

튜브 내 누출되는 고압수소의 격막파열조건에 따른 자발점화 현상

임한석* · 이상윤* · 이형진** · 정인석*

Self Ignition Phenomena of High Pressure Hydrogen Released into Tube with Diaphragm Rupture Conditions

Han Seuk Lim*, Sang Yoon Lee*, Hyoung Jin Lee**, In-Seuck Jeung*

ABSTRACT

High combustion efficiency of hydrogen could make it an ideal source of green energy in the future. At this time, high pressure vessel is the most reasonable method of storing hydrogen. However, such a high pressurized vessel could pose a critical threat if ruptured. For this reason, it is important to understand the mechanism of hydrogen's self-ignition when a high-pressure hydrogen released into air. This paper presents several visualization images as experimental results using high-speed camera. From the visualization images, the ignition is initiated near rupture disk immediately after failure of disk. And the initial ignition and flame is stronger as a rupture pressure increases. However, this ignition region do not affect the general self-ignition mechanism when a high-pressure hydrogen is released into air through tue after failure of disk.

Key Words : Hydrogen, Self-ignition, Mixing, Visualization

1. 서 론

수소는 단위 질량당 열량이 높고, 연소 생성물로서 수증기만이 발생하므로, 차세대 친환경 에너지원 및 연료로 촉망 받고 있다. 수소의 보관 및 활용을 위한 저장방식으로는 액화하여 저장하는 방식과, 고압으로 압축하여 저장하는 방식, 화학적 혹은 물리적으로 다른 고체 물질에 흡착하여 저장하는 방식이 제시되고 있다. 이 방법들 중 실생활에 적용하기에 현재 현실적으로 가장 경제적인 방법이 고압으로 압축하여 저장하는 방식이다. 그러나 가연성이 높은 수소를 고압으로 저장하는 방식은 필연적으로 안전과 관련한 문제가 발생하기 마련이다.

수소의 누출에 의한 화재사고는 점화 원을 수소와 떨어 뜨려 놓는 것만으로도 가능성을 크게 줄일 수 있다. 그러나 수소가 연료로 활용 되면서 고압의 수소가 저장 용기나 배관으로부터 파열 등의 이유로 의도치 않게 급격히 누출되었을

때, 명확한 점화원이 없음에도 불구하고 점화가 되어 화재가 발생하는 사고들이 관측되어 왔다. 이러한 자발 점화 현상의 메커니즘으로 다양한 가설들이 제시되었다.[1]

제시된 자발 점화의 원인으로는 Reverse Joule-Thomson 효과, 정전기의 방전, 확산점화, 급격한 단열 압축, 파열 표면 점화 등의 가설들이 제시되었으나, Wolanski와 Wojciki의 충격파관 실험[2]과 Dryer의 격막 파열 실험 결과[3]로부터, 확산 점화가 현재로서는 자발 점화 현상의 원인으로 가장 가능성이 높은 가설이라고 받아들여지고 있다. 최근에는 이러한 확산 점화 메커니즘에 의한 수소의 자발 점화 현상을 더욱 명확히 하고자, 격막이 파열하여 고압의 수소가 급격히 방출 되는 환경에서의 실험적, 수치적 연구가 지속되고 있다.[3-10]

본 논문에서는 튜브 내 유동을 관찰하기 위해 정사각형 튜브를 사용하였다. 튜브의 양 옆은 유동 및 화염 가시화 창을 적용하여 튜브 내부로 급격히 누출된 수소의 자발 점화 과정을 shadow image 기법과 직접광 촬영을 통해 관측하였다. 특히 본 연구에서는 격막이 파열되는 순간부터 튜브 끝까지 전 영역에 대해 가시화가 가능하

도록 실험 장치를 설계 제작하였다. 실험 결과로 획득한 가시화 결과를 통해 수소의 자발 점화 과정을 더욱 명확히 하고, 자발 점화 과정에서 유동과 점화된 화염의 진행 양상 및 상호간의 영향을 파악하고자 하였다.

