J. Korean Soc. Combust. 26(3) (2021) 51-61

《학술논문》 DOI: https://doi.org/10.15231/jksc.2021.26.3.051 ISSN 1226-0959
eISSN 2466-2089

프랙탈 난류생성판을 갖는 V-shape 화염에서 난류 예혼합 화염 분석: Part. II 난류화염의 구조 특징

김주한* · 이기만*†

*순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터

Analysis of Turbulent Premixed Flames in V-shape Flames with Fractal Turbulence Generators: Part. II Characteristics of Turbulent Flame Structures

Juhan Kim* and Keeman Lee*†

*School of Mechanical and Aerospace Engineering/Center for Aerospace Engineering Research, Sunchon National University

(Received 17 August 2021, Received in revised form 31 August 2021, Accepted 10 September 2021)

ABSTRACT

This study focuses on the characteristics of turbulent flame structures in V-shape turbulent premixed flames to evaluate the turbulent combustion dynamics of fractal turbulence generator. The details of the non-reactive turbulent flow characteristics with the fractal turbulence plate were explained in the previous study of Part I. In this work, the integral length scale of non-reactive flow was additionally investigated to obtain a Borghi-Peters diagram. By comparing the Borghi-Peters diagram shown as a result of the non-reactive flow with the reaction OH-PLIF image, it was confirmed that the flame characteristics for each regime were well represented. Also, the irregular turbulence of premixed flame was quantitatively analyzed using the flame brush obtained by the mean progress variable method. As a result, the flame brush of the fractal turbulence generator was wider than the perforated plate and mesh type. Finally, it was found that the thickness and angle of the flame brush were proportional to the turbulence intensity and turbulent Reynolds number, which are dimensionless numbers of turbulent flow.

Key Words : Fractal grid, Turbulent generator, Turbulent premixed flame, OH-PLIF, Mean progress variable

기 호 설 명

I	: Turbulent intensity	D	: Nozzle diameter
$\bar{c}$	: Mean progress variable	L_N	: Nozzle length
L	: Integral length scale	N	: Number of fractal iteration
Re_T	: Turbulent Reynolds number	σ	: Blockage ratio
$t_{conv.}$	: Eddy convection time	R_t	: Reduction rate of bar thickness
$t_{turn.}$	: Eddy turnover time	L_0	: Length of the largest bar
ϕ	: Equivalence ratio	t_0	: Thickness of the largest bar
U_0	: Bulk velocity	L_h	: Distance between holes

†Corresponding Author, kmlee@scnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$\overline{U}$: Mean velocity	d_h : Diameter of hole
u' : Velocity fluctuation	δ_T : Flame brush thickness
τ : Temporal separation	$\theta_{\bar{c}=0.5}$: Angle of $\bar{c}$ = 0.5
S_L : Laminar burning velocity	D_δ : Percentage difference of flame brush thickness
δ_L : Laminar flame thickness	

1. 서 론

난류 예혼합 연소와 관련된 여러 연구 중 V-shape 화염은 실제 엔지니어링 시스템에서 일어나는 난류연소현상을 이해하기 위한 기초 연구로서 활용되어 왔다[1]. 이러한 V-shape 화염 또는 난류 분젠화염(turbulent Bunsen flame)들은 타공판 또는 매쉬 스크린을 이용하여 간편하게 난류유동을 생성할 수 있지만 후류지점에서는 실제 엔지니어링 시스템의 난류강도에 비해 현저히 작다[2-4]. 이러한 문제를 해결하는 한 가지 방법으로 Hurst와 Vassilicos는 프랙탈(fractal) 또는 멀티스케일(multi-scale)의 형상을 가지는 난류생성판을 고안하였다[5]. 프랙탈 난류생성판은 형상 매개변수의 선택에 따라 수학적으로 다양한 스케일을 가지는 구조가 완성되는 것이 특징이며 프랙탈 형상에 대해서는 본 연구팀의 이전 연구인 [Part.1 : 비반응장의 난류유동 특징]에서 자세하게 설명하였다[6].

V-shape 화염은 얇은 화염안정화 막대(rod)를 중심으로 양 옆 대칭인 화염 형상을 띄는 것이 큰 특징이며 난류강도가 강할수록 V 형태의 화염이 더 벌어지고 두께가 두꺼워지는 것을 육안으로도 확인할 수 있다. 이러한 난류화염의 구조와 특징에 관해서는 몇 가지 연구가 이루어진 바가 있다.

S.Kheirkhah의 연구에서는 난류강도를 높이기 위하여 두 개의 동일한 타공판을 겹쳐 사용하였으며, 타공판의 개수에 따라 난류강도 I = 2, 6, 17%를 조사하였다[7]. 이들은 난류화염의 PIV 이미지를 통해 버섯모양을 갖는 화염전면 구조(mushroom-shape flame front structures), 자유롭게 전파하는 화염(freely propagating sub-flames), 포켓구조(pocket formation)와 같은 난류화염에서 나타나는 화염형상들의 특징을 정의하였다. 또한 높이에 따라 화염브러쉬(flame brush)의 두께를 조사하였고 다양한 모델(Langevin/Taylor의 난류확산 이론식[8-10], Peters의 식[11])과 비교하였다. 결과적으로 적분길이 스케일로 정규화 된 화염브러쉬의 두께 δ_T/L은 에디 대류시간(eddy convection time, t)과 에디 회전시간(eddy turnover time, τ) 비율인 t/τ에 따라 증가하였으나 위 두 모델과는 잘 일치하지 않음을 보였다.

Sponfeldner는 프랙탈 난류생성판 중 스퀘어 타입을 조사하였는데 일반 매쉬형상과 프랙탈 구조의 형상변수(막힘률 σ = 35, 37%와 두께축소율 R_t = 0.43, 0.56, 반복횟수 N = 3, 4)에 따라 총 5가지의 난류생성판을 비교하였다[12]. 에디 대류시간과 에디 회전시간의 비율인 t/τ에 따른 δ_T/L의 거동이 조사되어 스퀘어 프랙탈 난류생성판에 맞는 새로운 상관식이 제안되었으나 프랙탈 난류생성판의 형상 매개변수(막힘률, 격자축소율)에 따른 화염브러쉬의 형상 차이를 확인할 수는 없었다.

이처럼 프랙탈 난류생성판의 격자생성에 관련된 형상 매개변수에 따른 난류화염 및 화염브러쉬의 구조의 특징에 관련된 문헌은 아직 보고된 바 없으며, 프랙탈 난류생성판으로 인한 난류연소 특성을 이해하기 위해서는 꼭 필요한 과정이다. 이러한 프랙탈 난류생성판의 전체적인 화염구조 특징에 대한 내용은 후에 있을 화염 표면밀도(flame surface density), 화염 전방곡률(flame front curvature) 및 난류 연소속도(displacement speed, local consumption speed)와 같은 심층 분석 결과를 이해하는데 도움을 주며, 수치해석 결과와 비교하는데도 크게 도움이 될 수 있다.

