

액체질소를 이용한 액체 로켓 엔진 연소 가스 냉각 특성 연구

전준수* · 이양석* · 송재강* · 김유** · 고영성**

A Study on Cooling Characteristics of Combustion Gas by Liquid Nitrogen in a Liquid Rocket Engine

Junsu Jeon* · Yangsuk Lee* · Jaekang Song* · Yoo Kim** · Youngsung Ko**

ABSTRACT

In this study, cooling characteristics of combustion gas were investigated by injecting liquid nitrogen into liquid rocket combustion chamber. A injection ring of liquid nitrogen was installed between a combustion chamber and a mixing chamber which was designed for mixing of combustion gas and nitrogen. At first, a ignition test of liquid rocket engine was conducted to verify a stable combustion process and 10 second combustion tests were successfully conducted. The results showed that combustion gas of LRE could be cooled by using liquid nitrogen.

초 록

본 연구에서는 액체로켓엔진의 연소 가스에 액체 질소를 혼합하여 연소 가스의 냉각 특성을 알아보고자 하였다. 이를 위해 기존에 사용되던 액체로켓 연소실 후단에 액체 질소 분사용 분사기를 설계/제작하여 장착하였으며, 두 가스의 혼합 가스의 안정화를 위한 연소실과 노즐을 질소 분사링 뒤에 장착하였다. 액체질소 분사에 의한 상류 점화/연소 상태의 영향을 살펴보기 위한 점화 시험이 먼저 수행되었으며, 이후 10초 연소 실험을 성공적으로 수행하였다. 따라서 기존의 액체로켓엔진에 액체질소를 분사함으로써, 연소 가스의 온도를 저하시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Combustion Gas(연소 가스), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Liquid Nitrogen(액체 질소)

1. 서 론

일반적으로 램/스크램제트엔진과 같은 차세대 항공추진기관에는 실제 비행조건을 모사하기 위한 대용량의 공기공급원 뿐만 아니라 고온의 연소기 입구 조건을 모사하기 위한 고온 공기 공

* 충남대학교 항공우주공학과

** 충남대학교

연락처, E-mail : ysko5@cnu.ac.kr

급원이 필요하다. 따라서 이러한 추진기관의 지상 시험 설비에는 고온의 공기를 생성하기 위해서 대형 열교환기, 전기식 히터나 유동혼합식 가열기(vitiation heater) 등이 사용된다[1]. 전기식 히터나 열교환 방식의 경우, 공기 유량이 많아질 경우 설비 비용 및 운영비가 기하급수적으로 증가하게 되어, 대형 설비에는 유동혼합식 가열 방식이 많이 사용된다[1]. 그러나 이러한 설비들은 모두 대형 설비에 속하여, 학교에서는 관련 시험 설비를 구축하는데 무리가 있어, 국내에는 이러한 시험 설비를 구축하고 있는 학교가 전무한 상태이다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법으로 액체로켓엔진 내부에 액체질소와 액체산소를 주입하여 고온의 공기를 생성하는 방식이 일부 국가에서 사용되고 있다. 이 방식은 기존과 같이 기체상태의 공기를 이용하지 않고, 액체 상태의 질소와 산소를 주입하기 때문에 공급 배관의 크기를 상당히 축소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구팀은 기존에 구축된 액체로켓연소시험 설비를 보유하고 있기 때문에, 액체 질소와 액체 산소 공급 시험 설비만을 추가로 구축한다면 이러한 방식의 고온/고압 공기 공급원을 구축할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 고온/고압 공기 공급 시험 설비 개발의 첫 단계로, 액체로켓엔진 내부에 액체질소를 주입하여 연소가스와 액체질소를 혼합함으로써 연소가스의 온도를 조절하는 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에서 고온의 혼합 가스를 발생시키기 위해 제작된 시험 리그는 Fig. 1과 같으며, 기존의 액체로켓 연소기(인젝터헤드, 연소실, 노즐)에 액체질소 분사링(LN₂ injection ring), 혼합실 및 혼합가스 온도 측정부가 추가적으로 제작/설치되었다. 액체질소 분사링은 두 개의 입구에서 액체 질소가 유입되어 액체 질소 분사기내에 매니

