

파열 압력에 따른 튜브 내 고압 수소 누출에 의한 자발점화 현상

이형진* · 김성돈** · 김세환*** · 정인석***†

Spontaneous Ignition of High Pressure Hydrogen Gas released into Tube due to the Burst Pressure Variation

Hyoung Jin Lee*, Sung Don Kim**, Sei Hwan Kim***, In-Seuck Jeung***†

ABSTRACT

The spontaneous ignition mechanism of high pressure hydrogen gas released into tube is well-deduced from previous studies. However, those results have a limit because the studies have been conducted at low burst pressure of about 10 MPa. In this study, the process or ignition feature are investigated with higher burst pressure of up to 30 MPa through numerical analysis. The results show that the trend of ignition became to be different with a burst pressure. While two reaction regions is important to initiate the ignition when burst pressure is about 10 MPa, the reaction of the core region does not play a role in ignition inside the tube when a burst pressure is above 20 MPa.

Key Words : High pressure hydrogen gas, burst pressure, ignition mechanism

1. 서 론

고압 수소는 차세대 청정 에너지원으로 여러 산업에서 그 활용성이 증가되고 있으나, 시스템에 적용하는데 있어 안정성 문제가 끊임없이 제기되고 있다. 실제 뚜렷한 점화원이 없음에도 불구하고 고압 수소 가스가 누출된 경우 점화 및 폭발 등 다양한 사고 사례가 보고되고 있다.[1] 이에 최근 자발 점화의 메커니즘과 원인을 밝히고자 수많은 실험적/수치적 연구가 수행되어져 오고 있다. 누출되는 고압 수소의 자연점화의 원인으로 Reverse Joule-Thompson 효과, 정전기 발전, 확산 점화, 급속 단열압축, 고온표면 점화 등 다양한 가설들이 제시되었으나, Wolanski & Wojciki [2]의 수소와 산소를 이용한 충격파 튜브를 통한 실험적 연구 이후, 다양한 실험적/수치적 연구를 통해 확산 점화 메커니즘이 가장 가능성이 높은 것으로 여겨지고 있다.

최근에는 파열 격막을 고압의 수소를 이용하여 파열 시켜 튜브 내 수소를 누출시키면서 발생하는 자발점화현상에 대한 실험적/수치적 연구가 활발히 진행되어 왔다. 연구 결과 자발점화 현상은 파열 압력이 높을수록, 튜브 길이가 길수록 그 가능성이 높은 것으로 밝혀졌다. 이러한 결과

는 기존 연구 결과로부터 제시된 다음의 자발 점화 메커니즘으로부터 설명될 수 있다.[3-9] 격막을 통해 분리되어 있던 고압의 수소가 파열되면, 압력차에 의해 충격파가 발생한다. 발생한 충격파는 하류로 흐르면서 튜브 벽에서 반사되어 다차원적 상호간섭이 발생한다. 이러한 상호작용에 의해 충격파에 의해 유도된 유동의 경계층과 튜브 내 중앙 영역(core region)에서는 수소와 공기의 접촉면(contact surface)에 복잡한 수소/공기 혼합 영역이 형성된다. 1차적으로 고온의 경계층에서 형성된 혼합 영역에서 점화 현상이 발생한 후, 충격파 상호작용에 의해 형성된 튜브 중앙 영역에서의 혼합 영역이 2차적으로 점화된다. 2개의 반응영역이 하류로 전파되면서 하나의 화염으로 합쳐지게 된 후 튜브 단면전체를 채우게 된다. 합쳐진 화염은 튜브를 빠져나간 후 튜브 바깥에 화염이 존재할 수 있을 정도의 에너지를 공급하는 역할을 하게 되며 확산화염을 유지한다.

이와 같은 메커니즘에 의하면 튜브 내 고압 수소의 자발 점화가 발생하기 위해서는 1)공기를 충분히 데울 수 있을 정도의 강도를 갖는 충격파가 발생되기 위한 높은 파열 압력, 2)충격파 상호작용이 발생할 수 있는 파열 격막 형상, 3)수소와 공기가 충분히 혼합될 수 있는 튜브 길이가 반드시 필요한 것으로 여겨진다. 그러나 이는 대부분 10 MPa 정도의 파열압력에서의 결과로부터 유추된 결론이다. 실제 파열 압력이 높아지면 튜브 내 형성되는 유동의 형상이 달라질 수 있으며 이에 따라 점화 메커니즘 현상 달라질 수 있

* LIG벡스원 PGM 연구센터
 ** 부산대학교 항공우주공학과
 *** 서울대학교 기계항공공학부
 † 연락처, enjis@snu.ac.kr
 TEL : (02)880-7396 FAX : (02)-880-1718

다. 실제 튜브 내부 가시화를 통한 실험적 연구를 수행한 김용련 등[9]의 연구결과는 기존의 수치해석 연구 결과와 다른 양상을 보여준다.

