

면적비 변화에 따른 튜브 내 고압 수소 자발점화현상 연구

윤 희*, 이상윤*, 정만철*, 정인석*, 이형진**

A study of area-ratio effect on self-ignition of high pressure hydrogen gas released in to a tube

Hee Yoon*, SangYoon Lee*, Man Chul Jeong*, In-Seuck Jeung*, Hyoung Jin Lee**

ABSTRACT

When high-pressure gas is suddenly leaked out into the air, unexpected ignition occurs without any external ignition source. Until now, there have been investigations on self-ignition of hydrogen by supplying high-pressure hydrogen gas into a tube. However the mechanism of hydrogen ignition is still unclear. This paper describes the area-ratio effect on hydrogen ignition by inserting a brass plate. The results show that the ignition phenomena differ as the area-ratio changed. Also, the rupture pressure for self-ignition has to be higher.

Key Words : Hydrogen, Self-ignition, Area-ratio

수소 연료는 연소 후 물만 생성되기 때문에 인류가 직면하고 있는 환경오염 문제가 적어 차세대 대체 에너지원으로 사용하기에 적합하다. 수소 가스를 저장하는 방식은 고압 압축 저장 방식이나 액화에 의한 저장방식 등 여러 방식이 있으며 국내에서는 실용적이면서도 효율적으로 수소가스를 공급받기 위하여 주로 고압으로 저장하는 방식을 사용하고 있다. 하지만 수소는 가연성 기체이면서 확산이 빠르고 열전도성이 좋으며, 점화에 필요한 최소폭발에너지가 낮아 수소 저장 시 효율과 안전성에 대한 주의가 필요하다. 실제로 뚜렷한 점화원이 없음에도 불구하고 고압 수소가 공기 중으로 누출될 경우 점화 및 폭발 등 다양한 사고가 발생하고 있다[1]. 이에 자발점화 현상에 대한 메커니즘과 그 원인을 밝히고자 실험적·수치적 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다. 수소의 자발점화 현상에 대한 원인으로 Reverse Joule-Thompson 효과, 정전기 발전, 확산 점화, 급속 단열압축, 고온표면 점화 등 다양한 가설들이 제시되었다[1]. Wo lanski & Wojciki[2]가 충격과 튜브에서 수소와 산소를 이용하여 실험한 결과와 Dryer[3]의 수소와 공기를 이용해 rupture disk(격막)를 파열시킨 실험결과를 통해 확산점화 메커니즘이 가

장 가능성이 높은 것으로 여겨진다[4].

수소에너지의 확산 자발점화현상에 대한 메커니즘을 명확히 규명하고자 다양한 실험적·수치적 연구가 진행되었다[4-9]. 수행한 연구 결과에 따르면 고압 수소의 자발점화 현상이 발생하기 위해서는 공기를 충분히 가열할 수 있는 강한 충격파가 발생되기 위한 높은 파열압력과 수소와 공기가 충분히 혼합될 수 있도록 튜브길이 충분히 길어야 하는 것으로 밝혀졌다[9]. 최근에는 격막 파열직후부터 발생하는 점화현상과 유동현상을 관찰하고자 팽창 튜브 양면에 가시화창을 설치하여 연구를 수행하였다[10].

그러나 아직까지 수소에너지의 자발점화 현상에 대한 메커니즘을 완전히 설명하기에는 부족하다. 이에 본 연구에서는 황동 판(brass plate)을 격막과 팽창튜브 사이에 삽입하여 격막 파열 직후의 면적비(Area Ratio, AR)를 변화시키는 실험을 수행함으로써 튜브 내 발생하는 고압 수소의 자발점화 현상에 대한 발생 메커니즘 및 그 영향성을 분석하고자 한다.

본 연구에서 사용한 실험 장치에 대한 모식도는 Fig. 1과 같으며, 실험 장치는 크게 가압부와 시험부로 나누어진다. 가압부는 상업용 수소가스 실린더와 최대 130 Mpa까지 가압시킬 수 있는 booster로 구성 된다. 시험부는 수소가스를 저장 용기에 저장한 후, 실험 모델 cylinder 내부로 고압의 가스를 공급하여 격막이 터졌을 때 팽창 튜브로 수소 가스가 누출되도록 하는 구조로 되어 있다.

