

U-곡관 노즐에서 예혼합화염에 미치는 이차 유동의 영향

Effect of Secondary Flow on a Premixed Flame in the U-bend Nozzle

김형근, 차민석, 정석호

서울대 기계공학과

H. G. Kim, M. S. Cha, and S. H. Chung

Department of Mechanical Engineering, Seoul National University

Abstract

The effect of secondary flow on both methane/air and propane/air premixed flame was investigated experimentally. By changing the radius of curvature, various flame behavior was observed. In the U-bend nozzles, flame surface is deformed from axisymmetry. As the exit velocity increased, flame lifted off partially. When the radius of curvature of the U-bend increased, the region where premixed flame is entirely on the rim increased. Since the axial velocity field is changed due to the secondary flow effect, comparison of U-bend and straight tube with the same diameter shows larger U-bend nozzle exit velocity for both flash back and flame blow out. The flame characteristics are mapped with a equivalence ratio, a velocity, and a nozzle radius of curvature. To identify physical reasoning on the flame surface deformation, numerical calculations are conducted. OH radical distributions in flames are visualized by PLIF technique.

1. 서론

최근까지 주로 U-곡관을 통과한 유동에 생성되는 이차유동에 관한 연구가 유체 역학적으로 수행되었다 [1-3]. U-곡관 내의 유동은 곡률에 의한 원심력의 영향을 받게 되고 원리적으로 이 원심력은 U-곡관 평면에서의 압력 구배와 균형을 이루는데 속도가 작은 벽면 근처에서는 압력 구배와 속도가 균형을 이루지 못해 유체는 U-곡관의 중심쪽으로 이동하게 되고 연속성에 의해 빠르게 움직이고 있는 유체의 중심 부분은 U-곡관의 바깥쪽으로 움직이게 된다. 이처럼 평균 유동의 방향에 수직이 되는 평면에 생성되는 두 개의 와동 (vortice) 을 이차유동이라고 하고 [4] 이는 Dean number 와 곡률비 (curvature ratio) 에 영향을 받는 것으로 알려져 있다 [5].

이차 유동의 효과는 파이프 시스템 (piping systems), 열교환기, 혈관내의 유동 (coils in heat exchangers and in blood flow) 등과 같이 실용적으로 다양한 분야에 응용되고 있으나 [5], 주로 유체역학적인 관점에 국한되어 왔으며 이러한 이차유동의 영향을 받는 유동장 특성이 연소 현상에 미치는 영향에 대한 연구는 지금까지 상대적으로 결여되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 이차유동이 있는 U-곡관에서 분출되는 연료/공기 예혼합제트에 대한 화염의 특성을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험 장치는 연료/공기 혼합부, U-곡관 노즐과 노즐 수직 이송장치로 구성되어 있다 (Fig. 1). 실험에 사용된 U-곡관은 원형으로 굽은 부분을 180° 가 되도록 스테인레스 관을 벤딩하여 제작하였으며, 곡률 반경의 변화에 따른 화염 거동의 변화를 알아 보기 위해 곡률 반경 (ρ) 이 7.75 , 10.75 , 16.25 , 21.75 cm 인 네 개의 U-곡관이 실험에 사용되었다. 노즐은 내경이 10.45 mm, 외경이 12.35 mm 이며, 출구의 위치를 모두 곡선이 끝나는 지점보다 약간 높은 곳으로 하였다.

U-곡관 노즐 화염의 특성과 비교하기 위하여 내경 11.5 mm, 외경 12.7 mm 인 직관 노즐을 사용하였다. 곡관과 동일한 관을 사용하였으나 곡관 제작시의 특수 압축 처리로 인하여 곡관의 직경과 약간의 차이가 있다. 한편, 직관의 길이는 실험 전 영역에서 완전 발달된 유동을 얻기 위하여 132 cm 로 하였다.

연료로는 C.P. 등급의 메탄과 프로판이, 산화제로는 공기가 쓰였으며, 이들의 유량은 질량 유량 계를 통해 제어되며 U-곡관의 입구 직전에 비드를 채운 혼합부를 설치하여 연료와 산화제가 잘 섞이도록 하였다. 본 연구에서는 일정한 연료/공기 혼합비에서 이들 예혼합기의 유량을 변화시켜 형성되는 화염의 특성을 고찰하였다.

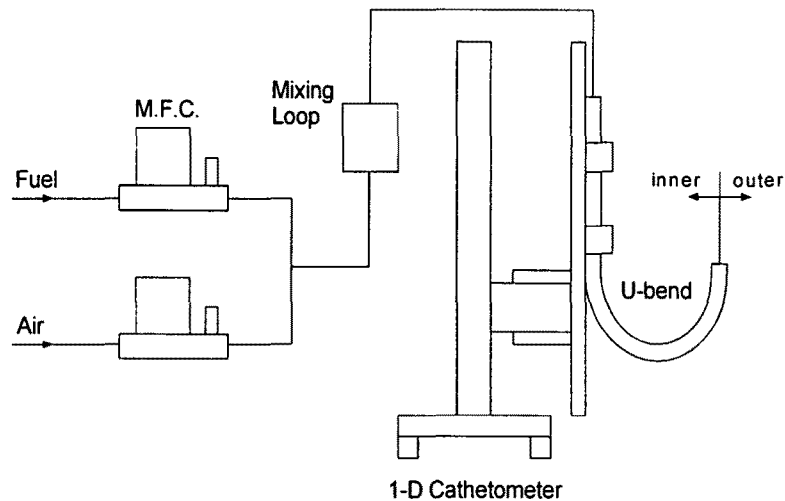


Figure 1 Experimental Setup.

