

이산화탄소 재순환이 순산소 난류제트 확산화염에 미치는 영향

차민석* · 김호근** · 김한석* · 안국영*

Effects of CO₂ Recirculation on Turbulent Jet Diffusion Flames with Pure Oxygen

Min Suk Cha, Ho Keun Kim, Han Seok Kim, and Kook Young Ahn

ABSTRACT

Characteristics of methane jet diffusion flames using pure oxygen with recirculating CO₂ as an oxidizer were investigated experimentally. A coflow burner was considered, and the diameter of confinement was larger than that of the coflow. No stabilized flame could be observed over 75% of CO₂ volume percent. A comparison between air and O₂/CO₂ mixture was made in terms of liftoff velocity, flame liftoff height, and blowout conditions. As results, more stable flame could be observed with O₂/CO₂ mixture for the case of having similar flame temperature.

Key Words : pure oxygen, CO₂, liftoff, lifted flame, blowout, blowoff

기 호 설 명

U_o : fuel jet mean velocity, m/s

H_L : flame liftoff height, mm

U_L : fuel jet velocity at liftoff, m/s

U_{co} : coflow mean velocity, m/s

$(H_L)_{B.O.}$: liftoff height at blowout, mm

X_{CO_2} : mole percent of CO₂ in oxidizer

1. 서 론

지구온난화의 주된 요인으로 지목되고 있는 이산화탄소(CO₂)는 각종 기상(LNG, LPG 등), 액상(휘발유, 경유 등) 및 고상(석탄 등)의 화석연료를 연소시킬 때 주로 발생하게 된다. 현재 인류가 사용하는 열 및 동력원의 90% 정도를 이와 같은 화석연료의 연소로부터 얻고 있음을 감안할 때 이산화탄소 발생에 미치는 화석연료 연소의 영향은 매우 크다고 할 수 있다.

고온 순산소 연소기술은 이산화탄소를 가장 효과적으로 저감시키는 방법 중의 하나로 주목받고

있는 기술로서 앞서 언급한 대로 대부분의 이산화탄소가 연소현상에서 비롯되고 있으므로, 그 발생원을 근본적으로 제어할 수 있는 연소기술을 이용하여 CO₂를 직접적으로 저감하는 것이 매우 바람직할 것으로 판단된다. 고온 순산소 연소기술은 일반적인 연소에 사용되는 산화제인 공기 대신에 산소를 산화제로 사용함으로써 약 30% 정도의 에너지를 절감할 수 있는 매우 유망한 기술이다. 산화제로 순수 산소를 이용하기 때문에 연소현상에 직접적으로 관여하지 않으면서도 공기성분의 80% 정도를 차지하는 질소에 의한 현열손실을 현저하게 줄일 수 있으며, 배기가스의 현열을 연소 이전에 산소를 고온으로 예열하는 방법으로 회수하여 에너지를 추가적으로 절감할 수 있다. 또한 원리상으로는 이산화탄소와 물만이 배기가스 중에 포함되어 있으므로 CO₂ 회수 비

* 한국기계연구원

** 한양대학교 대학원

† 연락처자, mscha@kimm.re.kr

Table 1 Experimental conditions.

U_{co} (m/s)	$X_{CO_2} = 60\%$		$X_{CO_2} = 65\%$		$X_{CO_2} = 70\%$		$X_{CO_2} = 73\%$	
	O ₂ (slpm)	CO ₂ (slpm)	O ₂ (slpm)	CO ₂ (slpm)	O ₂ (slpm)	CO ₂ (slpm)	O ₂ (slpm)	CO ₂ (slpm)
0.4	75.3	113.0	65.9	122.5	56.5	131.9	50.8	137.6
0.5	94.2	141.3	82.4	153.1	70.6	164.9	63.6	172.0
0.6	113.0	169.6	98.9	183.7	84.8	197.9	76.3	206.4

용을 줄일 수 있으며, 이외에도 부수적으로, 산소 연소에 의하여 연소시스템을 소형화할 수 있고, 열전달 효율을 극대화할 수 있으며, 근본적으로 질소가 공급되지 않기 때문에 질소산화물(NOx)의 배출을 현저하게 저감시키는 등의 많은 장점을 가지고 있다.

