

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.2.051>오리피스를 사용한 초음속 제트에서의 기저 압력
제어에 관한 연구

이종성* · 김희동**†

Control of the Base Pressure of the Supersonic Jet
Using an Orifice

Jongsung Lee* · Heuydong Kim**†

ABSTRACT

Base pressure at the base of high-speed jet has long been one of the important issues from both the view points of fluid dynamics as well as practical engineering applications. The base pressure characteristics of incompressible flows have been well known to date. However, the base pressure at transonic or supersonic speeds would be different due to the compressibility effects and shock waves. In the present paper, a CFD study has been performed to understand the base pressure characteristics at transonic and supersonic speeds, prior to experimental work. An emphasis is placed on the control of the base pressure using a simple orifice. A variety of supersonic jet plumes have been explored to investigate the flow variables influencing the base pressure. The results obtained were validated with existing experimental data and discussed in terms of the base pressure and discharge coefficient of the orifice.

초 록

고속의 제트에서 기저압력은 유체역학 및 실용적 공학 적용의 관점으로 매우 중요한 분야중의 하나로 다루어져 왔다. 현재까지 비압축성 유동의 기저압력 특성들은 비교적 상세하게 알려져 있다. 하지만 천음속 혹은 초음속에서의 기저압력은 압축성 효과 및 충격파 발생으로 인해 매우 다르게 나타난다. 본 연구에서는 이러한 천음속 혹은 초음속에서의 기저압력특성에 관한 이해를 위해 선행된 실험 연구 결과를 바탕으로 수치해석적 연구를 수행하였다. 간단한 오리피스를 사용하여 기저 압력 조절하는 것에 주안점을 두었다. 기저 압력에 영향을 미치는 유동변수의 적용으로 여러 형태의 초음속 제트 플룸을 분석하였다. 선행된 실험결과를 모사하여 수치해석 기법의 타당성을 조사하였으며, 계산된 기저압력과 오리피스의 유출계수에 관하여 논의하였다.

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Orifice(오리피스), Base Pressure(기저압력), Discharge Coefficient(유출계수), Supersonic Nozzle(초음속 노즐)

접수일 2011. 6. 2, 수정완료일 2012. 3. 2, 게재확정일 2012. 3. 8

* 학생회원, 안동대학교 대학원 기계공학과

** 종신회원, 안동대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

Nomenclature

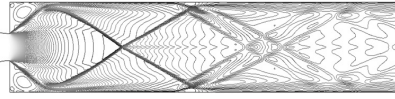
| | |
|------------------|--|
| C_d | : Discharge coefficient |
| D_c | : Diameter of base[mm] |
| D_e | : Diameter of nozzle exit[mm] |
| D_o | : Diameter of orifice[mm] |
| D_t | : Diameter of nozzle throat[mm] |
| L | : Length of nozzle exit to orifice[mm] |
| P_a | : Ambient pressure[pa] |
| P_b | : Base pressure[pa] |
| \overline{P}_b | : Averaged base pressure[pa] |
| P_0 | : Total pressure[pa] |
| T_0 | : Total temperature[K] |
| t | : Thickness of orifice[mm] |
| x | : Axial distance from nozzle exit[mm] |
| H | : Height of base[mm] |
| NPR | : Nozzle pressure ratio(P_0/P_a) |

1. 서 론

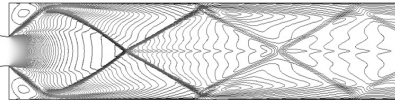
일반적으로 오리피스나 노즐로부터 유동이 방출되는 경우, 노즐 바로 외부의 기저부분에서 발생하는 압력을 기저압력(Base pressure)이라고 하며[1], 이러한 압력은 예로부터 중요한 학술적 연구의 대상이었다. 왜냐하면, 기저부분에서는 매우 복잡한 유동장이 형성될 뿐만 아니라 경우에 따라서 강한 비정상성(Unsteadiness)이 발생하여 전체 유동장에 큰 영향을 미치기 때문이다.

