

천연가스 연료의 연소특성에 관한 연구

박명호* · 이선봉**

(1999년 1월 13일 접수)

A Study on the Combustion Characteristics of Natural Gas Fuels

Myung Ho Park and Sun Bong Lee

Key Words: Natural Gas(천연가스), Methane/Hydrogen(메탄/수소), Burning Velocity(연소속도), Ignition Energy(점화에너지), Reaction Speed(반응속도), Equivalence Ratio(당량비)

Abstract

This study is concerned about the combustion characteristics of methane-air and methane/hydrogen-air mainly the behavior of burning velocity including the effect of the ignition energy. The experiments were conducted in a spherical combustion bomb designed in this laboratory. The burning velocities were measured by the pressure-time history and the reaction rates were estimated theoretically. The experimental results showed that the burning velocity increased by 25 to 50 percent when hydrogen is added to methane by 20 percent.

1. 서 론

최근 자동차의 배기가스로 인한 지구의 온난화 현상 및 석유자원의 고갈로 인하여 환경에 부드럽고 안정하게 공급될 수 있는 대체에너지원으로 천연가스가 주목을 모우고 있다. 천연가스는 환경부하가 적은 에너지로 지구 온난화의 원인인 이산화탄소의 발열량당 배출량이 적고, 배기가스가 깨끗하며 석유와 다르게 세계각지에 넓게 분포되어 있다는 연료로서의 많은 장점을 가지고 있다. 반면, 천연가스의 약90% 이상을 차지하고 있는 그 주성분인 메탄의 연소속도는 다른 연료와 비교할때 느리고 이점이 그 이용범위를 제한한다고 사료된다.^(1~4) 따라서 이들 연료를 보다 효율 좋게 사용하기 위한 새로운 보완방법을 강구해 내는 것이 과제라고도 볼 수 있다. 실제로 수소첨가에 의한 메탄가스의 연소속진효과를 확인

하기 위하여 메탄가스와 수소를 체적비율로 20% 첨가한 메탄을 연료로 불꽃점화기관에서 운전실험을 수행하였다. 실험방법은 무부하 운전에서 점화시기를 변경하면서 각각의 점화시기에서의 엔진회전수를 비교하였는 데, 실험결과 수소를 첨가한 경우 모든 점화시기에서 엔진회전수가 빨라짐을 확인할 수 있었다.⁽⁵⁾ 이와같이 불꽃점화기관에서 수소를 첨가함으로써 천연가스가 갖고 있는 연료로서의 장점을 살리면서 기관의 효율개선을 도모할 수 있다고 생각되어, 이들 현상을 보다 구체적으로 확인하기 위하여 연소특성의 실험적 연구를 수행하기로 하였다.

본 연구에서는 구형용기법을 사용 차세대의 청정연료로서 연소속도가 빠른 수소를 혼합하는 방법과 점화에너지의 강화에 의한 방법으로 메탄-공기혼합기 및 메탄/수소-공기혼합기에 대한 연소속도의 측정 및 반응속도의 계산을 수행하였다.

2. 구형용기법

구형용기법은 가연혼합기를 구형용기내에 넣어 그 중심에서 점화 구대칭의 화염이 전파할 때 화

* 九州工業技術研究所 研究員
** 회원, 삼척대학교 기계공학과

염위치의 시간적변화가 가져오는 압력변화를 측정함으로써 연소속도를 구하는 방법이다. 본 방법의 장점은 구대칭의 1차원화염이 형성되므로 연소용기 및 주변분위기의 영향이 작고 소량의 혼합기로도 연소가 가능하며 더욱이 초기의 온도와 압력에서 수배의 고온고압에 이르는 조건하에서도 연소속도를 구할 수 있다는 장점을 갖고 있다.⁽⁶⁾ 그러나 과거 이 방법에서 2가지 문제점이 지적되었는데,⁽¹⁾ 첫 번째로 연소속도는 직접측정이 불가능하므로 그것을 계산해 낼 수 있는 신뢰할 수 있는 계산방법이 필요하다는 것이고, 두 번째는 정확한 연소속도를 얻기 위한 복잡한 장치가 필요하다는 것이었다. 그러나 이와같은 문제도, 본 연구에서 제안한 해석법과 최근성능이 향상된 컴퓨터와 측정장치의 발달로 충분히 해결 가능하다고 사료된다.

