

<論 文>

# 고체미립자의 반사압축파에 의한 점화에 관한 실험적 연구

백 승 옥\*

(1986년 10월 6일 접수)

## An Experimental Study on the Ignition of Dusts behind Reflected Shock Waves

Seung Wook Baek

**Key Words:** Ignition(점화), Shock Tube(압축관), Reflected Shock Wave(반사압축관), Incident Shock Wave(입사압축파), Dust Particle(고체미립자)

### Abstract

In relation to the dust detonations which have imposed severe damages on the industry, the ignitability of various dusts has been investigated on a horizontal shock tube in this study. By using a newly designed air injector, very well-distributed clouds could be obtained. The proper reflected shock conditions have been generated by placing a reflector 1.5cm behind the air injector, which reflected the incident shock wave. The incident shock waves in the range of Mach number 2.8~3.3 created the postreflected shock temperature of 1200~1600K. Experimentally the ignition delay was defined as the time interval between the arrival of a reflected shock wave at dusts and the detection of visible light. Measured ignition delays of dusts investigated were located lower than 1msec under the above conditions. These values are one-order higher than those in the incident shock wave condition. In this type of ignition process the following three processes are considered to play important roles; heating of a particle, generation of volatile gas by endothermic devolatilization process, and its diffusion from the particle surface and the formation of stoichiometric mixture with oxidizer.

### 1. 서 론

고체미립자들이 존재하는 곳에서의 폭발(detonation) 현상은 산업계에 물질 및 인명피해를 야기시켜 왔다. 이 현상을 이해하고자 고체입자의 점화 및 화염발생과

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

가속등 단계적인 연구가 진행되고 있다. 특히 고체입자의 점화는 폭발현상이 일어나기 위한 초기단계이고 고체미립자의 공기 또는 산소에서의 폭발성(detonability) 및 가연성(flammability)과 밀접한 관계를 가지고 있다<sup>(1)</sup>. 또한 미분탄(pulverized coal)을 이용한 보일러의 설계에 있어서도 석탄가루의 점화 및 연소현상에 대한 이해가 고려되어야 한다.

고체미립자의 입사압축파(incident shock wave)에 의한 점화지연에 관한 실험적 결과에 의하면, 마하수가 4~5인 입사압축파에 의한 점화지연 시간은 고체입자의 종류에 따라 큰 차이가 있으나 대체로 100 $\mu$ sec 이내에 분포되었다<sup>(2~4)</sup>. 이러한 대단히 짧은 점화지연 시간을 지시하는 입자의 점화는 표면점화(surface ignition) 과정으로 이해될 수 있다. 왜냐하면 고체입자가 열분해(thermal decomposition)되어 생성된 증발기체(Volatile)에 의한 점화는 이보다 더욱 긴 시간이 요구되기 때문이다<sup>(5)</sup>. 이러한 증발기체의 확산에 의한 기체 상태에서의 점화는 반사압축파에 의해 생성된 조건 하에서 가능하다<sup>(6,7)</sup>.

그러나 Davis 등<sup>(6)</sup>의 실험에서는 고체입자가 장시간 입사압축파에 노출되어 있었으므로 순수한 반사 압축파에 의한 점화라고 보기에는 입사압축파의 영향을 무시할 수 없었다.

본 연구에서는 새로 고안된 연료주입기(air injector) 바로 뒤에 입사압축파를 반사시키기 위한 벽을 설치함으로써 고체입자의 입사압축파에 대한 노출을 최대한 줄였고 또한 새로운 연료주입기에 의해 매우 잘 분포된 입자분포를 얻을 수 있었다. 반사압축파에 의해 생성된 고온 고압의 산소중에서의 고체입자의 점화지연

