

## 중대사고시 수소폭발이 격납건물에 미치는 영향

류명록<sup>1</sup> · 박권하<sup>†</sup>

(Received December 3, 2015 ; Revised February 3, 2016 ; Accepted March 8, 2016)

### Hydrogen explosion effects at a containment building following a severe accident

Myeong-Rok Ryu<sup>1</sup> · Kweon-Ha Park<sup>†</sup>

**요약:** 2011년 3월 11일 리히터 스케일 9.0의 강진과 10-14m파도로 인해 Fukushima Daiichi(FD) 원자력 단지의 주전력과 보조전력이 끊어져 냉각장치가 작동하지 않았고 노심의 열이 제거되지 못해 폭발이 일어나는 사고가 발생했다. 노심의 열이 제거되지 못하면 핵연료 피복재인 지르칼로이(zircaloy)와 같은 금속이 고온 상태에서 수증기와 산화 반응하여 수소를 발생시킨다. 발생한 수소는 격납건물로 방출되는데 방출된 수소가 연소하는 경우 격납건물의 안정성에 영향을 줄 정도의 큰 충격을 유발할 수 있는 수소폭발로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 격납건물 내부의 수소 분포를 분석한 연구 [1]에서 제시한 폭발의 위해도가 높은 영역에 대하여 폭발해석을 수행하였으며 수소 폭발이 격납건물의 건전성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 격납건물 중앙부를 제외하고 수소폭발이 발생하였고 상부에 전체 수소의 40% 이상이 모였을 때와 하부 좌측, 우측의 격벽사이에 수소가 모였을 때 큰 폭발이 발생했으며 격납건물 벽면에 큰 응력을 동반하였다.

**주제어:** 수소폭발, 폭발압력, 벽면응력, 격납건물

**Abstract:** On March 11, 2011, a massive earthquake measuring 9.0 on the Richter scale and subsequent 10-14 m waves struck the Fukushima Daiichi (FD) Nuclear Power Plant. The main and backup electric power was damaged preventing the cooling system from functioning. Fuel rods overheated and led to hydrogen explosions. If heat in the fuel rods is not dissipated, the nuclear fuel coating material (e.g., Zircaloy) reacts with water vapor to generate hydrogen at high temperatures. This hydrogen is released into the containment area. If the released hydrogen burns, the stability of the containment area is significantly impacted. In this study, researchers performed an explosion analysis in a high-risk explosion area, analyzing the hydrogen distribution in a containment building [1] and the effects of a hydrogen explosion on containment safety. Results indicated that a hydrogen explosion was possible throughout the containment building except the middle area. If an explosion occurs at the top of the containment building with more than 40% of the hydrogen collected or in the bottom right or left side of the of containment building, safety of the containment building could be threatened.

**Keywords:** Hydrogen explosion, Explosion pressure, Wall stress, Containment building

### 1. 서론

1986년 4월 26일 체르노빌 발전소의 원자로 4호기의 비정상적인 핵 반응으로 냉각제가 증발하였고 그로인해 발생한 수소가 원자로 내부에서 폭발을 일으키는 사고가 발생했다.

2011년 3월 11일 Richter 크기 9.0의 강진으로 인한 10-14m의 파도가 Tokyo Electric Power Company(TEPCO)에서 운영하는 Fukushima Daiichi(FD) 원자력 단지를 강타했다[1]. 원자력 단지의 주전력과 보조전력이 끊어져 냉각장치가 작동하지 않았고 노심의 열이 제거되지 못했으며 폭발이 일어나는 사고가 발생했다.

원자로 노심의 열이 제거되지 못하면 핵연료 피복재로

사용되는 지르칼로이(zircaloy)와 같은 금속이 고온 상태에서 수증기와 산화반응하여 수소(hydrogen)를 발생 시킨다. 발생한 수소는 격납건물로 방출되는데, 여러 요인들에 의하여 방출된 수소가 연소하는 경우에 화염의 가속으로 인하여 격납건물의 안정성에 영향을 줄 정도의 큰 충격을 유발할 수 있는 수소폭발로 이어질 수 있다[2]. Fukushima 사고에서 보여준 것처럼, 중대사고시의 노심냉각을 위한 대책들이 모두 실패하고 노심용융에 의하여 수소가 생성되었으며 결국 수소폭발이 발생하였다. 수소는 폭발성이 매우 강하며, 폭발이 발생하면 다중방어벽을 훼손하고 다량의 방사능물질이 방출되기 때문에 중대사고시에 노심용융과 함께 발생한

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9460-8399>): Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: [Khpark@kmou.ac.kr](mailto:Khpark@kmou.ac.kr), Tel: 051-410-4367

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: [mha1234@naver.com](mailto:mha1234@naver.com), Tel: 051-405-4953

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다량의 수소를 효과적으로 제어 혹은 제거해야 하지만 사고의 원인이 다양하고 수소분포와 거동이 매우 불규칙하기 때문에 폭발 저감을 위한 대책마련이 쉽지 않다.

수소 폭발의 위험을 제거하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 격납건물 내로 방출된 수소의 거동을 해석하기 위한 연구가 진행되었고[2]-[5] 수소를 제거하기 위한 피동형 수소 재결합기(passive autocatalytic recombiner, PAR)에 대한 연구 [6]-[12] 및 수소 누출시 수소폭발에 대한 연구가 진행되고 있다[13][14]. 하지만 수소 분출시 수소의 거동과 그에 따른 수소폭발이 격납건물 내부에 미치는 영향에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 격납건물 내부의 수소 분포를 분석한 연구[1]에서 제시한 폭발의 위험도가 높은 영역을 중심으로 폭발해석을 수행하며 수소 폭발이 격납건물의 건전성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 수학적 모델 및 계산조건

### 2.1 수학적 모델

폭발 계산에 적용된 모멘텀, 난류운동에너지 및 스칼라항에 대한 보존 방정식은 다음과 같다.

모멘텀 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_i u_j) = -\beta_v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \sigma_{i,j}) + F_{o,i} + \beta_v F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i \quad (1)$$

난류운동에너지 방정식은 식 (2)과 같다.

$$P_k = G_s + G_w + G_b + G_0 \quad (2)$$

$$G_s = \sigma_{i,j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$G_b = -\frac{1}{\rho} \frac{\mu_{eff}}{\sigma_b} g_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$G_0 = C_0 \beta_v \rho |\vec{u}| u^2 f_i \quad (5)$$

스칼라항에 대한 보존 방정식은 식 (6)과 같다

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \Phi) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \Gamma_\Phi \frac{\partial}{\partial x_j}(\Phi)) = S_\Phi \quad (6)$$

### 2.2 계산 격자 및 조건

본 논문은 APR1400 모델의 격납건물을 대상으로 유체해석 및 폭발 코드를 이용하여 해석을 수행하였으며 크기는 직경 46.94m, 높이 79.4m이다. 건물하부는 여러 개의 격벽과 파이프라인으로 이루어졌다. 반응로가 중앙에 있으며 2개의 증기발생기와 냉각펌프가 대칭으로 위치하고 그 사이는 격벽으로 이루어지며 고압관으로 연결되는 구조이다(Figure 1).

