

## 수소의 폭발 특성에 관한 연구

오규형<sup>†</sup>, 이광원<sup>\*\*</sup>

\*호서대학교 소방학과, \*\*호서대학교 안전시스템공학과

### A Study on the Explosion Characteristics of Hydrogen

Kyu-hyung Oh<sup>†</sup>, Kwang-won Rhee<sup>\*\*</sup>

*\*Dept. of Fire Protection Eng. Hoseo Univ.*

*\*\*Dept. of Safety System Eng. Hoseo Univ.*

*Sechul, Baebang, Asan, Choongnam 336-795, Korea*

#### ABSTRACT

It was discussed about explosion danger of hydrogen gas experimentally that could be happen during the handling and using. Hydrogen concentration was varied from 10 to 60 vol% for get the explosion characteristics of hydrogen and 5 kinds of cylindrical vessel were used to find the explosion characteristics of hydrogen according to the vessel volume. Initial pressure of hydrogen-air mixture was varied from 0.6 to 2 kg/cm<sup>2</sup>. Based on the experiment, explosion pressure was most high near the 30vol% of hydrogen and explosion pressure was increased slightly according to the increase of vessel volume but explosion pressure rise rate was decreased. Explosion pressure was increased linearly proportional to the initial pressure of gas mixture.

**주요기술용어** :Hydrogen(수소), Explosion pressure(폭발압력), Hydrogen explosion(수소폭발), Hydrogen safety(수소안전).

#### 1. 서론

안전에 관련된 수소의 특성과 그 특성들이 위험성에 어떠한 영향을 주는지 이해하는 것은 수소를 이용하는 시설의 운영이나 취급에 있어 안전한 설계를 하기 위한 필수적인 요소이다. 수소

는 모든 원소 중에서 가장 간단한 구조로 일반적인 자연 상태에서는 거의가 화합물로 존재하고 반응성이 높은 물질이지만 저온에서는 반응성이 낮고, 촉매가 없으면 상온에서는 안정한 상태로 존재한다<sup>1)</sup>.

수소 가스가 용기나 배관 내에 존재할 때는 산소나 점화원을 그 속에 넣지 않는 한 위험성은 없

<sup>†</sup> Corresponding author :khoh@office.hoseo.ac.kr

으나 공기 중에 누출되면 폭발성 혼합가스를 형성하고 점화원이 존재하면 폭발·화재를 일으켜 주변에 대규모의 피해를 수반하게 된다. 수소는 탄화수소류 보다는 발화온도가 비교적 높지만 발화에너지가 매우 적기 때문에 정전기 불꽃 등에 의해서도 쉽게 점화된다. 수소의 공기 중에서의 폭발특성은 뒤에서 실험을 통해 자세히 설명하겠으나 일반적으로 폭발압력은 탄화수소계열의 가스폭발과 비슷한  $5\sim 8\text{kg/cm}^2$ 이 된다.

수소의 화염은 탄화수소보다 뜨겁지만 지속시간이  $1/5\sim 1/10$ 이고 복사에 의한 전열도 메탄의  $1/4$ 정도이며 폭발에너지는 동일부피의 메탄이나 가솔린 증기폭발의  $1/3\sim 1/20$ 으로 적은 편이다. 한편 수소가 갖는 물성 중에 확산속도가 빠른 것은 개방된 공간에서는 연소범위나 폭발범위의 농도에 이르기 전에 대기 중으로 쉽게 확산될 수 있으며, 밀폐 공간에서는 천정 부근에서 환기를 시킴으로 폭발이나 연소를 방지할 수 있다.

폭발과 관련하여 몇몇 실험자가 밝힌 주요 특성을 다른 gas와 비교 정리하여 보면 다음과 같다<sup>7)</sup>.

