

# 부족성분 확산계수의 영향을 고려한 난류연소속도의 스펙트럼 모델

김 준 효

목포해양대학교

(1997년 6월 28일 접수)

## Spectral Model of Turbulent Burning Velocity Taking Account of the Diffusivity of Deficient Reactant

Jun - Hyo Kim

Mokpo National Maritime University

(Received June 28, 1997)

### Abstract

The formerly proposed spectral model of turbulent burning velocity is refined for nonstoichiometric hydrocarbon mixtures. Refinements are made in regard to the following two points : (1) an effect of the diffusivity of deficient reactant on the turbulent burning velocity and (2) consideration of increasing laminar flame thickness with a decrease in the laminar burning velocity. A comparison between the predicted turbulent velocities and the measured ones is made. The predictions by the refined spectral model agree quantitatively well with the experimental results in the regime of practical equivalence ratio, but not in the high and low equivalence ratio regime.

### 1. 서 론

내연기관에 있어서 예혼합기의 난류연소속도는 기관성능을 좌우하는 주요한 인자로, 그 정량적인 예측은 연소모델의 작성상 중요한 과제이다. 따라서, 예혼합 난류연소속도에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1)~10)</sup>. 그러나, 최근의 연구<sup>5)~9)</sup>를 제외한 대부분의 난류연소속도 모델은 한정된 실험조건에서의 측정결과를 토대로 하여 매우 간단하게 작성되었기 때문에, 동일한 혼합기에 대한 예측결과가 몇 배나 차이가 나는 결과를 초래하게 된다. 한편, Kido et al.<sup>5)</sup>은 난류의 스펙트럼을 고려한 난류연소속도 모델을 제안하고, 약 30 종류의 이론

혼합기(당량비  $\phi = 1.0$ )에 대한 난류연소속도의 예측결과와 실험결과가 정량적으로도 잘 일치함을 보였다. 난류연소속도의 스펙트럼 모델은 기본적으로 화염면의 두께가 난류의 평균적인 공간척도에 비해 충분히 작은 것으로 가정하고 있다. 그러나, 연소 실험결과에 의하면 이론혼합기가 아니면서 층류연소속도가 작은 혼합기의 경우, 난류에 의한 연소속도의 증가 비율이 층류연소속도가 빠른 혼합기보다 큰 값을 나타내었다<sup>11)</sup>. 이와 같은 조건에서는 층류화염의 반응역 두께가 난류의 공간척도에 대하여 무시할 수 없는 크기를 가지며, 공간척도가 작은 와(Eddy)에 의하여 화염면의 내부에서 난류혼합이 촉진될 것으로 생각되기 때문에, 이

큰바 주름상 층류화염(Wrinkled Laminar Flame or Corrugated Laminar Flame) 모델만으로 연소속도의 증가를 설명하기는 곤란하다. 본 연구에서는 탄화수소계 연료의 가연 당량비(Flammable Equivalence Ratio)의 전범위를 만족하는 난류연소속도 모델의 작성을 목적으로, 부족성분의 확산계수 및 층류연소속도의 감소에 따른 층류화염의 반응역 두께의 영향을 고려한 난류연소속도의 스펙트럼 모델을 제안하고, 본 모델에 의한 예측결과와 실험결과를 비교함으로써 모델의 유효성을 확인하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 연소장치 및 난류장의 특성

실험에 이용한 연소용기는 내경 약 125 mm의 구형에 가까운 연소실로, 마주 보는 2 면에 직경 80 mm의 관측 창이 있으며, 다른 4 면에는 난류발생용 다공판과 원심 팬을 설치하였다. 연소용기

