

소형 초음속 디퓨저를 이용한 고고도환경 모사에 대한 시험적 연구

Experimental Study of High-Altitude Simulation using Small-Scale Supersonic Diffuser

이지형*
Lee, Ji-Hyung

오종윤*
Oh, Jong-Yun

변종렬*
Byun, Jong-Ryul

ABSTRACT

Experimental study was conducted on cylindrical supersonic diffuser in order to investigate the effects of the ratios of diffuser area to nozzle throat area (A_d/A_t), diffuser area to nozzle exit area (A_d/A_e), nozzle exit area to its throat area (A_e/A_t), and diffuser length to its diameter (L/D), the free volume of vacuum chamber, and the relative distance between nozzle exit and diffuser inlet on the diffuser performance. The study showed that the minimum diffuser starting pressure (P_o/P_a)st increased monotonically with increase in (A_d/A_t) as predicted by the normal shock and momentum theory models and the volume of vacuum chamber affected vacuum pressure level during diffuser operation at lower value of (A_d/A_e). The results of this investigation will be utilized in the design of real-scale high-altitude simulation test facility.

주요기술용어(주제어) : High Altitude Simulation(고 고도 모사), Vacuum Chamber(진공챔버), Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Diffuser(디퓨저), Sub-atmospheric Pressure(진공압력)

1. 서론

우주공간에서 작동하는 추진체 개발 시 반드시 요구되는 지상에서의 고고도 모사시험은 추진기관에서 발생하는 고압 연소가스의 모멘텀을 이용하여 노즐의 배압을 낮추어 시험환경을 진공으로 유지하는 방법인 디퓨저형 고고도 모사 시험장치가 일반적으로 활용되

고 있다. 본 연구에서는 디퓨저형 시험장치로 구현 가능한 진공도의 확인 및 노즐과 디퓨저 형상변수, 상대거리, 진공챔버 부피 및 초기 진공도 및 유동장의 거동 등에 대한 보다 깊은 이해를 위해 수행된 진공모사 시험결과를 수록하였다.

연구결과 배압이 약 0.5~1.0psia(고도 약 23~18km)의 저 진공 영역에 대한 진공도를 실현함으로써 고고도 성능 예측을 위한 디퓨저형 시험장치의 유용성을 확인하였고, 시험 변수로는 초기 진공도, 디퓨저 끝단과 노즐 끝단의 상대 거리 및 A_d/A_e 의 값이 시험 중 챔버의 진공도에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었으며, 또한 다른 설계변수 간의 상관관계를 확인함

† 2004년 11월 15일 접수~2004년 12월 13일 심사완료

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)
기술연구본부

주저자 이메일 : im_ljh@hanmail.net

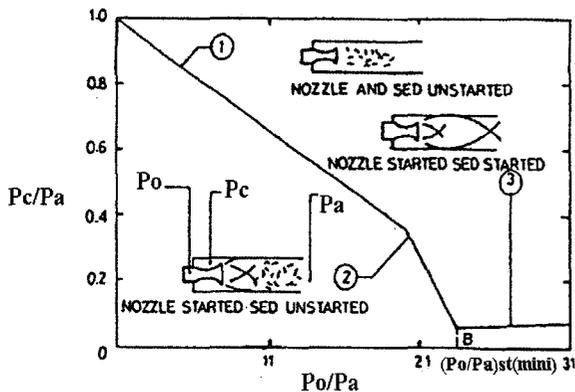
으로써 실기형 시험장치 설계 시 고려하여야 할 기초 기술 자료를 획득하였다.

2. 디퓨저형 진공모사 시험장치 이론

가. 작동원리

그림 1은 작동원리에 대한 개괄적인 초음속 디퓨저의 특성곡선을 보여준다.

특성도상의 구간 ①은 노즐과 디퓨저가 작동하지 않는 상태이며 구간 ②는 P_o/P_a 가 증가함에 따라 노즐유동이 형성되나 디퓨저의 작동이 이루어지지 않는 구간이다. 이 구간에서 유동은 경사 충격파를 통하여 노즐에서 분리되고 유동박리가 노즐출구 끝에서 발생하며 노즐 출구유동은 진공압력에 의해 팽창된다. 구간 ③에서는 끝단에서의 유동이 강한 경사 충격파나 Prandtl-Meyer expansion fan을 통과하고 P_o/P_a 가 증가함에 따라 저 팽창된 초음속 제트는 디퓨저 내부 벽면에 부딪혀 디퓨저 내부를 꽉 채워 흐르는 유동이 된다. 이때 시험장치 내부의 진공압은 일정하게 유지된다.



