

## 수력제어용 오리피스스의 개도 및 형상 변수에 따른 정상저항 특성의 변화

김상민\* · 김건웅\* · 고태호\* · 김형민\* · 윤웅섭\*\*

### Steady Characteristic Change of Hydraulic Control Orifice according to Opening and Configuration Parameters

Sangmin Kim\* · Geonwoong Kim\* · Taeho Ko\* · Hyungmin Kim\* · Woosup Yoon\*\*

#### ABSTRACT

The Study of steady performance of orifice must be precede before study of dynamic characteristics with configuration change. So, orifice performance with change of diameter ratio, thickness, expansion and angle predicted by CFD. The analysis algorithm is SIMPLEC. And PRESTO, QUICK scheme is used for discretization. The  $k-\omega$  STS turbulent model also used. The discharge coefficient is rapidly increased with increasing of diameter ratio and slowly decreased after rapidly increasing with orifice thicken. In case of expansion angle, the discharge coefficient is the smallest at  $45^\circ$  of the angle.

#### 초 록

형상에 따른 오리피스스의 동특성을 확인하기 위해 앞서 정상 상태에서의 성능에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이를 위해 수치해석을 통해 개도, 두께, 팽창각에 따른 오리피스스의 성능을 예측하였다. 유동 해석 알고리즘은 SIMPLEC을 사용하였고, 차분 기법은 PRESTO, QUICK 기법을 사용하였으며, 난류 모델은  $k-\omega$  STS를 사용하였다. 오리피스스의 개도가 증가하면서 유량계수는 급격하게 증가하였고, 두께가 증가하면서 유량계수는 급격하게 증가하였다가 서서히 감소한다. 팽창각이 45도일 때 유량계수가 가장 작게 나타났다.

Key Words: Plate Orifice(평판 오리피스), Steady Performance(정상 성능), Shape Effect(형상 효과)  
CFD(전산유체)

#### 1. 서 론

액체추진제 로켓 엔진에서는 압력 밸런싱과 유량 공급의 안정화를 위하여 공급관로 내에 다양한 수력 제어용 장치를 포함한다. 그 중 오리피스는 장치 후단에 발생하는 이차유동에 기인한 압력 손실을 통해 유량을 조절하는 장치이다.

\* 연세대학교 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계공학부

연락처, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

오리피스의 종류는 형태에 따라 concentric orifice, quarter-circle orifice, segmental orifice, eccentric orifice로 나뉘며 모두 평판의 형태로 설치, 사용된다.

평판 오리피스에 대한 연구는 1930년에 Johansen[1]이 실험을 통해 저 레이놀즈 영역에서 레이놀즈 수에 따른 오리피스의 유량계수 측정, 오리피스 사이즈에 대한 유량계수를 측정하는 등 정상 상태의 오리피스 성능에 대한 이론 및 실험적 연구는 오래전부터 많이 수행되었다.

형상에 따른 오리피스의 성능 연구는 Hobbs[2]와 Ohrn[3]이 sharp-edged 오리피스에서 입구 부분 모서리의 둥글기에 따른 유량계수를 나타내었다. 모서리가 둥글어지면 유량계수는 증가하며, 작은 변화에도 유량계수의 차이는 커짐을 보였다. Lichtarowicz[4]는 높은 레이놀즈 영역에서 오리피스의 세장비에 따른 유량계수의 식을 나타내었으며, Ramanurithi[5] 역시 세장비에 따른 유량계수의 변화에 대해 다양한 실험을 수행하였다. ASME에서는 팽창각 45도~60도의 얇은 오리피스에서 형상에 따라 유량계수를 예측하는 식을 만들었지만[6] 실험 결과와 차이가 있고, 형상에 따른 제약 조건이 많다.

관내에 설치된 오리피스가 가지는 동특성을 예측하기 위해 먼저 정상상태에서의 정확한 성능 파악이 필요하며 따라서 본 연구는 압력 차이가 1~15기압일 때, 직경 15.5 mm의 관내에 설치된 오리피스의 개도, 두께, 팽창각에 따른 성능 변화에 대한 해석적 연구를 수행하였다.

## 2. 오리피스 정상저항 특성 시험

오리피스의 성능에 대한 수치적 예측 결과의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 1과 같이 오리피스를 설치하여 실험을 수행하였다. 고압 수력장치에서 가압된 상온의 물이 오리피스가 설치된 관내를 흐르며 오리피스 하단에서 대기압의 수조로 방출된다. 압력센서는 오리피스 전·후단 각각 12 cm에 설치하여 압력차이를 측정하였다.

