

# 산소부하 이중 역 확산화염의 특성 및 복사열전달에 관한 연구

이성호\* · 황상순\*\*

## A Study on Radiation Heat Transfer and the Characteristics of Oxygen Enriched Double Inversed Diffusion Flame

Sung-Ho Lee\*, Sang-Soon Hwang\*\*

**Key Words:** Oxygen Enriched Double Inversed Diffusion Flame, Radiation Heat Flux

### Abstract

An Experimental study of oxygen enriched double inversed diffusion flame was conducted to understand the flame characteristics and radiation heat transfer. The infrared radiation meter was used to measure of various combination of fuel, air and pure oxygen. The results show that oxygen enriched double inversed diffusion flame is very effective to increase of thermal radiation and proper addition of pure oxygen in air flow can intensity thermal radiation of flame. And it can be found that oxygen enriched double inversed diffusion flame could give benefits of cost effective and very high energy saving.

### 1. 서론

근래 고온을 필요로 하거나 복사열전달이 추가 되는 공정(유리가공, 제철소의 빌렛 가공, 래들 가열등)들은 기존의 액체 연료에서 낮은 연료비용, 저공해특성을 가지며 저장과 운반이 용이한 기체연료인 LNG로 바뀌는 추세이며 대부분 확산화염의 형태로써 복사열전달(Radiation Heat Transfer)을 이용하게된다.

확산화염에 있어서 복사의 두 가지 근원은 적외선 스펙트럼 (Infrared Spectrum)의

넓은 띠에 집중되어 있는 연소 생성물 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O에 의한 분자복사 (Molecular Radiation)인 비발광화염복사 (Non-Luminous Flame Radiation)와 가시광선 영역에서 밝은 빛을 발하는 Soot에 의한 흑체복사 (Blackbody Radiation)인 발광화염 (Luminous Flame Radiation)복사로 나뉘어 지게 된다. 이러한 확산화염은 연료의 종류와 유동상태에 따라 복사분율은 수%에서 50%까지의 값을 나타낸다.

\* 인천대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인천대학교 기계공학과

그러나 본 논문에서 사용할 메탄의 경우는 LNG 내에 86.7%이상이 함유되어있으며 연료적 특성이 적은 Soot의 배출을 가져와 낮은 복사 방출을 가지게 된다<sup>[1]</sup>. 이러한 메탄의 연료적 특성을 극복하기 위해 산소를 산화제로 이용시 Soot양의 증대<sup>[2]</sup>에 의한 복사열전달효과<sup>[3][12]</sup>와 고온의 가열 효과를 가져오는 것으로 알려져 있다.

또한 유동장의 조합에 따른 연소 유동장을 살펴본 Hasegawa<sup>[4]</sup>의 연구에서 보듯이 2차원의 두 평행류 상태의 두 물질의 혼합에서 두 고속의 산화제 사이에 연료를 분사시키면 연료와 경계층의 높은 난류혼합속도로 고부하 연소에 적절한 형태의 연소유동장이 형성되는것으로 보고되었다.

이러한 산소의 연소특성과 유동장의 형태를 가지고 있는 산소부하 이중 역 확산 화염(Oxygen Enriched Double Inversed Diffusion Flame)의 경우 화염면의 이중 형성으로 높은 열방출율을 가지면서 주 산화제로 산소를 사용함으로써 Soot의 증대효과<sup>[5][6]</sup>를 통한 복사열전달의 극대화를 유도할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

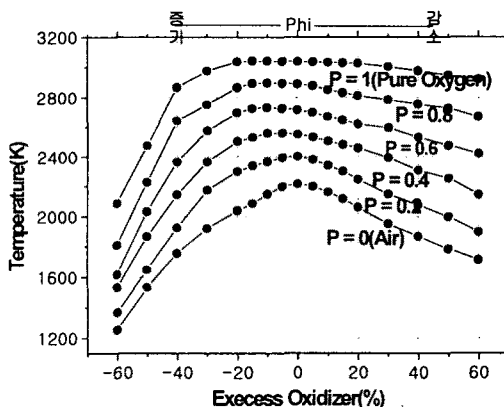


Fig.1 Adiabatic Flame Temperature of Methane-Oxygen Flame(Program STANJAN for chemical equilibrium calculations was used)

따라서 본 연구에서는 이와 같이 산소부하 이중 역 확산화염의 기본 복사열전달 특성 및 연소특성을 알아보고자 실험을 수행하였다.

## 2. 산소부하 화염의 특징

### 2.1 높은 화염의 온도

Fig.1은 산소첨가(P)에 따른 단일화염온도(Adiabatic Flame Temperature)를 보여주는 것으로 공기-메탄(P=0)화염 경우의 단일화염온도보다 산소-메탄(P=1)화염의 경우는 3076K로써 약 800K이상 높음을 알 수 있고 이러한 고온으로 인하여 에너지의 이용 증대 면에서 있어 커다란 장점을 가져올 수 있다. 여기서 P(Oxygen Participation)값은 식(1)로 정의되었다.

$$P(\text{Oxygen Participation}) = \frac{O_{2, \text{PureOxygen}}}{O_{2, \text{PureOxygen}} + 0.21 \times \text{Air}} \quad (1)$$

### 2.2 복사열전달 효과의 증대

Fig.2는 산소부하 연소시 연소생성물의 몰농도를 보여주는 것으로 산소-메탄화염의 경우가 공기-메탄화염보다 훨씬 높은

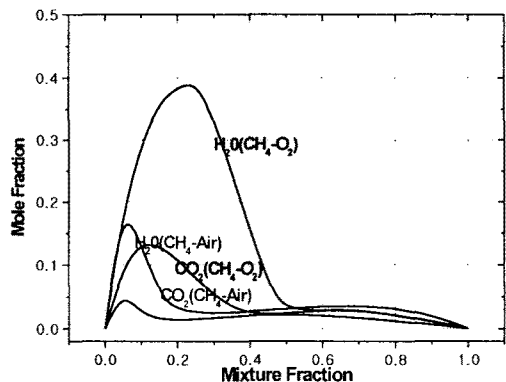


Fig.2 Mole Fraction of Methane-Air/Methane-Oxygen Flame CO<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>O (Program PRE-PDF3.2(CFD-FLUENT))

H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 농도의 증가를 보여주며 이로 인하여 분자복사를 증가시킬 수 있을 것이다. [7][8][9][10][11]

또한 Homan<sup>[2]</sup>의 연구에 따르면 일반적으로 Soot의 발생은 고온하에 연료가 농후한 지역에서 주로 발생하고 산소-메탄 화염의 경우는 산소사용으로 인한 고온과 질소의 희석 효과 감소로 흑체복사의 주요인이 되는 많은 양의 Soot를 발생하게 된다.

