

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.5.091>

75톤급 액체로켓엔진용 가스발생기 후연소 시험설비 인증시험 결과

김채형^{a,*} · 이광진^a · 한영민^a · 정용갑^b

Certification Test Result of After-burner Test Facility for Gas-generator of 75 tonf Class Liquid Rocket Engine

Chae-Hyoung Kim^{a,*} · Kwang-Jin Lee^a · Yeoungmin Han^a · Yonggahp Chung^b

^aEngine Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

^bLaunch Propulsion Control Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: avalonkc@kari.re.kr

ABSTRACT

After-burner test facility for gas generators of 75 tonf class liquid rocket engines was designed, which was verified by the facility certification test of the Combustion Chamber Test Facility(CCTF). The purpose of the certification test of the after-burner test facility is to verify the combustion stability of gas torches equipped in the gas generator and the after-burner test facility by using methane and oxygen gases. In the case of the autonomous test, the supply system provided steadily methane and oxygen gases to the after-burner system without pressure drop. The combustion pressure of the gas torch approached the design requirement. In the case of the coupled test, the gas generator ignition and the fuel-rich exhaust gas combustion were successfully carried out, leading to the verification of the test facility.

초 록

75톤급 액체로켓엔진용 가스발생기 후연소 시스템 설비를 제작하였으며, 연소기 연소시험설비 시험장에서의 설비인증 시험을 통해 그 성능을 확인하였다. 후연소 설비인증 시험은 메탄과 산소의 공급 성능, 가스발생기와 후연소 설비에 설치된 가스토치의 안정적인 연소 능력을 검증하는데 있다. 단독성능 시험에서 공급시스템은 감압 없이 일정한 압력으로 메탄과 산소를 공급했으며, 가스 토치 압력은 설계조건을 만족하였다. 가스발생기 점화용 가스토치와의 연계시험에서 가스발생기 점화 성능과 연료 과농 배기가스의 후연소 성능에 관한 인증 시험을 성공적으로 수행하였다.

Key Words: Gas-generator(가스 발생기), After-burner Test Facility(후연소 시험설비), Gas Torch(가스 토치), Combustion Chamber Test Facility(연소기 연소시험 설비)

Received 2 June 2015 / Revised 10 September 2015 / Accepted 14 September 2015

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 춘계학술대회(2015. 5. 28-29,

부산 해운대 그랜드호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

한국항공우주연구원 한국형발사체사업본부는

나로호(KSLV-1) 발사성공 이후 한국형발사체(KSLV-II) 개발을 진행하고 있다. 한국형발사체는 1.5톤급 실용위성을 고도 600-800 km에 올릴 수 있는 발사체로 1단은 75톤급 액체로켓엔진 4기 클러스터링, 2단은 75톤급 액체로켓엔진 1기, 3단은 5-10톤급 액체로켓엔진 1기로 구성되어 있다. 각 단의 하위부품인 가스발생기, 터보펌프, 연소기, 엔진 등은 한국형발사체사업본부가 국내 기술로 개발 중이며, 개발된 시제품을 테스트하고 성능을 검증하기 위한 시험설비들이 고흥 나로우주센터에 구축 중이다[1].

가스발생기는 터보펌프를 가동시키기 위한 장치로 케로신-액체산소를 추진제로 사용하며 연료과농으로 연소온도를 낮추어 터보펌프의 열적 부하를 줄인다. 이때 발생하는 연료과농 배기가스는 외부로 배출하는 오픈 사이클 시스템으로 시험설비에서는 환경오염 등의 이유로 배기가스를 연소시키는 설비가 추가로 필요하게 된다. 가스발생기 후단 배관부터 후연소 설비의 주요 구성은 JAXA의 후연소 설비[2]를 참고하여 선행연구 결과[3,4]를 통하여 개선하여 설계되었다.

엔진 하위부품 시험설비(터보펌프 실매질 시험설비, 연소기 연소시험설비)에 대한 인증 시험은 2014년에 완료 되었으며, 본 논문에서는 75톤급 액체로켓엔진의 하위부품인 연소기와 가스발생기를 시험할 수 있는 연소시험설비(CCTF, Combustion Chamber Test Facility)의 후연소 설비에 대한 인증시험결과를 기술하고자 한다.

