

추력측정장치의 신뢰도 향상 방안에 관한 연구

강동혁* · 주성민* · 김종규* · 최환석*

A Study on improving the Reliability of Thrust Measurement System

Donghyuk Kang* · Seongmin Joo* · Jong-gyu Kim* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

Thrust is one of the crucial performance parameter of a combustion chamber in the combustion chamber development test. So it is very important to measure an accurate thrust. Thrust calibration test was performed to identify the system characteristics, resistance and linearity of a vertical thrust measurement system(TMS) for accurate thrust measurement. It has been found 6.9% ~ 8.6% errors between the measured thrust by TMS calibration equations and theoretical thrust. It has been confirmed that the TMS calibration is necessary to be performed with the propellant lines connected to the combustion chamber for accurate thrust measurement.

초 록

추력은 연소기 개발시험 시 연소 성능을 확인하기 위한 매우 중요한 항목이다. 따라서 정확한 추력을 측정하는 것은 매우 중요하다. 정확한 추력을 측정하기 위해 추력측정장치 시스템 특성, 저항 및 선형성 등을 파악하기 위해 단계적으로 교정 시험을 수행하였다. 추력 교정식으로 산출된 추력과 이론 추력과 비교하여 약 6.9%~8.6%의 오차를 확인하였고, 연소기의 정확한 추력을 측정하기 위해서는 추진제 배관이 연결된 상태에서의 교정이 필요함을 확인하였다.

Key Words: Combustion Chamber(연소기), Thrust Calibration (추력 교정), Vertical Thrust Measurement System(수직형 추력측정장치), Propellant Line(추진제 배관)

1. 서 론

한국형 발사체(Korea Space Launch Vehicle

II; KSLV-II) 액체로켓엔진의 연소기, 가스발생기 터보펌프 등의 시제품의 성능을 검증하기 위한 연소시험설비들이 나로우주센터에 구축되어 개발시험이 수행되고 있다[1]. 한국형발사체 추진기관은 가스발생기를 사용한 개방형 사이클의 터보펌프방식 액체엔진으로 산화제로 액체산소

* 한국항공우주연구원 연소기팀

† 교신저자, E-mail: dhkang@kari.re.kr

(Liquid Oxygen)와 연료로 케로신(Kerosene)을 사용한다[2]. 액체로켓엔진의 구성품은 개별 성능검증 수락시험을 수행하며, 성능 평가를 위해 사용되는 요소로 대표적인 것이 순추력(net thrust)과 비추력(specific impulse)이다. 따라서 추력은 연소기의 연소성능을 확인하기 위한 매우 중요한 요소이며, 정확한 추력을 측정하기 위한 많은 선행 연구들이 수행되어졌다[3-4].

추력을 측정하는 방법에는 Scale Force Measurement, Internal Momentum Balance, Calculation Using Nozzle Coefficients 등이 있으며, Scale Force Measurement가 가장 널리 보편적으로 이용되고 있다. 추력측정장치(Thrust Measurement System; TMS)는 고가이며, 설계, 조립, 설치 및 검증 시 많은 시간이 소요되기 때문에 사전에 시험대상물, 시험 요구조건 및 시험 환경에 따라 추력 측정 방향, 측정 방법, 교정 방법 등을 알맞게 선정하는 것이 중요하다[5].

고체 로켓의 경우 연소에 필요한 모든 요소들이 로켓 내부에 포함되어 있어 외부적인 요인에 의해 발생하는 측정오차는 거의 없으나, 수직형 연소시험설비에서 액체로켓 연소기의 경우 추진제 공급배관, 측정센서 배관, 연소기 자체 무게 및 배관 냉각 등의 외부적인 요인에 의해 측정오차가 발생하기 때문에 측정된 추력의 보정작업은 필수적이라 할 수 있다.

본 논문에서는 TMS 구성과 연소시험 시 측정된 추력과 외부요인의 영향과의 관계를 파악하여 보정된 추력과 이론추력의 비교, 분석한 결과에 대하여 기술하였다.

