

# 위성발사체 로켓추진기관의 성능시험을 위한 디퓨저의 개념설계

권경도\*, 최열경, 이원기, 남평덕(삼성항공)

## 요약

고고도로 비행하는 위성발사체의 로켓모터는 압력이나 열적인 조건등이 지상과는 다른 저압환경에서 작동되기 때문에 그 성능이나 기능에 큰 영향을 받는다. 따라서 정확한 로켓의 추력과 자체의 신뢰성향상을 도모하기 위해서 로켓모터의 작동시험을 지상에서 저압환경을 모의하여 수행할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 저압환경을 위한 시험장치의 종류 및 성능특성과 설계방법을 논하였다.

## NOMENCLATURE

D : 직경  
 F : 면적  
 G : 질량유량  
 L : 길이  
 P : 압력  
 v, W : 속도

d : 디퓨저  
 e : 디퓨저 끝단  
 f : 디퓨저벽면의 friction  
 p, w : 디퓨저 벽면에 충돌하는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 추진제 입자

$\bar{D}_d$  : 디퓨저 직경비 (= D<sub>d</sub> / D<sub>s</sub>)

$\bar{L}_d$  : 디퓨저 길이비 (= L<sub>d</sub> / D<sub>s</sub>)

$$\lambda = \frac{M \sqrt{\frac{\gamma+1}{2}}}{\sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}} = \frac{v}{a^*}$$

$$\beta = \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{R}}}}$$

$$\pi(\lambda) = \left(1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{p}{p_0}$$

$$q(\lambda) = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \left(1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \cdot \lambda = \frac{F^*}{F}$$

$$f(\lambda) = (1 + \lambda^2) \left(1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \frac{\rho v^3 + p}{p_0}$$

## subscripts

\* : 노즐 목  
 a : 노즐 출구  
 air : 외부로부터 디퓨저 내부로 유입되는 공기  
 b : 디퓨저 진공부  
 c : chamber  
 c,b : 디퓨저의 정지압력  
 c,s : 디퓨저의 작동압력  
 p : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 추진제 입자

## 1. 서론

향후 우주탐사 및 개발목적의 많은 초음속/극초음속발사체의 개발에 있어서 정확한 추력계산과 유동해석은 필수적이다. 일반적으로 초음속/극초음속발사체들은 비행시험이전에 지상에서 연소시험을 하여 추력과 유동을 예측한다. 그러나 실제 Space vehicles들의 발사시험시에는 지상연소시험에서와는 달리 예측을 하지 못하는 현상들이 나타나게 된다. 이러한 것은 고공 및 우주공간에서 수많은 예측하지 못한 환경인자들에 직면하기 때문이며, 이로 인하여 새로운 로켓시스템의 개발에 있어서는 고공조건과 동일한 환경하에서의 시험이 필요하게 된다.

로켓이 지상에서 고공으로 발사되면서 고도에 따라 로켓 주위의 압력이 감소하여 로켓작동조건의 변화를 야기시킨다. 더욱이 노즐에서의 유동은 노즐배압(P<sub>b</sub>) 즉 로켓 외부의 압력에 의하여 주영향을 받게된다. 노즐출구에서의 압력(P<sub>j</sub>)보다 노즐배압(P<sub>b</sub>)이 높게되면 충격파가 노즐내부에서 발생되어 (over-expansion) 충격파가 없을때의 추력과는 다른 추력을 발생시킨다. 이와같은 이유로 인하여 고노즐 팽창비를 갖는 로켓모터의 지상연소시험은 노즐배압이 노즐에서 분사되는 유동의 압력보다 높게되어 고고도 상태에서 얻어지는 추력보다 낮은 성능을 발휘하게된다.

본 연구에 적용된 디퓨저는 노즐배압의 압력을 노즐출구압력보다 낮은 환경을 조성 하여 로켓모터의 추력이 고고도 비행중의 추력과 동일한 성능을 갖도록 만들어주는 장치이다. 이와 같은 디퓨저는 미국, 러시아등과 같은 항공우주선진국에서는 이미 1950년대부터 개발되어져 왔

으며[1]-[5], 러시아의 RSA(러시아 우주국)에서는 실제 우주왕복선인 뷰란이나 에네르기아의 주엔진을 직접시험할 수 있는 높이 50m, 직경 12m의 수직초대형 디퓨저를 제작하기도 하였다. 이웃 일본에서도 1970년대부터 본격적으로 저압환경시험장치의 개발을 NAL(항공우주기술연구소)에서 시작하여 완료한바 있으나[6][7], 국내에서는 이러한 장치의 개발이 전무하며 김희동 등[8]에 의하여 이와 유사한 일부 초음속 Ejector에 관하여 실험적인 연구가 이루어져 왔다.

본 연구는 고노즐 팽창비를 갖는 로켓추진기관의 지상 연소시험시 고도에 따른 저압환경을 조성해 주기 위한 시험장치의 성능해석 및 설계를 위한 기초연구로 이루어졌으며, 이와 같은 저압환경장치는 현재 KARI(한국항공우주연구소)에서 주관하고있는 중형과학로켓이나 우주발사체에 적용시 기본 개념형성에 보탬이 될 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 저압환경시험장치의 연구 및 개발은 장기적인 측면에서 상당한 의미를 가진다고 할 수 있다.

