

반밀폐공간 내 점화원의 위치가 수소-공기 혼합물 벤트폭연에 미치는 영향

윤웅기¹ · 박병직¹ · 황인주² · 김우경³ · 김양균^{1*}

¹한국건설기술연구원 화재안전연구소, ²한국건설기술연구원 환경연구본부, ³히로시마대학 기계시스템공학과

Effect of Ignition Location on a Vented Deflagration of Hydrogen-air Mixtures in Semi-confined Space

UNGGI YOON¹, BYOUNGJIK PARK¹, INJU HWANG², WOOKYUNG KIM³, YANGKYUNG KIM^{1*}

¹Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang 10223, Korea

²Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang 10223, Korea

³Department of Mechanical Systems Engineering, Hiroshima University, 1 Chome-3-2 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-0046, Japan

*Corresponding author :
yangkyunkim@kict.re.kr

Received 19 July, 2024
Revised 19 August, 2024
Accepted 21 August, 2024

Abstract >> Explosion experiments were conducted using a rectangular concrete structure filled with hydrogen-air mixture (29.0%). In addition, the effect of ignition location on explosion was investigated. The impact on overpressure and flame was increased with the increasing distance of the ignition source from the vent. Importantly, depending on the ignition location the incident pressure was up to 24.4 times higher, while the reflected pressure was 8.7 times higher. Additionally, a maximum external overpressure of 30.01 kPa was measured at a distance of 2.4 m from the vent, predicting damage to humans at the injury level (1% fatality probability). Whereas, no significant damage would occur at a distance of 7.4 m or more from the vent.

Key words : Hydrogen(수소), Overpressure(순간 과압), Vented deflagration(통풍구 폭연), Ignition location(점화 위치), Human damage(인적 피해)

Nomenclature

A_0 : Vent area calculated (m^2).

A_s : Enclosure internal surface are (m^2).

ρ_u : mass density of unburned gas-air mixture (kg/m^3).

P_{red} : maximum pressure developed in a vented enclosure during a vented deflagration (bar-g).

S_u : fundamental burning velocity (m/s).

P_{max} : maximum pressure (bar-g).

G_u : Sonic flow mass flux ($kg/m^2\cdot s$).

λ : ratio of gas-air mixture burning velocity.

C_d : vent flow discharge coefficient.

ρ_u : mass density of unburned gas-air mixture (kg/m^3).

γ_b : ratio enclosure pressure prior to ignition (bar-g).

\bar{P} : scaled overpressure (kPa).

\bar{i} : scaled impulse (pa·s).

P : actual pressure acting on the body (kPa).

P_0 : atmospheric pressure (kPa).

i : impulse (pa·s).

m : mass of the body (kg).

1. 서론

전 세계적으로 기후 변화 위기 및 지구 온난화를 막기 위해 탄소중립(carbon neutrality) 달성 선언이 이어지고 있다. 이에 우리 정부도 2050년까지 탄소중립을 이루겠다는 “탄소중립선언”을 발표하였으며 더불어 탄소중립을 위한 에너지 관련 모든 부문(에너지 공급, 산업, 수송, 건물 등)을 포함한 “2050 탄소중립 추진전략”도 발표하였다¹⁾. 탄소중립 추진전략으로는 청정에너지 중심으로 에너지 시스템 혁신을 추진하고 있으며 탄소중립을 위한 필수불가결한 청정에너지로 수소(hydrogen)가 전 세계적으로 각광받고 있다. 이에 따라 최근 수소를 주 에너지원으로 사용하는 수소경제(hydrogen economy)로 전환하는 추세이다. 수소경제는 수소 mobility (수소차 및 충전소), 수소 생산, 운송, 저장, 수소연료전지 발전 산업 등이 주도할 것으로 전망된다^{2,3)}.

한편 이러한 수소를 에너지원으로 하는 기반 시설 등에서 발생할 수 있는 다양한 사고(누출, 화재, 폭발 사고)에 대한 대책 방안 등이 현재로서는 현저히 부족한 실정이다. 이에 다양한 사고로 발생할 수 있는 인적 또는 물적 피해를 최소화하기 위한 대책 방안 등이 마련되어야 하며 최근 정부에서는 수소저장탱크 시설을 지하에 마련하여 수소 누출, 화재, 폭발 사고로부터 안전성과 수용성을 확보하기 위한 방안이 논의되고 있다⁴⁾.

수소저장탱크 시설을 지하화하기 위해서는 시설 내 우발적인 폭발로 인한 건물 등의 손상을 최소화하기 위한 조치 방안이 필요하다. 이러한 조치 방안으로 폭발 통풍구(explosion vent)가 광범위하게 사용되고 있으며 밀폐공간의 경우 반드시 최소 환기면적

이상의 폭발 통풍구를 설계하도록 되어 있다. 이렇게 설계된 폭발 통풍구를 통해 우발적인 폭발이 발생하는 순간 과압(overpressure) 및 화염(flame) 등이 외부로 방산될 수 있도록 하고 있다. 이때 방산된 순간 과압 및 화염 등에 의해 인적 및 물적 피해가 발생할 수 있기 때문에 반드시 최소한의 안전이격거리가 확보되어야 한다.

이와 관련된 기존 연구들을 살펴보면 폭발 통풍구를 대상으로 한 다양한 실험적 연구들은 과거에 많은 연구자들에 의해 수행되었다. Bauwens 등^{5,6)}은 다양한 가스-공기 혼합물로 채워진 chamber에서 통풍구 폭발 실험을 수행하였다. 실험 매개변수로 통풍구 크기, 가스 농도, 가스 종류, 점화원의 위치를 설정하여 통풍구 내 확산 화염의 압력 발달에 대한 매개변수의 영향을 조사하였다. Wang 등⁷⁾은 통풍구가 상단에 위치한 직사각형 용기를 사용하여 수소-공기 혼합물이 폭발하는 동안의 통풍구 압력 상승 및 화염거동을 실험적으로 조사하였으며 수소 농도가 증가함에 따라 외부 화염의 최대 길이와 지속 시간이 각각 증가하고 감소한다고 밝혔다. Skjold 등⁸⁾은 균질 및 비균질 혼합물에 대한 혼잡의 영향을 조사하기 위해 길이 6 m 컨테이너 내 수소-공기 혼합물을 사용하여 통풍구 폭발 실험을 수행하였다. 그리고 내부의 혼잡이 empty enclosures의 vented deflagrations와 비교하여 vented deflagrations의 최대 감소 폭발 압력을 크게 증가시킬 수 있음을 밝혔다. Li 등⁹⁾은 맨홀 모델을 대상으로 맨홀 폭발 실험을 수행하였으며 맨홀 폭발로 인한 최대 압력에 대한 메탄 농도, 점화원의 위치 및 맨홀 커버 무게의 영향을 조사하였다. Tang 등¹⁰⁾은 수소-공기 혼합물로 채워진 직육면체 chamber에서 통풍구 폭발 중 통풍구계수의 범위가 3.57-25.00인 7개의 다른 통풍구 크기에 대한 압력-시간 이력과 화염거동을 조사하였다. Liu 등¹¹⁾은 상면에 통풍구가 있는 직사각형 덕트에서 폭발 실험을 실시하였으며 수소-메탄-공기 혼합물의 통풍구 폭발 시 화염전파 및 압력 상승에 대한 통풍구 계수의 영향을 조사하였다.

