

## 2차목 초음속 디퓨저의 형상 변화에 따른 성능에 관한 실험적 연구

전준수\* · 김완찬\* · 연해인\* · 김민상\* · 고영성\*† · 한영민\*\*

\* 충남대학교 항공우주공학과, \*\* 한국항공우주연구원 추진시험팀

### An Experimental Study on Performance of Second Throat Exhaust Diffusers of Different Configuration

Jun Su Jeon\*, Wan Chan Kim\*, Hae In Yeoun\*, Min Sang Kim\*, Young Sung Ko\*† and Young Min Han\*\*

\* Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,  
\*\* Propulsion Test Team, KARI

(Received July 26, 2013 ; Revised February 14, 2014 ; Accepted February 17, 2014)

**Key Words:** Second Throat Exhaust Diffusers(STED, 2차목 디퓨저), High Altitude Environment Simulation (고공 환경 모사), Vacuum Chamber(진공 챔버)

**초록:** 본 연구에서는 고공 환경 모사를 위하여 2차목 초음속 디퓨저를 Normal Shock Model를 이용하여 설계/제작하였다. 2차목 디퓨저의 주요 설계 변수인 2차목 디퓨저의 길이와 직경 변화에 따른 성능 특성을 고찰하기 위하여, 상온 고압 질소 가스를 이용하여 디퓨저 성능 실험을 수행하였다. 다양한 디퓨저 길이에 따른 실험 결과 2차목 디퓨저의 시동 특성은 디퓨저 입구 길이( $L_d$ )가 증가함에 따라 아주 미세하게 향상되었으나, 2차목 디퓨저 길이비( $L_{st}/D_{st}$ )와 확대부 길이( $L_s$ )의 증가에 따라서는 크게 향상되었다. 또한 다양한 디퓨저 직경 변화에 따른 실험 결과, 시동 압력과 진공 챔버 압력은 모두 이론 설계 면적비( $A_d/A_{st}$ ) 근처에서 가장 우수한 성능을 보였다.

**Abstract:** Second throat supersonic exhaust diffusers (STEDs) were designed to simulate high-altitude conditions according to the normal-shock model. Experimental studies were performed on the STEDs to investigate how performance characteristics varied with the length and diameter of the STED using high-pressure nitrogen gas. The variation in performance due to length indicated that the performance of the STED could be very slightly improved by adjusting the diffuser inlet length ( $L_d$ ), and it could be significantly improved by optimizing the second throat length ratio ( $L_{st}/D_{st}$ ) and the divergence length ( $L_s$ ). The starting and vacuum chamber pressures exhibited the highest level of performance near  $A_d/A_{st}$  of the design point.

### 1. 서론

성공적인 로켓엔진의 개발을 위해서는 로켓엔진이 작동하는 비행 고도 상에서의 추력 및 점화 특성 등을 지상에서 반드시 선행 검증하여야 한다. 특히 고고도에서 작동하는 상단 추진기관 엔

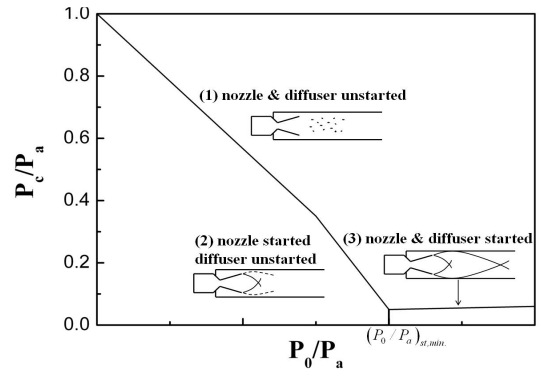
진이나 추력기의 경우, 보통 팽창비가 큰 노즐을 갖기 때문에 표준 대기압 근처의 실험에서는 노즐 내에서 유동박리가 발생하여 정확한 추력의 측정과 설계 목표의 신뢰도 확인이 불가능하다. 따라서 설계 목표에 적합한 비행 고도의 대기압을 인위적으로 조성하여 실제 작동 환경 하에서의 정확한 추력/점화 특성의 예측과 신뢰도 확보가 반드시 이루어져야 하며, 성능을 최종적으로 입증하기 위해서는 고공환경 하에서의 연소실험

† Corresponding Author, ysko5@cnu.ac.kr  
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

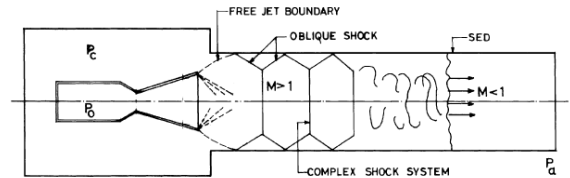
이 필수적이다. 지상에서 고공환경을 모사하는 방법으로는 추진기관에서 발생하는 고압 연소가스의 모멘텀을 이용하는 디퓨저형 모사 시험장치가 일반적으로 활용되고 있다.<sup>(1~12)</sup>

Fig. 1은 초음속 디퓨저의 작동원리에 대한 특성 곡선이다. (1)번 구간에서는 1차 노즐과 디퓨저가 작동하지 않은 상태로 1차 노즐의 유동이 충분히 발달하지 않아 노즐 확대부에서 유동 박리가 일어나는 상태이다.  $P_0/P_a$ 가 증가함에 따라 (2)번 구간에서처럼 노즐 유동은 형성되었으나 아직 디퓨저의 작동이 이루어지지 않고 있는 상태가 된다. 이 구간에서는 1차 노즐에서 나온 유동이 노즐 끝단에서 경사 충격파를 통하여 분리되고 노즐의 출구 부분에서의 유동은 출구 압력에 의하여 디퓨저 내부로 팽창하게 된다.  $P_0/P_a$ 가 일정 압력 이상 증가하게 되면 (3)번 구간과 같이 1차 노즐의 출구 유동이 충분히 팽창되어, Fig. 1(b)와 같이 디퓨저 내부의 벽면에서 경사 충격파가 형성되고 이로 인하여 다시 충격파의 반사가 반복적으로 발생하면서 디퓨저 내부에 충격파 시스템이 완전히 성립되면서, 챔버 내에 진공 압이 일정하게 형성되는 시동 구간으로 불린다.<sup>(4,5)</sup>

