

이중 동축 확산화염의 형상 및 배출 특성 (Measurement of soot concentration in flames using laser-induced incandescence method)

정 종 수, 이 교 우

한국과학기술연구원 지구환경연구센터

Jongsoo Jung and Gyo Woo Lee

Global Environmental Research Center
Korea Institute of Science and Technology

Keyword : Double-concentric Diffusion Flame(이중 확산화염), Central Air Jet(중앙 공기제트), Flow Visualization(유동 가시화), Flame Shape(화염 형태), Emission(배출가스)

ABSTRACT: An experimental study on double-concentric diffusion flame has been carried out in order to investigate the shape, the flame length, and the other characteristics of the flame. Flow visualization of the flame by the TiO_2 particles and also the emission measurements are conducted. The commercial grade LP gases are used as fuel. The inverse diffusion flames are formed at the center when the central air flow rate is about 0.1 L/min. With a larger flow rate of the central air jet than 0.2 L/min the flame turns to be an annular-shaped flame, which is very bright. When the central air flow rate increases over 2.4 L/min, the flame turns to blue and the flame tips are opened because of the lifting of the inner part of the flame. Because of this lifting and the incomplete combustion, the CO emission increases abruptly from 25 ppm to more than 150 ppm. On the contrary, the NO_x emission is decreased.

1. 서 론

연료 제트를 동축 공기 제트 유동이 둘러싸고 있는 형태의 일반 정상 동축 확산화염(normal diffusion flame)에서는 화염대의 바로 안쪽인 연료 측에서 매연 기본 입자가 주로 생성되고, 생성된 매연 기본 입자들이 유동을 따라 하류로 이동하면서 성장하여 기본 입자들의 평균 크기가 증가하거나 입자들간의 결합에 의해 마치 포도송이와 같은 형태를 이루게 된다. 이렇게 성장한 매연 입자들은 대체로 유동의 방향에 따라 화염대를 통과하게 되며, 화염대를 통과하는 동안 매연 입자의 산화가 일어나서 매연 입자의 농도와 크기가 급속히 감소하게 된다. 한편 화염의 온도 및 산소 농도 등의 여러 가지 조건에 따라서는, 완전히 산화되지 않은 매연 입자의 일부가 대기 중에 방출되는 경우도 있

다.

이와는 달리, 중심부의 제트로부터 연료 대신 공기가 분출되고 그 주위에 연료가 둘러싸는 형태의 역 확산화염(inverse diffusion flame)에 대한 연구가 최근 몇몇 연구자들에 의해 진행되고 있다[1-3]. 역 확산화염에서는 화염대의 바깥쪽에서, 즉 화염대를 기준으로 연료 쪽에서 매연 입자가 발생하고, 형성된 매연 입자는 화염대를 통과하지 않게 되므로 상당히 긴 시간 동안 매연 입자가 소멸되지 않아서 관측이 비교적 용이하여, 매연 입자의 생성 및 성장 과정을 연구하는데 유리하다. 황준영[1]은 역 확산 화염에서의 매연 입자의 수밀도 및 크기를 측정하여 정상 확산 화염과 마찬가지로 PAH의 농도가 감소하기 시작하는 위치에서 매연이 형성된다는 점을 확인하였다. Makel 등[2]은 층류 역

확산 화염에서는 매연 입자의 생성이 적고 최대 매연 체적 분율이 정상 확산 화염의 약 1/10 정도로 매우 작다는 점을 보여주었다. Partridge and Laurendeau[3]는 역 확산화염에서 NO 생성 과정을 연구하였는데 넓은 당량비 범위에서 2차 공기의 영향을 연구하였다. 본 연구의 대상인 동축 이중 확산 화염(double-concentric diffusion flame)은 화염

의 중심부의 공기 제트를 주위의 환형(annular) 연료 제트가 둘러싸는 형태로 외부의 정상 확산 화염의 내부에 역 확산화염이 형성되는 화염이다. 동축 이중확산 화염은 기하학적인 형상이 복잡하지 않으므로 화염의 구조 해석이 비교적 용이하면서도 종전에 많은 연구가 수행되어 온 정상(normal) 확산 화염과 비교하여 매연 생성 과정을 중심으로 많은 연구를 수행할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 저자들은 이러한 기존의 연구 결과를 바탕으로 실험의 대상을 동축 이중확산 화염으로 확장하여 화염 내에서의 매연 입자의 생성 과정에 대한 연구를 수행하여 왔다[4, 5]. 동축 이중 화염에 대한 연구로는 이와는 기하학적 형상이 약간 차이가 있지만 참고문헌 [6]에서 이러한 형태의 화염에서는 내부 제트를 포함한 유동 특성이 화염의 특성에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 발표하고 있다.