이와 같이 폭발 통풍구를 대상으로 한 연구 대부분

분은 통풍구 폭발 시 화염전파 및 압력 상승에 대한 통풍구계수의 영향을 중심으로 수행되었으며 지붕 통풍구(roof vent) 폭발이 인접거리에 미치는 영향을 조사한 연구는 현저히 부족하다. 이외에도 수행된 연구들¹²⁻¹⁷⁾은 측면 통풍구를 갖는 chamber 등에서의 통풍구 폭연(vented deflagration)에 의한 순간 과압 및 화염거동 등을 예측하는 데 중점을 두었기 때문에 지붕 통풍구 폭발로 인한 인접거리의 인명 피해 수준을 파악하고 폭발 통풍구로부터 안전이격거리를 예측하는 데에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 수소저장탱크 시설을 지하에 두었을 때를 가정하여 콘크리트 실험체의 지붕에서 벤트폭연에 의해 외부로 방산되는 순간 과압 및 화염거동을 분석한 후 인적 피해(human damage)를 최소화하기 위한 안전이격거리(safe separation distance)를 확인하고자 한다. 또한 변수로는 점화원의 위치를 설정하여 벤트폭연에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 수소-공기 혼합물의 벤트폭연 실험

2.1 실험체 및 각종 장비 개요

벤트폭연 실험은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 길이(L) 4,800 mm, 폭(W) 2,800 mm, 높이(H) 2,800 mm의 실규모의 콘크리트 실험체(20.33 m³)에서 수행되었다. 콘크리트 실험체의 개요를 Table 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다. 폭발벤트는 L=750 mm, H=1,500 mm (A_v=1.13 m²)의 직사각형 형태로 실험체의 지붕 정중앙에 상하좌우 대칭이 되도록 위치시켰으며 벤

트폭연 실험을 위해 실험체 내에 주입된 수소가스가 벤트를 통해 누출되지 않도록 0.2 mm 두께의 얇은 비닐시트를 이용하여 벤트를 완전히 밀봉하였다. 벤트계수(vent coefficient, K_v)는 V^{2/3}/A_v (V=밀폐공간의 체적, A_v=벤트의 면적)⁴⁾로 계산된 값인 6.62이다.

벤트폭연 실험에 사용된 각종 측정 기기의 설치 현황을 Fig. 2에 나타내었다. 벤트로부터 수직 방향으로 설치된 입사 압력계(수직 방향 입사 압력[vertical incident pressure, VIP]1-3) 3개는 벤트로부터 발산되는 폭발 압력을 측정하기 위한 것으로 벤트평면의 정중앙에서부터 상부 수직 방향으로 각각 1.0 m (VIP1), 3.0 m (VIP2), 5.0 m (VIP3) 떨어진 위치에 1개씩 설치하였다. 또한 벤트의 수평 방향으로 설치된 입사 압력계(수평 방향 입사 압력[horizontal incident pressure, HIP]1-3) 3개는 벤트폭연이 인접 거리의 사람에게 미치는 영향을 측정하기 위한 것으로 벤트평면의 정중앙을 기준으로 높이 1.5 m에 오른쪽 수평 방향으로 2.4 m (HIP1), 4.4 m (HIP2), 7.4 m (HIP3) 떨

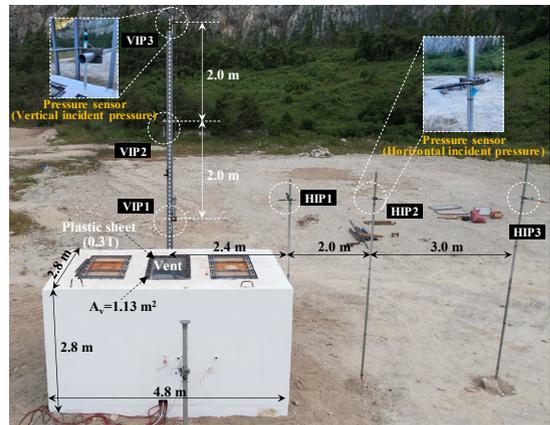


Fig. 1. View of the experimental structure

Table 1. Overview of experimental structure

Type	Structures condition						Vent condition			
	Dimensions (m)			Thickness (m)	Volume (m ³)		Dimensions (m)		Area (m ²)	Coefficient (-)
	L	W	H		Internal	External	L	H		
Experimental structures	4.8	2.8	2.8	0.3	20.33	37.63	0.75	1.5	1.13	6.62

어진 위치에 각각 1개씩 설치하였다. 반사 압력계(reflected pressure, RP) 3개는 실험체 내 폭발 압력을 측정하기 위해 내부 중앙부 벽면(RP1), 중앙부 1/4 지점(RP2), 우측 벽면 중앙부(RP3)에 각각 설치하였다. 점화 장치는 실험체 내 총 6곳에 설치하였다. 점화 장치 3개(central ignition tree)는 벤트 평면의 정중앙을 기준으로 수직 아래 방향으로 200 mm (front vent ignition, FVI), 1,100 mm (central ignition, CI), 2,000 mm (floor wall ignition, FWI) 떨어진 위치에 각각 1개씩 설치하였으며(FVI1, CI1, FWI1) CI tree와 같은 높이에 왼쪽 내벽 방향으로 1,900 mm 떨어진 위치(side ignition tree)에 점화 장치(FVI2, CI2, FWI2)를 각각 1개씩 설치하였다. 수소 농도 센서(concentration sensor, CS) 5개는 실험체 내 농도 조건을 일정하게 설정하기 위하여 x-방향의 대각선 양쪽 끝 상부(CS1, CS4)와 하부(CS2, CS5), 정중앙(CS3)에 각각 설치하여 내부 전체 공간에서의 수소 농도를 모니터링하였다. 수소가스 공급은 mass flow controller (TSM-D260; MKP, Siheung, Korea)를 사용하여 일정 유량의 수소가스를 실험체 내 하단에 설치된 8개의 노즐(gas supply nozzle)을 통해 공급하였다. Fan은 내부의 수소-공기 혼합물을 균질한 상태

로 설정하기 위하여 대각선 방향 양쪽 끝 바닥에 각각 위치시켰다. 열화상 카메라는 실험체 전방에 배치시켜 점화원의 위치 조건에 따른 외부 화염거동을 촬영하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

점화원의 위치에 따른 수소-공기 혼합물 벤트폭연 실험의 조건을 Table 2에 나타내었다. 본 벤트폭연 실험에서는 점화원의 위치가 벤트폭연거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 점화원의 위치 조건을 central ignition tree (FVI1, CI1, FWI1)와 side ignition tree (FVI2, CI2, FWI2)로 나누어 총 6가지 조건으로 설정하였다. 또한 수소 농도의 조건은 연소 반응이 잘 일어나는 수소-공기의 equivalence ratio (ϕ)가 1.0인 수소 농도 29.0%로 설정하였다. 벤트 조건은 NFPA 68¹⁸⁾ 및 KFS 720¹⁹⁾에 제시된 식 (1)의 최소 필요 벤트면적($A_0=1.09 \text{ m}^2$)에 상응하는 1.13 m^2 ($0.75 \times 1.5 \text{ m}$)로 모든 실험 조건에 동일하게 적용하였으며 Table 2에 나타난 실험 조건별로 각각 1회씩 폭연 실험을 실시하였다.