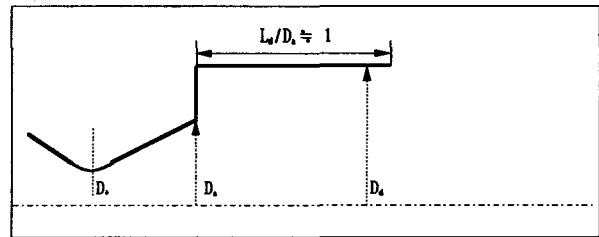
## 2. 디퓨저의 개요

발사체 상단에 사용되는 로켓모터는 고도에 따라 압력이나 열적인 조건등이 지상과는 다른 환경에서 작동되기 때문에 그 성능이나 기능에 큰 영향을 받는다. 따라서 착화성의 악화, 추력 및 비추력의 증대, 잔류추력의 발생 뿐만 아니라 구조부품등에 대한 영향이 크다. 그러므로 페이로드의 궤도 투입 정밀도의 향상, 로켓자체의 신뢰성 향상을 도모하기 위해서는 로켓모터의 작동시험을 지상에서 저압환경을 모사하여 반복 수행할 필요가 있다. 이를 위해서는 노즐 출구의 압력( $P_e$ )보다 디퓨저내부의 진공압력( $P_v$ )이 낮아야 하는 조건이 필요해진다.

로켓추진기관의 지상연소시험시 저압환경을 위한 디퓨저는 노즐출구직경( $D_n$ )과 디퓨저의 직경( $D_d$ ) 및 디퓨저의 길이( $L_d$ )에 따라 작동압력( $P_{a,d}$ )과 정지압력( $P_{s,d}$ ) 및 디퓨저의 진공부분의 압력( $P_v$ ) 등과 같은 성능이 달라진다. 일반적으로 디퓨저의 작동압력( $P_{a,d}$ )은 노즐내에서 발생한 충격파가 디퓨저에 의하여 노즐배압이 노즐출구압력보다 낮아져 디퓨저바깥쪽으로 이동하여 디퓨저의 출구에서 발생하는 순간의 모터연소압력( $P_e$ )을 말한다. 이 순간부터 노즐을 빠져나오는 유동이 under-expansion 되어 고공에서와 같은 추력을 발생하게 된다. 디퓨저의 정지압력( $P_{s,d}$ )은 Motor연소말기에 연소압력이 낮아짐에 따라 디퓨저의 출구에서 발생된 충격파가 디퓨저내부로 이동되어 디퓨저

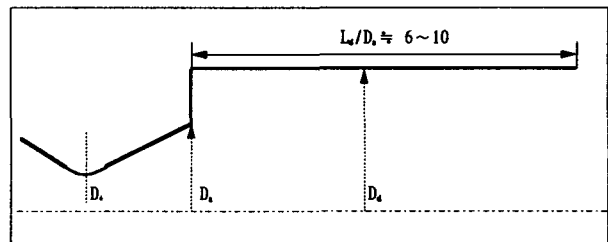
진공부분의 압력이 노즐출구의 압력보다 높아져 결국은 노즐내에서 유동이 박리(separation)되는 순간의 모터연소압력( $P_e$ )을 말한다. 이 후 노즐을 빠져나오는 유동이 over-expansion되어 디퓨저로서의 기능을 잃는다. 그러므로 디퓨저의 성능결정에 있어서 디퓨저의 작동압력과 정지압력의 결정은 매우 중요하며 이에따라 여러 가지 종류의 디퓨저들이 사용하게 되어진다.

본 논문에서는 디퓨저의 종류를 크게 Short type diffuser, Long type diffuser 그리고 Converging-diverging type diffuser으로 분류하였다.



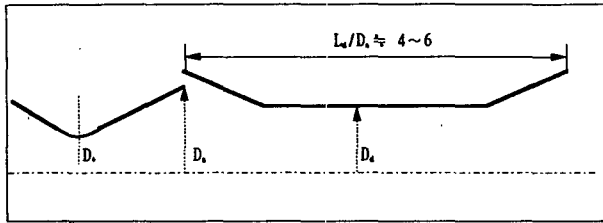
<Short Type Diffuser>

Short type diffuser는 디퓨저의 길이( $L_d$ )가 노즐출구직경( $D_n$ )보다 짧거나 같은( $L_d \leq D_n$ ) 형으로 제작이 쉽고, 제작비가 싸며 유지보수가 용이한 장점이 있으나 디퓨저의 성능특성상 디퓨저의 작동압력( $P_{a,d}$ )과 정지압력( $P_{s,d}$ )이 높아지며 디퓨저의 직경비( $D_n/D_d$ )가 적어져 노즐출구에서 나오는 분사화염에 의한 열전달이 심하게 일어나 열방호 대책을 강하게 하여야 하는 단점이 있다.



<Long type diffuser>

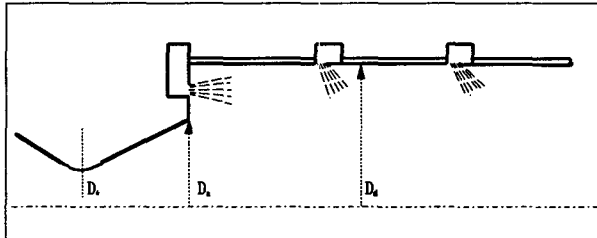
Long type diffuser는 디퓨저의 길이( $L_d$ )가 노즐출구의 직경( $D_n$ )보다 약 6~10배정도이며 Short type diffuser에 비하여 디퓨저의 작동압력( $P_{a,d}$ )과 정지압력( $P_{s,d}$ )이 낮고 디퓨저의 직경( $D_d$ )이 상대적으로 커 열전달이 적게 일어나는 장점이 있으나, 디퓨저의 길이가 길어져 제작 및 유지보수에 어려움이 따르게 된다.