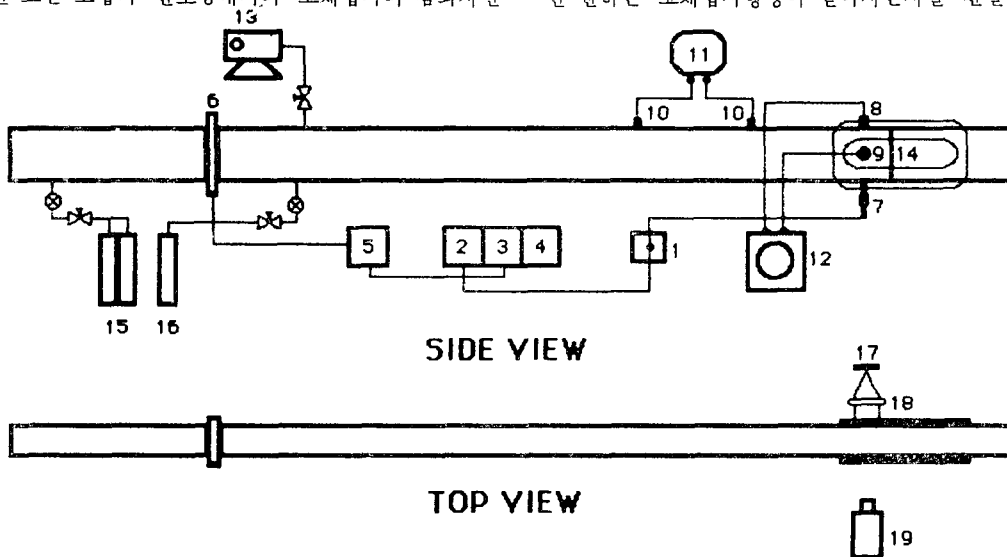
시간을 측정하므로써 기체유동이 존재하는 입사압축파 실험에서의 점화지연시간과 비교하여 기체유동이 고체미립자의 점화에 미치는 영향을 알아볼 수 있었고 반사압축파에 의한 점화상태 조건하에서도 표면 점화모델이 성립하는지를 관찰해 보았다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

실험은 길이가 3m 이고 직경이 7.3cm 인 원형단면의 압축부(driver section)와 가로 3.8cm, 세로 6.4cm, 길이 3.6m 인 사각단면의 팽창부(driven section)로 이루어져 있는 수평 압축관(shock tube)에서 이루어졌다.

Fig. 1에서의 같이 팽창부 하류 양쪽에 유리로 구성된 실험부(test section)가 있고 압축부와 팽창부 사이에 있는 격막(diaphragm)으로부터 2.74m 인 곳에 연료주입기가 압축관 하단에 설치되어 있다. 연료주입기 바로 후면 1.5cm 인 곳에는 입사 압축파를 반사시키기 위한 벽면이 설치되어 있다. 압축관의 압축부는 헬륨(Helium) 기체의 압력을 조절하게 되어 있어 원하는 속도의 입사압축파를 생성할 수 있다. 실험부에는 또한 원하는 고체입자형상이 얻어지는지를 관찰하기 위



- |                                 |                        |                     |
|---------------------------------|------------------------|---------------------|
| 1. Firing switch                | 8. Pressure transducer | 15. Helium tank     |
| 2. Wave form generator          | 9. Light detector      | 16. Oxygen tank     |
| 3. Pulse generator              | 10. Pressure switch    | 17. Spark generator |
| 4. Indicator                    | 11. Counter            | 18. Lens            |
| 5. High voltage pulse generator | 12. Oscilloscope       | 19. Camera          |
| 6. Flange connector             | 13. Vacuum pump        |                     |
| 7. Injector                     | 14. Reflector          |                     |

Fig. 1 Experimental setup

하여 스파이크 생성장치와 사진기가 설치되어 있고 연료주입기와 격막 파괴장치 사이에는 입사압축파가 매우 잘 분포된 고체입자형상에 도달할 수 있도록 시간지연장치와 격막 파괴장치에 공급할 고전압 신호 발생장치가 설치되어 있다.