비압축성 유동인 경우 기저압력은 노즐로부터 방출되는 유동에 크게 의존하지 않지만, 압축성 유동인 경우에 기저부분에서 발생하는 유동은 노즐로부터 방출되는 유동의 마하수 뿐만 아니라 기저부분의 기하학적 형상에 강하게 의존하게 된다[2]. 이와 같은 기저압력은 일반적으로 큰 저항력의 원인이 될 뿐만 아니라 유동장의 와류 혼합 또는 비정상 진동 등과 관련되므로, 종래 기저압력의 특성에 관해서는 매우 많은 연구가 수행되었다[3, 4].

그러나 이러한 기저압력에 미치는 기류 마하수의 영향, 노즐 형상의 영향, 기저의 상세 형상

(a) Experiments obtained by Mach-Zehnder interferometry⁽¹⁾

(b) Computed Iso-density contours by using RNG-k-ε turbulent model



(c) Computed Iso-density contours by using SST-k-ω turbulent model

Fig. 1 Validation of CFD results with experiment[1]

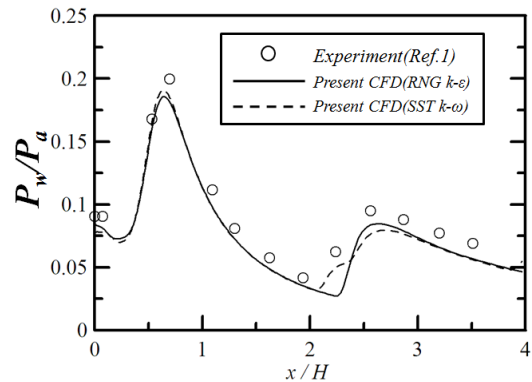


Fig. 2 Comparison of computed wall pressure distributions with experiment

의 영향 등에 관해서는 아직까지 상세하게 규명되지 않았으며, 더욱이 기저압력을 제어하기 위한 방법에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다.

본 연구는 추진체의 노즐 후단에 오리피스의 적용으로 기저압력을 조절하여 추진체가 정상적으로 더 짧은 시간에 추력을 발생시키는 것을 개념으로 하여, 이에 영향을 미치는 인자에 대한 정량적인 DB, 그리고 오리피스 및 노즐 형상에 대한 최적 형상 설계 DB를 구축하고자 하는 것이 최종 목적이 된다. 따라서 연구의 일환으로 노즐 입구와 출구의 압력비, 전온도, 기저의 직경, 오리피스의 두께 그리고 노즐 출구에서 오리피스의 거리를 각각 변화시켜 기초적인 기저압력의 변화인자에 대해 상세하게 조사하였다.

2. 수치해석법

본 연구에서는 오리피스를 적용한 초음속 제트유동을 모사하기 위하여, 축대칭, 압축성, N-S 방정식을 적용한 수치해석을 수행하였다. 수치계산은 상용코드인 Fluent Ver. 6.3을 사용하였으며, Coupled implicit 방법으로, 강한 충격파 발생으로 인한 수치적 불안정성을 보완하기 위하여, 이미 여러 문헌에서 적용된 AUSM-DV와 2nd order up-wind scheme을 적용하여 Convective term을 계산하였다. 동일한 형태의 선행 실험 연구 자료가 없기 때문에, 수치 모사의 타당성을 위해, 음속 노즐로부터 사각 덕트로 방출된 제트 유동에 따른 Base pressure 거동에 관한 실험적 연구결과[4]에, 일반적으로 노즐 유동을 잘 예측한다고 알려진 RNG- $k\epsilon$ 과 SST- $k\omega$ 난류모델을 각각 적용하여 예측한 결과를 Fig. 1, 2에 나타내었다. SST- $k\omega$ 난류모델이 좀 더 정확하게 예측함을 알 수 있다.