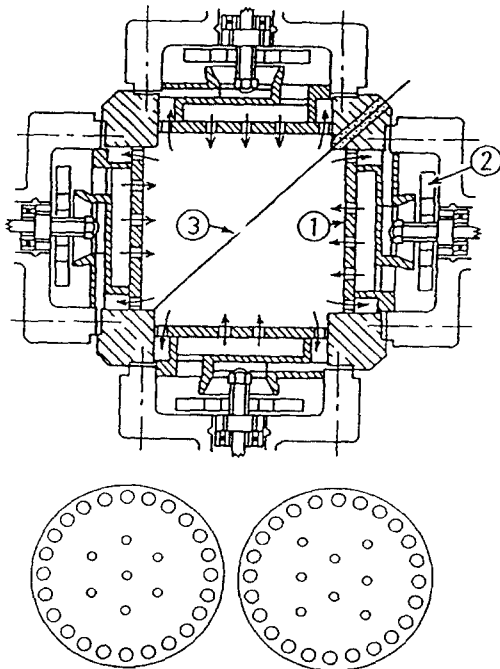


Fig. 1 Schematic diagrams of combustion chamber and perforated plates 1; Perforated plate, 2; Centrifugal fan, 3; Ignition plug

와 다공판의 개요는 Fig.1과 같다. 분압충전법으로 용기내에 주입된 혼합기는 각 원심 팬의 전방에 설치한 다공판을 통과하여 연소실의 중심부에서 충돌하고, 그곳에서 정상적이고 거의 등방적인 난류장을 형성한다. 난류강도는 팬의 회전속도로 변화시켰다.

난류장의 특성은 2 대의 정온도형 열선유속계와 형상이 다른 3 종류의 열선 프로브를 사용하여 공기에 대해 계측하였다<sup>3,5,10</sup>. Fig.2는 난류강도  $u'$  와 팬 회전속도와의 관계를 나타낸 것으로,  $u'$  는 팬 회전수가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 난류강도  $u'$  에 대한 횡방향 적분공간척도  $L_g$ 와 Taylor 미세척도  $\lambda_g$ 를 Fig.3에 나타낸다. 횡방향 적분 공간척도  $L_g$ 는 등방성 난류로 가정하여 난류의 공간상관함수로부터 구하였다. 한편, Taylor 미세척도  $\lambda_g$ 는 얻어진 상호상관함수에서 계측점의 간격이 작은 경우에 대해 정점부근의 함수 근사로 구하였다. 그러나, 프로브 간격은 너무 작게 할 수 없기 때문에,  $\lambda_g$ 의 계측에는 약간의 오차가 포함될 가능성이 있다.

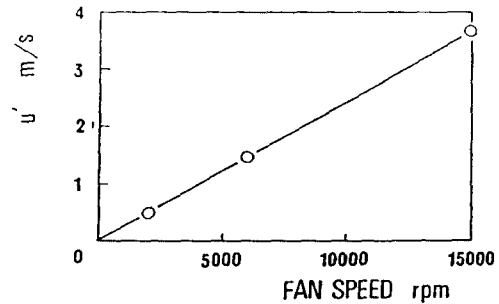


Fig. 2 Turbulence intensity vs. fan speed

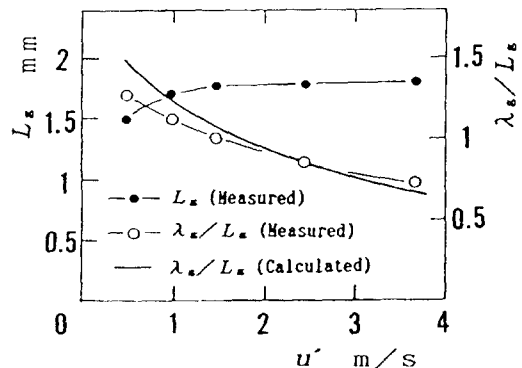


Fig. 3 Measured and calculated spatial scales of turbulence vs. turbulence intensity

## 2.2 혼합기의 조성파 실험조건

실험에 이용한 혼합기는 3 종류의 탄화수소계 연료(메탄, 프로판, 에탄)와 인공공기를 혼합한 것이며, 그 조성은 Table 1과 같다. Table 1에서  $S_{LO}$ 는 층류연소속도,  $\delta_{LO}$ 는 층류화염의 반응역 두께,  $\eta_0$ 는 층류화염의 예열역 두께,  $\phi$ 는 당량비,  $\nu$ 는 혼합기의 동점도이다.