이에 본 논문에서는 수치적 연구를 통해 파열 압력에 따라 고압에서 누출되는 수소에 대한 자발점화 메커니즘을 분석하고자 하였다. 이를 위해 축대칭형 튜브에 궁형의 파열 격막 형상과 10-30 MPa의 파열 압력을 적용하였다. 연구 결과를 통해 혼합영역, 화염 위치, 점화 메커니즘을 분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 수치기법

본 연구에서 적용된 수치기법으로는 이상 기체의 다원 화학 반응 유동에 대한 비정상 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 기본 지배 방정식으로 사용하였다. 공간 차분 기법으로 HLLC 기법과 2차 풍상 차분을 위한 WAF 기법과 Crank-Nicolson 기법이 점성항 차분에 적용되었다. 화학종의 열역학적 물성치는 NASA에서 제공되는 데이터에 기초하였으며 순수 화학종에 대한 전달 물성치들은 고전 가스역학 방법으로 얻어졌다. 화학반응 소스항에 대해 RADAU5에 의해 제안된 기법이 적용되었고 수소 반응 모델로는 Li 등이 제시한 9개 화학종에 대한 19개 반응식이 사용되었다. 시간 적분은 Strang이 제시한 splitting 기법을 적용하여 2차 정확도를 유지하였다.

2.2 해석영역

Figure 1.은 본 연구에서 수행된 해석 영역을 나타낸다. 일반적으로 파열되는 steel 격막은 파열될 때까지 가장자리에 얇은 테두리를 갖는 궁형의 형상을 유지한다. 이를 모사하기 위해 Fig. 1과 같은 압력 경계 조건을 적용하였다.

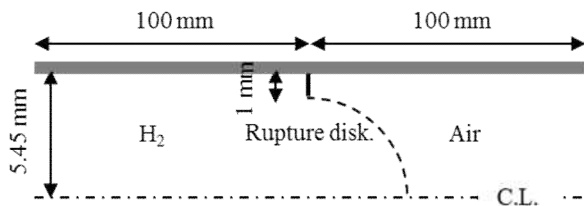


Fig. 1 수치 해석 영역

해석된 튜브의 직경은 10.9 mm로 축대칭 경계조건을 이용하여 해석 시간을 절감하였다. 길이 방향으로는 격막으로부터 상류, 하류 100 mm를 해석 대상으로 하였으며 해석 영역에 대한 경계조건은 다음과 같다. 튜브 벽면에 대해서는 단열 비점착 조건을 적용하였고, 튜브 양 끝단에서

는 외압 조건을 적용하였다. 튜브 중앙의 대칭축에 대해서는 점착 경계 조건을 적용하였다. 초기 온도 조건으로는 수소와 공기 영역 모두 300 K로 설정하였고 공기의 초기 압력은 0.1 MPa으로 고정하였다. 10 μm 의 균일한 정렬 격자계를 이용하여 해석하였으며 본 해석에서는 총 800만 개의 격자가 사용되었다.

