

# 가스터빈 엔진의 연소기 성능 시험



이 대 성 (KARI 기술연구부)

- '75-'79 서울대학교 공과대학 기계공학과(학사)
- '79-'81 서울대학교 공과대학 기계공학과(석사)
- '81-'86 Iowa State University(박사)
- '86-'91 Avco Research Laboratory, Textron  
Senior Scientist
- '91-현재 한국항공우주연구소 책임연구원

## 1. 서 론

최근들어 국내에서는 항공기 개발사업들이 본격적으로 진행되고 있으며 또한 열병합 발전에 관한 관심이 날로 높아지고 있다. 이와 병행하여 기계공업의 꽃이라 불리는 항공용 및 산업용 가스터빈의 개발프로그램들이 진행되고 있으며 이에 필요한 설계 및 성능평가기술에 많은 투자가 이루어지기 시작하고 있다.

이들 가스터빈의 공통된 핵심요소는 크게 압축기, 연소기 및 터빈으로 나누어지는데 이중 연소기는 주입된 연료의 효율적 연소를 도모함으로 고엔탈피 유체를 발생시키는 것을 목적으로 한다. 연소기에 요구되는 주요기능은 화염을 안정하게 보존함으로써 유입 연료의 지속적인 연소를 보장하고, 터빈에 고온의 유체를 공급함에 있어서 블레이드 재질이 견딜 수 있는 온도 한계에 맞추어 연소 가스를 회석시켜야 하며, 원심력을 받는 블레이드 재질의 열응력을 최소화시키기 위한 반경 방향 및 횡 방향의 온도 분포를 제공해야 한다. 따라서, 연소기는 가스터빈 전체의 효율 및 안정성과 내구성에 매우 중요한 영향을 미치며, 특히 최근 들어 환경규제가 강화됨에 따라 유해 연소 배기물을 줄이기 위한 연소기 성능개선에 많은 노력을 기울이고 있다.

이러한 연소기의 구조 자체는 복잡하지 않지만, 그 내부에서 일어나는 현상은 유동-열-화학반응(aerothermochemistry)의 복합 형태로 나타나게 되며 특히 액체 연료를 사용할 경우에는 미립화 및 분무된 액적의 증발 등의 물리적 현상까지 겹치게 된다. 이러한 복잡한 현상의 검증에는 이론적인 검토만으로는 어려우므로 선진국에서조차

주로 경험식에 의존하여 설계를 수행하게 되는데, 사용된 경험식들의 타당성을 입증하고 연소기 성능을 최적화 시키기 위하여 개발 단계에서 가스터빈의 다른 구성요소들보다 연소기가 더욱 성능평가시험에 크게 의존하고 있는 실정이다. 본 고에서는 이와 같이 가스터빈 개발에 있어 매우 중요한 연소기의 성능시험기술에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 연소기 개요

일반적으로 가스터빈의 연소기는 그림 1과 같이 diffuser, fuel injector, swirler, liner, casing 등으로 구성되어 있다. Diffuser는 압축기로부터 공급되는 공기를 안정된 연소와 연소에 의한 압력 손실을 줄일 수 있도록 감속시키며, fuel injector는 연료를 미립화/분무화 시켜 liner의 주연소 영역에 공급시킨다. Swirler는 liner의 hole과 더불어 liner 내부에 재순환 영역을 형성시키는 역할을 한다.

연소기의 liner는 주 연소 영역(primary zone), 중간 연소 영역(intermediate zone), 희석 영역(dilution zone)으로 구성된다. 주 연소 영역은 화염을 안정화시키는 역할을 수행하며, 점화가능 운용 범위가 크도록 설계되어야 한다. 중간 연소 영역은

주 연소 영역에서 미처 연소되지 못한 미연 가스가 연소될 수 있도록 하는 영역으로 완전 연소 영역(complete combustion zone)이라고도 한다. 희석 영역은 터빈 입구로 들어가는 연소 가스의 온도를 낮추고 반경 방향, 횡 방향의 온도분포가 고르도록 가스를 섞어주는 역할을 한다. 연소기는 각 부분별 요구조건을 만족하여 연소 효율이 높아야 하며, 아울러 유해 배기물이 적게 배출되도록 설계되어야 한다. 대표적인 유해 배기물로는 CO, HC, NO<sub>x</sub> 등이 있다. 여기서 CO, HC의 감소는 연소 효율 향상으로 이어지므로 효율 향상 방법과 같이 생각할 수 있다. 실제로 CO, HC, CO<sub>2</sub>를 측정하여 연소 효율을 구하게 된다.

이러한 연소기의 주요기능을 실험적으로 검증함에 있어 어려운 점은 연소기 유입 조건을 실제 엔진의 압축기 출구 조건으로 맞추는 일이다. 연소기 유입 온도, 압력, 유량을 실제 엔진에서의 조건으로 맞추기 위해 공기 공급 장치(air supply)와 예열기(heater)가 필요하지만, 이들 장비는 공급 압력과 유량이 증가됨에 따라 가격 상승이 있게 되므로, 시험장비 가격을 절감하기 위하여 실제 설계점에서의 운용 조건이 아닌 모델 운용 조건으로 시험을 수행하여 실제 설계 운용 조건에서의 연소기 특성을 추정하는 경우가 많이 있다.

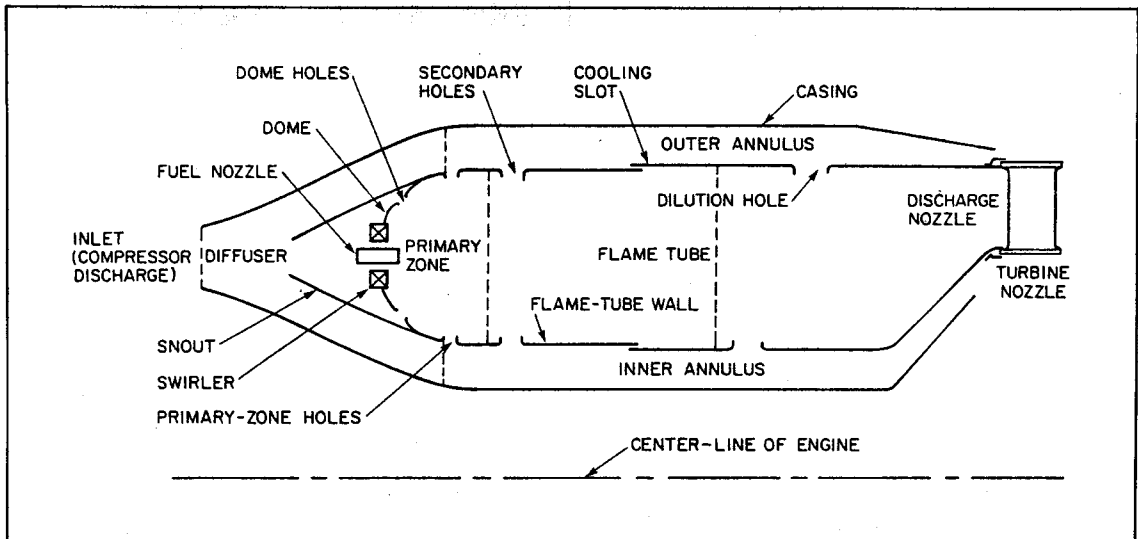


그림 1. 연소기 단면도

### 3. 성능 시험의 종류 및 특성

연소기 성능 시험은 사용되는 연소기 모형에 따라 부분 모형 시험, 축소형 모형 시험, 실물 모형 시험 등으로 나뉘며, 연소의 유무에 따라 비연소 시험과 연소 시험으로 나뉜다.

