



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 중대사고시 격납건물 내부 수소폭발 위험도 및 PAR 구조에 대한 연구

A Study on Hydrogen Explosion Risk and PAR Structure in  
Containment Building During Severe Accident



지도교수 박 권 하

2017 년 2 월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

류 명 록

본 논문을 류명록의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 조 종 래 (인)

위 원 : 이 영 호 (인)

위 원 : 박 권 하 (인)



2016 년 12 월 15 일

한국해양대학교 일반대학원

# 목 차

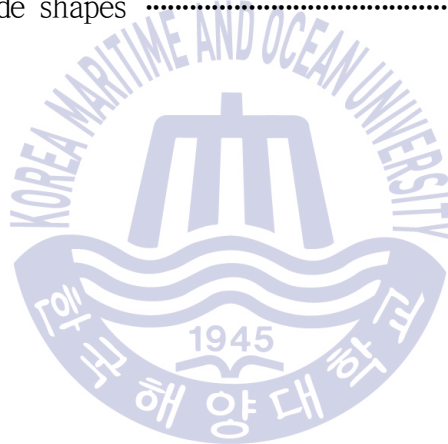
|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| List of Tables .....           | iii |
| List of Figures .....          | iv  |
| Abstract .....                 | vii |
| 1. 서 론                         |     |
| 1.1 연구배경 .....                 | 1   |
| 1.2 연구 목적 및 내용 .....           | 3   |
| 2. 수소 폭발에 대한 계산적 고찰            |     |
| 2.1 수학적 모델 및 계산 조건 .....       | 4   |
| 2.1.1 수학적 모델 .....             | 4   |
| 2.1.2 계산 조건 .....              | 6   |
| 2.2 폭발 계산 결과 및 고찰 .....        | 12  |
| 2.2.1 수소폭발 .....               | 12  |
| 2.2.2 최대압력이 격납건물에 미치는 영향 ..... | 37  |
| 2.2.3 수소 폭발 요약 .....           | 45  |
| 3. PAR의 구조에 따른 성능 해석           |     |
| 3.1 수학적 모델 및 계산조건 .....        | 46  |
| 3.1.1 수학적 모델 .....             | 46  |
| 3.1.2 계산조건 .....               | 48  |
| 3.2 내부 구조 해석 및 고찰 .....        | 45  |
| 3.2.1 성능 평가 방법 .....           | 55  |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 3.2.2 다단 촉매 해석 .....       | 56 |
| 3.2.3 촉매 형상 해석 .....       | 67 |
| 3.2.4 요약 .....             | 71 |
| 3.3 외부가이드 구조해석 및 고찰 .....  | 72 |
| 3.3.1 외부가이드 성능 평가 방법 ..... | 72 |
| 3.3.2 해석결과 .....           | 73 |
| 3.3.3 요약 .....             | 85 |
| 4. 결론 .....                | 86 |
| 참고문헌 .....                 | 87 |



## List of Tables

|                |                                |    |
|----------------|--------------------------------|----|
| <b>Table 1</b> | Calculation conditions .....   | 11 |
| <b>Table 2</b> | Calculation conditions .....   | 42 |
| <b>Table 3</b> | Cases on catalyst shapes ..... | 53 |
| <b>Table 4</b> | Cases on guide shapes .....    | 54 |



## List of Figures

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Fig. 2.1</b> Calculation model .....                                                                                   | 7  |
| <b>Fig. 2.2</b> Calculation mesh .....                                                                                    | 7  |
| <b>Fig. 2.3</b> Combustion in the case of hydrogen mass 129.46kg at Point 6 .....                                         | 8  |
| <b>Fig. 2.4</b> Gas volume fraction of hydrogen, air and steam at points .....                                            | 10 |
| <b>Fig. 2.5</b> Combustion product and pressure propagation in the case<br>of hydrogen mass 107.6kg(20%) at Point 1 ..... | 14 |
| <b>Fig. 2.6</b> Combustion product and pressure propagation in the case<br>of hydrogen mass 215.2kg(40%) at Point 1 ..... | 17 |
| <b>Fig. 2.7</b> Combustion product and pressure propagation in the case<br>of hydrogen mass 322.8kg(60%) at Point 1 ..... | 20 |
| <b>Fig. 2.8</b> Combustion product and pressure propagation in the case<br>of hydrogen mass 430.4kg(80%) at Point 1 ..... | 23 |
| <b>Fig. 2.9</b> Combustion product and pressure propagation in the case<br>of hydrogen mass 129.46kg at Point 5 .....     | 26 |
| <b>Fig. 2.10</b> Combustion product and pressure propagation in the case<br>of hydrogen mass 129.46kg at Point 6 .....    | 29 |
| <b>Fig. 2.11</b> Combustion product and pressure propagation in the case<br>of hydrogen mass 129.46kg at Point 7 .....    | 32 |
| <b>Fig. 2.12</b> Combustion product and pressure propagation in the case<br>of hydrogen mass 62.3kg at Point 8 .....      | 35 |
| <b>Fig. 2.13</b> Monitoring points .....                                                                                  | 37 |
| <b>Fig. 2.14</b> Impact pressure variations when combustion takes place in<br>the top of the containment .....            | 39 |
| <b>Fig. 2.15</b> Impact pressure variations when combustion takes place in                                                |    |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| the bottom of the containment .....                                                                                  | 41 |
| <b>Fig. 2.16</b> Stress distribution in the cases of the top of the containment .....                                | 43 |
| <b>Fig. 2.17</b> Stress distribution in the cases of the bottom of the<br>containment .....                          | 44 |
| <b>Fig. 3.18</b> PAR inside structures .....                                                                         | 49 |
| <b>Fig. 3.19</b> Calculation grids .....                                                                             | 50 |
| <b>Fig. 3.20</b> Structures of the guide .....                                                                       | 51 |
| <b>Fig. 3.21</b> Calculation mesh .....                                                                              | 52 |
| <b>Fig. 3.22</b> Evaluation criteria for possibility of spontaneous ignition .....                                   | 55 |
| <b>Fig. 3.23</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>catalyst gap distance 50mm .....          | 56 |
| <b>Fig. 3.24</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>catalyst gap distance 100mm .....         | 57 |
| <b>Fig. 3.25</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>catalyst gap distance 200mm .....         | 58 |
| <b>Fig. 3.26</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>catalyst gap distance 300mm .....         | 59 |
| <b>Fig. 3.27</b> Spontaneous combustion area with gap distance variation .....                                       | 60 |
| <b>Fig. 3.28</b> Initial hydrogen volume percentage for spontaneous<br>combustion and hydrogen reduction rates ..... | 61 |
| <b>Fig. 3.29</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>1-Step catalyst .....                     | 62 |
| <b>Fig. 3.30</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>2-Step catalysts .....                    | 63 |
| <b>Fig. 3.31</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>3-Step catalysts .....                    | 64 |
| <b>Fig. 3.32</b> Spontaneous combustion area with the number of the steps .....                                      | 65 |
| <b>Fig. 3.33</b> Initial hydrogen volume percentage for spontaneous                                                  |    |



|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| combustion and hydrogen reduction rates .....                                                                        | 66 |
| <b>Fig. 3.34</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>cross over type .....                     | 67 |
| <b>Fig. 3.35</b> Hydrogen concentration and temperature distribution of<br>hexagon type .....                        | 68 |
| <b>Fig. 3.36</b> Spontaneous combustion area with structure shape variation .....                                    | 69 |
| <b>Fig. 3.37</b> Initial hydrogen volume percentage for spontaneous<br>combustion and hydrogen reduction rates ..... | 70 |
| <b>Fig. 3.38</b> Measurement method of hydrogen induction area .....                                                 | 72 |
| <b>Fig. 3.39</b> Flow behavior upward flow .....                                                                     | 74 |
| <b>Fig. 3.40</b> Induced area on upward flow .....                                                                   | 75 |
| <b>Fig. 3.41</b> Induced hydrogen flow rate .....                                                                    | 76 |
| <b>Fig. 3.42</b> Flow behavior sideward flow .....                                                                   | 78 |
| <b>Fig. 3.43</b> Induced area on sideward flow .....                                                                 | 79 |
| <b>Fig. 3.44</b> Induced hydrogen flow rate .....                                                                    | 80 |
| <b>Fig. 3.45</b> Flow behavior downward flow .....                                                                   | 82 |
| <b>Fig. 3.46</b> Induced area on downward flow .....                                                                 | 83 |
| <b>Fig. 3.47</b> Induced hydrogen flow rate .....                                                                    | 84 |

# A Study on Hydrogen Explosion Risk and PAR Structure in Containment Building During Severe Accident

Myeong Rok Ryu

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School of  
Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

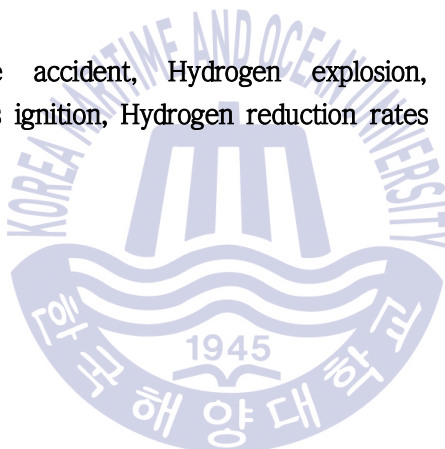
A massive earthquake of Richter scale 9.0 followed by a tsunami with waves of 10 to 14m struck the Fukushima Daiichi(FD) nuclear power plant operated by Tokyo Electric Power Company(TEPCO). The power of nuclear power plant was lost, so cooling systems did not operate, and then the accident of hydrogen explosion was occurred. Due to this accident, the hydrogen explosion in severe accident was concerned again.

The hydrogen must be effectively controled or removed for defending the hydrogen explosion, but because of various accident causes and irregularity of hydrogen distribution and behavior, preparing countermeasure for explosion risk reduction is difficult.

In this study, the explosion risk according to hydrogen behavior in severe accident is evaluated, and the new structure of PAR is proposed and analyzed, hydrogen explosion is simulated using the previews results and analyzed at the specified locations in the containment building. Flames and pressure propagations are discussed, and the effect of the pressure impact on a wall in analyzed. The result shows that the high pressures impact on the building wall in the cases of the top and the bottom explosions. A multi-step PAR is

proposed and analyzed. The distant between catalysts in firstly tested, and the analysis shows the distant 100mm is the best performance. Then two-step and three-step PAR are simulated and the results are compared with the results of the single step. The multi-step PAR reduces the spontaneous ignition problem and increases the hydrogen reduction rate radically. Two catalyst shapes of crossover and hexagon are proposed and analyzed, and the results are compared with those of conventional honeycomb. Hexagon shapes shows the best performance. As the outer structure of PAR, the guide vane is proposed, and studied. The vane having 150mm hight, 60° angle and attached between vane and catalyst is the best in the case of upward flow. The structure of 150mm hight, 100mm distance and 60° angle is the best in the sideward case, and the structure of 50mm hight, 60° angle and direct attached is the best.

**KEY WORDS:** Severe accident, Hydrogen explosion, Hydrogen flow, PAR, Spontaneous ignition, Hydrogen reduction rates



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

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.(Park & Khor, 2015) 강타한 파도에 의해 전력이 끊겼고 냉각장치가 정상 작동을 하지 못하면서 폭발이 일어나는 사고가 발생했다.

원자로 노심의 열이 제거되지 못하면 핵연료 피복재로 사용되는 지르칼로이(Zircaloy)와 같은 금속이 고온 상태에서 수증기와 산화 반응하여 수소(Hydrogen)를 발생 시킨다. 발생한 수소는 격납건물로 방출되는데, 여러 요인들에 의하여 방출된 수소가 연소하는 경우에 화염의 가속으로 인하여 수소폭발로 이어질 수 있다.(Hong et all., 2011) 수소는 폭발성이 매우 강하여 폭발 발생 시 다중방어벽을 훼손하고 다량의 방사능 물질을 방출시키기 때문에 노심용융과 함께 발생하는 수소를 효과적으로 제어, 제거해야 하지만 사고 원인의 다양성과 수소분포, 거동의 불규칙성 때문에 폭발 저감을 위한 대책마련이 쉽지 않다.(Park & Ryu, 2016)

수소폭발을 막기 위해 먼저 격납건물 내부로 수소 분출시 수소 분포 및 거동을 알아볼 필요가 있다. Park and Khor (2015)은 격납건물 내부로 수소 분출시 수소 분포 및 거동에 대해 연구하였다. 격납건물 내부로 스팀과 수소가 방출되고 다시 스팀이 방출 되면서 격납건물 상부에 뭉쳐 있던 수소가 격납건물 벽면을 타고 하부로 내려왔고 방출이 종료된 후 격납건물 상부로 다시 올라가 뭉치는 현상을 보였다. 그 외에도 수소 분포와 거동에 대한 연구가 진행되고 있다.(Hong et all., 2011; Lee & Park, 2002)

격납건물 내부로 방출된 수소는 여러 요인에 의하여 수소폭발을 야기하기 때문에 방출된 수소를 제어, 제거해야만 한다. 수소 제어를 위한 수소제어기구(Hydrogen Mitigation System, HMS)에 대한 연구가 진행되고 있다. 수소 제어기구로는 피동 촉매식 수소 재 결합기(Passive Autocatalytic Recombiner, PAR)와 수소점화기(Igniter)가

있다.(Ryu & Park, 2016) PAR는 외부 에너지 공급 없이, 구조 형상에 따른 자연 대류 유동에 의해 수소 혼합물이 유입되고 촉매 장치의 재결합 반응을 거쳐 생성물이 배출되는 피동식 작동 방식을 가지고 있고 촉매 반응 특성으로 인해 낮은 온도와 가연한계 이하의 희박한 수소 농도에서도 작동하는 장점이 있다.(Reinecke et al., 2010) 때문에 수소를 제어, 제거하는데 보편적으로 사용되고 있고 많은 연구가 진행되고 있다.(Reinecke et al., 2010; Deng & Cao, 2008; Huang et al., 2011) 수소점화기는 가연성 혼합가스를 인위적으로 점화하여 빠른 속도로 수소를 제거한다.(Fineschi et al., 1996) Igniter에 의해 연소되기 위해서는 수소 농도가 4%에 이르러야 한다.(Liang et al., 2016) 때문에 PAR와 Igniter를 함께 사용하는 연구가 진행되고 있다.(Fineschi et al., 1996; Liang et al., 2016; Heck et al., 1995)

PAR 자발화와 Igniter의 임계 수소농도 이상에서의 작동은 수소폭발을 유도하는 위험이 있기 때문에 Spray를 설치하는 방법과 격납건물내연료재장전수탱크(In-containment Refueling Water Storage Tank, IRWST) 환기구에 플랩을 설치하는 등의 방법이 연구되어 지고 있다. Huang et al. (2011)은 격납건물 내부에 Spray를 설치하여 격납건물 내부의 온도와 압력에 미치는 영향을 연구하였다. 격납건물 내부에 Spray를 설치하면 평균온도와 압력이 낮아져 Igniter와 같이 사용하면 연소를 위축시키고 화염의 확산을 억제 할 수 있다. Kim et al. (2005)은 IRWST 환기구에 플랩을 설치하였을 때 격납건물 내부의 수소와 수증기의 거동에 관한 연구를 하였다. IRWST 환기구에 플랩을 설치하면 수소가 방출되는 시기에 IRWST 내부의 수증기 농도가 낮고 산소가 지속적으로 공급되어 수소혼합 기체는 연소발생시 화염의 가속 및 초음속연소로의 천이(Delagation to Detonation, DDT) 가능성을 없애준다.

이러한 많은 연구에도 불구하고 격납건물 내부의 수소거동과 수소폭발에 대한 명확한 분석이 이루어지지 않았고 건물 내부에 무작위로 분포하는 수소의 효과적인 제거 방법이 제시되지 못하고 있다. 최근 연구되고 있는 수소거동에 대한 3차원 해석의 결과를 종합하여 수소폭발 위험도를 평가하고 효과적인 수소저감에 대한 연구가 요구되고 있다.

## 1.2 연구 목적 및 내용

Fukushima 원자력 발전소 폭발 사고로 중대사고시 수소폭발에 대한 관심이 재조명되고 있다. 격납건물 내부의 수소폭발은 수소, 수증기, 공기 유동과 밀접한 관계가 있다. 중대사고시 노심 냉각 실패는 수증기와 핵연료 피복재의 산화반응으로 수소를 발생시키고 발생한 수소는 격납건물 내부로 방출된다. 여러 요인들에 의해 수소가 점화하게 되면 화염의 가속으로 폭발이 일어날 수 있다. 수소폭발은 격납건물을 파손시키고 2차 피해를 발생시킬 우려가 있어 수소폭발을 방지 하기 위한 연구가 진행되어야 한다.

본 논문에서는 수소폭발의 위해도 평가 및 PAR의 성능을 향상시키기 위한 연구를 진행하였다. Park and Khor (2015)의 선행 논문의 수소 거동을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 수소 폭발 위해도를 평가하였으며 수소 저감을 위한 PAR의 내, 외부 형상을 변경하여 효율과 자발화 억제에 대해 연구하였다. 한국식 PAR 촉매부 형상인 Honeycomb 타입을 2단 촉매부로 나누어 촉매부간의 거리(50, 100, 200, 300mm)를 변경하였을 때의 성능분석과 촉매부 개수(1, 2, 3), 형상(Cross over, Hexagon)을 변경하였을 때의 성능 분석을 수행 하였다. 또한 PAR 외부에 가이드를 부착하여 수소 유도 면적 및 유량을 분석하였다. 가이드의 높이(크기)를 50, 100, 150mm, 촉매부와 거리 0, 50, 100mm, 가이드의 각도를 30, 60, 120, 150° 로 바꾸어 유속 1m/s일 때 바람의 방향 0, 90, 180° 에서 해석을 수행하였다.

## 제 2 장 수소 폭발에 대한 계산적 고찰

### 2.1 수학적 모델 및 계산 조건

#### 2.1.1 수학적 모델

폭발 계산에 적용된 보존 방정식은 다음과 같다.

연속방정식, 에너지 보존방정식, 등의 스칼라 항에 대한 보존방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i \Phi) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \Gamma_\Phi \frac{\partial}{\partial x_j}(\Phi)) = S_\Phi \quad (2-1)$$

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_i u_j) = -\beta_v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \sigma_{i,j}) + F_{o,i} + \beta_v F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i \quad (2-2)$$

$$F_{o,i} = -\rho \left| \frac{\partial \beta}{\partial x_i} \right| |u_i| |u_i| \quad (2-3)$$

$F_{o,i}$ 와  $F_{w,i}$ 는 유체저항을 나타내고  $\sigma_{i,j}$ 는 응력 텐서이다.

난류운동에너지 방정식은

$$P_k = G_s + G_w + G_b + G_0 \quad (2-4)$$

$$G_s = \sigma_{i,j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2-5)$$

$$G_b = -\frac{1}{\rho} \frac{\mu_{eff}}{\sigma_b} g_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2-6)$$

$$G_0 = C_0 \beta_v \rho |\vec{u}| u_i^2 f_i \quad (2-7)$$

$G_s$ 는 흐름전단응력,  $G_w$ 는 벽면전단응력,  $G_b$ 는 부력,  $G_0$ 는 하위격자객체,  $P_k$ 는 난류 에너지 생성 항 이다.

위 식에서  $\beta_v$ 는 체적기공률,  $\sigma$ 는 Prandtl-Schmidt 수,  $\mu_{eff}$ 는 유효점성계수,  $f$ 는 하위격자 장애물 난류 생성 항을 나타낸다.





### 2.1.2 계산 조건

APR1400 모델의 격납건물을 대상으로 FLACS(Wikipedia, 2013) 코드를 이용해 모델링, 격자생성, 폭발해석을 수행하였다. Fig. 2.1은 모델링 형상을 나타내고 Fig. 2.2은 격자생성을 나타낸다. 격자는 육면체이며 50만개 이상이다. 계산조건을 설정하기 위해 Park and Khor (2015)의 선행 연구에서 수소, 공기, 스팀 분포 데이터를 참고하였다. Fig. 2.3은 점화 위치를 나타내고 Fig. 2.4는 각 위치에서 수소, 공기, 스팀 분포를 시간에 따른 그래프로 표현한 것이다. 점화 위치는 선행 연구에서 제시된 폭발 위험도가 높은 영역을 선정하였으며, 격납건물의 상부, 중부, 하부로 구성되었다. 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 건물 상부에 다량의 수소가 모이는 사고 후 33000초 이후에 큰 폭발의 위험성이 있다. 중부인 Point 2-4의 경우는 수소가 다량의 스팀과 혼합되면서 수소농도가 연소가능 영역에는 해당되지만 폭발 영역에는 미치지 못하기 때문에 연소는 가능하나 폭발의 위험도는 없다. 하부의 Point 5-7의 경우는 수소가 격납건물 하부에 모이는 8000초 이후부터 수소가 부력에 의해 올라가는 15000초 까지 충분한 수소와 공기의 혼합으로 폭발의 위험성이 있다. 스팀발생기의 Point 8의 경우는 수소가 격납건물 하부에 모이는 8000초 이후부터 수소가 부력에 의하여 올라가는 15000초 이후에도 30000초까지 충분한 수소가 남아있어 폭발의 위험성이 있다.

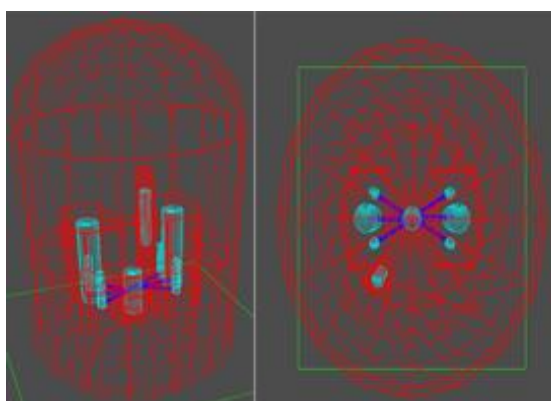


Fig. 2.1 Calculation model

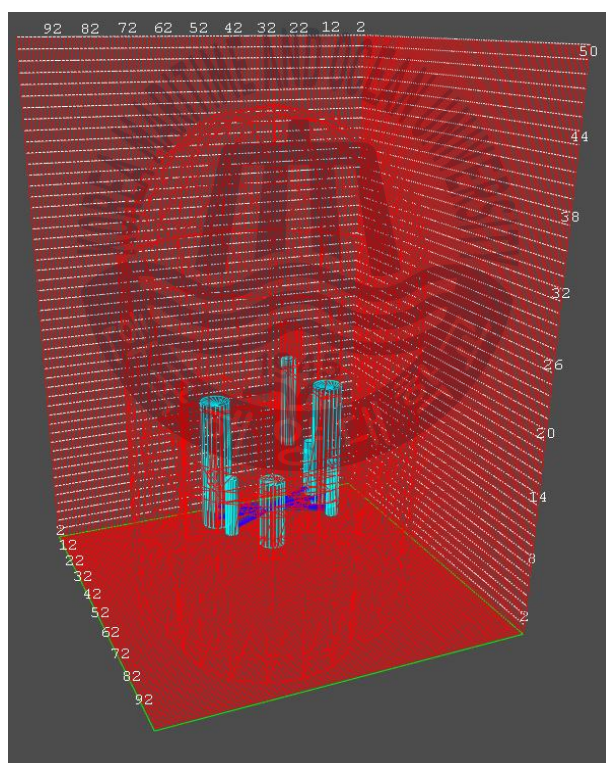


Fig. 2.2 Calculation mesh

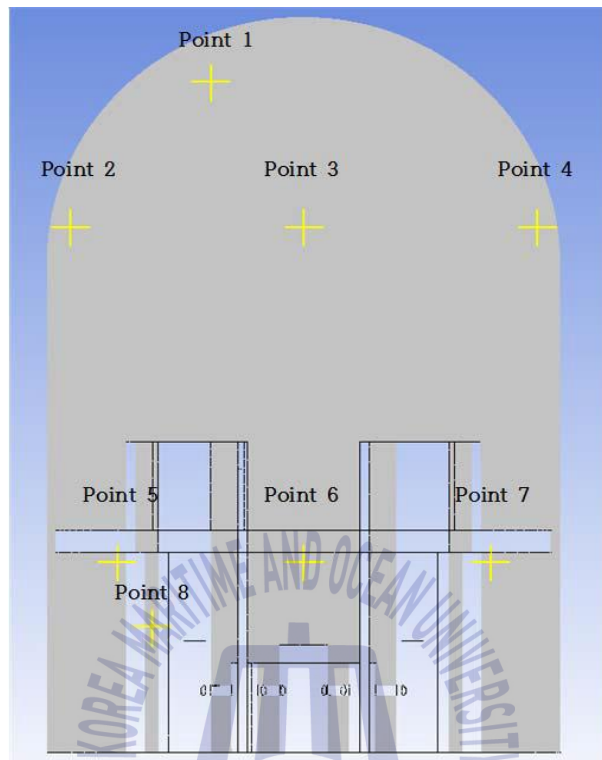
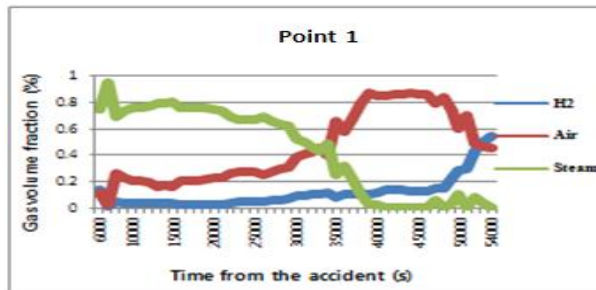
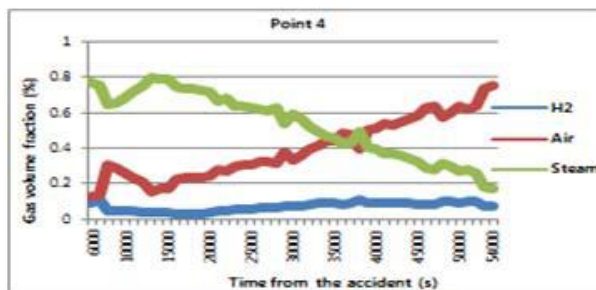
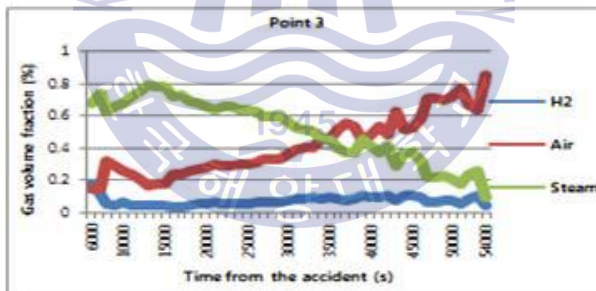
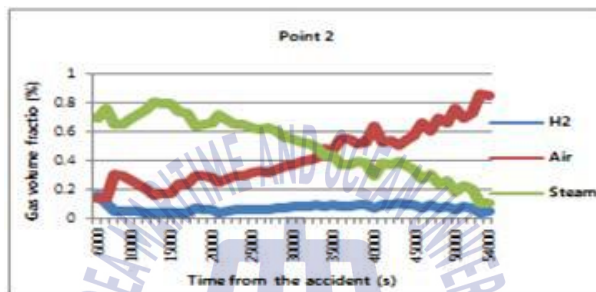