3. 계산방법

구형용기의 중심에 점화 순간적으로 형성된 화염이 전파를 개시하여 벽면에 도달할 때까지의 비정상적인 움직임을 준정상1차원 화염면 모델을 사용하여 해석을 하였다. 화염전파중의 각순간 t 에 있어서의 연소속도 S_u 는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$S_u = \frac{1}{F_1(\pi)} \frac{r_c}{P} \frac{dP}{dt} \quad (1)$$

단, r_c 는 연소용기의 반경, $\pi = P/P_0$ 은 무차원 압력, P_0 는 초기압력이다. 식 (1)의 $F_1(\pi)$ 은 용기의 형상 및 혼합기의 초기상태가 정해지면 π 만의 함수로 계산할 수가 있다. $F_1(\pi)$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$F_1(\pi) = \frac{(k+1)\gamma_u \gamma_b \xi^k \sigma_u}{\gamma_b + (\gamma_u - \gamma_b)\xi^{k+1}} \left\{ \frac{(\gamma_b - 1)q}{\gamma_b(\gamma_u - \gamma_b)} \frac{1}{\pi} - \frac{\gamma_u - \gamma_b}{\gamma_b(\gamma_u - 1)} \pi^{\frac{k-1}{\gamma_u}} \right\}$$

여기서, k 는 화염의 형상을 나타내며, γ 는 가스의 비열비로 첨자 u 와 b 는 미연가스 및 연소가스의 비열비를 나타낸다. 그리고 $\xi = r/r_0$ 는 반경방향의 위치를, $\sigma = \rho/\rho_0$ 는 가스의 밀도를 나타내며, 첨자 0 는 점화직전 $t=0$ 일때의 상태를 표시한다. 또한 q 는 각성분의 질량분율 및 엔탈피의 함수값을 표시한다.

4. 계산방법

4.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 이 실험장치는 연소실, 점화장치, 측정장치 및 데이터 처리장치로 구성되어 있다.

4.1.1 연소실

Fig. 2는 연소실의 단면도를 나타낸다. 연소실 형상은 구형으로 상반구와 하반구로 분리할 수 있도록 설계하였다. 연소실 내경은 160mm이고 용적은 2144cc이다.

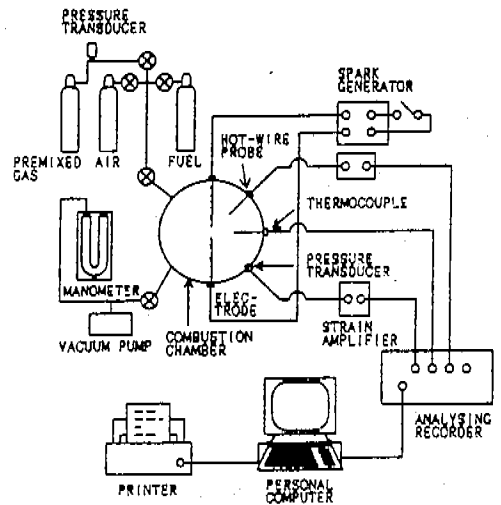


Fig. 1 Experimental apparatus.

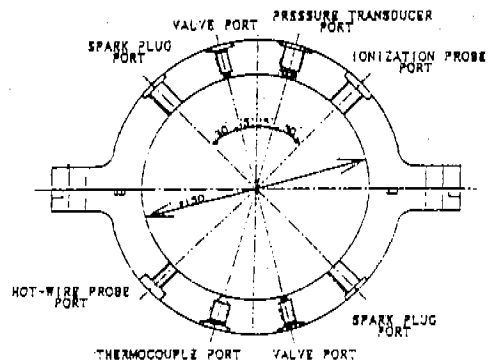


Fig. 2 Combustion chamber configuration.

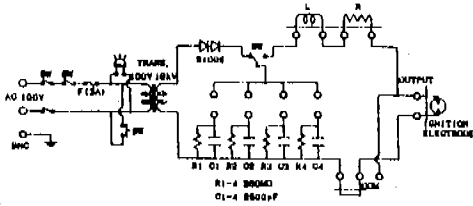


Fig. 3 Schematic diagram of ignition system.

또한 내경두께는 20mm로 Garforth와 Rallis 및 Bradley와 Mitcheson의 실험결과와 비교할 수 있도록 동일한 내경치수를 선택하였다.^(2,8) 재질은 SUS304로 허용최대압력은 100기압이다. 용기벽면에는 용기내부를 진공하기 위한 흡입밸브, 예혼합기를 흡입하여 연소가스를 배출하기 위한 배출밸브, 압력센서, 이온플러브, 점화용전극 및 외부로부터의 연소과정을 관찰할 수 있도록 창문을 설치하였다.