대표적인 디퓨저의 종류로는 일정단면적 디퓨저(CAED : Constant-Area Exhaust Diffuser)와 2차목 디퓨저(STED : Second Throat Exhaust Diffuser)가 있으며, 일정 단면적 디퓨저의 경우 이미 1950년대부터 수많은 연구가 진행되어 왔으며 국내에서도 연구가 활발히 수행되었다.<sup>(8,9)</sup> 그러나 일정 단면적 디퓨저보다 시동압력 특성이 양호한 것으로 알려진 2차목 디퓨저는 상대적으로 적은 연구가 수행되어, 실제 디퓨저 개발을 위한 자료는 부족한 실정이다. 국내에서도 2000년대 후반부터 2차목 디퓨저에 대한 연구가 수행되어 왔으나, 비교적 작은 디퓨저 입구 면적비( $A_d/A_t$ )의 제한된 실험 데이터를 이용하여 수치해석 기법을 검증한 후 주로 2차목 디퓨저의 면적비만에 대한 작동 특성을 수치해석 기법을 통해 예측하는 연구가 수행되었다.<sup>(10~12)</sup> 이러한 수치해석 기법으로도 2차목 디퓨저의 작동 특성에 대한 정성적 예측은 가능하지만, 고폭창비 노즐에 대한 실험 데이터는 부족한 실정이라 할 수 있다.



(a) Typical starting characteristic curve



(b) Complex shock system of started regime

Fig. 1 Starting characteristic of a diffuser<sup>(4)</sup>

따라서 본 논문에서는 향후 국내에서 고폭창비 노즐의 고공 환경 모사 실험을 위한 실제 2차목 디퓨저를 개발할 때 필요한 실험 데이터베이스를 확보하고자 하였다. 이를 위해 면적비 외에도 주요 설계 변수인 각종 길이 및 디퓨저 확대부를 변경시킨 2차목 디퓨저를 설계/제작하고, 상온 질소 가스를 이용한 실험을 통하여 2차목 초음속 디퓨저의 형상에 따른 성능 특성을 분석하고자 하였다.

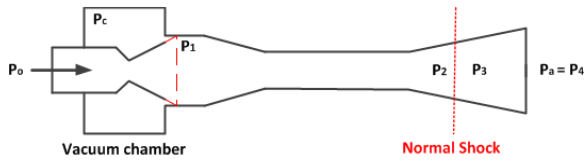
## 2. 초음속 디퓨저 설계 및 변수 선정

### 2.1 초음속 디퓨저 설계

고공 환경을 모사하기 위한 초음속 디퓨저는 수직 충격파 모델(Normal Shock Model)을 이용하여 설계되며, 아래 식 (1)~(6)으로 계산할 수 있다.<sup>(4~8)</sup> Fig. 2는 계산을 위한 2차목 디퓨저의 변수를 보여주고 있다. 또한, 디퓨저의 2차목 면적비( $\Psi = A_d/A_{st}$ )는 수직 충격파 모델에 의하여 비열비( $\gamma$ )와 디퓨저 입구 면적비( $A_d/A_t$ )에 따라 최대 허용치가 존재한다. Fig. 3은 비열비( $\gamma$ )와 디퓨저 입구 면적비( $A_d/A_t$ )에 따른 디퓨저의 2차목 면적비( $\Psi = A_d/A_{st}$ ) 값을 나타낸 것으로, 계산된 디퓨저

**Table 1** Specification of the STED

Parameters		STED
$D_d$	Diffuser inlet diameter(mm)	17.9
$L_d$	Diffuser inlet length(mm)	17.9
$L_{st}$	Second throat length(mm)	114.3
$D_{st}$	Second throat diameter(mm)	14.3
$D_e$	Diffuser outlet length(mm)	44.6
$L_c$	Convergence part length(mm)	20.4
$L_s$	Divergence part length(mm)	144.4
$L$	Diffuser total length(mm)	297.0
$\theta_c$	Convergence angle( $^\circ$ )	5
$\theta_e$	Divergence angle( $^\circ$ )	6
$A_d/A_t$		84.2
$A_d/A_{st}(\psi)$		1.56
$A_{st}/A_t$		53.9
$A_e/A_{st}$		9.8
$(L/D)_{st}$		8.0
$(L/D)_d$		1.0
$(L/D_{st})_{st}$		20.8



**Fig. 2** Flow model of a STED

$$\frac{A_d}{A_t} = \frac{1}{M_1} \left[ \frac{2}{\gamma+1} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right) \right]^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \quad (1)$$

$$\frac{P_0}{P_1} = \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2)$$

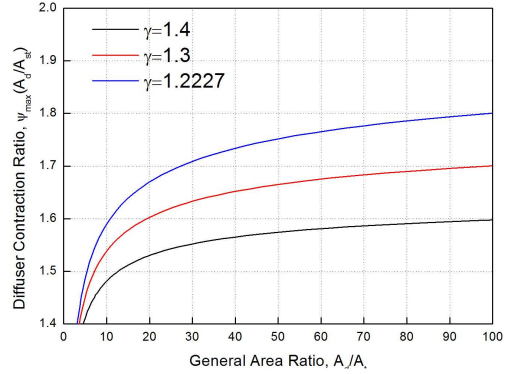
$$\frac{A_{st}}{A_t} = \frac{1}{M_2} \left[ \frac{2}{\gamma+1} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2 \right) \right]^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \quad (3)$$

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_2^2 + \frac{2}{\gamma-1}}{\frac{2\gamma}{\gamma-1} M_2^2 - 1}} \quad (4)$$

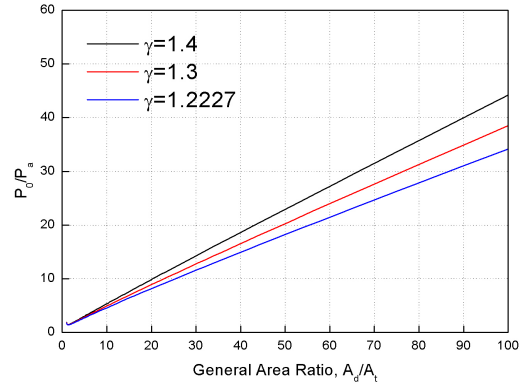
$$\left( \frac{P_0}{P_a} \right)_{st} = \left( \frac{P_0}{P_2} \frac{P_2}{P_3} \frac{P_3}{P_a} \right) \quad (5)$$

$$\left( \frac{P_0}{P_a} \right)_{st} = \frac{\left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)}}{\frac{2\gamma}{\gamma+1} M_2^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}} \left( \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_4^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_3^2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (6)$$