2. 추력측정장치

2.1 TMS 구성

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에 사용된 TMS는 Vertical type, Single Component Stand, Scale Force Measurement 방식이며, 교정은 유압 구동장치를 사용하는 하중인가 방식이다. Scale force measurement는 프레임, 로드셀, 교정시스템 및 계측장비로 구성된다. 로드셀은 추

력 측정의 핵심 부품으로 하중에 비례해서 bridge 회로의 변형 정도에 따라 전압 변화를 발생시키는 원리이며, 최대 측정 용량의 50~80%의 영역에서 가장 정확한 측정값을 얻을 수 있기 때문에 측정하고자하는 추력 용량의 1.5~2배의 것을 선정한다. 하중 측정 방식은 하중 분포가 가장 안정적인 트러스 구조의 3점지지/측정 방식이다. 유압실린더를 포함한 교정 장치는 TMS 상부에 장착되어 있으며 A-FRAME이 장착되는 인터페이스 플레이트(Live bed)를 당겨 교정을 수행하는 구조로서 최대 900 kN까지 추력을 교정 할 수 있다. 또한 교정용 로드셀은 내부교정, 외부교정 각각 별도로 구성하여 교정 정밀도를 향상시켰다. Table 1은 로드셀 규격, Fig 1은 TMS 형상을 각각 나타내었다.

Table 1. Specification of Loadcell

	Manufacture / Model	Signal
계측용 로드셀(M)	Interface / 1243ERD-1350kN	Dual Bridge
교정용 로드셀(C)	Interface / 1140AF-900kN	Single Bridge

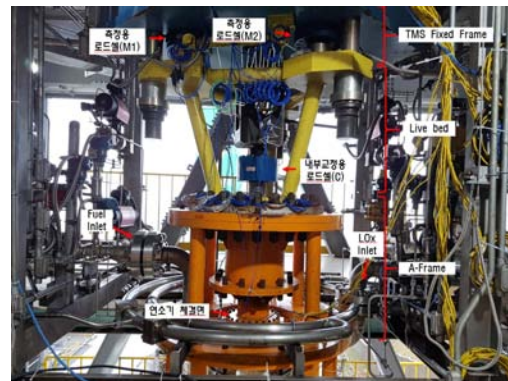


Fig. 1 Thrust Measurement System

2.2 연소기 장착

본 시험에 사용한 시제는 LOx와 Kerosene을 추진제로 하는 한국형발사체 1단 엔진의 구성품인 75톤급 연소기이며, Fig.2는 연소시험을 위해 TMS A-Frame에 연소기가 장착된 모습(좌)과 연

소시험 시 모습(우)을 나타내었다. 연소기로 공급되는 추진제 배관 직경은 LOx 4" pipe, Fuel 3" pipe, 측정센서는 1/8" tube, 점화기는 1/4" tube로 각각 연결하였다.



Fig. 2 Combustion chamber & Firing test

3. 실험결과

3.1 TMS 교정

연소기의 추력(F)은 배출되는 연소가스의 운동량에 의한 힘과 외부 압력과의 차이에 의해 발생하는 힘의 합으로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있는데, 첫 번째 항은 운동량에 의한 추력으로 분사가스의 속도(V_e)와 질유량(\dot{m})의 곱으로 표현하며, 두 번째 항은 압력에 의한 추력으로 노즐의 크기인 단면적(A_e)과 출구압과 대기압 차이($p_e - p_a$)의 곱으로 나타낸다.

$$F = \dot{m} V_e + (p_e - p_a) A_e \quad (1)$$

연소시험 시 측정된 추력과 Eq. 1의 이론 추력과 비교하기 전에 TMS의 자체 특성과 외부요인에 의한 추력 손실 보정을 위한 교정 작업을 수행하였다. TMS 교정 시험으로 ①연소기 장착 전, ②연소기 장착 후 추진제 배관 연결 전, ③추진제 배관 연결 후 및 ④추진제 배관 냉각 후 각각 1 회씩 총 4회를 수행하였다. 교정 작업은 유압 실린더를 사용하여 유압펌프로 단계적으로 가압 및 감압하여 TMS에 모사 추력을 발생시켜 3개의 측정용 로드셀에 일정한 힘이 계측될 수

있도록 하여 교정 로드셀과 비교를 통해 수행되며, 교정 값은 0 ~ 700 kN까지 50 kN 씩 단계적으로 가압 및 감압하는 방법을 사용하였다. 교정 결과 연소기 장착과 추진제 배관 연결에 의한 추력손실 발생을 확인하였으나, 상온상태에 비해 냉각된 상태에서의 추가 추력 손실은 거의 없는 것으로 확인되었다. 연소기 장착 후 추진제 배관이 냉각된 상태에서 선형성(linearity)을 확인한 결과 100 kN 이하의 값을 제외하고 0.37% 미만으로 매우 우수함을 확인하였다. Table. 2와 Fig. 3에 추진제 배관이 냉각된 상태에서 측정 추력과 교정 추력 값과의 오차 범위 및 각 단계별로 수행된 전체 교정 결과를 각각 제시하였다.