곡률반경에 의해 생성되는 이차유동의 크기는 축방향 속도에 비해 아주 작은 값이고 실험적으로 측정하기에는 상당한 어려움이 있기 때문에 이를 보완하기 위해 상용코드인 STAR-CD 를 통한 비반응장 유동의 시뮬레이션을 통하여 각 실험 케이스에서 생기는 현상들에 미치는 유동장의

영향을 고려해 보았다.

화염 관찰을 위해 35 mm 카메라를 통한 직접 사진과 평면 레이저유도 형광법 (Planar Laser Induced Fluorescence ; PLIF) 실험을 수행하였다. PLIF 실험을 위하여 U-곡관을 일차원 카세토미터 (cathetometer) 에 부착하여 수직방향으로 정밀하게 이송할 수 있게 하였다. 레이저 광원으로는 Nd:YAG 레이저 (Continuum, Powerlite8000), 색소 (dye) 레이저 (Continuum, ND6000), 주파수 배가기 (frequency doubler, Continuum, UVX) 를 사용하였다. OH 라디칼 여기파장으로 $A^2\Sigma^+-X_2\Pi_1$ (1.0) 밴드 Q_1 (6) 라인 (283 nm) 을 선정하였으며, 이를 실린더렌즈 ($f = 50$ mm) 와 볼록렌즈 ($f = 500$ mm) 를 이용하여 노즐과 수직 또는 수평하게 입사되는 폭 5 cm 의 평면광으로 변환하였다. LIF신호의 계측을 위하여 입사광과 90° 위치에 ICCD 카메라를 설치하였으며, 105 mm UV 렌즈 및 산란 신호를 줄이기 위한 WG-305 와 OH 형광신호 부분을 받아들이기 위한 UG-11 광학 필터가 사용되었다. LIF 계측에는 $\rho = 21.75$ cm 인 U-곡관이 사용되었으며 메탄, 프로판 각 연료에 대해 당량비는 0.9, 1.1 로 고정하고 이 때 형성되는 특성적인 화염에 대한 계측이 이루어졌다. 화염의 형상이 비대칭적 구조이므로 노즐에 수평한 화염 단면의 특성을 알아내기 위해 평면광을 노즐 출구에 수평이 되게 한후 노즐의 위치를 일차원 카세토미터로 조절하여 원하는 단면의 OH 라디칼의 분포를 측정하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 직관 노즐에서의 화염특성

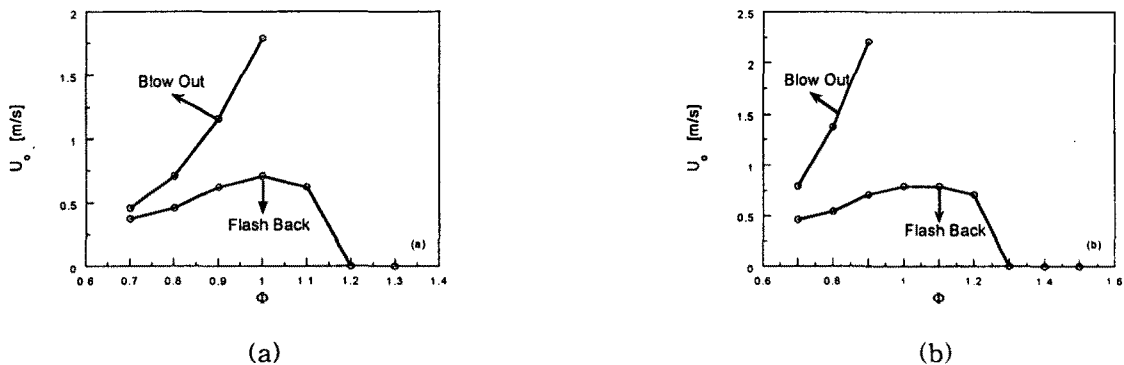


Figure 2 Flame characteristics of straight tube; (a) methane, (b) propane.