Figure 2는 계산에 사용된 모델 및 격자를 나타낸다. 격자수는 총 50만개이다.

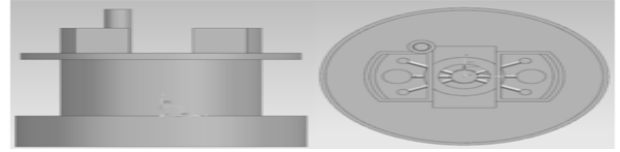


Figure 1: Inner shape of the containment building of the APR1400 nuclear plant

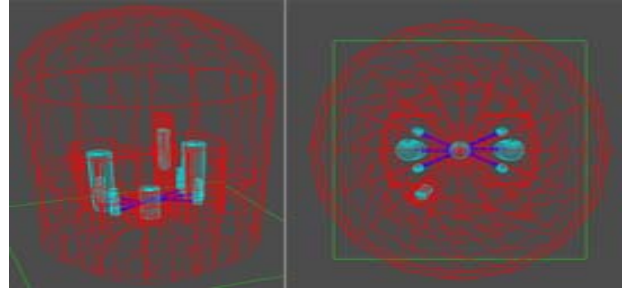


Figure 2: Calculation model and mesh

Figure 3은 점화위치를 나타낸다. 선행연구[1]에서 제시된 폭발 위험도가 높은 영역을 선정하였으며, 격납건물의 상부, 중부, 하부로 구분하였다. 상부의 연소지점 Point 1의 영역은 수소가 집중적으로 분출되는 사고 후 7000초 이후에도 수소폭발의 위험도가 없는데 이는 수소와 함께 다량으로 방출되는 스팀이 수소의 농도를 낮게 하며 동시에 공기와의 접촉을 방지하기 때문이다. 격납건물 하부에 모여 있던 수소가 부력에 의하여 상부로 상승하면서 공기와 혼합되는 과정과 함께 건물상부에 다량의 수소가 모이는 사고 후 33000초 이후에 큰 폭발의 위험성이 있다(Figure 4) 중부인 Point 2-4의 경우는 수소가 다량의 스팀과 혼합되면서 수소농도가 연소가능 영역에는 해당되지만 폭발 영역에는 미치지 못하기 때문에 연소는 가능하나 폭발의 위험도는 없다(Figure 5). 하부의 Point 5-7의 경우는 수소가 격납건물 하부에 모이는 8000초 이후부터 수소가 부력에 의해 올라가는 15000초 까지 충분한 수소와 공기의 혼합으로 폭발의 위험성이 있다(Figure 6). 하부의 Point 8의 경우는 수소가 격납건물 하부에 모이는 8000초 이후부터 수소가 부력에 의하여 올라가는 15000초 이후에도 30000초까지 충분한 수소가 남아있어 폭발의 위험성이 있다(Figure 7).

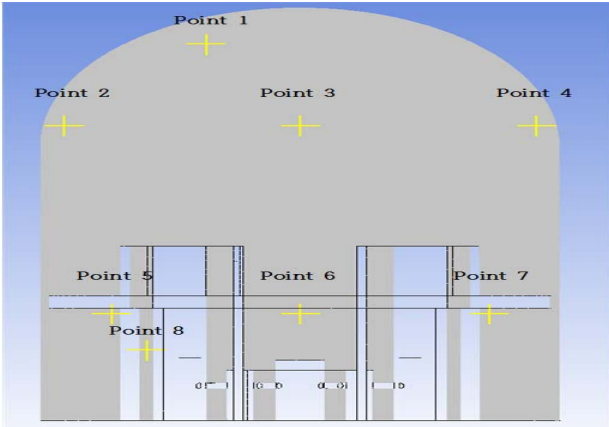


Figure 3: Ignition points

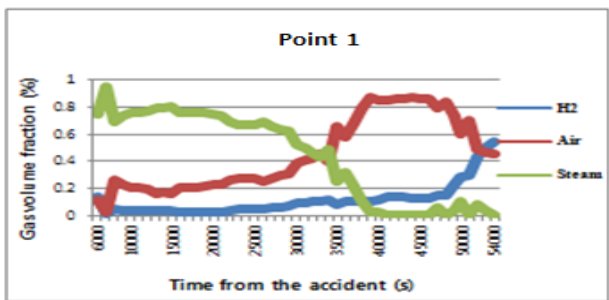


Figure 4: Gas volume fractions at Point 1

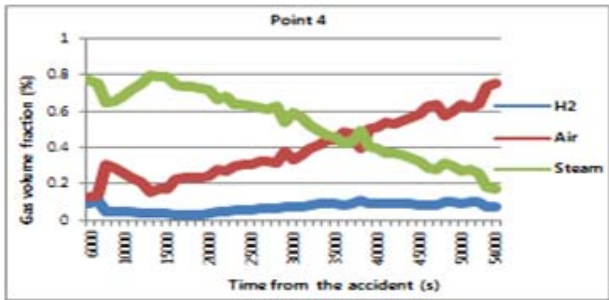
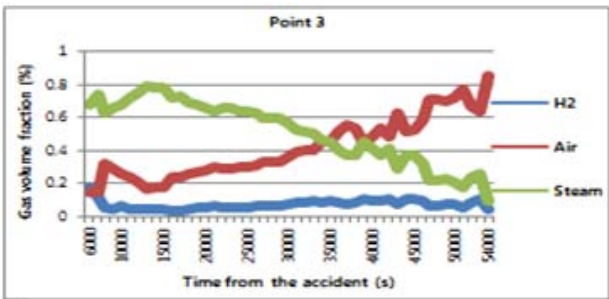
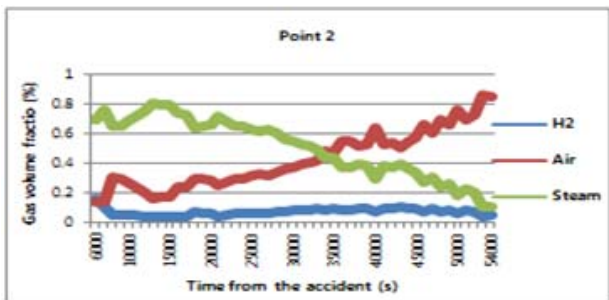


