

〈논 문〉 SAE NO. 96370003

# 점화에너지 특성이 예혼합기의 착화와 연소에 미치는 영향

## Effect of Ignition-Energy Characteristics on the Ignition and the Combustion of a Premixed Gas

이 중 순,\* 이 태 원,\* 정 성 식,\*\* 하 중 료\*\*  
J. S. Lee, T. W. Lee, S. S. Chung, J. Y. Ha

### ABSTRACT

In this paper, we study effect of the factors, participating in the combustion as the initial conditions, such as the flow characteristics of the mixture and the initial temperature, pressure and equivalence ratio in the chamber on the ignitability of the mixture, the combustion duration and the maximum combustion-pressure. The experiment was performed in a constant-volume combustion chamber, with turbulent flow inside, equivalent to the actual engine at TDC. The present experiment utilizes three ignition devices which differ from each other in the distribution and the magnitude of discharge energy.

주요기술용어 : Ignition Energy(점화에너지), Forced Turbulent Field(강제유동장), Lean Mixture (희박혼합기), Combustion Pressure(연소압력)

———— 기 호 설 명 —————

- $T_i$  : 초기온도(K)
- $P_i$  : 초기압력(MPa)
- $\phi$  : 당량비
- $\tau$  : 연소기간(ms)
- $u'$  : 난류강도(m/s)
- $P_{max}$  : 연소최고압력(MPa)
- $U_m$  : 400ms 기간 동안의 평균속도(m/s)

- $U_i$  : 400ms 기간 중 i번째의 순간속도(m/s)
- $N$  : 측정횟수

### 1. 서 론

전기점화기관에서의 저연비 실현과 유해가스 배출 저감을 위한 연소기술 개발 노력의 일환으로 R. J. Tabaczynski는<sup>1)</sup> 흡입·압축행정 시의 실린더 내에서의 유동의 특징과 유동장이 연소과정에 미치는 영향을 밝히기 위하여 난류강도에 따른 최소점화에너지를 당량비의 관계로 연구한 결과, 타 조건이 정상적일 때, 난류강도는 화염

\* 정회원, 동아대학교 대학원  
\*\* 정회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

전과율을 지배하고, 난류강도의 크기는 착화의 성공여부에 많은 영향을 미침을 밝혔다. 또 大須賀 등은<sup>2)</sup> 혼합기 형성이 기관성능에 미치는 영향에 대하여 연구하고 자작의 공연비 제어용 검출기에 대하여 보고하였으며, 연소개선에 중요한 수단으로 실린더 내 연소시 공연비의 실기관 계측법에 대하여 제안하였다. 또, 냉각수 온도가 낮을수록, 분무입경이 클수록 확산연소가 많이 발생하는 것을 실기관을 통하여 확인하였다.

한편, 저자들도 점화장치와 당량비와 유동에 따른 연소특성을 밝힌 결과, 난류강도의 영향은 착화초기의 화염보다는 반응대에 충분한 에너지 공급이 가능해지는 화염크기에서 커지고, 가연한계 부근을 제외한 착화 가능한 범위에서 연소기간은 방전에너지의 분포나 크기에 거의 영향을 받지 않음을 전보(前報)<sup>4)</sup>에서 보고한 바 있다. 또한, 최근의 기관 개발과 관련된 연구는 저공해 및 저연비를 실현하기 위하여 희박연소기관에 관심이 집중되고 있지만, 아직도 희박연소의 안정화를 위한 최적 유동장의 조건이 정립되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 전보에 이어서 강제유동의 제어가 가능한 정적연소기와 점화에너지의 방전특성이 상이한 3종의 점화장치를 사용하여, 초기온도와 초기압력 조건이 실기관(實機關)의 그것과 유사한 분위기에서, 이혼합비로부터 희박가연한계에 이르기까지의 희박혼합비 영역에 중점을 두고, 혼합기의 당량비, 난류강도와 점화에너지에 따른 가연한계와 상호의 관계가 연료·공기 혼합기의 착화 및 연소에 미치는 영향을 밝히는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 정적연소실은  $\phi$  65mm, 폭 50mm의 원통형으로 체적이 175cc이며, 점화위치는 연소실 중앙이고, 점화전극은  $\phi$  1mm인 피아노선을 사용하였다. 용량 100W인 판히터 2개를 연소실 외벽에 부착하여 연소실 내부를 설정온도로 제어하였고, 연소실 내부에 공급된 공기와 연료의 혼합과 난류강도의 변화를 위하여 연소실 내에 회전수를 0~12,000rpm까지 제어할 수 있

는 팬을 설치하였다.