본 논문은 삼중 동심관(triple concentric tubes) 형의 동축 제트 버너를 사용하여 중앙의 공기 제트, 가운데의 환형 연료 제트 및 주위 공기 유동의 각각의 유량을 적절히 변경시키면서 화염의 형태와 NOx 및 CO 등의 배출 특성 등에 미치는 이러한 조건의 영향에 대해 연구를 수행한 결과로, 특히 광계측 방법을 이용해서 이중 확산 화염의 구조와

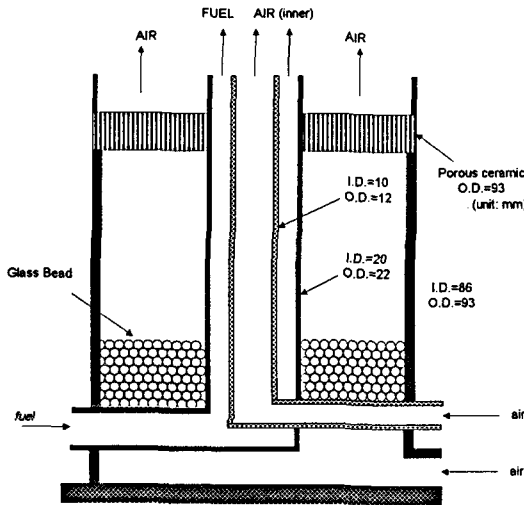


Fig. 1 Triple concentric burner

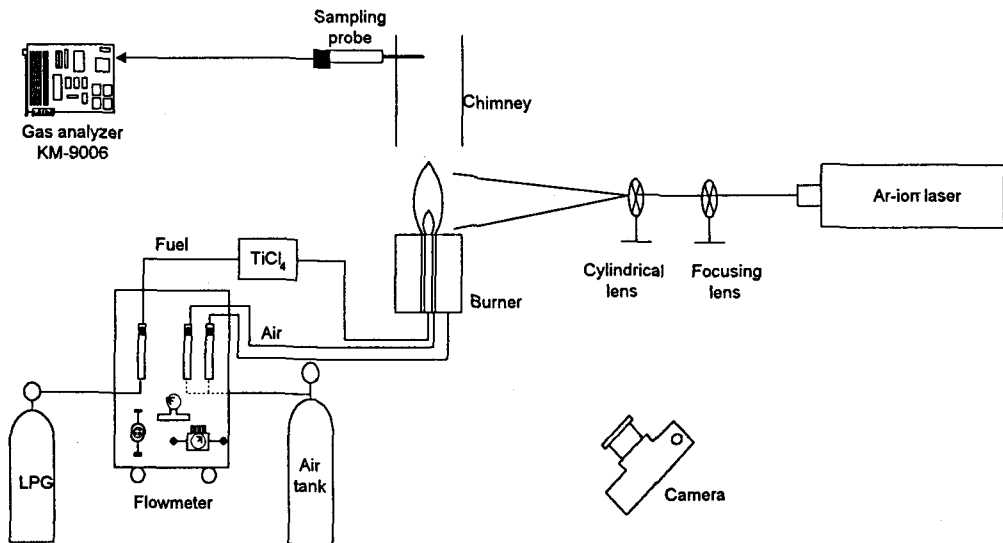


Figure 2. Experimental apparatus and optical setup for flow visualization

화염 내의 매연 입자의 생성과정을 연구하기 위한 실험 조건을 결정하기 위한 기본 실험으로서의 의미가 크다.

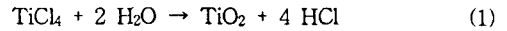
2. 실험 장치 및 방법

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 실험장치는 삼중관 버너, 연료 및 공기 공급 유로계, 레이저 평면광 광학계, 배출가스 분석용 샘플링 시스템 등으로 구성되어 있다. 본 실험에서 연료로는 표준 저위 발열량이 24,200 kcal/Nm³인 상용 LPG(commercial grade LP gas)를 사용하였다. 연료와 공기는 유량계를 통해서 공급하며, 유량계로는 일본의 Tokyo-Keiso 사의 Rotameter를 사용하였다. 압력 레귤레이터를 사용하여 공급 압력을 일정하게 유지하였으며, 유량계는 비누 막(soap bubble) 유량계를 이용하여 검정하여 사용하였다.

또한 화염의 가시화를 위하여 레이저 광원을 원통형(cylindrical) 렌즈를 사용하여 펼친 레이저 평면광(laser beam sheet)을 화염에 조사하고, 화염 내의 TiO₂ 입자의 산란을 이용해서 가시화한다. 본 실험에서 사용한 광원은 파장범위 514.5 nm인 아르곤 이온 레이저(최대출력 4 W)이다. 샘플링 프로브(sampling probe)로 채집한 배출가스를 Combustion Analyzer(Kane May Co., KM-9006)로 분석하여 배출가스 중의 화학종의 농도를 측정하였으며, NO, NO₂, CO, O₂, SO₂ 등의 농도를 측정하였다.