Figure 5: Gas volume fractions at Point 2-4

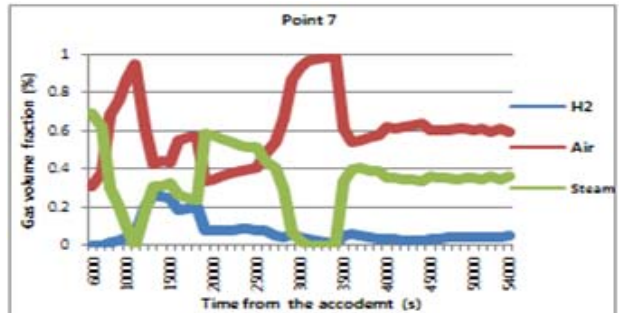
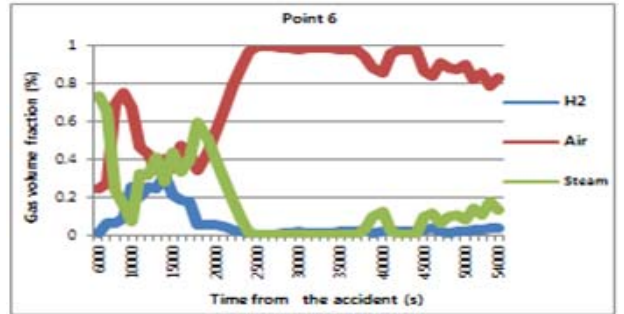
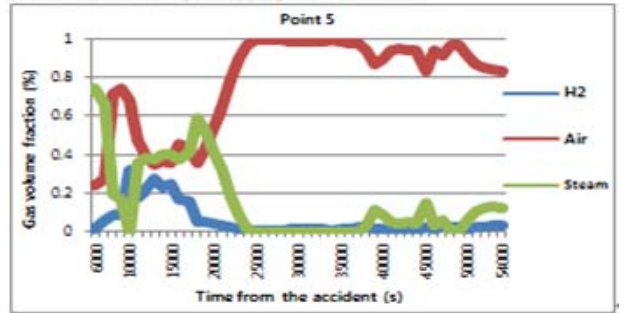


Figure 6: Gas volume fractions at Point 5-7

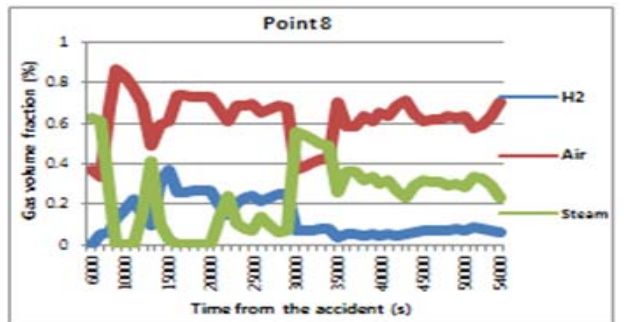


Figure 7: Gas volume fractions at Point 8

계산 조건은 Table 1과 같다. 선행연구[1]에서 제시한 폭발 위치에서 해석을 수행하였으며 조건은 폭발위해도가 가장 높은 경우를 선택하였다. 상부영역에서는 가스의 성분비가 수소 30%, 스팀 10%, 공기 60%이고 하부영역의 Point 5에서는 수소 20%, 스팀 30%, 공기 50%, Point 6에서는 수소 20%, 스팀 20%, 공기 60%, Point 7에서는 수소 30%, 스팀 10%, 공기 60%, Point 8에서는 수소 33%, 스팀 10%, 공기 57%이다. 상부영역인 Point 1에서의 수소량은 30000초 이후에 시간이 지남에 따라 증가됨으로 수소 총 질량(538kg)의 20%, 40%, 60%, 80%일 때를 해석조건으로 선정하였다.

**Table 1:** Volume fractions on ignition points

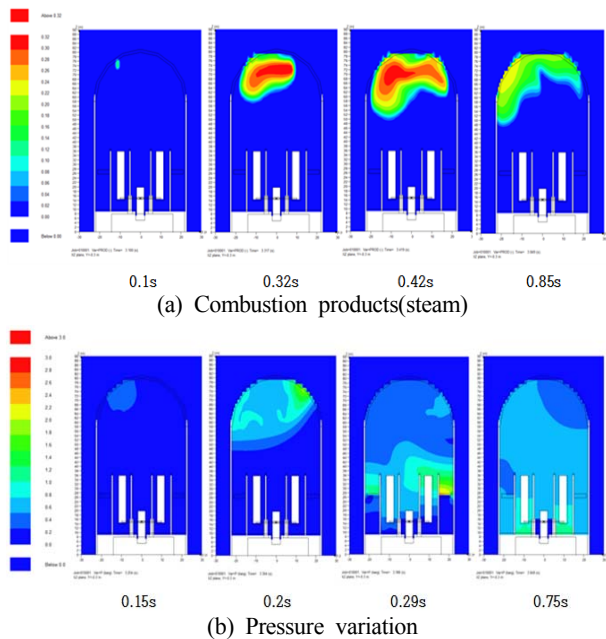
Cases	Combustion area	conditions			Hydrogen mass(kg)/percent(%)
		Volume fraction(%)			
		hydrogen	air	steam	
Case 1	Point 1	30	60	10	107.6/20
Case 2					215.2/40
Case 3					322.8/60
Case 4					430.4/80
Case 5	Point 5	20	50	30	129.46
Case 6	Point 6	20	60	20	129.46
Case 7	Point 7	30	60	10	194.2
Case 8	Point 8	33	57	10	62.3

### 3. 폭발결과 및 고찰

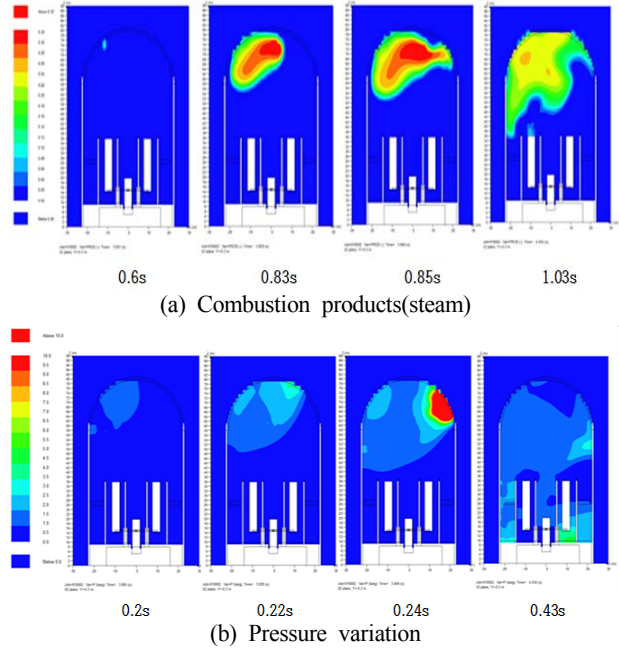
#### 3.1 수소폭발

Figure 8은 상부영역 Point 1에서 수소 107.6kg(20%)이 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 131.7 m/s이며 오른쪽 방향으로 빠르게 진행되는 모습을 보인다. 압력의 경우는 격납건물 오른쪽 상부에서 압력이 크게 발생한 후 격납건물 오른쪽 내부 구조물 벽면에 최대압력이 가해진다. 화염핵이 왼쪽 상부에 형성된 이후 화염면이 오른쪽으로 이동하면서 최대압력이 오른쪽 상부 벽면에 생성된다.