유동속도 측정 결과의 한 예를 Fig.1에 보인다. 균일혼합을 위한 팬의 회전수가 고속인 경우에는 유속의 변동 주기가 짧아서 연소에 미치는 영향이 일정하였으나, 저속에서는 유동속도의 변동주기가 길어서 특히, 희박혼합비 범위에서는 동일 혼합기 조건에서 연소속도나 연소압력의 변동이 있음을 확인하였으나 시험횟수를 증가시켜 그 영향을 최소화 하였다.

난류강도의 계산<sup>3)</sup>은 정온도형 열선유속계로써 점화플러그의 전극사이에 열선( $\phi$  5 $\mu$ m)을 부착하여 순간의 변동속도를 측정하고, 변동속도 측정기간 동안의 평균속도를 구한 후 아래 식을 이용하여 산출하였다. 본 실험 조건에서의 평균속도는 1.60~6.23m/s 범위였다.

$$u' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_m - U_i)^2} \tag{1}$$

방전에너지는 고전압프로브(HV-P30, Iwatsu electric Co.)와 고전류프로브(CP-502, Iwatsu electric Co.)를 사용하여 측정, 산출하였다. 진공펌프로 연소실 내의 압력을 부압으로 만든 후, 연료주입구를 통하여 마이크로리터 주사기(용량 10, 50, 100 $\mu$ l, 최소단위 0.2, 1.0 $\mu$ l)로써 설

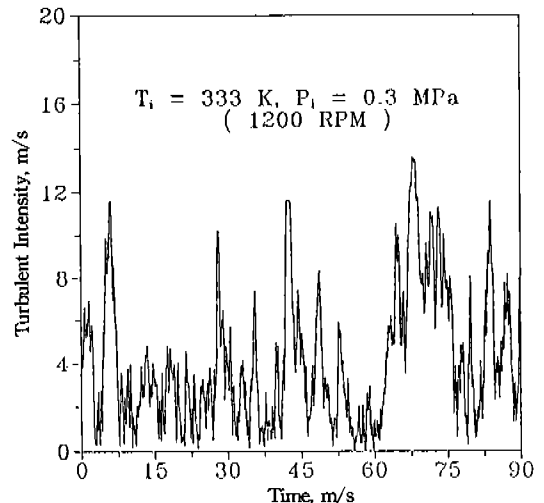


Fig.1 Flow velocity at the spark plug gap

정 연료량(Iso-octane, 또는 메탄올 99.9%)을 공급한 후, 설정된 압력과 온도로 조정된 공기를 공급하여 연료·공기를 균일하게 혼합시킨 후 연소를 행했다. 대기온도에서 연소실에 주입되는 연료량을 체적혼합비로 표시하여 사용하였다<sup>4),5)</sup>.

점화장치는 축전기에 충전되는 충전전압을 변화시키에 따라 점화에너지의 크기를 변화시킬 수 있고 방전기간 200 $\mu$ s 정도로 짧게하여 방전에너지의 밀도가 가장 코드로록 설계·제작한 축전기 방전식 점화장치(CDI)와 상용점화장치를 변형하여 일차코일의 통전시간을 제어함으로써 방전

기간을 변경하여 용량성분과 유도성분의 에너지 크기 제어가 가능한 단발 점화장치(SIS)와 20KHz의 속도로 최장 10ms동안 다수회점화가 가능하고 에너지 밀도는 적으나 총 방전에너지가 가장크고, 매 점화시 마다 용량성분과 유도성분이 존재하며 점화횟수의 조정이 가능한 연속점화장치(MIS)를 사용하였고, 일정 조건에서 측정된 에너지의 크기는 Table 1과 같다.

