

오리피스를 통하는 임계 기체 유동에 관한 연구

김재형[†] · 김희동* · 박경암**

Study of the Critical Gas Flow through an Orifice

Jae-Hyung KIM, Heuy-Dong KIM and Kyung-Am PARK

Key Words : Choke(초크), Compressible Flow(압축성 유동), Critical Pressure Ratio(임계압력비), Discharge Coefficient(유출계수), Orifice(오리피스)

Abstract

Gas flow through orifice is encountered in many diverse fields of engineering applications. In order to investigate the critical gas flow through an orifice system, a computational analysis is performed using axisymmetric, compressible, Navier-Stokes equations which are numerically solved by a fully implicit finite volume method. In the present study, the discharge coefficients of two different types of orifices which are a straight-bore orifice and a sharp-edged orifice, are predicted to obtain the critical flow conditions. The present CFD data are compared with the previous experimental results. The present computational results show that the critical mass flow rate through orifice is well predicted and it is a strong function of Reynolds number. The discharge coefficient increases with the orifice diameter.

1. 서론

최근 화학, 연소 등의 각종 플랜트에서 조업압력이 고압화 되어 가고 있으며, 이에 수반하여 배관계를 통하는 고압기체 유동에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 배관계를 통하는 고압가스의 유동에 있어서 유량의 계측 및 제어는 공학적으로 매우 중요하다.

오리피스(orifice)나 벤츄리(venturi) 및 노즐 등은 유량계측에 이용되어 왔을 뿐만 아니라, 고압기체 유동을 효과적으로 제어할 수 있는 장치로 널리 활용되었다. 이러한 장치들은 주로 내부 유동의 유량측정을 목적으로 사용되는 교축 유량계(contraction flow meter)로, 유로의 단면적을 변화시켜, 얻어지는 압력변화를 이용하여 유량을 산출한

다⁽¹⁾.

일반적으로 노즐이나 오리피스 등을 통하는 기체유동의 경우, 임계압력비(critical pressure ratio)이 하가 되면, 유로의 최소 단면적의 위치에서 유동은 초크(choke)하게 된다. 이 경우 최소 단면부를 통하는 기체 유동의 질량유량은 최대가 되며, 하류의 압력 변동이 최소 단면부의 상류로 전파하지 못하여 질량 유량은 변동하지 않게 된다⁽²⁾.

특히, 오리피스는 그 구조가 간단할 뿐만 아니라, 유지/보수가 필요치 않으며, 배관계에 손쉽게 설치할 수 있는 장점 등을 가지고 있어서 사용분야가 상당히 넓다.

오리피스를 통하는 유동의 압력 손실이 다른 교축장치에 비하여 크므로, 유출계수가 작아 정확한 유량계측이 곤란하다. 또 오리피스 상·하류에서 발생하는 박리영역에서 압력변동이 발생할 수 있어 배관계에서의 진동 및 소음 등의 원인이 될 수 있다⁽⁴⁾.

최근까지 오리피스를 통한 기체 유동에 관하여, 많은 연구들이 수행되어져 왔다. 오리피스를 사용하여, 각종 파워플랜트나 차량 엔진 등에서 소음 저감을 위해 압력 강하를 증가시키기 위한 연구들

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원
E-mail : kimhd@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495

* 안동대학교 기계공학부

** 한국표준과학연구원 유체유동그룹

(6-7)이 행해졌으며, 2 중 오리피스를 이용해 배관내에서 발생하는 충격파를 감금시키거나, 압력 강하를 제어하는 연구들(8)이 수행되었다. 한편, 오리피스의 임계압력비에 미치는 열전달 및 오리피스의 형상 등에 관해서도 많은 연구(9)가 행해졌다. 그러나, 압축성 유동장에 설치된 오리피스의 유출계수(discharge coefficient)나 임계압력비(critical pressure ratio)등에 관한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 특히, 오리피스를 통하는 질량유량은 레이놀즈수나 관직경 및 오리피스의 입구 형상들에 따라 상당히 달라진다. 또, 유량측정을 위한 정압탭(static pressure tap)의 위치에 따라서도 오리피스의 유출계수에 관한 보정과정이 필연적으로 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 오리피스를 통하는 임계 기체유동을 조사하기 위하여, 축대칭, 2 차원 압축성 Navier-Stokes 방정식에 표준 $k - \epsilon$ 난류모델을 적용한 수치계산을 수행하였다. 수치계산에서는 오리피스 형상을 변화시켜, 입구형상에 따른 오리피스의 유출계수를 조사하였으며, 그 결과는 이전의 실험결과와 비교하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 오리피스를 통하는 임계 기체유동에 관하여 수치적으로 모사하기 위하여, $k - \epsilon$ 난류모델을 사용하는 축대칭, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용하였다.

