

이단 원추형 오리피스를 지나는 유동장에 대한 수치해석

김연수*· 김유곤**

Numerical Analysis for the Flow Field past a Two-Staged Conical Orifice

Yeon-Soo Kim , You-Gon Kim

Key Words : Conical Orifice(원추형 오리피스), Pressure Drop(압력감소), FLUENT code, PISO Algorithm, $\kappa - \epsilon$ model, Recirculation Region(재순환 영역), Separation Phenomenon(박리현상), Cavitation(공동현상)

Abstract

The objective of the paper was to measure 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(L) 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. It was found that the shape of the orifice's hole affected the pressure drop and the flow field a lot, But the other parameters did not make much differences to the pressure drop. The PISO algorithm with FLUENT code was employed.

기호설명

- D : 관의 지름(= 10 cm)
 d : 구멍의 지름(= 0.6 cm)
 θ : 관과 오리피스 사이의 경사각
 (= 30°, 45°, 60°)
 L : 두 오리피스 사이의 간격
 (= 25 cm, 30 cm, 35 cm)
 α : 앞 오리피스에 대한 뒤 오리피스의 상대 회전각(= 0°, 15°, 30°, 45°)

1. 서론

오리피스⁽¹⁾는 높은 압력의 유체를 낮은 압력의 유체로, 유체 흐름을 제한하기 위한 목적의 제한용 오리피스와 유량측정을 목적으로 차압

(Differential Pressure)을 발생시키는 유량측정용 오리피스로 구분한다. 유체가 오리피스의 교축부에 통과 할 때, 단면적의 변화로 유속의 변화는 압력변화를 일으키는데, 이러한 압력손실량을 계량적으로 이용하는 방법이 오리피스를 이용한 유량측정용인 것이고, 압력손실량의 유체흐름에 직접적으로 이용하는 것이 제한용 오리피스이다. 본 연구는 실제 광양제철소에서 사용되어지는 원추형 오리피스(Conical Orifice)를 이용하여 압력감소(Pressure Drop)와 후류유동(Rear Flow)⁽²⁾에 대하여 해석하였다. 열연 공장에서는 후판(Slab)에 열을 가할 때에 생기는 산화물의 박편(Scale)을 제거하기 위하여, 펌프에서 고압수를 만들어 후판 표면의 박편을 제거한다. 여기서 오리피스는 펌프 토출부분의 By-Pass Line에 설치되어, 무부하(Unloading)때에 고압수인 박편제거용물(Descaling Water)을 감압하여 수로로 배출시킬 때 사용된다. 이와 같이, 실제로 Power Plant, 의료 연구 등에서 사용되어지기 때문에 오래 전부터 많은

* 회원, 전남대학교 대학원 kysoo@orgio.net

** 회원, 전남대학교 기계공학과
 ygkim@chonnam.ac.kr

연구의 대상이 되어왔다. 원관내 오리피스 링이 부착된 기하학적 형상은 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 혼합층이 생기며, 혼합층내에서는 매우 강한 박리전단유동이 발생한다. 이러한 영역에서는 난류량들이 급격히 증가하고, 하류로 갈에 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 후랑 계단에서의 유동현상을 규명하였다. 이러한 오리피스의 다양한 현상들은 여러 가지 요소(Parameter)들에 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 여러 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 열연공장에서 사용되어지고 있는, 원추형 오리피스에서의 압력 감소와 유동 해석을 하기 위하여 상용 프로그램인 FLUENT code⁽⁷⁾를 이용하여 작동 유체인 물에 대한 Re수를 2.0×10^4 에 대해서 계산하였다. 연구 요소로는 벽면과 원추형 오리피스와의 사이각($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)에서의 효과와 두 오리피스 사이의 거리(25 cm, 30 cm, 35 cm) 또 앞 오리피스와 뒤 오리피스를 상대적으로 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 회전시켜 그에 따른 변화를 조사하였다. 마지막으로 위의 여러 가지 요소들에 대해서 단면적이 같은 오리피스 구멍의 형상을 원형, 정사각형, 정삼각형으로 하여 조사하였다.

