

패브리-초킹을 이용한 환형분사 초음속 이젝터 부유동 압력 예측

김세훈* · 진정근** · 권세진***

Estimation of Secondary Flow Pressure of an Annular Injection Type Supersonic Ejector Using Fabri-Choking

Sehoon Kim* · Jungkun Jin** · Sejin Kwon***

ABSTRACT

A theoretical analysis is developed for an annular injection type supersonic ejector having a second-throat downstream under the assumption that the Fabri-choking is placed in mixing chamber. Non-mixing theory is applied to formulate secondary flow pressure in the region between inlet of the mixing chamber and Fabri-choking. To describe the shock standing at the inlet of the mixing chamber, two dimensional oblique shock relations are used and it is assumed that the shock affects only primary flow at Fabri-choking plane. In conclusion, it agrees well with experiments in case of small contracting angle of mixing chamber, under 4degrees.

초 록

혼합챔버 내에서 패브리-초킹(Fabri-choking)이 발생한다는 가정을 이용하여 이차목을 갖는 환형분사 초음속 이젝터의 이론 해석을 수행하였다. 부유동 압력을 예측하기 위해 혼합챔버 입구에서 패브리-초킹면 사이를 비혼합이론(non-mixing theory)을 이용하여 계산하였다. 혼합챔버의 수축각에 의해 발생하는 깔때기 모양의 경사충격파를 이차원 경사충격파로 모사하였고, 패브리-초킹면의 주유동에만 영향을 미친다고 가정하였다. 그 결과 혼합챔버의 수축각이 4도보다 작은 조건에서 실험값을 잘 예측하는 것을 확인하였다.

Key Words: Annular Injection Type Supersonic Ejector(환형분사 초음속 이젝터), Fabri-Choking(패브리-초킹)

1. 서 론

이차목을 갖는 환형분사 초음속 이젝터의 성능 변수로는 작동압력, 작동멈춤압력 그리고 부

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공
** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공
*** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공
연락처, E-mail: sehoonkim@kaist.ac.kr

2. 본 론

유동압력으로 나타낼 수 있다. 고진공을 얻는 이젝터의 경우 주유동 유량이 부유동의 유량에 비해 매우 큼으로 작동압력과 작동멈춤압력은 주유동의 조건에 의해 결정된다[1-2]. 하지만 부유동 압력은 주유동과의 혼합 및 모멘텀 교환, 충격파 등과 같이 복잡한 현상에 의해 결정되므로 이젝터 내부에서 발생하는 물리적인 현상을 정확히 예측할 때 의미 있는 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 주어진 형상 및 주유동 입구 조건을 통하여 부유동 압력을 예측하기 위한 이론 해석 모델 개발에 대한 연구를 수행하였다.

김 등의 연구에서 부유동 압력은 이차목의 단면적 및 길이저름비에 영향을 받지 않았다[1-2]. 이것은 혼합챔버 내부에서 패브리 초킹이 발생하여 이미 그것으로 인해 부유동 압력이 결정된다는 것을 의미한다. 패브리 초킹이 발생한다는 것은 큰 모멘텀 차이를 의미하므로[3], 본 연구에서는 비혼합이론(non-mixing theory)을 이용하여 혼합챔버 입구에서 임의의 패브리 초킹면 사이를 계산하였다[4].

또한 이차목을 갖는 환형분사 초음속 이젝터의 경우 증압분사 이젝터와 달리 초음속인 주유동이 벽면을 타고 흐르므로 수축각을 갖는 혼합챔버의 입구에서 경사충격파가 형성하기 때문에 이것에 대한 고려가 매우 중요하다[1-2]. 환형분사 이젝터의 경우 혼합챔버 입구에서 발생하는 충격파는 깔때기 모양이다. 하지만 본 연구에서는 간단한 해석을 위해 이차원 경사충격파 관계식을 사용하였다.