지배방정식들은 대류항에 대해서는 upwind scheme, 시간항에 적분은 4-stage Runge-Kutta scheme 을 적용하여, 이산화 하였다.

Fig. 1 은 본 수치계산에 적용된 오리피스의 유동의 계산영역 및 경계조건을 나타낸다. 오리피스를 중심으로 상·하류의 계산영역은 관 직경(D)의 3 배의 위치까지 설정하였으며, 오리피스의 두께(L)는 2mm 이다. 수치계산에서는 오리피스 형상을 두가지 경우, 즉 일정 단면적을 가지는 형상(straight-bore orifice)과 오리피스 입구를 날카롭게 한(sharp-edged orifice) 두가지가 사용되었으며, 오리피스의 직경은 d 로 정의한다. 본 수치계산의 경계조건으로는 오리피스 상류 경계에 전압력(p_o) 및 전온도(T_o) 조건을 적용한 pressure inlet, 하류경계에는 정압력(p_b) 조건을 적용한 pressure outlet 조건이 각각 사용되었다. 수치계산에 사용된 작동기체는 공기이며, 오리피스 벽면 및 관벽면은 단열 no-slip 벽조건을 적용하였다. 오리피스를 지나는 기체유동의 유출계수를 조사하기 위하여, 오리피스 상류의 전상태량을 고정하고, 하류의 정압 조건을 단계적으로 변화시켜 수치계산을 수행하였다. 본 수치계산에 사용된 계산영역의 상세 치수와 경계조건은 표 1 에 나타나있다.

Fig. 3 은 본 수치계산에 적용된 정렬격자계를 나타낸다. 계산 격자는 대략 25,000 개를 사용하였으며, 관벽 및 오리피스 벽면과 오리피스 내부에 격자를 집중하였다.

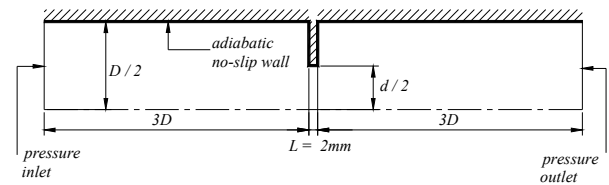


Fig. 1 Schematic diagram of orifice

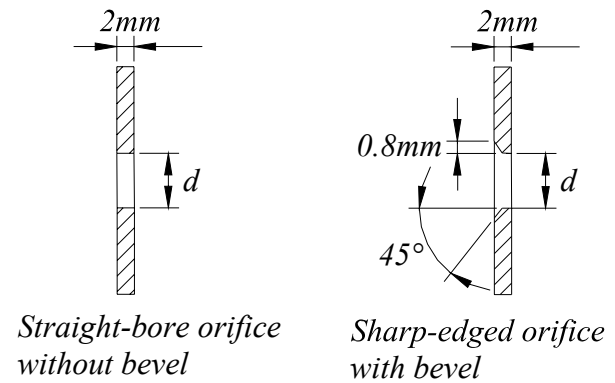


Fig. 2 Shapes of orifice

Table 1 Boundary conditions and dimensions of orifice

<i>Straight-bore orifice</i>		<i>Sharp-edged orifice</i>	
D	20mm	D	40mm
d	4, 7, 10 and 12mm	d	10 and 15mm
p_o	709275Pa	p_o	1317225Pa
T_o	300K		

