3$), 두 오리피스 간의 길이(S_1, S_2, S_3) 그리고 두 오리피스의 상대적 회

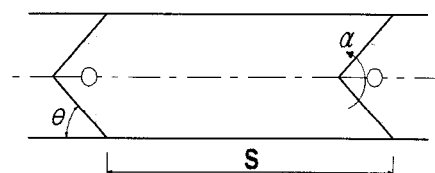


Fig. 1 The schematic diagram

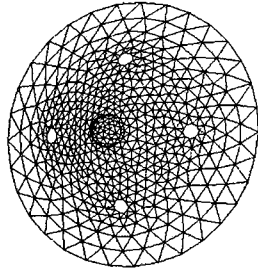


Fig. 2 The grid generation

전각도($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$)에 따른 유동장과 압력 변화를 계산하였다. Fig. 2는 연구에 사용되어진 격자이다. 오리피스가 원추형 형상의 측면에 구멍이 있어 삼각 격자를 이용하여 만들었고, 나머지 부분들은 사각 격자를 이용하였다.

2.2 지배 방정식

관내의 유체는 정상 상태이며 일정한 점성을 가진 3차원 비압축성 난류 유동장으로 가정을 하였다. 그리고 난류를 해석 하기 위하여 $k - \epsilon$ 모델을 사용하였으며 최종적인 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.

연속방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

난류운동에너지 방정식(k - equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon$$

난류에너지소산을 방정식(ϵ - 방정식)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

이 식에 관련된 변수들은 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad \sigma_k = 1.0$$

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_\epsilon = 1.3$$

2.3 경계조건

난류 유동인 경우 벽 부근에서는 급격한 속도 구 배를 정확하게 구하기 위해서 많은 격자가 필요할 뿐 아니라 계산 시간이 과다하게 소요된다. 따라서 벽 부근에서는 속도에 대한 경계 조건으로 벽함수(wall function)를 사용하여 $k - \epsilon$ 방정식을 대신했다. 오리피스를 지나는 유동에서 압력 변화가 급격하며 박리 현상이 일어나기 때문에 본 연구에서는 압력구배를 고려한 비평형벽함수(non-equilibrium wall function)를 사용한다.

입구조건

i) 속도 : $u = U_{\max} \left(\frac{r}{R} \right)^{1/7}$

ii) 난류운동에너지

관벽 : $k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}$

중심선 : $k = 0.002 U_{\max}^2$

두 식을 선형화 하여 입구조건을 분포시켰다.

iii) 난류에너지 소산을

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} l$$

l 은 mixing length로서 κr 과 0.085R의 최소 값이다. (κ = Karman 상수)

출구조건

입구의 유량과 출구의 유량이 같은 상황으로 가정을 하여 출구 조건을 정하였다.

Wall Function

i) $y^* > 11.5$ 일 때

$$\frac{u_a C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \right)$$

$$u_a = u - \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \left[\frac{y_v}{\rho \kappa k^{1/2}} \ln \left(\frac{y}{y_v} \right) + \right.$$

$$\left. \frac{y - y_v}{\rho \kappa k^{1/2}} + \frac{y_v^2}{\mu} \right]$$

y_v 는 physical viscous sublayer thickness 이다.

$$y_v \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}$$

$$y_v^* = 11.5$$

ii) $y^* < 11.5$ 일 때

$$u^* = y^*$$

벽부근에서 k 와 ϵ 에 대한 경계조건

$$k_{(wall)} = 0$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial n}_{(wall)} = 0$$

3. 수치해석

본 연구에서는 FLUENT code로 PISO 알고리즘을 사용하여 이산화된 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 풀었다. 평균속도는 0.2 m/s로서 완전히 발달된 속도분포를 입구 조건으로 하였고 Re수는 2.0×10^4 이었다.

3.1 벽과 오리피스 사이의 각도(θ)에 대한 연구

벽과 오리피스 사이의 각도를 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 로 변화시켜 압력 감소와 오리피스 뒤의 후류 유동의 발달과정을 살펴보았다. Fig. 3은 θ 가 변함에 따라 두 오리피스 사이의 간격(S)에 대해서 중심선으로부터 0.0D, 0.2D, 0.4D 떨어진 곳에서 축방향으로의 압력 변화 분포를 나타낸 것이다. 먼저 전체 압력 감소를 살펴보면 θ_1 일 때 $C_p =$