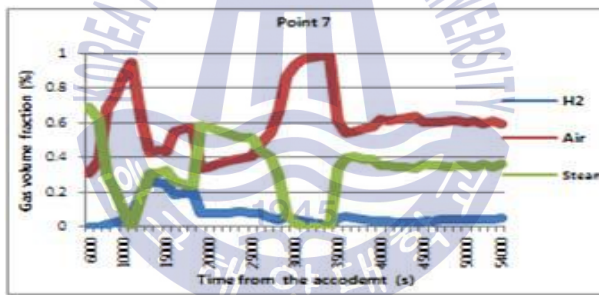
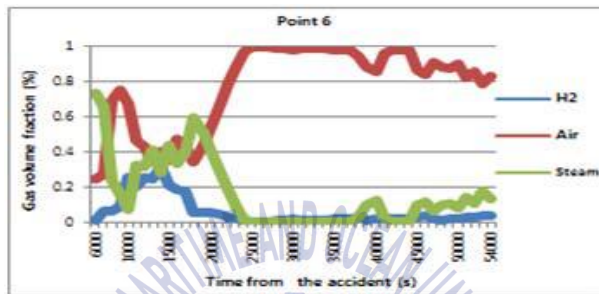
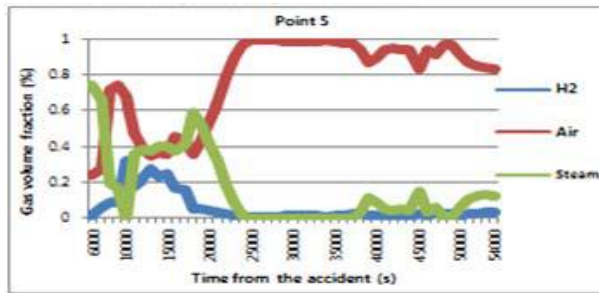
Fig. 2.3 Ignition points



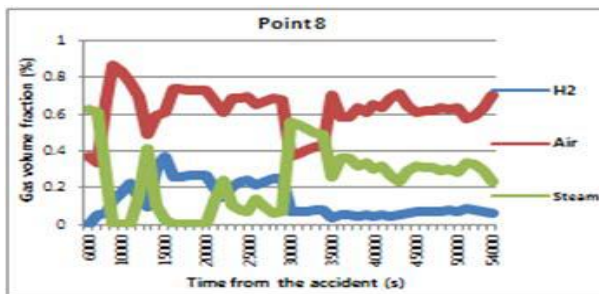
(a) Point 1 on top



(b) Point 2-4 on middle



(c) Point 5-7 on bottom



(d) Point 8 on steam generator

Fig. 2.4 Gas volume fractions of hydrogen, air and steam at points  
(Park & Khor, 2015)

Table 1은 계산 조건을 나타낸다. 선행연구에서 제시한 폭발 위치에서 해석을 수행하였으며 조건은 폭발 위해도가 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 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** Calculation conditions

|        | Conditions         |                    |     |       |                                 |
|--------|--------------------|--------------------|-----|-------|---------------------------------|
| Cases  | Combustion<br>area | Volume fraction(%) |     |       | Hydrogen<br>mass(kg)/percent(%) |
|        |                    | 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                            |

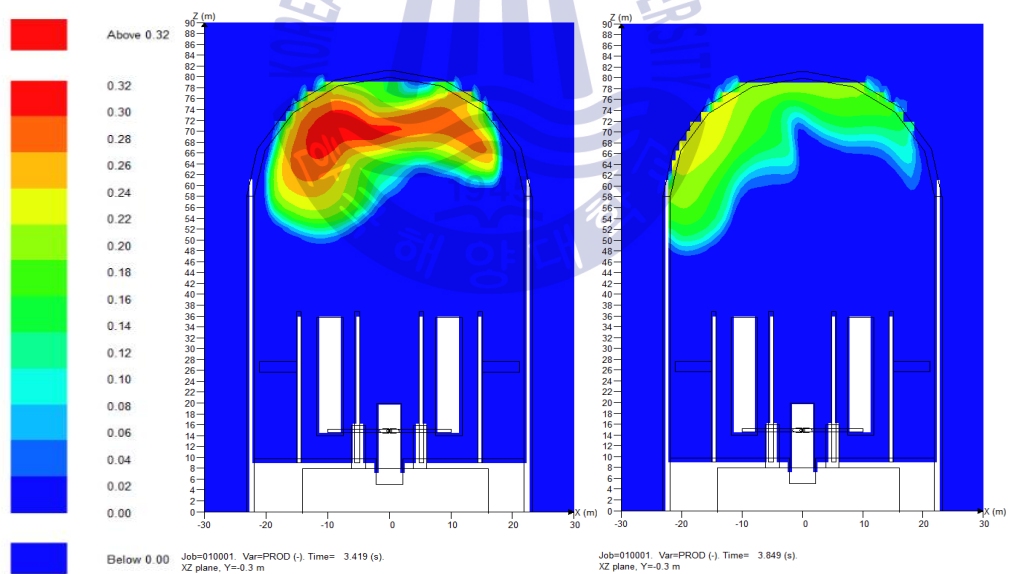
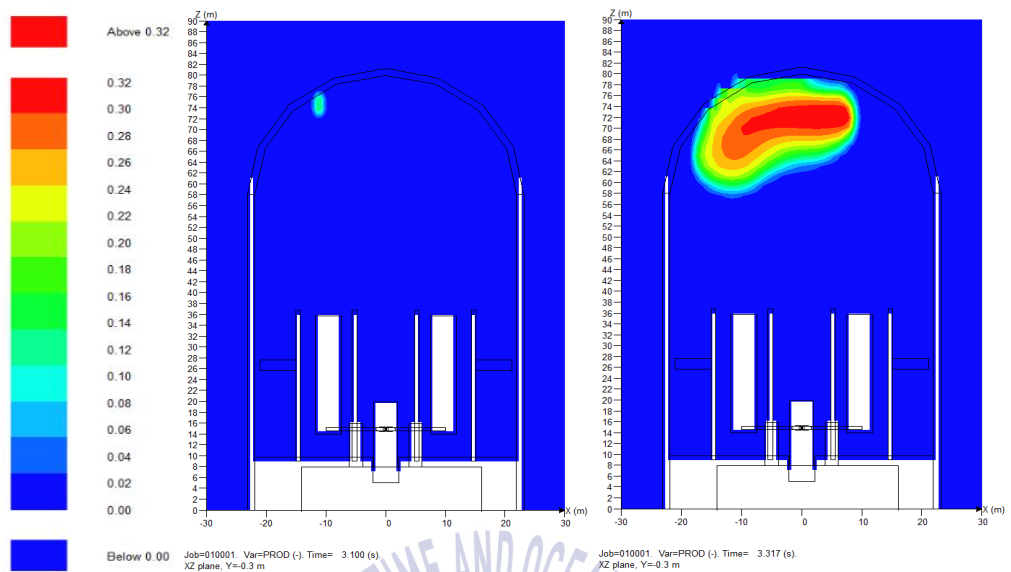
## 2.2 폭발 계산 결과 및 고찰

### 2.2.1 수소폭발

Fig. 2.5은 상부영역 Point 1에서 수소 107.6kg(20%)이 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 131.7m/s이며 오른쪽 방향으로 빠르게 진행되었다. 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.

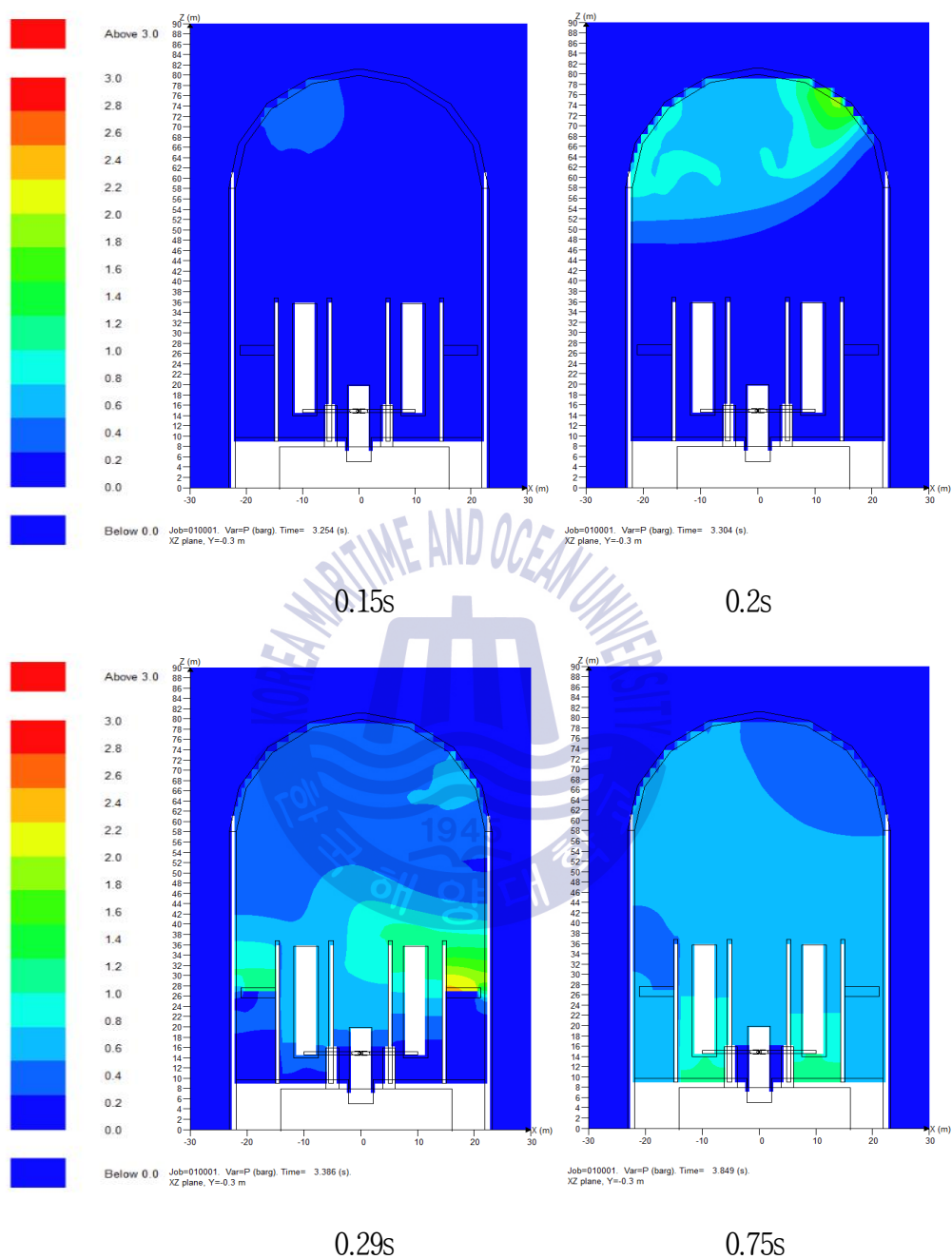






(a) Combustion product distribution



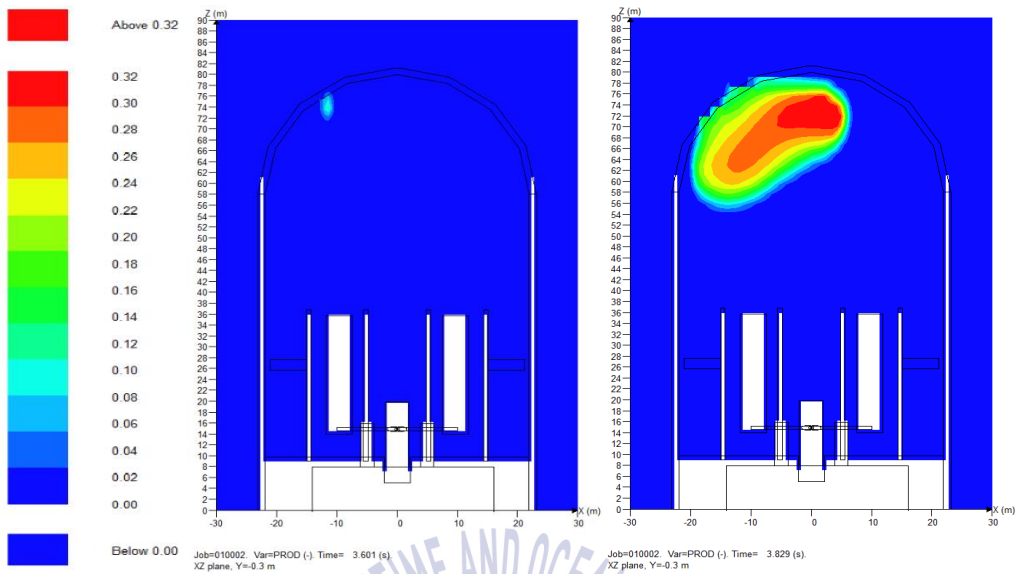


(b) Pressure propagation

**Fig. 2.5** Combustion product and pressure propagation in the case of hydrogen mass 107.6kg(20%) at Point 1

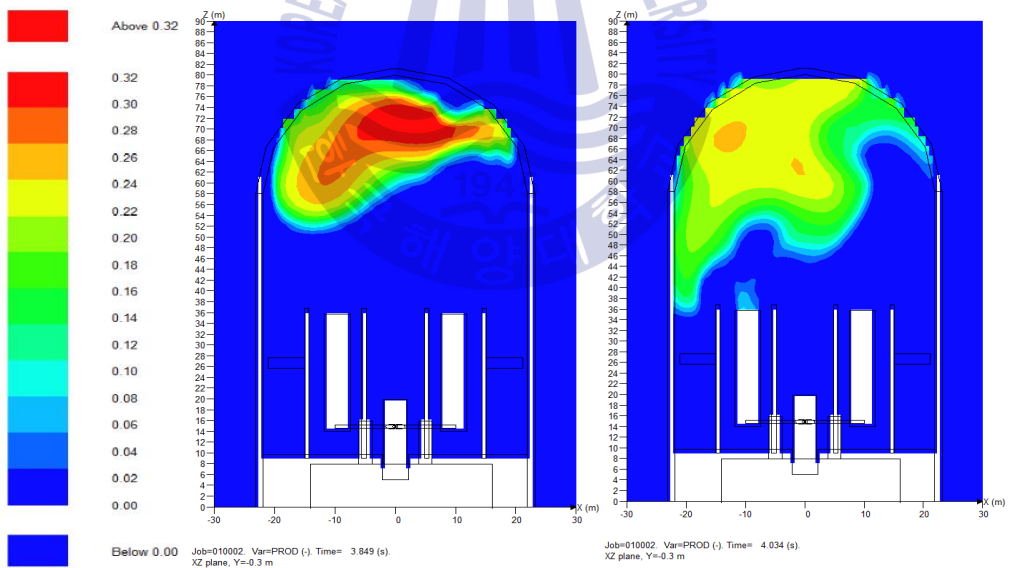
Fig. 2.6은 상부영역 Point 1에서 수소 215.2kg(40%)가 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 470m/s이며 오른쪽 방향으로 빠르게 진행되었다. 압력의 경우는 격납건물 오른쪽 상부에서 압력이 가장 크게 발생한 후 아래쪽에서 미약한 압력이 발생한다.





0.6s

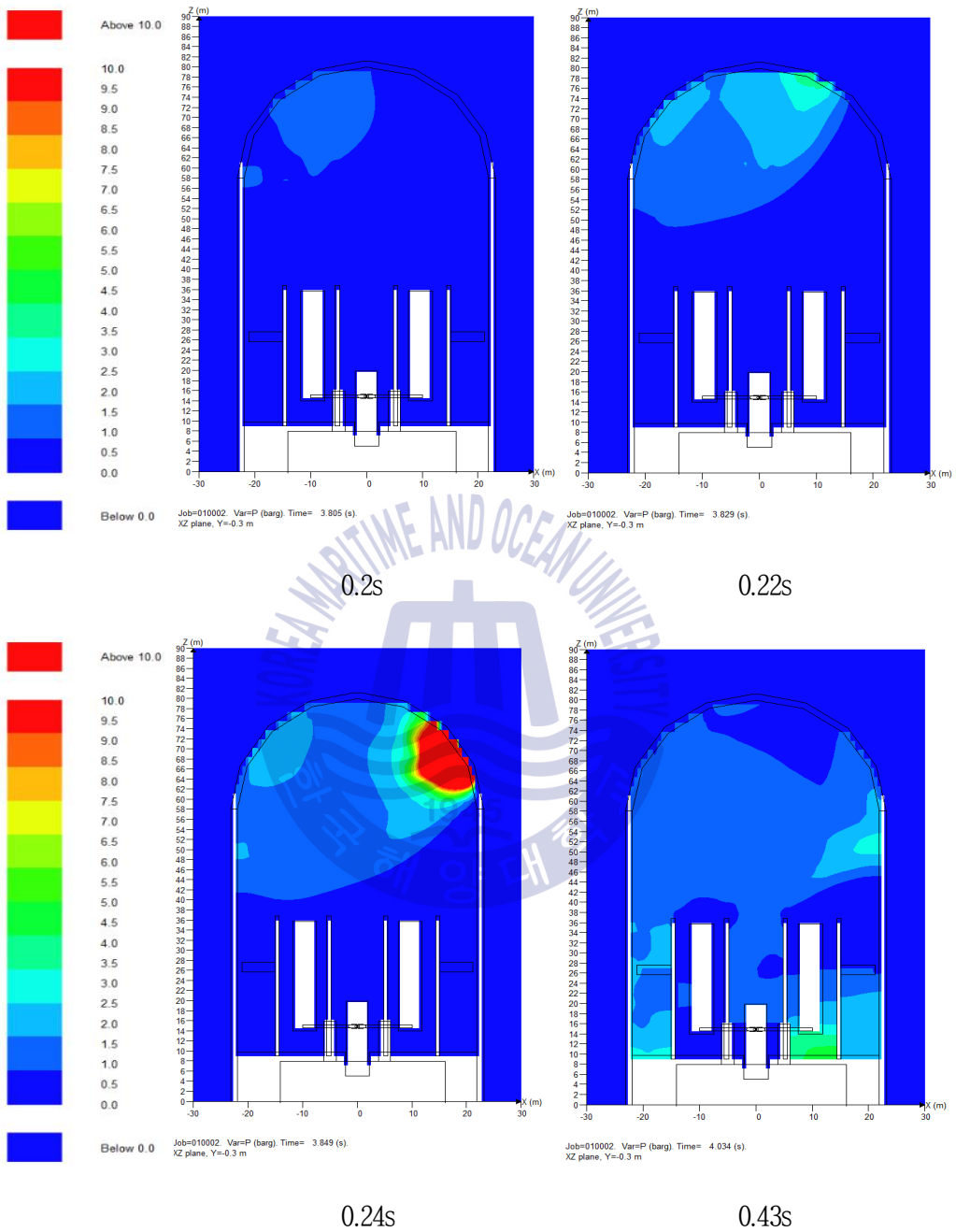
0.83s



0.85s

1.03s

(a) Combustion product distribution

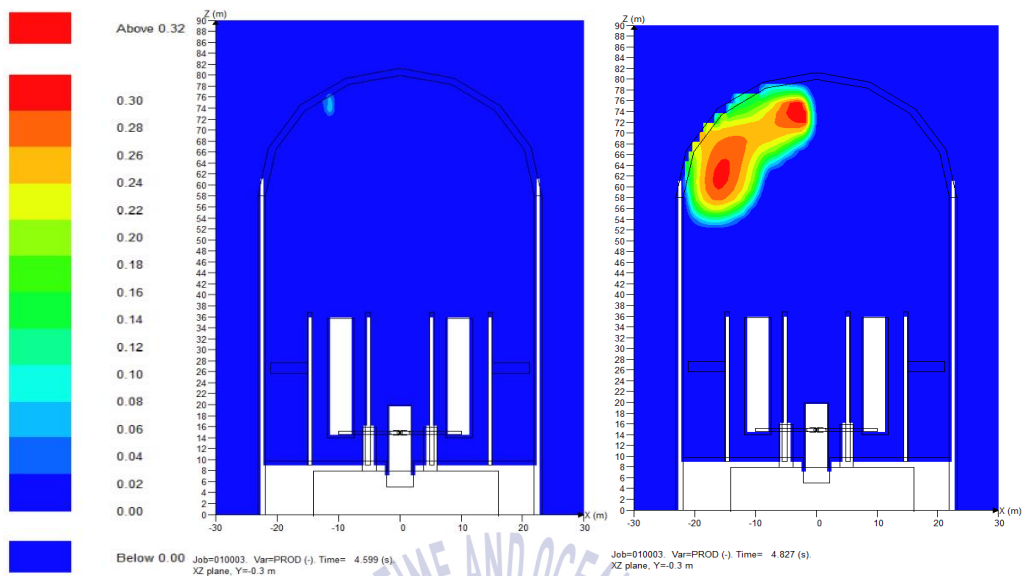


(b) Pressure propagation

**Fig. 2.6** Combustion product and pressure propagation in the case of hydrogen mass 215.2kg(40%) at Point 1

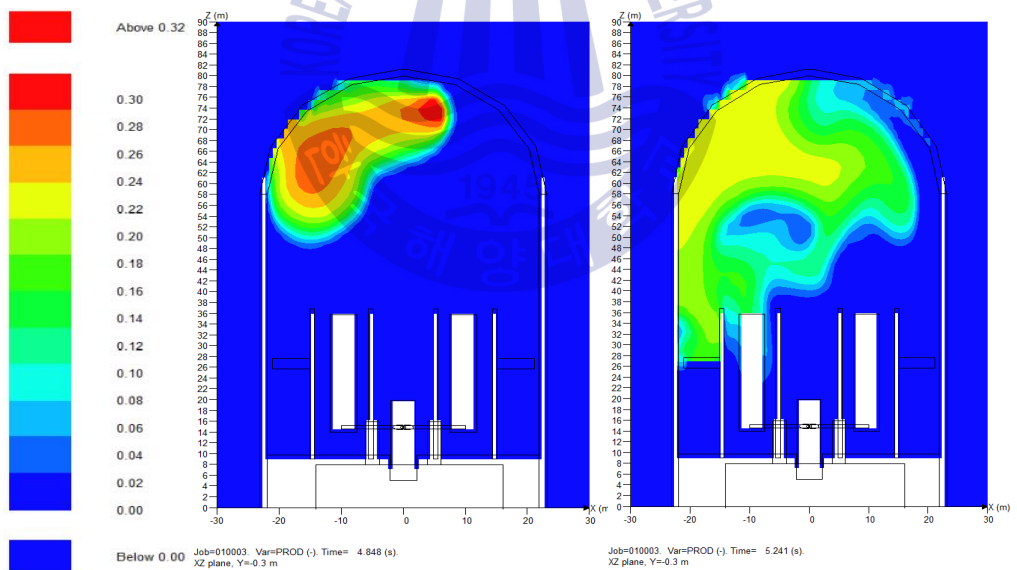
Fig. 2.7은 상부영역 Point 1에서 수소 322.8kg(60%)가 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 513.3m/s이며 오른쪽과 아래쪽 방향으로 진행되었다. 압력의 경우는 격납건물 오른쪽 중부에서 압력이 가장 크게 발생한 후 아래쪽으로 이동한다. 화염이 왼쪽상부에서 하부와 오른쪽으로 이동해감에 따라 오른쪽 중부에 최대압력이 발생한다.





1.6s

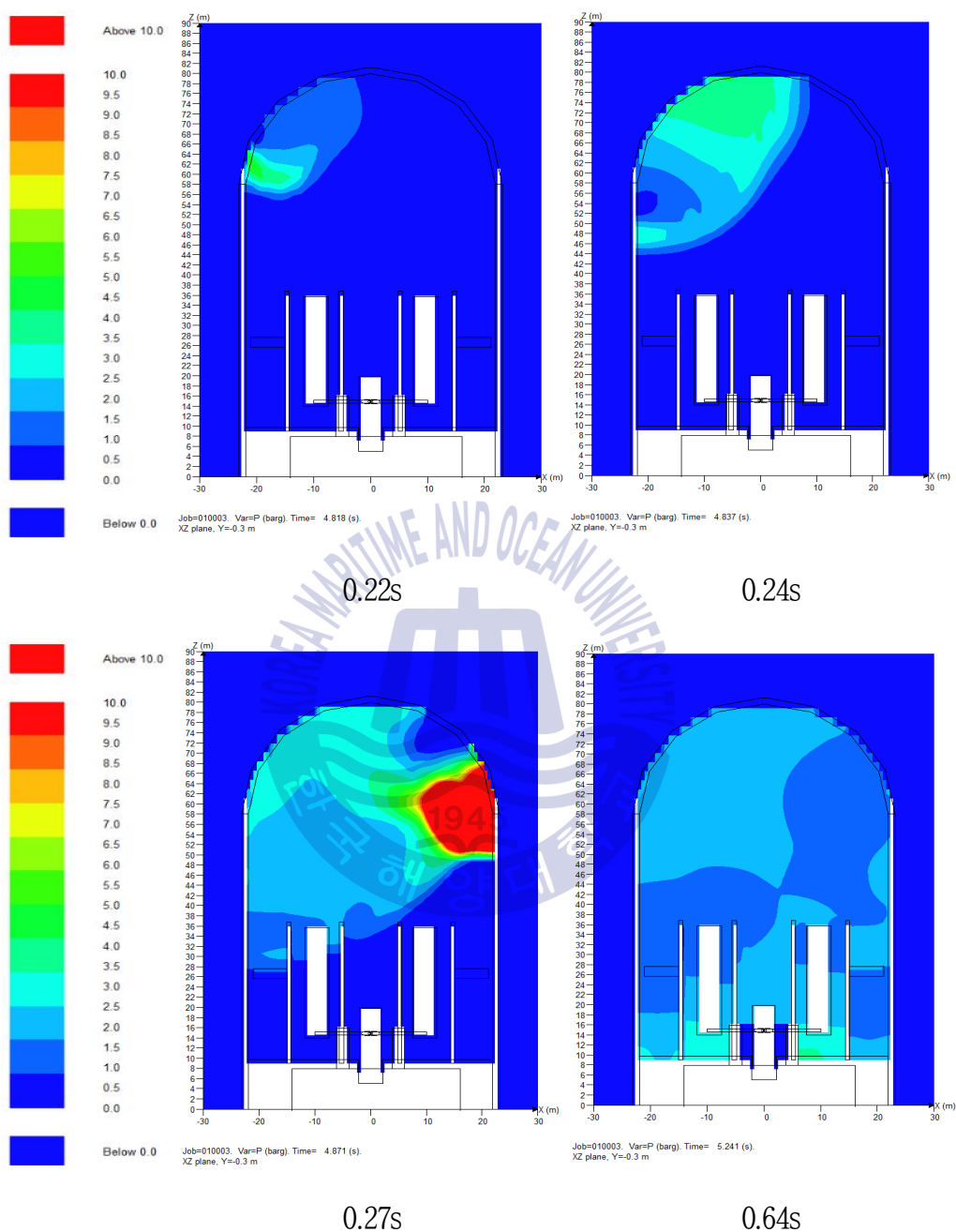
1.83s



1.85s

2.24s

(a) Combustion product distribution



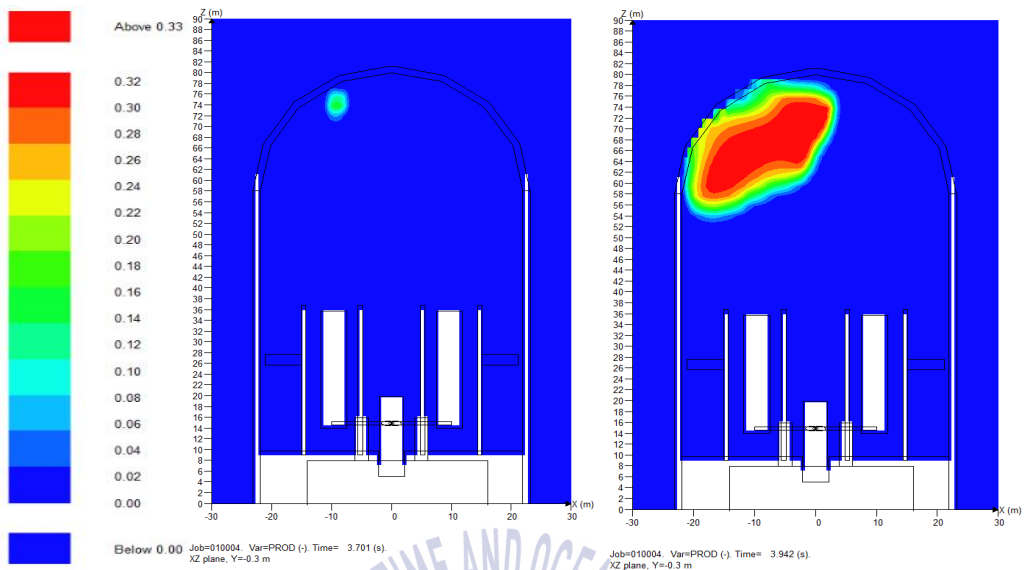
(b) Pressure propagation

Fig. 2.7 Combustion product and pressure propagation in the case of hydrogen mass 322.8kg(60%) at Point 1

Fig. 2.8은 상부영역 Point 1에서 수소 430.4kg(80%)가 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 556.7m/s이며 오른쪽과 아래쪽 방향으로 진행되었다. 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 판단된다.

