**〈**학술논문**〉** 

ISSN 1226-0959 eISSN 2466-2089

# 하이브리드타입 프랙탈격자 화염의 난류특성에 관한 실험적 연구

김정현·이기만<sup>+</sup>

순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터

### An Experimental Study on Turbulent Characteristics of Hybrid Type Fractal Grid Flames

Jung Hyun Kim and Kee Man Lee<sup>†</sup>

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

(Received 11 December 2023, Received in revised form 28 December 2023, Accepted 28 December 2023)

#### ABSTRACT

This study focuses on the V-shape with hybrid type fractal grid generator to evaluate the turbulent characteristics of turbulent premixed flames. In this work, the mean and velocity fluctuation, turbulence intensity were investigated. 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 based with the reaction OH-PLIF images, it was confirmed that the flame characteristics of each regimes in fractal grid flames were well represented. Also, the irreguar turbulence of premixed flames was quantitatively analyzed using the flame brushes obtained by the mean progress variable analysis. As a result, the flame brushes of the hybrid type fractal turbulence generator were wider than the conventional fractal grid generator with individual shape of cross and square grid. This means that the turbulence intensity has increased compared to the previous conventional fractal grid, and the local displacement speed is also expected to increase.

Key Words : V-shape flame, Hybrid fractal grid, OH-PLIF, Mean progress variable

기 ㅎ 석 명							
	기포	20					
D	: Nozzle diameter	$U_0$ : Bulk velocity					
σ	: Blockage ratio	$\overline{U}$ : Mean velocity					
$R_t$	: Reduciton rate of bar thickness	N : Number of fractal iteration					
Ι	: Turbulent intensity	$S_L$ : Laminar burning velocity					
$\overline{c}$	: Mean progress variable	<i>il</i> : Velocity fluctuation					
$Re_T$	: Turbulent Reynolds number	$\delta_T$ : Flame brush thicnkess					
$D_{\delta}$	: Percentage difference of flame brush	$\phi$ : Equivalence ratio					
	thicnkess						

### 1. 서 론

실제 엔지니어링 시스템에서 자주 사용하는 난류 예혼 합화염은 오염물질을 저감하고 고밀도 에너지를 갖는 장

<sup>+</sup>Corresponding Author, kmlee@scnu.ac.kr

점이 있다. 난류 예혼합화염 유동장을 형성하기 위해서 주 로 사용되는 타공판 또는 매쉬(Mesh)는 보다 쉽게 난류 유 동장을 형성하는 장점이 있지만 후류로 진행함에 따라 비 교적 낮은 난류강도를 가지게 되는 단점이 있다[1-3]. 이 러한 단점을 해결하기 위한 방법의 하나로 Hurst와 Vassilicos는 멀티스케일(multi-scale)의 난류구조를 가지는 프 랙탈(fractal) 난류생성판을 고안하였고 프랙탈 난류생성 판을 이용한 난류 연구에 다양하게 진행되고 있다[4,5].

대표적으로 Kheirkhah는 V-shape 화염을 통해 난류강

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.

도를 높이기 위하여 동일한 막힘률을 가진 타공판 두 개를 겹쳐 사용하여 난류강도를 조사하였다[6]. 이들은 타공판 격자에서 생성된 난류화염에서 나타난 특징을 PIV기법 을 이용하여 3개 영역인 버섯모양을 가진 화염전면구조 (mushroom-shape flame front structures), 자유전파화염 구조(freely propagating sub-flames), 포켓구조(pocket formation) 등 화염의 특징을 영역에 따라 정의하였다. 또한 V-shape 화염의 높이에 따라 화염브러쉬(flame brush)의 두께를 조사하고 다양한 모델(Langevin/Talyor의 식 [7-9]. Peter의 식[10])과 비교하였다. 적분길이 스케일로 정규화한 화염브러쉬 두께는 와류 대류시간(eddy convection time, t)과 와류 회전시간(eddy turnover time, t)의 비율이 t/t 에 따라증가하였지만 비교 모델과는 일치하지 않음을 확인하였다.

Sponfelder는 프랙탈 난류생성판 중스퀘어타입을 조사 하였는데 일반 매쉬형상과 프랙탈 격자의 주요 형상 매개 변수인 막힘률  $\sigma = 35, 37%와 격자 두께 축소율인 <math>R_i =$ 0.43.056, 격자 반복횟수 N=3, 4에 따라 총 5가지의 프랙 탈 난류생성판을 비교하였다[11]. 와류 대류시간과 회전 시간의 비율에 따른 화염 브러쉬 경향을 조사하여 스퀘어 타입의 프랙탈 난류생성판에서 새로운 상관식을 제안하 였으나 프랙탈 난류생성판 구조의 주요 형성 매개변수인 막힘률, 격자 두께축소비율 등에 의한 화염 브러쉬의 형상 차이를 확인하지는 못하였다.