<Converging-diverging type diffuser>

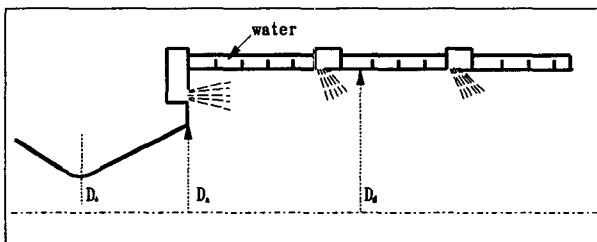
Converging-diverging type diffuser는 일반적으로 모터 내부의 연소압력이 낮은 경우에 사용하는 diffuser로서 Short type diffuser나 Long type diffuser보다 낮은 작동압력( $P_{c1}$ )과 정지압력( $P_{c2}$ )을 가지며 디퓨저의 길이가 노즐 출구의 직경보다 약 4~5배 정도의 길이를 가진다.

특히 연소시간이 상대적으로 긴 모터에서의 디퓨저는 디퓨저 벽면에서의 열전달이 매우 중요한 요소로 취급되며 디퓨저 벽면에 대하여 적절한 냉각장치를 설치하여 주지 않으면 디퓨저 벽면이 연소가스에 의해 손상을 받게 되고, 따라서 디퓨저의 성능이 발휘되지 않거나 반복사용이 불가능하게 된다. 디퓨저 벽면의 냉각장치로는 물분사(Water-spray)방식과 Water-jacket방식 그리고 물분사(Water-spray)방식과 Water-jacket방식을 혼합한 방식이 있다.



<물분사(Water-spray) 방식>

물분사 방식은 디퓨저의 진공부분에 직접 물을 분사하는 방식으로서 디퓨저 내부에 분사되어지는 물이 노즐에서 나오는 제트와 충돌하여 수증기로 변하여 디퓨저 벽면을 따라 하나의 heat-protection material과 같은 작용을 하며 디퓨저 벽면의 과열과 손상을 방지 해주는 역할을 한다.



<Water-jacket과 물분사 혼합방식>

Water-jacket방식은 디퓨저 벽면의 바깥에 벽면을 둘러싸는 원형관을 장착하고 그 사이로 물을 주입시켜 디퓨저의 벽면을 냉각하게 한다. 그러나 이러한 방식은 디퓨저의 벽면두께가 얇게되어 추진제 입자 덩어리가 벽면에 부딪쳐 디퓨저 벽면이 구멍이 발생할 위험이 있다.

Water-spray와 Water-jacket방식을 혼합하여 사용하는 방식은 매우 큰 냉각효과를 가지고 있어 모터의 작동시간에 무관하게 사용할 수 있는 장점이 있으나 이와 같은 장치는 제작이 어렵고 제작비가 많이 들며 유지보수가 힘들다는 단점을 가지고 있다.

### 3. 디퓨저의 특성

디퓨저의 특성으로는 모터내의 연소초기와 말기시 연소압력의 변화율과 초기유동이 노즐과 디퓨저를 빠져나가는 시간( $\tau_{12}$ )의 비율로서 정특성과 동특성으로 구분할 수 있다. 디퓨저의 동특성은 모터의 연소가 시작되어 연소압력이 급격히 상승하는 구간과 연소가 끝나면서 압력이 급격히 감소하는 구간에 발생하는 특성으로서, 이같은 특성은 디퓨저의 안정성과 밀접한 관계를 가지며 주로 구조적인 문제로 취급되어 진다. 반면에 디퓨저의 정특성은 동특성과는 반대로 디퓨저의 구조적인 문제보다는 공기역학적인 측면에서 다루어지며 디퓨저 본래의 목적인 저압환경조성에 있어서 중요한 요소가 된다.

#### 3.1 디퓨저의 정특성(Static characteristic)

디퓨저의 정특성으로는 모터의 연소가 시작되어 노즐 출구의 압력보다 디퓨저의 진공압력이 낮아지는 순간의 모터압력인 디퓨저의 작동압력( $P_{c1}$ )과 반대로 모터의 연소가 끝나면서 노즐 출구의 압력이 디퓨저의 진공압력보다 높아지는 순간의 모터압력인 정지압력( $P_{c2}$ ) 그리고 디퓨저의 진공도를 나타내어 주는 진공압력( $P_{c3}$ )이 있다.