본 연구에서는 우선 중심축에서 높이 z에 따른 적분길이 스케일 및 난류 레이놀즈 수에 대한 결과를 보여준다. 이는 프랙탈 난류생성판의 형상 매개변수에 따라 난류화 정도를 파악할 수 있고, Borghi-Peters 선도를 나타낼 때 사용된다. 그 다음으로 Borghi-Peters 선도와 OH-PLIF 단일 이미지를 같이 확인하여 화염 형상의 특징을 설명한다. 그 후 불규칙한 난류화염을 정량적으로 분석하고자 평균 진행변수(mean progress variable) 방법을 이용하여 화염브러쉬의 구조를 파악하고 기존 타공판, 일반 매쉬와 프랙탈의 구조를 서로 비교해본다. 마지막으로 난류유동의 대표적인 두 무차원 식인 난류강도, 난류 레이놀즈 수에 따른 화염브러쉬의 두께 경향을 파악한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 V-shape 버너

원형 난류생성판의 난류유동 및 난류화염의 구조를 평

가하기 위하여 원통형 화염 안정화 막대를 이용한 예혼합 V_shape 버너 및 실험장치는 Fig. 1과 같으며 이전 연구의 실험장치와 동일하다[6]. 버너풍동은 아크릴로 제작되었으며 균일한 유동을 생성하기 위하여 사이사이에 얇은 매쉬를 장착하고 난류생성판 하단에 약 13의 교축비를 가지는 헬름홀츠 형상으로 제작되었다. 노즐출구의 경우 화염에 의한 노즐 팁의 손상을 막기 위하여 알루미늄 재질로 되어있으며 노즐출구의 직경은 D = 28 mm, 난류생성판과 노즐출구까지의 거리는 L_N = 42 mm로 고정하였다. 그리고 화염을 고정시키기 위하여 직경 2 mm의 스테인리스(SUS-304a) 막대를 사용하였으며 노즐출구 기준 4mm 위에 위치한다(z = 46 mm). 이에 대한 노즐출구의 개략도 및 좌표계, 화염 고정 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 연료와 산화제는 각각 메탄(CH_4, 99.995%), 압축공기(compressed air)를 사용하였다. 본 연구에서는 프랙탈 형상 매개변수에 의한 난류화염의 특징만을 조사하기 위하여 당량비 ϕ와 출구 속도(bulk velocity) U_0는 각각 ϕ = 0.8, U_0 = 4 m/s로 고정하였다. 이 체적유량은 건식 가스 유량계(shinagawa, DS-16A-T)로 보정한 MFC(Line tech, Air, max, 300 L/min)와 전자식 유량계(Mesa Labs, Defender 520-H)로 보정한 MFC(Line tech, CH_4, max. 20 L/min)을 MFC Controller(MKP. MPR 3000S, 4ch)와 NI 기반 Labview 프로그램을 이용하여 제어하였고, 버너에 공급되는 혼합기는 예혼합 장치를 통하여 충분히 혼합된 후 공급된다.

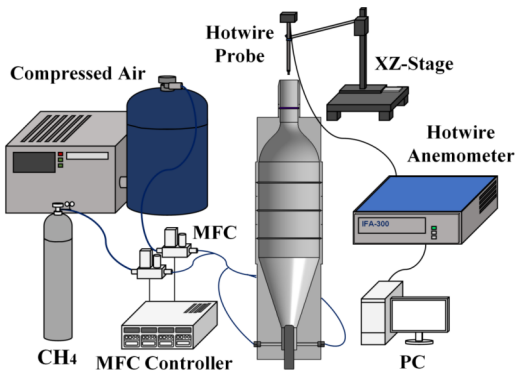


Fig. 1. Schematic diagram of a V-shape burner and experiment equipments.

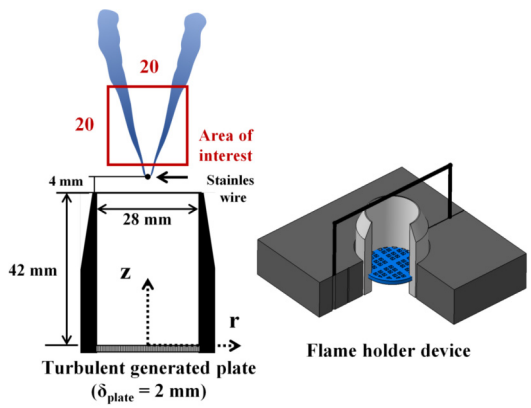


Fig. 2. Left; length and diameter of nozzle outlet and area of interest, right; Flame holder device.

2.2 난류생성판

본 연구에 사용된 프랙탈 난류생성판의 종류는 크로스(cross), 스퀘어(square) 타입을 선정하였으며 난류 증대효과를 확인하기 위하여 일반 원형타공판 형태인 Hexa 타입을 사용하였다. 프랙탈 격자는 형상 매개변수에 따라 하나의 형상이 정해지는 것이 큰 특징인데, 적용되는 형상 매개변수는 크게 (1) 프랙탈 반복횟수(number of fractal iteration) N, (2) 막힘률(σ, blockage ratio), (3) 반복횟수에 따른 격자의 두께감소비율($R_t = t_{i-1}/t_i$, reduction rate of bar thickness), (4) 초기형상(제일 큰 막대 구조)의 길이(L_0)와 두께(t_0)가 있다. 본 연구에서는 N = 3으로 고정하였으며 σ과 R_t를 주요 형상 매개변수로 선정하였다. 프랙탈 난류생성판의 형상정보 및 설계에 대한 자세한 내용은 이전 연구를 통하여 확인할 수 있다[6].

2.3 열선유속계

비반응장의 난류유동에 대한 정량적인 데이터는 정밀 열선유속계(hot-wire anemometry,TSI IFA-300)를 사용하여 측정하였다. 축(axial) 방향 및 반경(radial) 방향 속도 측정이 가능한 2채널 프로브 센서와 프로브, TSI IFA-300 CTA 컨트롤 박스로 이루어져 있으며, TSI Thermo pro 프로그램을 이용하여 취득, 저장된다. 평균속도 및 속도섭동은 공급유량을 고려하여 1,000 Hz으로 16 sec 동안 측정되며, 적분길이 스케일(integral length scale) L 및 에너지 스펙트럼을 위한 측정률(sampling rate)은 Kolmogorov scale까지 측정이 가능하도록 20 kHz로 180 sec 동안 측정하였다(Kolmogorov frequency, $f_\eta = U_0/2\pi\eta$) [13].