예로서 점화장치 중의 MIS 점화장치의 개념도와 2차전압, 전류의 파형을 Fig.2에 제시한다. 2차전압 파형은 초기에 수회분의 방전용량이 충전된 후에 브레이크다운이 발생하는 현상을 볼 수 있고, 커널이 생성된 후에는 매회 설정속도로 점화가 이루어진다. 특히, 브레이크다운 발생시키는 방전분위기의 온도, 압력에 의존한다. 또 2차전압과 전류를 확대하여 계측한 결과 매회 브레이크다운 현상이 생겨 용량성분과 유도성분이 존재함을 확인하였다.

Table 1 Ignition Energy

Ignition System	Breakdown Energy (mJ)	Arc-Glow Energy (mJ)	Total Energy (mJ)	Discharge Duration (ms)	Ignition Condition
SIS (2.3ms)	1.5	7.9	9.4	0.54	$T_i=373K$ $P_i=0.69MPa$
CDI (540V)	1.2	15.3	16.5	0.20	$T_i=373K$ $P_i=0.69MPa$
MIS (10ms)	1.8	78.5	80.4	6.20	$T_i=373K$ $P_i=0.69MPa$

3. 결과 및 고찰

Fig.3(a,b)에 연료의 영향과 초기압력, 점화장치의 방전에너지특성, 유동의 크기에 따른 회박

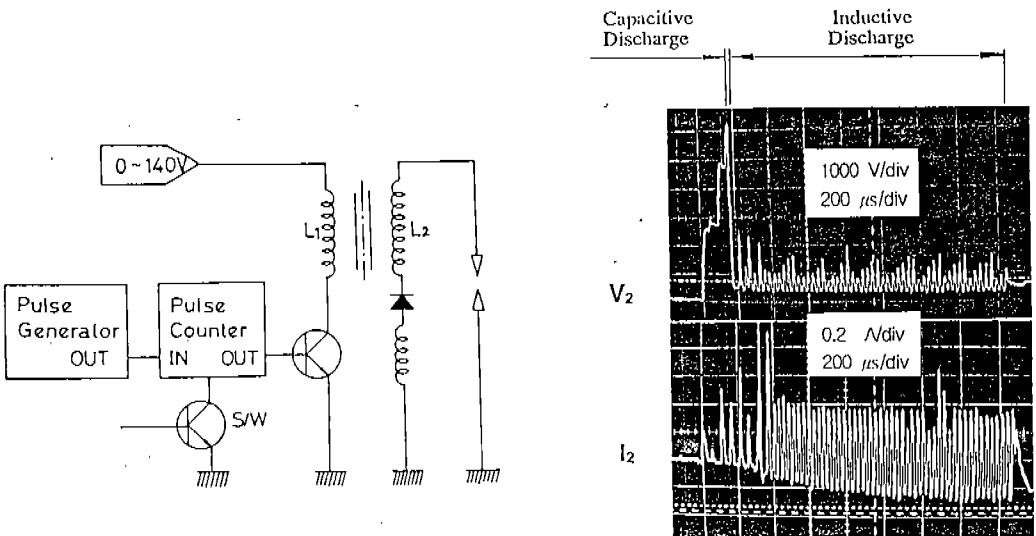


Fig.2 Block diagram of MIS circuit and secondary voltage and current variation with time

가연한계를 나타낸다. 그림의 경우 각 조건에서 데이터의 윗쪽 영역이 착화 가능한 영역이며, 각각의 선들은 해당조건에서의 가연한계영역을 나타낸다. 점화에너지의 크기는 Table 1에 제시한 바와 같고, 점화시도 횟수는 10회, 100% 발화한 경우를 데이터로 채택하였으며, 메탄을 연소 시에는 CDI 점화장치를 사용하였다. 그림 (a), (b)에서 보는 바와 같이 난류강도가 증가할수록 가연범위는 좁아지는 반면, 초기압력이 증가함에 따라 가연한계가 넓어짐을 그림 (a)에서 볼 수 있다. 또, 그림 (b)에서 MIS 점화장치의 경우는 연속점화의 형태로 50 $\mu$ s 마다 1회의 방전을 하게 되고 6ms동안 약 120회의 점화가 이루어지며, 매 방전시 마다 용량성과 유도성에너지가 존재하면서 적은 에너지를 오래동안 지속시키는 형태의 방전이다. 특히, 挑瀬 등의 보고에 의하면 용량성에너지를 포함하는 경우에는 유도성분만의 경우에 비하여 방전초기에 매우 강한 압력파가 관찰되고 그 결과 고온 가스핵이 방전 축의 수직방향으로 성장함을 밝혔다.<sup>6)</sup>