디퓨저의 정특성을 해석하기 위해서 일반공기를 이용하여 다양한 형태의 디퓨저에 대하여 실험을 하고, 고온 효과를 얻기위하여 공기에 에탄올을 주입시켜 시험하기도 한다[9][10]. 그림 1은 Short type diffuser와 Long type diffuser의 경우, 디퓨저의 정특성에서 서로 다른 특성을 나타내고 있는 것을 보여주고 있는 실험 결과이다. Short type diffuser(그림 1(a))에서는 작동압력( $P_{c1}$ )이 정지압력( $P_{c2}$ )보다 훨씬 높은 값을 나타내고 있지만 디퓨저의 길이비( $L/D_2$ )가 길어질수록(그림 1(b)) 작동압력( $P_{c1}$ )과 정지압력( $P_{c2}$ )의 차이가 줄어들어 디퓨저 길이비가 약8

배인 Long type diffuser(그림 1(c))에서는 같아지는 특성을 가지는 것을 볼 수 있으며, 특히 디퓨저의 길이비(L/D)가 일정 이상인 경우(그림 1(d), (e))에서는 길이비(L/D)가 길어져도 작동/정지압력이 변하지 않는 특성을 가지고 있다. 그림 2는 디퓨저의 다양한 직경비(D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>)에 따른 진공압력(P<sub>v</sub>)의 변화를 보여주는 실험결과이다. 이 그림으로 부터 디퓨저의 진공압력(P<sub>v</sub>)은 디퓨저의 직경비(D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>)가 커질수록 진공압력이 낮아지는 반면에 디퓨저의 작동압력(P<sub>a</sub>)과 정지압력(P<sub>c</sub>)은 높아지는 것을 알 수 있다. 이러한 정특성들로부터 디퓨저의 직경비(D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>)와 길이비(L/D) 그리고 열방호 대책이 결정되는 것이므로 정특성을 정확히 해석하는 것은 디퓨저의 설계에 있어서 아주 중요하다.

### 3.2 디퓨저의 동특성(Dynamic characteristic)

디퓨저의 동특성은 모터내부의 압력이 연소초기와 말기에 급격히 증가 또는 감소되는 순간에 디퓨저내부의 유동특성에 기인하여 발생된다. 이러한 디퓨저의 동특성들은 다음과 같은 문제들을 발생시킨다.

#### 3.2.1 노즐의 강도

그림 3(a)는 모터가 연소되는 순간의 노즐내부에 작용하는 압력과 힘을 보여준다. 모터 연소초기시 충격파가 노즐내부에 발생되어 모터압력(P<sub>a</sub>)이 증가함에 따라 충격파가 노즐바깥으로 이동하게 된다. 충격파가 노즐내부에 발생하는 순간, 충격파를 전후하여 큰 압력비가 생기며, 이때 상대적으로 노즐 바깥부위는 대기압으로 일정하게 유지되므로 이러한 압력차 때문에 노즐이 파괴될 수 있는 구조역학적인 문제를 발생시킨다.

#### 3.2.2 진공부위의 과도압력

모터의 연소가 시작되면서 노즐내에 충격파가 발생되어 충격파가 이동하여 디퓨저 중간부분에 도달하게 되면 충격파가 하나의 벽 역할을 하여 충격파전의 유동이 지나가는 것을 일시적으로 막는 현상이 발생되어, 유동이 디퓨저의 진공부분으로 밀려나 디퓨저의 진공압력(P<sub>v</sub>)이 순간적으로 높아지는 현상이 생기게 된다. 그림 3(b)는 이러한 순간의 디퓨저의 진공압력의 증가를 보여주고 있다.

#### 3.2.3 디퓨저 내부의 압력진동현상

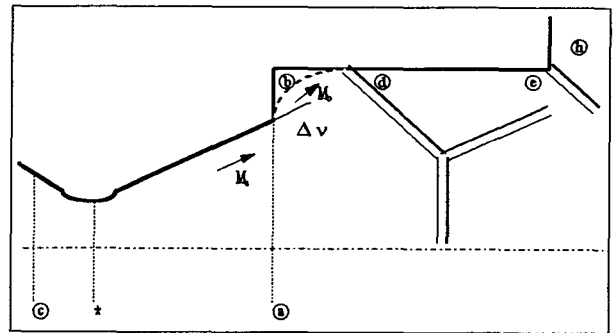
디퓨저가 작동되거나 정지되는 순간에는 디퓨저의 진

공압력(P<sub>v</sub>)이 급격히 상승하거나 하강하게 되며 이 순간에 디퓨저의 진공압력(P<sub>v</sub>)이 진동하는 현상이 발생된다. 이러한 현상은 일반적으로 디퓨저의 작동순간보다는 상대적으로 압력증가의 기울기가 적은 정지순간에 많이 발생되며, 이러한 압력진동현상을 방지하기 위하여 연소말기의 압력감소시간을 최소한으로 줄여주어야 한다. 그림 3(c)는 이러한 연소말기의 압력진동현상을 보여주고 있다.

## 4. 디퓨저의 성능해석

### 4.1 Short Type Diffuser의 성능해석

Short type diffuser의 작동압력(P<sub>a</sub>)는 현재 이론적으로 구할 수 있는 방법은 알려지지 않고 실험적인 방법을 통하여 해석되어지고 있으므로[9] 여기서는 Short type diffuser의 정지압력(P<sub>c</sub>)을 구하는 방법에 대해서만 언급한다.