즉, 식 (1)의 우변 제 1 항에서, 층류연소 상태에서의 연소속도  $S_{LO}$ 가 와(Eddy)에 의해 국소 층류연소속도  $S_L$ 로 변화하는 것을 고려하고 있다. 또한, 화염의 반응역 두께도 공간척도가 작은 와(Eddy)에 의해  $\delta_{LO}$ 에서 국소 층류화염의 반응역 두

Table 1 Properties of mixtures used

	MIXURE	COMPOSITION	$\phi$	$S_{LO}$	$\delta_{LO}$	$\eta_0 \times 10^2$	$\nu \times 10^5$
				m/s	m/m	mm	m <sup>2</sup> /s
I	43 - M05	CH <sub>4</sub> +4O <sub>2</sub> +6.47N <sub>2</sub> +0.93He	0.5	0.431	0.290	5.79	1.65
	43 - M05	CH <sub>4</sub> +2O <sub>2</sub> +7.17N <sub>2</sub>	1.0	0.429	0.246	4.93	1.52
	43 - M05	CH <sub>4</sub> +1.5O <sub>2</sub> +4.62N <sub>2</sub>	1.33	0.423	0.251	5.01	1.53
II	43 - M05	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +10O <sub>2</sub> +17.02N <sub>2</sub> +3.71He	0.5	0.432	0.294	5.87	1.61
	43 - M05	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +5O <sub>2</sub> +17.06N <sub>2</sub> +0.36He	1.0	0.436	0.226	4.53	1.43
	43 - M05	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +3.75O <sub>2</sub> +12.28N <sub>2</sub> +1.6He	1.33	0.436	0.260	5.19	1.50
III	43 - M05	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +7O <sub>2</sub> +11.97N <sub>2</sub> +2.33He	0.5	0.438	0.288	5.76	1.62
	43 - M05	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +3.5O <sub>2</sub> +13.03N <sub>2</sub> +0.27He	1.0	0.429	0.239	4.79	1.46
	43 - M05	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +2.63O <sub>2</sub> +9.06N <sub>2</sub> +0.76He	1.33	0.423	0.261	5.21	1.50

한편, 연소실험에서의 난류연소속도  $S_T$ 의 측정 은, 혼합기를 상온( $T_0=295\sim 300\text{ K}$ ), 상압 ( $P_0=0.101\text{ MPa}$ )의 조건하에서 분압충전법으로 연소실 내에 주입한 후, 소정의 난류강도를 가하여 연소실 중심에서 점화시키고, 그 때의 연소압력을 계측하였다. 연소압력  $P$ 가  $P-P_0=14.7\text{ kPa}$ 로 되었을 때의 난류연소의 압력상승율  $(dP/dt)_T$ 와 같은 압력에 대한 층류연소의 압력상승율  $(dP/dt)_L$ 과의 비를 구하였다. 이 비는 난류연소속도  $S_T$ 의 층류연소속도  $\delta_{LO}$ 에 대한 비와 동일한 것으로 생각된다<sup>12)</sup>.

## 3. 난류연소속도 스펙트럼 모델

### 3.1 난류연소속도의 계산식

부족성분 확산계수의 영향을 고려한 난류연소속도 모델은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{S_T}{S_{LO}} = 2\sqrt{3} \frac{u'}{S_{LO}} \left( \frac{S_L}{S_{LO}} \right) \int_0^k (16\delta k)^2 e^{-16\delta k} E(k) \left( \frac{3}{2} u'^2 \right) dk + 16\delta \int_0^k e^{-16\delta k} dk \quad (1)$$

계  $\delta$ 로 변화하는 것을 고려 하고 있다.

한편,  $E(k)$ 는 난류의 에너지 스펙트럼이고,  $k$ 는 난류의 파수(Wave Number)이며 적분상한파수  $k_c$ 는 그 파수 이상의 작은 와(Eddy)는 이미 화염면을 형성할 수 없다고 생각하는 것이다. 탄화수소계 연료의 경우,  $\delta_{LO}$ 와  $k_c$ 는 각각 (2)식과 (3)식으로 주어 진다<sup>5)</sup>.

$$\delta_{LO} = 5.0 \times a / S_{LO} \quad (2)$$

$$k_c = 0.26 \sqrt{Da} / \delta_{LO} \quad (3)$$

식 (2)에서,  $a$ 는 미연혼합기의 열확산율로 Wilke의 반경험식<sup>15)</sup>과 혼합기의 정압비열  $C_p$  및 밀도  $\rho$ 로부터 계산할 수 있다. 식 (3)의  $Da$ 는 담펠러 수로서 난류혼합 특성시간의 화학반응 특성시간에 대한 비율을 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$Da = \frac{S_{LO} L_E}{u' \delta_{LO}} \quad (4)$$