비연소 시험은 유동장 형태 및 연료와 공기의 혼합 특성을 알아보기 위하여 행하며 그 결과는 연소 시험과 일치하는 부분이 많다. 연소 시험은 터빈의 작동 범위와 일치하는 입구 조건, 압력 및 유량 조건으로 실시하는 것이 이상적이지만 시험 장치의 제약상 모델 운용 조건으로 행하는 경우가 많다. 그 결과로 설계 운용 조건시의 결과를 추정하게 된다.

#### 3.1 비연소 시험

비연소 시험으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- (a) 연소기에 유입하는 공기 유동장의 형태
- (b) 케이싱과 라이너 사이의 유동장
- (c) 점화 플러그와 라이너 고정핀 주위의 유동
- (d) 선회기 출구 흐름
- (e) 선회기와 공기공과의 관계
- (f) 라이너의 형상과 유동장과의 관계
- (g) 라이너 공기공에서의 공기 제트의 관통 형태
- (h) 라이너 냉각 슬릿 부위의 흐름

#### 3.2 연소 시험

##### 3.2.1 상온 상압 시험

연소기의 주요 작동 인자로는 입구 공기의 압력  $P_3$ , 입구 공기 온도  $T_3$ , 평균 유속  $U_3$ , 공기/연료비의 4가지가 있다. 상온 상압 시험의 경우,  $P_3$ ,  $T_3$ 가 실제 조건과 다르지만,  $U_3$ 를 일치시켜 다음의 결과를 얻는다. 이 시험은 비용이 저렴하므로 1차적인 단계로 수행된다.

- (a) 저 부하에서의 연소 특성

- (b) 연소기 출구 온도 분포 형태
- (c) Hot spot의 유무 측정
- (d) 전압 손실 계수 측정
- (e) 라이너 내부의 화염 분포 및 보염기 부분의 화염 형태(화염 색깔, 안정 여부, 화염 길이)

##### 3.2.2 상압 고온 실험

연소 성능과 배기 가스의 생성은 일반적으로 압력보다는 온도에 더 크게 의존한다. 따라서 온도를 실제 조건과 같게 하여 실험함으로써 보다 정확한 생성물을 얻을 수 있다.

- (a) 연소 효율 측정
- (b) 연소기 출구 온도 분포 측정
- (c) Hot spot의 위치 측정
- (d) 화염 분포 및 화염 형태 측정
- (e) 유해 배기물의 배출 성분 측정

위에서 (b)의 출구 온도 분포는 상온 상압 실험과 큰 차이가 없다는 것이 알려져 있다. (c)의 경우 공기/연료비가 같을 때 유입 공기 온도의 차이로 다른 운용 조건하에서의 라이너 벽의 온도를 추정할 수 있다. 상압 실험 조건과 실제 운용조건과의 부합성의 예가 그림 2에 제시되어 있다.

##### 3.2.3 고온 고압 시험

실제 설계 운용 조건과 비슷한 조건에서 행하기 때문에 결과에 대한 신뢰성이 매우 높다. 그러나 실제 운용 조건과 똑같은 조건에서 시험하기 위해서는 실험 장치의 건설, 운전비용이 많이 들기 때문에 모델 운용 조건을 택하는 경우가 많다. 이 경우 실제 설계 운용 조건을 정확히 측정하는 것이 필요하며, 여러가지 제시된 이론들이 사용되게 된다.

연소 시스템은 극단적으로 화학 반응물에 지배되는 시스템과 연료와 공기의 혼합에 지배되는 시스템으로 나눌 수 있다. 어떠한 연소 시스템도 위의 두 가지 현상 모두에 지배되지만 현상이 일어나는 특성 시간을 비교하여 더욱 지배적인 인자를 찾아 위의 두 가지 중 하나로 특정 지을

Test	Relevance				
	None	Poor	Fair	Good	Excellent
Ignition, Ground Level				Good	
Ignition, Altitude			Fair	Good	
Stability, Low pressure			Fair	Good	
Stability, High pressure			Fair	Good	
$\eta < 95 \%$			Fair	Good	
$\eta > 95 \%$		Poor	Fair	Good	
CO & HC, $\eta < 95 \%$			Fair	Good	
CO & HC, $\eta > 95 \%$		Poor	Fair	Good	
NOx			Fair	Good	Excellent
Carbon	None	Poor	Fair	Good	Excellent
Heat transfer			Fair	Good	Excellent
Wall Temperatures			Fair	Good	Excellent
Temperature traverse quality			Fair	Good	Excellent
Pressure loss			Fair	Good	Excellent
Alternative fuels			Fair	Good	Excellent

그림 2. 상압연소시 실제 운용조건과의 부합성

수 있다. 잘 설계된 가스터빈 엔진의 경우, 저압에서도 연료의 증발이 매우 빠르고 연소 시간에 비하여 연료와 공기의 혼합 시간이 훨씬 짧은 것으로 알려져 있다. 화학 반응에 의해 지배되는 시스템의 모델 중 연소기 설계와 시험 데이터 보정에 있어서 연소 속도 모델(burning velocity model)이 가장 널리 사용된다.

Lefebvre와 Hall 및 Murray 등이 많은 저압 연소시험을 통해 제시한 연소 속도 모델에 의하면, 연료와 공기의 혼합시간과 연료의 증발시간이 매우 짧다고 가정하였을 때 연소 효율은 다음과 같은 변수의 함수로 표시된다.

$$\eta_c = f(\theta) = f \left[ \frac{P_3^{1.75} A_{ref} D_{ref}^{0.75} \exp(T_3/300)}{m_a} \right]$$

단,  $m_a$  : 연소영역에 유입되는 미연혼합가스의 질량

- $P_3$  : 연소기 유입 공기 압력
- $T_3$  : 연소기 유입 공기 온도
- $A_{ref}$  : 연소기 케이싱 최대 단면적
- $D_{ref}$  : 연소기 케이싱 최대 지름

위의 경험식에서 볼 때 동일한 제원과 압력손실을 갖는 연소기의 경우, 연소 현상에 가장 큰 영향을 주는 것은 온도로 exponential 항에 비례하고, 그 다음이 압력으로 1.75 승에 비례하고 유량은 1 승에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 모델 운용 조건에서 실험할 경우, 온도는 설계점 근처에 맞추고 그 다음에 압력, 유량의 순으로 맞추는 것이 바람직하다.