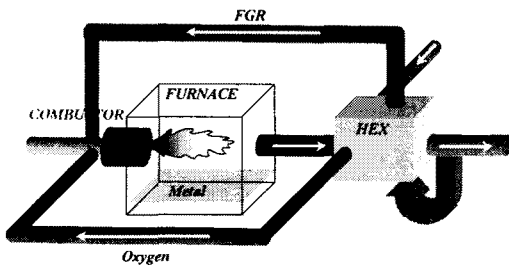


Fig. 1 Schematic of pure oxygen combustion system.

이에 따라 본 연구에서는 Fig. 1에 개략적으로 나타낸 바와 같이 강제 가열로 시스템에 적용을 목표로 하여 산화제 예열 및 배기가스 재순환(FGR)을 고려한 연소시스템을 개발 중에 있으며, 그 기초단계로 상온에서 동축류 난류 메탄제트 확산화염의 안정성에 관한 연구를 수행하였다. 일반 공기를 산화제로 사용한 경우와 산소/이산화탄소 비율이 조절된 산화제에 대한 비교 검토가 이루어졌으며, 수분의 영향 및 고온 예열 등에 관한 연구는 진행 예정에 있다.

난류제트화염의 안정성과 관련하여 화염부상, 부상화염, 화염날림 등의 현상이 있으며, 이들 현상을 규명하고자 하는 연구가 활발히 진행되어왔다[1-6]. 최근에는 부상화염 밀면의 에지화염(edge flame)에서의 국부 유동속도가 층류화염전파속도와 밀접한 관련이 있다는 실험, 수치적 결과들이 보고 되고 있으며[7-10], 화염날림 현상은 제트의 유동속도 보다는 화염의 부상위치가 지배적임을 시사하는 결과 또한 관측되고 있다 [6].

2. 실험장치 및 방법

이산화탄소 재순환이 산소 난류제트화염에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2 와 같이 연소기를 구성하였다. 화염가시화를 위하여 외경 305mm 길이 700mm 석영관으로 연소실을 구성하였으며, 외부의 공기 유입을 방지하기 위하여 출구부에 배기 직경이 100mm 인 덮개를 장착하였다. 연소기는 외경 100mm인 허니콤 중앙에 내경 2.7mm의 스테인리스관을 삽입한 동축류 버너를 고려하였으며 산화제의 유속을 일정하게 하기 위하여 50mm 두께의 직경 3mm 쇠구슬층과 셀 크기 1mm×1mm, 외경 100mm, 길이 150mm 인 허니콤을 이용하여 동축류를 구성하였다. 연료공급관의 길이는 700mm로 연료 속도가 공급관 내부에서 충분히 발달되도록 하였으며 연료공급관의 출구는 동축류 면에서 25mm 높게하여 허니콤 셀로부터의 영향을 최소화 하도록 하였다.

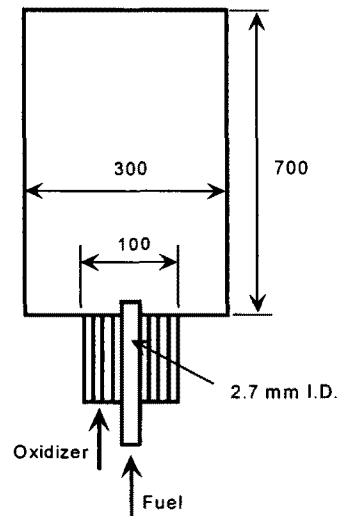


Fig. 2 Burner schematic.

연료는 메탄(99.9%)를 사용하였으며 연료를 정량 공급하기 위하여 질량유량계(MFC)를 사용하였다. 산화제로는 공기 및 O₂/CO₂ 혼합기(mixture)를 사용하였으며 각각 보정된 질량유량계를 이용하여 공급하였다. 산화제인 O₂, CO₂ 가

스의 원활한 혼합을 위하여 혼합기(mixer)를 이용하였다.

