

5MW 발전용 가스터빈 엔진 연소기 성능시험

박부민* · 김형모* · 최영호* · 양수석* · 천무환**

Performance Test of 5MW Gas Turbine Engine Combustor

Poo Min Park, Hyung Mo Kim, Young Ho Choi, Soo Seok Yang, and Mu Hwan chon

ABSTRACT

Performance test of 5MW class gasturbine combustor was carried out at combustor test facility of KARI(Korea Aerospace Research Institute). The combustor is dry low NOx type premixed combustor and fuel is natural gas. The characteristics of combustor were measured including emission, pressure pulsation and exit temperature distribution. Optimum operation point of combustor was found by changing parameters like fuel ratio between pilot and main burner. The test result showed that the combustor performance is sufficient to satisfy the gasturbine system requirement.

Key Words : Gas turbine, Combustor, Low NOx, DLN Combustor

기 호 설 명

FR	Fuel Ratio	α	공기과잉률 (Excess Air Ratio)
DLN	Dry Low NOx		

1. 서 론

본 논문에서는 두산중공업(주)이 개발 중인 발전용 5MW 가스터빈 엔진의 연소기 성능시험 결과에 대해서 서술하였다. 한국항공우주연구원은 이 가스터빈 엔진의 핵심구성품인 압축기, 연소기 및 터빈의 성능시험을 담당하고 있다. 가스터빈 엔진의 연소기는 압축기로부터 공급되는 고온 고압의 기체에 연료를 연소시킴으로써 고 엔탈피의 유체를 발생시켜 터빈으로 공급하는 것을 목적으로 하는 장치이다. 이상적인 브레이튼 사이클에서 연소기는 열교환기로 표시되는 장치이나, 실제로는 작동유체인 공기에 단시간에 대량의 열을 가하는 방법으로는 가장 적절하고 손쉬운 방법인 연소를 이용하여 열을 가하게 된다.

연소기에서 일어나는 연소현상은 유동과 반응이 서로 영향을 주면서 발생하게 된다. 그런데,

연소반응 자체가 아주 강한 비선형성을 가지므로 연소현상을 수치해석과 같은 해석적인 방법으로 예측하기는 힘들다. 때문에 연소기의 개발은 경험에 의한 데이터베이스로부터 기본 형상을 도출한 뒤 시험에 의하여 설계가 대부분 확정된다. 이 과정에서 수치해석은 연소반응이 없는 Cold Flow 상태에서의 유동 분배나 연료의 확산 등을 확인하는데 보조적으로 사용되기도 한다.

가스터빈 연소기의 개발에 필요한 단독 성능시험을 위해서는 가스터빈의 압축기에서 연소기로 공급되는 공기 조건의 모사가 필요하다. 때문에 연소기의 단독 시험을 위해서는 기본적으로 고압·고온(압축기에서의 단열압축에 의한)으로 대량의 공기를 공급해 줄 수 있는 설비가 필요하다. 그러나, 고압으로 대량의 공기를 공급할 수 있는 압축기 및 히터는 설치 및 운전비용이 막대하며, 고압 상태의 연소시험은 연소기의 성능이 아직 확인 되지 않은 개발 초기에 수행하기는 그 자체로 매우 위험하다. 때문에, 개발 초기 시험은 대부분 저압 상사시험에서 이루어진다.

저압 시험을 통해 개발된 연소기의 최종적인 설 조건에서의 성능 확인을 위한 고압 연소시험

* 한국항공우주연구원
 ** 두산중공업(주)
 † 연락처, ppm@kari.re.kr

Table 1 5MW가스터빈용 연소기의 재원

항 목	사 양
연소기 Type	Reverse Can (Multi Can)
연료	천연가스(LNG)
연소효율	99% 이상
저공해 성능	25 ppm이하 @15%O2

은 해외의 고압 시험설비에서 이루어지며, 이때까지의 경험으로부터, 저압 시험이 완료된 연소기는 고압 시험에서 별다른 문제가 발생하지 않는다.

여러개의 연소기가 사용되는 멀티캔 타입이나 애놀러 또는 캐놀러(Can-annular) 연소기를 시험하는 경우, 시험설비의 공기 유량 한계나 시험비용의 문제로 인하여 전체 연소기의 일부분만 시험을 수행하는 경우가 많다.[1] 본 과제에서 개발하고자 하는 연소기는 멀티캔 타입으로 연소기 한 개에 대한 시험만으로도 성능 확인이 충분하며, 설비의 용량 및 시험 비용을 고려하여 단위 단일캔 연소기에 대하여 연소기 시험을 수행한다.

2. 개발 대상 연소기

일반적인 재래식 연소기의 구조는 복잡하지 않지만, 본 개발 과제에 적용하고자 하는 연소기는 저공해형(DLN, Dry Low NOx)의 예혼합형 연소기로 복잡한 프론탈 디바이스(Frontal Device) 구조를 가진다. 시험 대상 연소기는 기존 연소기의 설계 변형을 통해 개발된다. 비록 원형(Prototype)이 있다고 하더라도, 예혼합형 연소기의 특성상 운전 조건의 변화에 성능이 민감하게 변화하므로 시험을 통한 성능검증은 불가피하다. 예혼합형 연소기는 공기와 연료가 반응 전에 완전히 혼합되어 화염대로 공급되는 형식이며, 혼합기는 연료 희박 상태로 만들어진다. 반응 전 혼합기 중의 연료 농도가 균일하므로, 예혼합 상태에서 연소반응이 일어나면 연소후 연소가스의 온도분포는 균일하게 된다. 이때 연료 희박 상태에서 연소반응이 일어나면 단열화염온도(Adiabatic Flame Temperature)가 이론반응비의 경우에 비해 낮아지므로 낮은 화염 온도로 인해 NOx의 생성이 줄어들게 된다. 그러나, 예혼합연소기의 경우, 저 NOx 특성은 뛰어나나 낮은 연소 온도로 인하여 미연연료인 UHC(Unburned Hydro-Carbon) 나 CO가 발생하기 쉬우며 또한 화염의 불안정성에도 취약한 문제가 있어서, 이러한 문제를 해결하도록 설계하는 것이 관건이