앞서 설명한 선행 연구들은 V-shape 화염을 이용하여 프랙탈 난류생성판에서의 화염거동을 조사였고, V-shape 화염뿐만 아니라 최근 새로운 연소기법인 저선회 인젝터 (low swirl injector)를 통해 프랙탈 난류생성판의 난류화 염 연구도 활발히 이루어지고 있다[12-14].

저선회 연소는 대부분의 산업 및 가스터빈 연소기에 적 용되는 강선회(high swirl) 연소기법과는 다르게 내부재 순환구조(inner recirculation structure)가 생기지 않고 배 기가스 배출 성능이 개선되는 장점을 가지고 있다[1,2,4]. 이러한 저선회 연소기법은 기존의 강선회 연소와 비교하 여 단순히 선회각도(swirl angle)가 작아서 약한 선회강도 (swirl strength)를 갖는 것이 아닌 화염의 안정화(flame stabilizing)방식이 강선회 연소와는 전혀 다른 개념의 연 소 원리를 갖는다. 즉 저선회 연소는 예혼합 화염의 대표 특성인 화염전파(flame propagation) 특성을 극대화시켜 노즐로부터 제트가 연소실로 확대되어 나오는 확대유동 장의 강한 난류유동과 결합되어 난류 화염장 내부에 재순 환영역이 발생하지 않으면서 저선회 인젝터 출구속도와 노즐쪽으로 전파되는 난류 연소속도가 같아지는 정체점 (stagnation point)을 형성하는데 이 지점에서 화염이 안정 적으로 부상되어 연소되는 방식이다.

이렇듯 내부재순환구조가 생성되질 않음으로써 화염 내 고온의 연소생성물이 체류하는 시간이 짧아 저선회 인 젝터는 질소산화물과 같은 연소생성물 저감을 위한 효과 적인 대안으로 연구되었다. 대표적으로 Johnson 등은 PIV 기법을 통해 저선회 화염에서 내부재순환영역이 화염 후 류로 밀려나는 것을 확인하였으며 그로 인해 강선회보다 저선회화염에서 배기가스 체류시간이 감소되어 열적 NOx 가 크게 감소하는 것을 확인하였다[14]. 최근 탄소중립에 따른 무탄소 연료가 주목을 받으면서 기존 가스터빈이나 보일러 등 산업 전반에 걸쳐서 무탄소 연료를 적용하기 위 한 연구가 활발히 진행되고 있다. 저선회 연소기 화염의 두드러진 특징인 안정된 부상화염(lift-off flame)은 수소 (H2)화염처럼 고온의 화염온도로부터 노즐 팁(tip) 열화를 방지할 수 있으며 공기역학(aerodynamic)적으로 부상된 화염이 노즐 안으로 역화(flash-back)되기가 힘든 구조로 인해 수소혼소 및 전소 등 수소기반의 무탄소 연료연소에 적합한 연소방식이다.

한편 저선회 연소기에서 사용되는 난류생성판에 비교 적 최근에 연구가 시작된 프랙탈격자(fractal grid)를 사용 한 연구들도 보고되고 있다. Kang 등은 크로스(cross) 형 상의 프랙탈격자를 타공판 대신 난류생성판으로 사용하 여기존 타공판과 난류 연소특성을 비교하였는데, 난류 연 소속도와 난류 레이놀즈 수과의 상관관계에 대해 보고하 였다[24]. 또한 A.A. Verbeek 등은 크로스타입 프랙탈격 자의 저선회 인젝터를 사용하여 난류 연소속도와 화염표 면밀도를 조사하였고 OH-PLIF 이미지를 통하여 크로스 프랙탈 격자에서 국부 난류연소속도와 속도섭동 등이 개 선됨을 확인하였다[15]. 이처럼 저선회 인젝터기반의 버 너에서 난류생성판으로 프랙탈 격자를 결합하는 시도가 다양하게 이루어지고 있지만 대부분 크로스타입 프랙탈 격자를 사용하고 있다[16-19]. 한편, 프랙탈격자를 처음 으로 고안한 J.C. Vassilicos 등이 제안한 프랙탈격자 타입 은 크로스(cross), 스퀘어(square), 아이(I)타입 등 총 3가지 였는데, 이들 중 아이(I)타입은 실용성이 떨어져 연구대상 으로 제외하면 스퀘어타입은 크로스타입과 달리 난류강 도가 후류로 갈수록 천천히 증대되었지만 이후 난류 붕괴 영역에서는 빠르게 감소하는 특징을 보였다. 또한 스퀘어 타입은 다른 형상에 비해 격자 구조에 대한 유동장 연관성 이 존재하는 경향을 보였고 다양한 난류특성과 상관관계 에 대해서도 보고하였다. 이러한 장점으로 일견 스퀘어타 입의 우수한 성능을 예상할 수 있으나 스퀘어타입은 저선 회 인젝터 형태로 산업용 연소기에 응용되기 위해서는 구 조적 한계를 안고있는 것으로 밝혀졌다. 저선회 인젝터로 산업용 연소기 화염을 구성하기 위해선 저선회 버너 특성 상 높은 막힘률이 필수적인데 스퀘어타입은 격자 생성 원 리상 일정 막힘률(o) 이상부터 격자 두께축소비율(R<sub>t</sub>)이 구현되지 않는 구조적인 문제점을 안고 있다. 이러한 문제 점을 개선하기 위해 본 연구에서는 높은 막힘률이 가능한 크로스타입을 스퀘어타입과 조합하여 구조적으로 조금 더 다양한 막힘률과 격자 두께 축소비율을 구현할 수 있는 하이브리드(hybrid)타입의 프랙탈격자를 고안하게 되었 다. 그런데 일반적으로 선회유동(swirling flow)을 갖는 저 선회 버너의 연소장은 비록 약한 선회강도이나 선회유동 이 화염에 많은 영향을 주고있기 때문에 선회유동이 배제 된 프랙탈격자만의 고유한 유동과 화염거동을 파악하기 엔 어려움이 있게된다.

