

가스터빈 연소기의 Emission 제어기술



안 국 영
(KIMM 열유체시스템연구부)

- '76-'80 한양대학교 공과대학 기계공학과(학사)
- '80-'82 한양대학교 공과대학 기계공학과(석사)
- '88-'94 한국과학기술원 기계공학과(박사)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원



한 용 식
(KIMM 산업설비연구부)

- '83-'87 경북대학교 기계공학과(학사)
- '87-'89 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '89-현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서론

연소기는 압축기로부터 공급되는 공기를 연료와 반응시켜 얻은 고온의 연소가스를 터빈으로 전달하여 기계적에너지를 얻게하는 역할을 수행하는 부분으로 가스터빈의 에너지 공급부라 할 수 있다. 연소기에 사용되는 연료는 일반적으로 원유로부터 정제된 탄화수소계의 것으로 이상적인 완전반응이 일어나는 경우는 이산화탄소와 수증기를 생성하게 되나, 불완전연소와 열해리현상 등에 따라 일산화탄소(CO), 탄화수소(UHC 또는 THC), 연기(smoke), NOx, SOx 등의 여러 연소가스를 배출하게 된다. 수증기와 이산화탄소는 지구온실화에 영향을 미치기는 하나 그리 심각한 정도는 아니고, SOx는 독성이 있으나 연료를 정제할 때 제거되어질 수 있다. 따라서, CO, UHC, NOx 및 smoke 등이 가스터빈 연소기에서 중요하게 고려되고 있으며 항공용 엔진의 경우 EPA (U.S. Environmental Protection Agency) 등에서 이들 emission에 대하여 규제를 가하고 있다. 이중 NOx는 지구 오존층을 파괴하여 생태계를 위협하기 때문에 중요하게 인식되어 NOx저감에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 관련 규제법 규모 강화되고 있다. NOx에 대한 규제값(15% O₂ 기준)은 미국과 유럽의 경우 거의 대부분 가스 연료에 대하여는 25 ppm, 액체 연료에 대하여는 42 ppm 이나, 지역마다 다소 상이하서 미국의 캘리포니아, 노스이스트, 미드-아틀란틱주의 경우는 액체연료에 대하여는 42 ppm으로 같으나, 가스연료의 경우는 5-9 ppm으로 훨씬 낮은 값으로 규

정하고 있다. Smoke 나 UHC에 대하여는 일반적으로 “눈에 보이지 않을 것” 정도로 규정하고 있으나, 이 경우에도 독일에서는 엄격한 smoke규정이 있는 등 지역마다 다소 상이하다. 한편, 이러한 emission값은 ppm으로 규정하는 것외에도 1년간의 배출량(ton/year)의 제한등 규제가 추가될 전망이다[1-2].

여기서는 가스터빈 연소기의 emission 제어기술을 살펴보고 제어기술을 실제 연소기에 적용한 예를 소개하기로 한다.

2. Emission 제어기술

연소기에서 생성되는 연소배기가스는 연료와 공기와의 화학반응뿐만 아니라 연소기내에서의 열교환 및 공기역학적인 현상 등에 영향을 받게 되므로, 연료, 연소기 형상 및 운전조건 등을 emission생성의 주요변수로 생각할 수 있다. 이와 같은 변수들에 대하여 emission을 예측하는 방법으로는 실험식을 이용한 semi-empirical방법과 수치해석에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 실험식을 이용한 방법은 연료, 연소기 형상 및 운전조건 등의 주요변수간의 상관관계를 나타내는 것으로, 기본설계 단계에서 설계자가 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 수치계산에 의한 방법은 연소실내의 각종 정보를 정확히 얻어낼 수 있는 장점이 있으나, 연소기내 유동의 복잡성과 다단 화학반응의 취급 등 아직 설계에 적용하기에는 많은 연구가 필요하다. 본 장에서는 특성시간 및 연소방법에 의한 emission 제어기술에 대하여 살펴 보기로 한다.

2.1 특성시간에 의한 Emission 제어

연소실내의 물리적·화학적 현상은 표 1에서 보는 바와 같이 연료분사 및 증발, 연소기내의 혼합 및 Arrhenius형태의 화학반응 특성을 갖는 특성시간으로 나타낼 수 있다[3]. 이들 특성시간은 연료, 연소기의 형상 및 운전조건 등의 변수에 따른 연소기의 효율, LBT(Lean Blow-off Limit), 및

배기가스에 관한 일반적인 특성을 나타낸다. 따라서, 특성시간을 나타내고 있는 변수들을 조절함으로써 유해 배기가스를 제어할 수 있다.

EPA에서는 표 2에서 보는 바와 같이 유해 배기가스 제어를 위하여 기존 엔진 연소기의 설계

표 1. 2상유동에서의 연소 및 유해 배기가스에 대한 특성시간

특성시간	기호	물리적·화학적 현상
연료 액적의 잔류시간	τ_{cb}	액적의 증발
분사 연료의 난류소멸시간	τ_{ff}	연료분사노즐 근방의 재순환 영역에서의 소규모 난류혼합
전단층에서의 난류소멸시간	τ_{sl}	연소용 공기와 재순환 연소가스와의 대규모 난류혼합
연료 점화지연 및 연소시간	τ_{hc}	연료의 동질연소
NO 형성시간	τ_{no}	NO형성 반응기구

표 2. EPA에서 제시하고 있는 Emission 제어기술 (Minor Combustor Modification)

EPA designation	Modification
t1-minor combustion chamber redesign	Minor modification of combustion chamber and fuel nozzle to achieve best state-of-art emission performance
t4-divided fuel supply system	Provide independent fuel supplies to subsets of fuel nozzles to allow shutdown of one or more subsets during low-power operation
t5-water injection	Install water injection system for short duration use during maximum power (takeoff and climb-out) operation
t6-modify compressor air bleed rate	Increase air bleed rate from compressor at low-power operation to increase combustor fuel-air ratio

변경을 제시하였으며, 표에서 t_1 , t_4 등은 항공기 엔진의 등급을 나타낸다[4]. 이 표는 항공용 가스터빈에 관한 것이나, 산업용 연소기도 기본적으로 동일한 개념으로 설계·운용되고 있기 때문에 적용가능하다. 그러나, 이 표에서는 하나의 출력점에 대하여 하나의 특성시간만을 변경하는 것을 제시하고 있기 때문에 EPA 등에서 규정하고 있는 emission 요구조건을 모두 만족시키기에는 부적합할 것으로 생각된다. 본 절에서는 각각의 특성시간 변화에 대한 영향을 살펴 보기로 한다.