* 서울대학교 기계항공공학부

** LIG 넥스원 PGM 연구센터

† 연락처, enjjs@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1905 FAX : (02)880-1718

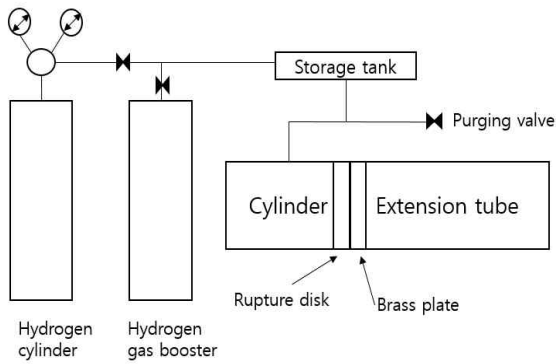


Fig. 1 Schematic of experimental configuration

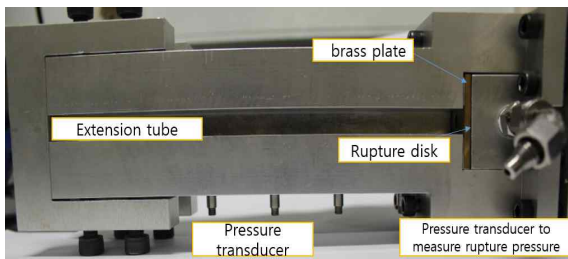


Fig. 2 Experimental model

팽창 튜브는 Fig. 2에서 보이는 것과 같이 길이 200mm, 단면적 100mm^2 으로 가시화가 가능하도록 정사각형의 모양을 이루고 있다. 실험에서 사용한 격막은 Pet재질을 사용하였으며, 격막두께를 50-250 μm 까지 바꾸어가며 파열압력을 조절하였다. 본 연구에서는 기존의 선행연구[4-6,9]와는 달리 2mm 두께의 황동 판을 팽창 튜브와 격막 사이에 삽입하였다. 판을 삽입하지 않았을 때의 유동이 흘러가는 단면적을 1이라고 할 때, 1을 기준으로 면적비가 0.75, 0.5가 되도록 판을 제작하였으며, 판의 형상은 Fig. 3과 같다.



Fig. 3 Picture of brass plate

Fig. 4에서 보이는 것과 같이, 본 실험에서의 판의 역할은 격막 파열 직후 수소가스가 튜브를 통해 흘러가는 단면적을 A에서 B로 순간적으로 바뀌게 하는 역할을 한다.

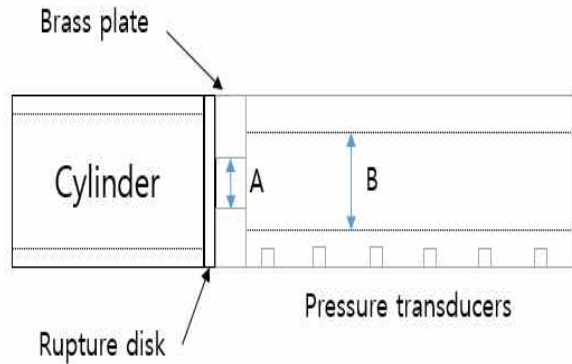


Fig. 4 Assembly of a rupture disk and brass plate with extension tube

실험 시 격막의 파열압력을 측정하기 위하여 cylinder 양쪽에 압력센서를 설치하였으며 설치한 압력센서는 Kulite센서(ETM-HT-375-5000G)와 Sensys 센서(PSC K 0700 BCPG)이다. 또한, 튜브 내 충격파 및 분출 수소의 압력은 측방향으로 설치한 6개의 PCB 센서(PCB, 111A26)로 측정하였다.

격막두께를 조절하여 파열압력을 30bar ~ 130 bar 변화시켰으며 Fig. 5는 본 실험에 대한 연구 결과를 보여준다. 그래프 분석 결과, 면적비 1과 0.75에서는 85bar 이상에서부터 자발점화가 발생하였으며, 면적비 0.5에서는 120bar 이상에서부터 점화현상이 발견되었다. 면적비 1과 0.75의 경우, 점화가 발생한 압력이 비슷하기는 하나, 터진 격막두께는 다르다.