초기에 작은 유량의 연료를 공급하여 점화한 다음 산화제를 공급하고 연료의 속도를 증가시켜 가면서 화염의 형상을 관찰하였다. 난류영역에서는 화염형상이 시간에 따라서 급격하게 변하기 때문에 캠코더(24 frame/s)를 이용하여 각 연료 속도에 대한 이미지를 얻은 다음 10초 동안 최대값과 최소값의 중간값을 취하여 화염부상거리 및 화염길이를 측정하였다.

O_2/CO_2 혼합기에 대한 실험조건은 Table 1 과 같으며 산화제 유속조건인 0.4, 0.5, 0.6 m/s로 유속을 일정하게 하고 산화제중 CO_2 혼합을 60, 65, 70, 73% 에 대하여 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 부상화염의 특성

공기 및 산소/이산화탄소 혼합 산화제의 변화에 따른 화염의 특성 변화를 살펴보기 위하여 각각의 산화제에 대한 화염의 특성을 검토하였으며, 동축류 산화제 유속 $U_{co} = 0.4m/s$, 연료 제트 유속 $U_o = 20m/s$ 인 경우에 대한 화염의 직접사진을 Fig. 3에 나타내었다.

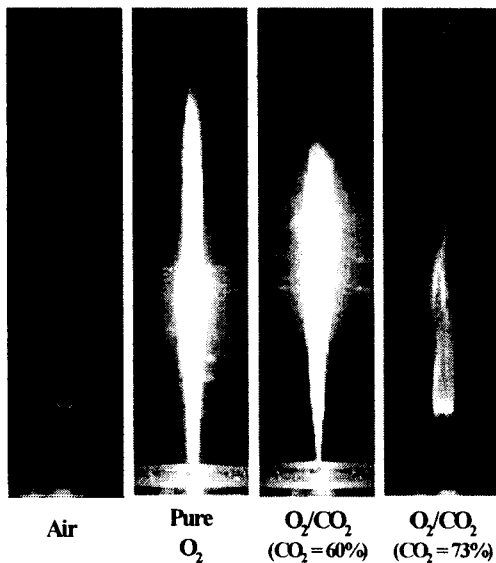


Fig. 3 Direct photos of flames for various oxidizer compositions: $U_o = 20m/s$ and $U_{co} = 0.4m/s$.

산화제로 공기를 사용한 경우에는 부상화염의 형태로 화염이 형성됨을 알 수 있으며, $X_{CO_2} =$

73% 인 경우에는 공기를 사용한 경우와 유사한 부상높이에서 화염이 안정화됨을 알 수 있었다. 그러나 이경우의 화염길이는 공기의 경우에 비하여 현저히 작아지는 현상을 나타내고 있다. 한편, 산화제로 순산소를 사용한 경우와 $X_{CO_2} = 60\%$ 인 경우에는 화염이 모두 노즐에 부착된 확산화염의 형태로 존재하고 있었으며, 육안으로 관찰되는 화염의 길이는 순산소에 비하여 $X_{CO_2} = 60\%$ 의 경우가 좀 더 짧게 나타났다.

여기서 산화제의 조성에 따른 화염의 특성 변화를 살펴보기 위하여 화염의 부상높이 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우에 동축류의 유동속도를 모든 실험조건에 대하여 0.4m/s 로 고정하여 유동장 변화에 따른 영향을 최소화 하여 실험하였다.

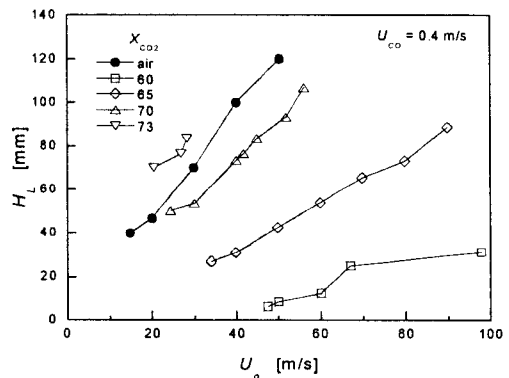


Fig. 4 Liftoff heights for various coflowing oxidizer compositions at $U_{co} = 0.4 m/s$.