2. 이론해석

2.1 계산 모델

본 연구에서 원추형 오리피스에 대한 영향을 주

는 요소들을 Fig. 1에 나타내었다. 벽과 오리피스 사이각도($\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)와 두 오리피스 간의 길이($L = 25 \text{ cm}, 30 \text{ cm}, 35 \text{ cm}$) 그리고 두 오리피스의 구멍간의 회전각도($\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)에 따른 유동장과 압력 변화를 계산하였다.

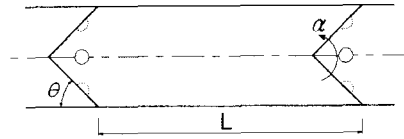


Fig. 1 The Schematic Diagram

Fig. 2는 연구에 사용되어진 mesh는 원추형 형상의 측면에 구멍이 있는 형태이기 때문에 삼각 grid를 이용하여 만들었고, 나머지 부분들은 사각 grid를 이용하였다.

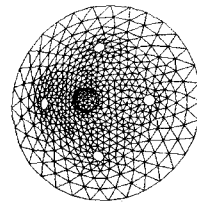


Fig. 2 The Grid Generation

2.2. 지배 방정식

관내의 흐름을 나타내는 지배 방정식을 기술하기 위해 유체는 3차원 축대칭 비압축성에 대한 난류 유동장으로 $k - \epsilon$ 일정한 점성을 가진 것으로 가정을 하였다. 그리고 최종적인 지배 방정식은 다음 식으로 표현된다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

운동량 방정식

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

난류운동에너지 방정식(k - equation)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{1}{Re_k} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial k}{\partial y} \right) \right] + (G - \epsilon)$$

난류에너지소산율 방정식(ε - 방정식)

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{1}{Re_\epsilon} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) \right] + C_1 G \frac{\epsilon}{k} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}$$

이 식에 관련된 변수들은 다음과 같다.

$$G = \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{v}{y} \right)^2 \right]$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad \frac{1}{Re_{eff}} = \frac{1}{Re} + \nu_t$$

$$\frac{1}{Re_k} = \frac{1}{Re} + \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \right), \quad \frac{1}{Re_\epsilon} = \frac{1}{Re} + \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09$$

2.2 경계조건

난류 유동인 경우 벽 부근에서는 급격한 속도구배를 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-ε 방정식을 대신했다. 이때 사용된 식은 오리피스를 지나가는 유동이 압력변화가 급격하며 박리 현상이 일어나기 때문에 Non - equilibrium Wall식을 이용한다.

입구조건

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

ii) 난류운동에너지

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

Free stream : $k = 0.002 U_{max}^2$

두 식을 선형화 하였다.

iii) 난류에너지 소산율

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

l 은 mixing length로 κr 과 0.085R의 최소값이다. (κ = karman vortex 상수)

출구조건

Outflow을 지정하여 입구의 유량과 출구의 유량이 같은 상황으로 가정을 하였다.

벽부근에서 k와 ε에 대한 경계조건

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

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

3. 수치해석

본 연구는 FLUENT code로 PISO 알고리즘을 사용하여 이산화된 Navier-stoke 방정식과 연속 방정식을 풀었다. 평균속도를 0.2 m/s로써 완전히 발달된 속도분포를 입구 조건으로 하였고 Re 수는 2.0×10^4 이었다.

