

덕트두께가 대향류 화염구조에 미치는 영향의 조사

박외철[†] · 고경찬

부경대학교 공과대학 안전공학과
(2002. 9. 9. 접수 / 2002. 12. 2. 채택)

Investigation of Effects of Duct Thickness on Counterflow Flame Structure

Woe-Chul Park[†] · Kyung-Chan Ko

Department of Safety Engineering, Pukyong National University
(Received September 9, 2002 / Accepted December 2, 2002)

Abstract : Nonpremixed counterflow flames at low strain rates, $ag = 12 \text{ s}^{-1}$ and 20 s^{-1} , were numerically simulated to investigate the effects of the duct thickness on the flame structure in normal gravity. For small values of the duct thickness, the positions of the flame and stagnation point were highly sensitive to the duct thickness. When the duct thickness was greater than 6 mm, however, the effects of the duct thickness on the flame structure were negligible. The computed temperature along the duct centerline agreed well with measurements.

Key Words: computational fluid dynamics (CFD), flame structure, air-methane flame, duct thickness

기호설명

D : 확산계수
g : 중력가속도, 9.81 m/s²
h : 엔탈피
L : 덕트간 거리(25 mm)
p : 압력
Q : 단위체적당 열발생을
T : 온도
t : 시간(Eqs. 2~5), 덕트 두께
u : 속도
V : 덕트내 평균유속
v : y 방향 속도
w : 단위체적당 화학종 생성률
Y : 질량분율
y : 덕트의 중심축
 λ : 열전도계수
 ρ : 밀도
 τ : 전단응력

아래첨자

O : 공기
F : 가연성가스

1. 서 론

대향류 확산화염에 관한 실험은 구조가 간단하고 규모가 작은 실험장치로도 소화의 원리와 구조를 밝히는데 적합하기 때문에 이에 관한 많은 실험적 연구가 수행되어왔다. 그러나 덕트의 두께가 화염의 구조에 어떤 영향을 미치는가에 대한 연구는 보고된 바가 없다. 최근의 저변형률 확산화염에 관한 수치적 연구¹⁾에 의하면 무중력상태에서는 덕트의 두께가 화염구조에 미치는 영향이 아주 작지만 정상 중력상태에서는 덕트의 두께가 다를 때 화염의 위치가 같지 않음에 따라 덕트의 두께와 화염구조에 대한 조사가 필요한 것으로 나타났다. 대향류 화염에 대한 실험에서 화염의 위치를 결정하는 것이 온도분포를 측정하는데 중요하다. 이 연구의 목적은 덕트의 두께가 대향류 화염의 구조에 어떤 영향을 미치는가를 조사하는 것이다. 이를 위해 실험 데이터가 있는 메탄-질소 혼합가스와 공기의 비예혼합 대향류 확산화염²⁾을 대상으로 하였다. 소화에 가까

[†]To whom correspondence should be addressed.
wcpark@pknu.ac.kr

운 농도와 두가지 저변형률을 실험에서와 같은 값을 사용하여 모사하였다. 여러값의 닥트 두께에 따라 닥트 중심선상의 화염의 위치와 온도분포, 정체점의 위치와 축방향 속도분포를 비교함으로써 닥트의 두께에 따른 화염구조의 변화를 조사한다. 또한 실험과 같은 조건에서의 수치모사결과를 실험결과와 비교한다.

2. 수치모사법

정상중력에서는 부력이 존재하므로 일반적으로 대향류 확산화염의 실험장치에 사용하는 두 원형닥트를 수직으로 배열한다. 이 연구에서는 Fig. 1과 같이 공기가 유입되는 상부의 공기닥트, 메탄과 질소의 혼합기체가 유입되는 하부의 연료닥트로 구성되어 있다. 두 닥트 사이에는 화염이 존재하고, 가연성 가스와 주위 공기의 연소를 차단하기위해 질소가 충전되어 있다. 닥트의 치수는 안지름이 23mm, 닥트 간 거리가 25mm이다. 실험에서는 일반적으로 두 닥트의 출구 유속이 균일하도록 내부에 망을 삽입하는데, 앞선 연구²⁾에서와 같이 닥트 선단에서부터 2mm인 곳의 속도분포가 균일한 것으로 가정하였다.

