

## 분위기 유동을 고려한 PAR 가이드 구조에 관한 연구

류명록<sup>1</sup> · 박권하<sup>†</sup>

(Received February 10, 2017 ; Revised May 19, 2017 ; Accepted May 26, 2017)

### Passive autocatalytic recombiner guide structure considering ambient flow

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

**요약:** 격납건물에서 수소폭발이 발생한다면 다중방어벽을 훼손하고 다량의 방사능 물질을 방출시킬 수 있기 때문에 노심용융과 함께 발생하는 수소를 효과적으로 제어하고 제거해야 하지만 사고 원인의 다양성과 수소분포, 거동의 불규칙성 때문에 폭발 저감을 위한 대책마련이 쉽지 않다. 본 논문에서는 가장 넓게 사용되는 수소저감 기술인 피동촉매형수소재결합기(PAR)의 수소저감 효율을 높이기 위해 외부 유동을 고려한 가이드 구조에 관하여 연구하였다. 2단 촉매 PAR 내부형상을 기본으로 하여 PAR 외부에 가이드를 부착하였을 때 유체의 거동과 수소저감효율에 대해서 해석을 수행하였다. 유동이 아래에서 위로 올라가는 경우 가이드 높이 150mm, 촉매와 가이드 직접 부착, 가이드 각도가 60°인 구조가 최적으로 판단되며 유동이 옆에서 불어오는 경우 촉매와 가이드 거리 100mm인 구조가 최적으로 판단되고, 유동이 위에서 아래로 내려오는 경우 직접부착, 높이 50mm 가이드 구조가 최적으로 판단된다.

**주제어:** 수소폭발, 피동촉매형수소재결합기, 수소저감, 분위기 유동, 가이드 구조

**Abstract:** If a hydrogen explosion occurs in a containment building, its multiplex defense wall may be destroyed and a large amount of radioactive material may be released. The hydrogen occurred interacting with melting fuel rods must be effectively controlled and removed. however, the countermeasures for reducing explosion risk are difficult to carry out, due owing to the various variety of accident scenarios causes and the irregularity of hydrogen distribution and behavior. In this study, We examine the guide structures while considering the ambient flows, in order to improve the efficiency of PAR the widely used Passive Autocatalytic Recombiner(PAR). We simulate the fluid behavior and the hydrogen reduction rate were simulated when a guide is attached to the two-step catalyst PAR. For an upward flow, the consisting of a height of 150mm, a gap of 0mm, and a performs 60° showed the best. In contrast, for a sideways flow, a consisting of the height of 150mm, a gap of 100mm, and a performs 60° showed the best in the case of side ward flow. for a downward flow, a consisting of the height of 50mm and a directly attached guide produce the best in the case of down ward flow results.

**Keywords:** Hydrogen explosion, Passive autocatalytic recombiner (PAR), Hydrogen reduction, Ambient flows, Guide structure

### 1. 서론

원자로의 열이 제거되지 못하면 핵연료 피복재인 지르칼로이(Zircaloy)와 같은 금속이 고온 상태에서 수증기와 산화반응하여 수소(Hydrogen)를 발생 시킨다. 격납건물로 방출된 수소는 여러 요인에 의하여 수소폭발로 이어 질 수 있다[1]. 수소는 폭발성이 매우 강하여 폭발 발생시 다중방어벽을 훼손하고 다량의 방사능 물질을 방출시키기 때문에 노심용융과 함께 발생하는 수소의 발생량을 효율적으로 제어하고 발생한 수소를 제거해야 하지만 사고 원인의 다양성과 수소분포, 거동의 불규칙성 때문에 폭발 저감을 위한 대책마련이 쉽지 않다[2].

이러한 수소폭발을 막기 위해 많은 연구들이 진행되고

있다. 먼저 수소 발생량을 제어하고 발생된 수소를 제거하기 위해 수소의 분포, 거동을 알아볼 필요가 있다. Park의 수소 분포와 거동에 관한 연구[3]에서 스팀과 공기가 격납건물 내부에 존재 할 때 수소가 방출되면서 수소는 격납건물 상부로 올라가 모이는 모습을 보이고 다시 스팀이 방출되면서 수소가 격납건물 벽면을 타고 하부로 내려와 머물다가 스팀의 방출이 종료된 후 수증기의 응축과 함께 격납건물 상부로 올라가는 모습을 보였다. 그 외에도 수소의 분포와 거동에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[4][5].