3.1 벽과 오리피스 사이의 각도(θ)에 대한 연구

벽과 오리피스 사이의 각도 30°, 45°, 60°로 변화시켜 압력 감소와 오리피스 뒤의 후류 유동의 발달과정을 살펴보았다. Fig. 3은 θ가 변함에 따라 두 오리피스 사이의 간격(L)에 대해서 중심선으로부터 0 cm, 2 cm, 4 cm 떨어진 곳의 축방향으로의 압력 변화 분포를 나타낸다. 먼저 전체 압력 감소를 살펴보면 θ가 30°일 때 ΔP = 533.74 kpa 이었고, 45°일 때 ΔP = 533.33 kpa이었으며, 60°일 때 ΔP = 524.34 kpa이었다. 그러나 그 차이는 ± 2.0 %내외로 θ에 따른 전체 감압의 효과는 그리 크지 않았다. 그리고 L 영역에서 보면 0cm, 4cm가 떨어진 경우는 θ에 상관없이 비슷했다. 그러나 2cm에서는 처음 오리피스에서 0.08D 떨어진 곳에서 θ가 30°일 때 압력이 278.87 kpa, 45°일 때는 276.33 kpa이었고 그리고 60°일 때는 258.604 kpa이었다. 이것은 θ가 30°일 때는 45°일 때 보다 2.55 kpa이 높았고, 60°일 때 보다는 20.266 kpa이 더 높았

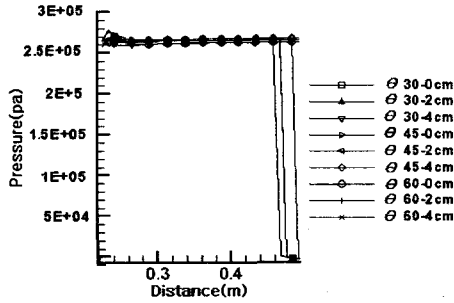


Fig. 3 Axial pressure distribution of L region with different inclined angles(= 30° , 45° , 60°) at different distances(= 0 cm, 2 cm, 4 cm) from the centerline

다. 이것은 전체압력감소에 비해 무시 될 수 있는 값으로 앞 오리피스스의 각도의 변화는 압력감소변화에 큰 효과가 없음을 말한다.

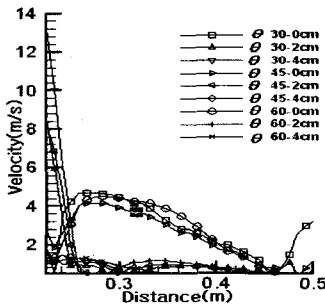
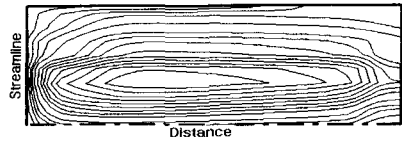


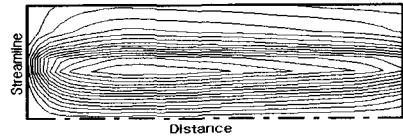
Fig. 4 Axial velocity distribution of L region with different inclined angles (= 30° , 45° , 60°)

Fig. 4에서는 L영역에 대한 중심선으로부터 0 cm, 2 cm, 4 cm 떨어진 곳의 속도 분포를 나타낸 것이다. 속도 분포가 압력과는 달리 위치에 따라서 다양한 변화가 나타났다. 특히 θ 가 60° 일 때 중심선으로부터 2cm 떨어진 곳에서 속도가 다른 각도에 비해서 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 이것은 θ 가 30° , 45° 일 때는 원추내에서 서로 부딪친 다음 원관쪽으로 이동되는데 반해서 θ 가 60° 일 때는 직접 분사하는 것처럼 원관내에서 흐르기 때문으로 간주된다. θ 의 변화에 따른 유동의 다른 형상을 Fig. 5의 유선으로 표현했다. θ 가 60° 일 때 30° 나 45° 보다 축방

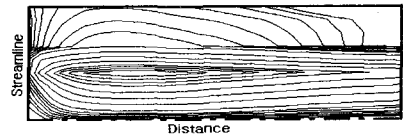
향으로 더욱 큰 운동량을 가지고 있기 때문에 주변 유동과의 더 큰 마찰에 의해서 더욱 빠르게 재순환이 발생하게 된다. 이때, 재순환의 시작 위치를 L영역의 시작 부분으로 하여 관의 지름인 D로 나타내면 다음과 같다. θ 가 30° 일 때는 0.892D이었고, 45° 일 때는 0.803D이었으며, 60° 일 때는 0.719D이었다. 그렇지만 이때 벽에서 중심쪽으로 생기는 박리 영역의 두께는 약 0.2898D로 유사했다.



