

충격파관 시스템설계에 의한 분무의 착화현상 연구

정진도 · 水谷幸夫*

한국전력공사 기술연구원 전력연구실

*Osaka대학 공학부 기계공학과

A Study on Spray Ignition Phenomena Using Shock Tube Combustion System Design

Jin-do Chung and Yukio. Mizutani*

Korea Electric Power Corporation, Research Center

*Department of Mechanical Engineering, Osaka University

요 약

계단형태의 고온발생장치로서, 고온의 흐름을 형성하고 난류유동이 없이 일정한 혼합기류를 만들 수 있는 2단격막구조 충격파관 장치를 이용하여, 혼합을 동반하지 않는 분무의 착화과정에 관한 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 충격파관 속에 하향으로 설치된 초음파 분무기에 의해 자유낙하 상태에 있는 예혼합 분무주를 만들어서 반사충격파에 의해 순간적으로 단열압축시켜서 착화 현상을 관찰하였다. 고온영역과 저온영역에서 얻어진 활성화에너지는 큰 차이가 나며 본 연구에서 얻은 착화지연의 실험결과는 통상의 분무착화 실험인 전기로법, 급속압축기법, 고온기류속에 연료를 분사하는 방법과 다른 현상을 보였다. 그 대표적인 결과에 대한 예로는 착화지연에 대한 압력 의존성과 연료분사율의 영향이 일반적인 분무의 착화실험 결과에 비해 적게 나타났다.

Abstract—Aiming at the elucidation of the phenomena occurring in the process of ignition of a premixed spray column behind a reflected shock, a shock tube technique was developed to observe the ignition delay of sprays without atomization and turbulent mixing. In this technique, a premixed spray column, falling freely from an ultrasonic atomizer directed downwards, it was ignited by a reflected shock. The ignition delays observed by shock tube seem to be different from those observed by the usual injection method, in which fuel is injected into a hot atmosphere, electric furnace etc. The ignition delays of cetane were determined. In shock tube have been obtained ignition delay data was different from rapid-compression machine, electric furnace, by injecting sprays into a hot air stream. Unlike the case of a jet spray type, the effects of fuel injection rate of ignition delay are little because of rapid increasing of temperature, different of flow pattern, turbulent intensity effect and cooling effect of hot air by spray.

1. 서 론

디젤엔진과 가스터빈 연소기 및 각종 분무용 연소기등에 있어서 액체연료에 대한 연소 기초연구로서 착화현상의 관측이 행하여지고 있다. 이와같은 기초적 연구방법으로서, 전기로를 이용하여 로의 고온분위기를 이용하는 방법¹⁻⁶⁾, 급속 압축기에 의한 방법⁷⁻¹⁰⁾ 고온 기류중에 연료를 분사하는 방법¹¹⁻¹³⁾, 충격파관을 이용

하는 방법¹⁴⁻¹⁸⁾ 등이 있다. 그러나 이상의 모든 방법은 분사밸브에서 분사되어지는 분류형 분무 또는 단일 액적을 대상으로 하고 있다. 분류형 분무의 경우, 미립화와 주위 기체의 유인과 혼합, 분무에 의한 냉각작용, 난류의 기류속에서 유적의 운동에 의해 많은 현상이 동시에 간섭해 가면서 진행하기 때문에 매우 복잡하다.

또 단일 유적의 경우, 유적 상호간의 간섭이 착화과정에서 중요한 역할을 하는 분무연소와는 형태가 다르

므로, 참고 데이터로 활용하기도 어렵다. 따라서 일반성 있는 초화지연 데이터를 얻기 위해 무화 혼합과정을 포함하지 않는 예혼합 분무의 착화과정을 관측할 필요가 있다. 이것을 규명하기 위하여 초음파 분무기에서 자유낙하 상태에 있는 예혼합 분무주를 만들어서 이것을 반사충격파로 접화하는 충격파관 착화현상 관측장치를 제안해서 일련의 연구를 하여왔다²¹⁻²⁷⁾. 입사충격파 배후의 고속기류에 의한 유적의 분쇄에 의한 Micromist의 발생, 저압부에 잔류하는 연료증기에 의해 정확한 착화지연시간의 측정이 불가능한 문제 등이 있어서, 여러번의 개량을 거듭한 끝에 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있었다.

분무의 착화는 연료증기의 기상반응에 지배되어지고, 혼합이 없는 이상적인 상황하에서의 착화와 난류상태에서 혼합이 있는 경우의 착화는 서로 매우 다른 사실이 판명되었다. 그래서 난류가 착화에 미치는 영향은 더욱더 상세히 규명되어야 하며 지금까지 난류영향이 배제된 실험에서 얻어진 결과와 실험 방법의 서술과 함께 실험에서 일어난 문제점등을 정리하여 착화지연에 영향을 미치는 인자를 중심으로 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

Fig. 1에 충격파관 전체 형상을 나타내고 있다. 충격파관은 스테인레스(SUS 304)제 이중 격막 구조(Double Diaphragm) 형이다. 고압부 3.5 m 중앙부 0.3 m 저압부 6.7 m로서 총길이 10.5 m 이다. 관내의 청소를 쉽게 하기 위하여 본체를 5등분으로 나누어져 있으며, 충격파의 감쇄를 방지하기 위하여 불순물이 내부에 잔류하지 않도록 관내벽은 초정밀 가공되어 있다.

