

가솔린 機關의 混合氣 成分이 燃燒特性에 미치는 影響 (燃燒 速度에 미치는 影響)

The Effect of Mixture Component in a Gasoline Engine on Combustion
(The Effect of Combustion Velocity)

宋 載 翼*

J. I. Song

ABSTRACT

By using a premixed laminar burner, the effect of mixture component on laminar burning velocity(S_L) was investigated. The following was made clear ; (1)As the humidity(H_2O), CO_2 and Ar in mixture is increased, S_L decreased in proportion to quantity of those dilution gases. (2) The heat reaction theory says that mean thermal conductivity (λ_m), specific heat (C_{pm}) of mixture and adiabatic flame temperatures (T_b) affect S_L . As a result of theoretical analysis, the effect of λ_m and C_{pm} on S_L is less than 1/25 of the effect of T_b , so the effect of λ_m and C_{pm} can be ignored. (3) From experimental results, it was confirmed that $\ln(S_L)$ is proportional to $(1/T_b)$, that is, the effect of H_2O on S_L is mainly caused by changes of T_b . This conclusion was verified by the fact increases of H_2O , CO_2 and Ar decrease the intensity of radiation typical C_2 , CH, and OH in the same manner.

주요기술용어 : Laminar Burning Velocity(층류연소속도), Specific Heat(비열), Radical Thermal Conductivity(열전도), Adiabatic Flame Temperature(단열화염온도)

1. 서 론

내연기관의 출력은 주로 흡입공기(산소)량에 의해 정해진다. 따라서, 출력은 이 공기량을 좌우하는 대기조건(압력, 온도, 습도)에 의해서도 크게 영향을 받는다. 이 때문에 대기조건에 영향 및 출력수정법에 관한 연구는 과거 많이 행해졌고⁽¹⁾⁽²⁾, 기화기 또는 흡기관내 분사식 가솔린기관에서는 대기압력과 온도의 변화는 공기 밀도를 변화시켜 주로 흡입공기량 및 공연비가 변화하는 것에 따라 출력이 변화하는 것이 명확하게 되어 있다⁽³⁾. 한편, 대기습도에 대해서는 건조공기분압에 의한 공연비의 변화이외에

점화지연과 화염 전파 속도가 크게 변화하여 출력이 변화되는 것으로 보고되어 있지만⁽⁴⁾, 그 원인에 대해서는 명확하지 않다. 또한 배출가스중의 유해성분저감을 위해 배기가스 재순환을 실시하고 있지만, 정량적인 양을 예측하기에는 연소특성의 정량적 분석이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는, 층류버너화염을 이용하여 혼합기의 성분(H_2O , CO_2 및 Ar)이 층류 연소 속도에 미치는 온도의 영향에 대해 조사하기로 했다. 즉, 층류연소속도는 열이론 및 확산이론의 어느 경우에도 아래니우스 반응형에 따른다고 되어 있고 사실, 보고에 의하면, 이산화탄소와 불활성가스인 Ar 등의 영향은 대개 이 반응 속도의 항에 지배되고 있는 것이 확인되어 있다⁽⁵⁾⁽⁶⁾. 그러나 Wortberg⁽⁷⁾에 의하면, 이러한

* 정회원, (주)케이티 생산기술연구소

영향 외에도 혼합기의 비열과 열전도율의 영향도 있다고 알려져 있지만 이산화탄소등과 습도가 연소속도에 미치는 영향과 이들의 각 인자와의 상관관계 및 그 정도를 명확하게 한 연구는 없다. 그래서 본 논문에서는 습도가 층류연소속도에 미치는 영향을 조사함에 있어서 엔진의 NO_x 저감에 이용되고 있는 EGR(배기재순환)가스와 유사한 특성을 갖는 이산화탄소⁽⁸⁾와 불활성탄소인 아르곤의 2종류의 희석가스를 사용하여 습도등의 영향이 Thomas⁽⁵⁾, Odgers⁽⁶⁾ 등이 제안하고 있는 것과 같이 단지 반응속도의 항에 의해 지배되는지의 여부를 상세히 조사하였다.