따라서 본 연구에서는 이번에 새롭게 고안한 하이브리 드타입을 이용해 프랙탈 격자만에 의한 난류화염 특성을 분석하기 위해 V-shape 화염장을 이용하였다. 이를 위해 저선회 연소기로서 높은 막힘률뿐만 아니라 넓은 범위의 막힘률까지를 고려할 수 있으나 우선적으로 하이브리드 격자의 특성을 파악하고자 본 연구팀이 선행연구로 진행 하였던 크로스타입과 스퀘어타입과의 차이점을 확보하 고 개선점을 파악하기 위해 본 연구에서는 선행연구와 동 일한 막힘률(*o*) 30과 50%, 격자두께축소비율(*R*<sub>t</sub>)을 0.4~ 1.0까지로 하여 조사하였다[5,20,21].

#### 2 실험장치 및 방법

#### 2.1 하이브리드타입 프랙탈격자

Fig. 1은 하이브리드타입 프랙탈 난류생성판을 도시하 였다. 십자(cross)형상과 정사각(square)형상의 기하학적 구조가 반복되는 형태를 적용하여 형성되는 프랙탈격자 는 격자의 형상매개변수 선택에 따라 다양한 스케일을 가 지는 격자구조가 완성되는 것이 특징이다. 프랙탈 격자구 조를 만들기 위한 주요 형상매개변수들로는 반복횟수 (number of fractal iteration, *N*), 막힘률(blockage ratio, *o*), 격자두께축소율(reduction rate of bar thickness, *R*,) 등으 로 크로스타입과 스퀘어타입의 제작방법에 대해서는 본 연구팀의 선행연구에서 자세하게 서술되어있다[5]. 본 연 구의 하이브리드타입 격자는 기존 크로스타입과 스퀘어 타입의 중앙을 기준점으로 겹쳐 하이브리드타입의 프랙 탈격자로 난류생성판을 생성하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용한 하이브리드타입의 난류생성판 개략도이다.

#### 2.2 V자형 버너

서론에서 기술한 바와 같이 새로 고안한 하이브리드타 입 프랙탈격자만의 유동과 연소특성을 파악하고자 이전 연구와 동일하게 V자형 버너를 통해 난류특성을 실험적 으로 조사하였다[5,20]. 사용한 V자형 노즐은 알루미늄 재질로 원형 풍동(wind tunnel)은 아크릴을 사용하여 제작 하였으며, 원통형 풍동은 균일한 유동장을 위해 각 층마다 매쉬(mesh)를 장착하였다.

Fig. 3은 본 연구인 하이브리드타입 프랙탈격자로 구성 된 노즐의 개략도와 좌표계 및 측정위치를 보여주고 있다. 하이브리드격자 노즐의 치수는 직경 *D*= 28 mm, 길이 *L*= 42 mm이며 V자형 화염을 형성하기 위해서 노즐 중앙에 Ø2 mm인 스테인리스 막대(rod)를 노즐 출구 4 mm 위에 장착시켰다.



Fig. 1. Definition of Hybrid type of fractal grid.

R <sub>t</sub>	0.4	0.6	0.8	1.0
$\sigma = 30\%$				
$\sigma = 50\%$				

Fig. 2. Hybrid type turbulence generating plate to shape parameters.



Fig. 3. Nozzle exit length, diameter and cylindrical coordinate system.

