

## 연소공학의 기초연구와 그 응용

### Fundamental Researches on Combustion and Applications

신 현 동\*  
H. D. Shin

#### 1. 머릿 글

연소공학 연구에 직접 또는 간접적으로 관여하는 연구자가 국내적으로 수년동안 급증하게 되었다. 이는 첫째 미국 국내에 있어서 열유체 연구분야중 연소공학이 차지하는 비중이 다소 커짐에 기인하며, 둘째로는 우리나라 연구자의 전체적인 수의 증가 그리고 마지막으로 국내 공업발전에 따른 산업의 다양화에 그 원인이 있는 것으로 추측된다. “연소 연구회”가 이미 결성되었으나 현재로서는 그 활동이 미미하지만 “The Combustion Institute”의 한국 지부의 역할도 겸하고 있으므로 금후의 활성화가 크게 기대된다.

지난 수년간 공업화의 추진과정에 있어서 소위 산학협조 체제의 구축을 정부 관련부서는 말할 나위 없고, 기업인 연구자 모두가 열심히 주장해왔다. 그 추진과정에서의 위 3자의 위상 및 주장은 각기 조금씩 달랐다. 관련부서는 기술정책의 구동(drive)을 목표로 하고 있었으며, 기업인은 현장에서의 기술적이고 충을 연구자가 직접 해결해 주길 원하였고, 연구자는 각 개인이 이때까지 스스로 접한 아주 특정한 분야의 연구에 집착하고자 하며 나아가서 그것을 토대로 더 넓은 공학적 시야를 갖게되길 희망하고 있었다.

상당수의 연구자는 좀 더 넓은 시야로 공학적인 문제에 접근하고자 하였으나 그들의 인식과 결과는 그렇게 합치되었다고 보기 어려웠다. 연소공학 연구의 한 분야만 보더라도, 정부의 기술정책과는 특별한 관계가 없었다고 볼 수 있다. 소위 정책적인 배려를 받을 만큼의 첨단성과 선진성이 결여되었다고 볼 수 있다. 한편 관련 기업은 대부분 중소기업으로서 외국으로부터의 직접적인 기술도입에 주로 의존하였으며, 실제로 기업의 성립여부가 이점에 달려 있었다고 해도 과언이 아닐 것이다.

연소가스를 동작유체(working fluid)로 쓰고 있는 제품을 생산하는 소위 대기업의 기술개발에 대한 태도는 당분간 큰 변화가 없으리라 짐작된다. 대기업의 질량적 비대성 때문에 이때까지 답습해온 기술도입의 방법과 그 실체를 쉽게 바꿀 수 없다는 이야기이다. 그러나 근자에 들어서 가스연료의 대량공급과 이와 관련된 산업의 여명기에 접어든 느낌이다. 이들 산업이 안고 있는 특징은 종전에 산업들과 다음과 같은 점에서 다르다고 볼 수 있다. 첫째, 가스연료의 특유의 장점인 유량 제어의 신속성 때문에 연소기의 소형화, 개별화가 급속히 진행될 것이며, 둘째로는 이에 따른 연소기에 대한 사용자의 각종 주문(예를들면, 공해기준 등)이 잇달을 것이며 마지막으로

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과, 부교수

로 이들 주문은 그 내용이 외국에서의 일괄 수입에 의한 생산으로는 해결이 어려운 것들이 많아질 것이다. 즉, 연소공학 관련 산업에서의 문제점제기(need)와 이를 해결해줄 수 있거나 이와 관련된 기초연구의 활성화(seed)가 충분히 가능해질 수 있다는 가정과 포부를 갖게 된다.

연소공학의 기초연구의 초보적인 일면을 소개하고 이런 초보적인 연구가 실제 공학적인 면에서 어떻게 쓰이고 또는 쓰일 수 있는가를 고찰해 보는 것이 본 글의 목적이며, 나아가서 국내연구 환경의 관점에서 볼 때 다소나마 기초연구를 응용하고자 하는 많은 연구자들에게 조금이나마 연구방향 설정에 도움이 될 것이다.