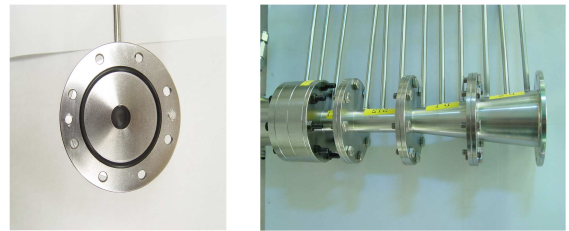
입구 면적비( $A_d/A_t$ )를 이용하여 해당하는 2차목



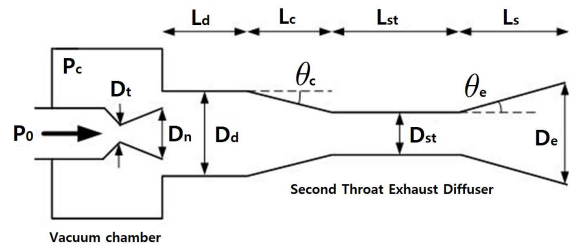
**Fig. 3** Allowable contraction ratio according to general area ratio



**Fig. 4** Starting condition according to general area ratio and specific heat( $\Psi = \max$ )



**Fig. 5** Manufactured STED



**Fig. 6** Main design parameters of a STED

면적비( $\Psi = A_d/A_{st}$ )를 구할 수 있다. 또한, Fig. 4는 디퓨저의 2차목 면적비( $\Psi = A_d/A_{st}$ )가 최대 허용치 일 때 비열비( $\gamma$ )와 디퓨저 입구 면적비( $A_d/A_t$ )에

다른 시동 압력( $(P_0/P_a)_{st}$ )의 변화를 보여주고 있다. Table 1과 Fig. 5는 각각 수직 충격과 모델로 설계된 이론 설계치 디퓨저의 제원과 설계/제작된 디퓨저를 보여주고 있다.

### 2.2 2차목 디퓨저 주요변수 선정

2차목을 가지는 초음속 디퓨저의 성능에 주요 영향을 주는 변수로는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 연소실 모사용 1차 노즐의 노즐 목 직경( $D_1$ ), 1차 노즐의 출구 직경( $D_n$ ), 1차 노즐의 축소/확대 반각, 디퓨저의 입구 직경( $D_d$ ), 디퓨저의 입구 길이( $L_d$ ), 디퓨저의 축소 각( $\theta_c$ ), 디퓨저의 2차목 직경( $D_{st}$ ), 2차목 길이( $L_{st}$ ), 디퓨저의 확대각( $\theta_e$ ), 디퓨저의 출구 직경( $D_e$ ), 비열비( $\gamma$ ), 1차 노즐 출구 마하수( $M_e$ ), 1차 노즐의 전단 압력( $P_0$ ) 등이 있다. 그리고 이들의 비, 특히 1차 노즐 목 면적과 디퓨저 입구 면적비( $A_d/A_t$ ), 1차 노즐의 팽창비( $A_n/A_t$ ), 1차 노즐의 노즐 목 면적과 디퓨저 2차목 면적비( $A_{st}/A_t$ ), 디퓨저 입구 면적과 디퓨저의 2차목 면적비( $A_d/A_{st}$ ), 각 부분별 직경 대 길이비( $L/D$ )는 설계 시 주요 변수로 알려져 있다.

본 연구에서는 기본형으로 설계된 Table 1의 2차목 디퓨저를 기준으로, 길이비와 면적비를 변수로 선정하였다.<sup>(13,14)</sup> 길이비의 변수로는 직경을 고정한 상태에서  $L_d/D_d$ ,  $L_{st}/D_{st}$ ,  $L_s$ 를 변수로 선정하였고, 면적비의 변수로는 길이를 고정한 상태에서  $A_d/A_{st}(\Psi)$ ,  $A_d/A_t$ 를 변수로 선정하였다. Table 2, 3은 길이비와 면적비를 기준으로 선정한 변수를 보여주고 있다.

기본형 디퓨저는 Table 2에서는 CASE 1, Table 3에서는 CASE D로 표시하였으며, 동일한 디퓨저를 나타내고 있다. 길이비는 CASE 1~3, CASE 4~9 및 CASE 10~11로 나타내었으며 각각 디퓨저 입구 길이 변화( $L_d/D_d$ ), 2차목 길이 변화( $L_{st}/D_{st}$ ) 및 확대부 길이( $L_s$ ) 변화를 보여준다. 면적비는 CASE A~C 및 CASE E~I로 나타내었고, 각각 디퓨저 입구 직경( $D_d$ )과 2차목 직경( $D_{st}$ ) 변화를 보여준다. 참고로 본 연구에서의 사용된 노즐의 팽창비( $A_n/A_t$ )는 45이다.

## 3. 실험 장치 및 방법

다양한 변수로 구성된 초음속 디퓨저를 이용하여 고고도의 저압 환경을 모사하기 위하여 디퓨

**Table 2** Specification of STED according to diffuser length

CASE	$L_d/D_d$	$L_{st}/D_{st}$	$L_s$ (mm)
1 [base]	1	8	72.2
2	0.5		
3	0		
4	1	3	72.2
5		4	
6		5	
7		7	
1 [base]		8	
8		9	
9	12		
10	1	8	0
1 [base]			72.2
11			144.4

**Table 3** Specification of STED according to diffuser diameter

CASE	$L_d/D_d$	$L_{st}/D_{st}$	$A_d/A_{st}(\Psi)$	$A_d/A_t$
A	1.09	8	1.31	70.7
B	0.899		1.94	104.1
C	0.82		2.32	125.0
D [base]	1		1.56	84.3
E	1	6.38	1.00	84.3
F		7.14	1.25	
G		13.5	1.76	
H		8.47	2.51	
I		11.43	3.20	

