

사각덕트 내 이단 오리피스를 지나는 유동의 압력강하에 대한 수치해석

송우열[†] · 김유곤^{*}

A Numerical analysis on the pressure drop of the flow field past a two-staged orifice in a rectangular duct

Woo-Yeol Song , You-Gon Kim

Key Words: FLUENT code, κ - ϵ model, Orifice(오리피스), Pressure Drop(압력감소), Recirculation Region(재순환 영역), SIMPLER Algorithm(SIMPLER 알고리즘), Separation Phenomenon(박리현상)

Abstract

A numerical study has been performed on the flow past a two-staged orifice in a rectangular duct. The flow field including the recirculation region behind the orifice was investigated and the pressure drop was calculated. Water was used as a working fluid and the flow was treated as the turbulent flow, of which the Reynolds number was 6000. The main parameters for the pressure drop and the recirculation region were the orifice's inclined angle against the duct, the interval between two orifices, the shape of the orifice's hole having the same area, and the change of the hole position at the same interval. The variation of the flow field was investigated with each parameter. Consequently, it was found that the most dominant parameter influencing the drop of the pressure was the change of the hole position at the same interval between orifices. Especially when the interval between orifices was narrow and the relative position the holes was changed, its effect to the flow field was shown most drastically as a result of this study. The SIMPLER algorithm with FLUENT code was employed to analyze the flow field.

기호설명

D : 덕트 직경(= 8cm)

h : 오리피스 구멍의 모양

e : 오리피스 구멍의 치우침

(e₁ = 0.0cm, e₂ = 0.5cm, e₃ = 1.0cm,

e₄ = 1.5cm, e₅ = 2.0cm)

θ : 덕트와 오리피스 사이의 경사각

($\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_3 = 75^\circ$, $\theta_4 = 90^\circ$

$\theta_5 = 105^\circ$, $\theta_6 = 120^\circ$, $\theta_7 = 135^\circ$)

d : 두 오리피스 사이의 간격

(d₁=1cm, d₂=2cm, d₃=3cm, d₄=4cm,

d₅=5cm, d₆=6cm, d₇=7cm, d₈=8cm,

d₉=16cm, d₁₀=24cm, d₁₁=32cm, d₁₂=40cm)

x/D : 무차원 길이 상수

C_P : 무차원 압력 상수(= $\Delta P / (1/2\rho U_o^2)$)

u/U_o : 무차원 속도 상수

U_o : 오리피스 구멍을 지나는 평균 속도

(= 0.64m/s)

[†] 전남대학교 기계공학과 대학원

E-mail : songwooyol@naver.com

TEL : (062)530-0206 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 기계시스템공학부

오리피스^[1]는 압력이 높은 유체를 압력이 낮은 유체로 변환하거나, 유체 흐름을 제한하기 위한 목적의 제한용 오리피스와 유량측정을 위해 차압(Differential Pressure)을 발생시키는 유량 측정용 오리피스로 구분된다. 유체가 오리피스의 교축부에 통과 할 때, 단면적의 변화로 유속의 변화는 압력변화를 일으키는데, 이러한 압력 손실량을 계량적으로 이용하는 방법이 오리피스를 이용한 유량측정용인 것이고, 압력 손실량의 유체흐름에 직접적으로 이용하는 것이 제한용 오리피스이다. 본 연구는 사각 덕트 내 이단 오리피스를 이용하여 압력감소(Pressure Drop)와 후류유동(Rear Flow)^[2]에 대하여 전산 해석하였다. 실제로 제철소에서 사용중인 제한용 오리피스는 열연 공장에서 후판(Slab)에 열을 가할 때에 생기는 산화물의 박편(Scale)을 제거하기 위하여, 펌프에서 고압수를 만들어 후판표면의 박편을 제거한다. 여기서 오리피스는 펌프 토출부분의 By-Pass Line에 설치되어, 무부하(Unloading)때에 고압수인 박편제거용물(Descaling Water)을 감압하여 수로로 배출시킬 때 사용되어진다. 이와 같이, Power Plant, 의료 연구 등에서 사용되어지기 때문에 오래 전부터 많은 연구의 대상이 되어왔다. 오리피스는 유체역학 부분에서 많이 사용되어지고 있는 유량측정 장치의 하나로서 유동 박리 및 그 이후의 유체 유동 발달과정을 해석하는 것은 매우 의미 있는 일이라 할 수 있다. 일반적으로, 오리피스 링을 지나는 유동은 박리와 더불어 링 하류로 크게 변형이 이어지고, 박리 점과 재부착점 주위에서 유동이 정체되며, 속도는 느리나 벽을 따른 역방향 유동이 발생한다. 또한 주 유선과 재순환 영역사이의 경계에 혼합 층이 생기며, 혼합층 내에서는 매우 강한 박리전단유동이 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 후량 계단에서의 유동현상을 규명하였다. 이러한 오리피스의 다양한 현상들은 여러 가지 요소(Parameter)등에 의한 영향을 받음을 알 수가 있다. 이에 따른 많은 연구가 있었다. 먼저 β Ratio(= d / D)^[5]의 감압에 대한 영향과 Re수가 난류인 경우에 압력손실계수에 영향이 없음이 여