### 2.3 화염의 조절성

점화온도의 경우 산소-메탄 화염은 540K로써, 공기-메탄 화염의 경우보다 100K이상 낮으며 가연범위의 경우 또한 산소-메탄 화염의 경우 ~59%이며 공기-메탄 화염의 경우는 5.3~14%로 산소를 산화제로 이용한 경우 4배 이상의 가연범위를 가짐을 알 수 있다. 또한 Fig.1을 보면 산소-메탄 화염의 경우 넓은 당량비 하에서도 고온이 유지되어짐을 보여 주고 있다.

$$Flame\ ability = \frac{CH_4}{CH_4 + Oxidizer} \quad (2)$$

$$O/F = \frac{Pure\ Oxygen + 0.21 \times Air}{Fuel} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{O/F_{Stoich}}{O/F_{Real}} \quad (4)$$

### 2.4 산소를 산화제로 이용시의 문제점

산소부하 화염은 적은 배출가스량(N<sub>2</sub>량의 감소)으로 인한 대류열전달의 감소, 운전비용의 상승(산소사용의 추가비용)등을 들 수 있지만 높은 온도를 필요로 하는 공정, 피 가열체에 영향을 주지 않고 복사열전달이 추가 되는 공정의 경우에서 이점을 가지게 될 것이다. 또한 운전비용에 있어서는 산소 생산기술(흡착 분리 기술, 에너지 절약형 심냉법)의 발달로 인하여 산소의 생산비용이 점점 낮아지는 추세에 있다.

Fig.3은 미국의 American Combustion 사의 산소와 공기를 동시에 사용하는 래들 가열용 버너로써 P=0.55,  $\phi=1$  하에서 요구온도에 따른 LNG와 산소의 가격비로 나타나 있다. 요구되는 온도가 1000°C 이상이면 산소/LNG 가격비가 0.35이하인 경우에서 800°C 이상일 경우는 산소/LNG 가격비가 0.2, 1200°C 이상일 경우는 0.58이하에서 경제적으로 이득을 얻을 수 있으며 산소의 가격이 낮을수록 넓은 온도 범위 하에서, 산소가격이 높다하여도 높은 온도를 요구하는 공정 하에서는 이득을 얻을 수 있을 것을 알 수 있다.

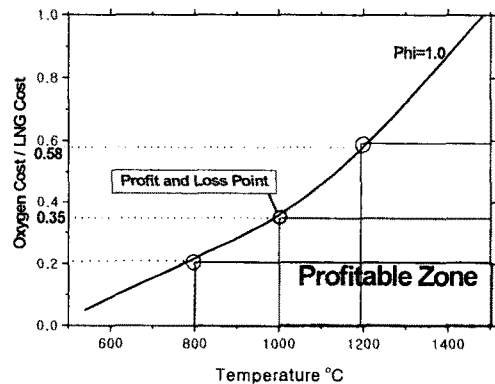


Fig.3 Profit and Gain Point of Oxygen/LNG Cost Ratio and Exhaust Gas Temperature (AirCost/LNGCost=5%)

## 3. 실험방법

### 3.1 버너의 구조

Fig.4에 나타나있는 버너는 적절한 화염의 크기와 난류적 특성이 나타나는 범위 내에서 화염을 형성하기 위해 Moss의 실험<sup>[12]</sup>을 참조로 여러 크기의 버너를 예비 실험을 하였으며 이를 통해 연료유량 5ℓ/min기준으로 설계하였다. 또한 각각의 주입구를 통해 버너노즐①,②,③에 메탄, 산소, 공기, 공기+산소를 주입 산화제에 따른 여러 종류의 확산 화염을 구성하여 실험하였다. 버너 노즐 ①,②의 면적을 최대

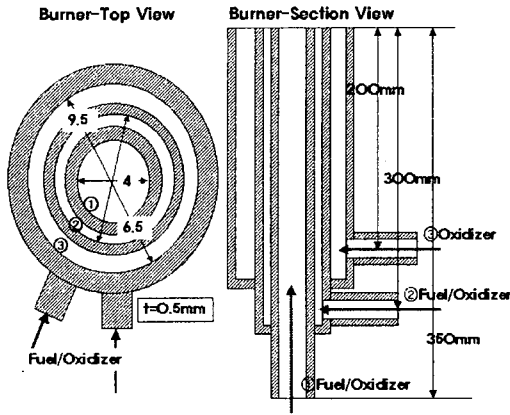


Fig.4 Double Coannular Burner design

한 동일하도록 하여 주산화제와 연료의 위치를 바꾸어 실험하였으며 각 주입구의 연료, 산소, 공기유량 및 재원은 Table.1에 나타내었다.

### 3.2 실험 장치 및 방법

연료와 산화제(산소, 공기, 산소+공기)는 Mass Flow Meter(MKS.Type-1179A)를 사용하여 유량을 조절하였으며 산화제에 따른 화염의 전반적인 특성, 화염의 길이(Luminous Flame Height)의 측정은 Digital Camera로 측정하였다.