## 2. 연소공학 연구 목적

연소를 공업에 이용하는데는 그 관점에 따라 그 분류방법이 각양각색이다. 그중에서 연소공학을 열공학적으로 평가할 때는 연소가스를 직, 간접의 동작유체로 이해하는게 편하다. 즉 연소반응에 의한 동작유체의 체적변화를 동력으로 이용한다든가, 다른 동작유체의 가열을 위한 열 에너지 원(source)으로 이해한다는 것이다. 한편, 쓰레기의 소각 또는 자연분해가 어려운 고분자물질의 소각등 물질분해속도의 촉진에 연소가 이용된다고 보아야 할 경우도 있다. 또한 연료와 산화제의 조합으로 여러 형태의 연소방식이 얻어질 수 있다. 연료는 대부분이 수소로부터 탄소에 이르기까지의 소위 탄화수소계열이 주를 이루게 되며 이때의 산화제는 주로 공기를 이용하게 된다.

이와같은 연료와 산화제에서는 주로 생성물의 체적이 급격히 커지게 되며 이를 이용하여 공업적인 일을 화학적인 에너지로부터 얻어낼 수 있다. 그러나 어뢰의 추진기관에서와 같이 발열반응은 기관동력원으로 필요하나 연소생성물의 체적이 증가하면 소기의 목적을 달성할 수 없는 경우도 있다. 액체 금속을 공기 이외의 산화제로 써서 생성물의 체적감소를 노리면서 발열반응을 얻어낼 필요도 있다. 하

여든 어떤 이용 목적이든지 소정의 연소(발열)반응이 일어나는 곳 즉 연소실이 있게되며, 이에따라 입력조건과 출력조건이 주어지게 마련이다. 이와같은 연소조건 아래서 고려되어야 할 사항은 정하여진(주어진) 장소(크기)에서 최대한의 열량을 어떻게 얻어낼 수 있을 것인가, 그리고 배출되는 연소가스의 특성중 소위 공해물질을 어떻게 최소화할 수 있을가에 연소공학의 주 목적이 있게된다. 이와같은 최종 목표의 달성을 이룰려면 결국 연소과정을 좀 더 상세히 분해하여 각 과정의 기여도를 정립하여야 한다. 연소반응 과정 자체는 분자운동에 의한 현상이다. 손꼽을 수 있는 연소과정에서의 주된 현상(phenomena)은 반응대로부터의 열전달, 열분해(thermal pyrolysis), 연쇄반응 등을 들 수 있다.

연소반응과 이에 따른 각종 현상을 분리해 낼 필요가 있으며 이를 토대로 모델을 설정함으로써, 목적으로 하는 연소의 최적상태를 얻어 내기 위한 다양한 제어가 가능해질 것이다. 여기서의 현상이란 분자운동의 결합으로서 거시적으로 관찰되는 외형적 또는 분석적인 것을 총칭하는 것이다. 그리고 실제 연소기 설계 및 연소 제어를 위하여서는 분자운동을 지배 또는 제어하는 유체역학적, 열역학적인 물리량에 대한 모델을 설정하지 않으면 안된다. 예혼합 화염(premixed flame)에서의 화염면 형성 과정과 그 내부구조를 면밀히 검토하는 연구를 소개하고, 이들로부터 실제 연소기 설계에 어떻게 이들 연구결과가 쓰일 수 있을 것이라는 제안을 하고자 한다.

## 3. 예혼합 기체의 연소 과정 모델

기체상태의 연료와 같은 상(phase)의 연료를 소정의 배합율에 의하여 미리 혼합한 후 연소기에 넣고 착화 과정을 거쳐 발열반응을 일으킬 때 형성되는 화염의 형태를 예혼합 화염으로 통상 분류되며, 이는 산화제와 연료가 별도로 연소기에 도입되어 확산과정에 의하여 연소가 일어나는 확산화염과 대별되는 것이다.

이와같은 연소방식은 가솔린 엔진 등에 실제

쓰이고 있지만, 광산의 갱내 폭발의 방지 등의 안전을 위해서도 매우 중요한 연구분야이다. 이제까지 연구, 제안된 예혼합 기체의 연소과정에 대한 모델은 열적 이론과 연소반응 중 생성된 중간생성물질의 확산과정을 중요시하는 확산 이론으로 대별될 수 있다.