[그림 1] 초음속 디퓨저의 특성도

나. 디퓨저 특성 예측모델

1) 수직 충격파 모델

디퓨저를 시동하기 위해 필요한 모타 전압력은 초음속 제트가 디퓨저 벽면에 부딪힌 위치에 수직 충격파가 존재하고 수직 충격파의 하류를 대기 압력으로

가정하여 상류의 전압력을 계산하여 평가할 수 있다. 덕트형의 디퓨저에서 최소 시동 전압력은 최소 작동 압력과 거의 일치한다. 마찰 효과와 같은 손실을 무시하고 노즐로부터 디퓨저 벽면까지 유동의 전압력이 동일하다면 등엔트로피 관계식에 의해 수직 충격파 상류의 압력과 마하수를 계산할 수 있다. 계산식은 다음과 같다.

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

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

수직 충격파 하류의 정압력은 유동이 아음속이기에 대기상태가 된다. 디퓨저와 노즐목의 면적비, A_d/A_t 에 상응하는 마하수 M_1 에서 수직 충격파 전후방의 정압력 상승은 다음식에 의해 계산된다.

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right) = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_1^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \quad (3)$$

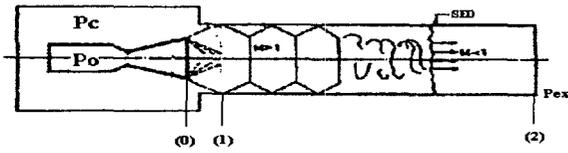
따라서 시동 압력, $(P_o/P_a)_{st}$ 은 아래 식과 같이 디퓨저 입구에서 수직 충격파의 존재를 가정하여 계산되어진다.

$$\left(\frac{P_o}{P_a} \right)_{st} = \left(\frac{P_o}{P_1} \right) \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = \left(\frac{P_o}{P_1} \right) \left(\frac{P_1}{P_a} \right) \quad (4)$$

$$\left(\frac{P_o}{P_a} \right)_{st} = \frac{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)}}{\frac{2\gamma}{\gamma+1} M_1^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}} \quad (5)$$

2) 모멘텀 이론 모델

디퓨저 작동조건에서 자유제트(free jet)는 디퓨저 벽면에 충돌하고 이용 가능한 배기압력까지 충격파 시스템을 통해 확산된다. 이것은 완전히 발달된 충격파 시스템의 형성이 가능하도록 충분한 길이를 가진 원형 디퓨저에서 이루어진다. 디퓨저 시동에 있어서



[그림 2] 디퓨저 유동 모델

배기 압력은 노즐과 디퓨저 출구면 사이에 일차원 보존방정식의 적용을 통해 계산될 수 있다. 그림 2는 디퓨저 유동모델을 나타낸다. 보존방정식의 해를 단순하기 위해 다음과 같은 가정이 사용된다:

- (1) 정상상태 단열유동
- (2) 완전기체
- (3) 일차원 유동
- (4) 진공 챔버내 유동속도는 없음
- (5) 마찰손실은 (1)위치에서 (2)위치까지 마하수 분포를 선형적으로 가정하여 계산되고 마찰계수는 일정
- (6) 디퓨저 외부 정압은 출구압력, P_{ex} 와 동일

위의 가정은 위치 (1)과 (2)사이 힘의 평형에 사용되어 연속방정식과 에너지 관계식과 함께 아래식과 같이 유도된다.

$$\frac{[F_{nzl} + p_c \pi (r_d^2 - r_{ne}^2)]}{\dot{m} \sqrt{RT_t}} = \frac{\sum_0^1 F}{\dot{m} \sqrt{RT_t}} \quad (6)$$

$$\frac{\sum_0^1 F}{\dot{m} \sqrt{RT_t}} = \frac{1 + \gamma M_1^2}{M_1 \sqrt{\gamma \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2\right)}} \quad (7)$$

위치 (1)과 디퓨저 외부사이의 힘-질량 관계식의 합은 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\sum_0^1 F - \int_1^2 df_d}{\dot{m} \sqrt{RT_t}} = \frac{1 + \gamma M_1^2}{M_1 \sqrt{\gamma \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2\right)}} \quad (8)$$

배기 압력의 최대치는 질량유동 보존방정식으로부터 식 (9)와 같이 계산될 수 있으며 디퓨저 시동압력은 식 (10)과 같이 계산된다.

