

천연가스 다단연소기술 연구

이진홍 · 목영일
아주대학교 에너지학과

A Study of Staged Swirling Combustion of Natural gas

Jin Hong Lee and Young Il Mok
Department of Energy Studies, Ajou University,

요 약

본 “천연가스 다단연소기술 연구”는, 공업적으로 널리 쓰이는 선회확산 방식으로 천연가스를 연소시킬 때 그 연소 특성과 발생하는 환경오염물질인 일산화탄소(CO)와 질소산화물(NOx)의 저감에 대한 연구로서, 천연가스의 난류확산화염과 선회확산화염의 유동장, 온도장, 농도장을 실험과 수치해석을 통하여 분석하여 각각 연소방식의 화염구조와 특성을 규명하고 해석하였다. 그리고 그결과를 토대로하여 다단확산 연소실험 장치를 제작 다단확산연소의 중요한 인자인 1차당량비, 2차공기 주입위치, 유속, 선회도 등을 변화시켜 질소산화물 저감과 높은 연소효율을 얻을 수 있는 최적의 연소조건을 찾아 내었다.

본고에서는 실험부분만을 간추려 발표하고 수치해석 부분은 다음 기회로 미루고자 한다.

Abstract : The objective of the present study is to obtain basic data on flame characteristics in natural gas combustor using turbulent diffusion and swirling diffusion combustion methods ,both of which are in wide use in industry today, and further to collect information on the associated pollutant behavior in the exhaust gases.

The main stream of this study is ,therefore, to analyze and to disclose the structure and the characteristics of the flame by the experiments and by the numerical computations with respect to changes in flow, temperature, and concentration fields. On the basis of the results obtained from experiments and computations, a staging combustor of laboratory size has been designed and assembled to demonstrate the staging diffusion combustion concept and to obtain the optimum condition which render lower NOx emission and the higher efficiency while varying 1st stage equivalence ratio, 2nd air injection point, the flow velocity, and the swirl intensity.

1. 서 론

두 차례에 걸친 석유파동 이후 석유에 크게 의존하던 국내 산업계는 일대 파란을 겪게 되었고 에너지의 안정적 공급 및 확보라는 명제에 국내에도 1987년부터 천연가스를 공급하게 되었다. 깨끗한 에너지원의 상징인 천연가스는 메탄(CH₄)을 주성분으로 하고 그 외에 에탄(C₂H₆), 프로판(C₃H₈) 등의 파라핀계 탄화수소로 이루어져 있다. 지구온난화효과 큰 원인인 이산화탄소(CO₂)의 배출이 단위열량 생산당 석탄이나 석유보다 적으며, 연료조성 자체에 질소성분이 거의 포함되어 있지 않기 때문에 연료 원인 질소산화물(Fuel NOx)의

생성을 근원부터 제거할 수 있다. 또한 석탄의 결점인 분진 및 황성분을 배출하지 않고 연료와 산화제와의 혼합물이 좋아 연소성이 타연료에 비해 아주 좋다. 그리고 천연가스는 공기보다 가벼워 누출되어도 쉽게 확산되어 날아가며, 연소속도가 늦고 발화온도가 높아 폭발의 위험성이 타 가스연료에 비하여 적다. 또한 배관으로 공급되므로 별도 수송수단이나 저장시설이 필요없어 에너지의 편리한 이용이라는 측면에서 많은 잇점을 가지고 있다. 따라서 도시공해의 감소, 부족한 발전량의 조기보완, 국민생활수준의 향상에 따른 편리성 추구 등 여러가지 수요측면에서 본 긍정성과 지적학적으로 편재되어 공급선에 불안정한 요소를

가진 원유에 대비하여 그 생산과 교역의 속성상 비교적 안정적인 공급을 보장받을수 있는 천연가스의 이용은 가스흡수식냉동기, 분산형 열병합발전 등과 더불어 더욱 확대될 것이다. 그러나 국내에서의 천연가스 사용 역사가 매우 짧아 천연가스의 고효율적인 사용과 안정적 이용 확대에 필요한 가스연소기의 설계 및 개발이 미흡한 실정이고, 또 이에 기본이 되는 천연가스 연소특성에 대한 국내자체의 연구실적 또한 전무한 실정이다. 그리고 나날이 심각해져가는 환경오염의 문제인식이 높아져 감에 따라 공해물질 배출규제는 더욱더 강화되어 갈 것이므로 이에 대응하기 위해서는 공해물질 저감기술의 축적이 무엇보다도 시급한 실정이다. 따라서 우리나라에서는 아직 초기단계에 있는 공해물질 저감기술과 함께 저 질소산화물 고효율 천연가스 연소기 설계 및 개발에 대한 연구가 요구되며 이를 위해서는 천연가스에 대한 기초자료 수집과 연소특성 연구가 필요하다.

2. 다단연소의 배경 및 이론

연소방식은 크게 예혼합연소와 확산연소로 구분된다. 예혼합연소방식은 화염이 형성되기 이전에 이미 설정된 혼합비에 의해 연료와 산화제가 혼합되어 화염대에 유입되어 연소되는 방식이다. 이것과 비교하여 확산연소방식은 연료와 산화제가 화염대 바로 전에 까지 각기 분리되어 유입되다가 서로 만나서 확산혼합되어 연소되는 방식이다.

2-1. 난류확산화염(Turbulent Diffusion Flame)

난류확산화염에 관한 연구는 1940년대부터 시작되었는데, 주로 화염에 영향이 되는 인자들, 즉 층류에서 난류로의 천이^{1,2)}와 화염내의 가스농도분포³⁾ 등에 관한 것이었다. 고속 화염장 가시화 장치(Schlieren System)가 발전함에 따라 그 것을 사용하여 확산화염의 층류에서 난류로의 천이의 상세한 관찰과 레이저 파동간섭 속도계(Laser Doppler Velocimetry : LDV)로 상기 연구들에서 부족한 난류확산화염의 난류유동특성을 측정하여 난류강도, Reynolds stress 등, 화염속성을 지배하는 제반인자들의 상관관계를 밝히는 정도였다. 최근에 와서는 레이저관련 광학계측의 발달로 전체 화염장의 시·공간 동시 측정이 가능하게 되어 비정상유동에 대한 특성규명이 활발히 연구되고 있다.