2.4 OH-PLIF

본 연구에서는 정밀한 화염구조 분석을 위하여 OH-PLIF 이미지 시스템을 사용하였다. 시스템 구성은 30 W Edgewave Nd: YAG 레이저 532 nm, high-speed star 6 (HSS6) 카메라와 연결된 LaVision IRO image intensifier

를 사용하였다. OH-PLIF 시스템의 FOV(field of view)는 60 mm × 60 mm이며 이때의 픽셀 크기는 156.25 μm/pixel 이다. 총 10 kHz, 0.2 sec 동안 측정한 2,000장의 이미지를 분석에 사용하였으며 OH-PLIF 시스템 장치에 대한 자세한 사양 및 이미지 분석 절차는 Wu jin과 동일하다[14].

2.5 실험 조건

본 연구의 형상 및 유동에 대한 정보를 Table 1에 나타내었다. 난류생성판의 종류는 크로스, 스퀘어 타입의 프랙탈 격자와 일반 원형타공판 타입인 Hexa 격자를 사용하였으며, 프랙탈 격자는 주요 형상 매개변수인 σ = 30, 50%, R_t = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0을 적용하여 총 18가지의 난류생성판을 조사하였다. 난류생성판의 Name은 형상변수에 따라 정해진 격자를 명확하게 구분하기 위해서 정해졌다. 예를 들어, C30_0.4는 크로스 타입의 σ = 30%, R_t = 0.4의 조건, S50_1.0은 스퀘어 타입의 σ = 50%, R_t = 1.0을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 난류생성판의 구조는 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

평균속도인 $\overline{U}$와 속도섭동 u'는 레이놀즈 분해(Reynolds decomposition) 방법을 사용하여, 화염을 조사하는 테스트영역(z = 46 – 66 mm, r = 0 – 12 mm) 중 화염브러쉬의 선단 부분($\bar{c}$ = 0.1)에서 비반응장 속도 데이터를 평균하여 나타내었으며 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용한 적분길이 스케일는 $L = \overline{U}T$로 추정하였다. 여기서 T는 시간적 자기상관 방법(temporal autocorrelation method)을 사용하여 구하였고 식 (1), (2)로 유도된다[9].

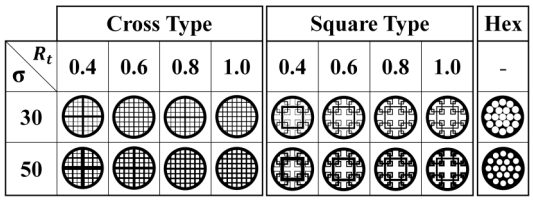


Fig. 3. Cross, square type turbulence generating plate and perforated plate (Hexa Type).

$$f(\tau) = \overline{u'(t)u'(t+\tau)} \,/\, \overline{t'(t)^2} \tag{1}$$

$$T = \int_0^{t_0} f(\tau)d\tau \tag{2}$$

Table 1. Overview of name, turbulent flow and shape information of each turbulence generating plate

Name	Type	σ [–]	R_t [–]	L_0 [mm]	t_0 [mm]	$\overline{U}$ [m/s]	u' [m/s]	L/δ_L [–]	Re_r [–]
C30_0.4	+	0.3	0.4	28	1.64	3.44	0.23	5.17	51.77
C30_0.6	+	0.3	0.6	28	1.13	3.59	0.17	4.98	37.35
C30_0.8	+	0.3	0.8	28	0.81	3.66	0.16	4.82	42.77
C30_1.0	+	0.3	1.0	28	0.61	3.86	0.15	5.84	46.95
S30_0.4	□	0.3	0.4	17.3	1.57	3.95	0.28	6.57	32.65
S30_0.6	□	0.3	0.6	17.1	1.16	3.89	0.29	4.47	28.05
S30_0.8	□	0.3	0.8	16.9	0.88	4.01	0.27	4.31	22.50
S30_1.0	□	0.3	1.0	16.8	0.69	4.24	0.24	4.73	17.56
C50_0.4	+	0.5	0.4	28	2.97	3.54	0.44	5.06	111.55
C50_0.6	+	0.5	0.6	28	2.06	3.55	0.27	6.10	66.04
C50_0.8	+	0.5	0.8	28	1.48	3.69	0.18	5.51	38.91
C50_1.0	+	0.5	1.0	28	1.10	3.86	0.15	4.82	39.25
S50_0.4	□	0.5	0.4	18.2	2.71	4.14	0.59	5.15	222.00
S50_0.6	□	0.5	0.6	17.9	2.04	4.15	0.55	6.05	184.69
S50_0.8	□	0.5	0.8	17.7	1.60	4.08	0.55	5.92	161.71
S50_1.0	□	0.5	1.0	17.5	1.32	4.54	0.63	5.76	216.02
Name	Tyep	σ [–]	L_h [mm]		d_h [mm]	$\overline{U}$ [m/s]	u' [m/s]	L/δ_L [–]	Re_r [–]
H30	○	0.3	5.6		2.69	4.13	0.21	5.10	42.83
H50	○	0.3	5.6		2.27	4.07	0.36	7.12	83.43

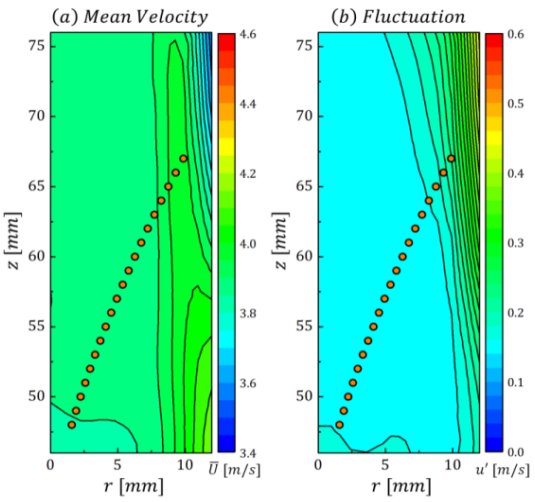


Fig. 4. Mapping example of 2D non-reactive flow and dotted line corresponding to flame brush c = 0.1 (C50_0.4).

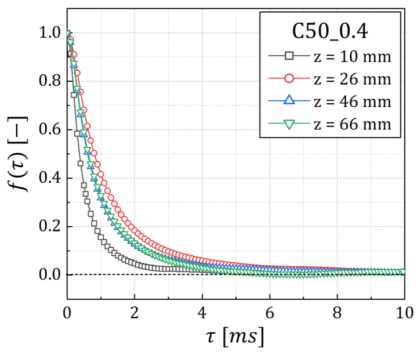


Fig. 5. Example of temporal auto-correlation by height (C50_0.4).

