

가연성 가스의 폭발특성에 대한 연구 A Study on The Explosion Characteristics of Flammable Gases

오규형* 김한석** 이춘하***
Kyu-hyung Oh Han-seuk Kim Chun-ha Lee

ABSTRACT

An experimental study was carried out to analyse the explosion characteristics of flammable gas-air mixtures. Used flammable gases were hydrogen, methane, acetylene, ethylene and propane, explosion pressure, explosion pressure rising rate, and flame propagation velocity were measured experimentally. The maximum explosion pressure and rising rate of flammable gas-air mixtures were appeared at the range of slightly higher concentration than the stoichiometric concentration. Initial pressure before explosion was controlled from 0.6 to 2.0kg/cm² absolutly. Explosion pressure was increased with increment of the initial pressure, and the relationship between initial pressure and explosion pressure was $P_e = KP_i$. The effect of vessel size on explosion characteristicis was also analysed in this experiment. Explosion pressure was increased with increasing the vessel size, otherwise explosion pressure rising rate was decreased. When we locate a dummy material in vessel explosion pressure was decreased with increasing the dummy volume but explosion pressure rising rate was increased.

I 序 論

석유화합물과 가연성 가스의 사용량은 해마다 증가 추세에 있으며 이들의 취급에 있어서 자료의 부족이나 사용상의 부주의 등으로 가스폭발 및 화재등에 의

한 인명과 재산의 손실도 증가하고 있어서 이에 대한 안전대책이 필요하게 되었다. 이러한 대책을 세우기 위해서는 가연성 가스나 증기등의 폭발특성에 대한 기본자료의 확보가 필수적으로 수반되어야 한다. ¹⁻⁴⁾ 일반적으로 가스의 특성은 최대 폭발압력, 폭발압력 상승속도, 압력상승시간등을 말하고 있으며³⁾ 이러한 특성들은 혼합가스의 농도와 초기압력에 의하여 큰 영향을 받게 되며⁴⁾ 이외에도 용기의 형상이나 크기, 점화에너지등에 의해 영향을 받는다.^{5,6)}

* 正會員 : 한국해사기술연구소
** 正會員 : 한국기계연구원
*** 正會員 : 한국기계연구원

본 논문에서는 IEC(국제전기기술위원회)⁶⁾에서 방폭형 전기기기 방폭성능평가에 사용하도록 권고하고 있는 수소, 메탄, 아세틸렌, 에틸렌 및 프로판등 5종의 가연성 가스와 공기와의 혼합가스에 대하여 이들의 폭발특성과 폭발특성에 영향을 주는 요인들에 대한 실험적 고찰을 하고자 하였다.

II. 실 험

2. 1 실험장치

가연성 가스의 폭발특성은 앞에서 언급한 것처럼 폭발압력, 폭발압력상승속도등을 의미하며 이러한 특성을 측정하기 위한 실험장치의 구성은 혼합가스 폭발용기와 혼합가스절화장치, 폭발압력 계측장치등으로서 폭발압력은 스트레인형 압력센서와 증폭기를 통하여 오실로스코프로 제측하였으며³⁾ 혼합가스의 점화는 10KV의 전기방전 불꽃과 점화에너지 측정장치를 사용하였고 동 실험장치 구성도는 Fig. 1과 같다.⁹⁾

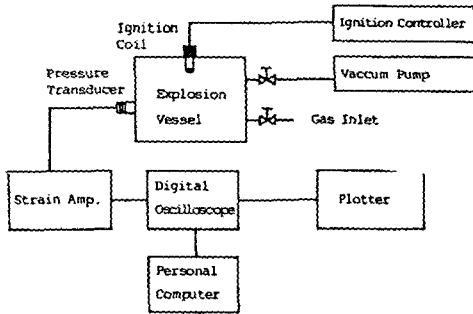


그림1 폭발특성 실험장치 구성도
Fig. 1 Schematic diagram of Experiment Equipment

또 용기의 크기에 따른 폭발특성을 고찰하기 위하여 170cm³에서 약 21,000cm³까지용적을 다르게한 5종류의 폭발용기를 사용하였는데 각 폭발용기의 형상은 모두 L/D=1이 되도록 하였다.