#### 2.3 열선유속계 및 OH-PLIF 시스템

하이브리드타입 난류생성판은 비반응장에서 프랙탈격 자에 의한 난류강도를 정확하게 파악하기 위하여 난류분 석용 전문 계측장비인 열선유속계(hot-wire anemometry) 를 사용하여 축-방향과 반경방향의 난류속도와 변동섭동 에 대한 정보를 취득하였다. 정밀 열선유속계는 TSI사의 IFA300을 사용하였고 2채널 프로브를 사용하였다. 1 kHz 샘플링율(sampling rate)로 16sec 취득하였으며, 이는 20 kHz 180 sec 동안 측정한 데이터와 오차율 0.1%를 갖는 다. 또한 하이브리드타입의 난류화염 특성을 가시화하며 정량적으로 분석하기 위해 OH-PLIF 시스템을 사용하였 다. OH-PLIF 시스템은 화염장에서 생성되는 OH 라디칼 분포를 실시간으로 측정이 가능한 레이저기반의 정밀 분 석기로, 사용한 PLIF 시스템은 Pumping laser인 Nd: YAG laser(Continum, Surelite Ⅲ)와 Dye laser(Radiant Dyes, Narrow Scan)로 이루어져있다. Nd: YAG laser는 진동수 10 Hz, 523 nm의 파장을 가지며, 한 pulse 당총 120 mJ 이 상의 에너지를 갖는다. 측정한 OH-PLIF 이미지 분석은 ICCD(Intensifier Charge-Coupled Device, PI-MAX4, Princeton Instruments) 카메라를 사용하여 10 Hz 샘플링율로 50 sec 동안 취득한 총 500장의 이미지를 Mathlab 통해 정 밀 분석을 진행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 하이브리드타입 비반응 유동조사

본 연구에서는 하이브리드타입 난류생성판의 화염구 조를 조사하기 전에 비반응 난류 유동장을 통해 중심 축 방 향에 대한 난류강도 및 속도섭동, 평균속도와 같은 대표적 인 난류 인자들에 대해서 조사하였다. 프랙탈 중심을 기준 으로 중심축방향 높이 1 mm부터 화염이 존재하는 구간인 67 mm까지 측정하였다.



Fig. 4. Dimensionless mean velocity measured from the center axis.

평균속도는 난류강도를 구하는데 필요한 정보로 Fig. 4 는 프랙탈 격자의 매개변수에 따른 난류생성판의 평균속 도를 나타낸 그래프이다. 여기서 HF는 하이브리드타입 프랙탈격자를 의미하며 HF 다음의 숫자는 막힘률(σ, 이 하 σ)을 대쉬(-) 이후 숫자는 격자두께축소율(R<sub>t</sub>, 이하 R<sub>t</sub>) 을 의미한다. 예를 들어 HF30-04는 σ = 30%에 R<sub>t</sub> = 0.4를 의미한다.

먼저 Fig. 4에서 보는바와 같이 막힘률이 30과 50% 별로 노즐 부근에서 서로 다른 경향을 보이면서 후류로 진행함 에 따라  $U/U_0 = 1.0로$  수렴하나 초기 난류생성판 부근 에서는  $\sigma = 30$ 과 50이 서로 다른 경향으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 프랙탈 형상 초기격자두께 t<sub>0</sub>와 두께축소 비율인  $R_1$ 에 따라 난류생성판 격자를 제외한 남은 열려있 는 공간의 면적이 달라 유량이 집중되는 정도가 달라지고 그로 인해 평균속도에 차이가 생기는 것으로 판단된다. 또 한 모든 난류생성판 조건에서 후류로 진행할수록 초기 유 동속도와 난류평균속도 비(比)인  $U/U_0$  값이 1.0으로 수 렴하고 있는데 이는 노즐출구 이후 난류에너지의 소산 등 으로 인해 평균속도 값으로 복귀되면서  $U/U_0 = 1.0$ 으로 수렴하는 것으로 판단된다.



Fig. 5. Velocity fluctuation measure from the center axis.

Fig. 5는 하이브리드타입 프랙탈 격자에서의 난류 축방 향 속도섭동인 u<sup>'</sup>을 나타내었다. 본 연구에서 속도섭동의 정의는 본 연구팀의 이전 연구에 자세하게 나타내었다[5].  $\sigma$ 가 증가하거나  $R_i$ 가 낮아짐에 따라 속도섭동의 최댓 값 이 증가했고 스퀘어타입과는 다르게 조사한 모든 난류생 성판에서 속도섭동이 노즐 출구 전 최댓 값을 가진 후 감소 하는 경향을 보였다.