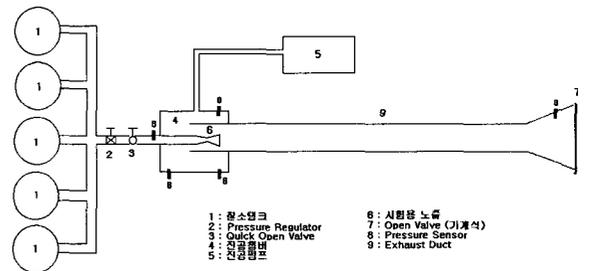
$$P_{ex} = \dot{m} \sqrt{RT_t} / \left[A_d M_2 \sqrt{\gamma \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2\right)} \right] \quad (9)$$

$$\left(\frac{P_o}{P_a}\right)_{st} = \frac{P_0}{P_{ex}} \quad (10)$$

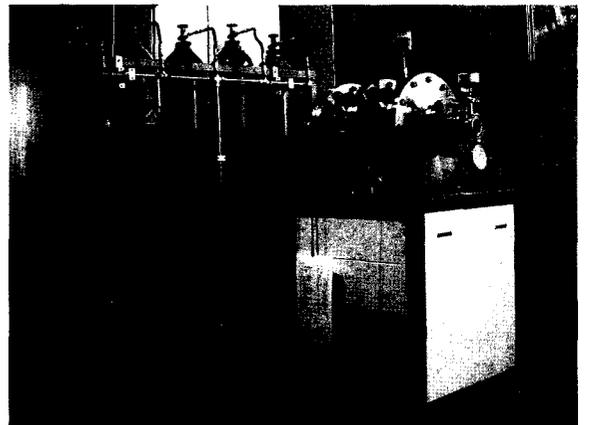
3. 시험장치 및 시험변수

가. 시험장치

시험장치는 크게 진공 챔버, 진공펌프, 디퓨저 및 시험용 노즐로 구성된다. 연소관 압력은 충전 질소탱크(5개)를 이용하여 고압을 모사하고, 질소탱크의 출



[그림 3] 시험장치 개념도



[그림 4] 시험장치 사진

구에 압력조절기와 밸브를 두어 노즐로 공급되는 압력을 조절한다. 또한 배기 덕트의 출구에 기계식 밸브를 두어 디퓨저 유동에 의해 순간적으로 배기 덕트의 출구가 대기에 노출되도록 하였다. 측정용 센서는 공급되는 공압의 압력을 측정하기 위한 고압측정 센서와 챔버 내부의 압력을 측정하기 위한 진공센서 및 절대압 센서로 구성하였다.(그림 3, 그림 4 참조)

나. 시험변수

디퓨저형 시험장치를 이용하여 수행한 시험변수는 표 1과 같다.

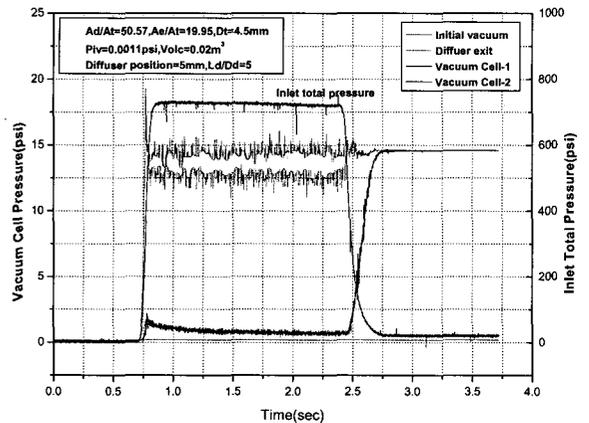
[표 1] 시험조건

No	변수	시험조건
1	A_d/A_t	28.44
		15.23
		50.56
2	A_d/A_e	3.95
		5.00
		1.42
		2.09
		2.53
3	A_e/A_t	7.20
		5.68
		19.95
		7.26
4	L/D	5.00
		10.00
5	Vol_c (m^3)	0.01
		0.02
6	Diffuser position (mm)	-5.00
		0.00
		+5.00