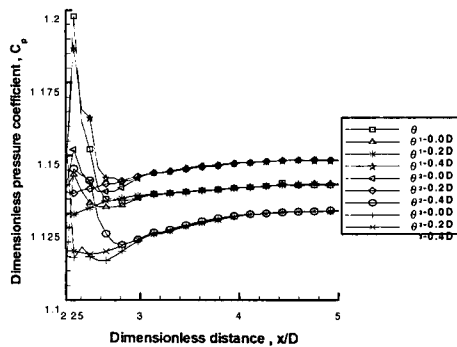


Fig. 3 Axial pressure distribution of S region with different inclined angles(= $\theta_1, \theta_2, \theta_3$) at different distances(= 0.0D, 0.2D, 0.4D) from the centerline

2.292였고, θ_2 일 때 $C_p = 2.291$ 였으며, θ_3 일 때 $C_p = 2.252$ 였다. 그러나 그 차이는 $\pm 2.0\%$ 내외로 θ 에 따른 전체 감압의 효과는 그리 크지 않았다. 그리고 S영역에서 보면 중심선으로 부터 0.0D, 0.2D가 떨어진 경우는 0.4D에 비해 오리피스를 지난 직후 C_p 값의 변화가 상대적으로 컸다. 특히 0.0D인 경우에 앞 오리피스에서 $x = 0.08D$

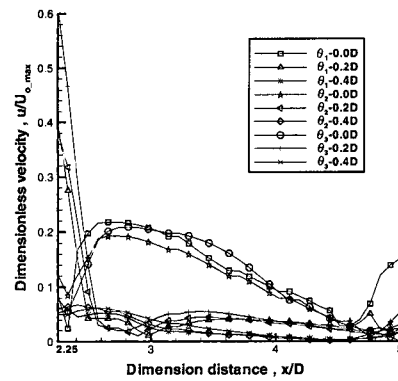
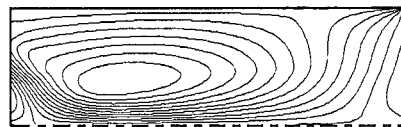


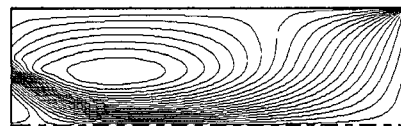
Fig. 4 Axial velocity distribution of S region with different inclined angles(= $\theta_1, \theta_2, \theta_3$)



(a) $\theta = \theta_1$



(b) $\theta = \theta_2$



(c) $\theta = \theta_3$

Fig. 5 Streamlines of S region with different inclined angles(θ)

떨어진 곳에서 θ_1 일 때 C_p 가 1.198, θ_2 일 때는 1.187이었고 그리고 θ_3 일 때는 1.11이었다. 이것은 θ_1 일 때가 θ_2 일 때 보다 0.011이 높았고, θ_3 일 때 보다는 0.088이 더 높았다. 그러나 이를 압력으로 환산하면 2.55 kpa 과 20.266 kpa 인데, 이는 전체압력감소에 비해 무시 될 수 있는 값이었다. 즉 앞 오리피스스의 각도의 변화는 압력감소에 큰 효과가 없음을 말한다. Fig. 4에서는 S영역에 대한 중심선으로부터 0.0D, 0.2D, 0.4D떨어진 곳의 속도 분포를 나타낸 것이다. 속도 분포는 유사했으나 위치에 따라서 값의 차이가 나타났다. 특히 θ_1, θ_2 에 비하여 θ_3 일 때 중심선으로부터 0.2D 떨어진 곳에서 속도가 다른 각도에 비해서 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 이것은 θ_1, θ_2 일 때, 원추내에서 서로 충돌 후 원관쪽으로 이동되는데 이때 많은 운동에너지 감소가 되어진다. 그러나 θ_3 일 때는 유동의 흐름에 원만하게 흐르기 때문에 운동 에너지 손실이 비교적 작게 된다. θ 의 변화에 따른 유동의 다른 형상을 Fig. 5의 유선으로 표현했다. θ_3 일 때 θ_1 이나 θ_2 보다 축방향으로 더욱 큰 운동량을 가지고 있기 때문에 주변 유동과의 더 큰 마찰에 의해서 더욱 빠르게 재순환이 발생하게 된다. 이때, 재순환 유동의 중심위치를 S영역의 시작 부분으로 하여 관의 지름인 D로 나타내면 다음과 같다. θ_1 일 때는 0.849D이었고, θ_2 일 때는 0.835D이었으며, θ_3 일 때는 0.768D였었다. 그리고 박리영역 폭은 θ 의 각도가 작을수록 두터웠는데 그 값은 다음과 같다. θ_1 은 0.319D, θ_2 는 0.305D, θ_3 는 0.269D였었다.