이 경우 τ는 시간적 분해값(temporal separation)이며 $f(\tau)=0$이 되는 첫 번째 교차점(t_0)까지 적분하여 구하였다. 간혹 $f(\tau)=0$에 만나지 않은 조건은 $t_0=10$ ms까지의 $f(\tau)$ 을 적분하여 사용하였다. C50_0.4 조건의 높이에 따른 τ와 $f(\tau)$ 의 결과 예시를 Fig. 5에 내었다. $z=10, 26, 46, 66$ mm의 높이 모두 $\tau=10ms$ 근처에서 $f(\tau)=0$에 수렴하는 것을 알 수 있다. Table 1의 적분길이 스케일 L은 화염이 존재하는 높이($z=46-66$ mm)에서 취득된 데이터를 평균하여 얻었으며 난류 레이놀즈 수 Re_T는 Table 1의 u'과 L을 사용하여 $Re_T=u'L/\nu$으로 계산하였다. 본 연구의 층류 연소속도(S_L) 및 층류 화염두께(δ_L)는 이전 연구를 참고(CH_4, $\phi=0.8$)하여 각각 $S_L=0.25$ m/s, $\delta_L=0.55$ mm을 사용하였다[12, 15, 16].

3. 결과 및 고찰

3.1 적분길이 스케일 및 난류 레이놀즈 수

이전 연구에서는 난류 예혼합 연소에 가장 크게 영향을 미치는 평균속도 및 속도섭동에 대한 내용을 자세하게 조사[6]하였는데 본 절에서는 난류 예혼합 연소에 영향을 미치는 또 다른 난류인자로 가장 큰 와(eddy)의 길이 척도를 나타내는 적분길이 스케일(integral length scale)과 난류 레이놀즈 수(turbulent Reynolds number)를 확인해 보고자 한다.

Fig. 6은 본 연구에서 사용한 난류생성판에서 높이에 따른 적분길이 스케일 L을 나타내었다. Fig. 6의 첫 번째와 두 번째 열은 각각 크로스와 스퀘어타입을 나타내며 우측과 좌측 그래프는 막힘률인 $\sigma=30\%, 50\%$로 구분된다. 모든 조건에서 노즐출구 이후의 L은 높이에 따라 증가하게 되는데 이는 일반적으로 난류흐름에서 관찰되는 현상이다[17]. 이때 스퀘어 타입 $\sigma=50\%$의 결과(Fig. 6(d))에서는 노즐출구 이전($z=0-42$ mm)에서 일정한 L을 가지며, 노즐출구 이후($z=42-98$ mm)부터는 점점 증가하였다. 이는 D. Hurst, Vassilicos[5]의 연구에서 처음 발견되었고 N. Mazellier[18], P.C. Valente[19]의 연구에서는 스퀘어 프랙탈 격자의 난류유동이 Richardson -Kolmogorov 난류 붕괴이론과는 차이가 있음을 자세하게 논의되었다. 본 연구에서도 이러한 특성이 나타나는 것으로 확인되었는데, 이는 난류유동이 존재하는 후류의 다른 위치에서도 동일한 길이 스케일을 가질 수 있기 때문에 연소응용 기술 측면에서는 유용하다고 설명된다[12]. 하지만 스퀘어 타입 $\sigma=30\%$의 결과에서는 오히려 난류생성판 부근에서 L의 값이 컸으며 이는 중앙 유동이 충분히 난류화가 진행되지 않았음을 보여준다. 본 연구의 관심사인 화염이 존재하는 영역($z=46-66$ mm)에서는 형상 매개변수에 따라 차이가 크지 않고 모두 $L=3$ mm 근처로 존재하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 제트 축방향 높이(z)에 따른 난류 레이놀즈 수이다. 두 타입의 프랙탈 모두 유사하게 막힘률의 증가에 따라 난류 레이놀즈 수가 크게 증가하였지만 막힘률에 대한 영향은 크로스 타입에 비해 스퀘어 타입이 더 명확하게 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6 결과와 다르게 형상변수에 따라 차이가 크게 나타났으며 Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 통하여 본 연구의 조건은 L 보다 u'에 따라 더 크게 변한다는 것을 알 수 있었다.

3.2 비반응 유동의 Borghi-Peters 선도

이 절에서는 두 무차원 수인 u'/S_L, L/δ_L를 이용하여

난류화염을 구분하는 한 방법인 Borghi-Peters 선도(Borghi-peters diagram)와 해당 영역에 존재하는 OH-PLIF 난류화염 이미지를 직접 비교하였다. 이러한 접근은 난류 화염의 구조 및 난류연소속도에 대한 결과들을 이해하는데 상당히 도움을 준다.

우선 비반응장 결과로 나타낸 Borghi-Peters 선도를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 사용된 u'/S_L의 경우 Table 1과 동일하게 화염브러쉬의 선단 부분($\bar{c}$ = 0.1)에서의 평균

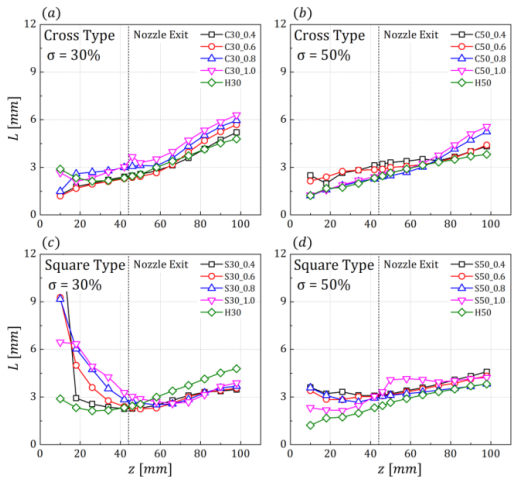


Fig. 6. Integral length scale (L) by height in each turbulence generating plate; (a) Cross type, σ = 30%, (b) Cross type, σ = 50%, (c) Square type, σ = 30%, (d) Square type, σ = 50%.

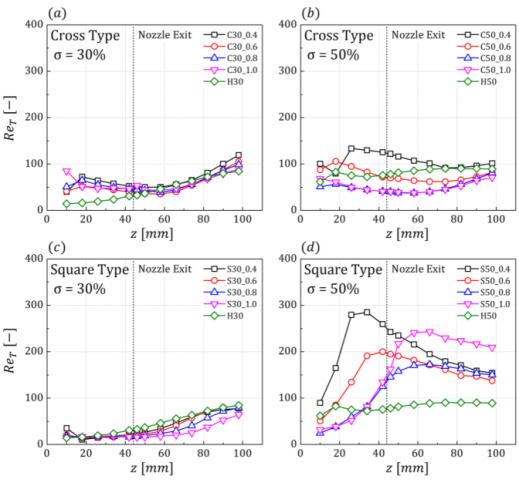


Fig. 7. Turbulent Reynolds number(Re_T) by height in each turbulence generating plate; (a) Cross type, σ = 30%, (b) Cross type, σ = 50%, (c) Square type, σ = 30%, (d) Square type, σ = 50%.