4.1.2 점화장치

Fig. 3은 점화장치 회로도도 나타낸다. 예혼합기는 점화용전원(Kanno製作所 DZD-004)의 콘덴서에 충전된 전기에너지를 순간적으로 방출시켜 그 에너지에 의해 전극사이에서 방전을 일으켜 점화하였다. 점화에너지는 콘덴서용량(2,500~10,000PF)을 변경시킴으로 쉽게 조절할 수 있도록 하였고, 점화용전극(NGK BK6E)은 자동차용 점화플러그의 음극단자를 제거 양극단자를 연장하여 2개가 서로 마주보도록 설치하였다.

4.1.3 측정장치

구형용기내의 압력의 시간적 변화를 측정하기 위하여 센서부에는 압력변환기(共和電業 PG-50KU), 센서로부터의 전기신호를 전압표시하기 위하여 동변형기(共和電業 DPM-603A)를 사용하였다. 동변형기의 전압신호는 아날로그 레코드로 읽어들이 컴퓨터로 보내도록 설치하였다.

4.1.4 데이터 처리장치

아날로그 레코드(橫河電機 3655)는 동변형기에 의해 증폭된 변형전압신호, 이온플러브 신호, 점화시의 전압, 전류의 값을 읽어들이 아날로그신호를 디지털신호로 변환, 데이터 처리하여 GP-IP 인터페이스 보드를 통해 컴퓨터로 보내도록 설치

하였다.

4.2 실험방법

실험은 우선 진공펌프(眞空機工 PD52)에 의해 예혼합분배를 진공으로 만든다. 다음 압력센서에서 분압을 측정함으로써 당량비를 조정하여 소정의 비율로 예혼합분배에 흡입 균일하게 혼합될 때까지 약 2시간동안 교반을 행한다. 그 후 연소실내를 진공시켜 압력센서를 보면서 소정의 압력에 도달할 때까지 연소실내에 공급한다. 이 전압표시로 부터 연료와 공기의 혼합비율을 알 수 있어 보다 정확한 당량비를 조절할 수 있다. 흡입밸브를 닫은 후 혼합기가 완전히 정지상태에 도달할 때 까지 10분정도 시간이 경과한 후 점화를 행하여, 점화후 얻어진 압력-시간(P-T)선도로 부터 화염전파후 각순간에서의 연소속도를 구하게 된다.

5. 실험결과

이번에 사용한 메탄-공기혼합기 및 메탄/수소-공기혼합기에 대해서 당량비, 초기압력 및 방전 에너지가 연소속도에 미치는 영향에 관해서 살펴 보았다.

5.1 메탄-공기혼합기

Fig. 4와 Fig. 5는 초기압력 $P_0=0.1MPa$, 초기온도 $T_0=291K$, 당량비 $\phi=1.0$ 일때의 이혼합기에 관하여 연소속도와 전파 각순간에서 연소실내 혼합기의 압력과의 관계를 나타내고 있다. 점화에너지 E는 각각125mJ과 375mJ이다. ●는 5회의 실험에서의 평균값이고 짧은 종선은 5회 실험의 편차범위를 나타내고 있다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교하여 볼 때 에너지가 큰쪽의 연소속도가 약간 빨라짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 초기압력 $P_0=0.07, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3 MPa$ 초기온도 $T_0=291K$, 당량비 $\phi=1.0$ 관하여 압력이 $P=0.12, 0.2, 0.3, 0.4MPa$ 일 때 연소속도에 미치는 미연가스온도 T_u 의 영향을 나타낸 것으로 이때의 점화에너지는 125mJ이다. 측정결과 모든 온도에 대해서 미연가스온도 T_u 가 증가함에 따라서 연소속도도 증가하는 경향이 나타났다.

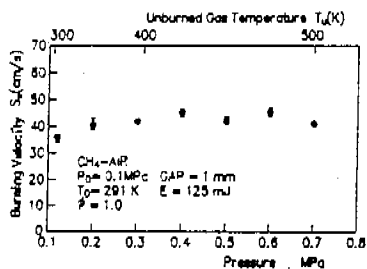


Fig. 4 Typical burning velocities obtained in 5 test runs under identical initial conditions.