한편, 난류의 에너지 스펙트럼  $E(k)$ 는 다음과 같

이 주어진다.

$$E(k) = \frac{c_1}{k_m} \left( \frac{k}{k_m} \right)^{n_1} \exp \left[ -c_2 \left( \frac{k}{k_m} \right)^{n_2} \right] \quad (5)$$

(5)식에서  $k_m$ 은 에너지 스펙트럼이 최대일 때의 파수이며, 측정된  $L_g$ 를 이용하여 (6)식에 의해 구할 수 있다.

$$L_g = \frac{\pi}{4u'^2} \int_0^\infty \frac{E(k)}{k} dk = \frac{3\pi}{8k_m} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^{1/n_2} \left( \frac{n_1+1}{n_1} \right) \Gamma \left( 1 + \frac{n_1}{n_2} \right) / \Gamma \left( 1 + \frac{n_1+1}{n_2} \right) \quad (6)$$

(6)식의  $\Gamma$ 는 Gamma 함수이다. 한편, 계수  $c_1$ ,  $n_1$ ,  $c_2$  및  $n_2$ 는 난류 에너지가  $(3/2)u'^2$ 으로 주어지고, 또 파수  $k$ 가 작은 영역에서의  $E(k)$ 는  $k^4$ 에 비례한다<sup>15)</sup>고 하는 조건으로부터 각각 다음과 같이 계산된다<sup>5)</sup>.

$$c_1 = \frac{3}{2} u'^2 (n_1 + 1) c_2^{(n_1+1)/n_2} / \Gamma \left( 1 + \frac{n_1+1}{n_2} \right) \quad (7)$$

$$n_1 = 4.0 \quad (8)$$

$$c_2 = n_1 / n_2 \quad (9)$$

$$n_2 = 16.2 \left( \frac{u' L_g}{\nu} \right)^{-2/3} \quad (10)$$

이상의 관계식을 이용하여, 식 (1)을 수치적분함으로써 난류연소속도  $S_T$ 를 계산할 수 있다.

### 3.2 부족성분 확산계수의 영향

반응영역에서의 부족성분의 확산계수가 난류연소속도에 미치는 영향이 큰 것은 Kido et al.<sup>11)</sup>에 의한 연구에서 밝혀졌다. 또, 전술한 바와 같이, 층류연소속도가 감소함에 따라 층류화염의 반응역 두께가 두꺼워지면, 공간적으로 크기가 작은 와의 난류혼합에 의하여 연소속도가 증가할 것으로 생각된다. 따라서, 국소 층류연소속도  $S_L$ 는 위의 2가지 요인에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$S_L = S_{L0} \times \xi_1(\phi) \times \xi_2 \left( \frac{\delta_{L0}}{L_g} \right) \quad (11)$$

(11)식에서,  $\xi_1(\phi)$ 는 부족성분의 확산계수의 영향을 나타내고,  $\xi_2(\delta_{L0}/L_g)$ 는 층류화염의 반응역

두께  $\delta_{L0}$ 가 난류의 적분공간척도  $L_g$ 에 비해 무시할 수 없는 크기로 된 경우의 영향을 고려한 것이다. 즉, 국소 층류화염의 반응역 두께  $\delta$ 는, 와에 의해 국소 층류연소속도가  $\xi_1(\phi)$  배로 될 때 층류화염의 반응역 두께는  $1/\xi_1(\phi)$ 로 변화되는 것으로 하여 (12)식과 같이 근사하였다. 한편,  $\xi_2(\delta_{L0}/L_g)$ 는  $\delta_{L0}$ 가 상당히 큰 경우에 대하여 화염면 내부에서의 난류혼합에 의한 연소속도의 증가를 고려한 것이며,  $\xi_2$ 의 영향은 없는 것으로 가정하였다.

$$\delta = \delta_{L0} / \xi_1(\phi) \quad (12)$$

$\xi_1(\phi)$ 에 대해서는, Fig.4의 (a)에 보이는 난류연소속도의 실험결과로부터 아래와 같이 근사하였다.