실험에 사용한 삼중 동심관 버너의 개략도를 Fig. 2에 나타냈다. 이 그림과 같이 내경이 각각 10, 20, 86 mm인 삼중관을 동축(concentric)으로 설치하고 이 관들을 통해서 각각 내측 공기, 연료, 그리고 외측 공기를 공급하였다. 균일한 공기 유동을 유지하기 위하여 가장 바깥의 86 mm 관에는 유리구슬 층과 다공성 세라믹을 설치하였다. 또한 가시화를 위하여 유량계를 통과한 연료가 TiCl₄가 담겨 있는 플라스크를 경유하도록 하였는데, 이렇게 하여 연료 중에 혼합된 TiCl₄의 증기는 화염대에서 형성된 혹은 대기 중의 H₂O와 결합하여 TiO₂ 입자를 형성한다. 즉 다음 화학반응식을 통하

여 TiCl₄는 수증기(H₂O)와 결합하여 TiO₂와 HCl을 발생시킨다.



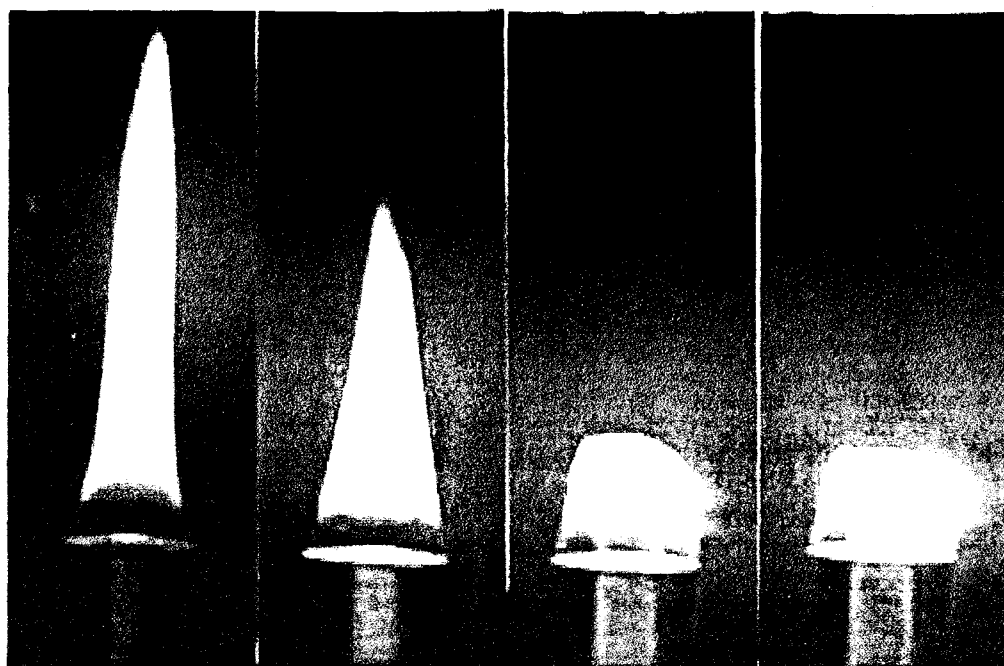
따라서 화염대에서 탄화수소계 연료의 연소 반응을 통해서 H₂O가 생성되므로 여기서 발생한 H₂O와 TiCl₄가 반응하여 TiO₂ 입자가 형성된다. TiO₂ 입자는 크기가 매우 작아서 거의 유동을 따라간다고 가정할 수 있다. 이 TiO₂ 입자가 산란시킨 레이저 산란광은 상당히 강해서 육안으로 관찰할 수 있을 정도이므로 유동에 큰 교란을 주지 않고 가시화를 할 수 있다. 그 밖의 측정장비로 가시화된 유동 및 화염 형상을 직접 촬영하기 위한 카메라 등을 사용하였다.

3. 실험 결과 및 검토

본 연구에서는 우선 동축 이중 확산 화염의 화염 형태에 대한 유량의 영향을 살펴보기 위한 실험을 수행하였다. 우선 본 논문에서는, 중간의 환형(annular) 관으로부터 분출되는 연료와 외부 관으로부터의 공기 유량은 고정하고, 중앙부의 공기 유량의 변화에 따라 바뀌는 화염의 형태를 관찰하고 화염 형태의 변화에 따른 배출 특성 등을 연구하였다.

환형관 연료			외부 공기
유량 (cc/min)	평균 유속 (cm/s)	Reynolds Number	유량
20	0.17	4	20 L/min (평균 유속 0.06 cm/s)
실험조건	중심관 공기		
	유량 (L/min)	평균유속 (cm/s)	Reynolds Number
(a)	0	0	0
(b)	0.1	2.1	14
(c)	0.5	10.6	71
(d)	2.2	46.7	311
(e)	2.6	55.2	368
(f)	3.0	63.7	425
(g)	4.0	84.9	566
(h)	6.0	127.3	849