4. 시험결과

가. 시스템 구성 시험

그림 5는 시험 시 계측되는 각 신호의 특성을 보여준다. 시험 시 노즐로 공급되는 공압은 약 720psi로 일정하게 시험시간 동안 공급되며 디퓨저 작동 후 진공챔버 내부의 진공도는 약 0.5psi로 유지됨을 알 수 있다. 초기에 발생하는 진공챔버 내부압력의 피크값은 디퓨저가 작동하기 전 노즐 출구의 유동이 진공챔버 내부로 유입됨에 따라 유입된 질량에 의하여 발생된 것이며 디퓨저가 작동됨에 따라 챔버로 유입된 질량이 자유제트에 의하여 빨려나오며 챔버 내부로의 질량유입이 평형상태에 도달함에 따라 챔버 내부에서 일정한 진공압이 유지된다. 또한 디퓨저 출구에서의 정압은 초기 진공도를 유지하기 위하여 장착된 기계적 밸브가 열리기 전 디퓨저 유동의 동압이 정압으로 바뀔때 따라 순간적인 피크 값을 나타내기 때문이며 시험 중 약 2.5psi 정도의 진폭으로 움직이다가 시험 후 대기압으로 돌아간다.



[그림 5] $A_d/A_t=50.57$ $A_e/A_t=19.95$ 인 경우

나. A_d/A_t 를 변수로 한 시험

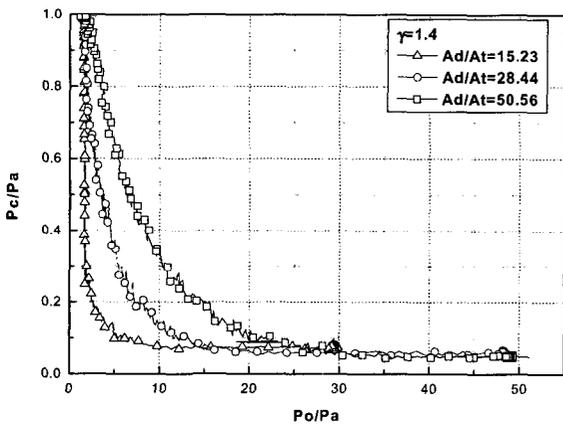
그림 6은 A_d/A_t 변화에 따른 디퓨저 특성을 보여주며 그림 7은 수직 충격과 모델과 모멘텀 이론모델에 의해 계산된 디퓨저 시동 압력비와 시험결과를 비교한 것이다. A_d/A_t 의 값이 커질수록 디퓨저의 시동압력이 증가하는 경향을 나타내나 P_0/P_a 의 값이 25이

상에서(디퓨저 시동압력 이후) 도달되는 챔버의 진공도는 동일함을 알 수 있다. 이러한 현상은 노즐유동의 질량유량이 커질수록 모멘텀에 의한 경계층에서의 평형상태 도달이 빨리 이루어지기 때문으로 판단된다.

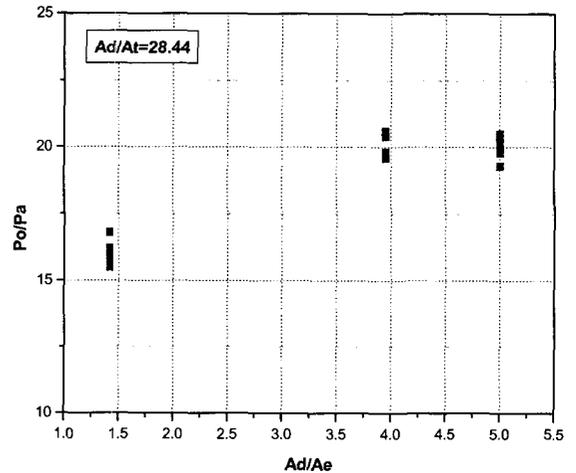
다. A_d/A_e 를 변수로 한 시험

그림 8은 노즐출구 면적 대 디퓨저 단면적비의 변화에 따른 디퓨저 시동압력비, $(P_o/P_a)_{st}$ 를 나타낸다. 일반적으로 면적비, A_d/A_e 가 커질수록 $(P_o/P_a)_{st}$ 값이 높아지는데 이는 A_d/A_e 가 클수록 Prandtl-Meyer expansion 내에 디퓨저가 놓여 있기 때문에 노즐 출구로부터 디퓨저 벽면에 충돌하는 자유 제트의 전압

