

## 고체추진제 가스발생기를 이용한 축소형 고공환경모사 시험

김용욱\*, 이정호\*\*, 유병일\*\*\*, 조상연\*\*\*\*, 오승협\*\*\*\*\*

### Subscale high altitude simulation test using solid propellant gas generator

Yong-Wook Kim\*, Jung-Ho Lee\*\*, Byung-il Yu\*\*\*, Sang-Yeon Cho\*\*\*\*, Seung-Hyub Oh\*\*\*\*\*

#### Abstract

Cylindrical supersonic exhaust diffuser, which utilizes the momentum of high temperature gas exhausted from nozzle, provides simple methods for obtaining stable and low pressure around the propulsion system. Hot zone on which exhausted gas from nozzle exit impinges directly should be cooled to avoid melting of diffuser. This paper describes method and result of subscale high altitude simulation test with water cooling. Subscale gas generator with solid propellant was used for hot gas source and tap water for coolant.

#### 초 록

원통형 초음속 디퓨저를 사용하면 추진기관에서 발생하는 고온 연소가스의 모멘텀을 이용하여 비교적 간단하게 안정된 고고도 환경을 모사할 수 있다. 디퓨저를 이용한 고공모사 시험에서 추진기관의 연소시간이 긴 경우, 고온의 연소가스가 디퓨저 내벽면에 직접 닿기 때문에 반복적인 사용을 위해 이 부위에 대한 냉각대책이 필요하다. 디퓨저 내부로 분사되는 냉각수가 디퓨저 작동특성에 미치는 영향을 파악하고자 축소형 연소실험을 수행하였으며, 본 논문은 실험방법과 그 결과에 대해 기술하고 있다. 고체 추진제를 연료로 하는 가스발생기를 이용하여 추진기관을 모사하였으며, 일반 수도물을 냉각제로 사용하였다.

키워드 : High Altitude Simulation Test(고공환경 모사 시험), Supersonic Exhaust Diffuser(초음속 디퓨저), Gas Generator(가스 발생기), Diffuser Cooling (디퓨저 냉각)

#### 1. 서 론

KSLV-I의 상단에 사용되는 키크모터의 경우 노즐

목 마개를 갖추고 있으므로 고공에서의 점화가 보장되며 그 점화특성 또한 일반적인 지상연소시험을 통해서 파악할 수 있다. 따라서 키크모터의 고공성능을 확인하기 위한 고공시험은 이젝터나 진공챔버와

접수일(2007년 12월 14일), 수정일(1차 : 2008년 6월 5일, 2차 : 2008년 6월 17일, 게재확정일 : 2008년 7월 1일)

\* 추진기관체계팀/kyw421@kari.re.kr

\*\* 추진기관체계팀/leejh28@kari.re.kr

\*\*\* 추진기관체계팀/biyoo@kari.re.kr

\*\*\*\* 추진기관체계팀/chosangy@kari.re.kr

\*\*\*\*\* 추진기관체계팀/shoh@kari.re.kr

같은 추가적인 설비 없이 원통형 디퓨저만을 이용하여 비교적 간단하게 수행할 수 있다. 초음속 디퓨저는 추진기관에서 발생하는 고압 연소가스의 모멘텀을 이용하여 노즐의 배압을 대기압 이하로 낮추게 되며, 디퓨저 내에 적절한 위치에 충격파 구조를 발생시켜 안정된 고고도 환경을 모사할 수 있게 한다[1,2,3].