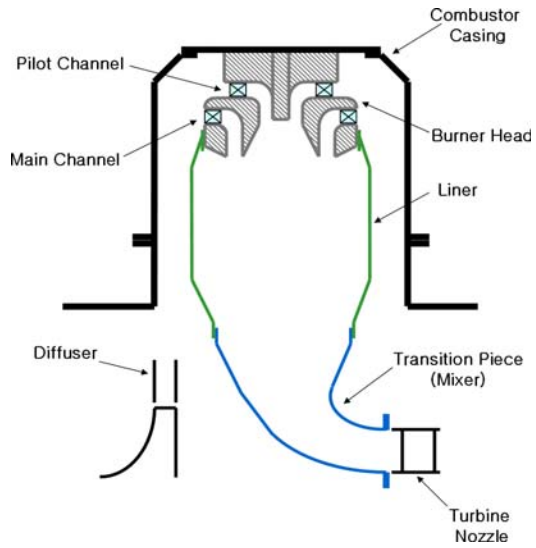


Fig. 1 연소기 개념도

다. 이 때문에 파일럿 버너와 메인 버너를 가지는 이중 연소 형식으로 하거나, 다단 연소 등의 각종 기법을 사용한다.

Table 1은 개발 대상 연소기의 요구사항이며, Fig. 1은 개발 대상 연소기의 개략적인 개념도이다. 본 연소기는 1차 시제이며, 본 시험의 결과를 바탕으로 지속적으로 수정이 된다.

개발 대상 연소기는 역류형 캔 타입 연소기 8개가 가스터빈의 중심축에 대하여 수직으로(방사상으로) 설치되는 멀티캔 방식이며, 연소기의 출구에 설치되는 트랜지션 피스가 모여서 전체적으로는 연소기 출구가 애놀러 채널의 형상이 되어 터빈 노즐로 연결된다. 연소기 케이싱의 앞쪽에 압축기의 최종단인 원심압축기 후단의 디퓨저가 있으며, 이 디퓨저로부터 공급된 연소공기는 연소기 케이싱과 라이너 사이의 공간을 지나서 프론탈 디바이스로 공급된다.예혼합연소기에서는 이 프론탈 디바이스의 성능이 연소기의 저공해 특성 및 화염안정화 특성을 결정짓는 핵심적인 부분이며, 이 두 가지 특성은 연소기에서 서로 상충되는 경향을 보인다. 따라서, 이러한 상충되는 두 특성을 동시에 만족하기 위하여 예혼합 연소기의 프론탈 디바이스는 일반적으로 복잡한 구조를 가진다.

시험 대상 연소기의 프론탈 디바이스는 중심부의 파일럿 버너와 주변부의 메인 버너로 이루어진다. 파일럿 버너는 비교적 높은 당량비로 연소가 이루어져서 연소기 전체 화염의 안정화의 역할을 수행하며, 메인 버너는 비교적 낮은 당량비에서 운전되어 저공해 성능을 향상 시키는 역할

을 한다. 연소기는 운용구간에 따라 메인 버너와 파일럿 버너의 연료 분배율이 다르게 운용이 된다.

압축기로부터 공급되는 공기 중 일부는 라이너 하부의 Dilution 구멍으로 공급되며, 또 일부는 라이너 벽에 설치된 냉각 구멍으로 공급되어 화염 및 고온 연소가스로부터 라이너를 보호한다. 라이너 하류의 트랜지션 피스에도 냉각공기 구멍이 설치된다.

3. 연소기 성능시험

3.1 연소기 성능시험 개요

일반적으로 가스터빈 연소기의 개발을 위해서 연소기의 성능시험은 가장 중추적인 역할을 하게 된다. 특히, 개발 대상인 예혼합화염 방식 연소기의 경우, 특성상 운전조건에 민감하게 연소특성이 변하므로 성능 확인 시험은 개발에 중요한 역할을 한다. 연소기의 내부에서 일어나는 현상은 유동과 화학반응이 동시에 나타나며, 유동과 화학반응은 서로 영향을 주게 되므로 복잡한 형태로 일어난다. 이러한 복잡한 현상을 검증하기 위해서는 이론적인 검토가 어려워 주로 경험식 및 기존의 데이터베이스에 의존하여 설계를 수행하게 되는데 사용된 경험식들의 타당성을 입증하고 연소기 성능을 최적화시키기 위해서는 개발 단계에서 다양한 시험이 수반되어야 한다.

연소기 성능시험은 개발시험과 설계 검증시험으로 나눌 수 있다. 개발 단계 시험은 설계와 병행하여 수행되는데 이를 통해 설계자는 연소기의 각 요소의 선정에 대한 비교자료를 제공받게 된다. 설계 검증시험은 연소기 설계 요구 성능을 검증하기 위하여 수행된다. 설계 검증시험을 통하여 만족할 만한 성능이 얻어지면 압축기, 터빈 등과 함께 조립된 형태로 엔진성능시험 단계로 들어 갈 수 있다.

예혼합 저공해 연소기는 고효율의 연소반응과 저공해 성능의 최적화라는 두 가지의 목적을 가지도록 설계되어야 한다. 저 NO_x 성능은 앞서 언급된 바와 같이 희박한 연소를 통하여 화염온도를 낮춤으로써 구현될 수 있으며, 이러한 상태에서는 미연가스의 발생 가능성이 커지게 된다. 여기서 발생하는 미연 배출 가스는 HC, CO 등이 있으며 고온에 의해 발생하는 공해성 연소배출물은 NO_x가 있다. 공해성 배출가스의 측정은 저공해 연소기의 저공해 성능 평가 및 연소기 재설계시 기초 데이터로 활용된다.

시험이 필요한 연소기의 요구 성능으로는 우선적으로 연소효율이다. 연소기는 고효율의 연소를 도모함으로써 연료의 소모를 최소화해야 하기 때

문이다. 동시에 고온의 유체를 터빈으로 공급함에 있어서 터빈 블레이드 및 가이드 베인 재질이 견딜 수 있는 온도 한계에 맞추어 연소가스를 희석시켜야 하며, 원심력을 받는 블레이드 재질의 열응력을 최소화시키기 위해서 반지름 방향 및 가로방향으로 되도록 고온 온도 분포를 제공해야 한다. 한편, 연소기에서 적절한 공기의 분배를 위하여 라이너 안팎의 압력차가 필요한데, 이 압력차는 동시에 가스터빈 동력의 손실로 나타나므로 이를 적정한 값 이내로 유지시켜야 한다. 이 외에도 연소기 자체의 내구성 확보 측면에서 라이너를 비롯한 각 부분의 온도가 허용범위 내로 유지되어야 한다.