저를 입구, 목, 출구 부분으로 나누어 제작하였다. 디퓨저 성능 실험에 사용된 실험 장치는 선행 연구에서 사용하던 것으로, 크게 고압 기체( $N_2$ ) 공급부, 시험부(Test Section), 데이터 측정 및 제어부로 나눌 수 있다.<sup>(13~15)</sup> Fig. 7은 본 실험에서 사용된 고압 질소 공급 부 및 시험부의 시험 장치도로서, 고압으로 저장된 질소 탱크를 이용하여 시험부로 질소를 공급할 수 있도록 되어 있다. 시험부는 설계된 디퓨저가 장착되는 곳으로, 진공 챔버 내부의 압력과 2차목 벽면 압력 변화를 측정하기 위해 전기식 진공 압력센서(VALCOM, -1~3 kgf)를 진공 챔버와 디퓨저 길이 방향으로 장착하여 데이터를 수집할 수 있도록 하였다. 모든 가압 압력은 bar 단위를 사용하였지만, 측정된 진공 압력은 일반적으로 진공 압력을 나타내는데

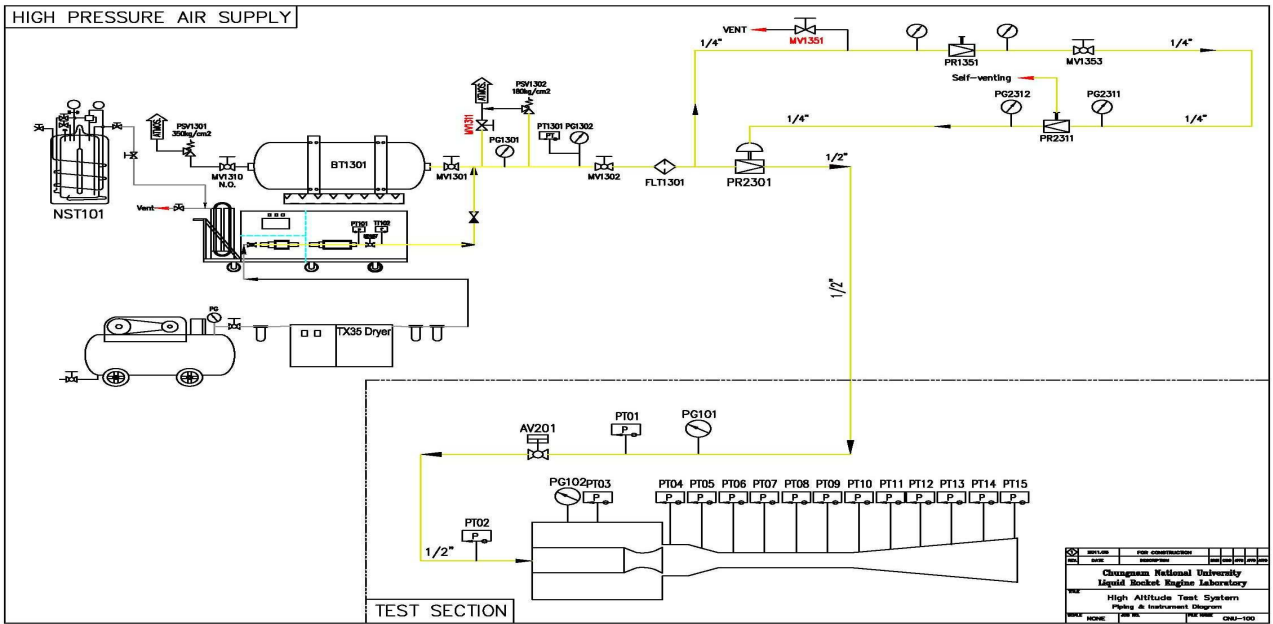


Fig. 7 Schematic diagram of the test apparatus



Fig. 8 Test section

최소화하기 위해서 고무 오링과 진공 그리스를 사용하였다. 진공 펌프를 이용하여 챔버와 디퓨저 내의 압력을 20 torr 미만까지 설정한 후 시간에 따른 압력회복 값을 측정하여 누설여부를 판단하였다. Fig. 9에서 약 500초 동안 8 torr의 압력상승이 있는 것으로 보아, 실험 시간을 고려할 때 누설이 없는 것으로 판단할 수 있다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 길이 변화에 따른 실험 결과

설계된 초음속 2차목 디퓨저에서 입구 길이 ( $L_d$ ), 2차목의 길이( $L_{st}$ ), 확대부의 길이( $L_s$ )를 각각 변화시켜가며, 디퓨저의 성능 특성을 분석하였다. 각각의 실험에서 변수에 해당하는 부품을 제외한 나머지 디퓨저 부품은 기본형 부품을 사용하였다.

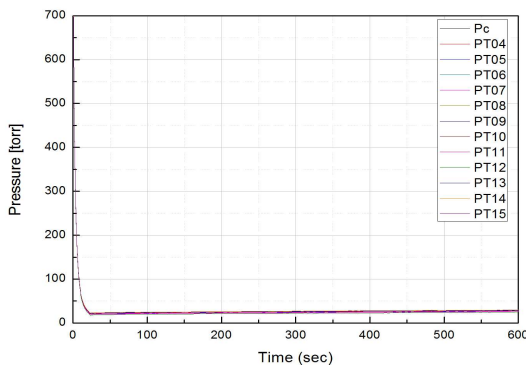


Fig. 9 Pressure variation of leak test

많이 사용되는 torr 단위로 변환하여 표시하였으며, 1 bar는 약 750 torr에 해당한다. Fig. 8은 제작/조립된 시험부의 모습을 보여주고 있다. 디퓨저 작동 실험에 앞서 정확한 실험 결과 값을 얻기 위해, 기밀시험을 수행하여 디퓨저 연결부의 누설 여부를 확인하였다. 각 결합부에는 누설을

##### 4.1.1 디퓨저 입구 길이( $L_d$ ) 효과

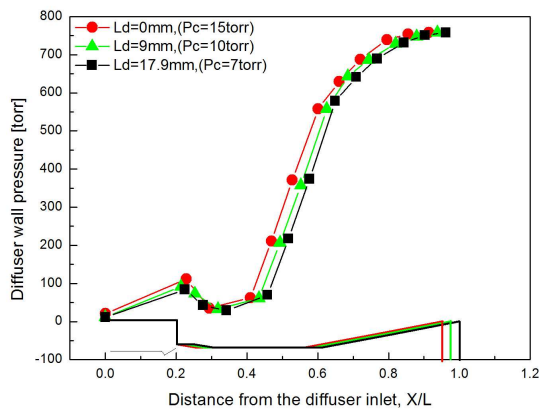
Table 4는 디퓨저 입구 길이 변화에 따른 실험 결과를 정리한 것으로 디퓨저 입구의 길이가 짧아질수록 작은 차이지만 시동압력이 높아지고, 진공 챔버의 압력이 커지는 것을 확인하였다. 1차 노즐에서 나오는 유동이 팽창하여 디퓨저 입구에서 만나게 되는데, 그 지점에서의 압력이 진공 압력과 동일하다고 알려져 있다. 디퓨저 입구

