

## 충격파관을 이용한 분무연료의 착화지연에 관한연구

## A Study on Ignition Delays of Sprays Using a Shock Tube

정진도\* 류정인\*\* 水谷幸夫\*\*\*  
J.D.Chung, J. I. Ryu, Mizutani Yukio

## ABSTRACT

A shock tube technique was developed in which a freely falling droplets column produced by an ultrasonic atomizer was ignited behind reflected shock.

In the present study, the effects of turbulent mixing on the ignition delay of a cetane was decided, also, ignition process was investigated. For the purpose of disturbance of droplets column and mixing, authors installed turbulent lattice in shock tube.

Usually, the ignition delay is so called Arrhenius plot which found break point in the Arrhenius plot on the high temperature side. The rate of misfiring increased rapidly below 1080K, but ignition took place from 838k and luminous flame was seen to spread over the whole section by turbulent lattice.

Length, from end plate to turbulent lattice, was varied with 60,40,20mm.

Also, ignition process was detected by Photo transistor. As a result, it was found that physical factors changed ignition delay greatly and turbulent mixing had a considerable effects in the ignition process.

## 1. 서 론

분무연료의 착화를 지배하는 인자는 통상 물리적 인자와 화학적 인자로 나누어진다. 물리적 인자로는 유적의 무화 및 증발, 연료와 고온공기의 혼합 및 확산 등으로 볼 수 있고, 화학적 인자로는 연료로 탄화수소를 생각할 경우, 연료증기의 열분해와 산화 또는 분해되어진 증기와 산소가 반응해서 전과 가능한 화염

핵을 형성하면서 착화되는 것으로 매우 복잡한 현상이다.

따라서 분무의 착화기구에 대해서는 아직 알려져 있지 않은 점이 많고 이러한 여러 인자가 착화현상에 어떤 영향을 미치고 있는지는 명확하지 않다.

분무연료 또는 가스연료를 고온 산화제 중에 분출한 경우의 착화지연을 Arrhenius 선도로 그려보면 측정값은 대개 일직선상에 있

\* 정회원, 충남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 충남대학교 기계공학과

\*\*\* 日本 大阪大學 工學部

다.<sup>1,2)</sup>

저자들은<sup>5,11)</sup> 하향으로 설치된 초음파 분무기에 의해 자유낙하 상태에 있는 예혼합 분무주를 만들어서 반사 충격파로서 순간적으로 단열 압축시켜서 혼합을 동반하지 않는 분무의 착화과정에 관한 실험에서 충격파관 연소 특유의 성질로 다음과 같은 점을 관찰하였다.

- 1) 통상의 분무착화는 650 K 부근에서 생기지만 충격파관 실험에서는 1080 K 이하에서는 생기기 어려웠다.
- 2) 착화지연의 압력 의존성이 통상의 분무착화에 비해서 매우 작다.
- 3) 1180 K 부근에서 고온영역과 저온영역에서의 활성화 에너지를 비교하면 큰 차이가 있다.<sup>5)</sup>

이러한 사실에서 충격파관 속에, H모양의 난류 발생장치를 임의 장소에 설치하는 것에 의해 충격파면을 교란시켜 예혼합분무주에 외란을 가했다.

이것에 의해 혼합이 없는 기존의 측정결과와 난류격자가 있을때의 분무의 착화 지연시간이 어떻게 변화하는가 또 박판에서 난류격자와의 거리 L에 의한 영향 및 그때의 연소과정을 화염 발광장치로 검출했다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 충격파관은 충격파를 형성시키는 고압부와 저압부 이중 격막 파괴시간의 제어를 가능하게 하는 중압부로 구성되어 있는데 전체 형상은 그림 1에 나타나 있다.

관은 고압에 충분히 견딜 수 있는 스텐레스(SHS 304)제, 이중 격막장치(double diaphragm)형이고, 충격파의 감쇄를 없애고 불순물이 내벽에 잔류하는 것을 막기 위해 관 내면은 초정밀 가공되어 있다.