관속의 10^{-1} Torr까지 진공도는 Geisler관의 방전색으로, 고진공영역에서는 전리진공계(ULVAC GI-TL2)로서 행했다. 밸브로서는 고진공에 견디는 것(ULVAC VSHC, FO-G)을, 충격파관에 부착하는 밸브는 더욱 가압에 견디는 것(ULVAC VV1000)을 사용했다. 또, 저압실 설정압력 모니터로 스트레인-게이지식 압력 변환기(KYOWA PG-2KW)을 사용했다.

연료의 미립화를 시키기 위해 공진주파수가 18 kHz의 초음파 분무기(진동자 TDK π (A)형, 공칭 공진주파수: 20 kHz)를 사용했다. 정상적으로 무화되고 있는 연료를 임의의 시각에 낙하시키기 위하여 샤테를 사용했다. 샤테는 분해, 조립이 가능토록 되어 있고 청소가 용이하고 고진공 배기시의 연료가스의 발생을 방지하는 구조로 되어 있다. 초음파 분무기에서 정상적으로 형성되어 있는 분무는 최초하부의 샤테에서 머물러 있으며,

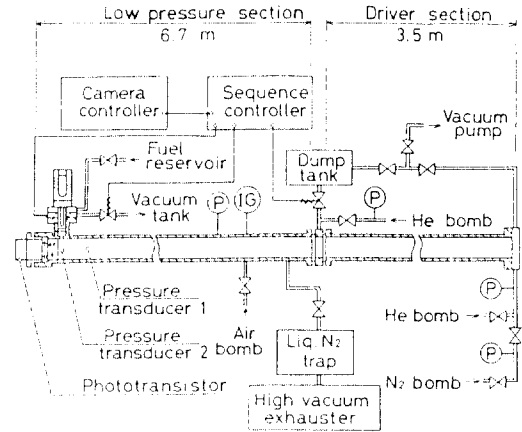


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

진공탱크에 연결된 흡인파이프로 충격파관 밖에서 흡인된다. 다음에 시퀀셜 제어 장치의 신호에 의해 전자 밸브로 샤테 개방과 흡인파이프의 차단이 동시에 행하여진다.

충격파관의 고압부와 저압부와의 사이에 중앙부(SUS 35C)를 설치해서 고압측에 원하는 강도의 충격파를 발생시키기 위하여 필요한 두께의 알루미늄제 다이어프램을 설치했다. 격막의 압력강도는 파괴실험에서 두께 0.2 mm에서 10.5 kg/cm^2 , 0.3 mm에서 15.5 kg/cm^2 , 0.4 mm에서 21 kg/cm^2 , 0.5 mm에서 25.5 kg/cm^2 로 나타났다. 고압부에는 7.5 atm 중앙부에 5 atm, 저압부에 5 atm의 압력까지 헬륨가스를 주입후 저압부를 진공으로 한 다음 갑자기 중앙부를 솔레노이드 밸브로 열면 고압부격막에 내압이상의 압력이 가해져 고압측 격막이 파괴되고 동시에 저압부도 파괴되어 충격파가 발생한다. 이상과 같이 이중격막 구조의 사용에 의해 임의의 시각에 충격파를 발생시키는 것이 가능하다.

연소에 의한 발광검출에는 발광다이오드(Photodiode NEC PD-32H)을 사용했으며 이 발광 트랜지스터는 협시각형이기 때문에 13개를 사용해서 시야범위를 넓혔다. 13개의 발광트랜지스터의 출력 전류는 100Ω 의 저항을 통해서 전압으로 변환한 후 평균시켜서 1개의 신호로서 처리했다. 각종 측정계의 구성이 Fig. 2이다. 압력변환기 1, 2(Kisler 201B2)에 의해 입사파가 통과할 때 진행신호의 시간차를 비교기(Comparator, Threshold 값 $-50 \text{ mV} = 33 \text{ Kpa}$)로서 Trigger시켜서 카운터 2로 기록한다. 압력 변환기 2에 의해 반사충격파 통과시의 신호는 비교기(Comparator Threshold 값 $-600 \text{ mV} = 0.39 \text{ Mpa}$)를 통해 동시에 카운터 1에 기록하고 디지털 메모리 1, 2(NFM MODEL E-5001, 및 IWATSU DM-201)의 기

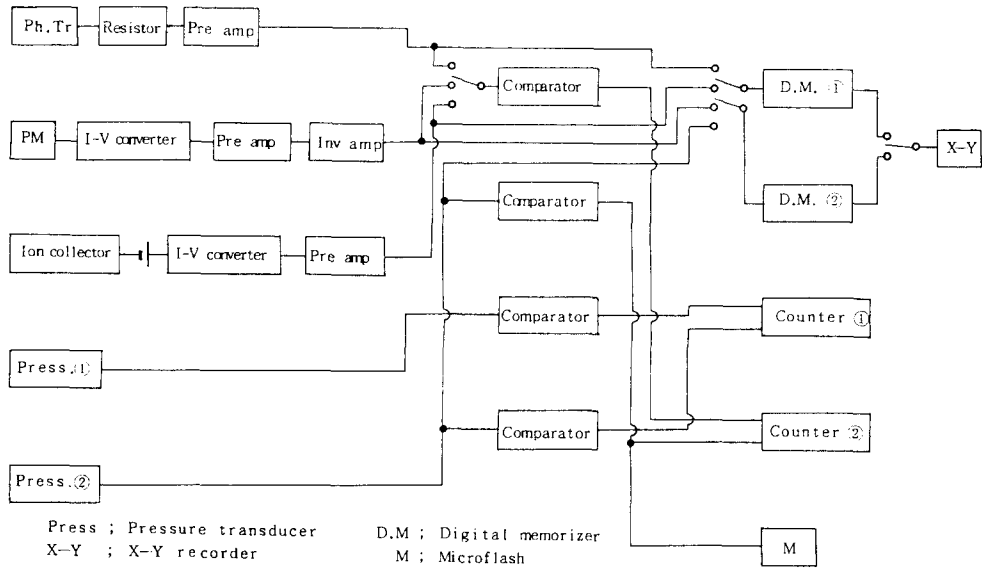


Fig. 2. Signals process and operating system.