**Table 4** Test result of diffuser length variation

CASE	$L_d$ [mm]	$(P_o/P_a)_{st}$	$P_c$ [torr]
1 [base]	0.0	43.6	15.0
2	9.0	41.8	10.0
3	17.9	41.5	7.0

**Table 5** Test result of throat length variation

CASE	$L_{st}/D_{st}$	$(P_o/P_a)_{st}$	$P_c$ [torr]
4	3	50.0	8.4
5	4	48.5	9.2
6	5	45.5	10.3
7	7	43.1	7.4
1 [base]	8	42.0	7.3
8	9	42.0	9.1
9	12	41.8	7.2



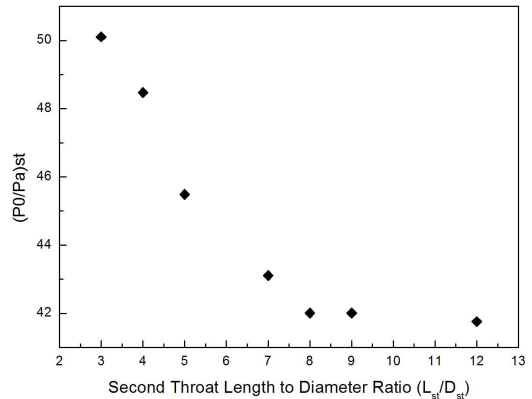
**Fig. 10** Pressure distribution according to  $L_d$

길이를 변화시키면 팽창된 유동이 충돌하는 지점이 변하게 되고, 그로인해 시동 압력과 진공 챔버의 압력이 변화하는 것으로 판단된다.

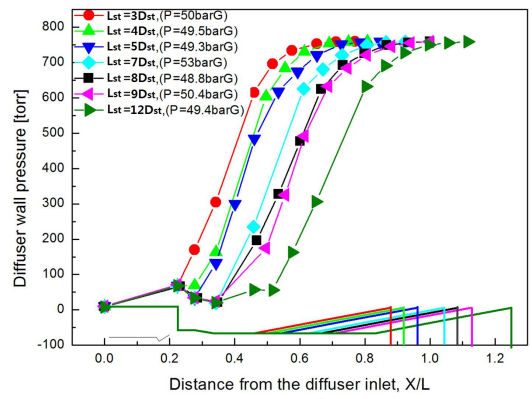
또한, Fig. 10은 입구 길이에 따른 디퓨저의 압력 분포를 보여주는 것으로 디퓨저 입구 길이가 증가할수록 축소부의 위치가 변하게 되어 그에 따라 진공도가 낮아지고 압력 회복 위치가 점차 뒤로 밀리는 것을 확인할 수 있다.

4.1.2 2차목 길이( $L_{st}$ ) 효과

2차목 길이는 디퓨저 성능에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 있고 디퓨저 전체 길이에 영향을 크기 미치기 때문에, 2차목 길이에 대한 성능을 확인하기 위해 2차목 길이를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 변화된 2차목 길이는 CASE 1, 4~9에 해당하며, 이를 직경에 대한 길이비( $L_{st}/D_{st}$ )로 환산해 보면 Table 2 및 5에 나타낸



**Fig. 11** Effect of second-throat length on the performance



**Fig. 12** Pressure distribution according to  $L_{st}$

바와 같이 3~12의 값을 갖게 된다.

Table 5는 2차목 길이 변화에 따른 실험 결과를 정리한 것으로 2차목 길이비( $L_{st}/D_{st}$ )가 커질수록 진공 챔버의 압력은 큰 변화가 없으나, Fig. 11의 그래프에서 볼 수 있듯이 시동 압력은 낮아지다가 8 이상에서는 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. Fig. 12는 2차목 길이 변화에 따른 디퓨저의 압력 분포를 보여주는 것으로, 2차목 길이가 짧을수록 외기와의 압력 회복을 하는 위치가 앞으로 당겨가는 것으로 확인되었다.

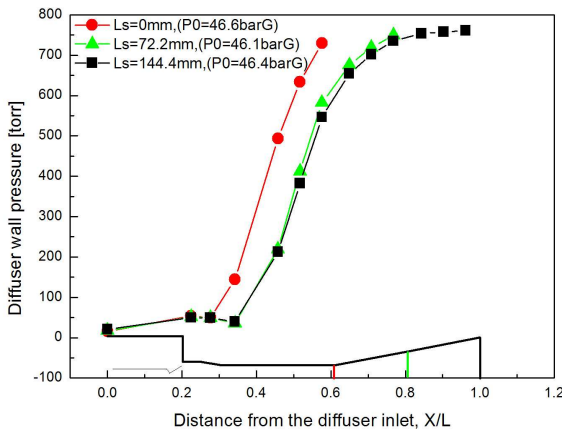
이는 2차목 길이비( $L_{st}/D_{st}$ )가 일정 한계치 길이보다 짧을 경우 외기와의 압력 회복 위치가 앞으로 당겨오게 되고, 그로인해 1차 노즐 유동에 의해 디퓨저 내부 유동이 충분히 발달하지 못하기 때문에 1차 노즐 전단 압력이 상승하는 것이다. 1차 노즐 전단 압력이 상승할 경우, 상대적으로 짧은 거리에서도 초음속 유동을 발달시킬 수 있어 외기와의 압력 회복 위치를 뒤쪽으로 이동시킬 수 있기 때문이다. 또한, 2차목 길이비

**Table 6** Test result of divergence length variation

CASE	$L_s$ [mm]	$(P_o/P_a)_{st}$	$P_c$ [torr]
10	0.0	46.6	16.1
1 [base]	72.2	41.1	12.7
11	144.0	41.5	18.9