Figure 2 는 직관 노즐에서 당량비와 노즐 평균 유속의 변화에 따른 메탄/공기, 프로판/공기 예혼합 화염의 화염 특성 경계를 나타낸 것이다. 연료가 메탄인 경우 특이한 화염은 존재하지 않았고 일반적인 원추 화염이 형성되었다. 그리고 당량비가 1.2 이상이 되면 유량을 줄여도 화염이 역화되지 않았다. 프로판의 경우 $\phi = 1.2$ 에서는 역화가 일어나기 직전인 평균유속 (U_o) 0.75

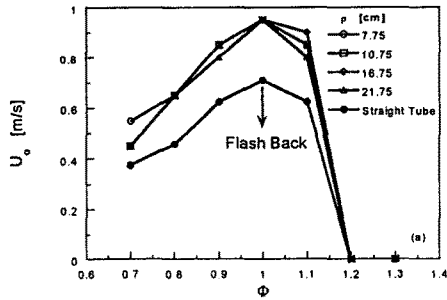
m/s 근처에서 다면 원추 화염 (polyhedral flame)이 발생하였고 ϕ 를 1.3 으로 증가시키면 $U_0 = 0.5-0.6$ m/s 부근에서 발생하였다. 특이한 점은 다면 원추 화염은 역화 경계에서 발생하는 것으로 알려져 있으나 [6] 본 실험에서는 주위 공기 유입이 용이하여 예혼합 화염 주변을 확산 화염이 둘러싸고 있기 때문에 당량비가 1.3 이상이 되면 역화가 일어나지 않는다.

3.2 U-곡관에서의 화염의 형상

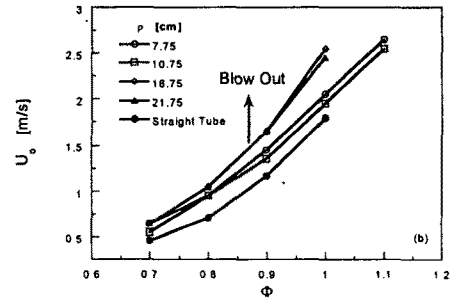
U-곡관의 출구에서 생성되는 화염은 이차유동의 효과에 의해 직관에서 생성되는 원추형 화염에 비해 화염의 끝 부분이 노즐의 곡률 반경 바깥쪽으로 치우침과 동시에 화염의 중앙 부분은 노즐의 안쪽에서 바깥쪽으로 향하는 이차유동에 의해 바깥쪽으로 불룩한 형상이다. 또한 유동 속도가 증가하면 화염의 바깥 쪽부터 노즐에서 부상하기 시작하여 고속으로 갈수록 화염이 노즐의 곡률반경 안쪽에서만 붙어있게 된다. 이와 같이 화염의 일부분이 노즐에서 뜨는 것은 같은 유속 조건에서 직관에서의 경우보다 U-곡관의 경우에 노즐의 바깥 쪽에서 축방향 속도 구배가 더 크기 때문으로 예측된다. 특히 연료를 프로판으로 썼을 경우 U-곡관의 경우에는 직관에서 다면 원추 화염이 관찰되는 영역에서 이미 역화가 일어나기 때문에 다면 원추 화염은 관찰되지 않았다. 화염 형상은 당량비와 유동의 속도의 변화와 더불어 연료의 종류와 곡률 변화에 따라 달라지게 되며, 이때의 화염특성을 Figs. 3-5 에 나타내었다. Figure 3, 4 는 메탄과 프로판 각각의 경우에 화염역화 (flashback), 화염 날림 (blowout) 을 나타내며, Fig. 5 에는 화염이 노즐에 완전히 부착되어있는 경계를 나타내었다.

연료의 변화에 따른 화염 형상 변화를 알아보면 $\rho = 21.75$ cm 일 때 연료가 메탄인 경우 당량비가 0.9 이상이 되어야 노즐에 완전히 부착되어 있는 형태 (on the rim) 화염이 형성되나 연료가 프로판일 경우는 당량비가 0.8 일 때에도 화염이 노즐에 완전히 부착되는 현상이 발생했다.

그래프에서 보면 화염 부착 경계와 화염날림 경계가 일치하지 않음을 알 수 있는데, 이 사이 영역에서는 화염이 노즐의 바깥쪽에서 부분적으로 부상하는 현상이 일어난다. 연료로 메탄을 쓴 경우 어떤 당량비이든 역화가 일어나는 유동 속도, $U_{F.B.}$ 는 U-곡관의 경우가 직관의 경우보다 더 높았고 당량비가 1.2 이상에서는 역화 현상이 나타나지 않았다. 이 현상 역시 직관의 경우처럼 주위 공기 유입에 의하여 확산화염이 생성되기 때문으로 생각된다. 또한 어떤 당량비이든 직관의 경우보다 U-곡관의 경우에 화염날림시의 평균 유속, $U_{B.O.}$ 가 더 크게 나타났다. 즉, 노즐이 직관인 경우에 비해 U-곡관인 경우 역화는 더 잘 일어나고 화염날림은 더 잘 일어나지 않는 것인데 이에 대한 내용은 수치해석 결과에서 논의하겠다. 프로판의 경우, 메탄의 경우와 마찬가지로 $U_{F.B.}$ 는 U-곡관의 경우가 직관의 경우보다 더 크게 나타났으나 $U_{B.O.}$ 는 직관과 $\rho = 7.75, 10.75$ cm 인 U-곡관과 비슷하게 나왔다. 그리고 당량비가 1.3 이상에서는 역화 현상이 나타나지 않았다.