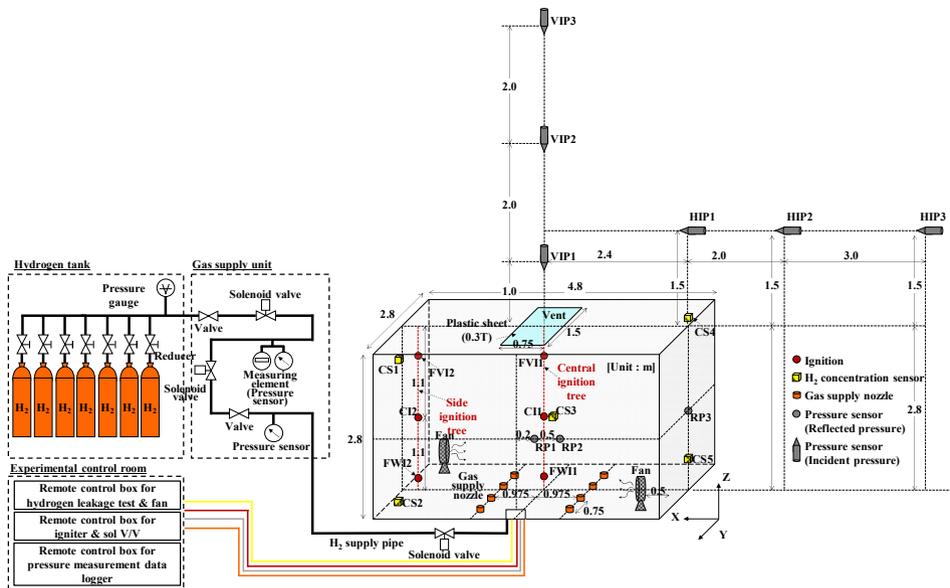


Fig. 2. Overview of experimental structure

$$A_0 = A_s \frac{\left[1 - \left(\frac{P_{red} + 1}{P_{max} + 1} \right)^{1/\gamma_b} \right]}{\left(\frac{P_{red} + 1}{P_{max} + 1} \right)^{1/\gamma_b} - \delta} \frac{S_u \rho_u \lambda}{G_u C_d} \quad (1)$$

실험 방법은 벤트를 0.2 mm 이하의 비닐시트로 밀봉하여 밀폐공간의 환경을 조성하였다. 밀폐된 실험체 내 일정 유량의 수소가스를 공급할 수 있게 mass flow controller를 사용하여 제어하였으며 바닥에 설치된 8개의 가스 공급 노즐을 통해 수소가스를 공급하였다. 공급되는 수소가스는 실시간으로 모니터링 하면서 도달하고자 하는 범위의 ±3.0%일 때 수소가스 공급을 중단한 후 실험체 내 설치된 2개의 방폭형 팬을 사용하여 공간 내 수소와 공기가 잘 섞이도록 유도하였다. 이후 방폭형 팬을 멈추고 구획 내 수소 농도가 안정화되면 각종 측정 데이터 로거 등을 활성화시키고 실험체 내 설치된 점화기를 이용하여 혼합된 가스에 점화하였다. 점화 직후 즉시 폭발이 발생하였으며 데이터 로거에 연결된 압력센서를 이용하여 입사 압력 및 반사 압력을 100만 분의 1초 단위로 측정하였다. 또한 실험체 전방에 배치된 열화상카메라를 통해 외부 화염거동을 촬영하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 벤트폭연 실험의 수소 농도 결과

실험체 내 점화원의 위치별 수소 농도의 결과 그

래프를 Fig. 3에 나타내었다. 수소 농도는 실험체 내 설치된 5개의 수소 농도 센서(CS1-5)를 이용하여 측정된 값의 평균값이고 결과 그래프를 step1-3으로 구분하여 나타내었다. Step1은 실험체 내 설치된 노즐을 통해 수소 농도를 목표치의 ±3.0% 이내로 제어되

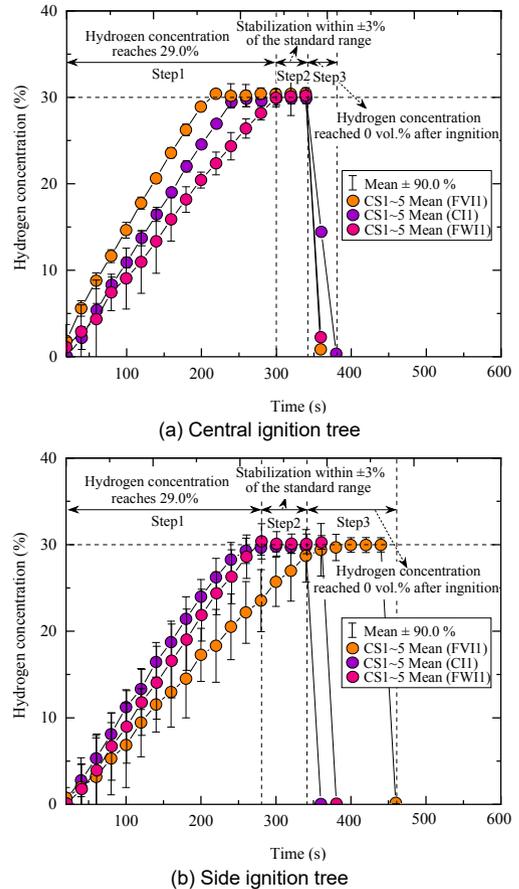


Fig. 3. Results of hydrogen concentration

Table 2. Summary of experimental conditions

Test number	Vent condition	Vent coefficient	Concentration of hydrogen	Ignition location	
1	A _v =1.13 m ²	K _v =6.62	29.0%	Central ignition tree	Front-vent ignition 1 (FVI1)
2					Central ignition 1 (CI1)
3					Floor-wall ignition 1 (FWI1)
4				Side ignition tree	Front-vent ignition 2 (FVI2)
5					Central ignition 2 (CI2)
6					Floor-wall ignition 2 (FWI2)

는 구간을 표시하였고 step2는 수소 공급을 중단한 후 실험체 내 균질한 수소 농도의 환경을 조성하기 위해 방폭형 팬을 이용하여 수소와 공기가 잘 섞이도록 유도한 점화 직전의 구간을 표시하였다. Step3은 점화 직후의 수소 농도가 0.0%에 도달할 때까지를 구분하여 나타냈다.

각 실험 조건별 수소 농도 결과 그래프를 보면 step1에서는 목표 도달 농도까지 잘 제어되었으며 step2에서는 목표치(29.0%) 범위의 $\pm 3\%$ 이내로 안정화 상태를 잘 유지한 후 step3에서 점화 직후 수소 농도가 급격하게 떨어지는 결과를 보였다. 이를 통해 수소 농도가 잘 제어된 후 폭발을 일으킨 것으로 확인되었다.