Figure 9은 상부영역 Point 1에서 수소 215.2kg(40%)가 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 470m/s이며 오른쪽 방향으로 빠르게 진행되는 모습을 보인다. 압력의 경우는 격납건물 오른쪽 상부에서 압력이 가장 크게 발생한 후 아래쪽에서 미약한 압력이 발생한다.

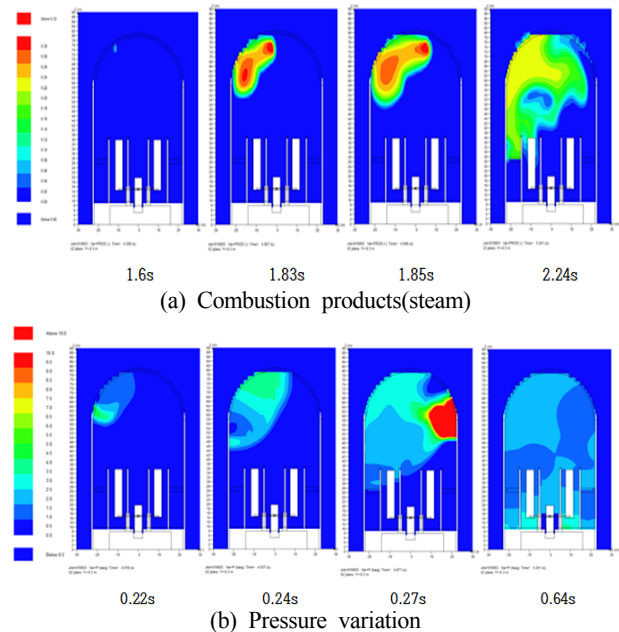


**Figure 8:** Combustion in the case of hydrogen mass 107.6kg(20%) at Point 1



**Figure 9:** Combustion in the case of hydrogen mass 215.2kg(40%) at Point 1

Figure 10은 상부영역 Point 1에서 수소 322.8kg(60%)가 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 513.3m/s이며 오른쪽과 아래쪽 방향으로 진행되는 모습을 보인다. 압력의 경우는 격납건물 오른쪽 중부에서 압력이 가장 크게 발생한 후 아래쪽으로 이동 한다. 화염이 왼쪽상부에서 하부와 오른쪽으로 이동해감에 따라 오른쪽 중부에 최대압력이 발생한 것으로 보인다.



**Figure 10:** Combustion in the case of hydrogen mass 322.8kg(60%) at Point 1



Figure 11은 상부영역 Point 1에서 수소 430.4kg(80%)가 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 556.7 m/s이며 오른쪽과 아래쪽 방향으로 진행되는 모습을 보인다. 압력의 경우는 격납건물 오른쪽 상부에서 압력이 가장 크게 발생한 후 아래쪽에서 압력이 발생한다. 화염이 왼쪽상부에서 발생하여 하부와 오른쪽 상부로 이동하지만 오른쪽으로 더욱 빠르게 이동하면서 오른쪽 상부에 최대압력이 발생한 것으로 생각된다.

Figure 12은 하부영역에 수소 129.46 kg이 모여 있을 때 Point 5에서 점화시의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 600m/s이며 오른쪽으로 연소된 이후 격납건물 상부로 진행된다. 압력의 경우는 격납건물 우측 하부에서 압력이 가장 크게 발생한다. 왼쪽 하부에서 화염핵이 발생한 직후에 폭발이 발생하는데 폭발압력효과 반대편 벽면에 최대 압력을 발생시킨다.

Figure 13은 하부영역에 수소 129.46 kg이 모여 있을 때 Point 6에서 점화시의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 380m/s이며 중앙격실을 중심으로 연소가 진행된다. 압력의 경우는 격납건물 하부 격벽들 사이에서 압력이 발생한 후 압력효과가 상부 중앙의 벽면에 큰 압력을 나타낸다. 화염핵의 생성후 화염이 내부구조물의 저항을 받아 위쪽으로 성장하는 모습을 나타내는데, 폭발압력과 역시 위쪽으로 진행하여 상부 중앙에 최대압력이 발생한 것으로 생각된다.