Short type diffuser의 정지압력은 다음식으로 부터 구할 수 있다.

$$\frac{P_c}{P_h} = \frac{P_c}{P_a} \cdot \frac{P_a}{P_b} \cdot \frac{P_b}{P_d} \cdot \frac{P_d}{P_e} \cdot \frac{P_e}{P_h}$$

여기서

$$\frac{P_c}{P_a} = \frac{1}{\pi(\lambda_a)}$$

$$\frac{P_d}{P_b} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_b^2 \sin^2 \alpha - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}$$

short type diffuser는 디퓨저의 길이가 짧으므로 다음과 같이 가정한다.

$$\frac{P_d}{P_e} \approx 1, \quad \frac{P_t}{P_e} = \overline{P_{cr}}(M_d), \quad M_d \approx M_e$$

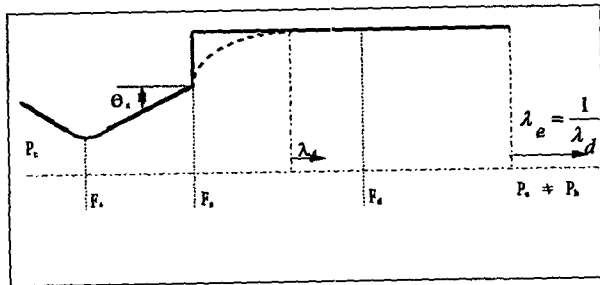
그러므로 최종식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{P_{cb}}{P_h}\right) = \frac{1}{\pi(\lambda_a)} \cdot \frac{P_a}{P_b} \cdot \frac{1}{P_d} \cdot 1 \cdot \frac{1}{\overline{P_{cr}}(M_d)} \quad (1)$$

## 4.2 Long Type Diffuser의 성능해석

앞절 3.1에서 언급한 바와 같이 Long type diffuser의 작동압력과 정지압력은 동일하므로(그림 참조) 다음과 같은 근사적인 Normal shock theory를 이용한 방법과 Eject Method를 이용한 방법으로 해석 한다.

### 4.2.1 Normal shock theory를 이용한 방법



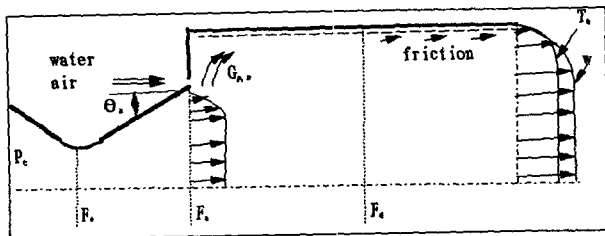
1차원 Normal shock theory로부터 다음과 같이 Long type diffuser의 작동, 정지압력을 구할 수 있다.

그림에서  $\lambda_e = 1/\lambda_d$ 는 Prandtl equation으로부터 나왔다.

$$\frac{P_c}{P_e} = \frac{P_c}{P_{cr}} \cdot \frac{P_{cr}}{P_e} = \frac{1}{\delta(\lambda_d)} \cdot \frac{1}{\pi\left(\frac{1}{\lambda_d}\right)} \quad (2)$$

$$\frac{P_b}{P_a} = \frac{\pi(\lambda_d)}{\pi(\lambda_a)}$$

### 4.2.2 Eject method를 이용한 방법



Eject method를 이용한 디퓨저의 작동/정지압력을 해석하는 방법은 다음과 같은 연속방정식과 운동량방정식의

유도로 부터 구할 수 있다.

연속방정식

$$G_c + G_{water} + G_{air} - G_{p,w} = \int_0^r \frac{P_e}{\pi(\lambda_a)} \cdot \frac{q(\lambda_a)}{\beta(\lambda_a)} \cdot 2\pi r dr$$

운동량 방정식

$$R_p + P_b(F_d - F_c) - \frac{G_{p,w}}{g} \cdot W_p - \sum F_{fric} \\ = \int_0^r \frac{P_e}{\pi(\lambda_a)} \cdot f(\lambda_a) \cdot 2\pi r \cdot dr$$

최종식은 다음과 같다.

$$\overline{P_{cb}} \cong \left[ 1 + \frac{\lambda_m^2}{(2n_1 + 1)(2n_1 + 2)} \right] \quad (3)$$

$$\frac{F_d}{F_c} \cdot \frac{I_p^{th}}{\beta_c} (1 - \sum \xi_{loss}) + \frac{P_b}{P_a} \frac{\pi(\lambda_a)}{q(\lambda_a)} (\overline{F} - 1) - \frac{G_{p,w}}{g\beta_c} W_p - \frac{R_f}{G_c\beta_c}$$

## 5. 성능해석 및 시험결과와 비교

지금까지 저압환경모의를 위한 다양한 디퓨저의 개요와 특성 및 성능해석법에 대하여 기술하였으며 앞절에서 언급한 해석방법을 이용하여 해석한 결과를 참고문헌 [11]에서 실험한 결과와 비교 및 검증하였다.

### 5.1 성능해석 결과

그림 4는 노즐팽창비( $F_2/F_1$ )가 25이고 비열비( $\gamma$ )가 1.16 일때의 Short type 디퓨저의 정지압력( $P_{cb}$ )과 디퓨저의 진공압력비( $P_2/P_1$ )에 대한 관계를 식(1)로부터 구한 결과이다.

그림 5(a)는 Normal shock theory를 이용한 식(2)를 사용하여 Long type diffuser에서 비열비( $\gamma$ ) 1.16, 1.2, 1.3, 1.4 일때에 디퓨저의 직경비가 변함에 따른 정지압력( $P_{cb}$ )을 구한 결과이다. 이 그림으로부터 디퓨저의 직경비가 커짐에 따라 디퓨저의 정지압력이 상승하며, 동일조건하에서는 비열비가 낮을 수록 정지압력도 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그림 5(b)는 일반공기( $\gamma=1.4$ )를 이용하여 그림 5(a)와 같이 디퓨저의 직경비가 변함에 따른 정지압력( $P_{cb}$ )의 관계를 실험한 결과이다. 이 실험결과와 그림 5(a)에서의 결과를 비교하여 보면 아주 유사하게 일치하고 있는 것을 볼 수 있으며 이로부터 일반공기에서 디퓨저의 직경비에 따른 진공압력의 예측은 Normal shock theory를 사용하여 비교적 정확히 예측할 수 있다는 것을 알 수