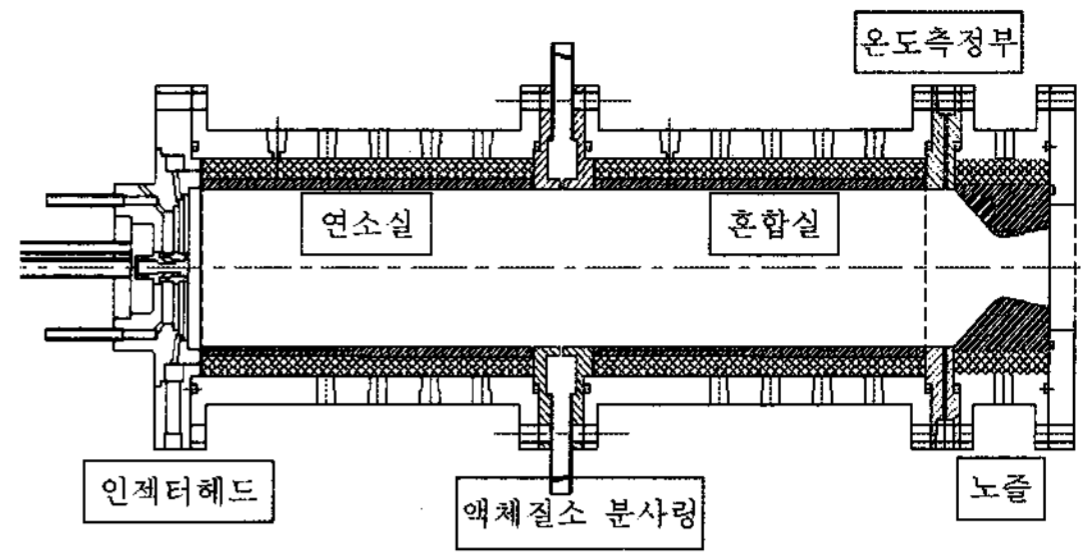
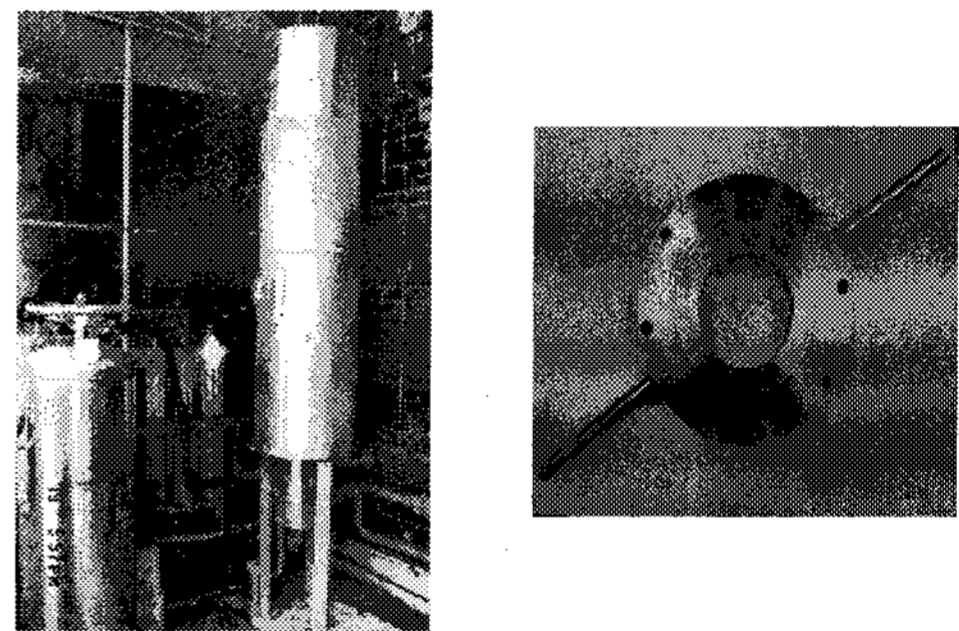