3.2 두 오리피스간의 길이(S)에 대한 고찰

Fig. 6에서는 S의 변화에 따른 전체 압력 감소를 나타내기 위하여 오리피스스의 중심선을 이용하였다. 그림에서 나타낸 것처럼 길이 S의 변화를 S_1, S_2, S_3 로 변화시켰지만 압력감소의 영향은 거의 무시 할 정도로 작았다. S_1 의 경우에 한개의 오리피스를 지날때의 순간 감압은 262.4 kpa 이고 이를 CP로 나타내면 1.125이다. 이때 오리피스를 지나는 순간에 압력이 약간 상승하는데 이는 단면적의 증가에 따른 일시적인 현상이었다. 이때의 증가 압력은 하나의 원추관 오리피스를 지나는 압력에 비하여 2.67 %였었다. 그리고 두 번째 오리피스를 지날 때 출구압력($P_{gauge} = 0$)보

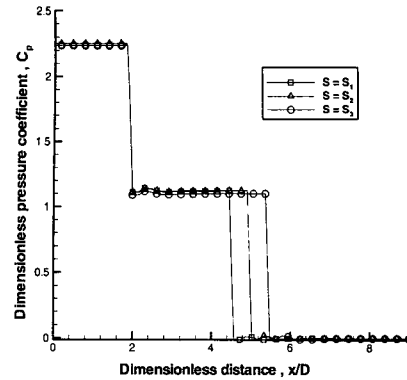


Fig. 6 Pressure drop along the centerline with different intervals(S) ($\theta = \theta_3, \alpha = \alpha_1$)

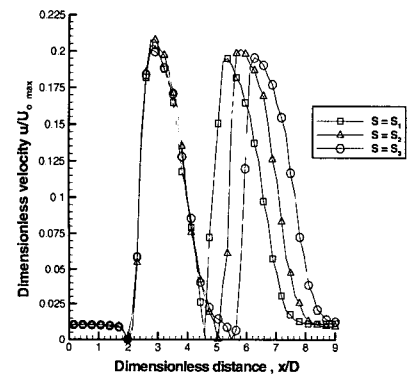


Fig. 7 Velocity distribution along the centerline with different intervals(S = S_1, S_2, S_3)

다 낮은 -3.12 kpa까지 감소했었다. 그러나 물이 온도가 20° C일 때에 $P_{abs} = 2.339$ kpa에서 포화상태가 되는데, 이 값과 비교하면 공동현상이 일어날 정도의 낮은 압력은 아니었다. 그렇지만 실제 광양제철소에서 사용중인 오리피스스의 전체 압력 감소가 거의 100bar이고 실제 압력감소에 따른 공동현상에 의하여 베어링의 마모가 심각한 문제임을 고려할 때 많은 연구가 따라야 할 것이다. Fig. 7에서는 오리피스스의 중심선에서 각각의 길이 S에 따른 전체 속도분포를 나타내었다. 전체의 압력 변화에서처럼 뒤오리피스스의 위치 차이에 따른 속도 증가 영역이 달랐을 뿐 큰 변화는 없었다. 즉 S_1 을 기준으로 할 때, 오리피스들을 지날때의 서로에 대한 속도차이가 ± 1.9 %정도

밖에 되지 않는 거의 같은 속도 분포를 가졌다. 그러나 S₁인 경우에 두 번째 오리피스의 바로 앞 부분에서 속도가 급격히 떨어지는 것을 볼 수가 있었다. 이것은 두 오리피스 사이의 거리가 가까워 속도가 충분히 하류 쪽에 전달이 되지 못하고 오리피스에 부딪치면서 모멘트 에너지가 감소하기 때문이었다. 이로 인하여 S₃인 경우가 S₁인 경우보다 S영역에서 C_p가 약 0.02정도 낮았다.