러 실험을 통해서 증명되어졌다. 또 수직 유동시에 측면 오리피스가 동일면적에 대한 다양한 형태는 두 오리피스 사이 간격과 배치에 따른 감압과 유동 현상에 대해서 조사되어 졌다.^[6] 이와 같이 본 연구에서는 실제 열연 공장에서 사용되어지고 있는, 오리피스에서의 압력 감소와 유동 해석을 하기 위하여 상용 프로그램인 FLUENT code^[7]를 이용하여 작동 유체인 물에 대한 Re수를 6000에 대해서 계산하였다. 연구 요소로는 벽면과 오리피스와의 사이 각에서의 효과와 두 오리피스 사이의 거리에 따른 변화를 조사하였다. 그리고 구멍 모양과 구멍 위치에 따른 압력강하와 유동현상에 대한 영향을 조사하였다.

2. 이론해석

2.1 계산 모델

본 연구에서 이단 오리피스에 대한 영향을 주는 요소들을 Fig. 1에 나타내었다. 벽과 오리피스 사이각도와 두 오리피스 간의 길이에 따른 유동장과 압력 변화를 계산하였다.

2.2 지배 방정식

본 연구는 FLUENT code로 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 이산화 된 Navier-stoke 방정식과 연속 방정식을 풀었다. 관내의 흐름을 나타내는 지배 방정식을 기술하기 위해 유체는 3차원 축대칭 비압축성에 대한 난류 유동장으로 $k - \epsilon$ 일정한 점성을 가진 것으로 가정을 하였다.

2.3 경계조건

벽 부근에서는 속도에 대한 경계 조건으로

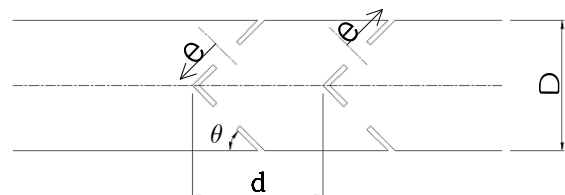


Fig. 1 The Schematic Diagram

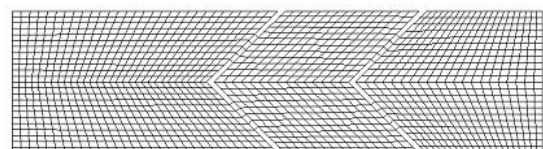


Fig. 2 The Grid Generation

벽함수(Wall Function)를 사용하여 $k-\varepsilon$ 방정식을 대신했다.

입구조건

i) 속도 : $U = 0.08\text{m/s}$

ii) 난류운동에너지

$$\text{Wall} : k = \frac{U_{\tau}^2}{\sqrt{C_{\mu}}}$$

$$\text{Free stream} : k = 0.002U^2$$

두 식을 선형화 하였다.

iii) 난류에너지 소산을

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

l 은 mixing length로 κr 과 $0.085R$ 의 최소값이다. ($\kappa = \text{karman vortex 상수}$)

출구조건

Outflow를 지정하여 입구의 유량과 출구의 유량이 같은 상황으로 가정을 하였다.

