

## 論文

## 주유동 기체의 물리적 특성이 환형 분사 초음속 이젝터의 성능에 미치는 영향

진정근\*, 김세훈\*, 박근홍\*, 권세진\*\*

### The effects of primary gas physical properties on the performance of annular injection type supersonic ejector

Jungkun Jin\*, Sehoon Kim\*, Geunhong Park\* and Sejin Kwon\*\*

#### ABSTRACT

The effects of the physical properties of primary flow on the performance of a supersonic ejector were investigated. Axisymmetric annular injection type supersonic ejector was used for the study of the effects of molecular weight and the specific heat at constant pressure on the ejection performance. Test gases include; air, CO<sub>2</sub>, Ar, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, and CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> for different values of gas properties. As the molecular weight and C<sub>p</sub> of the primary gas increase, the secondary flow pressure increases at the same primary stagnation pressure and this behavior results from the combined effects of molar specific heat or specific heat ratio.

#### 초 록

주유동 기체의 물리적 특성이 초음속 이젝터 성능에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 기체의 분자량과 정압 비열 변화에 따른 성능 변화에 관한 연구는 축대칭 환형 분사 초음속 이젝터를 사용하였다. 주유동 기체로는 공기, CO<sub>2</sub>, Ar, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>를 사용하였다. 주유동 기체의 분자량과 정압 비열이 증가함에 따라 일정 주유동 압력에 대한 부유동 압력은 증가하였고 이러한 경향은 몰비열이나 비열비의 형태로 통합되어 확인되었다.

**Key Words** : Supersonic Ejector(초음속 이젝터), Annular Injection Type(환형 분사식), Ejector Performance(이젝터 성능)

#### 1. 서 론

이젝터는 분무기와 같은 원리로 고압의 1차 유동(주유동)을 노즐로 분출시켜 주변의 저압 기체와의 운동량 교환을 통해 저압의 유체(부유동)를

높은 압력까지 압축 수송하는 장치이며, 주유동이 초음속으로 분출되는 이젝터를 초음속 이젝터라 한다. 초음속 이젝터는 시스템 내부에 압축기와 같은 운동 부분이 없기 때문에 다른 압축 장치에 비해 고장이 적고 소형임에도 불구하고 대용량의 유체를 주기할 수 있다는 장점이 있어 여러 산업 분야에서 응용되고 있으며 최근에는 고출력 화학레이저의 압력 회복 장치, 고공 환경 모사장치, RBCC (Rocket Based Combined Cycle) 엔진, V/STOL 항공기 추력 증강 등에 응용되고 있다[1-7].

† 2005년 5월 24일 접수 ~ 2005년 10월 26일 심사완료

\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

\*\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

연락처, E-mail : melody@kaist.ac.kr

대전광역시 유성구 구성동 373-1 번지

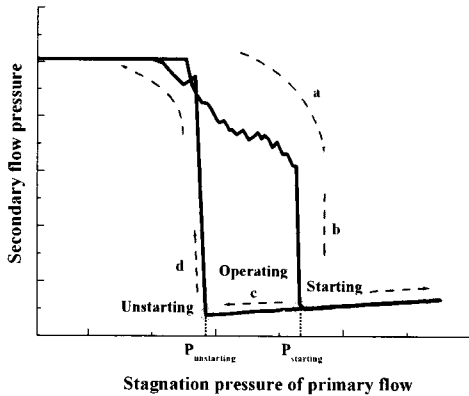


Fig. 1. 초음속 이젝터 성능 곡선

지금까지 초음속 이젝터에 관한 연구는 대부분 주유동 작동 기체가 정해진 상태에서 성능 요구 조건을 만족하는 최적의 이젝터 형상 설계에 관한 연구가 주로 수행되었다. 이와 관련하여 이차목의 면적, 주유동 노즐의 면적비, 이차목의 길이와 같은 형상 변수 변화에 따른 성능 특성 파악이 주된 연구 내용이였다[2-6].