방전에너지의 절대량이 큰 MIS의 경우에는 단위시간당의 방전에너지는 적으나 방전기간이 길어서 가연한계가 가장 넓은 값을 나타낸다. 특히, 유동이 적을 수록 가연범위가 넓어지는 것은

균일혼합기이어서 유동에 따른 긴 방전기간의 유리함이 없고 오히려 정지분위기이기 때문에 커널의 생성 및 유지에 유동으로 인한 온도구배가 완만해지는 현상을 피할 수 있기 때문으로 판단되며 특히, 다수회점화로 인한 고온 가스핵의 성장에 큰 영향을 미치는 용량성 에너지가 매 점화마다 발생하는 효과도 있을 것으로 생각된다. 이는 동일 조건에서 혼합기 대신 공기중에 방전을 행한 경우의 커널사진으로부터 확인하였다. 즉, 정지시에 비교하여 유동시에는 동일 방전에너지에서 고온가스부가 확산함으로써 체적이 증가하게 되고 그로 인해 온도구배가 완만해지게 될 것으로 추측된다.

초기온도와 압력을 일정하게 하고, CID점화장치를 사용하여 난류강도를 변화시킨 경우에, 연료에 따른 연소기간과 당량비와의 관계를 Fig.4 (a, b)에 제시한다. 각 연료조건에서 연소기간과 당량비와의 관계는 거의 동일한 경향을 보였으며 이소옥탄의 경우에 데이터가 약간 흔들리는 것은 이소옥탄의 이론공기량이 메탄올에 비해 15.10/6.45이기 때문에 동일 당량비에서 연료량은 반 정도로 줄어 공급연료량이 적어져서 당량비의 재현성이 상대적으로 떨어지기 때문으로 짐작된다. 유동분위기의 경우에는 점화하기 전부터 연소중

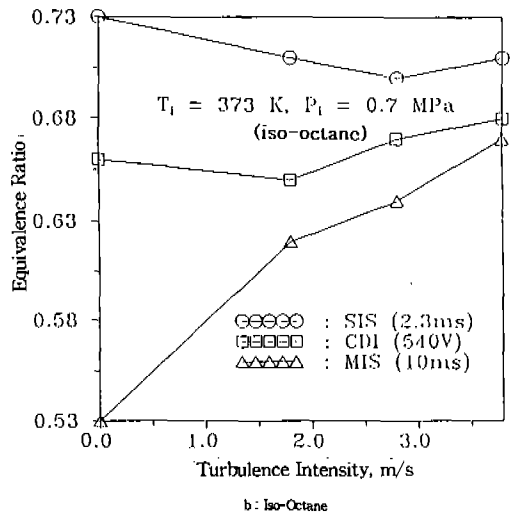
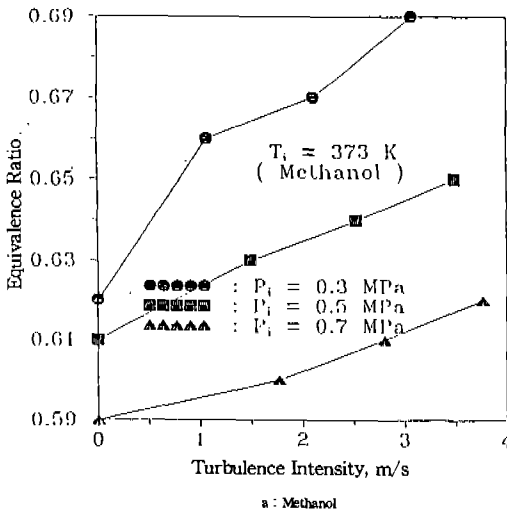


Fig.3 Relations between ignitability equivalence ratio and turbulence intensity

료까지 팬은 계속 구동되며 설정된 크기의 난류 강도를 유지한다. 본 연구에서는 희박혼합비 영역을 대상으로하기 때문에 그림에서는 이론혼합비를 기준하여 희박혼합비 부분만을 표시하였다. 연소기간에 미치는 당량비의 영향은 이론혼합비를 기준으로 볼 때, 희박영역에 있어서 길어지며 특히, 희박해지수록 연소기간의 증가율은 커