있다. 그림 6은 마찬가지로 식(2)를 사용하여 비열비( $\gamma$ ) 1.16, 1.2, 1.3, 1.4 일때에 디퓨저의 직경비가 변함에 따른 진공압력비( $P_0/P_1$ )의 변화를 보여주고 있다. 위의 그림들로부터 디퓨저의 진공압력은 디퓨저의 직경비가 커짐에 따라 낮아져, 진공도가 향상되나 반면에 디퓨저의 정지압력은 높아지는 경향을 가진다는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경향은 실험한 여러 결과들로 부터도 볼 수 있었다. 그림 7은 실제 모터에 대하여 Eject method를 이용한 식(3)으로부터 노즐팽창비( $F_2/F_1$ )가 25이고 비열비( $\gamma$ )가 1.16 일때의 디퓨저의 면적비( $F_2/F_1$ )에 따른 정지압력을 구한 결과를 실험결과와 비교한 그림이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 Eject method를 사용하여 예측한 정지압력과 실험한 정지압력의 차이가 약 10%내외의 오차를 가지는 것을 볼 수 있어 비냉각장치에서의 실제 모터에 대한 Long type diffuser의 해석은 Eject method가 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림 8은 직경비가 각각 1.2, 1.47인 경우에 대하여 디퓨저의 길이비에 따른 정지압력의 변화를 예측한 것과 직경비가 1.2인 경우의 실험결과와 비교한 그림이다. 이 결과는 Short type diffuser에서 정지압력( $P_{02}$ )을 구하고, Long type diffuser에서도 정지압력( $P_{02}$ )을 구하여 보간법을 사용하여 얻은 것이다. 직경비가 1.2인 경우 해석한 결과와 실험결과가 약 15%내외의 차이를 보여주는 것으로 위의 해석결과가 상당히 타당성이 있다는 것을 알 수 있다. 역시 그림 8에서도 디퓨저의 중요한 특성을 볼 수가 있는데, 동일한 디퓨저의 길이비에서도 디퓨저의 직경비가 달라짐에 따라 정지압력이 변하는 것을 알 수 있다. 즉 예를 들면 45atm의 정지압력을 갖는 디퓨저를 설계하고자 할때 그림 8로부터 직경비가 1.2이고 길이비가 6.0인 디퓨저와 직경비가 1.47이고 길이비가 10.0인 디퓨저를 선택할 수가 있다.

## 6. 결론

지금까지의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 디퓨저의 직경비가 커질수록 디퓨저의 진공압력은 낮아져 진공도는 향상되나 작동/정지압력은 상승한다.
2. 디퓨저의 길이비가 길어질수록 디퓨저의 작동/정지압력은 낮아지며, 길이비가 길어져도 디퓨저의 작동/정지압력이 변화가 되지않는 최적의 길이비가 존재한다.

3. Short type diffuser에서는 디퓨저의 작동압력과 정지압력이 서로 다른 많은 차이를 보이지만, 길이비가 커질수록 작동/정지압력의 차이가 적어지면서 최종적으로는 동일한 압력을 갖는 특성을 보인다.

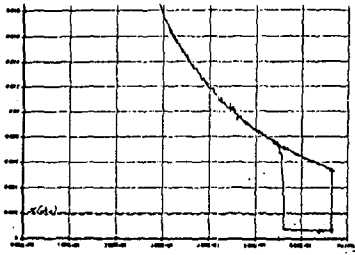
4. 비냉각장치에서 Normal shock theory를 이용한 해석결과와 Eject method를 이용한 해석결과를 실험치와 비교하였을 때 약10~15%의 오차를 가지는 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

## 후기

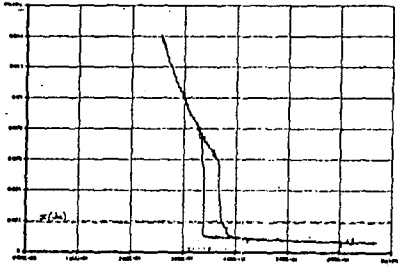
본 연구의 자료수집 및 해석에 도움을 주신 국방과학연구소의 김윤근박사님께 감사드립니다.