2.1.1 연료 액적의 잔류시간(τ_{eb})과 소규모 혼합물(τ_{fl}) 변화

연료 액적의 크기가 클 경우 즉, 연소 및 증발 시간이 긴 경우는 불완전연소를 유발시켜 UHC과 CO의 배출을 증가시킨다. 압력식 노즐의 경우는 엔진이 공회전상태(idle condition)로 접근함에 따라 연료량이 감소되어 액적분열 효과가 불량하게 된다. 따라서, τ_{eb} 및 τ_{fl} 를 감소시키기 위하여는 t_4 (표 2)에 제시된 바와 같이 노즐을 여러개 설치하여 연료유량에 따라 작동 노즐의 수를 조절하므로써 하나의 노즐에서의 연료유량을 일정하게 유지시켜 양호한 무화상태를 얻을 수 있다. 이와 같은 경우 공회전 상태에서 높은 효율을 얻을 수 있지만, UHC과 CO는 quenching에 크게 영향을 받기 때문에 액적의 크기 감소로만 UHC과 CO를 제어할 수는 없다. t_1 의 방법은 노즐의 형태를 압력식에서 air-blast 또는 air-assist 형태로 전환함으로써, 공기의 유입 또는 선회에 의하여 노즐 선단의 혼합율을 증가(τ_{fl} 는 감소)시켜 UHC과 CO를 감소시킬 수 있다. NOx의 경우는 명확하지는 않지만, 노즐 선단의 난류강도와 속도를 증가시킴으로써 감소시킬 수 있으나 공기가 유입됨에 따라 국부적으로 NOx가 현저히 증가할 수 있다. 측정에 의하면 대부분의 NOx는 화염을 유지시키는 재순환 영역을 둘러싸고 있는 전단층에서 형성되기 때문에 NOx의 제어는 τ_{fl} 를 제어함으로써 보다 큰 효과를 얻을 수 있다.

2.1.2 대규모 혼합물(τ_{fl}) 변화

주연소영역(primary zone)으로 들어오는 공기량과 공기유입구의 위치를 변화시킴으로서 전단층에서의 혼합율을 증가시킬 수 있다. τ_{fl} 이 감소하게 되면 혼합이 빨리 일어나 연료의 연소가 촉진되어($\tau_{fl} \geq \tau_{hc}$ 을 참조) 연소효율이 증가되고 동시에 NOx가 형성되는 시간을 줄이기 때문에($\tau_{fl} \leq \tau_{no}$ 을 참조) NOx가 감소하게 된다. 일반적으로 엔진은 공회전 상태에서 연소효율이 낮아지기 때문에, 설계시 정상상태와 마찬가지로 낮은 출력에서도 공기흐름 양상(pattern)을 변화시키지 않고 혼합율을 결정하게 되면 quenching에 의하여 UHC과 CO이 증가될 수 있다. t_6 는 낮은 출력에서 압축기로부터 공기를 미리 추출하므로써(연소기의 공기유량 감소) τ_{fl} 을 증가시키게 되나 연소실내에서의 평균 잔류시간을 증가시키므로써 불완전연소를 상쇄하여 연소효율을 증가시킨다. 결국, 재순환영역 주위의 전단층에서의 혼합특성과 난류소멸시간에 따라 주연소영역의 당량비를 변화시켜 emission을 제어하는 방법이라 할 수 있다.(t_4 및 t_6)

2.1.3 동질 반응율(homogeneous kinetic rate)에 의한 변화(τ_{hc} , τ_{no})

연료, CO의 산화(τ_{hc}) 및 NOx의 형성(τ_{no})에 영향을 미치는 반응율은 주연소영역의 평균당량비를 완전반응연소(stoichiometric)비에 가깝게 하므로써 증가시킬 수 있다. 한편, NOx의 형성은 t_6 에서 제시하는 바와 같이 물을 분사시켜 주연소영역의 온도를 낮추므로써 감소(τ_{no} 은 증가)시킬 수 있으며, 이 경우 연소기로 유입되는 질량유량이 증가하기 때문에 τ_{fl} 도 감소하게 된다. 한 예로, General Electric사의 MS6001, MS7001 가스터빈에 연료유량의 1.2배의 수증기를 분사한 결과 NOx를 약 70% 감소할 수 있었다. 그러나, 수증기의 분사로 인하여 MS7001의 경우(공기질량유량의 1% 분사) 효율이 2.0% 감소하였으며 출력은 2.7%, 연료소모량은 4.7% 증가하였다[5]. 이 방법은 널리 사용되어져 오고 있으나, 물에 함유되어

있는 광석을 제거(demineralization)하여야 하므로 운용비용이 많이 들고 또한 CO 및 소음이 증가하는 등의 결점이 있다.

2.2 연소방법 개선에 의한 Emission 제어

앞 절에서 살펴본 emission 제어방법(기존 연소기를 약간 수정)도 유해 배기가스를 줄이는 데 유용하지만 엄격하여지고 있는 규정에 대처하기 위하여는 연소기의 근본적인 설계변경을 통한 emission 제어방법을 도입하여야 한다. 본 절에서는 가스터빈 연소기에서 사용 가능한 emission 제어기술을 살펴보고 이 들의 개념 및 장단점을 정리하기로 한다. 한편, 이에 관련하여 표 2와 유사하게 EPA에서 제시한 emission 제어기술을 표 3에 나타내었다.

표 3. EPA에서 제시하고 있는 Emission 제어기술 (Major Combustor Modification)

EPA designation	Modification
t2-major combustion chamber redesign	Major modification of combustion chamber and fuel nozzle incorporating advanced fuel injection concepts (carburetion or prevaporization)
t7-variable geometry combustion chamber	Use of variable airflow distribution to provide independent control of combustion zone fuel/air ratio
t8-staged injection combustor	Use of advanced combustor design concept involving a series of combustion zones with independently controlled fuel injection in each

2.2.1 가변 형상 연소기 (Variable Geometry Combustors)

엔진의 출력변화에 따라 주연소영역 및 희석영역으로 유입되는 공기량을 조절하여 즉, τ_{sl} 을 조절하여 최적의 UHC, CO 및 NOx를 얻는 방법으

로, 이상적으로 예혼합-예분무 연료분사 시스템과 함께 사용하면 효과적이다. 공기흐름은 유입구의 개폐에 따라 조절되므로 연속적인 원적조정능력을 갖추어야 하며, 또한 열팽창, 내구성 및 자동제어 등의 문제가 있다.