짐을 알 수 있다. 또한, 난류 강도 증가함에 따라 모든 당량비 구간에서 연소기간은 짧아지며 특히, 난류강도가 4.2m/s로 증가함에 따라 전 당량비 영역에서 연소기간이 50% 넘게 감소하는 경향을 보였다. 본 연구를 통하여 연소기간( $\tau$ )에 가장크게 영향을 미치는 요인은 당량비로서 정지, 유동분위기의 두 조건에서  $\phi=1.2$ 로부터

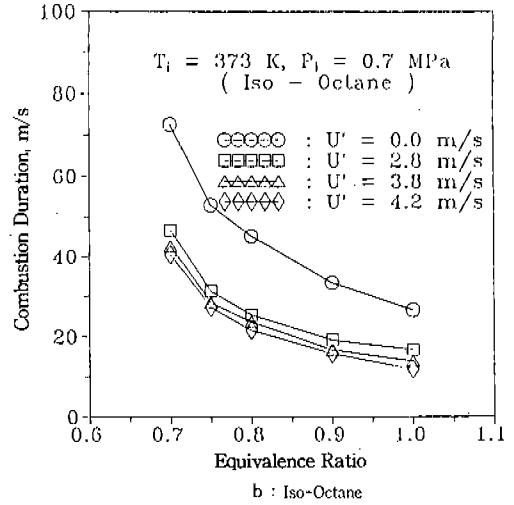
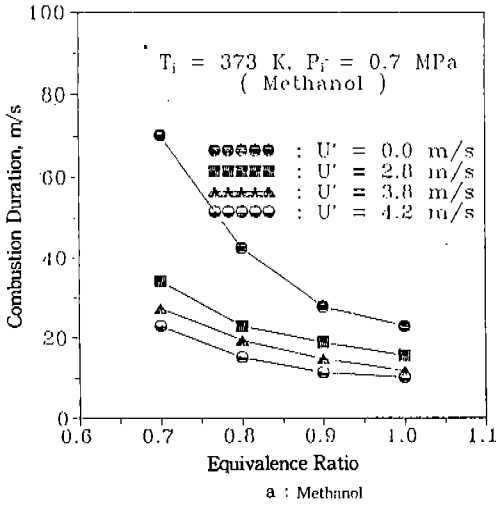


Fig.4 Relations between combustion duration and equivalence ratio at various turbulence intensities

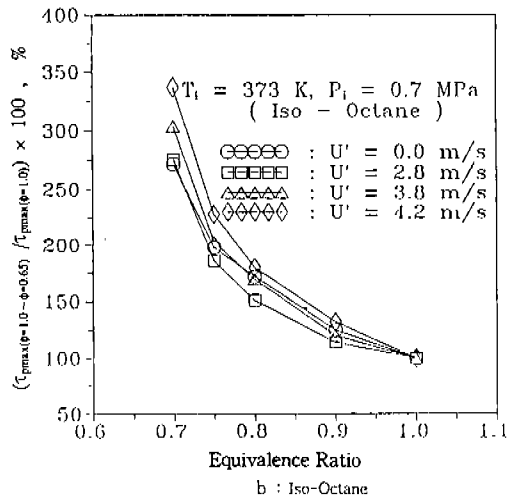
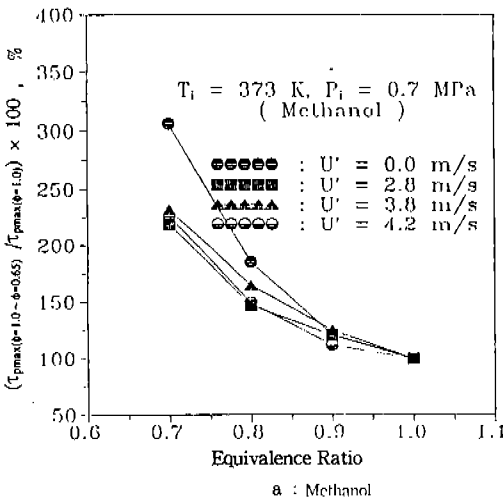


Fig.5 Relations between the rate of combustion duration and equivalence ratio at various turbulence intensities

회박가연한계 범위까지에서 다음의 관계를 보였다.