Fig. 6은 속도섭동을 평균속도로 나는 값인 난류강도(*I*) 에 대해 조사하였다. 난류강도는 프랙탈 난류생성판의 난 류화 정도에 대해 정략적으로 확인할 수 있는 대표적인 난 류인자이며 이후 난류강도와 연소장에서 난류 화염속도 를 대변하는 화염브러쉬(flame brush)와의 난류특성을 비 교하기 위해 필수적으로 조사되었다. 속도섭동의 값을 평 균속도로 나눴기 때문에 전체적인 경향은 속도섭동과 매 우 유사하게 나타났다. *R*,가 감소할수록 난류강도는 증가 하였으며, 국부적인 속도섭동의 값이 감소하여 난류강도 의 최댓 값 또한 감소하는 것으로 조사되었다. 이 경우 난 류강도의 최댓 값이 나타나는 지점은 속도섭동의 최고점 과 평균유속의 최저점과 일치함을 볼 수 있다.

### 3.2 난류 레이놀즈 수와 적분길이 스케일

하이브리드타입 프랙탈격자의 비반응장 유동조사를



Fig. 6. Turbulent intensity measure from the center axis.

통해 평균속도와 속도섭동에 대해서 자세하게 조사하였 다. 앞서 조사한 난류인자들 외에도 난류 예혼합연소에 유 의미한 영향을 미치는 난류 레이놀즈 수(turbulent reynolds number)와 난류구조에서 가장 큰 와류의 길이스케 일을 나타내는 적분길이 스케일(integral length scale)에 대해 조사를 하였으며, 적분길이 스케일은 구하는 방식은 이전 연구에서 자세하게 확인할 수 있다[20]. Fig. 7은 하 이브리드타입 난류생성판을 축-방향 높이에 따른 적분길 이 스케일(L)을 나타내었다. Fig. 7 그래프의 상단과 하단 은 o = 30,50%에서 R,별로 각각 도시되었다. 두 막힘률 모 두 노즐 출구 직후 후류로 진행됨에 따라 적분길이(L) 값 이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 난류유동장에서 일반 적으로 관찰되는 동일한 현상을 보이고 있다. 또한 두 결 과 모두 노츨출구(z = 42 mm)를 전후로 L이 점차 증가함 을 보이는데, 이는 선행 연구인 Hurst, Vassilicos[4]와 Kim[5,20]의 연구에서도 확인할 수 있었다. 두드러진 특 징으로는 Hurst, Vassilicos[4] 등의 이전 연구에서 스퀘어 타입 격자에서 난류유동이 알려진 Richardson-Kolmogorov 난류 붕괴이론과 차이가 있음을 보고하고 있는데, 기존스 퀘어타입을 결합한 하이브리드타입에서도 이러한 특성 이나타나는 것으로 판단된다. 강한 난류유동이 존재하는



**Fig. 7.** Integral length scale (*L*) by height in each turbulence generating plate.

노즐출구 이후에서도 비슷한 적분길이 스케일을 가지는 데 이는 반응이 있는 연소응용 측면에서 의미있는 결과로 판단되다.

σ과관계없이 R<sub>4</sub> = 1.0의 결과에서는 난류생성판 근처 L 값이 다른 R<sub>4</sub>에 비해 크게 나타났는데, 이는 하이브리드격 자 구조상 중앙에 위치한 격자의 두께가 작아 유동에 미치 는 영향이 작아서 나타난 현상으로 스퀘어 형상만의 프랙 탈격자에서도 노즐 중앙의 유동이 충분한 난류화가 진행 되지 않았을 때 나타는 현상과 유사하였다[22,23]. 본 연구 의 주요 관심영역(z = 42-66 mm)인 화염기저 부분이 존재 하는 구간에서 대부분 L = 2~4 mm 사이에 위치하여 형상 매개변수에 따른 차이가 크지 않고 균일한 것을 알 수 있다.

Fig. 8은중심 축방향높이에 따라 조사한 난류 레이놀즈 수를 보여주고 있으며, 난류 레이놀스 수는 앞서 조사한 값들을 기반으로  $Re_t = u'L/\nu으로$ 계산하였다. 모든 조 건을 비교하였을 때 HF50-10의 조건에서 최소  $Re_t=27.52$ 에서 최대  $Re_t=146.72$ 까지의 값을 가지며 그래프에서 보 는 바와 같이 낮은 막힘률에서 더 큰 값을 가지는데 이는 크로스타입, 스퀘어타입과는 다른 경향으로, 일반적으로



**Fig. 8.** Turbulenct Reynolds number( $Re_T$ ) by height in each turbulence generating plate.

막힘률의 증가에 따라 난류 레이놀즈 수가 증가하며 스퀘 어타입에서 더 명확한 차이를 보인다.