2. 연소속도에 미치는 혼합기 성분의 영향

2.1 층류 연소속도와 혼합기 조성의 관계

연소반응에 의한 열이 고온부에서 미연혼합기로 전달되어, 미연혼합기가 착화온도에 도달했을 때, 연소한다고 생각하는 열이론에 의하면 층류연소속도 S_L(cm/s)과 미연혼합기의 평균열전달을 λ_m(W/m·k), 평균정압비열 C_{pm}(J/kg·K) 및 평균분자량 M_u(kg/mol)와의 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_L \approx P^{N/2} \left(\frac{\lambda_m}{C_{pm} M_u} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{-E}{2R \cdot T_b} \right) \quad (1)$$

- 단, P : 대기압력, kPa
- N : 반응차수
- E : 활성화 에너지, J/kg
- R : 일반가스정수, J/kg·K
- T_b : 단열화염온도, K

여기서 수증기(이하, H₂O), 이산화탄소(이하, CO₂) 및 아르곤(이하, Ar)이 무첨가된 경우에 첨가 o를 붙이고 무첨가시의 S_{L0}에 대한 첨가시의 S_L의 비를 각각 구하면 본 실험에서는 압력이 일정하기 때문에 E/2R이 일정하다고 가정하면 식(1)에서 다음 식이 성립한다.

$$\ln\left(\frac{S_L}{S_{L0}} \right) = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\frac{\lambda_m}{C_{pm} \cdot M_u}}{\left(\frac{\lambda_m}{C_{pm} \cdot M_u} \right)_0} \right] + \frac{E}{2R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_b} \right) \quad (2)$$

따라서, 식(2)에서 H₂O, CO₂, Ar등의 첨가에 의해 T_b와 λ_m의 저하 또는 C_{pm}, M_u의 증가할 경우는 S_L이 저하하는 것을 알 수 있다. 따라서, 식 중의 T_b, λ_m, C_{pm} 및 M_u를 다음과 같이 구하여 희석가스의 영향을 조사해 보았다.

2.2 단열화염속도(T_b)

층류화염의 단열화염온도 T_b(K)는 다음과 같이 구했다. 실험조건인 혼합기압 101.3kPa, 온도 303K 하에서 프로판 공기와 희석가스의 혼합연소에 의해 생성되는 성분을 CO, CO₂, O₂, H₂, H₂O, OH, H, O, NO, N, Ar의 11종이라고 생각하고⁽¹⁰⁾, 화학평형계산에 의해 구했다. Fig. 1은 당량비 ϕ를 변수로, H₂O, CO₂ 및 Ar을 각각 첨가했을 경우의 T_b에 미치는 영향을 나타낸다.

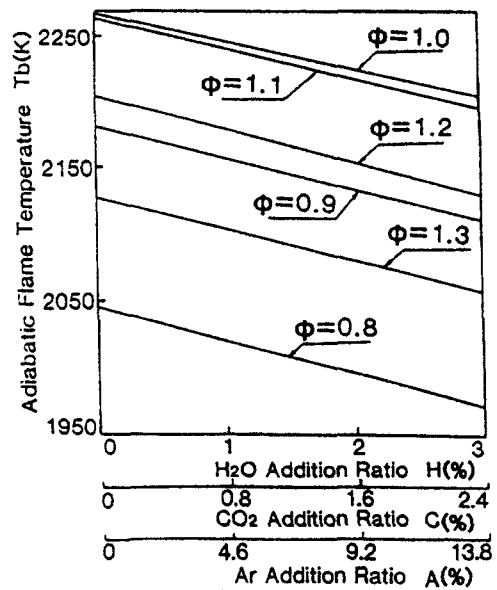


Fig. 1 Effect of H₂O, CO₂ and Ar Addition Ratio on Adiabatic Flame Temperature

그림 중의 첨가율을 절대습도 H 및 H의 비율과 같게 건조공기량에 대한 CO₂중량의 비율을 C, Ar 중량의 비율을 A로 나타낸다. Fig. 1에서 나타내는 것과 같이 H₂O, CO₂ 및 Ar의 경우 회석가스의 첨가로 인하여 일차 비례적으로 T_b가 저하되는 것을 알 수 있다.