Fig. 1 Schematic diagram of a test rig



(a) LN₂ run tank (b) LN₂ injection ring

Fig. 2 LN₂ feed equipment

폴드를 거쳐 직경 2mm의 8개 홀로 각각 일정한 유량이 나올 수 있도록 하였다. 액체질소 분사구는 분사형 인젝터로 볼 수 있기 때문에, 분사형 인젝터 설계 인자들을 이용하여 설계하였으며, 연소실 중심축 방향으로 수직으로 분사되도록 설계하였다[2]. 혼합가스 온도 측정부는 Fig. 1과 같이 혼합실과 노즐 사이에 설치되었다.

시험 설비는 크게 기존의 액체로켓 연소시험 설비가 기본적으로 사용되었으며, 액체로켓 연소실에 액체 질소를 공급하기 위한 액체질소 공급 시스템이 기존의 액체산소 공급시스템과 유사하게 추가적으로 구축되었다[2]. Figure 2는 추가로 설치된 액체질소 공급 탱크(a)와 제작된 액체질소 분사링(b)을 나타낸 것이다.

Figure 3은 연소 실험대에 장착된 전체 시험 리그의 사진이며, 중간 부분의 액체질소 분사링에 액체질소를 공급하기 위한 액체질소 공급 배관을 확인할 수 있다.

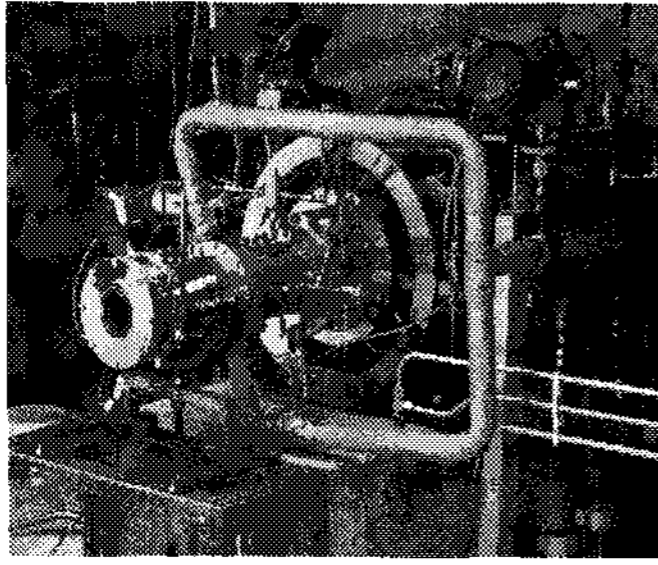


Fig. 3 Photo of a combustion test rig

2.2 실험 방법

연소실에 액체질소를 공급하기 위한 첫 단계로 수류시험을 수행하였으며, 공급되는 액체질소의 유량은 공급 배관에 설치된 캐비테이션 벤츄리(cavitation venturi)의 상류 압력을 이용하여 제어하였다[4].

액체질소의 분사시점이 너무 빠를 경우 점화와 연소 상태의 변화를 야기할 수 있으며, 너무 늦을 경우 액체질소 분사량이나 온도 측정부 등이 고온의 연소가스에 손상이 될 수 있다. 따라서 액체질소 투입 시점을 결정하기 위한 각종 시험이 순차적으로 수행되었다. 먼저 점화 상태에서 액체질소의 분사에 의해 점화 상태가 변화되는지를 확인하였으며, 연소 시작 구간에서의 연소 상태에 영향을 미치는지 파악하기 위한 3초 연소 시험이 수행되었다. 이 시험에서의 액체질소 분사 시점은 종단 밸브 이후의 배관과 매니폴드 부피와 공급 유량을 기준으로 실제 공급 시점을 대략적으로 예측하여 결정되었다. 이를 통해 점화 안정성과 연소 안정성을 확인한 후, 10초 연소 시험을 수행하였다.