격납건물 내부의 수소 제어를 위한 수소제어기구(Hydrogen Mitigation System, HMS)에 대한 연구가 진행되고 있다. 수소제어기구로는 피동 촉매식 수소 재결합기

<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.

(Passive Autocatalytic Recombiner, PAR)와 수소점화기 (Igniter)가 있다. 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[6]. 수소점화기는 가연성 혼합가스를 인위적으로 점화하여 빠른 속도로 수소를 제거한다[7]. Igniter에 의해 연소되기 위해서는 수소농도가 4%에 이르러야 한다[8]. 때문에 효율을 높이기 위해 PAR와 Igniter를 같이 사용하는 연구들이 진행되고 있다[7][9]. 하지만 PAR와 Igniter 모두 자발화에 의한 수소폭발 위험이 있기 때문에 Spray를 설치하는 방법과 격납건물내연료재장전수탱크 (In-containment Refueling Water Storage Tank, IRWST) 환기구에 플랩을 설치하는 방법이 연구되어 지고 있다. Spray는 격납건물 내부에 설치하여 평균온도와 압력을 낮추어 주는 역할을 하기 때문에 Igniter와 같이 사용하면 연소를 위축시키고 화염의 확산을 억제한다[10]. IRWST 환기구에 플랩을 설치하면 수소가 방출되는 시기에 IRWST 내부의 수증기 농도가 낮고 산소가 지속적으로 공급되어 수소혼합 기체는 연소발생시 화염의 가속 및 초음속연소로의 천이 (Delagration To Detonation, DDT) 가능성을 없애준다[11].

본 논문에서는 가장 넓게 사용되는 수소저감기술인 PAR의 수소저감 효율을 높이기 위해 PAR의 외부형상을 변경하여 유동을 효율적으로 증가시키는 연구를 진행한다. PAR의 내부형상을 변경하여 수소 자발화를 막으며 효율을 증가시키는 이전 연구[12]의 2단촉매 PAR 내부형상을 기본으로 하여 PAR 외부에 가이드를 부착하였을 때 유체의 거동과 효율에 대해서 해석을 수행하며 외부유동을 고려한 최적의 가이드 구조를 제시하고자 한다.

## 2. 수학적 모델 및 계산조건

### 2.1 수학적 모델

유동 계산에 적용된 모멘텀, 에너지 방정식은 다음과 같다. 모멘텀 방정식(식 (1), 식 (2)).

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

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

에너지 방정식(식 (3)).

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

난류계산은 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다(식 (4) ~ 식 (6)).

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

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

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

여기서 U는 속도벡터,  $S_M$ 은 운동량 생성항,  $\tau$ 은 응력 텐서, T은 온도,  $\delta$ 은 단위행렬,  $\rho$ 은 밀도, h은 비정상엔탈피,  $\lambda$ 은 열 전도도,  $S_E$ 은 에너지 생성항, k은 단위 질량당 난류 운동 에너지,  $\omega$ 은 각 속도를 나타낸다.

### 2.2 계산 조건, 격자 및 성능평가 방법

본 논문은 선행 연구[12]의 2단촉매 PAR 내부형상을 기본으로 외부에 가이드를 부착하여 Ansys CFX 코드를 이용해 영향을 분석하였다. 가이드의 영향을 알아보기 위해 가이드의 높이(크기)를 50, 100, 150mm, 촉매부와의 거리를 0, 50, 100mm, 가이드의 각도를 30, 60, 120, 150°로 바꾸어 유속 1m/s일 때 바람의 방향 0, 90, 180°에서 해석을 수행하였다. Table 1은 계산 조건을 나타낸다.

Table 1: List of cases

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

Figure 1은 각 조건의 모델링을 나타내고 Figure 2는 격자를 생성한 모습이다. 격자의 개수는 150만개 정도이다.

본 논문에서 가이드의 성능을 평가하기 위해 유도되는 수소의 면적과 1단 촉매부를 통과하는 수소의 유량을 분석하였다. Figure 3은 성능 평가 방법 중 유도되는 수소의 면적을 측정하는 방법을 나타낸다. 가이드의 밀면을 중심으로 지름 1m의 구를 생성하여 유도되는 수소의 면적을 계산하였다.

