

## 충격관을 이용한 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>의 폭굉특성연구

### A Study on the Detonation Characteristics of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> in Shock Tube

오 규 형\*

Kyu-hyung Oh

(1996년 6월 14일 접수, 1996년 12월 14일 채택)

#### ABSTRACT

Detonation phenomena of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> were investigated using the various shock tube. To study the detonation characteristics according to the composition of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-air mixtures, the composition were varied from 5 to 90% and 5 to 50% of acetylene each other. A spiral ring was installed in the shock tube to study the effect of obstacles in DDT phenomena. Detonation velocities were measured using the photodiode, and the DDT phenomena was visualized using the high speed schlieren photograph.

From the experimental result, it was found that the detonation velocity was most high near the 1.8 times the stoichiometric ratio of acetylene. And from the visualization of DDT phenomena, it was found that the detonation wave was strengthened through the pile up of small compression wave of burned gas. And the obstacles in shock tube accelerate the detonation reaction by turbulent effect of flammable gas mixture.

#### 1. 서 론

오늘날 가연성가스의 사용과 취급이 많아지면서 가스의 폭발사고와 가스폭발에 의한 화재사고가 많아지고 있다. 특히 가스는 그 특성상 배관시설을 통해 수송되거나 공급되는 것이 대부분이다. 가스의 폭발현상은 화염전파 속도에 따라 화염전파속도가 음속이하인 폭연(deflagration)과 음속이

상의 폭굉(detonation)으로 구분하게 되는데<sup>1)</sup> 폭연은 일반적으로 말하는 폭발의 대부분의 현상이며 폭굉은 긴 파이프나 duct등에서 발생한 폭연이 전이과정을 거쳐 음속이상(1000~3500m/s)의 빠른 화염전파속도로 발달한 폭발현상으로 폭연에 비해 폭발압력도 수배로 증가하여 파괴력도 훨씬 커지게 된다<sup>2,3)</sup>. 따라서 이러한 폭발위험성을 방지하기 위해서는 불활성가스 혼입에 의한 폭발방지나

\* 호서대학교 안전공학부

flame arrester 등의 안전장치를 사용하여 폭발화염의 전파를 방지한다<sup>5,8)</sup>.

본 연구에서는 공기중에서는 폭굉범위가 3.4~92%이며 공기중에서는 4.2~50%이고 고압에서는 100%에서도 분해폭발<sup>4)</sup>을 일으키며 최소점화에너지가 0.03mJ 정도로 반응성이 높은 아세틸렌을 시료 가스로 선정하여 산소와의 혼합비율 및 공기와 농도비를 변화시키면서 이때의 폭굉 특성의 변화를 살펴보고, 폭굉이 전파되는 충격관내에 장애물을 설치할 경우에 폭굉 특성의 변화 및 충격과의 거동을 고찰하므로써 가연성가스가 흐르는 관내에서의 가연성가스의 폭굉 특성을 규명하고 관내 폭발에 의한 폭발사고 방지의 기초 자료를 활용하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료가스의 제조

실험에 사용하기 위한 시료 가스의 제조는 비닐로 된 시료가스 주머니를 진공으로 만든 후 실린더를 이용하여 실험에 필요한 농도가 되도록 각 가스

의 일정량을 취하여 시료 주머니에 넣고 균일하게 혼합되도록 하였다<sup>7)</sup>. 실험에 사용된 각 가스들의 순도는 공급자가 제공한 자료에 따라 아세틸렌이 99.9%, 산소 99.99%, 공기는 보통의 대기를 취하였다.

실험에 사용된 혼합가스들은 아세틸렌-산소 혼합가스는 아세틸렌의 농도를 5~90vol%(=0.175~3.15)로 한 것과, 아세틸렌-공기 혼합가스는 아세틸렌의 농도를 5~50vol%(=0.645~6.45)한 것과 공기중에서 폭발 압력이 가장 큰 14vol%( $\phi = 1.8$ )이 되도록 조성을 조절하여 실험하였다<sup>9)</sup>.