최종적으로 결정된 전체 시험의 밸브 작동 절차(cyclogram)는 Fig. 4에 나타낸 바와 같다.

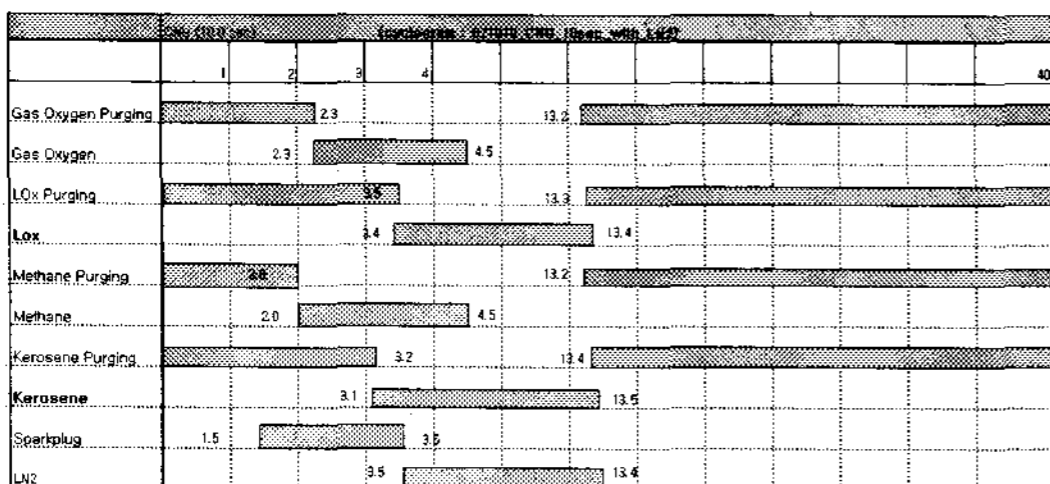
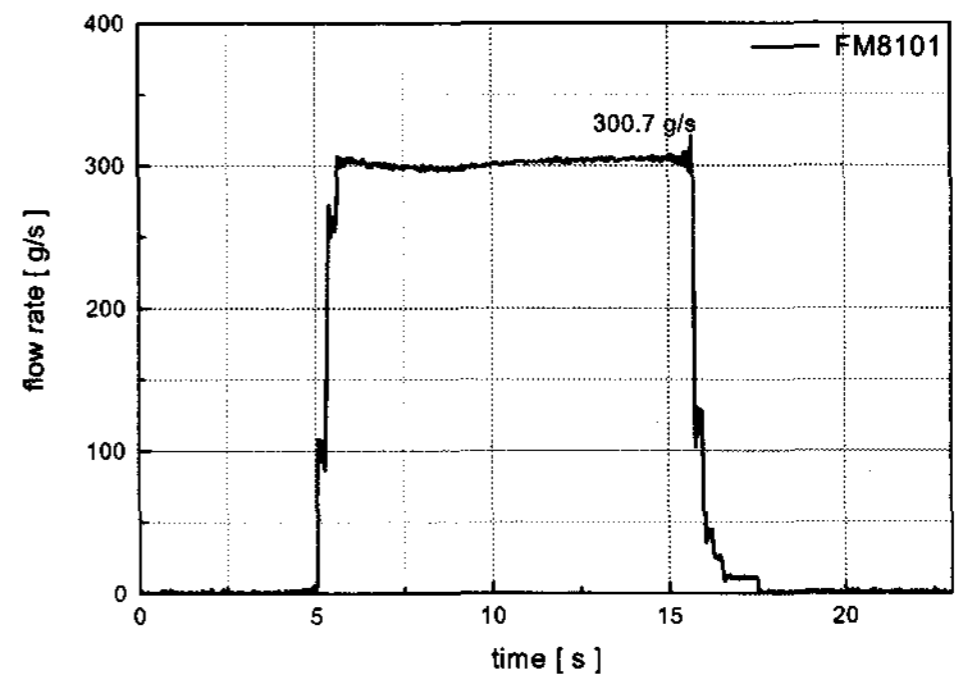