복사 열플럭스를 측정하기 위한 라디오미터는 PASCO사 모델 TD-8549를 사용하였고 이 변환기는 스펙트라 범위 0.6~30.0 $\mu\text{m}$ 내이며 감도(sensitivity)는 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

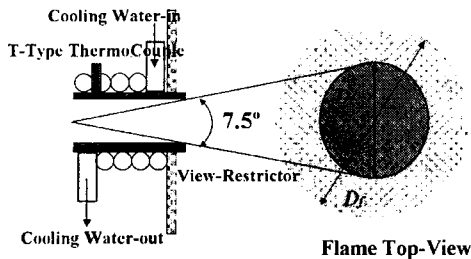


Fig.5 View-Restrictor

Table. Flow rate of Fuel and Oxidizer

	Gas	FlowRate l/min	Area (mm <sup>2</sup> )
① Primary Oxidizer or Fuel	Air	0~20	12.566
	Oxygen	0~20	
	Air+Oxygen	0~20+0~20	
	Methane	0~10	
② Fuel or Primary Oxidizer	Methane	0~10	13.548
	Air	0~20	
	Oxygen	0~20	
	Air+Oxygen	0~20+0~20	
③ Secondary Oxidizer	Air	0~60	16.7035
	Oxygen	0~20	
	Air+Oxygen	0~50+0~20	

이다. 수냉식 몸체를 한 가지적 제한기(View-Restrictor, Fig.5)를 통해 측정부를  $\theta_r=7.5^\circ$ 로 라디오미터에서 좁은 각을 제한함으로써 화염 주위의 복사를 피하고 단지 각각의 화염의 뜨거운 가스에 의해 빨려들어 오는 목표지점의 화염의 복사만을 측정되도록 하였다.

또한 수냉식 몸체의 가지적 제한기의 온도는 T-type 열전대를 사용하여 대략 300K를 유지하도록 하였고 버너와 라디오미터의 거리 차는 기계적 밀링 테이블(정확도 0.02mm)을 가지고 조절하였다.

실험에서 화염과의 거리차에 따른 복사량의 변화를 최소화하기 위해서  $D_f$ (가지적 화염의 폭)를 기준으로  $D_r$ (측정 직경)의 비를 증가시키면서 측정한 결과인

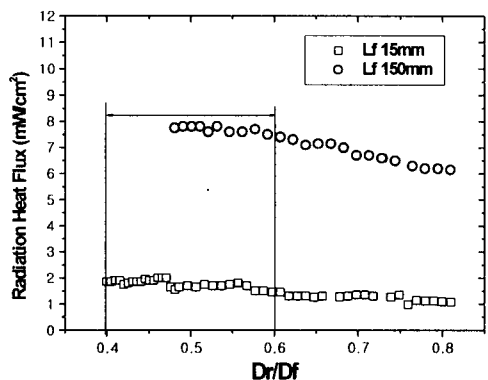


Fig.6 Radiation Heat Flux by increased  $D_r/D_f$  (DIFP05, P=0.5,  $\Phi=1.0$ ,  $Q_r=3.327\text{kw}$ )

Fig.6을 보면 복사 열플럭스 변화가 0.4~0.6 범위 내에서 거의 변화없이 완만함을 알 수 있었기 때문에 측정부는  $Dr/Df=0.5$ 로 설정하여 화염의 길이 방향(Lf)으로 측정하였다<sup>[3]</sup>.

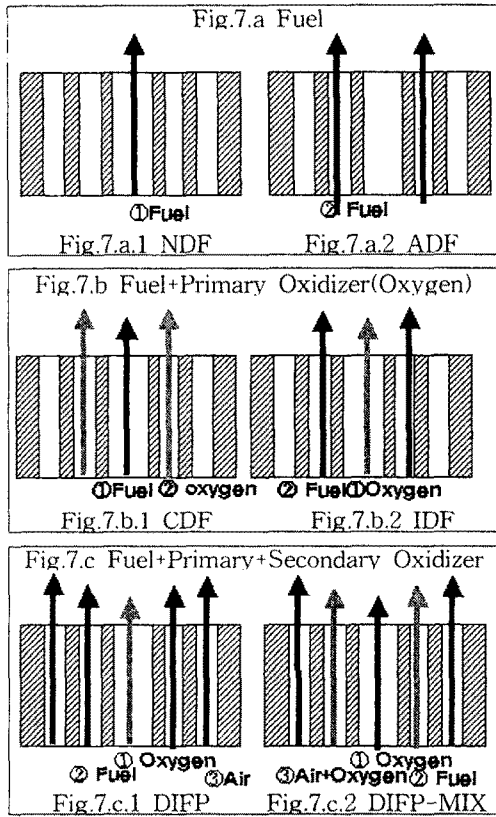


Fig.7 Combination of Fuel and Oxidizer

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 일반 확산화염(Normal Diffusion Flame(NDF))과 환형 확산화염(Annular Diffusion Flame(ADF))간의 비교

산소부하 이중 역 확산화염에 대한 실험에 앞서 기본적인 자료로써 연료제트의 위치에 따른 복사열전달 특성을 살펴보기 위해 Fig.7.a에 나타나 있는 일반 확산화염과 환형 확산화염을 비교하여 보았다. Fig.8의 화염사진에서 알 수 있듯이 일반

확산화염(NDF)과 환형 확산화염 (ADF)의 경우를 비교해 볼 때 환형 확산화염의 폭이 더 크고 길이는 일반 확산화염이 더 큰 것을 보여준다.



Fig.8.1 NDF



Fig.8.2 ADF

Fig.8 Photograph of NDF,ADF( $Q_r=3.327kw$ )

Fig.9는 화염의 길이방향(Lf)에 따른 복사 열플럭스를 측정값을 보여주는 것으로 보면 화염의 폭이 더 큰 환형 확산화염의 복사 열플럭스가 평균, 최대값이 더 큰 것을 알 수 있고 환형형태의 연료분사가 보다 효율적임을 알 수 있었다.