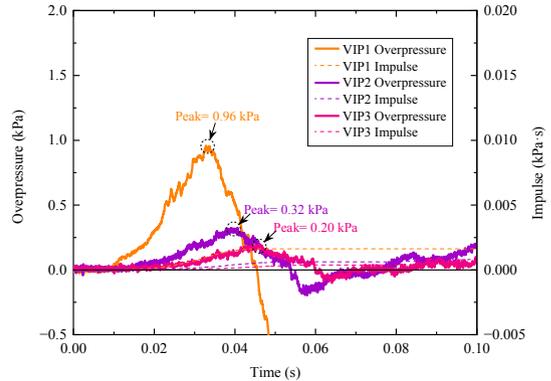
3.2 벤트폭연 실험의 순간 과압 결과

3.2.1 수직 방향 입사 압력 결과

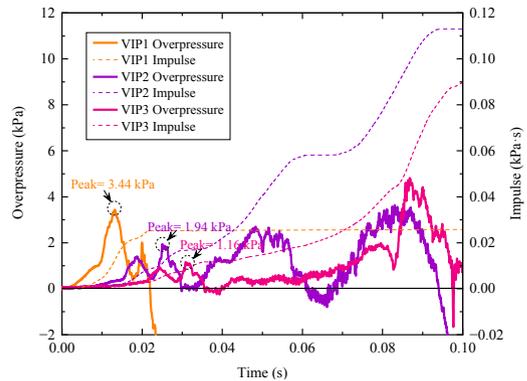
점화원의 위치에 따른 입사 압력(VIP1-3)결과를 center ignition tree와 side ignition tree로 각각 나누어 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었고 그 결과를 순간 과압과 충격량 값으로 나타냈다. 또한 반사 압력(RP3) 결과를 ignition tree별로 Fig. 6에 각각 나타냈다.

Central ignition tree의 FV11 조건에서는 미소하지만 벤트 직상부에 설치된 VIP1에서 0.96 kPa의 최대 압력이 측정되었으며 순차적으로 VIP2, VIP3에서 0.32, 0.20 kPa의 최대 압력이 측정되었다. 이때 최대 반사 압력은 RP3에서 1.98 kPa로 측정되었다. CI1 조건에서는 FV11 조건과 마찬가지로 VIP1에서 최대 압력인 3.44 kPa이 측정되었으며 VIP2, VIP3에서 1.94, 1.16 kPa의 최대 압력이 측정되었다. 이때 최대 반사 압력은 RP3에서 4.89 kPa로 측정되었다. 반면 FW11 조건에서는 FV11과 CI1의 최대 압력결과와 달리 VIP2에서 7.81 kPa의 최대 압력이 측정되었으며 VIP1, VIP3에서 5.09, 4.60 kPa의 최대 압력이 측정되었다. 이때 최대 반사 압력은 RP3에서 14.98 kPa로 측정되었다. 이 결과로 벤트로부터 점화원의 위치가 멀어질수록 폭발 압력은 높아지는 것으로 확인되었다.

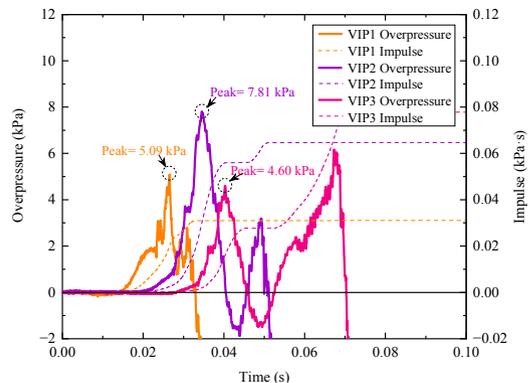
Side ignition tree의 FV12 조건에서 최대 압력인 3.39 kPa이 VIP1에서 측정되었으며 같은 높이에 설치된 FV11 조건에서의 최대 압력 결과(VIP1)보다 높은 압력이 측정되었다. 또한 내부 최대 반사 압력은



(a) Results of VIP1-3 overpressure and impulse (FV11)



(b) Results of VIP1-3 overpressure and impulse (CI1)



(c) Results of VIP1-3 overpressure and impulse (FW11)

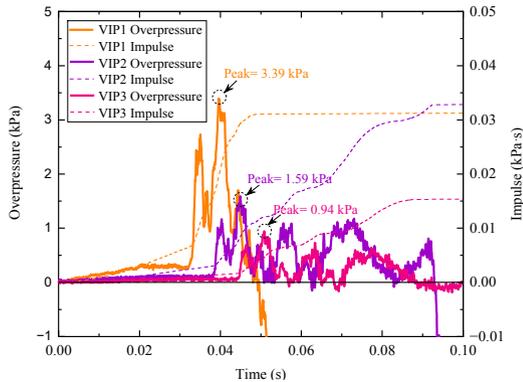
Fig. 4. Results of incident pressure according to the ignition location (central ignition tree)

RP3에서 5.44 kPa로 약 2.0배 이상의 압력차를 보였다. CI2 및 FWI2 조건에서의 압력 결과도 central ignition tree의 압력 결과와 비슷한 경향의 거동을 보이지만 두 조건(central 및 side ignition tree)의 최대

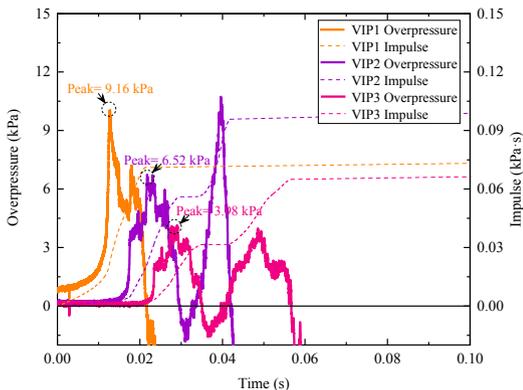
압력차는 큰 것으로 나타났다. 그 결과 central ignition tree의 점화 조건과 같은 높이의 조건에서 폭발 실험을 실시하여도 벤트로부터 점화원의 위치의 거리가 더 먼 side ignition tree에서의 최대 폭발 압력은 더 높게 측정되어 압력의 차이가 극명하게 나타났다. 따라서 벤트로부터 점화원의 위치가 멀어질수록 최대 폭발 압력에 미치는 영향은 큰 것으로 확인되었다.

3.2.2 수평 방향 입사 압력 결과

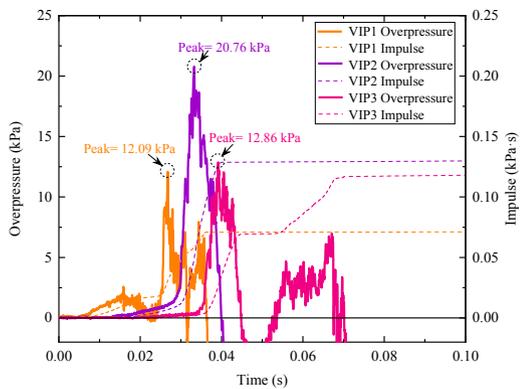
점화원의 위치에 따른 입사 압력(HIP1-3) 결과도 center ignition tree와 side ignition tree로 각각 나누어 Fig. 7과 Fig. 8에 나타냈으며 그 결과를 순간 과압과 충격량 값으로 나타냈다.