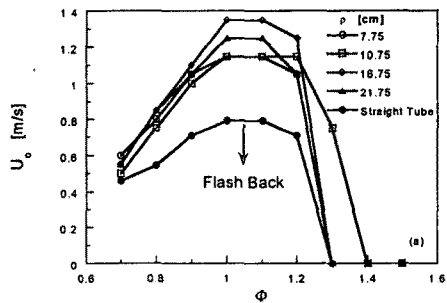


(a)

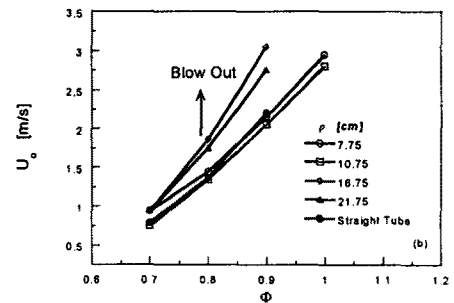


(b)

Figure 3 Flame characteristics of methane; (a) flash back, (b) blow out.

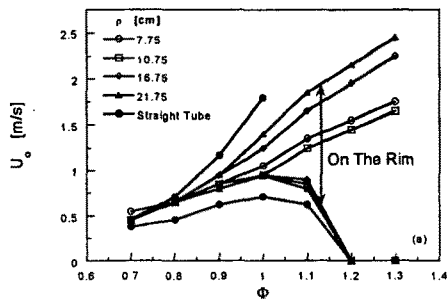


(a)

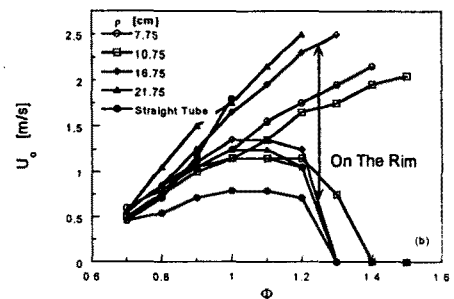


(b)

Figure 4 Flame characteristics of propane; (a) flash back, (b) blow out.



(a)



(b)

Figure 5 Flame characteristics for fully nozzle attached flames; (a) methane, (b) propane.

3.2.1 화염의 형상 및 곡률 반경 변화 효과

$\rho = 10.75 \text{ cm}$, 21.75 cm 일 때 프로판을 연료로 쓰고 측정된 직접사진을 Figs. 6-7 에 나타내었다. 당량비가 0.9 이고 평균 유속이 1.3 m/s 일 때 Fig. 6 을 보면 $\rho = 10.75 \text{ cm}$ 일때는 화염이 노즐의 곡률 반경 바깥쪽에서 완전히 부상해 있고 이 때 노즐의 바깥쪽에서 보면 화염이 존재하지 않는 영역이 확인되며, $\rho = 21.75 \text{ cm}$ 로 증가되면 화염이 노즐에 완전히 부착됨을 알 수있다. 당량비를 고정시키고 평균 유속을 1.8 m/s (Fig. 7) 로 증가시키면 두 가지 곡률 반경의 U-곡관 모두에서 화염이 노즐의 바깥쪽에서 부상된 형상이었는데 특히 $\rho = 10.75 \text{ cm}$ 일 때는 화염의 끝단에서 화염이 떨리는 현상이 관찰 되었으나, $\rho = 21.75 \text{ cm}$ 인 경우에는 화염 끝단의 떨림 없이 안정화되어 있게 된다. 여기서 유의할 점은 바깥쪽에서 부상한 화염은 형태의 큰 변함이 없이 유속의 증가에 따라 길이만 증가할 뿐 화염이 노즐의 안쪽에만 붙어 있고 노즐에서 화염이 부상한 지역의 증가는 없다는 점이다.

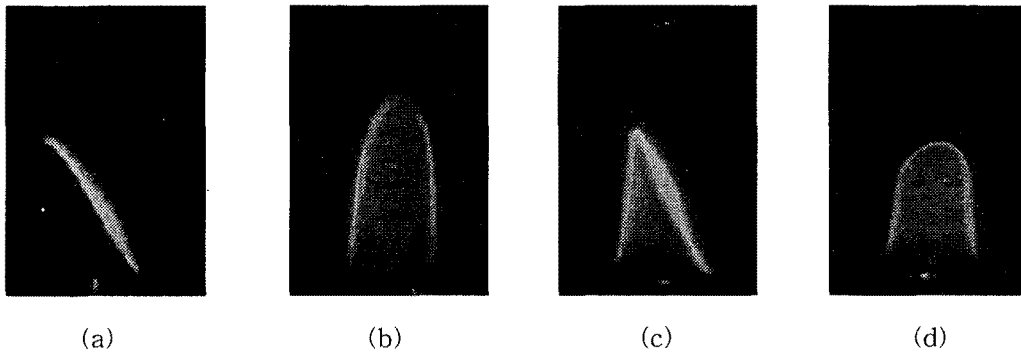


Figure 6 Direct photos of U-bend propane flame with different radius of curvature;
 $\phi = 0.9$, $U_o = 1.3 \text{ m/s}$ (a),(b) $\rho = 10.75 \text{ cm}$ (c),(d) $\rho = 21.75 \text{ cm}$.