### 배기계

저압부 관속에 충전된 기체속에 있는 불순물의 자발화를 방지하기 위하여 일단 고진공( $1 \times 10^{-4}$  torr)까지 배기시킨 후, 불순물이 없는 고순도 가스(불순물 16 ppm 이하)를 충

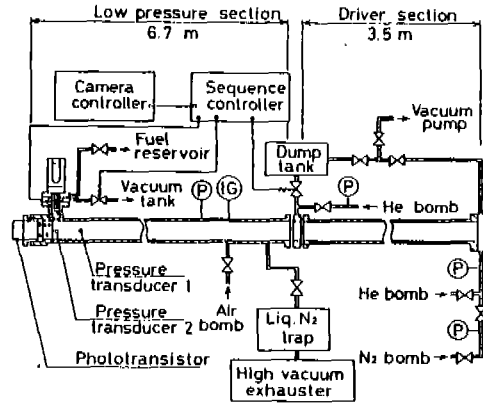


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

전시킨다. 진공은 로타리 펌프와 확산펌프 2대를 사용해서 진공시켰으며, 진공도의 확인은 Geissler 관의 색깔과 전리진공계(ULVAC GI-TL2)로서 확인했다.

또 확산펌프 속의 기름증기가 저압실로 역류하지 않도록 1시간 단위로 액체 질소 증기 트랩을 설치해서 액체 질소를 공급했다.

### 연료분사계

연료 분사시에는 입경의 미립화를 위하여 공

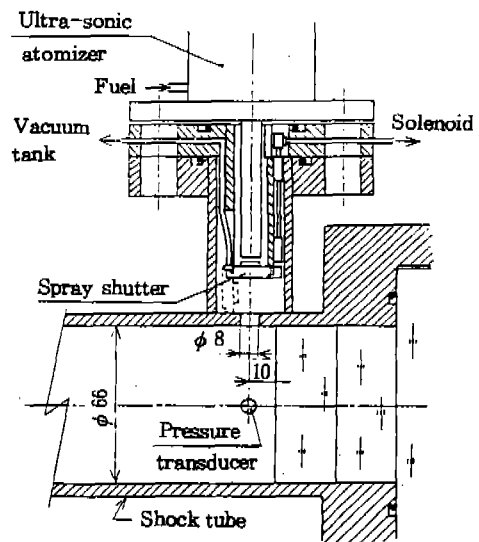


Fig. 2 Observation section of shock tube, supply unit and shutter

진주파수가 18 KHz 의 초음파 분무기(진동자 TDK,  $\pi$ (A)형, 공칭공진주파수 20 KHz)를 사용했다.

초음파 분무기에서 정상적으로 미립화되어 형성되고 있는 분무는 처음에 하부쪽의 동그랗게 파여진 샤프터에서 받아들여져서 머물고 있으면 진공탱크에 접속되어진 흡인 파이프를 통하여 충격파관 밖으로 제거되어진다.

미립화가 계속되는 도중에 시컨설 제어장치의 신호에 의해 전자밸브는 순간적으로 샤프터를 개방시키고 동시에 흡인 파이프는 차단된다.

이 조작에 의해 정상적으로 무화된 연료를 측정부에 원하는 임의시간에 낙하시키는 것이 가능하다. 충격파관에 설치된 샤프터의 구조 및 연료 공급부의 형상이 그림 2이다.

이충격막장치

압력을 제어하기 위하여 충격파관의 고압부와 저압부 사이에 중압부를 두어서 격막을 설치했다.

먼저 중압부에  $5\text{kg/cm}^2$ , 고압부측에  $13\text{kg/cm}^2$ 을 넣는다. 격막의 두께는  $0.2\text{mm}$ 로 내압은  $10.5\text{kg/cm}^2$ 이다. 이때 고압측 격막은 내압보다  $2.5\text{kg/cm}^2$  초과하지만 중압부 압력이  $5\text{kg/cm}^2$ 으로 실제로는 격막의 내압보다  $2.5\text{kg/cm}^2$  낮은 압력이 가하여져 있다.

