

레이저 토모그래피와 화염구조선도에 의한 연소영역의 검토

A Discussion of Combustion Regime Based on Laser Tomography and Flame Structure Diagram

김 준 호

J. H. Kim

Key Words : Turbulent Flame Structure(난류화염구조), Combustion Regime(연소영역), Laser Tomography(레이저 토모그래피), Reactant Islands Flame(군도상 화염), Flame Structure Diagram(화염구조선도)

Abstract : The combustion regime was discussed using a laser tomography and flame structure diagram. It was shown first how to represent the turbulent burning velocity and flame structural parameters in the dimensionless plane referred to as the flame structure diagram. And then, turbulent flame structure from the obtained images by laser tomography was compared with combustion regime in the *Re-Da* plane, one of the diagrams, specified by different researchers. As the result, the u'/S_{L0} ratio at the boundary between the wrinkled laminar flame regime and reactant islands flame regime was found to be about 1.5.

기호 및 정의

- Da : Damkohler 수 [$LS_{L0}/(u' \eta_0)$]
- Ka : Karlovitz 수 [$\gamma \eta_0/S_{L0}$]
- L : 난류의 종방향 적분공간척도 (m)
- Pr : Prandtl 수
- R : 와(Eddy)의 반경 (m)
- Re : Reynolds 수 [$u'L/\nu$]
- S_{L0} : 층류연소속도 (m/s)
- S_T : 난류연소속도 (m/s)
- U : 와의 원주속도 (m/s)
- u' : 난류강도(변동속도의 2승 평균치) (m/s)
- ρ : 와의 밀도 (kg/m^3)
- γ : 화염소면의 변형율 [u'/λ_g]
- δ_{L0} : 층류화염의 반응역 두께 (m)
- ϵ : 난류 에너지 감쇠율 [$A_1 \left(\frac{u'}{L} \right)^3 \left(\frac{\eta_K}{L} \right)$]
- ϵ_i : 자기상사성 화염소면의 하한(Inner cutoff)
- ϵ_o : 자기상사성 화염소면의 상한(Outer cutoff)
- η_0 : 층류화염소면의 예열역 두께 [$\nu/(PrS_{L0})$] (m)
- η_K : Kolmogorov 길이척도 [$(\nu^3/\epsilon)^{0.25}$] (m)
- λ_g : Taylor 미세척도 (m)
- ν : 혼합기의 동점도 (m^2/s)
- ξ : 전화염소면의 연소율에 대한 군도상 화염의 연소율의 비

1. 서 론

예혼합 난류화염구조의 해명은 엔진의 연소제어 및 연소모델의 작성상 중요한 과제이므로 많은 이론적·실험적 연구가 보고되고 있다¹⁻¹⁰⁾. 그러나,

접수일 : 1998년 4월 6일

김준호 : 목포해양대학교 기관공학부

복잡하게 뒤얽힌 여러 인자들의 상호작용으로 인하여, 난류화염구조의 상세한 내용은 아직 충분히 밝혀지지 않은 상태이다.

난류화염의 구조에 관한 최근의 연구에서는 레이놀즈 수 Re , 담켈러 수 Da 등과 같은 무차원수를 좌표축으로 하는 평면을 몇 가지 조건에 의해 선도로써 각각 다른 연소영역으로 나누어 난류화염의 구조를 정성적으로 나타내고 있다. 이와 같은 무차원 좌표 평면, 즉 화염구조선도는 화염의 구조를 위상적으로 나타내고 있으므로 화염구조 위상도(Phase diagram)라고도 한다. Abraham등¹⁾은 연소영역을 약한 난류(Weak turbulence)영역, 복수반응소면(Reaction sheets)영역 및 분산반응(Distributed reaction)영역 등으로 분류하여 $Re-Da$ 평면 위에 나타내었다. 또, Peters²⁾는 $L/\delta_{L0}-u'/S_{L0}$ 평면을 이용하여 주름상 층류화염(Wrinkled flamelets)영역, 군도상 화염(Corrugated flamelets)영역, 분산반응(Distributed reaction)영역 및 교반 반응기(Well-stirred reactor)영역 등으로 분류하였다.

한편, Abdel-Gayed등³⁾은 다른 연구자들에 의한 난류연소속도의 실측치와 실험에 이용한 혼합기의 성질 및 난류장의 특성치를 이용하여 무차원 난류연소속도 S_T/S_{L0} 를 Karlovitz 수 Ka 와 레이놀즈 수 Re 의 함수로 정리하고, Fig. 1과 같이 $L/\eta_0-u'/S_{L0}$ 평면상에 나타냄으로써 예혼합 난류화염의 구조가 난류연소속도와 밀접한 관계가 있음을 밝혔다.