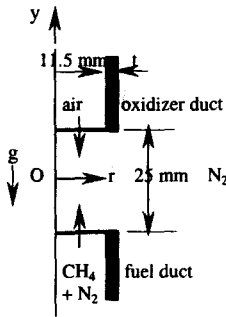


Fig. 1. Counterflow ducts

실험 데이터²⁾와 비교할 수 있도록 두가지 저변형률 $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 과 20 s^{-1} 을 대상으로 하고, 각각 벽두께 t 는 0에서 10 mm까지 2 mm 간격으로 모사하였다. 또 두께 2.5 mm인 닥트에서 측정된 온도분포와 비교하기위해 $t = 2.5 \text{ mm}$ 에 대해서도 계산하였다.

공기닥트와 연료닥트내의 평균유속 V_O 와 V_F 를 구하기 위해 다음의 변형률 정의³⁾를 따랐다.

$$a_s = \frac{2V_O}{L} \left[1 + \frac{V_F}{V_O} \left(\frac{\rho_F}{\rho_O} \right)^{0.5} \right] \quad (1)$$

Table 1. Fuel composition and mean velocity in ducts to be investigated

a_g		12 s^{-1}	20 s^{-1}
Fuel	CH ₄	17.8 vol%	20 vol%
	N ₂	82.2 vol%	80 vol%
V_O		0.122 m/s	0.129 m/s
V_F		0.030 m/s	0.129 m/s
V_O/V_F		4	1

여기서 L 은 닥트간 거리(25 mm)이고, ρ_O 는 공기의 밀도, ρ_F 는 연료(메탄과 질소의 혼합가스)의 밀도이다. Table 1에는 두가지 변형률에 관한 연료의 화학조성과 닥트내 평균유속을 나타내었다. $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 일 때 유속비 V_O/V_F 를 1로 하였으나, $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에는 화염이 윗쪽 공기닥트에 근접하여 위치하므로 화염과 닥트 사이에 전도에 의한 열전달이 일어나지 않도록 공기와 연료의 유속비를 $V_O/V_F = 4$ 로 하였다. 이들 값을 뒤에 비교할 실험데이터의 경우²⁾와 동일하다.

대향류 확산화염 주위의 질량, 선형운동량, 에너지, 화학종의 보존방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_i}{\partial x_i} - \frac{Dh}{Dt} = Q + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial (\rho_i \tau_{ij})}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + w_i \quad (5)$$

여기서 ρ 는 밀도, u 는 속도, t 는 시간, p 는 압력, g 는 중력가속도 (9.81 m/s^2), τ 는 전단응력, h 는 엔탈피, Q 는 단위체적당 열발생율, λ 는 열전도계수, T 는 온도, Y 는 질량분율, D 는 확산계수, w 는 단위체적당 화학종 생성률이다.

위 식에서 미지수인 u , T 및 Y 는 직접수치모사와 혼합분율 연소모델(mixture fraction combustion model)⁴⁾을 포함한 Fire Dynamics Simulator (FDS)⁵⁾로 구하였다. FDS는 미국 표준연구소에서 화재모사용으로 개발하여 web에 공개한 코드로서, Large Eddy Simulation (LES)와 직접수치모사(direct numerical simulations) 중에 하나를 선택하도록 되어 있다. 본 연구에서는 작은 계산영역에 적합한 직접수치모사를 선택하여 사용하였다. 격자와 계산영역의 크기에 대한 연구결과⁶⁾에 따라 격자크기는 r 방

향과 y 방향 모두 0.5mm로 하고, 격자수를 80×140 으로 하였다.

화염은 계산시작후 약 0.7초에 정상상태에 이르므로 0.9-1.0초의 온도와 속도의 순시값으로부터 각각 그 평균값을 구하였다. 1.0초까지 계산하는데 PIV-1Ghz PC에서 약 30분이 소요되었다.