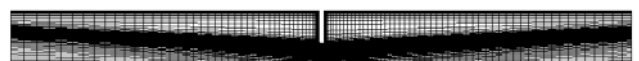
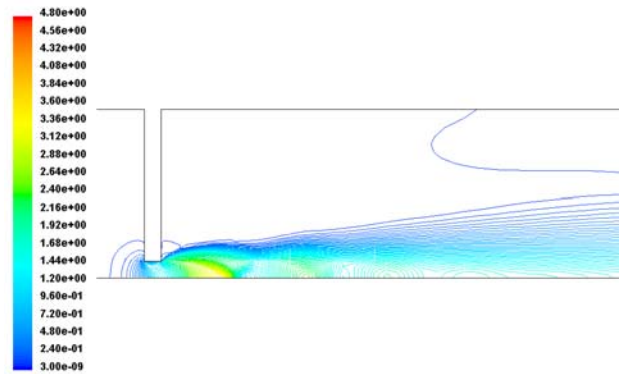


Fig. 3 Typical grid system

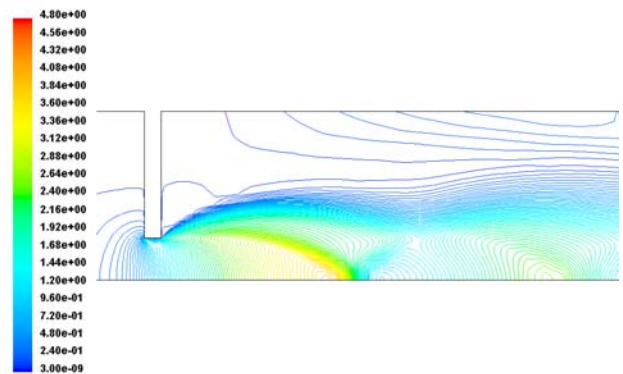
3. 결과 및 고찰

Fig. 4 는 오리피스의 작동압력비(p_b / p_o)가 0.1 인 경우, 등마하선도를 나타낸다. Fig. 4(a)는 일정 단면적을 가지는 오리피스의 직경이 4mm 일 때의 등마하선도로, 유동은 오리피스의 축류부에서 초크한다. 이때 오리피스 하류에서는 유로의 급격한 확대로 인하여, 유동의 마하수가 급격하게 증가하게 된다. 즉, 유동은 부족팽창 상태로 오리피스를 통과한 제트 유동은 오리피스 하류의 관내부에서 압축과 팽창을 반복한다. 일정단면적을 가지는 오리피스의 직경이 10mm 인 Fig. 4(b)의 경우, 제트 구조는 Fig. 4(a)의 경우와 유사하게 나타나지만, 제트의 폭은 상당히 증가하며, 충격파의 발생위치는 하류로 많이 이동해있음을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)와 (c)의 경우에는 오리피스의 직경이 동일하지만, 유동의 팽창 정도는 매우 다르다. 이것은 일정한 단면적을 가지는 오리피스의 경우, 입구부분에서의 vena contract 영향때문인 것으로 판단된다. Fig. 4(d)의 경우에는 오리피스를 통과한 기체 유동이 급팽창 하면서 제트 경계가 오리피스 하류 관벽면에 부착되며, 제트 경계와 오리피스 출구쪽 벽면사이에 큰 와류 영역이 발생한다. 또 경사충격파 후방의 관 벽면 근처의 유동은 벽면과 나란히 흐른다.

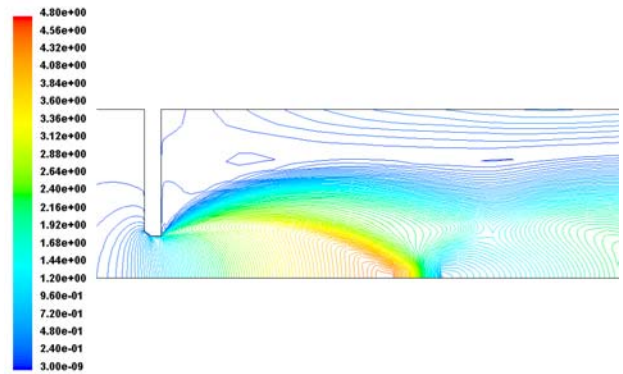
Fig. 5 는 일정단면적을 가지는 오리피스의 직경 (d)이 10mm 일 때, 관 중심축을 따르는 국소정압의 분포를 나타낸다. 횡축의 x / d 는 관 중심축을 따르는 거리 x 를 오리피스의 직경 d 로 무차원한 값이며, 종축의 p / p_o 는 국소정압 p 을 오리피스 상류의 전압 p_o 로 무차원한 값이다. 그림에서 $x / d = 0.0$ 에서부터 0.2 까지의 위치는 오리피스가 설치되어있는 부분이다. 작동압력비(p_b / p_o)가 0.1 인 경우, 유동은 오리피스를 지나면서 초음속으로 가속하게 되며, x / d 가 약 2.3 인 위치에서 충격파가 발생하고 있다. 작동압력비가 점차 높아 짐에 따라 충격파의 발생위치는 오리피스 쪽 으로 이동한다. 그림으로부터 작동압력비가 0.1 에서 부터 0.3 까지의 범위에서는 오리피스 내부의 정압분포가 동일하게 나타나고 있지만, 작동압력비가 0.5 가 되면 오리피스 상류의 정압분포는 다소 달라지게 된다. 이것은 오리피스에서 유동이 초크하기 때문이며, 압력비가 증가하게 되면, 유동이 오리피스에서 초크하지 못하게 된다. 즉, 직경이 10mm 의 일정단면적을 가지는 오리피스의 경우, 임계압력비는 0.5 정도로 나타난다.



