

# 노즐 확장비에 따른 고체추진기관 성능해석

신동일\* · 황형노\* · 서 혁\*

## Performance Analysis of Solid Rocket Motor according to the Ratio of Nozzle Expansion

Dongill Shin\* · Hyungno Hwang\* · Hyuk Suh\*

### ABSTRACT

There is many considerations of the composition development of propellant, performance analysis according to temperature, ablation condition of heat-resistant material, etc. in the solid rocket motor development process. Performance analysis of the motor according to nozzle expansion ratio is one of this process and an important factor to decide the motor performance. A Study is verified through analysis, motor manufacture and test.

### 초 록

추진기관의 개발과정에서는 추진제의 조성개발, 온도에 따른 성능분석, 내열재 삭마상태 등 여러 가지 고려사항이 있다. 노즐 확장비에 따른 추진기관의 성능분석 또한 이러한 과정 중에 하나로 추진기관의 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 추진기관에 대한 해석 후 실제 모타를 제작·시험하여 이를 검증하였다.

Key Words: Solid Rocket Motor(고체추진기관), Nozzle Expansion ratio(노즐 확장비), Specific Impulse(비추력), Static Firing Test(지상연소 시험)

### 1. 서 론

추진제가 연소관 내에서 연소하여 기체로 변화되면 순간적으로 높은 압력이 발생하게 되고, 외기와의 압력차에 의해 매우 빠른 속도로 노즐을 통해 연소 가스가 외부로 배출되게 된다. 가스가 빠른 속도로 배출되면서 추진기관은 그 반대 방향으로 전진하려는 추력을 얻게 되는데, 이

힘이 얼마나 강한지의 여부로 그 추진기관의 성능을 평가하게 된다. 일반적으로 이러한 성능 평가의 기준이 되는 것은 단위 무게의 추진제가 낼 수 있는 힘인 비추력이며, 이는 추진제가 연소하면서 발생된 힘의 총 합을 추진제의 무게로 나눈 값이다.[1]

대형 추진기관 개발과정에서는 일반적으로 실물형 추진기관의 제작·시험시에 발생하는 과도한 비용 문제로 인하여 축소형인 표준모타를 제작하여 시험을 진행한다.

\* (주)한화 대전공장 개발부

이번 연구 목표는 추진기관의 개발시 요구되어지는 성능확인시험의 일부인 노즐 확장비 변화에 따른 추진기관의 성능을 분석하는 것이다. 우선 내탄도 해석을 통하여 시험조건을 검토하고 이 조건에 따라 표준모타를 제작·시험을 진행하여 이를 검증하였다.

## 2. 시험모타 및 시험장치[2]

### 2.1 시험모타 제원 및 시험장비 소개

이상연소시험시 사용한 표준모타의 제원 및 장비의 사양은 Table 1,2와 같다.

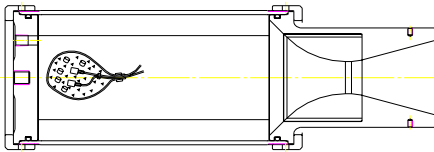


Fig. 1 Standard Motor(ST-6)

Table 1. Spcification of Standard Motor(ST-6)

구 분	단 위	제 원
모타 길이	mm	409.9
모타 직경	mm	174.0
추진제 길이	mm	279.0
추진제 외경	mm	152.4
추진제 내경	mm	101.6
추진제 두께(web)	mm	25.4
추진제 무게	kg	약 5.05

Table 2. Spcification of SFT\* Instrumentation

센서, 계측 설비 & Software	사 양
Pressure Transducer	0-3,000 psig (Dynisco)
Load Cell	0-3,000 lbf(BLH)
Thermocouple	0-1,000 °C(K type)
Signal Isolator	0-30 mV, Strain Gage Input Module
DAQ System	Multifunction I/O Board A/D Converter (National Instruments)

\* static firing test

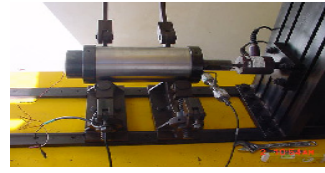


Fig. 2 SFT(static firing test)

## 3. 성능예측 (내탄도해석)

### 3.1 추진제 성능조건

추진기관의 개발 목표값은 대기압 조건하에서 비추력기준이 235 sec(±2%)이며 이를 만족하기 위해 일차적으로 추진제 개발을 진행하여 이번 시험에 적용하였다.

우선 노즐구조체의 노즐 확장비에 따른 성능을 내탄도 해석을 통해 예측하였다.

### 3.2 내탄도 해석 결과 [3][4]

해석조건은 Table 3에서 보이는 바와 같이 Strand Burning Test, CEA(chemical equilibrium with applications) 등을 이용하여 얻어진 값을 적용하였다.

확장비를 제외한 나머지 항목들은 고정값을 적용하였으며, 확장비 항목만 5 ~ 18까지 1씩 증가시키면서 성능값을 예측하였다.

Table 3. Input data

구 분	단 위	제 원
연소가스 평균분자량	g/mol	25.904
추진제 밀도	g/cc	1.797
비열비	-	1.1340
특성속도	ft/sec	5231.1
연소속도 압력상수	-	0.03910
연소속도 압력지수	-	0.2866
연소가스 화염온도	K	3464.29
연소속도 보정 factor	-	1.000
모타효율	-	95%
Free volume	m <sup>3</sup>	0.002342
노즐목	mm	20.72
노즐 확장각	°	15
확장비	-	5 ~ 18

해석을 통해서 얻어진 값 중 web 평균 압력, 비추력, web 평균추력은 Table 4와 같다.