$$\tau \propto \phi^{-7.46} \quad (2)$$

난류강도  $u'$ 의 영향으로는 정지분위기에서 난류강도가 4.2m/s로 증가할 때 동일 당량비에서 메탄올은 60%정도의 연소기간 단축을, 이소옥탄은 50%정도의 단축을 보였으며 4.2m/s를 초과하면 오히려 연소기간이 길어지기 시작하는 현상을 보였다. 이와 같은 결과로부터 난류강도가 연소에 순기능을 하는 범위에서 연소기간과 유동은 다음의 관계를 보였다.

$$\tau \propto u'^{-0.82} \quad (3)$$

Fig.5(a, b)에  $\phi=1.0$ 인 이론혼합비 조건의 연소기간에 대한 각 회박혼합비에서의 연소기간의 비( $\tau_{\text{pmax}(\phi=1.0-0.65)}/\tau_{\text{pmax}(\phi=1.0)}$ )의 백분율을 연료와 유동조건에 따라서 나타낸다. 연소기간의 비와 당량비 사이에서 전체적인 경향은 지수함수적인 관계를 보이니, 회박가연한계 부근에서는

연소기간이 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.  $\phi=1.0$ 의 연소기간에 비교하여 혼합비가 회박할수록 연소기간비는 길어져서 가연한계 부근에서는 150~300%의 값을 보인다. 특히, 그림 (b)의 경우 난류강도가 증가할수록 연소기간비는 증가함을 알 수 있다. 회박연소를 실기판에 적용할 때를 고려하면, 회박한계에서의 연소기간 지연현상을 유동만으로 해결하는 경우 회박혼합기 범위에서의 기관회전수에 한계가 있음을 알 수 있다.

Fig.6(a, b)에는 CDI점화장치를 사용한 경우,  $\phi=1.2$ (a, 메탄올)와 이론혼합비(b, 이소옥탄)로부터 회박가연한계까지의 연소최고압력의 변화를 보이고 있다. 본 그림은 주어진 초기조건에서 난류강도의 크기에 따른 연소최고압력과 당량비의 관계를 도시한 것이다. 각 당량비 조건에서 난류강도의 증가와 함께  $P_{\text{max}}$ 는 증가하며, 난류강도가 4.2m/s 근처에서 그 증가치는 한계를 보인다. 이와같은 난류강도에 따른  $P_{\text{max}}$ 의 증가는 가연범위 내의 동일 당량비에서 거의 같은 경향을 보이며 정지분위기에서의  $P_{\text{max}}$ 값에 비하여 최고의  $P_{\text{max}}$ 값을 보이는 최적난류강도에서의

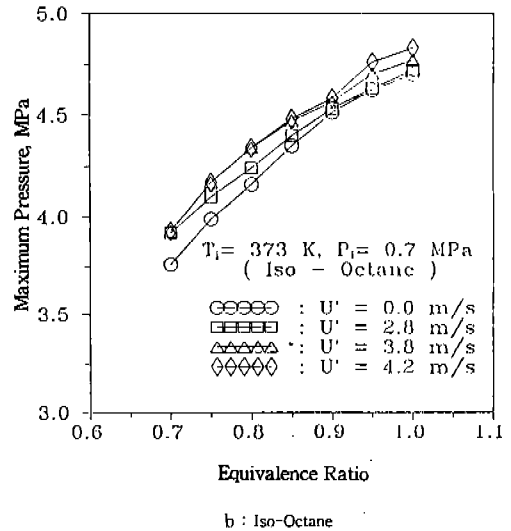
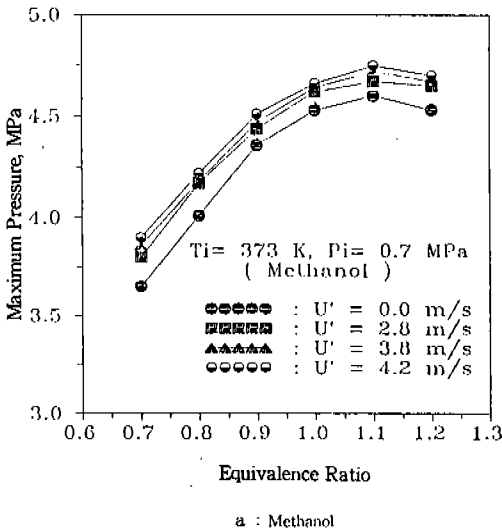