(a) $\theta = 30^\circ$



(b) $\theta = 45^\circ$



(c) $\theta = 60^\circ$

Fig. 5 Streamlines of L region with different inclined angle(θ)

3.2 두 오리피스스의 길이(L)에 대한 고찰

Fig. 6에서는 전체 압력 감소를 나타내기 위하여 오리피스스의 중심선을 이용하였다. 그림에서 나타낸 것처럼 길이 L의 변화를 25 cm, 30 cm, 35 cm로 변화시켰지만 압력감소의 영향은 거의 무시 할 정도로 작았다. L이 25 cm 경우에 한개의 오리피스를 지날때의 순간 감압은 262.4 kpa 이었고, 오리피스를 지나는 순간에 압력이 약간 상승하는 것을 볼 수가 있었다. 이는 단면적의 증가에 따른 일시적인 현상이었으며, 이때의 증가 압력은 하나의 원추관 오리피스를 지나는 압력에 비하여 2.67 %였었다. 그리고 두 번째 오리

피스를 지날 때 출구압력($P = 0$)보다 낮은 -3.12 kpa까지 감소했다. 그러나 이 값은 대기압 2.339 kpa에서 포화가 되는 물온도 20° C일 때에 비하여 공동현상이 일어날 정도의 낮은 압력은 아니었다. 그렇지만 압력감소가 생기면서 발생하는 공동현상에 의하여 베어링의 마모가 심각한 문제가 되므로 많은 연구가 따라야 할 것이다.

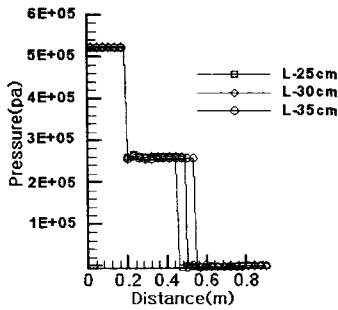


Fig. 6 Pressure drop along the centerline with different intervals(L)

Fig. 7에서는 오리피스의 중심선에서 각각의 길이 L 에 따른 전체 속도분포를 나타내었다. 전체의 압력 변화에서처럼 뒤 오리피스에서 속도 증가 영역이 다를 뿐 큰 변화는 없었다. L 이 25 cm일 때를 기준으로 할 때, 오리피스들을 지날 때는 서로에 대한 속도차이가 $\pm 1.9\%$ 정도 밖에 되지 않아서 거의 같은 속도 분포를 갖았다.

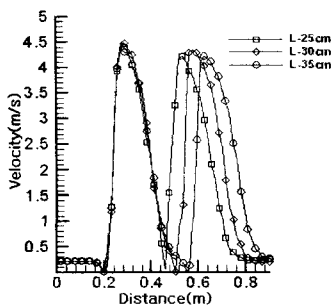


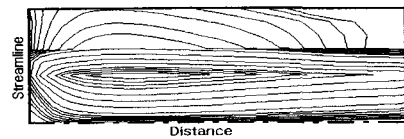
Fig. 7 Velocity distribution along the centerline with different intervals length($L = 25$ cm, 30 cm, 35 cm)

그러나 L 이 25 cm인 경우에 두 번째 오리피스의 바로 앞부분에서 속도가 급격히 떨어지는 것을

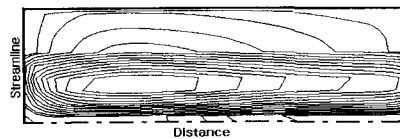
볼 수가 있었다. 이것은 가까운 거리에 따른 속도가 충분히 하류 쪽에 전달이 되지 못하고 오리피스에 부딪치면서 모멘트 에너지가 감소하기 때문이었다. 이로 인하여 L 이 35 cm인 경우가 25 cm인 경우보다 L 영역에서 압력이 약 4.745 kpa 정도 낮았었다.