데이터를 사용하였으며, L/δ_L은 Fig. 6의 결과 중 화염을 분석하는 영역(z = 46 – 66 mm)의 적분길이 스케일을 평균하여 나타내었다. 본 연구에서 사용한 난류조건은 주름진 화염(wrinkled flamelets)영역부터 얇은 반응영역 또는 넓어진 예열영역(thin reaction zone or broadened preheat zone) 까지 넓게 분포하는 것을 알 수 있으며, 3.1절과 동일하게 적분길이 스케일(L/δ_L)의 차이는 크지 않고 속도섭동(u'/S_L)에 의해 변화가 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9은 난류생성판이 없는 조건과 주름진 화염 영역 조건에서의 OH-PLIF 이미지를 나타내었다. 난류생성판이 없는 조건에서는 화염의 주름이 관찰되지 않았으며, 난류생성판이 있는 조건들인 Fig. 9(b), (c), (d)에는 약하게나마 주름진 화염이 생성되어 난류생성판이 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 10은 골이 진 화염(corrugated flamelets)에 해당하는 조건의 대표 OH-PLIF 이미지를 보여준다. 이전 Fig. 9의 화염과 비교해 보았을 때 더 주름진 것을 알 수 있으며 화염의 일부에서 제트흐름 방향과 반대 방향으로 화염이 존재하는 것을 알 수 있다(Fig. 10(a)의 연두색 네모박스). S. Kheirkhah는 이러한 역방향 화염구조를 자유롭게 전파하는 화염(freely propagating sub-flames)으로 정의하였으며 골이 진 화염 영역부터 얇은 반응영역까지 자주 관찰되는 화염이다[7].

Fig. 11은 얇은 반응영역 및 넓어진 예열영역에 해당하는 OH-PLIF 이미지이다. 이 영역부터는 S. Kheirkhah가 정의한 버섯 모양 화염 전면 구조(mushroom-shaped flame front structures) 및 주머니 화염(pocket flame)이 자주 관찰되며 화염 안정화 막대로부터 원거리(far field)에

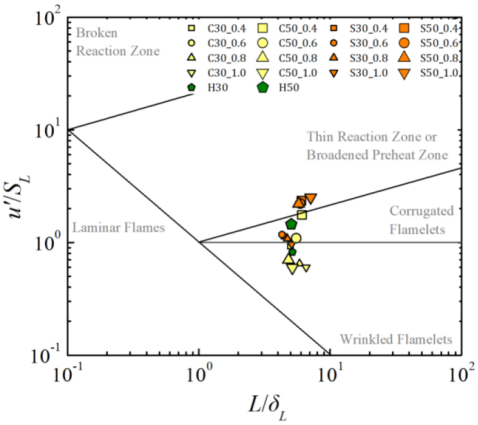


Fig. 8. Borghi-Peters diagram showing the results of the non-reactive flow of each turbulence plate.

서 주로 생성된다[7]. 이는 V-shape 화염 뿐 만 아니라 난류 예혼합 화염을 조사하는 다양한 화염구조에서 나타나는 현상이며, 비반응 유동의 결과값을 이용한 보기-피터

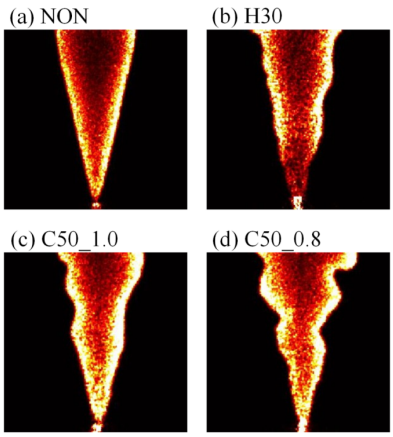


Fig. 9. Representative image of OH-PLIF showing the laminar flames and wrinkled flamelets regimes.

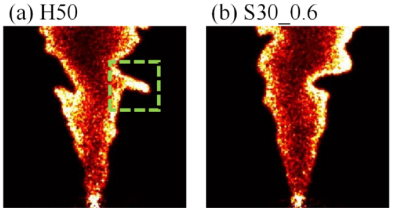


Fig. 10. Representative image of OH-PLIF showing the corrugated flamelets regimes.

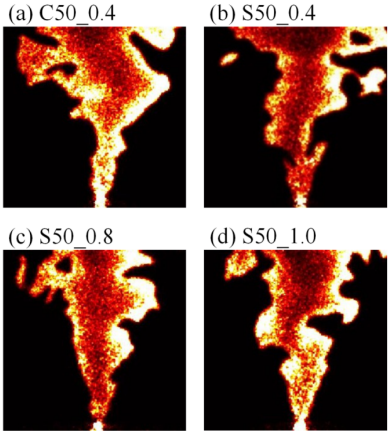


Fig. 11. Representative image of OH-PLIF showing the thin reaction zone or broadened preheat zone regimes.

선도의 각 영역 특징과 화염의 라디칼을 직접 촬영한 OH-PLIF 이미지의 구조가 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

3.3 화염브러쉬의 두께 및 각도

다양한 난류생성판을 사용한 불규칙적인 난류 예혼합 화염을 정량적으로 비교하기 위하여 본 연구에서는 반응 진척도를 알 수 있는 평균 진행변수(mean progress variable, $\bar{c}$) 방법을 사용하였다[7, 20]. 평균 진행변수란 측정시간 동안 촬영된 OH-PLIF 이미지를 이용하여 OH 라디칼이 관찰되지 않은 반응물(reactants)은 0, OH 라디칼이 분포하는 생성물(product)은 1로 이진화하여 평균한 이미지이다. 이와 같이 평균한 이미지는 난류화염의 화염브러쉬(turbulent flame brush)를 정량적으로 보여주게 된다. Fig. 12에는 화염브러쉬의 대표 이미지를 나타내었다. 이 경우 나타낸 연두색 파선들은 평균 진행변수인 $\bar{c}$가 각각 0.1, 0.9인 지점, 하늘색 점선은 $\bar{c}=0.5$로 화염브러쉬의 중심선을 의미한다. 이미지를 통해 기존 타공판 타입(Fig. 12 (a) H30, (f) H50)에 비해 다른 난류생성판들의 화염브러쉬의 폭이 다르고 기울어진 형태 또한 다르게 생성된 것을 볼 수 있다.