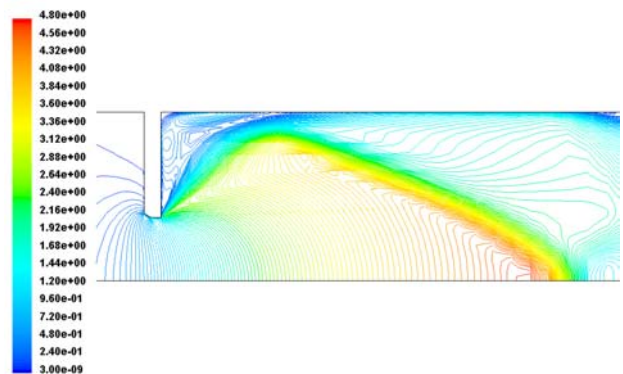
(a) straight - bore orifice, $d = 4mm$



(b) straight - bore orifice, $d = 10mm$



(c) sharp - edged orifice, $d = 10mm$



(d) sharp - edged orifice, $d = 15mm$

Fig. 4 Mach contours ($p_b / p_o = 0.1$)

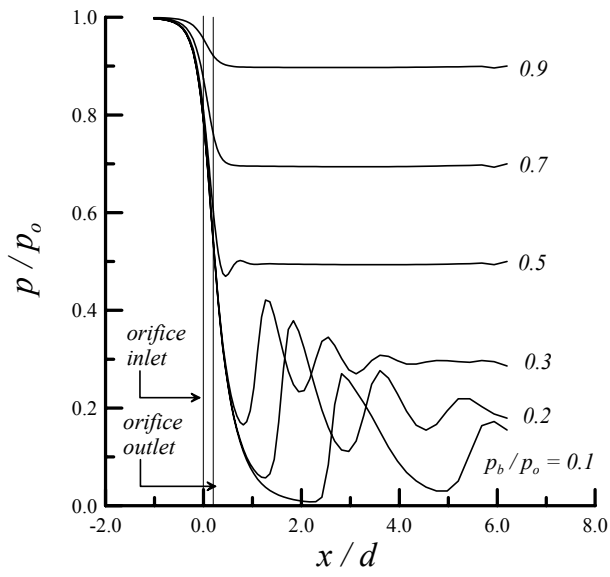


Fig. 5 1 Static pressure distributions along the axis (straight-bore orifice, $d = 10\text{mm}$)