**Table 7** Test result of diffuser diameter variation

CASE	$A_d/A_t$	$A_d/A_{st}(\psi)$	$(P_o/P_a)_{st}$	$P_c$ [torr]
A	70.7	1.31	46.5	25.0
D [base]	84.3	1.56	46.6	20.0
B	104.1	1.94	51.4	18.0
C	125.0	2.32	58.8	16.0



**Fig. 13** Pressure distribution according to  $L_s$

$(L_{st}/D_{st})$ 가 8 일 경우는 디퓨저 내부 유동이 충분히 발달되어 전단 압력의 상승이 없이도 시동이 걸리는 상태가 되고, 2차목 길이비( $L_{st}/D_{st}$ )가 8 이상이 될 경우, 이미 디퓨저 내부 유동이 충분히 발달된 상태이기 때문에 길이 변화에 따른 압력 회복의 위치의 변화만 있을 뿐 1차 노즐 전단 압력의 차이가 없는 것으로 확인되었다. 따라서 2차목 길이비( $L_{st}/D_{st}$ )가 8 이상일 경우는 실험 장치를 구성하는 경제적 측면에서 과설계 되었다고 할 수 있다.

4.1.3 확대부 길이( $L_s$ ) 효과

디퓨저 확대부 길이는 시동압력에 영향을 주는 주요 변수로 확대부 길이 변화로 시동압력이 변하게 된다. 확대부 길이에 따른 시동압력을 보기

위하여 확대부의 길이를 기본설계인 144mm를 기준으로 72.2mm, 0mm로 실험을 수행하였다. Table 6은 실험 결과를 정리한 것으로, 확대부가 없을 경우의 시동압력이 가장 높은 것으로 확인되었고, 확대부 길이가 72.2mm 이상에서는 디퓨저의 시동압력이 거의 동일한 것으로 확인되었다. Fig. 13은 디퓨저 확대부 변화에 따른 디퓨저 벽면의 압력 분포를 보여주는 것으로 확대부가 없을 경우 압력 회복의 위치가 당겨져 있으나, 72.2mm, 144.4mm는 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다.

확대부는 2차목에서 초음속에서 아음속으로의 유동 전이가 일어난 후 아음속 유동의 유속을 감소시키는 역할을 하고, 유동 감속으로 인해 외기와의 압력 차이를 줄일 수 있다. 따라서 확대부 유무에 따라 갑작스러운 압력 회복을 보이며, 확대부가 없는 경우 압력 회복의 위치가 앞쪽으로 당겨 오면서 디퓨저의 시동을 위한 1차 노즐의 압력이 상승하게 된 것으로 판단된다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 확대부의 유무에 따라 시동 압력에 영향을 미치나, 일정 길이 이상 확보 시 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인된다.

4.2 직경 변화에 따른 실험 결과

2차목 초음속 디퓨저의 디퓨저 직경( $D_d$ ) 및 2차목 직경( $D_{st}$ )을 변화시켜가며 디퓨저의 시동압력과 디퓨저 내의 진공도를 확인하였다. 2차목 디퓨저 입구부 및 2차목 직경에 따른 영향만을 확인하기 위하여 각각을 제외한 나머지 변수들은 기본형인 디퓨저와 동일하게 고정하였다. 또한, 확대부의 영향은 고려하지 않기 위해 모든 직경 변화 실험에서는 확대부를 장착하지 않고 실험을 수행하였다.

4.2.1 디퓨저 입구 직경( $D_d$ ) 효과

전술한 바와 같이 2차목 디퓨저의 입구부에 따른 영향만을 확인하기 위하여 2차목 입구 직경( $D_{st}$ ), 2차목 길이비( $L_{st}/D_{st}$ ), 디퓨저 입구 길이비( $L_d/D_d$ ), 축소각( $\theta$ )을 기본형인 디퓨저와 동일하게 고정시켰다. 디퓨저 입구 직경( $D_d$ )이 변화함에 따라 2차목은 고정되어 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\psi)$ )도 상대적으로 변하게 된다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 2차목 면적비의 허용치가 약 1.59로 계산되었고, 따라서 CASE A, D는 2차목 면적

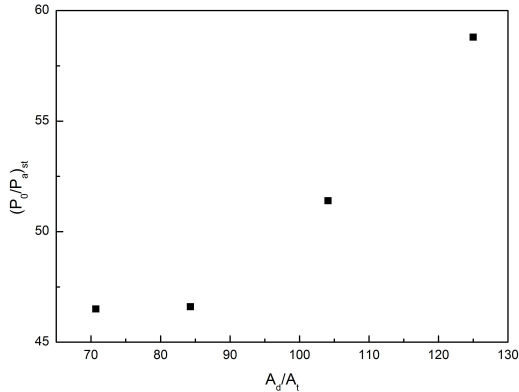


Fig. 14 Starting pressure according to  $A_d/A_t$

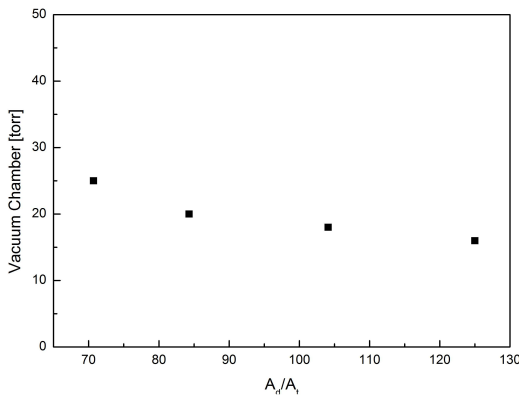


Fig. 15 Chamber pressure according to  $A_d/A_t$

비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ ) 최대 허용치 이내, CASE B, C는 허용치 바깥에 각각 분포하게 된다. Table 7은 디퓨저 입구 직경( $D_d$ ) 변화에 따른 실험 변수 및 실험 결과를 정리한 것이고, Fig. 14는 디퓨저 면적비( $A_d/A_t$ )에 따른 시동 압력을 나타낸다. 실험 결과에서도 알 수 있듯이 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )가 최대 허용치 이내의 형상에서는 시동 압력이 거의 일정하지만, 최대 허용치를 초과할 경우 시동 압력이 급격히 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 2차목 디퓨저는 1차 노즐에서 발생된 유동이 상대적으로 면적이 작은 2차목을 채우고, 그로인해 낮아진 노즐 배압에 따라 1차 노즐에서의 과소 팽창이 발생하여 유동이 디퓨저 입구 벽면까지 팽창하면서 시동이 된다. 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )가 최대 허용치 이내에 있을 경우, 2차목 직경( $D_{st}$ )이 고정되어 있기 때문에 시동 압력이 거의 동일하게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )가 최대 허용치를 초과한 경우, 동일한 1차 노즐의 압력으로 확장된 디퓨저 입구 벽면까지 유동 팽창이 불가능하게 되어 1차 노즐의 전압력이 상승하는 것으로