Fig. 3(a)은 본 연구에 적용된 도메인의 상세 형상과 경계조건을, (b)는 정렬 격자계를 각각 나타낸다. 오리피스의 직경을 D_o 로 정의하여, 각각의 치수를 무차원하여 정의하였으며, $D_o=44mm$ 로 적용하였다. 수치계산에 적용된 경계조건은 노즐 입구에 Pressure inlet, 출구에 Pressure outlet, 그리고 벽면은 단일 No-slip 조건을 각각 적용하였다. 적용된 노즐의 형상은 문헌[3]을 참조하였으며, 면적비는 2.132, 설계 마하수는 약 2.27이다.

Table 1에는 본 연구에 적용된 여러 변수 및 조건을 정리하였다. 기저의 직경(D_c)은 $1.5D_o \sim 8D_o$ 로, 전온도(T_0)는 $300K \sim 1000K$ 로, 오리피스 두께(t)는 $0.068D_o \sim 0.341D_o$ 로, 노즐 작동 압력비(NPR)는 $10 \sim 100$ 까지 그리고 노즐 출구에서 오리피스까지의 거리(L)를 $1D_o \sim 5D_o$ 로 각각 변화시켰다. 노즐 목과 노즐 출구직경은 $0.5D_o, 0.73D_o$ 로 항상 고정하였으며 면적 팽창 각도는 8.9° 이다.

참고로 본 연구에 사용된 유출계수는 노즐 입구의 전압(P_0)과 정체 온도(T_0)로 1차원 등엔트로피 이상기체 방정식을 사용하여 계산된 이론 유량

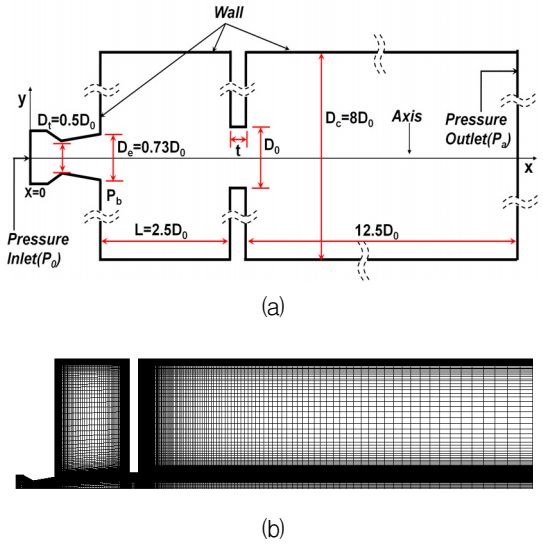


Fig. 3 Computational domain and grid system

Table 1. Numerical conditions used in the present study

| D_t | D_c | D_c | T_0 | t | L | NPR |
|-----------|------------|----------------|-------|-------------|----------------|------------|
| 0.5 D_o | 0.73 D_o | 1.5 D_o | 300K | 0.068 D_o | 1 D_o | 10 |
| | | \sim 8 D_o | 1000K | 0.341 D_o | \sim 5 D_o | \sim 100 |

(\dot{m}_{theo})과 수치계산 결과로 얻어진 실제 유량(\dot{m})과의 비로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{theo}} \tag{1}$$

또 이론 유량은 1차원 등엔트로피 이상 기체 방정식을 이용한 다음 식으로 나타낸다.

$$\dot{m}_{theo} = \frac{A \times P_0}{\sqrt{R \times T_0}} \sqrt{\gamma \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}} \tag{2}$$

여기서 A는 노즐 목의 단면적, R은 기체상수이며 γ 는 기체의 비열비이다. 유출계수에 사용된 실제유량은 노즐의 출구 면적을 통과하는 유량으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 NPR의 영향

Figure 4는 각각의 압력비에 따른 기저압력의 관계를 나타낸 결과이며, 종축은 평균 기저압력을 전압(P_0)으로 무차원화한 값이며, 횡축은 구동 압력비(NPR)이다. 전반적으로 오리피스를 적용한 경우의 기저압력이 적용하지 않은 경우에 비해 2배로 증가하며, NPR=50이상부터는 전압의 5%의 값으로 접근함을 알 수 있다. Fig. 5는 압력비에 대한 노즐과 오리피스를 횡방향으로 통과하는 유출계수를 비교한 결과이다. 오리피스를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우 모두 노즐에서의 유출계수는 약 0.93으로 동일하였다.