이와 같이, 연소영역의 분류는 아직 통일되어 있지 않고, 또 인접한 연소영역의 천이조건도 연구자에 따라 다르다. 예를 들면, Peters²⁾는 주름상 층류화염영역과 군도상 화염영역의 천이조건으로 $u'/S_{L0}=1$ 의 값을 제시하였다. 한편, Ballal⁴⁾은 3 영역 난류연소 모델을 제안하고 약한 난류영역과 강한 난류영역의 천이조건으로 $u'/S_{L0}=2$ 의 값을 제시하고 있다. 그러나, 화염구조선도에 의한 연소영역의 분류 및 그 천이조건은 개념적인 것이기 때문에 예혼합 난류연소의 현상 및 화염구조의 특성을 파악하기 위하여 각 연소영역 및 그 천이조건을 실험으로 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 난류화염구조 및 연소속도의 선도표시법을 제시하고, 레이저 토모그래피에 의한 난류화염구조의 관찰결과를 다른 연구자들이 $Re-Da$ 평면에 제시한 연소영역과 비교함으로써 주름상 층류화염영역과 군도상 화염영역의 천이조건을 조사하였다.

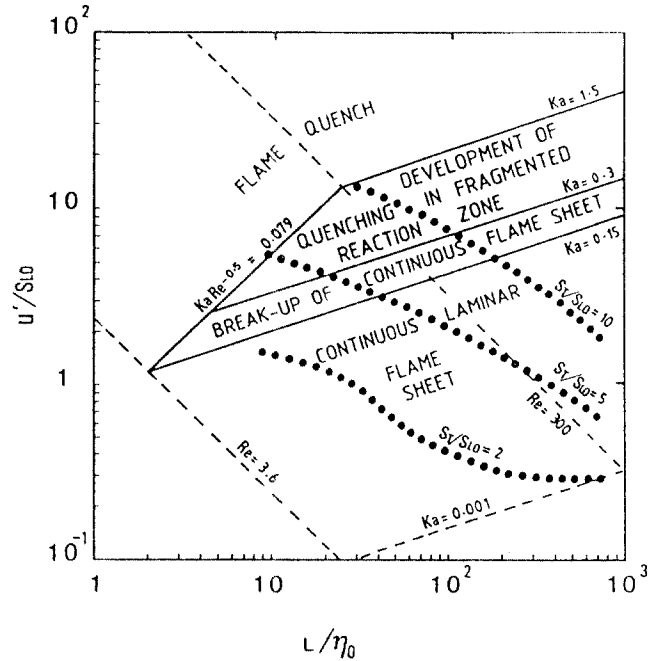


Fig. 1 Combustion regimes and experimental results of turbulent burning velocity (the "●" marks) reviewed by Abdel-Gayed et al.

2. 화염구조 및 연소속도의 선도표시법

2.1 선도표시용 좌표계 및 상호 관계

난류화염구조와 연소속도의 예측결과를 $Re-Da$, $L/\eta_0-u'/S_{L0}$ 및 $\eta_K/\eta_0-u'/S_{L0}$ 평면에 선도로 나타내기 위하여 각 평면의 상호관계를 규명할 필요가 있다.

난류의 에너지 감소율 ϵ 은 등방성 난류장의 경우 다음 식으로 계산할 수 있다⁵⁾.

$$\epsilon = A_1 \left(\frac{u'^3}{L} \right) \left(\frac{\eta_K}{L} \right) \quad (1)$$

여기서 $A_1 \approx 11$ 의 정수이다.

먼저, Re , Da 와 η_0 의 정의 및 식(1)에 의해 다음 식이 얻어진다.

$$u'/S_{L0} = (Pr \cdot Re/Da)^{0.5} \quad (2)$$

$$L/\eta_0 = (Pr \cdot Re \cdot Da)^{0.5} \quad (3)$$

$$\eta_K/\eta_0 = (Pr \cdot Da)^{0.5} / (A_1^{0.2} \cdot Re^{0.1}) \quad (4)$$

위식에서, (탄화수소/공기) 혼합기에 대한 Pr 의 값을 0.7로 하면 화염구조에 관한 모든 파라미터, 즉 u'/S_{L0} 와 L/η_0 및 η_K/η_0 등은 Re 와 Da 만의 함수로 되어 $Re-Da$ 평면에 선도로 나타낼 수 있다. 한편, u'/S_{L0} , L/η_0 , η_K/η_0 를 각각 변수로 하면 $u'/S_{L0}-L/\eta_0$ 평면 및 $u'/S_{L0}-\eta_K/\eta_0$ 평면으로 변환시킬 수 있다.