층류확산화염은 확산과정이 분자 스케일의 현상이고, 명백히 정의할 수 있는 화염대가 존재하는 것이 특징이다. 그러나 난류확산화염은 유체유동의 혼란이 물질이동현상에 영향을 주는 난류확산에 의해 지배

되기 때문에 명확한 화염대를 구분하기 힘들고 단위 체적당 반응량이 층류확산화염이나 예혼합화염에 비해 큰 폭으로 증가되어, 고밀도 고부하 연소가 가능하게 된다. 게다가 확산화염은 예혼합화염에 비하여 연소 제어가 비교적 용이하여 취급하기 안전하기 때문에 공업적으로 널리 사용되는 연소는 난류확산 화염방식을 채용하고 있다. 따라서 연소장은 보일러나 화로 안과 같이 큰용적 안에서 비교적 약한 난류의 상태에서 연소되는 것과, 가스터빈과 같이 강제선회를 부여한 공기류나, 회석용의 공기류가 만들어내는 복잡하고 강한 혼란상태에서 연소되는 것 등 여러가지가 있다.

난류확산화염의 화염대는 대부분의 경우 소용돌이가 이리저리 맴도는것 같은 구조를 하고 있으며, 이것이 시간적, 공간적으로 끊임없이 회오리치듯 변동한다.

예혼합화염에서는 화염대를 사이에 두고 미연가스와 기연가스가 분리되며, 화염면은 미연가스 쪽으로 전파되고 기연가스를 향해서 온도 상승과 팽창을 하는데 이 전파속도와 팽창속도가 평형을 이루는 곳에 화염이 안정된다. 이것과는 대조적으로 확산화염에서는 연료와 산화제가 화염대 사이에 두고 각기 이곳으로 확산하여 들어와 화염을 형성하고 발열, 팽창하여 연료와 산화제를 원래의 방향으로 밀어 보낸다. 이 팽창속도와 확산속도가 평형을 이루는 곳에서 화염이 안정된다. 이와 같이 난류확산화염의 경우에는 예혼합 화염에서는 없는 특징적인 현상이 있기 때문에 큰규모의 난류확산화염과 작은규모의 그것과는 연소의 양에서 상당한 차이가 나타난다.

2-2. 선회화염(Swirl Flame)⁴⁾

선회화염은 주로 공기를 선회 유동시켜 연소를 시키는 것이다.

선회화염에 대해서는 선회화염의 재순환영역의 구조를 통한 화염의 안정성에 대한 연구⁴⁾와 난류선회화염을 대상으로 미연소 유동장과 연소장의 속도분포와 난류강도를 LDV 를 이용하여 측정한 연구⁵⁾ 등이 꼽힐 수 있다. 거기서 더 나아가 선회연소기에 있어서 세차와류 연소심(Precressing Vortex Core)이 연소에 미치는 영향을 규명한 연구^{6,7)}와, 선회연소기의 연소소음에 관한 연구^{8,9)}로 이어졌다. 위의 연구결과들을 토대로 계속하여 선회난류 확산화염에 있어서 NO 생성에 관한 연구^{10,11)}와 화염의 안정영역확대를 시도하는 연구^{12,13)}가 많이 진행되고 있다.

선회유동은 연소기에서 화염을 제어하는데 사용될 뿐만아니라, 여러가지 형태의 것에 응용되고 있다. 난류선회유동은 공기역학적으로 회전운동과 자유난류운동과의 조합으로 형성된다.

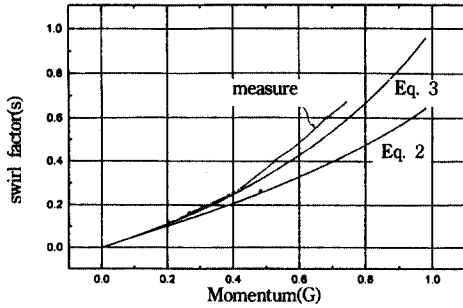


Fig. 1. Relation between swirl factor and momentum.

회전운동이 노즐 상류에 가해지면, 노즐에서 축방향, 반경방향, 접선방향의 모든 방향으로 유동장이 발생하며 그에따라 각방향으로 압력구배가 나타나게 된다. 이 회전운동의 강도를 나타내 주는 무차원 수를 선회도(Swirl number)라 하며, 다음과 같이 정의한다⁴⁾.

$$S = G_0 (G_x \times d/2) \quad (1)$$

여기서 G_0 는 선회유동의 접선방향 유체운동량의 축방향분 이고

G_x 는 유체 선회유동의 축방향분 이다.

선회강도 S 는 노즐에서의 유동이 강제회전 꼭지흐름(Solid body rotation plug flow)라고 가정하여 풀면 다음식과 같이 정의 된다.

$$S = \frac{G/2}{1 - (G/2)^2} \quad (2)$$

여기서 G 는 유동의 접선방향분의 최대속도를 축방향분 최대속도로 나눈 값(W_{m0}/U_{m0})이다.

S 와 G 의 관계가 Fig. 1에 나타나 있다. 강제회전 꼭지유동 가정하에서 S 와 G 의 관계는 G 값이 0.4($S \approx 0.2$) 이하에서는 실측치와 잘 일치하고 있으나, 그 값 이상이 되면 꼭지유동이라는 가정은 그림 1에서 보듯이 맞지 않고 있음을 알 수 있으며 다음식을 사용하는 것이 조금 더 정확하다.

$$S = \frac{G/2}{1 - (G/2)} \quad (3)$$

선회도가 0.6 이상이 되면 축방향의 압력구배가 역전되어 축방향 유동의 재순환영역이 생성된다.

확산화염에서 약선회($S < 0.6$)는 특별한 목적으로 사용되고 있는데, 이 경우 화염의 길이는 더 길어지게 된다. 한편 강선회($S > 0.6$)에서 생성되는 재순환영역은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

가. 노즐근처에서 주위 공기와의 높은 혼합율로 화염의

길이 가 짧아진다.

나. 고온의 연소생성물이 상류로 재순환하기 때문에 화염의 안정성이 증대된다.

따라서 재순환영역의 형상과 강도는 화염안정성, 연소부하, 체류시간(Residence time)과 같은 화염인자에 중요한 영향을 미치고 있기 때문에 선회화염은 가솔린 및 디젤 엔진, 연소로, 가스 터빈등 여러 연소기에서 사용되고 있다.

2-3. 다단연소(Staged Combustion)

공기를 여러단계로 나누어 공급하는 다단연소에 관한 연구로는 1차 연소영역의 연료와 공기의 예혼합율과 당량비의 변화에 의한 질소화합물의 생성과 억제에 대한 연구가 주종을 이루어 최대용량 6.28MW의 실용 보일러에서 NO_x 를 50ppm이하로 낮추고¹⁴⁾ 연소기의 기하학적 형상과 유동특성을 변화시켜 연료와 공기를 접선방향으로 주입하여 강한 내부 재순환을 형성시켜 2.5MMBtu/hr에서 NO_x 농도 25ppm(O_2 5%) 이하의 성능을 가진 저 NO_x 형 2단연소버너를 개발¹⁵⁾ 하는데 이르렀다.