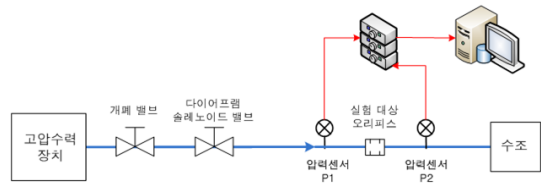


Fig. 1. Schematic of Orifice Experimental Set-up

Figure 2는 해석에 사용된 관내 오리피스의 형상을 2차원 축대칭으로 나타낸 것이다. 관의 직경을  $D$ , 오리피스의 직경을  $d$ , 오리피스의 두께를  $l$ , 오리피스의 팽창각을  $\theta$ 로 나타내었다. 오리피스 전·후에 관 위로 솟은 부분은 실험에서 오리피스를 설치하기 위한 공간이므로 해석에서도 동일하게 나타내었으며, 이 부분이 없다고 가정하였을 경우와 0.05% 정도 차이가 나므로 결과에는 영향을 미치지 않는다.

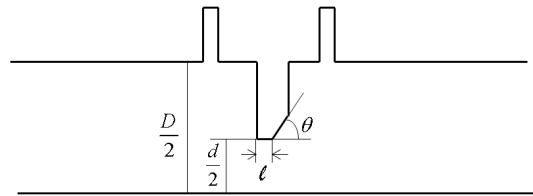


Fig. 2. Orifice Geometry used in Analysis

## 3. 수치 기법

작동 유체인 물은 비압축성으로 가정하고, 관에서의 온도변화는 고려하지 않으므로 유체의 물성치는 상수로 가정한다. 관내 레이놀즈 수가  $\sim 3 \times 10^5$ 의 범위이므로 난류를 고려한다. CFD 해석은 상용 S/W인 Fluent 6.3을 사용하였고, 계산 알고리즘은 SIMPLEC를 사용하였으며, 격자 생성에는 Gambit 2.2 버전을 사용하였다.

### 3.1 차분 기법

저 레이놀즈 영역에서의 오리피스 유동을 해석한 Hayasei[7]와 오리피스 내에서의 공동 현상을 해석한 Dabiri[8]는 대류항을 차분하는 방법으로 수렴이 빠르고 안정적이라 알려진[9]

quadratic upwind interpolation for convective kinematics (QUICK) 방법을 사용하였다. 본 해석에서는 직경비  $d/D = 0.4$ ,  $\theta = 45^\circ$ 의 오리피스에 대해 2차 정확도의 풍상 차분법과 QUICK을 비교하였고, 압력의 차분은 PRESTO, 2차 정확도, standard로 나누어 실험값과 비교하였다. 비교 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

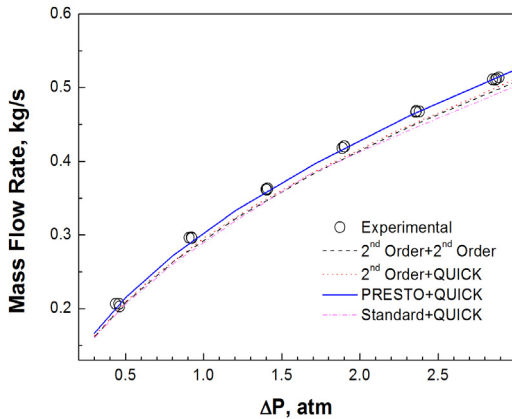


Fig. 3. Comparison of Variance Discretization with Experimental Data Set

Figure 3에서 나타나듯이 2차 정확도의 풍상차분법과 QUICK 기법은 결과에서 큰 차이를 보이지 않는다. 압력 차분의 경우 Standard와 2차 정확도의 압력 차분은 동일한 압력 차이에서 실험값보다 적은 값의 유량을 예측하였지만 PRESTO 기법은 실험값과 매우 잘 일치하는 결과를 예측하였다.

### 3.2 난류 모델

난류를 모사하기 위한 여러 모델 중  $k-\epsilon$  모델은 일반적으로 널리 사용되고 있으며, 난류를 포함한 관내의 유동을 해석하는 데에 있어서도 많이 사용되는 모델이다[10-12]. 본 해석에서는 standard  $k-\epsilon$ ,  $k-\epsilon$  RNG, standard  $k-\omega$ ,  $k-\omega$  STS를 사용하여 해석한 결과를 실험값과 비교하여 난류 모델을 결정하였다.