이때 시컨설 제어장치로 전자 밸브를 작동시키면 급격히 중압부측은  $1\text{kg/cm}^2$ 이하로 되어서 격막이 파괴되면서 충격파가 발생한다.

난류발생장치

난류 혼합이 분무의 착화현상에 미치는 영향을 조사하기 위해 종래 사용되어온 충격파관속에 지름 8 mm의 청동제 환봉으로 H형태로 된 난류격자의 모양이 그림 3이다. 관속에 설치되어진 난류발생장치의 전체적인 형상이 그림 4에 나타나 있다.

박판에서 난류격자까지의 거리 L도 변화시킬 수 있게끔 작은 나사로 체결되어 있고, 네 개의 지지대의 환봉은 박판(end plate)의 강화유리 속에 네개의 구멍을 파서 지지했다.만

약 지지하지 않으면 충격파의 강도때문에 난류격자와 박판과의 충돌, 관벽의 파손등의 위험성이 있으므로 이것을 예비실험으로 배제했다.

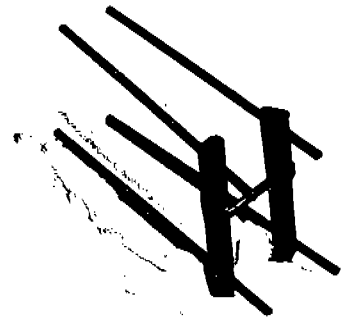


Fig. 3 Configuration of turbulent lattice (TWIN08)

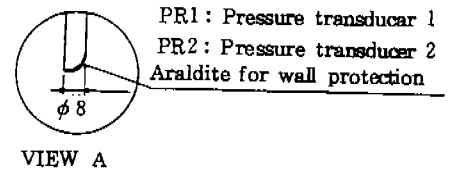
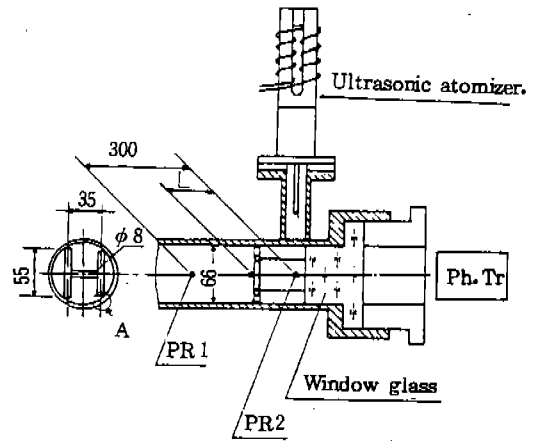


Fig. 4 The apparatus of turbulent occurrence

발화검출장치

Photo transistor 는 NEC-PD-32 H 의 제품으로 그림 5 에 그 구성을 나타내고 있다. 이 경우 저압실 박판으로는 강화유리를 사용했다.

발화의 검출강도를 높이기 위해서 협시각형을 사용했고, 포화 조도 40 lx (출력 90 mA), 0-20 lx (70 mA)에서 거의 직선 응답을 나타내고, 10 lx에 있어서 50% 감도시각 8°, 응답과장대 360-1150 nm (피크 800 nm)의 특성을 갖는다.

분광기를 사용해서 저압실 박판 강화유리의 분광 투과특성을 조사했으며, Photo transistor의 종합 분광 감도특성이 그림 6에 나타나 있다. 또 13개의 Photo transistor의 출력전류는 100 Ω의 저항을 통해서 전압으로 변환한 다음 평균시켜서 1개의 신호로 처리시켜 Amp로 증폭해서 사용했다.