### 3.1 열적 이론

#### a) 모 델

그림 1에서와 같은 공간 좌표계에 고정된 화염면(stationary combustion wave)을 가상한다. 연소될 수 있는 혼합기(combustible mixture)는 화염면(flame front)에 들어오게 되며, 화염면에서 발열반응을 일으킨 후 기연가스(combustion gas)로 배출된다. 열적 이론에서의 모델은 연소 반응대로 미연가스가 들어오기 직전(점합 장소)에 반응대로부터의 열전도에 의하여 미연가스가 예열되어, 연소반응이 일어날 수 있는 활성화 온도(activative temperature)에 도달하게 된다. 관련되는 혼합기체의 온도상승에 필요한 에너지( $\rho u C_p (dT/dx)$ )은 반응대로부터의 열전도에 의한 지분( $d/dx (\lambda dT/dx)$ )과 반응대에서의 발생열량( $-\sum h_i w_i$ )의 합과وازن될 것이다. 여기서  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $T$ ,  $u$ ,  $h_i$ 는 각각 밀도, 정압 비열, 온도, 유속 그리고  $i$ 의 화학종의 단위체적당 발

생되는 enthalpy를 나타낸다. 그리고 문제를 1차원화하였으므로 모든 물리량의 변화는  $x$ 에만 의존한다.  $w_i$ 는 단위시간, 체적당  $i$ (예를 들면)의 감소량을 나타낸다. 문제의 성격상 연속 방정식을 세워보면

$$\rho_0 u_0 = \rho u = \text{constant}$$

임을 알 수 있다.

즉, 미연가스의 ( $\rho_0 u_0$ )와 기연가스( $\rho u$ )는 같게 된다. 이 문제는 수학적인 입장에서 보면 ( $\rho u$ )를 고유치로 하는 2계 상미분 방정식에 의하여 지배됨을 알 수 있다. 따라서  $u_0$ (미연가스가 화염대로 진입하는 속도)를 연소속도(burning velocity)라 칭한다. 각 혼합기체에 대한  $u_0$ 가 존재하게 마련이다.  $u_0$ 의 결정이 예혼합 화염의 구조를 결정하는데 있어서 가장 큰 문제이며 또한 과제이다. 그런데 열적인 모델은 반응대에서 생성된 열량의 일부가 전도에 의하여 반응대로 진입하는 미연가스를 가열한다는 것이며, 연소가 정상 상태로 이루어질려면 진입하는 미연가스의 질량유속(mass flux,  $\rho u$ )이 반응열로부터 전달되는 열량으로 말미암아 반응에 충분한 어느 수준의 온도까지 올라가야만 된다. 이런 모델을 토대로 연소반응에 도달될 때까지의 제반과정을 몇가지 세부과정으로 분해할 수 있으며, 이 분해된 각 과정을 적당히 제어, 변경함으로써 흥미있는 연소형태를 얻어낼 수 있을 것이다. 그림 2는 열적구조를 모델화하여 화염대 근처를 확대하여 그림으로 나타낸 것이다.

#### b) 열적 모델 응용

앞에서 설명한 연소반응대 근처에서의 열적인 상황은 화염대에서 생성된 열량이 열전도에 의하여 미연가스에 활성화에너지를 높혀 주는 것이었다. 이와같이 반응대 근처의 제반현상은 아주 좁은 공간 그리고 짧은 시간 동안에 일어나는 것이므로, 이들 현상을 어떤 방법으로든 지 시, 공간적으로 분리할 수 있으면 새로운 연소기 설계에 도움이 될 것이다. 이런 관점에서 반응대에서의 발생열량을 직접 접촉에 의한 열전도로 미연가스를 가열하지 말고 다른 형태의 에너지로 변환시킨 후 이를