모델 운용 조건에서 압력을 실제 압력과 다르게 할 경우 증발율이 유한할 가능성이 있다. 이 경우 열 발생률이 화학 반응과 증발에 의해 제한되며, 연소 효율은 증발 효율  $\eta_{evap}$ 와  $\theta$  효율  $\eta_c$ 의 곱으로

표현될 수 있다. 또한, 연료와 공기의 혼합이 연소 성능에 큰 영향을 미치는 경우는 다음과 같은 관계식이 사용되기도 한다.

$$\eta_c = f \left[ \frac{P_3 A_{ref}}{m_a T_3^{0.5}} \right] \left[ \frac{\Delta P_{lin}}{P_3} \right]^{0.5}$$

단,  $\Delta P_{lin}$ : 연소기 라이너의 압력손실

#### 4. 성능 시험 장치

그림 3은 일반적인 연소기의 성능시험장비와 측정장비의 개략도를 보이고 있다.

##### 4.1 공기 공급 장치

공기 공급 장치는 연소기 설계점에서의 압력/온도의 공기를 공급할 수 있는 것이 바람직하다.

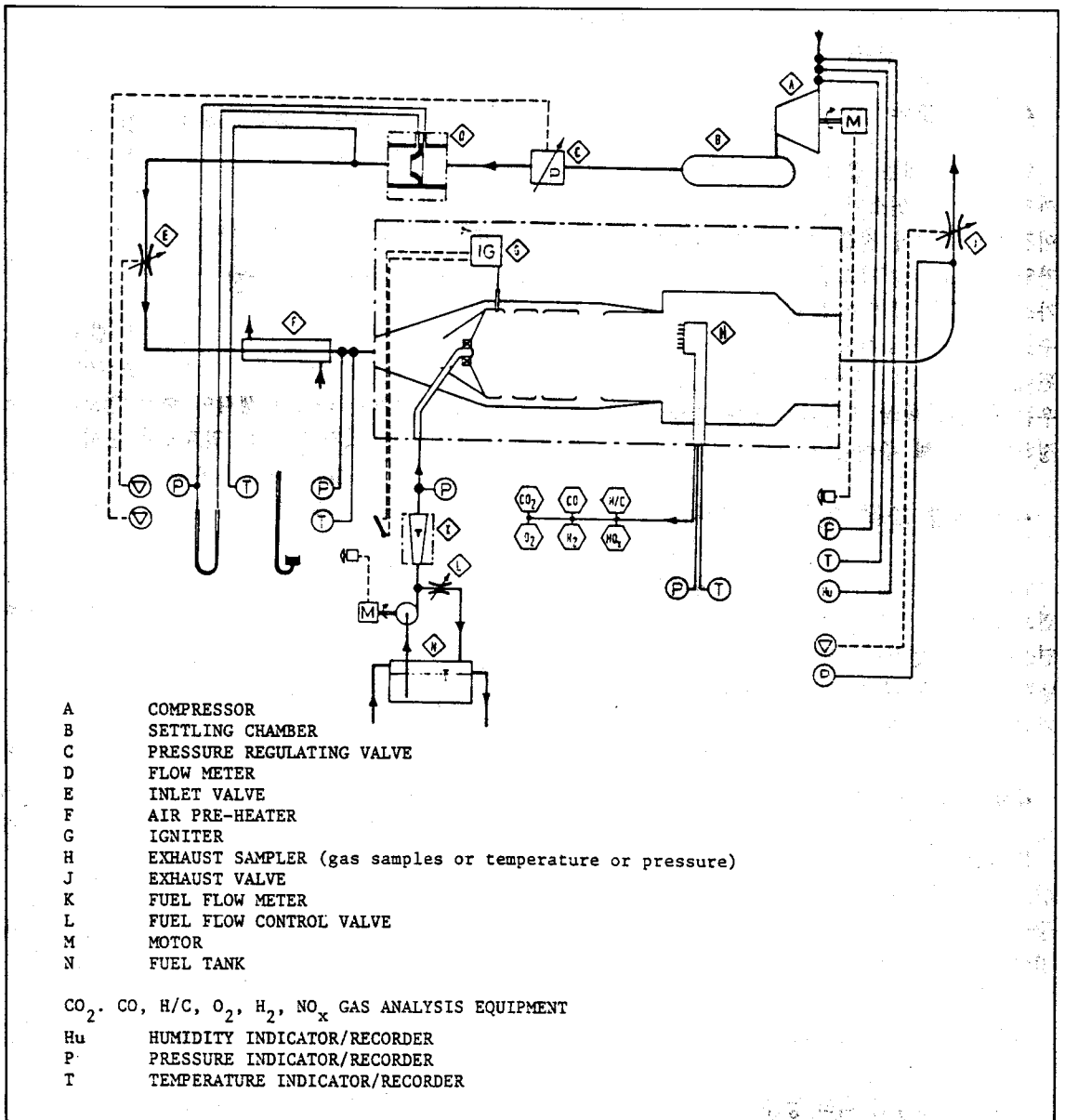


그림 3. 기본 성능 시험 장비 개략도

그런데 통상 공기 공급 장치의 가격은 유입 공기량에 비례하고 유입 압력의 15 승에 비례하므로 압력 및 유량이 증가함에 따라 엄청난 가격 상승이 있게 된다. 따라서 공기 공급 장치의 선택에는 모델링 기법, 연소기 크기 scaling, sector test, 상압 test 및 scaling 등이 고려되어야 한다. 공기 공급 장치는 맥동(pulsation)이 없이 연속적으로 공기를 공급할 수 있어야 한다. 만일 맥동이 발생하게 되면 이것은 인공적으로 높은 연소율과 열전달을 유발하는 것이 된다. 또한 이것은 측정 상의 오차를 유발하는 주요 원인이 된다.

#### 4.2 열 교환 장치

열 교환 장치는 공급되는 공기를 원하는 온도까지 가열하여 연소기 입구에 보내는 역할을 한다. 이것에는 유량이 작을 경우 많이 사용되는 전기 가열법, 연소 배기가스를 열교환기에 보내어 유입 가스를 데우는 배기 가스 이용법, 공급되는 공기에 수소를 넣어 연소시키는 수소 연소법 등이 이용된다. 유입공기를 직접 연소하여 가열시키는 경우는 연소에 의해 소모된 산소를 정량적으로 측정하여 보충해 주어야 한다.

#### 4.3 배압 조절 및 냉각 장치

연소기 내의 압력을 일정하게 유지시켜 고압 연소가 가능하도록 하며, 연소 생성물을 수집하여 연소 가스를 냉각시키고 이것을 대기로 배출한다. 냉각은 냉각수 분무 또는 외기로부터의 저온 공기의 유입에 의해서 이루어진다.

