

튜브 내경 변화에 따른 고압 수소의 튜브 내 자발 점화 특성

김세환* · 이형진** · 박지현*, 정인석*†

Effect of an inner diameter of the extension tube on the self-ignition characteristics

Seihwan Kim*, Hyoung Jin Lee**, Ji Hyun Park*, In-Seuck Jeung*†

ABSTRACT

To investigate the effect of an inner diameter of the extension tube on the self-ignition when high pressurized hydrogen abruptly released through a tube, both experimental and numerical approach are used. The result show that there is a possibility to have successful ignition when the tube diameter is decreased even at the pressure that could not give sustainable flame with a larger diameter tube. Numerical simulation show the flame development inside the tube and weak and stretch flame spout the tube for 10.9 mm tube, whereas strong complete flame has been generated for 3 mm tube.

Key Words : Hydrogen, Self-ignition, Hydrogen safety, Extension tube diameter

본 연구에서는 고압 수소가 동일한 과열 압력에서 튜브를 통하여 누출될 때 서로 다른 자발 화염 특성을 갖는 현상에 대하여 살펴보았다. 기존의 연구 결과에 따르면, 튜브의 길이가 길고 격막의 과열 압력이 높을수록 고압 수소의 누출에 의한 자발 화염 발생 가능성이 높은 것으로 알려져 있으므로 본 연구에서는 튜브 내경을 제외한 과열 압력, 튜브의 길이는 동일하게 유지하였다. 먼저 실험을 통하여 화염이 튜브 밖에서 유지되는 successful-ignition과 튜브 밖에서 화염이 유지되지 못한 failed-ignition의 발생 조건을 찾기 위하여 몇 가지 과열 압력 및 길이에 따른 자발 점화 특성을 살펴보고 본 논문에서는 10.8 MPa의 과열 압력에서 200 mm 길이를 갖는 내경이 각 10.9 mm 과 3 mm 인 튜브에 대한 해석 결과를 다루었다.

먼저 상용 수소를 air-driven 부스터를 이용하여 2 리터 저기조에 최대 40 MPa 까지 가압한 뒤 밸브를 이용하여 이를 0.5 리터 챔버에 일정한 속도로 공급하여 순간적인 압력차에 의해 격막이 파열되는 것을 방지하였다. 내경이 10.9 mm 인 튜브의 경우 SUS 격막을 사용하였으며, 3 mm 인 튜브에는 Mylar 격막을 사용하였다. 시험 장치의 구성을 그림 1에 나타내었다.

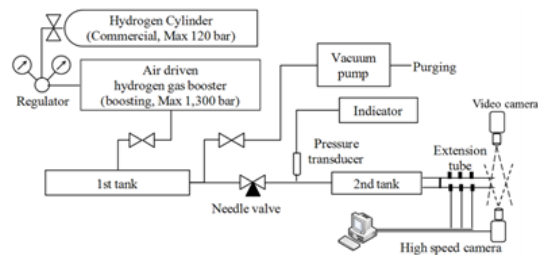


Fig 1. Schematics of the test facility

튜브 내 수소의 반응 특성 및 화염의 전파 형태를 살펴보기 위하여 화학 반응을 고려한 비정상, 압축성, 축대칭, 다상 Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며, 식 (1)과 같다.

$$Q_t + F_x + G_y = Fv_x + Gv_y + Sg + Sc \quad (1)$$

여기서 Sc 는 화학 반응에 의한 소스항으로 Burke[1] 등에 의한 수소-공기 반응에 대한 최근 반응 계수가 활용되었으며 생성률, 전달 계수 등은 CANTERA[2]에 의해 계산되었다.

그림 2는 내경이 다른 두 튜브의 끝단에서 화염의 전파 특성을 초고속 카메라(Phantom, v710)을 이용하여 촬영한 것으로 10.9 mm 튜브의 경우 출구에서 경계층을 중심으로 매우 약한 화염이 관찰되며 유동의 팽창에 따라 낮아진 온

* 서울대학교 항공우주추진연소연구실

** ㈜ LIG NEX1, PGM R&D 센터

† 연락처, enjis@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7387 FAX : (02)-880-1718

도를 이기지 못하고 소멸되는 것으로 조사되었다. 반면 내경이 3 mm 인 튜브의 경우 튜브 출구에 매우 강한 화염이 관찰되며 유동의 팽창에 따라 화염 면이 분열되었으나 이후 확산 화염으로 성장하여 고압부에서의 수소 공급이 차단되기 전까지 화염이 지속되었다. 그림 3은 내경이 3 mm 인 튜브에서 photodiode를 이용하여 측정된 튜브 내 화염 전파 특성을 나타낸 것이다. 격막에서 가까운 센서로부터 L1~L6 순이며 L2~L4에서 일정한 세기의 광학 신호가 측정되었으며 이후 L6에서 약 150% 증폭된 신호가 측정되어 화염이 성장하였음을 유추할 수 있다.