또한, 배기가스 중의 대기 오염물질도 최소화되어야 한다. 최근 들어 가스터빈에 대한 배출가스 규제가 강화되고 있고, 향후 더 강화될 것으로 예정되어있는 상황에서 저공해 성능은 연소기의 중요한 요구 성능으로 대두되고 있다. 특히, 지상의 고정된 장소에서 장시간 운전되는 발전용 가스터빈의 경우는 이러한 저공해 성능이 더욱 중요하게 요구된다. 최근의 강력한 배기가스 오염물 규제는 재래식 연소기로 맞출 수 있는 한계를 넘어선 것으로, 이로 인하여 최근 설치되는 발전용 가스터빈은 대부분 예혼합 형식의 연소기를 사용한다. 예혼합형 연소기는 저공해 성능은 뛰어나나, 화염의 안정성 문제에 취약하다. 따라서 이러한 예혼합형 연소기에서는 연소 안정성이 요구 성능 항목에 추가된다.

연소기의 모든 성능시험은 연소기의 유입조건을 실제 엔진의 압축기 출구 조건으로 맞추는 것부터 고려가 된다. 연소기로의 공기 유입 온도, 압력, 유량을 실제 엔진에서의 조건으로 맞추기 위해 공기 공급 장치와 히터를 이용하여 압축기에서 유도된 연소기 입구조건을 모사한다. 그러나, 이러한 장비들은 공급 압력과 유량에 따라 엄청난 전기비용과 운용비용을 초래하게 되며 일반적으로 연소기 개발시험 및 성능 확인시험들은 거의 대부분 저압상태에서의 모사시험을 통하여 이루어진다. 사용되는 모사기법은 입구조건의 마하수 모사이며, 모사시험을 통하여 개발이 된 연소기는 최종적으로 모사조건이 아닌 실조건 시험을 통하여 실조건에서의 연소기 성능을 확인한다.

3.2 시험설비 및 리그

연소기 성능시험설비는 대기 중의 공기를 가압/가열하여 연소기 시험부에 공급하고, 고온의 연소기 배기가스를 물분사 냉각장치를 이용해 냉각시킨 후, 다시 대기중으로 방출하는 개방 유포형으로 대표적인 사양은 Table 2와 같다. Fig. 2는

Table 2 연소기 성능시험설비 사양

공기 공급 계통	유량	6 kg/sec
	압력	5.5 bara
	온도	400 °C
연료(NG) 공급 계통	유량	0.1 kg/sec
	압력	9.9 barg

연소기 성능시험설비의 개략도이다.

항우연이 보유하고 있는 연소기 성능시험설비는 크게 공기 공급시스템, 연료 공급시스템, 제어 시스템, 계측/자료획득 시스템, 안전 설비 등으로 구성되어 있으며, 저압 연소 시험까지 가능하다. 이 설비를 통하여 국내에서 개발된 대부분의 가스터빈 엔진의 연소기 성능시험이 성공적으로 수행되었다.

공기 공급설비는 2250hP (1.65MW) 의 원심 3단 압축기(잉가솔란드 Centac)와 2.4MW 의 전기식 공기 히터(Chromalox, 1.2MW×2)로 이루어져 있으며, 이 압축기와 히터가 시험설비의 핵심 장비이다. 공기의 유량은 유량 레인지별로 벤츄리 유량계와 코리올리 유량계를 사용하여 측정한다. 연료는 일반 상용 천연가스(도시가스)이다. 연료 압축기는 왕복동식이며, 압축기 후단에 1m³ 용량의 리시버 탱크가 설치된다. 연료 유량은 MFC를 사용하여 측정 및 제어 하며, 도시가스의 표준 조성을 기준으로 보정하여 사용하였다. 연료 계통에는 자동 차단 밸브가 2중으로 설치되어 비상시 연료가 차단되도록 되어있다.

DAS 시스템은 데베트론사의 DEWE-5000을 사용하였으며, 최대 샘플링 레이트는 100kHz 이다. 예혼합연소기의 경우는 연소 불안정이 발생하기 쉬운데, 연소불안정시의 압력 섭동은 일반적으로 400Hz 전후이므로 충분한 샘플링 레이트이다. 압력 및 차압 센서는 Rosemount 사 제품과 Omega 사 제품을 사용하였으며, 측정 오차는 0.25%이하이다. 온도측정은 K-Type TC를 사용하였다.

배기가스 분석 장치는 Horiba 사의 측정 모듈들로 구성되어 있으며, 표준 19" 랙에 배가스 전처리 설비와 함께 일괄 장착되어있다. 각 측정 모듈들은 측정 대상 가스의 종류에 따라 각기 다른 독립적인 센서 모듈을 사용하며, 연속측정이 가능하다. HC, CO, NOx 등의 화학종을 측정하며, 제어실에 설치된 컴퓨터에 연결되어 계측기 교정, 자료획득 등의 제어가 이루어진다. 배가스 분석장치는 시험 직전에 표준가스로 교정후 사용

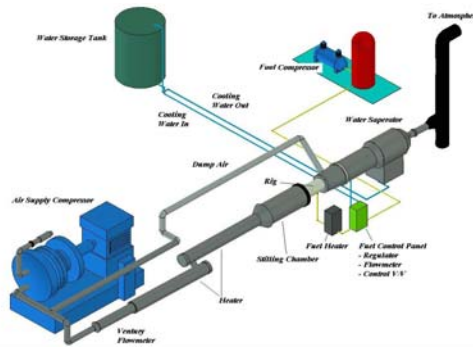


Fig. 2 연소기 성능시험설비 개략도

하였는데, 이 중 HC 모듈은 메탄(CH₄)으로 교정하여 사용하였다.

Fig. 3은 연소기 시험 리그의 3차원 단면도이다. 연소기의 성능시험시 설비와 연소기의 인터페이스를 위하여 시험 리그가 필요하다. 시험리그는 가급적 실제 엔진에서의 유동상황과 유사하게 제작되며, 각종 센서 들이 장착된다. 리그는 필요에 따라 부위별로 공냉 또는 수냉으로 냉각되어 고온 공기 또는 연소가스로부터 보호된다.