Table 1 The preparation of gas mixtures

| mixtures | composition                                    | ratio   |
|----------|--|---|
| A        | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : O <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 5~90Vol% ( $\phi = 0.175 \sim 3.15$ ) |
| B        | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : air            | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 5~50Vol% ( $\phi = 0.645 \sim 6.45$ ) |
| C        | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : air            | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 14% ( $\phi = 1.8$ )                  |
| D        | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : O <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 28.6% ( $\phi = 1$ )                  |

### 2.2 실험 장치

아세틸렌의 폭굉 특성 실험을 위하여 3종류의 충격관을 사용하였다. 먼저 Fig. 1의 실험장치를

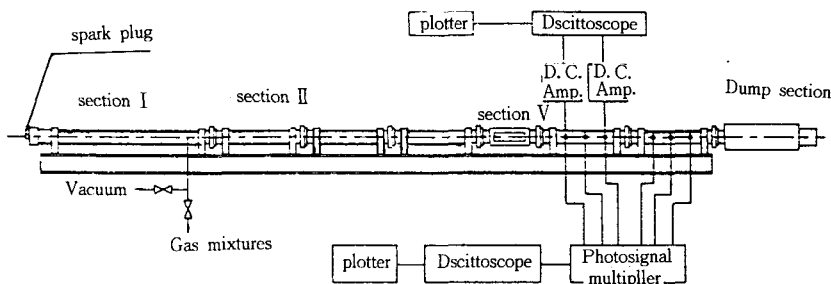


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for measuring the detonation parameters

이용하여 시료 A와 B를 가지고 아세틸렌 농도변화에 따른 폭굉 속도를 측정하였다, Fig. 1의 충격관은 격막에 의해 고압구간과 저압구간으로 분리시킬 수도 있으며, 필요에 따라 격막없이 고압구간의 막힌 끝부분에 점화 프러그를 설치하여 진기적 불꽃에 의한 폭굉실험을 할 수 있으며, 7개의 구간으로 분리할수 있어 점화위치로부터의 거리에 따른 폭굉특성도 측정할 수 있게 하였다. 각 구간의 연결은 나사링을 이용한 결합방식을 사용하고 조립시 각 구간의 움직임을 방지하도록 dowel pin

을 사용하였고 각 구간은 충격관 홀다가 설치된 H형강 받침대와 지지대를 사용하여 수평을 유지하도록 견고하게 고정시켰다.

이 충격관의 section 1은 내경 4.8cm의 강관으로 길이는 122cm이고 section 2에서 section 7까지는 가로 세로가 각각 4.16cm인 정사각형으로 되어 있다. section 5는 양측면을 투명 아크릴로 제작하여 폭굉의 진행상황의 가시화를 시도하였으나 길이가 짧아 사진촬영이 곤란하였다. section 1에는 관내부의 진공과 혼합가스 주입을 위한 밸브를 부착하

였고 section 6과 section 7에는 20cm 간격으로 6개씩의 압력센사와 photodiode를 부착하였다. section 7의 끝부분은 시료를 채우기 전에는 충격관을 진공으로 하기위해 밀폐시키고 시료 혼합가스를 주입한 후에는 폴리에스테르 등으로 된 얇은 막으로 교환하여 폭굉실험시 파열되도록 하였다. Fig. 2의 충격관은 DDT현상의 가시화를 위하여 사용하였으며 아크릴 창을 길게 할 수 없기 때문에 충격관의 길이가 짧고 따라서 완전한 폭굉현상의 관측은 어려우며 폭연에서 폭굉으로 발전해가는 과정을 관찰할 수 있었다. 점화원에서 10cm부터 6.5cm간격으로 뒷면에는 압전식 압력센사를 아랫면에는 photodiode를 각각 10개씩 부착하여 폭굉

파의 속도와 압력을 측정할 수 있고 양측면은 두께 1.5cm의 투명 아크릴로 만들어 육안관측 및 사진촬영용 창으로 사용하였다. Fig. 3의 충격관은 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-공기 혼합가스의 장애물에 의한 폭굉특성 변화를 측정하기 위한 것으로 길이 13m, 내경 10cm이며 점화원에서 2.5m부터 1m간격으로 Fig. 2에 설치했던 10개의 photodiode를 부착하였고 혼합가스의 농도를 균일하게 하게 하기위하여 순환용 브로아를 설치하였다. 장애물로는 선 굵기 1cm, 외경 5cm, 길이 50cm인 스프링을 점화원으로부터 150cm 위치에 충격관과 동심원 상태가 되도록 설치하였다.