3. 결과 및 토의

덕트의 두께범위 0-10mm에서 2mm 간격으로 계산한 결과 중에서 $ag = 12 \text{ s}^{-1}$, $t = 0, 4, 8\text{mm}$ 의 화염을 Fig. 2에 비교하였다. 두께가 0인 경우에도 벽면에서는 비활조건(no slip condition)이 적용되므로 실제로는 무한히 얇은 덕트라고 할 수 있다. 덕트의 두께가 두꺼울수록 화염의 곡률반경이 증가함을 알 수 있다. 이것은 덕트의 벽이 연소가스의 흐름을 방해하기 때문이다.

Fig. 3은 덕트의 중심선(y축)의 온도분포를 비교한 그림이다. 덕트의 두께가 두꺼워지면 화염의 위치는 연료덕트 쪽으로 이동한 것이 나타나있다. 그러나 $t = 0-4 \text{ mm}$ 에 비해 $t = 4-8 \text{ mm}$ 에서 위치변화는 훨씬 더 작음을 볼 수 있다.

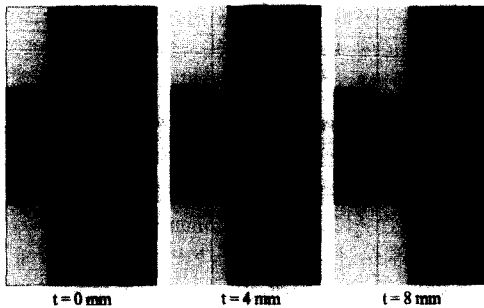


Fig. 2. Flames of $ag = 12 \text{ s}^{-1}$ for different duct thickness

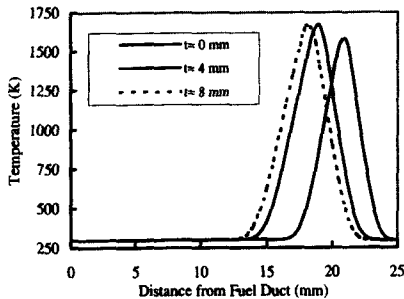


Fig. 3. Temperature profiles along the centerline of $ag = 12 \text{ s}^{-1}$ for different duct thickness

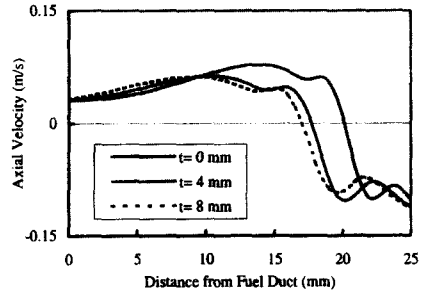


Fig. 4. Axial velocity profiles along the centerline of $ag = 12 \text{ s}^{-1}$ for different duct thickness

같은 경우에 축방향 속도의 분포를 Fig. 4에 비교하였다. 온도분포의 경우와 마찬가지로 두께 0mm에 비해 4mm일 때 정체점이 아래쪽으로 많이 이동하였으나 $t = 8\text{mm}$ 일 때는 $t = 4\text{mm}$ 에 비해 위치이동이 크지 않았다.

Fig. 3과 4에서 화염의 위치는 덕트의 두께가 작을 때 두께에 따라 민감하게 변하지만, 두께가 4mm를 넘으면 그 영향이 크게 감소함을 알 수 있다.

Table 2에는 $ag = 12 \text{ s}^{-1}$ 일 때 덕트의 두께에 따라 화염의 최고온도와 그 위치, 그리고 정체점의 위치를 비교한 것이다. 덕트의 두께가 4 mm 이상일 때 최고온도는 덕트의 두께에 따라 큰 변화가 없었고, 그 위치변화도 덜 민감하였다. 덕트의 두께가 6 mm 이상일 때 최고온도와 위치 및 정체점의 위치가 거의 같았다. 변화는 덕트의 두께가 크면 유동의 방해

Table 2. Comparison of computed locations of T_{max} and stagnation points for $ag = 12 \text{ s}^{-1}$

duct thickness	T_{max}	location of T_{max}	stagnation point
0 mm	1576K	21.0 mm	20.5 mm
4 mm	1669K	19.0 mm	17.5 mm
8 mm	1666K	18.0 mm	17.0 mm