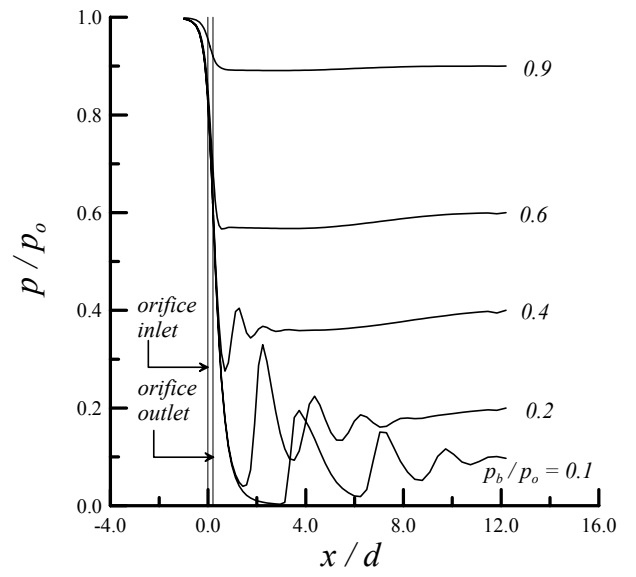
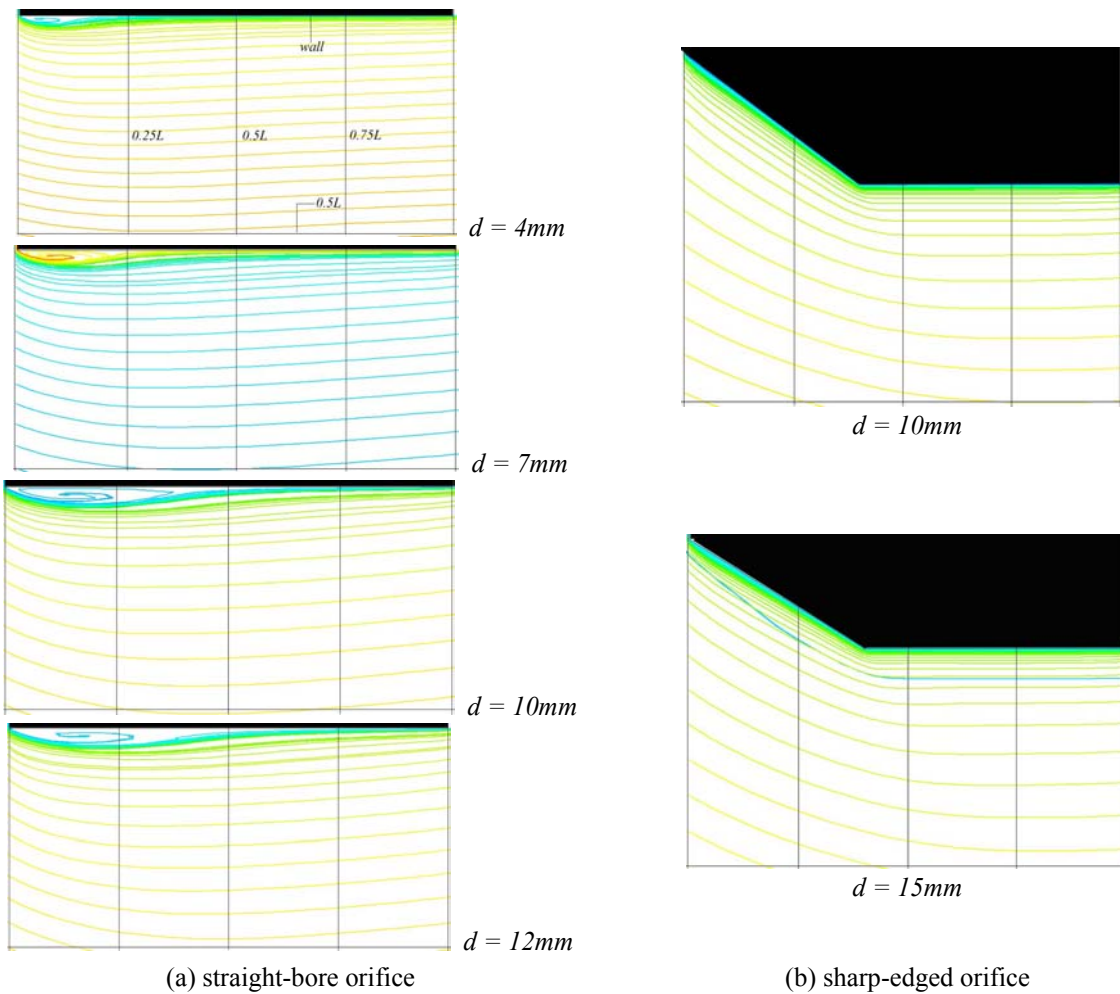


Fig. 6 Static pressure distributions along the axis (sharp-edged orifice, $d = 10\text{mm}$)



(a) straight-bore orifice

(b) sharp-edged orifice

Fig. 7 Streamlines in orifices

Fig. 6 은 경사진 입구 단면을 가지는 오리피스
의 직경이 10mm 인 경우, 관 중심축을 따르는 국
소 정압의 분포를 나타낸다. 작동압력비가 0.1 인
경우, Fig. 5 의 경우와 동일한 오리피스의 직경을
가지지만, 오리피스 하류의 선두충격과 발생 이전
까지의 유동 팽창 정도는 다소 차이를 보인다.