1) 공기 중에서 폭발농도 범위에 따른 위험지수가 18.5(산소 중에 23.5)로 천연가스 2.62, 프로판 3.3, 일산화탄소 6.0에 비해 가장 넓으며

2) 폭발 농도 범위에 따른 위험지수 역시 공기 중에서 3.3(산소 중에 6)으로 일산화탄소 2.4, 암모니아 3.0으로 이것 또한 넓은 범위이고

3) 점화에너지는 황화탄소보다는 약간 크나 10~5J급으로 프로판의 20배, 톨루엔의 100배 정도로 가장 낮은 그룹에 속하며

4) 폭약에 의하여 점화시키는 경우에도 메탄의 2만분의 1, 프로판의  $5\sim 60$ 분의 1정도만으로도 쉽게 기폭되며

5) Safe gap은 0.29mm로 메탄의 5분의 1, 프로판의 3분의 1정도로 매우 적은 허용틈새를 갖고 있고

6) 소염거리는 에틸렌과는 비슷하나 0.019cm로 일반가스에 비해 수분지 1의 길이를 요구하고 있으며

7) run-up length 역시 프로판은 10m/s의 화염 속도의 경우 101m를 필요로 하고 있으나 수소는 수 m 이내에서도 폭풍으로 발전한다는 점을 들 수 있다.

그동안 수소의 폭발특성에 대한 연구들이 수행되어 왔으며 T. Hayashi 등은 방폭기기 성능 시험을 위한 기초 자료로서 수소의 폭발 특성을 연구하였다<sup>2,3)</sup>. S.B. Dorofeev 등은 수소의 폭발 위험성에 대한 연구를 하였으며<sup>4)</sup> Valdimir Molkov 등은 수소의 폭발 압력 방출에 대한 연구를 수행하였다<sup>5)</sup>. Kenneth 등은 수소와 함께 탄화수소의 연소성에 관한 연구를 수행하였고<sup>6)</sup> U. Maas 등은 수소-산소의 착화 메커니즘을 해석하였다<sup>8)</sup>.

수소에 관한 연구는 실용화를 앞두고 수소의 경제적 생산 기술과 저장기술 및 이용기술 등에 초점을 맞추어 많이 수행되어 왔으며 현재도 이에 대한 연구가 매우 활발한 상태이나 수소의 위험성과 관련한 연구는 국내의 두 세 기관에서 관심을 가질 뿐 활발하지 못한 편이다. 본 연구에서는 수소와 공기의 혼합 가스에 대한 연소성 및 폭발성에 대하여 용기의 크기 및 초기 압력의 변화에 따른 폭발 특성을 연구대상으로 하여 사용조건에 따른 폭발 위험성들을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

수소가스의 폭발위험성을 이해하고 폭발특성을 측정하기 위하여 수소와 공기의 혼합가스를 부피가 서로 다른 5개의 폭발용기를 이용하여 폭발실험을 하였다. 폭발용기의 형태는 원통형용기를 사용하였으며 실험장치의 개략도는 다음 Fig. 1과 같다. 압력센서는  $50\text{kg/cm}^2$ 까지 측정할 수 있는 strain식을 사용하였고, 점화원은 용량방전에 의한 전기불꽃을 이용하여 점화에너지 조절이 가능하도록 하였다.

실험은 폭발특성에 영향을 미치는 중요요인으로 혼합가스의 농도와 초기 압력을 변수로 하였으며 또 용기의 크기에 따른 폭발특성도 측정하였다. 농도는 10%~60%까지, 초기 압력은 0.6kg/

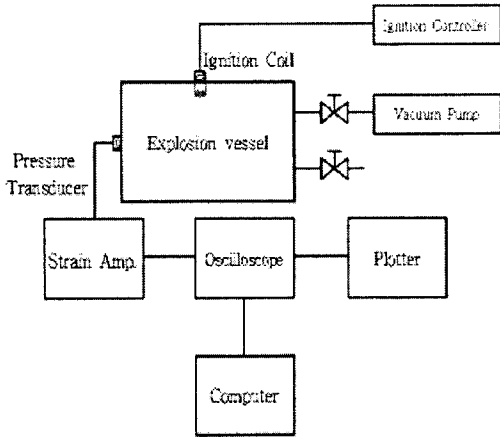


Fig. 1. Schematic diagram of test equipment using H<sub>2</sub> + air explosion

cm<sup>2</sup>-2kg/cm<sup>2</sup>까지 실험을 하였다.