Table 8 Test result of second throat diameter variation

CASE	$A_d/A_{st}(\Psi)$	$P_{st}$ [barg]	$P_{vc}$ [torr]
E	1.00	65.5	27
F	1.25	56.8	24
D [base]	1.56	46.6	20
G	1.76	48.9	20
H	2.51	-	75
I	3.20	-	350

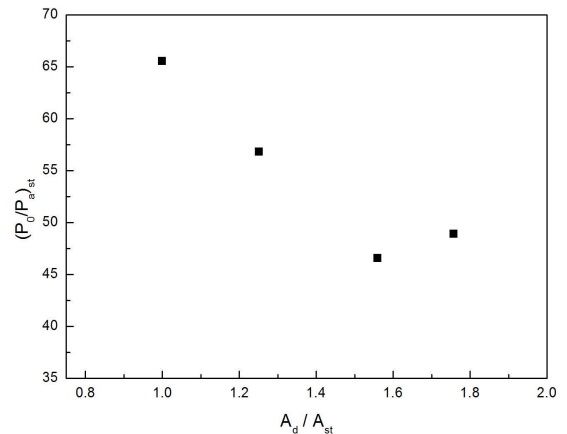


Fig. 16 Starting pressure according to diffuser contraction ratio( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )

로 판단된다. Fig. 15는 디퓨저 면적비( $A_d/A_t$ )에 따른 진공 챔버 압력을 보여주고 있으며, 디퓨저 입구 직경( $D_d$ )이 커질 경우 디퓨저 입구 벽면까지 유동이 더 팽창하면서 진공 챔버의 압력이 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )의 최대 허용치와 무관하게 지속적으로 낮아지는 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 2차목 직경( $D_{st}$ ) 효과

2차목 디퓨저의 직경( $D_{st}$ )에 따른 영향만을 확인하기 위하여 디퓨저 입구 직경( $D_d$ ), 2차목 길이비( $L_{st}/D_{st}$ ), 디퓨저 입구 길이비( $L_d/D_d$ ), 축소각( $\theta_c$ )를 기본형 2차목 디퓨저와 동일하게 고정시키고, 2차목 직경( $D_{st}$ )을 변화시켜가며 디퓨저 성능 변화를 살펴보았다. 2차목 직경( $D_{st}$ ) 변화는 2차목 디퓨저의 주요 설계 변수인 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ ) 변화를 수반하게 되고, 본 연구에서는 기본형 디퓨저(CASE D)를 포함하여 6개의 변수를 선정하였다. CASE E, F, D는 2차목 면적비 최대 허용치( $A_d/A_{st}(\Psi)$ ) 이내에 CASE G, H, I는 최대 허용치 밖에 각각 분포하고 있다. Table 8은 2차목 직경( $D_{st}$ )에 따른 실험 변수 및 실험 결과를



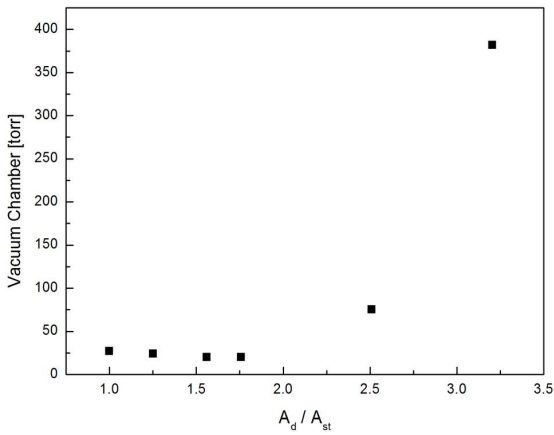


Fig. 17 Chamber pressure according to diffuser contraction ratio( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )

정리한 것이고, Fig. 16, 17은 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )에 따른 시동 압력, 진공 챔버 압력을 각각 보여주고 있다. Fig. 16에서 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )가 커질수록 시동 압력이 낮아지다가 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ ) 최대 허용치인 1.59를 넘어갈 경우 시동 압력이 다시 상승하기 시작하였고, 그래프에는 표시되지 않았지만 면적비가 2.51, 3.20에서는 시동이 걸리지 않는 것으로 확인되었다. 이는 2차목 직경( $D_{st}$ )이 작아질수록 더 적은 유량으로도 2차목을 충분히 채울 수 있기 때문에 낮은 압력에서 시동이 걸리다가 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )가 최대 허용치를 초과할 경우, 2차목 직경( $D_{st}$ )이 너무 작아져 노즐 배압이 상승하게 되고 그로인해 더 높은 시동 압력이 요구되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 2차목 직경( $D_{st}$ )이 지나치게 작을 경우는 유동이 충분히 발달하지 못하여 시동이 걸리지 않는 것으로 판단된다. Fig. 17에서 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )가 커질수록 진공 챔버 압력이 낮아지다가 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )가 최대 허용치를 넘어선 1.76 에서도 진공 챔버의 압력이 낮은 것을 확인할 수 있는데, 2차목 직경( $D_{st}$ )이 작아지면서 더 큰 노즐 배압으로 인해 진공 챔버 압력이 낮아진 것으로 판단된다. 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ ) 1.76에서는 2차목에서 유동이 완전 발달하여 1차 노즐 압력 상승에도 진공 챔버 압력은 낮은 것으로 판단된다. 하지만 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ )가 그 이상이 될 경우, 시동이 걸리지 않아 진공 챔버의 압력이 급격히 상승하는 것으로 판단된다. 또한 CASE E는 2차목 디퓨

저인 다른 경우와 달리 동일 단면적 디퓨저(CAED)에 해당하며, 동일 단면적 디퓨저보다 2차목 디퓨저가 더 낮은 압력에서 시동이 걸리고 더 높은 진공도를 모사할 수 있는 장점이 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 축소형 상온 실험을 통하여 고공환경 모사용 2차목 초음속 디퓨저의 형상에 따른 성능 확인을 위해 수직 충격과 모델(Normal Shock Model)을 이용하여 기본형 초음속 디퓨저를 설계하였다. 기본형 디퓨저 설계를 바탕으로 초음속 디퓨저의 길이비, 면적비 및 확대부를 변화시켜가며 디퓨저를 제작하고, 실험을 수행하여 그 특성을 분석하였다.