Figure 6은 오리피스가 있는 경우와 없는 각각의 경우에 압력비 변동에 따른 유동장의 마하수 분포를 나타낸다. 비교적 낮은 압력비 NPR=10일 경우 과팽창 유동(Over-expanded flow)로 인해 출구면에서 경사 충격파가 발생하여 제트 코어영역에서 연속적으로 반사하여 반복적인 셀 구조(Cell structure)를 이루며, 대기압에 조절되어 간다. 압력비가 증가할수록 노즐 출구 압력이 증가하여 부족팽창흐름(Under-expanded flow)[5] 상태가 되며, NPR=50이전까지는 제트의 축에서 충격파구조가 정상 반사하여 셀(Cell)을 이루지만, NPR=70부터 마하 디스크(Mach disk)가 발생하여 그 하류의 흐름은 아음속으로 천이한다. 따라서 초음속 제트유동은 초음속과 아음속이 동시에 혼합되어 나타난다. 오리피스가 있는 경우 노즐 출구 유동장은 상기와 동일하게 NPR=10일 경우 과팽창 제트가 발생 하였으며, 그 이상은 부족팽창 제트이다. 다른 점이 있다면 노즐 출구 초음속 제트의 직경이 크게 감소 하였고, 이는 오리피스와 노즐 출구면 사이의 공동(Cavity)부분에 압력이 대기압에 비해 크게 증가하였기 때문이다. 또 일반적인 오리피스나 노즐 유동의 최소 직경, 즉 흐름목으로 정의되는 Vena contracta[6] 현상으로도 설명할 수 있다. 즉 오리피스가 있는 경우 노즐 출구의 제트 직경이 공동(Cavity)의 고압으로 인해 감소하고, 오리피스를 통과한 후 다시 오리피스가 없는 경우와 상응하는 제트의 폭으로 회복하였다.