2. 후연소 시험설비

2.1 후연소 시스템 유공압 시스템

후연소 시스템의 가스 공급 시스템은 Fig. 1의 개념도처럼 상용 가스용기에서 가스(메탄, 산소 가스)를 헤드에 모아서 SVU(Switching Valve Unit)을 통해 각각 MDR(Methane Delivery Rack)과 ODR(Oxygen Delivery Rack)이라는 공급 유량 조절 패널을 통해 메탄과 산소를 일정한 압력으로 공급하게 된다. 가스 공급실에 설치된 MDR과 ODR 패널은 Fig. 2와 같다. MDR과

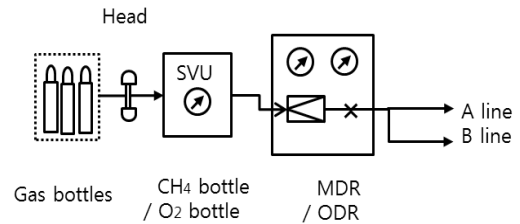


Fig. 1 Flow regulator panel scheme.



Fig. 2 MDR (left) and ODR (right) panels.

ODR에 설치되는 레귤레이터의 초기 설계에서는 전단압력 120 barg에서 40 barg까지 범위에서 유량계수 $C_v = 2.0$ 레귤레이터를 사용하여 후단 압력이 20 barg로 감압 되도록 설계하였다[5]. MDR과 ODR이 공급하는 가스 유량은 후연소 설비의 점화 토치 6개와 가스발생기 점화 토치 1개의 유량을 안정적으로 공급할 수 있도록 Eq. 1의 유량 계산식을 통해 Table 1과 같이 초기 유량을 설정하였다.

$$C_v = \frac{Q \times 2 \sqrt{S_g}}{P_1} \quad (1)$$

여기서, Q 는 유량, C_v 는 레귤레이터 유량계수, P_1 은 입구압력, S_g 는 기체 비중이다.

2.2 가스토치 점화기

가스 토치 형상은 Fig. 3과 같다. 재질은 동

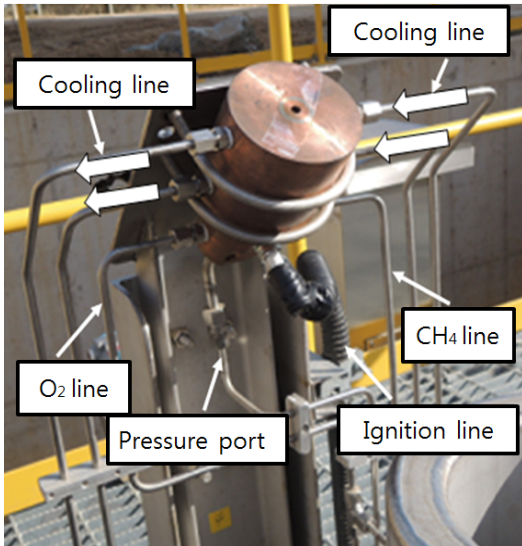


Fig. 3 Gas torch.

Table 1. Flow rate condition.

		Flow rate [g/s]	Orifice size [mm]
MDR		14.9	2.6
ODR		34.3	3.6
After-burner gas torch	CH ₄	2.3	1.5
	O ₂	5.3	1.9
Gas-generator gas torch	CH ₄	1.1	1.0
	O ₂	2.5	1.3

(copper)으로 되어 있으며, 전체적으로 부피를 늘려 heat sink 역할을 하도록 하였으며, 물냉각 방식으로 특히 고온에 노출이 되는 연소부와 분사구 부분은 지속적인 냉각이 되도록 하였다. 메탄과 산소는 충돌형 분사방식으로 분사되어 혼합된 가스는 점화플러그로 점화한다. 선행 연구 자료[3]를 참고하여 연소부에서 화염은 확산되어 6 mm 노즐을 통해 화염이 분사되는 방식으로 연소압력은 4 barg, 당량비는 1.7로 설계범위를 잡았다. 가스 토치로 유입되는 산소와 메탄은 1/4" 라인 전단에 오리피스를 설치하여 가스 토치로 유입되는 메탄과 산소 유량을 Table 1과

같이 산소는 5.3 g/s, 메탄은 2.3 g/s로 설정하였다.

가스토치는 Fig. 3과 같이 지지판에 U-bolt로 고정되어 있으며, 가스토치의 제트 화염이 가스 발생기 배기 노즐 지름(D)의 2배(2D)되는 지점에서 점화가 되도록 설계하였다. 배기가스의 화염 시작 위치가 후연소 설비의 배관이나 센서에 영향을 주지 않는 위치를 고려했으며, 부상화염으로 화염이 불안정하거나 점화가 되지 않을 경우를 고려하여 ±1D로 위아래 이동이 되도록 하였다.