실험방법은 폭발통의 내부를 진공으로 만든 후 농도에 맞추어 일정량의 수소가스를 넣고 밸브를 열어 공기로 혼합하는 방법으로 농도를 조절하고 용량방전식의 점화에너지 측정 장치의 고압 방전을 이용하여 점화시켰다. 폭발의 결과는 디지털 오실로스코프를 사용하여 측정하였고, 오실로스코프로부터 직접 값을 계산하거나 컴퓨터에 저장한 후 다시 분석하는 방법으로 하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 농도변화에 따른 폭발특성변화

수소는 화학적 구조가 간단하고 가벼워서 대기 중에 쉽게 확산되어 가연성 또는 폭발성 가스 분위기를 형성하며 점화에너지가 매우 작고 폭발범위가 넓으며 연소범위에서는 점화원에 의하여 연소하기 보다는 거의 폭발현상을 일으키는 경우가 많다. 수소가스도 다른 가연성가스의 경우와 같은 대기 중에 확산된 농도에 따라 폭발특성이 다르며 이러한 폭발특성을 측정하므로써 수소의 누출 등에 의한 폭발 위험성을 이해하고 이에 대한 방호대책도 세울 수 있다.

다음 Fig. 2는 농도별 최대폭발압력을 측정한

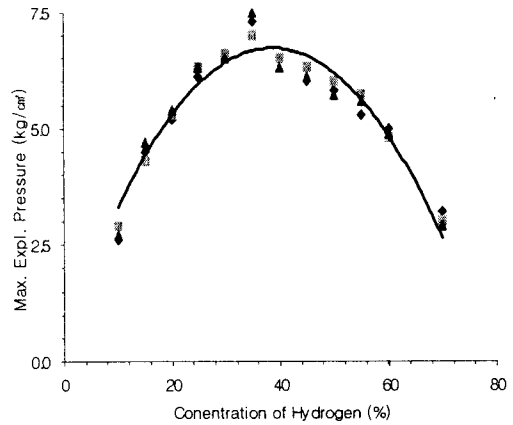


Fig. 2. Maximum explosion pressure of hydrogen-air mixtures

결과로 공기 중에서 당량농도는 28.5%로서 이론적으로는 폭발압력이 최대이어야 하나 공기 중에서의 질소의 영향과 완전반응이 일어나지 않기 때문에 실제 실험의 경우는 당량농도의 1.1-1.2배에서 폭발압력이 최대가 되며 이보다 농도가 높거나 낮은 범위에서는 위에서 설명한 것처럼 반응의 속도와 관련이 있는 것으로 생각된다. Fig. 3은 평균폭발압력 상승속도로 최대폭발압력을 최대폭발압력 도달시간으로 나눈 것이며, Fig. 4는

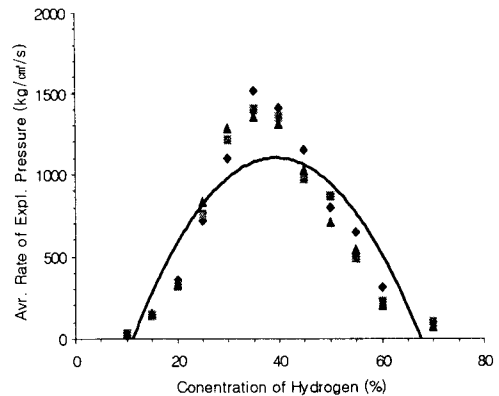


Fig. 3. Average explosion pressure rise rate of hydrogen-air mixtures

Table 1 Dimension of experiment vessel

구분	직경(cm)	높이(cm)	부피(cm <sup>3</sup> )	부피/내 표면적 (V/S)
1	6	6	170	1
2	9	9	572	1.5
3	19.6	19.6	5,913	3.3
4	24.2	24.1	11,085	4
5	29.8	30	20,854	5.2

폭발압력측정곡선에서 최대가 되는 점선의 기울기로, 평균폭발압력상승속도의 약2배의 값이 되며 농도 30-40% 부근에서 최대가 되며 이보다 높거나 낮은 농도에서는 감소하는 경향을 보여주고 있다.

수소의 경우 탄화수소와는 달리 점화 에너지가 작기 때문에 연소 하한계 농도부근이나 연소 상한계 농도 근처에서도 폭발 압력이 탄화수소의 한계 농도 부근에서의 폭발압력보다 높고 압력상승 속도도 크기 때문에 폭발압력에 의한 파괴 위험성이 높을 것으로 보인다.

### 3.2 초기압력과 폭발특성의 변화

공기-수소 혼합가스의 폭발특성에 큰 영향을

미치는 요인의 하나로 초기압력이 있다. 실험 용기는 Table 1의 2번째 용기로 내용적 572cm<sup>3</sup>인 것을 사용하였으며, 초기 압력은 실린더를 이용하여 절대압력으로 0.6kg/cm<sup>2</sup>-2kg/cm<sup>2</sup>까지 변화시켰고 수소의 농도는 최대 폭발 압력을 나타내는 31vol%로 하였다.

