

밀폐공간내의 가연성가스의 점화와 유독성 가스 발생에 대한 연구

Ignition energy effects and noxious product gases of combustible premixed gas in closed space

김한석\* 오규형\* 최연석\* 문정기\*  
H. S. Kim K. H. Oh Y. S. Choi J. K. Moon

ABSTRACT

Ignition energy effects of concentration of mixed gas in closed cylindrical vessel(1, 832cm<sup>3</sup>) are studied. The ignition energy ranged from 25 Joule to 110 Joule, and hydrogen and methane gases were used for flammable gas at stoichiometric condition with oxygen gas and nitrogen gas (N<sub>2</sub>) was for inert gas, which concentration was maximum 60%. The explosion pressure, temperature, concentration of product gases were calculated.

It is found that

- The explosion pressure and explosion velocity increase with ignition energy.
- The gradience of explosion velocity with ignition energy is steeper than explosion pressure.
- The results of calculation are similiar with results of experiment.
- NO<sub>x</sub> is not serious product gas for methane and hydrogen gas, but CO is serious at certain concentration for methane in asphyxiation.

I. 序論

석유화합물 및 가연성가스의 사용이 급격히 증가함에 따라 화재 및 폭발사고의 위험성이 심각해지고 있다. 밀폐 공간내에 가연성가스가 누출되어 있는 경우 점화원이 최소 점화에너지 이상으로 되면 폭발이 일

어나게 된다. 점화원이 최소 점화에너지 정도로 적은 경우에는 폭발로 발전하지 못하고 화염이 폭발상태로 전파되며, 재해는 폭발 후 발생하는 이차적인 화재 또는 유독성가스에 의한 것이 대부분이다. 그러나 점화에너지의 크기가 증가함에 따라 점화원이 폭발특성에 영향을 미치게 되며, 점화원의 크기가 임계점 이상일 때는 충격파를 동반하는 폭발을 일으키게 된다. 따라서 점화원이 최소 점화에너지에 비하여 지나

\*正會員 : 한국기계연구원 방폭연구실

치게 큰 경우에는 밀폐 공간 내부는 폭굉에 의한 일차적인 피해를 먼저 받게 된다.

본 연구에서는 점화에너지의 변화가 예혼합가스의 폭발특성인 폭발화염속도, 폭발압력 등에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 실험을 하였다. 점화에너지를 임의로 조절할 수 있는 용량방전형 점화장치를 선택하여 방전에너지에 대한 스파크의 형상과 크기의 변화를 사진을 통하여 분석하였으며, 수소와 메탄가스를 가연성 가스로 하여 공기 중에 가장 많이 존재하는 질소가스를 비가연성가스로 사용하여, 점화에너지 즉 방전에너지에 대한 폭발압력, 폭발화염속도 등을 폭발용기 내에서 계속 비교 하였다. 그리고 화학평형의 이론으로부터 폭발 직후의 압력과 실제 계측이 불가능한 폭발온도, 화재에 있어 질식의 원인이 되는 생성가스 성분 등을 계산하였으며, 폭발압력은 실험과 비교하였다.

## II. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험에서는 폭발압력, 폭발화염속도 등을 측정하기 위하여 폭발용기를 사용하였다. 용기의 직경은 15cm, 길이는 20cm의 강철관으로 이루어져 있으며, 양면에는 화염전파의 가시화를 위하여 두께 15mm의 투명한 아크릴판으로 관망창을 설치하였다. 점화원은 축전기를 이용한 용량방전형인 스파크 형으로 하였으며, 전압에 의하여 최대 110Joule까지 에너지를 변화시킬 수 있게 제작하였다. 점화장치는 직경 3mm의 텅스텐 봉의 끝을 날카롭게 연마하여 끝 간격을 1mm로 하여 폭발용기 중심에 위치하게 하였다. 폭발압력 측정용 센서는 50Kgf/cm<sup>2</sup>까지 측정할 수 있는 스트레인식으로 폭발용기 상면 중심에 설치하였으며, 압력센서에서 측정된 신호는 증폭기를 거쳐 디지털 오실로스코프로 계속하였다. 폭발화염속도를 측정하기 위하여 고속카메라(VT-101)를 이용하였고, 보다 명확한 화상을 얻기 위한 광학장치는 Schlieren을 이용하였다.