## 2.2 실험

매우 작은 양의 고체입자 가루는 Fig. 2에서와 같은 연료주입기의 스크린에 장착되어 연료 주입기와 함께 압축관 하단에 설치된다. 실험부는 진공펌프에 의해 배기된 후  $\frac{1}{3}$ 기압의 산소로 채워진다. 실험시작과 함께 솔레노이드 코일이 작동된 연료주입기의 피스톤은 압축관 팽창부 내부 및 외부의 기압차( $\frac{2}{3}$ 기압)에 의해 작동되어 연료는 강화유리로 이루어져 있는 실험부에 주입된다. 이때 고체입자는 입사압축파에 잠시 노출되었다가, 즉시 벽에서 반사되는 반사압축파에 의해 형성된 고온고압의 산소기체에 의해 가열 및 점화된다. 점화된 고체입자로부터의 빛 방출은 강화유리 앞쪽에 설치되어 있는 광 증폭기(photomultiplier)에 의해 측정된다. 입사 압축파의 속도는 연료주입기 상부에 설치된 두개의 압력스위치(pressure switch)에 의해 작동되는 카운터에 의해 측정된다. 연료주입기 바로 위쪽에는 압력측정기(pressure transducer)가 설치되어 압축파의 고체입자 도달시점을 측정한다. 일단 한회의 실험이 종료된 후 다음번의 실험을 위해서는 압축관 내에 잔존하는 모든 이물질들을 제거해야 하는 것은 어려움이 뒤따르는데 이때 사용된 방법은 팽창부의 하류를 열어선 상태에서 금속격막을 사용 압축파를 보

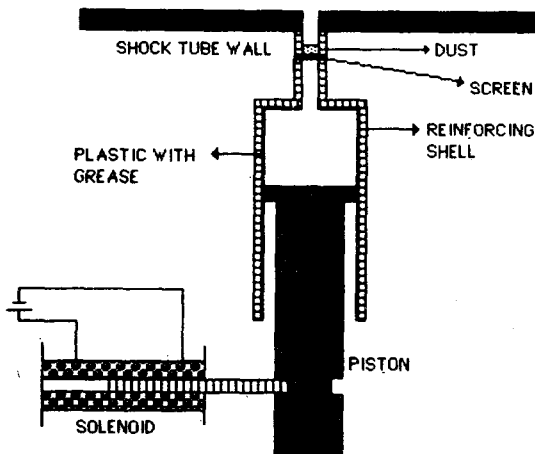


Fig. 2 Air injector schematics

냄으로써 이물질을 제거하는 방법을 이용하였다. 또한 배회 만족할 만한 결과를 얻었는지를 확인하기 위하여 분포된 고체입자의 형상을 촬영하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Table 1에는 실험에서 측정된 고체입자의 종류가 나타나 있다.

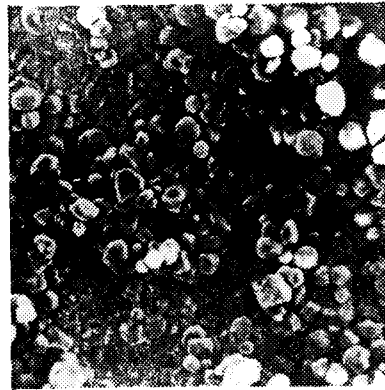
Table 1 Dusts investigated

Substance	Particle size range( $\mu\text{m}$ )
Coal	53~74
Oats	53~74
Corn starch	53~74
Flour	53~74
Wheat	53~74
Lycopodium	Less than 34