Fig. 7 은 오리피스 내부를 통과하는 유선을 나
타낸다. 그림에서 횡축의 거리는 오리피스 두께 L
의 거리에 대해서 나타내었으며, 종축의 거리는
오리피스 벽면으로부터 0.5L 떨어진 위치까지 나
타내었다. Fig. 7(a)의 일정단면적을 가지는 오리피
스의 경우, 오리피스의 직경이 4mm 일 때는 오리
피스 입구에서 발생하는 박리영역이 하류방향으로
약 0.25L 까지 나타난다. 오리피스의 직경이 증가
할수록, 박리영역은 점차 커지고 있다. 그러나, Fig.
(b)의 경사진 입구 단면을 가지는 오리피스의 경
우에는 이러한 박리영역이 매우 작아진다. 즉, 경
사진 입구를 가지는 오리피스의 경우, 일정단면적
을 가지는 오리피스에 비하여 질량유량의 손실이
매우 줄어들 것으로 판단된다.

Fig. 8 은 일정단면적을 가지는 오리피스의 경
우, 작동압력비 변화에 따른 질량유량의 변화를
나타낸다. 오리피스와 관의 직경비(d / D)가 0.2 일
때, 작동압력비가 증가할수록 질량유량은 증가하
며, 작동압력비가 약 0.5 이하가 되면 질량유량이
일정하게 유지된다. 수치계산 결과와 실험결과
모두 오리피스의 직경이 증가할수록, 유동이 초크
한 경우의 질량유량은 증가를 하지만, 유동이 초크
하기 시작하는 임계압력비는 거의 동일하게 나
타나고 있다. 그러나 수치계산 결과에 의한 임계
압력비는 실험결과 보다 다소 높다.

Fig. 9 는 경사진 입구단면을 가지는 오리피스
의 경우, 작동압력비 변화에 따른 질량유량의 변
화를 나타낸다. 오리피스 상류의 전상태량의 증가
로 Fig. 9 의 일정한 단면적을 가지는 오리피스의
질량유량과는 직접적인 비교는 할 수 없으나, 임
계압력비는 Fig. 9 의 경우와 유사하게 나타나는
것을 확인할 수 있다. 그러나 직경비가 0.375 의
경우에는 실험결과는 수치계산 결과와 상당히 다
르다.

Fig. 10 은 오리피스와 관의 직경비와 유출계수
와의 관계를 나타낸다. 1 차원 기체역학 이론에 의
하면, 유로를 지나는 초크 유동의 질량유량은 상
류의 전상태량, 기체의 비열비 및 유로의 최소단
면적의 함수로 주어지기 때문에, 유출계수가 1.0
이하의 값을 가지는 것은 일정한 상류의 전상태량
의 조건하에서 단면적의 영향이 지배적이다. 일례
로 관로를 통하는 유출계수에 영향을 미치는 요소
로는 벽면 경계층에 의한 유효단면적의 변화와 열
전달 등이 있다. 따라서, 노즐 등에서의 유출계수
의 감소는 노즐벽면에서 발생하는 경계층에 상당
히 크게 영향을 받지만, 오리피스의 경우에는 길

이가 매우 짧기 때문에 경계층의 영향보다는 입구
의 형상에 따른 vena contract 영향으로 질량유량
의 손실이 커질 것으로 판단된다. 결과적으로 일정단
면적을 가지는 오리피스의 유출계수가 경사진 입
구를 갖는 오리피스의 유출계수보다 낮게 예측하
며, 관직경과 오리피스 직경비가 커질수록 vena
contract 영향은 약화된다. 경사진 입구 형상을 가
지는 오리피스의 경우, 실험결과에 의해 예측된 유
출계수는 급격하게 감소하고 있으나, 본 수치계산
결과는 증가하는 반대 경향을 나타내고 있다.