폭발화염 전파속도의 제측은 고속카메라 시스템을 사용하였으며 시스템의 주요구성은 촬영카메라부분, 카메라제어부 그리고 Schlieren시스템 부분으로 나

눌 수 있으며 그 구성도는 Fig. 2와 같다.¹⁰⁾

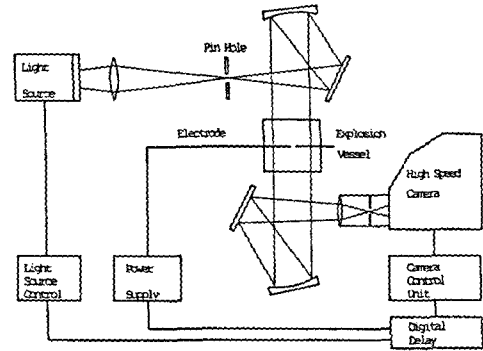


그림 2 폭발현상 가시화 장치 구성도
Fig. 2 Schematic diagram of Visualization System.

2. 2 실험방법

가스의 폭발특성실험은 가연성 가스와 공기와의 혼합가스의 농도를 기본 변수로 폭발실험을 실시하였다.^{1,9)} 가스의 농도는 당량 농도를 중심으로 당량농도보다 높은 농도범위와 낮은 범위농도에서 몇 개의 농도를 선정하여 혼합가스의 농도를 조절하였다. 농도를 조절하는 방법은 폭발용기를 진공으로 만든 후 일정량의 가연성 가스를 넣고 공기를 채우므로써 원하는 농도가 되도록 하였다. 방폭형 전기기기와 유사하게 폭발용기 내에 내용물이 들어있을 경우를 가정하여 용기내 내용물의 부피를 증가시키면서 실험을 행 하였다.⁶⁾ 또 초기압력의 변화에 따른 폭발특성의 변화를 고찰하기위하여 각 가스의 최대 폭발압력을 갖는 농도에서 초기압력을 0.6kg/cm²에서 2kg/cm²까지의 범위에서 실험하였다. 폭발화염의 전파속도는 Schlieren효과를 이용하여 촬영한 사진을 분석하여 측정하였으며 촬영속도는 5만fps로 하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3. 1 가연성 가스의 농도와 폭발특성

가연성 가스의 농도에 따른 폭발압력에 관한 자료는 많은 곳에서 찾아볼 수 있으나 폭발압력 상승속도에 관한 내용은 찾아보기 어렵다.

폭발압력은 이론적으로는 완전연소조건인 당량농도에서 최대값을 가져야 하지만 실험결과 실제로 최대값을 갖는 농도는 당량농도의 1.1배 정도 농도에서 최대값을 보였으며 기존의 실험 결과와 유사한 결과를 나타내었다.¹¹⁾ 이러한 현상은 당량농도에서 폭발시 가연성 가스가 분자 해리등에 의해 완전연소 되지 못하기 때문이며 이보다 높은 농도에서 공기중의 산소와 가연성 가스가 완전연소 반응을 일으킬 수 있는 조건이 되기 때문인것으로 생각된다.

폭발압력 상승속도 역시 폭발압력과 유사한 현상을 보여주고 있다. 특별히 폭발압력 상승속도는 연소속도와 관련이 있는 것으로 생각할 수 있는데 연소속도가 빠를수록 폭발압력 상승속도가 증가하게 된다. 다음에 용기의 부피와 폭발특성의 관계에서 자세히 설명하였으나 화염의 속도 V_f 가 빠를수록 화염면이 벽면에 도달하는 시간이 짧아지게 되기때문에 폭발압력 상승속도는 증가하는 것으로 해석된다. 가연성 가스의 농도에 따른 폭발압력 및 폭발압력 상승속도의 실험 결과는 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다.