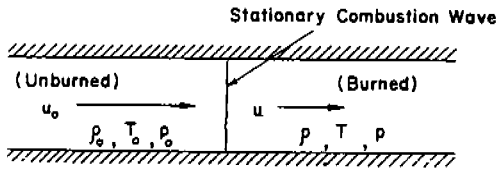


그림 1 예혼합 화염

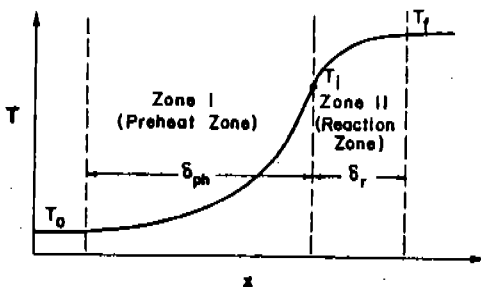


그림 2 연소 반응대 구조

이용하여 미연가스를 가열하여도 연소반응을 일으키는데는 원리적으로 큰 문제가 없을 것이다. 열전도에 의해 전달되는 열량은 물성, 온도 구배, 그리고 접촉 면적에 의하여 결정되는 것으로 외부에서 어떤 물리적 방법으로 제어하기가 아주 어렵다. 반면, 열전달 과정을 분리해 낼 수 있다면 그 제어가 용이해질 수 있을 것은 쉽게 짐작할 수 있다. 이런 맥락에서 제안된 연소기는 여러 형태로 제안되었다.

본 연구실에서 연구 진행되고 있는 열전달 기구 제어(또는 열 재순환 버어너) 연소기의 개요를 그림 3에 나타낸다. 그림에서 C로 표시된 세라믹 연소기는 다공질 물질로서 반응열의 일부를 열방사에너지(radiative energy)로 변환시키는 역할을 하게 된다. 구체적인 열전달 기구의 변환 및 그 구조는 그림 4에 나타낸다. 다공질 물질의 성질에 따라 반응열의 많은 부분이 열방사 에너지로 바뀌게 되며,

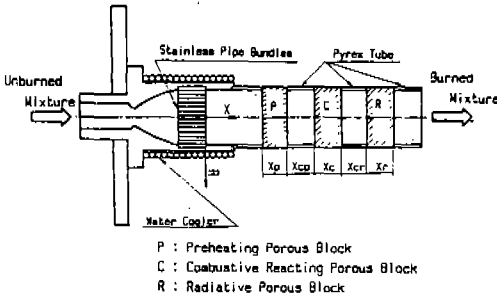


그림 3 열재순환 버어너

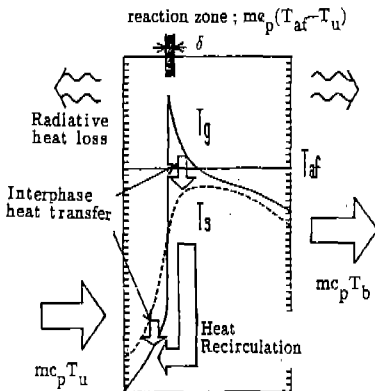


그림 4 열재순환 버어너 내의 열전달기구

변환된 이 에너지는 그 전달방식이 전자파형식으로 이루어지므로 열전도와 같이 온도 구배 모우드에 의하지 않는다. 즉, 미연가스가 흐르는 멀리 떨어진 상류의 물체를 직접 가열할 수 있으며 이때 가열된 물체속을 미연가스가 직접 접촉함으로써 에너지를 미리 받아 어느 정도 온도(연소반응이 가능한)에 도달될 수 있다. 그리고 열방사는 온도의 4승에 비례하므로 그림 4에서 보인 바와같이 미연가스 쪽으로의 전달 열량이 배기가스 쪽으로의 그것보다 훨씬 많아질 것이다. 즉 연소기 전후(미연 가스쪽은 전면, 기연 가스쪽은 후면)에서의 온도차이를 크게 하면 할수록 미연가스의 열방사에 의한 가열을 더욱 증가시킬 수 있다.

이 연소기의 연소 특성 및 다른 연소기와 의 비교는 다른 기회에 구체적으로 보고될 것이다.