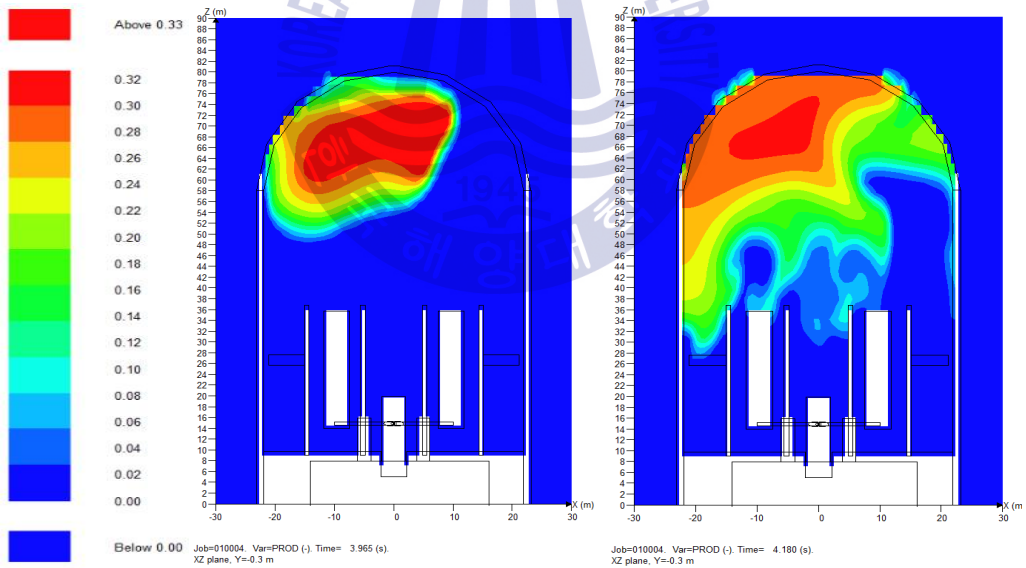






0.7s

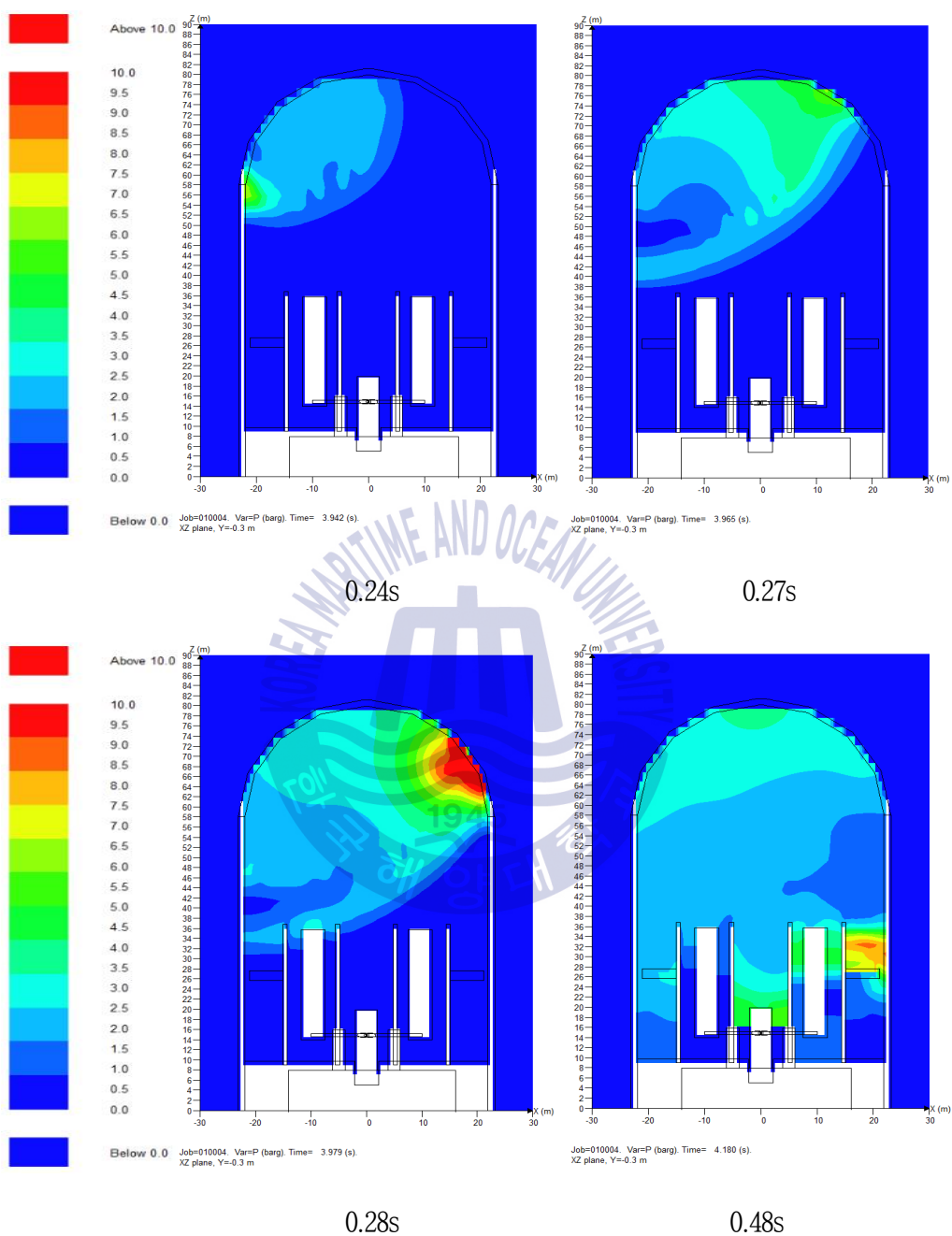
0.94s



0.97s

4.18s

(a) Combustion product distribution

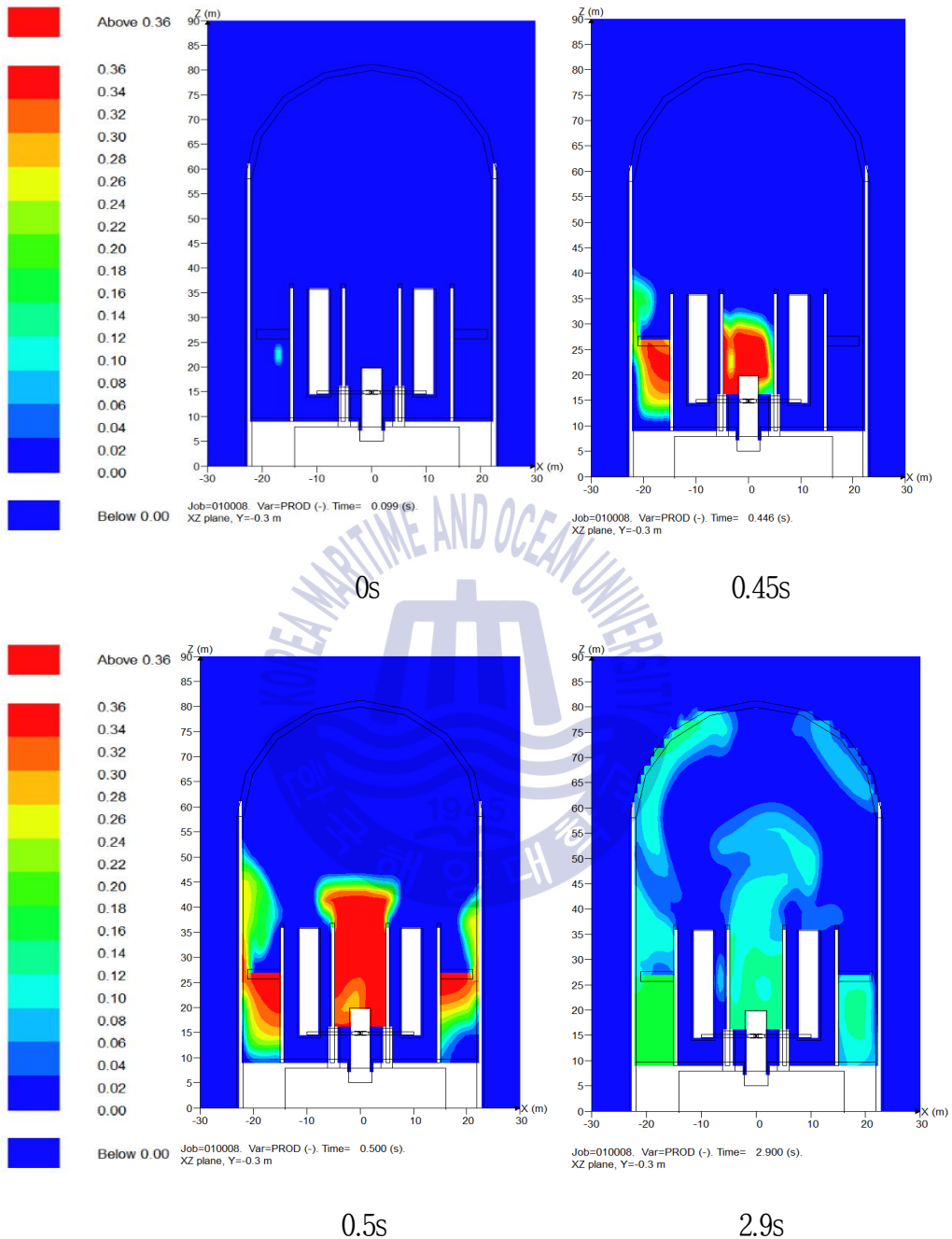


(b) Pressure propagation

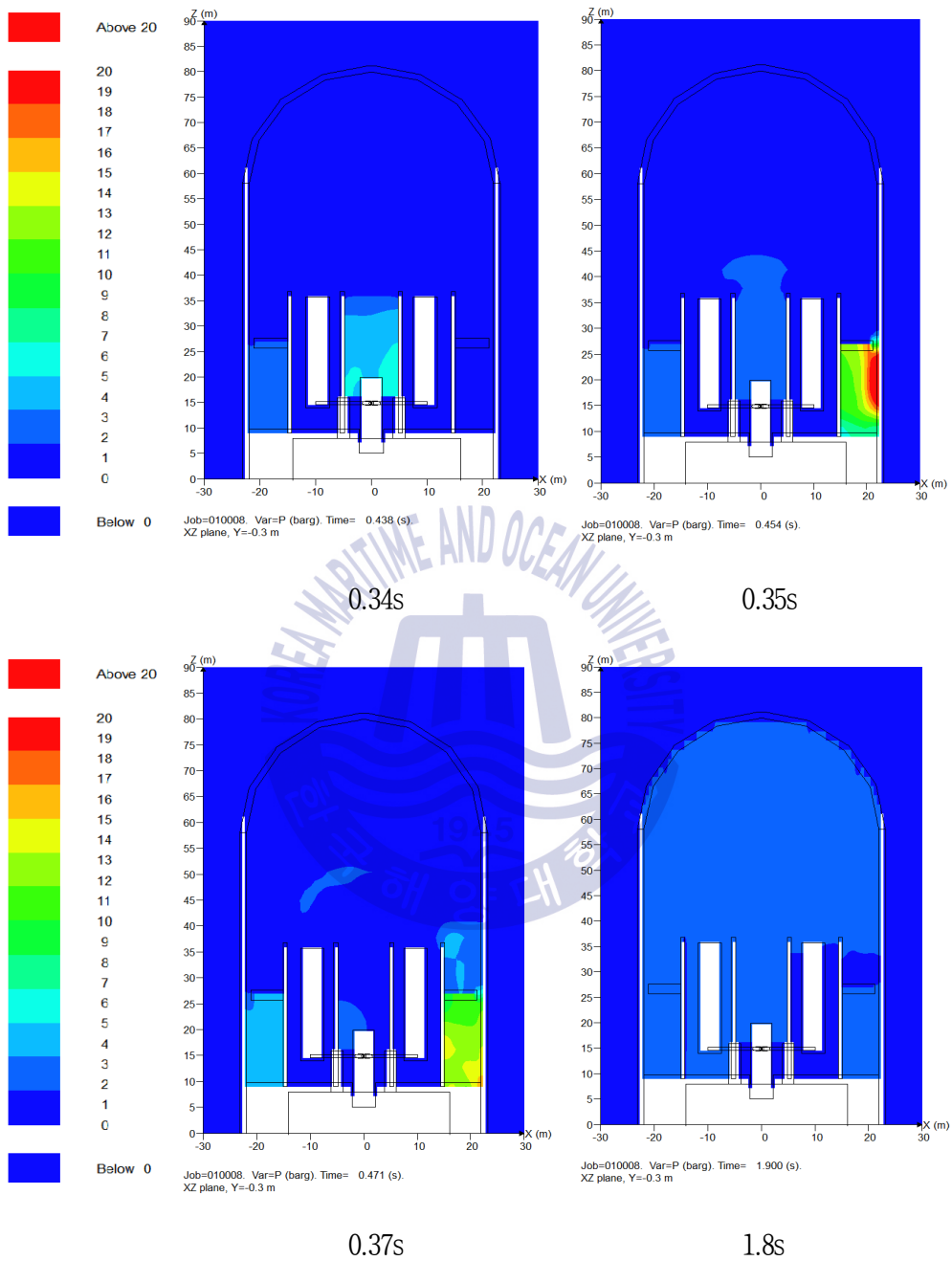
**Fig. 2.8** Combustion product and pressure propagation in the case of hydrogen mass 430.4kg(80%) at Point 1

Fig. 2.9은 하부영역에 수소 129.46kg이 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 폭발압력파가 반대편 벽면에 최대압력을 발생시킨다.





(a) Combustion product distribution

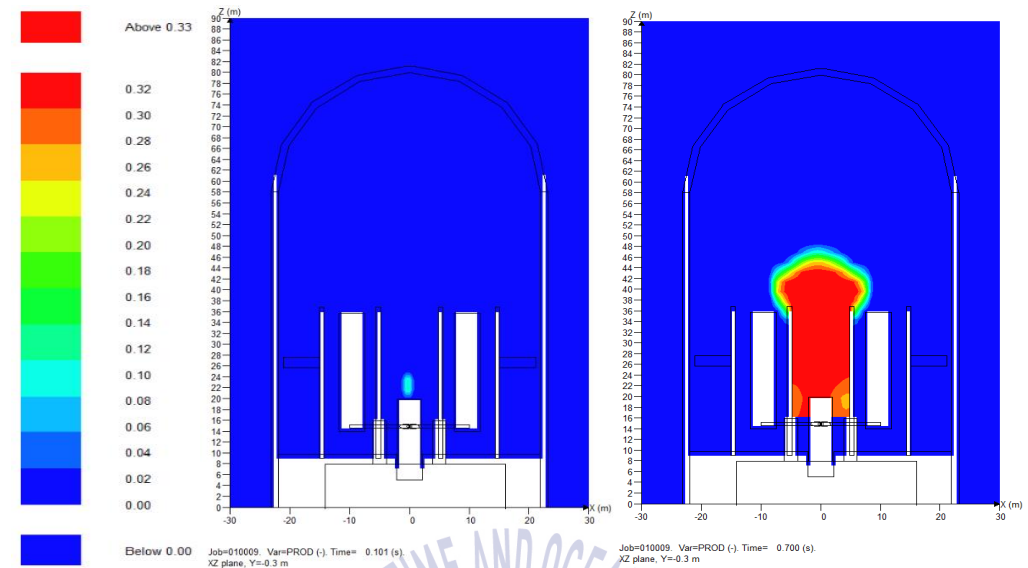


(b) Pressure propagation

Fig. 2.9 Combustion product and pressure propagation in the case of hydrogen mass 129.46kg at Point 5

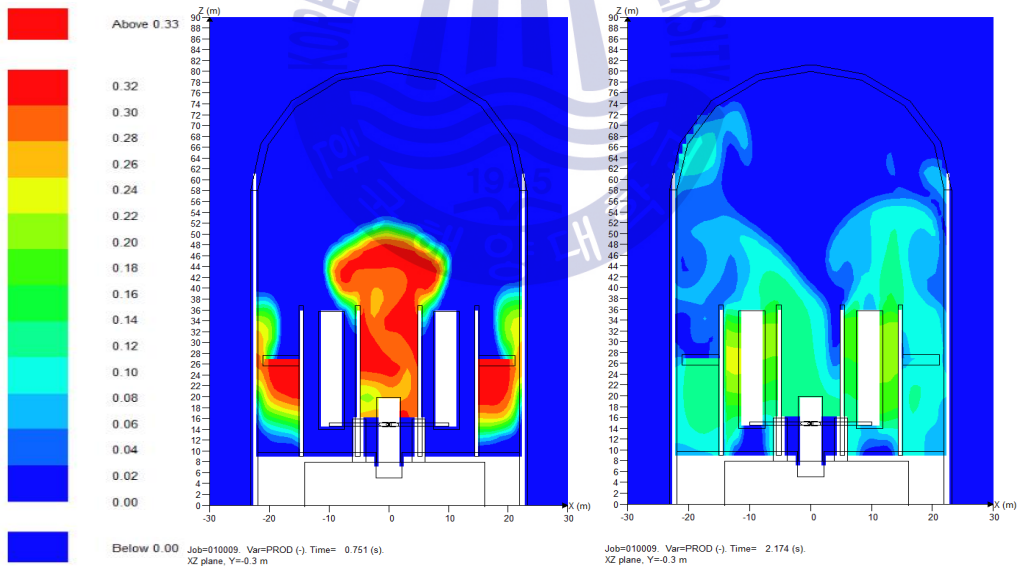
Fig. 2.10은 하부영역에 수소 129.46kg이 모여 있을 때 Point 6에서 점화시의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 380m/s이며 중앙격실을 중심으로 연소가 진행된다. 압력의 경우는 격납건물 하부 격벽들 사이에서 압력이 발생한 후 압력파가 상부 중앙의 벽면에 큰 압력을 나타낸다. 화염핵의 생성 후 화염이 내부구조물의 저항을 받아 위쪽으로 성장하는데, 폭발 압력파 역시 위쪽으로 진행하여 상부 중앙에 최대압력이 발생한 것으로 판단된다.





0.1s

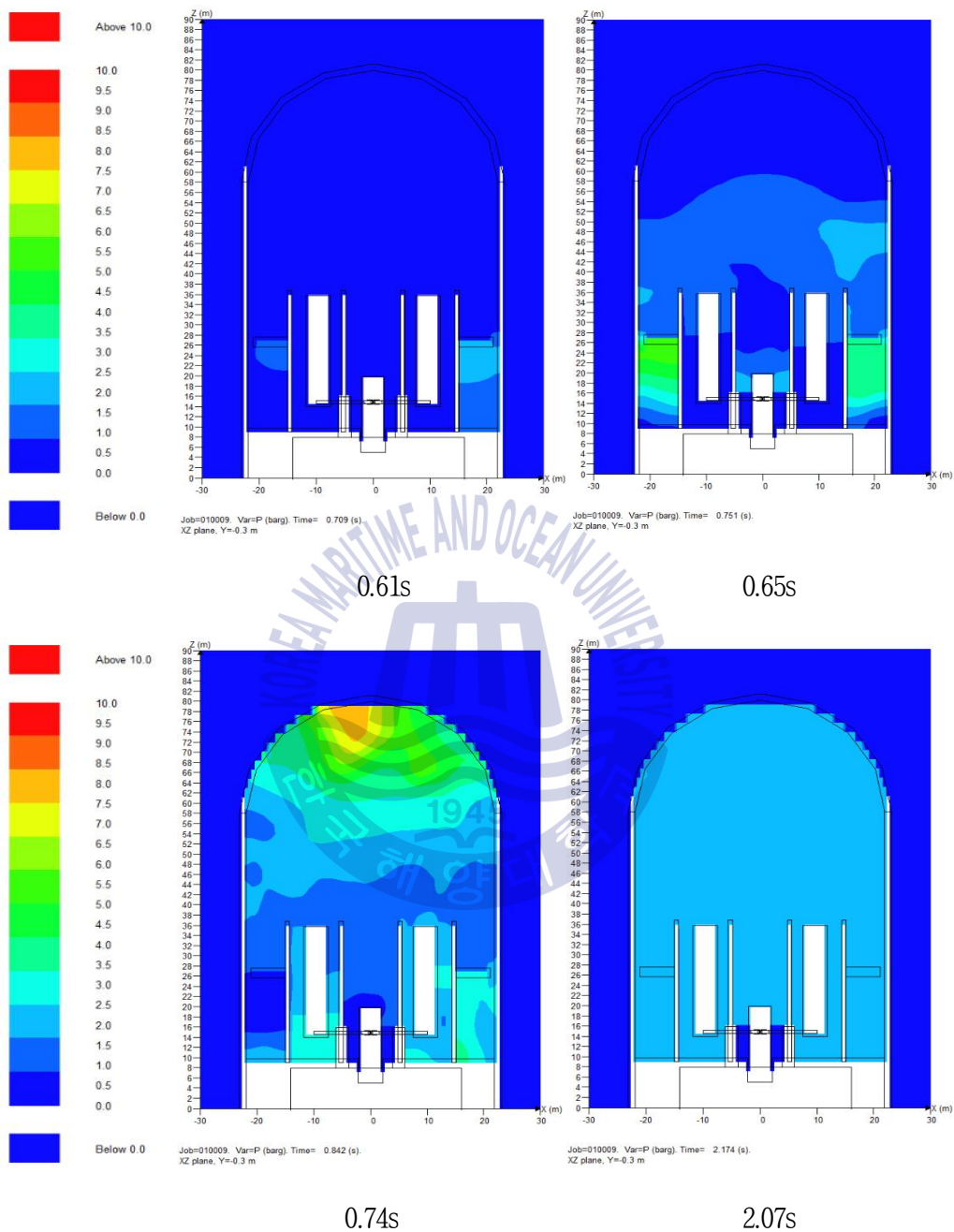
0.7s



0.75s

2.17s

(a) Combustion product distribution



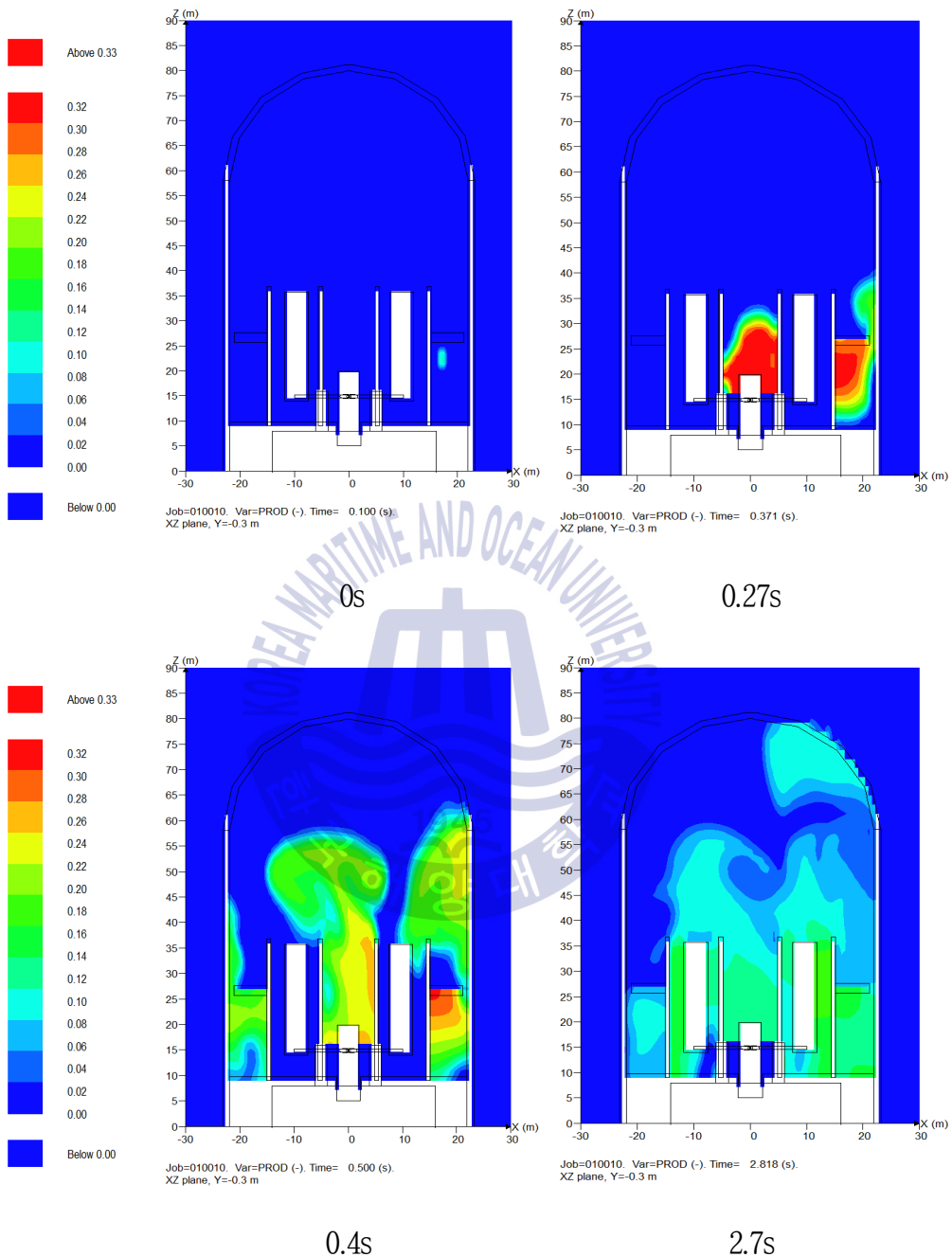
(b) Pressure propagation

Fig. 2.10 Combustion product and pressure propagation in the case of hydrogen mass 129.46kg at Point 6

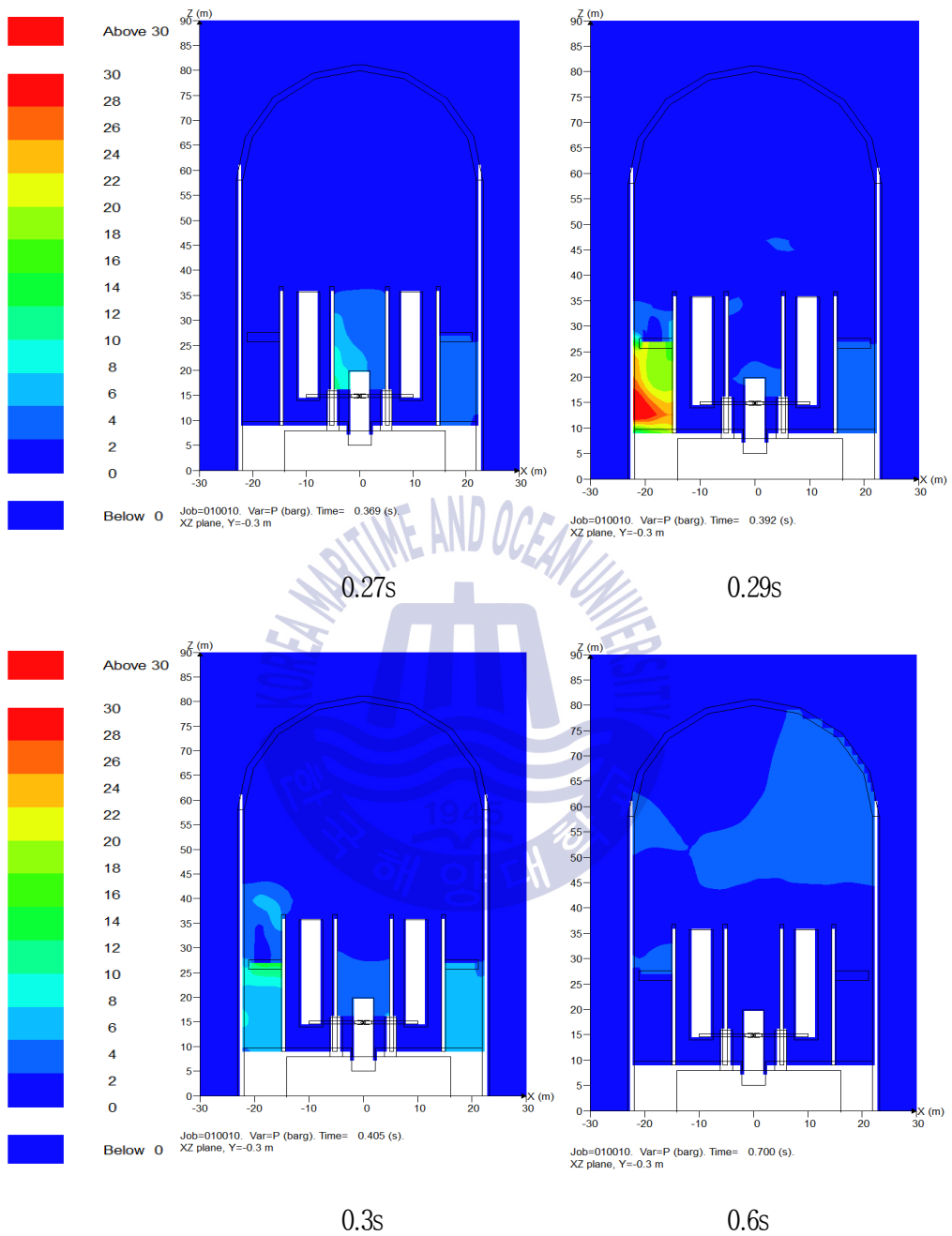


Fig. 2.11은 하부영역에 수소 194.2kg이 모여 있을 때 Point 7에서 점화시의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행속도는 평균 553m/s이며 왼쪽과 위쪽으로 연소가 진행된다. 압력의 경우는 격납건물 좌측 하부에서 최대압력이 발생한 후 돔 상부에 미약한 압력이 가해진다. 우측에서 시작된 화염과 폭발의 압력이 좌측 벽면에 최대압력을 형성한다.