### 2.2 실험방법

본 실험에서 사용한 혼합가스는 가연성 가스로 메탄과 수소를 사용하였으며, 산소와 각 화학적 당량비로 혼합하였고, 비가연성 가스로 공기 중에 가장 많이 포함되어 있는 질소가스를 사용하여, 혼합가스 중의 질소가스농도와 점화에너지에 대한 실험을 행하였다. 점화기의 방전에너지의 변화에 대한 스파크 형상과 예혼합가스의 화염의 전파속도의 측정은 Frame Mode Type의 고속카메라를 이용하여 촬영 후 Film 분석을 통하여 시간에 대한 화염의 진행상황으로 속도를 환산하여 측정하였다. 점화에너지는 축전기에 공급되는 전압조정에 의하여 행하였으며

$$\text{점화에너지는 } E = 1/2 \times C_x V^2$$

C : 축전지용량

V : 공급전압

로부터 계산하였다. 점화는 고속카메라와의 동기를 위하여 고속카메라의 콘트롤유니트에 의하여 작동되게 하였다. 폭발압력의 측정은 보정이 가능한 스트레인형 압력센서를 이용하였으며 폭발용기 상면 중심부에 설치하였고, 감지된 신호는 스트레인 앰프를 거쳐 응답속도가 250MHz인 디지털오실로스코프로 처리하였으며 최고압력을 폭발압력으로 하였다. 모든 실험은 같은 조건 하에서 3회씩 행하였으며, 각 결과는 평균을 하여 처리 하였다.

### 2.3 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 필름분석을 통하여 점화에너지와 Core의 크기와의 관계를 나타낸 것이다. Core의 크기는 점화에너지가 증가함에 따라 증가되며, 점화에너지가 40Joule 이상에서는 그 증가율이 감소되는 임계점이 존재한다. 이 결과는 점화장치의 구조 및 재질에 관계 되는 것으로 예상된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 수소와 산소를 화학적 당량비로 조성한 가스에 질소의 농도 변화에 대하여 점화에너지가 화염의 전파 속도와 폭발압력에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 이것으로 보면 점화에너지가 증가

함에 따라 폭발화염속도와 폭발압력은 증가하는 경향을 알 수 있으며, 폭발압력은 질소의 농도가 적을수록 점화에너지의 영향을 적게 받음을 알 수 있다. 또한 폭발화염속도와 폭발압력은 질소의 조성이 증가함에 따라 감소하는 경향을 알 수 있는데, 질소 가스로의 열 손실에 의한 것으로 예상되며, 폭발압력의 감소율보다 폭발화염속도의 감소율이 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 가연성 가스로 메탄을 이용하여 점화에너지 변화에 대한 폭발화염속도의 결과이다. Fig. 7과의 비교로부터 수소혼합가스보다는 점화에너지의 영향을 적게 받음을 알 수 있다. 이것은 메탄의 연소열과 최소점화에너지가 212.8Cal/ml, 0.33mJ인데 비하여 수소의 연소열과 최소점화에너지가 68.3 Cal/ml, 0.015 mJ이기 때문에 스파크에너지가 점화에 소비된 후 남은 에너지가 수소보다는 메탄가스의 반응열에 비하여 적기 때문으로 예상된다.