3. 두 오리피스의 구멍간의 회전각도(α)에 대한 연구

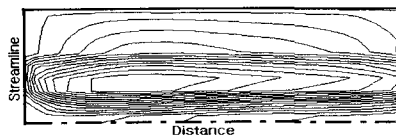
Fig. 8에서는 θ 가 60° 이고, L 이 30 cm인 경우에 대해서 앞 오리피스를 고정시킨채로 뒤 오리피스를 0° , 15° , 30° , 45° 만큼 회전시켰을 때의 유선을 나타낸 것이다. 유선이 α 가 작을수록 재순환 영역이 빨리 일어나는 것을 볼 수 있었다. L 영역의 시작부분을 기준으로 하여 재순환이 시작되는 길이를 관의 지름인 D 로 나타내면 다음과 같다.



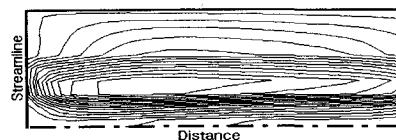
(a) $\alpha = 0^\circ$



(b) $\alpha = 15^\circ$



(c) $\alpha = 30^\circ$



(d) $\alpha = 45^\circ$

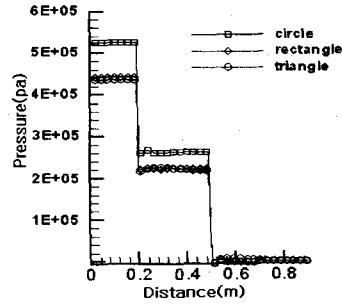
Fig. 8 Streamline of L region by rotated angle(α) ($\theta = 60^\circ$, $L = 30$ cm)

재순환 영역은 α 가 0° , 15° , 30° , 45° 로 변경할 때, 각각 0.719D, 0.7949D, 0.8805D, 1.054D이었다. 그리고 α 각이 클수록 벽에서의 재순환 두께도 더욱 두터워지는 것을 볼 수 있었다. 그 두께는 α 에 따라서 각각 0.2898D, 0.314D, 0.317D, 0.322D이었다.

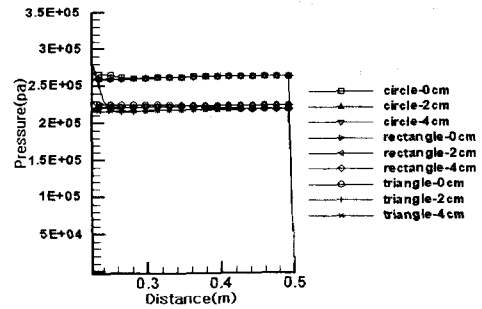
L영역에서 재순환 영역은 처음 재순환 영역이 시작된 부분에서 두께가 두껍고, 하류로 갈수록 얇아진다. 특히 α 가 0° 에서는 첫 번째 오리피스를 통과하면서 생긴 큰 운동량이 두 번째 오리피스에 잘 전달되면서 두께가 급격히 감소하는 것을 볼 수가 있었다. 그러나 α 각이 증가 할수록 운동량이 하류쪽으로 충분히 전달이 되지 않으면서 두 번째 오리피스의 앞에서도 재순환 영역 두께가 두꺼웠고, 순환되는 속도도 크게 나타났다. 그러나 뒤 오리피스의 회전에 따른 압력 감압에 있어서는 거의 영향을 미치지 않았다.