(a) Combustion product distribution

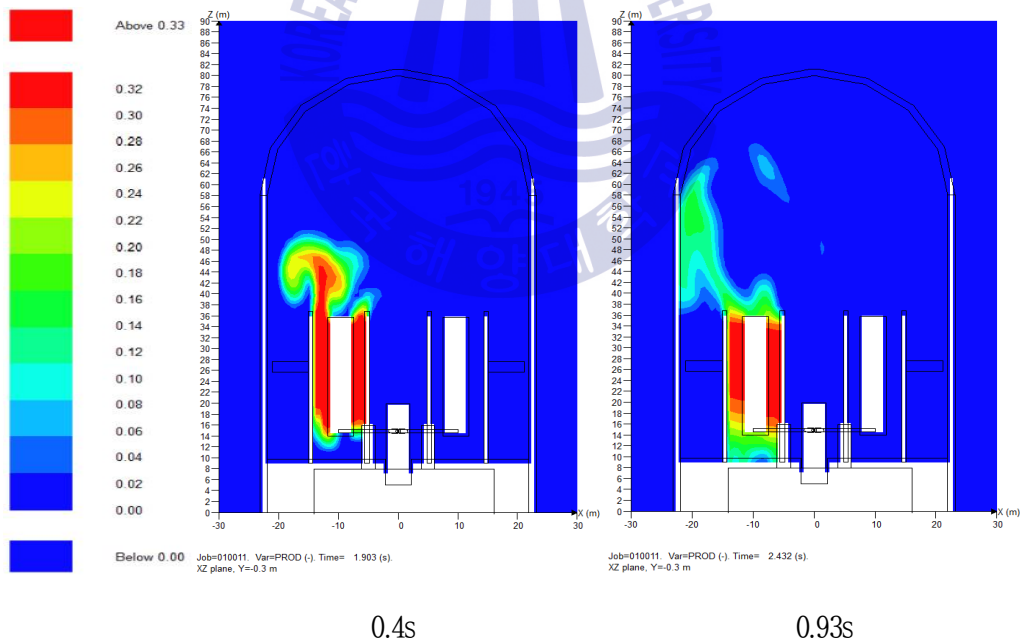
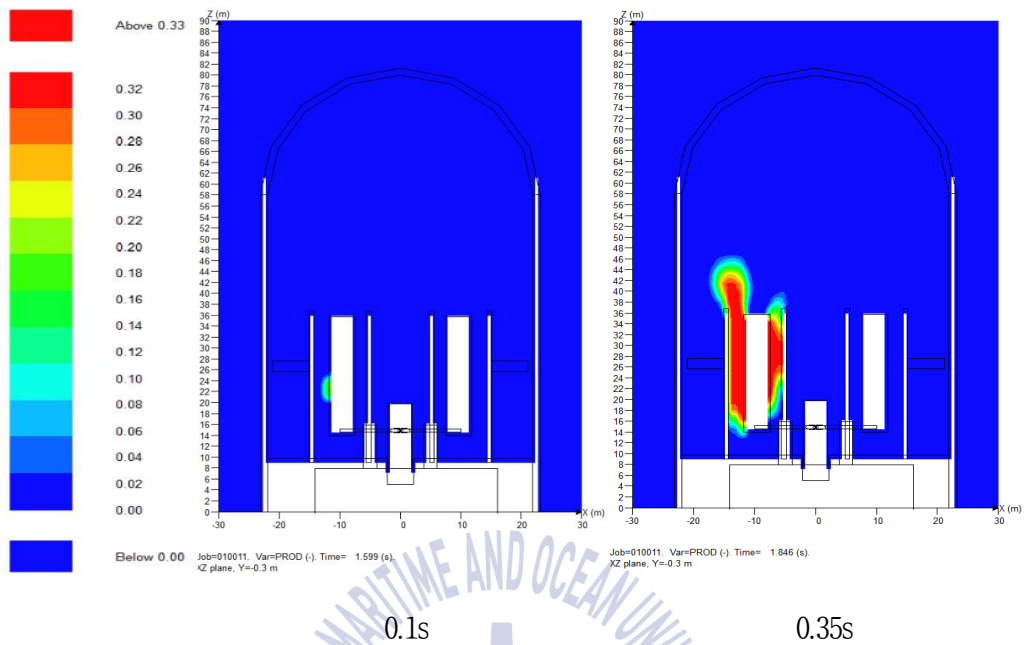


(b) Pressure propagation

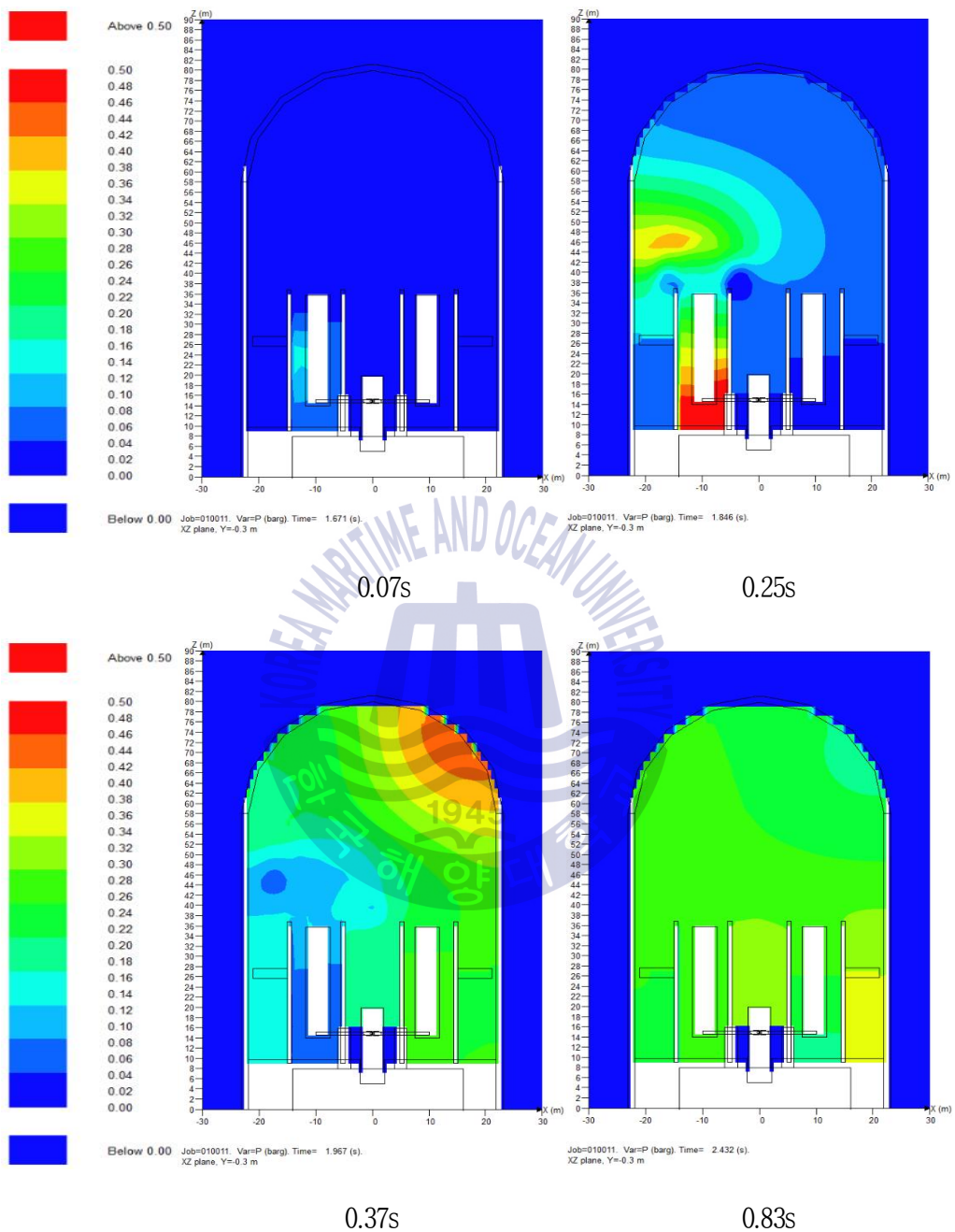
**Fig. 2.11** Combustion product and pressure propagation in the case of hydrogen mass 129.46kg at Point 7

Fig. 2.12은 하부영역 Point 8에서 수소 62.3kg이 모여 있을 때의 연소생성물과 압력분포를 나타낸다. 화염핵이 형성된 후 급속한 연소가 진행된다. 진행 속도는 평균 200m/s이며 위쪽으로 진행되었다. 압력의 경우는 왼쪽 스팀발생기 내부에서 최대압력이 발생한 후 격납건물 오른쪽 상부에서 크게 압력이 발생한 뒤 고르게 퍼져 나간다.





(a) Combustion product distribution



(b) Pressure propagation

Fig. 2.12 Combustion product and pressure propagation in the case of hydrogen mass 62.3kg at Point 8

위 결과를 요약하면 Point 1에 수소가 20, 40, 60, 80% 모였을 때, 화염핵 형성 후 131.7, 470, 513.3, 556.7m/s의 평균속도로 오른쪽과 아래쪽 방향으로 연소가 진행되었고 Point 5의 경우 평균 600m/s으로 오른쪽으로 진행한 후 상부로 진행하였으며, Point 6의 경우 평균 380m/s으로 중앙격실 부근으로 진행하였다. Point 7의 경우 평균 553m/s으로 왼쪽과 위쪽으로 연소가 진행되고 Point 8의 경우 평균 200m/s으로 위쪽으로 진행하였다. 압력의 경우 Point 1에 수소가 모일 때 오른쪽 상부에 큰 압력이 가해지고 Point 5의 경우 격납건물 우측 하부, Point 6의 경우 상부 중앙, Point 7의 경우 좌측 하부, Point 8의 경우 왼쪽 스팀발생기 내부에 큰 압력이 가해진다.



### 2.2.2 최대압력이 격납건물에 미치는 영향

폭발 시 최대압력이 나타나는 지점에서 최대 압력을 구하기 위해 11개의 측정점을 생성하고 데이터를 그래프로 나타내었다. Fig. 2.13은 측정점의 위치를 나타낸다. 상부 중앙에서부터 MP1-MP6, 하부 오른쪽, 왼쪽에 MP7,8, 왼쪽 스팀발생기에 MP9, 상부 왼쪽, 오른쪽에 MP10, MP11이 있다.

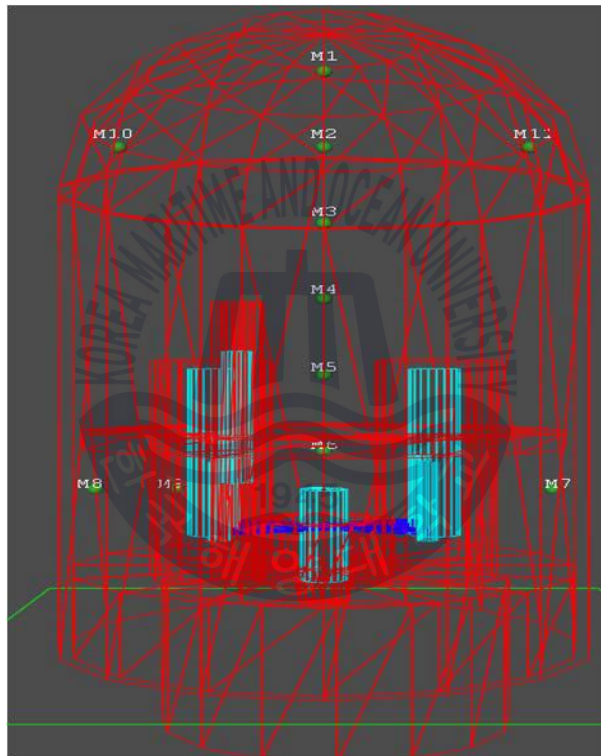
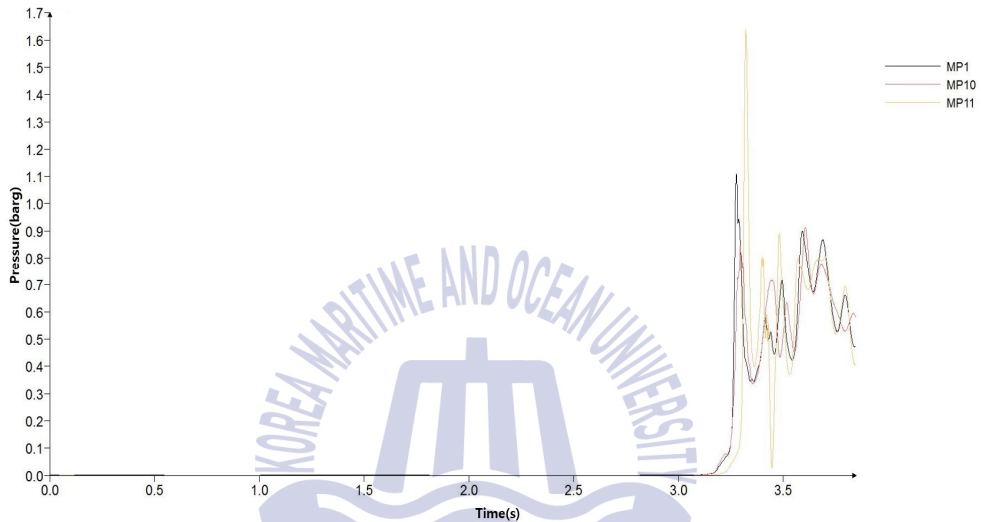


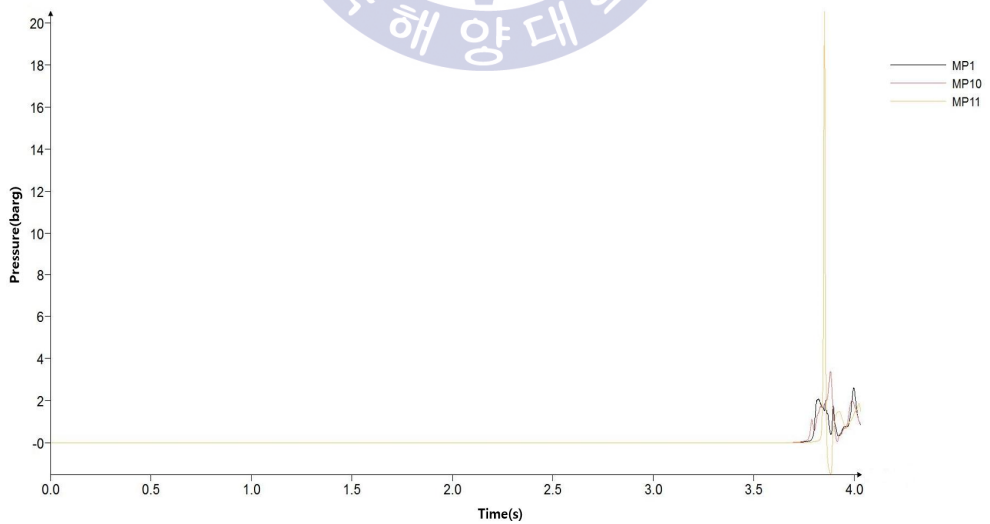
Fig. 2.13 Monitoring points



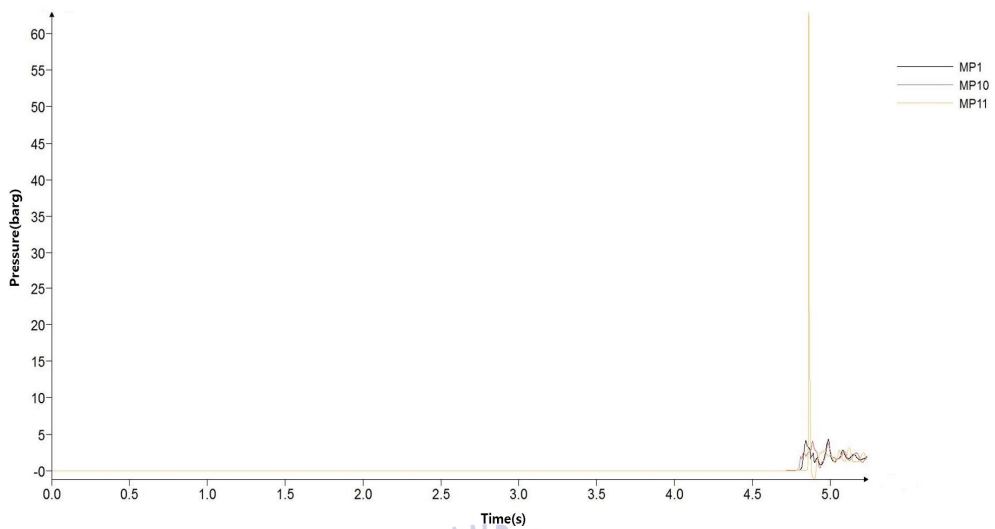
Fig. 2.14은 상부영역에서 폭발 시 수소의 양이 20%, 40%, 60%, 80%인 Case 1, 2, 3, 4의 압력그래프를 측정위치 MP(Monitor Point) 1, 10, 11에 대하여 나타낸 것이다. 20%의 경우 최대압력이 걸리는 격납건물 오른쪽 상부에서 1.6barg로 낮은 압력을 나타내고 40%의 경우 격납건물 오른쪽 상부에서 최대압력 20barg가 나타난다. 60%의 경우 최대압력이 걸리는 격납건물 오른쪽 상부에서 75barg로 매우 높은 값을 나타낸다.



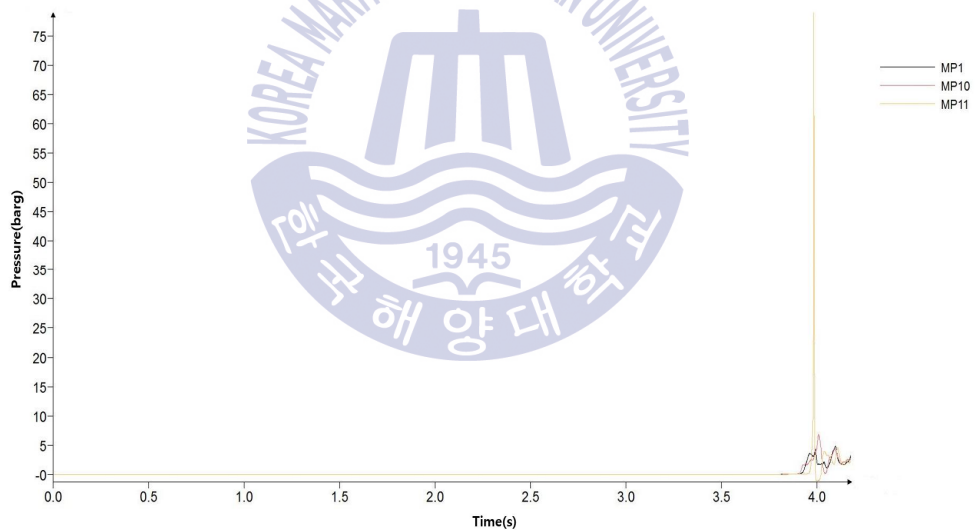
(a) Case 1(20%)



(b) Case 2(40%)



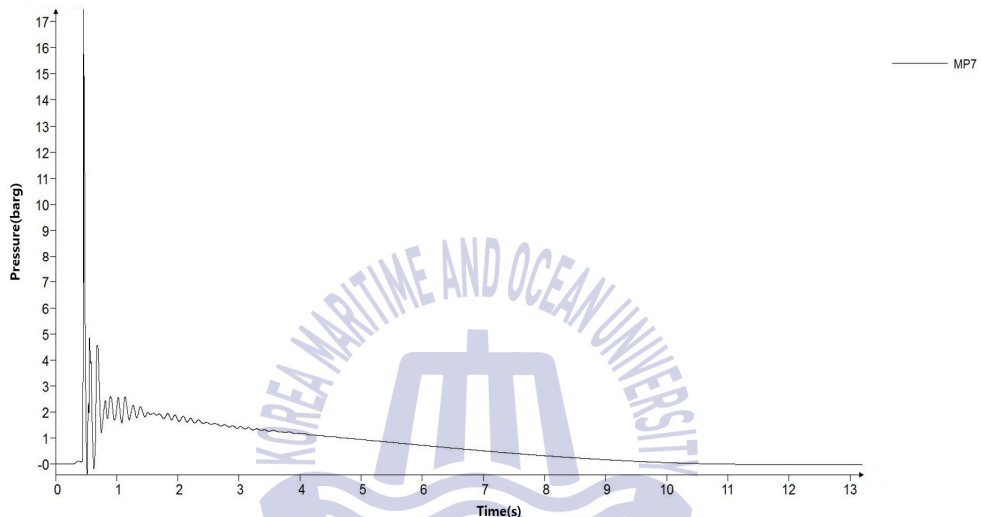
(c) Case 3(60%)



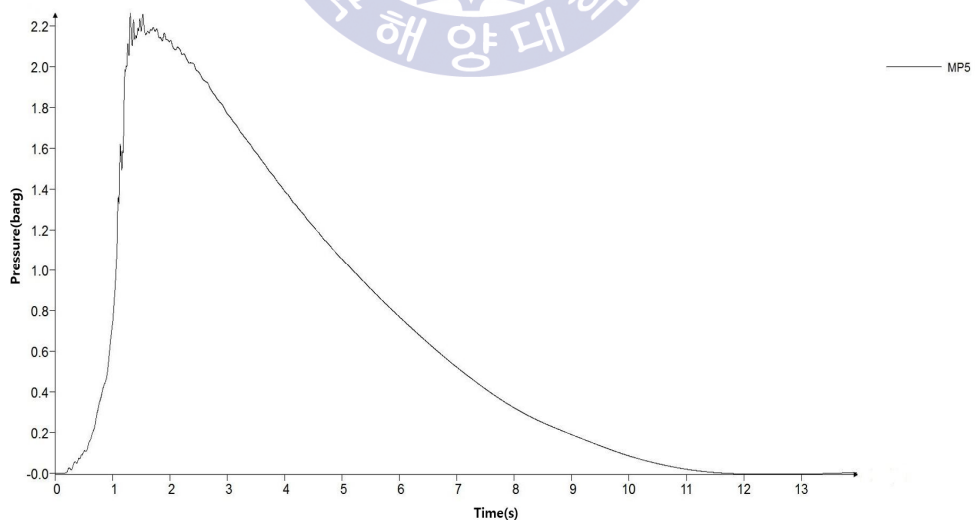
(d) Case 4(80%)

**Fig. 2.14** Impact pressure variations when combustion takes place in the top of the containment

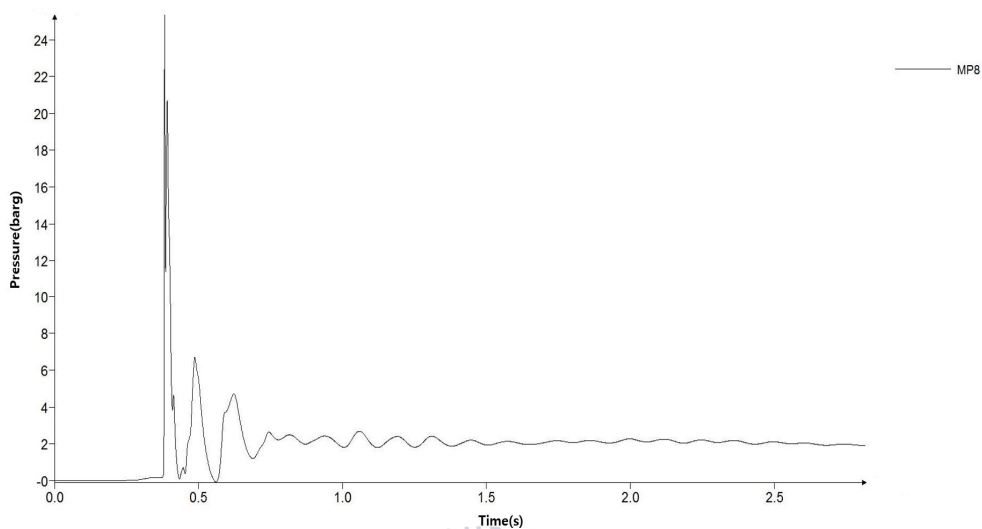
Fig. 2. 15은 하부영역에서 폭발 시 Case 5, 6, 7의 압력 그래프를 MP 6, 7, 8에서 나타낸 것이다. Case 5의 경우 격납건물 우측 하부에서 최대 압력 17.5barg가 되며 Case 6의 경우 격납건물 하부 중앙에서 최대압력 2.4barg를 나타낸다. Case 7의 경우 격납건물 하부 좌측에서 최대압력 25barg로 큰 압력을 나타낸다. Case 8의 경우 왼쪽 스팀발생기에서 최대 압력 0.7barg를 나타낸다.