벽부근에서 k 와 ε 에 대한 경계조건

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

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

3. 수치해석

평균속도를 0.08 m/s 로써 완전히 발달된 속도 분포를 입구 조건으로 하였고 Re 수는 6000 이다.

3.1 덕트와 오리피스 사이의 각도(θ)에 대한 연구

벽과 오리피스 사이의 θ 를 각각 θ_1 에서 θ_7 까지 15° 간격으로 변화시켜 압력 감소와 오리피스 뒤의 후류 유동의 발달과정을 살펴보았다. Fig. 3은 θ 가 변함에 따라 두 오리피스 사이의 간격(d_8)에 대해서 직사각형 구멍($1\text{cm} \times 4\text{cm}$)을 통과하는 축방향 압력 변화 분포를 나타낸 것이다. 전체 압력 변화를 살펴보면 θ_1 일 때 $C_p = 0.969$, θ_2 일 때 $C_p = 0.985$, θ_3 일 때 $C_p = 0.945$, θ_4 일 때 $C_p = 0.733$, θ_5 일 때 $C_p = 0.925$, θ_6 일 때 $C_p = 1.001$,

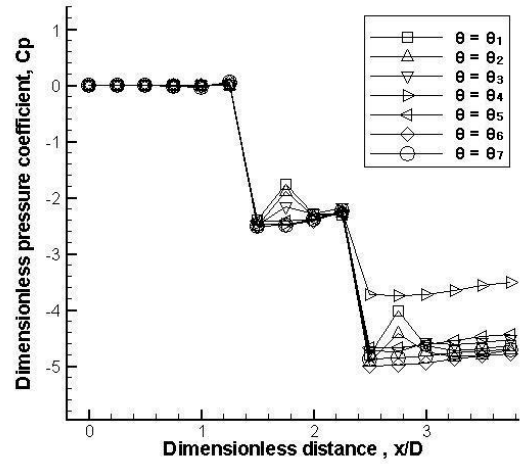


Fig. 3 Pressure drop along the centerline with different angles at $d=d_8$

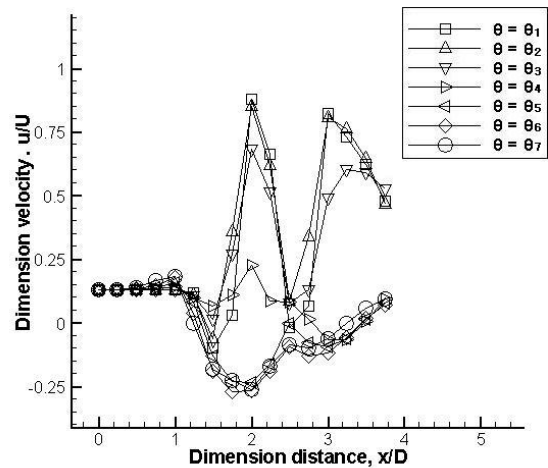
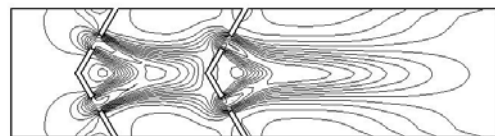
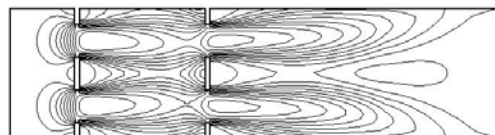


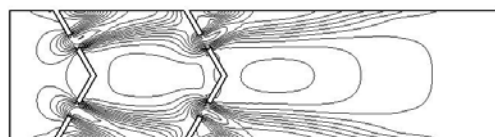
Fig. 4 Velocity along the centerline with different angles at $d=d_8$



(a) $\theta = \theta_2$



(b) $\theta = \theta_4$



(c) $\theta = \theta_6$

Fig. 5 Streamlines with different angles(θ)