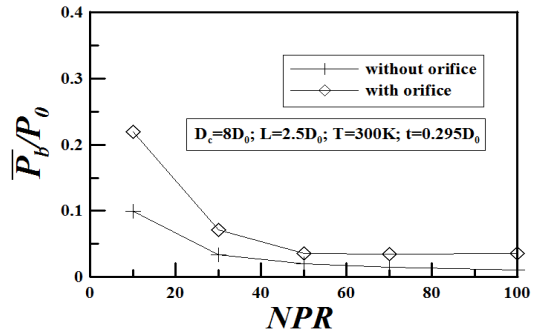


Fig. 4 Effect of NPR on the averaged base pressure

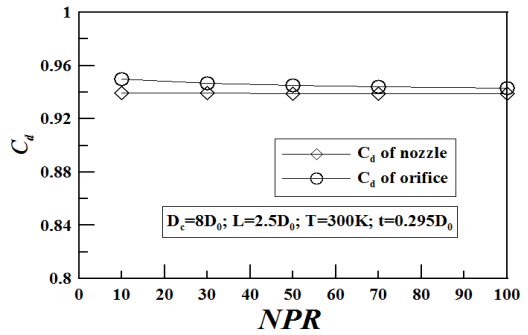


Fig. 5 Effect of NPR on the discharge coefficient

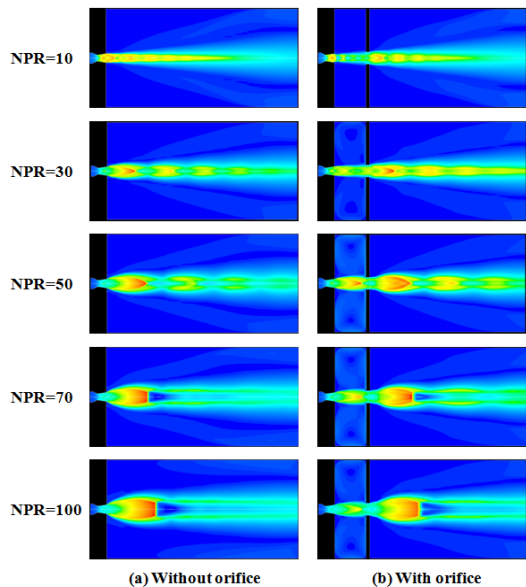


Fig. 6 Computed Mach number contours with and without orifice at different NPRs ($D_c=8D_0$, $L=2.5D_0$, $t=0.295D_0$)

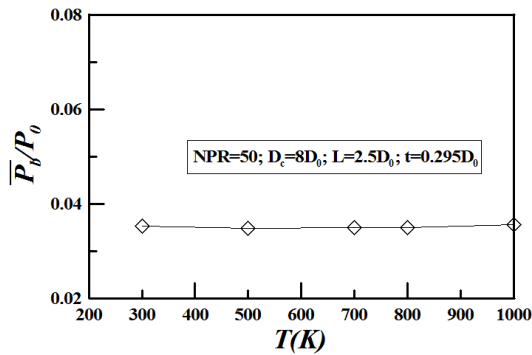


Fig. 7 Effect of total temperature on the averaged base pressure

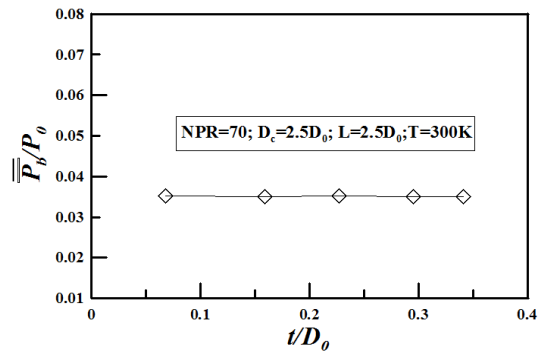


Fig. 9 Effect of orifice thickness on the averaged base pressure

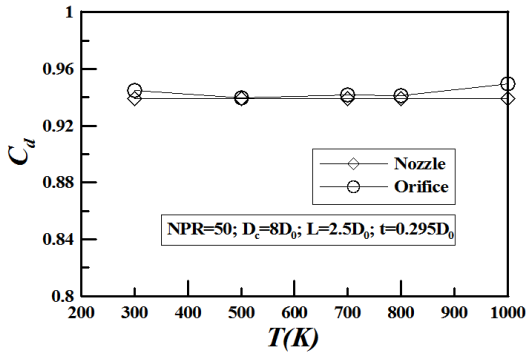


Fig. 8 Effect of total temperature on the discharge coefficient

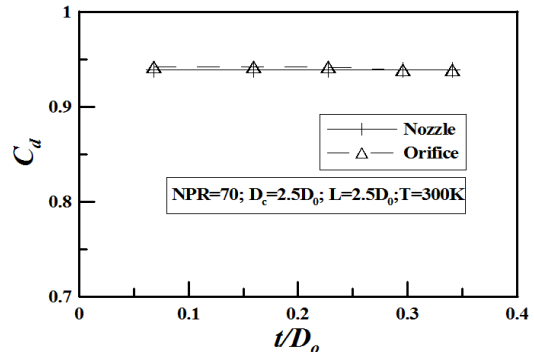


Fig. 10 Effect of orifice thickness on the discharge coefficient

3.2 전온도의 영향

Figure 7은 전온도와 기저압력과의 관계를 나타낸다. Fig. 4의 $NPR=50$ 의 예측값과 크게 상이하지 않음으로 보아, 기저압력은 전온도에 크게 의존하지 않음을 알 수 있다.