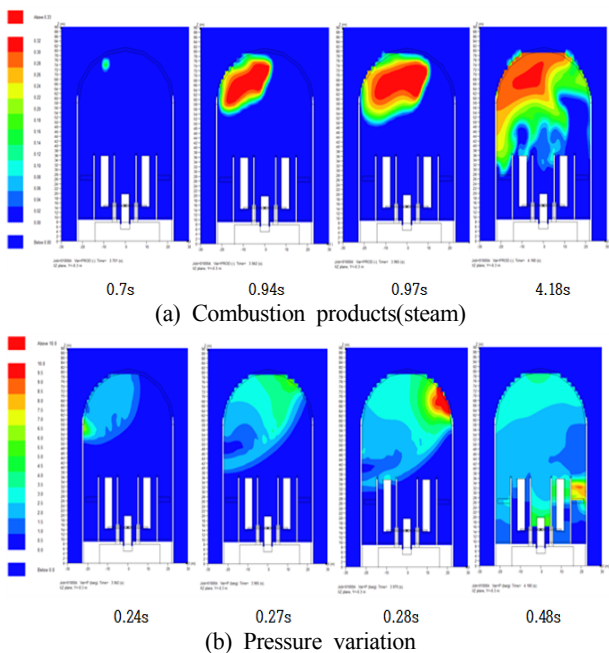


Figure 11: Combustion in the case of hydrogen mass 430.4kg(80%) at Point 1

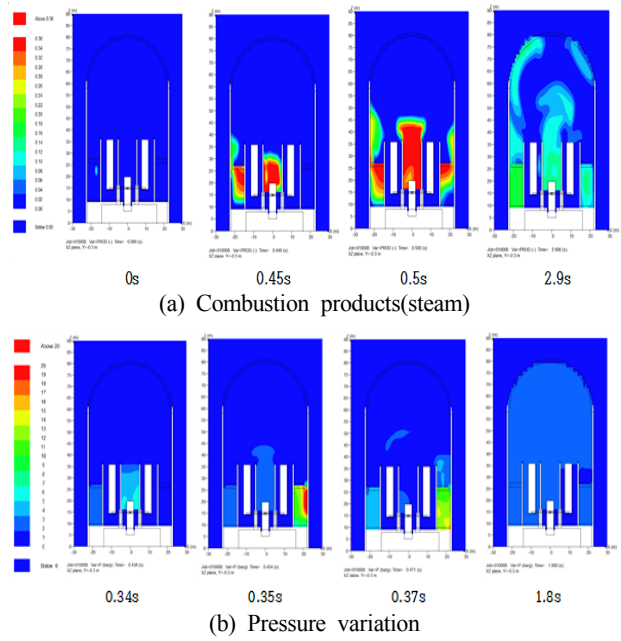


Figure 12: Combustion in the case of hydrogen mass 129.46kg at Point 5

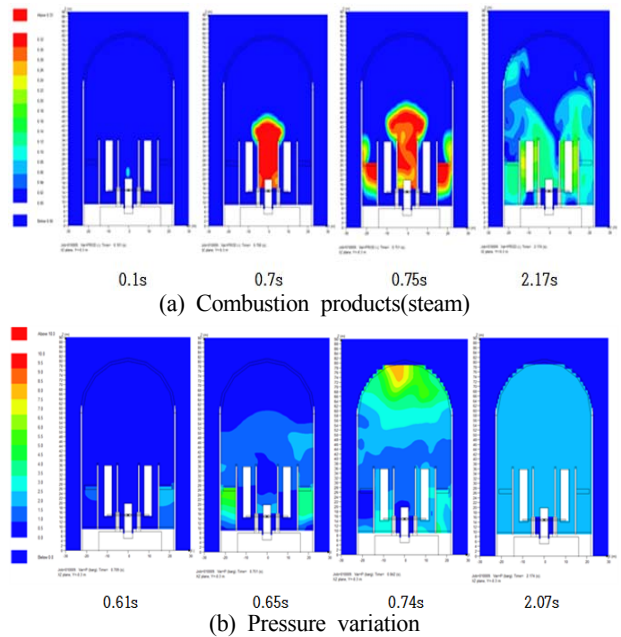


Figure 13: Combustion in the case of hydrogen mass 129.46kg at Point 6

Figure 14은 하부영역에 수소 194.2kg이 모여 있을 때 Point 7에서 점화시의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 553m/s이며 왼쪽과 위쪽으로 연소가 진행된다. 압력의 경우는 격납건물 좌측 하부에서 최대 압력이 발생한 후 돔 상부에 미약한 압력을 나타낸다. 우측에서 시작된 화염과 폭발의 압력이 좌측 벽면에 최대압력을 형성한다.

Figure 15은 하부영역 Point 8에서 수소 62.3kg이 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 200 m/s이며 위쪽으로 진행되는 모습을 보인다. 압력의 경우는 왼쪽 스팀발생기 내부에서 최대 압력이 발생한 후 격납건물 오른쪽 상부에서 크게 압력이 발생한 뒤 고르게 퍼져 나간다.

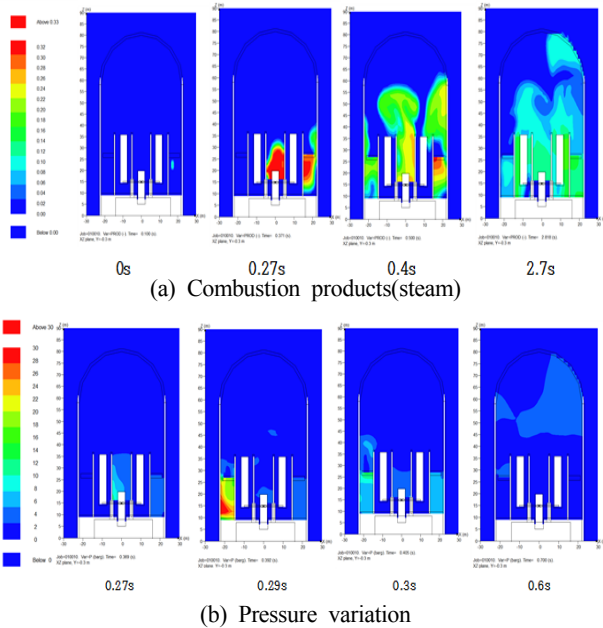


Figure 14: Combustion in the case of hydrogen mass 129.46kg at Point 7

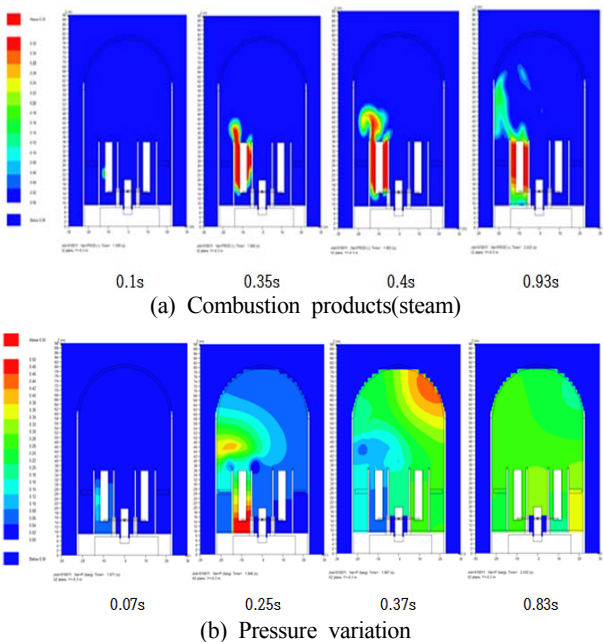


Figure 15: Combustion in the case of hydrogen mass 62.3kg at Point 8

### 3.2 최대압력이 격납건물에 미치는 영향

폭발 시 최대압력이 나타나는 지점에서 최대 압력을 구하기 위해 11개의 측정점을 생성하고 데이터를 그래프로 나타내었다. Figure 16은 측정점의 위치를 나타낸다. 상부 중앙에서부터 M1-M6, 하부 오른쪽, 왼쪽에 M7,8, 왼쪽 스팀발생기에 M9, 상부 왼쪽, 오른쪽에 M10, M11이 있다.