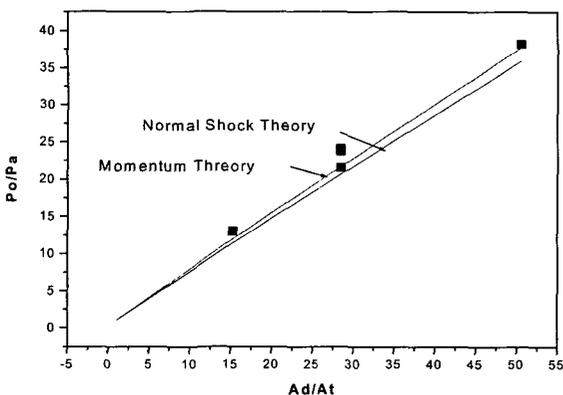
력 손실의 증가로 인해 더 큰 $(P_o/P_a)_{st}$ 값이 요구되기 때문이다. 그림 9는 A_d/A_e 에 대하여 각 시험조건별 디퓨저 특성변화를 나타낸다. 동일한 A_d/A_e 비에서 A_d/A_e 가 작을수록 낮아진 디퓨저 시동압력비가 얻어짐을 알 수 있다. 현재 시험장치 조건에서 A_d/A_e 의 영향과 시험 전 초기 진공 챔버 압력조건 등이 $(P_o/P_a)_{st}$ 과 진공챔버 압력에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 즉, A_d/A_e 가 작을수록 시동 압력비는 낮아지고 도달되는 진공 챔버압력이 낮아지는 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 A_d/A_e 가 작은 경우, 디퓨저 내부벽면과 노즐 끝단의 상대 길이가 작아져서 자유 제



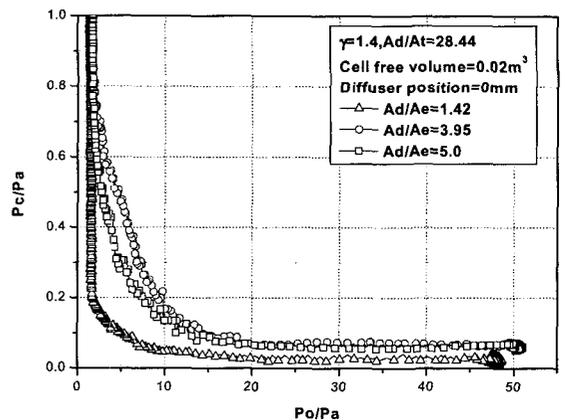
[그림 6] A_d/A_t 변화에 따른 디퓨저 특성



[그림 8] A_d/A_e 변화에 따른 디퓨저 시동압력



[그림 7] A_d/A_t 변화에 따른 디퓨저 시동압력



[그림 9] A_d/A_e 변화에 따른 디퓨저 특성

트가 진공 챔버안으로 유입될 수 있는 면적이 줄어들기 때문에 사료되며 시험시간을 충분히 길게 할 경우 수렴되는 진공압력은 같을 것으로 판단된다.