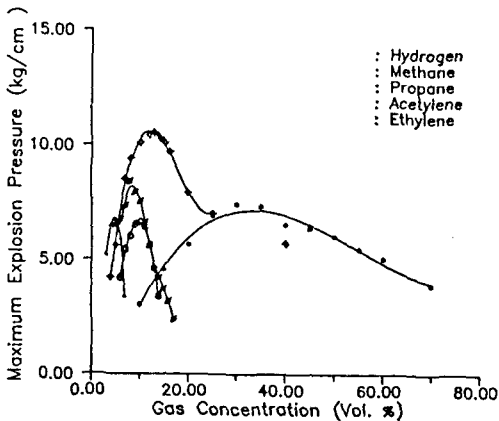


그림 3 가연성 혼합가스의 농도와 폭발압력 관계

Fig. 3 The relation between gas concentration and explosion pressure

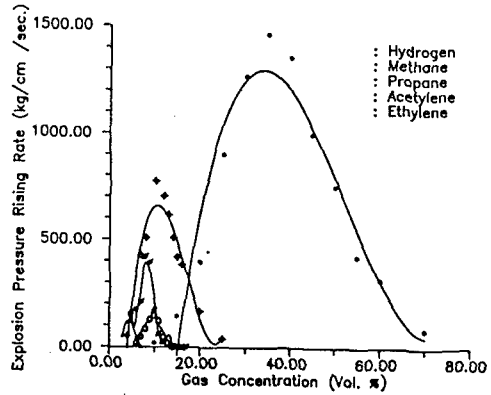


그림 4 가연성 혼합가스의 농도와 폭발압력 상승속도

Fig. 4 The relation between gas concentration and explosion pressure rising rate

3-2 혼합가스의 초기압력과 폭발특성

170cm³의 용기를 이용하여 수소 31%, 메탄 10%, 아세틸렌 14%, 에틸렌 8%, 프로판 4.3%에서 각 혼합가스의 폭발압력 및 폭발압력 상승속도에 미치는 초기압력의 영향을 실험한 결과를 Fig.5와 Fig.6에 나타내었다. 그림에서 보는것 처럼 초기압력의 증가에 따라 폭발압력 및 폭발압력 상승속도는 거의 일차적으로 비례하여 증가함을 알 수 있으며 가스의 종류에 따라 약간의 편차는 있으나 초기압력 P_1 에 대하여 폭발압력 P_e 는 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$P_e = KP_1 \quad (1)$$

이상기체 상태에서 Boyle-Charle's의 법칙을 적용하면

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (2)$$

여기서는 밀폐된 용기에서 실험을 하였으므로 $V_1 = V_2$ 이므로

$$P_2 = \frac{T_2}{T_1} P_1 \quad (3)$$

(3)식에서 $T_2/T_1 = K'$ 라 하면 $P_2 = P_e$, $P_1 = P_i$ 가 되어 (1)식과 같은 형태가 되어 이론식과 실험결과가

잘 일치됨을 알 수 있으며 실험에서는 실제 기체이기 때문에 약간의 편차를 보이고 있다.

또한 초기압력의 증가에 따른 폭발압력의 상승은 밀폐된 용기내에 폭발에 의한 연소 반응의 에너지의 증가로 생각할수도 있으며 폭발압력 상승속도의 증가는 초기압력 증가에 따라 연소매질의 밀도가 증가하였으며 이에 따라 연소속도도 동시에 빨라졌음을 의미한다고 생각할 수 있다.

위와 같은 결과들을 토대로 각 가연성 가스의 초기 압력에 따른 폭발특성의 변화를 예측할 수 있으며 측정된 압력을 (3)식에 대입하면 폭발 순간의 온도를 계산할 수 있다.

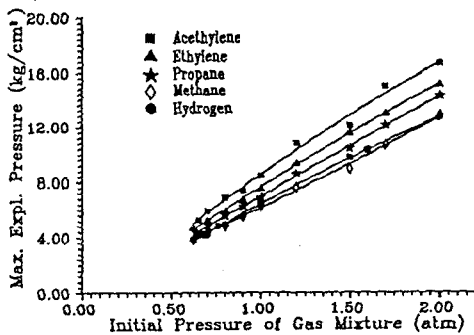


그림 5 초기압력과 폭발압력과의 관계 (Vessel Volume-170cm³)

Fig. 5 The effect of initial pressure on explosion pressure (Vessel Volume-170cm³)

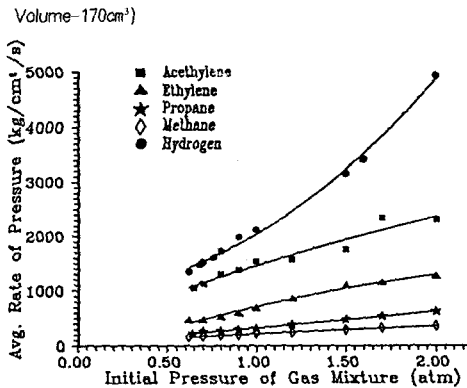


그림 6 초기압력과 폭발압력 상승속도 (Vessel Volume 170cm³)