#### 4.4 연료 공급 장치

연료는 액체 연료 공급 장치 또는 천연 가스 연료 공급 장치에서 시험 연소기로 공급된다. 연료 공급 장치는 연료가 시험 연소기에 공급되기 이전에 연료의 in-line calibration을 수행한다.

#### 4.5 연소기 시험부와 test rig

연소기 시험부는 여러 종류의 사이즈와 configu-

ration에 해당하는 연소기를 장착할 수 있게 총괄적이어야 한다. 가능한 많은 연소 영역을 볼 수 있도록 설계되어야 하며, 측정 장비로는 냉각수 냉각 방식 rake 및 자동적으로 프로그램화되어 조절되는 traversing 장비가 필요하다. 또한 test rig 상에서 압축기 출구의 속도분포와 swirl 각이 조절되는 것이 필요하다.

### 5. 연소기 성능 시험

#### 5.1 시험항목

연소기의 성능 시험에는 압력 손실 측정, 점화 시험, 안정성 시험, 연소 효율 측정, 출구 온도 분포 측정, 라이너 온도 분포 측정, 배기 가스 측정 등이 수행된다.

##### 5.1.1 압력 손실 측정

압력 손실은 벽면과의 마찰, 와류 발생, 혼합 및 온도 상승에 의해 발생한다. 압력 손실이 클수록 유동장 제어나 라이너 생각이 쉬워 연소기가 소형화 될 수 있지만, 대신 열효율과 출력은 떨어진다. 압력 손실은 원인에 따라 디퓨져 손실과 라이너 손실로 나눌 수 있다. 여기서 디퓨져 손실은 연소나 혼합 과정에 기여하지 못하므로 최소화 되는 것이 바람직하다. 라이너 손실은 연료와 공기의 혼합 과정에 기여하므로 전체 손실에 대한 라이너 손실의 비가 높은 것이 바람직하다.

##### 5.1.2 점화 시험

가스터빈 엔진은 점화가 쉽고 신뢰성 있게 이루어져야 하는데, 이것은 보조 장치의 가격, 무게, 전력 소모율을 낮추는 것과 직결된다. 점화 시험의 절차는 다음과 같다.

- 유입 공기의 압력, 온도, 유량을 특정한 값에 고정시킨다.
- 스파크를 튀긴다.
- 5번의 스파크를 튀기는 동안, 또는 4초 동안 연료를 분사한다.
- 점화 여부를 검사하여 점화가 일어나지 않았

으면 이 때의 운용 상태를 no-light 조건으로 지정하고, 유입 공기 유량을 감소시킨다.

- 점화가 일어날 시, 이 때의 운용 상태를 light 조건으로 지정하고, 유입 공기의 유량을 증가시킨다.
- 유입 압력과 온도를 바꾸면서 위의 실험을 반복한다.

이때 점화 여부를 확인하는 방법으로, 윈도우를 통해 직접 확인하는 방법과 온도 센서를 통한 방법이 병행된다. 본 시험을 통해 얻어지는 점화 가능 선도의 예가 그림 4에 제시되어 있다.

### 5.1.3 안정성 시험

연소기는 운용 조건이 변해도, 화염이 안정하게

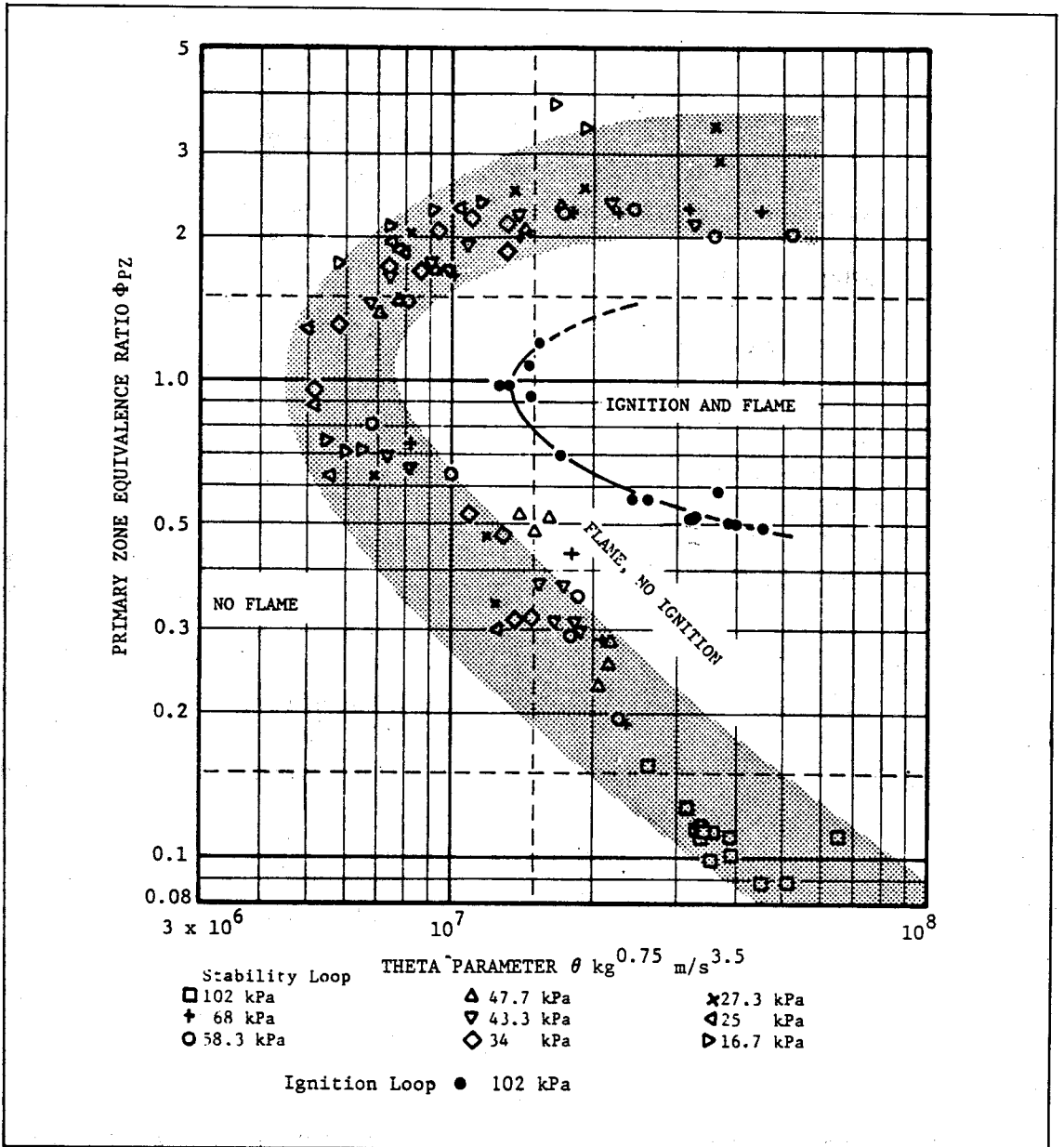


그림 4. 점화 가능 선도

보존되어야 한다. 화염의 안정성에 영향을 미치는 인자로 유량, 연료/공기비, 유입 온도, 압력 등이 있다. 이러한 운용 조건을 변화시키면서 설계된 연소기의 안정 영역을 도출한다. 안정성 시험의 절차는 다음과 같다.