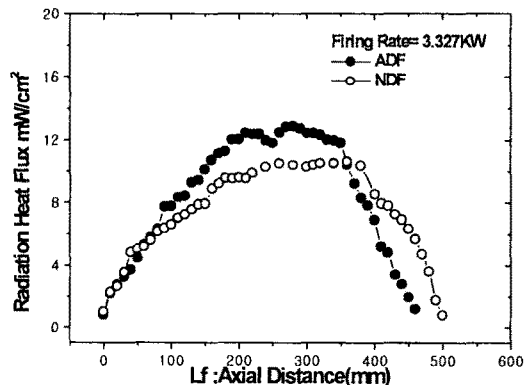


Fig.9 Comparison of Radiation Heat Flux results with NDF,ADF ( $Q_r=3.327kw$ )

##### 4.2 산소 확산화염(Coannular Oxygen Diffusion Flame(CDF))과 산소 역 확산화염(Oxygen Inversed Diffusion Flame(IDF))간의 비교

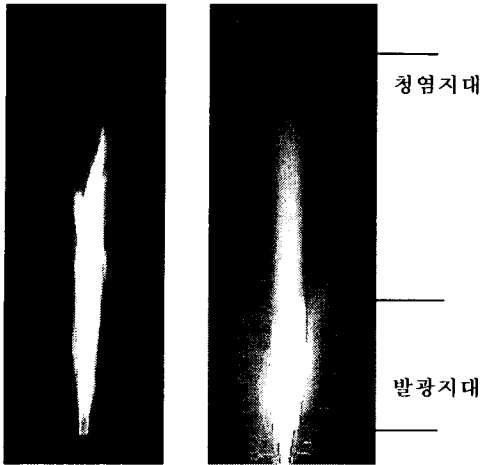


Fig.10.1 CDF Fig.10.2 IDF  
 Fig.10 Photograph of CDF, IDF  
 (Qr=3.327kw, P=1.0,  $\phi=1.0$ )

산소를 주 산화제로 공급할 경우에 연료의 분사위치에 따른 영향을 알아보기 위해 Fig.7.b와 같이 산소를 연료의 외부에 공급하는 경우와 산소를 중앙부 노즐에서 공급하여 역 확산화염 형태를 형성한 경우에 대하여 알아보았다.

Fig.11의 복사 열플럭스 분포를 보듯이 산소 역 확산화염(IDF)과 산소 확산화염(CDF)이 연료만을 주위 정지공기에 분사한 환형 확산화염(ADF)경우보다 복사 열플럭스 측정값의 최대, 평균값이 훨씬 높은 값을 나타냈으며 이는 산소를 산화제로 사용함으로써 얻어지는 고온을 통한

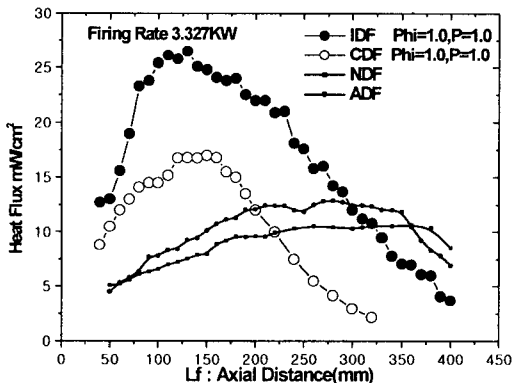


Fig.11 Comparison of Radiation Heat Flux results with IDF,CDF,NDF,ADF  
 ( Qr=3.327kw)

복사양 증가와 더불어 질소의 연료 희석 효과의 감소와 고온을 통한 Soot의 증가, H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>농도의 증가등이 복사양의 증가에 기인하였을 것으로 보인다.

또한 산소를 산화제로 사용할 경우 동일 조건하에서 산소 확산화염(CDF)보다는 역 확산화염(IDF)구조가 산소를 사용하는데 있어 더욱 유리한 방법임을 알 수 있다.

이는 Fig.12에서 나타나는 바와 같이 산소 확산화염의 경우는 산소가 연료를 감싸고 형태인데 반해 산소 역 확산화염의 경우 연료가 내부에 있는 산소를 감싸고 연료의 외측에서 주위의 정지공기와 접촉하고있는 형태이다. 이러한 화염형상에서는 연료내측의 산소와의 역 확산형태로써 반응하고 그에 따라 높은 온도가 발생하고 또한 연료의 외측과 주위의 정지공기와 반응함으로써 발생하는 이중의 화염면 형성으로 열발생이 중첩되어 발생하기 때문으로 생각된다.

산소 역 확산화염(IDF)하에서 순수산소의 사용량 증가에 따른 복사열전달의 변화를 알아보기 위한 화염의 사진이 Fig.13.1~3, Fig.10.2에 나타나 있으며 순수

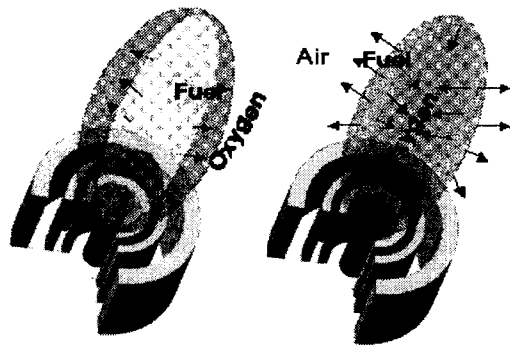
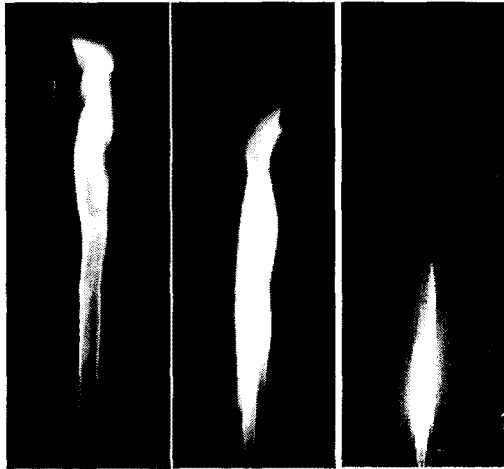


Fig.12.1 CDF Fig.12.2 IDF  
 Fig.12 Flame Structure of CDF, IDF



13.1 IDF at  $\phi=10.0$     13.2 IDF at  $\phi=4.0$     13.3 IDF at  $\phi=2.0$   
 13. Photograph of IDF by decreased  $\phi$   
 (Increased Pure Oxygen,  $Q_r=3.327\text{kw}$ ,  $P=1.0$ )

산소량의 증가는  $\phi$ 의 감소를 의미하므로 순수산소 변화량은  $\phi$  값으로 나타나있다.  $\phi$ 가 감소하면서  $\phi=2$  (Fig.13.3) 부근에서 형성된 화염의 발광지대( $100\text{mm} \leq L_f \leq 200\text{mm}$ )는  $\phi < 2$ 이하가 되어도 거의 변화가 없이 유지됨을 보여 주고 있으며 또한 이때의 화염 길이(Fig.14)의 측정결과를 보면 열부하량( $Q_r$ : Firing Rate)에 관계없이  $\phi=2$ 인 부근에서 최소가 되는 것을 보여준다.

