

압력 측정을 이용한 초음속 풍동의 추력 측정 방법에 대한 실험적 연구

허환일*·김형민**

An Experimental Study on Thrust measurement Method of Supersonic Wind Tunnel from Pressure Measurement

Hwanil Huh*, Hyungmin Kim**

Key words : Thrust Measurement(추력측정), Pitot Pressure(피토압력), Supersonic Wind Tunnel(초음속풍동)

Abstract

The determination of thrust is very important in hypersonic air-breathing propulsion design and evaluation. Because of the short flow-residence time in the combustor, the evaluation of engine performance is strongly influenced upon the engine thrust. Conventional methods to determine the thrust is using thrust stand or force measurement system. However, these methods cannot be applied to the case where thrust stands are impractical, such as free jet testing of engines, and model combustor. With this reason, the thrust determination method from measured pitot pressure is considered and evaluated.

1. 서론

초음속 풍동의 유동은 마하 2정도의 초음속 유동으로 잔류시간이 매우 짧기 때문에 일반적인 추력 측정 방법인 추력 측정기(thrust stand)를 사용하여 직접적인 추력을 실험적으로 얻는 방법이 있지만 풍동의 각 부분들이 추력에 끼치는 영향을 알 수 없다. 또한 추력 측정기를 이용한 추력 측정의 경우 전체 추력에서 저항(drag)을 뺀 값을 측정하지만 측정된 압력 데이터를 이용한 추력 측정의 경우 실험력을 직접 계산할 수 있다. 본 논문에서는 이론적인 추력식으로부터 피토압과 정압을 이용한 추력식을 유도하고 유도된 압력 측정 결과를 이용한 추력 측정 방법을 적용하기 위해 미시간 대학의 초음속 연소 실험에서 측정된 국부 피토 압력 데이터를 이용하여 벽면에서의 압력분포와 피토 압력 분포에 대하여 분석하고 이를 이용하여 초음속 풍동의 추력을 측정하는데 이용하였다.

2. 이론적인 진공 추력

이상적인 추력식은 뉴턴의 제 2 법칙으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (1)$$

엔진을 통한 추력(F)은 크게 질유량(\dot{m})과 출구 속도(V)로 표현되는 모멘텀 추력과 출구 압력(P_e)과 노즐 출구 단면적(A_e)으로 표현되는 압력 추력의 두 항으로 표현된다.

$$F_v = \dot{m} v_e + P_e A_e \quad (2)$$

위의 식에 이상기체 상태 방정식과 비열비를 적용하면 마하수(M_e)와 피토압력(P_{02})으로 표현이 되는 추력식을 아래와 같이 유도할 수 있다[1, 2].

$$F_v = P_{02} A_e f(\gamma, M_e) \quad (3)$$

For subsonic;

$$f(\gamma, M_e < 1) = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} (\gamma M_e^2 + 1) \quad (4)$$

For supersonic;

$$f(\gamma, M_e \geq 1) = \left[\frac{2}{(\gamma+1)M_e^2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[\frac{2\gamma M_e^2 - (\gamma-1)}{\gamma+1} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} (\gamma M_e^2 + 1) \quad (5)$$

3. 압력 데이터를 이용한 추력 계산의 적용

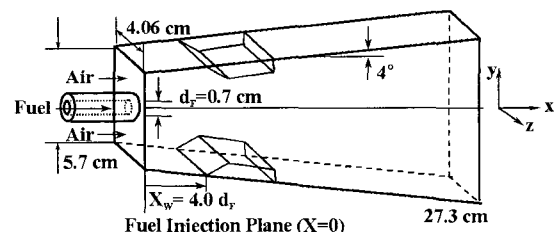


Fig. 1 Pitot pressure measurement at the local cross-sectional area of combustor

Figure 1은 Thick-Lip 튜브를 통해 수소 연료 제트가 bluff-body 처럼 마하2.5의 공기 유동장에 음속으로 분사되는 초음속 연소기의 형상으로 피토 압력 측정은 $X=5.0d_f$ 부터 $25.0d_f$ 까지 5 영역에

* 충남대학교 항공우주공학과, hwanil@cnu.ac.kr

** 충남대학교 대학원, propolise@hotmail.com

서 측정을 하였다. 각 단면은 측정 위치의 개수에 따라 동일한 분할 영역으로 나누어 측정된 피토 압력은 각 분할 영역을 대표하는 값으로 가정하였다. 각 분할 영역에서 측정된 피토 압력을 이용하여 분할 영역에서의 국부 마하수를 얻었고 식(3)으로부터 각 분할 영역의 추력을 계산하여 분할 영역의 추력 합이 단면에서의 추력으로 가정하여 Figure 2와 3과 같은 추력분포를 얻었다.