2.2.2 다단 연소 (Staged Combustion)

유입되는 공기량을 제어하는 또 다른 방법으로 엔진의 출력변화에 따라 연료량을 조절하는 다단 연소를 들 수 있다. 다단연소를 실제연소기에 적용하는 데는 여러가지 방법이 제시되고 있으나, 대표적인 방법은 다음과 같다. 주연소영역에서 공기와 연료를 잘 혼합하여 저 부하상태의 운전 및 연소실 하류 연소영역에 파이롯트 화염을 제공하고, 고부하시에는 연소실 하류에 설치된 또 다른 노즐로 부터 연료를 공급하므로써 연소영역을 분리하는 방법으로 효율, 안정성, 저 emission 및 적응성 등을 동시에 얻을 수 있다. 이 방식은 예혼합연소와 함께 사용되는 경우가 많으며, 희박예혼합 연소와 함께 사용될 경우(연료량이 적어짐) 주연소영역에서는 공기과잉에 의하여 τ_{no} 가 증가함으로써 NOx가 감소하게 되고, 2차영역에서는 보다 많은 공기를 공급할 수 있기 때문에 혼합이 증가하여 τ_{sl} 이 감소하므로 NOx가 감소하게 된다. 그러나, 2차영역에서의 공기에 의한 quenching에 의하여 UHC 및 CO가 증가할 수 있기 때문에 주연소영역 및 2차영역에서의 연료 및 공기량의 배분에 신중을 기하여야 한다.

2.2.3 예혼합, 예증발 연소 (Premixing, Prevaporizing Combustion)

이 방식은 연소실에 연료가 유입되기 전에 연료의 증발과 혼합을 미리 일으켜 emission을 감소시키는 방법으로, τ_{ob} 과 τ_n 의 두 변수를 소거할 수 있는 장점이 있다. 주연소영역에서는 당량비를 완전연소비보다 약간 적게하여 현저한 τ_{hc} 의 증가 없이 즉, 큰 UHC 및 CO의 변화없이 NOx를 감소시킬 수 있다. 이 방법 중 주연소영역에서의 당

량을 더욱 낮추어 희박연소시키는 경우는 NOx를 저감하는 방법 중 가장 가능성이 있는 것으로 다음절에서 별도로 설명하기로 한다.

2.2.4 과농희박 및 희박예혼합 연소 (Rich-Quench Lean-burning and Lean Premixing Combustion)

과농희박연소는 주연소영역에서 초기에 연소에 필요한 공기를 덜 넣어 연료가 덜 타게(fuel rich) 하여 화염의 온도를 떨어뜨린 후 그 나머지 연소에 필요한 공기를 연소실 후단에 재빨리 공급하여(quench)연소가 완료됨과 동시에 과잉공기가 남도록(fuel lean)하여 NOx를 제어하는 방법이며, 희박예혼합 연소는 처음부터 연소에 필요한 공기 이상을 공급하여(fuel lean) 화염의 온도를 떨어뜨려 NOx를 저감하는 방법이 있다. 전자의 방법은 고온의 입구조건에서도 역화나 자연점화등의 위험이 없고 작동성이 뛰어나며 액체연료가 질소를 함유하고 있을 경우에도 적합하다는 등의 잇점이 있으나, 공기냉각(quench)에 한계가 있어 국부적인 고온부위가 생겨 NOx가 발생할 가능성이 크고, CO나 UHC이 충분히 산화될 수 있도록 시간이 길어야 하는 등의 제한으로 말미암아 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 유망한 NOx 저감 방법중의 하나이나 아직 실용화되지는 못하고 있다. 후자의 방법은 현재 연소방식에 의한 제어 방법중 가장 널리 쓰이고 있는 방법으로, 현재 Pratt & Whitney(P&W) 등에서 이 방법을 사용하여 가스연료에 대한 저 NOx(dry low NOx) 기술개발이 거의 완료된 상태이며 액체연료에 대한 연구가 진행되고 있다. 여기서는 희박예혼합 연소에 대하여 보다 더 상세히 알아보기로 한다. 이 방법은 근본적으로 화염의 온도를 떨어뜨리기 위하여 연소에 사용되는 공기보다 더 많은 공기를 공급하여 NOx를 저감하는 방법이다. 즉, 공연비를 증가시키므로써 NOx량이 감소하게 되는 데, 이 경우에는 quenching에 의하여 CO나 UHC이 증가되기 때문에 다음과 같은 사항들이 신중히

고려되어야 한다.

- 1) 연료와 공기는 잘 혼합되어야 하며(well mixed), 만약 잘 혼합되지 않으면 국부적으로 고온 영역이 발생하므로 저 NOx를 얻을 수 없다.
- 2) 연료와 공기가 연소기의 바깥쪽에서 혼합되므로, 자연점화(auto ignition)될 가능성이 있다.
- 3) NOx를 줄이기 위하여 희박 연소를 하므로 안정성 문제가 야기될 수 있다.
- 4) 특히, 엔진 출력이 감소함에 따라 연공비도 감소하기 때문에 blow out의 가능성이 크므로 가변 형상 연소, 다단연소 등의 방법으로 안정성을 증가시킨다.

이와같은 희박 예혼합 제어 방식은 주로 가스 연료에 적합하다고 알려져 있으며, 이를 액체 연료에 적용하기 위한 시도는 GE나 P&W 등에서 시도하고 있으나 아직 성능실험에 의한 실용화가 입증되지 않은 상태이다.

2.2.5 촉매연소

촉매연소는 촉매가 연소를 연료의 가연한계보다 낮은 온도에서 일으키는 성질을 이용한 것으로, 연소실의 최고온도를 1000K로 낮출 수 있으므로 NOx를 상당량 줄일 수 있다. 이 경우에도 촉매반응기 상류지역의 국부적인 과농지역에 의한 자동점화와 시동시 촉매의 온도를 반응온도까지 가열하여야 하는 등의 문제점을 가지고 있으나, emission에 대한 규제가 강화됨에 따라 앞서 언급한 방법에 의한 제어는 한계가 있을 것으로 판단되어 촉매연소에 대한 연구에 관심이 모아지고 있다.

이상과 같이 언급된 방법들을 조합하여 emission을 보다 더 낮추려는 연구가 시도되고 있으며, 대부분 저 NOx의 관점에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

3. Emission 제어기술의 응용 예

앞 장에서는 연소기술을 통하여 저emission의 목적을 달성하기 위한 방법들을 기술하였다. 실제 연소기에서는 앞서 언급된 개념의 도입으로 모든 공해물질을 동시에 저감하는 것은 매우 어렵다. 예로서 NOx를 저감시키기 위하여 어떤 방법을 채택한 경우 CO 및 UHC가 증가할 수 있으며, emission제어를 위하여 가능한 방법들을 조합하는 경우는 한 조건에서 채택된 방법이 다른 조건 또는 다른방법에 의하여 emission의 생성을 촉진시킬 수도 있다. 따라서, 저 emission을 실현시키기 위하여는 앞서 언급된 제어기술을 적절히 적용하는 것과 함께 실제 실험을 통한 확증이 중요하다.