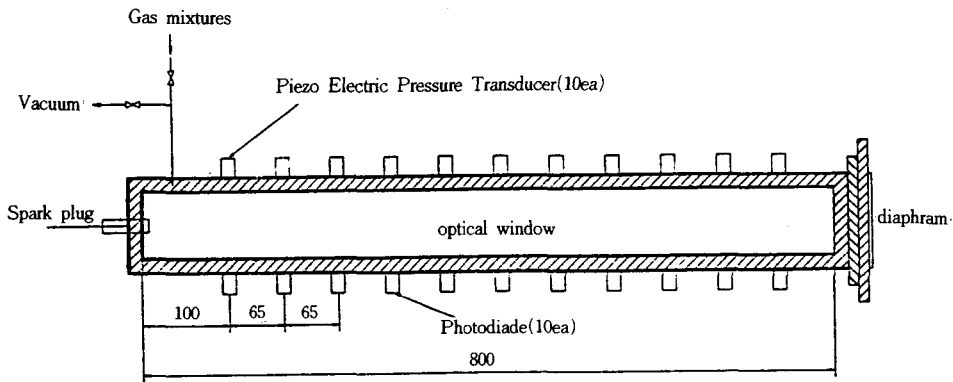


Fig. 2 Schematic diagram of shock tube for visualization of deflagration to detonation transition phenomena

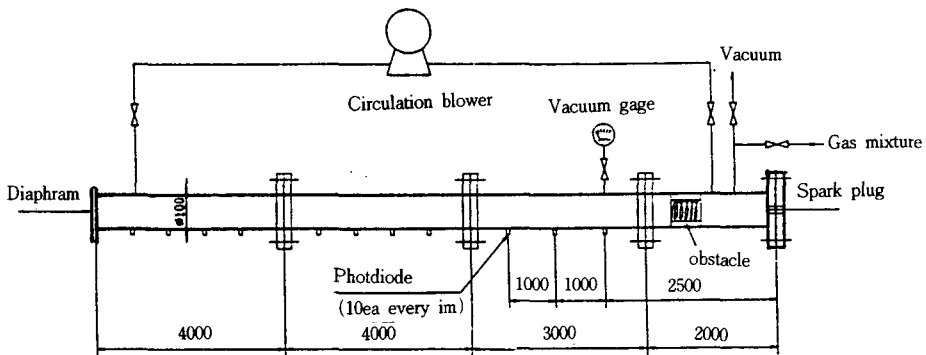


Fig. 3 Schematic diagram of shock tube for experiment the obstacle effect on detonations

### 2.3 실험방법

아세틸렌의 농도에 따른 폭발특성의 실험은 Fig. 1의 실험장치를 이용하였다. 충격관 내부를

10<sup>-1</sup>torr정도가 되도록 진공으로 만든후 시료가스 A 또는 B를 각 농도별로 채우고 section 7의 끝부분을 격막으로 막은후 section 1에 설치되어 있는

점화플러그로 전기적인 점화를 시킨다<sup>6)</sup>.