당량비  $\phi < 1.0$ 의 경우,  $\xi_1(\phi)$ 는 (13)식과 같이 주어진다.

$$\xi_1(\phi) = \left( \frac{15}{11} \cdot \frac{D_F}{D_O} \right)^{0.76(1-\phi)} \quad (13)$$

여기서,  $D_F$ 와  $D_O$ 는 다성분 혼합기에 있어서 각각 연료 및 산소의 확산계수이다. (13)식은  $D_F/D_O$ 가 약 0.73의 값을 가질 때 확산계수 즉 연료의 분자량의 영향은 없어지고, 또 당량비가 1.0에서 벗어날수록 그 영향이 커지는 것을 나타낸다.

한편,  $\phi > 1.0$ 의 경우에는,

$$\xi_1(\phi) = \left( \frac{16}{25} \cdot \frac{D_O}{D_F} \right)^{0.86(1-\phi)} \quad (14)$$

로 주어진다.

탄화수소계 연료의 다성분 혼합기에 있어서, 산소의 확산계수  $D_O$ 의 값은 그다지 변하지 않기 때문에  $\xi_1(\phi)$ 에 대한 영향은 연료의 확산계수  $D_F$  쪽이 결정적으로 작용하게 된다.

### 3.3 층류화염의 반응역 두께에 의한 영향

층류화염의 반응역 두께의 영향을 고려한  $\xi_2(\delta_{L0}/L_g)$ 는, 당량비의 영향을 배제하기 위하여,  $\phi = 1.0$ ,  $S_{L0} = 0.428$  m/s,  $\delta_{L0} = 0.561$  mm의 특성을 가진 메탄 연료에 대한 난류연소속도의 실험결과<sup>5)</sup>로부터 다음과 같은 근사식을 얻었다.

$$\xi_2 \left( \frac{\delta_{L0}}{L_g} \right) = \frac{1}{1.1} \exp \left( \frac{\delta_{L0}}{L_g} \right) \quad (15)$$

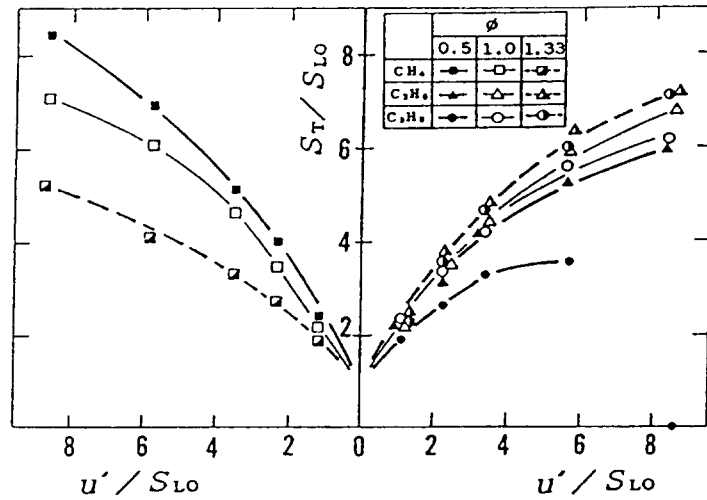
(15)식은 총류연소속도  $S_{L0}$ 가 작을수록 국소 총류연소속도  $S_L$ 에 미치는  $(\delta_{L0}/L_g)$ 의 영향이 커지게 됨을 나타낸다.