이 발화 검출장치는 CH와 C<sub>2</sub> Radical의 화학발광, 930 nm 부근의 수증기 흡수 Band, 근적외 영역의 휘염발광을 검출할 수 있다.<sup>10)</sup>

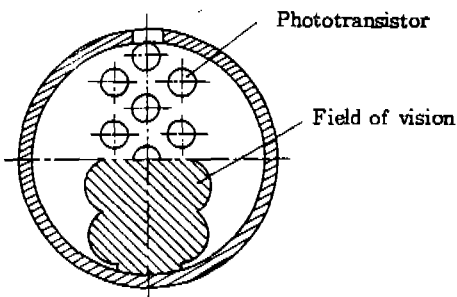


Fig. 5 Structure, range of sight Photodetector unit

입도분포

연료로는 포화 증기압이 아주 낮은 세탄 (Cetane C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>)을 사용했으며, 초음파 분무기에서 자유 낙하하는 입도분포가 그림 7에 나타나 있다. 측정방법으로는 산화마그네슘피막 혼적법<sup>6)</sup>을 사용하여 측정했다. 여기서 100 ΔN/Δd/n는 직경범위 Δd의 유적그룹에 대한 확률 밀도분포이다. Sauter 평균입경은 49 μm이다.

반사충격과 온도(T<sub>5</sub>) 계산

반사충격과 온도와 압력의 계산은 대기온도 (°C), 저압부 압력 (torr), 입사충격과 통과시

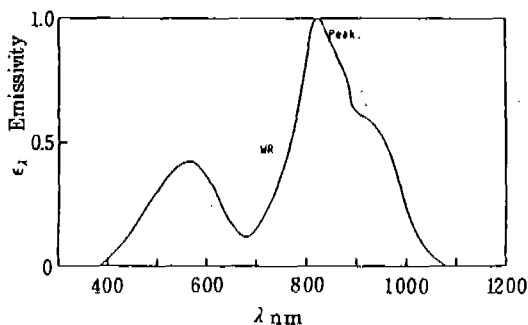
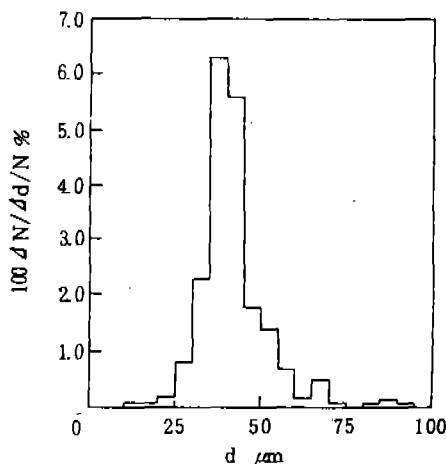


Fig. 6 Overall spectral sensitivities Photo-Transistor (Wide Range)



Cetane, P<sub>1</sub> = 27 kPa, q = 0.5 cm<sup>3</sup>/min  
 $\bar{d} = 49.2 \mu\text{m}$

Fig. 7 Size distribution of droplets (P<sub>1</sub> = 27 kpa, q = 0.5 cc/min)

간(μs)을 입력 데이터로 사용하여 shock3의 컴퓨터 프로그램을 사용해서 계산했다. 대기 온도 25 °C, 저압부 압력 200 torr, 압력변환기 1과 2를 통과하는데 걸리는 시간이 321.4 μs일때 계산결과 예가 부록 1에 있다.

3. 착화지연의 정의

착화의 검출에는 Photo transistor에서 얻은 광대역 발광신호 V<sub>WR</sub>을 500배 증폭한 신호 V<sub>WR</sub>(X500)을 이용한다. 그림 8은 분무주 단면에 설치된 즉 반사충격과 배후에 설치

되어진 압력 변환기의 신호와  $V_{WR}$  (X500)을 나타낸 것이다. 여기서  $t$ 는 분무주 단면에 반사 충격파가 도달하고나서 부터의 시각이다.