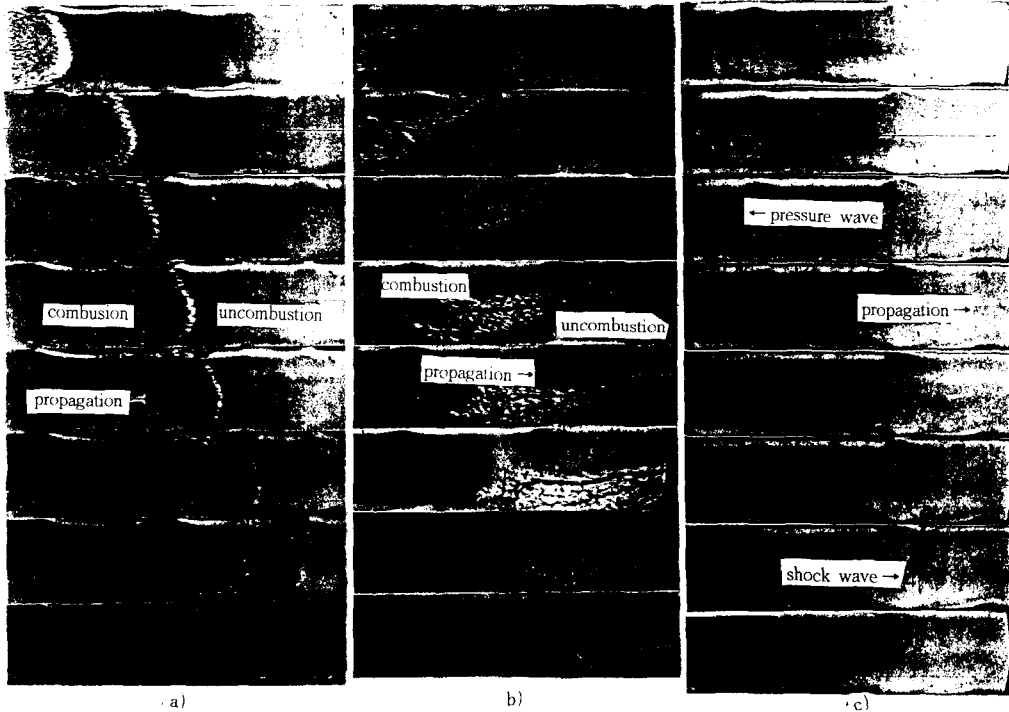
실험결과는 section 6과 7에 설치된 6개의 광센사를 이용하여 화염전파속도를 측정하였으며, 점화원으로부터 section 6의 첫번째 광센사까지의 거리는 335cm이며 길이 대 직경비 L/D가 약 80정도로 정상적인 폭굉으로 발달할 수 있는 위치에서 측정하였다. 광센사로부터 나온 신호들은 광신호 증폭장치를 통해 오실로스코프로 측정하였다. Fig. 3의 충격관을 이용하여 장애물에 의한 폭연에서 폭굉으로의 전이현상에 대한 실험을 하였다. 시료는 Table 1의 C를 이용하였으며 아세틸렌의 농도를 14%로 맞추어 균일하게 혼합하기 위해서 충격관, 순환용 blower, 순환용 호스의 부피를 구하고 여기에 아세틸렌 14%가 되는 부피를 구한다. 먼저 충격관을 진공으로 만든후 필요한 아세틸렌의 부피를 주입한 후 공기를 주입하며, 밀폐형 순환용 blower로 약 10분간 순환시켜 균일한 농도로 혼합시키고 전기 스파크로 점화시켜 각각의 photodiode로부터 나오는 신호를 화염증폭신호장치를

통해 오실로스코프로 받아 이때의 폭굉속도를 측정하였다. 또 아세틸렌과 산소가 당량비로 혼합된 시료 D를 가지고 Fig. 2의 충격관 이용하여 폭연에서 폭굉으로 전이되는 DDT의 현상과 관내 장애물에 의해 폭굉으로의 유도거리(DID : Detonation Induction Distance)가 짧아지는 현상을 규명하기 위하여 Schlieren 시스템과 고속카메라를 이용하여 frame mode 및 streak mode의 사진으로 가시화하였다. Frame mode의 촬영속도는 10만fps로 하였으며 streak mode의 기록속도는 1mm/ $\mu$ s로 하였다. 가시화를 위한 실험장치의 구성은 다른 문헌과 유사하다<sup>7)</sup>.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 폭굉현상의 가시화