역시, H₂O 첨가에 의한 T_b의 저하와 같은 효과를 얻을 수 있는 CO₂의 첨가물 C 및 Ar의 첨가물 A는 절대온도 H와 다음의 관계에 있다는 것을 알 수 있다.

$$H = C/0.8 = A/4.6 \quad (3)$$

그래서, 식 (3)에서 구한 CO₂ 및 Ar 첨가율의 C/0.8, A/4.6을 등가온도라고 정의하고, 이후의 정리에 이용했다.

2.3 미연혼합기의 평균 열전달율 (λ_m)

온도 T에 있어서의 혼합기의 열전달율 λ_g (W/m·K)는 Lindsan-Bromley⁽¹¹⁾에 의하면 다음 식으로 나타낸다.

$$\lambda_g = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{1 + \left(\frac{1}{X_i}\right) \sum_{j=(i \neq i)} X_j A_{ij}}$$

$$= \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\eta_i}{\eta_j} \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{3/4} \frac{\left(1 + \frac{S_{ij}}{T}\right)^{1/2}}{\left(1 + \frac{S_i}{T}\right)} \right]^2 \right\} \times \frac{\left(1 + \frac{S_{ij}}{T}\right)}{\left(1 + \frac{S_i}{T}\right)} \quad (4)$$

A_{ij} = 0.733(S_{ij})^{1/2} (H₂O인 경우)

S_{ij} = (S_i · S_j)^{1/2}

- 단, λ_i : 혼합기중의 i 성분의 열전달율, W/m·K
- T : 혼합기의 온도, K
- η : 온도 T에 있어서의 ij 성분의 점성계수 Pa·s
- M : i, j 성분의 분자량
- X : i, j 성분의 체적비율
- S : Stherland의 정수 = 1.5 · T_{bi}
- (T_{bi} : 압력 101.3kPa에서의 비등온도, K)
- i, j : 혼합기중의 임의의 2성분

식(4)를 이용하여 T와 λ_g 의 관계를 구하고, λ_m 의 계산은 다음과 같이 가정하였다.

(1) 미연혼합기는 착화온도 T_i까지 반응을 일으키지 않는다.

(2) 화염대에서의 미연혼합기의 온도 T_u가 예열대에서부터 반응대에 걸쳐, 단열화염온도 T_b까지 거의 1차적으로 온도 상승한다.

(3) T_i = 1200(K)라고 가정하여, 식(5)를 이용하여 착화에 도달할 때까지의 미연혼합기의 평균 열전도율 λ_m (W/m·K)을 구했다.

$$\lambda_m = \frac{\int_{T_u}^{T_i} \lambda_g dT}{(T_i - T_u)} \quad (5)$$

Fig. 2는 λ_m 에 미치는 회석가스의 영향을 나타낸다. 동일 단열화염온도를 부여하는 등가습도를 비교해 보면 그림에서 CO₂는 λ_m 에 거의 영향을 받지 않지만 H₂O첨가는 λ_m 을 약간 증가시키며, 또 Ar첨가는 당량비(ϕ)의 변화에 관계없이 λ_m 을 크게 감소시키는 것을 알 수 있다.

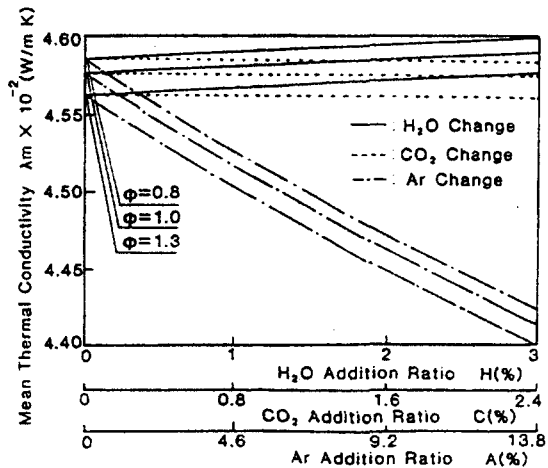


Fig. 2 Effect of H₂O, CO₂ and Ar Addition Ratio on Mean Thermal Conductivity

2.4 미연혼합기의 평균정압비열(C_{pm})