3.3 두 오리피스의 구멍간의 회전각도(α)에 대한 연구

Fig. 8에서는 θ_3 이고, S₂인 경우에 대해서 두 오리피스에 대해 상대적인 각도를 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 로 하였을 때의 유선을 나타낸 것이다. 유선에서 α 가 작을수록 재순환 영역이 빨리 일어나는 것을 볼 수 있었다. S영역의 시작 부분을 기준으로 하여 재순환 유동의 중심위치를 관의 지름인 D로 나타내면 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 에 대해서, 각각

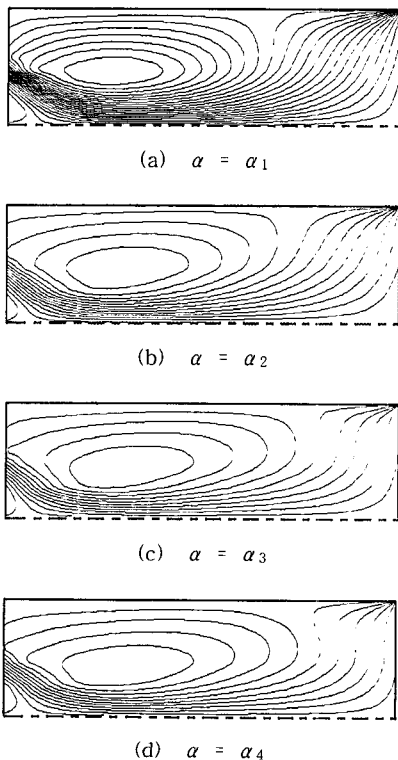
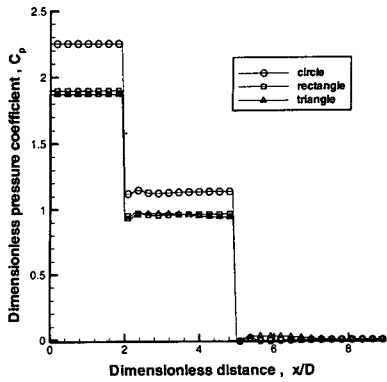


Fig. 8 Streamlines of S region with different rotated angles(α) ($\theta = \theta_1, S = S_2$)

0.768D, 0.87D, 0.877D, 0.892D이었다. 그리고 재순환중심 폭은 α 각이 클수록 벽에서 더욱 두터워지는 것을 볼 수가 있었다. 그 폭은 α 에 따라서 각각 0.269D, 0.272D, 0.278D, 0.292D였다. S영역에서 재순환 영역은 처음 재순환 영역이 시작된 부분에서 폭이 두껍고, 하류로 갈수록 얇아진다. 특히 α_1 에서는 첫 번째 오리피스를 통과하면서 생긴 큰 운동량이 두 번째 오리피스에 잘 전달되면서 폭이 급격히 감소하는 것을 볼 수가 있었다. 그러나 α 각이 증가 할수록 운동량이 하류 쪽으로 충분히 전달이 되지 않게된다. 그래서 두 번째 오리피스의 앞에서도 재순환 영역 폭이 두꺼웠고, 순환되는 속도도 크게 나타났다. 그러나 뒤 오리피스의 회전을 시켰을 때, 압력감압은 거의 영향이 없었다.

3.4 면적이 같은 구멍의 형상에 따른 연구

이번 연구는 동 면적에 대한 다른 구멍 형상에 따른 전체의 압력분포와 중심선으로부터 0.0D, 0.2D, 0.4D 떨어진 곳에서 축방향으로의 압력분포를 Fig. 9에서 나타내었다. 먼저 무차원화한 전체 압력 감소를 보면 원형인 경우 C_p가 2.252였고 사각형이 1.897, 삼각형이 1.871정도가 감소하였다. 이는 원형이 사각형에 비해 18.74 %, 삼각형에 비해 20.35 %나 감압효과가 있었다. 그러나 사각형과 삼각형의 경우는 1.3 % 정도의 감압으로 서로 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. S영역에서 압력 분포를 살펴보면 사각형과 원형의 분포는 중심선인 0.0D에서는 압력이 잠시 상승하였다가 첫 번째 오리피스의 0.556D떨어진 곳에서부터 압력의 변화가 거의 없었으나 0.2D, 0.4D에서는 처음부터 압력의 변화가 거의 없었다. 그러나 삼각형에서는 0.0D인 경우에 상승한 압력이 첫 번째 오리피스로부터 2.1D까지 변화하였으며, 특히 0.0D에서는 $x/D = 2.25$ 에서 원형이나 사각형에 비해 C_p가 0.277이 상승한 1.215가 되었다. Fig. 10에서는 오리피스의 중심선에서 다른 구멍의 형상에 대한 전체 속도 분포를 나타내었다. 전체적인 속도 분포는 비슷했지만 오리피스를 지나는 순간에 원형의 무차원 속도는 0.21이었고, 사각형은 0.193, 삼각형은 0.197로 나타나 원형에서 더 큰 상승이 생긴 것을 알 수 있었다. 그리고 재순환영역의 중심위치와 폭의 변화는 구멍의 형상에 무관하게 비슷하였다.