Table 1. Experimental conditions

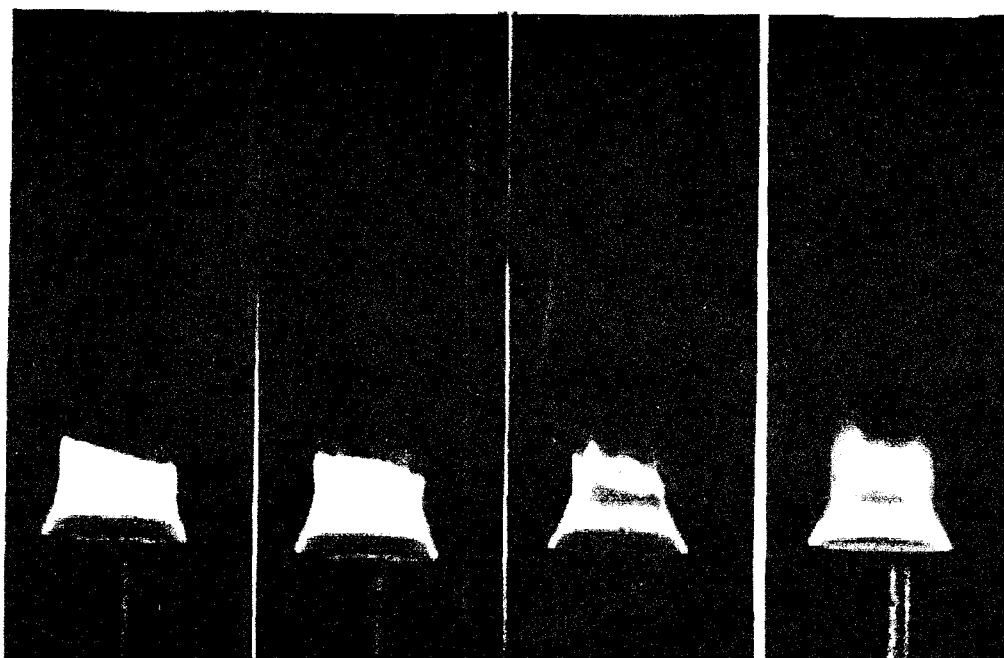


(a) 0 L/min

(b) 0.1 L/min

(c) 0.5 L/min

(d) 2.2 L/min



(e) 2.6 L/min

(f) 3.0 L/min

(g) 4.0 L/min

(h) 6.0 L/min

Fig. 3 Flame shapes with various central air flows

3.1 공기유량에 따른 화염 형태의 변화

Figure 3 은 중앙의 공기 제트의 유량을 각각 0 부터 6.0 L/min 까지 변경하면서 변화하는 화염의 형태를 직접 촬영한 사진이다. 이 실험에서는 환형 관(annular tube)로 분출되는 연료 유량은 20 cc/min, 외부 공기 유량은 20 L/min으로 고정하였으며 Table 1 은 이 실험 조건을 정리한 표이다. 중앙의 공기 제트의 유량을 0 부터 6.0 L/min 까지 변경하면 유속은 0 - 1.3 m/s 의 범위이고 Reynolds 수는 최고 850 이다.

한편 환형 관 부의 공급 연료의 평균 유속은 0.25 cm/s, 외부 공기의 유속은 이보다도 더욱 작은 0.06 cm/s 의 매우 작은 값이고, 환형 관의 간

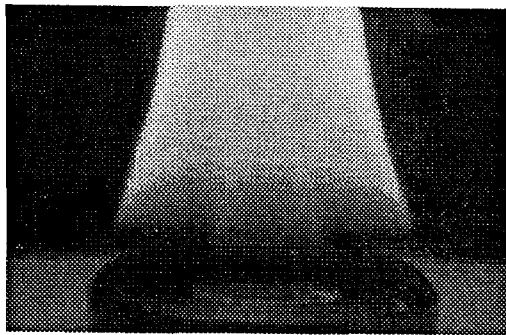


Fig. 3-1 Closeup of the bottom of a double-concentric diffusion flame

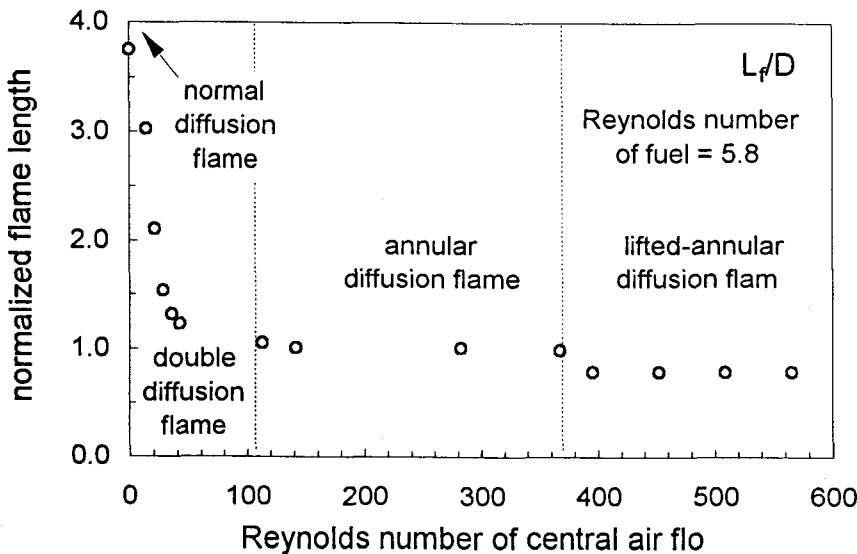


Figure 4 Effect of the flow rate of the central air jet on the flame length

격을 기준으로 한 Reynolds 수가 10 이하이므로 본 화염 주위의 유동은 기본적으로 층류 유동이라고 할 수 있다.