$X_{CO_2} = 60\%$ 인 경우에는 연료유량계의 제한으로 인하여 화염날림 현상을 관측할 수 없었으나, 이외의 경우에는 데이터의 시작점이 화염부상을 마지막 점이 화염날림을 각각 나타낸다. 전반적으로 질소대신 이산화탄소가 첨가된 산화제의 경우에는 실험범위의 조성비에 관계없이 공기의 경우보다 화염부상이 늦게 시작되며, 화염날림은 공기의 경우보다 낮은 위치에서 일어나게 됨을 알 수 있다. 특히, $X_{CO_2} = 73\%$ 의 경우에는 화염이 존재하는 안정화 영역이 현저히 줄어들어 있으며, 이산화탄소의 첨가량을 더욱 증가시켜 $X_{CO_2} = 75\%$ 수준이 되면 동축류 유량 및 연료의 유속에 관계없이 노즐부착된 상태의 확산화염이 바로 소멸되는 화염꺼짐(blowoff) 현상을 관찰할 수 있게 된다.

이와 같이 유동장에 관계없이 확산화염이 소멸되는 조건을 파악하기 위하여 산소와 질소를 혼합한 산화제에 대한 실험을 수행한 결과 산화제중에 질소의 몰 분율이 81% 정도에 이르면,

Table 2 상세화학반응계산에 의한 단열화염온도 및 화염전파속도.

	Oxidizer Composition				
	Air	Volume Percent of CO ₂			
		73	70	65	60
Laminar Burning Velocity [cm/s]	37.41	11.01	16.87	27.81	41.55
Adiabatic Flame Temperature [K]	2,228	2,038	2,138	2,288	2,402

$X_{CO_2} = 75\%$ 인 경우와 동일하게 연료 및 산화제 유속에 무관하게 소염이 일어나게 되는데, 이는 연소현상의 열화학적 측면에서 접근해야 될 문제로 판단되며, 본 연구의 경우에 혼합기체의 비열 및 화염온도의 계산 등을 통하여 서로의 공통점을 찾고자 노력하였으나 아직 만족할 만한 설명 방법을 알아내지 못하였으며 추후에 계속적으로 관심을 갖고 검토할 예정이다.

충류부상화염의 경우에 있어서 연료측에 질소를 희석하여 화염온도를 감소시킨 경우에는 1-D planar 코드와 GRI3.0 메카니즘 등 상세화학 반응을 고려하여 계산한 각 경우에 해당하는 최대 충류 화염전파속도를 이용하여 서로 다른 부상높이의 변화 경향을 $H_L \sim f(U_o/S_L)$ 인 함수의 꼴로 잘 표현할 수 있었으며[11], 난류부상화염의 경우에는 연료의 변화에 따른 충류화염전파속도의 차이를 고려한 무차원화를 통하여 $H_L \sim f(U_o/S_L^2)$ 로 표현될 수 있음이 알려져 있다[2]. 따라서 본 연구의 결과를 해석하기 위하여 이론당량비를 고려한 단열화염온도와 화염전파속도를 계산하여 Table 2에 나타내었다.

Fig. 4와 Table 2를 동시에 고려할 때, 산화제로 공기를 사용한 경우의 부상특성이 $X_{CO_2} = 70\%$ 와 $X_{CO_2} = 73\%$ 의 중간정도를 나타내고 있으므로, 만약 충류화염전파속도만으로 현상을 설명할 수 있다면 공기의 경우에 계산된 화염전파속도가 이들 조성비에 따른 화염전파속도의 중간 값을 갖게 될 것으로 예상할 수 있다. 그러나 Table 2에 나타낸 바와 같이 $X_{CO_2} = 70 - 73\%$ 인 경우에 화염전파속도가 대략 11-17 m/s 로 공기의 경우에 37 cm/s 와 큰 차이를 보이고 있어 산화제가 공기에서 O₂/CO₂ 혼합기로 대체된 경우에는 각종 확산계수들을 동시에 고려해야 될 필요가 있을 것으로 판단된다. 여기서 한가지 언급할 내용은 이론당량비의 예혼합화염을 고려할 때 공기를 사용한 경우와 유사한 화염온도를 얻기 위해서는 $X_{CO_2} = 65\%$ 정도를 고려하여야 한다는 점이다.