본 장에서는 앞서 언급된 저 emission(저 배기) 기법들의 실제 적용된 사례로서, 미국 NASA에서 수행한 ECCP(Experimental Clean Combustor Program)와 PRTP(Pollution Reduction Technology Program)의 연구결과[6,7]들을 요약하고, 현재 미국 Pratt & Whitney에서 개발중인 희박혼합 연소를 이용한 저 NOx 제어기술을 소개하기로 한다.

3.1 ECCP (Experimental Clean Combustor Program)

1972년에 ECCP는 EPA class가 t2이고 Trust가 8000lbs보다 큰 높은 바이패스 비를 가지는 엔진들의 공해배출을 저감하기 위한 일환으로 시작되었다. 이 프로그램에는 Pratt & Whitney Aircraft (JT9D-7 엔진)와 General Electric Company (CF6-50 엔진)가 참여하였다. 프로그램은 3단계로 진행되었으며, 1단계는 다양한 저emission 개념을 도입한 연소기들을 선별하는 과정(combustor screening)으로 구성되었다. 2단계에서는 1단계에서 선별된 연소기들을 개조하는 것이 이루어졌으며, 3단계에서는 2단계에서 얻어진 가장 적절한 연소기의 실물크기 엔진(full scale engine)의 실험

을 수행하였다. 각 추진단계 내의 세부 사항은 참여업체에 따라 약간씩 다르게 적용되었다.

ECCP의 프로그램을 통하여 각각의 연소기에 적용된 개념들은 표 4와 같다

표 4. ECCP에 적용된 저 배기 개념

연소기 종류	적용된 개념
JT9D-7 엔진 (P&W)	<ul style="list-style-type: none"> - 다단분사(Fuel scheduling) - 희박혼합기(Lean mixture) - 예혼합(Premixing) - 급속냉각(Quick quenching)
CF6-50 엔진 (GE)	<ul style="list-style-type: none"> - 다단분사(Fuel scheduling) - Air-blast fuel nozzle - 희박혼합기(Lean mixture) - 예혼합(Premixing)

여기에서는 General Electric Company(CF6-50) 엔진의 경우에 대해 자세히 소개하고자 한다.

GE의 1단계는 다양한 저배기 연소기 설계들을 선별하는 과정(combustor screening)으로 18개월 동안 수행되어졌다. 연구 대상 연소기는 주영역에서 매우 희박한 연소방법을 채택한 CF-50 연소기의 한 형태이다. 여기에 저배기 개념으로 설계된 연소기는 4가지 형태로 single-annular combustor, swirl-can combustor, radial/axial staged combustor 및 double annular combustor이며, 각 연소기에서 얻어진 최적의 결과를 표 5에 요약하였다.

적용된 개념들의 최적 배기상태는 연소기의 작동조건에 따라 달라진다. 표 5로 부터 알 수 있는 바와 같이 radial/axial staged 연소기와 double annular 연소기 설계에서 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 2단계 개선을 위하여 이 두 연소

표 5. CF6-50에 대한 1단계 결과의 요약
(EI 값)

Combustor concept	Configurations tested	Lowest emission indices(E.I.), g/kg fuel		
		NO _x ^a	THC ^b	CO ^b
Single Annular	4	28	4	48
Swirl-Can	17	28	15	67
Radial/Axial	7	14	2	38
Double Annular	6	17	10	42

^a Takeoff conditions, extrapolated

^b Idle conditions

기가 선정되었다(그림 1 참조). 표 6은 2단계에서 얻어진 배기가스 배출에 대한 결과이며, 나타내어진 값들은 E.I값(Emission index, lb/1000 lb fuel)으로 표시되어있다.

전 엔진작동 영역에서 공해물질의 배출을 저감하기 위하여 두 설계 모두 다단계 연료분사(fuel scheduling)방법을 이용하였다. 엔진 출력이 낮은 idle condition으로 운전될 때 고효율(낮은 CO 및 THC 배출)을 얻도록 pilot stage가 최적화 되었으며, 최대출력 조건인 takeoff condition으로 운전될 때는 낮은 NO_x배출을 위해 main stage가 최적화되었다.

두 연소기 모두 앞서 표 4에서 언급된 저배기 개념들이 적용되었으며, 최종적으로 double annular 연소기가 3단계 엔진 성능실험을 위하여 선정되었다.

그림 2는 엔진시험을 위해 설치된 double annular 연소기를 보여준다. Idle 작동조건에서 배기를 개선하기 위해 2단계 double annular 연소기에 약간의 수정이 이루어졌다.

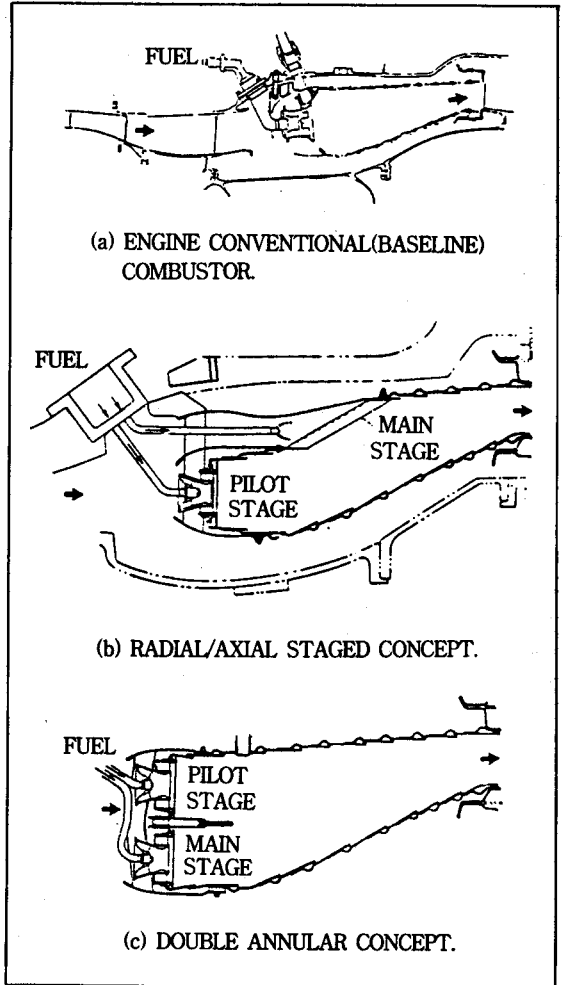


그림 1. Combustors for the CF6-50, phase II of ECCP

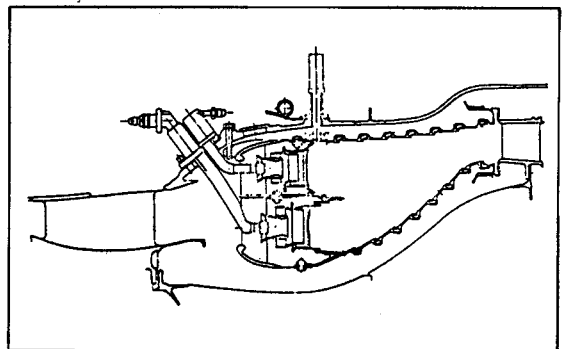


그림 2. Double annular combustor configuration for phase III of ECCP

표 6. 각 연소기의 2단계에서 얻어진 배기가스 배출 현황(E.I. 값)