Figure 3의 (a)는 중심 관에서 공기 공급을 하지 않은 일반적인 동축 확산 화염(normal coflow diffusion flame)을 보여주는 사진으로 전체 가시 화염의 길이는 약 75 mm 이고, (b)가 동축이중 확산화염이다. 이 화염에서는 외부의 화염 내부에 중심부에 약 15 mm 정도 길이의 역 확산화염이 형성되는데 화염의 하단 부분을 확대한 Fig. 3-1에 내부에 형성된 역 확산화염이 분명히 관찰된다. 이 조건에서 전체(외부) 화염의 길이는 약 50 mm로 (a)의 정상 동축 화염에 비해 30% 정도 짧다. 이중 확산 화염은 정상 동축 화염과 비교하여 대체로 밝은 편인데, 화염이 밝아지는 것은 내부에 형성된 역 확산화염에 의해 화염 내부의 온도가 상승하기 때문이라고 생각되며, 이중 확산 화염 내부에서의 온도를 측정하여 이러한 현상을 확인하였다.[7] 중앙부의 공기 유량이 0.5 L/min 까지 증가하면 내부의 역 확산 화염의 길이는 길어지고 전체 화염의 길이는 짧아진다. 내부의 공기 유동의 유량이 0.5 L/min 가 되면 외부와 내부의 화염이 서로 만나게 되며 그림의 (c) 와 같은 환형(annular shape) 화염이 형성되며 아주 밝은 빛을 낸다. 이러한 환형의

화염 형태는 그림의 (d)와 같이 내부 공기 유량이 2.2 L/min 정도에 도달할 때까지 계속 유지되다가, 2.6 L/min 이상에서는 내측의 화염이 노즐 끝 부분에 더 이상 부착되지 못하고 그림의 (e) 및 (f) 와 같은 형태로 공중으로 떠오르는 부상 화염이 형성된다. 부상 화염으로의 천이(transition)가 일어날 때는 아주 약간 공기 유량을 증가시키

기만 하면, 화염의 형태가 밝은 황색의 화염에서 어두운 청색 화염으로 천이가 일어나면서 갑자기 화염이 어두워진다. 이 조건에서 공기 유량이 더욱 커지면 그림 (g) 및 (h)와 같이 내측의 화염은 완전히 부상되어 거의 화염의 끝 부분에만 걸치게 된다. 이러한 조건에서 중앙부의 공기 유속은 약 1.3 m/s 로 연료의 평균 유속 0.17 cm/s 에 비해 700 배 이상의 고속이지만 환형 관 외부에 형성되어 있는 화염이 보염(保焰)을 하여 화염의 취염(吹焰, blow-out)이 발생하지 않았다.

3.2 공기 유량에 따른 화염 길이 변화

Figure 4 는 내부 공기 유량의 증가가 화염 길이에 미치는 영향을 나타내는 그림이다. 가시 화염의 길이는 직접 촬영한 사진에서 측정하였으며, 망원 cathetometer를 이용하여 확인하였다. 이 그림에서 동축 이중 확산 화염은 화염의 형태를 바탕으로, 크게 세 영역(category)으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 일반 확산화염의 내부에 작은 역 확산화염이 생기고 화염의 길이가 약간 짧아지는 전형적인 형태의 이중 확산화염이고, 두 번째는 환형(annular) 이중 확산화염이며, 세 번째는 부상된(lifted) 이중 확산화염이다. 이 Fig. 4 에서 나타난 것은 중앙 공기 유량이 증가함에 따른 외부 화염의 길이이다. 외부 화염의 길이는 중앙공기 유량이 증가함에 따라 급격히 감소하다가 환형 확산 화염(annular diffusion flame)이 형성되면 중앙 공기 유량이 약 10 배에 이르는 범위까지 전체 화염 길이에 거의 변화가 없다. 또한 내부의 화염이 환형 부상 화염(lifted-annular diffusion flame)이 되면 화염의 길이를 명확히 정의하기 어렵지만 거의 변화가 없거나 약간 짧아지는 정도이다. 이러한 부상된(lifted) 2중 확산 화염이 형성되면 화염의 끝 부분은 완전히 열린 형태가 된다.