록개시 Trigger로 되고, 발광트랜지스터 출력, 압력신호등은 각각 디지털 메모리에 기록되어 X-Y레코더로 출력된다.

2-2. 실험방법

실험은 다음의 순서로 행한다.

1) 저압부, 고압부를 분해하고, 아세톤 수건으로 깨끗히 충격파관내 벽을 청소한 후, 아세톤 증기를 흡인 펌프로 배기시킨 다음, 관의 중심을 잘 정리하고, 중앙부에 2장의 격막을 설치한다.

2) 저압부를 고진공영역(1.3×10^{-2} pa)까지 배기후 혼합 탱크에서 충전기체를 충전한다. 고압부 구동 가스로서는 헬륨에 질소를 혼합해서 사용한다.

3) 연료를 분사시키기 위해 초음파 분무기를 확인하고 초음파 분무기에 쌓인 액적은 진공 흡인시킨다. 저압부 압력 및 연료 분사율을 최종확인 한 후 측정계를 영점으로 하고 시퀀스 제어장치의 On 스위치를 눌러서 충격파를 발생시킨다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 반사충격파 실험^{21~23)}

입사충격파에 의한 점화에서는 입사충격파 배후의 고속기류에 의한 액적의 분쇄에 의한 Micromist의 발생이 매우 큰 영향을 미친다는 사실을 알았다. 여기에서 초음파분무기를 저압부 박판 근방까지 이동해서 반사충격파를 사용해서 점화하는 형태로 개선시켰다.

3-1-1. 착화지연

a) 착화지연의 정의

입사 충격파의 분무중심을 통과해서 착화에 의한 최초의 발광이 검출될 때까지의 시간 τ_m 과 반사충격파가 분무중심을 통과해서 착화에 의한 최초의 발광이 검출될 때까지의 시간 τ_{re} 의 두 종류의 착화지연 시간을 정의했다.

b) 저압실 박판에서 거리의 영향

입사 충격파에 의해 분무의 분쇄를 받지 않는 분무 중심에서 저압실 박판까지의 거리 L은 15~20 mm 정도에서 착화지연의 영향을 받지 않는다. 또 L의 영향은 고온에서 크고, 저온에서 작았다. 이것은 저온에서 We , No 가 작고, 입사 충격파배후의 고속류에 접촉되는 시간이 짧고 가연 농도의 Micromist가 발생했기 때문이라고 생각된다.

c) 착화지연의 압력 의존성

착화지연의 압력 의존성은 매우 작고, 전기기로에 의한 방법에서 얻어진 결과와는 크게 다르게 나타났다. 이것은 분류형 분무는 온도강화가 큰 영역에서 착화가 일어나고 냉각작용이 저온 영역일수록 크게 영향을 미치는 것에 비해, 충격파에서 점화시킨 경우, 분무내부 가스도 동시에 가열되기 때문에 분무주 내부의 온도강화가 작고 유인도 없기 때문이라고 생각되어진다.

d) 착화지연의 산소분압 의존성

착화지연의 산소분압 의존성은 크게 나타났다. 실험식으로는 $\tau_{re} = 0.504P_{O_2}^{0.378} P_{N_2} \exp(2150/T_5)$ 의 형으로 나타났다. 이 경향은 기체연료의 경우와 유사하며 착

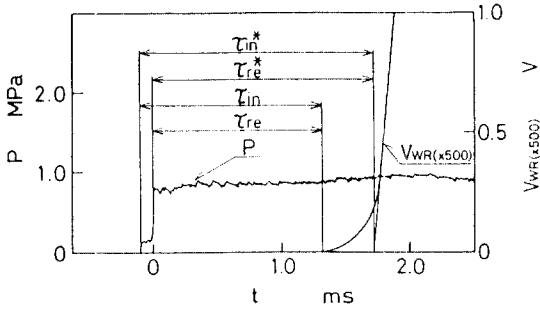


Fig. 3. Definition of ignition delay (Signals of pressure and wide range emission).

화는 기상(gas phase)중에서 화학반응에 기인한다고 생각되어진다.

e) 입경의 영향

입경이 작게되면 착화지연 시간은 짧게 되고 활성화 에너지는 작게되어 기체연료의 착화특성과 가깝다. 입경이 작은 유적이 온도상승이 빠르고 그 주변에 착화가 일어난다고 생각되어 착화지연 시간의 차이는 평균입경보다 최소입경의 영향이라고 생각된다.

3-2. 실험 결과(개량후의 결과)

개량전의 결과에서 얻어진 결과에는 다음과 같은 결함이 보였다.

