

신개념에 의한 Dry Low-NOx 가스터빈 연소기의 특성

* 본 자료는 일본열병합발전센터 자료에서 발췌·번역한 것임.

1. 머리말

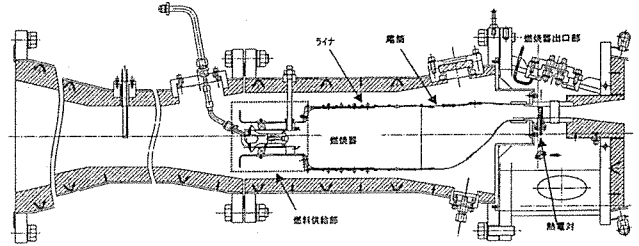
코제너레이션용 가스터빈으로 부터 배출되는 NOx의 저감은 환경보전의 면에서 중요하고도 긴급한 과제이다. 현재 가스터빈에 있어서 주요한 NOx 저감법은 물·증기 분사방식이지만 NOx배출량이 100ppm 정도(산소 0%환산)로 비교적 높을뿐만 아니라 순수(純水)장치 등이 필요하여 초기운전비용이 크고 또한 그의 설치공간도 필요하게 된다.

이로 인하여 물·증기분사가 필요없는 희박예혼합방식(稀薄豫混合方式)의 연소기술개발이 진행되고 있다. 단순히 이 희박예혼합방식만으로는 안정된 연소 범위가 좁아지는 문제가 있다. 연료를 줄이는 저부하시에 혼합가스가 너무 희박하게 되어 연소효율이 떨어지고 또한 화염을 유지할 수 없는 위험성이 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 가스터빈 메이커 등에서 이제까지 여러가지의 연소기술이 개발되었다. Staging 연소로 복수의 연료유량제어기구를 사용하는 방법, 가변기구를 부착하여 연소영역에서의 공기량을 제어하는 방법 등이 개발되었다.

그러나 전자는 연료계통이 복수로 필요하여 초기 투자비가 증대되고 후자는 고압·고온중에서 가동부(可動部)가 존재하므로 그의 신뢰성과 내구성에 대한 위험성이 있다.

위의 문제점을 해결하기 위하여 새로운 간편한 연

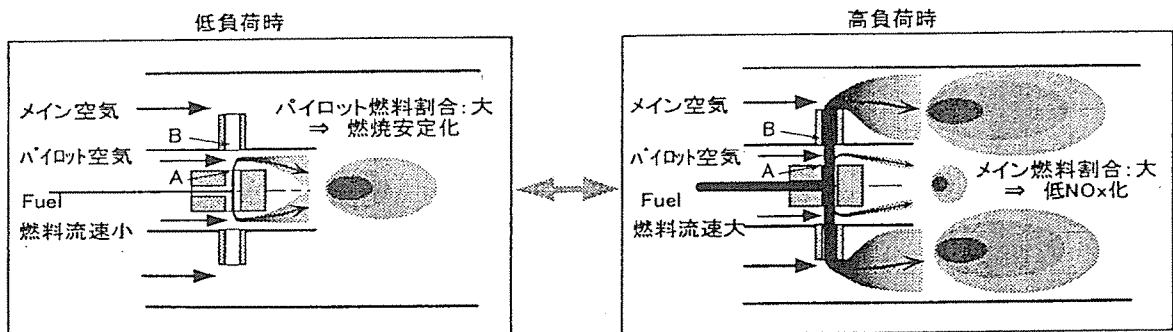
<그림-2>



소공급방식을 고안하였다. 개념도를 그림-1에 표시하였다. 저NOx화를 목적으로한 희박예혼합으로 연소시키는 Main부와 연소안정화를 목적으로한 Pilot부 의 2개 부분으로 되어 연료공급은 1계통으로 간편하다. 연료분사공(A孔)과 대향위치에 메인부에 연료를 통과시키는 연료도입공(B공)이 설치되어 있어 이 2개의 구멍을 통하여 메인부에 연료가 공급된다. 양자 사이에는 Pilot부에 공급되는 Pilot 공기의 일부가 흐를 수 있도록 되어있어 이 공기를 관통하여 B공에 유입된 연료가 메인부에 도달하여 희박예혼합으로 연소된다. B공에 유입되지않은것은 Pilot부에 도입된다.