초음속 이젝터의 작동 기체는 그 응용에 따라 달라진다. 화학레이저의 압력 회복 장치로 사용될 경우에는 장치의 소형화를 위해 가스 발생기(gas-generator)를 사용하며 주유동 기체의 물리적 특성은 화학 반응을 통해 얻어지는 생성물의 조성에 의해 결정된다. 이 때 부유동 기체는 레이저의 종류에 의해 결정되게 된다. 또한 RBCC 엔진이나 항공기의 추력 증강 혹은 고공 환경 모사 장치에 사용할 경우에는 사용하는 연료에 따라 주유동 기체의 조성이 달라져 같은 형상의 초음속 이젝터에 대해서도 다른 성능을 보일 수 있다. 지금까지의 주유동 기체와 이젝터 성능에 관해서는 주로 기체의 분자량에 대한 연구가 수행되어 왔다. Work 등[7]은 화학 공업에서 사용되는 이젝터에 대하여 주유동 기체인 증기의 분자량이 흡입 성능에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였으며, Sam Han 등[8]은 이젝터 램젯 엔진에서 주유동 기체의 분자량이 엔진 성능에 미치는 영향에 대한 이론적인 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 주유동 기체의 두 가지 물리적 특성 - 분자량과 정압 비열 - 이 환형 분사 초음속 이젝터 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 이를 바탕으로 초음속 이젝터의 응용 과정에 있어서 형상으로 해결할 수 없는 문제점의 해법을 제시할 수 있을 것으로 기대하며 특히 초음속 이젝터의 최적 설계 및 이론적 해석에 있어서 중요한 역할을 할 것으로 기대한다.

Fig. 1은 부유동 유량이 고정되어 있을 때 이차목을 가지는 환형분사 초음속 이젝터의 일반적인 성능 곡선(performance curve)을 나타내고 있다. 작동 과정에서 히스테리시스(hysteresis)가 확인되며 이러한 히스테리시스는 이차목을 가지는 초음속 풍동의 원리와 같다. 초음속 이젝터의 초기 작동을 위해서는 작동 압력( $P_{\text{starting}}$ )보다 높은 압력으로 주유동 기체를 공급해야 하지만 작동 멈춤 압력( $P_{\text{unstarting}}$ ) 근처에서 작동 상태를 유지하는 것이 좋다. 따라서 초음속 이젝터의 성능은 작동 압력과 작동 멈춤 압력 그리고 초음속 이젝터 작동 중의 주유동 압력에 대한 부유동 압력을 이용하여 평가할 수 있다.

본 연구에서는 먼저 물리적 특성이 다른 여러 기체를 이용하여 기체 역학을 이용한 해석과 상용코드를 이용한 수치 해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 실험에 앞서 예상되는 성능 변화를 확인하였다. 그리고 실험을 수행하여 해석 결과를 검증하였다.

## II. 이론적 해석과 수치 해석

### 2.1 이젝터 형상과 주유동 기체 선정

수치 해석에서 사용한 이젝터는 10kW 급 HF/DF 레이저 구동을 위해 설계한 환형분사 이젝터로 형상과 형상 변수가 Fig. 2와 Table 1에 주어졌다[2].

주유동 기체는 분자량과 정압 비열을 기준으로 선정하였으며 선정한 기체의 특성이 Fig. 3에 주어졌다. 기체는 크게 두 그룹으로 분류되며 이산화탄소를 기준으로 공기와 프레온은 분자량

Table 1. 형상 변수(단위 : mm)

$(A/A^*)_P$	10.78
$(L/D)_2$	8
$R_2$	14
$R_s$	17
$R_d$	24.5

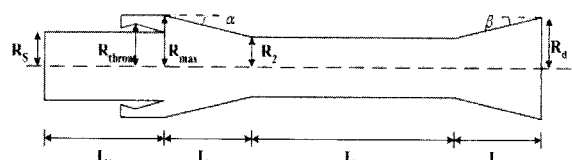


Fig. 2. 환형 분사식 이젝터의 형상

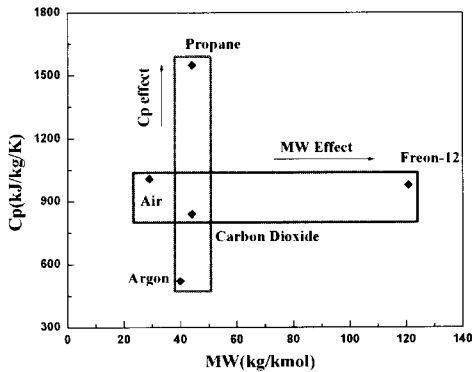


Fig. 3. 기체의 분자량과 정압 비열

의 영향을, 아르곤과 프로판은 정압 비열의 영향을 알아보기 위해 선정하였다.

기체를 이상 기체로 가정하면 몰비열은 정압 비열과 분자량의 곱으로 결정되며 비열비는 몰비열의 함수로 표현된다. 따라서 두 그룹의 기체를 동시에 비교하기 위해서는 몰비열이나 비열비를 하나의 독립 변수로 선택할 수 있다.