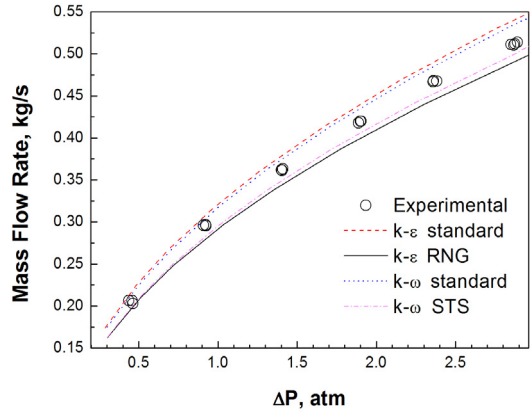


Fig. 4. Comparison of Variance Turbulent Models with Experimental Data Set

Figure 4에 직경비  $d/D = 0.4$ ,  $\theta = 45^\circ$ 의 오리피스에 대해 여러 난류 모델들과 실험값을 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 모든 난류 모델은 실험값과 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 두 standard 모델은 실험값보다 높게 나타났으며,  $k-\epsilon$  RNG와  $k-\omega$  STS는 실험값보다 적은 유량값을 예측하였다. 해석에 사용된 압력 차분이 2차 정확도의 차분이고, 이 방법은 실험값보다 적은 값을 예측한다는 2.1에서의 결과를 고려하였을 때, 난류 모델은  $k-\epsilon$  RNG, 또는  $k-\omega$  STS 모델이 보다 정확하다고 할 수 있다.

### 3.3 기법의 범용성

3.1과 3.2에서 직경비  $d/D = 0.4$ ,  $\theta = 45^\circ$ 의 오리피스에 대해 차분법 및 난류 모델에 대한 검증을 수행하였다. PRESTO, QUICK 차분법과  $k-\omega$  STS 난류모델을 사용하였을 때 해석에서의 예측값은 실험값과 정확히 일치함을 Fig. 1에서 나타내었다.

직경비가 다른 경우, 이 기법들이 여전히 실험값과 일치하는지를 확인하기 위해 다른 직경비를 가진 오리피스의 실험값과 해석값을 비교하였다. Fig. 5, 6에 직경비가 각각 0.6, 0.8일 때의 실험값과 해석값을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 직경비 0.6의 경우 경향성은 일치하지만

해석값은 실험값보다 적은 유량값을 예측하였다. 직경비 0.8의 경우 0.3기압을 기준으로 경향성이 바뀌고, 압력이 커질수록, 실험값과 해석값의 차이는 커질 것으로 예측된다.

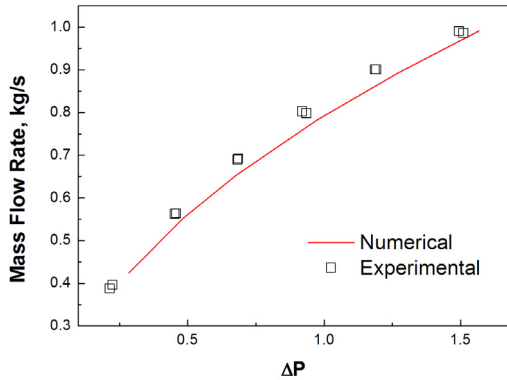


Fig. 5. Mass Flow Rate with Pressure Difference.  $d/D=0.6$ ,  $\theta=45^\circ$

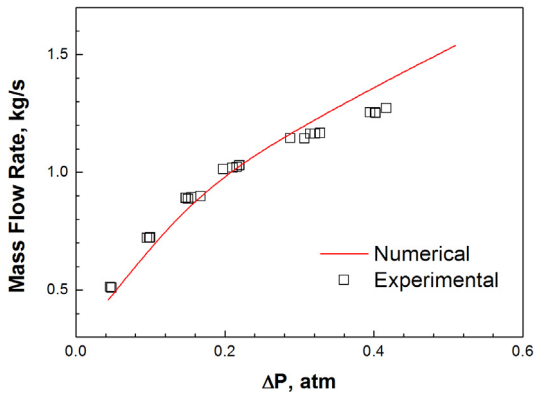


Fig. 6. Mass Flow Rate with Pressure Difference.  $d/D=0.6$ ,  $\theta=45^\circ$

직경비가 0.4일 때는 최대 오차가 2%이며, 직경비가 커질수록 오차는 선형적으로 증가하여 직경비가 0.8일 때는 최대 오차가 8%임을 보인다.