저부하시에는 연료유속이 늦어 투입연료의 대부분이 극간부(隙間部)의 공기류를 관통할 수 없어 Pilot부로 흘러가고 연료를 줄일시의 화염의 유지가 확실히 가능하게 된다. 역으로 고부하시에는 A공은 연료의 유속이 크므로 투입연료의 대부분이 극간부의 공기류를 관통할 수 있어 B공을 통하여 메인부로 공급

<그림-1> 신연료공급 개념도



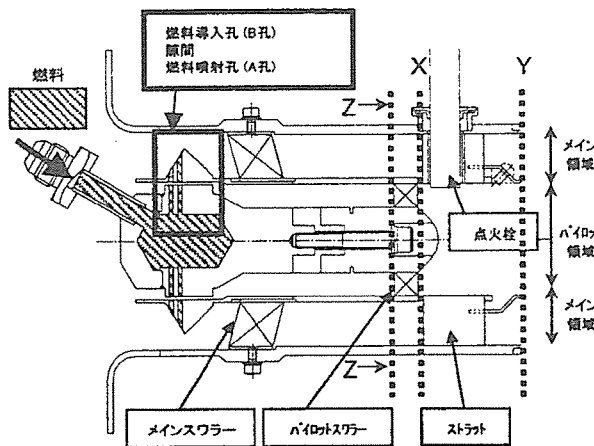
된다. 대상으로 하고있는 열병합용 가스터빈의 연소 조건에서는 Main측으로의 연료분배가 가장 많은 정격시에서도 메인부가 희박하게 되어 저NO_x화가 가능할것으로 생각된다.

이상과 같이 고안한 연료공급방식에서는 간편한 1계통의 연료공급에서도 고부하에서의 저NO_x화와 저부하에서의 연소안정화를 양립시킬 수 있고 또한 고부하~저부하간의 이동은 연료유량에 따른 분배가 자동적으로 되어 급격한 부하변동에도 양호한 부하추종성을 실현할것이라 생각된다.

2. 흐름시뮬레이션을 이용한 연료공급부 내의 당량비 계산

시작(試作)연소기와 연소평가용 테스트기기의 단면도를 그림-2에 표시하였다. 6기의 연소기(4,000kW) 중 1기만을 대상으로 하였다(350mm). 상류측으로부터 연료공급부, 라이나부(내경 142.3mm), 후미부로 되어있다.

연료공급부의 확대도를 그림-3에 표시하였다. 연료공급부는 희박에혼합연소되는 외환부(外環部, Main부)와 공기유속이 작을시 안정연소되는 내환부(Pilot부)로 구성된다.



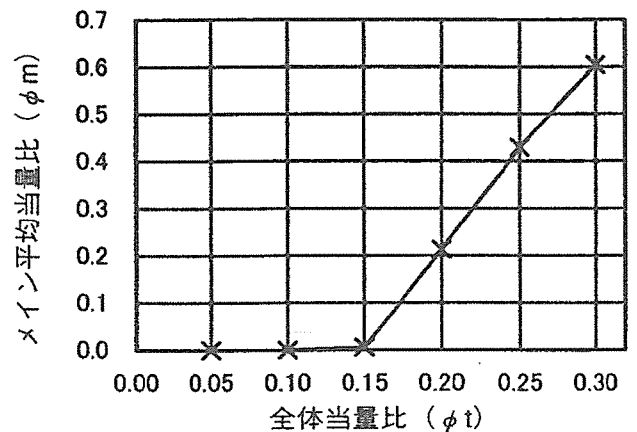
<그림-3> 연료공급부의 확대도

연료분출공(A공)의 외측에 연료도입공 (B공)이 배치되어 양자의 사이에는 Pilot 연소용공기가 흐를 수 있는 극간(隙間)이 존재한다. 이와같은 구조물이 원둘레방향에 8개가 배치되어있다.

기기의 운전조건을 고려, 투입공기온도는 350°C, 라

이나 단면에서의 연소공기 유속은 24m/s 를 설정하였다.