**Weak Extinction Limit 결정**

- 점화 시험에서 얻은 점화 가능 영역상의 특정한 점을 택하여 점화시킨다.
- 점화가 된 후 연료 유량을 감소시키면서 화염 유지 여부를 검사한다.
- 화염이 소멸되면 이때의 운용 상태를 weak extinction limit로 지정한다.

**Rich Extinction Limit 결정**

- Weak extinction limit의 결정 과정과는 반대로 연료 유량을 증가시키면서 화염 유지여부를 검사한다.
- 화염이 소멸되면 이 때의 운용 상태를 rich extinction limit로 지정한다.

유입 공기의 유량, 압력, 온도를 바꾸면서 위의 시험을 수행한다. 여기서 화염의 소멸 여부 확인으로 원도우를 통해 확인하는 방법과 온도 센서를 통한 확인 방법이 병행된다. 본 시험을 통해 얻어지는 안정 운용 영역 선도의 예가 그림 5에 제시되어 있다.

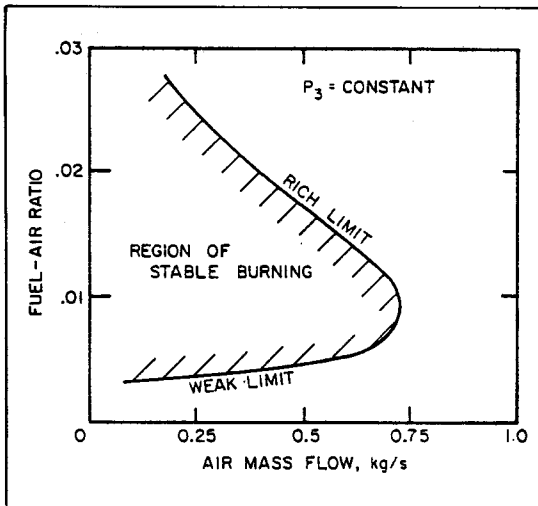


그림 5. 안정 영역 선도

**5.1.4 연소 효율 측정**

연소기 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_c = \frac{\text{연소기 입출구 가스의 엔탈피 차}}{\text{연료 투입 열량}} = \frac{(m_a + m_f)h_4 - m_a h_3}{m_f \Delta H_f}$$

여기서  $m_a$ ,  $m_f$ 는 각각 공기 및 연료 투입량,  $h_3$  및  $h_4$ 는 연소기 입/출구의 엔탈피, 그리고  $\Delta H_f$ 는 연료의 발열량이다. 이 때 연소기 출구 가스의 온도 측정을 위해서 출구에 열전대를 등간격으로 배치한다.

다른 방법으로 뒤에 설명될 배기 가스 성분을 분석하여 연소 효율을 측정하는 방법이 있는데 효율 측정의 정밀도가 높기 때문에 근래에는 이 방법이 주로 사용된다. 시험을 통하여 얻어지는 연소 효율 선도의 예를 그림 6에 제시한다.

**5.1.5 출구 온도 분포 측정**

연소기 출구 온도 분포는 노즐의 guide vane과 터빈 블레이드의 수명에 직접적인 영향을 준다. 온도는 연소기 출구 면에서 등각도로 배치된 열전대 rake에서 측정하게 되는데 각 rake에는 보통 8~10개의 열전대가 반경 방향으로 등간격으로 배치되어 있다.

본 시험에서는 inlet guide vane의 수명에 관계되는 값인 Circumferential traverse quality와 고속 회전하는 터빈 블레이드의 수명에 관계되는 값인 Radial traverse quality를 다음과 같이 측정하게 된다.

$$\text{Circumferential traverse quality} = (T_{\text{peak}} - T_{\text{mean}}) / (\text{Mean Temp. Rise})$$

$$\text{Radial traverse quality} = (T_{\text{radial peak}} - T_{\text{mean}}) / (\text{Mean Temp. Rise})$$