여기에서

(a) 착화지연을 입사 충격파가 분무주 단면을 통과한 순간에서 측정하느냐?

(b) 반사 충격파가 분무주 단면을 통과한 순간에서 측정하느냐?에 의해서 제 1의 분류가 되고

(c)  $V_{WR}(X500)$ 이 0에서 급격히 상승하는 순간을 착화지연으로 하느냐?

(d) 직선적으로 상승하는 부분의 연장선이 횡축과 교차하는 점을 착화시각으로 하는가에 의해서 제 2의 분류가 가능해진다.

이러한 분류를 조합해 보면 (a)-(c)를  $\tau_{in}$ , (b)-(c)를  $\tau_{re}$ , (a)-(d)를  $\tau_{in}^*$ , (b)-(d)를  $\tau_{re}^*$ 로 한다. 그래서 반사 충격파의 착화지연 시간으로는  $\tau_{re}$  또는  $\tau_{re}^*$ 를 선택했다.

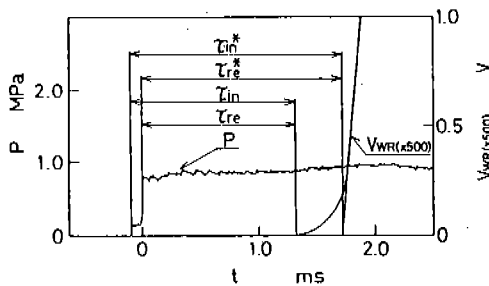


Fig. 8 Definition of ignition delay (Signals of pressure and Wide-Range emission)

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 고온영역에서 착화지연의 온도의존성

반사 충격파 배후의 압력은 저압부 충전기 체압력과 고압부 설정압력(He 가스와 액체질소의 혼합기 압력)의 변화로 반사 충격파 배후의 온도  $T_5$ 를 변화시켰다. 착화지연  $\tau_{re}$ 와  $\tau_{re}^*$ 가 어떻게 변화하는가를 조사했다.

반사 충격파 온도 1380 K에서부터 착화가 일어날 수 있는 온도 1080 K까지의 착화지연 그래프가 그림 9이다. 착화지연의 정의에 나

타난  $\tau_{re}$ 와  $\tau_{re}^*$ 를 그림 9에서 보면  $\tau_{re}$ 에 대해서는  $1000/T_5$ 가 0.85 부근( $T_5=1180$  K),  $\tau_{re}^*$ 에 관해서는  $1000/T_5$ 가 0.88 ( $T_5=1130$  K)이다. 이것을 Arrhenius 선도에서 보면, 이 부근에서 활성화 에너지가 변화하여서 변곡점이 나타났다.

활성화 에너지는  $\tau_{re}$ 에 대해서 보면, 고온에서는 167 KJ/mol 이고, 저온에서는 31.2 KJ/mol 을 나타내고 있다. 또  $\tau_{re}^*$ 의 경우는 156 KJ/mol 과 32.4 KJ/mol의 값으로서 변곡점의 저온측에서 얻은 값은 전기로법<sup>7)</sup>과 급속압축장치<sup>8)</sup>에서 얻은 값(26.4 KJ/mol 및 32.6 KJ/mol)과 비슷하다. 그러나 고온측의 값은 전기로법에 비해서 크게 차이가 난다. 반면에 Spadaceni 등은 고온기류중에 직각으로 연료를 분사했을때 211 KJ/mol 이라는 값을 얻은 예도 있다.

여기서 실험식은  $\tau_{re} = A \exp(E/RT_5)^{10)}$ 이다. A는 0.032 이고, R은 일반 기체상수, T는 반사 충격파 온도이다. 그리고 1080 K 보다 저온에서는 연소가 되지 않는 부분이 대부분이고 발화 검출장치에 발화가 전혀 확인되지 않았다.