키크모터의 연소시험에 사용되는 실물형 디퓨저의 경우 작동시간이 약 60초로 비교적 길고 고온의 연소가스가 디퓨저 내벽면에 직접 닿기 때문에 반복적인 사용을 위해 시험 중 물을 이용한 채널 냉각 방식으로 디퓨저를 냉각한다. 아울러 노즐을 나온 고체모터의 연소가스가 직접 닿는 부분은 알루미늄 산화물 등의 영향으로 다른 영역에 비해 열적으로 더욱 취약할 수 있으므로 이 영역을 열적으로 보호할 수 있는 대책이 필요하다. 이를 위해 실물형 디퓨저의 경우 내부로 물을 분사하는 방식을 채택하여 입구 영역을 보호한다. 그러나 내부로 분사되는 물은 디퓨저 내부의 유동 질량을 증가시키고, 증발 등으로 인해 배출가스의 모멘텀과 유동에 영향을 주게 된다.

따라서 내부에 분사되는 냉각수가 디퓨저의 작동 특성에 미치는 영향을 파악하고 아울러 실물형 디퓨저의 설계를 확정하기 위해 가스발생기를 이용한 축소형 연소시험을 수행하였으며, 본 논문에서는 그 시험방법과 결과에 대해 기술하고 있다. 키크모터와 조성이 유사한 고체추진제를 가스발생기의 연료로 사용하였으며, 일반 수돗물을 냉각제로 사용하였다.

## 2. 시험장치

고체연료를 추진제로 하는 축소형 가스발생기를 이용하여 실물형 모터를 모사하였다. 실물형 모터의 추진제에는 알루미늄이 포함되어 있으며 연소압은 연소초기 급격히 상승한 후 시간에 따라 감소하는 특성을 가지고 있다. 이러한 실물형 모터를 모사하기 위해 유사한 조성을 가진 추진제를 사용하였으며 점진적으로 감소하는 압력 곡선을 얻기 위해 그림 1과 같이 그래인을 제작하였다.

그림 2는 실험에 사용한 가스발생기의 형상을 나타내며, 그래인 외부와 내부에서 동시에 추진제를 점화시키면 그림 3과 같은 연소실 압력곡선을 얻을 수 있다.