### 3.2 중간 생성물의 확산 이론

#### a) 모 델

앞에서 언급한 열적 모델은 화염대의 열역학적 구조와 그 특성을 규명하는데 큰 문제가 없으며, 연소기 설계에서의 도입에도 무난하다고 사료된다. 그러나 연소반응대의 실제적 구조를 더욱 더 미세한 입장에서 이해함으로써 화학물질의 첨가 또는 확산기구의 제어가 가능하게 될 것이다. 근자에 들어와서 컴퓨터의 보급확대와 성능 향상으로 말미암아 연소반응의 구체적인 수치 모사(numerical simulation)가 가능하게 되어가고 있다. 물론 연소반응 자체에 대한 정보는 아직 확립되어 있지 않지만 반응에 관여할 수 있을 것으로 여겨지는 주요반응을 전부 대입하여 연소 반응대의 구조와 이에 따른 제어 요소를 평가할 수 있게 되었다.

표 1에는 수소와 공기의 반응에서 고려할 수 있는 대표적인 연소반응을 나열한 것이다. 예혼합 기체의 연소 특성을 지배하는 연소속도를 본 계산에 의한 결과와 실험결과를 비교하여 그림 5에 나타낸다. 반응속도 정수의 불확실성을 검토하기 위하여 몇가지 검토해석.

표 1 고려된 수소-공기 연소반응기구

Reaction mechanism in  $H_2-O_2$   $k = AT^b \exp(-E/RT)$

No	Reaction	A (cm. mol, s)	b	E (kJ/mol)
(1)	$OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$	$1.2 \cdot 10^9$	1.3	15.2
(2)	$H + H_2O \rightarrow OH + H_2$	$4.5 \cdot 10^9$	1.3	78.7
(3)	$H + O_2 \rightarrow OH + O$	$2.2 \cdot 10^{14}$	0	70.4
(4)	$OH + O \rightarrow H + O_2$	$1.0 \cdot 10^{13}$	0	0
(5)	$O + H_2 \rightarrow OH + H$	$1.8 \cdot 10^{10}$	1.0	37.3
(6)	$OH + H \rightarrow O + H_2$	$8.3 \cdot 10^9$	1.0	29.1
(7)	$OH + OH \rightarrow H_2O + O$	$1.5 \cdot 10^9$	1.14	0
(8)	$O + H_2O \rightarrow OH + OH$	$1.6 \cdot 10^{10}$	1.14	72.4
(9)	$H + H + M^1 \rightarrow H_2 + M^1$	$9.0 \cdot 10^{16}$	-0.6	0
(10)	$H + OH + M^1 \rightarrow H_2 + M^1$	$2.2 \cdot 10^{22}$	-2.0	0
(11)	$H + O_2 + M^1 \rightarrow HO_2 + M^1$	$2.3 \cdot 10^{18}$	-0.8	0
(12)	$H + HO_2 \rightarrow OH + OH$	$1.5 \cdot 10^{14}$	0	-4.2
(13)	$H + HO_2 \rightarrow H_2 + O_2$	$2.5 \cdot 10^{13}$	0	2.9
(14)	$OH + HO_2 \rightarrow H_2O + O_2$	$1.5 \cdot 10^{13}$	0	0
(15)	$O + HO_2 \rightarrow OH + O_2$	$2.0 \cdot 10^{13}$	0	0
(16)	$OH + OH + M \rightarrow H_2O_2 + M$	$9.1 \cdot 10^{14}$	0	-21.4
(17)	$H + H_2O_2 \rightarrow H_2O + OH$	$3.2 \cdot 10^{14}$	0	37.5
(18)	$H_2O_2 + M \rightarrow OH + OH + M$	$3.0 \cdot 10^{17}$	0	190.0
(19)	$H + HO_2 \rightarrow H_2O + O$	$1.5 \cdot 10^{13}$	0	4.2
(20)	$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$	$8.5 \cdot 10^{12}$	0	4.2
(21)	$H_2 + M^1 \rightarrow H + H + M^1$	$8.8 \cdot 10^{14}$	0	402.0
(22)	$O + O + M \rightarrow O_2 + M$	$7.0 \cdot 10^{13}$	0	-7.5
(23)	$OH + OH \rightarrow HO_2 + H$	$1.2 \cdot 10^{13}$	0	168.0
(24)	$HO_2 + M^1 \rightarrow H + O_2 + M^1$	$7.0 \cdot 10^{16}$	0	192.0
(25)	$HO_2 + H_2 \rightarrow H_2O_2 + H_2$	$7.3 \cdot 10^{11}$	0	78.3
(26)	$H_2O_2 + H \rightarrow HO_2 + OH$	$1.7 \cdot 10^{12}$	0	15.7
(27)	$H_2O_2 + O \rightarrow HO_2 + O_2$	$2.8 \cdot 10^{13}$	0	26.8
(28)	$H_2O_2 + O \rightarrow H_2O + O_2$	$2.8 \cdot 10^{13}$	0	26.8
(29)	$H_2O_2 + OH \rightarrow H_2O + HO_2$	$1.0 \cdot 10^{13}$	0	7.5
(30)	$HO_2 + H_2O \rightarrow H_2O_2 + OH$	$2.8 \cdot 10^{13}$	0	137.0