Fig. 6 The effect of initial pressure on explosion pressure rising rate (Vessel Volume 170cm³)

3. 3 용기의 용적과 폭발특성

폭발용기의 용적변화에 대한 폭발특성의 변화의 관계를 알아보기 위하여 L/D=1이 되는 5개의 폭발용기를 이용하였는데 각 용기의 용적은 170cm³, 570cm³, 5,900cm³, 11,080cm³, 21,000cm³였으며 이때 사용한 가연성 가스는 수소 31Vol%였다.

실험결과 Fig.7과 Fig.8같이 폭발압력은 용기의 용적이 증가함에 따라 점차 조금씩 상승하는 모습을

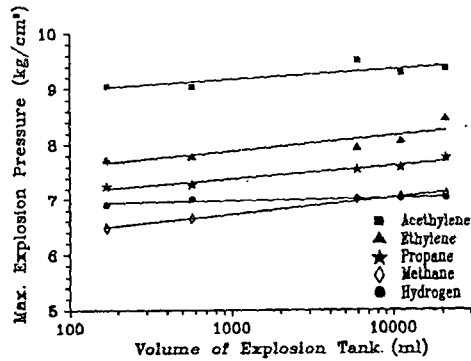


그림 7 폭발용기의 용적과 폭발압력과의 관계 (Hydrogen 31Vol%)

Fig. 7 The relation between vessel volume and explosion pressure (Hydrogen 31 Vol%)

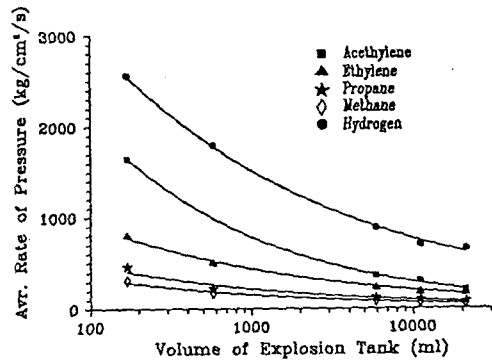


그림 8 폭발용기의 용적과 폭발압력 상승속도의 관계 (수소 31%)

Fig. 8 The effect of vessel volume on explosion pressure rising rate (Hydrogen 31 Vol%)

보여주고 있으며, 폭발압력 상승속도는 반대로 감소하는 현상을 나타내고 있다. 이러한 현상은 폭발용기 용적을 용기내면적으로 나눈값인 V/S가 클수록 폭발에서 발생하는 열손실이 적기 때문인 것으로 생각되며 다음과 같은 이상기체의 상태 방정식과 비교하므로써 그 현상을 이해할 수 있다. 즉, 폭발 전후의 상태방정식을

$$P_1V_1 = n_1RT_1 \quad (4)$$

$$P_2V_2 = n_2RT_2 \quad (5)$$

폭발통의 부피는 폭발 전후 일정하므로 $V_1 = V_2$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad (6)$$

(6)식에서는 T_2 는 단열화염의 온도이고 M_2 는 연소가스의 평균분자량이다. 이 식에서 P_2 는 폭발압력으로 폭발 전후의 평균 분자량비와 폭발 전후 온도의 비에 비례하고 있다.

폭발용기의 부피가 변하여도 혼합가스의 조성이 일정하므로 M_1/M_2 는 용기의 크기에 상관없이 일정하다. 따라서 폭발압력에 영향을 주는 것은 폭발후의 온도에 의한 영향으로 생각할 수 있으며 실험결과 동일한 현상을 보여주고 있다.