### III. 계산결과 및 고찰

화학평형을 기초로 하여 밀폐공간 내의 가연성가스의 폭발시 외부로의 열 손실을 무시하고 평형 상태에 도달한 것을 가정하여 계산하였다. Fig. 10은 수소와 산소의 화학적 당량비로 혼합된 가스에 질소를 각 농도 별로 혼합한 가스의 폭발 후 공해성 생성가스인 NO<sub>x</sub>의 농도를 나타내고 있다. NO<sub>x</sub>는 질소가스의 조성에 대하여 포물선모양을 형성하고 있는데, 이것은 초기 질소가스의 농도가 적을 때에는 반응열에 의하여 온도는 높지만 질소 성분이 적기 때문에 NO<sub>x</sub>의 발생이 적고, 질소가스의 농도가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub>가 증가하지만 반응열의 감소와 질소 가스로의 열손실로 생기는 온도의 저하로 인하여 NO<sub>x</sub>의 발생이 억제됨으로 어떤 변곡점이 존재하며, 그 점은 질소가스 조성이 25%일 때 NO<sub>x</sub>의 발생이 억제됨으로 어떤 변곡점이 존재하며, 그 점은 질소가스 조성이 25%일 때 NO<sub>x</sub>가 최대 1.2%가 된다. Fig. 11은 가연성가스를 메탄으로하여 계산하였을 때 공해성 가스인 NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 가스의 생성에 대한 결과인데, 질소의 조성이 증가함에 따라 온도가 감소하기

때문에 CO는 감소하며, CO<sub>2</sub>는 질소가스의 농도에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 NO<sub>x</sub>는 수소혼합가스의 경우와 같은 경향을 얻을 수 있다. Fig. 12와 Fig. 13은 수소와 메탄가스의 폭발압력과 폭발온도를 나타내고 있는데 질소 가스의 조성이 증가함에 따라 폭발압력과 폭발온도는 감소함을 알 수 있는데 이것은 질소 가스로의 열 손실에 의한 것으로 예상된다. 또한 질소 가스의 농도가 적을 때에는 수소혼합가스의 반응열에 대한 수소가스의 비열이 메탄의 반응열에 대한 비열에 비하여 크기 때문에 폭발압력과 폭발온도는 메탄혼합가스보다는 수소혼합가스보다 크지만 질소 가스의 농도가 증가함에 따라 반응열의 감소로 인하여 메탄혼합가스의 온도보다 수소혼합가스가 낮아짐을 예상할 수 있다. Fig. 14는 수소혼합 가스의 폭발압력에 있어서 계산과 실험의 결과에 대한 비교이다. 계산된 압력은 폭발압력과 같은 경향을 가짐을 알 수 있다.

### IV 결론

1832ml 크기의 폭발용기를 사용하여 수소와 메탄 가스를 산소와 화학적당량비로 혼합한 후 비가연성가스인 질소의 농도를 변화시키면서 점화에너지가 가스 폭발 특성에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 실험과 생성물질에 대하여 계산을 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 가연성 혼합가스의 폭발압력 및 폭발화염속도는 점화에너지가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있다.
2. 비가연성가스인 질소 가스(N<sub>2</sub>)의 농도가 증가함에 따라 폭발압력, 폭발속도, 폭발온도는 감소한다.
3. 수소와 메탄의 질소와의 혼합가스는 반응 후 생성물질 중 NO<sub>x</sub>는 1.2% 미만으로 낮고 변화는 크지 않지만, 메탄의 경우에서의 CO의 생성은 질소가스의 농도에 따라 크게 변화하며, CO<sub>2</sub>의 변화는 적다.
4. 폭발압력에 있어 실험치와 계산치와의 결과는

같은 경향을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

1. G.E. Abouse and T. Y. Toong, "On Direct Initiation of Gaseous Petonation", Combustion and Flame(1982)
2. E. L. Litchfield, M. H. Hay D. R. Forshey, "Direct Electrical Initiation of Frelly Expanding Gaseous Detonation Waves." Combustion Symposium.
3. G. G. Bach, R. Knystautas, and J. H. Lee,
4. "Initiation Criteria for Diverging Gaseous Detonations" Combustion Symposium.
5. Kenichi NIU "단시간 방전방염의 점화과정에 있어서 화염핵의 성장기구와 화염전극형상의 영향" 일본기계학회

논문집(13편), 55권 511호.