초음파 분무기와 충격파관사이의 공간에서 2차충격파가 발생해서 분무주에 난류를 발생했으며 저압부 충전기체중에 불순물과 확산펌프에서 기름증기가 흡입했다. 또 발광트랜지스터가 협시각형이기 때문에 시야가 불충분했다. 2차충격파의 발생때문에 무화, 혼합과정을 포함하지 않는 착화현상을 관찰하지 못하므로 공간의 밀봉을 시도하였고, 연료증기 이외의 불순물 발광이 있을 수 있으며 정확한 분무의 착화지연이 측정할 수 없는 가능성도 있으므로 아세톤 수건으로 관내를 충분히 청소했다. 또 분무주의 일부만 시야에 들어오기 때문에 시야 이외의 분무주의 반응이 포함되지 못했다. 이와 같은 이유로 충격파관을 크게 개조해서 각각의 대책을 완비해서 무화, 혼합을 동반하지 않는 이상적인 상황에서 분무의 착화가 일어나는 실험장치를 완성했다.

3-2-1. 착화지연

a) 착화지연의 정의

착화지연은 (a) 입사파가 분무주 단면을 통과한 순간에서 측정하는 법 (b) 반사파가 분무주 단면을 통과한 순간에서 측정하는 법 (1) 발광 검출장치의 출력신호가 0에서 상승하는 순간을 착화시간으로 하는 법 (2) 직선적으로 상승하는 부분의 연장선이 시간축과 교차하는

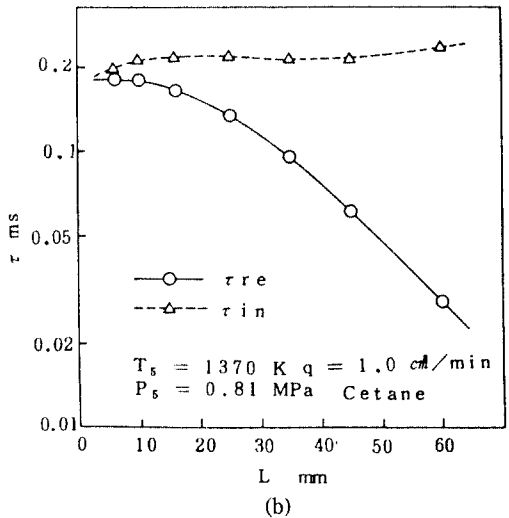
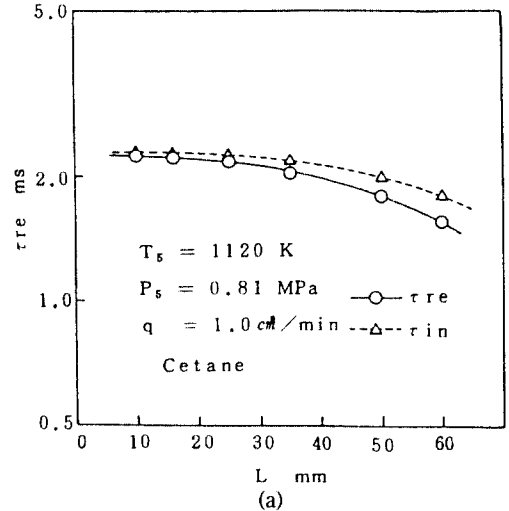


Fig. 4. (a) Behaviors of τ_{in} and τ_{re} as L is varied ($T_2 = 690$ K, $T_5 = 1120$ K)

(b) Behaviors of τ_{in} and τ_{re} as L is varied ($T_2 = 810$ K, $T_5 = 1370$ K).

점을 착화시간으로 볼 수 있는 4가지 방법으로 나눌 수 있다.

조합해 보면 (a)-(1)은 τ_{in} , (a)-(2)은 τ_{in}^* , (b)-(1)을 τ_{re} , (b)-(2)을 τ_{re}^* 로 표시하였다. 분무주축과 저압실 박판과의 거리 L 을 가능한 고정시키는 것에 의해, τ_{re}^* 을 착화지연으로 했으며, Fig.3에 정의 되어있다.

b) 분무주와 박판사이의 거리에 대한 영향

여기서 분무주 중심과 박판과의 거리 L 과 착화지연 τ_{in} , τ_{re} 의 관계를 조사했다. L 을 아무리 짧게 연결해도 $\tau_{in} - \tau_{re} > 0$ 이므로 이 사이에 분무주는 입사충격파 배후의

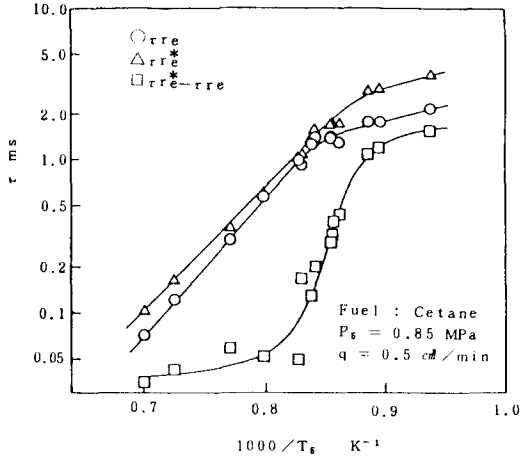


Fig. 5. Temperature dependence of ignition delay ($P_5 = 0.85$ Mpa, $q = 0.5$ cc/min).

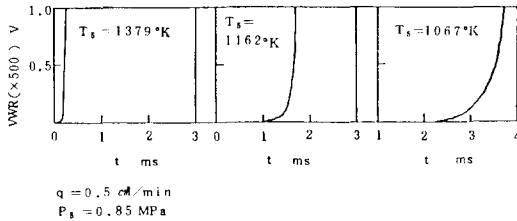


Fig. 6. Phototransistor output as temperature is varied.