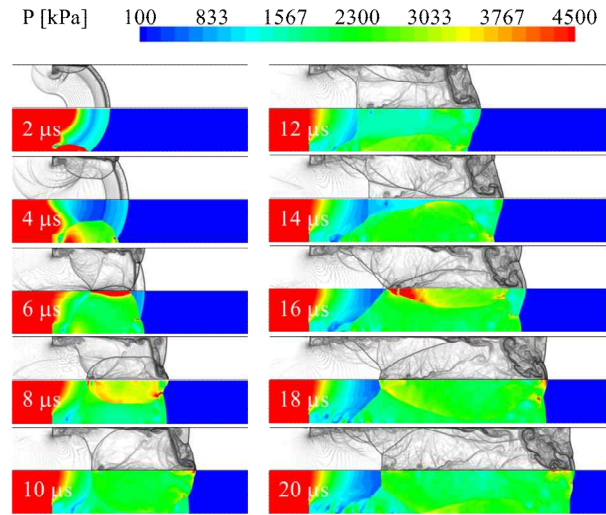
3. 논의 및 결과

Figure 2는 10 MPa의 파열 압력에 대한 결과로 (a)에 수치적 쉘리렌 이미지와 압력 선도를 이용하여 초기 유동의 형성 과정을 2 μsec 간격으로 제시하였다. 10 MPa에서의 수치해석 결과는 기존의 연구 결과와 매우 유사하다. 궁형 압력 경계 조건으로부터 발생하는 궁형 충격파로 인해 튜브 내 유동장이 형성되고 유도된 유동에 의해 경계층이 형성된다. 발생한 충격파는 튜브 벽면에 반사되어 튜브 중앙 영역에 큰 압력의 제트를 형성한다 (6 μsec). 이러한 제트로 인해 선행하는 충격파의 형상이 달라지며 튜브 중앙 영역에 큰 vortex ring이 발생한다 (8 μsec). 형성된 vortex ring은 충격파에 의해 데워진 공기와 고압 영역으로부터 팽창되는 차가운 수소의 혼합을 도와 자발 점화가 발생하도록 하는데 있어 매우 중요한 영향을 미친다. 이후 vortex ring에 의해 형성된 혼합 영역은 하류로 흐르면서 점차 그 영역이 증가되어 반응영역 역시 증가된다.

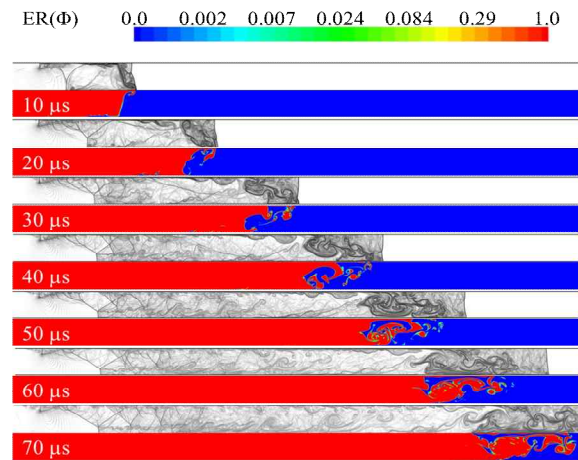
Figure 2(b)과 (c)에 동일한 파열 압력에 대한 가상 쉘리렌 이미지, 당량비, OH 분포 및 온도 선도를 10 μsec 시간 간격으로 제시하였다. 앞서 Figure 2에서 언급한 바와 같이 10 μsec 에서 발생한 vortex ring에 의한 혼합 영역은 점차적으로 시간이 흐를수록 그 영역이 증대됨을 확인할 수 있다. 약 40 μsec 의 결과에서 경계층 영역에서 발달하고 있는 반응 영역과 튜브 중앙 영역에서 발달하고 있는 반응 영역이 존재함을 알 수 있으며, 이후 두 영역이 합쳐지면서 큰 화염으로 전파됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 이복직 및 정인석[8]의 파열 압력 약 9.0 MPa의 연구 결과와 매우 유사하다. 즉 10 MPa 정도의 약한 파열 압력에서는 경계층에서 발생하는 혼합 영역과 충격파의 상호작용으로 인해 발생하는 중앙 영역의 혼합 영역 모두 자발 점화를 발생시키는데 있어 중요한 요소가 됨을 알 수 있다.

Figure 3에 파열 압력 23.5 MPa에 대한 결과를 제시하였다. Fig. 3 (a)에서 보여지듯이, 초기 충격파의 상호작용에 의해 튜브 중앙 영역에 혼합 영역이 발생하는 것은 동일하다. 그러나 유동이 하류로 흐르면서 튜브 중앙의 혼합 영역이 확대되지 못하고 급격히 소멸되며 이에 따라 Fig.

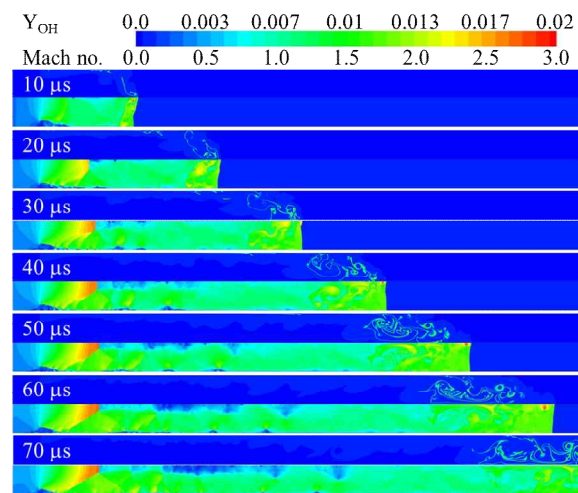
3(b)에 보여지듯 중앙 영역의 반응 영역 역시 사라지는 것이 관찰된다.