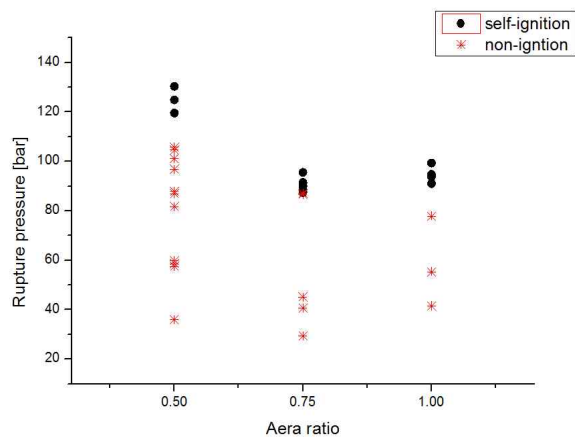


Fig. 5 Experimental results with area-ratio

면적비 변화에 따른 튜브 내 벽면 압력을 PCB 압력센서로 측정한 결과는 Fig.6-8 에서 확인할 수 있다. 또한 Shock tube theory와 격막 파열 직후 실험을 통해 측정된 튜브 내 벽면 압력

에 대한 비교 값을 Table 1에 첨부 하였다. Table 1에서 확인 할 것과 같이, 면적비가 1일 때에는 이론값과 실험값에 별다른 큰 차이가 없지만, 면적비가 작아질수록, Shock tube theory값과 실험으로 측정된 압력 값의 차이가 두드러지게 나타났다. 이를 통해, 유동이 흘러가는 단면적이 변화하면 Shock tube theory을 적용할 수 없다는 결론을 내릴 수 있다.

Table 1 면적비에 따른 자발 점화 시 실험결과와 충격파이론에 대한 평균 결과값 비교

AR [Area Ratio]	experiment [Mpa]	theory [Mpa]
1	2.12	2.29
0.75	1.95	2.25
0.5	1.79	2.6

이에 실험을 통해 측정된 튜브 내 벽면압력을 Shock tube theory에 적용시켜 예상되는 이론 파열압력을 계산하였다. 계산 결과, 0.75에서는 파열압력 90bar임에도 실제 이론을 적용했을 때, 80bar에서 격막이 터지는 것으로 계산이 되었고, 면적비 0.5에서 측정된 파열압력은 120bar 이지만 이론식을 적용했을 때 약 60bar 근처에서 격막이 터지는 것으로 계산이 되었다. 실제 60이나 80bar 압력으로는 면적비 1에서는 불이 붙지 않는 조건임을 선행연구[10]를 통해 이미 알고 있다. 이를 통해 면적비가 작아질수록 자발점화를 일으키기 위한 파열압력은 높아지는 경향성을 알 수 있다.

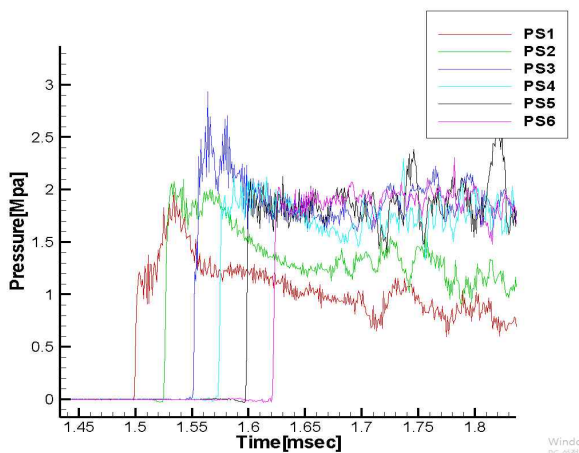


Fig. 6 Measured pressure along the side wall (AR=1, Rupture pressure about 90bar)