회석가스를 첨가한 경우의 미연혼합기의 평균 비열 C_{pm}(J/kg·K)은 각 성분의 비율 및 정압비열로 다음 식에 의해 구했다.

$$C_{pm} = \frac{\int_{T_u}^{T_i} C_p dT}{(T_i - T_u)} \quad (6)$$

$$C_{pm} = \frac{C_m + C_H \cdot F + C_{H_2O} \cdot H + C_{CO_2} \cdot C + C_{Ar} \cdot A}{1 + F + H + C + A}$$

단 C_{pm} : 온도 T에서의 혼합기의 정압비열, J/kg · K

C_p : 온도 T에서의 각 성분의 정압비열, J/kg · K

여기서, 첨자 a, f, H₂O, CO₂, Ar은 각각 건조공기, 프로판, 수증기, 이산화탄소, 아르곤을 나타내고, F는 C₃H₈의 중량/건조공기의 중량을 나타낸다. Fig. 3은 식(6)으로 구한 C_{pm} 에 미치는 희석가스의 영향을 나타낸다. 그림에서 동일 단열화염온도를 부여하는 등가습도로 비교하면, H₂O와 CO₂의 경우는 C_{pm} 에 거의 영향을 미치지 않지만 Ar은 C_{pm} 을 크게 저하시킨다는 것을 알 수 있다.

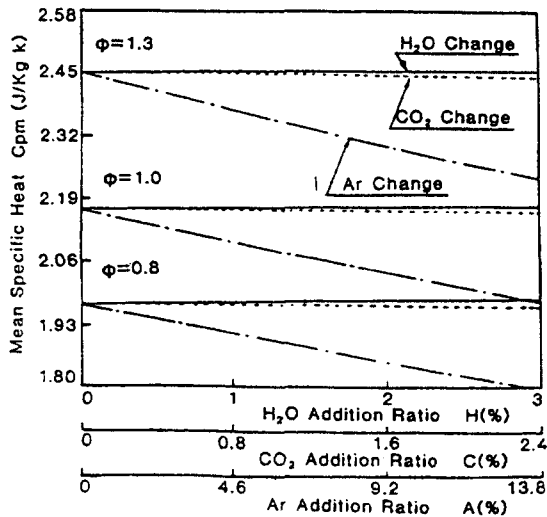


Fig. 3 Effect of H₂O, CO₂ and Ar Addition Ratio on Mean Specific Heat

2.5 S_L 에 미치는 H₂O, CO₂ 및 Ar의 이론적 영향
이제까지 구한 T_b , λ_m , C_{pm} , M_u 를 식(2)에 대입하여 S_L 에 미치는 T_b 의 영향과 $\lambda_m/C_{pm} \cdot M_u$ 의 영향의 정도를 비교하였다. ($E/2R = 18000K$ 일정하다고 생각함)

Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. 그림에서 T_b , λ_m , C_{pm} , M_u 의 변화가 S_L 에 미치는 영향은 T_b 에 의한 영향의 약 1/25 이하로 대단히 작은 것을 알 수 있다. 단, 미세하게 보게 되면, 같은 등가습도에서 비교하는 것과 H₂O 첨가보다 Ar 첨가가 S_L 의 저하에 미치는 영향은 3.9% 작고 CO₂ 첨가는 1.3% 큰 경향은 나타내고 있다. 그러나, 그 차가 적어 실용상 이러한 영향의 차이는 거의 무시할 수 있다고 생각되며, 이것을 확인하기 위해 실제로 H₂O, CO₂, Ar을 첨가하여 희석가스의 영향을 실험적으로 비교 검토했다.