(a) 가상 쉘리엔 이미지 및 압력 선도



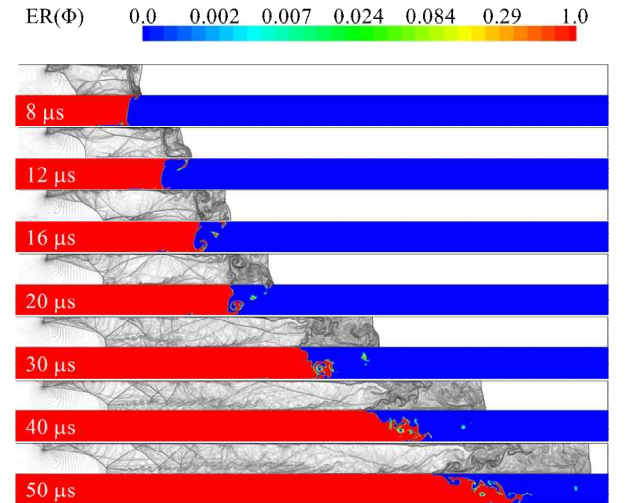
(b) 가상 쉘리엔 이미지 및 당량비 선도



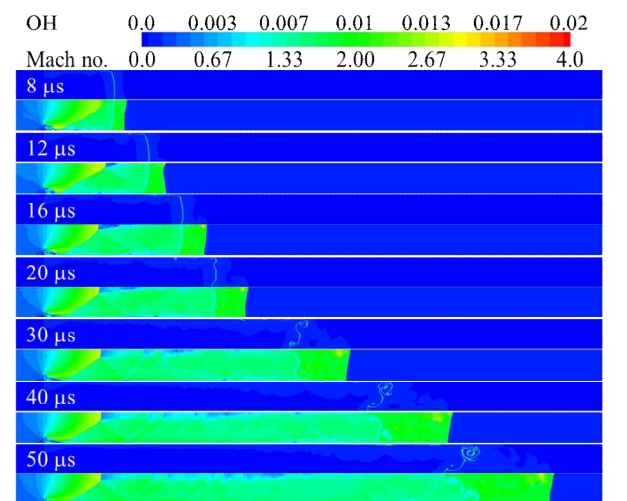
(c) OH 분포 및 온도 선도

Fig. 2 파열 압력 10 MPa 에 대한 해석 결과
이는 파열 압력이 높아짐에 따라 충격파의 이

동 속도가 급격히 증가함에 따라 발생하는 현상으로 보인다. 대신, 경계층 영역에서 발달하던 반응 영역은 충격파의 이동 속도와 무관하게 상대적으로 느린 속도로 이동하며 반응 영역이 지속적으로 증가하여 40 μsec 이후에는 경계층 영역에서 시작한 화염이 튜브 전체를 채우는 것으로 보인다. 결국 파열 압력이 증가함에 따라 충격파의 이동 속도와 유도된 유동 속도 역시 매우 빨라져 중앙 영역의 혼합 영역이 점차 사라지게 되는 것으로 보인다. 실제 Fig. 3(b) 결과에서 보여지듯, 중앙 영역에 매우 빠른 유동이 형성됨을 알 수 있다. 이에 따라 중앙 영역의 반응 영역은 전체적인 자발 점화 메커니즘에 큰 역할을 못하는 것으로 보이며 이는 비교적 낮은 파열 압력인 10 MPa의 결과와는 다른 것으로 여겨진다.