### 2.2 기체 역학을 이용한 해석

이론적 해석을 위해 먼저 G. Emanuel[11]이 사용한 초음속 이젝터의 최적 성능 해석 방법을 사용하였다. 초음속 이젝터의 최적 성능을 예측할 수 있다. 아래의 식은 초음속 이젝터 내부에서 기체의 상변화가 발생하지 않고 외부와의 열전달이 발생하지 않는다는 가정을 포함하고 있다.

$$\frac{P_{rec}}{P_m} = \left[ \frac{(\gamma_m + 1)M_m^2}{2} \right]^{\frac{\gamma_m}{\gamma_m - 1}} \left[ \frac{\gamma_m + 1}{2\gamma_m M_m^2 - (\gamma_m - 1)} \right]^{\frac{1}{\gamma_m - 1}} \quad (1)$$

$$M_m^2 = \frac{2}{(\gamma_m - 1)(\phi - 1)} \quad (2)$$

$$\phi = \left( 1 + \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \right) \left( 1 + \frac{\dot{m}_s h_{0s}}{\dot{m}_p h_{0p}} \right) \left( \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2}{\frac{\gamma - 1}{2} M^2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3)$$

식(1)에서  $P_m$ 은 이젝터 작동 중의 부유동 압력을 나타내며  $P_{rec}$ 은 회복 압력으로 이젝터 출구 압력에 해당한다. 회복 압력과 부유동 압력의 비를 결정하는  $M_m$ 은 이차목 입구에서 완전 혼합된 유동의 마하수로 식(2)를 이용하여 얻을 수 있다.  $\phi$ 는  $M_m$ 을 결정하며 주유동 노즐 출구에서의 마하수( $M_p$ ), 주유동과 부유동의 유량비 및 엔탈피비 및 비열비( $\gamma$ )의 함수로 정의된다(식(3)).

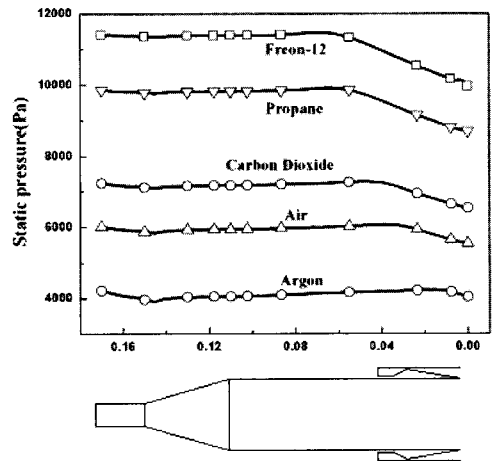


Fig. 4. 부유동 덕트 내부의 압력 분포

위의 식에서는 부유동 압력을 계산하는데 있어서 이차목 면적을 고려하지 않는다. 김등[4]에 따르면 이차목 면적은 작동 압력과 작동 멈춤 압력에 영향을 주지만 작동 영역에서 주유동 챔버의 압력이 같을 경우 부유동 압력에는 영향을 주지 않는다. 따라서 위의 식을 이용함이 타당할 것으로 판단된다.

### 2.3 상용 코드를 이용한 수치 해석

초음속 이젝터의 수치 해석을 위해 상용코드인 FLUENT를 사용하였으며, 질량 보존, 운동량 보존, 에너지 보존을 모두 고려하였다.

기체의 물성치의 영향을 보는 것이 주목적이므로 경계 조건은 모든 기체에 대해 동일하게 설정하였다. 주유동 입구의 경계조건은 절대기압 15기압의 압력 입구 조건으로 하였고 부유동 입구의 경계 조건은 1g/s의 공기 유량으로 하였다. 두 유동의 전온도는 모두 300K로 설정하였다. 또한, 점성 모델로는 k- $\omega$  난류 모델을 사용하였다.

Fig. 4는 수치 해석을 통해 얻은 부유동 덕트 내부의 압력 분포로 각 주유동 기체에 대하여 부유동 덕트 내부의 위치에 관계없이 압력 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. 따라서 해석 결과를 비교하기 위해 주유동 노즐 출구부터 하류방향으로 12mm 떨어진 지점의 압력을 선택하였다.