6. H. Turumi, "내압용기의 내용적과 폭발압력의 관계", 산업안전연구소, (1969)
7. 김한석, 오규형 "An experimental investigation on the transition from deflagration to detonation of combustible gas" Proceedings of first symposium on energetic materials pp. 347-357(1989)
8. 최연석, 김한석 "폭발성가스의 폭굉특성에 관한 연구" 한국 연소학회 제5회 학술강연회 초록집 pp.5-7(1989)
9. 최연석, 김한석 "폭발성가스의 폭굉억제에 관한 연구" 한국화학학회 1991 춘계학술대회 논문초록 pp.235(1991)
10. 김한석, 문정기 "폭굉제어기에 의한 수소, 아세틸렌 산소 혼합가스의 폭굉제어" 한국산업안전학회지 제6권 제2호(1991).

Figure List

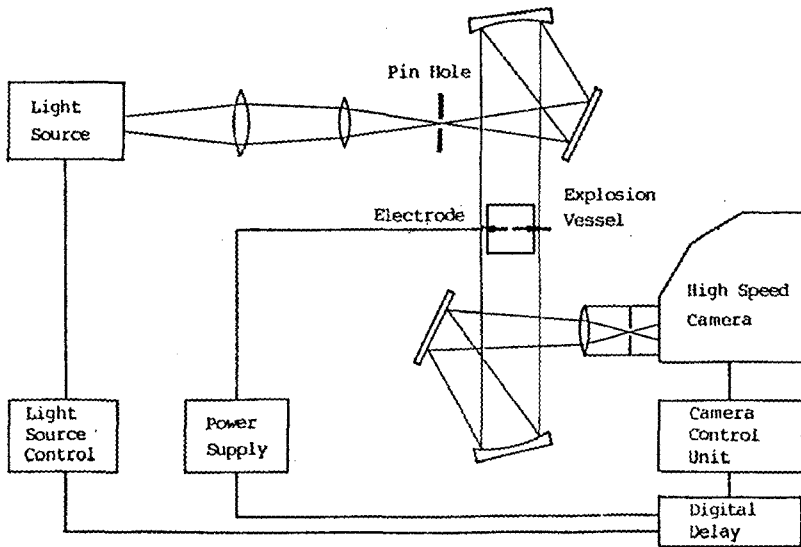


Fig. 1 Optical Process for Flame Velocity

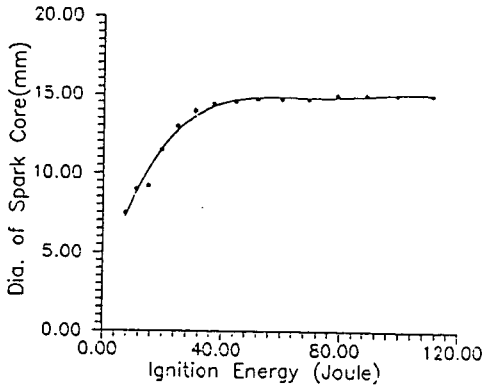


Fig. 2 High Speed Photography of Spark  
(Es = 100Joule)