연료가 완전연소를 하면 수증기와 이산화탄소만이 생성되나 실제의 연소에서는 여러가지 원인으로 불완전연소를 하여 일산화탄소, 미연탄화수소, 그을음(Soot)와 같은 공해물질의 생성이 필연적으로 뒤따르게 마련이다. 그러나 끈질긴 연구의 결과로 연소기의 고성능이 이루어져 괄목할만한 개선이 이루어졌다. 그러나 고성능화로 인한 화염장의 고온은 공기중의 산소와 질소를 열반응시켜 질소산화물이라는 새로운 공해물질을 생성시키고 있다. 이 질소산화물들(NO , NO_2 , N_2O 등)을 총량라하여 NO_x 라 하는데, 이 중 이산화질소(NO_2)는 다량의 공기를 유입하는 연소기(예: 가스터빈연소기)내에서 생성되며, 그 이외의 대다수 연소기에서는 배가스 중에 포함된 NO 가 대기중에서 산화하여 NO_2 를 생성하게 된다. 따라서 NO_x 를 제어하기 위해서는 근본적으로 NO 를 제어해야 하므로, 본 연구에서는 NO 에 대하여 주목할 것이다.

질소산화물은 연료중의 질소가 연소시 산화하여 생성되는 연료원인 질소산화물(Fuel NO_x)과 공기중의 질소가 고온(1500K 이상)에서 산화하여 생성되는 열적 질소산화물(Thermal NO_x)로 구분된다. 천연가스는 질소성분을 거의 포함하고 있지 않으므로 열적 질소산화물의 생성만을 고려하겠다.

열적 질소산화물은 다시 고온에서 열분해된 탄화수소기가 화염대에서 산화하여 급격히 발생하는 급속 NO_x (Prompt NO_x)와 화염대 후류에서 생성되는 NO_x 로 구분된다. Thermal NO 는 화염온도와 산소농도에 크게

의존하므로 NO의 생성제어에는 화염온도와 산소농도를 저하시키는 방법이 효과적이다. 이에는 물분사법, 수증기분사법, 배가스 재순환법, 다단연소법, 농염연소법 등 여러가지 방법이 있는데, 이 중 본연구에서 채택한 다단연소법에 대하여 설명한다.

다단연소법(또는 2단 연소법)은 연소를 1단, 2단으로 나누어 수행하는 방법이다. 연료과잉 상태에서 일단 연소가 일어나게 한후 이 화염의 적당한 부위에 이차공기를 공급하여 완전연소를 만드는 것이다.(본연구에서는 이일단 연소에 선회확산 연소법을 채용하였다.) 이렇게 하여 일차연소시 열분해로 생성되는 질소화합물이 NO로 전환되는 것을 방지하고 이단연소로 잔류하고 있는 미연성분의 완전연소와 질소산화물의 분해를 촉진하는 방법이다. 이때 1차 당량비, 화염온도, 잔류시간 등이 중요한 인자이며, 질소화합물의 환원영역을 확대시키는 것이 중요하다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

본 연구에서는 동축분류 선회확산화염을 형성하기 위하여 Fig. 2와 같은 축방향및 접선방향주입(Axial and Tangential entry)방식의 연소기를 제작하여 사용하였다.

선회발생장치를 보면, 선회용 공기가 외통(Outer tube)에 설치된 4개소의 접선방향 주입구를 통한 후, 균일한 선회유동을 형성하기 위하여 다시 내통(Inner tube)에 뚫린 4개소의 접선방향 슬릿(Tangential inlet slit)을 통과하여, 축방향으로 주입되고 있는 공기와 섞여 최종적으로 얻고자 하는 선회강도의 유동장을 형성하게 된다.

3-2. 실험적 방법

앞서 설명한 연소기에서 연료노즐의 내경을 6mm로 두께는 1, 2, 3, 4mm로 변화를 주었다.

연료노즐과 공기노즐의 교축비(Blockage ratio:ω) 및 연료노즐의 두께에 변화를 주기위하여 유로면적이 다른 공기노즐과 두께가 다른 연료노즐을 바꿔 끼워 가며 실험 하였다.

그리고 2단 연소용 화염통은 2차 공기 주입시 기연가스와 2차 공기의 혼합을 양호하게 하기위하여 2차 공기 주입구를 연소로 둘레에 등간격으로 3개소 설치하였다.

다단 연소시에는 화염통 측면, 연소기 노즐로부터 상단 100, 200, 300mm의 거리에 있는 공기 주입구로 공기가 주입 되는데 축을 마주보며 직각방향으로 들어

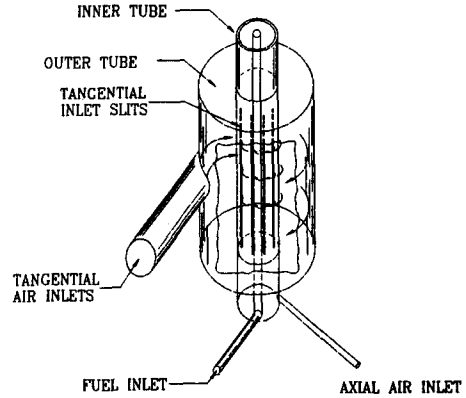
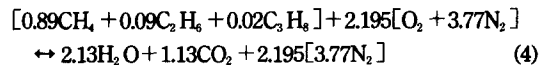


Fig. 2. Axial and tangential inlet swirl combustor.

오게 하였다.

가. 연료 공기 당량비:Φ

본 실험에 사용된 천연가스의 당량비 계산을 위하여 천연가스의 성분은 한국가스공사 분석대표치를 사용하였다. 표준상태(25°C, 대기압)에서 천연가스와 공기의 반응을 보면 다음 식과 같이 된다.



윗 식에서 연료 1mole과 공기 10.47mole(2.195×4.77)이 반응하므로 이론연공비와 실제연공비의 비인 당량비는 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi = \frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{stoch}} = \frac{(F/A)_{act}}{1/10.47} = 10.47(F/A)_{act} \quad (5)$$

나. 연료 공기 운동량비

버너출구에서 단위면적당 연료와 공기의 운동량비는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\frac{m_{fuel}}{m_{air}} = \frac{(\rho U^2)_{fuel}}{(\rho U^2)_{air}} \quad (6)$$

다. 선회도(S)

선회도는 설정된 유량들에 대하여 노즐출구에서 각각의 유동장을 3차원 측정하여 얻은 수치를 앞에서 정의된 방정식 식 3에 대입하여 작성된 선회도 대 운동량비 도표 Fig. 1를 작성하여 사용하였다.