리그의 케이싱은 고압의 내부압력을 견딜 수 있도록 원통형으로 제작된다. 그러나, 하나의 연소기는 전체의 1/8분할에 해당되므로, 엔진의 1/8분할 케이싱이 모사되도록 분할 섹션을 설치하여 원통형 리그케이싱 내부에 장착되는 형태를 가지고 있다. 리그의 입구부에 설치된 벨마우스 입구단으로부터 공기가 유입되며, 연소기에서 연소된 후 터빈 노즐 부위에 설치된 온도레이크에서 후류 온도분포를 측정하고 2단계의 냉각 채널을 거치고 출구의 냉각형 제어밸브에서 압력 제어 후

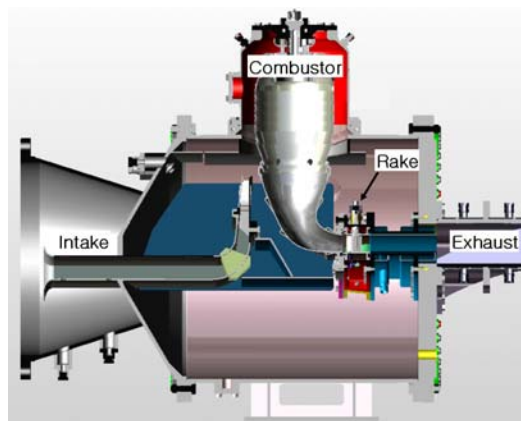


Fig. 3 연소기 시험 리그

배출되며 냉각/배출 직전에 가스분석을 수행한다.

4. 연소기 성능시험 결과

4.1 점화 시험

개발 대상 연소기의 점화시에는 모든 연료가 파일럿 버너로 공급된다. 점화시험은 연소기 내 공기 유속을 기준으로 수행된다. 이때, 엔진의 점화 회전수는 정격 회전수에 비하여 많이 낮으므로 연소기 압력은 대기압으로 두고 시험 한다. 또한, 점화 특성은 온도에 아주 민감하므로 Cold Day 조건, Hot Day 조건 및 Standard Day의 Idle 조건의 연소기 입구 온도에 대해서 시험을 수행한다. 따라서, 연소기 공급 공기의 온도 및 부피유량을 변수로 수행된다. 구체적인 점화 온도 및 공기 유량은 엔진의 사이클 해석으로부터 정해진다.

점화시험에서 중요한 것은 점화에 의한 온도 상승이다. 이것은 점화에 의해서 엔진이 자력 구동이 되는가가 연소에 의한 온도 상승이 얼마나 되느냐에 따라서 정해지기 때문이다. 즉, 실제 엔진에서 공급되는 연료량은 자력구동이 되는 온도 상승분 이상이 나오도록 공급되어야 하므로, 이 유량보다 낮은 유량에서 점화가 되어야 하기 때문이다. 그런데, 점화 조건과 같이 설계조건에서 많이 떨어진 조건에서는 연소효율이 낮을 가능성이 크다. 더구나 본 연소기와 같이 예혼합형식인 경우는 더욱 그럴 가능성이 크다. 따라서 단순히 공연비만으로 온도 상승을 예측하기에는 불충분하며 직접적으로 온도 상승값을 측정한다. 이때문에 점화 가능한 α 뿐 아니라, 점화에 의한 온도 상승도 같이 표시해야 한다.

Fig. 4는 점화시험 항목 중 연소기 입구온도 25°C인 경우(대기온도 -45°C, Cold Day)의 시험

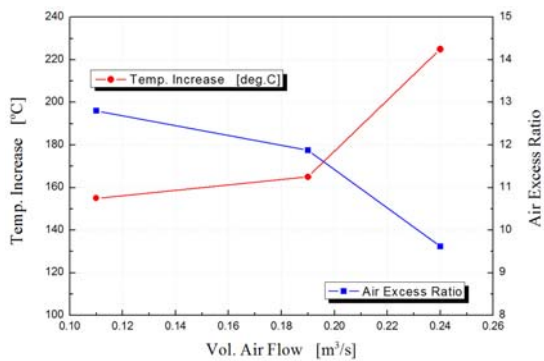


Fig. 4 점화 성능 시험 결과

결과이며, 그래프의 등근 표시는 점화에 의한 온도 상승분이며, 네모 표시는 공기과잉률(α)이다.

전반적으로 공기과잉률 10 이상 까지도 점화가 이루어지는 것을 볼 수 있으며, 이때 온도 상승분은 200°C 보다 작다.

공기의 유속이 작아질수록 점화 가능한 한계(최대)공기과잉률이 커지는데, 이는 가스연료 연소기의 특징이다. 액체연료의 경우는 가스연료와 달리 연료의 미립화가 일어난 뒤 연소하게 되는데, 공기유량이 작아지면 연료 유량의 감소로 인해 미립화 특성이 나빠져서 점화가 가능 공기과잉률 한계가 오히려 작아진다.

4.2 화염안정화 시험

엔진이 Idle 조건에서 운전될 때 연료량이 최소가 되는데, 이렇게 희박하게 연소기가 운전되는 경우에 화염이 안정하게 유지되는지를 확인하기 위해 화염안정화시험을 실시한다.

점화 조건과 마찬가지로, Idle 상태에서는 파일럿 버너만으로 연소기가 운전 된다. 이 시험은 각 대기 조건 (-45°C, 15°C, 45°C)에 대해서 각각 수행되어야 한다. 개발대상 가스터빈 엔진이 발전용이므로 항공용 엔진과 달리 어떤 부하에서든 엔진의 회전수가 일정하게 운전 되므로 공기 유량은 거의 일정하다. 결과적으로 시험시의 공기 유량은 설계점과 같게 유지한 채로 연료를 줄여가면서 화염이 소화되는 연료 유량을 찾는 방식으로 시험한다.