θ_7 일 때 $C_p = 0.985$ 였다. 감압효과가 떨어지는 θ_4 를 제외하면 전체 감압효과 차이는 8.2% 이내이다. 유동의 특성은 $\theta_1 \sim \theta_3$, θ_4 , $\theta_5 \sim \theta_7$ 에서 각각 다른 특성을 보여주고 있다. $\theta_1 \sim \theta_3$ 는 오리피스를 통과하고 $x/D=1.75$ 와 $x/D=2.75$ 위치에서 국부적으로 압력강하가 낮아진다. 이것은 유동이 오리피스를 지나면서 두개의 흐름으로 나뉘었고, 각도의 영향으로 흐름은 가운데 방향으로 모이게 되면서 유동이 충돌하여 운동에너지가 감소하여 압력강하가 나타난 것이다. θ_4 에는 가장 낮은 압력차를 보였다. 오리피스를 통과한 유동이 방향의 변화 없이 흐르기 때문에, 운동에너지가 감소 없이 다음 오리피스로 통과할 수 있었다. $\theta_5 \sim \theta_7$ 는 오리피스를 통과한 유동이 벽을 타고 흐르면서 에너지 손실이 일어난다. 전체적으로 θ_4 에서 떨어질수록 높은 압력차를 보였다.

3.2 두 오리피스간의 길이(d)에 대한 고찰

두 오리피스간 길이를 d_8 에서 d_{12} 까지 변화시켜 압력 감소와 후류 유동의 발달과정을 살펴보았다. Fig. 6는 θ_1 일 때 오리피스간 길이를 d_8 에서 d_{12} 까지 변화시킬 때 축방향으로 압력변화를 나타내는 그래프이다. 오리피스를 지나고 나서 압력강하의 거동은 각각 비슷한 형태를 보이고 있다. 앞단 오리피스를 통과할 때는 d_8 에서 d_{12} 까지 비슷한 유동흐름을 보여준다. 그리고 사이 거리의 차이 때문에 압력강하 되는 위치가 다르지만, 전체적으로 둘째 단에서 압력 강하되는 경향은 거의 일치함을 보여준다. 오리피스 통과 직후 압력이 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 오리피스와 벽의 각도가 θ_4 미만이기 때문이다. 오리피스를 통과하면서 유체의 흐름은 2개로 나뉘고, 이것이 서로 충돌하면서 오리피스 통과 직후 압력이 상승한다. 전체적으로 오리피스 사이 거리가 늘어났지만, 그에 따른 압력 강하는 찾아보기 어렵다. 오히려 오리피스 사이 거리가 늘어날수록 압력강하가 줄어드는 경향이 나타난다. d_9 의 경우 압력차가 최대일 때와 6.8%정도 차이가 난다.

3.3 구멍 모양에 따른 연구

오리피스 모양을 직사각형($1\text{cm} \times 4\text{cm}$, h_1)와 정사각형($2\text{cm} \times 2\text{cm}$, h_2)일 때 각도를 변화시켜 압력 감소와 후류 유동의 발달과정을 살펴보았

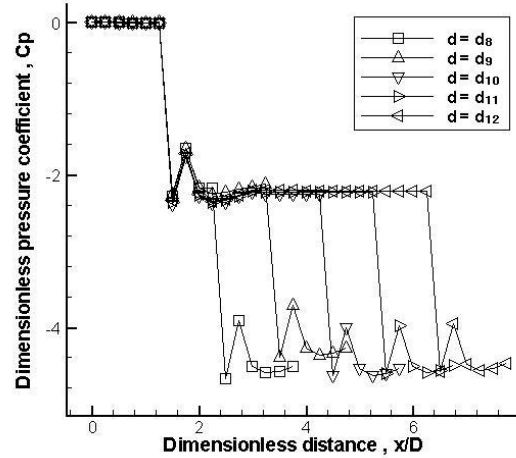


Fig. 6 Pressure drop along the centerline with different intervals(d) at $\theta = \theta_1$