본 연구에서는 계산의 편의를 위해서 계산 과정을 두 단계로 나누어 수행하였다. 첫 번째 단계는 주유동과 부유동이 등엔트로피 과정으로 가속하여 부유동이 초킹 된다는 것이고, 두 번째 단계는 혼합챔버 입구조건 즉, 주유동 노즐 출구 조건에 의해 형성되는 이차원 경사충격파가 패브리-초킹면의 주유동에만 영향을 미쳐 압력이 증가하고, 마하수가 감소한다는 것이다. 이러한 과정으로 얻어진 패브리-초킹면의 주유동 압력과 부유동 압력이 같다는 조건을 만족시키는 부유동 압력을 계산하였다.

2.1 이론 해석

2.1.1 가정

그림 1은 일차원 이론 해석을 위한 환형분사 이젝터 혼합챔버의 수축부 개념도이다. 본 연구에서 사용된 가정은 다음과 같다.

- 주유동과 부유동은 일차원이고 완전기체이다.
- 이젝터 내에 응축이 발생하지 않는다.
- 이젝터 내부 벽에 의한 마찰은 무시한다.
- 부유동은 등엔트로피 과정으로 가속하여 패브리-초킹이 이루어지므로 $M_{S2}=1$ 이고, 혼합챔버 내부에서 발생한다.
- 혼합챔버 입구에서 발생하는 충격파는 이차원 경사충격파이고 패브리-초킹면의 주유동에만 영향을 미친다.
- 패브리-초킹면에서의 주유동과 부유동의 압력은 같다.
- 단열이므로 외부와의 열교환은 없다.

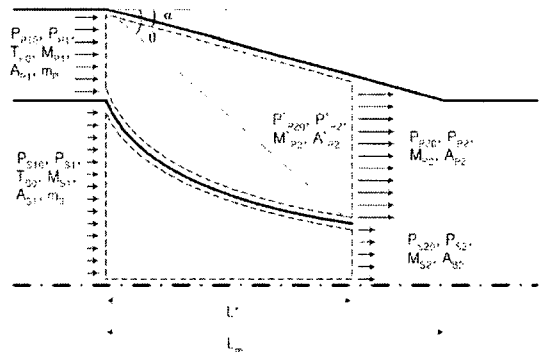


Fig. 1 Fabri-chocking in the mixing chamber

2.1.2 공식화

- First Step

그림 1에서와 같이 A_{P1} , A_{S1} 그리고 α 는 이젝터 형상변수이고, P_{P10} , P_{P11} , T_{P10} 그리고 M_{P1} 은 주유동의 입구조건으로 주어진다. 또한 주유동과 부유동의 유량인 m_P 와 m_S 도 주어진다. 질량보존식과 모멘텀보존식 그리고 패브리-초킹 조건을 이용하여 주유동 출구조건인 마하수 (M'_{P2})를 계산하고, 이차원 경사충격파 관계식을 통하여

M_{P2} 를 계산한다[4]. 이에 사용된 식은 아래와 같다. 여기서 위첨자 (')은 충격파를 고려하지 않은 패브리 초킹면의 주유동 조건이다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_p &= \rho_{P1} A_{P1} v_{P1} = \rho_{P2} A_{P2} v_{P2} \\ \dot{m}_s &= \rho_{S1} A_{S1} v_{S1} = \rho_{S2} A_{S2} v_{S2} \\ P_{P1} A_{P1} + P_{S1} A_{S1} - P'_{P2} A'_{P2} - P_{S2} A_{S2} &= \\ -v_{P1} (\rho_{P1} v_{P1} A_{P1}) - v_{S1} (\rho_{S1} v_{S1} A_{S1}) + & \\ v'_{P2} (\rho'_{P2} v'_{P2} A'_{P2}) + v_{S2} (\rho_{S2} v_{S2} A_{S2}) & \\ P &= \rho RT \\ M &= v/a \\ a &= \sqrt{\gamma RT} \end{aligned}$$