Fig. 4의 고속카메라 사진은 충격관내에서 전기 스파크로 점화시켜 frame mode로 촬영한 폭굉현상



a) 10cm from the ignition point to 28cm  
b) 30cm from the ignition point to 48cm

c) development of shock waves through the pile up of small compression waves

Fig. 4 Frame mode schlieren photographs of detonation development phenomena in stoichiometric C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixture

의 진행사진이고 Fig. 5은 폭굉현상의 발전상황을 streak mode로 촬영한 사진이다. 이 사진에서 알 수 있는것은 아세틸렌-산소혼합가스가 충격관내에서 점화되면 Fig. 4-a에서와 같이 초기에는 plug flow와 같은 화염면의 형상을 갖게 되지만 시간이 지나면서 반응은 더욱 빨라져 Fig. 4-b와 같이 화

염면이 깨지면서 복잡한 형상을 갖게되고 화염면과 미반응혼합가스와의 접촉면적이 더욱 커지고 Fig. 4-c와 같이 발생된 압력파들이 중첩되어 마침내 충격파를 형성하는 것을 알 수 있다. Fig. 5에서 사선으로 보이는 부분들이 충격파의 진행을 보여주는 것으로 streak사진에서도 압력파들의 중첩

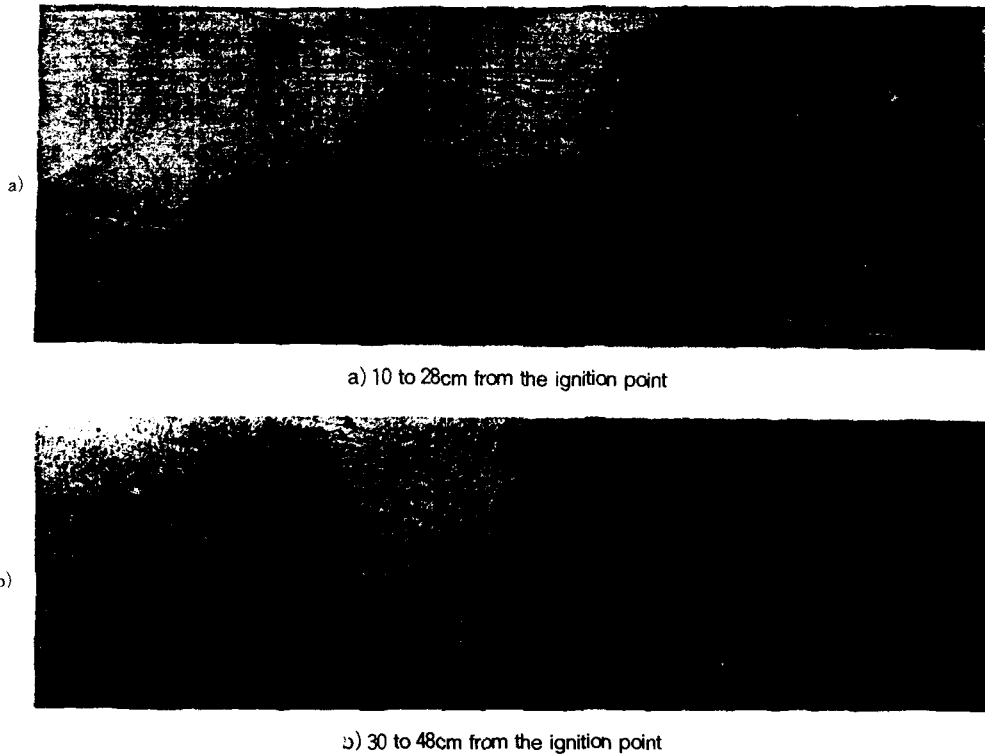


Fig. 5 Streak mode schlieren photographs of shock waves in detonation

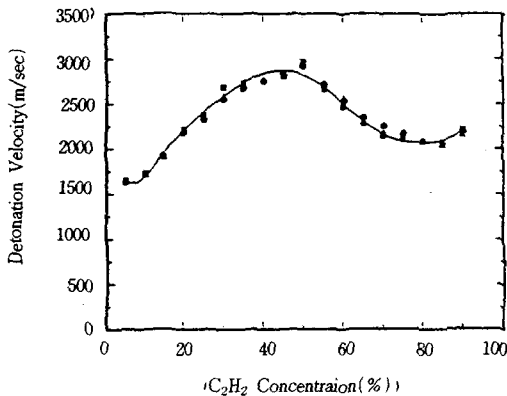


Fig. 6 Detonation flame velocities of acetylene-oxygen mixture

에 의해 충격파가 강화됨을 알 수 있다.