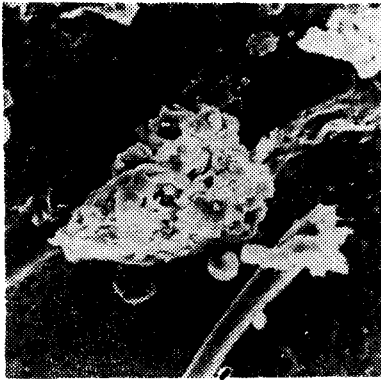
400 배로 확대된 4 종류의 고체입자 사진이 Fig. 3에 실려있는데 그 형상이 매우 불규칙함을 보여준다. 연료주입기에 의해 분포된 고체입자의 형상과 압축파와의 상호작용은 Fig. 4에서 볼 수 있다. 여기서 입자는 그림의 하부로부터 주입되었고 입사압축파는 좌측에서 우측으로 움직이며 오른쪽 끝에 있는 벽면에서 반사된다. Fig. 5에는 광증폭기와 압력측정기로부터의 신호형상을 볼 수 있는데 입사압축파에 의한 급격한 압력 증가와 반사 압축파에 의한 두번째 압력증가 지점에 고체 미립자의 압축, 가열된 산소기체에의 노출시작점을 나타낸다. 광증폭기에 의한 신호는 일정시간 후 고체입자로부터의 빛방출에 의해 반응하는 것을 볼 수 있다. 실험적으로 점화지연시간은 고체입자가 반사압축파에 노출되는 시점으로부터 점화에 의한 빛 방출시점까지의 시간으로 정의되는데 Fig. 6에 그 결과가 로그눈금의 점화지연시간과 반사 압축파에 의한 압축기체 온도( $T_5$ )의 무차원화된 역수로 나타나 있다. 압축기체의 온도가 증가할수록 즉 압축파의 속도가 증가할수록 점화지연 시간이 단축되고 있다. Arrhenius 형태의 반응항으로 지배되는 연료의 경우 점화지연시간을 로그눈금의 점화지연시간과 온도의 좌표에 나타냄으로써 그 기울기는 활성화 온도(Activation temperature)에 비례하게 된다. 반사압축파에 의한 고체입자의 점화에 대한 경우 1200~1600K의 산소기체 내에서 점화 지연시간은 1msec 내에 분포하는데 이 결과를 Sichel<sup>(2)</sup> 등의 입사 압축파에 의한 점화지연 시간(100



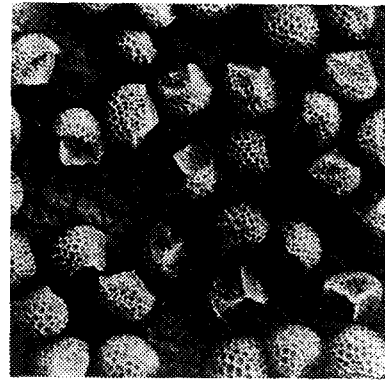
(a)



(b)

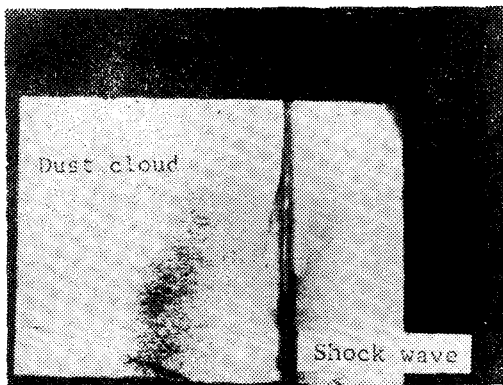


(c)

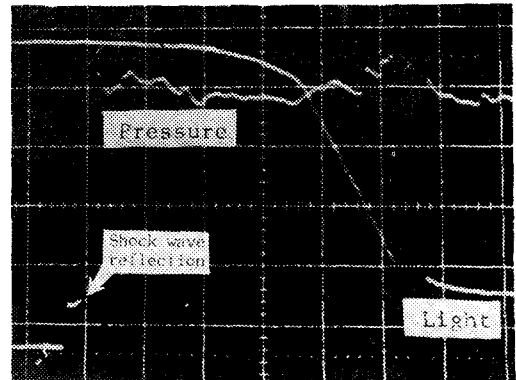


(d)

**Fig. 3** Magnified pictures of dusts investigated  
(a) coal (b) corn starch  
(c) wheat (d) lycopodium



**Fig. 4** Interaction of a shock wave with a cloud of 53~74 micron coal (Mach number 3.19)



**Fig. 5** Typical oscillogram for lycopodium dust (Mach number 3.22)

x Coal (53-74 micron)  
 ■ Oats (53-74 micron)  
 ○ Corn starch (53-74 micron)  
 □ Flour (53-74 micron)  
 △ Wheat (53-74 micron)  
 ▲ Lycopodium (less than 34 micron)  
 T5 is the gas temperature behind the reflected shock