(a) Results of VIP1-3 overpressure and impulse (FWI2)

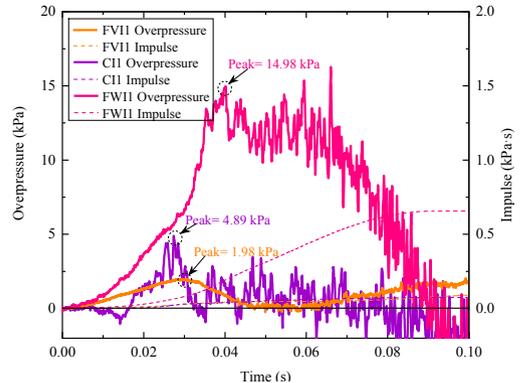


(b) Results of VIP1-3 overpressure and impulse (CI2)

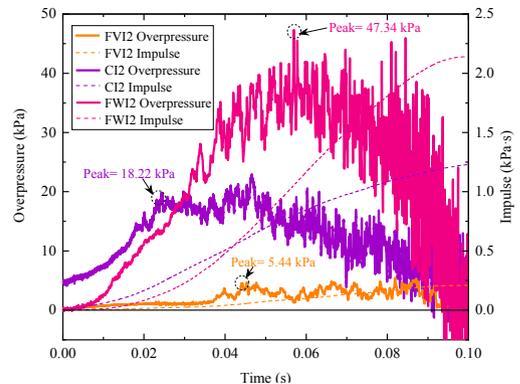


(c) Results of VIP1-3 overpressure and impulse (FWI2)

Fig. 5. Results of incident pressure according to the ignition location (side ignition tree)



(a) Results of RP3 overpressure and impulse (central ignition tree)

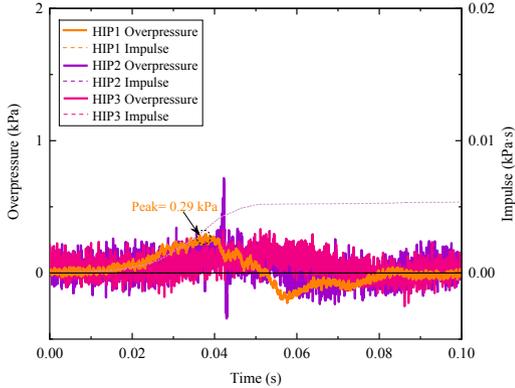


(b) Results of RP3 overpressure and impulse (side ignition tree)

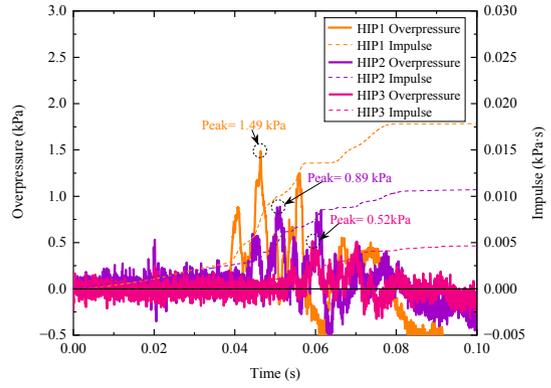
Fig. 6. Results of reflected pressure according to the ignition location

Central ignition tree의 FV11 조건에서는 벤트 기준 수평 방향으로 2.4 m 떨어진 HIP1에서 미소하지만 0.29 kPa의 최대 압력이 측정되었으며 HIP2와 HIP3에서는 벤트 폭발에 의한 압력이 측정되지 않았

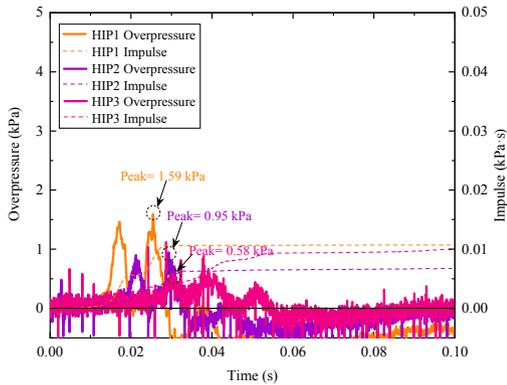
다. CI1 조건에서는 HIP1에서 최대 압력인 1.59 kPa이 측정되었으며 순차적으로 HIP2, HIP3에서 미소하지만 0.95, 0.58 kPa의 최대 압력이 측정되었다. FW11 조건에서의 최대 압력은 HIP1에서 6.03 kPa,



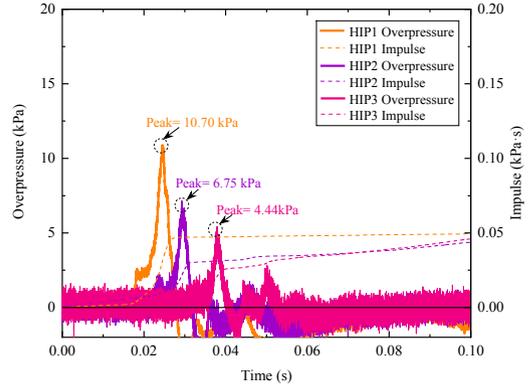
(a) Results of HIP1-3 overpressure and impulse (FV11)



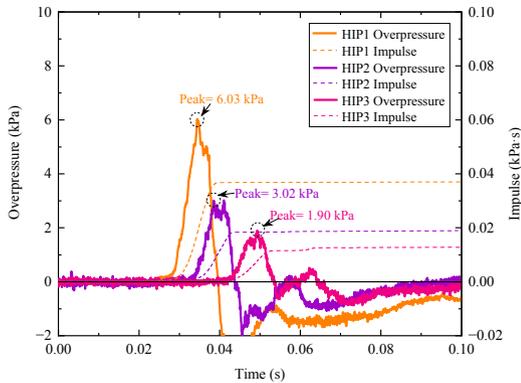
(a) Results of HIP1-3 overpressure and impulse (FV12)



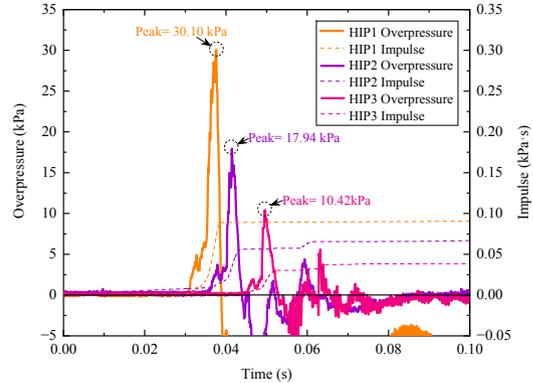
(b) Results of HIP1-3 overpressure and impulse (CI1)



(b) Results of HIP1-3 overpressure and impulse (CI2)



(c) Results of HIP1-3 overpressure and impulse (FW11)



(c) Results of HIP1-3 overpressure and impulse (FW12)

Fig. 7. Results of incident pressure according to the ignition location (central ignition tree)

Fig. 8. Results of incident pressure according to the ignition location (side ignition tree)

HIP2에서 3.02 kPa, HIP3에서 1.90 kPa이 측정되었다.

Side ignition tree의 FVI2에서는 HIP1에서 1.49 kPa의 최대 압력이 측정되었으며 순차적으로 HIP2, HIP3에서 미소하지만 0.89, 0.52 kPa의 최대 압력이 측정되었다. 이 값은 central ignition tree의 CI1에서의 최대 압력에 상응하는 값으로 확인되었다. CI2 조건에서는 FVI2 조건과 마찬가지로 HIP1에서 최대 압력인 10.70 kPa이 측정되었으며 HIP2, HIP3에서는 6.75, 4.44 kPa이 측정되었다. FWI2 조건에서는 CI2 조건의 압력 결과와 비슷한 경향의 거동을 보이지만 최대 압력차는 약 2.0배 정도 더 높게 측정되었다. 따라서 수직 방향 입사 압력 결과와 마찬가지로 벤트로부터 점화원의 위치가 멀어질수록 수평 방향에서 측정된 수평 방향 입사 압력이 높아지는 것으로 확인되었다.