온도 T_2 , 압력 P_2 에서 예열되어 진다. 입사충격파는 배후에 고속류를 동반하기 때문에 유적의 분쇄에 의한 Micromist 발생의 가능성이 있다. 속도 932 m/s의 입사충격파에 접촉되어진 직경 49 μ m의 세탄 유적의 초기 Weber No.는 356으로 분쇄가 생기는 임계 Weber No. 20을 훨씬 초과하였다¹⁷⁾. 그러나, Kauffman^{17,19)} 등에 의하면 직경 930 μ m의 세탄유적에 Mach No. 3.79의 입사충격파가 충돌할 경우 분쇄시간은 35 μ s 정도이기 때문에 직경 49 μ m 정도의 세탄 유적에서 20 μ s 정도의 고속류에 접촉 되어져도 원형은 보존된다. 분무주가 극히 단시간이지만 입사충격파에 접촉되는 영향을 조사하기 위하여 L을 6~60 mm 범위에서 변화시켜서 τ_{re} 와 τ_m 의 변화를 조사하였다. 그 결과가 Fig. 4의 (a) 및 (b)이다.

입사충격파 및 반사충격파 배후 온도 T_2 와 T_5 가 비교적 낮은 Fig. 4의 (a)에서는 L이 변화해도 τ_m , τ_{re} 모두 크게 변화하지 않고 τ_m 과 τ_{re} 의 차도 10% 정도이다.

이것은 유적의 분쇄에 의해 Micromist가 발생해도 착화지연에 영향을 미치지 못하며, T_2 의 분위기온도가 예열로 작용하여 착화과정에 영향을 미친다고 사료된다.

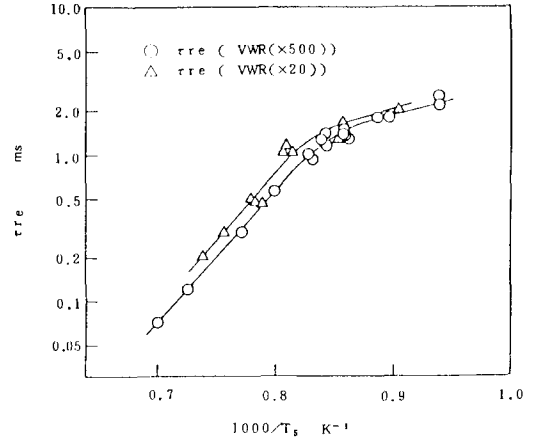


Fig. 7. Comparison of amplification ratio $V_{WR}(x20)$ and $V_{WR}(x500)$.

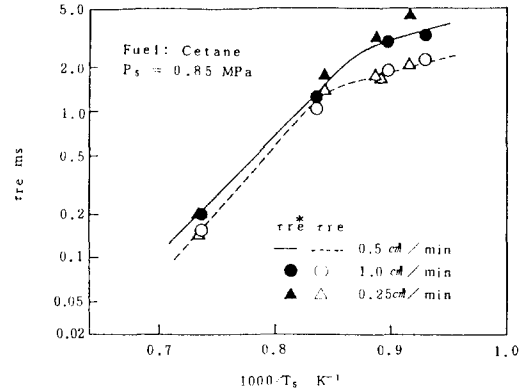


Fig. 8. The effect of fuel injection rate of ignition delay.

특히 $L < 20$ mm에서 τ_{re} 가 거의 일정치로 되는 것은 이 주위에서는 입사충격파가 착화지연에 거의 영향을 미치지 않았다는 것을 의미한다. 한편, T_2 와 T_5 가 상당히 높은 Fig. 4의 (b)에서는 Fig. 4의 (a)에 비해서 τ_m 이 처음에 10배 정도 작은상태에서 L이 60 mm까지 증가하면, τ_{re} 이 10배 정도 감소한다. τ_m 과 τ_{re} 의 차가 크게나는 15 mm 이상에서는 입사충격파가 착화과정에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. L이 크게 될수록 예열효과 뿐만 아니라, 분쇄에 의한 Micromist의 발생도 영향을 미치게 된다. 그러나, L이 10 mm 이하로 되면($\tau_m - \tau_{re}$)/ τ_{re} 는 1에 또 τ_{re} 는 일정값에 접근하기 때문에 입사충격파가 착화에 관여하여 착화지연을 변화시키는 기구(mechanism)에는 큰 영향을 미치지 않는다. 이상의 것에서 L을 10 mm 정도로 선택하면 $T_5 \leq 1370$ K 이하의 조건에서는 입사충격파의 영향을 거의 받지 않는 착화지연을

측정할 수 있었다. 그래서 실험에서는 모두 $L=10$ mm을 표준으로 해야함이 판명되었다.

c) 착화 지연의 온도 의존성

반사충격파 배후의 압력 $P_5=0.85$ Mpa(8.7 kgf/cm²) 연료분사율 q 을 0.5 cc/min로 일정하게 유지해서 반사충격파 배후온도 T_5 을 변화시킨 경우에 착화지연 τ_{re} 와 τ_{re}^* 가 어떻게 변화하는가를 조사했으며, 그 결과가 Fig. 5이다. 그림에서처럼 τ_{re} 에 대해서는 $1000/T_5=0.85(T_5=1180$ K), τ_{re}^* 에 대해서 $1000/T_5=0.88(T_5=1130$ K) 부근에서 나타나는 활성화 에너지가 변화해서 변곡점이 생겨서 구부러져 있다. 계산된 활성화에너지는 τ_{re} 에 대해서 170 KJ/mol과 32.4 KJ/mol이다. τ_{re}^* 에 대해서는 158 KJ/mol과 32 KJ/mol이다. 변곡점에서 저온측의 약 32 KJ/mol이라는 값은 전기로법¹⁻⁵⁾이나 급속압축기에서 얻은 값⁷⁻¹⁰⁾과 가깝지만, 고온측의 170, 158 KJ/mol이라는 값은 650~750 K의 고온기류¹²⁾에 연료를 분사해서 210 KJ/mol이라는 값을 얻은 Spadaccin¹¹⁾ 등의 예도 있지만 전기로법³⁾ 등에 비교하면 큰 차이가 난다.