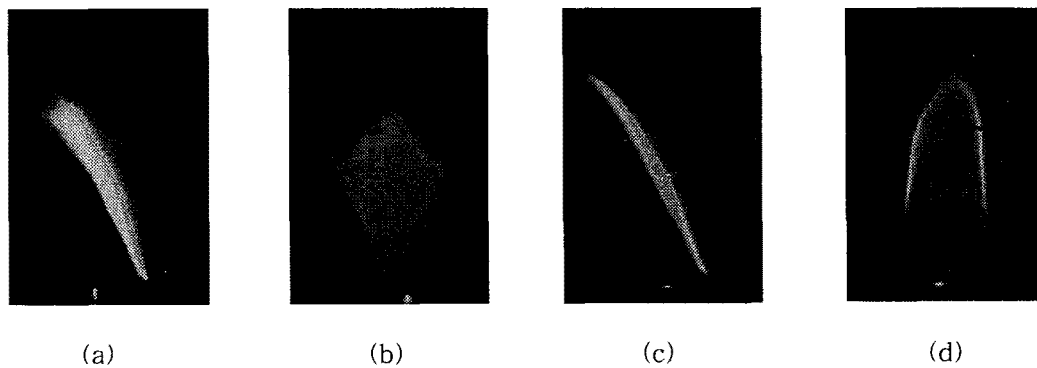
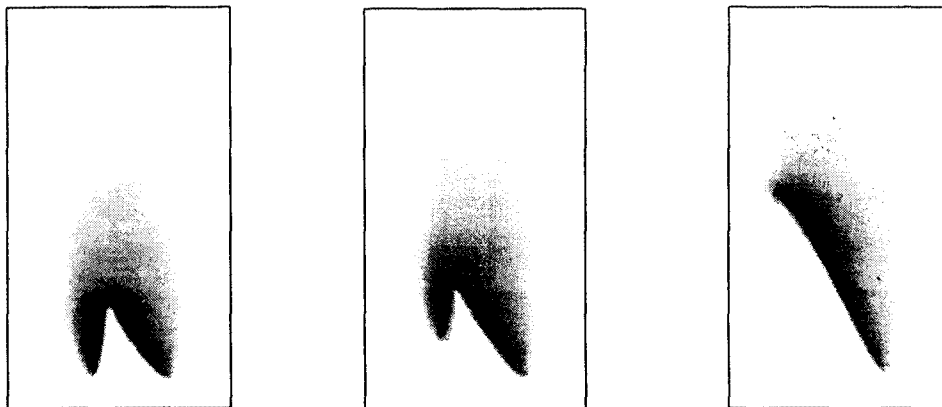


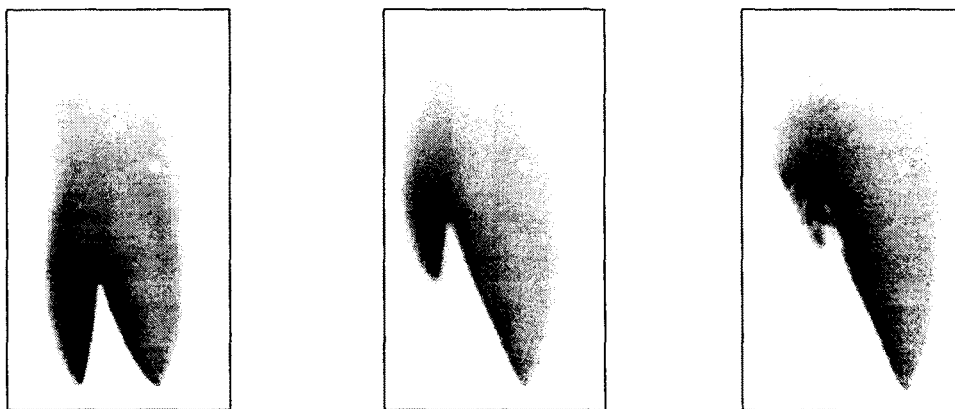
Figure 7 Direct photos of U-bend propane flame with different radius of curvature;
 $\phi = 0.9$, $U_o = 1.8 \text{ m/s}$ (a),(b) $\rho = 10.75 \text{ cm}$ (c),(d) $\rho = 21.75 \text{ cm}$.



(a) (b) (c)

Figure 8 PLIF vertical cross-sectional image of methane;

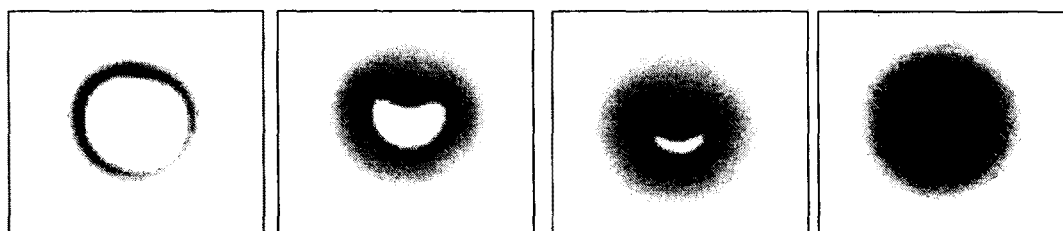
$\phi = 0.9$ and (a) $U_o = 0.9$ m/s (b) 1.0 m/s (c) 1.3 m/s.