라. 교축비(Blockage Ratio:ω)

연소로 내에서 확산화염의 당량비를 고정하고 운동량비를 변화시키기 위하여 연료노즐 외경과 공기노즐내경의 비를 정의하여 사용하였다.

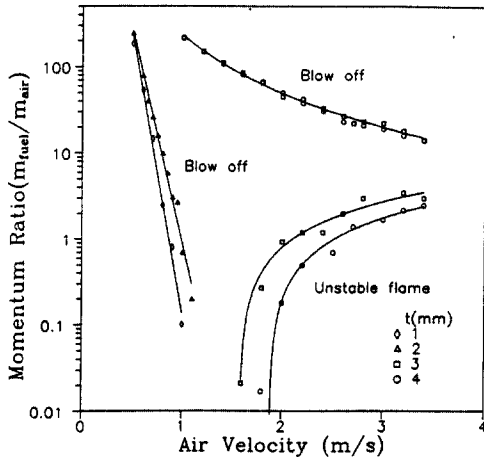


Fig. 3. Flame stable zone on fuel nozzle thickness vs. momentum ratio plane.

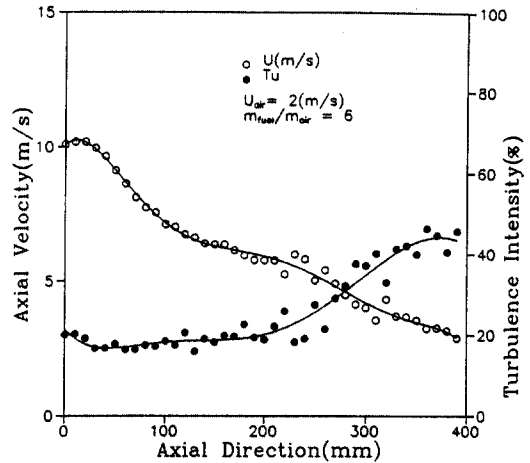


Fig. 4. Turbulence intensity and axial velocity vs. axial direction.

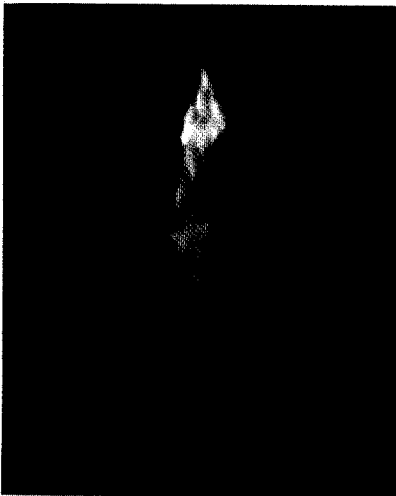


Photo. 1. Diffusion-flame lifting.

4. 실험결과

Fig. 3은 연료노즐의 두께(rim)를 1, 2, 3, 4mm로 변화시켰을 때의 노즐선단에서 화염의 안정성을 나타내는 것이다.

노즐의 두께가 두꺼워 질수록 화염의 안정영역이 확대되는 것을 볼 수가 있다. 특히, 두께가 2에서 3mm로 증가될 때 화염안정영역이 급격히 확대되는 것을 볼 수가 있는데, 이는 노즐선단에서 공기와 연료가 확산 혼합되어 예혼합기를 형성하여 그 후류에서 확산화염이 형성되나 공기와 연료의 유속이 증가하면 이런 확산 혼합유동을 유지시켜줄 최소한의 재순환영역을

필요로 하기 때문이다. 결국, 노즐선단에서 최소한의 재순환영역을 확보하기 위해서는 두께가 3mm 이상이 되어야 하는 것을 알 수 있다.

그리고 유량조건에 따른 화염안정성을 보면 노즐 두께 1~2mm까지는 운동량비(m_{fuel}/m_{air})와는 거의 무관하게 공기유속에 의해서 취염한계(Blow off)가 나타나는 것을 볼 수가 있다. 그러나 노즐두께 3mm부터는 운동량비가 취염한계에 더 큰 영향을 주는 것을 볼 수가 있다. 즉 재순환영역이 큰 유량이 흐르는 노즐 선단에서 화염이 생성되기 위해서는 공기와 연료의 운동량비가 어느 범위안에 있어야 하는 것이다. 버너의 조절대역비(Turndown Ratio)를 크게하기 위해서는 적절한 운동량비(1~10)가 존재함을 알 수 있다.

그리고 재순환영역에 의한 화염의 안정화기구는 상취염한계와 하취염한계로 구분되는 것을 볼 수가 있다. 하취염한계는 분출되는 연료가 적어 노즐선단의 예혼합기가 희박한 상태이기 때문에 화염의 시작점부터 불안정해져 결국 꺼지게 되는 양상을 나타낸다. 그러나 상취염한계에서는 화염 시작점의 예혼합기가 연료과잉 상태이기 때문에 안정되게 화염을 형성하나 화염의 후류에서 연료와 공기의 운동량차이가 커져 전단응력으로 인한 화염면의 찢어짐이 발생하여 중간부분에 화염대가 존재하지 않는 형상을 띄게 된다(Photo.1). 이 후 유량을 더욱 증가시키면 결국 화염은 완전히 날아가고 만다.

Fig. 4는 특정의 유량조건에서 화염의 중심축상에서 축방향에 따른 화염의 유동장을 나타내는 것인데 레이어 간섭 무늬 속도계로 측정 하였다. 연료 및 공기 출구부터 약 30mm까지는 연료유속이 노즐출구에서와

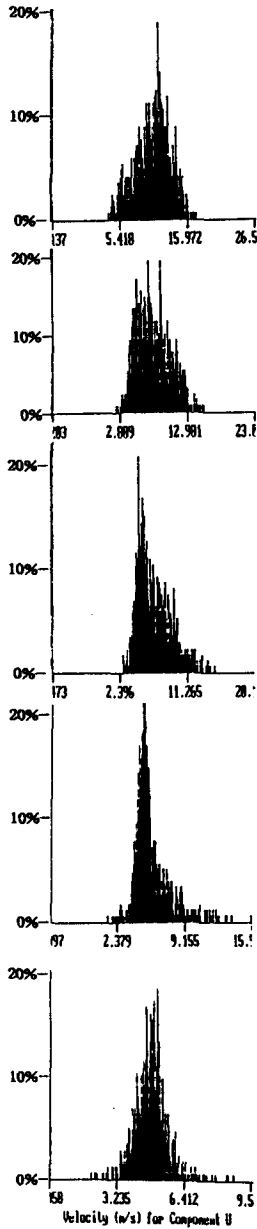


Fig. 5. PDF($U_{ax}=4m/sec, m_{fuel}/m_{ax}=10$).