우선 고부하시에는 메인측에, 저부하시에는 Pilot측에 보다 많은 연료가 분배되는가를 확인하기 위하여 신(新)연료공급방식에서 키(Key)인 연료분출공(A공), 연료도입공(B공), 극간을 파라미터로 하여 비연소상태에서의 흐름시뮬레이션을 이용하여 그림-3에 표시한 연료공급부내의 당량비 (공기비의 역수로 값이 클수록 고농도)를 계산하였다. 난류(亂流)의 영향은 표준 모델을 이용할 계획이다. 공기류(空氣流)와 분출연료류와의 상호작용을 상세히 해석하기 위하여 연료분출부근의 영역에서는 Multi grit system을 사용하였다. 연료공급부의 A 및 B공의 극간 등을 자주 변화시켜 흐름Simulation을 실시한 결과 본 시작(試作)연소기 운전조건으로서 연료분출공 (A공)을 2.6mm, 연료도입공 (B공)을1.6mm, 극간을 1.2mm로 하고 고부하시의 투입연료의 대부분이 희박에혼합연소를 하는 메인측까지 도달하고 역으로 저부하시의 연료의 대부분이 Pilot측에 흘러가는것을 확인하였다.



<그림-4> 흐름시뮬레이션에 의한 평균당량비(φm)와 전체당량비(φt)와의 관계

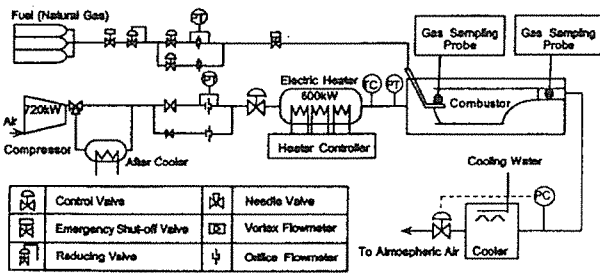
흐름시뮬레이션에서 산출된 그림-3의 X단면의 평균당량비(φmm)와 전체당량비(φt)와의 관계를 그림-4에 표시하였다. φt가 0.15 이하인 경우는 φm도 대체로 영으로 된다. φt가 0.15를 초과하면 φt의 증가와 함께 φm도 증가된다. 이로부터 그림-1에서 표시한 새로운 연료공급방식의 실현가능성이 높아진다는것을 알 수 있다.

이상의 흐름시뮬레이션 결과에 따라 상기 사양의 연료공급부를 갖춘 시작연소기에서의 고압연소평가지험을 실시하기로 하였다.

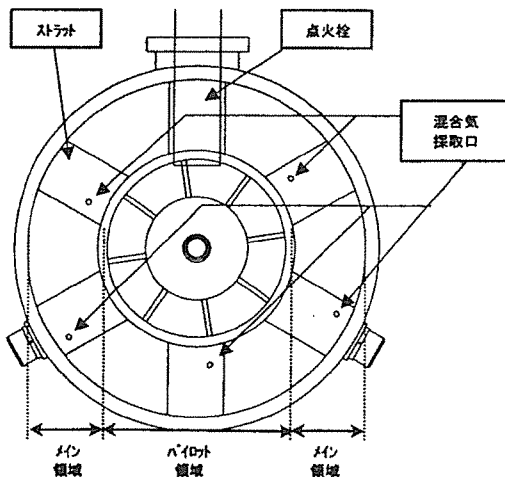
3. 연료평가장치

고압연소평가장치 전체의 계통을 그림-5에 표시하였다. 공기는 압축기로부터 공급되어 전기가열에 의하여 필요한 유입공기온도를 (350°C)에 설정, 연소기 단면유속(斷面流速)이 24m/s 가 되도록 공급공기량을 조정하였다. 연료는 13A 가스(메탄 88%, 에탄 6%, 프로판 4%, 부탄 2%)가 충전된 봄베로부터 실험에 필요한 압력으로 감압, 실온으로 연료의 노즐에 공급하였다. 연소시험압력의 영향을 고려하기 위하여 실조건에 가까운 0.80MPa 까지 몇가지의 압축기 출구압력(CDP)을 실험조건으로 하였다(0.15, 0.40, 0.50, 0.80MPa).