2.3 후연소 시험설비

후연소 시험설비는 Fig. 4와 같이 구성되어 있다. 가스발생기에서 분기된 14" 배관배관은 물냉각이 되도록 하기 위해 냉각수 수조에 담겨 있으며, 수조 밖으로 노출된 18개의 6" 배관은 3개씩 6개 부분으로 구성되어 있으며, 후연소 화염에 노출되는 배관은 냉각수를 통해 냉각된다. 3개의 배출 배관 가운데에 가스토치가 하나씩 위치하여 배기가스를 점화한다. 중앙 제어시스템을 통해 자동으로 메탄과 산소는 가스토치로 공급되어 점화되며, 공급 배관의 압력과 연소압력 등의 계측과 CCTV 카메라 영상을 통해 실시간으로 모니터링을 하게 된다. 가스토치의 작동 종류는 메탄과 산소의 공급 라인을 자동밸브를 통해 잠그며, 질소 퍼지를 통해 배관에 남아있는 메탄과 산소를 외부로 내보내게 된다.

연소기 연소시험설비에서 후연소 시험설비의 유공압 라인 구성은 Fig. 5와 같다. 가스 발생기에서 발생된 연료과농 배기가스는 14" 배관(A line과 B line)을 따라 이동되며 후연소 시험설비에서 내경 6"의 18개의 배관으로 분기된다. 메탄과 산소 라인(1/2")은 배기가스 라인을 따라 가스발생기 점화기(A line)까지 약 60 m, 후연소 시험설비(B line)까지 약 40 m로 메탄/산소 공급실과 가스토치 점화기까지 상당한 거리로 떨어져 있다. 따라서 배관 길이, 밸브류 등에 따른 압력 손실을 고려하여 실험에 요구되는 유량과 압력을 맞추기 위해서 여러 번의 개별 선행 시험이 요구된다.

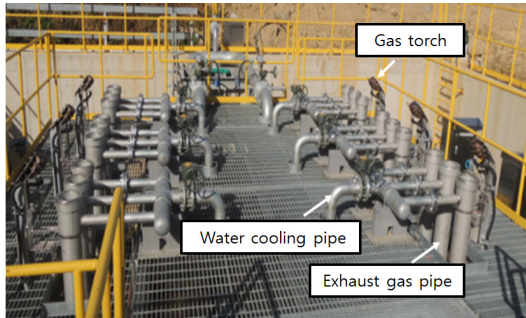


Fig. 4 After-burner facility.

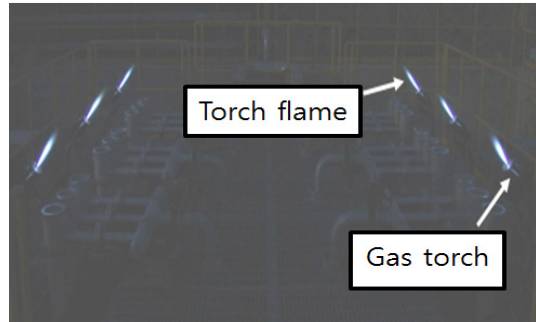


Fig. 6 Flame of the gas torches.

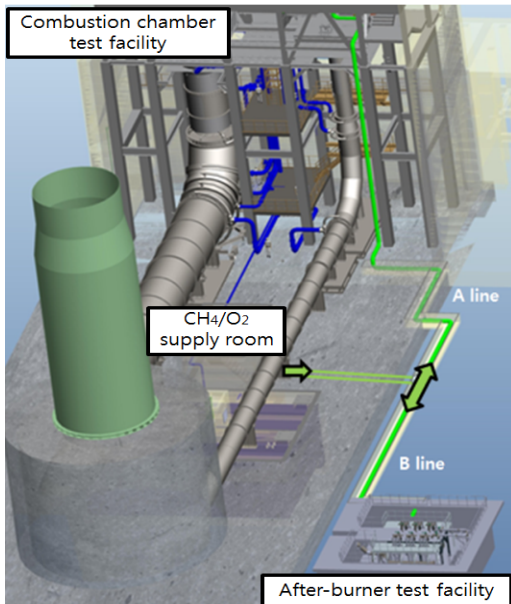


Fig. 5 Gas line scheme in combustion chamber test facility.