다음 Fig. 5는 초기 압력변화에 따른 최대 폭발압력을 나타낸 실험결과로 초기압력에 대하여 폭발압력이 거의 직선적으로 증가하는 현상을 보여주고 있다. 즉 특정 압력 상태에서의 폭발압력을 Pe, 폭발 전 용기내 초기압력을 Pi라고 하면 다음과 같은 실험식을 얻을 수 있게 된다.

$$Pe = KPi \dots\dots\dots(1)$$

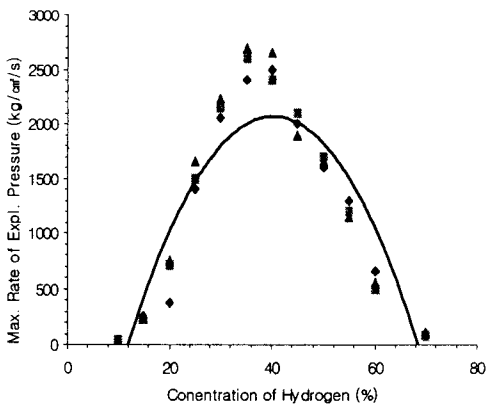


Fig. 4. Maximum explosion pressure rise rate of hydrogen-air mixtures

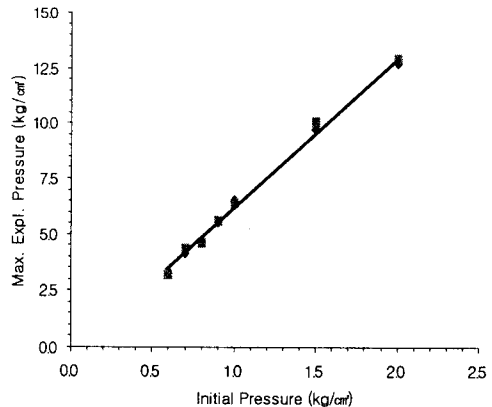


Fig. 5. Maximum explosion pressure according to initial pressure

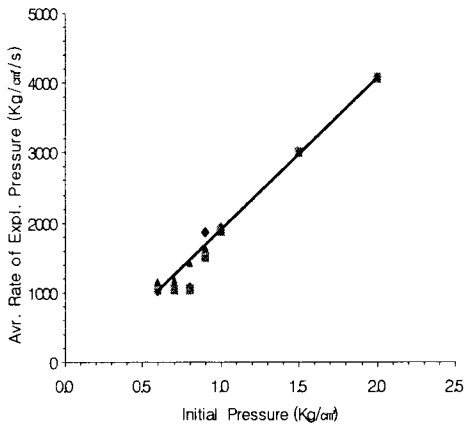


Fig. 6. Maximum rate of explosion pressure vs initial pressure

위의 (1)식에서 K는 비례상수이고 이 비례상수는 대기압 상태에서의 폭발압력이 된다.

이러한 현상은 동일농도에서 초기압력이 증가할수록 연소반응에 의한 에너지 또는 엔탈피가 비례적으로 증가하기 때문인 것으로 해석된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 초기압력변화에 따른 평균폭발압력상승속도나 최대폭발압력상승속도로 폭발압력과 비슷한 경향으로 초기압력이 증가할수록