### 2.4 해석 결과

Fig. 5, 6은 Emanuel의 해석 방법과 수치 해석 방법을 통해 얻은 결과 부유동 압력을 비교하여 보여주고 있다. 주유동 기체의 분자량이 증가하거나 정압 비열이 증가하면 부유동 압력이 증가하며, 수치 해석 결과와 Emanuel의 해석 결과

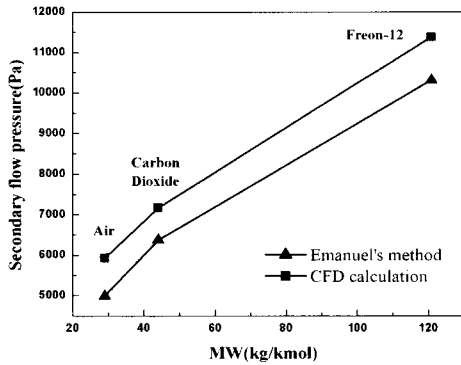


Fig. 5. 분자량에 따른 부유동 압력

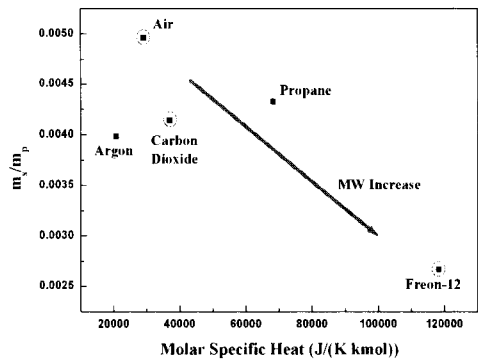


Fig. 8. 유량비

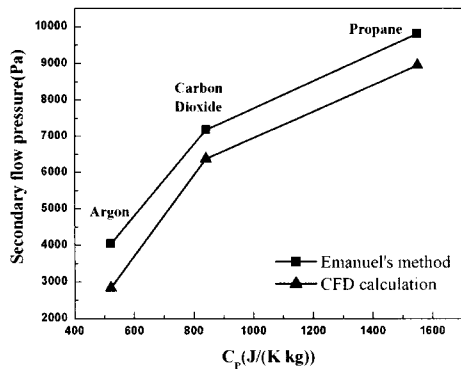


Fig. 6. 정압 비열에 따른 부유동 압력

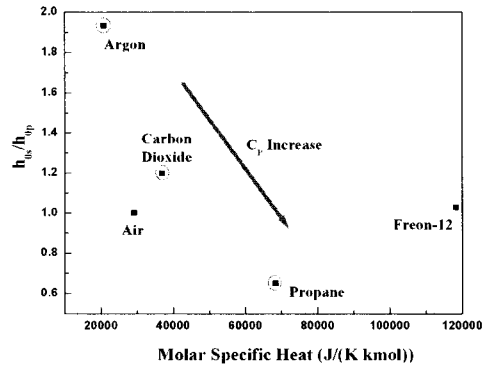


Fig. 9. 전엔탈피비

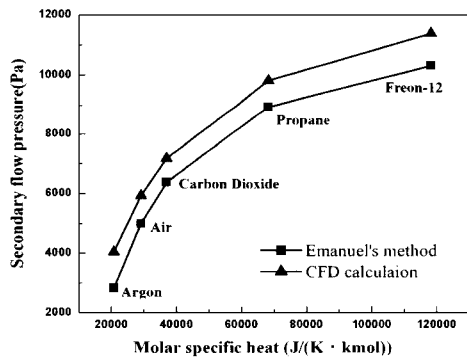


Fig. 7. 몰비열 변화에 따른 부유동 압력

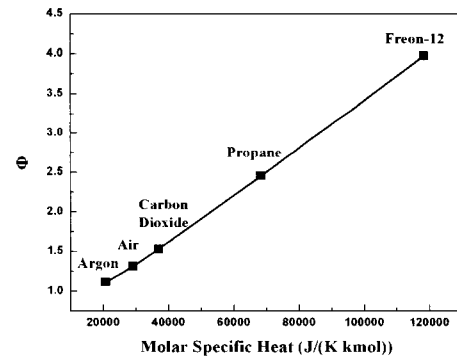


Fig. 10. 주유동 기체 변화에 따른 ϕ

가 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 모든 주유동 기체에 따른 결과를 몰비열을 독립 변수로 하여 한번에 비교해주고 있으며 주유동 기체의 몰비열이 증가함에 따라(혹은 주유동 기체의 비열비가 감소)함에 따라 부유동 압력이 증가함을 확인할 수 있으며 분자량과 비열의 영향이 비열비로 동시에 나타남을 확인하였다.