위의 식을 마하수의 식으로 정리하여 패브리 초킹면에서 부유동 마하수가 1이 된다는 식을 사용하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F_3(M'_{P2}) = \frac{1}{F_3(M_{P1})} \cdot \left\{ \frac{P_{S1}}{P_{P1}} \cdot \frac{A_{S1}}{A_{P1}} [F_1(M_{S1}) - F_2(M_{S1}) \cdot F_3(1)] + F_1(M_{P1}) \right\}$$

여기서 $F_3(M)$ 은 아래와 같이 정의된다.

$$F_3(M) \equiv \frac{F_1(M)}{F_2(M)} = \frac{1 + \gamma M^2}{M \left\{ \gamma \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right] \right\}^{1/2}}$$

위의 두 식을 통하여 $F_3(M'_{P2})$ 이 계산되면 이차방정식을 통하여 M'_{P2} 를 구할 수 있다. 단, 주유동은 초음속이므로 $M'_{P2} > 1$ 인 값을 선택한다. 위에서 구한 M'_{P2} 를 이용하면 주유동과 부유동 출구의 압력은 등엔트로피 가정을 통하여 구할 수 있다.

- Second Step

이차원 경사충격파 관계식을 이용하여 패브리-초킹면의 주유동 압력과 마하수를 구하고 반복 계산을 통하여 $P_{P2} = P_{S2}$ 를 만족시키는 부유동

압력을 취하였다.

2.2 이론 해석 결과

2.2.1 주유동 노즐 면적비

그림 2는 주유동 노즐 면적비가 부유동 압력에 미치는 영향이다. 면적비가 커질수록 부유동 압력이 낮아지는데, 이것은 혼합챔버 내의 주유동 압력이 낮아지기 때문이다. 그림에서와 같이 이론 해석 결과가 실험값을 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 하지만 모든 면적비에서 조금씩 낮은 결과를 예측하였는데, 이것은 혼합챔버 입구에서 발생되는 깔때기 형태의 경사충격파를 이차원 경사충격파로 모사하였기 때문이다. 깔때기 형태의 경사충격파의 강도는 이차원 경사충격파보다 강하기 때문에 낮은 부유동 압력의 결과를 나타내었다. 이러한 영향은 마하수가 커짐에 따라 증가하므로 그림에서와 같이 주유동 노즐 면적비가 커질수록 실험값과 계산값의 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다.

2.2.2 부유동 유량

그림 3은 부유동 유량이 부유동 압력에 미치는 영향이다. 동일한 이젝터 형상에서 부유동 유량만 증가시킨 결과이다. 그림에서와 같이 실험값을 잘 예측하는 것을 볼 수 있다.