연소배가스분석은 세로 방향으로 7곳에 $\phi 1.0\text{mm}$ 의 채취구로부터 등량(等量)이 채취되어 혼합되는 구조의 수냉식 가스채취 Probe를 후미의 출구부로부터 하류측 약 1m 의 위치에 부착하여 가열도관에서 가스분석기에 들어가게 유도하고 NO_x, O₂, CO, CO₂, THC 의 5성분을 분석하였다. 연소효율은 실측된 배기가스 조성으로부터 계산하였다.



<그림-5> 가압연료평가장치계통도



<그림-6> 연료공급부의 단면도(Z-Z) (그림3 참조)

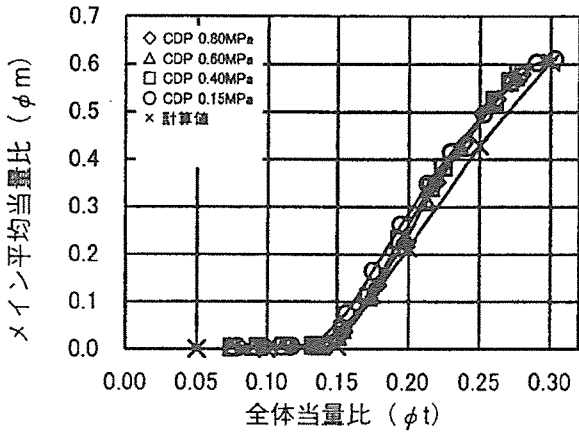
또한 그림-1에 표시한것과 같은 연료분배가 실제에 이루어지는가의 여부를 실험평가하기 위하여 메인연료공급부의 혼합기의 가스분석을 실시하였다. 그림-3 및 그림-6에 표시한 주유로(主流路)에 6개의 구조물 중 점화밸브를 내장한 이외의 5개 구조물에 $\phi 1.3\text{mm}$ 의 채취구를 각각 설치하였다. 평균농도를 계측하기 위하여 각각의 채취구는 Tip측과 Hub측에 분산시켜 설치하였다. 채취한 혼합기체를 가열도관에서 분석기에 도입, THC·O₂의 2성분을 분석하였다.

연소기 출구부의 연소배가스 평균온도(BOT)는 그림-2에 표시한 열전대에 의하여 계측하였다.

4. 연소평가결과 및 고찰

우선 본 시작연소기의 연소평가시험에 의하여 연료 1계통에서도 착화가 가능하였고 또한 급격히 연료를 줄여 부하를 변화시켰을 경우에도 실화(失火) 등이 일어나지 않았고 화염이 확실히 유지되는것을 확인 하였다. Main 평균당량비(ϕ_m)와 전체당량비(ϕ_t)의 계측결과를 그림-7에 표시하였다. 연소압력은 대체로 영향을 끼치지 않는것을 알게되었다. 그림-4에 표시한 계산결과와 동일하게 ϕ_t 가 0.15 이하의 경우에 ϕ_m 도 대체로 제로가 된다. 역시 ϕ_t 가 0.15를 초과하면 ϕ_t 의 증가와 함께 ϕ_m 도 증가한다. 이 현상은 다음과 같이 생각된다. ϕ_t 가 0.15 이하의 경우 극간을 흐르는 Pilot 연소공기를 관통하기에 충분한 에너지가 분출연료류에는 없다. ϕ_t 가 0.15가 되면 분출연료류가 Pilot 연소공기를 관통하게 되고 연료의 일부가 Main 영역에 도입되기 시작한다. ϕ_t 가 0.15를 초과하면 극간을 흐르는 Pilot 연소공기를 관통하기에 충분한 에너지를 분출연료류가 갖는것처럼 되어 ϕ_t 가 증가함에 따라 ϕ_m 도 증가한다.

연소배가스중의 NO_x치 (산소 0%환산)와 전체당량비 (ϕ_t)와의 관계를 그림-8에 표시하였다. 연소시험압력 (CDP)은 NO_x치에 크게 영향을 끼친다. CDP가 클수록 배출 NO_x는 많다. 또한 어떤 CDP에 있어서도 배출 NO_x치는 ϕ_t 가 0.15까지는 ϕ_t 와 공히 증가하지만 ϕ_t 가 0.15를 초과하면 감소한다. 이 현상은 그림-4나 그림-7의 흐름시물레이션결과나 실험결과를 기반으로 다음과 같이 생각할 수 있다. 어떠한 CDP에서도 ϕ_t 가 0.15 이하인 경우 ϕ_m 는 대략 제로이