식 (1)-(3)에서 부유동 압력은 식(3)으로 정의된  $\phi$ 에 의해 결정된다. 따라서 주유동 기체의 변화가  $\phi$ 를 결정하는 각 인자들에 미치는 영향을 확인하면 물리적 이해가 가능하다.  $P_{rec}$ 는 초음속 이젝터의 배압으로 대기압이며  $M_m$ 이 커질수록  $P_m$ 은 감소하며  $M_m$ 은  $\phi$ 가 작을수록 증가한다.

Fig. 8은 각 기체에 따른 주유동 유량에 대한 부유동 유량비( $m_s/m_p$ )를 나타내고 있다. 유량비

는 분자량의 영향을 지배적으로 받으며 분자량이 증가함에 따라 유량비는 감소한다. Fig. 9는 주유동 기체의 전엔탈피에 대한 부유동 기체의 전엔탈피비( $h_{0s}/h_{0p}$ )를 나타내고 있으며 엔탈피비는 주유동 기체의 정압 비열이 증가함에 따라 감소한다. 식 (1), (2)에서 유량비와 엔탈피비가 감소하면  $\phi$ 가 감소하고  $M_m$ 이 증가하기 때문에 두 인자만 고려한다면 주유동 기체의 분자량과 정압 비열의 증가는 부유동 압력을 감소시킨다.

$\phi$ 를 결정하는 또 다른 변수로는 노즐 출구에서의 마하수( $M_p$ )가 있다. 등엔트로피 유동으로 가정하면 주유동 기체의 분자량이나 정압 비열이 증가함에 따라  $M_p$ 는 감소하며[4] 식 (1), (2)에서  $M_p$ 가 감소하면  $\phi$ 가 증가한다. 따라서  $M_p$  관점에서는 분자량과 정압 비열의 증가는 부유동 압력을 증가시킨다.

Fig. 10은 각 주유동 기체에 따른  $\phi$ 를 보여주고 있다. 기체의 몰비열이 증가함에 따라  $\phi$ 가 증가하며  $\phi$ 를 결정하는 인자들 중에서 유량비와 엔탈피비의 영향은 적고  $M_p$ 의 영향이 지배적임을 확인할 수 있다. 따라서 주유동 기체의 분자량과 정압 비열이 부유동 압력에 미치는 영향은 노즐 출구 마하수의 감소로 인한 것임을 확인할 수 있다.

### III. 실험

Fig. 11은 실험 장치 구성이다. 부유동 유량은 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 조절하였고 부유동의 전압은 대기압이다. 주유동 기체는 최대 6개의 가스 실린더로 매니폴드(manifold)를 구성하여 공급하였다. 주유동 전압력과 부유동 압력은 압전소자(piezoelectric)을 이용하여 측정하였다. 주유동 전압력은 1-30 bar 범위의 센서를, 부유동 압력은 1-300 mbar 범위의 센서를 사용하여 측정하였다.