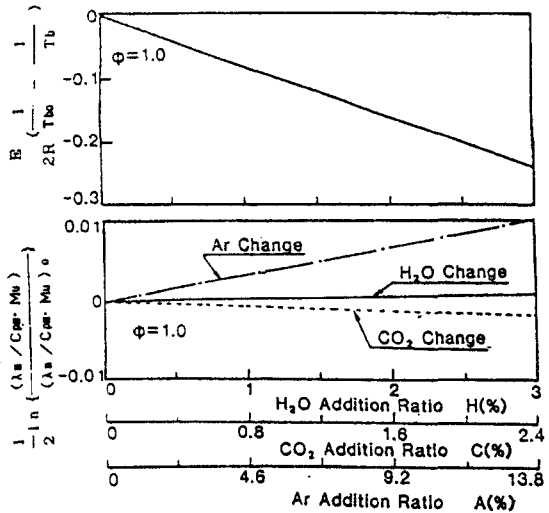


Fig. 4 Effect of H₂O, CO₂ and Ar Addition Ratio on $(1/2)\ln((\lambda_m/C_{pm} \cdot M_u)/(\lambda_m/C_{pm} \cdot M_u)_0)$ and $(E/2R)((1/T_{b0})-(1/T_b))$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 5는 실험장치의 배치를 나타낸 것으로 건조공기는 밸브 2에 의해 소정의 공기량이 되도록 오리피스 3으로 계측, 조정하였다. 또, 예혼합충류 버너 26은 출구내경 10mm, 입구내경 30mm, 높이 25mm의 원형 노즐을 내경 30mm, 길이 65mm의 탱크에 접속한 것이고 탱크내에는 정류와 역화염방지를 위해 100 Mesh의 금속망을 삽입하였다.

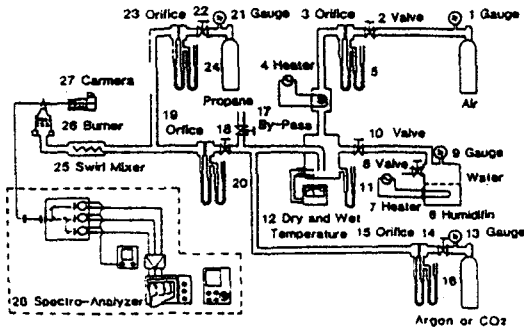


Fig. 5 Test Apparatus

연료와 공기의 합은 희석가스의 첨가량에 상관없이 100cm³/s로 일정하게 하였다. 혼합기 온도는 버너끝 부분에서 항상 303K로 일정하게 되도록 가열기 4에 의해 제어하였다. 가습할 경우는 가습기 6에 의해 수증기를 발생시켜, 열전대식 건습구온도계 12로 계측하였고 습도가 소정의 값이 되도록 밸브 8 및 10에 의해 가습량을 제어하였다. 또, Ar 또는 CO₂를 첨가하는 경우는 밸브 14에 의해 오리피스 15로 계량되는 값이 소정의 첨가량이 되도록 제어하였다. 이와 같이 하여 혼합한 희석 공기를 오리피스 19로 계량하고, 밸브 17 및 18에 의해 유량을 제어하였다. 그리고, 이 희석공기에 소정의 당량비가 되도록 프로판(순도: 99.95%)을 밸브 22로 제어하고 스윙혼합기 25로 충분히 예혼합한후, 버너에 공급하였다. 총류연소속도는 버너화염을 사진촬영(Shutter 속도=1/30s, 조리개=2.8)을 이용하여 각도법⁽⁹⁾에 의해 계측하였다. 한편, 습도의 연소반응에 의한 영향을 보기 위해 화염중의 대표적인 래디컬인 C₂ (5165A), CH(4315A), OH(3064A)의 발광강도를 분광 필터 (C₂, CH Radical: DIF-B Type, OH Radical: MIF-M Type) 및 광전자증배관 (Type: 1 P 28 A)를 이용하여⁽¹²⁾ 계측하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 수증기 및 희석가스가 총류연소속도 S_L에 미치는 영향