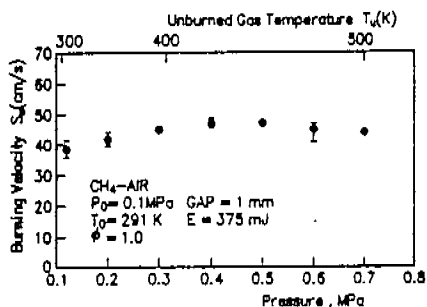


Fig. 5 Typical burning velocities obtained in 5 test runs under identical initial conditions.

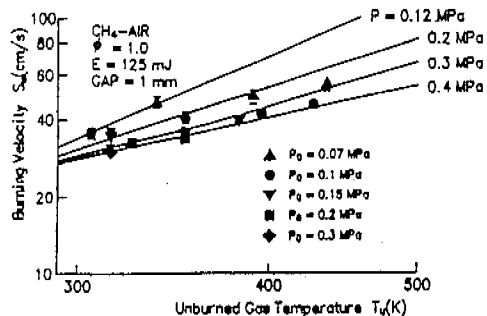


Fig. 6 Effects of unburned gas temperature on burning velocity.

Fig. 7은 초기압력 $P_0=0.07, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4\text{MPa}$, 초기온도 $T_0=291\text{K}$, 당량비 $\phi=1.0$ 일 때, 미연가스온도가 $T_u=306, 350, 400$, 및 450K 일 때 연소속도에 미치는 압력의 영향을 나타낸 것으로, 실험결과 모든 온도에서 압력의 상승과 더불어 연소속도는 저하하는 경향이 나타났다.

5.2 메탄/수소-공기혼합기

Fig. 8과 Fig. 9은 메탄/수소-공기혼합기에 관하여 메탄·공기혼합기와 동일한 방법으로 실험을 하여 얻어진 연소속도와 압력과의 관계를 나타낸

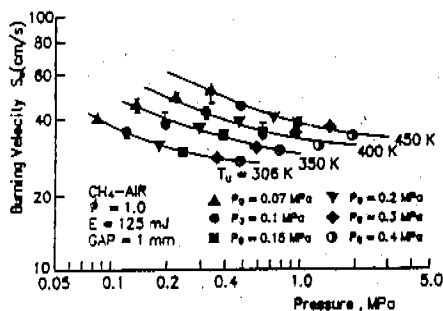


Fig. 7 Effect of pressure on burning velocity.

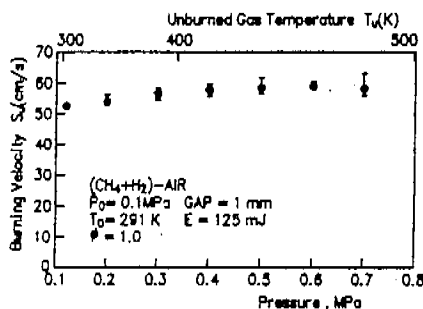


Fig. 8 Typical burning velocities obtained in 5 test runs under identical initial conditions.

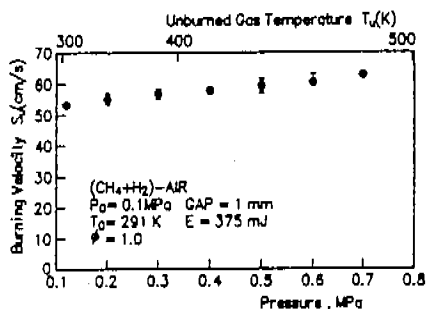


Fig. 9 Typical burning velocities obtained in 5 test runs under identical initial conditions.

다. Fig. 8과 Fig. 9의 비교에서 20%의 수소첨가에 의해 연소속도가 25~50%정도 향상되었고, 에너지강화에 의한 변화는 크게 나타나지 않았다.

Fig. 10 및 Fig. 6은 동일한 조건하에서 얻어진 연소속도와 미연가스온도 T_u 와의 관계를 나타낸 것으로, 메탄-공기혼합기와 같이 미연가스온도 T_u 가 상승함에 따라서 연소속도도 증가하는 경향을 볼 수 있었다. Fig. 11 및 Fig. 7도 동일한 조건하에서 실험하여 얻어진 결과값으로 압력의 상

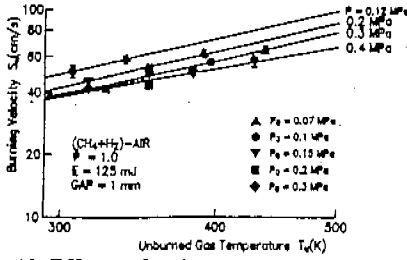


Fig. 10 Effects of unburned gas temperature on burning velocity.