(a) Pressure drop along the centerline

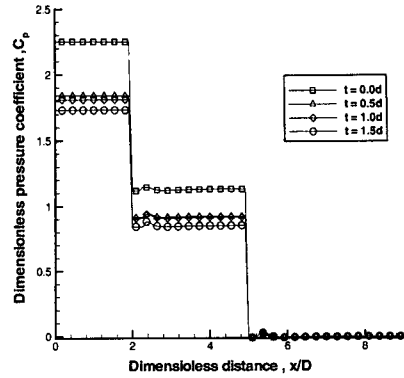
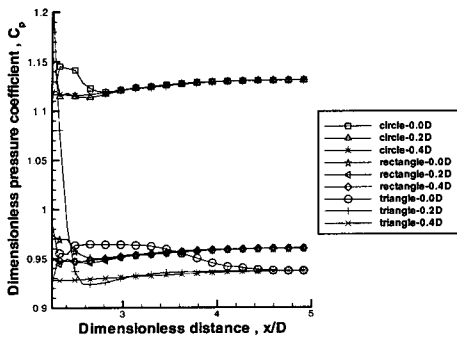


Fig. 11 Pressure drop along the centerline with different thicknesses(t) of the holes ($\theta = \theta_3, \alpha = \alpha_1, S = S_2$)



(b) Axial pressure distribution of S region

Fig. 9 Pressure distribution ($\theta = \theta_3, S = S_2$)

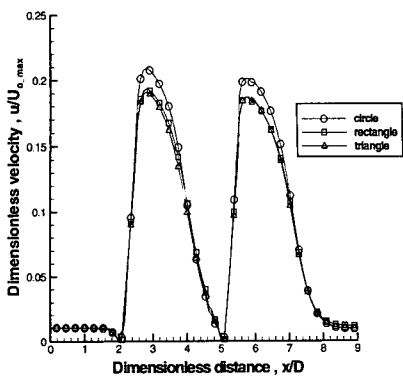


Fig. 10 Velocity distribution along the centerline with different shapes of the holes

압력변화에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 구멍의 두께가 커질수록 전체 압력감소가 작아지는 것을 볼 수 있었다. 그 값을 알아 보면 t 가 0.0d일 때는 $C_p = 2.252$ 이고, 0.5d에서는 1.842, 1.0d일 때는 1.81, 1.5d일 때는 1.73이었다. 이는 0.0d와 1.5d를 비교했을 때, 23.1%나 감압 효과가 있었다. 그러나 0.5d와 1.0d 사이에서는 감압이 1.7% 정도로 거의 차이가 나지 않았다. 이 결과는 Re수 600 ~ 10⁶에 대해서 두께를 변화시켜 압력감소의 차이를 연구한 Mersmann⁽¹³⁾에 의해서 확인된다. 즉 t/d 가 1과 2 사이일 때 최소순실계수가 있다는 것과 유사했다. 전체 속도 분포를 알려면 중심선에서 그 속도크기를 나타낸 Fig. 12를 보면 알 수 있다. 전체적인 속도 분포는 비슷했지만 $u/U_{o,max}$ 는 오리피스를 지나는 순간에 0.21, 0.197, 0.214, 0.233였었다. 즉 속도 크기는 t 가 0.5d에서 약간 감소하였다가 t 가 커질수록 속도 크기가 커졌다. 그리고 관내 S영역에서의 유동현상을 파악하기 위해서는 Fig. 13의 유선을 보면 알 수가 있다. t 가 0.0d에서 1.5d까지 변화를 주었을 때 두께가 있는 경우보다 없는 경우가 재순환 영역의 중심 위치가 뒤에 있었다. 이때, 재순환 유동의 중심위치를 S영역의 시작 부분으로 하여 관의 지름인 D 로 나타내면 0.768D, 0.66D, 0.707D, 0.693D였다. 그러나 두께가 있는 경우 0.5d에서 1.5d까지 변화를 주어도 그 차이는 $\pm 6\%$ 내외로 그리 크지 않았다. 또 재순환 폭은 t 의 4가지 경우(0.0d, 0.5d, 1.0d, 1.5d)에 대해서 각각 0.269D, 0.288D, 0.319D, 0.34D의 값을 가졌었다.