이러한 경향들을 정량적으로 확인하기 위하여 화염브러쉬의 두께 δ_T와 각도 $\theta_{\bar{c}=0.5}$를 나타내었으며 이에 대한 정의를 Fig. 13에서 개략적으로 표기하였다. 여기서 δ_T는 $\bar{c}=0.5$의 선과 수직한 화염브러쉬의 두께로 정의하였으며 $\theta_{\bar{c}=0.5}$은 해당 높이에서 $\bar{c}=0.5$의 라인과 중심축 z와의 각도이다. 우선, 모든 난류생성판에서 높이에 따른 화염브러쉬의 두께 δ_T를 Fig. 14에 나타내었다. 두 타입의 프랙탈 모두 막힘률이 증가하거나 R_t가 감소함에 따라 화염브러쉬의 두께가 증가하는 것으로 나타났다. 이처럼 형상 매개변수에 따른 경향은 Part. I의 난류강도 결과와 유사하며, 난류강도(속도섭동)의 증가로 인하여 화염의 주름이 더욱 심해지고 화염대(flamelet) 위치의 변동 폭이 증가하여 화염브러쉬의 두께가 증가한 것으로 사료된다. 그리고 얇은 반응영역(C50_0.4, 스퀘어 σ = %)에 해당하는 조건들은 화염브러쉬의 두께가 매우 두꺼운 것을 알 수 있는데 이는, 국소적으로 포켓 화염 및 자유 전파하는 화염으로 인해 더욱 넓은 범위에서 화염대 주름이 존재하여 생긴 결과로 유추할 수 있다.

일반 원형타공판 및 매쉬(C30_1.0, C50_1.0) 타입에 비해 대부분 프랙탈 타입의 화염브러쉬 두께가 큰 것을 알 수 있으며, 이를 명확하게 비교해보고자 식 (3)으로 나타낼 수 있는 백분율 오차(percentage difference)방법을 이용하

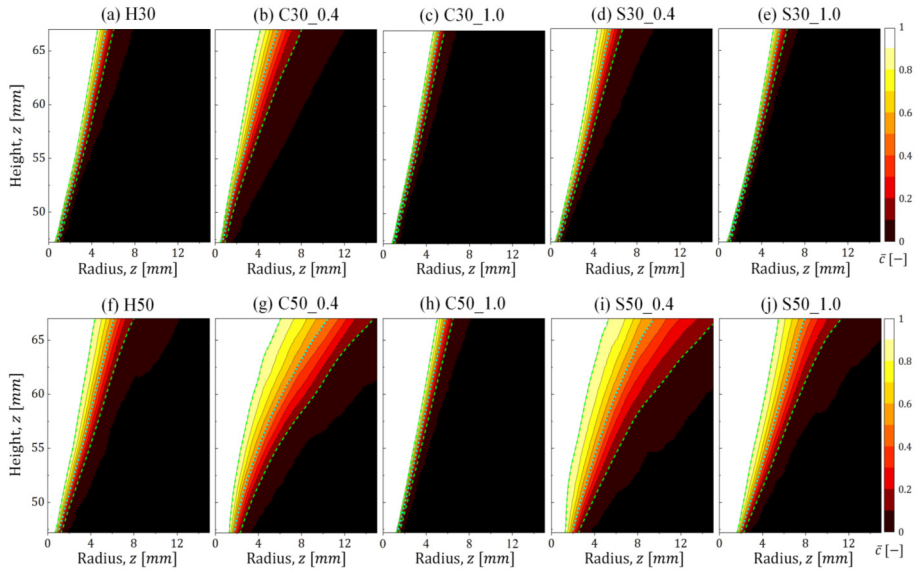


Fig. 12. Representative images of each turbulence plate using the mean progress variable method.

여 비교하였다.

$$D_\delta = \frac{\delta_T - \delta_{ref}}{\delta_{ref}} \times 100\ [\%] \tag{3}$$

여기서 δ_T는 비교되는 화염브러쉬의 두께이며 $\delta_{T,ref}$는 참고하는 화염브러쉬의 두께로 일반 원형타공판 및 매쉬 타입(C50_0.4, C50_1.0)의 화염브러쉬 두께이다.

δ_T, $\delta_{T,ref}$ 모두 관찰한 높이(z = 47 - 67 mm)에서의 화염브러쉬 두께를 평균한 값을 적용하였고 화염브러쉬의 백분율 오차 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 헥사형상의 일반 원형타공판과의 비교에서 일부 프랙탈 타입(C30_1.0, S30_1.0, S30_0.8)을 제외하고 D_δ가 양의 값을 가지고 있었으며, 이는 일반 원형타공판에 비해 프랙탈격자의 화염브러쉬 두께가 크다는 것을 의미한다. 일반 매쉬(mesh) 타입과의 비교에서는 모든 프랙탈 난류생성판의 조건들이 D_δ가 양의 값이었다. 정리하자면, 프랙탈 타입의 난류생성판을 사용할 시 일반 원형타공판 타입(H30, H50)에 비

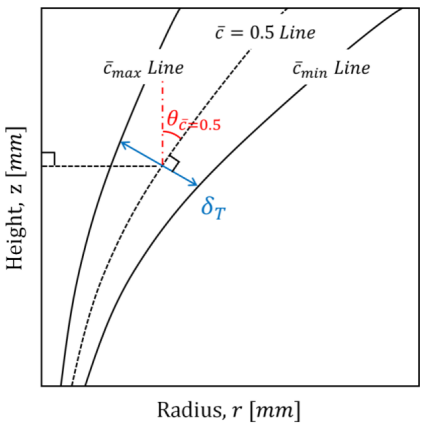


Fig. 13. Example of thickness and angle of flame brush image.

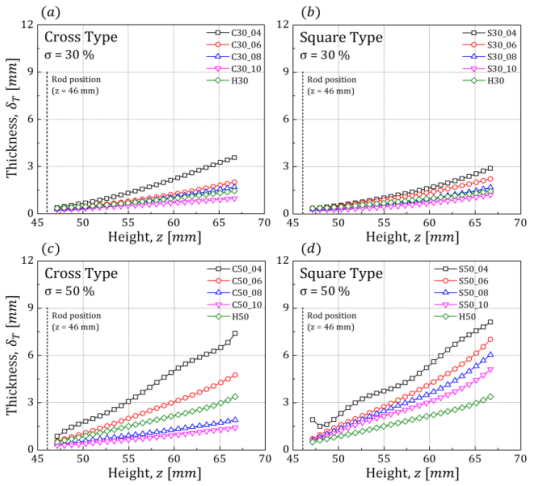


Fig. 14. Flame brush thickness by height of each turbulence generating plate (δ_T); (a) Cross type, σ = 30%, (b) Square type, σ = 30%, (c) Cross type, σ = 50%, (d) Square type, σ = 50%.