Fig. 5는 Idle 조건에서의 화염안정성 시험 결과이다. 가로축은 대기온도이며, 왼쪽 세로축은 연소기 출구온도, 오른쪽 세로축은 연소기에서의 온도 상승값을 나타낸다. 각 대기 온도 별로 연소기에서의 온도 상승값이 주어져 있으며, 이 조건에서부터 화염이 꺼질 때까지 연료 유량을 줄여나간다. 이때, 화염이 꺼지기 직전 조건에서의 온도상승분(ΔT , 연소기 입출구 온도차)을 파악하

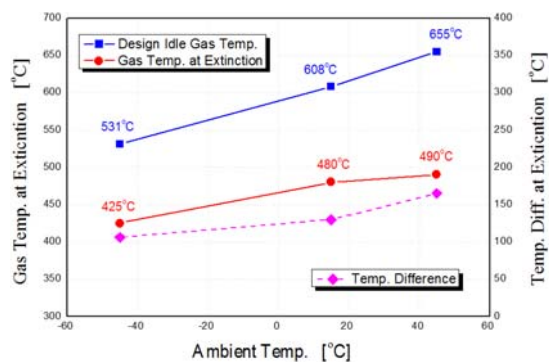


Fig. 5 Idle 화염안정성 시험 결과

여, 설계 Idle 조건으로부터 몇 °C의 마진을 가지는지를 확인한다. 만일, Idle 상태의 ΔT 에서 화염이 유지 되지 않거나 요구되는 마진이 확보되지 않으면, 엔진의 Idle 운전점을 바꿀 수는 없으므로 연소기를 수정해야 한다.

시험 결과로부터 모든 조건에 대하여 온도 상승분은 설계 요구값 이상을 확보하고 있다. 온도 상승분의 마진은 대기 온도가 높을수록 클데, 이는 유입공기의 온도가 높을수록 화염안정성이 커지기 때문으로 생각된다.

4.3 저압 연소성능시험

연소기의 각 부하 조건별로 Fuel Ratio(=과일릿 Fuel Flow/Total Fuel Flow, 이하 FR)를 바꾸어가면서 연소효율, 배가스 분석, 출구 온도 분포 등을 측정하였다. 시험은 세 가지 대기조건(-45, 15, 45°C)에서 40%, 60%, 80%, 100%의 전 부하 조건에 대하여 수행되며, 본 논문에서는 15°C 대기조건(Standard Day)의 결과를 위주로 설명하였다.

부하시험에서는 연소기의 압력 섭동과 저공해 성능(저 NOx)을 주로 살펴보게 되는데, 배가스 온도가 높아질수록 UHC나 CO 등의 불완전 연소 생성물은 줄어드는데 반해 NOx와 압력 섭동은 커진다. 또한, 과일릿 연료를 늘일수록 NOx가 많아지고, 압력 섭동은 줄어든다.

압력 섭동은 고속 압력센서를 연소기 케이싱 벽면에 설치하여 측정하였다. 시험시 연소기 압력을 배관 후단의 배기압력 조절 밸브로 제어했는데, 이 경우 실제 엔진에서의 음향학적 특성과 다를 것으로 판단되어 연소기 시험 리그 출구에 노즐을 설치하여 음향학적 경계를 만든 뒤 시험을 수행하였다.

4.3.1 압력손실

Std. Day 조건에서 연소기의 부하별 압력손실을 측정한 결과, 부하에 따라 3.85~4.7%의 압력손실을 나타내었다. 설계된 연소기가 구조적으로 매우 복잡한 형상임에도 불구하고 시험결과는 설계 요구값보다 상당히 낮은 값을 보였다.

각 부하별 공기 유속, 압력, 온도가 다르므로, 각 조건에서의 압력 손실계수(c_d)를 계산하여 비교한 결과 일정하게 나타났다. 이로부터 시험이 정상적으로 수행되었음을 알 수 있었다.

4.3.2 연소효율

15°C 대기조건의 각 부하조건에 따른 연소효율을 Fig. 6에 보였다. 연소효율은 배가스 분석으로부터 계산하는데, 배가스 중의 UHC(Unburned Hydro-Carbon, 미연탄화수소) 및 CO가 미연분

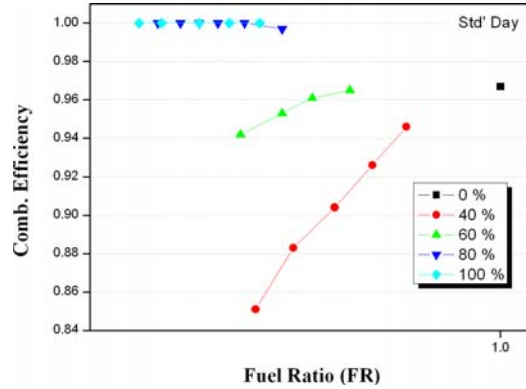


Fig. 6 부하별 연소효율 (15°C 대기조건)

이므로 투입된 연료의 총 발열량 대비 이들 화학종의 발열량과 배가스 중 농도로부터 구한 손실된 발열량으로부터 연소효율을 역산하였다. UHC 측정 모듈이 메탄(CH₄)를 기준으로 한 농도를 표시하므로, 연소 효율 계산시 UHC는 메탄으로 가정하였다.

설계점 근처인 80% 및 100% 부하조건에서는 연소효율이 연료비에 영향을 거의 받지 않고 설계 목표치인 99%를 초과하는 거의 완전연소상태를 보인다. 이에 비해, 60% 이하의 낮은 부하에서는 상대적으로 효율이 많이 떨어짐을 볼 수 있다.

전 영역에 걸쳐서 과일릿 버너의 역할이 커지는 연료비(FR)가 증가하는 방향으로 진행할수록 효율도 함께 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 과일릿 버너는 넓은 영역에서 연소가 되도록 메인 버너에 비하여 상대적으로 연료 과잉한 조건에서 운전되도록 설계되어 있으며 FR

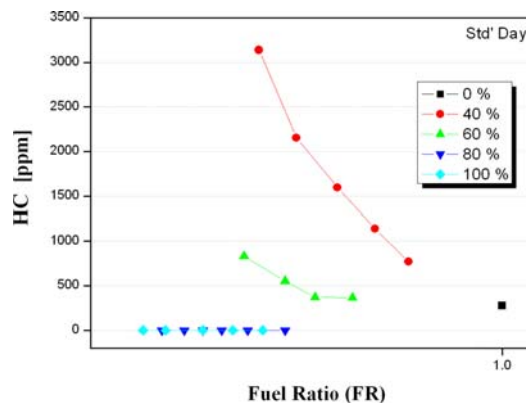


Fig. 7 부하별 UHC 측정 결과 (15°C 대기조건)

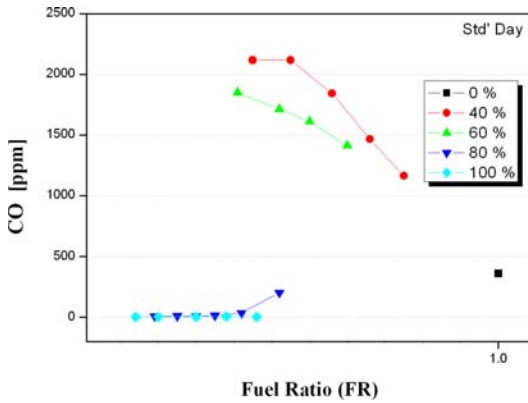


Fig. 8 부하별 CO 측정 결과 (15°C 대기조건)

비가 높아질수록 파일럿 버너로의 연료 공급이 증가되어 연소효율은 높아지게 된다.