#### 3.3 화염브러쉬 두께 분석

앞절에서는 하이브리드타입 난류생성판의 비반응 유 동장에 대해서 조사하였다. 사용한 하이브리드타입 생성 판으로 취득된 직접 화염사진에서 육안으로 형상 매개변 수에 따라 V자형 화염에서 화염브러쉬의 두께 차이를 발 견할 수 있었는데, 화염두께 차이를 정량적으로 분석하기 위하여 OH-PLIF 장치를 이용하여 정량적으로 분석을 하 였다. Fig. 9는 반응장에서 화염의 반응 진척 정도를 정량 적으로 나타내는 평균진행변수(mean progressive variable,  $\bar{c}$ ) 값으로 나타낸 하이브리드타입 프랙탈격자에서 대칭 으로 생성된 V자 화염 중 반쪽면의 OH-PLIF 이미지를 보 여주고 있다[6,15]. 조사된 평균진행변수는 OH-PLIF 이 미지를 활용하여 OH 라디칼의 반응 여부에 따라 반응물 (reactants)은 0, 생성물(product)은 1로 이진화된 평균 이 미지이다. 본 연구에서의 화염브러쉬 두께는 이전 연구에 서와 동일하게  $\bar{c}$ 가 0.1부터 0.9까지 진행된 길이로 정의하



Fig. 9. Representative images of each turbulence plate using the mean progress variable method.

였다[20]. 이때 초록색 점선은 반응장 중심인  $\overline{c} = 0.5$ 인지 점으로 화염브러쉬의 중심선을 의미한다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 보여진 V자형 화염의 이미지를 통해 난류화염의 연소속도를 가늠할 수 있는 화염브러쉬 두 께를 형상 매개변수에 따라 정량적으로 나타내었는데, 이 경우에서도 화염브러쉬 두께인 δ<sub>7</sub>를 정의하는 방법은 이 전 연구와 동일하게 사용하였다[20]. 높이에 따른 화염브 러쉬의 두께는 사용한 모든 난류생성판에서 σ이 증가하거나 *R*<sub>4</sub>가 감소함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이는 선행 연구에서도 잘 나타난 현상이고 앞 절인 비반응 유동장의 난류강도 계측과 유사한 결과로 난류강도와 속도섭동의 증가에 따른 화염브러쉬의 두께 변화로 판단된다[20].

앞서 취득한 비반응장 결과와 적분길이 스케일 등을 기 반으로 하이브리드타입 프랙탈격자 화염의 속성을 난류 화염의 대표적인 Borghi-Peter 선도를 통해 Fig. 11에 도시 하였다. 이 경우 선도상에서 거시적인 난류화염 특성을 구 분하기 위한 방법으로 두 무차원수인  $u'/S_L$ ,  $L/\delta_L$ 을 사용 하였다. 사용된 무차원  $L/\delta_L$ 은 화염을 분석하는 영역의 적분길이 스케일을 평균하여 사용하였으며  $u'/S_L$ 의 경우 화염브러쉬 선단 부분( $\overline{c} = 0.1$ )에서의 평균값을 사용하여 나타내었다.



Fig. 10. Flame brush thickness by height of each turbulence generating plate.



Fig. 11. Borghi -Peters diagram showing the results of the non-reactive flow of each turbulence plate.



Fig. 12. Representative image of OH–PLIF showing the corrugated flamelets regmies.

본 연구에서의 하이브리드타입 난류화염은 대부분 주 름진화염(wrinkled flamelets) 영역과 일부분 골이진화염 (corrugated flamelets) 영역에 위치하였으며 속도섭동  $(u'/S_L)$ 에 의한 차이보다는 적분길이 스케일 $(L/\delta_L)$ 에 의 한 변화가 크다는 것을 확인할 수 있었다. Borghi-Peter 해 당되는 대표적인 OH-PLIF 화염 이미지를 HF50-10과 HF30-04 경우로 Fig. 12에 나타내었다.

### 3.4 하이브리드타입 난류생성판 비교평가

앞 절과 선행 연구의 결과들을 통해 본 연구에서 고안한 하이브리드타입 난류생성판을 크로스타입과 스퀘어타입 의 난류강도 및 화염브러쉬 두께를 정량적으로 비교하여 나타내었다. 각 결과들을 비교하기 위해서 식 (1)으로 정 의한 백분율오차(percentage error) 방법으로 화염이 존재



Fig. 13. Difference in turbulence intensity between fractal turbulence plate the general perforated plate using percentage difference method.

하는 구간인 z = 46-66 mm까지의 데이터를 평균한 값을 사용하였다. 식 (1)에서 표현의 편리성을 위해 각 물리량 을  $X 로 표시하였는데, X_{H</sub>는 비교하고자 하는 값, 즉 하이$  $브리드타입의 해당 데이터이며, <math>X_{re}$ 는 참고하는 값으로 크로스타입과 스퀘어타입의 해당 데이터를 의미한다.  $D_x$ 는 백분율오차율을 나타내며 값이  $D_x < 0 인 경우 측정된$ 하이브리드타입의 데이터가 참고값인 크로스와 스퀘어 $의 값보다 낮다는 의미이며 <math>D_x > 0$ 는 하이브리드타입의 값이 높다는 것을 의미한다. 또한 그래프 내 사각박스 안 의 기호인 HC와 HS는 같이 비교하는 프랙탈 형상인 크로 스타입과 스퀘어타입을 의미하고 수치는 막힘률인  $\sigma$ , 대 쉬(-) 다음은 격자두께축소율인 R,를 의미한다. 예를 들어 HC30-04는 하이리드형과 크로스타입의 비교를 뜻하고 30은 막힘률, 04는 격자두께축소율을 의미한다.