2. 수소 자발 점화 실험

2.1 실험장치 구성

실험 장치는 수소 실린더, 팽창 튜브로 구성하였다. 실린더의 한쪽 면은 Mylar로 제작된 격막이 대체하게 되어 있으며 노출되는 격막의 면적을 조절하기 위한 별도의 격벽을 설치 할 수 있도록 하였다. 격막 이후에는 팽창 튜브가 설치되어 있다. 실린더에 고압의 수소가 채워지면, 격막의 두께와 겹친 장수, 노출된 면적에 따라 특정한 압력에서 격막이 파열하며 실린더 내부의 고압의 수소가 튜브를 통해 누출하도록 하였다. 팽창 튜브는 가시화를 위해 단면이 정사각형으로 되어 있으며, 양 측면은 광학적 접근을 위해 가시화 창으로 제작되었다. 튜브 내부의 단면은 가로 10mm, 세로 10mm이며, 총 길이는 200mm이다. 안전을 고려하여 실험 장치를 안전 챔버 내부에 설치하였다. 안전 챔버는 시험부와 덤프 탱크로 구성하였다.

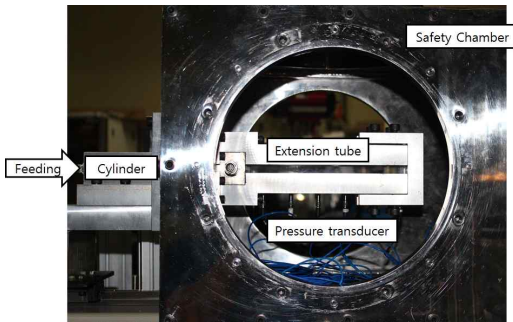


Fig. 1 Experimental apparatus

2.2 계측 및 유동 가시화

격막의 파열 압력은 실린더 중앙에 설치된 압력센서(Kulite)와 실린더에 수소를 공급하는 파이프 입구에 설치된 압력센서를 이용하여 계측하였다. 팽창 튜브 하단에는 6개의 압력센서를 설치하여 튜브 내부의 충격파 및 유동의 압력 분포를 측정하게 하였다. 유동의 가시화는 shadow image 기법을 적용하여 촬영 하였으며, 점화 및 화염의 전파를 관측하기 위해 직접광 촬영을 병행하였다. 계측된 압력 데이터와 가시화 영상은 팽창 튜브 하단의 첫 번째 압력 센서의 신호를

기준으로 동기화 하였다.

3. 실험 결과 및 검토

실험은 격막의 두께와 노출 면적 각각에 대해 두 가지 조건으로 수행 되었으며, 비 반응시의 유동과 대조를 위해서 수소와 헬륨의 두 가지 실험 기체를 통해 실험 하였다.

Fig.2는 파열 압력 94bar에서 팽창 튜브 하단의 압력 센서가 계측한 시간에 따른 정압 측정값이다. 충격파에 의해 압축된 공기의 압력은 약 23bar로 충격파 이론값과 매우 근사하게 측정되었다. 격막파열 직 후, 압력차에 의해 발생하는 충격파가 완전하게 형성되기 전이기 때문이다.

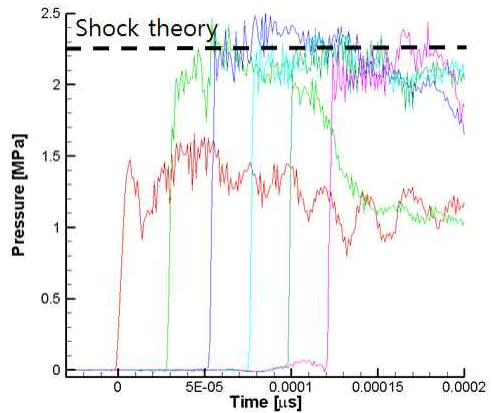


Fig. 2 Pressure traces inside tube for rupture pressure of 9.4 MPa

실험을 통해 격막의 파열로부터 누출된 수소가 점화되어 화염이 튜브 바깥으로 전파되기까지의 유동 구조를 가시화를 통하여 확인하였다. 직접광 촬영을 통해 튜브 내부에서의 화염의 전파 양상 또한 확인되었다.