#### 4. 난류연소속도의 예측결과와 계측결과와의 비교

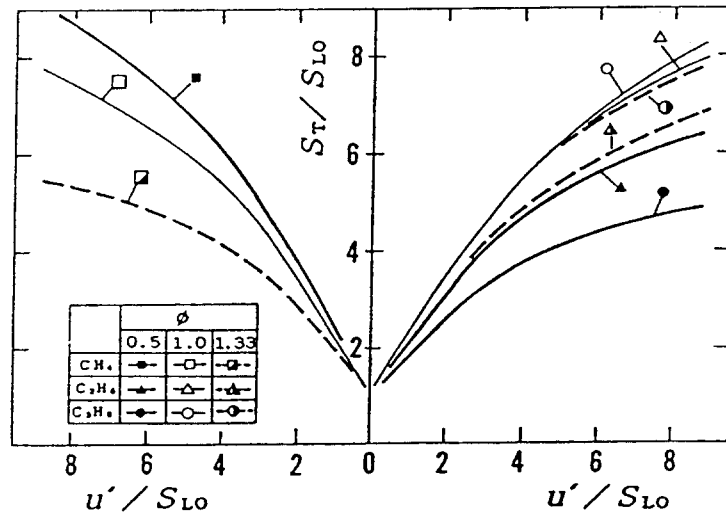
Fig.4는 총류화염의 반응역 두께가 거의 같은 경

우에 대한 난류연소속도의 예측결과와 계측결과를 나타낸 것이다. Fig.4로부터, 난류연소속도의 예측결과와 계측결과와 정량적으로도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

당량비  $\phi$ 에 대한 메탄과 프로판 공기혼합기의 총류연소속도 및 총류화염의 반응역 두께를 Fig.5에 나타낸다. Fig.5에서 알 수 있듯이,  $\phi = 1.1 \sim 1.3$ 의 경우를 제외하면 당량비가 1.0에서 벗어남



(a) Measured



(b) Calculated

Fig.4 Influences of the diffusivity of deficient reactant

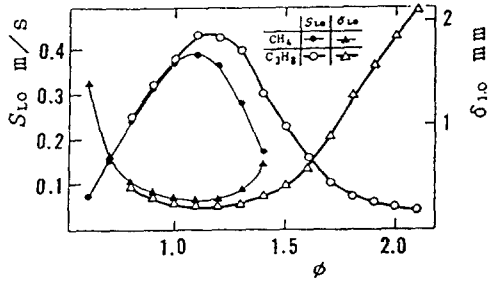
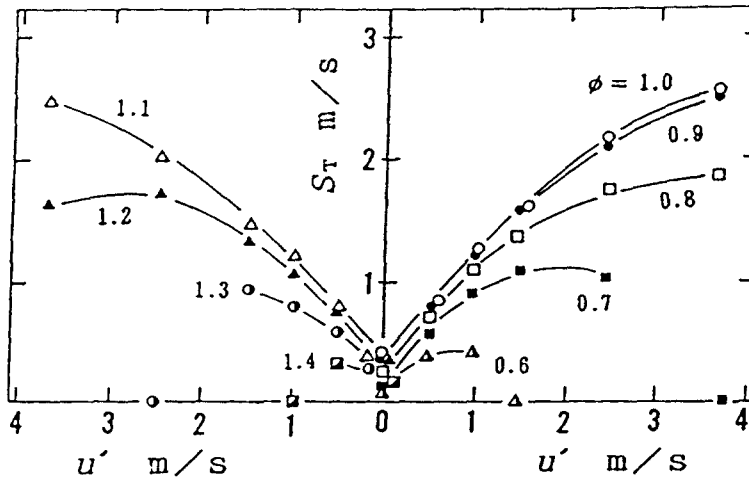


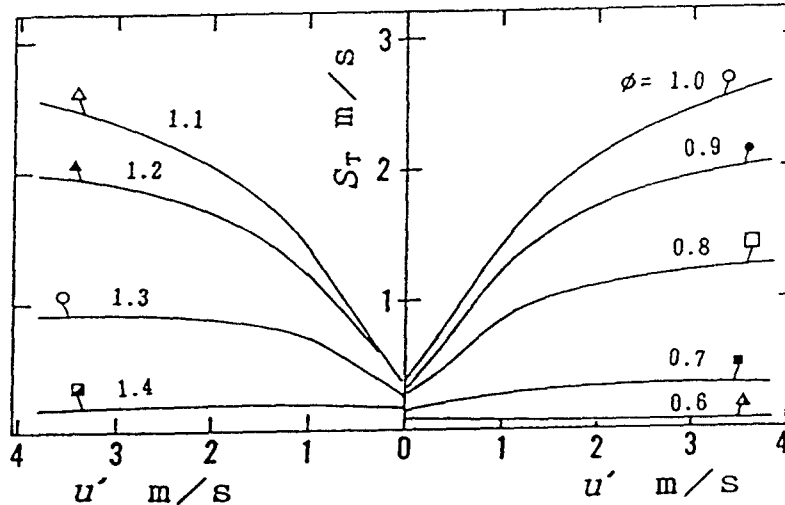
Fig. 5 Laminar burning velocity and flame thickness of mixtures

에 따라,  $S_{L0}$ 는 감소하며  $\delta_{L0}$ 는 증가하게 된다.