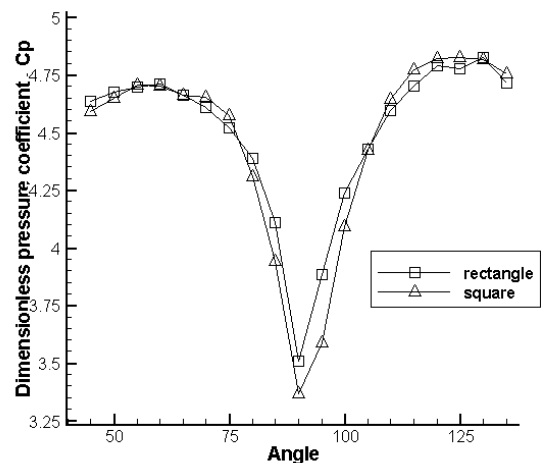


Fig. 7 Pressure drop along the centerline with different hole(h) at $\theta = \theta_1$, $d = d_8$

다. Fig. 7은 $\theta_1 \sim \theta_7$ 에서 h에 따른 축방향의 압력변화를 나타내는 그래프이다. 구멍모양에 따라 $\theta_1 \sim \theta_3$, $\theta_3 \sim \theta_5$, $\theta_5 \sim \theta_7$ 에 다른 특성의 압력차가 나타난다. $\theta_1 \sim \theta_3$ 에서는 h_2 가 최대 $C_p = 0.009$ 높은 압력형태를 보여 주고 있다. θ_4 에서는 h_1 이 $C_p = 0.030$ 높은 압력형태를 보여 주고 있다. $\theta_5 \sim \theta_7$ 에서는 h_2 가 $C_p = 0.014$ 높은 압력형태를 보여 주고 있다. h가 h_2 일 때 h_1 보다 완전 발달된 유동이 오리피스를 통과한다. 따라서 h_2 일 때 오리피스를 통과하는 운동에너지는 h_1 보다 높다. 이것은 오리피스를 통과한 후 경사각에 의해서 운동에너지가 충돌하여 소멸되는 에너지 역시 높다고 할 수 있다. $\theta_1 \sim \theta_3$, $\theta_5 \sim \theta_7$ 에서는 오리피스의 경사각에 의해서 오리피스를 통과한 두 유동이 충돌하여 소

떨하게 되고, h_2 의 경우 유동의 운동에너지가 높기 때문에 소멸되는 에너지 역시 높다. 그러나 $\theta_3 \sim \theta_5$ 에서는 충돌하는 유동이 적기 때문에 운동에너지의 소멸 역시 적다. 이것은 h_2 가 $\theta_3 \sim \theta_5$ 에서 압력강하가 h_1 보다 낮은 이유가 된다. 즉 h 가 h_2 일 경우 h_1 보다 완전 발달된 유동이 흐르기 때문에 경사각에 따른 압력강하 변화가 명확하게 나온다.

3.4 구멍 위치에 따른 연구

오리피스에 있는 구멍위치에 따른 압력 감소와 후류 유동의 발달과정을 살펴보았다. 오리피스면 중앙에 각각 1개의 구멍이 있다. 오리피스가 θ_1 이므로 이것을 기준으로 앞단 오리피스의 h 는 중앙쪽으로 이동하고, 뒷단 오리피스의 h 는 벽쪽으로 이동하여 이동위치를 극대화 시켰다. 유동흐름은 오리피스 사이의 거리가 충분히 멀리 있을 때와 극단적으로 가까울 때 압력강하 효과가 매우 다른 것을 관찰할 수 있었다.