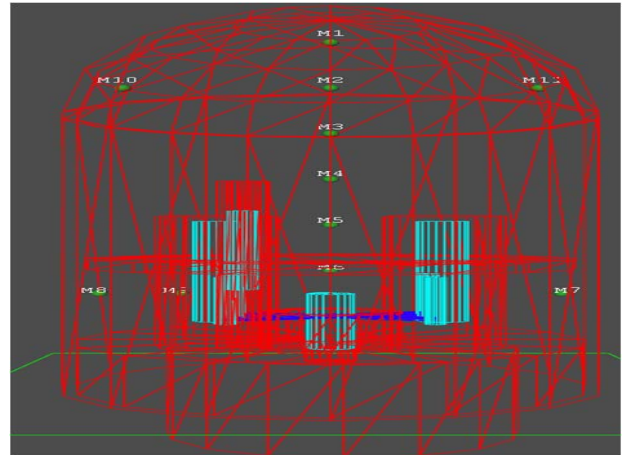
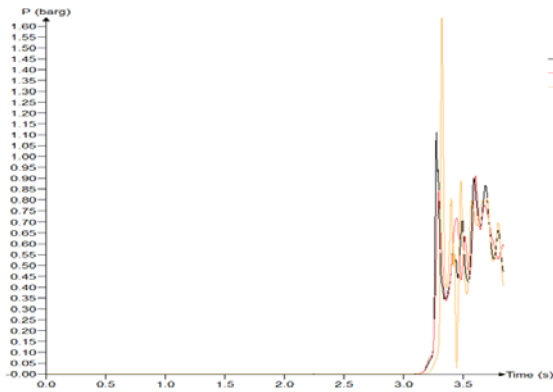


Figure 16: Monitoring points

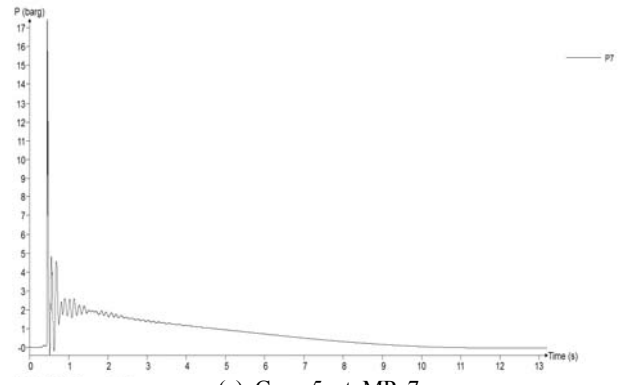
Figure 17은 상부영역에서 폭발 시 수소의 양이 20%, 40%, 60%, 80%인 Case 1, 2, 3, 4의 압력그래프를 측정위치 MP 1, 10, 11에 대하여 나타낸 것이다. 20%의 경우 최대압력이 걸리는 격납건물 오른쪽 상부에서 1.6barg로 낮은 압력을 나타내고 40%의 경우 격납건물 오른쪽 상부에서 최대압력 20barg가 나타난다. 60%의 경우 최대압력이 걸리는 격납건물 오른쪽 상부에서 60barg가 되며 80%의 경우 최대압력이 걸리는 격납건물 오른쪽 상부에서 75barg로 매우 높은 값을 나타낸다.

Figure 18은 하부영역에서 폭발 시 Case 5, 6, 7의 압력 그래프를 Mp 6, 7, 8에서 나타낸 것이다. Case 5의 경우 격납건물 우측 하부에서 최대 압력 17.5 barg가 되며 Case 6의 경우 격납건물 하부 중앙에서 최대압력 2.4barg를 나타낸다. Case 7의 경우 격납건물 하부 좌측에서 최대 압력 25barg로 큰 압력을 나타낸다. Case 8의 경우 왼쪽 스팀발생기에서 최대 압력 0.7barg를 나타낸다.

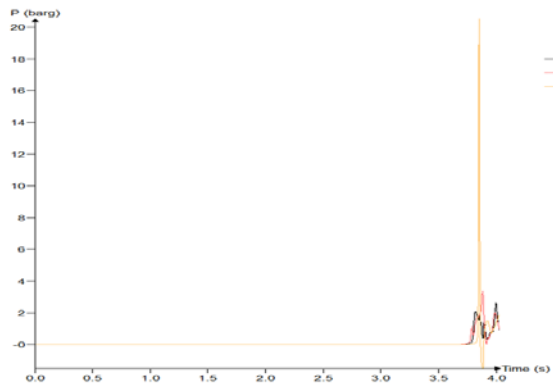
Ansys Workbench를 이용하여 각 Case에서 최대압력이 나타나는 부분에서 격납건물의 응력을 알아보았다. 격납건물의 벽면에 큰 충격압력을 미치지 않는 Case 6, 8을 제외하고 비교적 큰 압력을 미치는 Case 1~4, 5, 7의 경우에 대하여 격납건물의 벽면에 미치는 영향을 검토하였다. Case 1~4는 격납건물의 중부 오른쪽에 압력을 주었고 Case 5는 하부 오른쪽에, Case 7은 하부 왼쪽에 압력을 주었다. 압력을 가한 시간은 0.2초이고 0.1초 동안 0에서 최대압력까지 올라가고 0.1초 동안 0으로 떨어지게 주었다(Table 2).



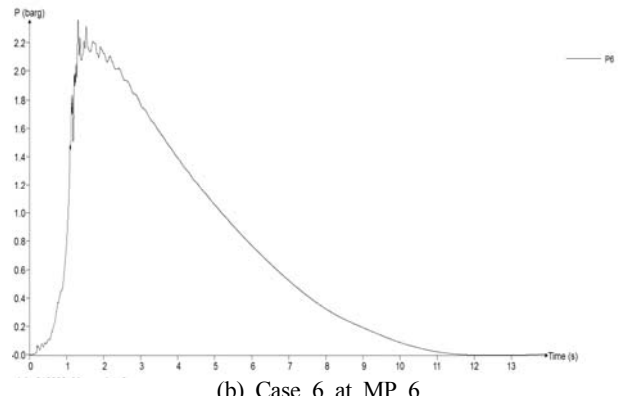
(a) Case 1(20%)