$[M^1] = 6.0(H_2O) + (H_2) + 0.4(N_2) + 0.4(O_2)$   
 $[M] = \text{Total molar concentration}$

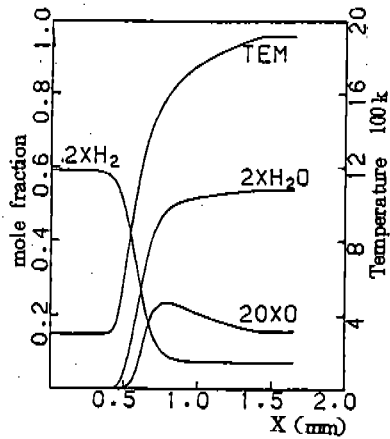
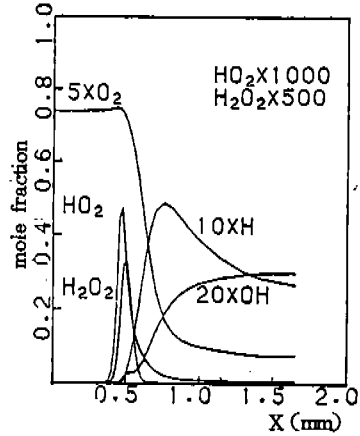


그림 6 연소 반응대 근처에서의 농도분포

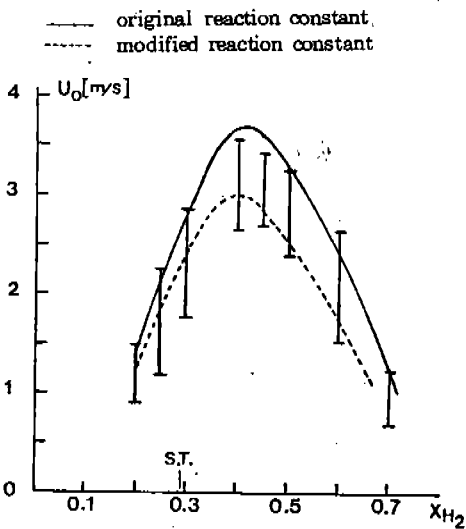


그림 5 연소속도(실험결과와 계산결과의 비교) 비교)