Onuma 등¹²⁾은 고온 공기류중에 직각으로 연료를 분사해서 연료질, 분무중에 환봉 삽입, 연소기벽의 영향, 분사압의 영향 등을 실험한 결과 착화지연의 기ولوج는 화학적인 인자가 지배하며, 물리적 인자에 영향을 받지 않는다고 했다. 이 결과는 Freeman-Lefebvre²⁸⁾, Mullins²⁹⁾ 등의 결과와도 일치하고 있다. 이것과 동일조건에서 발화검출장치($V_w(x500)$)의 출력파형을 조사해 보면 Fig. 6에 나타난 것처럼 T_5 가 저하하는 것에 따라서 최초의 상승점이 완만하게 되고 있다. 그래서 1060 K보다 저온에서는 통상의 연소라고 하는 것과 완전발화가 인정되지 않는 빈도가 증가했다. 완만한 반응기간에서 대강 τ_{re}^* , τ_{re} 을 분석하면 Fig. 5에 나타난 것처럼 τ_{re} , τ_{re}^* 모두 변곡점 부근 즉, 0.05 ms에서 1.0 ms까지 급격히 상승함을 알 수 있다. 이 사실에서 고온 영역과 저온 영역에서 착화과정이 매우 다르다는 것이 추론되어 진다.

또, 분무공급부와 draintube에서 2차충격파가 발생해서 분무주가 단면전체에 비산하는 상태에서는 700 K 정도의 저온에서도 착화가 관측되어지고²²⁻²⁴⁾ 고온기류중에 연료를 분사하는 방법에서는 저온에서도 착화가 생기기 때문에 분무주의 이상적인 반사충격파 착화는 혼합과 교반(Stirring)을 동반하는 착화와는 본질적으로 다른 현상이라고 생각되어 진다.

또, 속시 V_w 의 증폭율이 작으면 착화초기의 미약한 발광이 검출될 수 없는 것이 있어서 증폭율에 의해 착화지연 시간이 다르다고 생각되어 진다. 여기에서 V_w 을 20배 증폭한 것에서 결정한 착화지연 $\tau_{re}(WRx20)$ 와 $\tau_{re}(WRx500)$ 을 Fig. 7에서 비교하여 나타내었다. $\tau_{re}(WRx$

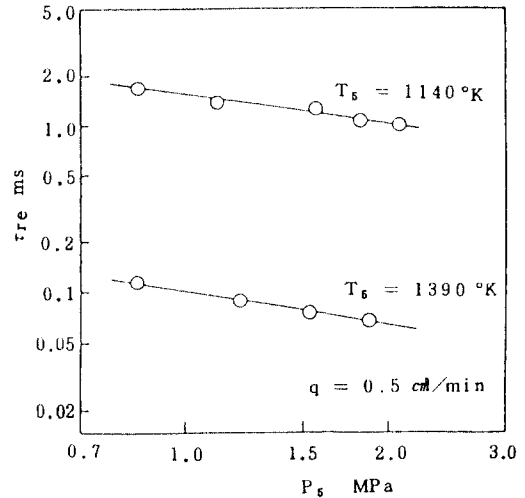


Fig. 9. Total pressure dependence of ignition delay.

20)의 쪽이 $\tau_{re}(WRx500)$ 보다도 동일 온도에 대해서 윗곡선으로 되어 있어서 착화지연은 V_w 의 증폭율에 의해서 거의 무시될 정도의 차가 Photo Tr의 감도차라는 것이 확인되었다. 그러나 $\tau_{re}(WRx20)$ 과 $\tau_{re}(WRx500)$ 의 활성화에너지는 고온영역 및 저온 영역 모두 거의 같게 되어서 정성적인 경향은 변하지 않는다.

Yoshizawa^{14,16)} 등은 충격파관을 사용해서 기체연료를 착화연소시켜서 착화지연, 착화기구(Ignition mechanism)를 조사하였으나 어떠한 연료에 대해서도 $T_5=1200$ K에서 저온측과 고온측에서 활성화에너지가 변화해서 Arrhenius선도는 그 온도에서 변곡점이 생긴다는 결과를 얻었다. 그래서 저온측과 고온측에서 착화지연을 지배하는 반응기구가 다르다고 보고했다. 본 실험에서도 그들의 결과¹⁴⁾와 정성적으로 매우 유사하고 변곡점의 온도도 거의 같다. 또 그들이 충격파관에 의해서 액적 연료를 착화시키는 실험^{14,16)}을 행한 결과 착화는 기상 중에서, 지극히 연료농도가 낮은 영역에서 개시되어 점차 농도가 높은 영역으로 진행해 간다고 하는 것에서 액적과 기체연료의 착화 사이에서는 화학적인 지연의 차는 없다고 할 수 있다. 이상에서와 같이 본 연구에서도 최초의 착화는 분무주내 또는 근방의 연료농도가 낮은 부분에서 일어나서 휘염(Luminous flame)을 동반하는 강한 연소는 아니고 청염(Blue flame)에 가까운 연소가 계속해서 일어나고 있다고 생각된다.

d) 연료분사율의 영향

연료분사율 q 를 변수로 해서 연료분사율이 착화지연 τ_{re} , τ_{re}^* 에 미치는 영향을 조사했다. 분사율은 각각 0.25, 0.5, 1.0 cc/min의 3단계로 행하고 충격파 배후압력 P_5 는

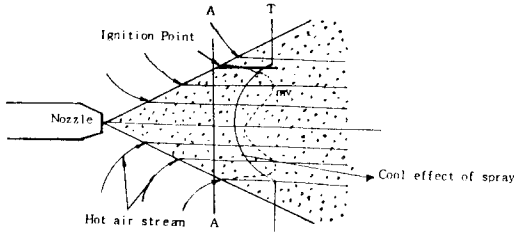


Fig. 10. Model of injecting spray type.