Fig. 4 Cyclogram of auto valves

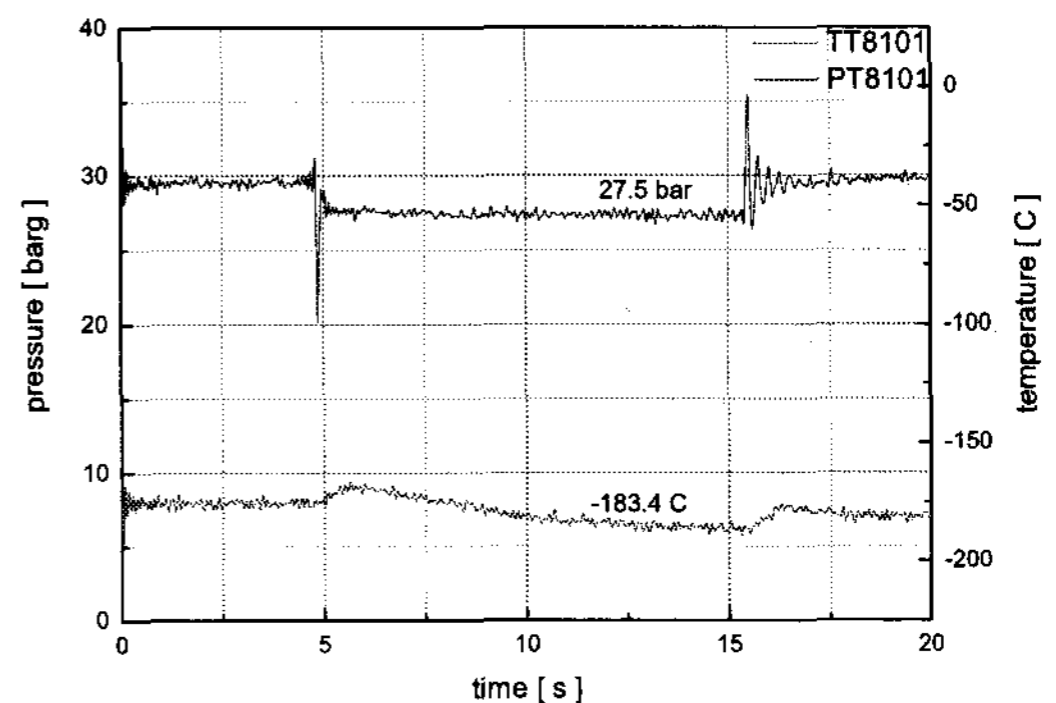
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 LN₂ 수류 실험 결과

먼저 액체질소의 안정적인 공급을 확인하기 위한 수류시험을 수행하였다. 액체 질소 공급 배관과 벤츄리 전후단 및 매니폴드 입구에 각각 압력 센서와 온도 센서를 두어 배관의 압력과 온도를 측정하여 액체 상태를 확인하였고, 터빈 유량계를 이용하여 유량을 확인하였다. Figure 5(a)는 액체질소 공급 유량이며, (b)는 공급 배관의 압력과 온도 측정 결과를 정리한 그래프이다. Figure 5에서 확인 할 수 있듯이 유량은 목표 유량인 300 g/s 가 일정하게 나오는 것을 확인할 수 있으며, 공급 압력이 일정하며 액체 상태로 분사되었음을 확인할 수 있다.