**5.1.6 라이너 온도 분포 측정**

라이너 표면에서 국부적 고온부(hot spot)의 존재는 라이너 수명에 큰 영향을 미친다. 라이너



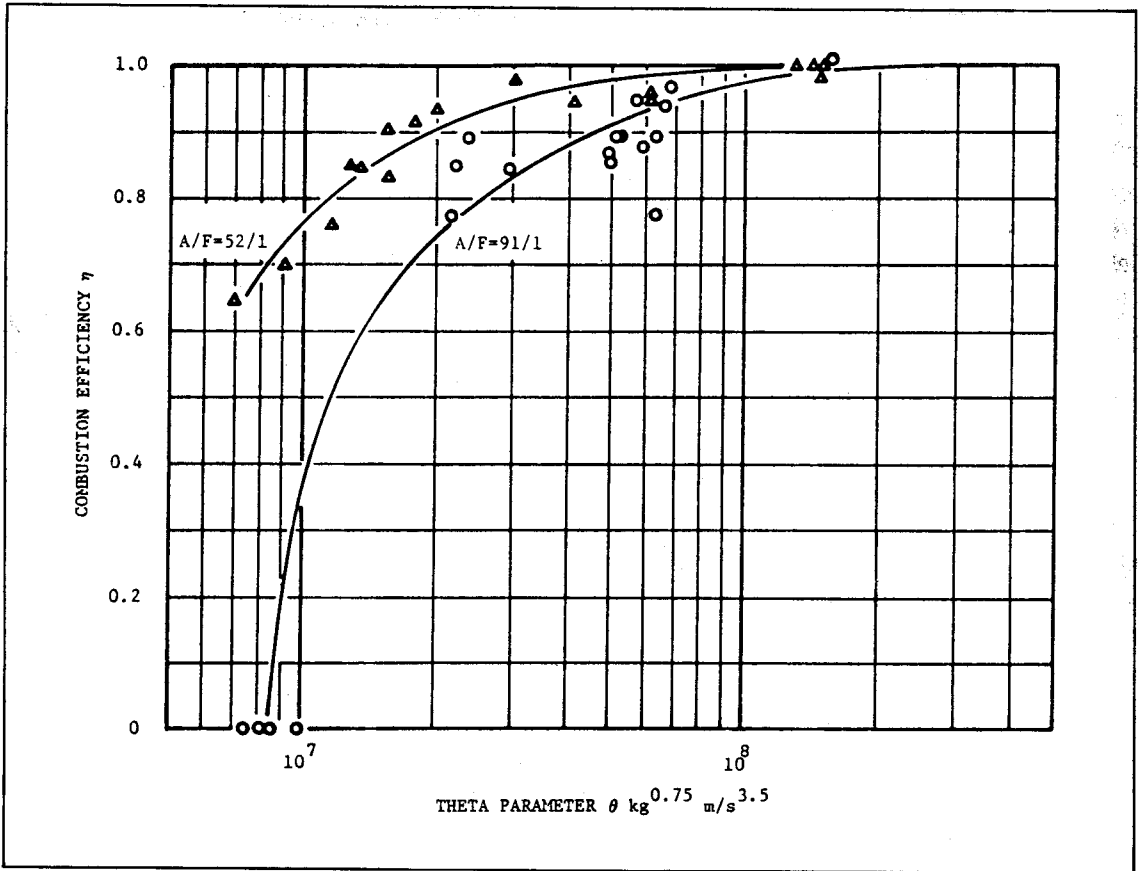


그림 6. 연소 효율 선도

온도 분포 측정에는 thermal paint가 널리 사용된다. 연소기를 특정 운용 상태에서 15분간 유지한 후 paint의 색깔을 조사한다. 이 때 유입 공기의 오염은 paint의 온도 반응에 영향을 미치므로, 오염 정도의 영향을 고려하여 해석해야 한다. Thermal paint로 국부적 고온부를 찾아낸 후, 보다 정확한 온도 값을 찾아내기 위해 표면 열전대를 부착하여 시험한다.

### 5.1.7 배기물 측정

연소 효율을 계산하기 위해서는  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$ 가 측정되어야 한다. 효율은 미연 가스와 부분적으로 연소된 연소 생성물의 양 또는 carbon balance에 의해 측정된다.  $\text{NO}_x$ 의 생성율은 온도에 의존하기 때문에 고온의 유체를 발생시켜야 하는 고효율 목표와는 상반 관계를 갖는다. 따라서 고

효율을 유지하면서  $\text{NO}_x$ 를 저감시키기 위해서는 특별한 설계가 요구된다.

### 5.1.8 유속 측정

연소기 설계에 있어서 라이너 구멍으로 들어가는 공기의 속도와 방향은 매우 중요하다. 주연소 영역으로 유입되는 공기는 화염의 재순환구조를 형성하여 안정성을 도모함과 아울러 라이너를 적절히 냉각해야 한다. 완전 연소 영역으로 유입되는 공기는 충분한 혼합을 이루어 완전 연소를 도모해야 한다. 희석 영역으로 유입되는 공기는 연소기 출구 온도를 고르게 할 수 있어야 한다. 따라서 각 설계 관심 분야의 유속이 설계한 대로 되었는가를 측정하는 것이 매우 중요하다. 이 시험은 시험장치 구성의 제약 때문에 주로 비연소 실험(cold test)으로 측정한다.

### 5.1.9 가시화 실험

이 실험은 주로 재순환 영역 구조의 정성적 구조를 측정하는데 주안점을 둔다. 이 영역에 창을 만들어, 유체의 밀도 구배에 의하여 단 색광이 산란되는 정도를 측정하여, 연소기 유동 구조를 파악하는 솔리렌 광학 장치를 이용한다. 이 방법에 의해 화염의 안정성 여부, 연료와 공기의 혼합과정 등을 파악할 수 있다.

## 5.2 계측방법

### 5.2.1 온도 측정

연소기의 내부 및 배기가스 온도는 여러 가지 방법으로 측정될 수 있다. 크게는 접촉(intrusive) 방식 및 비접촉(non-intrusive) 방식으로 나눌 수 있는데 이것을 조금 더 세분하면 표면 온도를 측정할 것인가 가스온도를 측정할 것인가로 나눌 수 있다. 계측 방법의 선택에는 적용 가능성, 가격, 신뢰성 등이 고려되어야 한다.

#### 1) 접촉식 온도 측정 방법

연소기 개발에 있어 높은 시간 해상도와 공간 해상도를 지닌 온도 측정이 요구된다. 센서는 라이너의 국부적 고온부와 연소기 출구온도 분포를 정할 수 있을 만한 공간적 해상도를 가져야 한다. 접촉(intrusive)식 온도측정 방식에서 센서는 연소기의 고온가스 조건에 노출되기 때문에 센서가 견디기에 매우 혹독한 조건이 형성된다. 따라서 센서 설계시 특별한 주의가 필요하다.

가장 널리 사용되는 열전대(thermocouple) 프로브는 연소기 성능시험시 요구되는 공간 및 시간 분해도를 제공할 수 있다. 그러나 이것은 전도, 복사, 촉매 반응, 대류 열전달로 인한 여러 종류의 오차가 발생하므로 이를 적절히 보정해야만 한다. 열전대의 접합부를 산화 실리콘(silicon oxide)으로 코팅함으로써 전도 및 촉매반응에 의해 발생하는 오차를 줄일 수 있다. 또한 접합부를 shield 함으로써 복사 효과를 상당히 감소시킬 수 있다.

열전대의 온도 응답 지연시간(response time)은 재료의 물리적 특성과 주위 유동에 관계되는 값인

시상수(time constant)에 의해 좌우되는데, 빠른 응답특성을 얻기 위해서는 wire의 직경이 작아야 한다. 접합부의 크기와 직경은 제조상의 정밀가공 한계를 만족하고 연소기 출구 환경에 견딜 수 있도록 접합부가 충분히 두꺼워야 하는데 이것은 응답시간을 늘리는 효과를 가져온다. 프로브의 성능이 오래 유지되기 위해서는 접합부에 보호막을 설치하는 것이 필요하나 이 막을 통한 열 전달율이 낮으므로 응답지연 시간을 늘리는 효과가 있다. 따라서 열전대의 내구성과 응답시간 사이의 적절한 trade-off가 필요하다.

유체식(fluidic) 온도측정 센서는 주로 500K 부근의 엔진 압축기 출구온도를 측정하는데 주로 이용되어 왔다. 이 장치는 유체의 진동(fluidic oscillator) 주파수가 그것을 통과하는 가스의 온도에 의해 결정된다는 것을 원리로 한다. 연소기 내부나 엔진 출구영역으로부터의 고온가스는 사각형 모양의 오리피스에 들어가 프로브 내부의 splitter에 충돌하여 진동을 발생시킨다. 이 때 센서 몸체의 cavity는 가스온도에 따른 주파수로 진동하게 되며 이 진동은 전기식 압력 변환 장치(piezoelectric pressure transducer)로 전달된다. 측정값의 보정은 측정시의 압력 및 가스 조성에 따라 좌우된다.

한편 표면 온도 측정은 요소 수명을 예측하는데 있어 매우 중요하며 이에 표면열전대가 널리 사용된다. 이 경우 측정 데이터의 보정을 위한 표준화된 방법들이 잘 정립되어 있으나 접합부 및 lead 선의 장착이 측정하고자 하는 온도 분포에 영향을 미치는 단점이 있다. 이러한 영향을 없애기 위해 측정하고자 하는 위치에 홈을 파서 접합부를 장착하게 되는데 이 때에도 유동의 교란과 lead 선으로의 열전달 효과 때문에 해석상의 어려움이 수반된다.