4. 면적이 같은 구멍의 형상에 따른 연구

오리피스의 조건이 θ 가 60° 이고, L이 30 cm이며 동 면적에 대한 다른 구멍 형상에 따른 전체의 압력분포와 중심선으로부터 0 cm, 2 cm, 4 cm 떨어진 곳에서 측방향으로의 압력분포를 Fig. 9에서 나타내었다. 먼저 전체 압력 감소를 보면 원형인 경우 ΔP 가 524.34 kpa이 감소하고 사각형이 441.572 kpa, 삼각형이 435.667 kpa이 감소하였다. 이는 구멍이 원형인 경우가 사각형에 비해 18.74 %, 삼각형에 비해 20.35 %나 감압효과가 뛰어나며, 사각형과 삼각형의 경우는 1.3% 정도의 감압으로 서로 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. L영역에서 압력 분포를 살펴보면 사각형과 원형의 분포는 중심선인 0 cm 에서는 압력이 잠시 상승하였다가 첫 번째 오리피스의 0.556D 떨어진 곳에서부터 압력의 변화가 거의 없었고, 2 cm, 4 cm 에서는 처음부터 압력의 변화가 거의 없었다. 그러나 삼각형에서는 0 cm인 경우에 상승한 압력이 첫 번째 오리피스로부터 2.1D까지 변화하였으며, 특히 2 cm에서는 원형이나 사각형에 비해 압력이 64.45 kpa이 상승한 282.83 kpa이 되었다.



(a) Total pressure drop along the centerline



(b) Axial pressure distribution of L region

Fig. 9 Pressure distribution

Fig. 10에서는 오리피스의 중심선에서 다른 구멍의 형상에 대한 전체 속도 분포를 나타내었다. 전체적인 속도 분포는 비슷했지만 오리피스를 지나는 순간에 원형은 4.518 m/s이었고, 사각형은 4.177 m/s이었으며, 그리고 삼각형은 4.25 m/s

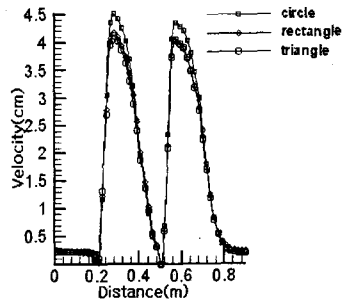


Fig. 10 Velocity distribution along the centerline with different shapes of hole

로 나타나 원형에서 더 큰 상승이 생겼다. 그리고 재순환 영역이 발생하는 위치와 두께 변화는 구멍의 형상에 무관하게 비슷하였다.

4. 결론

FLUENT code를 이용하여 원추형 오리피스에 대한 감압효과와 박리 영역에 대한 영향을 조사하였다. θ , L , α 에 대해서 변화시키면서 수치해석 결과를 구했으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 벽과 오리피스 사이의 각도(θ)를 30° , 45° , 60° 변화시켰지만 전체 압력감소에 대해서는 $\pm 2.0\%$ 내외로 감압차가 나지 않았다. 그러나 재순환 영역은 운동량의 크기 차에 의해서 60° 에서 가장 빨리 시작 되었다.
- (2) 두 오리피스간의 길이(L)를 25 cm, 30 cm, 35 cm로 하여 조사한 결과 전체 압력감소의 영향은 미치지 않았다. 그러나 두 번째 오리피스를 통과 할 때 출구압력($P = 0$)보다 낮은 -3.12 kpa 까지 감소하였는데, 이것은 공동현상이 발생할 가능성이 있었다.
- (3) 두 오리피스의 상대 각도(α)를 0° , 15° , 30° , 45° 로 회전하여 계산한 결과는 α 가 작을수록 재순환이 빨리 일어났고, 벽에서의 재순환 영역의 두께도 더욱 얇았다.
- (4) 면적이 같은 구멍에 대해서 형상을 원형, 사각형, 삼각형으로 하여 조사했을 경우에는 원형이 사각형과 삼각형에 비해 약 20% 내외의 감압 효과가 있음을 알 수 있었다.

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) 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.