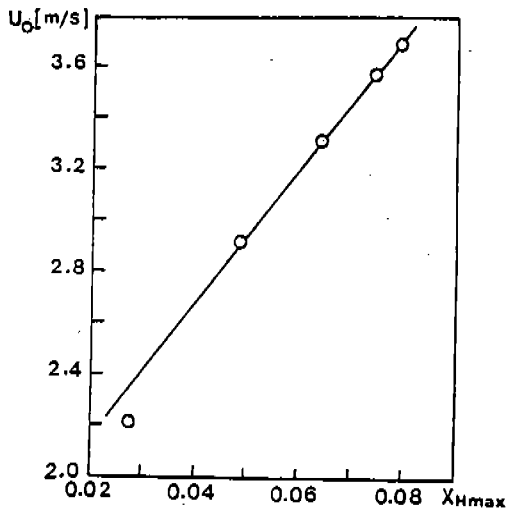


그림 7 수소원자 농도와 연소속도와의 관계

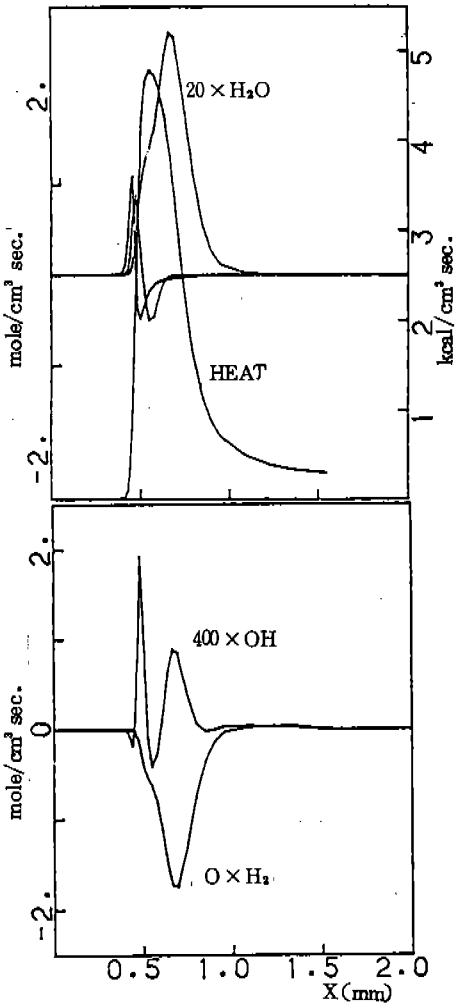


그림 8 발열분포와 중간생성물(OH) 분포와의 상관관계

(sensitivity analysis)을 실시한 결과도 아울러 보여주고 있다. 대표적으로 화염대내의 각종 물질의 농도, 온도 분포를 제시한 것이 그림 6이다.

그림 7에는 수소원자의 농도와 연소 속도와 의 상관 관계를 나타낸 것으로서, 반응대내의 수소원자의 확산과정이 반응을 지배하는 연소 속도에 지대한 영향을 미친다는 것을 간접적으로 보여 주는 결과이다. 그림 8은 열발생 속도와 OH 농도를 대비시킨 것으로 연소 반응대 내의 OH 농도 분포가 열발생 속도의 분포를 거의 결정한다는 것을 알 수 있다.

b) 응용의 제안

수소원자의 농도를 제어할 수 있다면 연소 속도를 대폭적으로 제어할 가능성이 있다. 이는 미연가스속에 미량의 수소원자 생성을 촉진하는 원소의 첨가 등으로 가능할 것이다. 그리고 OH 농도를 추적함으로써 열발생 속도의 정보를 정확히 유추해 낼 수 있으며, 이는 계측 계기의 발달로 그 응용분야가 넓다고 사료된다.

4. 맺는 말

연소 효율, 배기 특성을 제어하기 위하여 연소 반응대의 상세한 구조를 이해해야 하며 이를 토대로 열역학적 모델을 만들 필요가 있다. 이미 여러 연구자들에 의하여 제안된 예혼합 화염의 반응대 구조에 대한 열적모델과 확산모델을 소개하고 각각에 대한 응용과 가능성에 대하여 저자 나름대로의 의견을 제시하였다. 기초연구와 응용연구와의 결합 또는 문제성 제기에 관심이 있으신 독자에게 조금이라도 연구에 대한 동기 또는 방법론설정에 도움이 되었다면 더 이상 바랄 것이 없겠다.

참 고 문 헌

1. F. J. Weinberg, Advanced Combustion Methods, pp. 183-234, 1986, Academic press
2. K. k. Kuo, Principles of Combustion, pp. 285-340, 1986, John Wiley & Sons
3. 유 영돈, 초과 엔탈피 화염의 구조에 관한 실험적 연구, 1988. KAIST 석사학위논문
4. 최 병인, 1차원 화염구조에 관한 수치적 연구, 1986. KAIST 석사학위논문
5. Dae Ki Min et. al, Heat Transfer in a Porous Material Having Reaction Zone, 1st KSME-JSME Thermal and Fluid Engineering Conference, p. 316, 1988