4.3.3 오염물 배출 특성

연소기 배기가스 중의 UHC 및 CO 등은 유해 오염물질임과 동시에 불완전 연소로 인한 미연 연료이다. 따라서 이러한 오염물 배출특성은 연소기의 연소상태와 연관되며, 앞서 나왔던 연소 효율에도 직접적으로 영향을 준다. 앞에서 언급하였듯이 본 연소기는 대기환경보전 측면에서 규제를 강하게 받는 발전용 가스터빈의 연소기이므로, 이러한 오염물질 배출특성은 특히 중요한 성능이다.

Fig. 7은 부하별 UHC 측정 결과이다. 부하가 높은 80% 및 100%에서는 UHC가 거의 발생되지 않으며, 부하가 줄어들수록 UHC의 배출이 증가되어 60%에서 보다 40%에서는 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, UHC가 발생하는 낮은 부하에서는 FR이 높아질수록 같은 부하에서 UHC의 배출이 줄어들게 되는데, 이는 연료 총량이 작은 상황에서 공기량이 적은 파일럿 버너로 연료가 집중 될수록 연소 상태가 좋아져서 UHC가 상대적으로 줄어들기 때문으로 판단된다.

Fig. 8은 CO에 대한 배기가스 측정결과이며, CO의 경우도 UHC와 유사한 경향을 보인다. 저공해 연소기의 개발에서 가장 관심이 되는 것이 NOx의 수치이며 Fig. 9는 NOx의 농도결과이다. 이때의 NOx는 NO 및 NO₂에 대한 총합이며 15%O₂로 보정된 수치이다. Fig.에서 전반적으로 NOx의 수치는 FR이 내려갈수록 저공해 특성이 좋아지는 결과를 보이며 이는 희박 연소를 전담하는 메인 버너의 역할이 커지는 방향으로 조건 변화가 이루어지기 때문이라고 생각된다.

또한, 부하가 높을수록 연소기내의 온도 상승

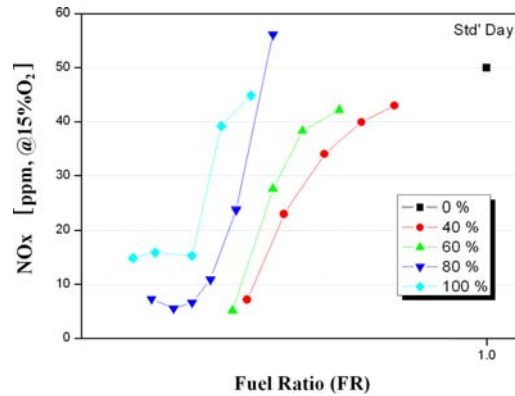


Fig. 9 부하별 NOx 측정 결과 (15°C 대기조건)

이 커지므로 NOx는 증가하는 것을 보여주고 있다. 여기서 주목할 점은 각 부하별로 특정 연료비 근처에서 급격히 NOx가 감소하여 그 연료비보다 작은 곳에서는 NOx의 수치가 약 15 ppm 이내로 안정화되는 경향을 보여주고 있다. NOx의 생성 메카니즘 상 연소 온도 1600°C 근처에서 Thermal NOx의 생성이 급격히 커지는 것을 볼 수 있는데 특정 연료비가 교차하는, 즉 메인 버너의 연소가 보다 희박하게 진행되는 특정 시점에서 이러한 경향이 불연속 구간처럼 나타나는 것으로 생각된다.

이때의 UHC 및 CO 배출특성을 보면(Fig. 7, 8), 80% 및 100% 부하에서는 화염의 온도가 낮아져서 NOx의 배출이 급감한 낮은 FR 영역에서도 UHC 및 CO의 배출이 거의 없음을 볼 수 있다. 결과적으로, 이러한 영역이 본 연소기와 같은 저공해 연소기의 운전점이 된다. 이때, UHC와 CO의 발생이 없으므로 연소효율도 높게 유지된다. 그러나, 60% 이하의 낮은 부하에서는 UHC와 CO의 증가로 저공해 운전영역이 나타나지 않는다.

4.3.4 연소기 출구 온도 분포

Fig. 10은 15°C 대기조건에서 부하별 출구 배기가스 온도 분포이다. 각 부하별로 설계 FR은 다르다. 이때의 연소기 입구 공기 온도는 385°C 전후이다.

연소기 출구 형상은 환형인 터빈 입구의 1/8 분할부이므로 호의 모양이나, 편이상 직사각형으로 표시하였다. 온도측정은 4개의 K-Type 열전대이 설치된 온도 레이크를 사용하였다. 가로축의 번호는 원주방향으로 설치된 레이크의 번호이며, 세로축의 번호는 레이크의 4개 열전대 정선에 해당한다. 1번이 레이크의 끝으로 아래쪽이다.

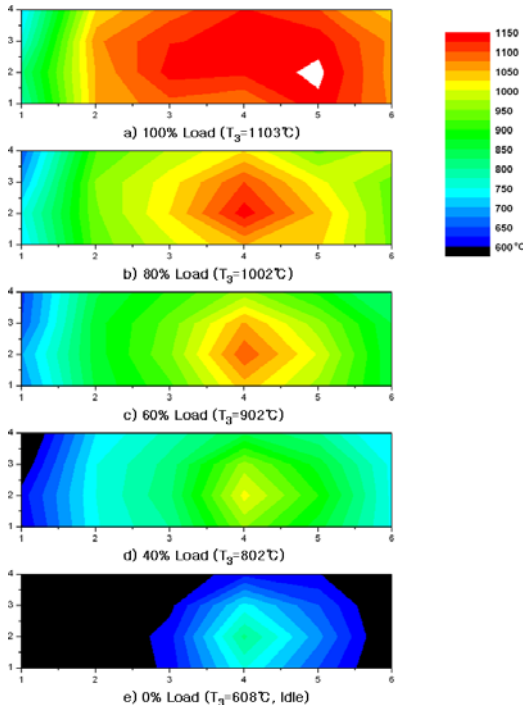


Fig. 10 부하별 연소기 출구 온도분포 (15°C 대기조건)

따라서 Fig. 10은 연소기를 터빈 쪽에서 바라볼 때의 출구 온도 분포이다.