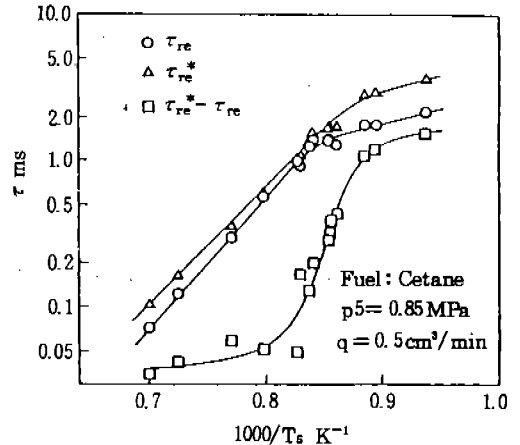


Fig. 9 High temperature side dependence of ignition delay

##### 4.2 저온영역에서 착화지연의 온도의존성

앞에서 논술한 것과 같이 분무의 착화를 지배하는 주요한 물리적 인자의 하나로서 연료

와 고온 공기의 혼합이다.

1080 K 이하에서는 통상의 착화현상이라고 할 수 있는 착화가 관찰되지 않아서 공기와 연료를 혼합시키기 위해 H모양의 난류 격자를 넣은 결과, 난류격자가 없을 때와는 달리 1080 K 이하에서도 발화를 확인할 수 있었다. 그 결과가 그림 10이다.

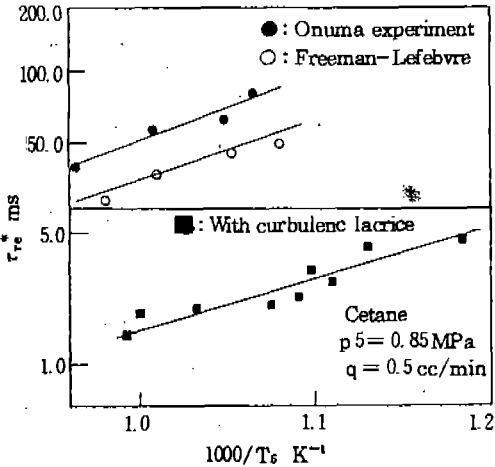


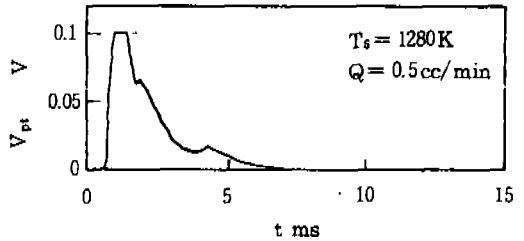
Fig. 10 Low temperature side dependence of ignition delay

충격파관에서 반사 충격파 온도를 1080K에서 838 K 까지 측정 한 결과를 Arrhenius 선도로 그린 것이 ■이다. 그림 10에서 Freeman-Lefebvre<sup>22)</sup>이 N-헥탄중기로 실험을 한 결과가 ○로서, Onuma<sup>9)</sup> 등의 착화지연 선도와 비교해 보면 연료 분출형태가 기체와 분무라는 차이에도 상관하지 않고 직선의 기울기는 서로 같은 경향을 보이고 있으며, 특히 그림 8의 고온영역에서 발생한 변곡점은 나타나지 않고 직선적이다. 그림 10을 실험식의 형태로 나타내면,  $\tau_{re} = 0.024 \exp(E/RT_s)$ 이고, 활성화 에너지는 29.5 KJ/mol이다. Freeman-Lefebvre의 결과를 본 실험과 비교하면 본 실험의 착화지연 기간이 훨씬 짧은 것은 연료의 분출형태의 차이에서 기인한다고 생각된다.