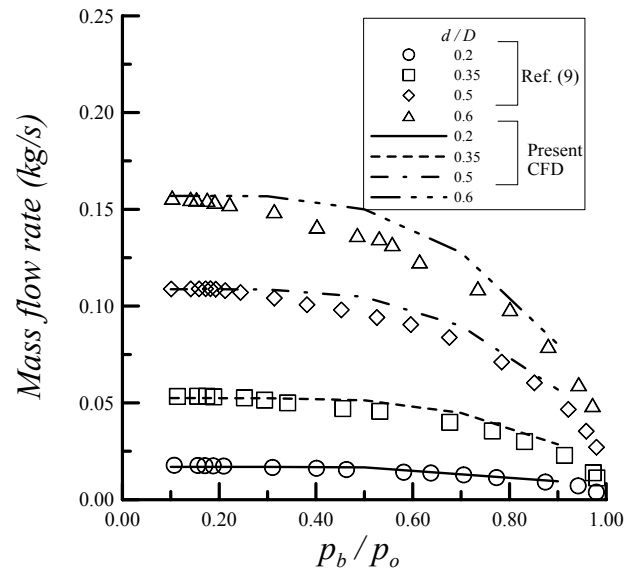


Fig. 8 Variations of mass flow rate with pressure ratio (straight-bore orifice)

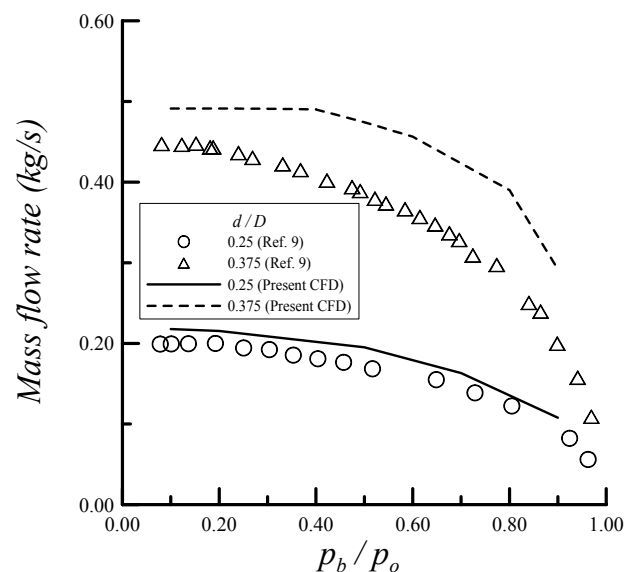


Fig. 9 Variations of mass flow rate with pressure ratio (sharp-edged orifice)

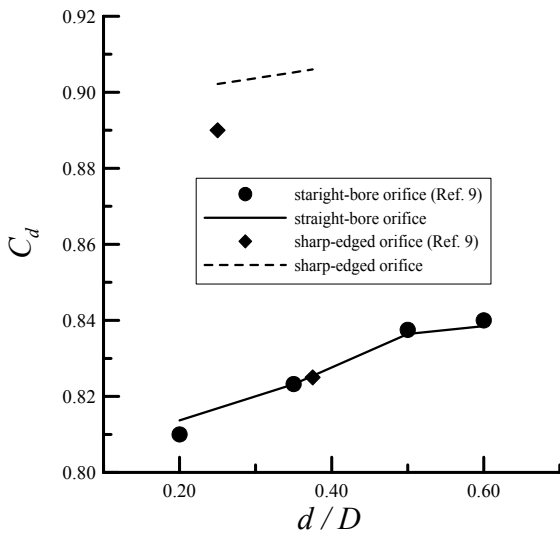


Fig. 10 Variations of discharge coefficient(C_d) with diameter ratio(d/D)