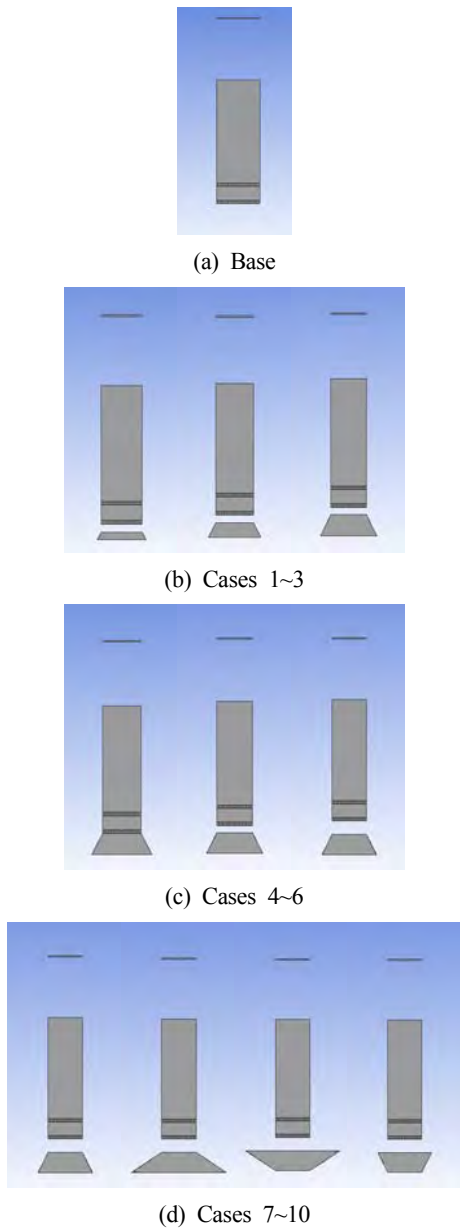


Figure 1: Structures of the cases

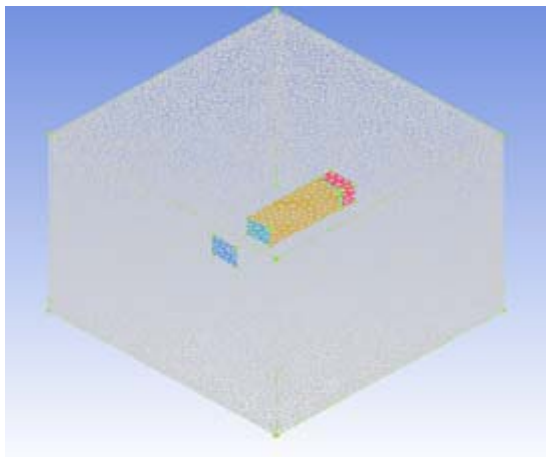


Figure 2: Calculation mesh

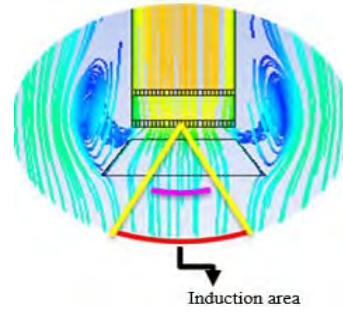


Figure 3: Measurement method of hydrogen induction area

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Upward flow

Figure 4는 유동의 방향이 아래에서 위로 향할 때 각 조건들의 수소 유도 면적을 나타낸다. PAR 내부의 고온에 의하여

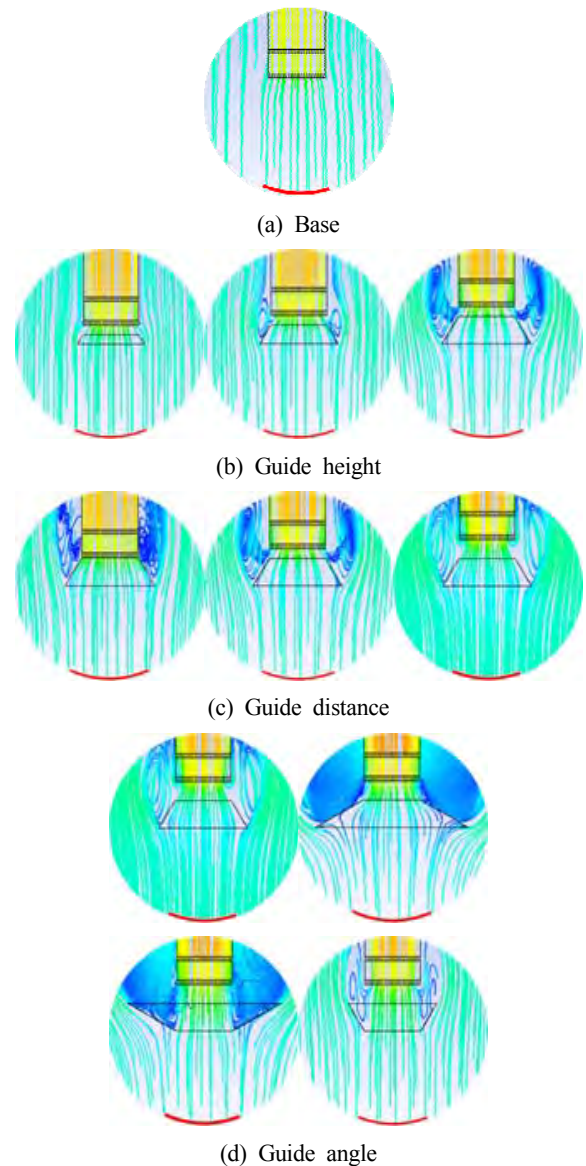


Figure 4: Flow behavior in the case of upward flow