이상과 같이 각 평면에서의 모든 선도를 상호 변환함으로써 다른 연구자들의 연구 결과를 동일한 평면에서 비교 검토할 수 있다. $Re-Da$ 와 $L/\eta_0-u'/S_{L0}$ 평면에서의 각 좌표계 사이의 관계를 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 RIFF 모델에 의한 예측결과의 선도표시

Kido 등^{6,7)}은 예혼합 난류화염영역이 주름모양의

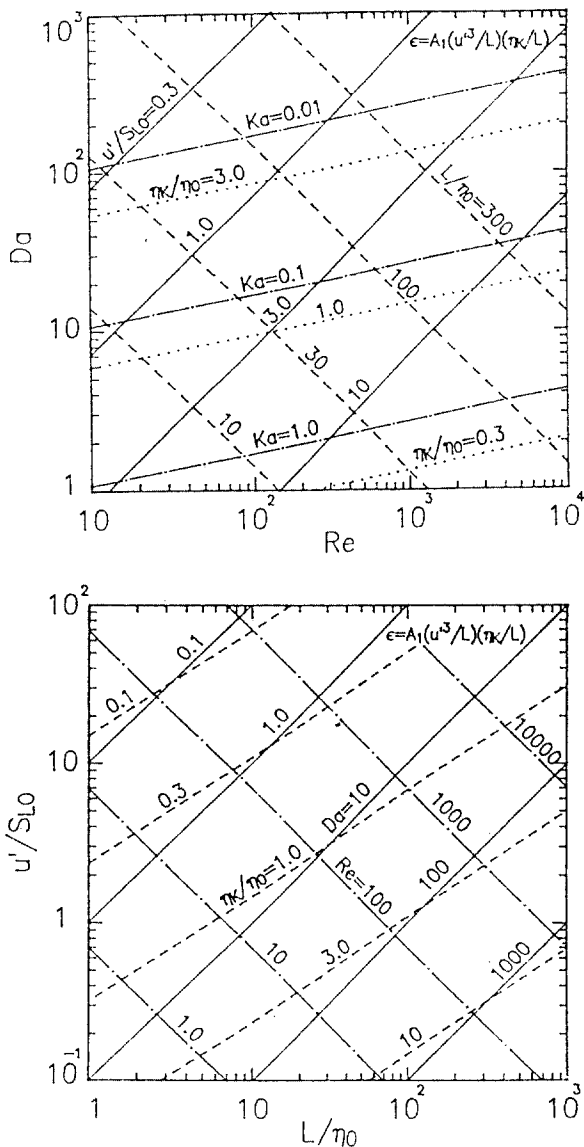
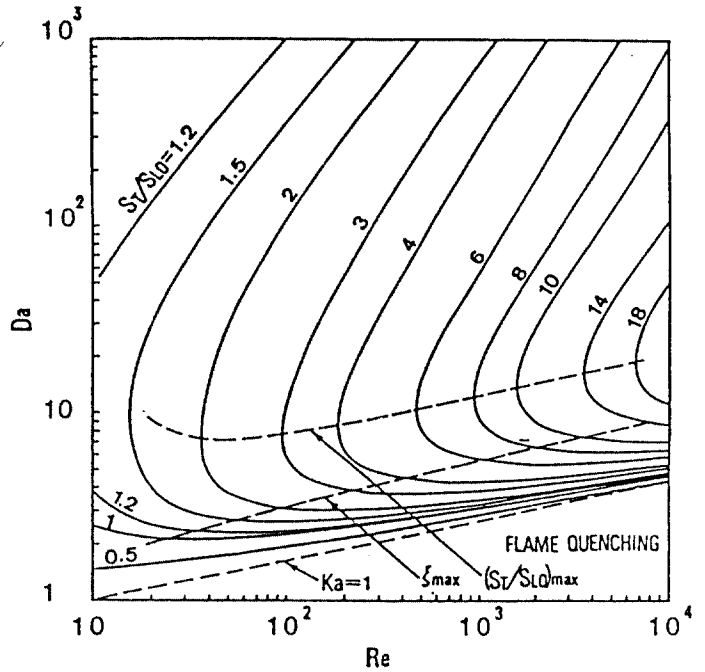
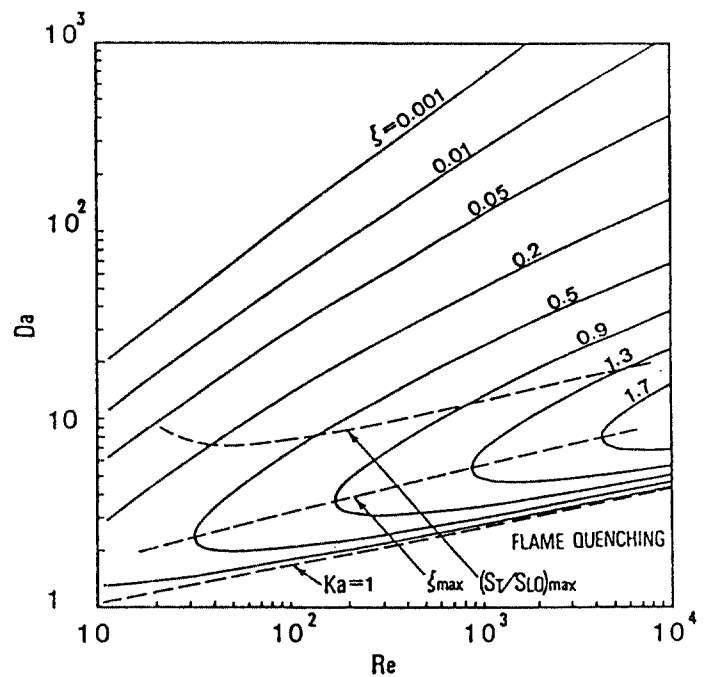