Configuration	Operating condition	Emissions ^a			
		CO	THC	NOx	SMOKE
CF6-50 engine baseline combustor	IDLE	73	30	2.5	13
	APPROACH	4.3	----	10.0	
	CLIMBOUT	----	----	29.5	
	SLTO	----	----	35.5	
	EPAP ^c	10.8	4.3	7.7	
	CRUISE	----	----	----	
Double annular concept configuration D/A-13	IDLE	19.3	2.2	3.0	-----
	APPROACH ^b	3.1	----	12.8	
	CLIMBOUT	----	----	13.3	
	SLTO	----	----	16.9	
	EPAP	3.0	0.3	4.25	
	CRUISE	8.8	0.17	8.0	
Radial/axial concept configuration R/A-2	IDLE	53.8	6.1	3.1	-----
	APPROACH ^b	1.3	0.2	9.2	
	CLIMBOUT	10.9	0.2	14.2	
	SLTO	8.5	0.1	16.1	
	EPAP	9.56	0.88	4.30	
	CRUISE	----	----	----	
1979 EPA standards	EPAP	4.3	0.8	3.0	19

^a 모든 값들은 실제 엔진 작동조건에서 계산되었다.
^b Approach 단계에서는 pilot 단계에서만 연료가 분사된다.
^c EPAP 단위 : pounds of pollutant /1000 pounds thrust-hours /cycle
 여기서 EPAP는 EPA parameter를 나타낸다.

표 7은 3단계에서 얻어진 배기가스 배출에 대한 결과이며, 모든 다른 성능적인 측면에서는 기존 연소기와 대등하다.

3.2 PRTP (Pollution Reduction Technology Program)

PRTP는 EPA분류 t1, t4와 p2의 엔진들의 공해 물질 배출을 줄이는 첨단기술을 개발하기 위한 일환으로 1974년도에 시작되었다. PRTP를 위하여

표 7. 3단계 이중 환형 연소기에서 얻어진 배기가스 배출 현황 (E.I. 값)

	CO	THC	NOx	SMOKE
1979 EPA standards	4.3	0.8	3.0	19
Production combustor	10.8	4.3	7.7	13
Double annular in test rig	3.0	0.3	4.25	NIL