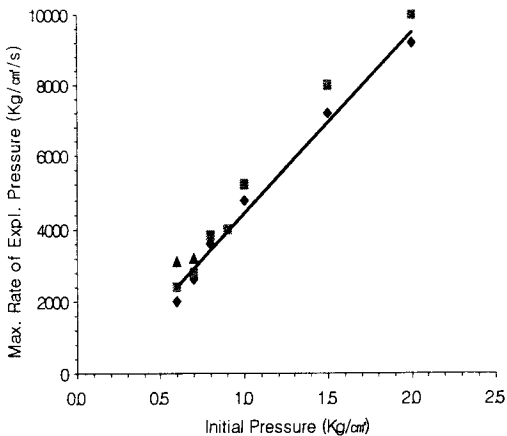


Fig. 7. Maximum rate of explosion pressure vs initial pressure

압력상승속도도 비례적으로 증가하는 현상을 보여주고 있다. 압력상승속도는 연소속도와 관계가 있으며 초기압력의 상승은 연쇄적인 연소반응 속도를 가속 시킨 것으로 보이며 물리적으로는 압력파가 전파되는 매질이 조밀하여 빨리 전파될 수 있기 때문으로 생각된다. 이러한 것은 물리적인 현상 가운데 소리의 속도는 매질이 조밀할수록 빨라지는 현상이나, 화학의 밀도를 높게 했을 때 폭속이 빨라지는 것 현상과도 유사성이 있는 것으로 생각할 수 있다.

### 3.3 폭발통의 크기와 폭발특성

폭발통의 크기에 따른 폭발특성의 관계를 살펴보는 것은 수소의 누출 등으로 위험성분위기의 크기와 폭발이 일어났을 경우에 어떠한 관계가 있는지를 이해하는데 유용하다. 실험에 사용된 용기는 5개의 원통형용기로 L/D가 1이며 크기는 각각 Table 1과 같다.

수소의 농도는 폭발압력이 최대가 되는 31%에서 실험하였다. 실험결과 폭발압력은 Fig.8과 같이 약간의 편차는 있으나 용기의 크기가 클수록 폭발압력이 약간 상승하는 경향을 볼 수 있다. 폭발용기의 내용적이 클수록 연료의 양이 증가하고

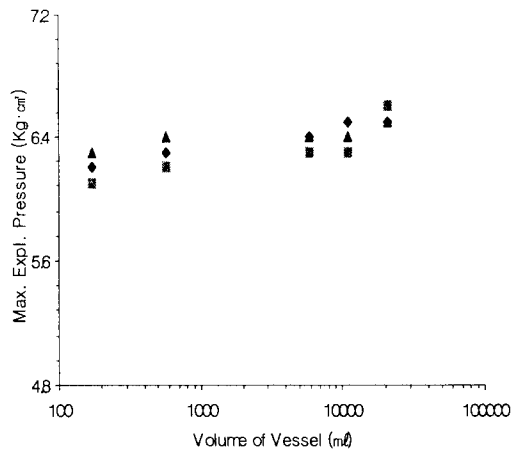


Fig. 8. Maximum explosion pressure vs volume of vessel

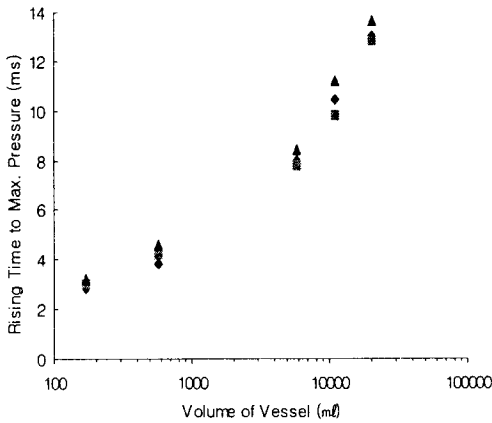


Fig. 9. Rising time to maximum pressure vs volume of vessel

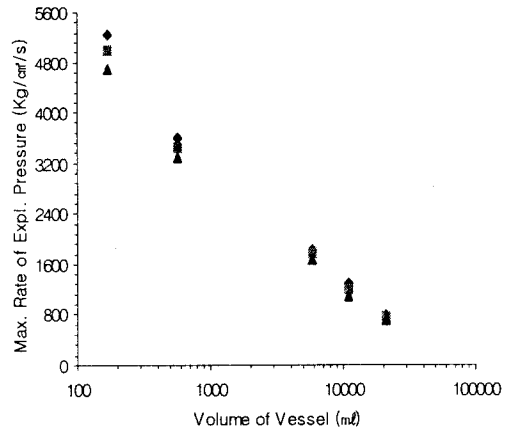


Fig. 11. Maximum Rate of Explosion Pressure VS Volume of Vessel

용기의 내부표면적도 증가하게 된다. 용기의 용적이 커질수록 V/S 즉 내용적대 내 표면적의 비도 증가한다. 이것은 폭발에 의해 발생된 에너지가 압력으로 나타난다고 생각하고 벽면으로의 열전달이 일어난다고 생각하면 내용적이 클수록, 폭발에 의한 에너지의 손실이 적기 때문에 폭발압력이 클 것으로 예상되었으며 실제 실험결과도 비슷한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 9는 폭발용기의 내용적에 따른 최대폭발