Fig. 2 Relations between the $Re-Da$ and $L/\eta_0-u'/S_{L0}$ coordinate planes

연속적인 전화염소면과 그 뒤에 존재하는 균도상 화염소면으로 구성되고, 또 국소화염소면에서의 총류연소속도는 화염소면의 신장에 의해 저하된다고 생각하여 난류연소속도와 화염구조를 동시에 설명할 수 있는 예혼합 난류연소모델을 제안하였다. 이 모델은 균도상 화염(Reactant islands)과 화염면의 자기상사성(Fractal flame surfaces)을 가정하고 있으므로 RIFF모델이라고도 한다.



(a) Turbulent burning velocity



(b) Flame structure parameter

Fig. 3 Burning velocity and flame structure diagrams of the RIFF model

RIFF모델에 의하면 무차원 난류연소속도 S_T/S_{L0} 및 화염구조 파라미터 ξ 는 각각 다음 식으로 계산된다.

$$S_T/S_{L0} = (1 - Ka) \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_i} \right)^{D_3-2} (1 + \xi) \quad (5)$$

$$\xi = 4 \frac{(\eta_0/L)}{(\eta_0/\delta_{L0})} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_i} \right)^{D_3-2} \frac{1 - Ka}{\exp(CS_{L0}/u') - 1} \quad (6)$$

여기서, ξ 는 균도상 화염과 전화염소면의 연소율의 비로, ξ 의 값이 커질수록 화염구조가 더욱 분산화됨을 의미한다. 또, D_3 는 프랙털 차원(Fractal Dimension)으로서 u'/S_{L0} 의 함수로 주어지고, Ka 와 ϵ_0/ϵ_i 역시 Re 및 Da 의 함수로 나타낼 수 있다. 한편, C 는 모델 정수로 4.8의 값이며 δ_{L0}/η_0 의 값은 탄화수소 혼합기에 대하여 약 4.5이다.

따라서, 화염구조 파라미터 ξ 와 무차원 난류연소속도 S_T/S_{L0} 및 그 외의 화염구조에 관한 정량적인 파라미터를 Fig. 3과 같이 $Re-Da$ 평면에 나타낼 수 있다.

3. 토모그램에 의한 난류화염구조의 관찰

3.1 온도상승에 따른 Kolmogorov 길이척도의 변화

온도상승에 따른 Kolmogorov 길이척도의 변화를 고려하기 위하여 Fig. 4와 같은 난류구조를 생각하고 다음과 같이 가정한다.

(1) 와(Eddy)는 일정한 각속도로 강제회전하며 그 원주속도는 난류강도 u' 와 동일하다.

(2) 와는 반경방향으로만 팽창하고 공간적분척도 L 은 변화하지 않는다.

위와 같은 가정아래 각운동량 보존법칙과 질량 보존법칙을 적용한다. 먼저, 강제 와이므로 Fig. 5 (b)와 같은 와상의 유체요소의 원주속도 v 는

$$v = U_1(r/R_1) \quad (7)$$

따라서, 와의 반경이 R_1, R_2 일 때의 각운동량 P_1, P_2 는 각각

$$P_1 = \int_0^{R_1} \rho_1 d\theta \left(\frac{U_1}{R_1} \right) r^3 dr = d\theta \frac{\rho_1 U_1 R_1^3}{4} \quad (8)$$