### 3.2 농도변화에 따른 폭굉특성

Fig. 6은 시료A의 혼합물에 대하여 아세틸렌의 농도에 따른 C-J 폭굉속도를 실험적으로 측정된 것으로 아세틸렌의 농도가 약 50%일 때 즉 당량비가 약 1.8에서 폭굉속도가 최대가 되며 50%이상의 농도와 50%이하의 농도에서 점점 감소하다가 아세틸렌의 농도가 85%이상에서 다시 속도가 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이와같은 현상은 일반적인 탄화수소화합물과 산소 혼합물들의 폭굉속도가 당량혼합비 보다 약간 높은  $\phi = 1.1$  부근에

서 최대값을 갖고 농도의 증가나 감소와 함께 폭굉 속도가 감소하는 현상과는<sup>3)</sup> 다른 특성을 보여주고 있는데 이는 폭굉속도가 최대가 되는  $\phi=1.8$  근처까지는 연소에 의한 반응이 지배적이며, 그이상  $\phi=2.8$  정도까지는 연료 과다에 의한 불안전 연소 반응과 아세틸렌의 분해반응이 일어나는 단계로 이때 발생하는 에너지들이 미반응 물질들로 흡수에 의해 전체적인 에너지가 감소로 폭굉속도가 감소하나, 아세틸렌이 85% 이상의 범위에서 폭굉한 채까지는 과농도 아세틸렌의 분해폭발에<sup>4)</sup> 의해 발생된 에너지가 다시 폭굉을 가속시키는 것으로 판단된다. Fig. 7은 시료 B의 혼합물에 대한 폭굉속도를 측정된 것으로 Fig. 6과 유사한 경향을 갖는 것을 볼 수 있으나 폭굉범위는 시료 A의 혼합물에 비해 좁고 폭굉속도도 작은 것을 알 수 있는데 이는 공기중의 질소가 불활성 가스로 작용하여 에너지 흡수체의 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다.

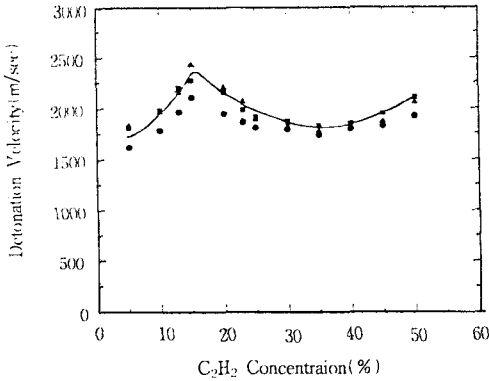


Fig. 7 Detonation flame velocities of acetylene-air mixture

### 3.3 장애물에 의한 폭굉특성

Fig. 8은 Fig. 3의 실험장치에 장애물이 없이 시료가스 C를 채우고 전기스파크로 점화시켰을 때 폭굉속도를 측정된 oscillogram이며 Fig. 9는 이 결과들을 그린것으로 Fig. 8에서 왼쪽에서 1번부터 4번의 광센사까지는 속도가 완만하다가 4번과 5번 사이에서부터 급격히 빨라지는 현상을 보여주고 있다. 즉 L/D가 55~65에서 폭굉으로 전이되는 현상을 알 수 있으며, 폭굉으로 전이된 직후 over

driven 상태를 보이다가 정상폭굉 상태(steady state detonation)로 복귀되는 것과 폭굉속도의 맥동현상도 볼 수 있다. Fig. 10은 관내에 장애물을 설치하고 측정된 결과로서 장애물을 통과한 직후부터 정상폭굉으로 발달된 상태를 보여주고 있다.