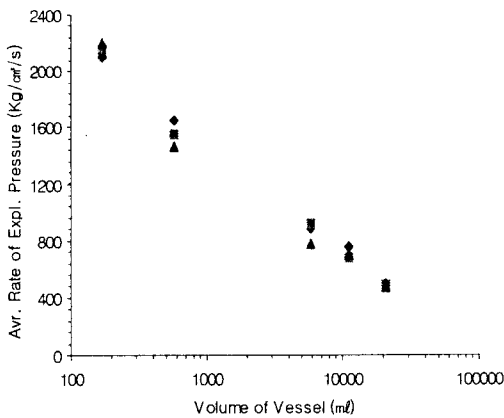


Fig. 10. Average Rate of Explosion Pressure VS Volume of Vessel

압력에 도달하는 시간으로서 동일 압력에서 연소 속도는 같기 때문에 내용적이 클수록 연소되는 시간이 길기 때문에 생각되며 이러한 폭발압력이 상승하는 시간을 예측하면 폭발의 전파를 방지하기 위한 시스템의 작동 시간을 설정이 가능할 것으로 생각되며 폭발 차단시스템을 통해 폭발에 의한 피해를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 10과 Fig. 11은 폭발압력 평균상승속도와 최대상승속도를 측정된 결과로 용기가 클수록 압력상승속도는 감소하는 경향을 보여주고 있는데 이는 폭발 압력은 크게 변함이 없는데 비해 연소시간이 길어지기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구는 수소의 사용 및 취급 시 일어날 수 있는 수소의 폭발 위험성에 대한 기초 연구로 통상적인 대기압 상태에서의 폭발 특성과 초기 압력의 변화에 따른 폭발특성 및 용기의 크기변화에 따른 폭발 특성들을 실험을 통해 살펴보았으며 그 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

수소와 공기의 혼합 가스는 폭발 한계 부근에

서도 탄화수소 가스들에 비하여 쉽게 폭발되며 폭발 시 폭발 압력과 압력 상승 속도가 크기 때문에 폭발압력에 의한 피해가 클 수 있으며 초기 압력이 증가하는 경우 폭발 압력은 대기압 상태 폭발압력에 초기압력의 비례로 증가하여 초기 압력이 높은 공정에서의 수소 취급 시는 이에 대비한 안전 대책이 필요할 것으로 판단되며 이 경우 폭발압력 상승 속도가 매우 빠르기 때문에 폭발화염을 차단하는 것은 곤란하며 압력을 방출하므로써 압력을 완화시키는 대책이 유용할 것으로 보인다. 또한 용기가 커질수록 폭발압력 상승 속도는 감소하지만 폭발압력은 약간 증가하는 경향이 있어 저장용기의 경우 용기가 커질수록 폭발압력에 대한 대응이 필요할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- 1) J. Hord : "Is hydrogen a safe fuel?", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 3, Issue 2, 1978, pp. 157-176.
- 2) T. Hayashi : "수소 폭발위험성에 관한 연구", " RIIS-RR-18-1 일본 산업안전연구소, 1969.
- 3) T. Hayashi : "압력용기의 내용적과 폭발 압력에 관한 연구", RIIS-RR-18-3 일본 산업안전연구소, 1969
- 4) S. B. Dorofeev et al : "Evaluation of the hydrogen explosion hazard", Nuclear Engineering and Design, vol. 148, 1994, pp. 305-316.
- 5) Vladimir Molkov et al : "Venting of deflagrations: Hydrocarbon-air and Hydrogen-air systems", J. of Loss Prevention in the Process Industry, Vol. 13, 2000, pp. 397-409.
- 6) Kenneth L. Cashdollar et al : "Flammability of methane, propane and hydrogen gases", J. of Loss Prevention in the Process Industry, Vol. 13, 2000, pp. 397-409.
- 7) 문정기, 오규형 외 : "수소가스의 폭발 재해 방지기술 개발(I)", 한국기계 연구소 연구보고서 UCN206-133.D, 1990.
- 8) U. Maas, J Warnatz : "Ignition process in hydrogen-oxygen mixtures", Combustion and Flame Vol 74, 1988, pp. 53-69.