$$P_2 = d\theta \frac{\rho_2 U_2 R_2^3}{4} \quad (9)$$

로 주어지며 각운동량 보존법칙에 의해

$$U_2/U_1 = (\rho_1/\rho_2)(R_1/R_2)^3 \quad (10)$$

한편, 질량보존법칙에 의해

$$R_1/R_2 = (\rho_2/\rho_1)^{0.5} \quad (11)$$

가정에 의해 $U_1 = u'$ 이므로 식(11)을 식(10)에 대입하면

$$U_2 = u'(\rho_2/\rho_1)^{0.5} \quad (12)$$

따라서, 반경이 R_2 인 와의 난류에너지 감쇠율 ϵ_2 는

$$\epsilon_2 = \epsilon_1(\rho_2/\rho_1)^{1.5} \quad (13)$$

그러므로 온도상승에 따른 Kolmogorov 길이척도의 변화는

$$\frac{\eta_{K2}}{\eta_{K1}} = \left\{ \frac{(\nu_2/\nu_1)^3}{(\rho_2/\rho_1)^{1.5}} \right\}^{0.25} \quad (14)$$

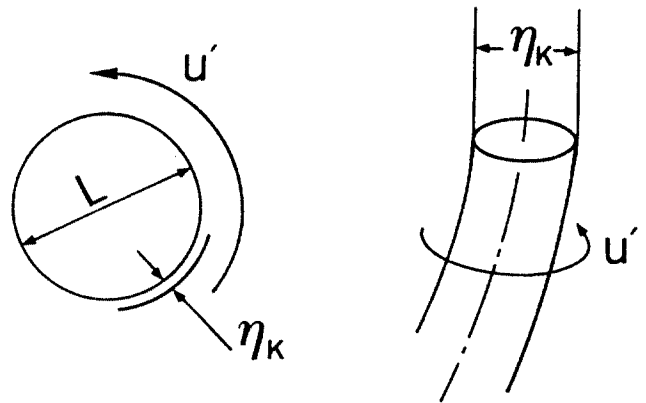


Fig. 4 Structure of turbulence

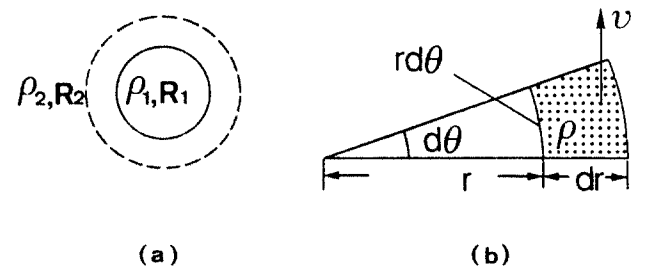


Fig. 5 Application of mass conservation and angular momentum conservation : (a) mass conservation, (b) angular momentum conservation