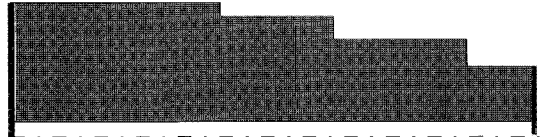


그림 1. Grain of subscale gas generator

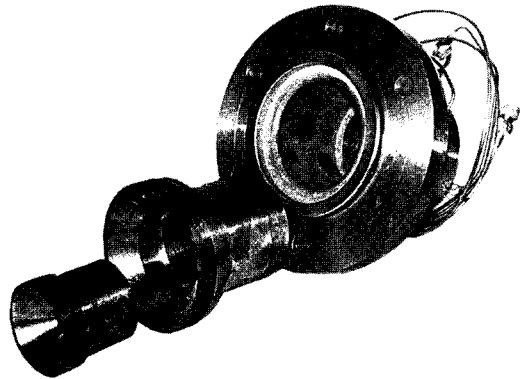


그림 2. Subscale gas generator

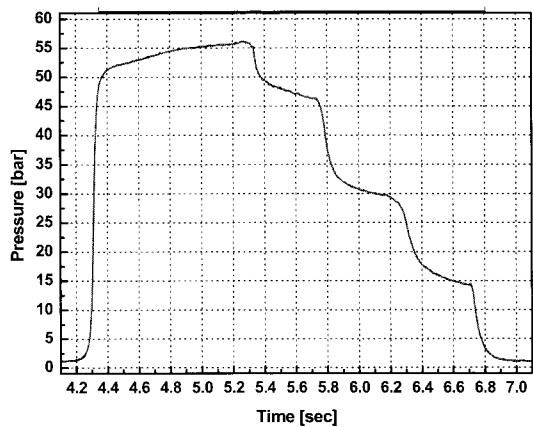


그림 3. Pressure in gas generator chamber

그림 4는 시험에 사용된 디퓨저의 형상과 전반적인 치수를 도시하고 있다. 디퓨저의 앞쪽 부분에

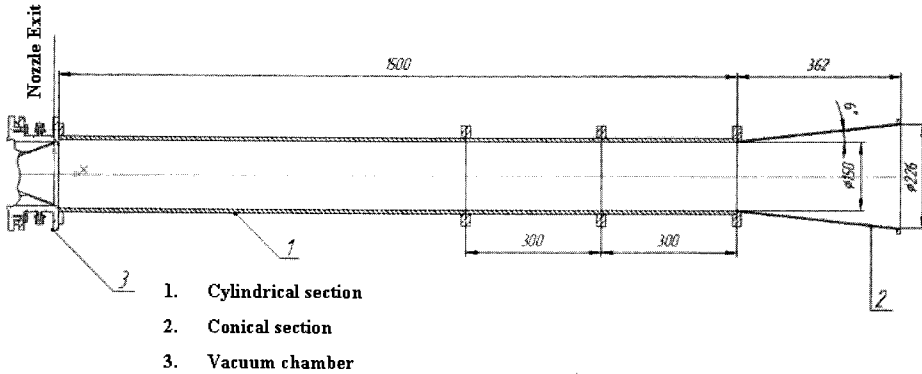


그림 4. Schematic of diffuser for subscale test

는 펠름 냉각방식을 구현 할 수 있는 냉각수 공급 설비가 갖추어져 있으며, 냉각수는 디퓨저 입구 쪽의 플랜지 부분에 환형으로 배치된 분사구를 통해 내부로 분사되게 된다.

연소시간이 길지 않다는 점과 실험 수행 목적 등을 고려하여, 사용된 디퓨저는 일반적인 철펠로 제작되었으며, 채널 냉각방식은 적용하지 않았다.

표 1. Comparison of subscale diffuser dimension for GG test with diffuser for KM test

구 분	축소형	실물형
노즐 목 직경 [mm]	22.5	95
노즐 출구 내경 [mm]	132.82	562
노즐 확장각	20°	20°
디퓨저 실린더부 내경 [mm]	150	639
디퓨저 실린더부 총 길이 [mm]	1500	6390
디퓨저 확장부 출구 내경 [mm]	226	958.5
디퓨저 확장부 길이 [mm]	362	1530
디퓨저 확장부 반각	6°	6°
디퓨저 총 길이 [mm]	1862	7920
실린더부 길이비 $(L/D)_{cil}$	10	10

가스발생기의 노즐부는 실물형 KM과 동일한 형상으로 제작되었으며 노즐목의 직경은 22.5 mm이고 확대 면적비는 35이다. 또한 노즐을 통해 배출

된 고온의 유동이 흐르는 디퓨저의 경우 원통형 부분과 확장형 부분으로 이루어져 있다. 디퓨저의 압력이 대기압으로 회복되는 확장형 부의 반각은 6°이다[4,5].

디퓨저의 실린더 부의 길이는 내경의 10배이며, 디퓨저에 사용된 소재의 두께는 9 mm이고, 확장형 부의 두께는 3 mm이다. 표 1은 실물형과 축소형 디퓨저의 치수를 비교한 것이며, 실물형 디퓨저에 대한 축소비는 4.2:1이다.

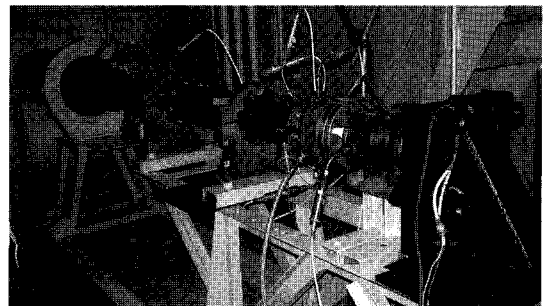


그림 5. Experimental setup for subscale test

그림 5는 실험을 위해 가스발생기와 디퓨저가 조립된 사진이다. 디퓨저의 실린더부는 3개의 영역으로 나뉘어져 있으며 플랜지를 통해 체결하게 된다. 이러한 체결방식은 시험설비에서 각각의 서로 다른 파트들을 체결할 시에 동축 정렬을 보장할 수 있게 한다.

