

## 저공해 연소기 시험기술

김형모\*, 최영호\*\*, 김동식\*\*\*, 박부민\*\*\*\*

### Test Methods on Development of Low Emission Gas Turbine Combustor

Hyungmo Kim\*, Youngho Choi\*\*, Dongsik Kim\*\*\*, Poomin Park\*\*\*\*

#### Abstract

On the stage of combustor development process, many aerodynamic and combustion characteristics are found out not by only ideal design concept but by only useful tests which are top confidentiality of technically advanced engine development companies, RR and GE, etc. In this study, test techniques of one of that company are analysed and described about some unique tests for test low emission combustors.

키워드 : Combustor, Low NOx Emission, Performance Test, Combustor Test Rig, Ignition

#### 1. 서 론

가스터빈용 연소기에 적용되는 연소과정은 복잡한 메카니즘을 갖는 화학반응으로써 관련한 연구들이 무수히 이루어지고 있으나 아직도 정확한 연소특성을 예측하여 설계하거나 해석을 하는 경우는 현존하지 않고 있다. 따라서, 연소기의 설계는 재래식 연소기뿐만 아니라 보다 복잡해진 저공해 연소기의 설계의 경우도 항상 연소기의 다양한 시험을 통하여 최적화 되는 것이 일반적이다.

본 연구는 한국항공우주연구원에서 전력연구개발사업의 일환으로 수행하고 있는 저공해 연소기 성능시험기술의 일부이며 해외 기술협력 업체 (Zorya-Meshproekt, 우크라이나)와의 기술교류 결과를 분석하고 기존의 국내기술을 접목하였으며 단일 역류-캔형 연소기를 시험하는 것을 기준으

로 기술하였다.

#### 2. 연소기 시험 방법

##### 2.1 연소기 냉간시험

가) 연소기 부품 유동 시험

건설 저공해 연소기는 대부분이 예혼합 연소 방식을 채택하고 있으며 저공해 목표성능 달성과 고효율 연소특성을 유지하기 위하여 연소기의 설계 시 각 영역으로의 공기의 분배와 당량비의 분포가 매우 섬세하게 고려된다. 저공해 연소기의 버너부는 파일럿부, 메인부, 냉각부(Head에 들어가는 Cooling)로 크게 나누어지며 이러한 유동적 특성을 시험적으로 검증하는 단계를 거친다. 이를 위하여 버너 Head에서의 유동 측정을 수행하는데, 이때의 압력은 200~4000mmH<sub>2</sub>O정도의

\* hmkim@kari.re.kr

차압을 이용하여 시험이 수행되며 유량, 압력 등을 측정한다. 측정된 결과는 3D-CFD 결과와 비교하여 약 5%이내에서 에러가 발생되면 해석 및 시험이 만족되었다고 판단할 수 있다. 측정 장치는 주로 rake를 4개정도를 원주방향으로 배치하고 각 배관을 연결하여 평균값을 취득한다. 그리고 시험의 정확도를 위하여 3회 시험을 반복하며 반드시 시험은 하루 내에 이루어져야 신뢰도가 높다.