해 크로스 타입은 최대 118.2%(C50_0.4) 스퀘어 타입은 최대 153.3%(S50_0.4)의 두꺼운 화염브러쉬를 생성하였고 일반 매쉬 타입에 비해 크로스타입은 최대 394.8%(C50_0.4), 스퀘어타입은 최대 474.2%(S50_0.4)의 화염브러쉬 두께가 증가하는 효과를 보였다. 이처럼 화염브러쉬의 두께 증가는 난류증대 효과로 인한 화염의 주름 증가, 포켓 화염의 존재로 인해 야기된 현상으로 이해할 수 있으며, 이러한 화염의 표면적의 증가는 난류연소 속도 중 국부소비속도(local consumption speed) 또한 증가할 것으로 판단되며 이러한 난류 소비속도에 대해서는 후속 연구결과로 계속해서 Part III.로 보고될 예정이다.

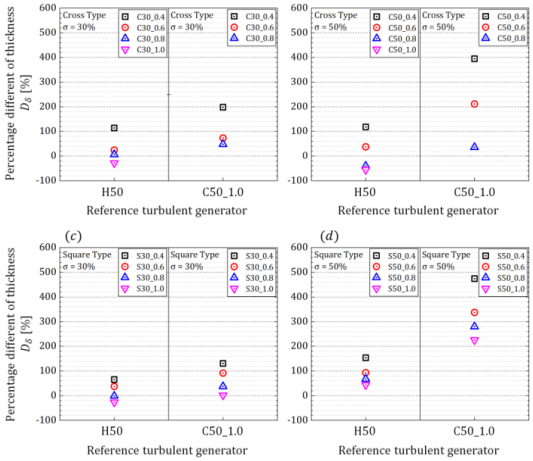


Fig. 15. Difference in flame brush thickness between fractal turbulence plate and general perforated plate using percentage difference method (D_δ); (a) Cross type, σ = 30%, (b) Cross type, σ = 50%, (c) Square type, σ = 30%, (d) Square type, σ = 50%.

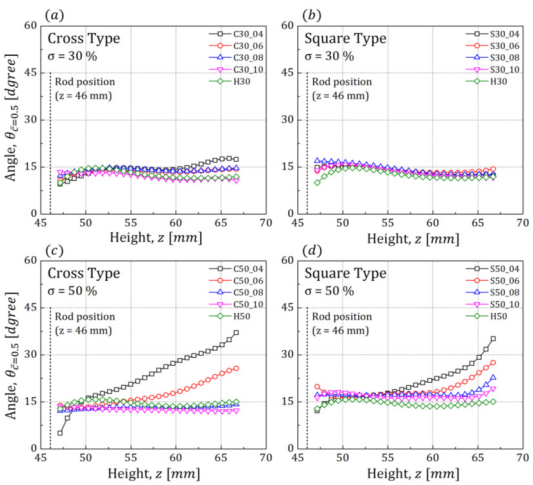


Fig. 16. The angle of the flame brush $\bar{c} = 0.5$ line by height of each turbulence generating plate ($\bar{\theta}_{\bar{c}=0.5}$); (a) Cross type, σ = 30%, (b) Square type, σ = 30%, (c) Cross type, σ = 50%, (d) Square type, σ = 50%.

다음으로, 모든 난류생성판에서 화염브러쉬의 각도인 $\theta_{\bar{c}=0.5}$을 Fig. 16에 나타내었다. 낮은 난류 조건(Borghi-Peters 선도 중 주름진 화염, 골이 진 화염)에서는 $\theta_{c=0.5}$ = 15 ° 근처였지만 Borghi-Peters 선도 중 얇은 반응영역의 조건들은 각도가 급격히 증가한 것을 알 수 있다(Fig. 16(c), (d) 참고). 이는 반응물 영역에서 나타나는 포켓 화염, 난류연소 속도 증가로 인해 화염높이가 감소함에 따라 각도가 증가한 것으로 판단된다.

3.4 화염브러쉬와 난류 성분 비교

이전 연구를 통하여 각 난류생성판마다 난류유동에 대한 특징을 확인하였고 앞 절에서는 화염브러쉬의 두께 및 각도가 각 난류생성판마다 다르게 나타나는 것을 정량적으로 보여주었으며, 비반응장의 난류유동 및 반응장 내의 화염브러쉬 두께의 경향이 유사한 것을 알 수 있었다. 이를 난류화 정도를 나타내는 2가지 대표 난류 무차원화 수(난류강도 I, 난류 레이놀즈 수 Re_T)가 층류 화염두께로 정규화된 평균 화염브러쉬 두께와 각도에 미치는 영향에 대한 결과를 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17의 좌, 우는 각각 층류 화염두께로 무차원화 된 평균 화염브러쉬의 두께

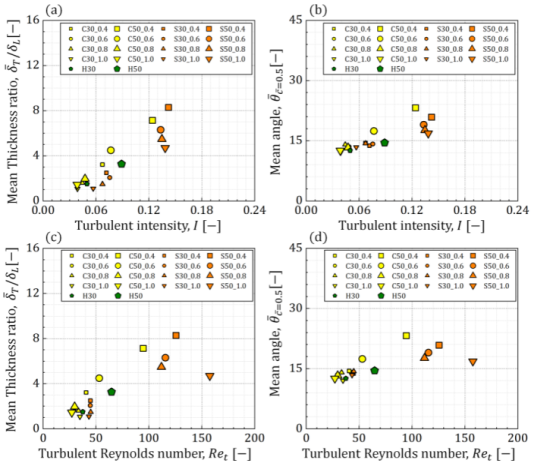


Fig. 17. Tendency of mean flame brush thickness and angle with a turbulence intensity(I) and turbulence Reynolds number(Re_T).

$\overline{\delta}_T/\delta_L$와 평균 화염브러쉬의 각도 $\overline{\theta}_{\tilde{c}=0.5}$이다. Fig. 17(a), (b)는 난류강도 I에 따른 $\overline{\delta}_T/\delta_L$ 및 $\overline{\theta}_{\tilde{c}=0.5}$이며 I가 증가함에 따라 두 값이 선형적으로 증가하였다. 이러한 경향은 난류 레이놀즈 수 Re_T에 따른 $\overline{\delta}_T/\delta_L$, $\overline{\theta}_{\tilde{c}=0.5}$를 조사한 Fig. 17(c), (d)에서도 S50_1.0을 제외하고 동일하게 나타났으며, 난류화염의 구조는 두 난류 무차원 수(Re_T, I)에 공통적으로 포함되어 있는 u'의 영향이 지배적이라는 것을 직접 확인할 수 있었다.