Fig.6 Relations between maximum pressure and equivalence ratio at various turbulence intensities

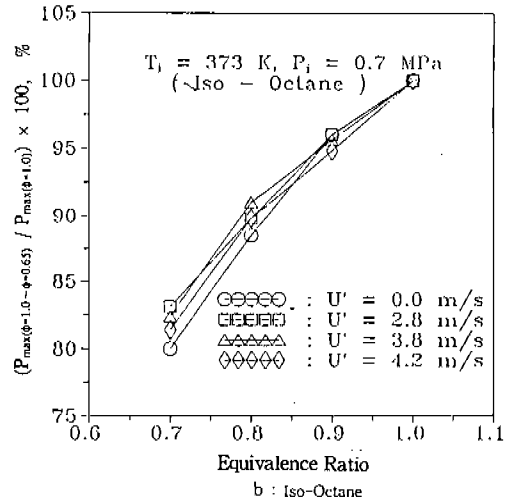
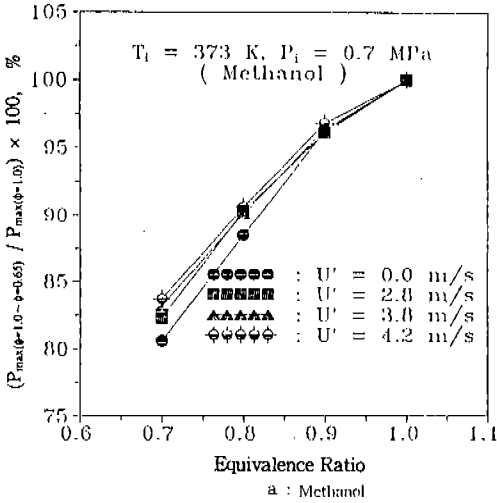


Fig.7 Relations between the rate of combustion pressure and equivalence ratio at various turbulence intensities

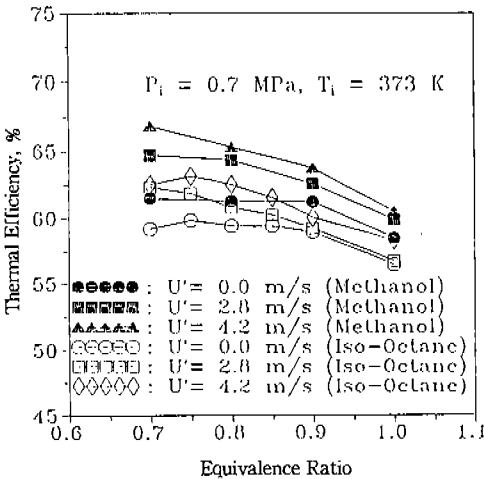


Fig.8 Relations between thermal efficiency and equivalence ratio at various turbulence intensities

$P_{max}$ 는 4~7% 범위의 증가치를 보인다. 난류강도에 따라 약간의 차이를 보이지만,  $P_{max}$ 와 당량비의 관계에서 당량비 1.1~1.2 사이에서 최대의  $P_{max}$  값을 보임을 알 수 있으며 이는 연소기간의 경우와 일치하는 현상이다. 이와같은 결과로 볼 때, 가연한계 내에서 난류강도가 발화에 지장을 주지않는 범위에서는 연소최고압력, 최단연소기

간을 얻을 수 있는 최적의 난류강도 조건이 존재함(본 연구의 경우 4.2m/s 부근)을 알 수 있다. 두 연료 조건에서  $\phi=1.0$ ~가연한계까지의 범위에서 연소최고압력과 당량비는 거의 비례하며 희박한 쪽으로 최고압력이 감소하는 현상을 보인다.

동일 행정체적을 가진 기관에서 희박연소를 행할 때의 연소최고압력 강하를 알아보기 위하여 이론혼합비에서의 연소최고압력에 대한 각 희박혼합비에서 연소최고압력의 비를 백분율로 표현하여 Fig.7(a, b)에 제시한다. 희박혼합비 범위에서 연소최고압력비는 1.0인 부(負)의 기울기로서 거의 직선적인 감소를 보인다. 난류강도가 적정치에 가까울수록 감소경향은 줄며 희박가연한계 부근에 접근할수록 압력감소에 미치는 난류강도의 영향은 증가한다. 또, 연소기간의 경우와 같이 희박 혼합비 영역에서의 연소에서는 연소기간은 급격히 증가하고, 연소최고압력은 급격히 감소하며 그 값은 약 20% 정도이다. 즉, 희박혼합기 쪽에서 기관의 회전수와 평균유효압력이 감소하여 최고출력이 급격히 감소함을 알 수 있다.