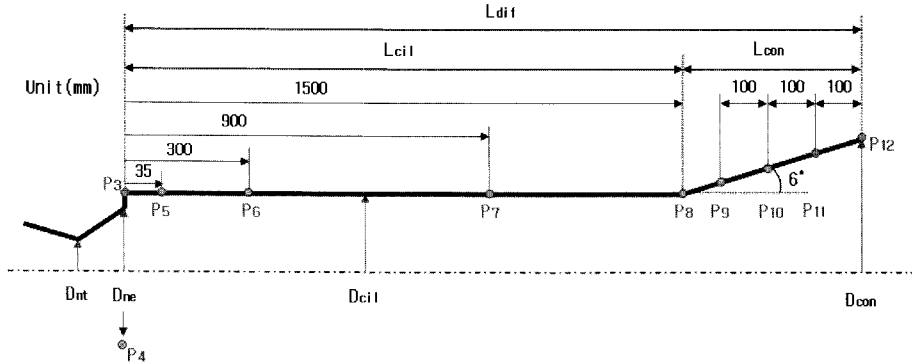


그림 6. Position of pressure sensors

디퓨저 내부에 냉각수 공급을 위한 컬렉터가 설치되어 있으며, 컬렉터와 연결된 플랜지에 48개의 인젝터가 장착되어 있다. 연소실험 시 컬렉터로부터 공급된 냉각수는 가스발생기의 노즐 끝단부터 일정구간까지 분사되어 디퓨저 벽면을 냉각하게 된다. 공급되는 냉각수의 유량은 공급압력이 0.4 MPa 일 때 0~0.5 kg/sec 범위 내에서 유량변경이 가능하도록 되어있다.

디퓨저 내부의 유동특성을 파악하기 위해서 압력센서를 디퓨저의 길이방향으로 설치하였으며, 그 위치는 그림 6과 같다. 압력센서 P3과 P4가 설치된 위치가 진공챔버의 역할을 하게 되며 이곳에서 측정된 압력이 진공챔버 압력을 모사하게 된다. 압력센서 P5는 노즐에서 나온 제트가 디퓨저의 벽면에 부딪치는 영역에 설치되어 있다. 또한 압력이 회복되는 디퓨저의 확장부에도 끝단으로부터 100 mm 간격으로 4개의 압력센서를 부착하였다.

### 3. 시험결과

가스발생기를 이용하여 6회의 고공모사 연소시험을 수행하였으며, 그 실험 조건과 주요 결과는 표 2와 같다. 가스발생기에 장착되는 고체추진제의 총질량은 약 2.5 kg이며, 연소시간은 2.5~3.5초 정도이다. 전체 실험 조건에서 진공챔버 내의 압력은 0.2 bar 이하로 나타났으며, 본 실험을 통해 냉각수

유량조건과는 무관하게 실물형 디퓨저가 성공적으로 작동할 것임을 확인할 수 있었다.

표 2. Test conditions and results of subscale test

Parameter	Test number					
	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Max. Pressure in GG chamber [MPa]	5.51	5.65	5.81	5.65	5.75	4.3
Water injection [kg/sec]	0	0	0.25	0	0.35	0.40
Pressure in vacuum chamber [bar]	0.08 ~ 0.1	0.08 ~ 0.2	0.08 ~ 0.2	0.05 ~ 0.2	0.08 ~ 0.2	0.08 ~ 0.2

그림 7은 디퓨저 내부로 분사되는 냉각수가 없는 경우의 연소실험에서 측정된 가스발생기의 연소실 압력과 진공챔버 압력을 도시한 그림이다. 가스발생기에 두 개의 압력센서(P1, P2)를 장착하여 연소실 압력을 측정하였다. 가스발생기의 연소실 압력은 연소 초기 50 bar 이상으로 형성 되다가, 후반부에 4회의 단계적 하락 후 연소가 종료된다. 그림에서 보는 바와 같이 점화 후 급격한 연소실 압력 증가에 따라 디퓨저는 0.1초 내에 작동하게 되며 진공챔버 압력은 대기압에서 0.05 bar까지 감소하게 된다. 이후 연소실 압력이 약 35 bar까지 낮

아저도 진공챔버 압력은 큰 변동 없이 0.05 bar를 유지하게 된다.