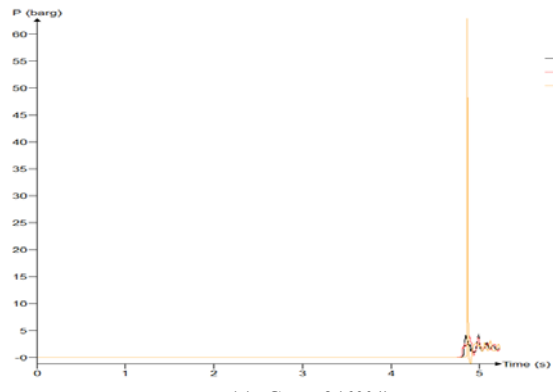
(a) Case 5 at MP 7



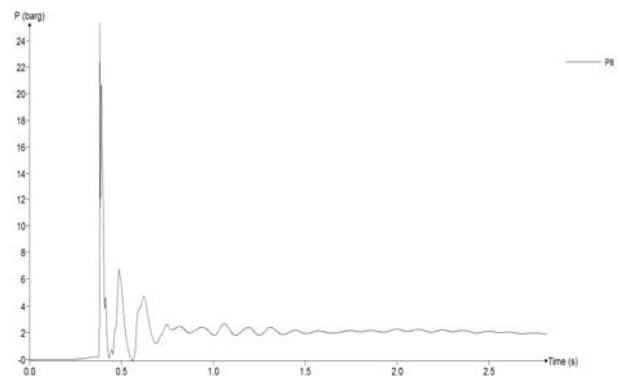
(b) Case 2(40%)



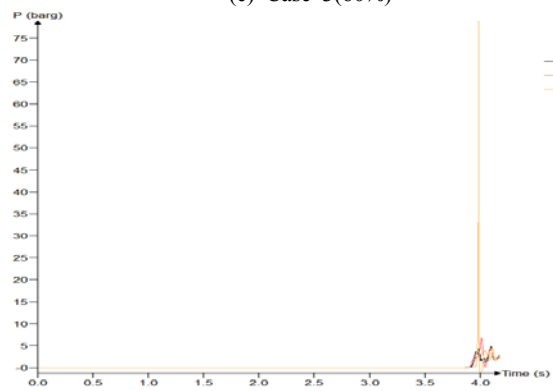
(b) Case 6 at MP 6



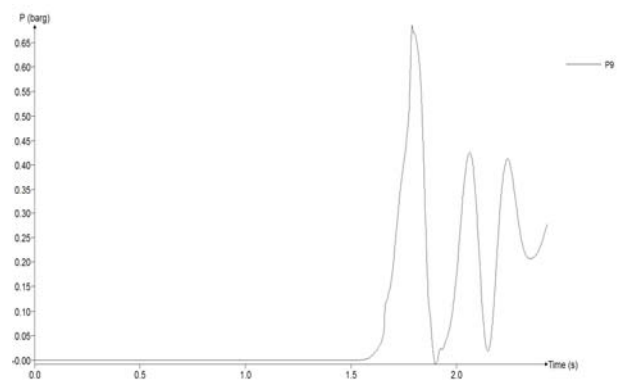
(c) Case 3(60%)



(c) Case 7 at MP 8



(d) Case 4(80%)



(d) Case 8 at MP 9

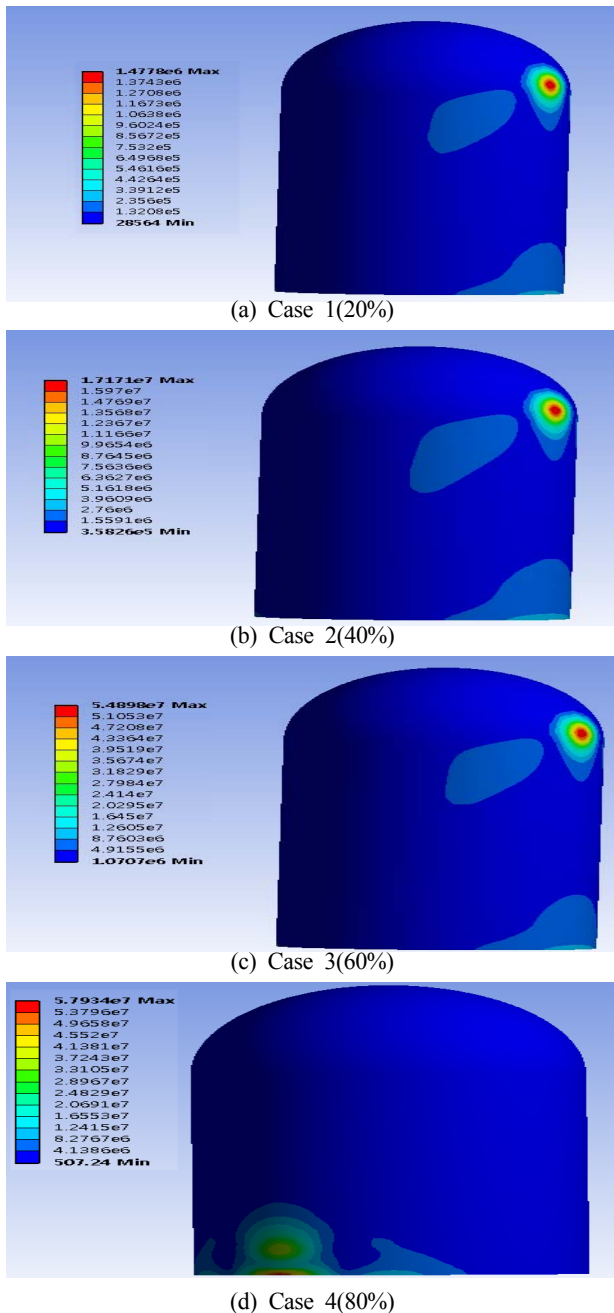
**Figure 17:** Impact pressure variations when Combustion takes place in the top of the containment (MP 1, 10, 11)

**Figure 18:** Impact pressure variations when Combustion takes place in the bottom of the containment

**Table 2:** Calculation conditions

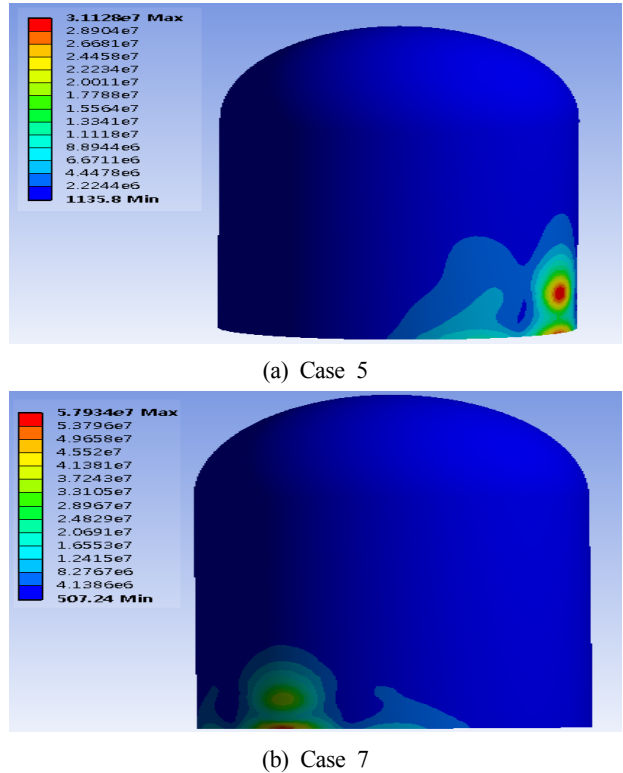
Time (s)	Pressure(MPa)					
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case7
0.0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.16	2	6	7.5	1.75	2.5
0.2	0	0	0	0	0	0