(a) 가상 쉘리엔 이미지 및 당량비 선도



(b) OH 분포 및 Mach no. 선도

Fig. 3 파열 압력 23.5 MPa 에 대한 해석 결과

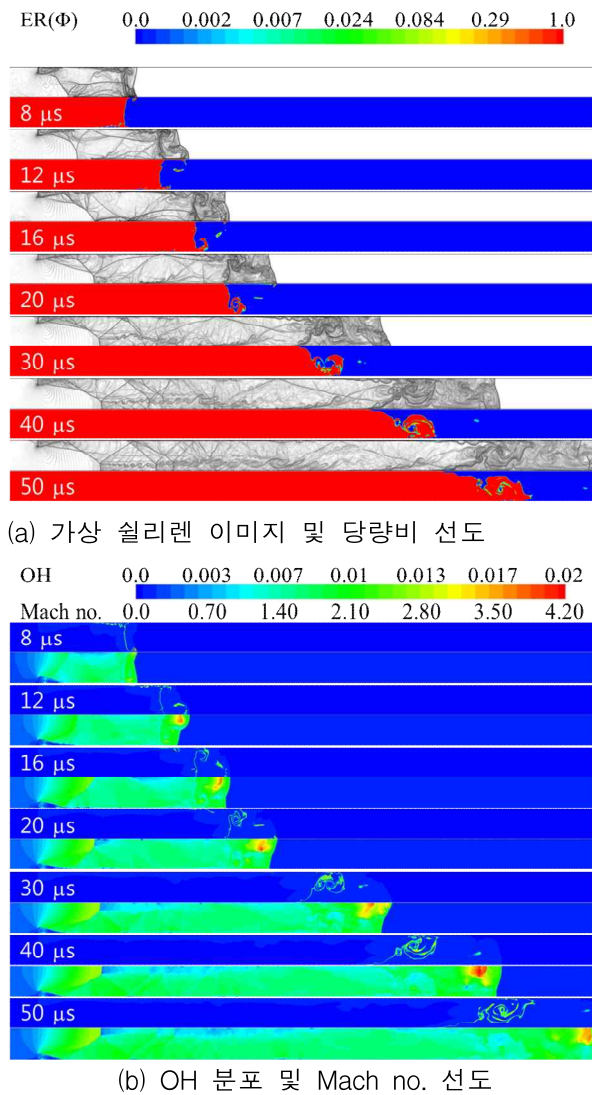


Fig. 4 파열 압력 30.0 MPa 에 대한 해석 결과

Figure 4는 파열 압력 30 MPa에 해당하는 수치해석 결과이다. 앞서 제시한 파열 압력 23.5 MPa의 결과와 유사하며 튜브 중앙 영역에 혼합 영역이 빠르게 사라지는 현상이 관찰된다. 이때 튜브 중앙에 형성되는 유동의 마하수는 4.2에 이르며 전반적으로 튜브 내 발생하는 화염은 경계층에서 발달하는 반응 영역으로부터 유도된다.

4. 결론

본 논문에서는 현재까지 알려진 튜브 내 고압 수소 가스의 누출에 의한 자발점화 현상에 대해 파열 압력에 따라 달라지는 특성을 밝히고자 하였다. 파열 압력이 20 MPa 이상의 경우, 튜브 중앙에 vortex ring에 의한 혼합과 반응 영역은 충격파의 강도가 강해짐에 따라 쉽게 소멸되면서 전체적인 자발 점화에 큰 역할을 하지 못하는 것

으로 관찰되었다. 대신 경계층에서 생성된 반응 영역은 충격파의 강도와 무관하게 지속적으로 증가하고 튜브 전체를 채우는 큰 화염으로 전파되면서 자발 점화를 유도하는 중요한 요소로 여겨진다.

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] Mogi T, Kim D, Shiina H, Horiguchi S. (2008). Self-ignition and explosion during discharge of highpressure hydrogen. *J Loss Prevent Proc.* 21(2):199-204.

[5] Golub VV, Baklanov DI, Golovastov SV, Ivanov MF, Laskin IN, Saveliev AS, Semin NV, Volodin VV. 2008, Mechanisms of high-pressure hydrogen gas self-ignition in tubes, *J of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 21, pp.185-198

[6] Xu BP, El H, Wen JX, Dembele S, Tam VH, Donchev T. 2008. Numerical study on the spontaneous ignition of pressurized hydrogen release through a tube into air. *J Loss Prevent Proc.* 21(2):205-213.

[7] Lee BJ, Jeung IS. 2009, Numerical study of spontaneous ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk into a tube, Vol. 34, pp.8763-8769

[8] Lee HJ, Kim YR, Kim SH, Jeung IS. 2011, 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 pp. 2351-2358

[9] Kim YR, Lee HJ, Kim SH, Jeung IS. 2012, A flow visualization study on self-ignition of high pressure hydrogen gas released into a tube, *Proceedings of the Combustion Institute*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2012.07.020>