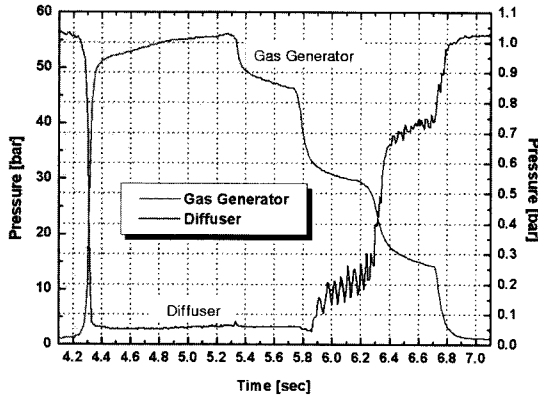


그림 7. Pressure of GG and vacuum chamber (1st subscale test,  $\dot{m}_{inj} = 0$  kg/s)

연소실 압력이 더 낮아지면 진공챔버 압력이 변동하면서 상승하게 되며, 이후 급격한 상승과 함께 디퓨저의 작동이 정지하게 된다. 연소실 압력 감소에 따라 디퓨저 내부에 발생한 충격파의 위치가 노즐 쪽으로 이동하며 진공챔버의 압력상승과 변동을 유발하는 것으로 생각된다. 실험결과로부터 가스발생기의 연소실 압력이 30 bar 이하로 낮아지는 연소 후반부까지 디퓨저가 정상적으로 작동하는 것을 확인하였다.

그림 8은 냉각수 분사가 없는 경우의 디퓨저 내부 압력을 나타내며 액체로켓을 이용한 연소실험에서 측정된 디퓨저 압력과 그 경향이 유사함을 알 수 있다. 디퓨저 내부의 압력은 후류 영역으로 갈수록 상승하며 디퓨저 출구 면에서는 대기압으로 회복되는 것을 확인할 수 있다. P5 센서에서 측정된 압력이 이보다 후단에서 측정된 압력(P6, P7)보다 높은 것은 이곳이 연소실을 나온 제트가 처음으로 디퓨저 벽면에 부딪히는 영역이기 때문으로 판단된다.

확장부가 시작되는 곳에서 측정한 압력(P8)의 경우 그 변동이 매우 큰데, 이는 디퓨저 내부에 형성된 충격파 시스템의 디퓨저 종방향 변동으로 인해 나타나는 현상으로 판단된다.

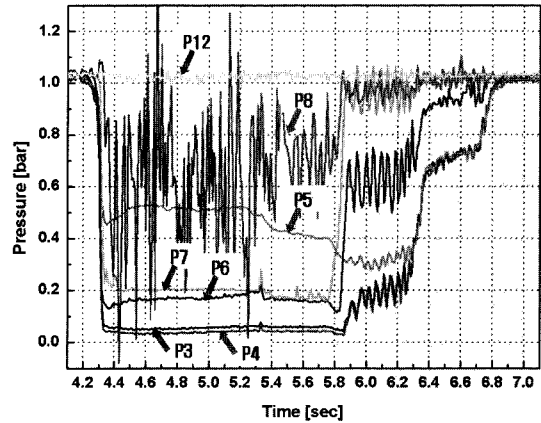


그림 8. Pressure along the diffuser wall (1st subscale test,  $\dot{m}_{inj} = 0$  kg/s)

그림 9와 그림 10은 디퓨저 내부로 분사되는 냉각수 유량이 0.25 kg/s인 경우의 연소실 압력과 디퓨저 내부 압력을 각각 나타낸다.