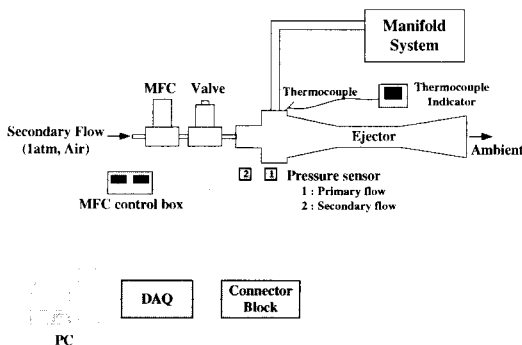


Fig. 11. 실험 장치 구성

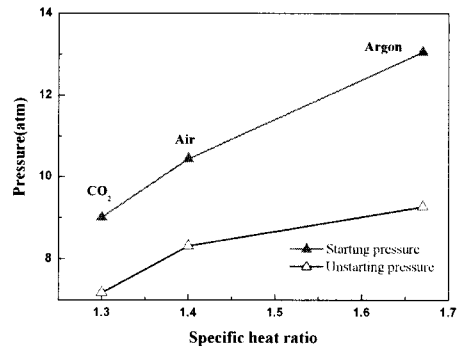


Fig. 12. 작동 압력과 작동 멈춤 압력

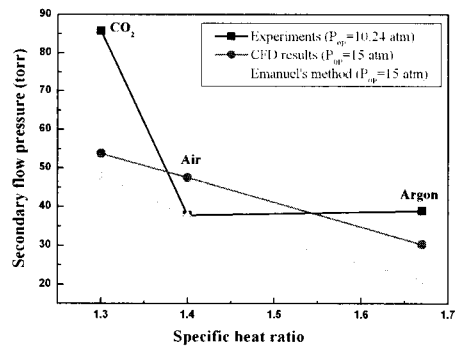


Fig. 13. 부유동 압력

실험에서는 두 가지 형태의 초음속 이젝터를 사용하였다. 먼저 주유동 노즐 면적비( $A_p/A_p^*$ )가 10.78이고 모든 형상 변수가 해석에서 사용한 것과 동일한 이젝터를 사용하였다(case 1). case 1의 초음속 이젝터는 주유동 노즐 면적비가 크기 때문에 면적비가 작은 노즐을 제작하여 동일한 실험을 수행하였다(case 2). Fig. 2와 같은 환형 분사 이젝터의 경우 노즐 출구 면적이 부유동 덕트 면적을 결정하기 때문에 노즐 목면적의 증가를 통해 면적비를 감소시킬 수 있다. 노즐 목면적이 증가하면 초음속 이젝터 작동을 위해 필요한 이차목 면적 역시 증가하게 된다. 새로운 이차목 직경( $D_2$ )은 이차목이 있는 초음속 풍동을 설계하는 방법과 등엔트로피 가정을 통해 얻은 면적에 점성에 의한 손실 등을 고려하여 보정하였다. 참고 문헌[5]에 따르면 140~160%의 범위에서 보정이 증가할 수로 작동 압력이 감소하며 초음속 이젝터의 작동이 용이해진다. 따라서 본 연구에서는 모든 기체에 대하여 초음속 이젝터를 작동시키기 위해 160%의 보정을 수행하여 작동이 충분히 가능하도록 하였다.

실험에서 사용한 case 2의 초음속 이젝터는 혼

합 챔버의 수축각(a)과 아음속 디퓨저의 확장각 (β) 그리고 이차목 덕트의 L/D가 case 1과 동일 하며  $A_P/A_P^*$ 는 3.0,  $D_2$ 는 33mm이다.

Fig. 12 - 14는 case 1 이젝터의 실험 결과를 나타내고 있다. 주유동 기체로는 공기, 아르곤 그리고 이산화탄소를 사용하였으며 부유동 공기 유량은 1g/s로 설정하였다. 주유동 기체의 비열비가 증가함에 따라 작동 압력과 작동 멈춤 압력이 증가함을 확인할 수 있다(Fig. 12).

Fig. 13은 측정된 부유동 압력으로 실험결과 해석과는 달리 아르곤을 사용하였을 때 1 torr 정도 더 높은 부유동 압력이 측정되었다. 또한 이산화탄소를 사용하였을 때 두 해석 결과보다 훨씬 높은 부유동 압력이 측정되었다. 이것은 주유동 기체의 응축 현상이 원인인 것으로 판단된다. 수치 해석과 Emanuel의 방법을 이용한 해석에서는 이젝터 내부에서 주유동 기체가 기체 상을 유지한다고 가정하였다. 그러나 실험에서는 상온의 기체가 주유동 챔버로 공급되었으며 10.78의 높은 면적비를 가진 노즐을 통해 팽창하면서 기체 상태를 유지하지 못하고 응축(condensation)이 발생하게 된다. 응축 현상이 발생하는 경우 등엔트로피 설계 조건에 비해 노즐 출구에서의 압력은 높아지고 유동의 마하수가 낮아진다[12]. 따라서 부유동 압력은 기체상을 유지한다는 가정 하에 얻어진 해석 결과보다 증가하게 된다.

Fig. 14는 아르곤에 대한 상 경계도와 노즐 내부에서의 등엔트로피 팽창 곡선을 보여주고 있다. 그래프에서 상 경계선 우측의 압력 조건에서 물질은 기체 상태를 유지할 수 있다. 아르곤의 경우 면적비 10.78인 노즐에 대하여 노즐 출구에서 열적 평형 상태에서는 기체 상태를 유지할 수 없으며 팽창 과정에서 응축 현상이 발생할 수 있다. 따라서 아르곤이 면적비가 큰 노즐을 통과하면서 응축되기 때문에 해석과는 달리 공기보다 높은 부유동 압력이 측정되었음을 확인할 수 있다.