3.4.1 두 오리피스간 길이가 d_8 이상일 때

구멍위치가 가운데 있을 때 가장 압력강하가 낮게 나타난다. 앞단 오리피스를 통과한 유체는 두 흐름으로 나뉜다. 두 흐름은 벽과 오리피스의 경사각에 의해서 충돌하게 되고 하나의 흐름으로 합쳐진다. 그리고 뒷단 오리피스를 거치면서 흐름이 나누어지고 합쳐지는 것을 반복하게 된다. 이 과정에서 구멍위치가 가운데 경우에는 앞단의 오리피스를 지나고 뒷단의 오리피스를 지날 때 같은 위치에 구멍이 있기 때문에 유체의 흐름이 가장 짧아진다. 그러나 구멍의 위치가 이동을 할 경우 앞단 오리피스에서는 유체의 충돌로 인한 운동 에너지 손실이 일어나고, 뒷단 오리피스의 벽쪽까지 유체가 흐르기 위해서는 보다 많은 운동 에너지를 필요로 하게 된다. 그에 따라 압력강하 효과 또한 상승하게 된다. 전체 압력강하를 살펴보면 e_1 일 때 $C_p=4.52$, e_2 일 때 $C_p=4.60$, e_3 일 때 $C_p=4.69$, e_4 일 때 $C_p=5.06$, e_5 일 때 $C_p=6.49$ 이었다. 특히 e_5 에서는 구멍 이동이 없을 때 보다 42.6% 향상된 압력강하 효과가 나타났다.

3.4.2 두 오리피스간 길이가 d_8 이하일 때

두 오리피스 사이를 d_1 부터 d_8 까지 변화하여 압력 강하 및 후류 유동의 발달과정을 살펴보았다.

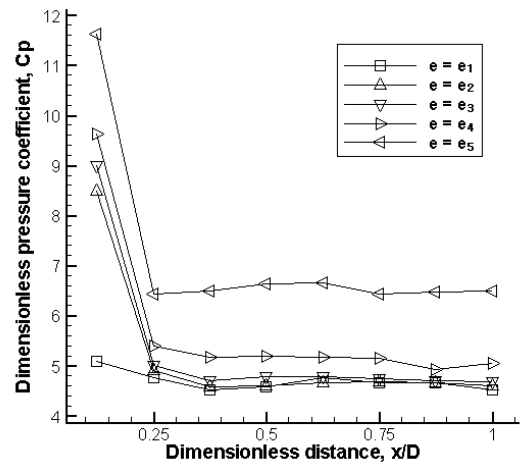


Fig. 8 Pressure drop along the centerline with different hole positions at $\theta=\theta_1$, $d=d_8$

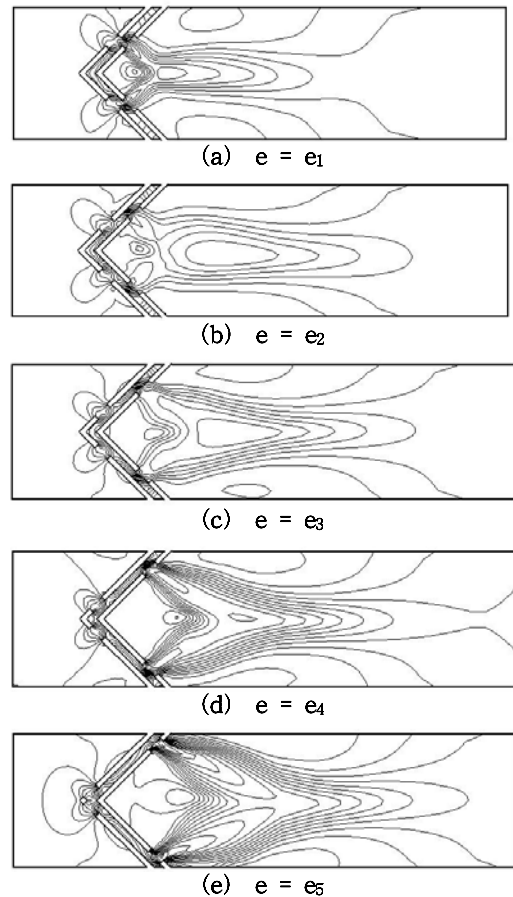


Fig. 9 Streamlines with different hole positions

d_2 이하일 때는 압력 강하효과가 매우 많이 나타났다. 구멍이동이 없을 때와 비교해서 e_2 일 때 67%, e_3 일 때 76.78%, e_4 일 때 89.06%, e_5 일 때 128.5% 향상된 압력강하 효과를 보여줬다. 오리피스간격이 너무 좁기 때문에 앞단 오리피스에서 통과한 운동에너지가 뒷단 오리피스에 부딪혀 감

소하게 된다. 구멍위치 변화가 클수록 감소되는 운동에너지는 큰 폭으로 증가하게 된다. d_2 이상에서는 d_8 이상에서의 압력 강하와 비슷한 경향을 보인다.