3. 시험설비 검증 결과

3.1 설비 검증 사전 준비

MDR과 ODR의 전후단 압력에 대한 실제유량을 검증하기 위해 Micromotion사의 ELITE CMF050 시리즈 모델의 Coriolis 유량계와 1700 Coriolis 트랜스미터를 사용하였다. 측정된 값은 데이터화하여 레귤레이터 진단 압력에 대한 유량을 확인하는 유량 확인표로 사용한다. 한 예로 MDR은 오리피스 2.6 mm를 사용하며 유량 14.9

g/s를 공급하는데 전단 압력은 14.8 barg, 후단 압력은 9.5 barg, 온도는 278 K이다.

가스토치의 점화원인 점화플러그는 외부 환경에 직접적으로 노출되어 있기에 시험 전후에 정상 작동 확인이 요구된다. 점검사항은 제어·계측 라인, 변압기, 전원 상태, 점화플러그의 방전 유무 상태와 각 센서들의 정상 작동여부이다.

3.2 후연소 시험설비 단독시험결과

가스토치의 화염이 육안으로 잘 보이도록 후연소 시험설비 검증시험은 저녁시간에 수행하였다. Fig. 6과 같이 6개의 가스토치에서 균일한 푸른색의 제트화염이 형성되는 것을 볼 수 있으며, 가스토치의 설치 위치는 Fig. 4와 동일하다.

가스토치의 연소압력분포는 Fig. 7과 같다. 6개의 가스토치들은 35초 동안 연소가 진행되었으며, 점화 시작 후 일정한 압력으로 유지되는데 약 10초의 시간이 걸리는 것을 볼 수 있다. 이는 후연소 시험을 할 경우 화염으로부터 압력센서를 보호하기 위해 약 20 m정도 압력 라인(1/4")의 길이 때문에 생기는 지연시간이다. 6개의 가스토치는 전반적으로 4 barg에서 유지되는 것을 볼 수 있다. 가스토치의 연소 조건은 Table 2와 같이 당량비 (ER) 1.7, 전체 질유량(total mass)은 7.7 g/s 으로 6개의 가스토치가 비슷한 경향성을 보인다. 연료과농 배기가스를 점화하기 위해 높은 열량이 필요하며, 연소압 4 barg 로 테스트한 후 가스 토치를 육안확인 했을 경우 가스토치의 외부 상태는 특이 사항 (크랙, 누수, 녹음) 없이 양호하였다.

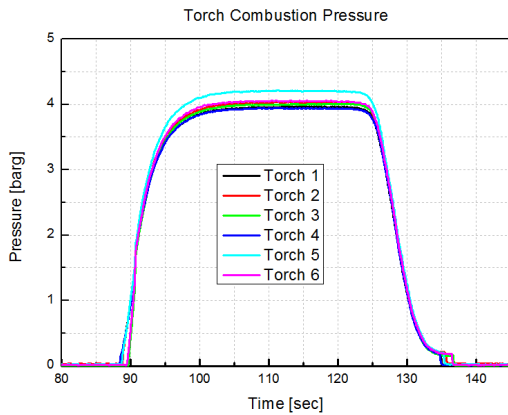


Fig. 7 Gas torch combustion pressure distribution.

Table 2. Gas torch working condition.

	Torch 1	Torch 2	Torch 3	Torch 4	Torch 5	Torch 6
Combustion pressure [barg]	3.95	4.03	3.99	3.94	4.21	4.05
ER	1.69	1.68	1.68	1.68	1.69	1.7
Total mass	7.68	7.67	7.66	7.67	7.67	7.69

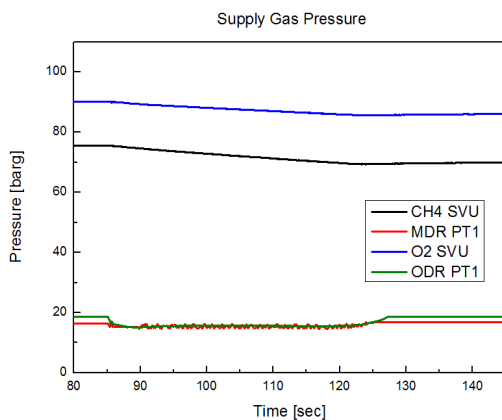


Fig. 8 Gas supply pressure distribution.