2.2.3 질량 유량비

그림 4는 고정된 형상조건에서 부유동과 주유

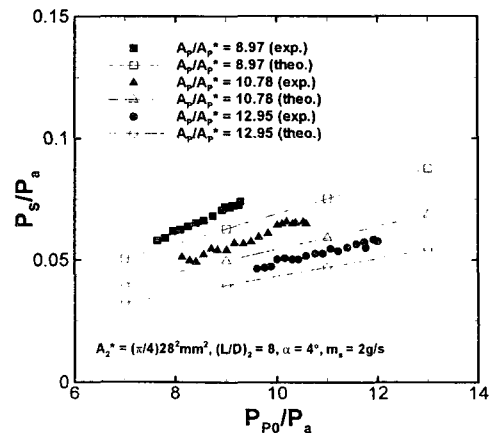


Fig. 2 Effects of primary nozzle area ratio

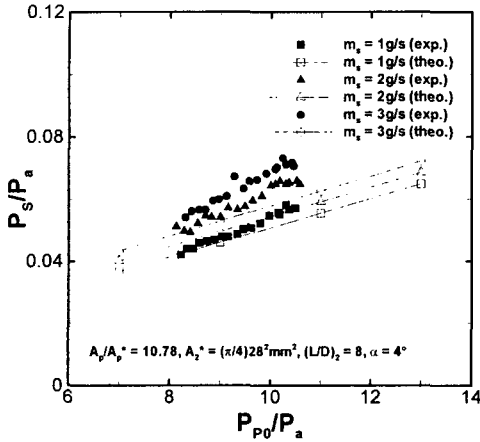


Fig. 3 Effects of secondary mass flow rate

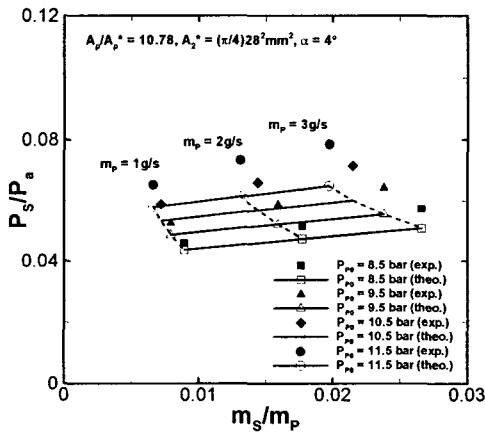


Fig. 4 Effects mass flow rate ratio

등의 유량비에 대한 부유동 압력 변화이다. 그림에서 실선은 주유동 유량이 일정한 조건이고, 점선은 부유동 유량이 일정한 조건이다. 부유동이 일정할 경우 유량비가 증가하면 부유동 압력이 증가하는데, 이것은 주유동 증가하는 주유동 전압의 증가에 기인하기 때문이다. 주유동 전압이 증가하면 혼합챔버 내의 주유동 압력이 증가하므로 부유동 압력은 증가한다. 또한 부유동 유량이 증가하면 부유동 압력의 회복이 빠르므로 압력은 증가한다. 해석의 결과가 전체적으로 실험의 경향성을 잘 보여주고 있으나, 모든 조건에서 낮은 압력을 예측하는데, 이것은 앞에서 언급한바

와 같이 깔때기 형태의 경사충격파 효과 때문이다.

3. 결론

패브리-초킹을 이용하여 이차목을 갖는 환형 분사 초음속 이젝터의 이론 해석을 수행하였다. 환형분사 이젝터의 경우 초음속인 주유동이 벽면을 타고 흐르므로 혼합챔버 수축부 입구의 수축각에 의해 발생하는 경사충격파의 고려가 매우 중요하다. 본 연구에서는 이차원 경사충격파를 이용하여 이를 모사하였다. 해석의 결과가 실험값을 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 하지만 수축각이 커지면 오차가 증가하였는데, 이것은 혼합챔버 입구에서 발생하는 깔때기형의 경사충격파를 이차원 경사충격파로 모사하였기 때문이다. 보다 정확한 이론 해석을 위해 깔때기 형태의 경사충격파에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 김세훈, 진정근, 권세진, "화학레이저 구동용 이젝터 시스템 개발(II) - 이차목 형태의 환형 초음속 이젝터 최적 설계", *대한기계학회 논문집 B* 제 28권, 제 10호, pp. 1231-1237, 2004.
2. 김세훈, 김춘택, 권세진, "화학레이저 압력회복용 이젝터 시스템 연구", *춘계한국추진공학회*, 2003, 안동대학교.
3. Fabri J. and Siestrunk R., "Supersonic air ejectors", *Advances in Applied Mechanics* (eds Von Meiss and Von Karman), Academic Press, New York USA, 1958, V, pp 1-34.
4. Mikkelsen, C. D., Sandberg, M. R., and Addy, A. L., "Theoretical and experimental analysis of the constant-area, supersonic-supersonic ejector," U. S. Army Research Office, Grant Number DAHC 04-75-G-0046, 1976.