## 참고문헌

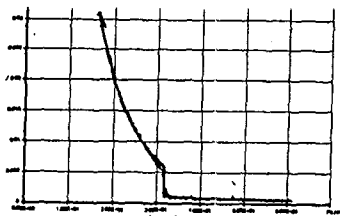
1. A. Fortini. "Performance Investigation of a Nonpumping Rocket Ejector System for Altitude Simulation", NASA TN D-257 (1959).
2. Aro, Inc. "High Altitude and Space Simulation Testing", AEDC AF.40(600)1200, 1961.
3. Aro, Inc. "Application of Diffusers in Altitude Simulation testing Facilities for Rocket Engines", AEDC F40600-69-C-0001, November 1968.
4. Aro, Inc. "Ejector Design for a Variety of Applications", AEDC F40600-69-C-001, 1969.
5. Aro, Inc. "High Altitude Testing of Propulsion Systems", AEDC, 1959.
6. 宮島, 日下, 阿部, 鎌田, 植野, 佐藤, "ロケット・エソツソ 高空性能試験用 エセクタ의 實驗的研究", 航技研報告 TR-449, 1976.
7. 宮島, 日下, 黒田, 阿部, 鎌田, 植野, 佐藤, "零 2次流 エセクタにおける啞音速ディフューザ およびノズル形状の效果", 航技研報告 TR-493, 1977.
8. 김희동, 이종수, "진공펌프용 초음속 이젝터에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 추계학술대회논문집(II), 1994, pp.520~525.
9. V. M. Mironov, V. K. Ivanov., "Researches of high-altitude chamber operation with additional air pressurization. Supersonic aerodynamic tubes and stands", Book of articles No 37, NII-TP, 1964
10. G. I. Averenkova, E. A. Ashratov, T. G. Volkonskaya, U. N. Djyakonov, N. I. Egorova, D. A. Melnikov, G. S. Roslyakov, V. I. Uskov., "Supersonic jets of ideal gas", Works of VZMGU, 1970, Russia
11. Samarskiy A. A., Popov Yu. P., "Difference scheme of gas dynamics", Moscow, "Nauka", 1975



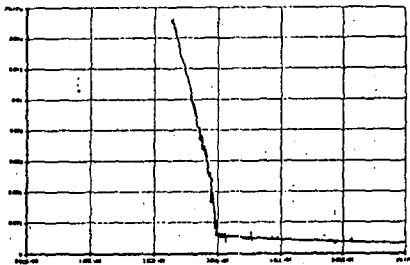
a)  $L_4/D_1 = 4$



b)  $L_4/D_1 = 7$



c)  $L_4/D_1 = 8$



d)  $L_4/D_1 = 10$



e)  $L_4/D_1 = 12$

그림 1. 디퓨저 길이비( $L_4/D_1$ )에 따른 디퓨저의 정특성

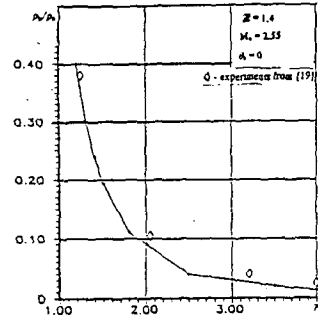
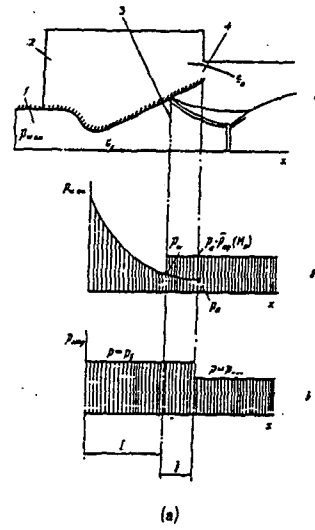
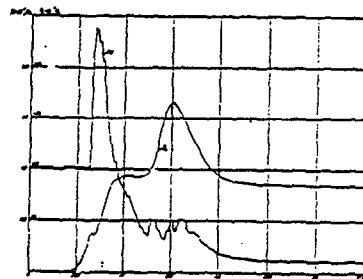


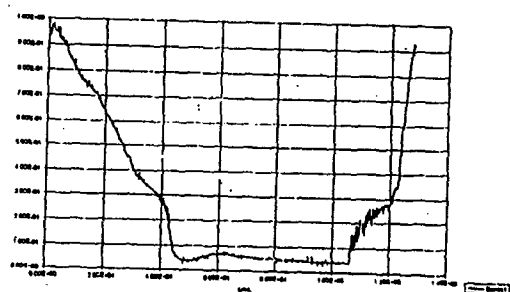
그림 2. 디퓨저의 직경비( $D_4/D_1$ )에 따른 진공압력( $P_4$ )



(a)



(b)



(c)

그림 3. 디퓨저의 동특성

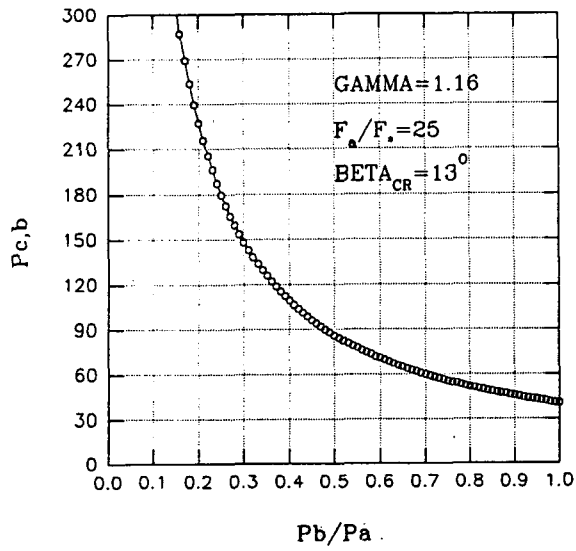


그림 4. Short type diffuser의 정지압력( $P_{c,b}$ )에 따른 전공압력( $P_b$ )