$$D_{x} = \frac{X_{H} - X_{ref}}{X_{ref}} \times 100[\%]$$
 (1)

먼저 Fig. 13는 비반응장에서 취득한 난류강도를 비교



Fig. 14. Difference in flame brush thickness between fractal turbulence plate the general perforated plate using percentage difference method.

한 그래프를 보여주고 있다. 우선 크로스타입과의 비교에 서 막힘률과 관계없이 R가 증가함에 따라 난류강도의 차 이가 증가하였는데, R, = 0.4를 제외한 대부분의 조건에서 D<sub>r</sub> > 0의 값이 지배적으로 나타났다. 또한 스퀘어타입과 의 결과에서도 마찬가지로 R,가 증가함에 따라 난류강도 의 차이가 증가하였지만 막힘률에서는 상반된 결과가 나 타났다. 다음은 연소반응장에서 취득한 OH-PLIF 이미지 의 결과로 분석된 화염브러쉬 두께의 비교 결과를 Fig. 14. 에 나타내었다. 그래프 상단인 크로스타입과 비교와 하단 인 스퀘어타입과의 비교 모두에서 R,가 증가함에 따라 화 염브러쉬 두께 차이가 증가하였으며, 크로스타입과의 비 교에서 난류증대 효과가 뚜렷하게 나타났다. 화염브러쉬 의 두께 증가는 화염의 표면적 증가로 난류 연소속도가 증 가되는 것을 의미하는데 이는 화염의 국소속도(local consumption speed)가증가하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 난 류증대효과의 차이가 큰 조건(HS50)의 경우 Fig. 11에서 나타난 Borghi-Peter선도에서 확인 할 수 있듯이 얇은 반 응영역 혹은 넓어진 예열영역(Thin Reaction Zone or Broadened Preheat Zone)에 위치하였으며 이 경우  $D_x$  값 은  $D_x < 0$ 를 보였다. 이상의 결과들을 종합하면, 하이브 리드타입 난류생성판의 난류성능 증대효과는 단독 격자 로 구성된 기존의 크로스타입과 스퀘어타입과 비교해서 크로스타입보다는 HC50-04 격자기준으로는 최대 62.5%, 스퀘어타입에 비해 HS30-10 격자에서는 최대 172.2%가 증가하였고, 난류화염의 연소속도를 대변하는 화염브러 쉬 두께에서도 크로스타입에 비해 최대 57.5%(HC30-04), 스퀘어타입은 최대 29.15%(HS30-04)가 증가하였다.

### 4. 결 론

하이브리드타입 난류생성판을 고안하여 프랙탈격자만 의 V자형 난류화염을 통해 단독 격자인 기존 프랙탈 난류 생성판과 동일한 막힘률과 격자두께축소율에서 화염의 구조과 난류증대 효과를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻 었다.

- 하이브리드타입 난류생성판의 비반응 유동장 조사를 통해 막힘률인 ø과 격자두께축소율인 R,에 따라 평균 속도, 속도섭동 및 난류강도를 조사하였고 화염이 존 재하는 구간에서 스퀘어타입 막힘률 50%를 제외하고 대부분의 난류생성판에서 난류강도가 개선됨을 확인 하였다. 또한 비반응 유동에서 축-방향 높이에 따른 적 분길이스케일인 L을 확인한 결과, 모든 난류생성판에 서 L=2~4 mm 값을 확인하였으며, 분석된 난류화염들 을 Borghi-Peter 선도를 통해 난류화염의 구분을 확인 하였다.
- 2) 연소반응의 진척도를 알 수 있는 평균진행변수(mean progress variable) 값을 통해 불규칙한 난류화염의 구 조를 파악하였으며, 난류화염의 연소속도를 가름할 수 있는 화염브러쉬의 두께가 프랙탈의 매개변수인 R,가 증가함에 따라 두께 차이가 증가하는 것을 확인하여 선 행 연구와 동일한 현상으로 판단하였다.
- 3) 마지막으로 기존 단독 격자형상인 크로스타입과 스퀘 어타입을 본 연구팀에서 개선안으로 고안한 하이브리 드타입의 난류생성판과의 난류강도와 화염브러쉬 두 께를 정량적으로 비교하였다. 백분율 오차 방법을 사 용하여 비교하였고 그 결과, 난류강도가 최대 172.2% 화염브러쉬의 두께에서는 최대 57.5%가 증가되는 효 과를 보여 하이브리드타입 프랙탈격자 화염에서 난류 연소속도가 크게 증가할 것으로 판단되었다.