Fig. 6~8은 각각 당량비 ϕ 를 변수로하여 H₂O, CO₂, Ar이 총류연소속도 S_L(cm/s)에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 나타낸 것과 같이 실험범위내에서는 ϕ 에 상관없이 H₂O, CO₂ 및 Ar의 증가는 S_L을 1차 비례적으로 저하시키는 것을 알 수 있다. 더구나, 동일단열화염속도를 부여하는 동가습도로 비교하면, 혼합기 각 성분의 어느 것이나 S_L에 미치는 영향은 대개 같고, S_L(cm/s)와 습도 H와의 관계는 최소 2승법에 의해 다음과 같이 실험식을 구했다.

$$S_L = \alpha_H \cdot H + S_{L0} \quad (7)$$

$$\alpha_H = -49.3\phi^3 + 166.7\phi^2 - 184.9\phi + 64.7$$

$$S_{L0} = -218.2\phi^2 + 483\phi - 216.03$$

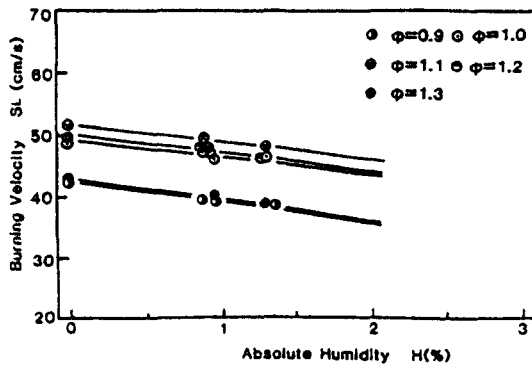


Fig. 6 Effect of Humidity on Burning Velocity

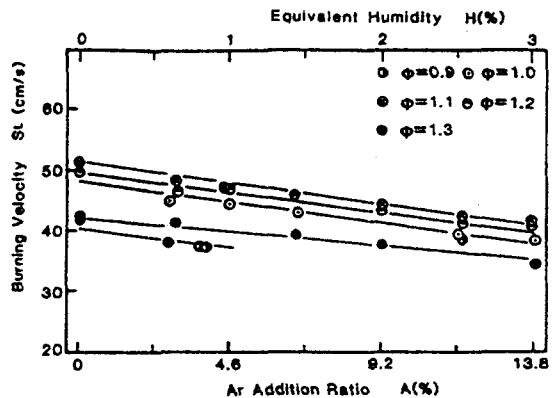


Fig. 7 Effect of Ar Addition Ratio on Burning Velocity

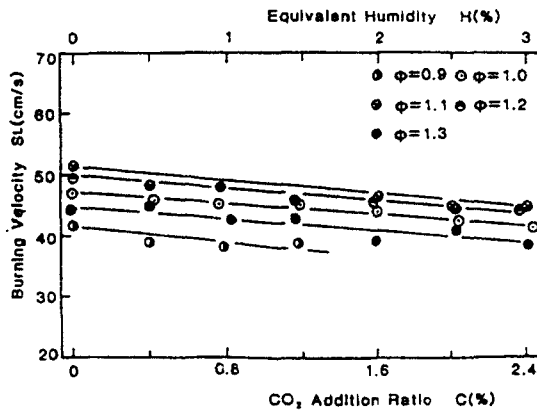


Fig. 8 Effect of CO₂ Addition Ratio on Burning Velocity

식(7) 및 (3)에 의해서 대기압력 101.3kPa, 온도 303K시에 희석가스가 S_L에 미치는 영향은 습도의 경우는 평균 ±2%, CO₂의 경우는 ±2%, Ar의 경우는 ±3%의 오차($\phi=0.9\sim 1.3$)로 구할 수 있다.