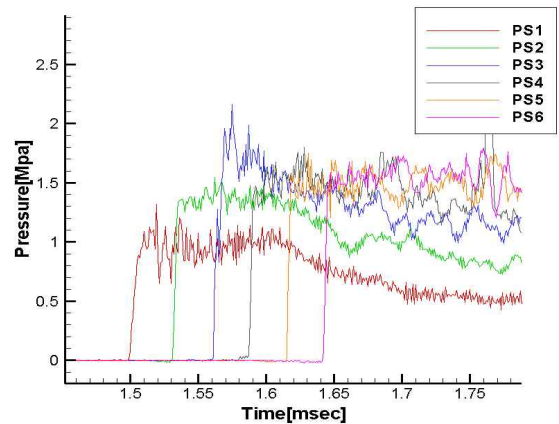


Fig. 7 Measured pressure along the side wall (AR=0.75, Rupture pressure about 90bar)

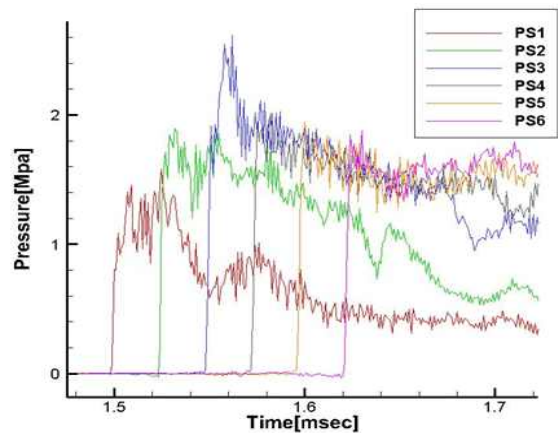


Fig. 8 Measured pressure along the side wall (AR=0.5, Rupture pressure about 120bar)

본 연구에서는 현재까지 알려진 튜브 내 고압 수소 가스의 누출에 의한 자발점화 현상에서 면적비의 변화가 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과, 면적비가 작아질수록 강한 충격파를 생성하기 위해 필요로 하는 파열압력이 높아지는 것을 실험적 연구를 통해 확인하였다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)과 국토교통부의 「날다 프로젝트」(정만철, 이상윤) 및 우주핵심기술개발 사업(NRF-2015M1A3A3A02014343)의 지원(윤 회)을 받았습니다.

참고 문헌

- [1] Astbury GR, Hawksworth SJ. "Spontaneous ignition of hydrogen leaks : a review of postulated mechanism", *Int J Hydrogen Energy*, Vol.32, No. 13, 2007, pp.2178-2185.
- [2] Wolanski H, Wojcicki S. 1973, Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere, In proceedings of the 14th symposium (international) on combustion, pp.1217
- [3] Dryer FL, Chaos M, Zhao Z, Stein JN, Alpert JY, Homer C., "Spontaneous ignition of pressurized releases of hydrogen and natural gas into air", *Combust Sci Tech*, Vol. 179, No. 4, 2007, pp.663-694.
- [4] Lee HJ, Kim YR, Kim SH, Jeung IS. "Experimental investigation on the self-ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk through tubes", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, 2011, pp. 2351-2358.
- [5] Lee BJ, Jeung IS. "Numerical study of spontaneous ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk into a tube", *Vol. 34*, 2009, pp.8763-8769
- [6] Kim YR, Lee HJ, Kim SH, Jeung IS, "A flow visualization study on self-ignition of high pressure hydrogen gas released into a tube". *Proc. Combust. Inst.*, 34, 2013, pp.2057-2064.
- [7] Mogi T, Kim D, Shiina H, Horiguchi S. "Self-ignition and explosion during discharge of high-pressure hydrogen" *J. Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.21, 2008, pp.199-204.
- [8] Golub VV, Baklanov DI, Golovastov SV, Ivanov MF, Laskin IN, Saveliev AS, Semin NV, Volodin VV, "Mechanisms of high-pressure hydrogen gas self-ignition in tubes", *J of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 21, 2008, pp.185-198.
- [9] 이형진, 김성돈, 김세환, 정인석, "튜브 내 고압수소의 파열막 형상에 따른 자발점화 현상에 대한 수치해석, 한국연소학회지, Vol.18, No.3, 2013, pp.31-37.
- [10] 이형진, 박지현, 이상윤, 임한석, 정인석, "튜브내 고압수소의 파열 순간 가시화를 통한 자발점화 현상 연구", 한국연소학회, 2013년도 추계학술대회 KOSCO SYMPOSIUM, 2013, pp.111-114.