Fig.13.1~3, Fig.10.2을 보면  $\phi > 2$ 인 지역에서는 발광지역이 넓게 상부까지 위치

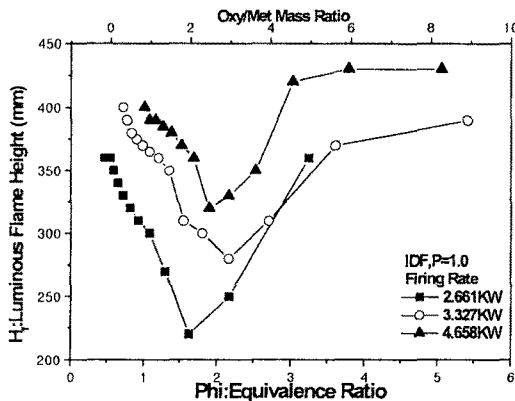


Fig.14 Comparison of Luminous flame height results of IDF by Increased of  $Q_r$  ( $P=1.0$ )

하지만 산화제의 증가에 따라  $\phi < 2$ 인 지역 (Fig.13.3, Fig.10.2)에서는 이러한 발광지대는 커다란 변화가 없이 유지되면서 화염의 상부에 청색 화염대의 길이가 증가로 전체적인 화염의 길이가 증가하게 된다.

Fig.15, 16의 복사 열플럭스 측정결과를 보면  $\phi < 2$ (산소량의 증가)인 지역에서는 복사 열플럭스의 분포, 평균, 최대값이 일정하게 유지됨을 보여준다.

위의 결과들을 볼 때 복사 열플럭스는 화염하단부의 발광지대에서 대부분이 발생되며 산소를 주산화제로 이용시 순수 산소량의 증가( $\phi$  감소)에 따라 복사열전달이 증가하나  $\phi=2$ 에 해당되는 일정 순수

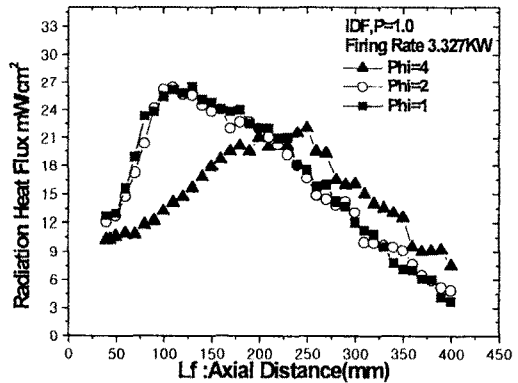


Fig.15 Comparison of Radiation Heat Flux results with IDF by  $\phi$  ( $Q_r=3.327\text{kw}$ ,  $P=1.0$ )

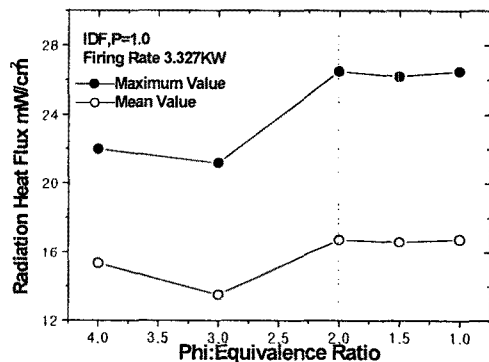
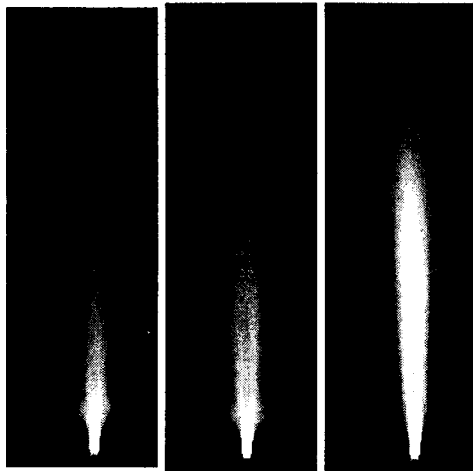


Fig.16 Comparison of Radiation Heat Flux results with IDF by Increased  $\phi$  ( $Q_r=3.327\text{kw}$ ,  $P=1.0$ )

산소 사용량 이상에서는 복사 열플럭스가 거의 변화없이 일정값을 나타냄을 보여줌으로써 순수산소 사용의 한계치가 존재함을 알 수 있었다.

### 4.3 산소부하 이중 역 확산화염 (Oxygen Enriched Double Inversed Diffusion Flame(DIFP))



17.1DIFP035 17.2DIFP5 17.3DIFP065  
17. Photograph of DIFP by Increased P ( $Q_r=3.327kw, \phi=1.0$ )

산소 부하 이중 역 확산화염(DIFP)은 복사 열플럭스가 우수한 역 확산화염(IDF) 구조를 가지면서 주산화제로 산소를 사용

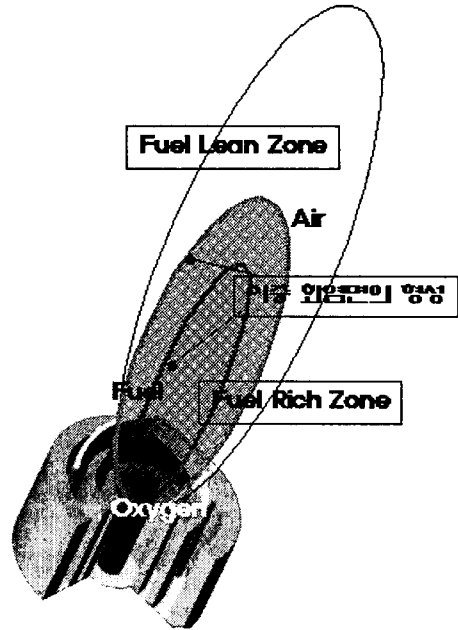


Fig.18 Flame structure of DIFP

하고 연료의 외층에 보조산화제로써 공기를 공존하여 복사열전달을 극대화시키기 위해 Fig.7.c에서 보는 바와 같은 구조로 구성하였으며 이러한 화염에 대한 복사열 전달 특성을 살펴보았다. 산소부하 이중 역 확산화염(DIFP)에서 P값의 증가는 주산화제로써 산소의 사용량의 증가를 나타내며 보조산화제인 공기양의 감소를 나타낸다. 만약 P=1.0인 이중 역 확산화염이