거의 동일하게 유지되는데, 이는 동축분류공기의 영향으로 자유분류화염과 비교하여 두 유체간의 유속차가 적어 전단응력이 상대적으로 적게되어 축방향 유속의 감소가 더디게 진행되는 것이다. 그리고 이후부터는 동축분류공기축과 연료축의 운동에너지 전달이 활발히 일어나 혼합 및 반응으로 인하여 연료축의 축방향유속이 감소되는 것을 볼 수 있다. 이것은 난

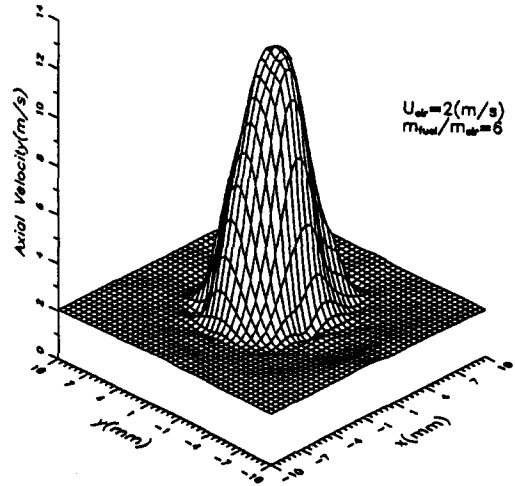


Fig. 6. Axial velocity distribution on X-Y plane.

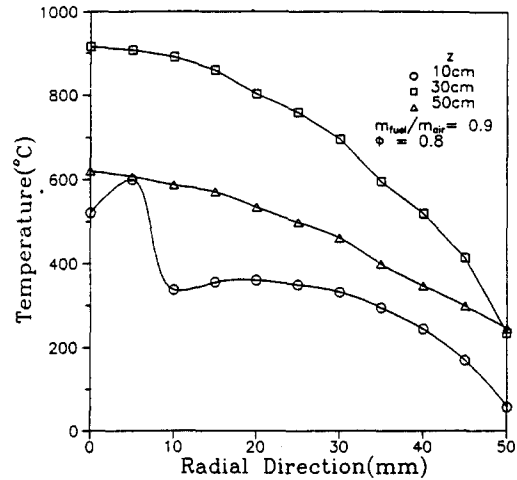


Fig. 7. Temperature gradient vs. radial direction ($\phi=0.9$).

류강도가 유동장의 후류측으로 갈 수록 증가하는 것 으로부터 알 수 있다.

Fig. 5는 확산화염 유동장의 반경방향에 따른 확률밀도함수(Probability Density Function:PDF)를 나타 내는 것이다. 공기류의 PDF는 정규분포를 나타내고 있으며 화염대로 갈 수록 연료류와의 속도차에 의한 전단력으로 저속의 영역으로 이동하는 것을 보이고 있다. 그리고 화염의 중심축상인 연료류의 중심으로 이동하면서 PDF는 다시 정규분포를 보이고 있다. 여기서 공기류및 연료류의 확률밀도함수가 정규분포를 나타내는 것은 그 유동이 완전 발달된 유동이기 때

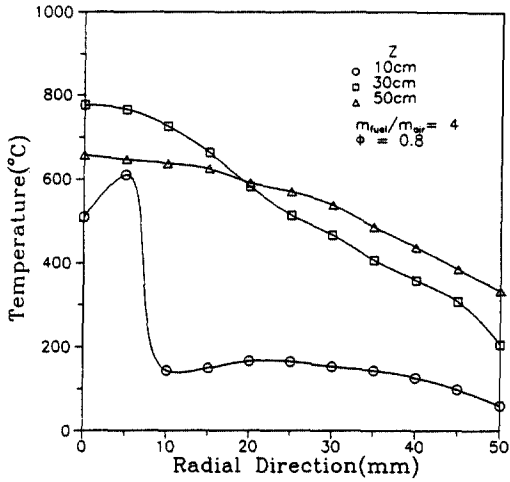


Fig. 8. Temperature gradient vs. radial direction($\phi=4$).

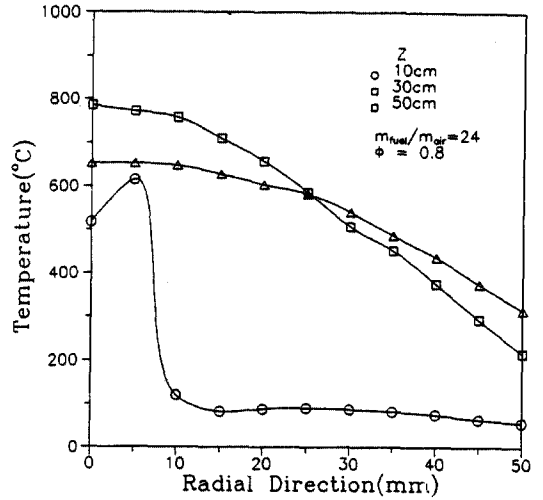


Fig. 9. Temperature gradient vs. radial direction($\phi=24$).

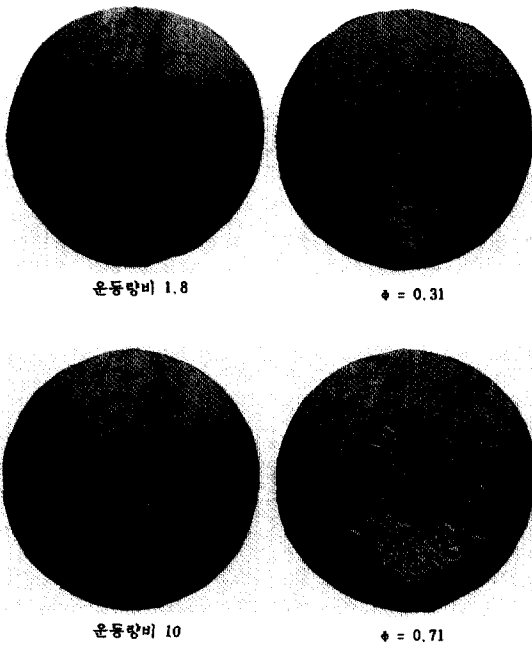


Photo. 2. Schlieren figure of swirling diffusion flame.

문이나 화염대에서 비정규분포를 보이는것은 연료가 공기와 혼합되면서 유동이 흐트러지기 때문이다. 이는 앞의 실험 결과들인 축방향 유속성분과 잘 연관되고 있다.