4. 결 론

크로스와 스퀘어 타입의 프랙탈 격자와 동일한 막힘률의 일반 원형타공판을 이용한 V-shape 난류화염에서 난류화염의 구조를 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비반응 유동 내에서 높이에 따른 적분길이 스케일 L을 확인한 결과, 본 연구에서 사용한 모든 난류생성판이 화염이 존재하는 구간에서 L = 3 mm 근처로 크게 차이가 없었고, Re_T와 보기-피터 선도를 통해 난류 속도섭동인 u'에서 차이가 크게 나타나는 것을 알았다.
2) u'/S_L과 L/δ_L로 표현한 보기-피터 선도의 난류화염 구간과 실제 화염의 OH-PLIF 이미지를 비교하여 난류화가 심해질수록 화염의 주름이 더욱 심해지고 각 구간 별 특징(포켓 화염, 자유 전파 화염)이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다.
3) 불규칙한 난류화염의 구조를 정량적으로 분석하기 위해 연소반응의 진척도를 알 수 있는 평균 진행변수(mean progress variable) 방법으로 화염브러쉬 이미지를 얻었으며 높이 z의 증가, 프랙탈의 형상변수인 σ이 높아지거나 R_t가 낮아짐에 따라 화염브러쉬의 두께 및 각도가 증가하였다.
4) 프랙탈 난류생성판과 일반 원형타공판 및 매쉬 타입(크로스 타입의 R_t = 1.0)의 화염브러쉬 두께 차이를 확인하기 위하여 백분율 오차 방법을 사용하여 비교하였다. 그 결과, 프랙탈 타입은 일반 원형타공판 타입에 비해 153.3%, 매쉬 타입에 비해 최대 474.2% 두께 증가 효과가 있었으며, 난류 연소속도 중 국부 소비속도(local consumption speed)가 크게 증대될 것으로 예상되었다.
5) 각 프랙탈 격자의 난류생성판에서 생성된 난류유동 및 난류화염의 구조는 대표적인 두 무차원수인 난류강도와 난류 레이놀즈 수에 따라서 화염브러쉬의 평균 두께와 각도 경향이 모두 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1F1A1059256).

References

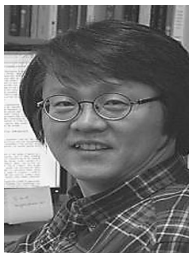
[1] S.R. Turns, An Introduction to Combustion : Concepts and Applications Third Edition, Mcgraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 2012.
[2] Parsa Tamadonfar, Omer L. Gulder, Effects of mixture composition and turbulence intensity on flame front structure and burning velocities of premixed turbulent hydrocarbon/air Bunsen flames, Combust. Flame 162 (2015) 4417-4441.
[3] S. Kheirkhah and Ö. L. Gülder, Turbulent premixed combustion in V-shaped flames: Characteristics of flame front, Phys. Fluid 25, 055107, 2013.
[4] S. Kheirkhah and Ö. L. Gülder, Consumption speed and burning velocity in counter-gradient and gradient diffusion regimes of turbulent premixed combustion, Combust. Flame 162 (2015) 1422-1439.
[5] D. Hurst, and J.C. Vassilicos, Scalings and decay of fractal-generated turbulence, Phys. Fluids 19, 035103, 2007.
[6] J.H. Kim, K.M. Lee, Analysis of Turbulent Premixed Flames in V-shape Flames with Fractal Turbulence Generators : Part. I Turbulent Flow characteristics in a Non-Reacting Field, J. Korean Soc. Combust. 26(2) (2021) 53-69.
[7] S. Kheirkhah, Ö. L. Gülder, Topology and Brush Thickness of Turbulent Premixed V-shape Flames, Flow Turbulence Combust., 93 (2014) 439-459.
[8] P. Langevin, Sur la théorie du mouvement brownien. C. R. acad. Sci. Paris 146, 1908, 530-533.
[9] S.B. Pope, Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000.
[10] G.I. Taylor, Diffusion by continuous movements, Proc. Lond. Math. Soc. 20 (1922) 196-212.
[11] N. Peters. Turbulent combustion. Cambridge University Press, first edition, 2000.
[12] T. Sponfeldner, N. Soulopoulos, F. Beyrau, Y. Hardalupas, A.N.K.P. Taylor, J.C. Vassilicos, The structure of turbulent flames in fractal- and regular-

grid generated turbulence, Combust. Flame 172 (2015) 3379-3393.
[13] A.A. Verbeek, R.C. Pos, G.G.M. Stoffels, B.J. Geurts, Th. H. van der Meer, A compact active grid for stirring pipe flow, Exp. Fluids, 54 (2014) 1594.
[14] Wu Jin, Sccot A. Steinmetz, Mrinal Juddoo, Matthew J. Dunn, Zuohua Huang, Assaad R. Masri, Effects of shear inhomogeneities on the structure of turbulent premixed flames, Combust. Flame 2018 (2019) 63-78.
[15] G. Rozenchan, D.L. Zhu, C.K. Law, S.D. Tse, Outward propagation, burning velocities, and chemical effects of methane flames up to 60 ATM, Proc. Combust. Inst. 29 (2002) 1461-1470.
[16] Y. Lafay, B. Renou, G. Cabot, M. Boukhalfa, Experimental and numerical investigation of the effect of H2 enrichment on laminar methane-air flame thickness, Combust. Flame 153(4) (2008) 540-561.
[17] G. Comte-Bellot, S. Corrsin, The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence, J. Fluid Mech. 25(4) (1966) 657-682.
[18] N. Mazellier, J. C. Vassilicos, Turbulence without Richardson-Kolmogorov cascade, Phys. Fluids 22(7) (2010) 075101.
[19] P.C. Valente, J.C. Vassilicos, The decay of turbulence generated by a class of multiscale grids, J. Fluid Mech. 687 (2011) 300-340.
[20] A.A. Verbeek, P. A. Willems, G.G.M. Stoffels, B.H. Geurts, T. H. van der Meer, Enhancement of turbulent flame speed of V-shaped flames in fractal-grid-generated turbulence, Combust. Flame 167 (2016) 97-112.

저자정보

김주한

현재 순천대학교 우주항공공학과 석사과정이며, 관심분야는 열-음향 불안정성 및 난류화염 분석, 3D 수치해석이다.



이기만

현재 국립순천대학교 기계우주항공학부 교수로, 혼합연료연소, 화염구조해석, 연소불안정성, 수소전소 및 가스터빈 등에 관심이 있다.