3.3 유동 및 화염의 가시화

Figure 5 에 나타난 사진들은 $TiCl_4$ 를 연료에 혼합하여 화염 내에서 형성시킨 TiO_2 로부터의 산란광을 이용한 화염의 가시화 결과이다. 이 실험의 조건은 Table 2에 정리하였는데, Table 1에 정

환형관 연료			외부 공기
유량 (cc/min)	평균 유속 (cm/s)	Reynolds Number	유량
30	0.26	6	20 L/min (평균 유속 0.06 cm/s)
실험조건	중심관 공기		
	유량 (L/min)	평균유속 (cm/s)	Reynolds Number
(a)	0	0	0
(b)	0	0	0
(c)	0.05	1.1	7
(d)	0.1	2.1	14
(e)	0.1	2.1	14
(f)	0.5	10.6	71
(g)	3.0	63.7	425
(h)	4.0	84.9	566

Table 2 Experimental conditions for Flow visualization

리한 실험 조건보다 연료의 분출량이 50% 많은 30 L/min 인 경우이다.

Figure 5(a) 는 환형 관에서 연료를 분출하면서 화염을 형성시키지 않고 촬영한 저온 연료 제트(cold fuel jet) 사진이다. 중앙 관에서 공기를 공급하지 않았기 때문에 중심축 부근의 정체 지역에서 대칭으로 형성된 유동 재순환 영역이 뚜렷하게 나타난다. 이 사진에서는 연료와 공기가 반응하지 않았지만 주위의 공기에 포함되어 있는 수분과 반응한 $TiCl_4$ 로부터 형성된 TiO_2 입자일 것이다. 환형 관으로 공급된 연료에 의해 외부 화염을 형성시킨 후, 중앙 관으로부터 소량의 공기를 공급하여도 역 확산화염이 형성되지 않도록 주의하면 공급된 공기가 연료 제트의 내부로 확산되어서 사진 (b) - (d)와 같은 화염의 형태를 나타낸다. 중앙 공기를 공급할 때 서서히 유량을 증가시키면 0.1 L/min 에 이르기까지 내부의 역 확산화염이 형성되는 것을 억제할 수 있다. 이 상태에서는 공급된 공기는 확산하여 주위의 연료와 혼합되어 약간의 예혼합 상태가 되며 공기 유량을 증가시키면 화염의 길이가 약간씩 짧아지는데, 그 이유는 화염 내부에서 연료와 공기가 확산에 의해 혼합되기 때문이라고 생각된다. 사진 (d)에서는 화염의 외부의 상부에서 중심축을 중심으로 TiO_2 입자의 떠가 대칭으로 관찰되는데, 이 사진으로부터 유선(streamline)이 어떻