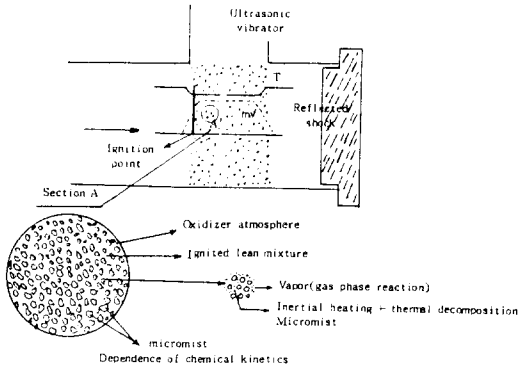


Fig. 11. Model of shock tube.

0.85 Mpa로 일정하게 하여 얻은 측정결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 저온 영역에서 τ_{re}^* 은 q가 증가 할수록 약간 단축되어져 있는 것을 제외하면, 분사율 q는 착화지연에 거의 영향을 미치지 않는다. 착화가 일어나는 이 현상은 분무주 표면의 최적농도 상태라고 생각되어진다.

e) 착화 지연의 압력의존성

착화 지연의 압력의존성을 Fig. 9에서 고온영역($T_5 = 1390$ K), 그리고 천이영역과 저온영역의 경계에 해당하는 영역($T_5 = 1140$ K)에 대해서 조사했다.

여기서, 유량 $q = 0.5$ cc/min이다. 그림에서 n , n^* 는 정수로서 $\tau_{re} \propto P_5^n$, $\tau_{re}^* \sim P_5^{n^*}$ 로 되는 관계인 것을 알 수 있다. $T_5 = 1390$ K에 대해서 $n = -0.65$, $n^* = -0.77$ 이고 $T_5 = 1140$ K에 대해서 $n = -0.59$, $n^* = -0.14$ 로 계산된다. 전기로법³⁴⁾ 등에 비해서 압력지수 n , n^* 의 절대값이 매우 작지만 이 원인은 반사충격파에서 압축점화되어지는 예혼합분무주와 고온기류중에 분사되어지는 분류형 분무와의 着火機構의 차이에 의한 것이라고 사료되어진다.

전기로법과 충격파관에서, 착화지연의 차이가 생기는 원인은 다음의 결과로 추측된다. 온도의 급격한 상승과 유동방향의 차이에서 보면 전기로법에서는 Fig. 10처럼, 고온공기가 분무경계면(boundary surface)을 통해서 유

인되어, 분무와 평행으로 흐르기 때문에, 접촉거리가 길고, 온도의 상승도 완만하다. 이런 경우 유도시간도 길어져서, 냉각작용도 현저하게 나타난다.

충격파관에서는 Fig. 11처럼, 고속기류가 분무축에 직각으로 유동되기 때문에 접촉거리가 짧고, 유적과의 상대속도가 크기 때문에 압축시간이 수 μs 이내로 짧기 때문에, 온도의 상승도 빠르다. 이 경우 분무와 가스와의 작용은 진행되지 않고 분무질량의 대부분을 점하는 큰 유적에는 관계없이 작은 유적에서 착화가 일어난다고 사료된다.

이상에서 전기로법과 충격파관의 압력 의존성의 차는 분무에 의한 고온공기의 냉각작용에 의한 가스온도의 하강 때문에 생긴다고 생각된다. 분무의 착화현상은 증발과 혼합과정이 전혀 포함하지 않는 gas와 공기가 균질하게 혼합하는 균질혼합기의 착화지연과 증발 혼합과정을 포함하는 큰 직경의 분무 유적의 착화지연과의 중간 특성이라고 생각된다. Fig. 10에서, 분류형분무는 주위의 고온가스를 유입해서, 주변에서 가열되어지고 증발을 시작한다. 좀 더 상세히 설명하면, 단면 A-A에서 온도 T와 연료증기의 질량분율 m_v 의 분포인데, 착화는 T와 m_v 가 조합되어 연료증기와 온도가 최적이 되는 분무경계면(Spray boundary surface)부근에서 생긴다. 분무의 계면 부근은 강한 전단층에 의해渦(eddy)가 생기기도 하고, 온도와 농도가 시간에 따라서 맥동 현상도 생기며 동시에 화학반응에 좌우되는 것을 생각하면 매우 복잡하다. Fig. 11의 충격파관은, 단열압축 기간이 약 20 μs 에서 완료되기 때문에 유적과의 열교환에 의한 분무내에서의 온도 강하는 거의 생기지 않고, 일정한 온도분포로 된다. 충격파관에서 얻어진 고온영역의 착화지연의 데이터는 Lifshitz³⁰⁾ 등이 기체연료를 균질혼합기 상태에서 실험한 착화지연결과와 거의 같은 時間次數(order)로 되어있다. 고온영역에서는 미소유적과 Micromist의 균질 혼합기중의 증기와 산소의 최적농도 상태에서 착화가 일어난다고 사료된다.