4. 결론

FLUENT code를 이용하여 오리피스에 대한 감압효과와 재순환 영역에 대한 영향을 조사 하였다.

(1) 벽과 오리피스 사이 각도를 θ_1 에서 θ_7 까지 변화시켰다. 유동 특성은 $\theta_1 \sim \theta_3$, θ_4 , $\theta_5 \sim \theta_7$ 에서 다르게 나타난다. $\theta_1 \sim \theta_3$ 은 오리피스를 통과한 두 유동이 충돌하여 압력강하가 일어나고 θ_2 에서 가장 압력강하가 잘 일어난다, θ_4 는 오리피스가 수직이기 때문에 압력강하 효과가 적다. $\theta_5 \sim \theta_7$ 은 오리피스를 통과한 유동이 벽에 충돌하면서 압력강하가 잘 일어나고 θ_6 에서 가장 압력강하가 잘 일어난다.

(2) 두 오리피스 사이의 간격을 d_8 , d_9 , d_{10} , d_{11} , d_{12} 로 변화시켰다. 간격에 따른 유동의 차이는 있었지만, 오리피스를 통과한 전후의 압력차는 비슷한 형태를 보였다.

(3) 오리피스 내 구멍 모양을 각각 직사각형(1cm × 4cm)과 정사각형(2cm × 2cm)으로 하고, 덕트와 오리피스의 각도를 θ_1 에서 θ_7 까지 변화시켰다. 각도에 따라서 압력강하 효과는 구멍 모양에 따라 다르게 나왔다. $\theta_1 \sim \theta_3, \theta_5 \sim \theta_7$ 에서는 정사각형이 직사각형보다 C_p 의 값이 0.014 더 많은 압력강하를 보여주며, $\theta_3 \sim \theta_5$ 에서는 직사각형이 정사각형보다 C_p 의 값이 0.030 더 많은 압력강하를 보여주었다.

(4) 앞단 오리피스와 뒷단 오리피스 구멍위치를 상대적으로 e_1 , e_2 , e_3 , e_4 , e_5 만큼 이동하였다. 그리고 오리피스 간격이 d_8 이상 일 때와 d_8 이하 일 때 유동특성을 조사하였다. d_8 이상에서는 구멍위치를 e_1 , e_2 , e_3 , e_4 , e_5 로 이동하여 조사한 결과 구멍위치의 이동량이 많을수록 압력강하는 더 많이 나타났다. 구멍 이동이 없을 때 보다 구멍 이동이 최대일 때 42.59% 향상된 압력강하 효과를 볼 수 있었다. d_8 이하에서 역시 구멍위치를 e_1 , e_2 , e_3 , e_4 , e_5 로 이동하여 조사하였으며, 두 오리피스 간격이 2cm 이하일 때 압력강하 효과가 급격히 올라간

다. 구멍위치의 변화가 클수록 압력강하는 크게 나타났다. 구멍 이동이 없을 때 보다 구멍 이동이 최대일 때 128.5% 향상된 압력강하 효과를 볼 수 있었다.

참고문헌

- (1) Frank M. White, 1991, *Viscous Fluid Flow*, 3rd ed., McGraw - Hill , Inc., pp.421-431.
- (2) Anderson and Szweczyk, "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) G. L., Morrison, J. Hauglie and R. E. DeOtte, Jr, 1995, "Beta ratio, axisymmetric flow distortion and swirl effects upon orifice flow meters," *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 6, pp. 207-216
- (6) Moon-Hyun Chun and Kyong-Won Seo, 1996, "An Experimental Investigation of Effects of Side-Orifices on Pressure Drop in Vertical Flow," 한국과학기술원 학위논문 초록집,
- (7) *FLUENT User's Guide*, 1995, Fluent Inc., Lebanon, NH.
- (8) 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.
- (9) 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. 84~92.
- (10) Richardson, B. L., 1959, "Some Problems in Horizontal Two-Phase Two-Component Flow," Ph.D. Dissertation, Purdue University