3.5 구멍의 두께(t)에 대한 연구

Fig. 11은 t 에 따른 오리피스의 중심선에서 전체

이는 t 의 값이 커질수록 재순환 영역의 폭이 두꺼워지는 것을 알 수 있었다.

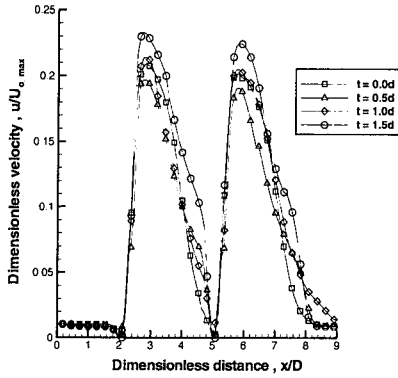


Fig. 12 Velocity distribution along the centerline with different thicknesses of the holes

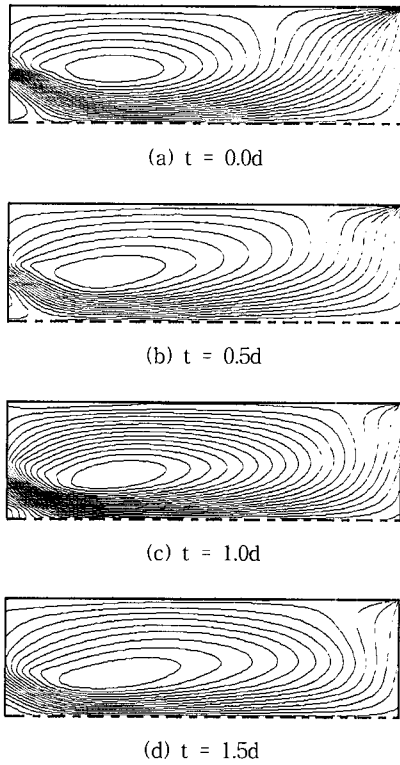


Fig. 13 Streamlines of S region with different thicknesses(t) of the orifice($\theta = \theta_3$, $S = S_2$)

3.6 구멍의 수(N)에 따른 연구

이번 조건은 오리피스를 통과하는 유량이 같도록 구멍의 단면적을 변화시켜 구멍의 수를 2개에서 6개까지 늘려서 연구하였다. Fig. 14는 θ_3 , S_2 , α_1 에 대해서 구멍의 수에 따른 전체 압력을 중심선에서 나타낸 것이다. 먼저 N에 대한 압력감소의 값을 알아보면 2, 3, 4, 5, 6개에 대해서 C_p 가 2.139, 2.346, 2.252, 2.447, 2.449였다. 이 값을 통해 알 수 있는 것은 구멍을 통과하는 유량이 같아도 단면적이 적을수록 압력이 더욱 많이 감소한다는 것이다. 즉 N이 2와 6일 때를 비교해 보면, 6일 때가 0.313이 높다는 것을 알 수가 있는데 이는 14.64 %의 감압효과를 보이는 것이다. 또 N = 5, 6의 경우는 3과 4일 때 보다 면적 감소에 의해 4.3 % - 8.9 % 정도의 압력 효과가 낮다. 이는 β Ratio가 적어질수록 압력감소가 커지는 것과 유사했다. 그러나 N = 3에서 4보다 C_p 가 0.094가 높은 것을 알 수 있었다. 이는 비록 단면적은 3이 4보다 크지만 구멍의 위치가 오리피스 위에 120° 의 간격으로 되어있어 좌우상하 대칭이 되어있지 않기 때문이다. 그래서 첫 번째 오리피스를 지날 때 구멍을 통한 유동이 다른 반대쪽으로 치우치면서 구멍과 바로 위 벽 사이에서 큰 재순환 영역이 생기고 또 두 번째 오리피스 영역 부근에서 작은 재순환 영역이 생겨났다. 그 이유로 유동이 두 번째 오리피스로 원활하게 전달이 되지 않으면서 압력차가 4일 때 보다 3일 때가 더욱 크게 생겨난 것이다. 그러나 5와 6를 비교해 보면 3과 4 때와는 다르게 5의 경우가 6에

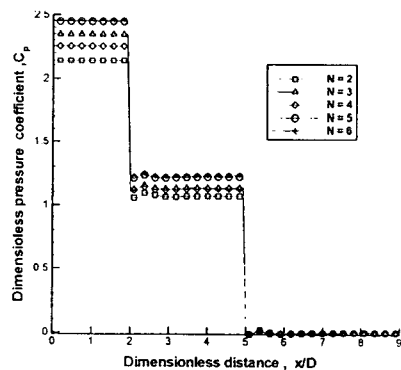


Fig. 14 Pressure drop along the centerline with the different numbers of the holes