주어진 초기조건에서 연소실에 공급된 연료의 열량( $Q_1$ )이 연소실 내 압력상승에 기여한 정도( $Q_2$ )를 알아보기 위하여  $\eta = (Q_2/Q_1) \times 100$ 으로

표시되는 유효열량을 두 연료조건에 대하여 구하였다. 여기서  $Q_u$ 는 연소최고압력으로부터 산출한 열량이다. 주어진 초기온도, 압력조건에서 난류강도의 영향을 유효열량률과 당량비의 관계로서 Fig.8에 제시한다. 두 연료조건에서 난류강도가 증가하면 유효열량률도 약간 증가하는 현상을 보이고 특히, 이혼합비로부터 희박혼합비 쪽으로 접근할수록 증가하는 현상을 보인다. 난류강도의 증가와 함께 유효열량률이 증가하는 것은 난류강도의 증가와 함께 연소기간이 단축되는 영향으로 판단되며, 희박혼합비 쪽에서 높은 값을 보이는 것은 희박혼합비에서 연소최고온도가 낮기 때문으로 판단된다. 특히 이소옥탄의 경우가 메탄을 보다 낮은 값을 보이는 것은 이소옥탄이 메탄을 보다 연소기간이 대략 120% 정도 길어져서 냉각손실이 증가하기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

강제유동의 제어가 가능한 정적연소기를 제작하여 방전에너지의 분포와 크기가 서로 다른 3종의 점화장치와 당량비 및 유동의 크기를 변화시켜서 서로의 관계가 혼합기의 착화 및 연소특성에 미치는 영향을 밝혔다.

- 1) 착화성은 단위시간당의 방전에너지가 큰 경우에 양호하나 단위시간당의 방전에너지는 적어도 용량성과 유도성에너지가 매회 발생하는 다수회점화의 경우 더욱 양호해진다.
- 2)  $\phi=1.0$ 에서의 연소기간에 대한 희박혼합비 영역에서의 연속기간비는 지수함수적으로 증가하며 특히, 가연한계 부근에서는 직선적으로 증가하고 난류강도가 증가할수록 변화율은 증가한다.
- 3)  $\phi=1.0$ 에서의 연소최고압력에 대한 희박혼합비 영역에서의 연소최고압력비는 희박가연한계쪽으로 직선적으로 감소하며 그 기울기에 미치는 난류강도의 영향은 적다.
- 4) 메탄올과 이소옥탄의 연소특성 비교에서

유동이 연소기간, 연소최고압력에 미치는 영향은 동일한 경향을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 통상산업부에서 지원하는 G7과제 중 저공해공통기반기술의 일환으로 수행하여 얻은 연구결과의 일부로서 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. R. J. Tabaczynski, "Turbulence and Turbulent Combustion in Spark Ignition Engines", Prog. Energy Combust. Sci., Vol.2, pp.143-165, 1976.
2. 大須賀 外 3名, "混合比 形成과 空燃比 計測", Lean-burn Gasoline Engine Symposium 前刷集(JSAE) pp.13-19, 1982.
3. John B. Heywood, "Internal Combustion engine Fundamentals", McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, pp.330~336, 1989.
4. 이종순, 하종률 외 3인, "정적연소에서 점화에너지와 당량비와 유동과의 관계" 대한기계학회논문집 제19권 제 9호, pp.2308~2315, 1995.
5. Ha, J. Y., Jung, S. S., Lee, J. S., Lee, T. W and Lee, S. S., 1994, "Fundamental Study on Combustion Characteristics of Methanol Fuel in a Constant Combustion Chamber", FISITA '94 Congress(China), Vehicle and Environment, No.945146, pp.305-310, 1994.
6. 挑瀬 外 4名, "複合放電"에 의한 高温GAS核 生成課程의 數值Simulation", 日本機械學會論文集(B編) Vol.59, No.557, pp.262-269, 1993.