(a) (b) (c)

Figure 9 PLIF vertical cross-sectional image of methane;

$\phi = 1.1$ and (a) $U_o = 1.4$ m/s (b) 1.9 m/s (c) 2.1 m/s.



(a) (b) (c) (d)

Figure 10 PLIF horizontal cross-sectional image of methane;

$\phi = 0.9$, $U_o = 0.9$ m/s from the nozzle (a) 0mm (b) 5mm (c) 10mm (d) 15mm.

3.2.2 PLIF를 이용한 화염의 분석

PLIF를 이용하여 각 연료에 있어 U-곡관 출구에서 생성되는 화염 내의 OH 라디칼의 농도를 측정하였다. 각 연료의 경우에 있어 연료 희박과 과농시 각각 화염이 노즐에 완전히 부착된 경우와 화염 일부분이 부상하기 시작하는 경우, 화염이 노즐 안쪽에만 부착된 경우 그리고 $\phi=1$ 일 때 화염 끝단이 떨리기 시작하는 경우를 대상으로 하였다. Figure 8 은 $\phi=0.9$ 인 메탄/공기 혼합기의 평균 유속을 증가시킬 때 생성되는 화염의 수직 단면에 대한 OH의 평균 이미지이다. 그림의 왼쪽이 노즐의 바깥쪽 부분이며 오른쪽이 노즐의 안쪽 부분이다. $U_o = 0.9$ m/s 일 때 화염은 노즐에 완전히 부착되어 있으나 $U_o = 1.0$ m/s 로 증가시키면 화염이 노즐 바깥쪽에서 부상하기 시작한다. $U_o = 1.3$ m/s 로 증가시키면 화염이 노즐의 바깥쪽에서 완전히 부상하여 ‘\’자 형태가 된다. Figure 9 는 $\phi=1.1$ 로 증가시킨 상황이며 $U_o = 1.4$ m/s 일 때 화염은 노즐에 완전 부착되어 있으며 예혼합화염 주변에서 주위 공기의 유입으로 유출된 연료와 확산화염을 형성하여 이 부분에 OH가 다량 존재함을 알 수 있다. $U_o = 1.9$ m/s 로 증가시키면 화염이 노즐 바깥쪽 부분부터 부상하기 시작하며, $U_o = 2.1$ m/s 까지 증가시키면 화염의 바깥쪽 끝이 노즐에서 완전히 떨어져 조금씩 떨리기 시작한다. Figure 10 은 $\phi=0.9$ 이고 $U_o = 0.9$ m/s 인 메탄에 대한 화염의 수평 단면 OH 평균 이미지로서 노즐로부터 5 mm 간격으로 측정 하였으며 그림의 위쪽이 노즐의 안쪽이다. 수평 단면 사진을 보면 노즐부근에서는 거의 원형이지만 (Fig. 10a) 노즐로부터 5 mm 이상 올라가면 (Fig. 10b, c) 이차 유동의 효과로 화염의 안쪽면이 바깥쪽으로 불룩하게 밀려나가는 형태가 확인된다. 특히 주목할 것은 Fig. 10a 에서 노즐의 바깥쪽 부분의 OH 라디칼의 농도가 노즐의 안쪽에 비해 상대적으로 낮게 나온점에서 이곳의 화염 강도가 상대적으로 약해 곧 소멸될 것을 짐작하게 해 준다는 점이다.

3.2.3 STAR-CD를 통한 비반응 유동장의 해석

실험에서 혼합기로 쓰인 메탄/공기와 프로판/공기를 각 당량비에 맞게 성분비를 조정하여 입구 조건으로 주었으며 입구 평균 속도를 실험에서 화염이 일부 뜨기 시작하는 값으로 선택하여 이때 나온 결과로 실험에서의 현상을 유추해 보았다. 수치계산을 위해 사용된 U-곡관의 형상과 이때의 격자 (grid) 를 Fig. 11 에 나타내었다. 이때 출구를 둘러싸고 압력 경계 조건이 주어진 원통 내부에 고체 셀 (solid cell) 을 두어 출구의 위치를 곡률이 끝이 나는 지점에서 위에 위치시키고 출구 근처에서의 공기 유입을 구현하였다. 또한 출구에서 노즐 내에 존재 하는 셀 각각에서의 세 방향 속도의 크기를 데이터화 하여 노즐 출구의 중심축에서의 축방향 속도와 속도 구배를 구하여 같은 평균 유속의 직관에서의 속도 모양과 비교해 보았다.