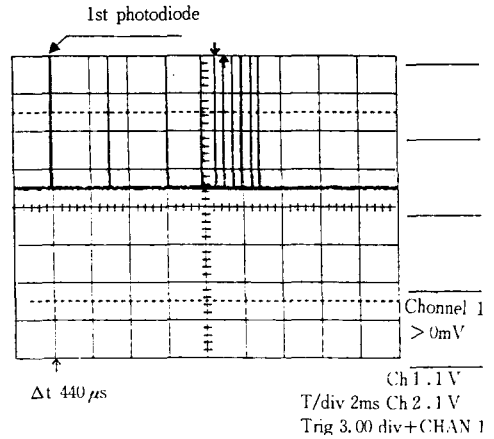


Fig. 8 Typical oscillogram from the photodiode for showing the deflagration to detonation transition in Fig. 3 shock tube

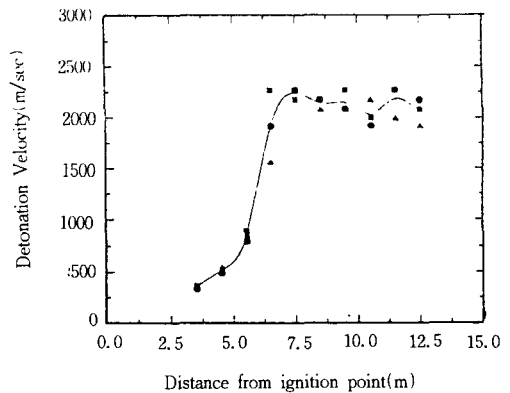


Fig. 9 Detonation induction distance of acetylene-air mixture(14 : 86vol%)

Fig. 11은 장애물에 의해 폭굉이 가속되는 현상을 확실히 규명하기 위하여 Fig. 2의 충격관에 점화 원으로부터 40cm에 4mesh 철망을 1매 설치하고 철망이 설치된 구간에서 streak mode로 촬영한 사진으로 장애물 후면에서 충격파의 속도가 갑자기 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이 두가지 경우를 비교할 때 장애물에 의해 폭굉유도거리(D.I.D :

detonation induction distance)가 감소하는 현상을 알 수 있었으며, 이 결과들로부터 장애물에 의해 화염의 가속효과가 있음을 확인할 수 있었다. 관내에서의 폭발(deflagration)이 가속되어 폭굉으로 전이되는 기구는 밀도가 현저하게 다른 두 유체간의 접촉면의 불안정으로 고밀도의 미연소가스와 저밀도의 연소가스의 접촉면이 깨지면서 화염면적이 증가되는 Taylor-Makstein 현상<sup>1)</sup>, 그리고 화염전면의 기체의 운동으로 난류경계층이 형성되고 화염이 이 경계층에 도달되면 화염이 급속히 퍼지면서 급속한 열 방출을 일으키는 현상등이 있는데 본 연구에서는 장애물의 위치가 완전한 폭굉으로 발달하기 이전의 위치에 놓여져 있어 장애물에 의한 폭굉으로의 전이가 쉽게 일어나는 현상은 plug flow 형태를 갖던 화염이 장애물에 의해 깨지면서 난류형태로 바뀌고 열 방출속도와 화염면적의 증대로 반응속도가 급격히 증가되는 현상이 지배적

인 것으로 생각된다.