4. 결 론

분무의 착화현상을 관측하기 위해 충격파관을 사용하여 하향으로 설치된 초음파 분무기에서 형성된 자유낙하 상태의 예혼합분무주를 착화시키는 방법을 고안해서 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 착화지연의 정의에서 보면 4가지로 분류할 수 있으나 본 연구에서는 반사파가 분무주 단면을 통과한 순간 발광검출신호가 직선적으로 상승하는 부분의 연장선이 시간축과 교차하는 순간을 착화시간으로 하는 것이 적합한 것으로 사료되며 분무주가 액적의 분쇄와

예열효과 등으로 고온영역에서는 약간의 영향이 있으나 박판에서 거리 L 이 10 mm 이하 영역에서 착화지연의 영향은 적었다.

2) 반사충격과 배후온도 T_3 가 1180 K를 경계로 고온과 저온 영역의 착화과정이 다르며, 세탄의 경우 고온영역에서 170 KJ/mol, 저온에서 31.6 KJ/mol의 활성화 에너지를 보였다.

저온측의 값은 전기로법이나 급속압축법에서 얻은 값과 가깝지만, 고온측의 값은 통상의 분무실험 데이터와는 큰 차이가 났다.

3) 유적의 연소에 동반되는 휘염(luminance flame)의 발생은 대부분 1280 K 이상에서 나타났으며, 이 이하의 저온 영역에서는 기상반응에 의한 저휘도 화염이 출현해도 계속 성장하지 못하며, 특히 1060 K 이하의 영역에서는 실화율이 급증했다.

차후에 난류의존성 및 난류강도의 영향을 파악하기 위해서 충격파관속에 난류발생용 격자를 설치하여 예혼합분무주에 외관을 가해서 정량적으로 난류효과에 대한 규명이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Liuma, Y., and Yamaki, K., *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs.*, **26**, 1662 (1960).
2. 酒井, 小竹, 機械の研究, **10**, 383 (1958).
3. Ikura, S., Kadota, T. and Hiroyasu, H., *Trans Japan Soc. Mech Engrs.*, **53B**, 274 (1987).
4. 小泉, 北岡, 日本機械學會論文集, **28**, 286 (1962).
5. Fujimoto, H., Shibata, K. and Sato, G. T., *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs.*, **45**, 599 (1979).
6. Fujimoto, H., *et al.*, *Trans. J. Marine Eng. Soc. Mech. Japan*, **13**, 89 (1978).
7. Ogasawara, M., *et al.*, *J. Internal Combustion Engine Japan*, **15**, 9 (1976).
8. Ikegami, M., Miwa, K., Ohmiwa, T. and Nishitani, T., *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs.*, **53B**, 274 (1987).
9. Kirsch, L. J., *et al.*, *Combustion. Flame*, **43**, 11 (1981).
10. Melton, Jr., R. B. and Rogowski, A. R., *Trans. ASME Ser. A*, **94**, 11 (1972).
11. Spadaccini, L. J and Tevelde, J. A., *Combustion. Flame*, **46**, 283 (1982).
12. Onuma, Y., Shibata, K., Morinaga, N. and Morikawa, M., *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs.*, **52B**, 3380 (1986).
13. Shibata, K. *et al.*, Proc. 22th Symp., Combustion in Japan, 205 (1984).
14. 吉澤善男 外 4名, 日本機械學會論文集, **40**, 1437 (1974).
15. Kawata, H., *et al.*, *Acta Astronautica*, **1**, 753 (1974).
16. 吉澤善男, 河田治男, 日本機械學會論文集, **43**, 371 (1977).
17. Kauffman, C. W., *et al.*, *Comb. Sci. Technol.*, **3**, 165 (1971).
18. Ranger, A. A. and Nichollst, J. A., *AIAA Jour.*, **7**, 285 (1969).
19. Kauffman, C. W. and Nichollst, J. A., *AIAA Jour.*, **9**, 880 (1971).
20. Wierzb, A. S., *et al.*, *Comb. Sci. Technol.*, **9**, 233 (1974).
21. 정진도, 水谷幸夫, 류정인, 한국자동차공학회 논문집, **11**, 48 (1989).
22. 정진도, Y. Mizutani, 제 1회 전투차량개발기술학술대회 논문집, 450 (1990).
23. Miyasaka, K. and Mizutani, Y., *Modern Developments in Shock Tube Research* (Proceedings of 10th International Shock Tube Symposium), Shock tube Society of Japan, 429 (1975).
24. Miyasaka, K. and Mizutani, Y., 16th (International) on Combustion, 639 (1977).
25. Mizutani, Y., Nakabe, H., Yoshida, M., Nogiwa, H. and Jinrong, H., Dynamics of Reactive Systems Part I, *Flames*, **113**, 37 (1988).
26. 정진도, 류정인, 水谷幸夫, 中部主敬, 대한기계학회 추계학술대회 초록집, 548 (1989).
27. Mizutani, Y. and Nakabe, K., Jin Do., Chung., Proc. 23th Symp. (Int.) on Combustion, 1455 (1990).
28. Freeman, G. and Lefebvre, A. H., *Combustion Flame*, **48**, 153 (1984).
29. Mullins, B. P., *Fuel*, 211 (1951).
30. Lifshitz, A. *et al.*, 22th Symp. (Int.) on Combustion, 631 (1984).