#### 4. 해석 결과

형상에 따른 오리피스 성능 변화를 확인하기 위해 Table 1과 같이 오리피스 직경비( $d/D$ ),

팽창각( $\theta$ ), 두께( $l$ )를 변화시켜가면서 오리피스의 유량계수( $c_d$ )를 비교하였다.

Table 1. Analysis Case by Orifice Configuration

구분	변화 요소	기호	범위
Case1	직경비	$d/D$	0.2~0.6
Case2	팽창각	$\theta$	0~75
Case3	두께	$l$	1~15

#### 4.1 직경비에 따른 오리피스 성능 변화

Figure 7에서 직경비에 따른 오리피스의 성능 변화를 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 직경비가 상승함에 따라 유량계수가 급격하게 증가함을 보인다. 유량계수는 직경비가 0으로 갈 때 0.7 정도로 수렴하며, 이 때 유량계수는 압력 차이에 무관하다. 직경비가 1일 때, 즉 오리피스가 없을 때 유량계수는 1이므로 유량계수의 증가 정도는 직경비가 커질수록 작아질 것으로 예측할 수 있다. 또한 직경비가 작을 때와 달리 직경비가 커지면 압력 차이에 의한 유량계수의 차이가 증가한다.

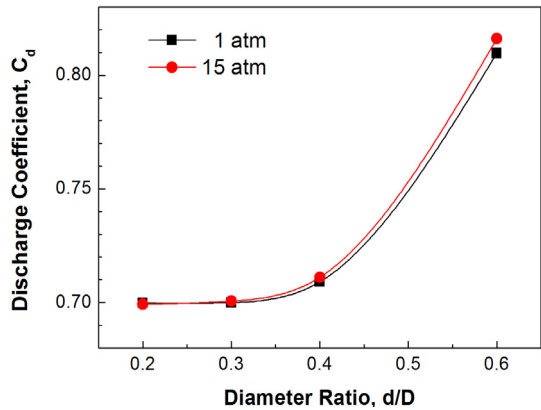


Fig. 7. Discharge Coefficient with Diameter Ratio

#### 4.2 오리피스 두께에 따른 성능 변화

Figure 8에서 오리피스 두께에 따른 유량계수를 나타내었다. 오리피스의 두께가 증가하면서 유량계수는 급격하게 증가를 하다가  $l=7$  mm 에서 최대 유량계수를 갖는다. 즉, 오리피스 직경 대비 길이( $d/l$ )가 0.66이 되는 지점에서 최대 유

량계수를 갖으며,  $d/l$ 이 점차 작아질수록 유량계수도 점차 감소하는 것을 보인다.

4.1에서의 결과와 유사하게 오리피스 두께가 작을 때 유량계수는 압력 차이에 따른 영향이 없지만 오리피스의 길이가 커짐에 따라 압력차이의 증가에 따른 유량계수의 차이가 커짐을 확인하였다.

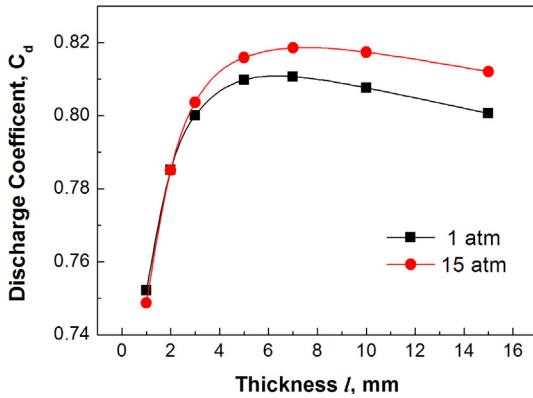


Fig. 8. Discharge Coefficient with Orifice Thickness

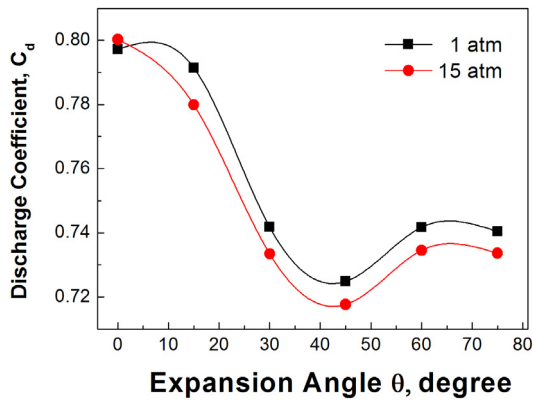


Fig. 9. Discharge Coefficient with Orifice Expansion Angle

#### 4.3 팽창각에 따른 오리피스 성능 변화

Figure 9 에서 팽창각에 따른 유량계수의 변화를 나타내었다. 팽창각이 커질수록 유량계수는 작아지며 45도일 때 최소값을 갖는다. 팽창각이 45도 이상이 되면 유량계수는 점차 증가하며, 45도를 기준으로 대칭되는 값을 갖는다. 하지만 60