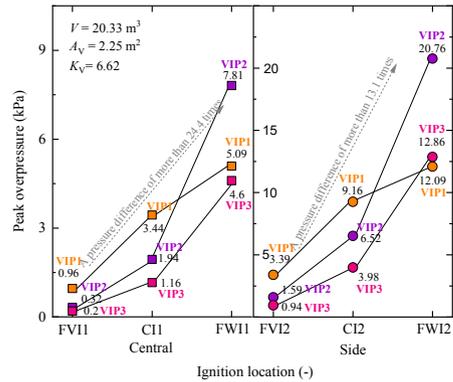
3.3 점화원의 위치에 따른 최대 압력 결과

점화원의 위치에 따른 최대 압력 결과를 수직 방향 입사 압력(VIP1-3), 수평 방향 입사 압력(HIP1-3) 및 반사 압력(RP3)으로 각각 나누어 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타냈으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

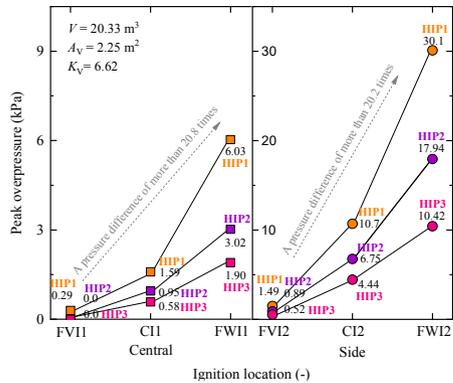
점화원의 위치에 따른 VIP1-3의 최대 압력 결과에서는 점화원의 위치가 벤트로부터 멀어질수록 VIP2에서의 최대 폭발 압력차가 central ignition tree에서 약 24.4배, side ignition tree (FVI2 to FWI2)에서는 13.1배로 측정되었다. 또한 점화 조건별(side vs. central ignition tree) VIP1-3에서의 최대 폭발 압력은 side ignition tree의 최대 압력이 central ignition tree에 비해 약 3.0배 정도 높은 것으로 확인되었다. HIP1-3의 최대 압력 결과에서도 VIP1-3의 최대 압력결과와 마찬가지로 점화원의 위치가 통풍구로부터 멀어질수록 최대 폭발 압력은 HIP1에서 최대 20.0배 이상의 차이를 보이며 전체 입사 압력 결과 중 FWI1 조건의 HIP1에서 최대 폭발 압력인 30.1 kPa이 측정되었다. RP3의 최대 압력 결과에서도 점화원의 위치가 벤트로부터 멀어질수록 폭발 압력은 높아지는 결과를 보

이며 그 최대 압력차는 side ignition tree 조건에서 약 9.0배 정도의 차이를 보였다.

이 결과들을 통해 최대 압력에 대한 점화원의 위



(a) Results of vertical incident pressure



(b) Results of horizontal incident pressure

Fig. 9. Results of peak overpressure according to the ignition location

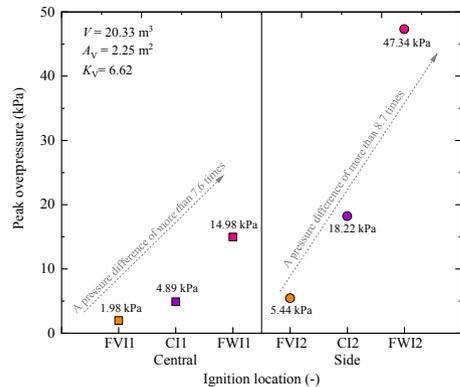


Fig. 10. Results of peak overpressure according to the ignition location (reflected pressure)

치의 영향은 벤트로부터 멀어질수록 폭발 압력에 미치는 영향은 큰 것을 확인하였다.

3.4 점화원의 위치에 따른 외부 화염거동 결과

점화원의 위치에 따른 외부 화염거동을 central ignition tree와 side ignition tree로 각각 나누어 Fig. 11에 나타내었다. 구획 내 수소-공기 혼합물 폭연으로 형성된 화염은 통풍구를 통해 외부로 분출되며 외부 화염의 진화는 다음 3단계로 이루어졌다. 먼저 통풍구 가까이 형성된 combustible cloud의 빠른 연소로 인해 fireball이 형성되고 몇 초에 걸쳐 화염이 최대 크기로 확장된 후 high-speed vented outflow에 의해 아래로 밀려나면서 flame jet가 형성되었다.

Central 및 side ignition tree의 점화 조건별(FVI, CI, FWI) 외부 화염거동의 차이는 Fig. 11에서 명확하게 나타난다. 화염거동 결과에서 FWI와 FVI는 각각 fireball의 최대 크기와 최소 크기로 나타났으며 가장 긴 화염 길이는 CI와 FWI에서 확인되었고 FVI의 결과는 반대로 나타났다. Central과 side ignition tree를 점화 조건별로 비교하면 central ignition tree의 화염 길이가 보다 길고 긴 원형 기둥 형태의 화염이 형성되는 것으로 나타났다. 반면 side ignition tree에서는 central ignition tree에 비해 화염이 낮게 형성되지만 폭넓은 버섯구름 형태로 나타났다. 이 결과들을 통해 점화원의 위치는 외부 화염거동에 상당한 영향

을 미치는 것으로 확인되었다.

3.5 벤트폭연이 인간에게 미치는 피해 영향

실험체 내 수소-공기 혼합물의 벤트폭연으로 발생하는 순간 과압에 의해 인체에 피해가 발생하는데 대부분의 피해를 입히는 것은 blast wave로 incident pressure에 따른 인적 피해 수준을 Table 4에 나타내었다. Blast wave로 인한 인체 피해는 순간 과압과 충격량으로 표현이 가능하며 환산 순간 과압 \bar{P} 및 환산 충격량 \bar{i} 은 식 (2) 및 식 (3)로 나타낼 수 있다. 또한 Fig. 10의 그래프처럼 표현이 가능하다²⁰⁻²².

$$\bar{P} = \frac{P}{P_0} \tag{2}$$

$$\bar{i} = \frac{i}{p_0^{1/2} \times m^{1/3}} \tag{3}$$

본 연구에서의 수평 방향 입사 압력으로부터 측정된 값에 대한 인적 피해 수준을 점화 조건별로 Fig. 12에 나타내었다. FWI2 조건일 때 HIP1과 HIP2에서 injury 정도의 인적 피해가 발생하는 것으로 나타났다. HIP1에서는 최대 압력인 30.01 kPa로 1%의 사망 확률이 발생할 것으로 예측되며 HIP2에서는 17.94 kPa로 1%의 고막 파열 확률이 발생할 것으로 나타났다. 나머지 점화 조건에서는 낮은 순간 과압 결과가 측