Table 4. Result data

확장비	web 평균 압력	isp	web 평균추력
5	975.0126	241.8809	753.8325
6	975.0126	244.318	761.5252
7	975.0126	245.7854	766.1977
8	975.0126	246.582	768.7812
9	975.0126	246.8894	769.841
10	975.0126	246.8256	769.7448
11	975.0126	246.4713	768.7441
12	975.0126	245.8843	767.0182
13	975.0126	245.1067	764.699
14	975.0126	244.1707	761.8864
15	975.0126	243.1011	758.6575
16	975.0126	241.9172	755.073
17	975.0126	240.6351	751.1824
18	975.0126	239.2676	747.0259

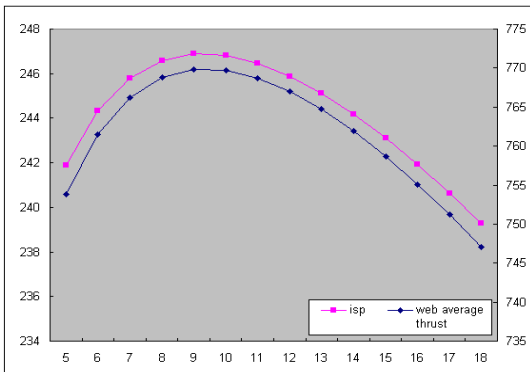


Fig. 3 Analysis result according to the Ratio of Nozzle Expansion

노즐 확장비에 따른 비추력 및 평균추력은 Fig. 3에서 보여지듯이 일정값(확장비 9)까지는 증가를 하다가 다시 감소하는 형태를 보인다.

추진기관에서 배출되는 연소가스는 노즐 출구에서 외부 기압과 동일하도록 확장되었을 경우 가장 이상적인 추력을 얻을 수 있다. 노즐 확장이 충분하지 않을 경우 추력의 낭비가 발생하고, 노즐 확장이 과도할 경우 끝단부에서 대기압에 의한 역추력이 발생하여 추력에 손실이 발생

한다.

해석을 통해서 얻어진 결과를 지상연소시험에 적용하여 검증을 진행하였다.

#### 4. 지상연소시험 결과 분석

##### 4.1 지상연소시험 조건

4발의 표준모타를 제작하여 지상연소시험을 수행하였다. 내탄도 해석에서 획득한 모터 성능을 검증하기 위해 노즐 확장비를 변화시킨 노즐을 제작하였다.

Table 5. Testing condition for SFT(1)

구 분	Web 평균압력 (psi)	팽창비	출구 압력 (기압)	노즐목 직경 (mm)	출구 직경 (mm)
1호기	975	5.695	1.0	20.73	49.47
2호기		10.387		20.69	66.68
3호기		11.926		20.73	71.59
4호기		17.850		20.70	87.56

◎ 측정 항목 : 압력 2channel, 추력 2channel

◎ 연소시험 온도 : 20℃

Table 6. Testing condition for SFT(2)

구 분	기준치	측정치	
추진제 무게 (kg)	-	1호기	5.05
		2호기	5.08
		3호기	5.16
		4호기	5.07
추진제 내경 (mm)	101.6	1호기	101.9
		2호기	101.3
		3호기	102.3
		4호기	102.1
추진제 외경 (mm)	152.4	1호기	152.4
		2호기	152.4
		3호기	152.3
		4호기	152.4
추진제 Web (mm)	25.4	1호기	25.3
		2호기	25.1
		3호기	25.3
		4호기	25.2
추진제 길이 (mm)	279	1호기	278.2
		2호기	279.0
		3호기	278.6
		4호기	278.3

#### 4.2 지상연소시험 결과

노즐 구조물의 확장비에 따른 성능은 Table 7과 같다.

Table 7. Result data of SFT

구분		측정치
ISP (s)	1호기(5.695)	238.45
	2호기(10.387)	240.08
	3호기(11.926)	239.23
	4호기(17.850)	232.46
web average pressure (psia)	1호기(5.695)	918.86
	2호기(10.387)	933.51
	3호기(11.926)	926.47
	4호기(17.850)	932.98
web average thrust (lbf)	1호기(5.695)	736.89
	2호기(10.387)	750.53
	3호기(11.926)	744.60
	4호기(17.850)	724.12

노즐의 확장비에 변화에 따른 성능을 확인하는 것이 이 시험의 목적으로 동일한 추진제를 각각의 표준모타에 적용함으로써 확장비 변화가 그대로 성능 변화로 이어질 수 있도록 고려하였다.

시험 결과 설계시에 고려하였던 975 psia의 wab 평균 압력을 모두 만족시키지는 못했지만, 약 918 ~ 933 psia로 서로간에 큰 차이가 없었기 때문에 성능의 변화는 모두 팽창비의 변화에

기인한다고 가정할 수 있다. 이러한 가정하에 성능을 비교해 보면 확장비 10 내외에서 높은 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

추진기관의 개발과정에서는 추진제의 조성개발, 온도에 따른 성능분석, 내열재 삭마상태 등 여러 가지 고려사항이 있다. 특히 노즐 확장비에 따른 추진기관의 성능분석 또한 이러한 과정 중에 하나로 추진기관의 추력 성능을 결정짓는 주요한 요소이다. 추진기관의 개발과정 중 추진제의 성능을 확인하기 위한 시험으로 해석 및 실제 모타 제작·시험을 통해서 이를 검증하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 한국추진공학회, "항공우주 추진공학회", 한티 미디어
2. (주)한화 대전공장, "KSLV-I 적용 Kick Motor 추진제, 표준모타 개발 완료 보고서"
3. Anon, "Solid propellant grain design and internal ballistics", NASA SP-8076
4. Anon, "Solid rocket motor performance analysis and prediction", NASA SP-8039