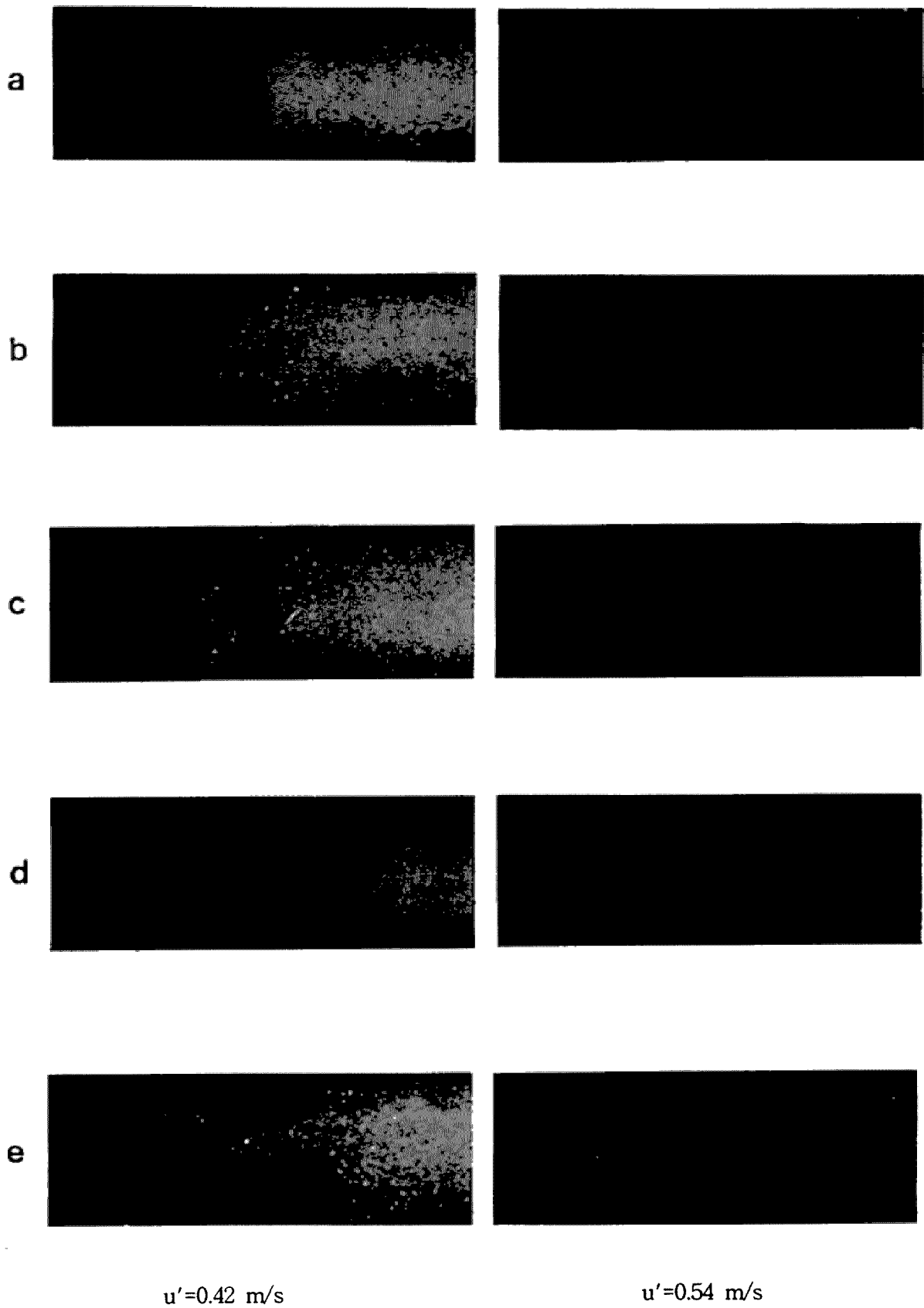


Fig. 6 Tomograms of turbulent flame for mixture 33-P10-30

3.2 토모그램에 의한 화염구조의 관찰

화염구조의 관찰에 이용한 혼합기는 2종류의 프로판 인공공기 혼합기이며, 그 조성은 Table 1과 같다. Table 1에서 η_0 는 층류화염의 예열역 두께, ϕ 는 당량비, ν 는 혼합기의 동점도, T_b 는 정압 단열 화염온도이다.

Table 1. Properties of mixtures used

MIXTURE	MOLAR FRACTION				ϕ	S_{L0}	δ_{L0}	η_0	T_b	$\nu \times 10^7$
	C ₃ H ₈	O ₂	N ₂	He						
24-P10-38	1.0	5.0	22.0	2.0	1.0	0.24	0.38	0.095	2089	1.51
33-P10-30	1.0	5.0	20.0	2.0	1.0	0.33	0.30	0.069	2168	1.50

Fig. 6은 혼합기 33-P10-30, 난류강도 u' 가 각각 0.42 m/s, 0.54 m/s일 때 전파화염의 측면(직각방향)에서 촬영한 토모그램의 한 예를 나타낸 것⁸⁾으로, 난류강도가 동일한 조건에서도 화염전파속도의 편차에 의해 각각 다른 화염구조가 관찰되었다. 토모그램에 있어서 어두운 부분은 기연가스, 밝은 부분은 미연혼합기를 나타내며 이 명암은 산란입자의 공간 밀도차에 의한 것이다. Fig. 6으로부터, 화염면의 왜형(歪形)의 정도는 난류강도가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다. 한편, 기연가스 쪽으로 파고 들어가는 미연혼합기의 척도는 약 1mm~2mm로, 1000K 정도에서의 Kolmogorov 척도가 상온에서의 값보다 약 8 배 정도 증가하는 계산 결과(3.1 참조)와 잘 일치하고 있다. 그러나, 각 토모그램의 산란광 강도의 비교에 의하면, 휘감겨 들어가는 미연혼합기의 온도는 그만큼 높지 않은 것으로 생각되기 때문에, Kolmogorov 척도와와의 관련성에 대해서는 보다 상세한 검토가 필요하다.

Fig. 6에서 기연가스와 화염면에 둘러 쌓인 미연혼합기피의 존재도 관찰할 수 있다.

이 결과로부터, 적어도 2차원 단면에서는 균도상 화염영역의 존재가 확인되었다고 할 수 있다.

4. Re-Da 평면에서의 연소영역의 고찰

4.1 Kido등이 제시한 연소영역과의 비교

Kido등^{7,10)}이 제시한 연소영역과 실제 화염구조와의 대응관계를 밝히기 위하여 토모그램에 의한 관찰 결과를 Fig. 7과 같이 Re-Da 평면에 나타내었다.