메탄과 프로판 공기혼합기에 대한 난류연소속도의 예측결과와 계측결과를 Fig.6 및 Fig.7에 각각 나타낸다. Fig.6 (a) 및 Fig.7 (a)에 있어서, 난류연소속도  $S_T = "0"$ 로 표시된 것은 그 난류강도에서는 화염전파가 불가능한 것을 의미한다. Fig.6과 Fig.7에서 알 수 있는 바와 같이, 프로판 공기혼합기에 비해 가연 당량비(Flammable Equivalence Ratio)의 범위가 좁은 메탄 공기혼합기의 경

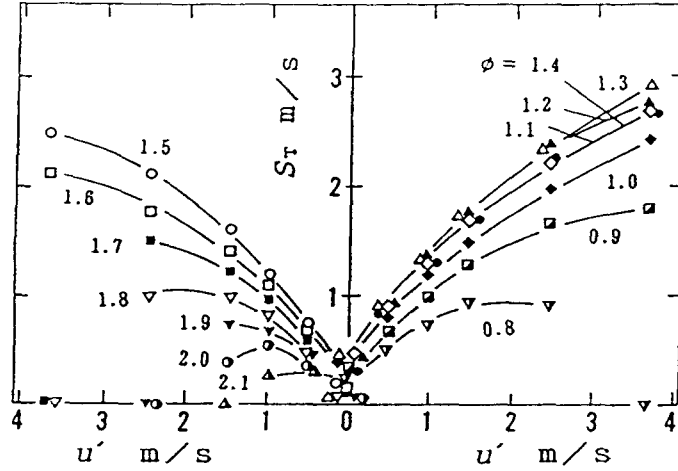


(a) Measured

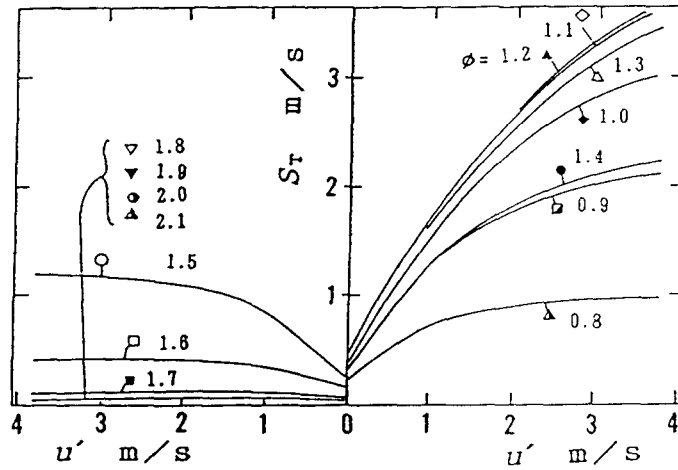


(b) Calculated

Fig.4 Influences of the diffusivity of deficient reactant



(a) Measured



(b) Calculated

Fig.4 Influences of the diffusivity of deficient reactant

우,  $S_{L0}$ 가 꽤 작아지는 조건을 제외하면 두 결과는 잘 일치하고 있다. 한편, 가연범위가 넓은 프로판 공기혼합기의 경우에는,  $S_{L0}$ 가 특히 작아지는 과농혼합기 쪽의 예측결과가 계측결과와 상당한 오차를 보이고 있다. 이 결과로부터,  $S_{L0}$ 가 작고 난류혼합이 상대적으로 강해지는 조건에서는, (12)식의 국소 층류화염의 반응역 두께  $\delta$ 도  $\xi_2(\delta_{L0}/L_g)$ 의 영향을 받고 있음을 예상할 수 있다.