폭발압력 상승속도는 화염이 구형으로 일정속도 V_f 로 전파된다고 하고 반응몰수의 변화가 없다고 가정하고, 초기압력을 P_1 초기온도를 T_1 이라 하면 폭발압력은

$$P = \Delta P = P_1 \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1} \quad (7)$$

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi (V_f t)^3, \quad V = \frac{4}{3} \pi r^3, \quad T_2 - T_1 = \Delta T$$

$$P = P_1 \cdot \frac{V_f^3}{r^3} \cdot \frac{\Delta T}{T_1} t^2 \quad (8)$$

폭발압력 상승속도는 (8)식을 1차 미분한 값으로

$$\frac{dp}{dt} = 3 \cdot P_1 \cdot \frac{V_f^3}{r^3} \cdot \frac{\Delta T}{T_1} t \quad (9)$$

$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ 은 화염이 용기벽에 도달했을때이며 화염이 용기벽에 도달하는 시간 t 는

$$t = \frac{r}{V_f} \text{이므로}$$

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 3 \cdot P_1 \cdot \frac{\Delta T}{T_1} \cdot \frac{V_f}{r} \quad (10)$$

따라서 (10)식에서 혼합가스의 초기압력과 화염전파속도가 일정하므로 폭발압력 상승속도는 용기 크기에 반비례함을 알 수 있으며 실험결과 또한 이와 잘 일치함을 알 수 있다.

3. 4 용기내 내용물에 따른 폭발특성

폭발용기내부에 내용물의 유무에 따른 폭발특성 변화를 조사하기 위하여 31Vol% 수소-공기혼합가스를 시료가스로 사용하여 대기압조건에서 21,000cm³ 폭발용기 내부에 원통형 금속용기로 된 내용물의 부피를 변화시키면서 폭발특성을 측정하였다. Fig. 9에서 보는 것같이 내용물의 용적이 증가할 수록 폭발압력은 감소하는 경향을 보여주고 있으며 이와 반대로 폭발압력 상승속도는 증가하는 현상을 나타내었다.

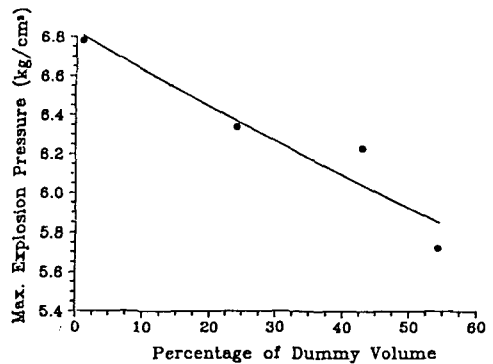


그림 9 폭발용기 내부 모형물의 부피변화에 따른 폭발압력 변화

Fig. 9 The effect of dummy volume on explosion pressure

이러한 현상은 동일한 크기의 용기에 내용물이 증가할수록 가연성 혼합가스의 양이 내용물의 용적만큼 감소하기 때문에 폭발반응의 에너지가 감소하기 때문이며, 또 내용물의 용적 증가에 따라 용기 내의 전체

적인 표면적이 증가하여 V/S가 감소하므로 폭발 연소열의 손실도 증가하여 폭발압력이 감소하는 것으로 판단된다.

폭발압력 상승속도의 증가는 앞 3-3의 (9)식과 (10)식에서 알 수 있는 것처럼 화염전파속도 V_f 가 일정하면 용기의 크기 r 에 반비례하므로 폭발용기 내에 다른 고체 내용물을 채우게 되면 r 이 감소하는 결과를 가져오게 되므로 폭발압력 상승속도는 증가하게 될 것으로 생각된다.

3. 5 폭발화염 전파속도

가연성 혼합가스의 폭발특성에 있어서 또 하나의 중요한 특성은 폭발화염 전파속도이다. 폭발의 전파는 다르게 연소반응의 진행이라고 생각할 수 있으며, 이 반응은 각 가연성 가스의 물리적 성질에 따라 크게 달라질 수 있다.

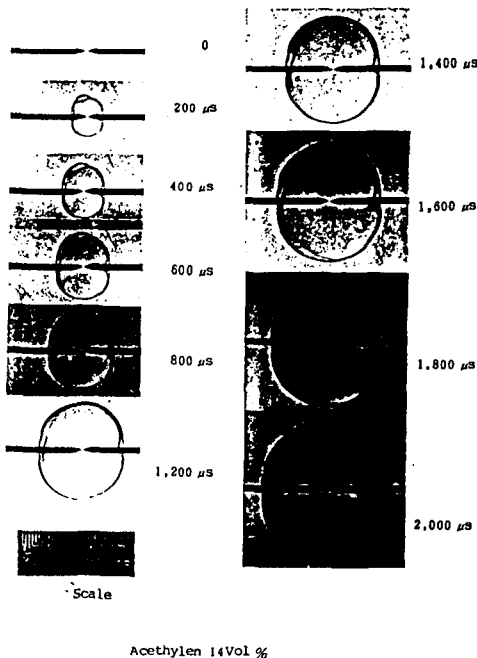


그림 10 아세틸렌-공기 혼합가스의 폭발화염전파현상
Fig. 10 Visualization of explosion flame propagation phenomena of Acetylene-Air mixture.