Fig.3은 기존의 연구결과로 참고문헌 [6,7]에서 제시된 결과 중 일부이다. 기존에 수행된 가시화 연구는 튜브 내 전체 화염의 영상을 촬영하지 못하고 하류 부분에 국한하여 촬영하였다. 따라서 격막 파열 직 후 형성되는 유동과 화염의 양상은 관찰하지 못하고 튜브 중간에서부터 가시화 이미지가 획득되었다. 획득된 이미지로부터 고압의 수소가 격막이 파열된 후 자발 점화되는 과정은 간략히 다음과 같다. 튜브 내부에서 형성되는 화염은 약 70 마이크로초에 수소와 공기의 혼합면에서 튜브의 벽면 경계층에서 먼저 발생하였다. 이는 수소와 공기의 혼합면에서 충격파로 가열된 공기가 경계층에서 더욱 가열되어 국소적

으로 유동의 다른 영역보다 상대적으로 더 고온인 영역이 먼저 점화 되어 발생하는 것으로 보인다. 벽면에서 발생한 화염은 유동이 하류로 진행함에 따라 같이 하류로 전파하면서 점차 더 강한 화염으로 발달하며 점차적으로 유동의 중심부로 전파하였다. 그러나 이와 같이 관찰된 결과는 앞서 기술한 바와 같이 튜브 초기 부분의 관찰은 불가하여 격막이 파열되는 조건에 따라 점화되는 양상이나 차이를 구분하는 것이 불가하였다. 이에 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 격막이 파열되는 순간부터 튜브 끝까지 전 영역의 유동과 점화 양상을 관찰할 수 있도록 실험 장치를 설계 변경/제작 하여 가시화 실험을 수행하였다.



Fig. 3 Direct image of previous result [6] (rupture pressure 8.6 MPa)

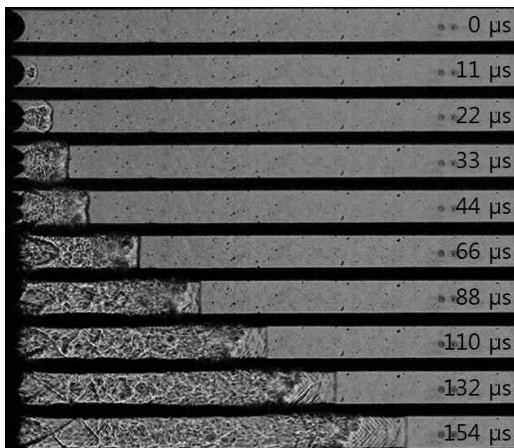


Fig. 4는 고압의 헬륨으로 인해 격막이 파열되는 경우의 비반응 유동장에 대한 가시화 결과이

다. Fig. 4로부터 고압 수소의 점화 양상을 관찰하기 앞서 실험 기체를 반응성이 없는 헬륨으로 바꾸어 전체적인 유동의 발달 과정을 관찰할 수 있다. 전반적으로 충격파의 발달 양상과 같은 유동 구조는 기존에 발표된 전산해석을 통한 연구 결과[10]와 큰 차이가 없었다. 다만, 분자량의 차이에 의한 충격파의 전파 속도의 차이가 발생함은 관찰되었다. 전체적인 유동의 형성 과정은 다음과 같다. 파열 직후 작은 구멍으로부터 작은 영역에서 충격파가 발생한 후 점차 튜브 전체를 차지하도록 크게 전파된다. 이후 궁형 충격파의 발생 및 반사와 함께 격막 가장자리로부터 발생한 유동 교란에 의해 튜브 내 복잡한 유동장이 형성된다. 격막 파열 후 우선적으로, 격막의 가장자리로부터 유도된 교란 때문에 경계층 영역에 혼합 및 반응영역이 발생하기 시작 한다. 한편, 격막 파열로 인해 발생된 충격파는 튜브 벽면에 반사되어 튜브 중앙 영역에 큰 압력의 제트를 형성한다. 튜브 중앙 영역에 충격파 상호작용으로 발생된 제트로 인해 선행하는 충격파의 형상이 달라진다. 이후 충격파에 의해 데워진 공기와 고압 영역으로부터 팽창되는 차가운 수소의 혼합을 유도하고 일정 시간 후 연소 반응이 발생되도록 한다. 다만, 실험 가시화 결과에서는 전산해석에서 발생한 Vortex ring과 같은 와류가 명확하게 관찰되지 않았으며 이는 이미지가 촬영되는 시간 간격이 너무 크기 때문에 매우 빠르고 짧게 발생하는 물리적 현상이 명확하게 관찰되지 않은 것으로 판단된다.