Fig. 6에는 버너출구 단면에서의 유동장 분포가 나타나 있다. 연료의 운동량이 공기의 운동량보다 큰 조건이기때문에 중앙의 연료노즐에서 속도분포가 큰

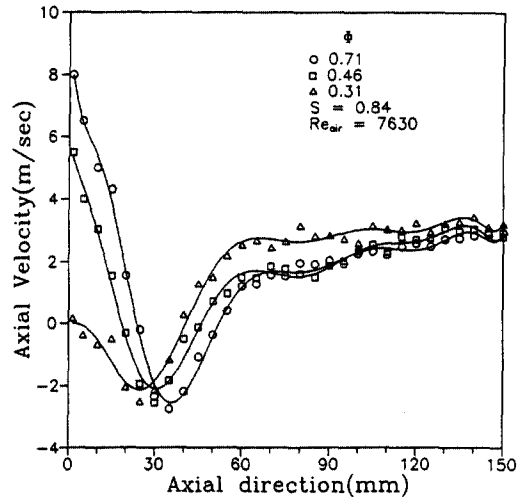


Fig. 10. Axial velocity on axial direction vs. stoichiometric plane.

것을 볼 수 있다. 그리고 난류강도는 화염대부근에서 가장 최대치를 나타내고 있으며, 속도, 난류강도가 앞의 결과와 같은 분포를 보여주고 있다.

확산화염의 공기와 연료의 운동량비에 따른 온도 분포와 배출특성을 연구하기위하여 연소로 내에서 당량비는 0.8로 고정시키고 운동량비를 0.9, 4, 24로 변화시켜 가면서 연소를 시켰다.

Fig. 7은 운동량비 0.9일때 화염온도분포를 나타 내는 것이다. 기체온도는 L=10mm에서 가시적으로 정의할 수 있는 화염대에서 최대치를 보이다가 중심

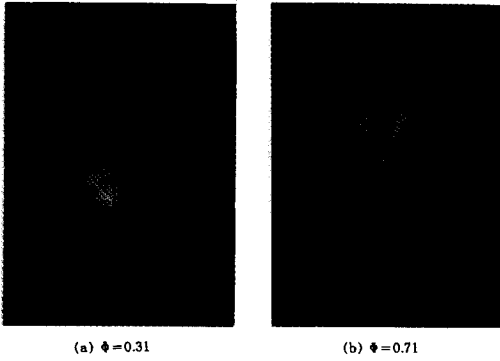


Photo. 3. Direct photo. figure of swirling diffusion flame.

부의 연료 심부(Fuel Core)에서 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. L=30mm에서 온도가 가장 높게 나타나고 있으며, 더 이상의 연료심부는 보이지 않는다. 전체적으로 온도분포는 연소로 벽으로 갈 수록 감소하는 것을 볼 수 있다. L=50mm에서 온도는 전체적으로 L=30mm와 비교하여 낮아졌으므로 연소가 거의 완결되어가고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 운동량비가 4일때로 L=10mm에서 운동량비 0.9와 경향은 같으나 주위류의 온도는 낮게 나타나고 있다. 이는 운동량비 0.9일때 공기류의 운동량 증가로 연소로내의 재순환영역이 커져 화염하류의 고온의 가스가 상류로 유입되는 것으로 판단된다. L=30과 50mm에서는 운동량비 0.9와 비교하여 전체적으로 화염온도가 낮게 나타나고 있는데, 이는 공기류 운동량의 감소로 원활한 연소반응에 필요한 충분한 혼합이 이루어 지지 못하기 때문이라 사료되며, Fig. 9에서 이 현상은 계속되어 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다.

따라서 이상의 결과인 화염안정영역과 온도분포 및 배출특성을 비교 고려하여 볼때, 확산연소화염에서 부하의 조절대역 범위도 가장 넓게하고 동시에 연소 효율도 높이기 위해서는 버너의 설계에 있어 연료노즐의 두께는 3mm 이상이 되어야 하고 당량비 0.8을 운동량비 2에서 3 사이에 맞추어 설계하는 것이 최적이라는 결론을 얻을 수 있다.

본 실험에서는 선회확산연소의 화염안정에 영향을 주는 재순환영역에 대한 분석실험을 수행하였다.

Fig. 10은 선회도 0.84일때 당량비 변화에 따른 측방향으로의 유속분포를 나타내는 것이다. 당량비가 증가할 수록 재순환영역이 하류에서 형성되는 것을 볼 수 있으며, 그을음(Soot)의 발생도 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 연료유속의 증가때문으로, 화염을 노즐 출구에서 안정되게 연소시키기 위해서는 선회도에

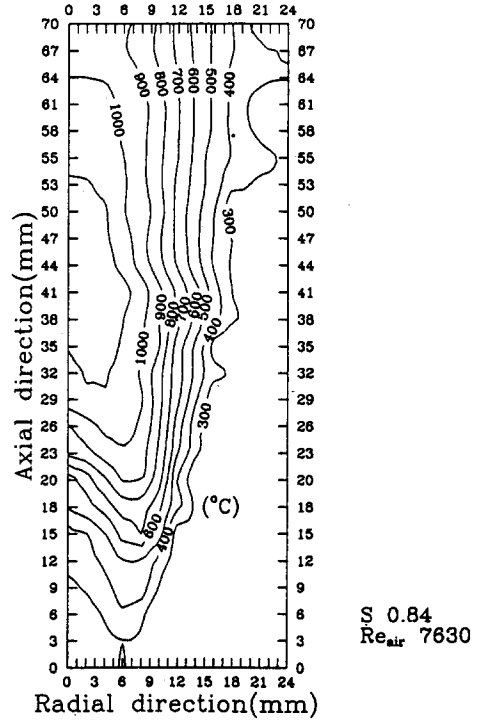


Fig. 11. Temperature gradient upon radial and axial plane.

따라 적정의 유속이 필요한 것을 가리킨다. 그리고 선회유동을 형성시키는 공기의 유동조건도 화염의 형상에 영향을 주었다. 즉, Reair가 작으면 선회도가 높아도 화염은 황등색을 띄며 그을음을 발생하게 된다.