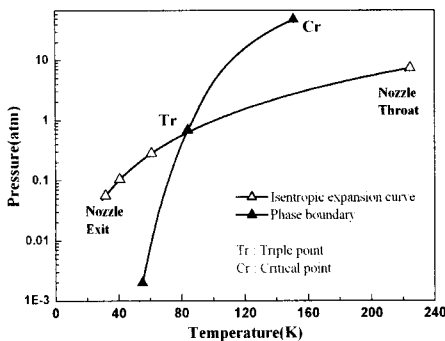


Fig. 14. Ar의 팽창 곡선과 상경계도

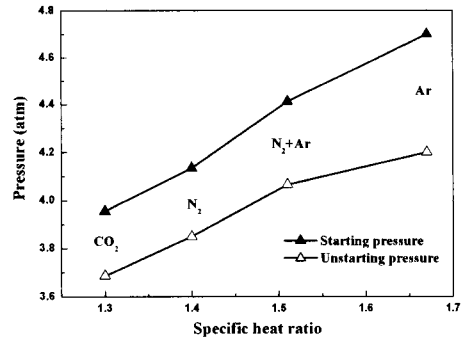


Fig. 15. 작동 압력과 작동 멈춤 압력

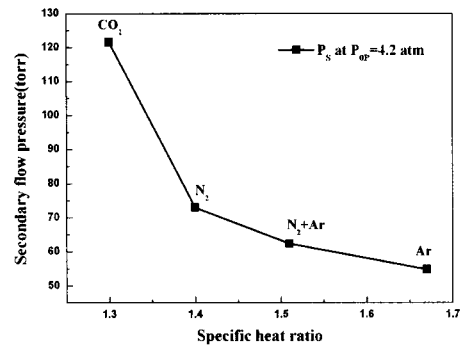


Fig. 16. 부유동 압력

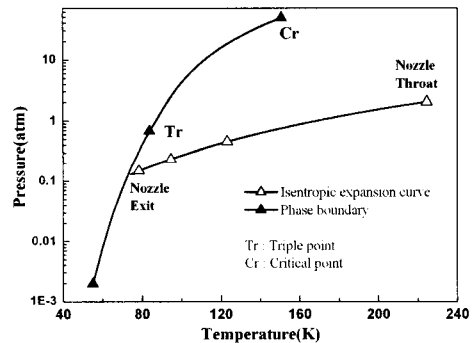


Fig. 17. Ar의 팽창 곡선과 상경계도

Fig. 15 - 17은 case 2 이젝터의 실험 결과로 질소, 아르곤, 이산화탄소, 그리고 아르곤-질소 혼합 기체를 사용하였으며 부유동 공기 유량은 2g/s로 고정하였다. 혼합 기체는 예혼합 기체를 조성하지 않고 매니폴드에 동일한 수의 아르곤과 질소 실린더를 연결하여 주유동 챔버에 동시에 공급하였다. 이 때 혼합 기체의 조성비는 각 기체 실린더의 부피에 의해 결정되며, 공급 기체의 분자량과 정압 비열은 아래의 식을 사용하여 얻

을 수 있으며  $Y$ 는 기체의 몰분율(mole fraction)을 나타낸다.

$$(Y)_{N_2} = \frac{(V)_{N_2}}{(V)_{N_2} + (V)_{Ar}}, (Y)_{Ar} = \frac{(V)_{Ar}}{(V)_{N_2} + (V)_{Ar}} \quad (3)$$

$$MW_m = (Y \cdot MW)_{N_2} + (Y \cdot MW)_{Ar} \quad (4)$$

$$C_p = \frac{(Y \cdot C_p \cdot MW)_{N_2} + (Y \cdot C_p \cdot MW)_{Ar}}{MW_m} \quad (5)$$

본 연구에서 사용한 혼합 기체는 분자량이 34.46 kg/kmol, 비열비가 1.51로 아르곤과 질소의 중간 특성을 보여주고 있다.

Fig. 15는 실험 결과 얻은 작동 압력과 작동 멈춤 압력을 보여주고 있으며 case 1과 마찬가지로 주유동 기체의 비열비가 증가함에 따라 증가하였다.