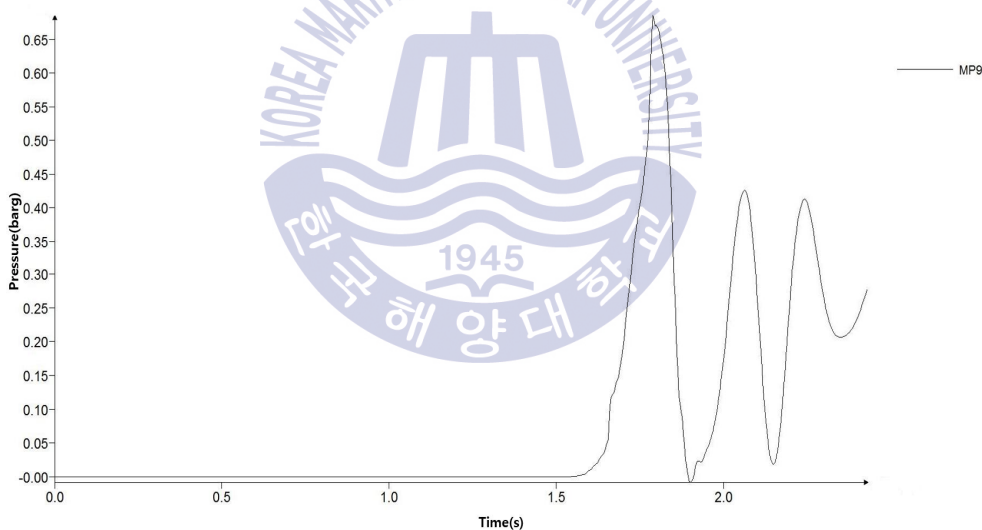
(a) Case 5 at MP 7



(b) Case 6 at MP 6



(c) Case 7 at MP 8



(d) Case 8 at MP 9

**Fig. 2.15** Impact pressure variations when combustion takes place in the bottom of the containment

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 격납건물 중부 오른쪽에 압력을 주었고 Case 5는 하부 오른쪽에, Case 7은 하부 왼쪽에 압력을 주었다. 계산 조건은 Table 2와 같다. 압력을 가한 시간은 0.2초이고 0.1초 동안 0에서 최대압력까지 올라가고 0.1초 동안 0으로 떨어지게 주었다.

**Table 2** Calculation conditions

| Time(s) | Pressure(MPa) |        |        |        |        |        |
|---------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | Case 1        | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 7 |
| 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      |



Fig. 2.16은 상부에서 폭발 시 Case 1, 2, 3, 4의 응력을 나타낸다. Case 1의 경우 응력은 최대 1.478Pa이 발생한다. Case 2의 경우 응력은 최대 17.17MPa이 나온다. Case 3의 경우 최대 응력은 54.90MPa이 나왔다. Case 4의 경우 최대응력은 68.46MPa이 나온다.

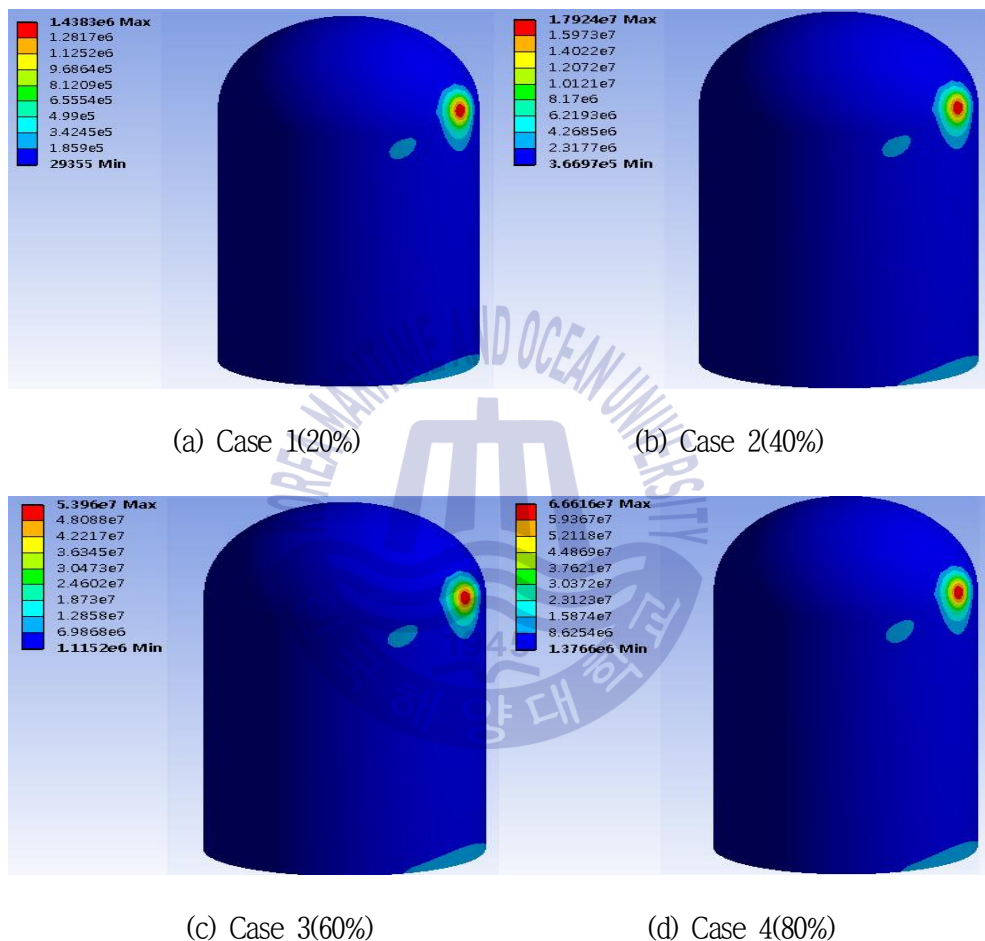
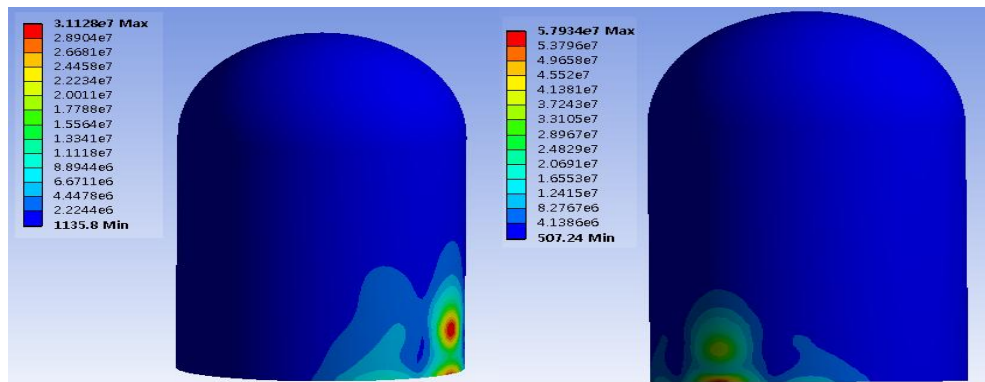


Fig. 2.16 Stress distribution in the cases of the top of the containment

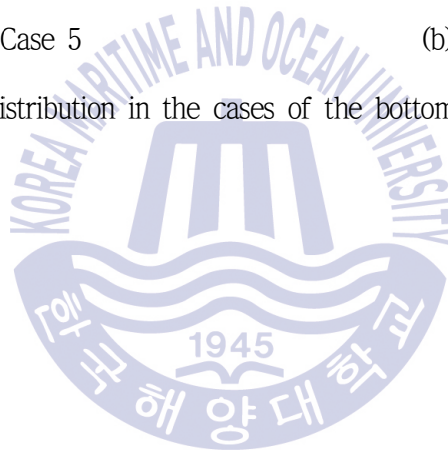
Fig. 2.17은 Case 5, 7의 응력을 나타낸다. Case 5의 경우 최대응력은 31.11MPa이 나온다. Case 7의 경우 최대 응력은 57.93MPa이 나온다.



(a) Case 5

(b) Case 7

Fig. 2.17 Stress distribution in the cases of the bottom of the containment



### 2.2.3 수소 폭발 요약

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

1) 격납건물 상부(Point 1)에서 폭발이 발생한 경우 점화점을 중심으로 화염이 확산되며 평균 연소속도는 수소량이 증가함에 따라 증가하였고 최대압력 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 31.11MPa과 57.93MPa로 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 충격압력이 걸리고 순간 응력 또한 높게 나오는 것을 알 수 있다.



## 제 3 장 PAR의 구조에 따른 성능 해석

### 3.1 수학적 모델 및 계산 조건

#### 3.1.1 수학적 모델

유동 계산에 적용된 모멘텀, 에너지 방정식, 난류 모델 방정식은 다음과 같다.

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (3-1)$$

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U \quad (3-2)$$

에너지 방정식은

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla U + S_E \quad (3-3)$$

난류계산은 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다.

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} = \frac{a_1 k}{\max(a_1, (\frac{\partial u}{\partial y}) F_2)} \quad (3-4)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3-5)$$

$$\arg_2 = \max(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega}) \quad (3-6)$$

여기서  $U$ 는 속도벡터,  $S_M$ 은 운동량 생성항,  $\tau$ 은 응력 텐서,  $T$ 은 온도,  $\delta$ 은

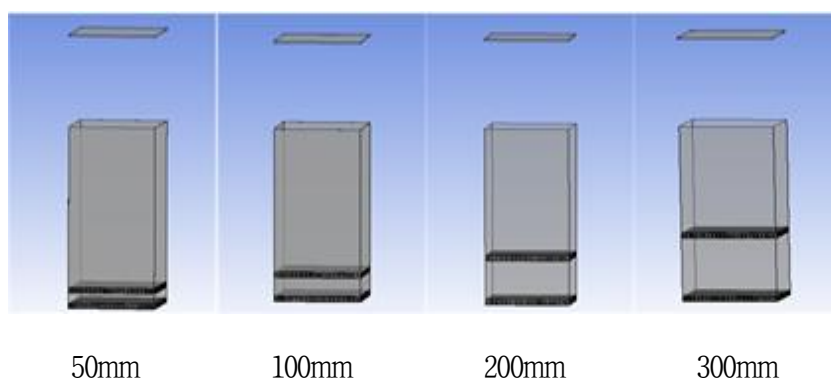
단위행렬,  $\rho$ 은 밀도,  $h$ 은 비정상엔탈피,  $\lambda$ 은 열 전도도,  $S_E$ 은 에너지 생성  
항,  $k$ 은 단위 질량당 난류 운동 에너지,  $\omega$ 은 각 속도를 나타낸다.



### 3.1.2 계산 조건

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 한국형 피동 축매식 수소재결합기(PAR)의 내, 외부 형상이 PAR 성능에 미치는 영향을 해석하였다. UGS NX 3D 모델링 프로그램을 이용하여 모델링을 수행하고 ICEM CFD로 격자를 생성한 후 ANSYS CFX로 해석을 수행하였다. Fig. 3.18은 PAR 내부 축매부 형상을 모델링 한 것이고 Fig. 3.19은 계산에 사용된 격자이다. Fig. 3.20은 PAR 외부에 가이드를 모델링한 형상이고 Fig. 3.21은 계산에 사용된 격자이다.

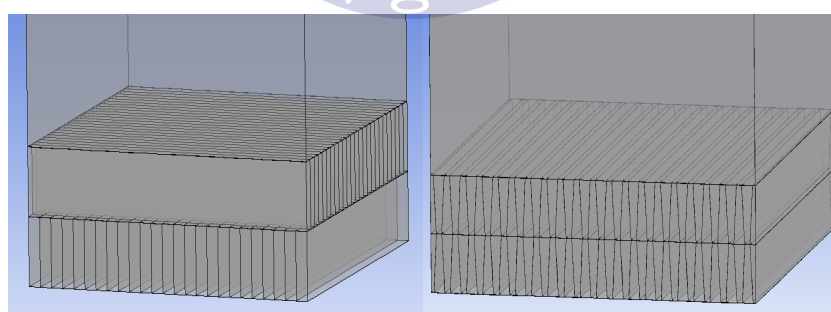




(a) Distance between catalysts



(b) Number of steps



(c) Catalysts shapes

**Fig. 3.18** PAR inside structures

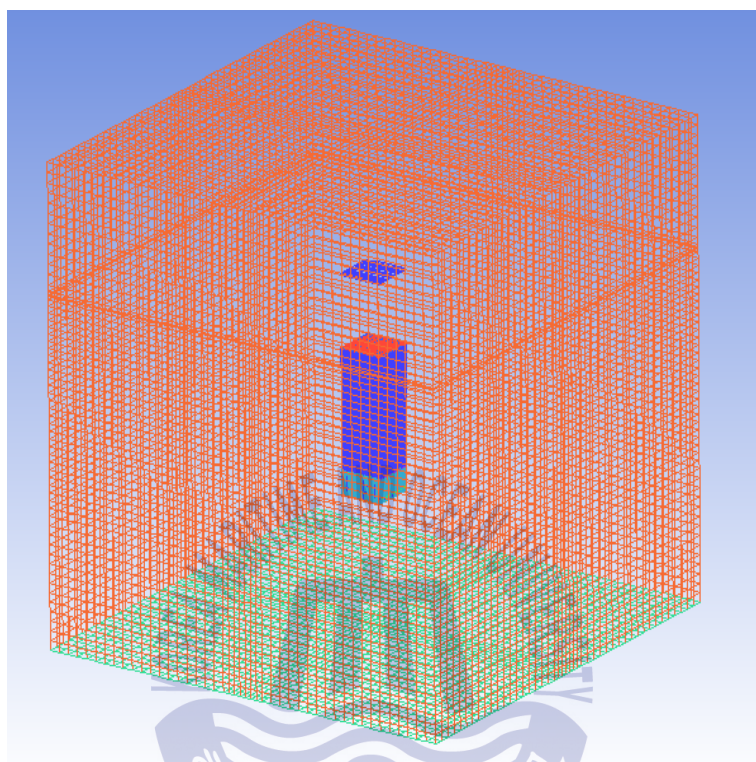
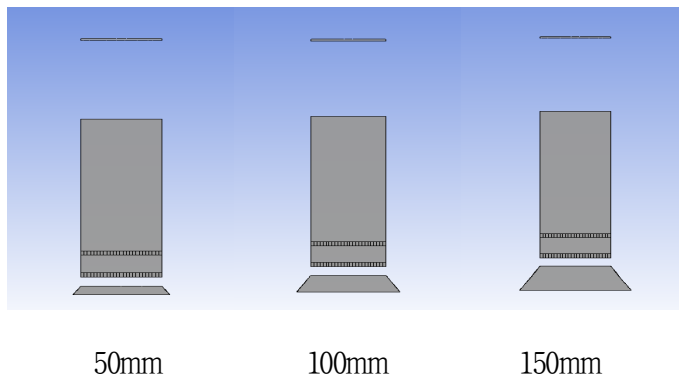
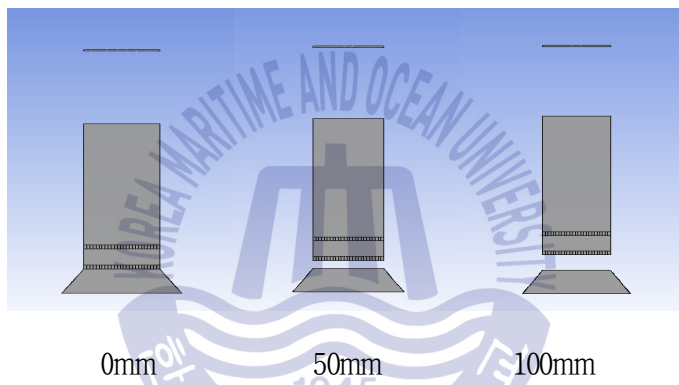


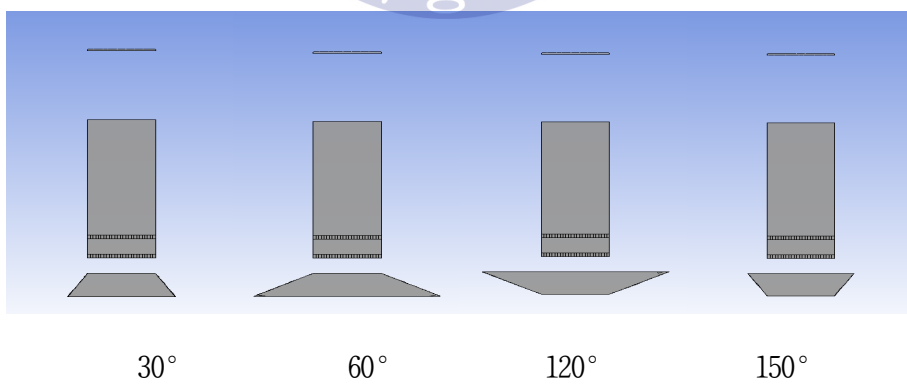
Fig. 3.19 Calculation grids



(a) Guide height



(b) Guide distance



(c) Guide angle

**Fig. 3.20** Structures of the guide

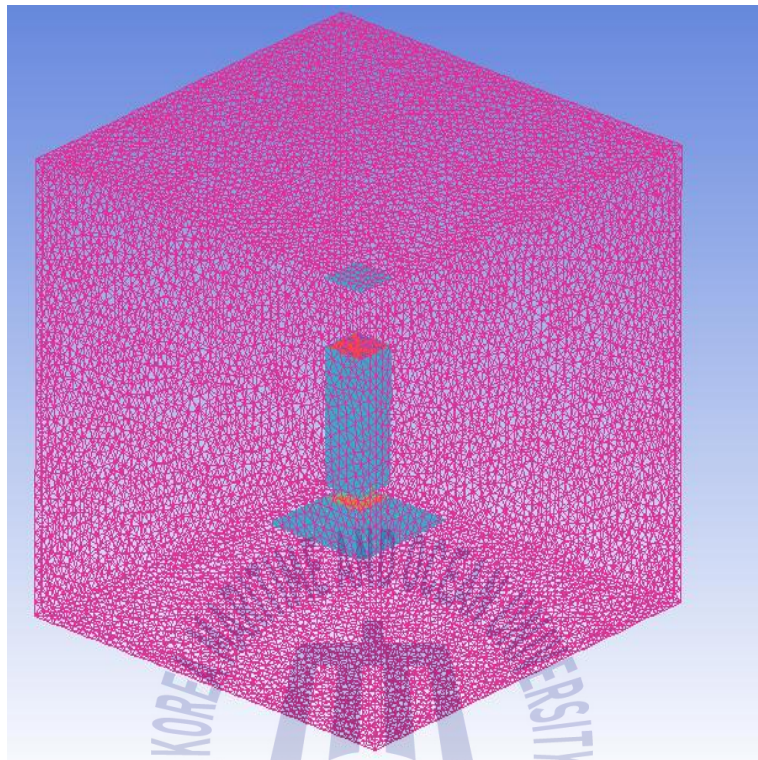


Fig. 3.21 Calculation mesh

Table 3은 PAR 내부 촉매부 형상 계산 조건을 나타낸다. 한국형 피동 촉매식 수소 재 결합기(PAR)의 Honeycomb 형상 촉매부를 2단으로 나누어 촉매부간 거리 50, 100, 200, 300mm로 띄었을 때와 촉매부의 개수를 2, 3단으로 나누었을 때, 촉매부의 형상을 Honeycomb, Cross over, Hexagon형으로 나누었을 때 초기 수소농도 2, 4, 6, 8, 10, 12% 에서 해석을 수행하였다.

**Table 3** Cases on catalyst shapes

| Items              |                    |            | Initial hydrogen concentration(%) |
|--------------------|--------------------|------------|-----------------------------------|
| Shapes             | Distance(mm)       | 50         | 2,4,6,8,10,12                     |
|                    |                    | 100        |                                   |
|                    |                    | 200        |                                   |
|                    |                    | 300        |                                   |
|                    | Number of catalyst | 1          |                                   |
|                    |                    | 2          |                                   |
|                    |                    | 3          |                                   |
|                    | Shapes             | Honeycomb  |                                   |
|                    |                    | Cross over |                                   |
|                    |                    | Hexagon    |                                   |
| Ambient conditions | Pressure(bar)      | 1          |                                   |
|                    | Temperature(K)     | 300        |                                   |



Table 4은 PAR 외부 가이드 형상 계산 조건을 나타낸다. 2단 축매 PAR 내부형상을 기본으로 외부에 가이드를 부착하였다. 가이드 높이(크기) 50, 100, 150mm, 축매부와의 거리 0, 50, 100mm, 가이드 각도 30, 60, 120, 150° 를 바꾸어 유속 1m/s일 때 바람의 방향 0, 90, 180° 에서 해석을 수행하였다.

**Table 4** Cases on guide shapes

|         | Guide<br>height(mm) | Guide<br>distance(mm) | Guide<br>angle(°) | Flow<br>velocity(m/s) | Flow<br>directions(°) |
|---------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Base    | 0                   | 0                     | 0                 | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 1  | 50                  | 50                    | 30                | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 2  | 100                 | 50                    | 30                | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 3  | 150                 | 50                    | 30                | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 4  | 150                 | 0                     | 30                | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 5  | 150                 | 50                    | 30                | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 6  | 150                 | 100                   | 30                | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 7  | 150                 | 100                   | 30                | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 8  | 150                 | 100                   | 60                | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 9  | 150                 | 100                   | 120               | 1                     | 0, 90, 180            |
| Case 10 | 150                 | 100                   | 150               | 1                     | 0, 90, 180            |



## 3.2 내부 구조 해석 및 고찰

### 3.2.1 성능 평가 방법

내부형상에 따른 성능 평가 방법에는 수소 자발화 위험도 평가와 수소 저감률 평가가 있다. Fig. 3.22는 수소 자발화 위험도 평가 방법을 나타낸다. 수소 자발화가 가능한 수소의 체적분율 하한계는 4vol%이고 고온 표면(hot surface)이 발화원인 경우 온도의 하한계는 913.15K이다.(Ha, 2008) 본 연구에서 수소 폭발 위험도를 평가하는 방법으로 촉매부에서부터 수소 농도 하한계 이하 영역의 두께(A)와 온도 하한계 이상영역의 두께(B)를 계측하여 자발화가 가능한 고온 고농도 영역의 두께인 B-A의 크기로 PAR의 자발화에 의한 수소폭발 위험도를 평가하였다. 수소 저감률 평가 방법은 PAR내부 상부에 평판을 만들어 평균수소 농도를 측정하고 초기 수소농도에서 평균수소 농도 값을 빼 수소저감률을 계산하여 평가하였다.

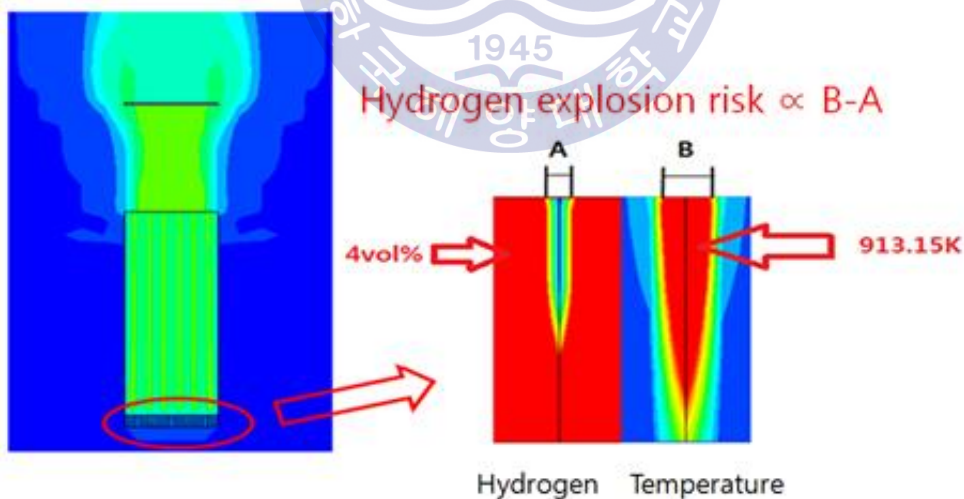
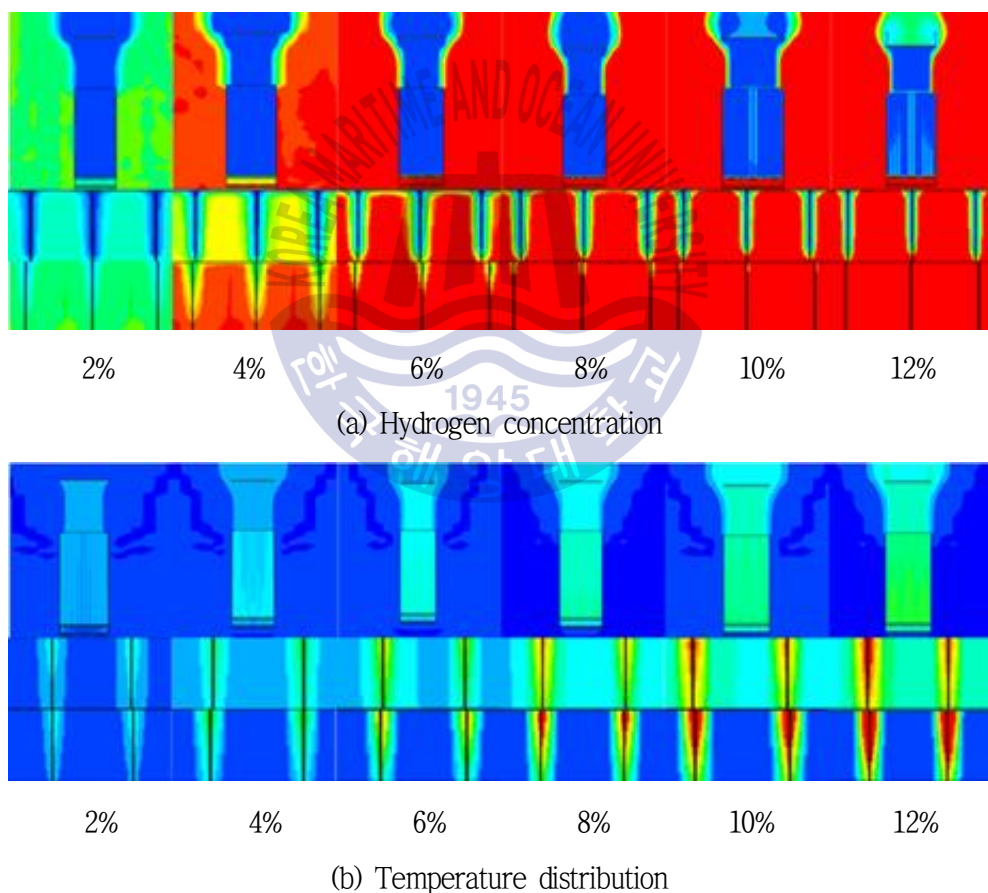


Fig. 3.22 Evaluation criteria for possibility of spontaneous ignition

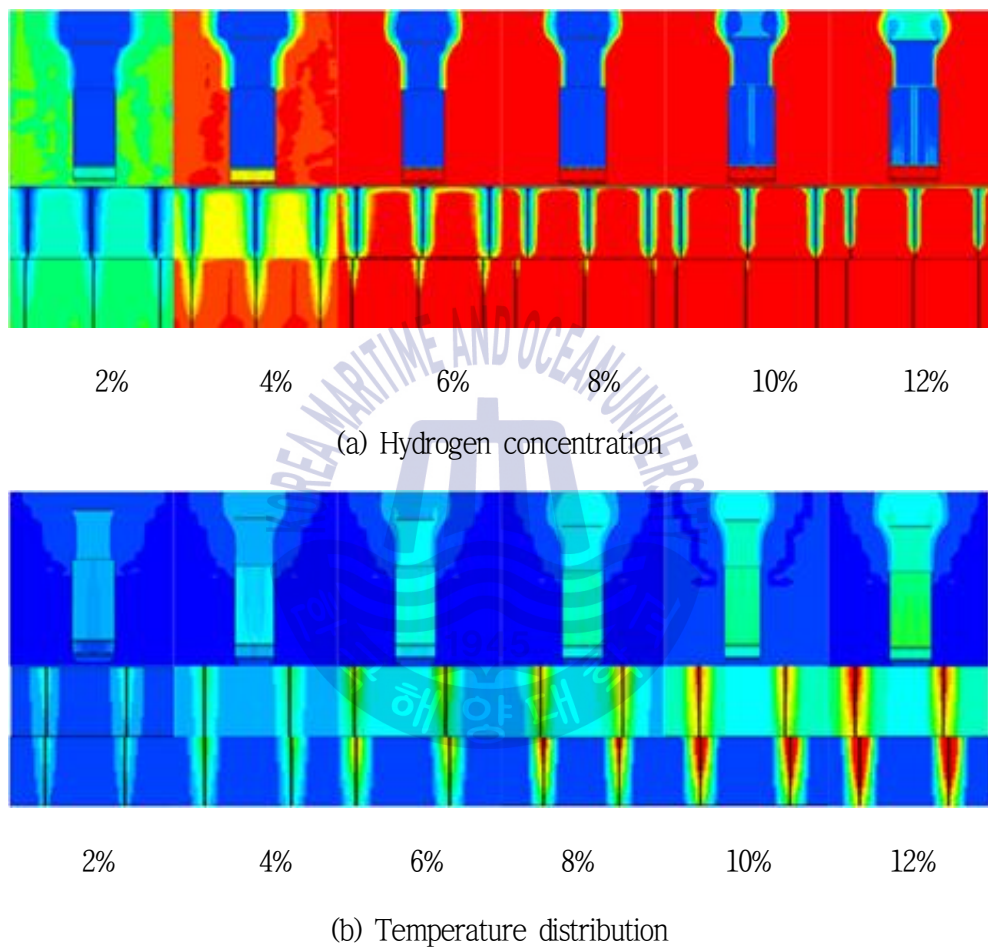
### 3.2.2 다단촉매 해석

Fig. 3.23은 촉매부의 개수가 2개일 때 촉매부간의 거리를 50mm 띄었을 때 수소와 온도의 분포를 나타낸 것이다. 수소의 경우 0%부터 4%까지의 contour로 나타내었고 온도의 경우 300K부터 913.15K까지의 contour로 나타내었다. 자발화 가능 수소 영역은 초기 수소농도가 6%부터 첫 번째 촉매부에서 대부분을 차지하고 온도의 경우 8%부터 나타나기 시작한다. 두 번째 촉매부에서는 수소의 경우 6%부터 나타나지만 온도의 경우 12%를 넘어가야 자발화 가능 영역이 나타난다.