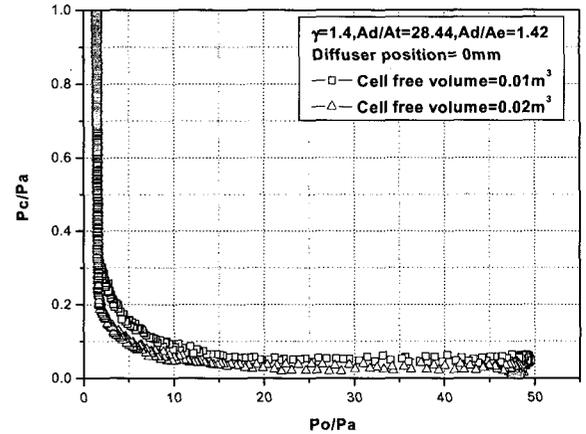
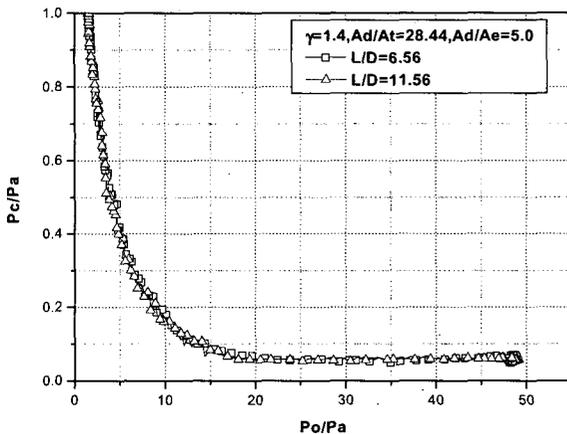
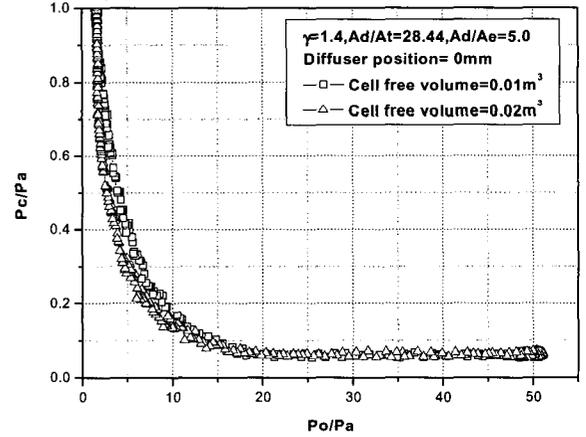
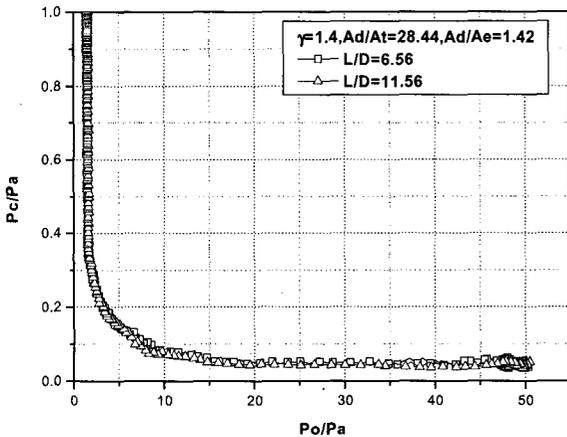
라. L/D를 변수로 한 시험

디퓨저의 길이가 매우 길 경우에는 덕트 벽면의 마찰 손실로 인해 높은 $(P_o/P_a)_{st}$ 이 요구되며, 또한 L/D가 한계치보다 작아질 경우에도 초음속 디퓨저의 역할을 하므로 높은 시동압력비가 요구된다. 그림 10은 노즐과 디퓨저 면적비 조건에서 L/D변화에 따른 디퓨저 성능 특성을 보여준다. 시험결과, 현재 설계된 디퓨저 길이에서는 디퓨저 시동 압력비의 변화가 없음을 알 수 있다.

마. 진공챔버 체적을 변수로 한 시험

그림 11은 진공챔버의 체적변화에 따른 시험결과를 보여준다. A_d/A_e 가 5.0 인 경우, 챔버의 체적이 커질수록 초기 진공도의 변화가 작으나 평형상태 도달 진공압력은 동일함을 알 수 있다.

또한, A_d/A_e 가 1.42인 경우 챔버 체적이 커질수록 평형상태 진공도가 낮게 나타나는데 이러한 현상은 시험 전 진공도에 의한 영향으로 판단된다. 즉, 진공 챔버의 체적이 증가할수록 챔버 내부의 압력변화 변화(시험초기 피크 값)가 작아지며 A_d/A_e 값이 작아질수록 디퓨저 내부벽면과 노즐 끝단사이의 면적(자유 제트가 진공챔버로 역류할 수 있는 면적)이 줄어들어 시험 전 진공도에 더 작은 영향을 미쳐 진공도가 낮