길이 변화에 따른 실험 결과 디퓨저 입구길이( $L_d$ ) 변화는 1차 노즐을 지난 유동이 디퓨저 벽면까지 팽창하는 면적이 변하여 진공도에 영향을 주지만, 영향이 그다지 크지는 않은 것으로 확인되었다. 2차목 길이( $L_{st}$ )가 짧아질수록 시동압력이 점점 커지는 것으로 확인되었고, 2차목 길이비( $L_{st}/D_{st}$ )가 8이상에서는 시동 압력 및 진공 챔버 압력의 변화가 거의 없는 것으로 확인되었다. 마지막으로 디퓨저 확대부( $L_s$ )가 존재하면 시동 압력이 감소되지만, 일정 길이 이상에서는 그 효과가 없음을 확인하였다.

디퓨저 직경 변화에 대한 실험 결과, 디퓨저 입구 직경( $D_d$ ) 변화는 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ ) 변화가 수반되어 최대 허용 면적비 이내에 있을 경우 2차목 면적비가 커짐에 따라 진공 챔버 압력이 상승하지만 최대 허용 면적비를 초과할 경우 진공 압력 상승 뿐만 아니라 시동 압력도 급격히 상승하여 성능이 나빠지는 것으로 확인되었다. 2차목 직경( $D_{st}$ ) 변화에 따른 실험 결과도 마찬가지로, 최대 허용 면적비 이내에 있을 경우 시동 압력이 점차 낮아지다가 범위를 초과하면 시동 압력이 상승하고, 심지어는 시동이 걸리지 않는 것으로 확인되었다. 진공 챔버 압력은 2차목 직경이 작아질수록 낮아지고, 2차목 면적비( $A_d/A_{st}(\Psi)$ ) 최대 허용치 이상에서 더욱 낮아지다 일정 면적비 이상에서 진공 챔버 압력이 급격히 높아지는 경향을 보였다. 이러한 경향으로 보아

2차목 면적비 최대 허용치 근처에서 가장 효율적인 2차목의 설계가 가능한 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 얻어진 2차목 디퓨저의 설계 자료 및 실험 결과들은 향후 최적화된 실물형 디퓨저를 설계 및 제작하는데 있어 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

### 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 인재양성형 학연협력강화사업의 기술지원을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌 (References)

- (1) Keenan, J. H., Neumann, E. P. and Lustwerk, F., "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 72, 1950, pp. 299~309.
- (2) Schafer, K. and Zimmermann, H., 2006, "Development and Operational Conditions of VINCI ®Altitude Simulation Test Bench P4.1," 42<sup>nd</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.
- (3) Roschke, E. J., Massier, P. F. and Gier, H. L., 1962, "Experimental Investigation of Exhaust Diffuser for Rocket Engines," Technical Report No.32-210.
- (4) Annamalai, K., Visvanathan, K., Sriramulu, V. and Bhaskaran, K. A., 1998, "Evaluation of the Performance of Supersonic Exhaust Diffuser Using Scaled Down Models," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 17, pp. 217~229.
- (5) Annamalai, K., Satyanarayana, T., Sriramulu, V. and Bhaskaran, K. A., "Development of Design Methods for Short Cylindrical Supersonic Exhaust Diffuser," *Experiment in Fluids*, vol. 29, 2000, pp. 305~308.
- (6) James, E. A. J. and Theo, G. K., 2006, "Gas Dynamics," Pearson Prentice Hall.
- (7) John D. A., 2003, "Modern Compressible Flow," Mc Graw Hill.
- (8) Sung, H. G., Yeom, H. W., Yoon, S. K., Kim, S. J. and Kim, J. G., 2010, "Investigation of Rocket Exhaust Diffusers for Altitude Simulation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 2, pp. 240~247.
- (9) Park, B. H., Lim, J. H. and Yoon, Y. S., 2008, "Fluid Dynamics in Starting and Terminating Transients of Zero-Secondary Flow Ejector," *Heat and Fluid Flow*, Vol 29, pp. 327~339.
- (10) Park, S. H., Park, B. H., Lim, J. H. and Yoon, Y. S., 2008, "Improvement of Starting Performance in Supersonic Exhaust Diffuser with Second Throat for High Altitude Simulation," *KSPE Spring Conference*, pp. 321~327.
- (11) Park, S. H., Park, B. H., Lim, J. H. and Yoon, Y. S., 2008, "Investigation of the Essential Parameters Governing Starting Characteristics in the Second Throat Exhaust Diffuser for High Altitude Simulation," *KSME Conference*, pp. 2642~2647.
- (12) Lim, J. H., Park, B. H., Yoon, Y. S. and Lee, Y., 2008, "Parametric Investigation on the Essential Flow Factors Commanding Steady Operations of the Second Throat Exhaust Diffuser," 44<sup>th</sup> AIAA /ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.
- (13) Park, J. H., Lee, Y. S., Kim, J. I., Ko, Y. S., Kim, S. J., Kim, Y. and Kim, S.H., 2011, "Study on Design of Secondary Throat Supersonic Exhaust Diffusers," *KSPE Fall Conference*, pp. 881~884.
- (14) Park, J. H., Jeon, J. S., Yu, I. S., Ko, Y. S., Kim, S. J., Kim, Y. and Han, Y. M., 2011, "Performance Characteristics of Secondary Throat Supersonic Exhaust Diffusers," *KSPE Fall Conference*, pp. 641~644.
- (15) Kim, J. H., Yeoun, H. I., Kim, M. S., Jeon, J. S., Ko, Y. S. and Kim, S. H., 2012, "An Experimental Study on Performance of Second Throat Exhaust Diffuser according to Diameter of Second Throat," *KSPE Fall Conference*, pp. 871~874.