부하가 큰 경우는 FR이 낮은 관계로 출구 중심부에 넓은 고온부가 형성되며, 부하가 줄어들수록 전체 온도가 떨어짐과 동시에 중심부의 고온부가 좁고 온도 구배가 급하게 형성됨을 볼 수 있다. 이것은 부하가 줄어들수록 화염온도가 낮아져서 화염 유지에 불리하므로 파일럿 연료량을 늘여서 (FR을 증가시켜) 화염안정성을 높이도록 운전하기 때문이다. 최종적으로, Idle 조건(부하 0%)에서는 중심부에 비교적 온도가 낮은 고온부가 큰 온도 구배를 가지고 형성되며, 주변부의 대부분은 600°C 이하를 나타내는 검은색으로 표시된다.

Fig.10의 연소기의 출구온도분포는 출구의 중앙을 기준으로 대칭으로 나타나지 않고 고온부가 오른쪽으로 치우치는 경향을 일관되게 보이는데, 이는 온도측정용 레이크가 설치된 터빈 노즐 위치의 유로가 노즐 베인의 굴곡을 모사하기 위하여 휘어져 있기 때문이다.

한편, 부하 100%인 Fig. 10-a)를 보면 5번 레이크의 2번 정선에서 1150°C를 넘어서 가장 고온이 형성되는 것을 볼 수 있는데, 이는 부하가 큰 경우에는 FR이 낮아져서 주변부의 메인 화염의 온도가 상대적으로 높아지기 때문으로 판단된다.

Table 3 부하 변화에 따른 Pattern Factor 비교 (15°C 대기조건)

Load	%	Idle	40	60	80	100
Peak Temp.	°C	806	1010	1096	1139	1158
Avg. Temp.	°C	632	837	944	1007	1103
Pattern Factor	%	68.0	37.5	26.7	20.8	7.6

부하 100% 를 제외한 모든 경우에 4번 레이크의 2번 정선에서 최고온부가 형성된다.

Table 3은 15°C 대기조건에서 부하별로 최고 온도 및 온도 패턴 팩터를 표시한 것이다. 부하가 클수록 고온부가 넓고 평탄하게 나타나므로 패턴 팩터는 좋아지게 되어, 7.6%라는 재래식 연소기에 비하여 극단적으로 작은 값을 가진다. 부분부하에서는 파일럿 연료의 증가로 인해 중심부의 온도가 상대적으로 높아지므로, 부하가 낮아질수록 패턴 팩터가 나빠져서 Idle 경우에는 68%라는 큰 값을 가진다. 그러나, 이때는 연소가스의 절대적인 온도 자체가 낮아서 문제가 되지 않는다.

4.3.5 연소진동 분석

저공해 연소기는 균일하게 낮은 연소 온도를 얻기 위하여 예혼합연소방식을 사용하는데, 이때문에 연소 불안정에 의한 압력 섭동이 쉽게 발생하는 문제가 있다. 이러한 압력 섭동에 의하여 심한 경우 연소기가 파손되는 경우도 발생하므로, 압력 섭동 특성을 파악하는 것은 저공해 연소기 성능시험의 중요한 목적 중의 하나이다.

연소기의 압력섭동은 연소기 케이싱에 설치된 고속 압력 센서로(Kulite, WTC-312) 측정된다. 압력 센서의 공진 주파수는 380 kHz로 실험시에 파악된 연소기의 압력 섭동의 주파수인 250 ~ 500 Hz에 비하여 충분히 크다. 압력 센서는 수냉각형이며, 케이싱 내부면과 센서의 측정면이 같은 면에 위치하도록 어댑터를 제작하여 설치하였다. 케이싱 내부에서 측정하므로 라이너 내부의 압력 섭동과는 차이가 있으나, 실제 엔진에 설치하는 압력센서도 라이너 케이싱에 설치되므로 실제 운전시 압력 섭동을 모니터링 하는 시스템과 유사할 것으로 판단된다.

압력 섭동 특성은 측정된 압력의 FFT 스펙트럼으로부터 파악되는데, FFT 분석시 윈도우는 Blackman 윈도우를 적용하였다. Blackman 윈도우는 다른 FFT 윈도우에 비해 진폭(Amplitude)의 정확도가 비교적 양호하기 때문에 압력 섭동

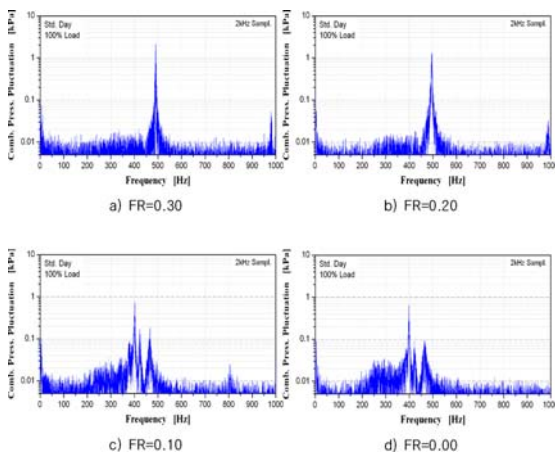


Fig. 11 FR의 변화에 따른 압력섭동 특성변화 (15°C 대기조건, 100% Load)

의 진폭을 파악하고자하는 본 분석에 적합하다. 연소진동 측정결과, 100% 부하에서는 500Hz 부근의 압력 섭동이 있으나, 그 이외의 부하 조건 및 Idle 조건에서는 압력 섭동이 발생하지 않는 것을 볼 수 있었다. 연소 진동이 발생하는 100% 부하의 경우에는 다른 경우와 뚜렷하게 구분되는 정현파 공진 형태의 소리가 연소기로부터 발생하는 것을 들을 수 있다.