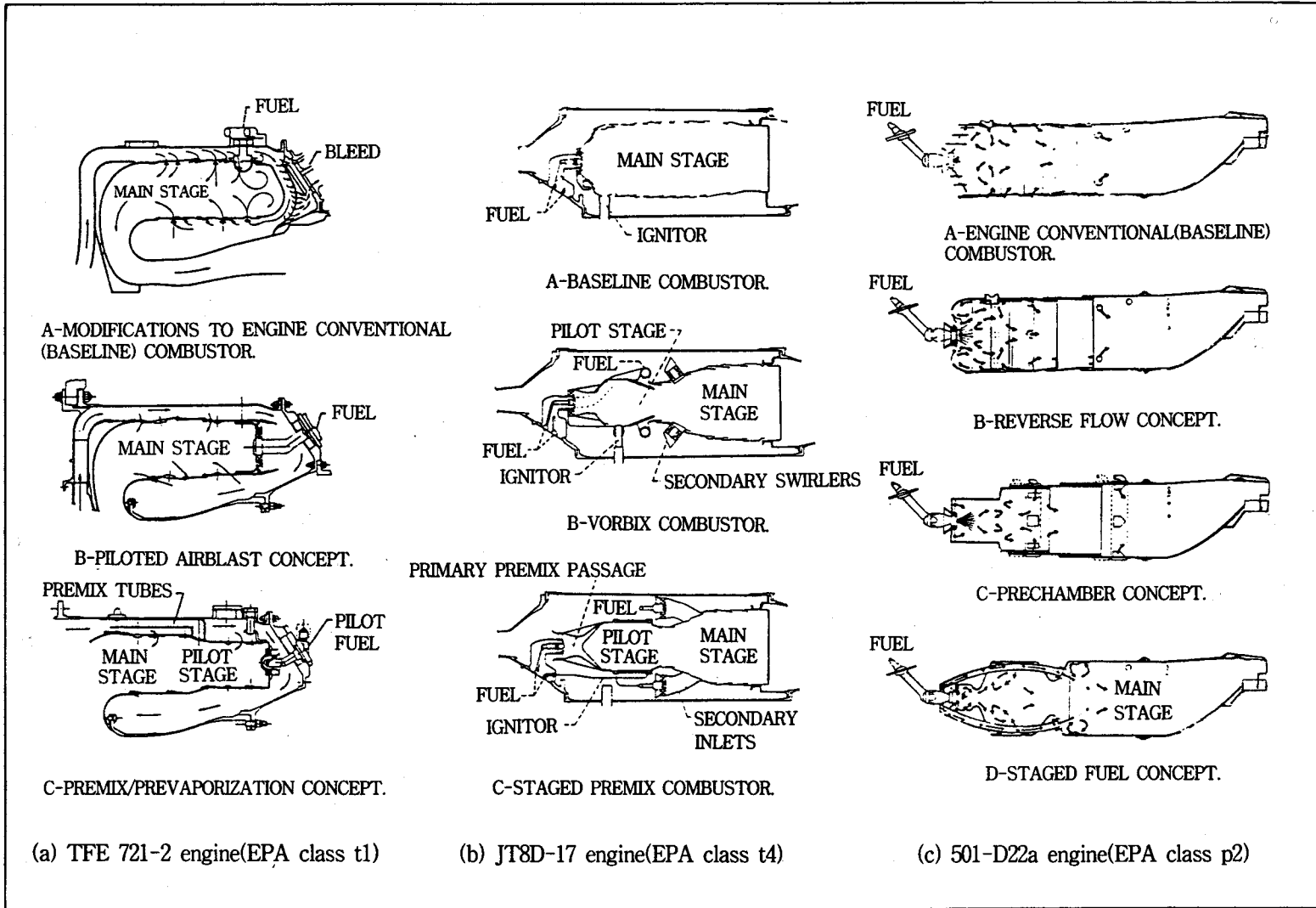


그림 3. Phase I advanced technology concepts of PRTP

선정된 계약자와 엔진들은 Garrett AiResearch의 TFE 731-2엔진(EPA등급 t1), P&W의 JT8D-17 엔진(EPA등급 t4)과 Detroit-Diesel Allison의 501-D22A엔진(EPA등급 p2)이다. 연소기의 평가는 ECCP와 유사한 다단계 접근방식(multi-phase approach method)으로 수행되어졌으며, 목적은 1979에 제정될 EPA기준을 만족하도록 만드는 것이었다. 그림 3은 TFE 731-2, JT8D-17과 501-D22A 엔진들에 대한 1단계 선정시험으로 선정된 연소기 개념들을 각각 보여준다. 그림에서 A는 원래 엔진을 나타낸다. A 혹은 B는 개발 위험성은 최소이지만 배기가스 저감의 측면에서는 최소의 개선효과를 가진다. 반면에 B, C 혹은 D는 높은 개발 위험성을 내포하지만 배기가스 저감이라는 측면에서는 상당히 유리한 입장에 있다. PRTP에서 대상으로 하고 있는 각 연소기에 적용된 개념들은 표 8과 같다.

3.3 Pratt & Whitney의 희박예혼합 연소기

본 절에서는 미국의 P&W사에서 항공용엔진(JT8-D)을 산업용으로 개조하는 연구중 희박예혼합 연소에 의한 연소기의 저 NOx(dry low NOx) 제어기술을 소개하기로 한다. 그림 4는 P&W에서 개발된 저 NOx형 연소기를 나타낸 것으로, 그림 상단의 GG8-1(연구명)은 수증기를 분사하여 NOx를 저감한 경우로서 연소기는 can-annular형태로 근본적인 구조는 항공용 엔진(JT8-D)과 거의 유사한 형상을 가지고 있으며 현재 파이로트 플랜트가 가동중이다. 그림 하단의 GG8-2는 희박예혼합 연소에 의하여 NOx를 저감시키는 경우로 항공용 엔진의 개조형이기 때문에 연소기 크기에 제한이 있어 예혼합에 의한 연소기의 용량증가를 감당하기 위하여 버너부분이 기울어져 있다. 본 절에서는 GG8-2 연소기를 대하여 버너부분의 개조를 통한 저 NOx 제어기술을 소개하기로 한다.

3.3.1 저 NOx 버너의 선정

저 NOx 버너는 세계의 서로 다른 버너에 대한

표 8. PRTP에 적용된 저 배기 개념

엔진 형태	적용된 개념
TFE 731-2	(1) idle상태에서 사용 연료노즐의 감소 (12개→6개) (2) 선회기를 통과하는 연료/공기비 증가 (3) piloted air blast 연료노즐로 대체 및 idle에서의 고압 air assist 사용 (4) 주연소영역의 재순환유동 양상 변경 (5) 가변 구조를 갖는 주연소영역
JT8D-17	(1) Air-blast 노즐 사용 (2) 주연소영역에서의 공연비 변화 -희박연소 채용 (3) Vorbix(Vortex burning and mixing) 개념 - 선회공기에 의한 혼합을 향상 및 pilot 영역 형성 - pilot 영역과 주연소영역의 분리 - 주연소영역에 2차 선회기 채용 하여 혼합특성 향상 (4) 다단-예혼합 연소
501-D22A	(1) Reverse flow 개념 - 연소기 전면 끝단에 2개의 냉각용 공기흡입구 설치 (2) Prechamber 개념 - 가변면적 선회기 (3) 다단 연소 - Pilot 영역과 주연소영역 분리 - Air-blast 노즐 사용 - 새로운 라이너 냉각기술 도입(film 냉각과 convection냉각 조합)