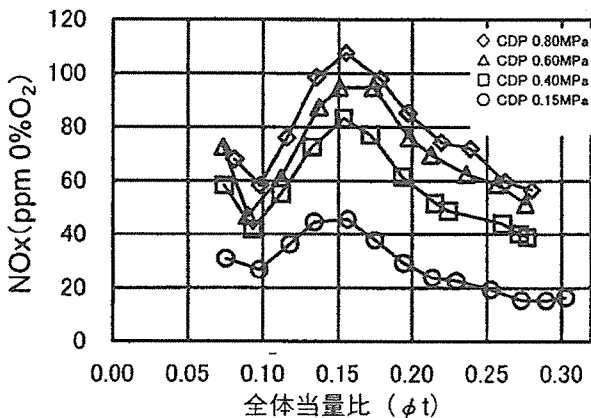
<그림-7> Main 평균당량비(ϕ_t)와 전체당량비(ϕ_t)와의 관계(실험결과)

지만 ϕ_t 가 0.15를 초과하면 ϕ_t 의 증가와 함께 희박예혼합으로 연소하는 Main 측의 연료분배가 증가하여 Pilot측의 연료분배가 감소한다.

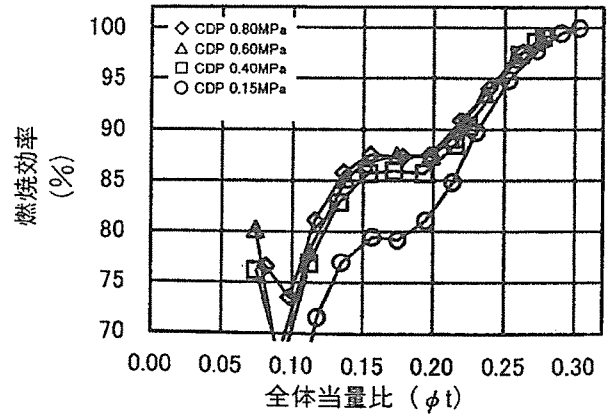
즉 고부하가 될수록 희박예혼합연소의 비율이 증가하므로 배출NOx가 감소되는것으로 생각된다. 그림-8의 연소시험결과에 따라 CDP가 0.80MPa에서 ϕ_t 가 0.28이면 배출 NOx치는 60ppm(산소 0%환산) 이하가 된다.

이것은 오사카부 NOx 지도기준치의 3/4에 상당하는 값이다. 또한 연료공급부 사양의 최적화에 의하여 동 연소조건에서의 배출 NOx치를 40ppm(산소 0%환산) 이하가 되는것도 확인하였다.

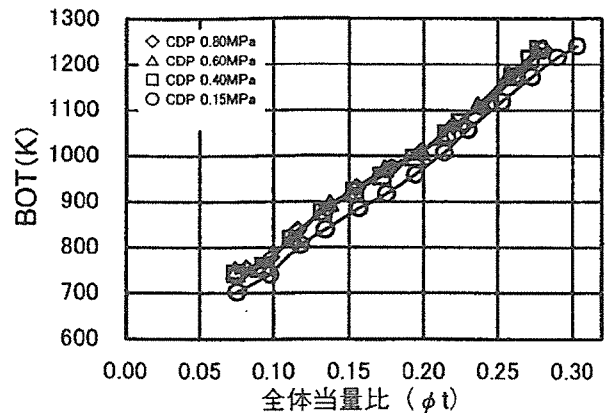
연소효율과 전당량비(ϕ_t)의 관계를 그림-9에 표시하였다. 연소압력(CDP)는 연소효율에 영향을 끼쳐 같은 전당량비의 값에서는 CDP가 클수록 연소효율은 높아진다. 전당량비가 0.20~0.30의 범위에서는 전당량비가 작아질수록 연소효율도 저하되지만 전당량비가 0.15~0.20의 범위에서는 연소효율의 저하가 억제된다.