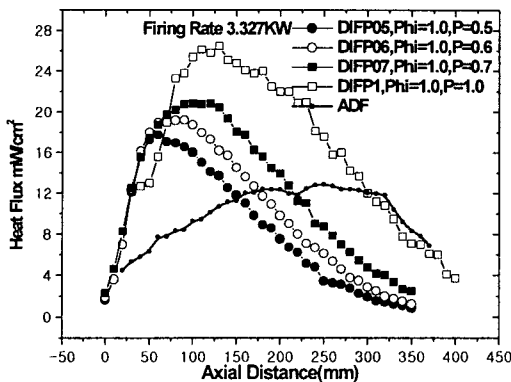


Fig.19 Comparison of Radiation Heat Flux results of DIFP by increased P and ADF ( $Q_r=3.327kw$ )

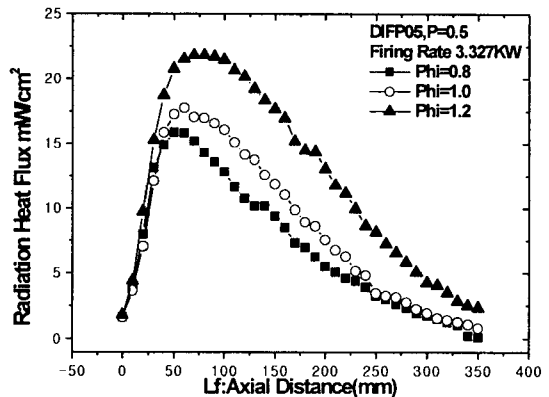


Fig.20 Comparison of Radiation Heat Flux results with DIFP05 by increased  $\phi$  ( $Q_r=3.327kw, P=0.5$ )



되면 결국 산소 역 확산화염(IDF)과 같은 구조가 된다.

앞의 산소 역 확산화염의 실험결과를 보면  $\phi < 2$ 인 지역에서는 복사 열플럭스의 변화가 없음을 나타냈고 이중 역 확산화염에서 단지 주산화제와 연료의 관계를 보면  $\phi = 2$ 일 경우의 산소 역 확산화염(IDF)은 P=0.5인 이중 역 확산화염(DIFP 05)과 같은 구조를 나타내므로 이중 역 확산화염에서 P=0.5를 기준으로 실험하였다.

Fig.19,20은  $\phi = 1$ 을 기준으로 P값의 변화에 따른 복사열플럭스를 보여준다. 평균 및 최대값은 P값의 증가에 따라 복사 열플럭스의 증가를 보여주는데 P값의 증가는 순수산소의 사용량의 증가를 의미하고 이에 따른 온도의 증가와 질소의 감소에 따른 복사 열플럭스의 증가를 가져오는 것으로 생각된다.

Fig.17은 이중 역 확산화염의 P값의 변화에 따른 화염의 사진이며 화염면이 환형 구조로 형성되어 있음을 보여주고 있다.

이러한 이중 역 확산화염의 구조는 Fig.18로 나타낼 수 있으며 연료의 외측의 보조산화제인 공기 유동이 존재할 경우 전체  $\phi = 1$ 의 조건에서는 순수산소와 연료만의 당량비가  $\phi > 1$ 조건이 되어지며 연료의 과잉상태로 될 수 있다. 이러한 순수산소에 의한 높은 온도와 연료과잉지역(Fuel Rich Zone)의 발생으로 고온 하에서 질소의 회석효과 감소와 연료가 농후해지는 결과로 다량의 Soot가 형성되며 이중 역 확산화염의 Soot 발생 특성상 이러한 지역 하에서 Soot가 오래 머무르면서 높은 온도에 의해 높은 복사 열플럭스를 발생하게 된다. 이는 복사 열플럭스의 측정시 최대값의 분포가 화염의 하단부에 형성됨으로써 설명되어진다.

연료의 외측 보조산화제인 공기와의 반응 지역은 연료희박지역(Fuel Lean Zone)

으로 산소와 반응하지 못한 미연의 연료와 보조산화제인 공기와의 반응을 통해 완전연소하며 Soot는 산화하게되는 과정을 가질 것으로 예상되며 이와 같은 연소방식은 다단연소방식형태로 된다고 할 수 있다.

#### 4.4 보조산화제(공기)의 산소농도를 높인 산소부하 이중 역 확산화염(DIFP-MIX)

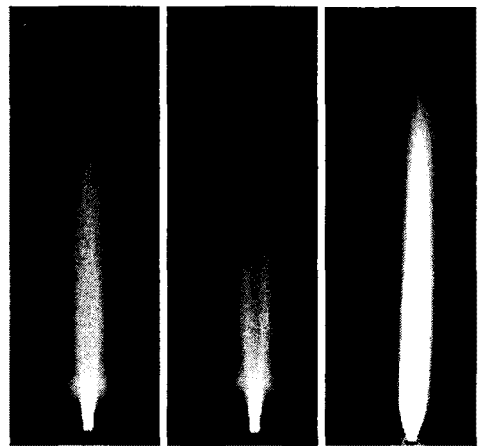


Fig.21.1DIFP 05-MIX50 Fig.21.2DIFP 05-MIX70 Fig.21.3DIFP 1-MIX50  
21. Photograph of DIFP-MIX by Increased P and MIX(Qr=3.327kw,  $\phi = 1.0$ )

순수 산소사용의 증대는 복사열전달의 증가를 당연히 가져오지만 아울러 비용의 증가를 수반하므로 전체 산소의 공급을 순수산소로 50% 보조 산화제인 공기내부의 산소로 50%를 공급한 P=0.5 (DIFP05)인 경우에 대하여 산소 이용효과를 극대화하기 위하여 실험조건으로 50%의 순수산소 일부를 보조산화제인 공기측에 일부를 공급함으로써 연료외측 화염면의 화염강도를 높이는 효과를 알아보았다.