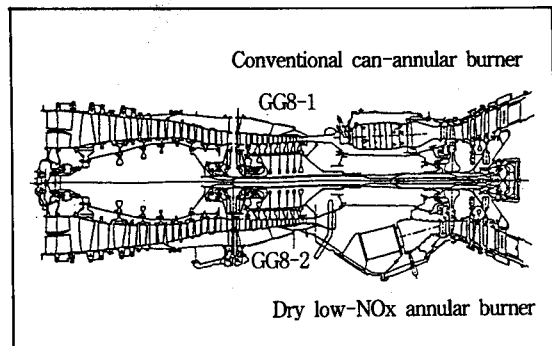


그림 4. Configurations of aeroderivative industrial gas turbine combustor

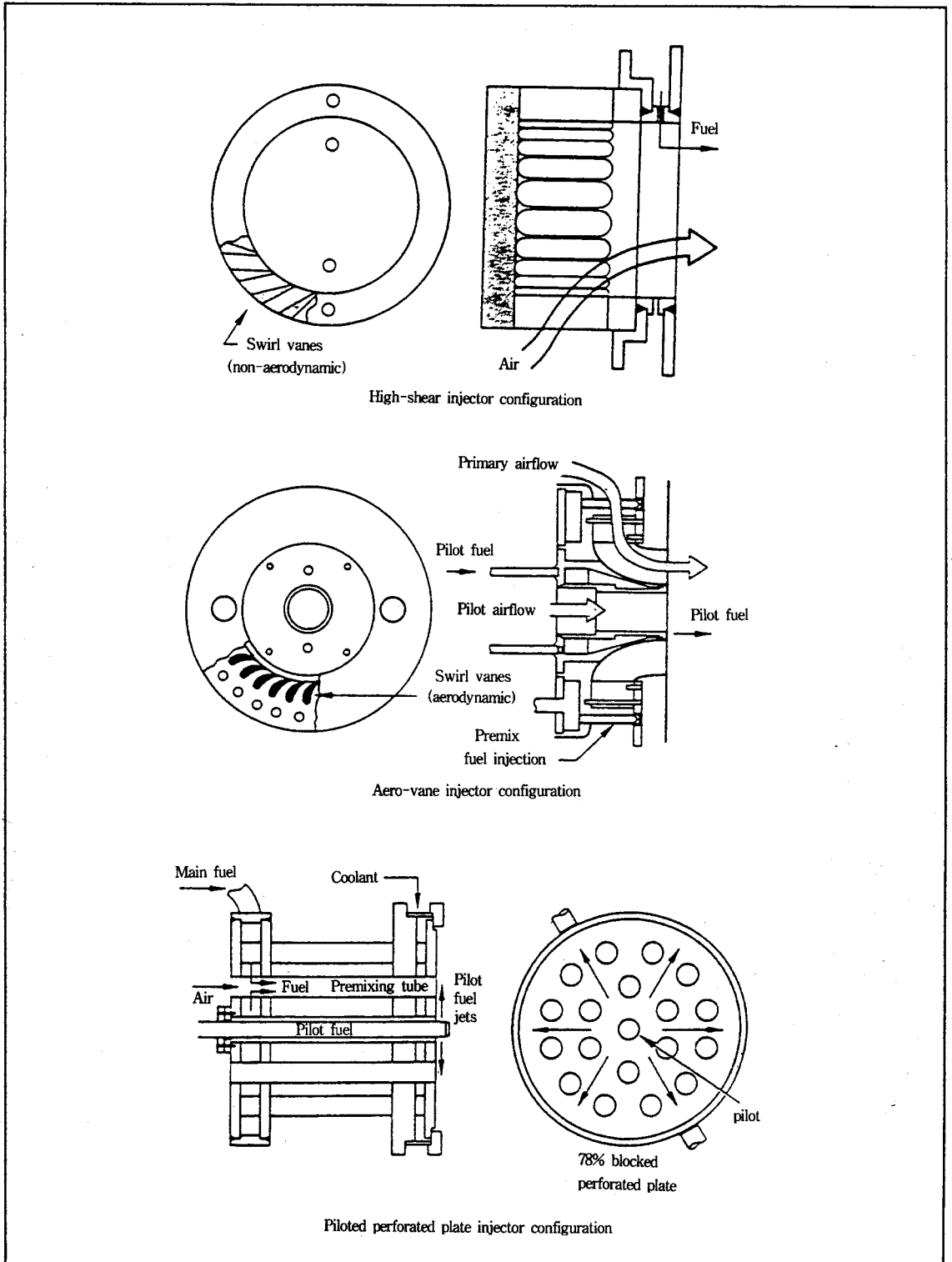


그림 5. Configurations of experimented burners

일련의 실험을 통하여 선정되어 졌다. 실험되어진 세 종류의 버너로는, high shear fuel injector, aero-vane injector 및 pilot perforated plate injector로서 그 기하학적 형상은 그림 5와 같다. 이와 같이 실험된 버너들은 문헌 또는 P&W자체 내의 연구 결과를 토대로 채택되어진 것으로 모두 저 NOx의 가능성이 있는 버너들이다. 각 버너에 대한 상세한 개념, 실험방법 및 결과는 참고문헌[8]을 참고하기 바람이며 여기서는 중요한 실험결과에 대하여만 언급하고 또한 선정된 버너에 대하여는 다음 절에 별도로 소개하기로 한다.

표 9에서 보는 바와 같이 버너는 emission, 압력손실(연소기 입구압력 P₀기준), 작동성 및 소음 등으로 평가되어지며, high-shear fuel injector의

경우는 작동성이 양호하여 낮은 당량비에서도 blow-out되지 않는 장점이 있으나 NOx값이 크기 때문에 사용에 적합하지 않고, aero-vane injector의 경우는 NOx는 기준값을 만족하나 압력손실이 예상외로 커서 문제가 있다. 한편, pilot perforated injector의 경우는 pilot 연소에 의하여 작동성이 향상되기는 하나 연료와 공기의 혼합이 불량하여 데이터에 흠이 크고 소음이 크기 때문에 사용에는 적합하지 않다. 따라서, 연료와 공기의 혼합특성이 양호하고 압력손실이 적으며 소음이 적은 버너를 선정하기 위하여 앞서 언급된 버너들의 특성을 고려하여 high-shear fuel injector의 작동성(blow-out)과 스윙 예혼합(swirl-stabilized premixing ; aero vane injector)에 의한 저

표 9. 실험용 저 NOx 버너의 특성

종류 항목	High-shear fuel injector	Aero-vane injector	Pilot perforated injector
NOx	<ul style="list-style-type: none"> 연료 출구 제트수가 감소하거나 크기가 증가하여 관통거리가 증가하면 연료가 끌고루 분포하여 NOx감소 연료 출구 제트수가 너무 적으면(8→4) 연료의 원주 방향으로 분포가 일정하지 않아 NOx증가 <p>▶ 예상한 것 보다 NOx가 크게 나타나 선정에서 제외 (기준 만족 못함)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 예상한대로 당량비가 감소하면 NOx감소 Pilot가 없으면 당량비 0.52에서 Blow-out Pilot를 10% 공급하면 당량비 0.44에서 Blow-out (이때 NOx 증가 없음) Swirl을 Pilot에 줘도 NOx에는 영향 없음 <p>▶ NOx는 기준값 만족</p>	<ul style="list-style-type: none"> 당량비에 크게 영향 받음 데이터의 흠이 크며, NOx의 평균값이 크다 →혼합이 잘 되지 않음을 예측 Pilot에 의하여 작동성이 현저히 향상 <p>▶ 데이터의 흠이 크므로 사용여부 고려하여야함</p>
CO	<ul style="list-style-type: none"> 모든 종류의 버너에 대하여 만족하나, 당량비가 작을 경우 작동성이 나빠 증가하고 있다 또한, CO의 측정을 주연소영역에서 하였기 때문에 실제로는 더 작은 값을 가질 것임 		
ΔP	3% of P ₀	9% of P ₀	3% of P ₀
Blowout limit (φ)	0.3-0.4	0.43-0.52	0.39-0.49
Noise	중	소	대

NOx특성 및 pilot연료 공급에 의한 작동성 향상 등을 고려하여 버너가 선정되었다.

3.3.2 선정된 저 NOx 버너

선정된 저 NOx 버너는 tangential entry burner(이하 TE 버너라 한다)로서, 앞서 언급된 바와 같이 압력손실, emissions 및 작동성 등에 대한 요구조건을 만족할 수 있도록 설계되어 있으며, TE 버너는 그림 6에서 보는 바와 같이 연소기로 공기가 들어갈 때 최대의 접선방향 모멘텀을 주므로서 혼합특성을 향상시켜 NOx등을 저감하는 구조를 갖고 있으며, 와류를 일으키는 스윌러(scroll swirler)와 원추형의 중앙부(conical centerbody)로 구성되어 있다.

이와 같은 TE 버너의 성능을 개선하기 위하여 다음과 같은 사항들이 고려되어 초기설계된 버너가 수정·보완되어 졌다.

- Piloting
 - 전 범위의 운전조건에서 pilot에 의하여 다단

연소(staging)시킴으로서 저 emission 유지 (baseload에서는 Pilot없이도 작동성이 양호하나, idle의 경우는 pilot에 의하여 작동성을 향상시킬 수 있다.)