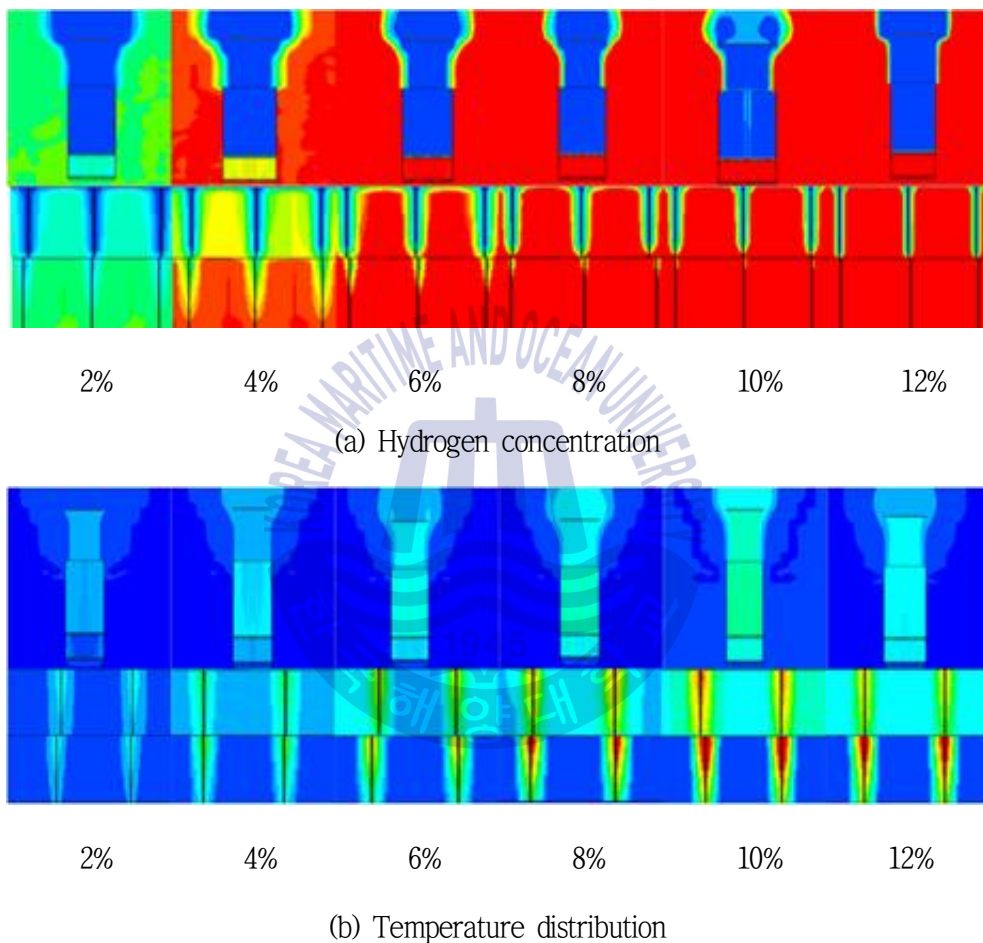
**Fig. 3.23** Hydrogen concentration and temperature distribution of catalyst gap distance 50mm

Fig. 3.24은 촉매부간 거리가 100mm일 때 수소와 온도 분포를 나타낸다. 자발화 가능 수소 영역은 초기 수소 농도가 6%부터 첫 번째 촉매부에서 대부분을 차지하고 온도의 경우 8%부터 나타나기 시작한다. 두 번째 촉매부에서는 수소의 경우 6%부터 나타나지만 온도의 경우 12%를 넘어가야 자발화 가능 영역이 나타난다.



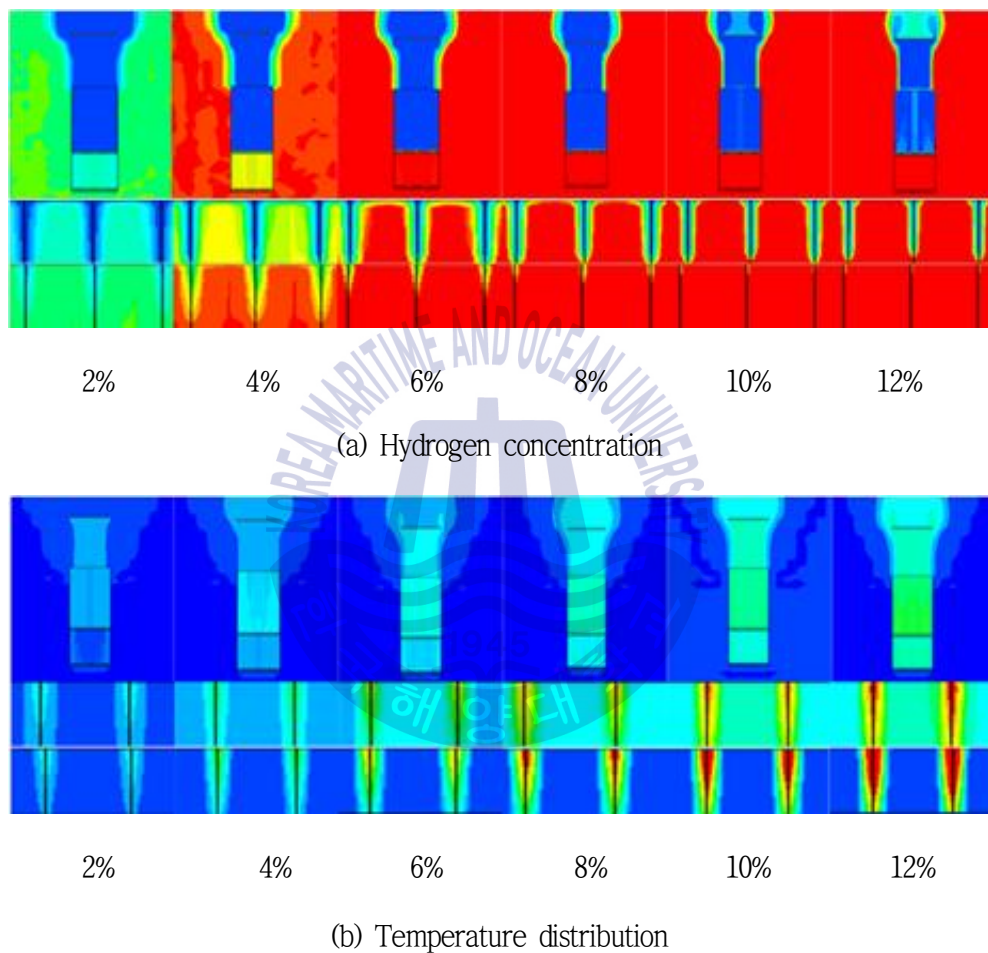
**Fig. 3.24** Hydrogen concentration and temperature distribution of catalyst gap distance 100mm

Fig. 3.25은 촉매부간 거리가 200mm일 때 수소와 온도 분포를 나타낸다. 자발화 가능 수소 영역은 초기 수소농도가 6%부터 첫 번째 촉매부에서 대부분을 차지하고 온도의 경우 8%부터 나타나기 시작한다. 두 번째 촉매부에서는 수소의 경우 6%부터 나타나지만 온도의 경우 12%를 넘어가야 자발화 가능 영역이 나타난다.



**Fig. 3.25** Hydrogen concentration and temperature distribution of catalyst gap distance 200mm

Fig. 3.26은 촉매부간 거리가 300mm일 때 수소와 온도 분포를 나타낸다. 자발화 가능 수소 영역은 초기 수소농도가 6%부터 첫 번째 촉매부에서 대부분을 차지하고 온도의 경우 8%부터 나타나기 시작한다. 두 번째 촉매부에서는 수소의 경우 6%부터 나타나지만 온도의 경우 12%를 넘어가야 자발화 가능 영역이 나타난다.



**Fig. 3.26** Hydrogen concentration and temperature distribution of catalyst gap distance 300mm



Fig. 3.27은 자발화 여부를 판단하기 위해 촉매부에서 폭발 가능 온도(913.15K) 영역과 수소 농도(4%) 영역의 두께를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 자발화 가능 초기수소 농도가 첫 번째 촉매부에서 가장 낮으므로 두 번째 촉매부의 온도와 수소의 두께는 나타나지 않았다. 그래프에서 온도의 두께가 수소의 두께보다 증가되는데 이영역이 자발화 영역이다.

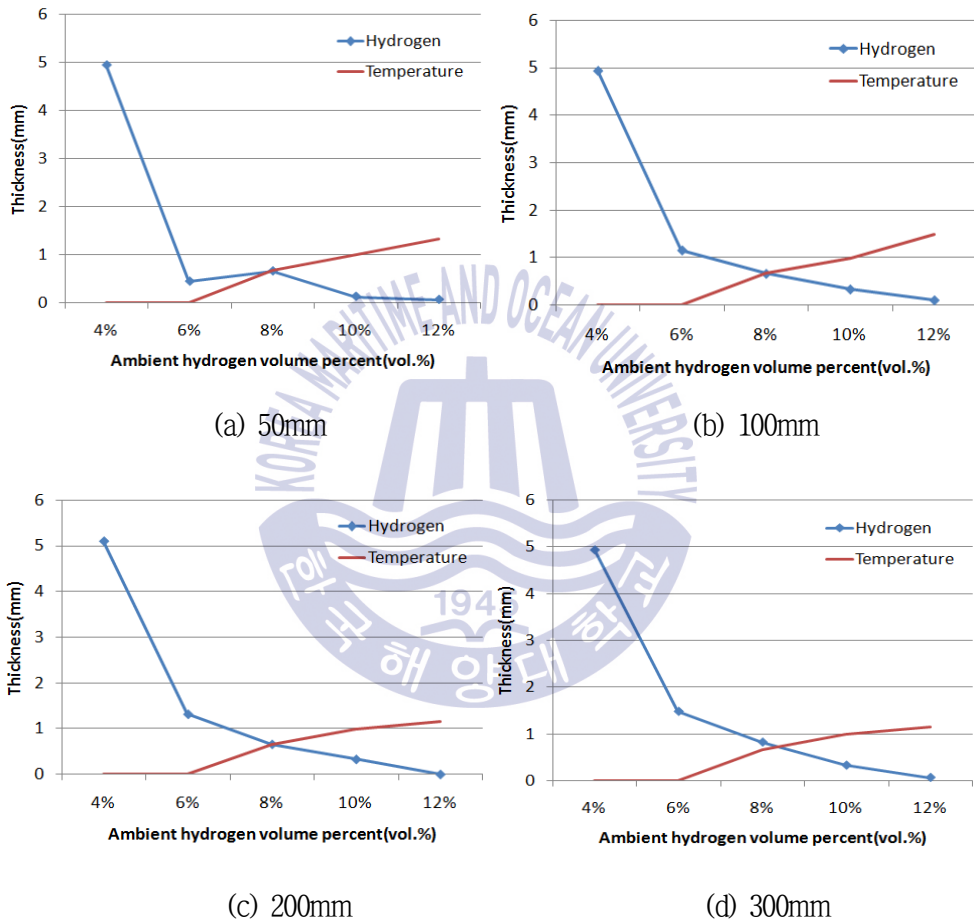
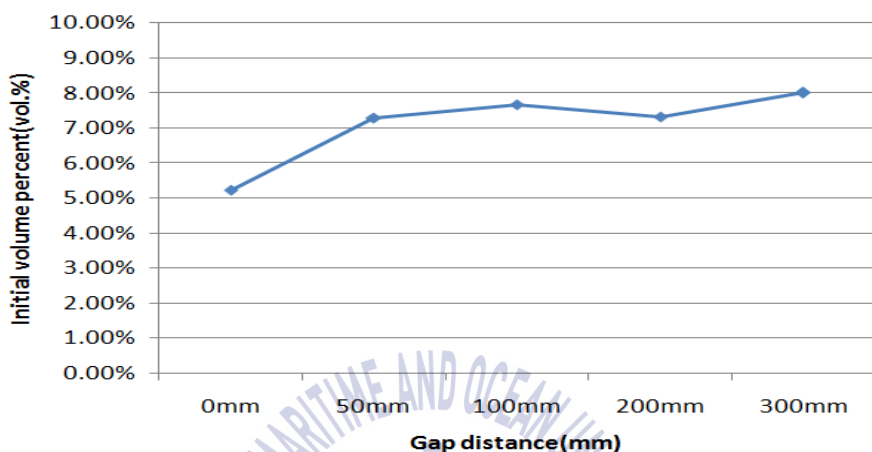
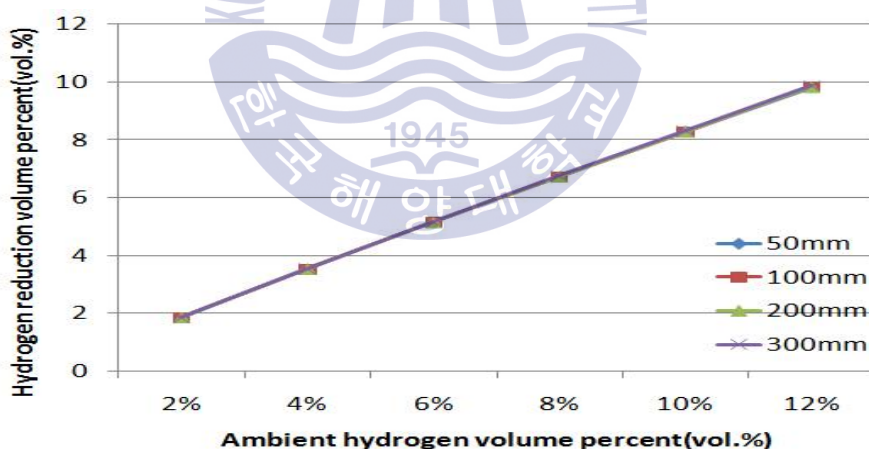


Fig. 3.27 Spontaneous combustion area with gap distance variation

Fig. 3.28은 자발화 가능 초기 수소농도와 수소 저감률을 나타낸다. 자발화 가능 초기 수소농도는 거리가 늘어나는 것에 비례하지 않으며 큰 차이도 없다. 수소 저감률 또한 거리가 늘어나도 큰 차이가 없다.



(a) Initial hydrogen volume percentage



(b) Hydrogen reduction rates

Fig. 3.28 Initial hydrogen volume percentage for spontaneous combustion and hydrogen reduction rates



촉매부간 거리가 100mm일 때 이후로 자발화 위해도의 변화가 미비하고 수소저감률은 거리에 따른 변화가 거의 없기 때문에 촉매부간의 거리를 100mm로 하여 개수에 따른 성능을 비교하였다. Fig. 3.29은 Honeycomb 형상 촉매부 1개일 때 수소와 온도를 나타낸다. 초기 수소농도가 늘어나면서 촉매부에서 4%의 체적비를 넘어가는 영역이 줄어들고 913.15K을 넘어가는 온도 영역은 늘어난다.

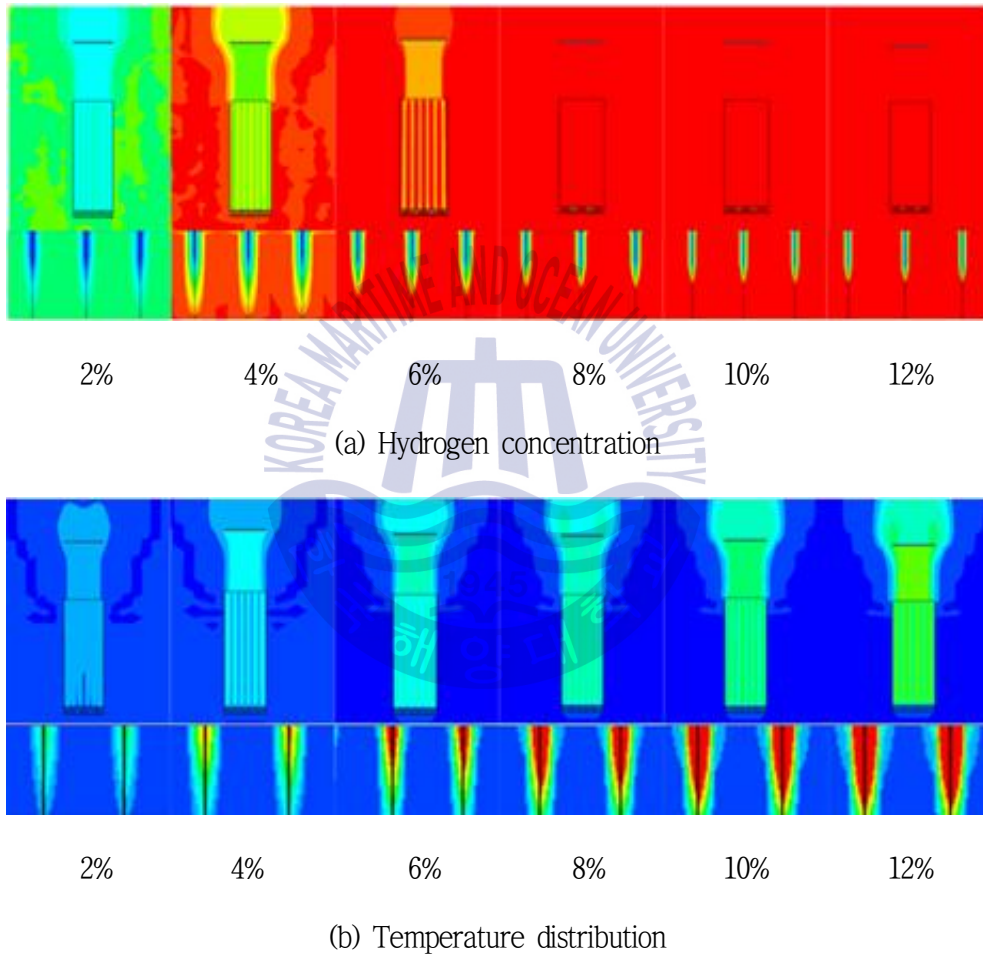
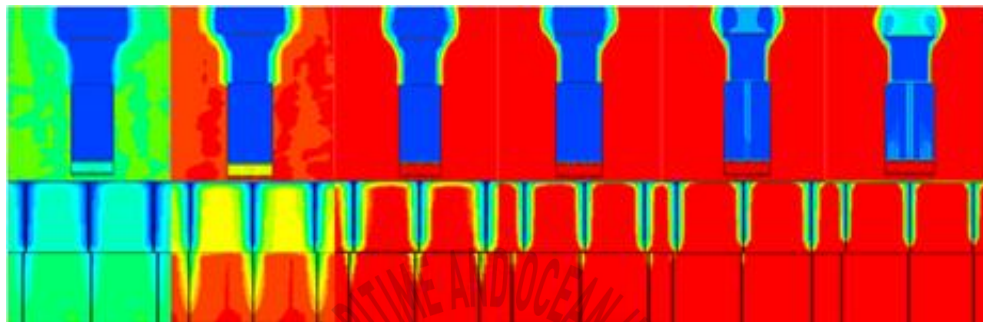
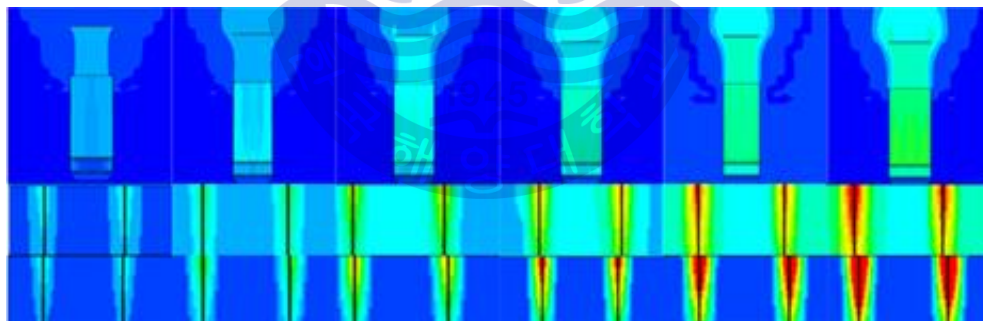


Fig. 3.29 Hydrogen concentration and temperature distribution of 1-Step catalyst

Fig. 3.30은 Honeycomb 형상 촉매부가 2개일 때 수소와 온도를 Contour로 나타낸 것이다. 촉매부의 1단에서 4%이하의 영역은 초기 수소농도 6%를 지나면서 거의 나타나지 않고 2단에서는 초기 수소농도가 올라가면서 영역이 지속적으로 줄어든다. 온도의 경우 1단에서 초기 수소농도 8%부터, 2단에서는 초기 수소농도 12%부터 913.15K에 이르는 영역이 나타난다.



(a) Hydrogen concentration



(b) Temperature distribution

Fig. 3.30 Hydrogen concentration and temperature distribution of 2-Step catalysts

Fig. 3.31은 Honeycomb 형상 촉매부가 3개일 때 수소와 온도를 contour로 나타낸 것이다. 촉매부의 1단에서 4% 이하의 영역은 초기 수소농도 6%를 지나면서 거의 나타나지 않고 2단에서는 초기 수소농도가 올라가면서 영역이 지속적으로 줄어들며 3단에서는 초기 수소농도가 12%까지 올라가도 4% 이상의 영역은 나타나지 않는다. 온도의 경우 1단에서 초기 수소농도가 10% 이상일 때 913.15K를 넘어가고 2단, 3단에서는 913.15K를 넘어가지 않는다.

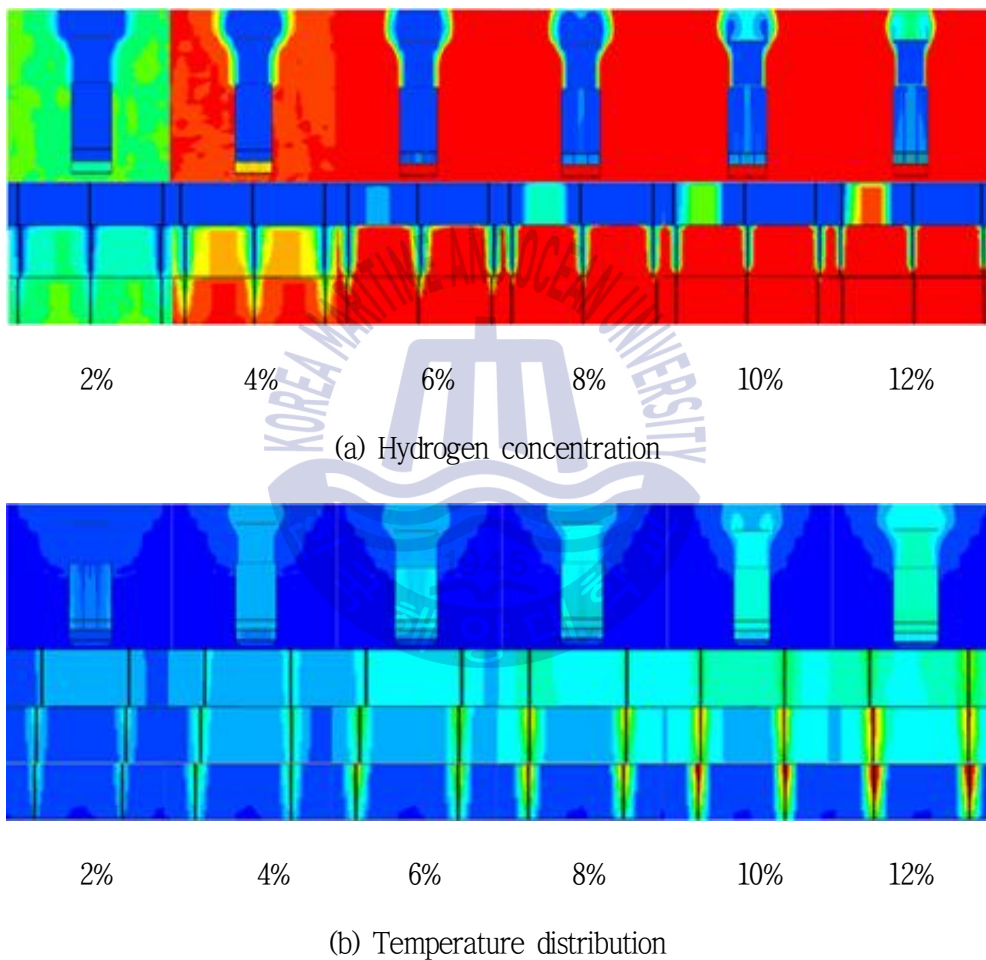
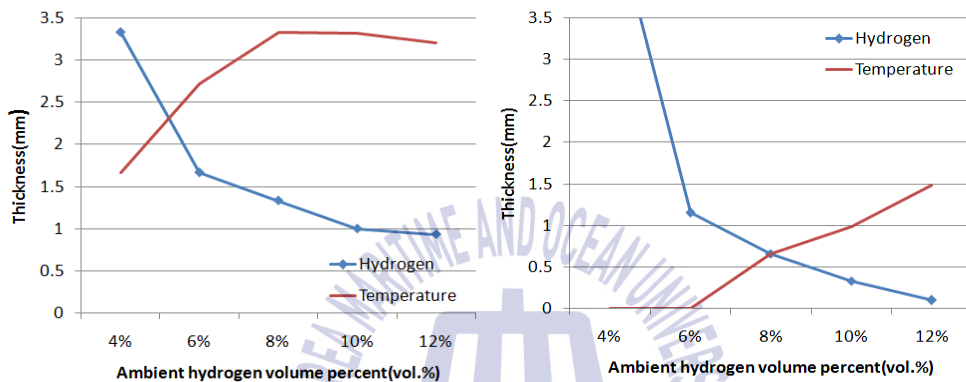


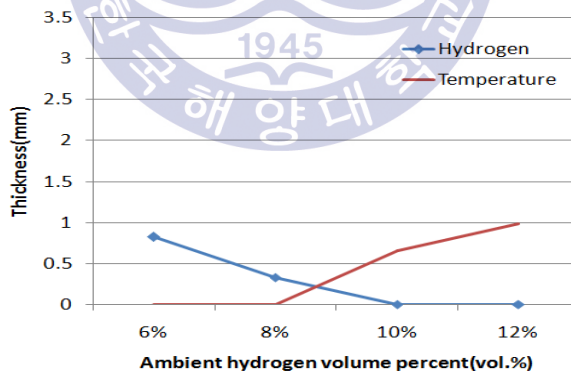
Fig. 3.31 Hydrogen concentration and temperature distribution of 3-Step catalysts

Fig. 3.32은 폭발여부를 판단하기 위해 촉매부에서 폭발 가능 온도(913.15K) 영역과 수소 농도(4%) 영역의 두께를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 촉매부가 2, 3개일 때 자발화 가능 초기수소 농도가 첫 번째 촉매부에서 가장 낮으므로 두 번째, 세 번째 촉매부의 온도와 수소의 두께는 나타나지 않았다. 그래프에서 온도의 두께가 수소의 두께를 보다 증가되는데 이 영역이 자발화 영역이다. 촉매부의 개수가 1개일 때 초기 수소농도 5.2%, 2개인 경우 8%, 3개인 경우 8.7%부터 수소폭발이 가능하다.