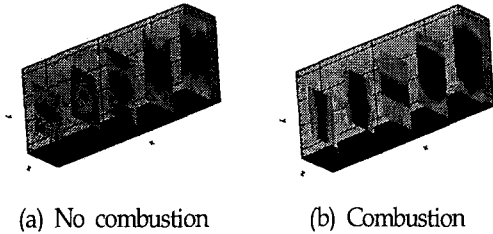


Fig. 2 Thrust distribution for no wedge case

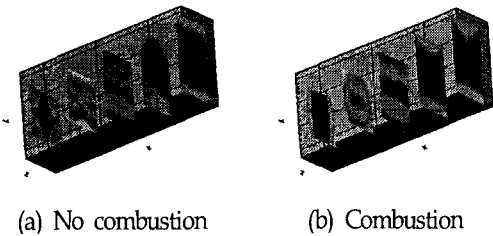


Fig. 3 Thrust distribution for wedge case

Figure 2와 3을 비교하였을 때 wedge가 있는 경우 연료노즐 근방에서 재순환 영역이 생기고 혼합이 증대가 되면서 상대적으로 추력이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 연소가 있는 경우 노즐 근방에서 추력이 적게 나오지만 실질적으로 연소기 끝 부분에서는 피토 압력을 측정하지 못하여 추력을 계산하지는 못하였지만 추력이 증가할 것으로 추정된다.

3. 추력 측정기를 이용한 추력 측정

위의 압력 데이터를 이용한 추력 계산 방법에 대해 실제 추력 측정기를 이용하여 검증해 봐야한다. 모델 로켓 모터 추력 측정을 통한 「추력 측정기를 이용한 추력 측정에 대한 기초 연구」를 바탕으로 압력 데이터를 이용한 추력 계산 방법을 검증하기 위해 먼저 소형 초음속 풍동을 설계하여 압력을 측정하고 추력을 계산하여, 추력 측정기를 이용하여 측정된 추력과 비교하기 위해 먼저 추력 측정기를 이용한 실험을 실시하였다. 소형 초음속 풍동은 노즐 팽창비 1.4, 마하수 1.77의 원뿔형태로 settling chamber의 압력은 5.5기압, 질유량 0.268[kg/s]으로 설계되었다.

Figure 4와 5는 소형 초음속 풍동을 장치한 추력 측정기와 이를 이용한 초음속 풍동의 추력곡선이다.

본 연구에 앞서 예비실험으로 이론적인 완전팽창을 가정하여 주요 변수인 피토압력을 노즐 출구의 면적 분할을 통해 측정하고 이를 앞서 구한 추력식에 적용하여 추력을 계산해 보았다. 그 결과 71.4[N]의 추력값을 얻을 수 있었으며, 추력 측정기를 통해 구한 값과는 피토압을 이용한 추력계산 과정과 추력측정기에서 발생

하는 오차 요인은 고려하지 않았기 때문에 약간의 차이를 보인다. 하지만 보정을 통한 비교연구의 가능성을 확인할 수 있다.

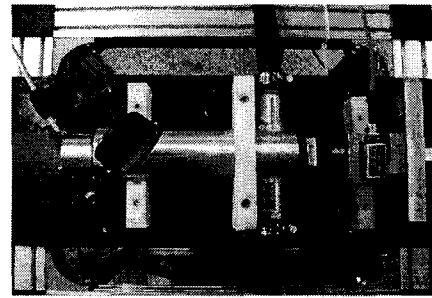


Fig. 4. Photo of supersonic wind tunnel installed on the thrust stand

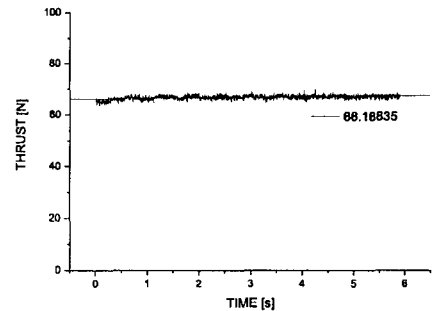


Fig. 5. Thrust curve for SWT

4. 결론

본 연구에서는 피토 압력을 이용한 초음속 풍동의 추력 측정 방법에 대한 연구의 선행연구로서 초음속 연소기에 대해서 측정된 압력 데이터를 이용한 추력 계산 방법의 적용과 이의 검증을 위한 추력 측정기를 이용한 추력 측정을 실시하였다. 본 연구를 통해 피토 압력을 이용한 초음속 풍동의 추력 측정이 가능하며, 추력 측정기를 이용한 추력값과의 비교연구를 통해 제한된 범위내에서 방법의 타당성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구 지원(과제번호:KOSEF (특정)R01-2000-00316)으로 수행된 연구결과와 일부이며 연구비를 지원해 주신 한국과학재단에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] John D. Anderson, JR, "Fundamentals of Aerodynamics," Mc Graw-Hill, 1991.
- [2] Hiers. R., and Pruitt, D., Determination of Thrust from Pitot Pressure Measurements, AIAA Paper 2001-3314, 2001.
- [3] 김정용, 서정원, 허환일, 김 유, "피토 압력을 이용한 초음속 풍동의 추력 추정에 대한 기초 연구," 제17회 한국추진공학회 추계학술발표대회, KAIST, November 16, 2001.
- [4] Huh, H., Kim, J., Kim, Y., and Driscoll, J. F., "Assessment of Thrust from Pressure measurements of Supersonic Combustor," AIAA-2002-4016, The 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Indianapolis, Indiana, USA, July 7-10, 2002.