한편, 동축류 프로판 화염에 대한 유사한 연구

결과를 보면[12] O₂/N₂ 혼합 산화제와 O₂/CO₂ 혼합기에 따른 부상화염의 거동이 계산된 충류화염 전파속도에 따라 유사하게 나타나고 있어 검토의 대상이 되고 있으며, 본 연구에서 고려한 연소기가 동축류 직경은 10cm, 연소기 외벽의 직경은 30cm 이기 때문에 이로 인하여 야기되는 내부 유동의 재순환 현상이 부상화염에 미치는 영향일 것이라고 예상되고 있으며, 추후에 깊게 연구해 나갈 계획이 있다.

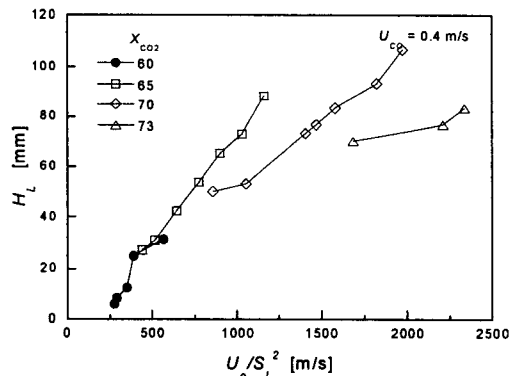


Fig. 5 Lift-off heights with U_o/S_L^2 for O₂/CO₂ oxidizers at $U_{CO} = 0.4$ m/s.

그러나 본 연구의 결과 중에서 공기의 경우를 제외한 O₂/CO₂ 혼합기에 대한 결과를 U_o/S_L^2 로 표현한 경우에는 $X_{CO_2} = 73\%$ 인 경우를 제외하고 비교적 그 특성이 잘 맞고 있음을 Fig. 5를 통해서 알 수 있다.

동축류 산화제의 유속 변화에 따른 부상특성의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. $X_{CO_2} = 73\%$ 의 경우에는 동축류 유속 0.5m/s부터 연료 유속 증가에 따라 노즐 부착화염으로부터 바로 화염날림이 일어나 안정된 화염을 발견할 수 없었으며, 그래프에 잘 나타나 있듯이 공기의 경우에는 동축류 유속이 증가함에 따라 화염의 부상높이가 점차로

증가 하게 되며 그 안정 영역 또한 현저히 감소함을 알 수 있었으며, 이와는 반대로 O_2/CO_2 혼합기의 경우에는 동축류 유속에 비교적 둔감한 특성을 나타냄을 알 수 있다.

이와 같이 공기의 경우와 O_2/CO_2 혼합산화제의 경우에 큰 경향 차이를 보이는 것은 에지화염의 전파특성과도 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되며, 더 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

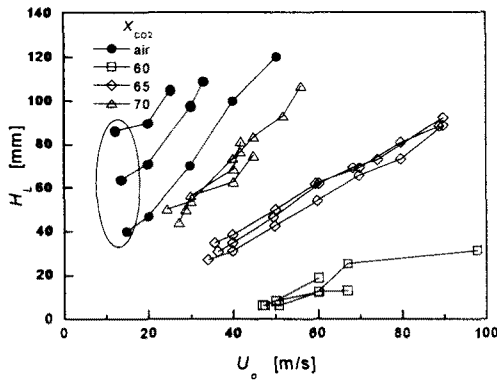


Fig. 6 Liftoff heights for various coflow velocities.