Table 3. Results of peak overpressure according to the ignition location

Incident peak overpressure (kPa)															
Horizontal incident pressure								Vertical incident pressure							
Central ignition	HIP1	HIP2	HIP3	Side ignition	HIP1	HIP2	HIP3	Central ignition	VIP1	VIP2	VIP3	Side ignition	VIP1	VIP2	VIP3
FVI1	0.29	0.0	0.0	FVI2	1.49	0.89	0.52	FVI1	0.96	0.32	0.20	FVI2	3.39	1.59	0.94
CI1	1.59	0.95	0.58	CI2	10.7	6.75	4.44	CI1	3.44	1.94	1.16	CI2	9.16	6.52	3.98
FWI1	6.03	3.02	1.90	FWI2	30.1	17.94	10.42	FWI1	7.81	5.09	4.60	FWI2	20.76	12.86	12.09
Reflected peak overpressure (kPa)															
Central ignition	Reflected pressure, RP3						Side ignition	Reflected pressure, RP3							
	FVI1		CI1		FWI1			FVI2		CI2		FWI2			
	1.98		4.89		14.98			5.44		18.22		47.34			

정되어 인적 피해 발생이 크게 없을 것으로 확인되었다. 이 결과로 FWI2 조건일 때 순간 과압에 의한 인적 피해 상황이 가장 높을 것으로 예측되며 점화원의 위치가 순간 과압에 미치는 영향이 큰 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 수소-공기 혼합물로 채워진 직육면체의 콘크리트 실험체에서 점화원의 위치에 따른 بنت폭연의 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하였다.

주요 결론은 다음과 같이 요약된다.

Table 4. Effect of blast waves on people²³⁾

Damage level	Incident pressure (kPa)
Eardrum rupture threshold ²¹⁾	13.8
1% eardrum rupture probability ^{24,25)}	16.5
1% eardrum rupture ²⁶⁾	23
1% fatality probability ²⁷⁾	25-35
50% eardrum rupture probability ²¹⁾	34.5-48.3
15% fatality probability ²⁶⁾	35
50% fatality probability ²⁶⁾	50-100

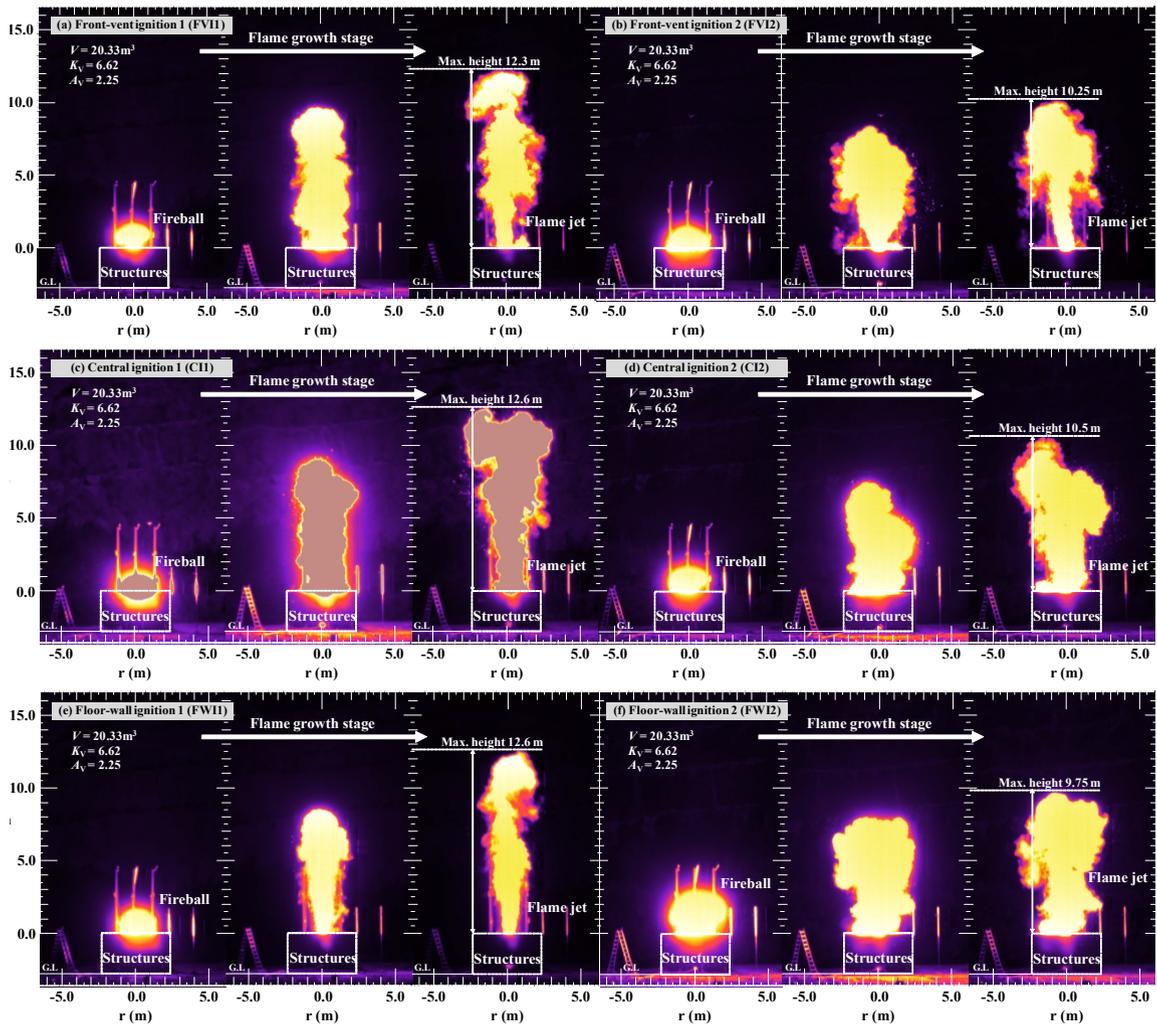


Fig. 11. Effect of ignition location on the flame behavior

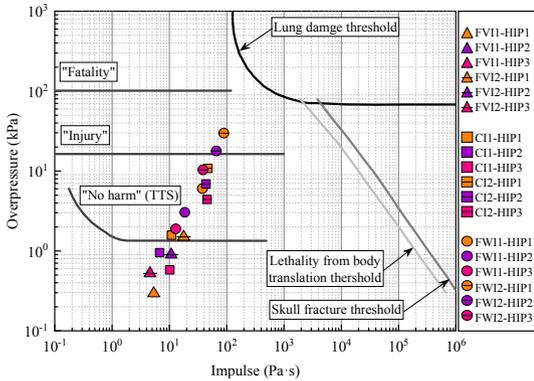


Fig. 12. Overpressure-impulse thresholds of harm criteria for humans

1) 점화원의 위치가 벤트로부터 멀어질수록 순간 과압 및 화염거동에 큰 영향을 미치는 것으로 확인 되었으며 점화원의 위치에 따라 입사 압력 결과에서는 최대 24.4배, 반사 압력 결과에서는 최대 8.7배의 압력차를 보였다. 이는 점화 위치가 개구부로 멀어질 수록 점화 초기에 형성된 화염선단에서의 압축이 크며 개구부로 방산되기 전 단계까지 반사 압력이 계속 쌓이는 것에 반해 점화 위치가 개구부와 가까울 수록 폭발 압력이 축적되는 시간이 짧기 때문인 것으로 판단된다.

2) 외부 화염거동 결과에서는 점화원의 위치에 따른 화염 형태가 다르게 형성되었으며 central ignition tree의 화염 형태는 긴 원형 기둥의 형태로 형성된 반면 side ignition tree의 경우 폭넓은 버섯구름 형태로 화염이 형성되는 것으로 나타났다.