Enter ↵

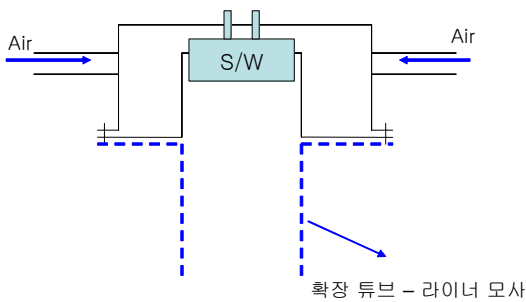


그림 1. 연소기 head 유동 및 농도장 시험장치

Enter ↵

나) 스윌러 농도장 시험

연료의 스윌러 중단에서의 농도장을 측정하는 시험은 저공해 연소기의 안정성과 직접적으로 관계가 되는 사항이므로 매우 중요한 시험이다. 시험을 위한 시험 리그의 형태를 그림 1에 나타내었으며 이때의 라이너는 실제의 라이너와 비슷한 정도의 형태를 가지도록 하며 냉각 홀들을 배제시킨다. 측정방법은 스윌러로 유입되는 연료튜브에 특정 가스를 seeding하고 노즐부에서 해당 가스를 가스분석함으로써 농도장을 취득할 수 있다. 이때 사용하는 seeder는 CO2 또는 CH4를 직접쓰기도 하나 CH4를 쓰는 경우는 환기 팬 등의 설치가 철저하게 고려되어야 한다. 프로브는 0.5mm의 직경을 갖는 튜브를 주로사용하며 반경 방향 및 rotational 위치에 대해서 조금씩 이동시켜 데이터를 취득한다. 스윌러 vane 몇 개정도에 해당되는 면적에 대해서만 수행해도 큰 오차가 없다. 이러한 데이터는 연소시험이 끝나고 emission 데이터와 비교하게 되며 특정 연소기의 특성을 결정짓게 된다.

다) 부분 유량시험

부분유량시험은 시험리그가 제작되기 전에 각 section 별로 유량이 설계와 같이 분배되는지를 확인하는 시험으로써 앞부분의 head에 대한 유량시험이후에 더 이상 수정할 사항이 없으면 라이너와 transition piece에 대하여서 각각 유량시험을 수행한다. 각각의 section에 대하여 시험할 때 나머지 section의 공기공을 막고 유량측정을 수행하며 transition piece의 경우는 라이너와 연결되는 부분을 막고 시험한다.

라) 전체 유량시험

부품에 대한 유동시험이 끝나면 전체 연소기를 조립하여, 연소기 케이싱에서의 유동을 거의 모사할 수 있도록 제작된 케이스(리그)에 장착하여 전체 연소기에 대한 유동시험을 실시한다.

conventional combustor를 가정하면 그림 2와 같이 네 개의 구간으로 나누어서 생각해볼 수 있다.

- ① X1 - 선회기를 통해 챔버로 유입되는 구간
- ② X2 - 주연소영역 공기공
- ③ X3 - 회석영역 공기공
- ④ X4 - 냉각 공기용 공기공

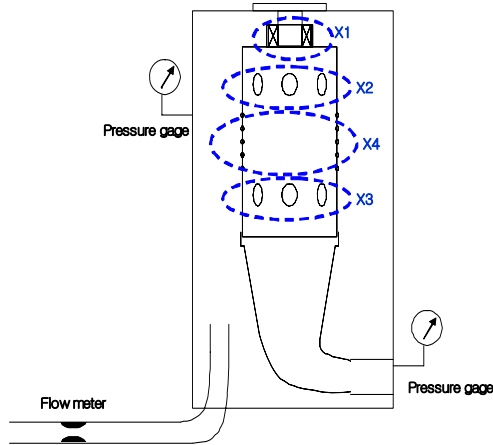


그림 2. Schematics of mass flow measurement test

유량측정을 위한 시험은 연소기 표면상의 공기공들을 막거나 열린상태로 유량을 측정함으로써 유량분포를 계측하게 되며 이때의 시험횟수는 (식 1.1)에 의해 계산될 수 있다.

$$N = 2^{n-1} \quad (\text{식 1.1})$$

$X_4 = -X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$  와 같은 관계를 통하여 표 1과 같이 N개의 variant에 대해서 다양한 유동시험조건을 구성할 수 있다.

이러한 유동조건들은 각각의 위치에서의 유량에 대해 metrics화 된 모양으로 표현이 가능하며 metrics의 해를 식 (1.2)에 나타내었다. 유동시험은 각각의 variant에 대하여 이루어지므로 N번의 최소 시험이 필요하며 이때의 연소기 입구 압력차는 400~ 5000 mmH2O범위로 수행한다. 압력에 대한 영향도 확인하기 위하여 압력차이에 대한 2차원의 맵을 작성하며 이를 통한 시험의 오차는 1~1.5% 이내로 매우 정확한 유량분포를 측정할 수 있다.