(a) Flow rate of LN₂



(b) LN₂ line Pressure & Temperature

Fig. 5 LN₂ Flow test results

3.2 점화/연소 시험 결과

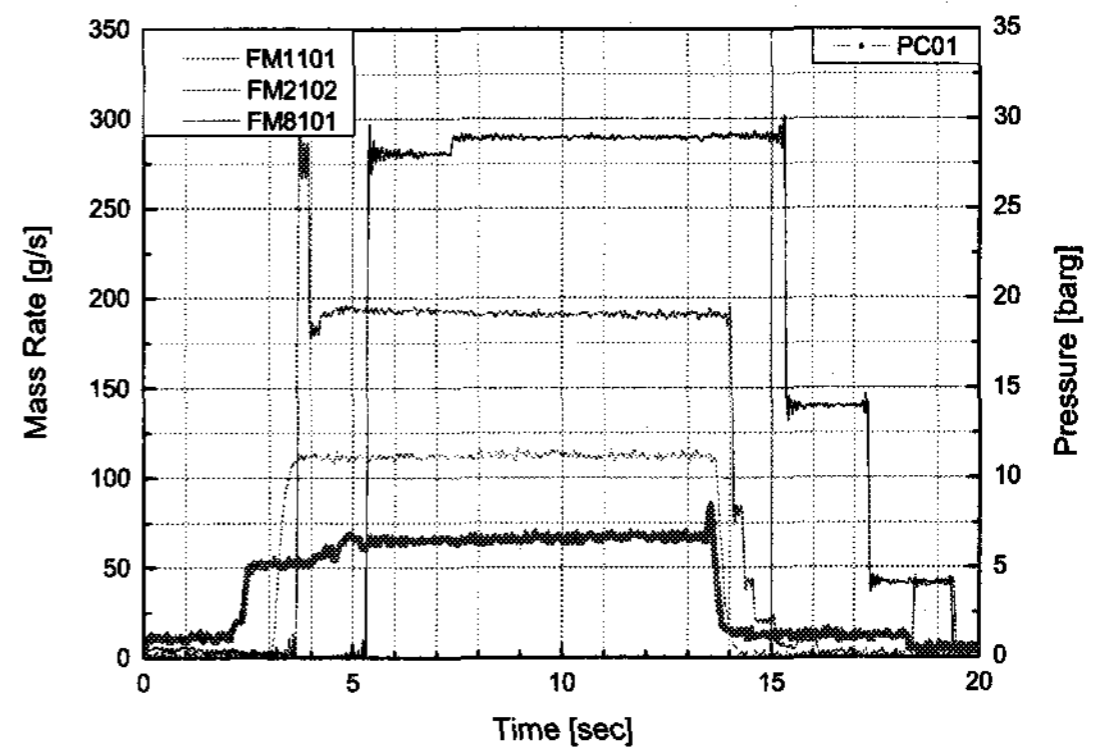
액체질소 분사시 액체질소의 온도가 매우 낮

기 때문에 점화기 쪽의 온도도 매우 낮아져 점화가 안 될 것을 고려하여, 액체산소와 케로신을 공급하지 않은 상태에서 액체 질소를 분사하면서 점화 실험을 수행하였다. 실험 결과 액체 질소 분사시 챔버의 온도가 많이 떨어지긴 하지만 점화 안정성에는 문제가 없는 것을 확인하였다.