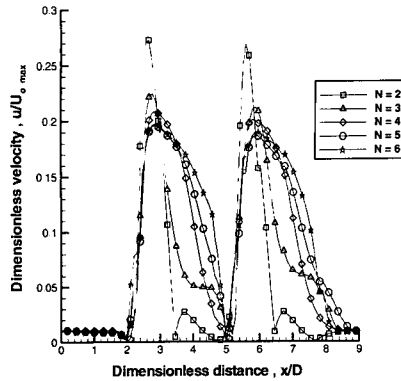


Fig. 15 Velocity distribution along the centerline with the different numbers of the holes

비해서 -0.005 가 낮았다. 이는 N 이 5일 때 구멍의 위치가 오리피스 위에 72° 의 각 차이를 두고 위치해 있어서 비대칭의 정도가 3의 경우보다 훨씬 줄어들었기 때문이다. 이에 유동이 어느정도 대칭을 이루면서 뒤 오리피스에 흐름이 원활해지고 오리피스 주변에서 작은 재순환 영역이 발생하지 않았기 때문에 N 이 5일 때가 6일 때보다 더 작게 나온 것이다. 구멍의 갯수(2 - 6)에 따른 속도 분포를 중심선을 통하여 나타낸 그림은 Fig. 15이다. 그림에서 보면 N 이 4에서 6까지는 오리피스를 지나는 순간의 속도 차이만 있을 뿐, 속도 분포는 유사했다. 그러나 N 이 2일 때와 3일 때는 많이 다르게 나타났다. 먼저 2일 때를 알아보면 2개의 구멍에서 많은 유량이 통과되면서 무차원 속도가 0.273까지 상승을 한다. 그러나 다른 구멍수에 비해 상대적으로 작은 압력차와 구멍이 없는 영역으로 유량이 분산되면서 S영역이 시작되는 부분을 기준으로 했을 때 1.45D에서 더 이상 유동이 관을 통해 진행하지 못하고, 벽쪽으로 퍼지면서 벽을 따라 흐르게 된다. 그중 일부는 두 번째 오리피스를 통해 흘러가고 나머지는 중심쪽으로 되돌아 오는 유동이 생기게 되었다. 그래서 1.45D에서 속도 크기가 0에 가까운 0.0045인 것이다. 그리고 N 이 3일 때를 보면 오리피스를 지나는 순간에 속도가 4.825 m/s로 상승하지만 관을 통해 흐르면서 속도가 감소하여 2.1D에서 0.05로 일정하게 유지되다가 두 번째 오리피스를 만나면서 급속도로 감소하는 것을 볼 수 있었다.

4. 결론

FLUENT code를 이용하여 원추형 오리피스에 대한 감압효과와 재순환 영역에 대한 영향을 조사 하였다. θ , S , α , t , N 에 대해서 변화시키면서 수치해석 결과를 구했으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 벽과 오리피스 사이의 각도(θ)를 θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 로 변화시켰지만 전체 압력감소에 대해서는 $\pm 2.0\%$ 내외로 감압차가 나지 않았다. 그러나 S영역에서 재순환 영역은 유동량의 크기차에 의하여 θ_3 의 경우가 가장 빨리 시작되었다. 그래서 재순환 중심의 위치가 첫 오리피스에서 가장 가까운 위치에 있었다. 또 θ 의 각이 작을수록 박리 영역의 두께가 두터운 것을 볼 수 있었다.

(2) 두 오리피스간의 길이(S)를 S_1 , S_2 , S_3 로 하여 조사한 결과 전체 압력감소와 재순환 중심위치에 대해서 영향을 미치지 않았다. 그러나 두 번째 오리피스를 통과 할 때 출구압력($P_{\text{gauge}} = 0$)보다 낮은 $P_{\text{abs}} = -3.12 \text{ kpa}$ 까지 감소하였는데, 이것은 공동현상이 발생 할 가능성이 있었다.

(3) 두 오리피스의 상대 각도(α)를 α_1 , α_2 , α_3 , α_4 로 회전하여 계산한 결과는 α 가 작을수록 유동의 흐름이 원활하면서 재순환이 빨리 일어났고 그 결과 재순환 유동의 중심 위치가 첫 오리피스에 가깝게 있었으며 벽에서의 재순환 영역의 중심위치 폭은 더욱 얇았다. 그러나 전체 압력감소에는 영향을 미치지 않았다.