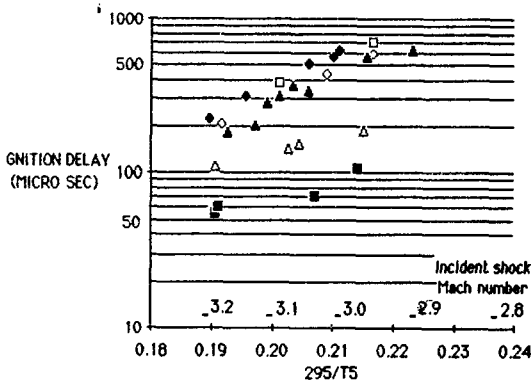


Fig. 6 Ignition delay data measured in reflected shock condition

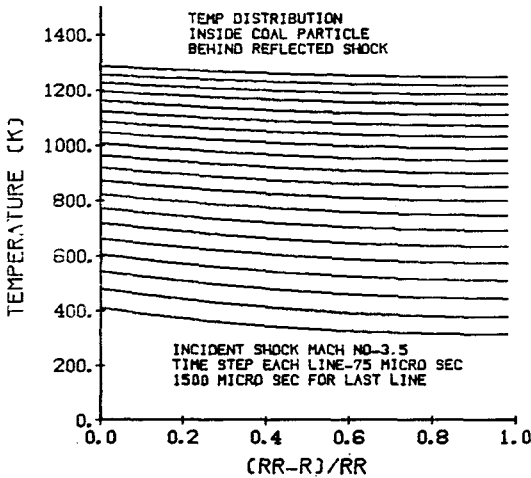


Fig. 7 Temperature variation with time inside 53 micron coal particle along the radial direction under reflected shock condition created by incident shock wave Mach number 3.5 (Time is increasing upwards)

$\mu\text{sec}$  이내)과 비교해 볼 때 대체로 한 차수(order)가 증가하는 것을 볼 수 있다. 원인은 입사압축파에 의해 가속된 기체가 즉시 반사된 압축파에 의해 상쇄되어 정체됨으로써 고체입자로의 열전달이 감소하기 때문이다.

또한 실험결과는 여러 곡식가루는 석탄가루 같이 짧

은 점화 지연시간을 가지므로써 가연성도 대단히 큰 것으로 보여진다. 이러한 반사 압축파에 의한 고체입자의 점화에서와 같이 고체입자로의 열전달율이 낮은 상태에서도 표면 점화모델이 성립하는지를 알아보기 위하여 반사압축된 기체상태에서의 고체입자의 가열상태에 대해 Fig. 7에서와 같은 온도변화 곡선을 구할 수 있었다( $RR$ 은 고체입자의 반경을 나타냄). 이 변화곡선은 Sichel<sup>(2)</sup>에서와 같이 측대칭 좌표에서의 에너지식

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

와 입자표면에서의 경계조건

$$k_c \frac{\partial T}{\partial r} (R, t) = h [T_f - T(R, t)]$$

입자 중심에서의 경계조건  $\frac{\partial T}{\partial r} (0, t) = 0$ 의 해인

$$T = T_f + \frac{1}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \sin(\lambda_n r) \exp(-\alpha \lambda_n^2 t)$$

로부터 얻어졌다.

여기서 특성치  $\lambda_n$ 은 다음과 같다.

$$\tan(\lambda_n R) = -\frac{\lambda_n}{A}$$

$$A = \frac{h}{k_c} - \frac{1}{R}$$

$$\beta_n = \frac{\left\{ 4 \left( T_i - \frac{B}{1+AR} \right) \left[ \frac{\sin(\lambda_n R)}{\lambda_n} - R \cos(\lambda_n R) \right] \right\}}{2\lambda_n R - \sin(2\lambda_n R)}$$