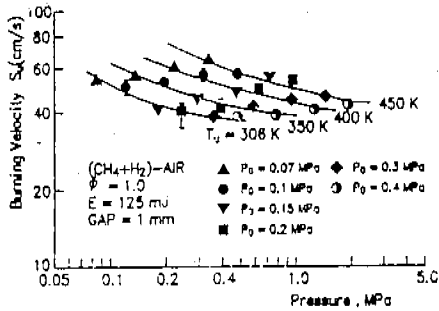


Fig. 11 Effect of pressure on burning velocity.

승과 더불어 연소속도는 저하하는 경향을 볼 수 있었다.

5.3 종래의 연구결과와의 비교

Fig. 12는 초기압력 $P_0=0.1\text{MPa}$, 초기온도 $T_0=291\text{K}$ 일때의 연소속도 S_u 와 당량비 ϕ 와의 관계를 다른 연구자들의 연구결과와의 비교를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 연소속도는 $\phi=1.1$ 부근에서 최대값인 42.2cm/s 였고, 이혼합기(당량비 $\phi=1.0$)부근에서의 값은 35cm/s 를 나타내었다. 그러나 Andrews와 Bradley가 얻은 결과와 비교하여 전범위에 걸쳐 낮은 값을 나타내고 있는 반면, Sharma가 구한 연소속도보다는 당량비가 $0.9\sim 1.2$ 부근에서 조금 높은 값을 보여주고 있다. 특히 밀도의 공간분포를 정확히 고려하고 있지 않은 Sharma등의 측정값과 비교하여 조금 큰값을 나타내고 있는 것은 밀도의 공간분포의 영향이라고 사료된다. 한편, 버너법과 비교하여 작은 값을 나타내고 있지만, 버너법은 화염의 각위치에서의 연소속도값이 반드시 일정하다고 볼 수 없고, 화염위치와 화염경사각의 측정정도의 문제도 있기 때문이라고 사료된다.^(9,10)

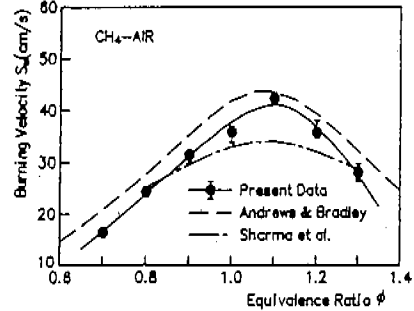


Fig. 12 Effect of equivalence ratio on burning velocity.

6. 반응속도

이번에 사용한 혼합기의 연소후 반응속도를 살펴보기 위하여, 메탄·수소·공기계의 소반용 59종용 사용, 초기온도 800°C , 반응개시후의 온도, 조성의 계산을 타임스텝 10^{-9} 초에서 수행하였다. 또한, 이번 실험에 상당하는 점화에너지 ($E=125\text{mJ}$)는 다음과 같은 가정하에서 실시하였다.

(1) 직경, 길이가 0.5mm 의 원주의 아크를 발생 시켜

(2) 아크는 순간적으로 생성되는데 아크내에 생기는 반응에 중요하다고 생각되는 O, OH, H 라디칼의 농도는 평형계산값 (각각 0.08%, 0.07%, 0.13%체적분율)으로 하고

(3) 이 라디칼은 직경 5mm 의 구형점사공간내에 일정하게 순간적으로 분포한다.

또한 점화에너지($E=375\text{mJ}$)의 경우는 위 3종류의 농도를 전부 3배로 한 것을 초기값으로 택했다. Fig. 13은 점화에너지에 의한 화염핵 형성 모델을 나타내었다.

Fig. 14은 점화에너지의 차이가 반응속도에 미치는 영향을 나타낸 것으로 양쪽모두 약 2600K 에 도달했을 때 반응이 종료됨을 확인할 수 있었다. 또한 점화에너지가 375mJ 일 경우 평형에 도달할 때까지의 시간이 약 40% 단축되었는데, 이것은 점화에너지의 차이가 화염핵 성장에 영향을 미쳐 연소후 평형에 도달할 때 까지의 시간을 단축시켰기 때문이라고 생각된다.