Table 2. Linearity test results of TMS

Cal pt [kN]	Meas'd [kN]	Corr'd [kN]	Err [%]
0	(1.06)	34.86	(5015.96)
100	64.81	101.01	1.38
200	165.49	202.12	0.37
300	264.83	301.88	0.16
400	364.26	401.73	0.21
500	463.92	501.81	0.11
600	565.05	603.37	0.13
700	667.07	705.82	0.03

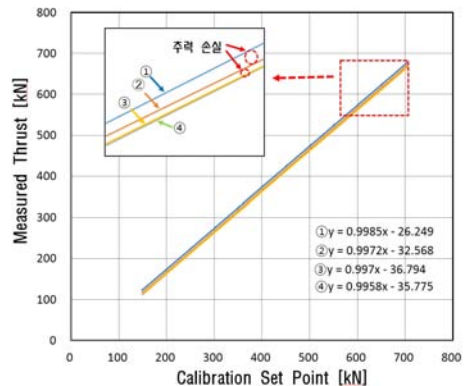


Fig. 3 Linearity curve of TMS

3.2 연소시험 결과

Fig. 4는 수직형 단축 추력측정설비에서 수행된

20초 연소시험 결과로서 3개의 로드셀에서 측정된 추력과 그 합을 나타내며, 연소시험 시 일정하게 측정되었음을 알 수 있다. 연소시험 시 추력은 611.48 kN 이 계측되었으며, 앞서 각 단계별로 구한 교정식으로 보정한 결과 638.67 ~ 650.2 kN으로 6.96% ~ 8.61%의 차이를 확인하였다. 이론 추력인 698.85 kN과 비교하면 추진제배관 연결 후 보정한 결과의 오차가 6.96%로 가장 적은 것을 확인하였다.

Table 3. Comparison of Thrust result(kN)

	이론 추력	측정 추력	교정추력			
			1	2	3	4
추력 (kN)	698.85	611.48	638.67	645.20	650.20	650.00
오차 (%)	0.0	12.50	8.61	7.59	6.96	6.99

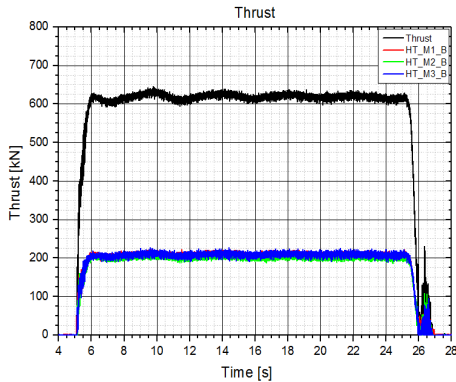


Fig. 4 Hot firing test result

4. 결론

연소시험 시 정확한 추력데이터 획득을 위해 TMS 자체 특성 및 외부요인들에 의해 손실되는 추력을 각 단계별 교정 작업을 수행하여 확인하

였다. TMS 교정 결과 연소기 장착에 의한 추력손실은 1.03%로 가장 큰 것을 확인하였으며, 그 다음으로 배관 연결에 의한 손실은 0.62%임을 확인하였다. 추진제 배관 연결 후 냉각 전 후의 추력손실 확인 결과 0.03%이하로서 추진제 배관의 냉각이 추력 손실에는 거의 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 결론적으로 정확한 추력 데이터 획득을 위해서는 연소기 장착 후 추진제배관 및 계측센서배관 등이 연결된 후 교정을 수행하는 것이 이론 추력과 오차가 최소임을 확인하였다. 본 연구에서 구한 보정추력과 이론추력에 대한 분석은 추 후 계속적인 연소시험을 통해 추가 연구될 예정이다.

참고 문헌

1. 한영민, 조남경, 정용갑, 김승한, 유병일, 이광진, 김진선, 김지훈, "한국형발사체 추진기관 연소기 및 터보펌프 시험설비 구축 현황," 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2013, pp.405-409
2. 조원국, 박순영, 문윤완, 남창호, 김철웅, 설우석, "한국형발사체 액체로켓엔진시스템," 한국추진공학회지, 제14권, 제1호, 2010, pp.56-64
3. A. Bray, G. Barbato, R. Levi, Theory and Practice of Force Measurement, Academic Press, June 1990
4. 박수환, 박희호, 김유, 조남춘, 금영탁, "액체 로켓 엔진에서의 추력 측정 장치 개발과 calibration에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제5권 2호, 2001, pp.16-23
5. Runyan, R. B. Rynd, J. P., and Seely, J. F., "Thrust Stand Design Principles", AIAA 17th Aerospace Ground Testing Conference, AIAA-92-3976, 1992.