4.2 이론계산과 비교

2.5절에서 H₂O, CO₂ 및 Ar의 첨가가 S_L에 미치는 이론적 영향에 대해 서술하였지만, 이것과 실측결과와의 대응을 조사하여 습도의 변화가 S_L에 미치는 원인이 2.5절에서 논한 것과 같이 주로 T_b의 변화에 의한 것인지를 고찰해 보았다. 즉, 2.5절에서 서술한 바와 같이, 이론상 λ_m , C_{pm}, M_u의 영향이 작기 때문에 이것을 무시하고, 층류연소속도 $\ln(S_L/S_{L0})$ 와 단열화염 온도의 역수의 차 $(1/T_{b0}-1/T_b)$ 와는 1차 비례관계에 있다고 생각할 수 있다. 그래서 횡축에 $(1/T_{b0}-1/T_b)$, 종축에 $\ln(S_L/S_{L0})$ 를 두고 양자의 관계를 조사해 보았다. 그 결과, Fig. 9에서 알 수 있는 것과 같이 다수의 편차가 있지만 $\ln(S_L/S_{L0})$ 와 $(1/T_{b0}-1/T_b)$ 는 대개 1차 비례관계에 있다는 것을 알 수 있다. 양자의 관계가 1차 비례관계에 있는 것에 의해, 그 기울기인 E/2R도 일정하다는 것을 알 수 있다. 더구나, 이론 계산에서 예측한 것과 같이, H₂O 첨가에 비해 S_L에 미치는 Ar의 영향이 크고, CO₂의

영향이 작다는 경향적인 차가 인정되지 않음에 따라, H₂O, CO₂, Ar등의 희석가스가 층류 연소 속도에 미치는 영향은 그들이 단지 단열화염 온도를 변화시키기 때문이라는 것이 명확해졌다. 이들을 확인하기 위해, 각 희석가스 첨가시의 래디컬의 발광강도를 측정해 보았다.

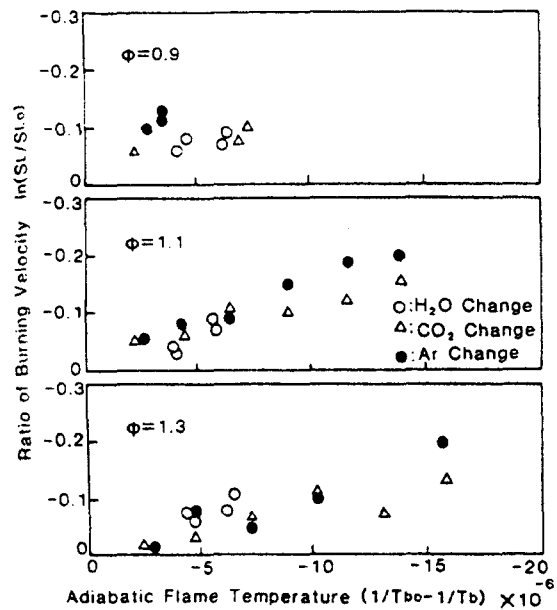


Fig. 9 Relation of Adiabatic Flame Temperature on the Ratio of Burning Velocity in mixing H₂O, CO₂ and Ar

4.3 희석가스가 래디컬 발광강도에 미치는 영향

만약, 습도가 연소반응에도 영향을 받게 되면, 연소과정에서 생기는 각종 래디컬의 발광강도도 변화한다고 생각하고, 화염중의 대표적인 래디컬인 C₂, CH, OH의 각 래디컬 발광강도를 광전자증배관을 이용하여 측정하고 습도의 영향을 아르곤과 비교해 보았다. Fig. 10에 그 결과를 나타낸다.

그 결과 각 래디컬 발광강도는 각 당량비 어는 것의 경우도 H₂O, Ar의 증가에 따라 1차 비례적으로 감소하지만, 그 기울기가 양자 모두 거의 같기 때문에 습도는 연소반응에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