도를 넘어서면서 다시 줄어드는데, 이는 팽창각이 증가하면서 결과적으로 오리피스의 두께가 줄어드는 효과를 갖기 때문이며, 앞서 3.2의 결과에서 오리피스 두께가 줄어들면 유량계수가 줄어드는 경향을 확인하였다.

## 5. 결론 및 고찰

본 연구에서 직경 15.5 mm 관내에 설치된 오리피스의 형상에 따른 성능 변화를 예측하였다. 이를 위해 여러 수치 기법에 대한 비교를 하였으며, 그 결과 압력 차분은 PRESTO, 대류항의 차분은 QUICK 또는 2차 정확도의 풍상차분법이 적합한 것으로 나타났다. 난류모델의 경우  $k-\epsilon$  RNG와  $k-\omega$  STS가 실험값과 유사한 값을 예측하였으나 다른 난류 모델 역시 그 오차가 충분히 작은 것으로 나타났다.

오리피스 형상에 따른 성능 변화는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 직경비의 증가에 따라 유량계수는 급격하게 증가한다.
- (2) 오리피스의 두께가 증가함에 따라 오리피스의 유량계수는 급격히 증가하며  $d/l$ 가 0.66일 때 최대값을 갖는다.
- (3) 오리피스의 팽창각이 커지면서 유량계수는 감소하며 45도 일 때 최소값을 가진다.

오리피스의 형상에 따라 10% 정도의 유량계수의 차이가 나타났으나 관의 크기, 압력 조건 등에 의해 달라질 수 있으므로 이에 대한 성능의 정확한 예측에는 추가적인 연구가 필요하다.

## 6. 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행 되었습니다 (2009-0082434).

## 참 고 문 헌

1. F.C. Johansen, "Flow through Pipe Orifices at Low Reynolds numbers," Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Vol. 126, No. 801, 1930, pp.231-245
2. J.M. Hobbs, J.S. Humphreys, "The Effect of Orifice Plate Geometry upon Discharge Coefficient," Flow Measurement and Instrumentation 1, 1990, pp.133-140
3. T.R. Ohm, D.W. Senser, A.H. Lefebvre, "Geometrical effects on Discharge Coefficients for Plain Orifice Atomizers," Atomization and Sprays 1, 1991, pp. 137-153
4. K. Ramamurthi, K. Nandakumar, "Characteristics of flow through small sharp-edged cylindrical orifices," Flow Measurement and Instrumentation 10 , 1999, pp.133-143
5. Rao, G. V. R., "Exhaust Nozzle Contour for Maximum Thrust," Jet Propulsion, Vol. 28, No. 0, June, 1958, pp.377-382
6. ASME Fluid Meters Research Committee, "The ISO-ASME Orifice Coefficient Equation," Mech. Eng. July 1981, pp.44-45
7. Toshiyuki Hayase, Ping Cheng, Satoru Hayashi, "Numerical Analysis of Transient Flow through a Pipe Orifice," Proceedings of the Third JSME-KSME Fluids Engineering Conference, 1994, pp.277-282
8. S. Dabiri, W.A.Sirignano, "Cavitation on an Orifice Flow," Physics of Fluids, vol 19
9. T. Hayase, J. Humphrey, R. Grief, "A Consistently Formulated QUICK Scheme for Fast and Stable Convergence Using Finite-Volume Interative Calculation Procedure," J. Comput. Phys., Vol. 98, No.1, 1992, pp.108-
10. 민영위, 김유곤, "관내 오리피스를 지나는 유동에 관한 수치해석," 대한기계학회 춘추학술대회, 제2권 2호, 1999, pp.530-535
11. 이세영, 이창진, "오리피스 발생하는 공동현상에 대한 수치적 연구," 한국항공우주학회 2007년도 추계학술발표회 논문집(II), 2007, pp.1305-1308
12. 김연수, 김유곤, "이단 원추형 오리피스를 지나는 유동장에 대한 수치해석," 대한기계학회 춘추학술대회, 제1권 5호, 2001, pp.499-505