Figure 19은 상부에서 폭발 시 Case 1, 2, 3, 4의 응력을 나타낸다. Case 1의 경우 응력은 최대 1.4778MPa이 발생한다. Case 2의 경우 응력은 최대 17.171MPa이 나온다. Case 3의 경우 최대 응력은 54.898MPa이 나왔다. Case 4의 경우 최대응력은 68.459MPa이 나온다.



**Figure 19:** Stress distribution in the cases of the top of the containment

Figure 20은 Case 5, 7의 응력을 나타낸다. Case 5의 경우 최대 응력은 31.1128MPa이 나온다. Case 7의 경우 최대 응력은 57.934MPa이 나온다.



**Figure 20:** Stress distribution in the cases of the bottom of the containment

#### 4. 결 론

APR1400의 중대사고시 수소거동에 따른 수소폭발과 격납건물에 미치는 영향에 대해 해석을 수행한 본 연구를 요약하면 다음과 같다.

1) 격납건물 상부(Point 1)에서 폭발이 발생한 경우 점화점을 중심으로 화염이 확산되며 평균 연소속도는 수소량이 증가함에 따라 증가하였고 최대 압력 발생위치는 점화점의 반대방향 벽면이었다. 최대 충격압력은 수소량에 따라 증가하여 80%의 수소가 폭발하는 경우 7.5MPa로 매우 높은 압력을 나타냈으며 벽면 최대 응력도 크게 증가하였다.

2) 격납건물 하부(Point 5, 6, 7)에서 폭발이 발생한 경우 점화점을 중심으로 화염이 확산되며 최대 압력 발생위치는 Point 5의 경우 하부 우측에서 발생하였고 Point 6의 경우 상부 중앙의 벽면에 발생하였으며 Point 7의 경우 하부 좌측에서 발생하였다. Point 5와 Point 7의 경우 격납건물 하부 격벽에서 순간 최대응력은 각각 31.1128MPa과 57.934MPa로 매우 높은 값을 나타내었다.

3) 왼쪽 스팀발생기 내부(Point 8)에서 폭발이 발생한 경우 점화점을 중심으로 화염이 확산되며 격납건물 상부 우측에서 매우 낮은 최대 압력을 나타낸다.



이상을 종합하면 격납건물 상부에 전체수소의 40% 이상이 모였을 때와 하부 좌측, 우측에서 수소폭발이 발생할 경우 격납건물에 큰 충격 압력이 걸리고 순간 응력 또한 높게 나오는 것을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (원자력연구개발사업, No. 2012M2A8A4025897)

## References

- [1] K. Park, C. L. Khor, "Consideration on hydrogen explosion in APR 1400 containment building during small breakup loss of coolant accident," *Nuclear engineering and design*, vol. 293, pp. 458-467, 2015.
- [2] T. H. Hong, T. H. Kim, and C. R. Choi, "CFD analysis on the behavior of hydrogen and steam during a severe accident in the OPR1000 containment," *Proceedings of the KSME Fall Conference*, p. 2223, 2011 (in Korean).
- [3] J. T. Kim, S. W. Hong, S. B. Kim, and H. D. Kim, "Numerical analysis of the hydrogen-steam behavior in the APR1400 containment during a hypothetical total loss of feed water accident," *Journal of the Korean Society for Computational Fluids Engineering*, vol. 10, no.3, pp. 9-18, 2005 (in Korean).
- [4] H. C. Kim, N. D. Suh, and J. H. Park, "Hydrogen behavior in the IRWST of APR1400 following a station blackout," *International Journal of the Korean Nuclear Society*, vol. 38, no. 2, pp. 195-200, 2006.
- [5] K. H. Park and K. H. Bae, "Hydrogen concentration variation and examination of PAR installation reactor containment building during hydrogen release from different direction failure places," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 278, pp. 229-238, 2014.
- [6] J. Deng and X. W. Cao, "A study on evaluating a passive autocatalytic recombiner PAR-system in the PWR large-dry containment," *Nuclear engineering and design*, vol. 238, no. 10, pp. 2554-2560, 2008.
- [7] J. W. Park, B. R. Koh, and K. Y. Suh, "Demonstrative testing of honeycomb passive autocatalytic recombiner for nuclear power plant," *Nuclear engineering and design*, vol. 241, no. 10, pp. 4280-4288, 2011.
- [8] K. R. Kim, S. W. Paek, H. J. Choi, and H. Chung, "Catalytic recombination of hydrogen and oxygen in air stream," *Journal of industrial and engineering chemistry*, vol. 7, no. 2, pp. 116-120, 2001.
- [9] B. Gera, P. K. Sharma, R. K. Singh, and K. K. Vaze, "CFD analysis of passive autocatalytic recombiner interaction with atmosphere," *Journal of Kerntechnik*, vol. 76, no. 2, pp. 98-103, 2011.
- [10] F. Morfin, J. C. Sabroux, and A. Renouprez, "Catalytic combustion of hydrogen for mitigating hydrogen risk in case of a severe accident in a nuclear power plant: study of catalysts poisoning in a representative atmosphere," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 47, pp. 47-58, 2004.
- [11] N. Meynet, A. Bentaib, and V. Giovangigli, "Impact of oxygen starvation on operation and potential gas-phase ignition of passive auto-catalytic recombiners," *Combustion and flame*, vol. 161, no. 8, pp. 2192-2202, 2014.
- [12] E. Bachellerie, F. Arnould, M. Auglaire, B. de Boeck, O. Braillard, B. Exkardt, F. Ferroni, and R. Moffett, "Generic approach for designing and implementing a passive autocatalytic recombiner PAR-system in nuclear power plant containments," *Nuclear engineering and design*, vol. 221, no. 1, pp. 151-165, 2003.
- [13] J. Taveau, "Explosion hazards related to hydrogen releases in nuclear facilities," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 24, no. 1, pp. 8-18, 2011.
- [14] E. Kim, J. Park, J. H. Cho, and I. Moon, "Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea," *International journal of hydrogen energy*, vol. 38, no. 3, pp. 1737-1743, 2013.