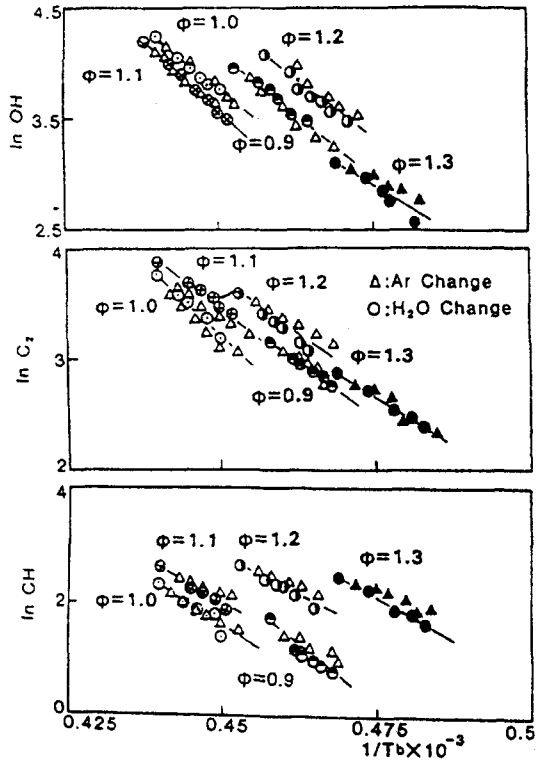


Fig.10 Relation of Adiabatic Flame Temperature on the Intensity of Radiation in mixing CH, C₂ and OH

5. 결 론

대기의 습도변화를 고려한 혼합기중의 습도 (H₂O) 및 EGR 등이 연소속도에 미치는 화학적, 물리적 영향을 조사하기 위해 H₂O, CO₂ 및 Ar과 비교하여 조사한 결과 다음과 같다.

(1) 이론식에서는 희석가스가 S_L에 미치는 영향은 그 것에 의한 평균 열전달율 λ_m과 평균 정적비열 C_{pm} 및 평균분자량 Mu와 단열화염 온도 T_b의 변화에 의한다고 할 수 있다.

따라서, 이론적으로 그들의 값을 구해 검토해 본 결과, T_b에 대해 λ_m/C_{pm} · Mu의 S_L에 미치는 영향은 약 1/25이하로 극히 작아 무시할 수 있다는 것을 알 수 있다.

(2) 실험에서, 혼합기중의 H₂O, CO₂ 및 Ar의 증가는 S_L을 1차적으로 저하시키고, 더구나

S_L은 습도 H와 동일한 T_b를 부여한 0.8H의 CO₂량 또는 4.6H의 Ar량과 하나의 식으로 표시되는 것을 명확히 하였다. 이 실험식을 이용하여 습도 및 희석가스의 영향을 각각 평균 ±3%의 오차로 구하는 것이 가능하다.

즉, 온도가 S_L에 미치는 영향은 주로 T_b의 저하에 의한 것을 명확하게 하였다.

(3) 화염중에 생성되는 대표적인 라디칼인 C₂, CH, OH의 발광강도에 미치는 H₂O의 영향과 Ar의 영향을 비교하여 조사한 결과, 각 발광강도는 각각의 희석가스의 증가에 따라 감소하고 그 경향은 양자 모두 거의 같으며, 습도가 연소에 미치는 영향은 물리적인 영향만인 것을 명확히 하였다.

참 고 문 헌

1. 日本機械學會編, 內燃機關の出力修正に關する研究成果報告書, 昭44-2.
2. Nakajima, K., ほか 3名, SAE Paper, 690166.
3. 本望 · ほか 2名, 自動車技術論文集, 8, 昭50, 11.
4. 小早川 · ほか 1名, 自動車技術, 18-4, 昭39, 274.
5. Thomas, W., ほか 1名, Technical Paper, No. CSS CI-79-02.
6. Odgers, J., ほか 2名, ASME, No.79-GT-168.
7. Wortberg, W., 10th Symp. On Cymb., 1963, 651.
8. 齊藤 · ほか 3名, 三菱重工技報, 15-3, 昭48, 81.
9. 疋田 · ほか 1名, 燃焼概論, 昭54, 56, コロナ社.
10. 水谷, 內燃機關, 11-125, 昭47, 79.
11. Lindsay, A., Ind. Eng. Chem., 42-8, 昭25, 1508.
12. 伊藤 · ほか 3名, 自動車技術論文集, 29, 昭59, 10.