Figure 12 는 $U_o = 0.55$ m/s 이고 $\phi=1$ 인 메탄/공기 혼합기의 노즐 출구에서의 속도 프로파일과 그 평면에서의 속도 벡터를 나타낸 것이다. 여기서 그림의 왼쪽이 노즐의 안쪽이며 평면 속도 벡터는 실제 크기를 10 배 확대해서 나타낸 것으로 실제로는 축방향 속도의 약 1/100 에 해당하는 값이 나온다. 속도 프로파일은 최대값이 노즐의 바깥쪽으로 밀려나가고 있으며 평면상에서 노즐의 중심부에서 유동이 노즐의 안쪽에서 바깥쪽으로 나오다 노즐 바깥쪽 벽 근처에서 벽을 타

고 노즐의 안쪽으로 이동하는 전형적인 이차유동의 형태를 보인다.

Figure 13 은 $\rho = 21.75 \text{ cm}$ 인 U-곡관 출구에서의 메탄/공기 혼합기의 축방향 속도를 같은 유량의 일반 직관에서의 축방향 속도와 비교하여 나타낸 것으로써 $x = -5 \text{ mm}$ 가 노즐의 안쪽이며 $x = 5 \text{ mm}$ 가 노즐의 바깥쪽을 나타낸다. 이 때 일반 직관에서의 축방향 속도는 식 (1) 을 이용하여 구했다.

$$\frac{u(r)}{U_o} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서 U_o 는 유동 평균 속도 이며, r_o 는 관 내경이다.

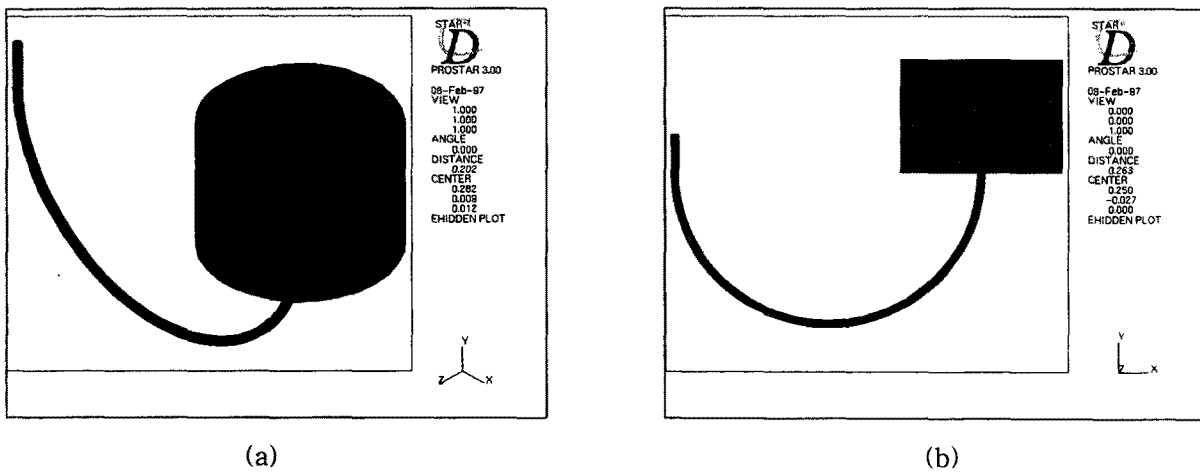


Figure 11 Grid used in STAR-CD.

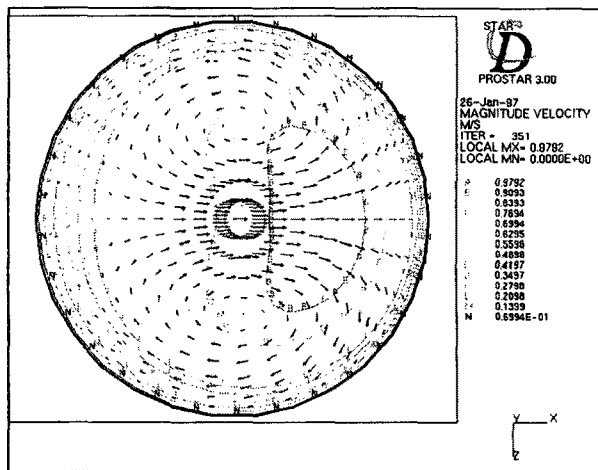


Figure.12 Velocity profile and planar velocity vector at the nozzle exit.