### 후 기

본 논문은 순천대학교 교연비사업에 의하여 연구되었음

### References

- P. Tamadonfar, and O. 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.
- [2] S. Kheirkhah and Ö. L. Gülder, Turbulent premixed combustion in V-shaped flames: Characteristics of flame front, Phys. Fluid 25, 055107, 2013.
- [3] 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.
- [4] D. Hurst, and J.C. Vassilicos, Scalings and decay of fractal-generated turbulence, Phys. Fluids 19, 035103, 2007.
- [5] 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
- [6] S. Kheirkhah, Ö. L. Gülder, Topology and Brush Thickness of Turbulent Premixed V-shape Flames, Flow Turbulence Combust. 93, 2014, 439-459.
- [7] P. Langevin, Sur la théorie du mouvement brownien.C. R. acad. Sci. Paris 146, 1908, 530-533.
- [8] S.B. Pope, Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000.
- [9] G.I. Taylor, Diffusion by continuous movements, Proc. Lond. Math. Soc. 20, 1922, 196-212.
- [10] N. Peters. Turbulent combustion. cambride University Press, first edition, 2000.
- [11] T. Sponfeldner, N. Soulopoulos, F. Beyrau, Y. Hardalupas, A.N.K.P. Taylor, J.C. Vassilicos, The structure of turbulent flames in fractal- and regulargrid generated turbulence, Combust. Flame 172, 2015, 3379-3393.
- [12] R.K. Cheng, D.T. Yegian, M.M. Mivasato, G.S. Samuelsen, C.E. Benson, R. Pellizzar i, R. Loftus, Scaling and Development of Low-Swirl Burners for Low-Emission Furnaces and Boilers, Proc. combust. Inst., 28, 2000, 1305-1313.

- [13] T. Yegian, R.K. Cheng, Developmet of a Vane-Swirler for use in a Low NOx Weak-swirl Burner, AFRC, 1996, (LBNL-39354)1-20.
- [14] M.R. Johnson, D. Littlejohn, W.A. Nazeer, K.O. Smith, R.K. Cheng, A Comparison of the Flow fields and Emissions of High-swirl Injectors and Low-swirl Injectors for Lean Premixed Gas Turbines, Proc. Combust. Inst., 30(2), 2005, 2867-2874.
- [15] 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 fractalgrid generated turbulence, Combust. Flame, 167, 2016, 97-112.
- [16] B. Bedat, R.K. Cheng, Experimental Study of Premixed Flames in Intense Isotropic Turbulence, Combust. Flame, 100, 1995, 485-494
- [17] R.K. Cheng, Velocity and Scalar Characteristics of Premixed Turbulent Flames Stabilized By Weak Swirl, Combust. Flame, 101 (1995) 1-14.
- [18] H. Jeong, M. Han, K. Kang, Y. Lee, K. Lee, An experimental Study on the Effect of a Turbulence Generating Plate in Low Swirl Combustor. J. Mech. Sci. Technol., 31 (12) (2017) 6077-6084.
- [19] P.L. Therkelsen, D. Littlejohn, R.K. Cheng, Parametric study of low swirl injector geometry on its operability, ASME, GT20112-6846 (2012) 1-10.
- [20] J.H. Kim, K.M. Lee, Analysis of Turbulent Premixed Flames in V-shape Flames with Fractal Turbulence Generators : Part. II Turbulent of Turbulent Flame Structures, J.Korean Soc. Combust. 26(3) (2021) 51-61
- [21] J.H. Kim, K.M. Lee, Analysis of Turbulent Premixed Flames in V-shape Flames with Fractal Turbulence Generators : Part. III Turbulent Burning Velocity, J.Korean Soc. Combust. 26(2) (2021) 53-69
- [22] N. Mazellier, J. C. Vassilicos, Turbulence without Richardson-Kolmogorov cascade, Phys. Fluids 22(7) (2010) 075101
- [23] P.C. Valente, J.C. Vassilicos, The decay of turbulence generated by a class of multiscale grids, J. Fluid Mech. 687 (2011) 300-340
- [24] Y.S.Kang, K.M.Lee, The study of Turbulent Flame Characteristics by Plate Shape of Turbulence Generator, J.Korean Soc. Combust. 26(3) (2021) 20-34.

### 저자정보

## 김정현

현재 국립순천대학교 기계우주 항공공학 석사과정이며, 난류 화염분석, 연소불안정성, 수소 전소 및 가스터빈 등에 관심이 있다.

이기만



### 현재 국립순천대학교 기계우주 항공공학부 교수로, 혼합연료연 소, 화염구조해석, 연소불안정 성, 수소전소 및 가스터빈 등에 관심이 있다.