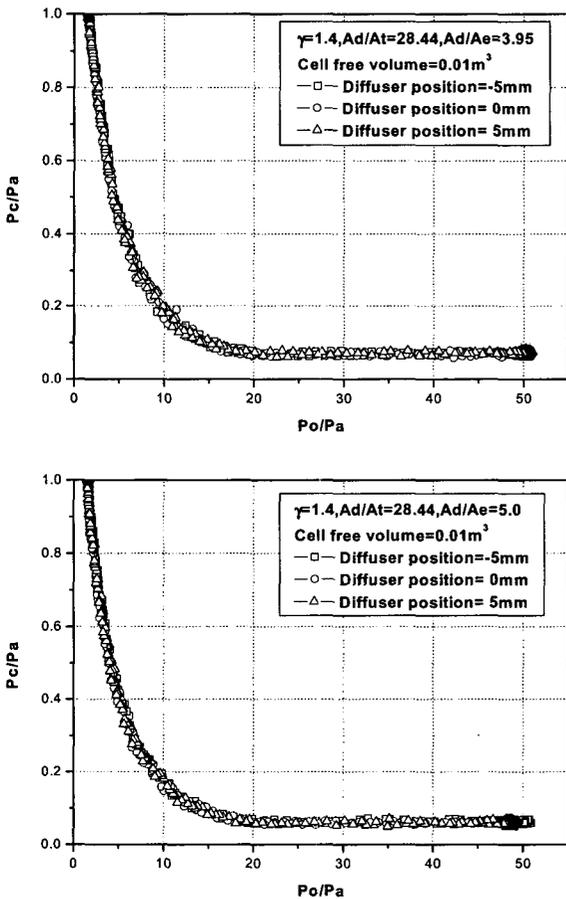


[그림 10] L/D 변화에 따른 디퓨저 특성

[그림 11] 진공챔버 체적 변화에 따른 디퓨저 특성

게 유지되나 이러한 경향은 시험시간이 짧아 수렴되는 진공도에 도달이 되지 않았기 때문으로 판단된다.

바. 노즐과 디퓨저간 상대거리를 변수로 한 시험
 그림 12는 노즐 출구와 디퓨저 입구간의 상대거리를 변화해 가며 시험한 결과이다. 노즐이 디퓨저 속으로 들어가는 경우를 (-) 값으로, 노즐과 디퓨저가 떨어지는 경우를 (+) 값으로 선정하였으며 노즐 끝단과 디퓨저 끝단이 일치하는 경우를 0으로 선정하였다. 시험은 각각 $\pm 5\text{mm}$ 와 0mm 에 대해 수행하였다. 시험의 결과 노즐출구와 디퓨저 입구의 상대거리는 디퓨저성능 특성에는 크게 영향이 없는 것으로 판단



[그림 12] 노즐/디퓨저 상대거리 변화에 따른 디퓨저 특성

된다. 이는 $+5\text{mm}$ 의 위치는 -5mm , 0mm 와 동일 환경인 Prandtl-Meyer expansion에 의한 제트 충돌각의 안쪽에 있기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서 디퓨저형 진공 시험장치를 이용하여 수행한 진공모사 시험을 통해 시험장치 설계변수간의 상관관계를 확인하고 구현 가능한 진공도를 확인한 결과는 다음과 같다.

- (1) 디퓨저(diffuser)형 진공 시험장치의 설계/제작시 험기술을 확보하였으며 디퓨저(diffuser)형 진공 시험장치를 이용하여 진공 챔버의 진공도를 약 1.0psi의 정상 상태로 실현이 가능함을 알 수 있었다.
- (2) 시험 전 초기 진공도는 낮을수록 시험초기 챔버 압의 피크값이 낮게 나타나며 자유제트에 의한 진공압력 도달이 빨리 진행되기 때문에 초기 진공도로 디퓨저 작동시간을 조절할 수 있다.
- (3) 디퓨저와 노즐끝단의 거리(자유제트가 진공챔버로 역류할 수 있는 면적)가 작을수록 시험초기 챔버압의 피크값이 낮게 나타나며 압력평형 상태의 도달시간이 길어진다.
- (4) A_d/A_t 의 값이 커질수록 디퓨저의 시동압력은 높아지나 디퓨저 작동 후 평형상태에 도달하는 챔버의 진공도에는 영향을 미치지 않는다.
- (5) A_d/A_e 가 커질수록 디퓨저 시동압력은 증가하고 동일한 A_d/A_t 에서 A_d/A_e 가 작을수록 디퓨저 시동압력은 낮아진다.
- (6) 시험에 적용된 L/D의 변화(6.56, 11.56)에서는 디퓨저의 시동압력에 영향을 미치지 않는다.
- (7) 진공챔버의 체적이 커질수록 시험 전 초기 진공도의 변화가 작으며 시험초기 챔버압의 피크치의 진폭이 낮아진다.
- (8) 시험에 적용된 노즐 끝단과 디퓨저 끝단의 상대거리는 디퓨저의 시동압력에 영향을 미치지 않는다.

참 고 문 헌

[1] B. H. Goethert "High Altitude and Space Simulation Testing", ARS Journal.

[2] K. Annamalai, K. Visvanathan, "Evaluation of the performance of supersonic exhaust diffuser using scaled down models", 17th ETF, 1998.