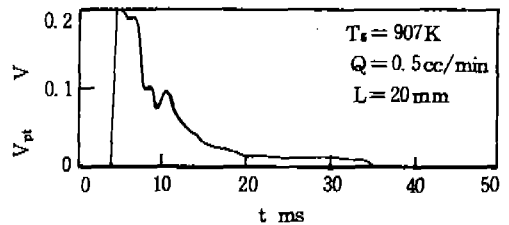
Onuma<sup>9)</sup> 등은 Freeman 등이 얻은 값보다 착화지연이 길지만 고온기류 중에 직각으로 이소옥탄 등을 분출해서 얻은 결과와도 같은 경향을 보인다.

또 난류혼합이 있는 저온상태(907 K)의 경우와 혼합이 없는 고온상태(1270 K)의 광대역 발광을 비교했다. 난류격자가 없을 경우, 907 K에서는 착화불능상태이므로 난류격자가 없어도 착화가 되는 1270 K와 난류격자가 있는 907 K와 착화를 비교해 보았다. 이 두 비교가 그림 11이다.

그림 11에서 (a)는 혼합이 없는 조건의 Photo transistor에서 직접 나타난 발광신호를 Digital storage oscilloscope (Model E-800D)에서 얻은 파형으로 x축은 발광검출시간으로 직접 얻은 시간이다. (b)는 난류격자가 없으면 착화가 일어나지 않는 저온인 907 K의 온도와 난류격자가 20 mm지점에 설치되었을 때 나타난 발광신호를 (a)와 같은 측정 장치로서 검출한 것이다. 그림 11에서처럼 발광강도는 오히려 난류격자가 있는 저온쪽이 온도차, 370 K임에도 불구하고 발광강도의 출력이 난류격자가 없을 때보다 2배정도 강하게 검출되었다. 이 경우의 발광형상은 비슷한 형태로 나타나 발광의 지속시간 즉 연소시간은 난류격자가 있는 쪽이 3배정도 길게 지속되고 있으므로 착화지연에 미치는 물리적인 인자의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.



a) Without turbulent lattice



b) With turbulent lattice (TWIN φ 8)

Fig. 11 Comparison of Wide-Range output as turbulent lattice installed

4.3 난류 의존성

그림 12는 같은 온도에서 혼합이 있는 경우와 없는 경우에 측정된 착화지연시간의 차이를 나타내고 있다.  $T_5 = 1350$  K 부근에서 ●표와 ■표의 착화지연의 차이는 0.03 ms 정도이고, 1230 K에서는 0.5 ms, 1123 K 주위에서는 1.11 ms의 차이가 나타나고 있다.

1080 K 이하의 비교는 난류격자가 없을때는 착화불능이므로 1080 K 이상의 비교밖에 되지 않았다.

1350 K에서는 희박 연료증기의 혼합이라는 물리적 인자의 영향보다 고온에 의한 연료증기의 열분해에 의한 화학적 인자의 영향이 크며, 1200 K 부근은 모적유적의 증발 및 혼합이 큰 영향을 미친다고 생각되며, 1123 K에서는 난류격자가 없으면 겨우 착화가 되어지나, 난류격자의 설치로 연료와 공기의 혼합이라는 물리적 인자의 영향으로 착화지연시간이 크게 단축되었다고 생각할 수 있다.

난류 혼합은 착화온도를 크게 내림과 동시에 착화지연을 단축시켰다.

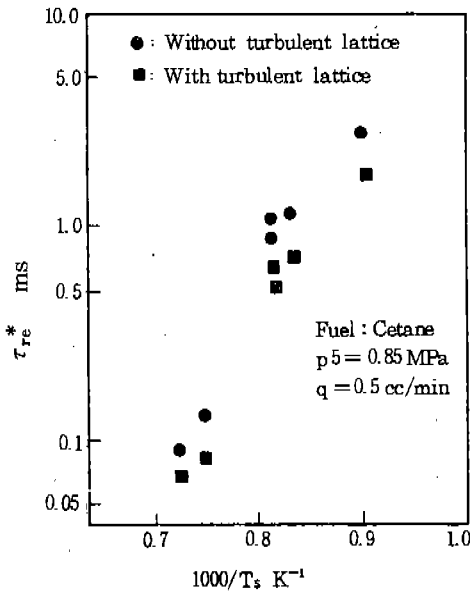


Fig. 12 The effect of ignition delay by turbulent lattice is installed

4.4 난류강도의 영향

박판(End plate)에서 난류격자까지의 거리 L을 60 mm, 40 mm, 20 mm로 변화시키면서 반사 충격과 온도 T<sub>5</sub>를 거의 같게 유지해서 착화지연과 착화과정이 난류강도에 의해 변화하는 형태를 조사한 결과가 그림 13에 나타나 있다.