그리고 당량비 0.31과 0.71의 직접 촬영결과가 Photo. 3에 나타나 있는데 당량비 0.71은 유동장 측정에서 알 수 있듯이 화염이 노즐로부터 수 cm 인양 (lifting) 되어 형성되었으며 당량비 0.31은 재순환영역의 노즐선단에서의 형성으로 화염대가 인양되지 않았다. 그리고 보다 정성적으로 화염대의 구조를 분석하기 위하여 Schlieren 사진을 촬영하여 Photo. 2에 보였다. 당량비 0.71은 화염의 인양으로 인하여 연료의 분출 심부가 관찰되었으며 당량비 0.31과 비교하였을때 화염대의 폭은 훨씬 넓게 분포되어 있다. 그리고 Schlieren에서 보듯이 실제 화염길이가 가시적 화염길이 보다 고온의 연소가스로 인하여 하류로 넓게 분포함을 알 수가 있다. 비선회의 그것과 비교하여 보면 화염대의 난류도가 증가하면서 작은 난류 소용돌이들이 아주 복잡하게 배치된 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 11은 선회확산화염의 온도분포를 나타내는 단면도이다. 중심부의 연료심부에서 온도는 낮게 측정되었으며, 주위공기류와 혼합되어 화염을 형성하는

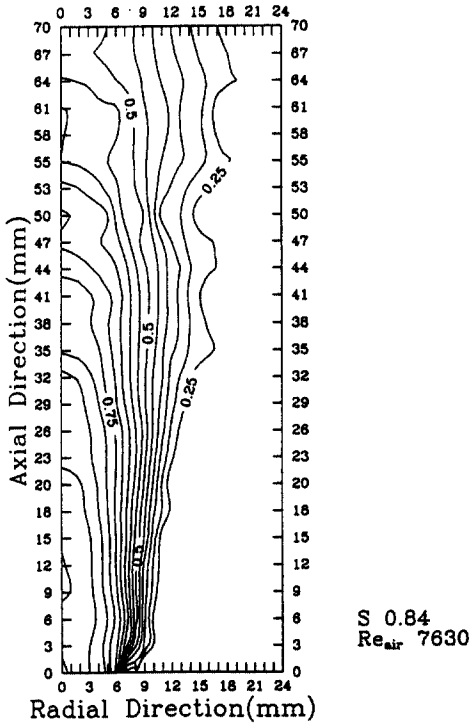


Fig. 12. Stoichiometry gradient on axial and radial plane.

노즐 선단부의 화염대에서 온도가 상대적으로 높게 측정되었다. 따라서 온도분포는 화염의 형상과 같은 양상을 나타내고 있다.

그리고 화염의 최대온도는 재순환영역의 흐름이 활발히 진행되고 있는 중심부에서 측정되었으며, 이는 재순환영역 흐름에 의해 화염대에서 고온의 기체가 유입되어 미연가스와 혼합되어 연소되기 때문이다. 전체적으로 화염의 후류에서 고온의 화염대가 두껍게 형성되고 있다.

Fig. 12는 화염의 농도장을 보인 것이다. 전체적인 농도분포는 온도분포와 잘 일치하고 있다. 노즐의 중심부에서 산소농도는 거의 희박한 상태이며 화염대로 접근할 수록 당량비는 감소하고 있다. 그리고 화염의 최고온도를 나타내는 위치에서 당량비는 이론당량비보다 공기과잉의 상태인 0.7~0.8의 분포를 나타내는데, 이는 화염이 최고온도를 가질때의 당량비는 이론당량비보다는 약간 공기가 과잉된 상태에서 일어난다는 일반적인 사실과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

본 다단연소실험에서는 먼저 총당량비를 결정하기 위하여 1차당량비를 변화시켜 가면서 총공기비 1.2, 1.3, 1.4, 1.6에 대한 NO의 배출특성을 분석하였다.

Fig. 13에서 볼 수 있는 것처럼 총공기비가 증가할

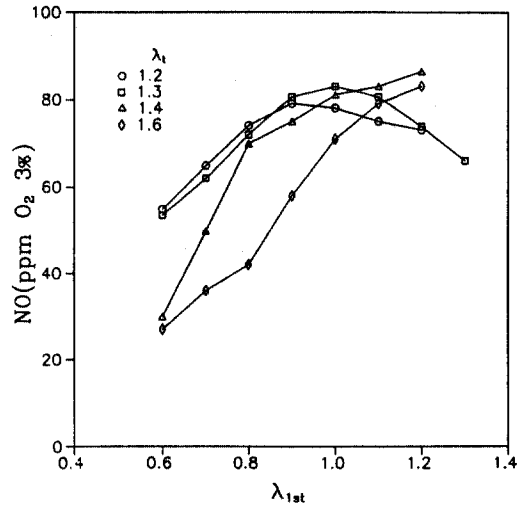


Fig. 13. NO emission upon total air ratio.

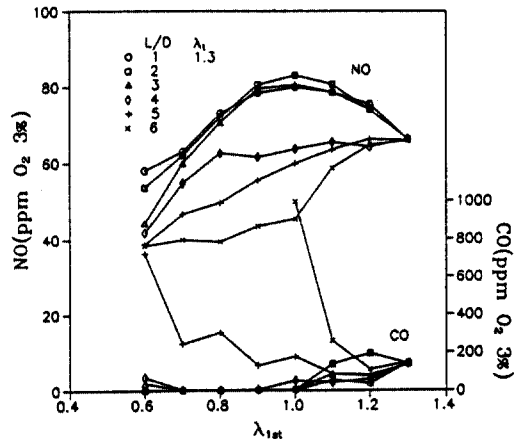


Fig. 14. NO, CO emission upon 1st air ratio.

수록 NO는 감소하고 있다. 그런데 NO의 최대 배출이 비다단에서가 아니라 1차공기비 0.9~1.4에서 나타내고 있는데, 이는 비다단시 연료와 공기의 혼합이 비교적 양호하지 못하며 오히려 다단이 시작됨에 따라 2차공기의 유입으로 연료와 공기의 혼합이 촉진되어 연소상태가 호전되기 때문이다. 그리고 그림에는 나타나 있지 않지만 공기비 1.2에서는 CO의 배출이 다소 많이 측정되었다. 따라서 본 실험에서는 CO 배출이 비교적 양호한 공기비 1.3으로 고정하여 1차당량비와 2차공기주입위치 공기속도 변화에 따른 실험을 수행 다음 과같이 결과를 얻었다.

Fig. 14가 그것인데 2차공기 주입위치를 L/D=1, 2,



(a) L/D = 2



(b) L/D = 5

Photo. 4. Combustor surface temperature gradient.

3, 4, 5, 6 으로 변화시켜 가면서 1차당량비를 변화시켜 얻은 결과이다. 먼저 주입위치에 따른 배출특성을 보면, 주입위치가 1차연소영역으로부터 멀어질 수록 NO는 저감되는 경향을 나타내고 있으나 CO의 배출은 급격히 증가함을 볼 수 있다. 1차 연소가스의 체류시간이 길어짐에 따라 연소가스의 온도가 저하되어 2차공기를 주입하여도 연소반응이 제대로 이루어지지 않기 때문에 NO는 저감되나 CO의 배출이 증가하는 것이다. 이는 연소로 전체의 표면온도분포로부터 알 수 있다. Photo. 4에 연소로의 표면온도가 나타나 있다. 사진에서 알 수 있듯이 2차공기 주입위치에서 최고온도를 나타내고 있으며 L/D=5(380°C)에서 최고온도는 L/D=1(480°C)에 비교하여 낮게 분포되고 있다.