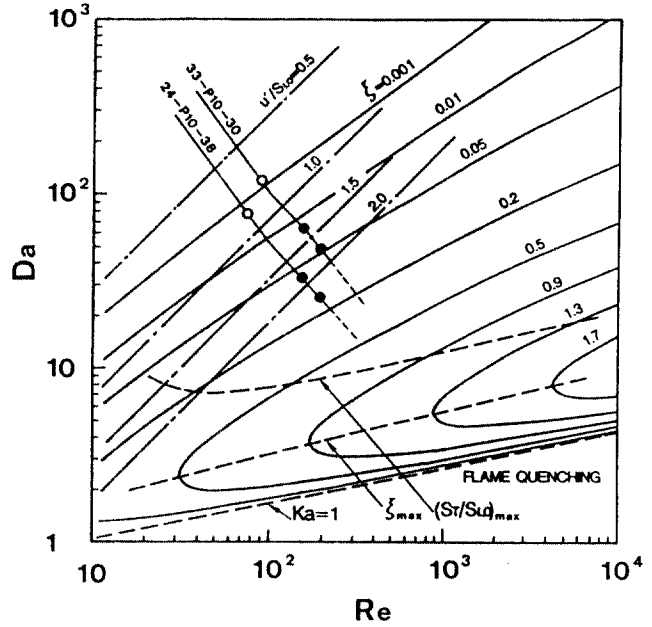


Fig. 7 Comparison of the experimental results with flame structure parameter by the RIFF model

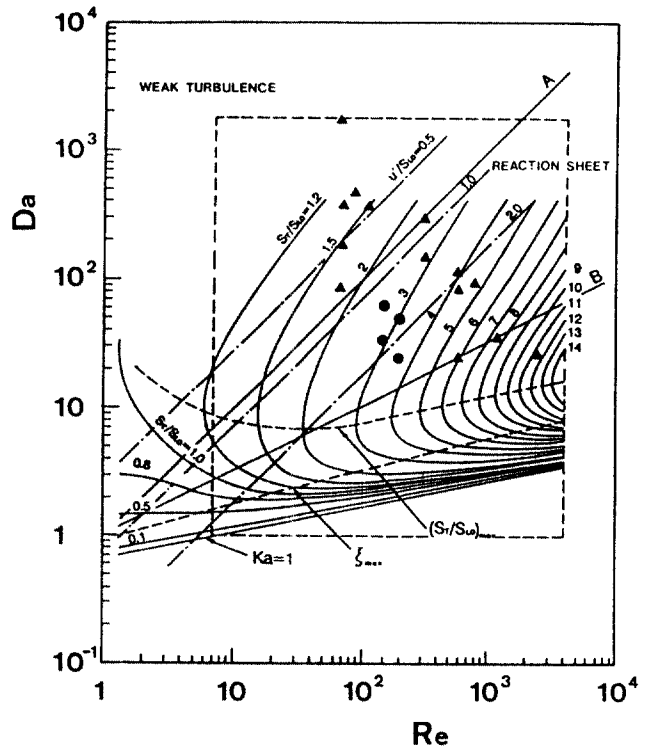


Fig. 8 Comparison of the experimental results with combustion regimes specified by Abraham et al.

또, 무전원 정전탐침법에 의한 난류화염구조의 계측 결과도 함께 나타내었다. Fig. 7에서 "○"는 정전탐침법에 의해 난류화염영역에서의 화염소면수가

3개 이상으로 천이하는 u'/S_{L0} 의 최소값으로, 군도상 화염이 발생할 수 있다고 판단되는 경계를 나타내며 그 값은 0.7로 보고되었다⁹⁾. 한편, “●”는 레이저 토모그래피에 의해 군도상 화염이 관찰된 u'/S_{L0} 의 값이다. 정전탐침법에 의한 화염구조의 예측결과에 대해서는 Fig. 6의 관찰결과로부터 난류화염영역내에 군도상 화염이 존재하지 않아도 3개 이상의 화염소면수가 검출될 가능성이 있음을 알 수 있다. 따라서, 주름상 층류화염영역과 군도상 화염영역의 천이경계에서의 u'/S_{L0} 의 값은 약 1.5임을 확인할 수 있다.

Kido등은 RIFF모델에 의한 화염구조선도에서 군도상 화염의 발생범위를 $\xi=0.01$ 의 선에서 $(S_T/S_{L0})_{max}$ 의 선까지의 영역으로 하고 있다. Fig. 7로부터, RIFF모델에 의한 화염구조의 예측결과는 토모그래피에 의한 화염구조의 관찰결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4.2 Abraham등이 제시한 연소영역과의 비교

Abraham등¹¹⁾은 $Re-Da$ 평면에 몇 개의 연소영역과 내연기관의 실제 운전영역을 제시하였다.