연소기 라이너 표면온도 측정 기법 중에 가장 유용한 것으로 알려진 것은 온도 지시 페인트(thermal paint)이다. 이것은 시험부의 온도가 정해진 한계치를 초과할 때 화학반응에 의해서 페인트의 색깔이 영구적으로 변하는 원리를 이용한다. 시험장치 가동 후 라이너에 칠했던 페인트의 색깔 분포를 조사함으로써 온도 수준, 온도 구배, 국부적 고온부에 대한 풍부한 정보를 얻을 수 있다. 그런데

이 기법을 고온, 고속의 가스 유동에 적용시키는데는 상당한 기술 및 숙련이 필요하며 숙련된 시험자에 의해 해석이 수행될 경우 오차는 30°C 이내인 것으로 알려져 있다.

2) 비접촉식 온도 측정 방법

높은 온도와 부식성이 높은 연소가스의 유동은 접촉식 온도 측정에 부식, 마모 등의 문제를 발생시킨다. 또한 측정하고자하는 위치에서 유동과 온도 분포에 교란을 주게 된다. 따라서 이러한 문제를 보완하기 위해 측정할 위치에서의 열복사를 측정하여 온도를 계속하는 비접촉식 온도 측정 방법이 활발히 연구되고 있다.

복사 광온계(radiation pyrometer)는 최근에 가스터빈 블레이드 온도 측정에 많이 이용되고 있다. 블레이드에서 방출된 복사에너지는 엔진 내에 장착된 센서에 모이게 된다. 모아진 에너지는 광섬유 케이블을 통하여 실리콘 photovoltaic 탐지기에 전달된다. 데이터 처리 장치는 탐지기의 출력을 온도 데이터로 바꾼다. 측정시 부유 입자로 인한 광학부품의 오염 및 광학 요소의 열적 성능 저하에 의해 복사율이 바뀌므로 이에 대한 주의가 요망된다.

적외선 온도 측정 장비는 온도 분포가 특히 중요시될 경우 유용하다. 표면 온도가 200°C를 넘고 가시화될 수 있다면 온도 분포는 적외선으로 촬영되어서 가시화될 수 있다. 이것의 정확도는 2°C 이내이고 1.5mm 이하의 공간 해상도로 가진다. 이 방법을 사용하는데 있어 주의해야 할 점은 표면의 복사율이 보는 각도 혹은 작은 부유물에 의한 광학기구의 오염에 의해서 달라질 수 있다는 것이다.

최근 들어 레이저를 이용한 비접촉식 온도 측정 방법들이 개발되고 있으며 그중 CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) 방법이 비교적 많이 사용되고 있다. 이 방법은 온도 측정뿐만 아니라 속도 및 배기물 성분의 농도 측정도 가능한 장점이 있으나 측정장비 및 해석이 복잡하여 아직 보편화되고 있지 못하고 있다.

5.2.2 유속 계측

연소기 개발단계에서 시스템 전체의 공기역학적

및 열역학적 성능을 예측하는데 있어 연소기 내의 속도장(velocity field)을 아는 것이 필요하다. 연소기 성능 및 압력 손실을 결정하는데 있어 디퓨저에서부터 애널러 영역 및 터빈 입구를 통과하는 속도 변화가 중요하며, 냉각특성을 이해하는데 있어 난류강도를 측정할 필요가 있다.

1) 접촉식 속도 측정 방법

유동의 국부적 속도 측정은 pitot tube에 의해 이루어질 수 있다. 유동의 온도를 알고 정압(static pressure)이 일정할 때 전압 및 벽면에서의 정압력을 측정하면 속도 분포를 얻을 수 있다. 만일 정압이 일정하지 않다면 pitot-static tube를 사용하는 것이 필요하다. 3차원 속도 분포의 경우 여러 각도에서 유속을 측정하는 것이 필요한데 이것은 다섯 개의 구멍을 가진 5공 프로브에 의해 이루어질 수 있다. 이 장비는 넓은 접근 속도각에 걸쳐 유동의 정압과 방향 및 속도를 측정할 수 있게 한다.

유동의 속도뿐 아니라 난류수준도 계측하기 위한 장비로 열선 유속계(hot wire anemometry) 및 열필름 유속계(hot film anemometry)가 있는데 이들은 기계적 강도한계 및 보정에 있어서의 비선형적 특성 때문에 고온환경에서의 측정에 부적합한 것으로 인식되어 왔다. 그러나 최근에는 적용범위가 넓어짐에 따라 이것의 유용성에 관한 관심이 높아져 가고 있다. 이 장치는 가열된 센서가 그것을 지나는 유동에 의해서 냉각되는 정도를 측정하는 원리를 이용한 것이다.

2) 비접촉식 속도 측정 방법

비접촉식 속도 측정 방법으로는 레이저를 사용한 LDA(Laser Doppler Anemometry)가 가장 널리 사용되고 있다. 이 경우 유동에 교란을 주지 않아 정확도를 높일 수 있는 장점이 있으나 광학계를 사용하므로 측정하고자 하는 형상이나 부위에 한계가 있으며 특히 표면근처에서는 표면에서의 레이저 빔의 산란으로 인하여 noise가 심하여 정확도가 급격히 떨어지는 단점이 있다. 또한 속도측정에 필요한 seeding에 세심한 주위가 필요하다.

### 5.2.3 가스 샘플링

배기가스의 측정은 연소기의 연소효율 측정과 배출되는 가스의 양이 배기가스 규제치에 맞는 가를 조사하기 위해 수행된다. 연소기의 여러 운용 조건 즉 연소기 유입온도, 압력, 유량, 공기/연료비 등에 따른 배기가스 변화를 측정하는 것이 중요하다. 왜냐하면 전체적인 배기가스 요구조건은 특정한 운용 조건에 국한되지 않고 전 사이클에 걸친 배기가스 특성과 관계되기 때문이다. 배기가스 분석은 우선 전체를 대표하는 샘플링을 한 다음 샘플링한 가스가 분리가 일어나지 않도록 분석계로 보내어 성분을 분석하게 된다. 배기 조성 대표 샘플링에서 특히 고려해야 할 것은 유동 교란, 프로브 및 샘플링 관에서의 화학반응, 배기가스 분포의 공간 구배 등이다. 배기가스 화학종의 농도 구배는 매우 급격하며 특히 연소기 출구부분에서 크다. 따라서 가스농도의 평균값을 구하기 위해서는 여러 점을 조사하는 것이 필요하다.