3) FW12 점화 조건일 때 벤트로부터 2.4 m 떨어진 위치(HIP1)에서 injury 정도(1% fatality probability)의 인적 피해가 발생할 것으로 예측되었으며 벤트로부터 7.4 m 이상 떨어진 위치에서는 인적 피해가 거의 발생하지 않는 것으로 예측되었다.

본 실험은 반복 실험의 한계가 있기 때문에 향후에 추가적인 실험을 통한 실험 결과의 신뢰성을 높이고자 한다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영지원비지원사업으로 수행되었습니다(과제 번호 20240176-001, 수소도시 기반시설의 안전 및 수용성 확보기술 개발).

References

1. Y. Cheon, "Review of global carbon neutral strategies and technologies", Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 59, No. 1, 2022, pp. 99-112, doi: <https://doi.org/10.32390/ksmer.2022.59.1.099>.
2. E. Y. Kim, "Major projects and future considerations in 2020 according to the hydrogen economy revitalization road map", NABO Focus, Vol. 7, 2019, pp. 1-4. Retrieved from https://www.nabo.go.kr/Sub/01Report/12_Board.jsp?func=view&funcSUB=¤tPageSUB=0&pageSizeSUB=10&key_typeSUB=&keySUB=&search_start_dateSUB=&search_end_dateSUB=&arg_id=0&bid=68&rbid=0&ridx=0&idSUB=0&cid1=0&cid2=0&cid3=0&cid4=0&cid5=0&cid6=0&cid7=0&arg_cid1=0&arg_cid2=0&arg_class_id=0¤tPage=6&pageSize=10&pagePerBlock=0&nowBlock=6&key_type=&key=&search_start_date=&search_end_date=&class_id=0&sortBy=&ascOrDesc=&bidx=7060&idx=7060.
3. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Leap to become a world-class hydrogen economy leader-government, hydrogen economy revitalization road map announcement", MOTIE, 2019. Retrieved from <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156313559>.
4. U. G. Yoon, B. Park, W. Kim, and Y. Kim, "Large scale experiment of a roof vented deflagration of high-concentration hydrogen-air mixtures", Process Safety and Environmental Protection, Vol. 184, 2024, pp. 1411-1423, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.049>.
5. C. R. Bauwens, J. Chaffee, and S. B. Dorofeev, "Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 3, 2011, pp. 2329-2336, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.005>.
6. C. R. Bauwens, J. Chao, and S. B. Dorofeev, "Effect of hydrogen concentration on vented explosion overpressures from lean hydrogen-air deflagrations", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 22, 2012, pp. 17599-17605, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.053>.
7. J. Wang, J. Guo, F. Yang, J. Zhang, and S. Lu, "Effects of hy-

- drogen concentration on the vented deflagration of hydrogen-air mixtures in a 1-m³ vessel”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 45, 2018, pp. 21161-21168, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.108>.
8. T. Skjold, H. Hisken, S. Lakshminpathy, G. Atanga, L. Bernard, M. van Wingerden, K. L. Olsen, M. N. Holme, N. M. Turøy, M. Mykleby, and K. van Wingerden, “Vented hydrogen deflagrations in containers: effect of congestion for homogeneous and inhomogeneous mixtures”, *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 44, No. 17, 2019, pp. 8819-8832, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.010>.
 9. P. Li, P. Huang, Z. Liu, B. Du, and M. Li, “Experimental study on vented explosion overpressure of methane/air mixtures in manhole”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 374, 2019, pp. 349-355, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.046>.
 10. Z. Tang, J. Li, J. Guo, S. Zhang, and Z. Duan, “Effect of vent size on explosion overpressure and flame behavior during vented hydrogen-air mixture deflagrations”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 361, 2020, pp. 110578, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110578>.
 11. W. Liu, J. Guo, J. Zhang, and S. Zhang, “Effect of vent area on vented deflagration of hydrogen-methane-air mixtures”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 9, 2021, pp. 6992-6999, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.123>.
 12. M. Schiavetti, A. Marangon, and M. Carcassi, “Experimental study of vented hydrogen deflagration with ignition inside and outside the vented volume”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 35, 2014, pp. 20455-20461, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.006>.
 13. X. Rocourt, S. Awamat, I. Sochet, and S. Jallais, “Vented by drogen-air deflagration in a small enclosed volume”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 35, 2014, pp. 20462-20466, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.233>.
 14. Z. Liang, “Scaling effects of vented deflagrations for near lean flammability limit hydrogen-air mixtures in large scale rectangular volumes”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 10, 2017, pp. 7089-7103, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.086>.
 15. Q. Zhang, Y. Wang, and Z. Lian, “Explosion hazards of LPG-air mixtures in vented enclosure with obstacles”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 334, 2017, pp. 59-67, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.03.065>.
 16. J. Guo, C. Wang, X. Liu, and Y. Chen, “Explosion venting of rich hydrogen-air mixtures in a small cylindrical vessel with two symmetrical vents”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 11, 2017, pp. 7644-7650, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.097>.
 17. Y. Chen, Z. Li, C. Ji, and X. Liu, “Effects of hydrogen concentration, non-homogenous mixtures and obstacles on vented deflagrations of hydrogen-air mixtures in a 27 m³ chamber”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 11, 2020, pp. 7199-7209, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.082>.
 18. National Fire Protection Association (NFPA), “NEPA 68: standard on explosion protection by deflagration venting”, NFPA, 2023. Retrieved from <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-68-standard-development/68>.
 19. Korean Fire Protection Association (KFPFA), “KFS 720: standard on venting of deflagrations code”, KFPFA, 1998. Retrieved from <https://ulsansafety.tistory.com/1827>.
 20. D. A. Crowl and J. F. Louvar, “Chemical process safety: fundamentals with applications”, 2nd ed, Prentice Hall, USA, 2002, pp. 264-282.
 21. R. M. Jeffries, L. Gould, D. Anastasiou, and A. P. Franks, “Derivation of fatality probability functions for occupants of buildings subject to blast loads”, *Probabilistic Safety Assessment and Management '96*, 1996, pp. 669-675, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3409-1_107.
 22. B. Park, Y. Kim, and I. J. Hwang, “Risk assessment of explosion accidents in hydrogen fuel-cell rooms using experimental investigations and computational fluid dynamics simulations”, *Fire*, Vol. 6, No. 10, pp. 390, doi: <https://doi.org/10.3390/fire6100390>.
 23. J. Debroey, “Probit function analysis of blast effects on human beings [Master’s thesis]”, Leuven: Royal Military Academy, 2016.
 24. S. Mannan, “Lees’ loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment, and control”, 3rd ed, Elsevier Butterworth-Heinemann, Netherlands, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24104-3>.
 25. L. E. Fugelso, L. M. Weiner, and T. H. Schiffman, “Explosion effects computation aids”, General American Transportation Corporation, 1972. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0903279.pdf>.
 26. National Fire Protection Association (NFPA), “NEPA 3: hydrogen technologies code”, NFPA, 2023. Retrieved from <https://www.nfpa.org/product/nfpa-2-code/p0002code>.
 27. Health and Safety Executive (HSE), “Methods of approximation and determination of human vulnerability for offshore major accident hazard assessment”, HSE, 2013. Retrieved from https://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/technical_osd/spc_tech_osd_30/spctecosc30.pdf.