Fig. 8은 Abraham등이 제시한 연소영역을 Kido등이 나타낸 난류연소속도선도 위에 옮긴 것이다.

Fig. 8에서 A로 표시한 직선은 $u'/S_{L0}=1$ 의 조건에 대응하지만, Abraham등은 Prandtl 수를 1로 하고 Kido등은 0.7로 하였기 때문에 약간의 차이를 보인다. B로 표시한 직선은 $\eta_K/\eta_0=1$ (본 연구에서의 기호로 수정함 ; Abraham등은 η_K/δ_{L0} 로 나타내었음)의 조건에 대응한다. 또, 파선으로 둘러싸인 부분은 내연기관의 실제 운전영역이며, “▲”는 실제 엔진에서의 실험점을 나타낸다. 한편, “●”는 본 연구에서의 실험점으로 레이저 토모그래피에 의해 군도상 화염의 존재가 관찰된 곳이다.

Fig. 8로부터, 본 연구에서의 실험범위는 내연기관의 실제 운전영역내에 있음을 알 수 있다. 또, 군도상 화염이 발생하는 u'/S_{L0} 의 값이 약 1.5인 것으로부터, Fig. 8에서 왼쪽 위 7점의 “▲”는 $u'/S_{L0}=1.5$ 의 선보다 위쪽에 위치하고 있으므로 그곳에서의 화염에는 군도상 화염이 아직 발생되지 않았음을 추측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 화염구조선도에 이용되는 좌표계 ($Re-Da$, $u'/S_{L0}-L/\eta_0$ 및 $u'/S_{L0}-\eta_K/\eta_0$ 좌표계)를 상호 변환함으로써 연소속도와 화염구조에 대한 각각의 연구결과를 동일한 좌표계에서 비교 검토할 수 있었다.
- 2) 기연가스쪽으로 휘감겨 들어 가는 미연혼합기의 척도는 약 1mm~2mm로, 이것은 상온에서의 Kolmogorov 길이척도의 약 8 배 정도에 상당하였다.
- 3) Kido등과 Abraham등이 제시한 연소영역은 토모그래피에 의한 화염구조의 관찰결과와 잘 일치하였다.
- 4) 주름상 층류화염영역과 군도상 화염영역의 천이경계에서의 u'/S_{L0} 는 약 1.5였다.
- 5) 본 연구에서의 실험범위는 내연기관의 실제 운전영역내에 있으며 엔진의 연소영역에도 군도상 화염영역이 존재할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

1. Abraham J., Williams F. A. and Bracco F. V., "A Discussion of Turbulent Flame Structure in Premixed Charges", SAE Paper, No. 850345, 1985
2. Peters N., "Length and Time Scales in Turbulent Combustion", Turbulent Reactive Flows, (Borghi, R. and Murthy, S.N.B. Eds.), Springer-Verlag, pp. 242~256, 1989
3. Abdel-Gayed R. G., Bradley D. and Lung F. K., "Combustion Regimes and the Straining of Turbulent Premixed Flames", Combust. Flame Vol. 76, p. 213, 1989
4. Barral D. R. and Lefebvir A. H., "The Structure and Propagation of Turbulent Flames", Proc. R. Soc., Land., A344, p. 217, 1975
5. Kido H., Wakuri Y. and Murase E., "Measurements of Spatial Scales and a Model for Small-Scale Structure of Turbulence in an Internal Combustion Engine", Proc. R. Soc. Lond., ASME-JSME Thermal Engrg. Joint Conf., Vol. 4, p. 191, 1993
6. Kido H., Huang S. and Nakashima K., "A Premixed Turbulent Flame Structure Model Having Reactant Islands and Fractal Flame Surfaces (Formulation and Test of the Model)" JSME Int. J., Ser. II, Vol. 34, p.

- 509, 1991
7. Kido et al., "A Premixed Turbulent Flame Structure Model having Reactant Islands and Fractal Flame Surfaces (General Correlation Between Turbulent Burning Velocity and Flame Structure)", JSME(in Japanese), Vol. 58, No. 548, p. 231, 1992
 8. Kim J. H. and Ahn S. K., "Structure of Premixed Turbulent flames Determined by Laser Tomography", Proc., KSAE, Vol. II, p. 321, 1995
 9. Kim J. H. and Ahn S. K., "A Study on the Structure of Premixed Turbulent Propagating Flames Using a Microprobe Method", Trans. KSAE, Vol. 3, No. 6, p. 78, 1995
 10. Kido H. and Huang S., "Comparison of Premixed Turbulent Burning Velocity Models Taking Account of Turbulence and Flame Spatial Scales", SAE Paper, No. 930218, 1993