100% 이외의 부하에서 압력 섭동은 없으나, 350 Hz 및 500 Hz 주파수 부근에서 노이즈 레벨을 넘어서는 섭동이 발생하고 있음을 알 수 있었고, 이로부터, 500 Hz의 공진을 일으킬 수 있는 가진원(Excitation Source)은 항상 존재하고 있으며, Overall 당량비가 높은 100% 부하에서는 연소반응과 커플되어 공진이 발생하여 압력 섭동의 진폭이 커지는 것으로 생각된다.

본 연소기는 파일럿 및 메인 연료의 유량을 바꾸어가면서 최적화 하는 방식으로 운전조건이 정해진다. 따라서 100% 부하에서 발생하는 압력 섭동이 FR의 변화에 따라 어떻게 바뀌는지 파악할 필요성이 있다.

Fig. 11은 15°C 대기조건 100% 부하에서 FR의 변화에 따라 압력 섭동의 특징이 어떻게 바뀌어 가는지를 나타낸 것이다. 가로축은 주파수이며, 세로축은 압력섭동의 진폭을 로그 스케일로 나타낸 것이다.

FR=0.30으로(Fig. 11.a) 운전 시에는 500 Hz 부근에서 2.3 kPa의 압력 섭동 진폭을 가진다. 그러나, 이 압력 섭동의 크기는 기준값 이하이므로, 엔진의 운전에 문제는 없는 크기이다. 스펙트럼의 형태가 하나의 큰 피크를 가지는 것으로부터 압력 섭동은 정현파 형태의 공진 특성을 보임

을 알 수 있다. 1 kHz 부근의 작은 피크는 하모닉이다.

FR을 0.2로 떨어뜨려서 운전하면(Fig. 11.b) 연소기 내부 압력 섭동의 주파수는 500 Hz로 변화가 없으나, 진폭은 1.3 kPa로 줄어든다.

FR이 0.1로 줄어들면(Fig. 11.c) 압력섭동의 피크가 400 ~ 470 Hz 사이에서 3개로 갈라지고, 피크 중에 가장 큰 것은 400 Hz에서 0.7 kPa의 진폭을 보인다. 다른 두 피크들의 진폭은 400 Hz 섭동의 주 섭동의 진폭에 비하여 4배 정도로 작으므로 압력 섭동의 전체 진폭에 영향은 크지 않다.

FR이 0.0이 되면(Fig. 11.d) 파일럿 연료는 차단하고 메인 연료로만 운전되는 상황인데, 이때의 주파수 특성은 FR=0.1인 경우와 유사하게 3개의 Peak를 가지며, 가장 큰 피크의 진폭은 더 줄어든다.

이로부터 FR이 증가하면 압력 섭동의 진폭은 커지고 그 주파수는 하나로 강하게 나타나며, 0.1 이하로 FR이 작아지면 압력 섭동은 여러개의 작은 주파수를 가지고 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나, 모든 경우에 연소기 압력 섭동은 허용 기준 이내이다.

Standard Day 100% 부하의 경우, NOx의 발생특성 때문에 FR을 작게 유지하면서 운전하는 것이 바람직한데, 낮은 FR에서 압력 섭동 문제가 없으므로 이 조건에서 운전이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

5MW급 발전용 가스터빈 엔진 개발을 위한 연소기 성능시험을 수행하였다. 시험대상 연소기는 1차 시제작품이다. 시험 대상 연소기는 기존에 국내에서 다수 시험되었던 항공용 액체 연료 연소기와 달리 천연가스를 연료로 사용하는 발전용 저공해 연소기이다. 따라서 본 연소기의 성능시험을 위하여 발전용 저공해 연소기의 성능시험기술과 방안을 확립하였으며, 1차 시제 연소기에 대한 성능시험을 한국항공우주연구원의 연소기 성능시험설비에서 성공적으로 수행하였다.

시험결과, 본 연소기는 공기과잉률 10 이상에서도 원활히 점화되었으며, Idle 상태에서의 화염 안정성도 요구치를 만족하였다.

부하조건에 따른 시험으로부터 80% 이상의 부하에서는 모든 FR에 대해서 99% 이상의 연소효율을 나타냈으며, 60%이하의 부하에서는 부하가 낮을수록 연소효율이 떨어지며, 같은 부하에서는 FR이 커질수록 연소효율이 작아졌다. 이는 연료량이 작은 저부하 조건에서 파일럿 화염으로 연료가 집중됨으로 인해 이 부분의 국지적인 화염은

도가 증가하기 때문으로 생각된다.

같은 이유로 NO_x 배출은 FR이 증가할수록 늘어나나, 80% 이상의 부하에서는 FR에 무관하게 연소 효율이 높게 유지되므로, 낮은 FR로 운전하게 되면 높은 연소효율과 낮은 NO_x배출을 다 만족하게 된다. 이 조건이 연소기의 최적 운전조건이다. 부하가 낮아질수록 화염 유지를 위하여 FR이 높게 운전된다.

연소기 출구의 온도분포는 FR이 낮은 고부하에서는 비교적 평탄한 고온부를 가지며, 이 때문에 패턴 팩터도 아주 좋게 나타났다. 낮은 부하에서는 높은 FR 때문에 패턴 팩터가 커지나, 이 경우에는 전반적인 출구온도가 낮아서 문제가 되지는 않는다.

예혼합 형식의 연소기의 취약점인 연소 섭동특성 측정결과, 본 연소기는 100% 부하의 높은 FR 쪽에서 500Hz의 공진이 발생하나, 실제 운전점인 낮은 FR에서는 공진폭이 줄어들고, 주파수도 분산되는 것을 알 수 있었다.

결과적으로, 1차 시제 연소기는 연소효율, 패턴 팩터, 저공해 성능 등 가스터빈 엔진 체계에서 요구하는 성능들을 거의 만족하였다.

5MW 가스터빈 엔진의 개발은 현재 1단계가 완료된 상태이며, 향후 2단계에서는 본 연소기 시험 결과를 바탕으로 더욱 성능이 개선된 2차 시제를 제작하여 성능시험을 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지원으로 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] A. H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion" 2nd edition, Taylor & Francis, 1999.
- [2] T. C. Lieuwen. and V. Yang, "Combustion Instabilities in Gas Turbine Engine", AIAA, 2005
- [3] 박부민 외, "가스터빈 연소기 성능시험", 35th KOSCO Symposium, 2007, pp. 140-146