Fig. 16은 각 기체에 따른 부유동 압력을 보여주고 있다. Fig. 13의 실험 결과와는 달리 주유동 기체의 비열비가 증가함에 따라 부유동 압력은 감소하는 경향을 보였으며 특히 아르곤을 사용하였을 때 질소보다 20 torr 정도 낮은 부유동 압력이 측정되었다. Fig. 17은 면적비 3.0인 노즐에서 아르곤의 등엔트로피 팽창 곡선을 보여주고 있으며 기체의 전압력과 전온도는 Fig. 14의 조건과 동일하다. Fig. 14와는 달리 노즐 출구에서의 압력과 온도 조건이 열평형 상태에서 기체에 해당한다. 따라서 case 2의 실험에서는 아르곤을 사용하였을 때 응축 현상이 발생하지 않았음을 확인할 수 있다. 따라서 case 1의 실험에서 비열비가 큰 아르곤을 사용하였을 때 공기보다 높은 부유동 압력이 측정된 것은 응축 현상에 의한 것임을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 초음속 이젝터 주유동 기체의 두 가지 특성 - 분자량과 정압 비열- 의 영향에 관한 연구를 수행하였다.

이론을 이용한 해석과 실험을 통해 얻어진 두 물성치의 영향은 두 가지로 분류될 수 있다.

먼저, 공급된 주유동 기체가 이젝터 내부에서 기체 상태를 유지할 수 있으면 분자량과 정압 비열의 영향을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 이러한 두 물성치의 영향은 각각의 독립적인 영향보다는 비열비 혹은 몰비열이라는 다른 물성치의 형태로 초음속 이젝터의 성능에 영향을 준다. 추가적으로, 형상 변수와 관련지어 보면 주유동 기체의

비열비가 증가하는 것은 주유동 노즐 면적비가 증가하는 것과 동일한 효과를 보였다[5].

주유동 기체가 이젝터 내부에서 기체 상태를 유지하지 못하고 일부가 응축하게 되면 두 물성치의 영향 뿐만 아니라 응축 현상에 따른 영향이 수반된다. 응축 현상은 작동 압력과 작동 멈춤 압력에는 영향이 적었으나 부유동 압력에 있어서는 응축 과정의 진행 정도에 따라 큰 영향을 주었다.

#### 참고문헌

- 1) DA-WEN SUN and Ian W.Eames, "Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors - a review", J. the Institute of Energy, 68, 1995, pp. 33~40.
- 2) 최보규, "이젝터 유동 특성에 관한 연구", 공학박사 학위논문, 부산대학교.
- 3) Boreysho, A.S., Khailov, V.M., Malkov, V.M. and Savin, A. V. "Pressure Recovery Systems for High Power Gas Flow Chemical Lasers", 2002, 13<sup>th</sup> GCL-HPL.
- 4) Kim, H.D., Lee, J.H., Woos, S. H. and Cho, B. G., "Study of the Operation Characteristics of the Supersonic Steam Ejector System", J. KSPE, Vol. 5, No. 3, 2001, pp. 33~44.
- 5) 김세훈, 권세진, "화학레이저 구동용 이젝터 시스템 개발(I) - 화학레이저 구동용 초음속 이젝터 설계 변수 연구", 대한기계학회논문집 B 제 27권, 제 12호, 2003, pp. 1673~1680.
- 6) 김세훈, 진정근, 권세진, "화학레이저 구동용 이젝터 시스템 개발(II) - 이차목 형태의 환형 초음속 이젝터 최적 설계", 대한기계학회논문집 B 제 28권, 제 10호, 2004, pp. 1231~1237.
- 7) K. Annamalai, K. Visvanathan, V. Sriramulu and K. A. Bhaskaran, "Evaluation of the performance of supersonic exhaust diffuser using scaled down models", Experiments Thermal and Fluid Science, 17, 1998, pp. 217~229.
- 8) Work, L. T. and Haedrich, V. W., H.T., "Performance of Ejectors as a Function of the Molecular Weights of Vapors," Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 31, No.4, 1939, pp. 464~477.
- 9) Sam Han, John Peddieson, Jr. and David Gregory, "Ejector Primary Flow Molecular Weight

Effects in an Ejector-Ram Rocket Engine", Journal of Propulsion and Power, Vol. 1, No. 3, 2002, pp 592~599.

10) 진정근, 김세훈, 권세진, "주유동 기체의 분자량과 비열이 초음속 이젝터 성능에 미치는 영향", 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2004.

11) Emanuel, G., "Optimum Performance for a Single-Stage Gaseous ejector", AIAA Journal, Vol. 12, No.9, 1976, pp. 1292~1296.

12) Willmarth, W.W., Nagamatsu, H.T., "The Condensation of Nitrogen in Hypersonic nozzle", Journal of Applied Physics, Vol. 23, No. 10, 1952, pp. 1089~1095.