여기서 다음과 같이 보조산화제인 공기측에 공급되는 순수산소의 분율(MIX)를 정의하였다.

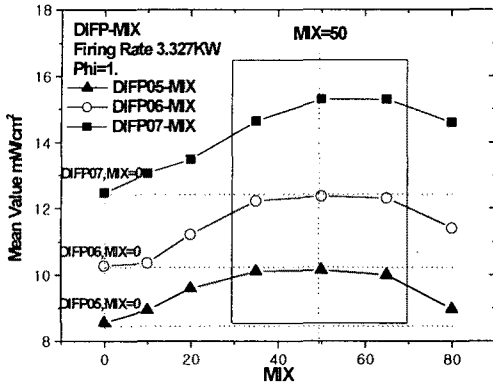


Fig.22 Comparison of mean Radiation Heat Flux results with DIFP-MIX by increased MIX ( Qr=3.327kw. Φ=1.0)

$$MIX = \frac{Oxygen_{Sec-Oxi}}{TotalOxy} \quad (5)$$

Fig.21에서 보듯이 화염의 구조는 이중역 확산화염(DIFP)과 유사하며 여기 MIX 값의 증가는 보조산화제의 순수산소량의 증가와 주산화제인 순수산소량의 감소를 가져오게 된다.

Fig.22,23은 P, MIX 값의 증가에 따른 보조산화제(공기)의 산소농도를 높인 산소부하 이중역 확산화염(DIFP-MIX)의 복사 열플럭스의 평균, 최대값으로써 P 값의 관계없이 MIX<30 지역 하에서는 증가하다가 30<MIX<70에서는 완만한 증가 또는 감소를 보이면서 MIX>70에서는 감소함을 보이며 대략 MIX=50에서 최대값을 가짐을 알 수 있으며 또한 전반적으로 MIX=0 인 경우의 산소부하 이중역 확산화염(DIFP)보다는 높은 값을 가짐을 보여준다.

이러한 적절한 산소+공기, 산소, 연료의 조합에 따라 보다 효과적인 열복사 조건을 구할 수 있으므로 산소사용으로 인한 연료의 절감효과를 나타내기 위하여 Fig.24,25에서 동일 열부하량(Qr:연료양)하에 따른 각 연소모드별 복사 열플럭스를 비교하여 보았다. 여기서 보조산화제(공

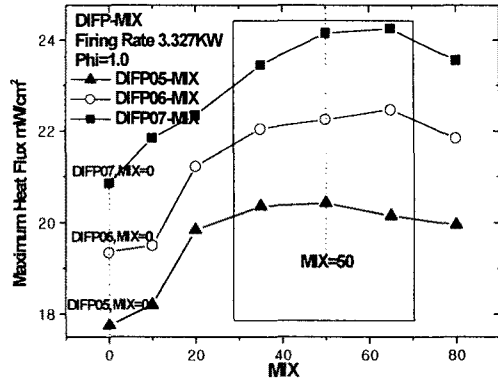


Fig.23 Comparison of maximum Radiation Heat Flux results with DIFP-MIX by increased MIX ( Qr=3.327kw. Φ=1.0)

기)의 산소농도를 높인 산소부하 이중역 확산화염(DIFP05-MIX50)이 가장 높은 값을 가지며 산소부하 이중역 확산화염(DIFP05)도 환형 확산화염(ADF)와 비교 시 최대값이 약1.4배의 값을 가짐을 보여주고 있다. 보조산화제(공기)의 산소농도를 높인 산소부하 이중역 확산화염(DIFP05-MIX50)이 Qr=3.327KW(5 l/min)에서 환형 확산화염(ADF)의 최대값에 1.6배, 평균값은 1.2배정도 높음을 보여주고 있다. 또한 환형 확산화염의 4.77KW(7 l/min)는 보조산화제(공기)의 산소농도를 높인 산소부하 이중역 확산화염(DIFP05-MIX50)의 연료 4 l/min와 같은 평균 복사 열플럭스를 가지며 연료의 양을 40% 이상 절감 할 수 있는 효과를 가져온다. 여기서 사용된 산소의 비용(산소/LNG가격=0.2~0.33)에 해당되는 연료의 비용을 제외한다면 종합적으로 약 27%의 연료의 절감을 가져 올 수 있다.

이를 종합적으로 비교하여 보기 위하여 다음과 같은 식으로 총 비용(Total Cost)를 나타내었다.

$$Total Cost = 0.266 \times Oxygen_{FlowRate} + Fuel_{FlowRate} \quad (6)$$

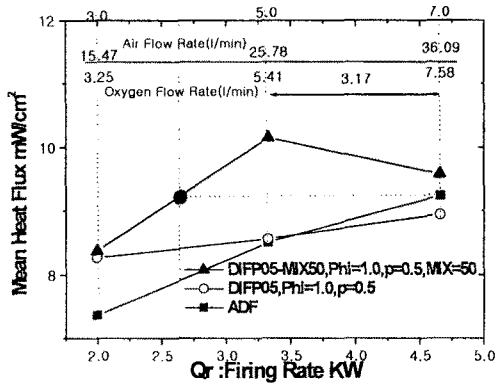


Fig.24 Comparison of mean Radiation Heat Flux results with DIFP05-MIX50, DIFP05, ADF by increased Qr

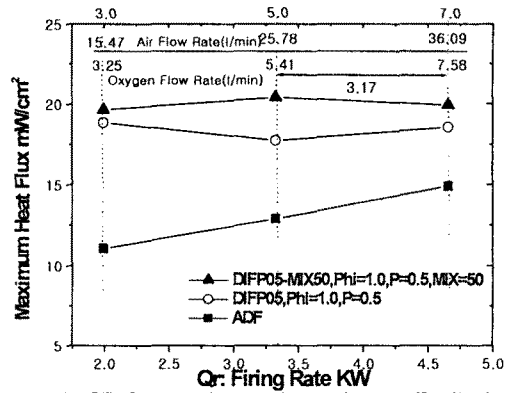


Fig.25 Comparison of maximum Radiation Heat Flux results with DIFP05-MIX50, DIFP05, ADF by increased Qr