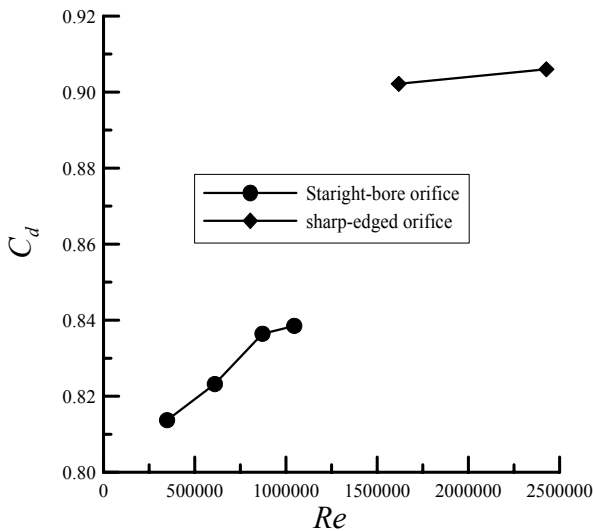


Fig. 11 Variations of discharge coefficient(C_d) with Reynolds number(Re)

Fig. 11는 오리피스의 유출계수와 레이놀즈수의 관계를 나타낸다. 레이놀즈수는 오리피스 상류의 전상태량과 오리피스 직경을 특성길이로 하여 얻어진 값이다. 본 결과로부터 오리피스를 통하는 임계 유동의 유출계수는 레이놀즈수의 함수로 나타낼 수 있으리라 예측한다.

4. 결론

본 연구에서는 오리피스를 통하는 임계 기체유동을 조사하기 위하여, 2 차원, 축대칭, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용한 수치계산을 수행하였다. 오리피스 형상이 일정한 경우와 입구형상을 경사지게 한 두 경우에 대하여 계산을 수행하였으며, 그 결과는 유용한 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 본 수치계산은 일정단면적을 가지는 오리피스의 임계 질량유량은 잘 예측하였으나, 임계 압력비는 잘 예측하지 못하였다.

(2) 동일한 직경을 가지는 오리피스의 경우, sharp-edged 오리피스를 통한 유동의 팽창은 straight-bore 오리피스의 경우보다 심하며, 충격파의 발생위치도 달라진다.

(3) 경사진 입구를 가지는 오리피스의 유출계수는 vena contract 영향의 감소로 인하여, 일정단면적을 가지는 오리피스의 유출계수보다 크게 예측하였다.

(4) 오리피스의 직경을 특성길이로 하는 레이놀즈수에 대한 유출계수의 의존성은 경사진 입구를 갖는 오리피스보다 일정단면적을 갖는 오리피스의 경우가 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 2003 년 한국표준과학연구원의 연합협동연구과제의 지원으로 수행됨

참고문헌

- (1) Anderson, A., 1992, "A Note on Compressible Flow through Orifices in Series," J. Mechanical Engineering Science, Vol. 206, pp. 361~366.
- (2) Kim, H. D., Kim, J. H. and Park, K. A., 2003, "Study for the Gas Flow through a Critical Nozzle," Proceedings of 4th ASME JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM2003-45593.
- (3) Raymond, G. and Ronald, B., 1993, "New Orifice Meter Standards Improve Gas Calculations," J. Oil Gas, Vol. 11, pp. 14~20.
- (4) Kim, H. D., Kim, T. H., Woo, S. H. and Masuo, K., 1998, "New Treatment of High-Pressure Exhaust Gas Flows using Shock-Wave Confinement," J. KSPE, Vol. 2, No. 1, pp. 78~87.
- (5) Yudin, E. Y., 1955, "The Acoustic Power of the Noise Created by Airduct Elements," J. Soviet Physics and Acoustics, Vol. 1, pp. 383~398.
- (6) Mori, y. Hijikata, K. and Shimizu, T., 1975, "Attenuation of Shock Wave by Multi-Orifice," 10th International Symposium Shock Tube and Waves.
- (7) Davis, D. D., Skokes, G. M. and Moore, D., 1964, "Theoretical and Experimental Investigation of Mufflers with Comments on Engine-Exhaust Mufflers Design," NACA report 1192.
- (8) Kim, H. D., Setoguchi, T., Matsuo, S. and Raghunathan, S. R., 2001, "Pressure Drop Control using Multiple Orifice System in Compressible Flows," J. Thermal Science, Vol. 10, No. 4, pp. 309~317.
- (9) Shannak, B. A., 2002, "Experimental Investigation of Critical Pressure Ratio in Orifices," J. Experiments in Fluids, Vol. 33, pp. 508~511.