Figure 8은 전온도에 대한 노즐과 오리피스에서의 유출계수를 비교한 결과이다. 전반적으로 오리피스에서의 유출계수가 노즐에 비해 크게 나타났지만, 어느 특정 전온도(500 K)에서는 동일한 유출계수가 나타났다. 또한 전온도가 증가할수록 노즐에 비해 미세하게 증가하는 경향이 나타난다.

3.3 오리피스 폭(t)의 영향

Figure 9는 오리피스의 폭변화가 기저압력에 미치는 영향을 나타낸다. 약 0.037로 일정한 결

과로 오리피스의 폭이 배압에는 크게 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

Figure 10은 오리피스 폭과 유출계수의 관계를 나타내는데, $0.227 D_0$ 까지는 노즐에 비해 약 1~2% 정도의 미세하게 큰 유출계수로 예측되며, 그 이상의 폭에서는 동일한 값으로 나타난다. 하지만 오리피스 폭은 유출계수에 영향을 미치지 않는다.

3.4 기저의 직경(D_0)의 영향

Figure 11은 기저의 직경과 기저압력의 관계를 나타내는 결과이다. 어느 특정 직경($2.5 D_0$)까지 기저의 압력은 급격히 증가하는 경향을 보이다가, 그 이상일 경우 단조롭게 감소한다. Fig. 12의 오리피스에서 유출계수도 전술한 다른 변수들의 결과와 동일하게 노즐에 비해 대부분 크게

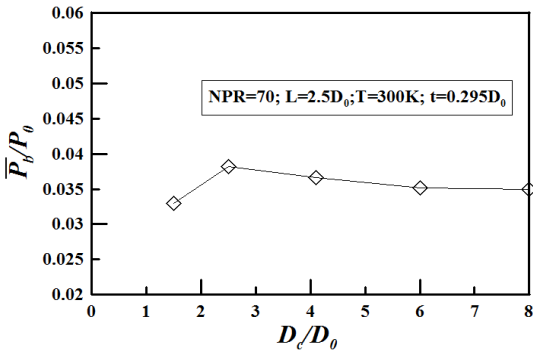


Fig. 11 Effect of the base diameter on the averaged base pressure

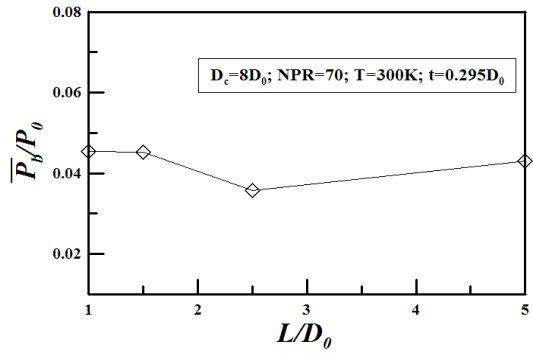


Fig. 13 Effect of length from nozzle exit to orifice on the averaged base pressure