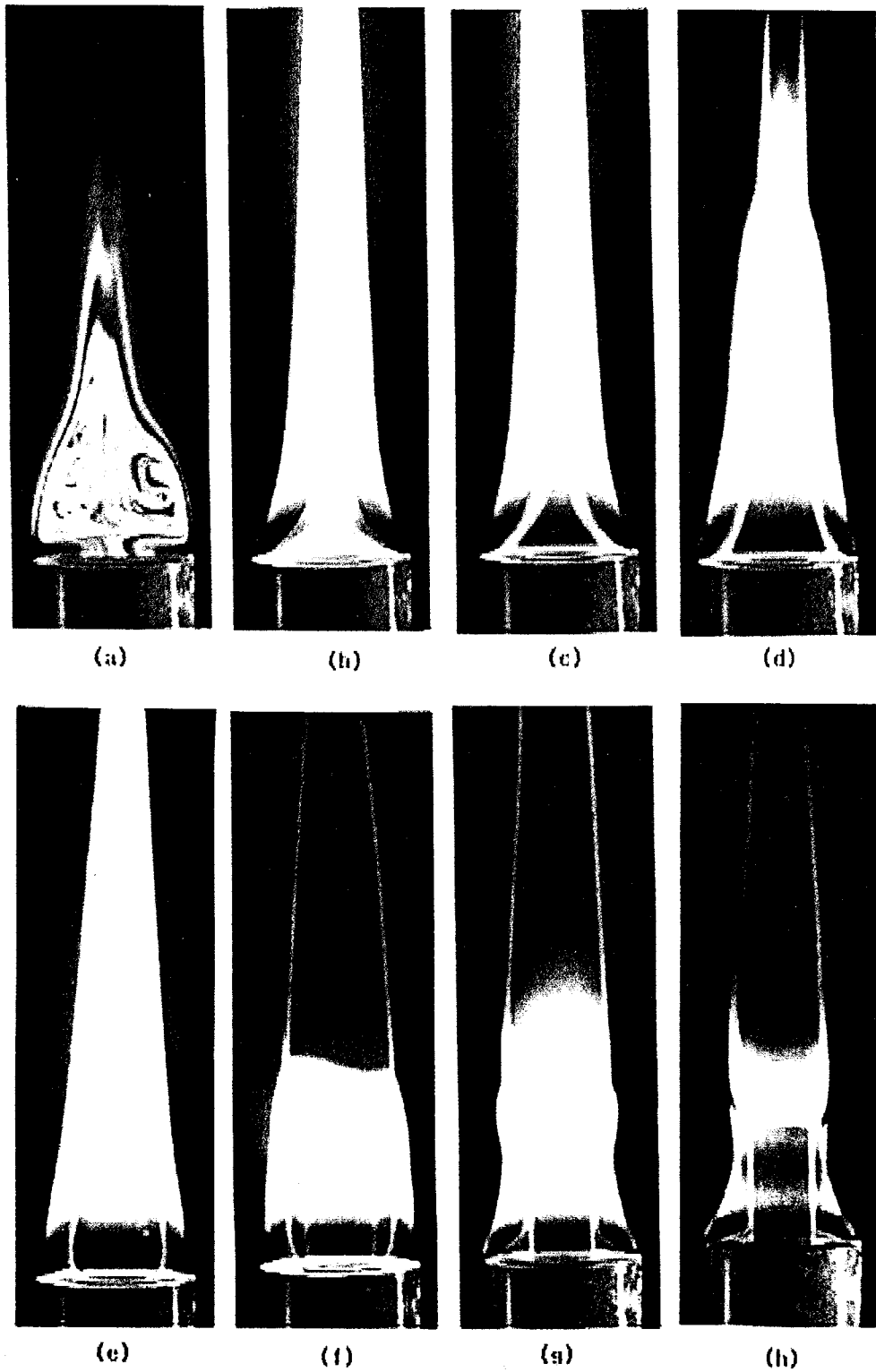


Fig. 5 The visualization of various flame structures

게 형성되는 지를 간접적으로 추정할 수 있다.

사진 (e)에서 보이는 화염의 형태는 이중 동축 확산 화염으로 내부에 형성된 역 확산화염을 볼 수 있으며, 내부 공기 유량이 (d)와 거의 유사한 조건 인데도 화염 길이는 다시 길어져서 (c)의 화염 정도의 길이이다. 사진 (f)는 환형 확산화염의 형태이다. 이 사진에서 특징적인 것은 화염 후류에 보이는 TiO_2 입자의 떠인데, 이는 화염이 환형(annular)으로 바뀌면서 환형 화염의 끝 부분을 통과하여 화염 외부로 나온 TiO_2 입자라고 생각된다. 이 사진의 (g)와 (h)는 내부 화염이 부상한 이중 화염을 나타내는 사진들이다. 이 사진에서는 TiO_2 입자의 가시화로 중앙의 공기 제트의 경계선이 명확히 관찰된다. 사진 (h)에서는 화염의 상부에 왕관과 같은 형태의 산란광의 이미지가 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 2 (h)에서는 이 부분에 화염이 나타나지 않으므로 화염이 아닌 것으로 보이며 이 부분을 통과하는 TiO_2 입자에 의한 산란광에 의한 것으로 생각된다.

3.4 배출가스 특성

Figure 6 은 이중 동축 화염의 형태에 따른 NO_x 및 CO 의 배출특성을 나타내는 그림이다. 배출 가스 성분의 측정을 위해서 화염의 하류에 배출 가스 포집을 위해 굴뚝(chimney)을 설치하고 화염으로부터 약 1 m 정도 떨어진 하류에 샘플링 프로브를 삽입하여 배출가스를 포집하여 측정기로 보내서 가스의 성분을 분석하였다. 이 그림에서 NO_x 및 CO 의 배출농도는 수분을 제외한 dry basis의 농도를 나타낸다. NO_x 및 CO 의 배출 특성 중 특징적인 점은 내부 공기 유량이 2.5 L/min 정도까지 증가하는 동안 화염의 형태가 정상 동축 화염 - 이중 확산 화염 - 환형 확산 화염의 3 단계를 거치면서 화염의 형상이 크게 변화하는데도 불구하고 NO_x 및 CO 의 배출농도가 거의 변화가 없다는 점이다. NO_x 의 농도는 약 7 ppm, CO 의 농도는 약 25 ppm으로 화염의 형태에 무관하다. 한편 내부 공기 유량이 증가하여 2.5 L/min에 도달하여 내부 화염이 부상된(lifted) 후에는 배출가스 중의 CO 의 농도가 급격히 증가하여 150 ppm 이상에 도달하고