폭발화염의 전파속도는 최소 점화에너지가 적은 가스일수록, 연소속도가 빠를수록 커지는 경향을 볼 수 있는데 이는 각 가스와 산소와의 반응성과 관련이 있는 것으로 생각되며 최대 화염전파속도는 폭발압력이나 폭발압력 상승속도와 유사하게 당량농도보다 높은 농도 즉 연료 과잉 조건에서 일어나고 있음을 알 수 있다. 다음 Fig 10은 아세틸렌 가스의 폭발화염 전파 현상을 촬영한 사진이며 Fig11은 각 가스들의 농도 변화에 따른 화염전파 현상을 촬영한 것을 분석하여 속도로 나타낸 것이다.

이와 같이 각 가연성 가스의 화염전파속도를 측정 하므로서 폭발의 확대 또는 화재로의 전이에 의한 재해를 방지할 수 있는 자료를 얻을 수 있게 된다.

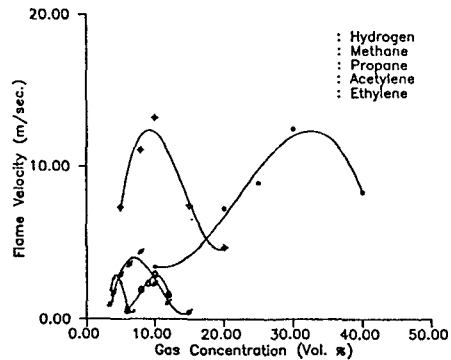


그림 11 각 가스의 농도별 화염전파속도
Fig. 11 Flame propagation velocities of gas-air mixtures

IV. 結 論

본 연구에서 5종의 가연성 가스를 폭발특성에 대하여 실험적으로 고찰해보았으며 실험한 내용과 결과들을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가연성 혼합가스의 최대 폭발압력은 당량비 보다 약 1.1배 높은 농도에서 얻을 수 있다.
2. 가연성 혼합가스의 폭발압력 및 폭발압력 상승속도는 폭발전 초기압력과 일차적인 비례 관계를 갖는다.
3. 폭발 에너지가 동일한 경우 연소반응속도가 빠를수록 폭발압력은 크게되며 이는 반응중의 에너지

손실과 직접적인 관계가 있음을 나타낸다.

4. 가연성 혼합가스의 최대 화염전파속도는 당량농도보다 높은 농도에서 발생하며 각 가스의 연소반응 속도에 의존한다.

참 고 문 헌

1. 안전공학협회, “안전공학편람”, 코로나사
2. 김영대 외, “가스폭발 예방기술”, 세화, (1985).
3. H. Turumi, “내압용기의 내용적과 폭발압력의 관계”, 산업안전연구소, (1969).
4. H. Matsui의, “수소의 폭발한계에 미치는 압력의 영향”, 안전공학 Vol. 8, No. 5(1969).
5. Frank. P. Lees “Loss Prevention in the Process Industries” Butterworth and Company (1980).
6. IEC 79-1. (1983).
7. 고압가스 보안협회, “수소보안기술 Handbook”, (1985).
8. 한국기계연구소, “수소, 메탄, 아세틸렌, 에틸렌 및 프로판가스의 폭발특성 비교 (I)”, UCE 393-1282. D, 91988).
9. 한국기계연구소, “수소, 메탄 아세틸렌, 에틸렌 및 프로판가스의 폭발특성 비교(II)”, UCE438. 1271D,(1989)
10. 한국기계연구소, “충격관을 사용한 가연성 가스의 폭발특성(1)”, UCN125-1076A I.D(1988)
11. 한국기계연구소, “수소폭발재해방지기술 해외전문가 활용보고서, EX-90-01, ‘1990.’”