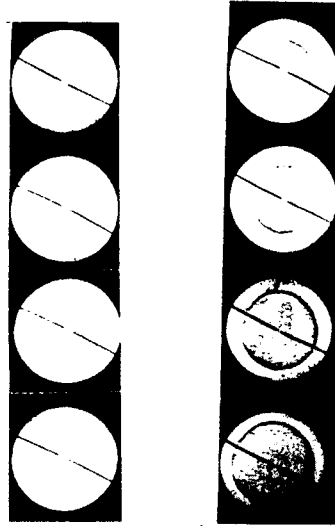


Fig. 4 Dia. of Spark with Spark Energy

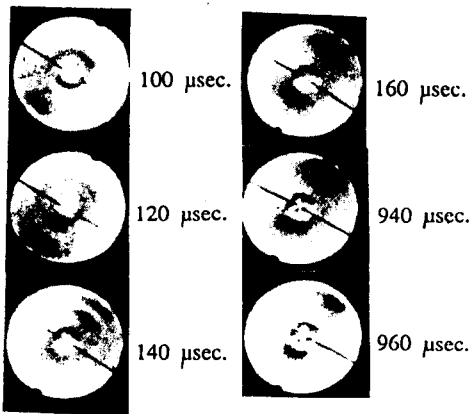


Fig. 3 High Speed Photography of  
Gas Explosion( $12,500\text{fps}$ ,  $\text{H}_2 + 1/20_2$ )