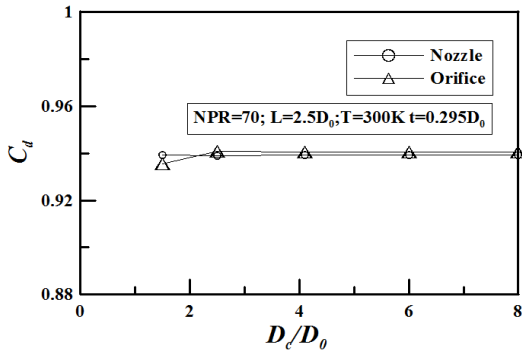


Fig. 12 Effect of the base diameter on the discharge coefficient

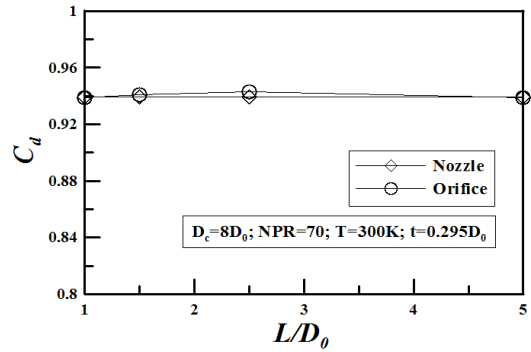


Fig. 14 Effect of the length from nozzle exit to orifice on the discharge coefficient

나타나지만, $1.5 D_0$ 의 직경을 가지는 경우는 노즐에 비해 1%정도 감소한다.

3.5 노즐출구에서 오리피스까지 거리(L)의 영향

Figure 13은 노즐출구에서 오리피스까지의 거리변화에 대한 평균 기저압력 변동의 결과이다. 전반적으로 0.045값으로 일정하였다. 그러나 특정 거리($2.5 D_0$)에서 기저압력이 감소하였다. Fig. 14의 유출계수도 0.94로 일정한 값으로 나타나지만, 동일한 거리($2.5 D_0$)에서 미소의 차이를 보였다. 그러나 노즐출구에서 오리피스까지의 거리변화에 대하여 영향을 거의 받지 않는다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 단일 오리피스의 적용이 초음속 제트의 기저 압력 및 유출계수 등에 미치는 영향을 조사하기 위하여, Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용한 수치해석을 수행하였으며, 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 오리피스를 적용한 경우의 기저압력은 적용하지 않은 경우보다 두 배로 크게 나타나며, 또한 압력비가 증가할수록 기저압력은 전압의 5%에 가깝게 접근한다.
2. 기저의 직경이 약 $2.5 D_0$ 까지 기저압력은 급격히 증가하지만, 그 이상일 경우 단조롭게 감소한다.
3. 기저압력이 오리피스의 폭이나 온도변화에는 크게 의존하지 않는다.
4. 대부분의 오리피스에서의 유출계수가 노즐목

에 비해 크게 나타나며, 이는 출구와 오리피스 사이에 위치한 공동에서 상대적으로 압력이 상승함으로 나타나는 것으로 판단되며, 어느 특정 온도, 특정 오리피스의 폭 그리고 특정 기저의 직경에서 노즐보다 유출계수가 작게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 사업인 일반연구자 지원 사업(과제번호:2009-0087898)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Wagner, B. and White, R. A., "Supersonic Base Flow Problem in Presence of an Exhaust Jet," AIAA Journal, Vol. 18, No. 8, 1980, pp.876-882
2. Hwang, C. B., Chow, W. L. and Moslemian, D., "Base Pressure of a Sudden Expansion from a Conical Converging Nozzle," AIAA Journal, Vol. 31, No. 4, 1993, pp.657-662
3. North, B. F. and Kim, I. K., "Thrust Augmentation for Tomahawk Cruise Missile," DTIC Online - Public Scientific & Technical Information, ADA111781, 1982, pp.395-416
4. Meier, G. E. A., Grabitz, G., Jungowski, W. M., Witczak, K. J., and Anderson, J. S., "Oscillations the Supersonic Flow Downstream of an Abrupt Increase in Duct Cross-Section," AIAA Journal, Vol. 18, No. 4, 1978, pp.394-395
5. Kim, H. D. and Shin, H. S., "Numerical Study on Under-Expanded Jets through a Supersonic Nozzle(II)," KSME(B), Vol. 20, No. 6, 1996, pp.1994-2004
6. Otake, Y., Kashimura, H., Matsuo, S., Setoguchi, T. and Kim, H. D., "Influence of Nozzle Geometry on the Near-Field Structure of a Highly Under-Expanded Sonic Jet," Journal of Fluids and Structures, Vol. 24, Issue 2, 2008, pp.281-293