$$B = (hR/k_c) T_f$$

그리고  $t$ 와  $r$ 은 각각 시간 및 반경방향 좌표이고  $T$ 와  $T_f$ 는 온도 및 기체회복온도(gas recovery temperature),  $h$ 와  $k_c$ 는 대류열전달 계수 및 고체입자의 열전도율이다. 또한  $\alpha$ 와  $R$ 은 각각 열확산계수(thermal diffusivity) 및 고체입자의 반경이다. Fig. 7은 직경  $53\mu\text{m}$ 의 구모양으로 가정된 석탄입자가 마하수 3.5인 입사 압축파에 의해 반사 압축된 상태에서의 시간에 대한 입자 내부의 온도 변화곡선이다. 이때 석탄입자는 반사압축된 기체의 자연대류에 의해 가열되고 있다. 그림에서와 같이 특정시간에 입자는 표면으로부터 중심까지 거의 균일하게 가열되는 것을 볼 수 있다. 즉 입자내부에서의 열전달 특성 시간은 기체로부터의 입자표면으로의 열전달 특성시간에 비해 대단히 짧음을 보여주고 있다. 만일 표면점화 모델이 성립한다면 입자 표면과 중심이 거의 같은 시간에 점화 및 연소된다는 결론이 얻어진다. 그러므로 이러한 경우 표면점화 모델은 성립되지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 경우 다음과 같은 점화모델이 예측된다. 입자가 외부의 기

체에 의해 균일 가열됨과 동시에 열분해에 의해 증발기체 (volatile)가 생성, 구표면으로부터 확산되어 산화제와 혼합하여 점화된다. 그러므로 반사 압축파에 의한 고체입자의 점화의 경우 다음과 같은 과정이 고려되어야 한다.

(1) 입자의 고온기체에 의한 가열

(2) 가열입자의 흡열 열분해에 의한 증발기체 발생

(3) 표면에서 생성된 증발기체의 확산에 의한 산화제와의 당량혼합물 (stoichiometric mixture) 형성

이상의 주요 과정 중 전체 점화현상을 지배하는 가장 늦은 것은 구체적인 전개에 의해 밝혀질 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 여러 종류의 고체미립자를 연료주입기를 이용 공중에 잘 부유시켜 반사압축파에 의해 생성된 고온고압의 산소기체에 노출시키므로써 점화지연 시간을 측정하여 입자 압축파에 의한 점화 지연 시간과 비교한 후 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 대체적으로 측정된 고체입자의 점화지연 시간이 입자 압축파에 의한 점화지연 시간에 비해 한 차수 (order)가 증가하였는데 이는 반사압축파에 의한 경우 기체유동이 정제됨에 따라 고체입자로의 열전달이 감소하기 때문이다.

(2) 실험결과 사용된 고체입자의 경우 1200~1600K의 산소기체 중에서 점화지연 시간은 1 msec 내에 분포하였다.

(3) 자연대류에 의한 열전달 하에서도 곡식가루는 석탄가루보다도 짧거나 거의 같은 점화지연 시간을 가지고 있었다. 이로부터 곡식가루의 가연성 및 점화성이 대단히 큰 것을 알 수 있다.

(4) 반사 압축파에 의한 고체입자의 점화는 입자압

축파에 의한 점화에서 타당한 표면점화이론 보다는 고체 입자의 가열에 수반하는 열분해 현상 (pyrolysis)에 의한 증발기체의 생성 및 확산에 기인하는 기체 점화 이론이 적합함을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Lee, F., Detonation Characteristics of Some Dusts and Liquid/Dust Suspensions, Ph. D. Thesis, The University of Michigan, 1985
- (2) Sichel, M., Baek, S.W., Kauffman, C.W., Maker, B., Nicholls, J.A., and Wolanski, P., The Shock Wave Ignition of Dusts, AIAA Journal, Vol. 23, No. 9, pp. 1374~1380, 1985
- (3) Boiko, V.M., Fedorov, A.V., Fornin, V.M., Papyrin, A.N., and Soloukhin, R.I., Ignition of Small Particles Behind Shock Waves, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 87, p. 71, 1981
- (4) Hwang, C.C. and Pillay, S., Ignition Delay of Coal Particles in Shock-Heated Air, Combustion Science and Technology, Vol. 18, p. 241, 1978
- (5) Anthony, D.B. and Howard, J.B. Coal Devolatilization and Hydrogasification, AIChE Journal, Vol. 22, No. 4, pp. 625~656, 1976
- (6) Davis, W.P., Baer, A.D. and Ryan, N.W., A Shock Tube Ignition Study of a Utah Coal, Combustion and Flame, Vol. 58, pp. 201~215, 1984
- (7) Seeker, W.R., Wegener, D.C., Lester, T.W. and Marklin, J.F., Single Pulse Shock Tube Studies of Pulverized Coal Ignition, 17th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 155~166, 1979