* distance from fuel duct

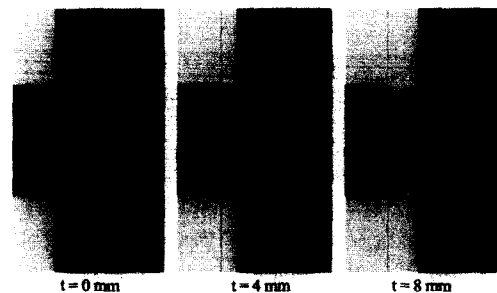


Fig. 5. Flames of $ag = 20 \text{ s}^{-1}$ for different duct thickness

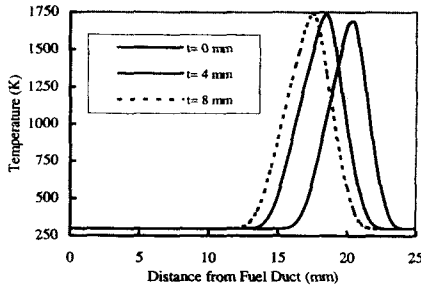


Fig. 6. Temperature profiles along the centerline of $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ for different duct thickness

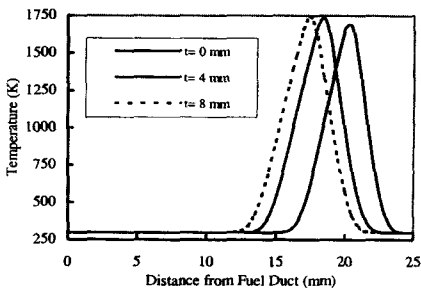


Fig. 7. Axial velocity profiles along the centerline of $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ for different duct thickness

로 화염의 위치와 정체점의 이동이 크지 않음을 알 수 있다. 최고온도의 위치가 정체점보다 조금 높은 곳에 위치하는 이유는 메탄이 산소와 반응하는 쪽이 고온이기 때문이다.

Fig. 5는 닥트의 두께 $t = 0, 4, 8\text{mm}$ 에 대한 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 의 화염을 비교한 그림이다. 닥트의 두께가 두꺼울수록 닥트의 벽이 연소가스의 흐름을 방해하기 때문에 화염의 곡률반경이 증가하는 것은 $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 의 경우와 비슷하다.

Fig. 6에는 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 일 때 닥트의 중심선을 따른 온도분포가 나타나있다. 닥트의 두께가 증가하면 화염의 위치가 아래쪽 연료닥트 쪽으로 이동하고, 두께가 두꺼울수록 화염의 위치변화가 적음을 확인할 수 있다.

Fig. 7에는 축방향 속도분포를 비교하였다. 온도 분포의 경우와 마찬가지로 두께 0mm에 비해 4mm일 때 정체점이 아래쪽으로 많이 이동하였으나 $t = 8\text{mm}$ 일 때는 $t = 4\text{mm}$ 에 비해 위치이동이 크지 않은 것은 $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 의 경우와 비슷하다.

Table 3은 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 일 때 두께에 따라 화염의 최고온도와 정체점을 비교한 것이다. $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 의 경우와 같이 닥트의 두께가 4mm 이상일 때 최고온도

Table 3. Comparison of computed locations of T_{max} and stagnation points for $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$

duct thickness	T_{max}	location of T_{max}	stagnation point
0 mm	1680K	20.5 mm	19.0 mm
4 mm	1733K	18.5 mm	17.0 mm
8 mm	1744K	17.5 mm	16.0 mm

* distance from fuel duct

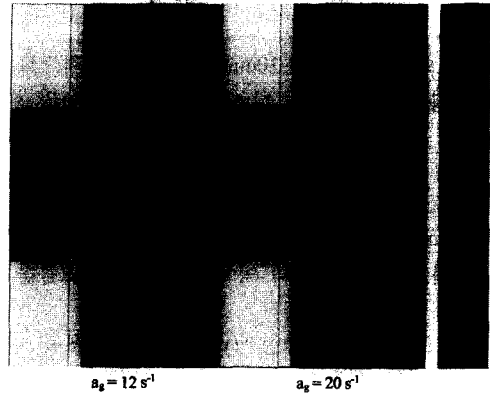
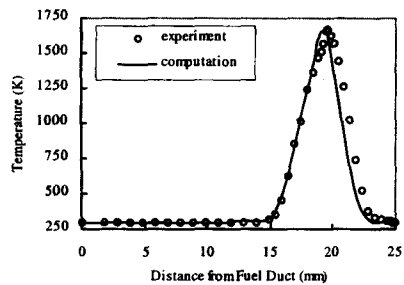


Fig. 8. Flames for $t = 2.5\text{mm}$

의 변화가 작고, 화염의 위치와 정체점의 이동이 크지 않았다.