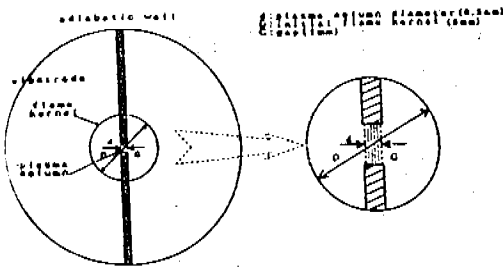


Fig. 13 Flame Kernel Models.

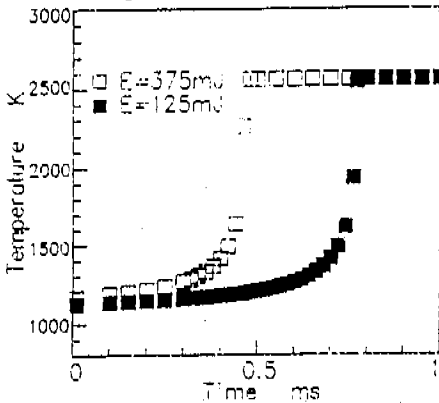


Fig. 14 Effect of spark energy on reaction speed.

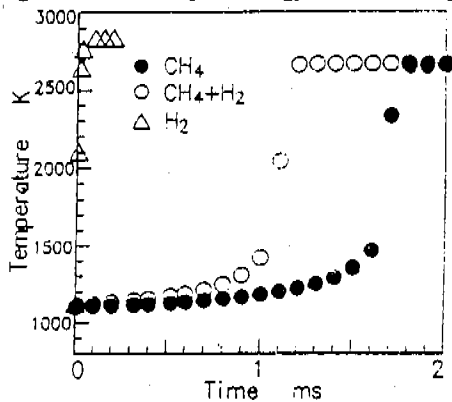


Fig. 15 Comparison of effectiveness of different mixtures on combustion.

Fig. 15 또한 연료를 메탄만 넣었을 경우와 20%수소를 첨가했을 경우의 비교를 나타낸 것으로 반응시간의 측정결과, 메탄-공기의 경우가 1.8ms, 수소를 첨가하였을 경우가 1.2ms로 반응시간이 0.6ms정도 단축됨을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 수소첨가가 화염핵의 성장을 촉진시킴을 확인할 수 있었지만 화염전파와 직접 연관되는 것은 극히 초기단계라 볼 수 있고, 그 후의 화염전파에 어떠한 영향을 미칠 것

인가에 대해서는 앞으로 더욱더 많은 검토가 필요하다고 사료된다.

7. 결론

구형용기를 사용 메탄-공기혼합기 및 메탄/수소-공기혼합기에 관하여 연소속도의 측정 및 반응속도의 계산을 실행한 결과 다음과 같은 결론을 얻어낼 수 있었다.

(1)점화에너지의 강화에 의해 연소속도가 2~5%정도 증가한데 비하여, 20%수소 첨가의 경우 연소속도가 25~50%정도 크게 향상됨을 확인할 수 있었다.

(2)수치계산에 의해 얻어진 반응속도 또한 수소를 20%첨가함으로써 반응시간이 메탄보다 빠르게 진행됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구를 수행하는데 있어 협력하여 주신 규슈 공업대 연소실험실 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Andrews, G. E. and Bradley, D., 1972, *Combustion and Flame*, 18, pp. 133~153.
- (2) Bradley, D. and Mitcheson, A., 1976, *Combustion and Flame*, 26, pp. 201~217.
- (3) Metghlchi, M. and Keck, J. C., 1980, *Combustion and Flame*, 38, pp. 143~154.
- (4) Kim, S. J., 1997, *Journal of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 5, pp. 67~72.
- (5) 平島繁紀, 朴明浩ら, 1994, *内燃機関*, Vol. 33, pp. 9~16.
- (6) 竹野忠夫, 飯島敏雄, 1979, "球形容器による 燃焼速度の測定," 第17回燃焼シンポジウム, pp. 141~143.
- (7) 竹野忠夫, 飯島敏雄, 1981, *航空宇宙研究所報告*, pp. 261~272.
- (8) Garforth, A. M. and Rallis, C. J., 1978, *Combustion and Flame*, 31, pp. 53~68.
- (9) Andrews, G. E. and Bradley, D., 1972, *Combustion and Flame*, 19, pp. 275~288.
- (10) Andrews, G. E. and Bradley, D., 1972, *Combustion and Flame*, 18, pp. 133~153.