이와 대조적으로 NO_x 는 크게 감소하므로, 전형적인 NO_x - CO Trade-off의 특성을 나타내고 있다. 앞의 화염 사진을 통해 화염 형태의 변화를 설명할 때 화염이 환형(Annular)으로 변하면서 화염의 밝기가 크게 증가하므로 화염의 내부 온도가 증가하는 것으로 생각할 수 있다고 설명하였다. 하지만 화염 내부의 온도에 따라 생성 농도가 영향을 많이 받는 NO_x 와 CO 의 농도가 이 구간에서 거의 변하지 않는 것은 예상 외의 결과이다. 따라서 이러한 화염 형태의 변화에 따른 화염 내부 온도에 대해 측정을 할 필요가 있을 것이다. 한편 내부 화염이 부상된(lifted) 후에는 배출가스 중의 CO 의 농도가 급격히 증가하고 대조적으로 NO_x 는 크게 감소하는 현상에 대해서는 다음과 같은 설명을 할 수 있다. 화염의 내부에는 연소의 중간 생성물인 CO 및 미연 탄화수소가 존재하는데, 환형 화염에서 내측의 화염이 부상되면 화염 면이 존재하지 않는 부분을 통하여 이러한 CO 및 미연 탄화수소가 확산되어 배출량이 증가하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 정상 확산화염과 역 확산화염이 동시에 존재하는 이중 동축 확산화염에 대해서 화염의 형태와 배출특성 등의 변화를 연구하였다. 특히 본 실험에서는 중간의 환형(annular) 관으로부터 분출되는 연료 유량과 외부의 공기 유량을 고정하고, 중앙부의 공기 유량을 변경하면서 바뀌는 화염의 형태를 관찰하고 화염 형태의 변화에 따른 배출 특성 등을 연구하였다. 연구의 결과 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 확산 화염의 내부에 소량의 공기를 공급하면 중심부에 작은 역 확산화염이 형성되어 전형적인 이중 확산화염의 형태가 된다. 이중 확산화염이 되면 내부의 공기 유량이 증가함에 따라 내부의 역 확산 화염의 길이가 공기 유량에 비례하여 길어지고 전체 외부 화염의 길이는 짧아진다.

(2) 공기 유량을 계속 증가시키면 외부와 내부의 두 화염이 서로 만나서 도넛형의 환형(annular shape) 화염을 형성하며, 이 화염은 아주 밝은 빛

을 낸다. 환형 화염이 형성된 후 중앙의 공기 유량이 더욱 증가하면 내측의 화염이 공중으로 떠오르는 부상화염이 형성된다. 이렇게 부상화염이 형성되어도 외부의 화염이 보염기 역할을 하기 때문에 고속의 내부 공기 유속에서도 화염의 쫓염(blow-out)이 발생하지 않는다.

(3) 내부 공기 유량이 상당히 크게 증가하기까지 화염의 형태가 크게 달라지고 화염의 길이도 크게 변화함에도 불구하고 이중 확산화염에서 배출되는 NOx 와 CO 의 농도는 거의 변화가 없다. 그러나 내부 화염이 일단 부상된(lifted) 후에는 배출가스 중의 CO 의 농도가 급격히 증가하고 NOx 는 이에 반비례하여 감소한다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원(KIST)에서 시행한 전문성심화연구개발사업의 연구과제로 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 황준영, 1995, "확산화염의 매연특성에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
- [2] Makel, D. B. and Kennedy, I. M., 1994, Combust. Sci. and Tech., Vol. 97, pp 303 - 314.
- [3] Partridge, W. P. and Laurendeau, N. M., 1995, "Nitric oxide formation by inverse diffusion flames in staged-air burners", Fuel, Vol. 74, No. 10, pp. 1424-1430.
- [4] 정중수 외, 1996, "청정연소를 위한 레이저 응용 계측 기술," KIST 전문성심화과제 보고서, UCE1358-5714-2.
- [5] 정중수, 이교우, 1997, "동축 이중 확산화염에 대한 중앙 공기제트 유동의 영향," '97 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집(II), pp. 37 - 42.
- [6] Huang, R.F., Yang, J.-T. and Lee, P.-C., 1997, "Flame and Flow Characteristics of Double Concentric Jets," Combust. Flame, V.108, pp. 9-23.
- [7] 최강림, 남평우, 정중수, 이교우, 1998, "동축 이중확산화염의 매연 생성에 미치는 산화제의 영향," 1998 대한기계학회 추계 학술대회 논문집(II), pp. 440 - 445.

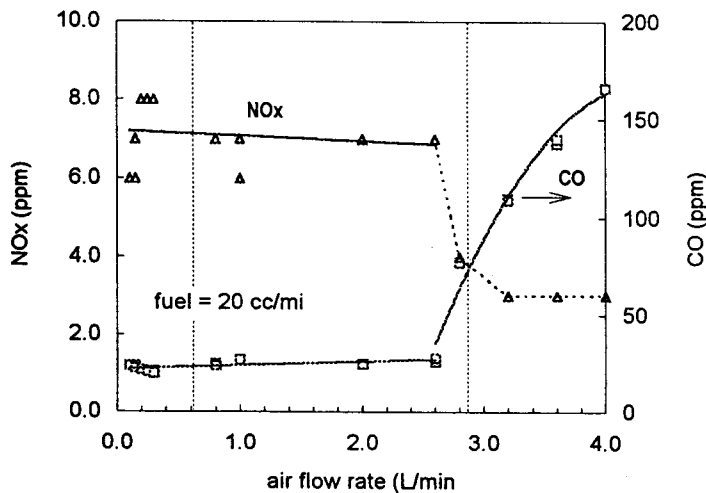


Fig. 6 Effect of the flow rate of the central air jet on the emission of nitric oxide and carbon monoxide