3.2 화염부상 및 화염날림

완전 발달된 (fully developed) 난류 제트에서는 주어진 연료와 유동조건에 대하여 노즐직경에 관계없이 화염부상이 시작되는 부상속도 U_L 이 상수인 것으로 밝혀져 있다[6]. 그러나 이러한 화염 부상속도에서 충분히 큰 레이놀즈수를 얻을 수 없는 작은 직경의 노즐에 대해서는 유동장 천이 속도와 유사한 영역에서 화염부상이 시작되게 된다[6]. 내경 2.7mm인 메탄 확산화염은 자유제트인 경우에 약 14m/s에서 화염 부상이 시작될 것으로 예상할 수 있으며, Fig. 7에 나타내었듯이 공기의 경우에는 이와 유사한 수치인 13m/s 정도에서 화염부상이 시작되고 있어 본 연구에서 사용한 동축류 유속영역에서는 화염부상시작 속도가 자유제트인 경우와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

그래프에서 확인할 수 있듯이 각종 산화제에 따른 화염의 부상속도는 대체로 동축류 속도에 무관하게 일정한 편이며, Fig. 8에 나타내었듯이 O_2/CO_2 혼합 산화제의 경우에는 X_{CO_2} 의 증가에 따라 대략 선형적으로 U_L 이 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 결론적으로 화염부상이 시작되는 안정성 경계는 공기의 경우보다 이산화탄소를 포함한 산화제의 경우가 비교적 우세한 특성을 보이고 있으나, 질소와 동일한 부피비를 고려

할 때는 안정성이 떨어진다고 할 수 있겠다.

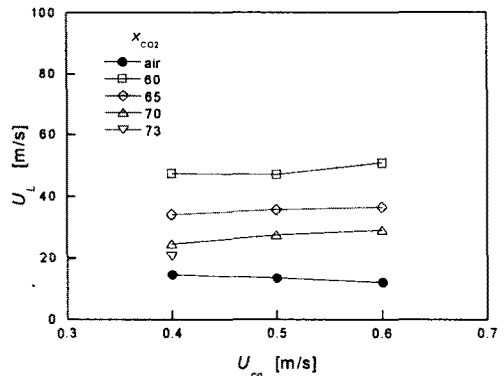


Fig. 7 Liftoff velocities for various oxidizer compositions with coflow velocities.

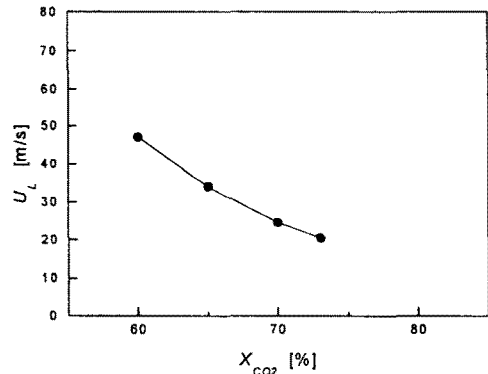


Fig. 8 Liftoff velocities with X_{CO_2} .

한편, 메탄의 화염날림이 일어나는 조건을 살펴보면, 공기를 산화제로 한 경우에 있어서 자유제트와 아랫면이 노출된 제한제트의 경우에 모두 화염날림이 일어날 때의 부상높이와 노즐직경의 비인 $(H_L)_{B.O.}/d$ 가 대략 40정도임을 알 수 있는데[6], 본 연구결과에서도 Fig. 9에 나타난 바와 같이 공기를 산화제로 사용한 경우에는 $(H_L)_{B.O.}/d = 38.9-44.4$ 로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이산화탄소를 혼합한 경우에는 $(H_L)_{B.O.}/d$ 값이 공기의 경우보다 작게 되며, 그 값이 30 수준으로까지 떨어지게 되는데 이는 공기의 경우보다 낮은 부상높이에서도 화염날림이 일어나게 되는 것으로 화염날림 안정성은 CO_2 혼합의 경우가 오히려 불리한 것으로 판단될 수 있다.