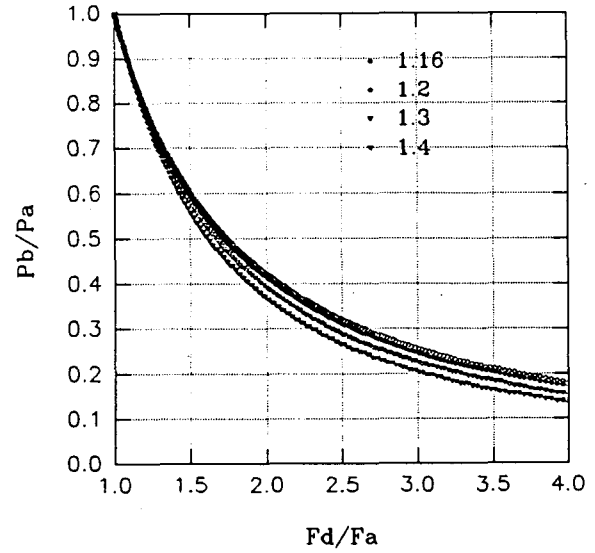
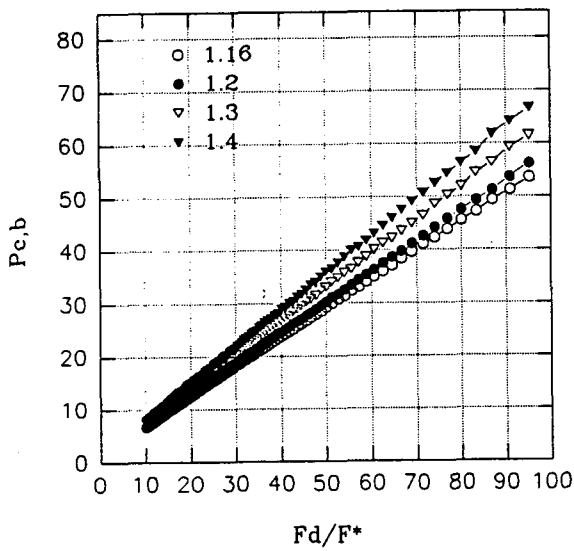


그림 6. Long type diffuser의 면적비( $F_d/F_a$ )에 따른 전공압력( $P_b$ )



a) Normal shock theory를 이용하여 해석한 결과

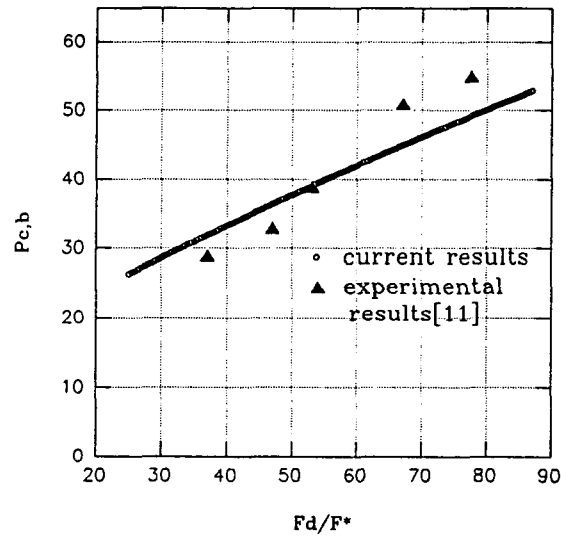
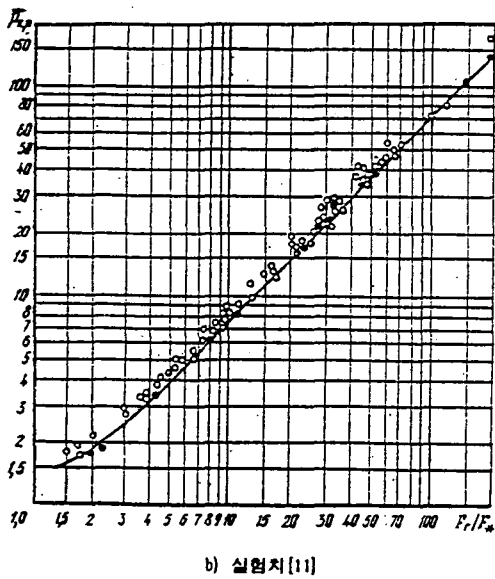


그림 7. Long type diffuser의 면적비( $F_d/F_a$ )에 따른 정지압력( $P_{c,b}$ )



b) 실험치[11]

그림 5. Long type diffuser의 면적비( $F_d/F_a$ )에 따른 정지압력( $P_{c,b}$ )

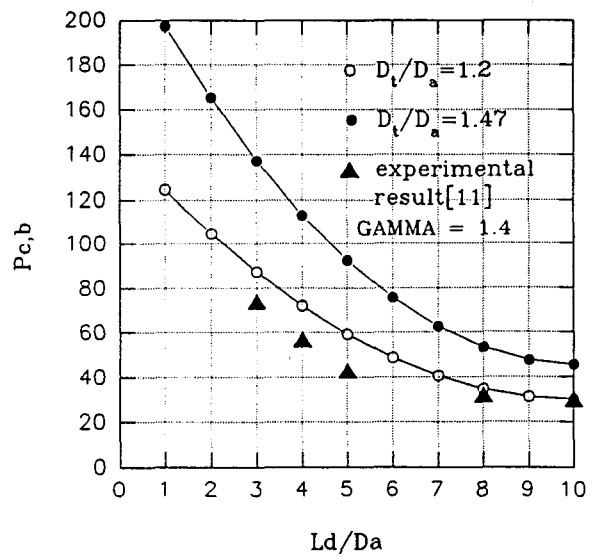


그림 8. 직경비( $D_t/D_a$ ) 1.2, 1.47인 경우의 길이비에 따른 정지압력( $P_{c,b}$ )