<그림-8> NOx와 전 당량비(ϕ_t)



<그림-9> 연소효율과 전당량비(ϕ_t)의 관계



<그림-10> 연소효율과전당량비(ϕ_t)의 관계

그림-4나 그림-7의 흐름시뮬레이션의 결과나 실험 결과로부터 이 전당량비 범위에서는 ϕ_t 가 감소한 경우에 Pilot측의 당량비가 급격히 증가하므로 연소안정화를 도모하기 위하여 연소효율의 저하가 억제된 것으로 생각된다.

연소기 출구온도(BOT)와 전체당량비(ϕ_t)의 관계를 그림-10에 표시하였다. CDP 0.80MPa에서 전체당량비가 0.28의 조건에서 BOT는 약 970°C(1,143K) 였다.

5. 맺는말

코제너레이션용 Dry low-NOx 가스터빈연소기에 관해서 복수의 연료류량 제어기구나 가변공기류량 조정기구 없이 넓은 운전범위에서 저NOx·안정연소를 실현하기 위한 신(新)연료공급방식을 고안 하였다. 이 방식은 단지 연소공기의 에너지를 이용함으로써 각 연소영역에의 연료공급량을 자동적으로 조절이 가

능한 것이다. 고부하시는 대부분의 연료가 회박예혼 합연소영역에 공급되어 저NO_x화가 가능하고 저부하시에는 대부분의 연료가 Pilot 연소영역에 공급되어 연소 안정화가 가능하게 하는 것이다.

흐름시뮬레이션을 이용하여 신연료공급방식의 키인 연료분출공, 연료도입공, 극간을 파라미터로 연료공급부의 당량비 패턴을 계산, 운전조건에 맞는 사양을 설정하는것으로 이 새로운 연료공급방식의 실현가능성이 높다는것을 확인 하였다.

다음으로 앞서 기술한 연료공급부를 갖춘 시작연

소기의 (13A가스연료) 고압연소평가시험에 의하여 저NO_x화 (연소압력CDP=0.80MPa, 전체당량비 φ_t=0.28로 산소 0%환산 60ppm 이하)와 연소안정화 (연소효율의 저하 억제) 가 실현되는것을 확인 하였다.

이 간단한 구조를 도입하여 복잡한 제어기구 없이 저NO_x·안정연소가 가능하고 초기투자비의 저감이나 신뢰성·내구성 향상이 기대될것으로 사료되어 조기실용화를 진전시키고 싶다.

회원사 동정 (The State of Major Affairs in Membership Companies)

1. 제 24회 에너지절약 촉진대회 수상

지난 11월 21일 한국전력공사 대강당에서 개최된 제 24회 에너지절약 촉진대회에서 수상한 회원사 및 관계자 여러분에게 축하를 드립니다.

- 석탑산업훈장 : 에너지관리공단 김장길 공업단지사업본부장
- 산업포장 : 에너지관리공단 손규석 처장 (주)포스코 정상훈 부장
- 대통령 : 한국지역난방공사 권순갑 처장 (주)휴비스 김보광 팀장
- 국무총리 : 에너지관리공단 오중구 지도역
- 산업자원부 장관 : 한국지역난방공사 조용신 과장 한전기공(주) 한용구 대리 에너지관리공단 이종인 부장

2. 한국지역난방공사 서경 베스트 히트상품 선정

한국지역난방공사가 공급하는 '지역난방' 이 지난 11월 20일 '2002. 서경 베스트 히트상품'으로 선정됐

다. 이번 서경 베스트 히트상품은 소비자들의 요구를 충족시키고 매출에도 성공을 거둔 우수한 제품을 대상으로 가전, 정보통신, 공공서비스 등 총 10개 부문에서 72개 제품이 선정되었으며, 지역난방은 공공서비스 부문에서 단독으로 수상하였다.

3. 한전기공(주) 품질경영 우수업체 '자리매김'

한전기공(주)는 지난 11월 15일 코엑스에서 개최된 산업자원부가 주최하고 한국표준협회가 주관한 제 28회 국가품질경영대회에서 대통령상과 산업훈장을 수상했다. 이로써 한전기공(주)는 국내 품질경영 우수업체로서 자리매김했다.

4. 산단에너지(주) 출범 선포식

산단에너지(주)는 지난 11월 25일 반월발전소에서 회사명을 산단열병합발전(주)에서 "산단에너지 주식회사"로 변경하고 출범 선포식을 가졌다.