Table 2와 3에서 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 일 때 화염의 최고온도는 $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 에 비해 60K정도 더 높은 것은 연료의 공급이 $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 에 비해 훨씬 더 많기 때문이다 (Table 1 참조). $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 의 최고온도와 정체점은 $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 의 경우에 비해 약간 더 아래 연료닥트쪽에 위치하였다.

Fig. 8에는 닥트 두께가 2.5mm일 때 두 변형률의 화염을 비교하였다. $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 일 때 $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 에 비해 화염의 크기가 훨씬 더 큰 것은 Table 1에 나타나 있는 것과 같이 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 일 때 연료닥트내 유속이 $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$ 의 유속의 거의 4배나 되기 때문이다.



(a) $a_g = 12 \text{ s}^{-1}$

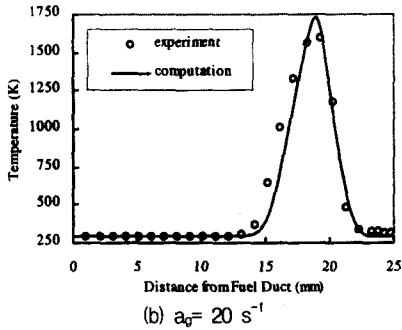


Fig. 9. Comparison of temperature profiles for $t = 2.5\text{mm}$

Fig. 9는 다트의 두께가 2.5mm 일 때 두 변형률 $a_g = 12\text{ s}^{-1}$ 와 20 s^{-1} 에 대하여 본 연구에서 얻은 평균 온도와 측정치²⁾를 비교한 것으로, 두 경우 모두 잘 일치하고 있다.

4. 결론

정상중력상태에서 다트 두께가 지변형률 대항류 확산화염의 화염구조에 미치는 영향을 수치적으로 조사한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 다트 두께가 작은 경우에는 화염과 정체점의 위치가 다트 두께에 민감하게 이동함을 알 수 있었다.
- 2) 다트의 두께가 4 mm 이상일 때는 화염의 최고 온도와 그 위치의 변화가 크지 않았고, 다트의 두께가 클수록 두께의 영향이 감소하였다.
- 3) $t > 6\text{mm}$ 일 때 화염의 최고온도와 그 위치 및 정체점의 위치는 두께가 증가해도 변화가 없었다.

4) 메탄의 공급이 더 많은 $a_g = 20\text{ s}^{-1}$ 의 화염이 $a_g = 12\text{ s}^{-1}$ 에 비해 화염의 크기가 훨씬 더 컸고 본 연구의 결과가 온도 측정치와 잘 일치하였다.

참고문헌

- 1) W.C. Park, "Computation of a Low Strain Rate Counterflow Flame in Normal and Zero Gravity," Korea Institute for Industrial Safety J., Vol. 17, No. 3, pp. 107~111, 2002.
- 2) W.C. Park and A. Hamins, "Investigation of Velocity Boundary Conditions in Counterflow Flames," KSME Int'l J., Vol. 17, No. 2, pp. 262~269, 2002.
- 3) K. Seshadri, and F. A. Williams, "Laminar Flow Between Parallel Plates with Injection of a Reactant at High Reynolds Number," Int'l J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 251~253, 1978.
- 4) J. E. Floyd, K. B. McGrattan and H. R. Baum, "A Mixture Fraction Combustion Model for Fire Simulation Using CFD," Proc. Int'l Conf. on Engineered Fire Protection Design, pp. 279~290, 2001.
- 5) K. B. McGrattan, H. R. Baum, R.G. Rehm, A. Hamins, G. P. Forney, J. E. Floyd and S. Hostikka, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide V.2, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (see <http://fire.nist.gov/fds/>), 2001.
- 6) 박의철, "대항류 확산화염에 대한 직접수치모사의 검증," 산업안전학회지, Vol. 16, NO. 4, pp. 74~81, 2001.