MDR과 ODR의 공급성능은 Fig. 8과 같다. 메탄(CH₄ SVU)과 산소(O₂ SVU)의 공급압력이 감소하여도 MDR과 ODR 레귤레이터 후단의 메탄

과 산소 압력(PT1)은 증감 없이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 설비 검증에서 MDR은 메탄 14.02 g/s를 지속적으로 공급하며, ODR은 산소 36.6 g/s를 지속적으로 공급하였다.

3.3 후연소 시험설비 연계시험결과

메탄과 산소 공급실에서 60 m 떨어진 75톤 가스발생기 점화 가스토치는 약 4 barg의 연소압을 요구한다. 엔진에 장착되어 시동되는 가스발생기의 점화원은 발화점화기(Pyro-igniter)이지만, 개발 시험에서는 시험 비용과 연속적인 개발시험을 위해 가스토치를 사용하였다. 개발팀에서 축소형 개발 시험을 통해 가스발생기의 점화 압력을 4 barg로 요구조건을 주며, 시험설비 인증 시험에서는 이를 맞추기 위해 선행 시험과 설비 수정작업이 수행된다.

공급설비(MDR, ODR)의 공급유량이 제한되어 있는 조건에서 후연소 시험설비 가스토치 6개에서 사용되는 유량을 줄여 가스발생기 점화 가스토치로 공급되는 유량을 증가시키는 수정작업이 수행되었다. 가스발생기 점화용 가스토치와 후연소 시험설비 가스토치의 설계 요구조건은 연소압 약 4 barg를 만족해야 한다. 메탄과 산소의 오리피스 사이즈를 변경하면서 요구조건을 만족할 때까지 검증시험을 수행했다. 그 결과 후연소 시험설비 가스토치의 메탄 라인 오리피스는 1.5 mm에서 1.2 mm로, 산소 라인 오리피스는 1.9 mm에서 1.7 mm로 변경되었다.

후연소 시험설비 연계시험 시험절차는 후연소 시험설비 가스토치가 점화되어 작동되는 동안 가스발생기에 장착된 점화 가스토치가 약 4초 동안 작동하여 가스발생기를 점화시킨다. 가스발생기가 정상 작동되어 배기되는 연료과농 배기가스는 후연소 시험설비에서 연소된다. 가스발생기 연소가 종료되면, 가스발생기 내부로 질소 퍼지를 하며 배관 내의 연료 과농 배기가스는 질소 퍼지를 통해 후연소 시험설비쪽으로 배출된다. 후연소 시험설비의 가스토치는 배기되는 연료과농 배기가스를 모두 연소시킬 때까지 작동한다.

가스발생기와 후연소 시험설비 가스토치 연계

시험 압력결과는 Fig. 9와 같다. 후연소 시험설비 가스토치는 약 4.5 barg로 5개의 토치가 안정적인 연소 압력을 보인다. 토치 1(Torch 1)의 경우 점화플러그가 방전되어 연소가 이루어지지 않았다. 가스발생기 점화 가스토치는 가스발생기와 직접 연결되어 있으며, 가스발생기의 퍼지 압력으로 인해 가스토치 점화전에 압력이 약 0.5 barg인 상태에서 가스토치가 점화되면서 약 3.4 barg가 된다. 가스토치의 제트화염은 가스발생기를 점화시키며 가스발생기 연소압력은 약 47 barg로 유지되며, 이 압력은 가스토치의 압력센서에도 전달된다. 압력데이터에서 가스발생기가 작동하는 동안 후연소 시험설비쪽 가스토치들이 정상적인 압력값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 가스발생기의 연소가 종료된 뒤 약 10초 뒤에 후연소 시험설비쪽 가스토치는 작동 종료된다.

가스발생기의 연료과농 배기가스는 Fig. 5의 라인 경로(A+B line)를 따라 후연소 시험설비로 이동하게 된다. 배관 출구부에서 6개의 토치에 의해 연료과농 배기가스는 2차 점화가 된다. 점화 사진은 Fig. 10과 같다. 인증시험에서는 6개의 가스토치 중에서 5개만 작동했지만, 화염이 확산되면서 가스토치가 작동하지 않은 배관에서의 배기가스도 추가로 연소가 되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