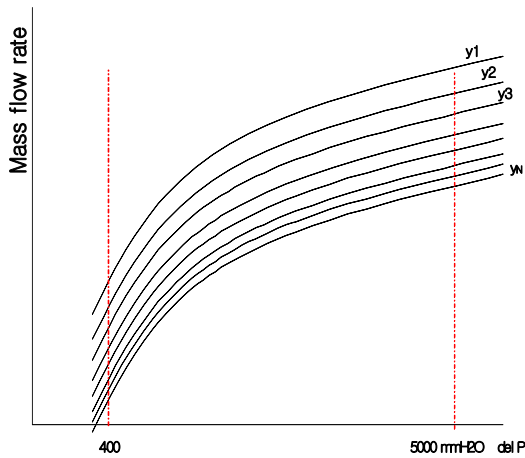


그림 3. 압력차에 대한 유량분포 시험결과 예

그러나, 저공해 연소기의 경우에 재래식 연소기 보다 매우 복잡한 형태를 가지고 있고 라이너 표면에 다수의 홀들이 배치되게 된다. 홀들의 종류 및 개수가 증가함에 따라 시험의 횟수도 증

가하게 되므로 많은 시간이 소요될 것으로 예상된다.

표 1. 유량분포 시험조건(n=4)

#N	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
variant #1	-	-	-	+
variant #2	+	-	-	-
variant #3	-	+	-	-
variant #4	+	-	+	+
variant #5	-	-	+	-
variant #6	+	+	-	+
variant #7	-	+	+	+
variant #8	+	+	+	-

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{bmatrix} \quad (\text{식 1.2})$$

$$G_{tot} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = \frac{1}{4} \times \sum_{j=1}^8 y_j \dots$$

$$= \sum_{i=1}^n G_i = \frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^N y_j \quad (\text{식 1.3})$$

$$G_1 = y_2, \quad G_2 = y_3, \quad G_3 = y_5, \quad G_4 = y_1$$

마) 압력손실 측정(냉간시험)

연소기 시험리그를 제작하고 연소기를 리그에 장착하면 연소기 및 연소기시험리그 등의 결합을 찾고 냉간에서의 압력손실을 확인하는 시험을 가장 먼저하게 된다. 시험실로 유입되는 공기 유량

확인, 센서들의 작동유무, 제어장치들의 원활한 작동 등을 확인하면서 주로 냉간에서 압력손실을 같이 측정하게 된다. 압력손실은 마하수의 제공에 정확하게 비례하기 때문에 공기 유량계의 범위에 대하여 오차를 확인 할 수 있으며 만약 이러한 측정에서 예상 치와 정확하게 일치하지 않을 경우 리그의 불안정한 조립을 확인하고 지속되는 문제가 발생할 시에는 유량계를 재 보정하는 과정을 거쳐야 한다. 이렇게 측정된 압력손실은 3차원 시뮬레이션 유동해석 결과와 비교검토 한다.

## 2.2 연소 시험

### 가) Stability 및 ignition test

점화시험은 크게 ignition loop test와 ignition delay 특성시험 등으로 나누어질 수 있다. 점화 지연이 크게 발생할 경우 후류에 모인 미연 가스들이 폭발할 가능성이 있어 안정성 검토에 매우 중요한 역할을 한다. 또 하나의 점화 안정성 시험은 소염시험이며 점화된 화염이 소멸될 때까지 연료를 줄여가면서 안정된 화염영역을 확보하게 된다. 점화 루프시험을 통하여 다양한 공기유량에 대한 가연영역을 확보할 수 있으며 이 데이터를 엔진의 제어에 적용시킬 수 있다. 점화시험부터는 라이너의 안과 밖을 연마하여 특별한 센서를 장착하지 않고서도 hot spot이나 carbon deformation등을 확인할 수 있도록 한다.

### 나) Fuel scheduling test

제작된 연소기의 pilot과 main에 대한 연료 유량분배를 최적화하기 위해서 연소기의 모든 운전 조건에 대하여 시험을 한다. 그림 4는 전형적인 rpm constant control mode를 갖는 엔진에서의 연료 분배그래프를 보여준다.