따라서 L/D=5, 6은 CO를 다량발생시켜 부적절한 주입위치로 판정되어 L/D=1, 2, 3, 4에 대하여만 1차 공기비를 계속 줄여가면서 배출특성을 조사하였다.

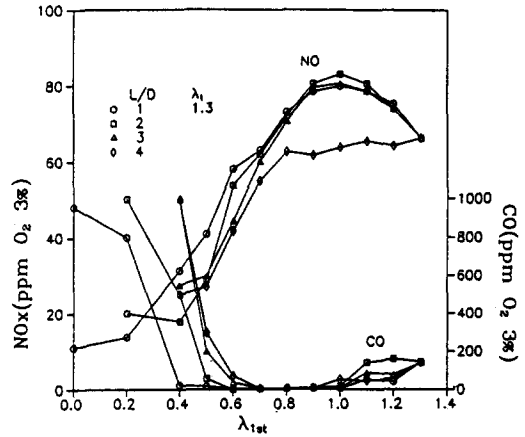


Fig. 15. NOx, CO emission upon 1st air ratio.

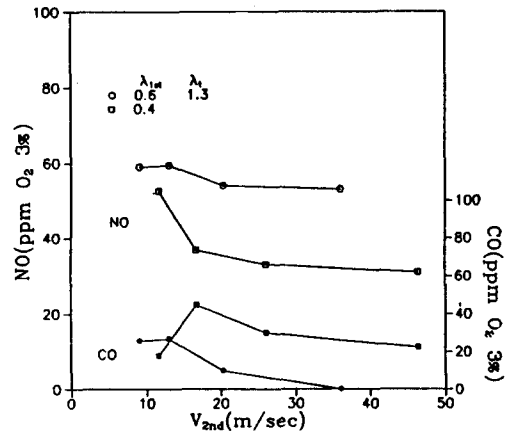


Fig. 16. NO, CO emission 2nd air velocity.

Fig. 15, Fig. 16이 그 결과들이다. 전체적인 경향은 NO의 배출이 최대가 되는 1차공기비에서 CO의 배출은 최저로 감소되다가 1차공기비가 계속 감소함에 따라서 다시 NO의 배출이 감소되면서 CO의 배출이 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 서로 상반된 배출특성을 보이고 있는 NO와 CO를 적절하게 만족하기 위해서는 주입위치와 1차공기비를 동시에 고려하여 최적의 상태를 결정하여야 한다. NO의 배출의 측면에서 볼 때는 L/D=4가 가장 좋으나 1차공기비가 0.6일 때부터 CO의 배출이 급격히 증가하는 결점이 있다. 따라서 전체적인 NO와 CO의 저감면에서 고려할때, 2차공기 주입위치를 L/D=1에 1차 공기비를 0.4로 할때가 최적인 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서 획득한 기본자료를 토대로 천연가스를 연소시킬때 발생하는 환경오염 물질인 질소산화물(NOx)과 일산화탄소(CO)를 줄일 수 있는 방안의 결론은 다음과 같다. 다만 자료들은 실험과 전산모사로 얻어진 것이나 앞서 요약에서 말했듯이 전산모사 부분은 다음의 투고에서 발표코자 한다.

1. 확산화염 안정영역의 확대를 위해서는 연료노즐 두께를 3mm 이상으로 하여야 한다.
2. 연소로 내에서 넓은 부하범위를 만족시키며 확산화염이 양호한 연소상태를 유지하도록 하기 위해서는 설정된 당량비에 따라 연료와 공기의 운동량비를 2~3에 맞추는 것이 최적이다.
3. 동축분류확산화염의 비연소장과 연소장의 유동장 분석을 통하여 화염대의 존재는 급격한 온도증가로 인한 난류도의 증가를 유발시킨다.
4. 연료의 유동특성이 동축분류 난류확산화염대의 특성을 규정한다.
5. 선회확산화염의 화염안정에는 연료의 분출유속이 중요한 변수로서 유속이 증가하면 화염안정기구인 재순환영역이 하류에서 형성된다.
6. 유동장, 온도장, 농도장 분석을 통하여 재순환영역 내에서도 선회의 유동이 존재하고 고온의 화학반응이 일어나며 재순환영역의 경계에서는 접선방향의 유속성분(W)만이 존재한다.
7. 2단연소에서 1차공기비가 감소할 수록, 또 2차공기 주입위치가 1차연소영역에서 멀어질 수록 NO의 배출은 감소하나 반대로 CO는 증가한다.
8. 2차공기의 주입유속의 증가는 NO, CO 모두를 저감시킨다.
9. 1차공기류의 약선회($S_{max} < 0.54$)는 NO의 생성, 소멸에 큰 영향을 주지 못한다.
10. 2차공기주입위치를 직경과 같은 위치($L/D=1$)일 때가 일차공기비의 넓은 범위에서 CO의 배출특

성이 좋으며 이점 산업용 연소기 설계시 특히 잘 고려해야 한다.

참고문헌

1. K.Wohl, C.Gazley and N.Kapp: 3rd Symposium on Combustion, pp. 288 (1949).
2. D.A.Scholefield and J.E.Garside: 3rd Symposium on Combustion, pp.102 (1949).
3. W.R.Hawthorne, D.S.Weddell and H.C. Hottel: 3rd Symposium on Combustion pp. 3 (1949).
4. A.K.Gupta, D.G. Lilley, N.Syred: *Swirl Flows*, pp.1-23, (1984).
5. N.Syred, N.A.Chigier: 13th Symposium on Combustion, pp. 617 (1971).
6. N.A.Chigier, K.Dvorak: 15th Symposium on Combustion, pp. 573 (1974).
7. R.J.Baker, J.H.Whitelaw: 15th Symposium on Combustion, pp. 553 (1974).
8. N.Syred, A.K.Beer: 14th Symposium on Combustion, pp. 537 (1973).
9. N.Syred, A.K.Gupta, J.M.Beer: 15th Symposium on Combustion, pp. 587 (1974).
10. M.Sadakata, J.M.Beer: 16th Symposium on Combustion, pp. 93 (1976).
11. T.Takagi, T.Okamoto: *Combustion and Flame*, Vol 43, pp. 69 (1981).
12. S.Yuasa: *Combustion and Flame*, Vol 66, pp. 1986 (1986).
13. M.J.Oven, F.C.Gouldin: 17th Symposium on Combustion, pp. 363 (1978).
14. K.Yamagishi: 15th Symposium on Combustion, pp. 1157 (1974).
15. Dennis A. Chojnacki: Annual Report GRI-90/0058 (1989).