나로우주센터의 연소기 연소시험설비에서는 75톤급 액체로켓엔진의 하위부품인 연소기와 가스 발생기 시험이 이루어지고 있다. 여기서 가스 발생기에서 배출되는 연료과농 배기가스를 연소시키는 후연소 시험설비의 개발 제작과 설비 인증시험에 대한 결과를 본 논문에 제시하였다. 가스토치 설치위치에서 원거리에 위치한 메탄, 산소 공급 시스템의 유량 공급 능력과 후연소 시험설비의 가스토치의 연소 성능에 대한 단독 설비 인증을 수행했으며, 설계집대로 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 가스발생기가 정상적으로 작동하는 상태에서 수행된 연계 성능 시험

에서 후연소 시험설비에서의 연료과농 배기가스의 연소 시험도 정상적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

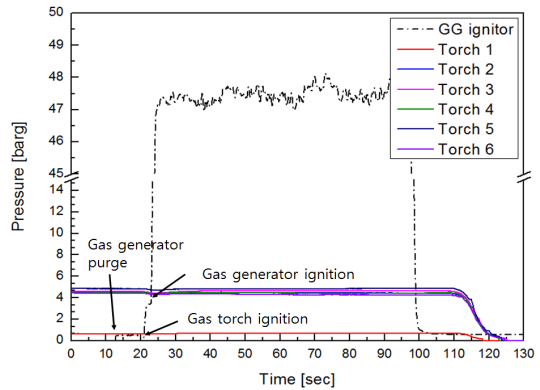


Fig. 9 Pressure comparison of gas torches.

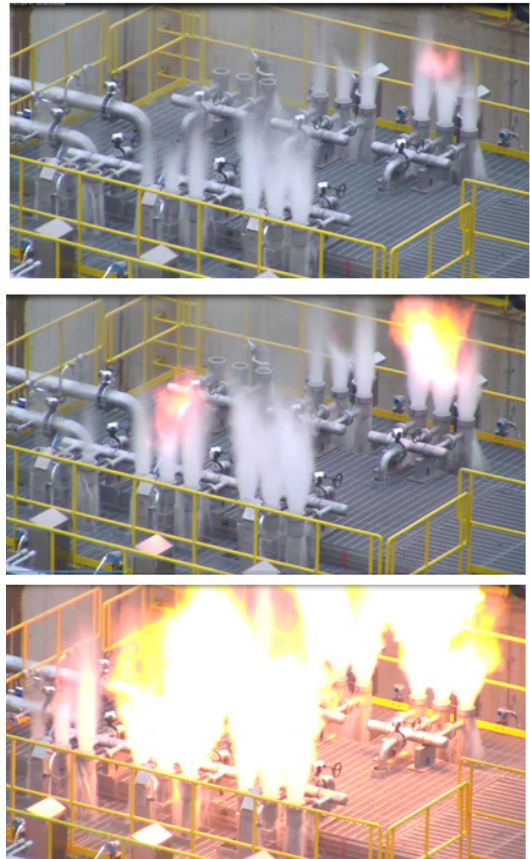


Fig. 10 After-burner flame.

References

1. Han, Y.M., Cho, N.K., Chung, Y.G., Kim, S.H., Yu, B.I., Lee, K.J., Kim, J.S. and Kim, J., "Construction State of Combustion Chamber and Turbopump Test Facilities for KSLV-II," *Proceedings of the 2013 KSPE Spring Conference*, Pusan, Korea, pp. 405-409, May 2013.
2. Yoshiaki, W., Satoshi, H., Hitoshi, Y., Kenjiro, K. and Shinya, I., "Turbine Drive System of High-Pressure Liquid Oxygen Turbopump Test Facility," *35th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Los Angeles, C.A., USA, AIAA 99-2345, June 1999.
3. Kim, M., Lim, B., Kang, D., Ahn, K., Kim, J.G. and Choi, H.S., "Hot-firing Tests of Afterburning Device for a Gas Generator," *Proceedings of the 2011 KSPE Spring Conference*, Uiwang, Korea, pp. 79-82, April 2011.
4. Lim, B., Kim, M., Kim, H.J., Kang, D., Kim, J.G. and Choi, H.S., "Combustion Tests of the Gas Generator Development Models of a 75 tonf-class Liquid Rocket Engine," *Proceedings of the 2014 KSPE Spring Conference*, Seoul, Korea, pp. 428-431, May 2014.
5. Wang, S., Lee, K.J., Cehung Y.G. and Han, Y.M., "Modeling and Simulation of O₂/CH₄ Gas Supply System of Afterburner for Fuel-rich Gas of Gas Generator," *Journal of Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 86-92, 2014.