Pilot을 이용하여 점화부터 idle까지 엔진을 컨트롤하게 되며 부하의 약 5%정도에서 pilot에서 main으로 변환을 시작하여 각각의 유량을 고정한다. 특히 pilot 유량은 이 지점부터 고정되거나 약간 줄어드는 상태로 운전이 되며 반대로 main이 전체 부하를 감당하도록 선형적으로 운전된

다. 부하 75%에서 저공해 특성을 만족하도록 pilot을 최소화 시키는 모드 변환이 있다. 이러한 알고리즘은 시험을 통해 얻어지게 되며 제어로직에 포함되어 엔진운전을 하게 된다.

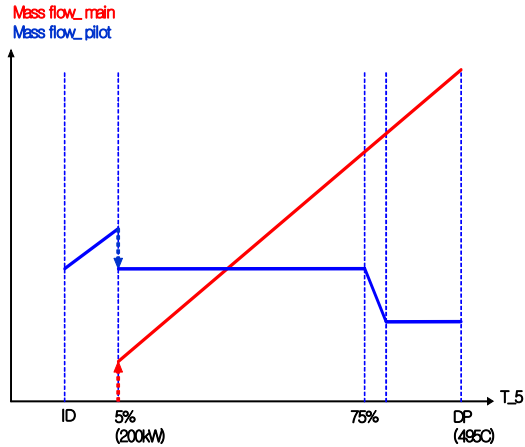


그림 4. Fuel scheduling 개략도

### 다) 연소기 저압시험

그림 5에 저압 성능시험 설비의 일례를 나타내었으며 저압시험을 위한 공기공급시스템은 전기모터를 이용하는 방법과 가스터빈을 이용한 방법 등 두 가지정도가 있다. 전기모터 방식은 모터구동에 의해 압축기가 구동되며 가스터빈 방식은 두 대의 가스터빈을 이용하여 압축기를 구동하는 방식이다. 압축기를 통하여 공급되어진 공기는 히터에 유입되어 최대유량에 대하여 약 수백℃까지 가열되어 공급될 수 있다. 가열된 공기는 두 개의 시험 섹션으로 유입이 되도록 밸브가 설치되어 있으며 시험라인이 동시에 가동이 가능하다. 또한, 연소기에서 생성된 배기가스는 배기용 이젝터 안으로 방출되며, 배기가스에 의해 대기 중의 공기가 빨려나가면서 혼합되어 냉각 및 배출된다. 배기가스에 의한 자동 환기가 실패시를 대비하여 별도 강제 배기 시스템이 갖추어져 있으며, 이 시스템은 Test Shop 내부에 배기가스 또는 연료가스가 감지되면 자동으로 동작한다.

저압 연소시험에서 측정항목은 ①점화 및 화염 안정화 영역 시험, ②연소기 출구 온도 분포,

③버너 헤드, 라이너, Transition Piece의 온도 측정, ④압력 손실 측정, ⑤배가스 Emission 측정, ⑥압력 섭동 측정 등을 수행한다. 온도는 주로 Thermal Paint를 사용하며, 확인용으로 K-type TC를 쓴다. 압력 맥동을 측정하기 위해서는 고속 응답이 가능한 압력 센서를 사용한다. hot spot이 발견되면 그 이후에 k-type의 열전대를 표면에 장착을 하며 이때의 숫자가 너무 많아서 유동에 방해되지 않도록 최소화해야 한다.

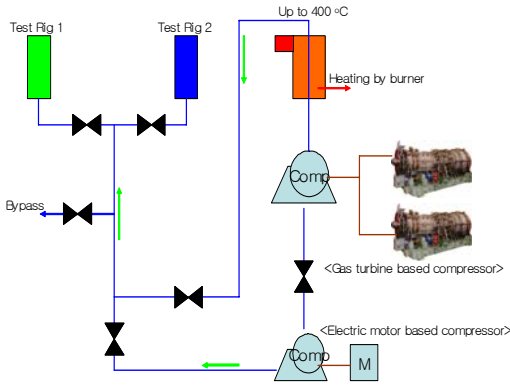


그림 5. 저압 연소성능시험 설비 일례(Zorya-mash社)

라) 연소기 고압시험

대부분의 연소시험은 저압 성능시험에서 완료가 되지만, 배기가스 특성 및 하드웨어의 열부하 등은 운전 조건에 따라 달라질 수 있으므로 고압 시험을 실시하여 확인한다.