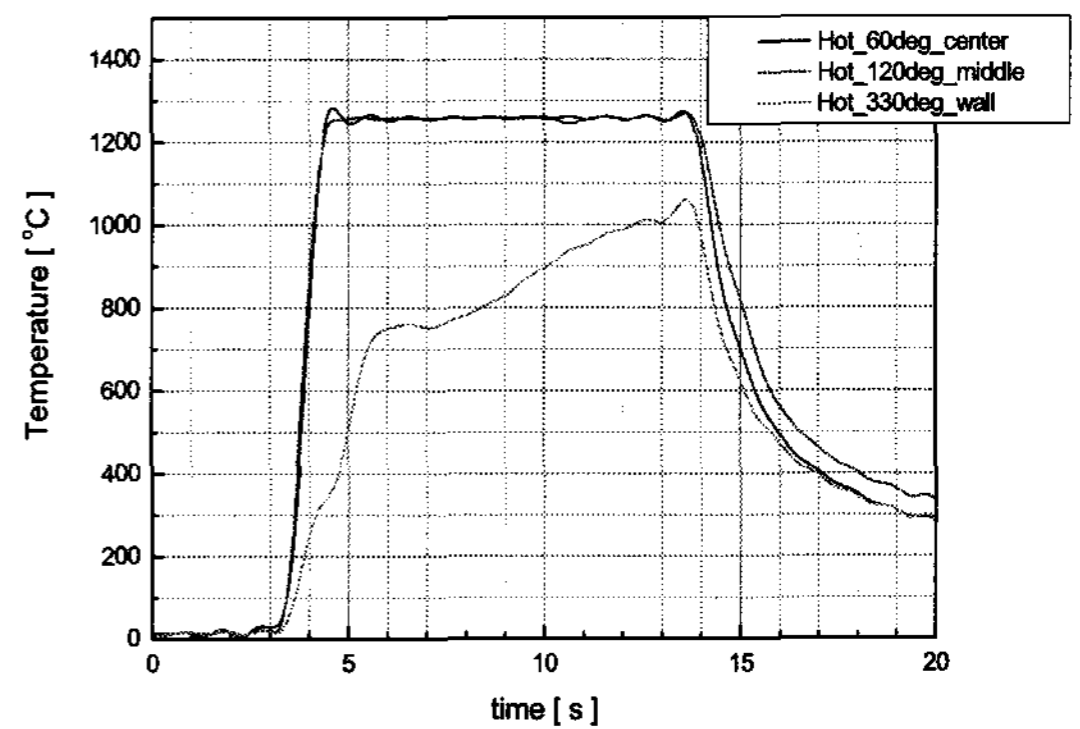
액체 질소의 공급이 주 추진제 연소 초기의 화염 안정화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 미리 결정된 액체질소 공급 시점으로 3초 연소 실험을 수행한 결과 액체산소, 케로신 및 액체질소의 공급이 모두 안정적이었으며 연소실 압력도 정상적으로 상승함을 확인하였다. 이와 같이 점화 및 연소 안정성을 확인 한 후, 이번 연구의 목표인 10초 연소 실험을 수행하였다. Figure 6은 10초 연소 실험에서의 압력 곡선과 혼합실 이후의 혼합 가스의 온도 측정 결과를 나타낸 것이다. Figure 6(a)에서 볼 수 있듯이 연소실 압력이 정상적으로 형성되었으며, Figure 6(b)의 혼합가스 온도에서는 중심축의 온도는 아직 많이 저하되지는 못했으나, 벽면 근처의 온도는 약 1000°C로 많이 냉각되었음을 확인하였다. 혼합실 내부의 온도를 균일하게 만들기 위한 보완 연구가 수행된다면, 향후 고온/고압 공기 공급원 개발에 성공할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 향후 고온/고압 공기공급원으로 사용될 수 있는 시험 설비의 개발의 선행 연구로서, 기존에 사용되던 액체로켓 연소기에 액체질소를 주입하여 연소 실험을 수행하였다. 이와 같이 새로운 개념의 연소기를 개발하기 위하여, 액체 질소 공급 시스템과 장치를 추가 구축하였다. 액체질소 수류시험, 점화 시험 및 3초 연소 시험 등을 통해 최종적으로 10초 연소 실험을 수행함으로써, 새로운 연소 시험 절차 및 기법의 개발에 성공하였다. 이 연소기는 고온 가스의 공급이 필요한 연구에 활용될 수 있으며, 향후 보완 연구를 수행한다면 고온/고압 공기 공급원으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.



(a) Pressure & Flow rate



(b) Hot gas temperature

Fig. 6 Test results of 10s combustion test

참 고 문 헌

1. G.L. Pellett, C. Bruno, and W. Chinitz, "Review of Air Vitiation Effects on Scramjet Ignition and Flameholding Combustion Processes", 38th Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2002-3880, 2002
2. 전준수 외 6인, "연료 인젝터 스웰 챔버 유무에 따른 단일 인젝터 페이스 냉각 특성 연구", 한국추진공학회 춘계학술대회, 2007
3. 도브로볼스키, "액체 로켓 엔진"
4. 박희호 외 3인, "안정적인 액체연료 공급을 위한 Cavitating Venturi의 응용", 한국 항공 우주 학회지, 제30권 1호, 2000, pp. 88~941.