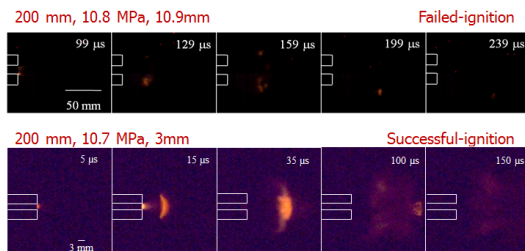


Fig 2 Ignition patterns for two extension tubes

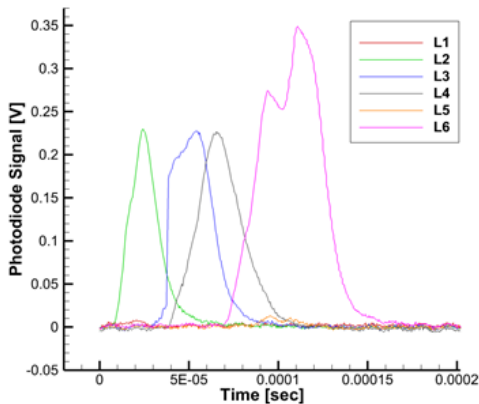


Fig 3 Luminance signal through the tube

튜브 내 화염 전파 특성을 살펴보기 위하여 두 경우에 대한 수치 해석 결과를 15 μ s 간격으로 그림 4과 그림 5에 각각 나타내었다. 두 경우 모두 다차원 충격파의 효과로 1차원 해석(14 μ s)에 비해 빠르게 반응이 일어나고 있으나 3 mm 튜브에서 화염이 빠르게 안정화되고 실험에서와 같이 튜브 끝에서 하나의 완전한 화염으로 성장하였다. 그러나 내경 10.9 mm 관의 경우 내부에 발생한 화염이 격막 파열에 의한 교란을 따라 작은 화염으로 분산되고 주 화염 역시 길고 얇게 확장되며 세기가 감소하는 것으로 조사되었다.

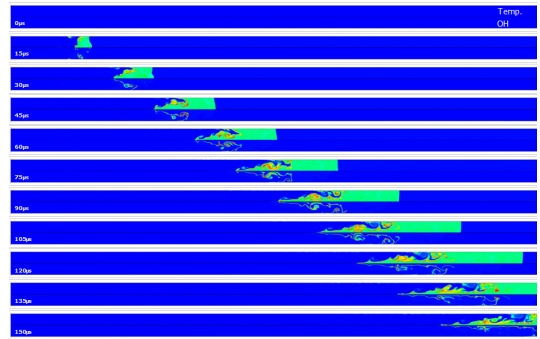


Fig 4 Temperature and OH distribution (10.9mm)

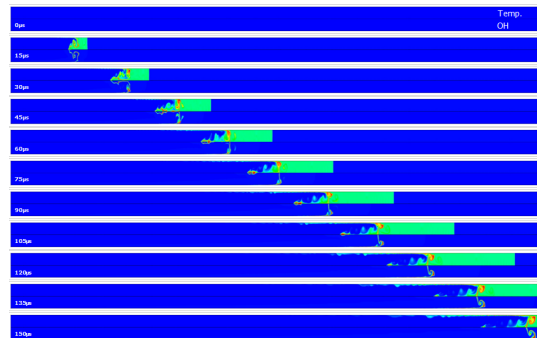


Fig 5 Temperature and OH distribution (3mm)

참고 문헌

- [1] M. P. Burke, M. Chaos, Y. Ju, F. L. Dryer, and S. J. Klippenstein, "Comprehensive H₂/O₂ Kinetic Model for High-Pressure Combustion," *International Journal of Chemical Kinetics*, Vol. 44, No. 7, 2012, pp. 444-474.
- [2] D. Goodwin, *Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes*, Caltech, Pasadena, 2009
- [3] 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.
- [4] Kim SH, Lee HJ, Park JH, Jeung IS, "Effect of a wall on the self-ignition patterns and flame propagation of high-pressure hydrogen release through a tube," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, 2013, pp. 2049-2056.