Fig.5는 격막 파열 직후로부터 튜브 끝까지 전 영역에서 관찰된 직접광 가시화 결과이다. 격막 파열 직후 격막 부근에서 작은 화염이 발생하였다. 특히 이 화염은 대체적으로 유동의 중심부에서 발생하는 것으로 관측되었다. 이 화염은 파열 직후 발생한 후, 약 50 μs 까지 유지되다 사라졌다. Fig. 4에서 관찰된 바와 같이 격막 파열 초기 둥글게 부풀었다 파열하는 격막에서 충격파가 발생하는 순간 동시에 국소적인 고온의 영역이 발생하고, 팽창하는 수소와 고온의 영역이 접촉하는 접촉면에서 순간적으로 점화가 발생하는 것으로 관찰된다. 그러나 격막 파열 초기 이와 같이 발생하는 화염은 일정 시간 존재한 후 사라진다. 이후 튜브 내 점화 및 화염이 발생하는 메커니즘과 양상은 기존에 발표된 결과와 동일하다. 즉, 파열 초기 단계 국소적으로 발생하는 점화 영역의 발생은 튜브 전체의 자발 점화 현상에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

파열 압력이 증가하는 경우 전체적인 고압 수소의 점화 현상과 양상은 큰 변화 없이 동일하다. 그러나 격막 파열 초기 단계에서 발생하는 초기 점화 영역이 보다 강하게 발생하는 것으로 관찰

되었다. 파열 압력이 증가하면 발생하는 충격파의 강도도 함께 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 최종적으로 이러한 강한 점화 영역이 격막 파단 초기에 발생한다 하더라도 튜브 내 발생하는 전체적인 자발 점화 메커니즘에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.



Fig. 5 Direct image for full region from rupture disk (rupture pressure 8.6 MPa)

4. 결 론

본 논문에서는 튜브 내부로 급작스럽게 누출하는 수소의 자발 점화 현상을 더욱 명확히 하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 연구는 가시화 기법을 통하여 튜브 내부의 유동 구조 및 화염 영역을 확인하였다. 튜브의 중심부에서 격막 파열 초기에 발생하는 화염 영역과 이후 튜브의 벽면에서 발생하는 화염 영역이 각각 확인 되었으며 각 화염영역이 자발점화 현상에 끼치는 영향을 확인하였다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

참고 문헌

- [1] Astbury GR, Hawksworth SJ. 2007, Spontaneous ignition of hydrogen leaks : a review of postulated mechanism, *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 32, No.13 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 on combustion*, pp. 1217
- [3] Dryer FL, Chaos M, Zhao Z, Stein JN, Alpert JY, Homer CJ. 2007, Spontaneous ignition of pressurized releases of hydrogen and natural gas into air, *Combust Sci Tech*, Vol. 179, No. 4, pp.663-694
- [4] B.J. Lee, I.S. Jeung, 2009, "Numerical study of spontaneous ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk into a tube", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.34, No. 21, pp. 8763-8769.
- [5] H.J. Lee, Y.R. Kim, S.H. Kim, I.S. Jeung, 2011, "Experimental investigation on the self-ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk through tubes", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 33, pp. 2351-2358.
- [6] Y.R. Kim, H.J. Lee, S.H. Kim, I.S. Jeung, 2013, "A flow visualization study on self-ignition of high pressure hydrogen gas released into a tube", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 34, pp. 2057-2064.
- [7] S.H. Kim, H.J. Lee, J.H. Park, I.S. Jeung, 2013, "Effects of a wall on the self-ignition patterns and flame propagation of high-pressure hydrogen release through a tube", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 34, pp. 2049-2056.
- [8] 김용련, 이형진, 김세환, 정인석, "튜브내 고압수소가스 누출에 따른 자발점화 현상 유동가시화 연구," 한국연소학회, KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2012. 4. pp.247-248
- [9] 이형진, 박지현, 이상윤, 임한석, 정인석, "튜브내 고압수소의 파열 순간 가시화를 통한 자발 점화 현상 연구" 한국연소학회, KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2013. 12. pp.111-114
- [10] 이형진, 김성돈, 김세환, 정인석, "튜브 내 고압 수소의 파열막 형상에 따른 자발 점화 현상에 대한 수치해석" 한국연소학회지, Vol. 18, No. 3, pp. 31-37. 2013