- 전체 부하의 40%이하 에서는 pilot를 사용하여야 작동성 유지 가능
- Airflow capacity
 - 공기의 압력손실을 초기의 4%에서 3%로 감소시킴으로서 엔진의 열량 및 전 사이클 효율을 증가
 - TE 버너를 플라스틱 유리로 모델을 제작하여 비연소식 실험을 통하여 버너 출구지름과 슬롯길이(slot length) 등의 변화에 대한 압력손실을 고려하여 크기 결정
- Fuel-air premixing
 - 저 NOx를 얻기 위하여 연료와 공기의 혼합을 향상
 - 연료 노즐의 오리피스 사이의 간격, 갯수 및 지름 등의 기하학적 형상을 변화시켜 가며 최적의 혼합특성을 갖는 노즐 선정

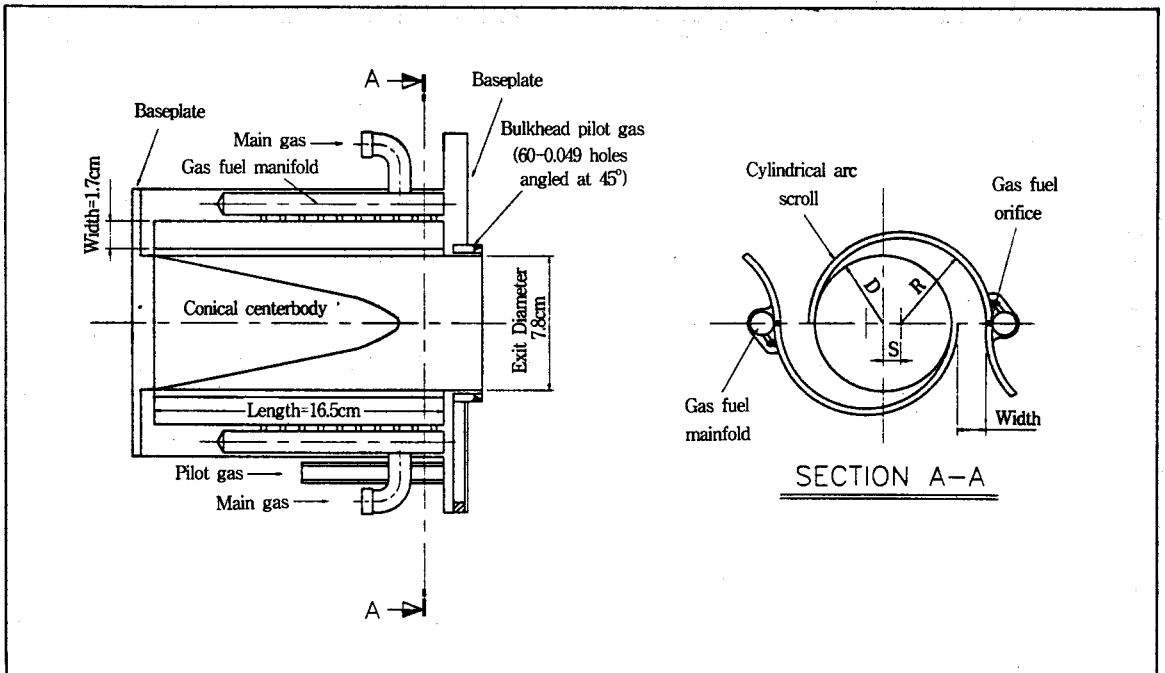


그림 6. Configurations of tangential entry burner

실험결과 NOx 및 CO 등은 운전조건에서 규정 값 이하로 나출 수 있었으며, 희박예혼합 연소의 경우 NOx를 감소시키기 위하여는 연료와 공기의 혼합특성이 가장 중요하다는 결론을 얻었다.

5. 결 론

Emission제어기술은 최근 환경문제가 심각하게 대두됨에 따라 가스 터빈을 비롯한 거의 모든 연소장치에서 중요하게 인식되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Emission을 효율적으로 제어하기 위하여는 emission의 생성기구와 이를 지배하는 연료, 운전조건 및 연소기의 형상 등의 변수에 대한 연소실내의 연소현상을 이해하는 것이 중요하다. 본 고에서는 특성시간 및 연소방법 개선에 의한 emission제어기술을 살펴보았으며, 이를 적용한 실제 연소기에서의 emission저감 예를 소개하였다. 적용 예에서 알수 있는 바와 같이 emission제어기술을 적용한 결과 NOx 및 CO, UHC등을 규정값이하로 낮출 수 있었으며, 대부분의 연구는 NOx저감에 초점을 맞추어 진행되고 있다. 현재까지 유망한 방법으로는 희박예혼합 연소를 들 수 있으나 화염의 안정성, 자동점화, 역화 등의 문제가 야기되고 있어 이를 개선하기 위한 노력이 필요하다. 이와같이 저 emission 가스터빈 연소기 개발에는 NOx 등의 배기물질의 제어기술과 함께 화염의 안정성, 점화특성 등 연소기의 전체성능을 함께 고려하여야 한다. 따라서, 저 emission 연소기를 개발하는 경우 저 emission제어기술 뿐만 아니라 전체 성능실험이 수반되어져야 하며 이에 막대한 실험경비 및 연구노력이 투여되고 있다. 최근에는 연소기 설계 및 emission 제어 등을 위한 수치해석기법의 발달로 그 결과가 어느정도 활용되고는 있으나 실제 연소기에 적용하기에는 부족한 실정이다. 끝으로, 저 emission 성능을 갖는 연소기 개발을 위하여는 연

소기 설계기술을 비롯하여 체계적인 연구개발의 노력이 뒤따라야 하며, 세라믹 연소기 등 최근의 연구동향을 파악하여 차세대 연소기 개발에도 주력하여야 하겠다.

참 고 문 헌

1. Lefebvre, A. H., Gas Turbine Combustion, Hemisphere Publishing Corporation, 1983
2. 오군섭 외, 복합열병합 발전 플랜트 국산화 설계 및 제작기술 개발, 한국기계연구원 보고서, UCN 019-127.M, 1994
3. Mellor, A. M., Gas Turbine Engine Pollution, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 1, pp. 111-133, 1976
4. Environmental Protection Agency, Aircraft emissions: impact on air quality and feasibility of control, 1972
5. Hilt, M. B. and Waslo, J., Evolution of NOx Abatement Technique Through Combustor Design for Heavy-Duty Gas Turbines, J. Eng. Gas Turbine and Power, Vol. 1, 1984
6. Jones, R. E. Gas turbine engine emissions - problems, progress and future, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 4, pp. 73-113, 1978
7. Mosier, S. A. and Pierce, R. M., Advanced combustion systems for stationary gas turbine engines: Volume I. review and preliminary Evaluation, EPA-600, Jan. 1980
8. McVey, J. B., Padget, F. C., Rosfjord, T. J., Hu, A. S., Peracchio, A. A., Schlein, B., Tegel, D. R., Evaluation of Low-NOx Combustor Concepts for Aeroderivative Gas Turbine Engines, J. of Eng. for GT and Power, Vol.115, 1993