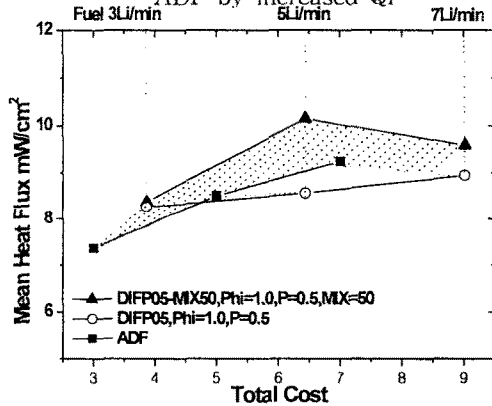


Fig.26 Comparison of mean Radiation Heat Flux results with DIFP05-MIX50, DIFP05, ADF by increased Total Cost

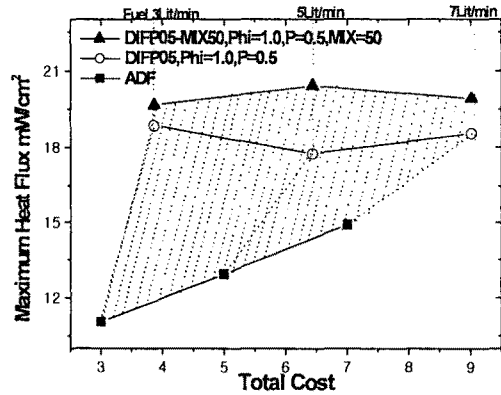


Fig.27 Comparison of maximum Radiation Heat Flux results with DIFP05-MIX50, DIFP05, ADF by increased Total Cost

식(6)은 연료의 비용을 1로 하고 산소/LNG의 가격비는 0.2~0.33이므로 평균값인 0.266으로 계산하였다.

Fig.26,27은 총 비용(Total Cost)에 대한 복사 열플럭스의 평균, 최대값으로써 점선은 동일연료량을 가리키며 동일비용(Total Cost)하에서 보조 산화제인 공기의 산소 농도를 높인 산소부하 이중 역 확산 화염(DIFP05-MIX50) 복사 열플럭스의 값이 다른 화염들에 비해 높게 나타내며 Fig.26,27에서의 빗금지역은 동일비용 하에서 산소부하 이중 역 확산 화염(DIFP05-MIX50)의 복사에너지 증대량을 보여준다.

## 5. 결론

- 1) 산소부하 이중 역 확산 화염의 경우 이중 화염면의 열발생으로 인한 증첩효과와 순수산소의 사용에 따른 고온조건 및 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O의 증가로 인한 분자복사의 증가, Soot의 증가로 인한 흑체복사의 증가로 일반 산소 확산 화염에 비해 높은 복사 에너지를 방출하는 화염형태임을 알 수 있었다.
- 2) 산소부하 이중 역 확산 화염 중 순수산소를 보조 산화제인 공기측에 50%(MIX=50)의 값으로 혼합시킬 경우 복사에너지가 최대로 증대됨을 알 수 있었다. 이는

이중화염면에서 연료의 외측 공기의 열발생 증가를 최적화 한 것으로 판단된다.

3) 동일(연료+산소)비용 하에서 산소부하이중 역 확산화염이 일반 산소부하 확산화염에 비해 보다 우수한 복사에너지 방출특성을 가져 산소부하 이중 역 확산화염 형태를 고 복사에너지가 필요한 공정에 사용시 보다 큰 에너지 절감효과를 기대할 것으로 판단된다.

## 6. 참고 문헌

- 1) Stephen R. Turns, "An introduction of combustion" ,Mcgraw Hill ,pp 410~442, 1999
- 2) Homan. H. S, Combustion. sci. Tech.,33.1,1983
- 3) Chales. E. Baukal ,Benjamin Gebhart,"Oxygen-enhanced/Natural gas flame radiation", Int. Heat Transfer, Vol40, No.11, pp 2539. 2547. 1997
- 4) Hasegawa. T, Yamaguchi S, Ohiwa. n. "A Numerical Analysis of Mass Transfer in a Plane Sheat Layer", JSME international Journal, Vol.30 ,NU.263,1987
- 5) 최강림, 남평우, "레이저 진단법을 이용한 동축 이중 확산 화염의 매연 생성에 관한 연구", Journal of Mechanical Engineering and Technical Research Inst, Vol.5, No.1, 1999
- 6) 정종수, 이교우, "이중 동축 확산화염의 형상 및 배출특성", 한국연소학회지, Vol.4, No.1, 1999
- 7) Hottel. H. C , Salrofim. A. F. "Radiation Transfer", McGraw-Hill. New York, Chap.6,1976
- 8) Siegel. R , Howell. J. R, Thermal Radiation Heat Transfer", 3rd edn. Hemisphere ,Washington D. C. Chap. 13, 1992
- 9) Purvis. M. R. I , "Heat transfer from normally impinging hydrocarbon oxygen flames to surface at elevated temperatures", Ph. D. theis, The University of Leeds, U.K ,1974
- 10) Hoogendoorn. C. J , Popiel. C. O, van der Meer .T .H, "Turbulent heat transfer plane surface in impingingment round premixed flame jets", Proceedings of 6th international Heat Transfer Confererence. pp107~112, 1988
- 11) Davies. D. R, "Heat transfer working flame burners", B. S. thesis, University of Salford. Salford, U.K. 1979
- 12) S. J. Brookes , J. B. Moss, "Measurements of Production Thermal Radiation From Confined Turbulent Jet Diffusion Flames of Methane", Combustion and Flame 116:49-61,1999
- 13) J. F. Griffiths , J. A. Barnard."Flame and Combustion", Blacket Academic and Professional, 3rd, Chap 6.8,1988