화염날림은 특정 위치에서의 연료와 산화제의 혼합 분율과 밀접한 관계가 있는 현상이며, 거대 난류구조에 의한 기연가스의 재유입(re-entrain-

ment) 에 의한 과도한 혼합 또한 큰 역할을 할 것으로 생각된다. 따라서 이산화탄소를 혼합시킨 경우에는 이산화탄소의 비열이 질소에 비해 상대적으로 크고, 또한 CO로 열해리되며 생기는 열손실, CO₂에 의한 복사열손실 등에 의하여 화염 날림이 쉽게 일어난 것으로 생각된다.

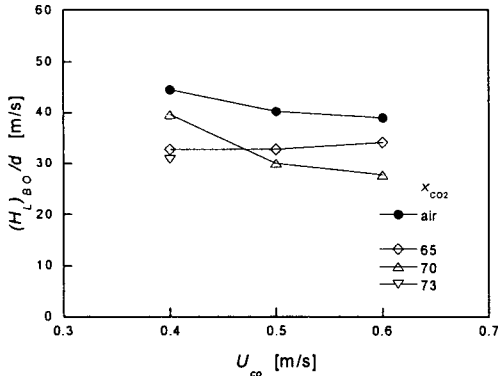


Fig. 9 Normalized liftoff heights for various oxidizer compositions with coflow velocities.

4. 결론

고온 순산소 연소기 개발의 초기 단계로서 상온의 산소와 배기가스 재순환을 고려한 이산화탄소의 첨가에 따른 메탄 확산화염의 안정화 특성에 대하여 실험적으로 살펴보았다.

순산소에 이산화탄소를 첨가할 수 있는 최대 비율은 부피비로 75% 수준이며, 이 이상 이산화탄소를 혼합할 경우 유동조건에 무관하게 화염꺼짐이 발생함을 알 수 있었다. 공기의 경우와 비교하여 낮은 층류화염전파속도에도 불구하고 낮은 화염부상높이를 나타냈으며, 화염부상이 시작되는 연료제트 유속 또한 높게 나타나 화염부상 안정성은 공기에 비하여 비교적 우수하게 나타났다. 그러나 화염날림이 일어나는 무차원 높이가 공기의 경우에 $(H_L)_{BO}/d = 40$ 인 것에 비하여 O₂/CO₂ 혼합 산화제의 경우에 최저 30까지 낮아져서 부상거리에 따른 화염날림 안정성은 향상되지 않는 특성을 보였다. 하지만 제트유속에 따른 화염날림 안정성은 공기에 비하여 향상된 결과를

얻을 수 있었다. 따라서 공기의 경우와 유사한 화염온도를 예상할 수 있는 $X_{CO_2} = 65\%$ 의 경우에 화염안정성 측면에서 공기에 비하여 뛰어난 것을 알 수 있었다.

또한, 동축류 유속의 변화에 따른 변화도 O₂/CO₂ 혼합 산화제의 경우에는 거의 무시할 만한 특성을 고찰할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Peters, N., and Williams, F. A., *AIAA J.* 21:423-429 (1983).
- [2] Kalghatgi, G. T., *Combust. Sci. Technol.* 41:17-29 (1984).
- [3] Broadwell, J. E., Dahm, W. J. A., and Mungal, M. G., *Proc. Combust. Inst.* 20:303-310 (1984).
- [4] Pitts, W. M., *Proc. Combust. Inst.* 22 809-816 (1988).
- [5] Cha, M. S. and Chung, S. H., *Proc. Combust. Inst.* 26:121-128 (1996).
- [6] Cha, M. S. and Chung, S. H., *Combust. Flame* submitted (2003).
- [7] Muniz, L., and Mungal, M. G., *Combust. Flame* 111:16-31 (1997).
- [8] Schefer, R. W., and Goix, P. J., *Combust. Flame* 112:559-574 (1998).
- [9] Maurey, C., Cessou, A., and Stepowski, D., *Proc. Combust. Inst.* 28:545-551 (2000)
- [10] Domingo, P., Vervisch, L., and Bray, K., *Combust. Theory Modelling* 6:529-551 (2002).
- [11] Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M. S., and Lee, B. J., *Proc. Combust. Inst.* 28:2093-2099 (2000).
- [12] 배정락, 이병준, 대기환경학회논문집 B 제 26권 10호 pp.1458-1464 (2002).