샘플링시의 화학조성을 유지하기 위하여 채취된 가스를 프로브 안에서 소염시키는 것이 필요한데 일반적으로 온도가 1500K 이상일 경우에는 CO, NO, SO<sub>2</sub>와 같은 화학종의 반응을 고려해야 한다. 또한 프로브를 설계하는데 있어 HC의 영향이 고려돼야 한다. 이는 미연 탄화수소로 인해 NO와 NO<sub>2</sub>를 채집하고 전달하는데 있어서 온도 범위 100~300°C에서 NO<sub>x</sub>로 산화되어 감소될 수 있다는 점 때문이다. 고온에서 일어날 가능성이 있는 화학반응을 억제하기 위하여 1000~1500K 사이의 온도에서는 반응을 10<sup>4</sup>deg K/sec의 소염율로 소염시키는 것이 필요하다. 1000K 이하에서는 10<sup>4</sup>deg K/sec면 충분하다.

온도의 강하는 프로브 내에서 가스를 단열 팽창 시키거나 냉각수에 의한 방법이 있는데 냉각수에 의한 소염을 이용할 경우 빠른 소염이 이루어질 수 있다. 그러나 만일 온도가 이슬점(dew point) 미만으로 떨어질 때 냉각수가 NO와 SO<sub>2</sub>를 흡수하는 것을 주의해야 한다. EPA에서는 이러한 소염상의 문제를 해결하기 위해 샘플의 체류시간(residence time)을 2초내로 하고 또한 온도를 150±5°C로 유지하는 것을 추천한다. 또한 샘플링 관의

재료로 스테인리스나 테플론을 쓰는 것을 권장한다.

### 5.2.4 화염가시화 기법

연소기 개발의 초기단계에서 라이너 내부의 유동가시화를 위해서는 water flow 가시화 기법이 많이 사용되는데 물을 사용한 실험은 공기를 사용한 실험에 비해 간단하기 때문에 유체 유동의 규명에 흔히 사용된다. 이러한 analogy 시험은 레이놀즈수의 유추와 같은 similitude 법칙에 의하여 지배된다. 대부분의 가스터빈 연소기를 모사하기 위해서는 모델의 레이놀즈수가 난류유동을 충분히 모사할 수 있을 만큼 레이놀즈수가 커야 한다.

화염연구를 위한 도구로서의 화염촬영은 특히 비균질한 유동 조건에서 매우 중요한 실험기법이다. 정상적인 화염 특성의 연구하기 위해서는 일반 카메라가 사용되며 빠르게 일어나는 현상을 가시화하기 위해서는 스파크 촬영이나 펄스 레이저나 혹은 고속카메라를 사용한다. 가시적인 현상을 보다 분명히 하기 위해서는 Shadow, Schlieren, Interferometric 기법들이 사용된다.

### 5.2.5 분무특성의 측정

액적 크기를 측정하는 방법은 여러 가지가 있는데 이중 직접 방법은 액적을 산화 마그네슘이나 그을음(soot)를 코팅한 슬라이드에 충돌시켜서 액적의 자취를 피막층에 남게 하여 액적크기를 측정하는 방법이다. 이 방법의 문제점은 슬라이드에 너무 많은 액적이 부딪히면 자국이 중복되어 오차가 매우 커지게 되고 너무 적은 액적이 부딪치면 표본 데이터의 신뢰성이 매우 떨어지게 된다는 점이다. 또 다른 문제점은 액적의 증발과 수집 효율이다. 작은 액적의 유지시간은 매우 짧기 때문에 액적의 증발효과는 매우 중요하다. 에어 블라스트 무화기에서는 큰 액적은 슬라이드 표면에 충돌할 수 있는 충분한 관성력을 가지지만 작은 액적은 유동선(streamline)을 따라 움직이는 경향을 보이기 때문에 측정된 데이터는 실제 액적 크기보다 큰 값을 나타내는 문제가 생긴다. 또 슬라이드에 만들어진 자국은 액적이 납작하게

찌그러진 상태로 만들어진 것이기 때문에 본래 구형 체적에서의 보정계수를 얻기 위한 보정계수를 결정하여야 하는데 이 값은 연료와 코팅의 성질에 따라 달라지게 된다.

근래에는 광학적인 방법을 이용하여 액적의 크기와 분포를 측정한다. 이 방법은 표본장치를 유동속에 삽입시키지 않아도 되는 장점이 있다. 모노크롬 빔(monochrome beam)이 분무를 지나면서 생기는 산란된 빛의 강도(intensity) 분포를 직접 측정하여 SMD(Sauter Mean Diameter)를 구하는 방법이 있고 수정된 방법으로써 강도 분포 측정 대신에 산란 에너지 분포를 이용하는 측정법이 있다. 그 밖에 사진 측정법이 있고 최근에는 새로운 레이저 산란(laser scattering) 기법에 대한 관심이 고조되고 있다.

## 6. 결 론

본 고에서는 이상과 같이 가스터빈 연소기 성능 시험의 전반에 대해서 기술하였다. 가스터빈 엔진의 부품으로서 연소기는 압력 손실, 연소 효율, 출구 온도 분포, 배기 가스량 등의 주요설계 성능 요구 조건의 만족여부를 검증해야하는 만큼 개발 단계에서 연소기의 성능 시험은 매우 중요하나 앞서 언급한 바와 같이 연소기의 성능시험에는 많은 시험설비의 투자와 오랜 경험과 know-how의 축적이 필수적이다.

현재까지 국내에서 연소기 및 연소현상에 관한 연구는 비교적 활발히 진행되고 있으나 대부분 자동차 엔진 등 내연기관에 관한 연구에 치우쳐 있으며 가스터빈 연소기에 대한 연구실적은 매우 미비한 형편이다. 그나마 실험설비의 제약으로

인해 대부분 이론적 해석이나 수치해석에 국한되고 있는 실정이다. 이러한 시점에 국내에서 자체 개발되고 있는 1MW급 산업용 가스터빈과 연계되어 항공우주연구소에 본격적인 연소기 성능시험설비가 갖추어지고 있는 것은 매우 바람직한 일이며 이를 기회로 국내의 가스터빈 연소기 관련 설계 및 성능시험기술에 획기적인 도약을 기대해 본다.

## 참 고 문 헌

- [1] Dils, R.R. and Follansbee, P.S., "High Temperature Sputtered Surface Sensor," Paper No. 75224, Proceedings of the Twentieth International Instrumentation Symposium.
- [2] Type, L.C., "Temperature Indicating Paints," Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol.152, 1945, pp.226-231.
- [3] National Gas Turbine Establishment, England, Private Communication, 1975.
- [4] Doyle, B.W., "Sampling a Turbine Engine Exhaust for Average Emissions," ASME Paper No.73-WA/GT-9.
- [5] Lipfert, F.W., "Correlation of Gas Turbine Emission Data," ASME Paper No. 72-GT-60.
- [6] Merzkirch, W.F., "Making Flows Visible," International Science and Technology, No. 58, October 1966, pp.46-56.
- [7] "The Design and Development of Gas Turbine Combustors," Northern Research and Engineering Corporation.