그러나, 층류연소속도가 대단히 작은 경우를 제

외한 실용적인 당량비의 범위에서는, 난류연소속도의 예측결과와 계측결과와의 오차는 그다지 크지 않으므로, 본 모델의 유효성을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 탄화수소계 연료의 가연당량비의 전 범위에 대한 난류연소속도를 정량적으로 예측하기 위하여 난류연소속도의 스펙트럼 모델을

개량하고, 그 예측결과와 계측결과를 비교하였다. 그 결과, 실용적인 당량비의 범위에서는, 난류연소속도의 예측결과와 계측결과는 잘 일치하여 본 모델의 유효성을 확인할 수 있었다.

그러나, 층류연소속도가 대단히 작은 조건에서는 정성적으로 일치하지 않는 문제점도 있으므로, 앞으로 회박혼합기 영역뿐만 아니라 난류혼합이 지배적으로 되는 조건에서도 적용될 수 있도록 본 모델을 더욱 검토할 예정이다.

### 참고문헌

- 1) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H. (1975) : The Structure and Propagation of Turbulent Flames, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 344, 217.
- 2) Abdel - Gayed, R. G. and Bradley, D. (1976) : Dependence of Turbulent Burning Velocity on Turbulent Reynolds Number and Ratio of Laminar Burning Velocity to R.M.S. Turbulent Velocity, 16th Sympo. (Int.) on Combustion, 1725.
- 3) Kido, H., Ono, S, and Wakuri, Y. (1979) : On the Spectral Theory of Turbulent Combustion, Bull. JSME, Vol. 22, No. 166, 577.
- 4) Daneshyar, H. and Hill, P.G.(1987) : The Structure of Small - Scale Turbulence and Its Effect on Combustion in Spark Ignition Engines, Prog. Energy and Combust., Sci., Vol.13, 47.
- 5) Kido, H., Kitagawa, T., Nakashima, K. and Kim, J.H.(1992) : Refinement of the Spectral Model of Turbulent Burning Velocity; In the Case of Stoichiometric Mixtures, JSME Int. J., Ser. II, Vol.35, No.3, 421.
- 6) Gouldin, F. C. (1987) : An Application of Fractals to Modeling Premixed Turbulent Flames, Combust. and Flame, Vol. 68, No. 3, 249.
- 7) Yakhot, V. (1988) : Propagation Velocity of Premixed Turbulent Flames, Combust. Sci. and Tech., Vol. 60, 191.
- 8) Gouldin, F. C., Bray, K. N. C. and Chen, J. - Y. (1989) : Chemical Closure Model for Fractal Flamelets, Combust. and Flame, Vol. 77, 241.
- 9) Kido, H., Huang, S. and Nakashima, K.(1991) : A Premixed Turbulent Flame Structure Model Having Reactant Islands and Fractal Flame Surfaces; 1st Report, Formulation and Test of the Model, Trans. JSME, Vol.57, No.533, 346.
- 10) Kido, H., Wakuri, Y. and Nakashima, K. (1983) : Experiments and a Correlation of Turbulent Burning Velocities, Proc. 1983 ASME - JSME Therm. Engrg. Joint Conf., Vol. 4, 183.
- 11) Kido, H., Wakuri, Y. and Nakashima, K., and Kato, K (1989), An Improved Model of Turbulent Mass Burning Velocity, Memoirs of the Fac. Engrg. Kyushu Univ., Vol. 49, 229.
- 12) Babkin, V. S., Babushok, V.I. and Suyushev, V. A.(1978) : Dynamics of Turbulent Gas Combustion in a Closed Volume, Combust. Explo. and Shock Waves, Vol. 13, No. 3, 291.
- 13) Morgan, G. H. and Kane, W. R.(1953) : Some Effects of Inert Diluents of Flame Speeds and Temperatures, 4th Sympo. (Int.) on Combust., 313.
- 14) Strehlow, R. A.(1968) : Fundamentals of Combustion, International Textbook Company, 73.
- 15) Hinze, J. O.(1975) : Turbulence, 2nd ed., McGraw - Hill, 227
- 16) Baritaud, T. A.(1989) : Combustion and Fluid Dynamic Measurements in a Spark Ignition Engine; Effects of Thermochemistry and Velocity Field ; Turbulent Flame Speeds, SAE Paper, No. 892098.