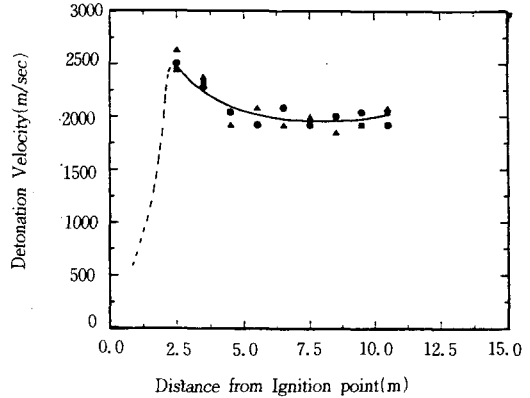


Fig. 10 The effect of obstacles in detonation induction distances of acetylene-air mixture(14 : 86vol%)

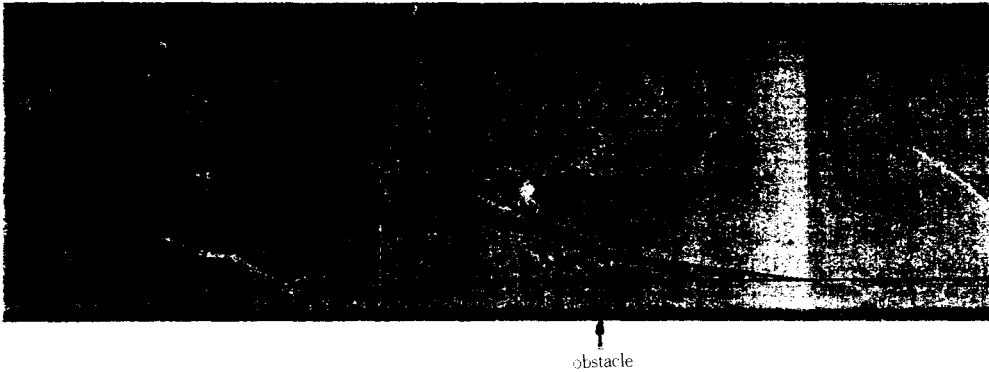


Fig. 11 Streak mode schlieren photograph of shock waves behind the obstacle : stoichiometric C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixture

#### 4. 결 론

아세틸렌의 폭굉특성에 대한 실험결과 아래와 같은 몇가지 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 아세틸렌-산소 혼합가스의 폭굉속도는 당량비  $\phi = 1.8$  부근에서 최대가 되며, 아세틸렌의 농도가 약 80% 이상에서의 폭굉속도의 증가현상은 아세틸렌의 분해 폭발에너지에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 관에서 폭굉으로의 전이는 점화초기 층류형의 예혼합화염이 진행되면서 화염의 일유체학적 특성과 화염면과 벽면의 마찰에 의해 난류

형화염으로 발전되면서 화염전파속도가 가속되며 이때 발생된 압축파들의 중첩에 의해 강한 충격파를 형성하여 폭굉으로 발전한다.

- 3) 관내 장애물이 있을 경우 난류효과로 화염확산에 의해 반응을 가속시켜 폭굉으로의 전이를 가속하는 효과가 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Roger A. Strehlow "Combustion Fundamentals" McGraw Hills. 1985.
- 2) Atsumi OMORI etal. "Explosion of

- Ethylene-Air Mixtures in Tubes” 採光과 保眼 Vol. 27, No. 8, 1981.
- 3) H. Matsui “On the Measure of the Relative Detonation Hazards of Gaseous Fuel-Oxygen and Air Mixtures” 17th Symp. (Int) on Combustion, p, 1269, 1979.
  - 4) H. Matsui “Decompositive Explosion of Acetylene by Detonation Induced Shock Wave” 高壓가스 Vol. 21, No. 12, 1984.
  - 5) K. N. Palmer “The Quenching of Propane-Air Explosions by Crimped Ribbon Flame Arrester” And Symp on Chemical process hazards. p. 15, 1963.
  - 6) H. E. Perlee etal “Constent Volume Flame Propagation” RI 7839. US Burean of Mines.
  - 7) 오규형외 “가연성가스의 폭발특성에 관한 연구”, 한국산업안전학회지, Vol. 7, No. 3, pp. 35~42, 1992.
  - 8) 오규형외 “Flame arrester의 개발에 관한 연구”, 한국기계연구원 연구보고서, BCG 145. 017M, 1993.
  - 9) IEC 79-1 “Construction and Test of Flame-Proof enclsures of Electrical Apparatus”, 1971.