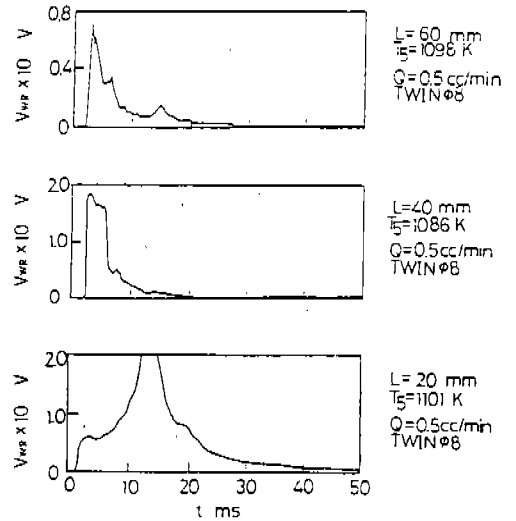


Fig. 13 Comparison of ignition signals as L is varied 60, 40, 20mm(Wide Range)

L = 60 mm인 경우 착화시기가 1.9 ms에서 예리한 피크를 이루며, 연소 지속시간은 짧게 된 후 다시 15 ms에서 조그마한 파형을 나타내며 28 ms 지점에서는 소멸된다. 혼합이없는 경우의 같은 온도조건<sup>11)</sup>에서 보다 발광 출력 전압은 4 배정도 강하고 연속 지속시간도 2.7 배 정도 증가하고 있다.

L = 40 mm인 경우는 L = 60 mm 때보다 난류강도의 증가로 더욱 더 활발하게 연소가 일어나고 있으며, 연소 종료시간은 L = 60 mm 보다 20 ms 정도 오히려 연소시간은 짧으나, 발광강도는 2 배정도(y 축 단위주의) 강한 것으로 연료 증기와 고온 공기의 혼합이 활발하게 일어나서 급격히 연소해진 것을 알 수 있다. 착화 검출시기는 1.7 ms 에서 일어났다.

L = 20 mm인 경우 착화검출 시기는 1.5 ms에서 착화되어서 L = 60 mm, 40 mm인 경우





5. Mizutani, Y. et al., "A Study on Ignition Phenomena of Sprays Using a Shock Tube" JSME, 52-476B, p.1945, 1986.
6. May, K.R., "The Measurement of Airborne Droplets by the Magnesium Oxide Method", J. Sci. Instrum. 27, pp.128-130, 1950.
7. Ininuma, K. and Yamazaki. K., "Spontaneous Ignition Delay of Fuel Sprays" Trans. JSME. 26, pp.1662-1667, 1960.
8. Melton, Jr., B.B. and Rogowski. A.R., "The Interaction of Air Motion, Fuel Spray, and Combustion in the Diesel Combustion Process" Tras. ASME, A94, pp.11-16, 1972.
9. Onuma, Y. et al. "Spontaneous Ignition of Fuel Spray in Steady Hot Air Flow", Trans. JSME, 52B, pp.3380-3387, 1986.
10. 水谷幸夫, "燃焼工学", p. 194, 森北出版, 東京, 1977.
- 11) Jin DO, Chung. and Mizutani, Y. and Nakabe, K. "A supplementary Study of Ignition Phenomena of Sprays Using a Shock Tube" JSME (in Japanese), 89-1160 (submitted), 1989.