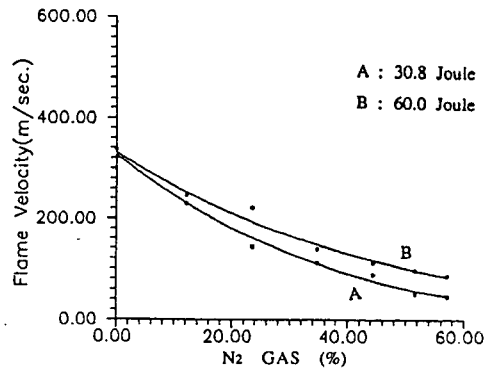


Fig. 5 Flame Velocity of Hydrogen Gas with  
Nitrogen Gas Concentration

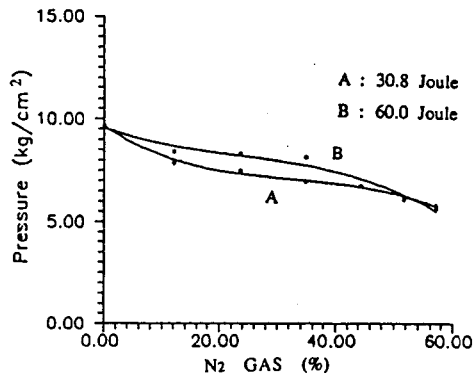


Fig. 6 Explosion Pressure of Hydrogen Gas with Nitrogen Gas Concentration

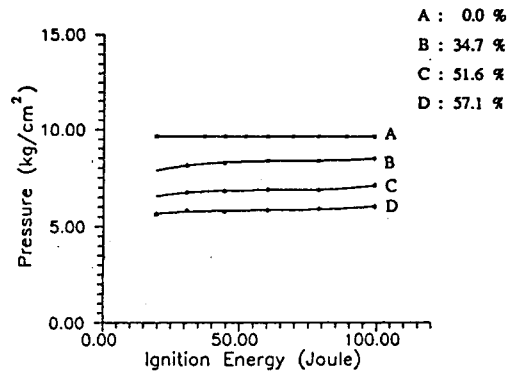


Fig. 8 Explosion Pressure of Hydrogen Gas with Ignition Energy

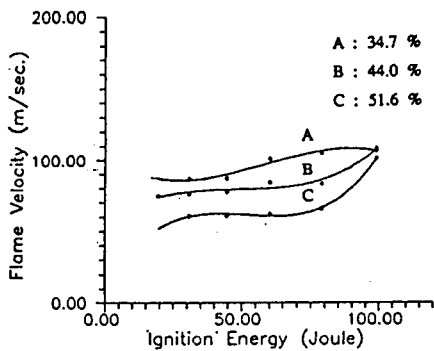


Fig. 7 Flame Velocity of Hydrogen Gas with Ignition Energy

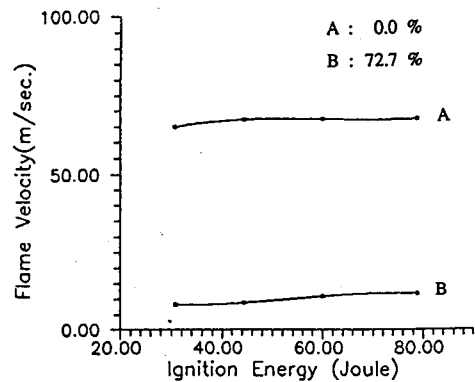


Fig. 9 Flame Velocity of Methane Gas with ignition Energy

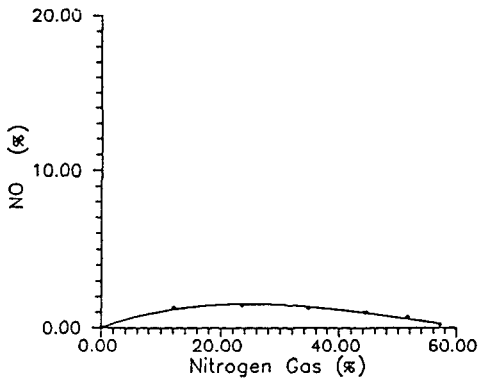


Fig. 10 Product Gas of Hydrogen Mixing Gas

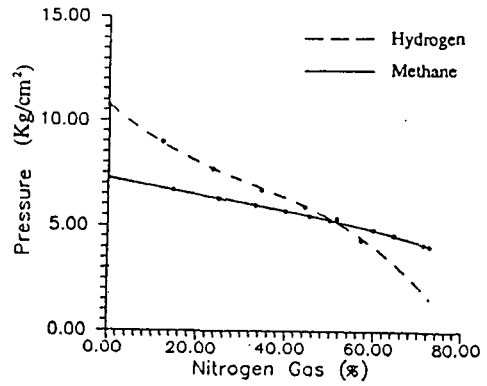


Fig. 12 Pressure of Gas Explosion

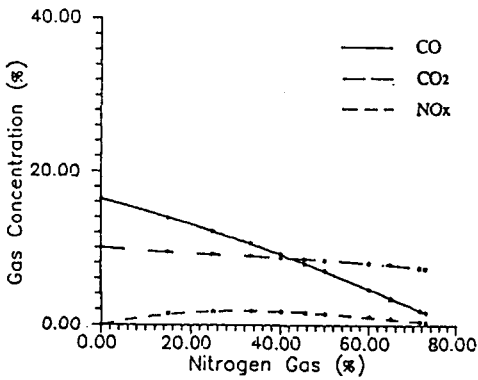


Fig. 11 Product Gas of Methane Mixing Gas

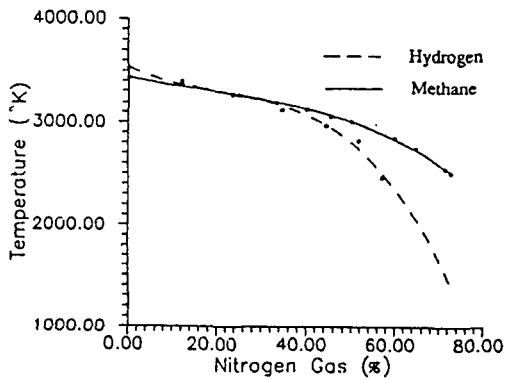


Fig. 13 Temperature of Gas Explosion

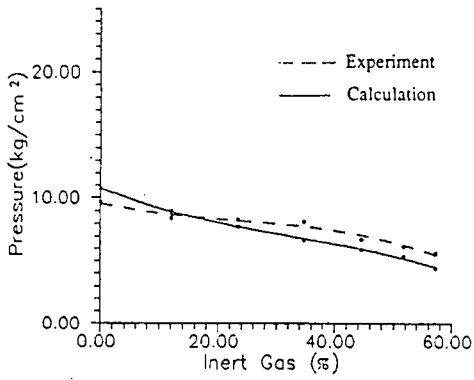


Fig. 14 Experiment and calculation of Explosion Pressure of Hydrogen Gas