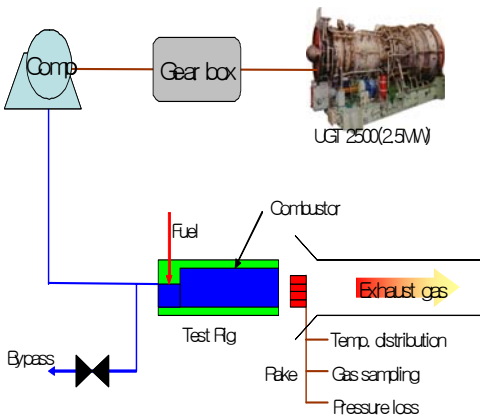


그림 6. Mash사의 고압 성능시험설비 개략도

또한, 실제 운전상태에서의 내구성과 탈 설계를 목적으로 시험하기도 한다. 고압 시험의 항목은 저압 시험의 항목을 거의 동일하게 반복한다.

Z-M사의 고압 시험설비의 개략도를 그림6에 나타내었다. 별도의 히터는 없으나, 12bar까지의 단일압축에 의해서 공기가 가열되며, 감압이 터빈을 통하지 않고 일어나므로 온도는 감압 전후에 거의 동일하게 유지되므로 고온으로 공급가능하다. 압력조절은 리그 주변에 설치된 바이패스 밸브로부터 조절하게 된다.

### 2.3 연소 시험 분석 및 수정

각 시험 단계별로 많은 분석방법과 수정대책이 있을 수 있으며 그 경우는 대부분 재설계를 CFD 등과 단순 비교해서 처리하는 경우가 많다. 그러나 연소기 시험리그에서 수행하는 시험들에서는 성능인자를 확인하는 시험으로 복잡한 수정과정을 가진다. 그중 가장 대표적인 두 가지 문제점에 대하여 수정 및 개선법을 소개하고자 한다.

가) 압력손실이 너무 큰 경우

압력손실은 엔진성능 및 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 압력손실이 요구사양에서 벗어나면 좋지 않다. 특히 저공해 연소기는 여러 가지 제어의 개념을 가지는 복잡한 구조물들을 가지고 있어 압력손실이 재래식 연소기보다 높다. 압력손실이 크게 발생하면 상세히 압력손실을 측정하여 특정 부분을 찾고 그 부분을 수정하는 방식으로 해결하게 된다.

연소상태에서 압력손실 확인을 우선하며 연소기 챔버의 압력은 후단의 static 압력포트에 의한 압력을 그대로 사용한다. 그리고 각각의 부분의 공기공을 지나기 이전의 압력을 probe를 설치하여 확인한다. 스윌러의 경우 스윌러의 공기 입구부 주변 등으로 설치하고 원주방향으로 측정점을 만들어서 시험한다.

나) Pattern factor가 나쁠 경우

다른 어떤 경우보다도 pattern factor가 나쁘면

가장 많은 수정을 감수해야한다. 특히 pattern factor는 알려진 수치해석 프로그램을 통하여서도 예측될 수 없는 부분 중에 하나이다. 그러나, 어느 정도 경향은 예측가능하며 수정횟수 및 시험 횟수를 상당부분 줄여줄 수 있다. 이 경우는 주로 dilution hole을 수정하게 되며 충분한 penetration을 갖도록 여러 측면에서 검토해야 한다. dilution 홀의 개수 조정과 cooling hole과의 관계를 고려해야하며 그러한 수정을 통하여서도 hot spot이 지속될 경우 구멍의 형태를 변경시킨다. dilution hole을 타원형으로 바꾸고 평형 공기공에서 plunge형으로 바꾸는 등의 접근도 한 예이다.

### 3. 결 론

가스터빈 저공해 연소기의 개발을 위하여 필요한 냉간 유동 시험과 연소시험 기술을 확보하였으며 향후 관련 연소시험에 적용 예정이다.

### 참 고 문 헌

1. Lefebvre, W, Gas Turbine Combustion, McGraw-hill series, 1983.
2. 김형모, 박영일, 박부민, "55kW급 저공해 연소기 개발", 한국추진공학회 춘계학술대회, 2005.