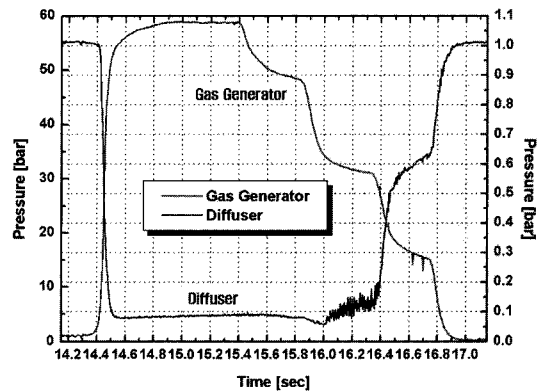


그림 9. Pressure of GG and vacuum chamber (3rd subscale test,  $\dot{m}_{inj} = 0.25$  kg/s)

그림에서 보는 바와 같이 냉각수를 디퓨저 내부로 분사하는 경우, 시간에 따른 디퓨저 내부의 압력 변동은 냉각수가 없는 경우와 동일한 경향을 보이나 진공 챔버의 압력은 냉각수가 없는 경우에 비해 높아진다. 그러나 그 상승값과 센서의 정밀도 등을 고려할 때 냉각수 유량의 차이가 정상상태의 진공챔버 압력에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

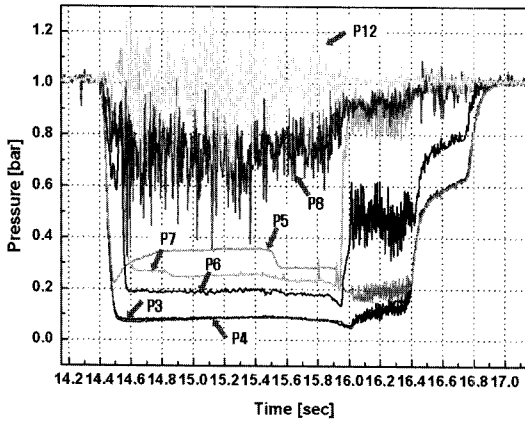


그림 10. Pressure along the diffuser wall  
(3rd subscale test, minj = 0.25 kg/s)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 디퓨저 보호를 위해 내부로 분사되는 냉각수의 영향을 파악하기 위해, 고체 추진제를 연료로 하는 가스발생기를 이용하여 축소형 고공환경모사 시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 디퓨저 내부로 분사되는 유량 조건에 무관하게 디퓨저가 작동하고, 일정 압력 이하의 진공챔버압이 형성됨을 확인하였다. 이로부터 실물형 디퓨저가 성공적으로 작동할 것임을 확인할 수 있었다. 또한 냉각수 분사가 진공챔버 압력에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Annamalai, K. Visvanathan, V. Sriramulu and K. A. Bhaskaran, "Evaluation of the Performance of Supersonic Exhaust Diffuser Using Scaled Down Models," *Experimental Thermal and Fluid Science* 17, 1998, pp. 217-229.
2. 이양석, 양재준, 고영성, 김유, 오승협, 김용욱, "고공환경 모사용 디퓨저 설계에 관한 실험적 연구", 제8회 우주발사체기술 심포지움, 2007,

pp. 21~27.

3. 윤상규, 김진곤, 성홍계, 김용욱, 오승협, "고고도 모사용 초음속 디퓨저의 설계인자 및 작동인자에 대한 연구", 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2007, pp. 303~306.
4. V. V. Mironov, V. N. Sivenkov, I. N. Gurina, N. A. Davydenko, "Analysis and Provisional Designing of Exhaust Diffuser for Testing of SRM Developed by KARI for KSLV," Keldysh Research Center, 2006.
5. 조인현, 이원복, 김영목, 조광래, "KSLV-I 킷모터 설계 및 시험", 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, 2007.