(a) 1-Step catalyst

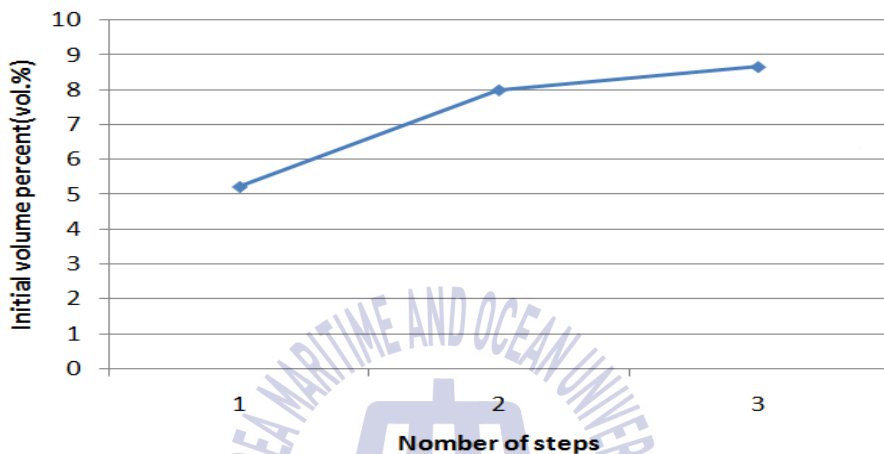
(b) 2-Step catalysts



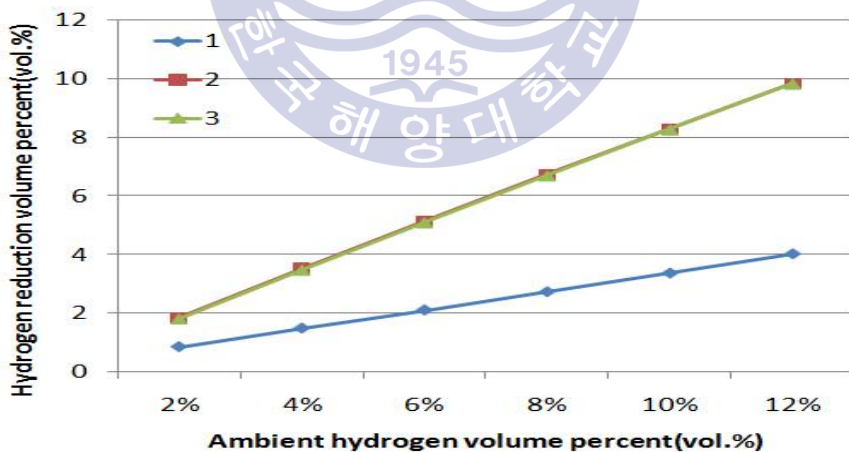
(c) 3-Step catalysts

Fig. 3.32 Spontaneous combustion area with the number of the steps

Fig. 3.33은 자발화가 일어나기 시작하는 초기 수소농도와 수소 저감률을 촉매부 개수에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 촉매부의 개수가 증가 할수록 자발화 가능 초기 수소 농도가 증가하고 수소저감률 또한 증가한다.



(a) Initial hydrogen volume percentage

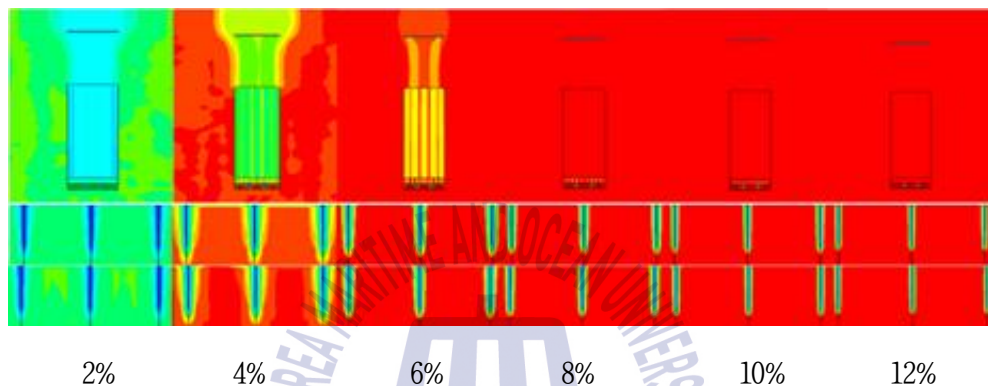


(b) Hydrogen reduction rates

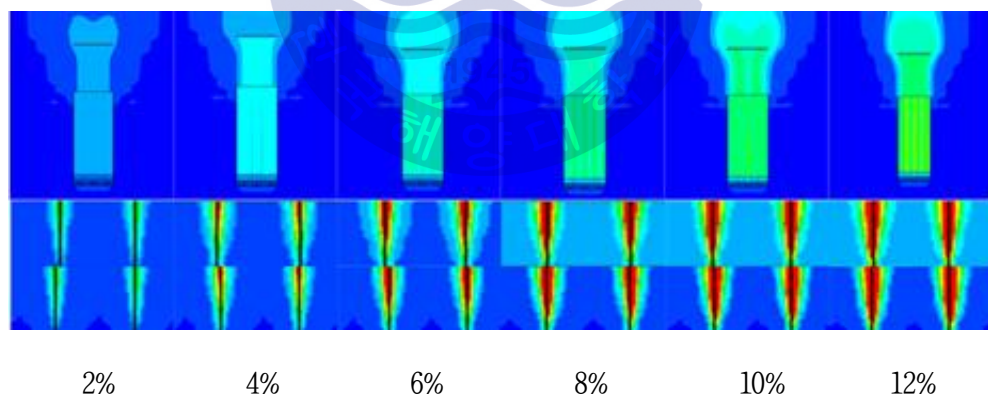
Fig. 3.33 Initial hydrogen volume percentage for spontaneous combustion and hydrogen reduction rates

### 3.2.3 촉매 형상 해석

Fig. 3.34은 Cross over 형상의 온도와 수소 분포를 나타낸다. 자발화 가능 수소 영역은 초기 수소농도가 4%부터 첫 번째 촉매부에서 나타나고 온도의 경우 6%부터 나타나기 시작한다. 두 번째 촉매부에서는 수소와 온도 둘 다 초기 수소농도가 6%일 때 나타난다.



(a) Hydrogen concentration

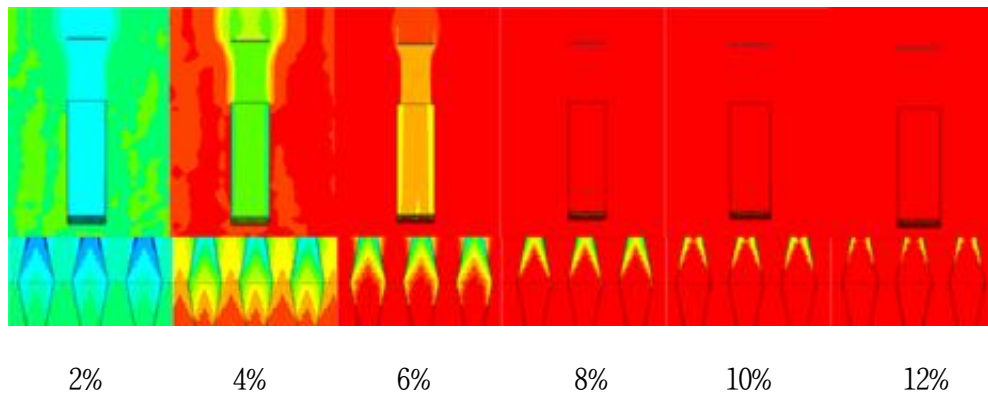


(b) Temperature distribution

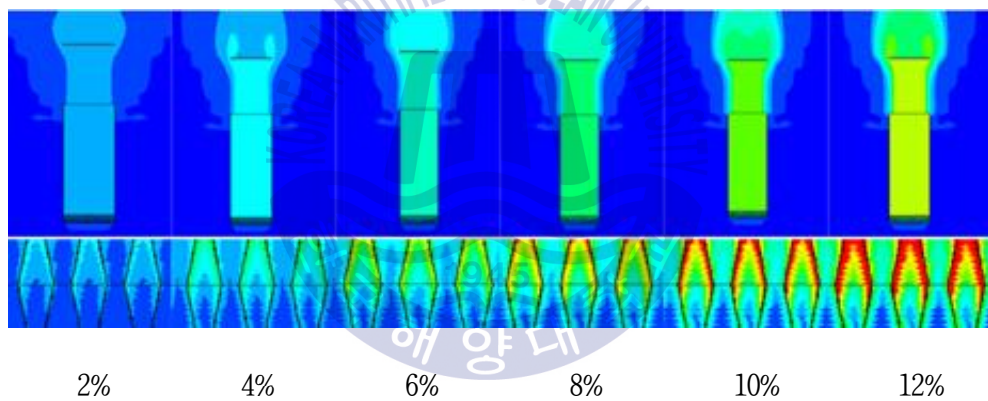
**Fig. 3.34** Hydrogen concentration and temperature distribution of cross over type



Fig. 3.35은 Hexagon 형상의 온도와 수소 분포를 나타낸다. 자발화 가능 수소영역은 초기 수소농도가 6%부터 촉매부에서 나타나고 온도의 경우 10%부터 나타난다.



(a) Hydrogen concentration



(b) Temperature distribution

Fig. 3.35 Hydrogen concentration and temperature distribution of hexagon type

Fig. 3.36은 자발화 여부를 판단하기 위해 촉매부에서 폭발 가능 온도(913.15K)영역과 수소농도(4%) 영역의 두께를 측정한 그래프이다. Cross over 형상과 Hexagon 형상의 온도두께가 수소두께보다 증가되는데 이영역이 자발화 영역이다. Honeycomb 형상의 경우 초기 수소농도 5.2, Cross over 형상 7.1%, Hexagon 형상 10% 이상일 때 수소 자발화가 가능해 진다.

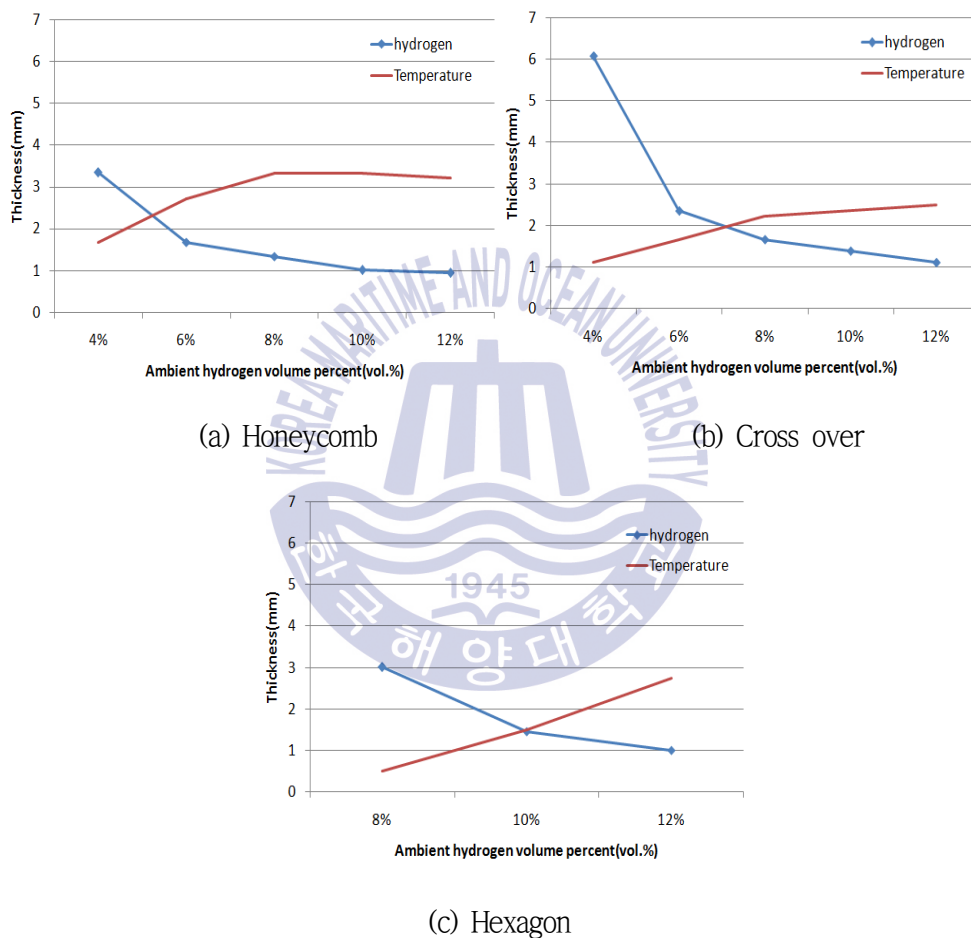
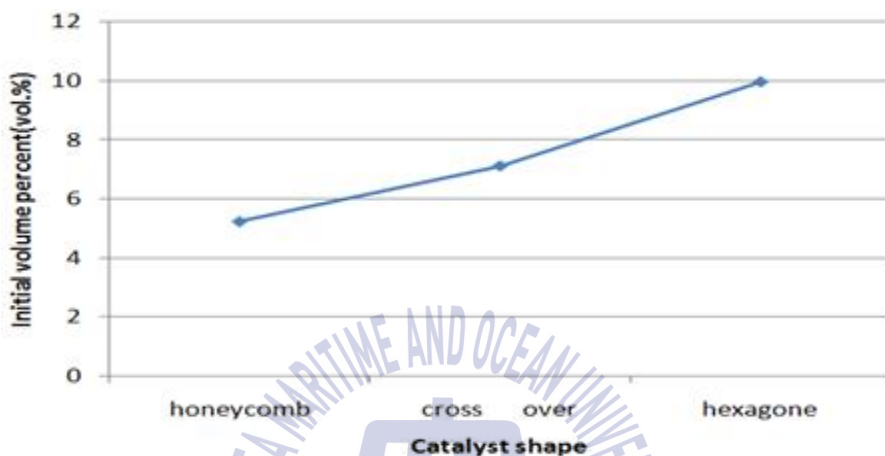


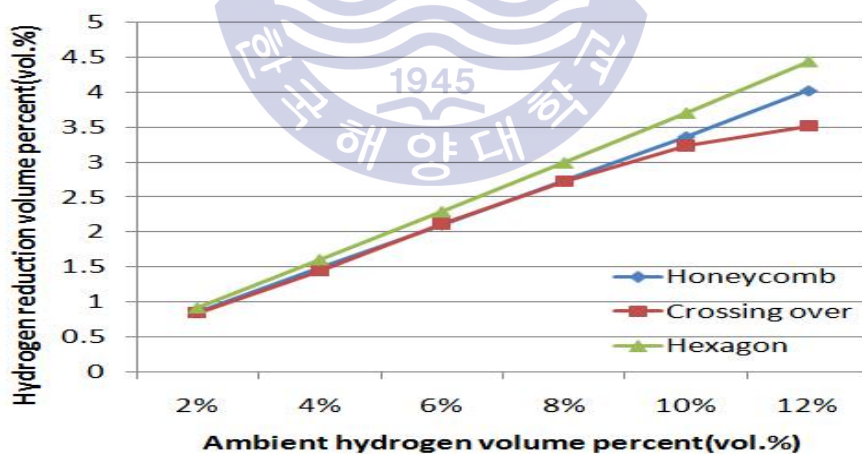
Fig. 3.36 Spontaneous combustion area with structure shape variation



Fig. 3.37은 자발화가 일어나기 시작하는 초기 수소농도와 수소저감률을 촉매부 형상에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 자발화 가능 초기 수소농도는 Hexagon 형상에서 가장 높고 Honeycomb 형상에서 가장 낮다. 수소 저감률은 큰 차이는 없지만 Hexagon 형상이 가장 높고 Cross over 형상이 가장 적다.



(a) Initial hydrogen volume percentage



(b) Hydrogen reduction rates

Fig. 3.37 Initial hydrogen volume percentage for spontaneous combustion and hydrogen reduction rates

### 3.2.4 요약

피동 촉매식 수소 재결합기 내부 촉매부의 형상이 성능에 미치는 영향을 요약하면 다음과 같다.

촉매부의 거리 : 수소저감률과 자발화 가능 초기 농도는 100mm까지 증가된 후 유사한 변화를 나타낸다.

다단촉매 : 1단과 비교하여 2단과 3단일 경우 수소 자발화의 가능성이 크게 저감되고 수소 저감률이 크게 증가되었고 3단 촉매의 경우 2단 촉매보다 소폭 증가하였다.

형상 : Hexagon 형상이 자발화 가능 초기 수소농도가 10%로 가장 높았고 Honeycomb 형상이 5.2%로 가장 낮았다. 수소 저감률 또한 Hexagon 형상이 가장 높았다.

이상을 종합하였을 때 Hexagon 형상과 2단 Honeycomb 형상이 수소저감 향상과 자발화에 의한 수소폭발 위험을 줄일 수 있다.



### 3.3 외부가이드 구조해석 및 고찰

#### 3.3.1 외부가이드 성능 평가 방법

외부가이드의 성능을 평가하기 위해 가이드로 유도되는 수소의 면적을 측정하고 축매부로 유입되는 수소의 유량을 측정하여 비교하였다. Fig. 3.38은 가이드의 성능을 평가하는 방법 중 유도되는 수소의 면적을 측정하는 방법을 나타낸다. 가이드의 밑면을 중심으로 지름 1m의 구를 생성하여 유도되는 수소의 면적을 계산하였다.

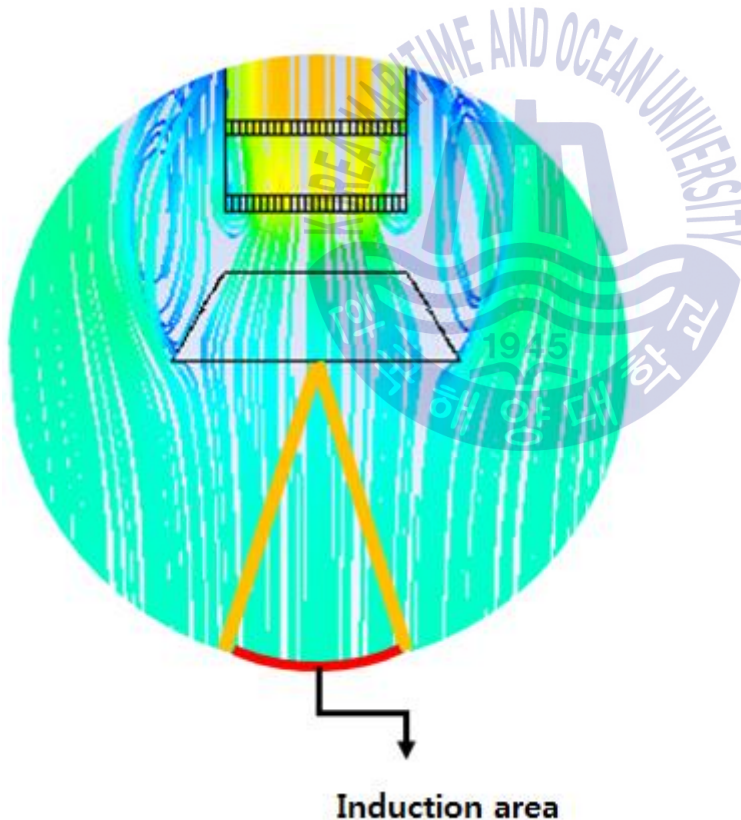
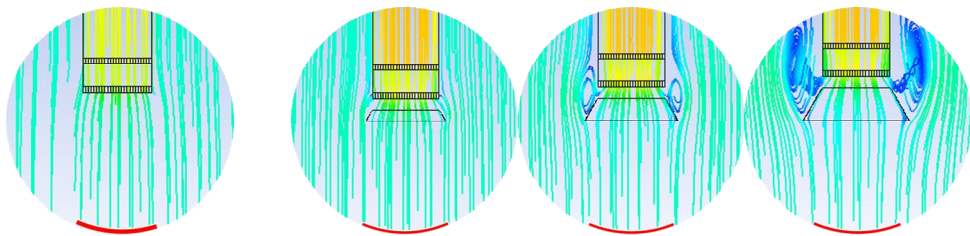


Fig. 3.38 Measurement method of hydrogen induction area

### 3.3.2 해석결과

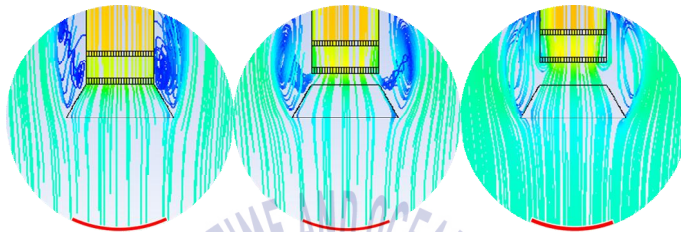
Fig. 3.39은 유동의 방향이 아래에서 위로 향할 때 각 조건들의 수소 유도 면적을 나타낸다. PAR 내부의 고온에 의하여 발생한 강한 유동은 하부의 유체를 빨아 올리는 유동을 생성한다. 가이드가 없는 경우 입구 주변의 유체만이 입구로 흡입된다. 그러나 가이드가 설치되면 가이드 내벽에 부딪쳐 입구로 흡입되는 유량이 증가한다. 가이드의 높이가 증가하면 내벽에 부딪치는 유량이 증가하면서 유도면적이 증가한다. 촉매부와 가이드의 거리가 증가하면 입구에서 유체를 빨아 올리는 힘이 줄어들어 흡입되는 유량이 줄어들게 되어 유도면적이 감소한다. 가이드 각도  $60^\circ$  까지 증가된 넓이로 인해 내벽에 부딪쳐 흡입되는 유량이 증가하면서 유도면적이 증가한다. 가이드 각도  $120^\circ$  일 때 일부는 외벽에 부딪쳐 가이드 외부에 와를 생성하고 입구로 흡입되므로  $150^\circ$  일 때보다 유도면적이 넓지만 각도  $60^\circ$  일 때의 유도면적에 미치지 못한다.



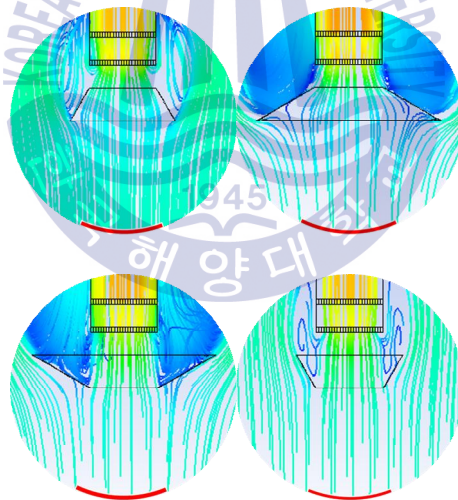


(a) Base

(b) Guide height



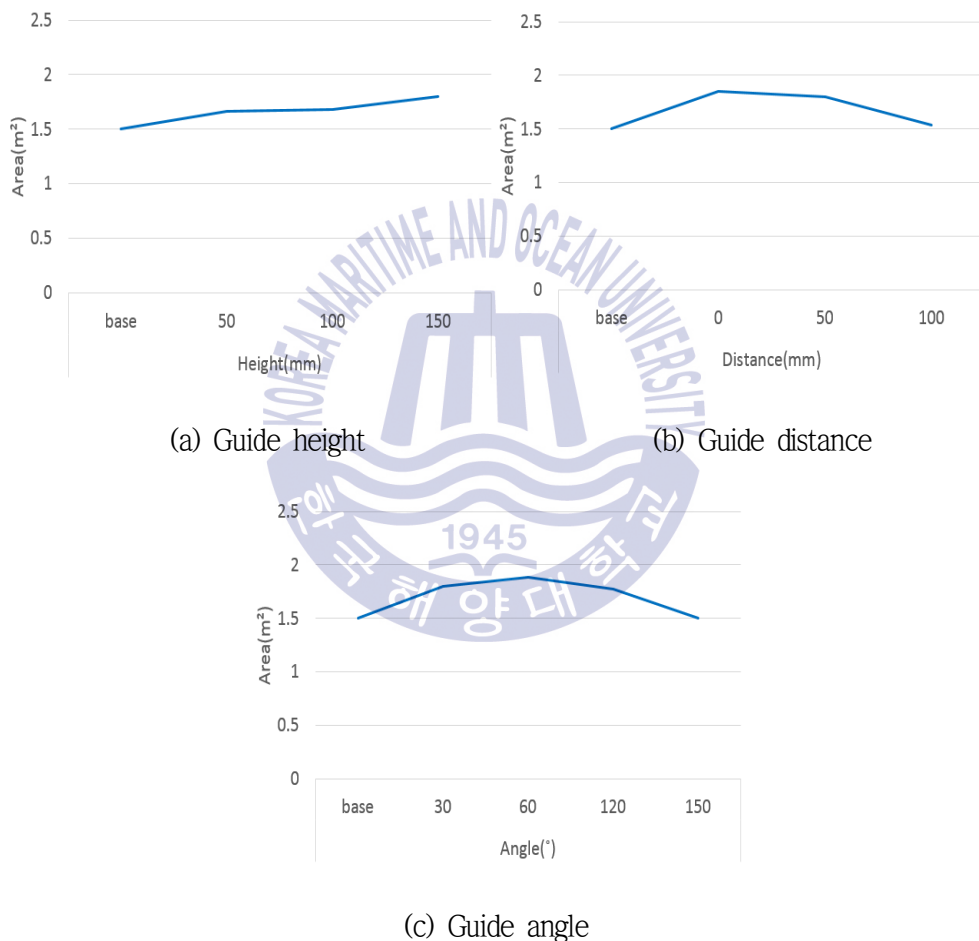
(c) Guide distance



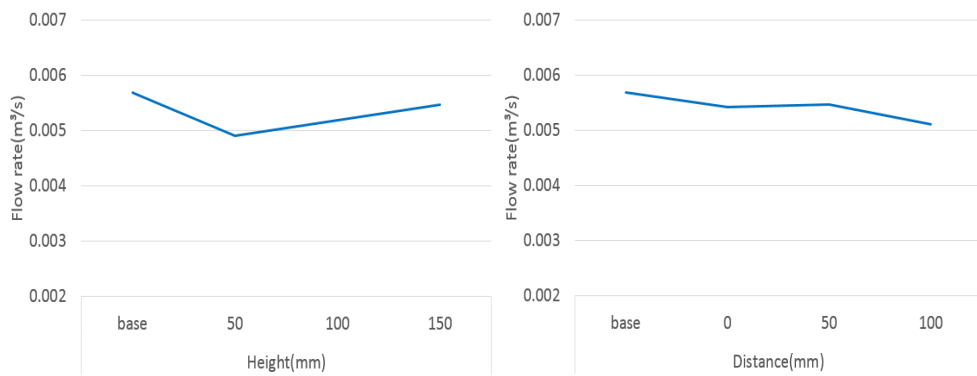
(d) Guide angle

Fig. 3.39 Flow behavior upward flow

Fig. 3.40은 Fig. 3.39의 수소 유도면적을 측정하여 나타낸 도표이고 Fig. 3.41은 1단 촉매부를 지나는 수소의 유량을 도표로 나타낸 것이다. 두 그래프를 종합하면 가이드 높이가 증가함에 따라 빨려 들어오는 수소 유도면적이 증가, 가이드와 촉매사이 거리의 경우 빨려 들어오는 유동 폭이 감소화 하여 유도면적 감소, 각도의 경우  $60^\circ$  일 때 수소 유도면적이 증가한 것을 알 수 있다. 유동의 방향이 아래에서 위로 향하는 모든 경우 가이드의 설치가 유동 폭과 면적을 증가시켰다.