(4) 면적이 같은 구멍에 대해서 형상을 원형, 사각형, 삼각형으로 하여 조사했을 경우에는 원형이 사각형과 삼각형에 비해 약 20% 내외의 감압 효과가 더 있음을 알 수 있었다.

(5) 오리피스의 두께를 변화시켜 계산한 결과 두께가 얇을수록 감압효과가 최고 23.1%나 더 좋았고, 두께가 있는 경우보다 없는 경우가 S영역 부분에서 재순환 영역의 중심 위치가 뒤에 있었다. 또 두께를 0.5D에서 1.5D까지 변화시켜도 재순환 중심위치의 차이는 $\pm 6\%$ 내외 안에 있었다. 그리고 재순환 영역의 폭은 구멍의 두께가 클수록 더욱 넓어졌다.

(6) 오리피스에서 흐르는 전체 유량을 일정하게 하면서 갯수(N)의 변화를 주어 계산한 결과 단면적이 작을수록 감압의 효과가 최고 14.65%까지

더 좋았으나 N이 3일 때만 오리피스를 지난 후 유동의 대칭이 심하게 깨지면서 오히려 N이 4일 때 보다는 감압이 컸다.

이와 같이 본 연구에서 θ , α , S, N, t, 구멍의 형상에 대해서 변화시켜 가며 계산 해본 결과, N, t, 구멍의 형상에 대한 변화가 압력에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 그리고 θ , α , N, t에 대한 변화는 재순환 영역의 중심위치와 박리 폭에 영향을 주는 것을 알 수가 있었다.

후 기

본 연구는 전남대학교 2001년 BK21 지역대학 육성 사업단(수송 기계 분야) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) White, F. M., 1991, *Viscous Fluid Flow*, 3rd ed., McGraw - Hill, Inc., pp. 421~431.
- (2) Anderson and Szewczyk, "Effects of a Splitter Plate on the near Wake of a Circular Cylinder in 2 and 3-dimensional Flow Configurations," Vol. 23, Issue 2, pp. 161~174.
- (3) Minh, H. Ha. and Chassaing, P., 1997, "Perturbations of Turbulent Pipe Flow," *Turbulent Shear Flows*, Vol. 1, pp. 178~197.
- (4) Eaton, J. K. and Jhonston, J. P., 198, "Backward Facing Step Flow," *The 1980 - 1981 Afosr-Httm-Stanford Conference on Complex Turbulent Flows*, Vol. 1, pp. 275~283.
- (5) Morrison, G. L., Hauglie, J. and DeOtte, R. E., Jr, 1995, "Beta Ratio, Axisymmetric Flow Distortion and Swirl Effects Upon Orifice Flow Meters," *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 6, pp. 207~216.
- (6) Kyong-Won Seo, 1996, "An Experimental Investigation of Effects of Side-Orifices on Pressure Drop in Vertical Flow," 한국과학기술원 석사학위논문.
- (7) Guohui Gan and Saffa B. Riffat, 1997, "Pressure Loss Characteristics of Orifice and Perforated Plates," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 14, pp. 160~165.
- (8) Kim, B. C., Pak, B. C., Cho, N. H., Choi, D. S., Choi, Y. M. and Pak, K. A., 1997, "Effects of Cavitation and Plate Thickness on Small Diameter Ratio Orifice Meters," *Flows Meas. Instrum.*, Vol. 8, No. 2, pp. 85~92.
- (9) Richardson, B. L., 1959, "Some Problems in Horizontal Two-Phase Two-Component Flow," Ph.D. Dissertation, Purdue University
- (10) Giot, M., *Singular Pressure Drops.*, 1981, In Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering, J. M. Delhaye, M. Giot, and M. L. Riethmuller, Eds., Hemisphere.
- (11) Delhaye, J. M., 1981, *Singular Pressure Drops in Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries*, A. E. Bergles, J. G. Collier, J.M. Delhaye, G. F. Hewitt and J. Mayinger, Eds., Hemisphere, New York.
- (12) *FLUENT User's Guide*, 1995, Fluent Inc., Lebanon, NH.
- (13) Stichlmair, J. and Mersmann, A., 1979, "Dimensioning Plate Columns for Absorption and Rectification," *Int. Chem. Eng.*, Vol. 18, pp. 223~236.