그래프에서 최대 축방향속도의 위치는 직관에서는 $x = 0$ mm 이었으나 U-곡관에서는 $x = 3.2$ mm 로 이동하였고 이로인해 $x = -5$ mm 부근에서의 속도구배는 직관에 비해 현저히 낮고 $x = 5$ mm 부근에서는 현저히 높다. 노즐 안쪽의 속도구배가 동일 유량의 직관에 비해 낮기 때문에 역화는 쉽게 일어나게 되며, 화염 날림 안정성도 이러한 저속 지역의 존재로 더 좋아진 것으로 판단된다. U-곡관의 곡률반경이 화염 형상의 변화에 미치는 영향을 알아보면, 원심력 F_c 는 $F_c \sim U_o^2/\rho r$ 의 관계로 같은 유동 속도를 가지고 있을 때 곡률반경이 커질수록 원심력이 작아지게 되어 이차유동의 크기가 줄어들게 되면, 노즐 출구에서의 축방향속도의 최대지점이 노즐의 바깥지점으로 밀리는 효과가 상대적으로 작아지게 되어 노즐 바깥 부분의 축방향 속도 구배 역시 작아지게 되어 작은 곡률반경의 경우보다 높은 평균 유동속도에서도 화염이 뜨지 않고 노즐에 완전히 붙어 있을 수 있는 것이고 유동 속도가 증가되어 작은 곡률반경의 경우에는 화염의 끝단이 떨어지는 현상이 나올 때에도 곡률반경이 큰 경우에는 노즐의 바깥쪽부분에서 화염이 약간 뜰 뿐 화염 떨림 현상이 발생하지 않았다. 또한 U-곡관 노즐 바깥쪽에서 화염이 뜨는 현상은 직관에서 화염날림이 일어날 때 림부근에서의 속도구배를 저유량의 U-곡관에서 이미 초과하기 때문으로 예상된다.

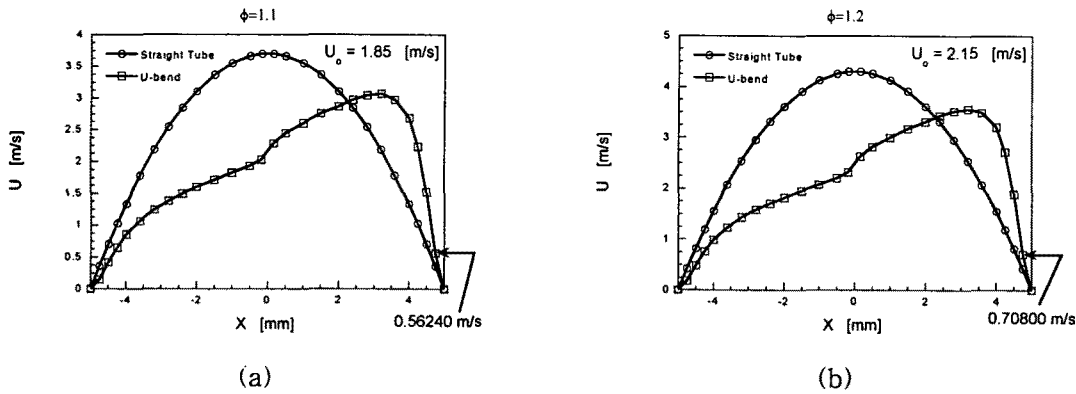


Figure 13 Comparison of axial velocity at the nozzle exit.

4. 결론

이차유동이 예혼합 화염에 미치는 영향을 화염의 형상, 직관노즐과 U-곡관 화염의 안정화한계 비교, 수치 해석과 PLIF 실험을 통해 연구하였다. U-곡관을 통과한 예혼합화염은 직관에서의 원추형 화염과는 달리 화염의 끝이 노즐의 바깥쪽으로 밀려나갔으며 평균유속이 빨라지면 노즐의 바깥쪽부터 부상하기 시작하고 연료 과농한 경우에 유속이 충분히 증가하면 화염의 바깥쪽 뜬 끝단이 떨어진다. 직관노즐에 비해 역화와 화염 날림이 더 높은 유동속도에서 일어나는 현상은 STAR-CD 를 통한 수치해석을 통해 노즐 안쪽의 속도 구배가 직관에 비해 U-곡관에서 작기 때문이며 노즐의 바깥쪽에서 화염이 부상하는 현상은 노즐 바깥쪽의 속도 구배가 직관에 비해 U-곡관에서 크기 때문이라는 결론에 이르렀다. PLIF 실험에서는 연료 희박과 과농 각 경우에 대해 화염이 노즐에 완전히 부착될 때, 노즐의 바깥쪽에서부터 부상하기 시작할 때, 화염이 노즐 안쪽에

만 부착 되었을 때 수직 단면 이미지와 노즐에서의 높이에 따른 수평 단면 이미지를 얻어서 화염의 형상과 화염 주변의 OH 라디칼의 분포도를 구했다.

참고 문헌

- [1] Dean, W. R., 1927, "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Philos. Mag.* Vol. 20, pp. 208-223.
- [2] Collins, W. M., Dennis, S. C. R., 1975, "The Steady Motion of a Viscous Fluid in a Curved Tube," *Q. J. Mech. appl. Math.*, Vol. 28, pp. 133-156.
- [3] Rowe, M., 1970, "Measurements and Computations of Flow in Pipe Bends," *J. Fluid Mech.*, Vol. 43, part 4, pp. 771-783.
- [4] Boersma, B. J., Nieuwstadt, F. T. M., 1996, "Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow in a Curved Pipe," *Trans. ASME*, Vol. 118, pp. 248.
- [5] Berger, S. A., Talbot, L., and Yao, L. S., 1983, "Flow in Curved Pipes," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 15, pp. 461-512.
- [6] Sohrab, S. H., Law, C. K., 1995, "Influence of Burner Rim Aerodynamics on Polyhedral Flames and Flame Stabilization," *Combust. Flame*, Vol. 62, pp. 243-254.