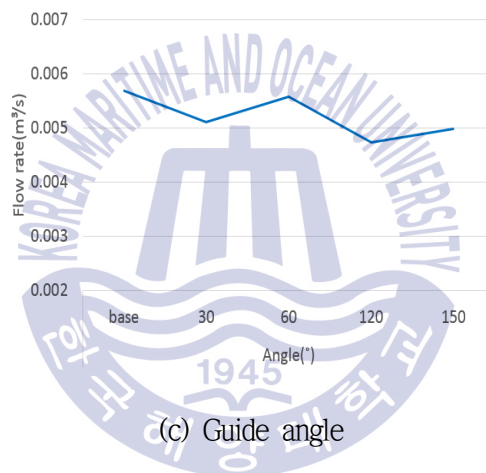


**Fig. 3.40** Induced area on upward flow



(a) Guide height

(b) Guide distance



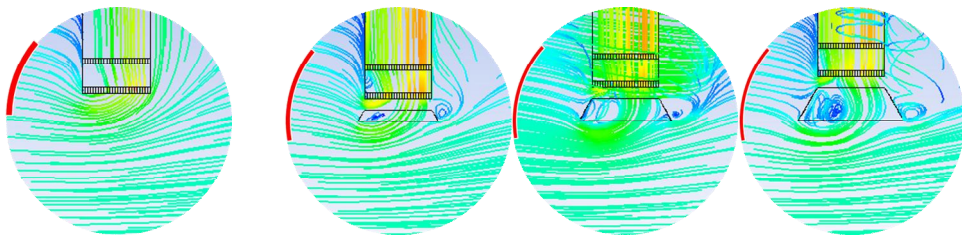
(c) Guide angle

**Fig. 3.41** Induced hydrogen flow rate

Fig. 3.42은 유동의 방향이 옆으로 향할 때 각 조건들의 수소 유도면적을 나타낸다. 가이드가 없는 경우 입구주변의 유체만이 입구로 흡입된다. 그러나 가이드가 설치되면 일부는 가이드 외벽에 부딪쳐 흡입되고 일부는 가이드 하부의 입구를 통해 흡입된다. 가이드의 높이가 증가하면 외벽에 부딪치는 유량이 증가하여 전체 흡입면적이 증가한다. 촉매부와 가이드의 거리가 증가하면 외벽에 부딪쳐 올라가는 유량과 하부 입구에서 흡입되는 유량에 의해 촉매부와 가이드 사이를 지나가는 유동의 흡입 유량이 많아져 전체적으로 유도면적이 증가한다. 가이드 각도  $60^\circ$  까지 외벽에 부딪쳐 입구로 흡입되는 유량이 증가하여 유도면적이 증가한다. 가이드 각도  $120^\circ$  일 때에 비해  $150^\circ$  일 때 외벽에 부딪친 유동이 와를 생성하기 때문에 입구로 흡입되는 유량이 많아 유도면적이 넓지만  $60^\circ$  일 때 비해 줄어든다.

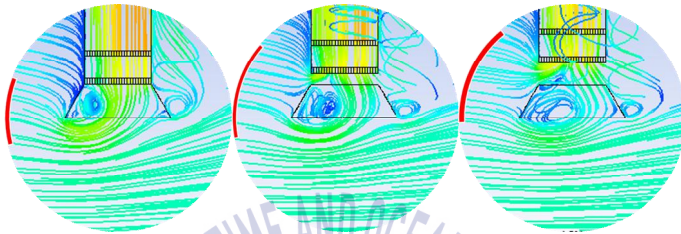




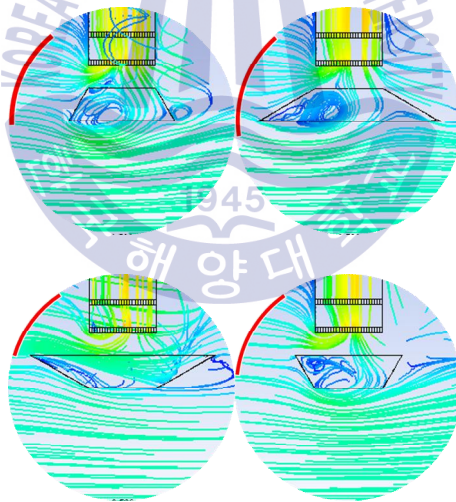


(a) Base

(b) Guide height



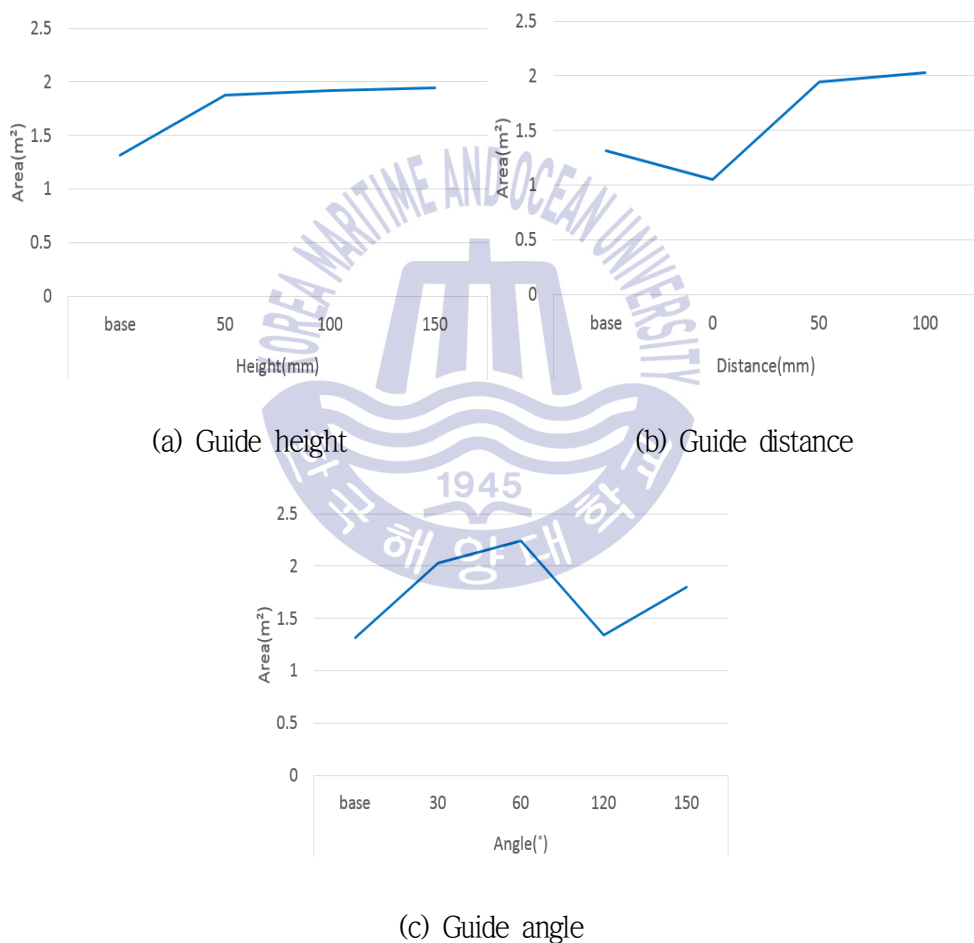
(c) Guide distance



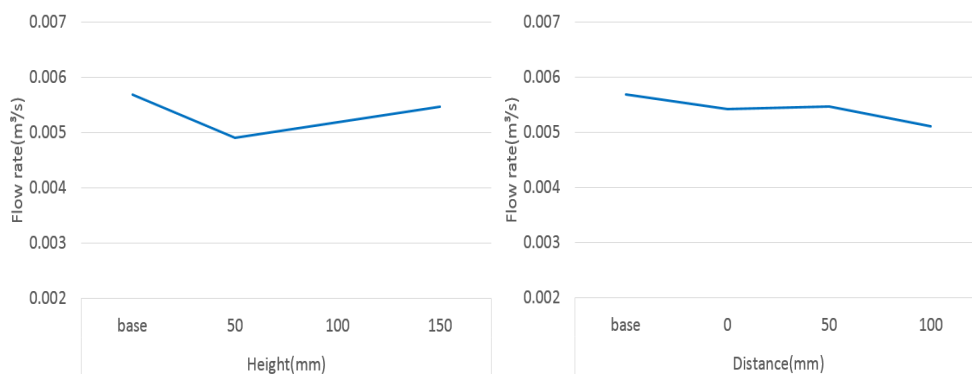
(d) Guide angle

**Fig. 3.42** Flow behavior sideward flow

Fig. 3.43은 Fig.3.42의 수소 유도면적을 측정하여 나타낸 도표이고 Fig. 3.44은 1단 축매부를 지나는 수소의 유량을 도표로 나타낸 것이다. 두 그래프를 종합하면 가이드 높이가 증가함에 따라 빨려 들어오는 유동 폭이 감소하지만 넓어진 입구면적의 영향으로 수소 유도면적은 증가, 가이드와 축매사이 거리의 경우 빨려 들어오는 유동 폭이 50mm일 때 까지 소량 증가 후 감소하고 유도면적 증가, 각도의 경우 빨려 들어오는 유동 폭 및 면적이 60° 까지 증가 후 감소한다. 가이드의 설치는 유동 폭은 감소 시켰으나 축매부와와의 거리가 0mm일 때를 제외하고 면적을 증가시켰다.

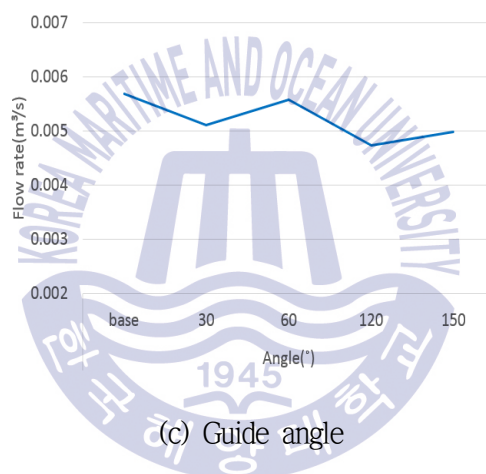


**Fig. 3.43** Induced area on sideward flow



(a) Guide height

(b) Guide distance

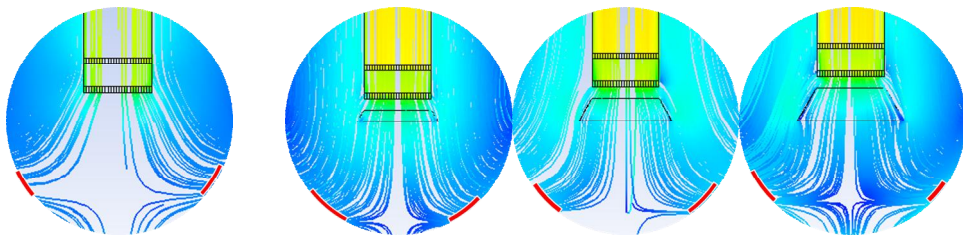


(c) Guide angle

**Fig. 3.44** Induced hydrogen flow rate

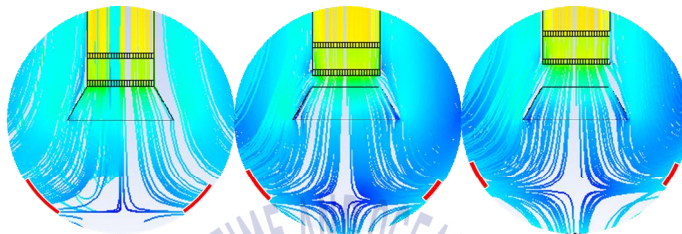
Fig. 3.45은 유동의 방향이 아래로 향할 때 각 조건들의 수소 유도면적을 나타낸다. 가이드가 없는 경우 촉매부의 반응으로 인해 생성된 와가 입구 양 끝에 위치해 양 끝에서만 흡입된다. 그러나 가이드가 설치되면 내벽과 외벽에 부딪친 유동이 와의 위치를 입구 중앙으로 이동시켜 흡입면적을 증가시킨다. 가이드의 높이, 거리가 증가하면 내벽에 부딪치는 유량보다 외벽에 부딪치는 유량이 증가하여 유도면적이 감소한다. 가이드 각도  $60^\circ$  까지 외벽에 부딪치는 유량보다 내벽에 부딪쳐 입구로 흡입되는 유량이 증가하여 유도면적이 증가한다. 가이드 각도  $150^\circ$  일 때에 비해  $120^\circ$  일 때 외벽에 부딪친 유동이 또 다른 작은 와를 생성하기 때문에 입구로 흡입되는 유량이 많아 유도면적이 넓지만  $60^\circ$  일 때 비해 줄어든다.



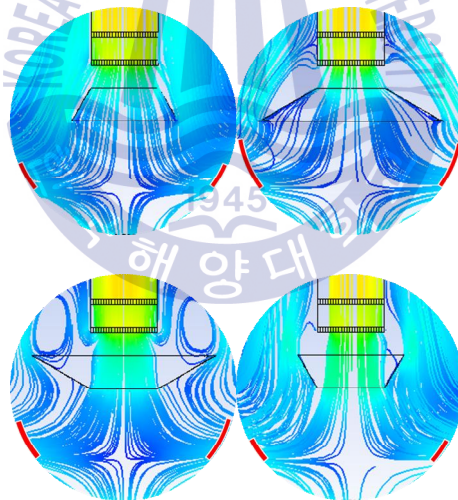


(a) Base

(b) Guide height



(c) Guide distance



(d) Guide angle

**Fig. 3.45** Flow behavior downward flow

Fig. 3.46은 Fig. 3.45의 수소 유도면적을 측정하여 나타낸 도표이고 Fig. 3.47은 1단 촉매부를 지나는 수소의 유량을 도표로 나타낸 것이다. 두 그래프를 종합하면 가이드 높리와 거리가 증가함에 따라 빨리 들어오는 유동 폭 및 면적 감소화, 각도의 경우 각도가 증가함에 따라 유동 폭은 감소화, 면적은  $60^\circ$  까지 증가 후 감소하였다. 가이드의 설치는 유동 폭을 크게 향상 시켰고 촉매부와의 거리 100mm, 각도  $30^\circ$ ,  $150^\circ$  를 제외하고 면적을 증가 시켰다.

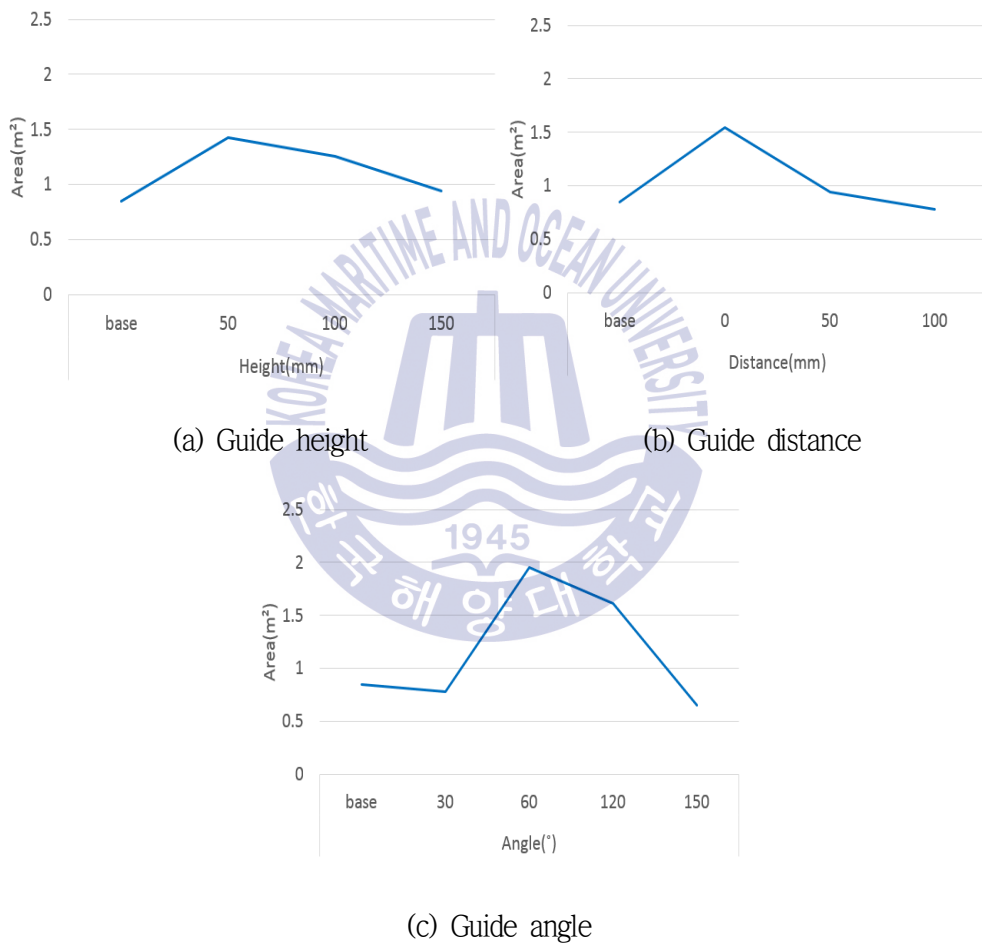
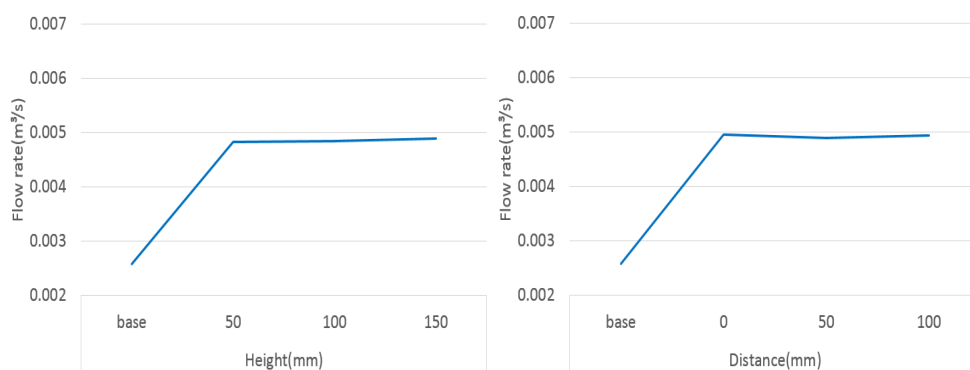
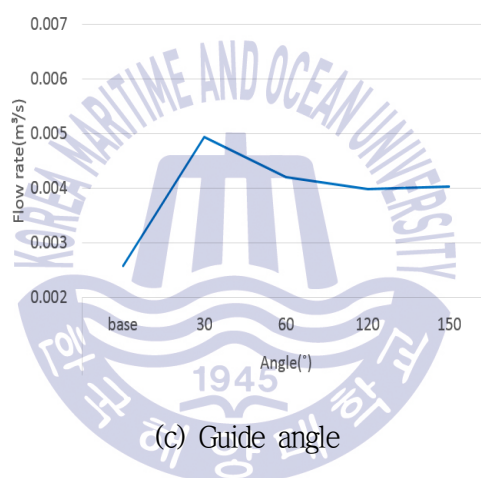


Fig. 3.46 Induced area on downward flow



(a) Guide height

(b) Guide distance



(c) Guide angle

**Fig. 3.47** Induced hydrogen flow rate

### 3.3.3 요약

PAR의 외부에 가이드를 부착하였을 때 PAR의 성능에 미치는 영향에 대해서 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Upward flow(유동이 아래에서 위로 올라가는 경우)에서 가이드 높이 150mm, 촉매와 가이드 직접 부착, 가이드 각도가  $60^\circ$  인 구조가 최적으로 판단된다.

2) Sideward flow(유동이 옆에서 불어오는 경우)에서 가이드 높이 150mm, 촉매와 가이드 거리 100mm, 가이드 각도가  $60^\circ$  인 구조가 최적으로 판단된다.

3) Downward flow(유동이 위에서 아래로 내려오는 경우)에서 가이드 높이 50mm, 촉매와 가이드 직접 부착, 가이드 각도가  $60^\circ$  인 구조가 최적으로 판단된다.

이상을 종합하면 수소유동이 아래에서 위로 유동하는 격납건물 중심부에는 높이 150mm, 각도  $60^\circ$ , 촉매부 직접 부착 가이드를, 수소유동이 옆으로 유동하는 격납건물 하부 및 상부에는 높이 150mm, 촉매부와의 거리 100mm, 각도  $60^\circ$  인 가이드를 부착하고 수소유동이 위에서 아래로 유동하는 격납건물 측면에는 높이 50mm, 각도  $60^\circ$ , 촉매부 직접 부착 가이드가 PAR의 수소유도 및 제거 효율을 증가 시킨다.



## 제 4 장 결 론

중대사고시 격납건물 내부 수소폭발 위해도 및 분위기 유동을 고려한 PAR 내, 외부 형상이 성능에 미치는 영향에 대해 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 격납건물 상부(Point 1)에서 폭발이 발생한 경우 점화점을 중심으로 화염이 확산되며 수소량이 증가함에 따라 연소속도, 최대압력이 증가하였고 격납건물 상부에 전체수소의 40% 이상이 모였을 때 수소폭발이 발생할 경우 격납건물에 충격압력과 순간 응력이 크게 발생한다. 또한 격납건물 하부 우측(Point 5), 좌측(Point 7)에서 폭발이 발생할 경우 연소속도 및 최대압력이 크고 순간 응력 또한 크게 발생한다.

2) 2단 축매에서 축매간 거리를 변화 시켰을 때, 수소 저감률과 자발화 가능 초기 농도는 100mm까지 증가된 후 유사한 변화를 나타낸다. 다만 축매의 경우, 1단과 비교하여 2단, 3단일 때 수소 저감률과 자발화 가능 초기 농도가 크게 증가하였고 3단 축매의 경우 2단 축매보다 소폭 증가하였다. 축매부 형상을 변경한 경우, Hexagon 형상일 때 수소 저감률과 자발화 가능 초기 농도가 가장 높았다.

3) 중대사고시 분위기 유동이 아래에서 위로 유동하는 경우 높이 150mm, 각도 60°, 축매부 직접 부착 가이드를, 옆으로 유동하는 경우 높이 150mm, 축매부와의 거리 100mm, 각도 60° 인 가이드를, 위에서 아래로 유동하는 경우 높이 50mm, 각도 60°, 축매부 직접 부착 가이드가 PAR의 수소유도 및 제거 효율측면에서 가장 적합할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Park. K. H., and Khor. C. L., 2015. Consideration on hydrogen explosion in APR 1400 containment building during small breakup loss of coolant accident. Nucl. Eng. Des., vol. 293, pp. 458-467.
2. Hong. T. H., Kim. T. H., and Choi. C. R., 2011. CFD analysis on the behavior of hydrogen and steam during a severe accident in the OPR1000 containment. Proceedings of the KSME Fall conference., pp. 2223-2226.
3. Park. K. H., and Ryu. M. R., 2016. Hydrogen explosion effects at a containment building following a severe accident. Journal of the Korean Society of Marine Engineering., vol. 40, no. 3, pp. 165-173.
4. Lee. U. J., and Park. G. C., 2002. Experimental study on hydrogen behavior at a subcompartment in the containment building. Nucl. Eng. Des., vol. 217, pp. 41-47.
5. Park. K. H., and Ryu. M. R., 2016. A Study On PAR Guide Structure Considering Ambient Flow. Journal of the Korean Society of Marine Engineering., (Submitted).
6. Reinecke. E. A., Bentaib. A., Kelm. S., Jahn. W., Meynet. N., and Caroli. C., 2010. Open issues in the applicability of recombiner experiments and modeling to reactor simulations. Prog. Nucl. Ener., vol. 52, no. 1, pp. 136-147.
7. Deng. J., Cao. X. W., 2008. A study on evaluation a passive autocatalytic recombiner PAR-system in the PWR large-dry containment. Nucl. Eng. Des., vol. 238, pp. 2554-2560.
8. Huang. X. G., Yang. Y. H., and Zhang. S. X., 2011. Analysis of hydrogen risk mitigation with passive autocatalytic recombiner system in CPR1000 NPP during a hypothetical station blackout. Ann. Nucl. Ener., vol. 38, pp. 2762-2769.
9. Fineschi. F., Bazzichi. M., and Carcassi. M., 1996. A study on the hydrogen recombination rates of catalytic recombiners and deliberate ignition. Nucl. Eng. Des., vol. 166, no. 3, pp. 481-494.
10. Liang. Z., Clouthier. T., and Thomas. B., 2016. Experimental study of combustion

- behavior during continuous hydrogen injection with an operating igniter. Nucl. Eng. Des., vol. 298, pp. 99-108.
11. Heck. R., Kelber. G., Schmidt. K., and Zimmer. H. J., 1995. Hydrogen reduction following severe accidents using the dual recombiner-igniter concept. Nucl. Eng. Des., vol. 157, pp. 311-319.
  12. Huang. X. G., Yang. Y. H., Cheng. X., Al-Hawshabi. N. H. A., and Casey. S. P., 2011. Effect of spray on performance of the hydrogen mitigation system during LB-LOCA for CPR1000 NPP. Ann. Nucl. Ener., vol. 38, pp. 1743-1750.
  13. Kim. J. T., Hong. S. W., Kim. S. B., and Kim. H. D., 2005. Numerical analysis of the hydrogen-steam behavior in the APR1400 containment during a hypothetical total loss of feed water accident. Korean society for computational fluids engineering., vol. 10, no. 3, pp. 9-18.
  14. Ha. D. M., 2008. Investigation of Combustion Properties for Using Safe Hydrogen. Journal of the Korean Institute of Gas., vol. 12, no. 2, pp. 1-6.
  15. Wikipedia, 2013. FLACS [Online] (Updated July 2013) Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/FLACS> [Accessed 15 December 2016].

## 감사의 글

먼저 부족한 저를 정성과 믿음으로 가르쳐 주시고 기댈 수 있는 버팀목이 되어주신 박권하 교수님에게 존경과 감사의 말씀을 드립니다. 또한 바쁘신 와중에 저의 졸업논문을 심사하고 세심한 지도와 충고의 말씀을 해주신 조종래 교수님, 이영호 교수님에게 감사를 드립니다.

대학원 석사 2년 동안 연구해왔던 결과들을 바탕으로 한 석사 학위 논문이 완성되었습니다. 대학교 3학년, 배경효형에게 이끌려 실험실로 오게 되었던게 석사 생활로 이어졌습니다. 대학원 생활은 배움과 생각이 어우러져야 했기 때문에 많은 고민과 노력이 필요하였습니다. 하지만 고민과 노력 덕분에 전공분야에 관한 지식을 넓힐 수 있었습니다.

대학원 생활동안 항상 자신감에 차있었습니다. 자신감으로 인해 새로운 지식, 과제, 연구에 두려움 없이 임할 수 있었지만 넓게 바라보지 못하게 했고 세심하게 연구에 임하는데 부정적인 영향을 미쳤습니다. 때문에 대학원 생활에 미련이 남습니다.

제가 대학원 진학을 결정할 때 제 결정을 지지하고 응원해준 아버지 류민조, 어머니 전원순, 형 류종록에게 감사를 드립니다.

제가 대학원 생활을 할 수 있게 설득과 회유를 해준 배경효형, 대학원 생활 동안 많은 것을 가르쳐준 김형탁형, 손권형, 고제현형, 김철정형, Khor Chong Lee에게 감사를 드립니다. 힘들 때 힘이 되고 위로해준 김상아, 최준봉, 박희태, 김승현, 김희삼, 최윤기, 송기석, 한수지, 이호연 모두에게 감사를 드립니다. 앞으로 실험실을 이끌어갈 박진우에게 미안함과 감사함을 전합니다.

저에게 도움과 응원을 준 모든 분들에게 진심을 담아 감사의 말을 전하고 모든 일 잘되길 빌며 이 논문을 바칩니다.