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°까지 증가된 넓이로 인해 내벽에 부딪쳐 흡입되는 유량이 증가하면서 유도면적이 증가한다. 가이드 각도 120°일 때 일부는 외벽에 부딪쳐 가이드 외부에 와를 생성하고 입구로 흡입되므로 150°일 때 보다 유도면적이 넓지만 각도 60°일 때의 유도면적에 미치지 못한다.

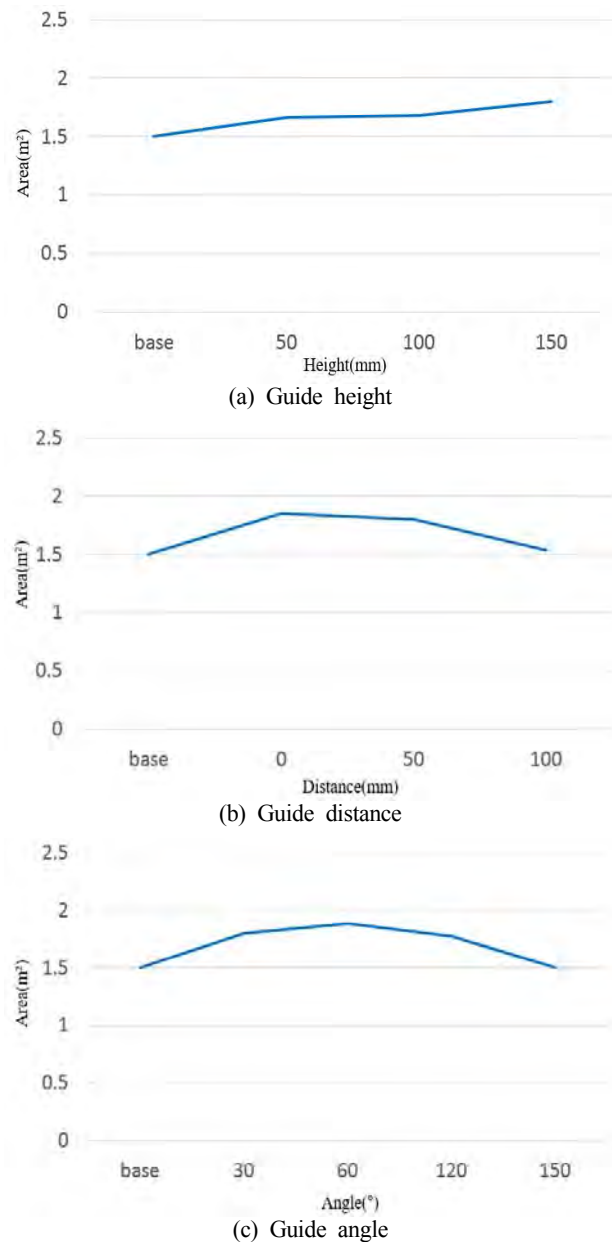


Figure 5: Induced area in the case of upward flow

Figure 5는 Figure 4의 수소 유도 면적을 측정하여 나타낸 도표이고 Figure 6는 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 감소하여 유도면적 감소, 각도의 경우 60°일 때 수소 유도면적이 증가한 것을 알 수 있다. 유동의 방향이 아래에서 위로 향하는 모든 경우 가이드의 설치가 유동 폭과 면적을 증가시켰다.

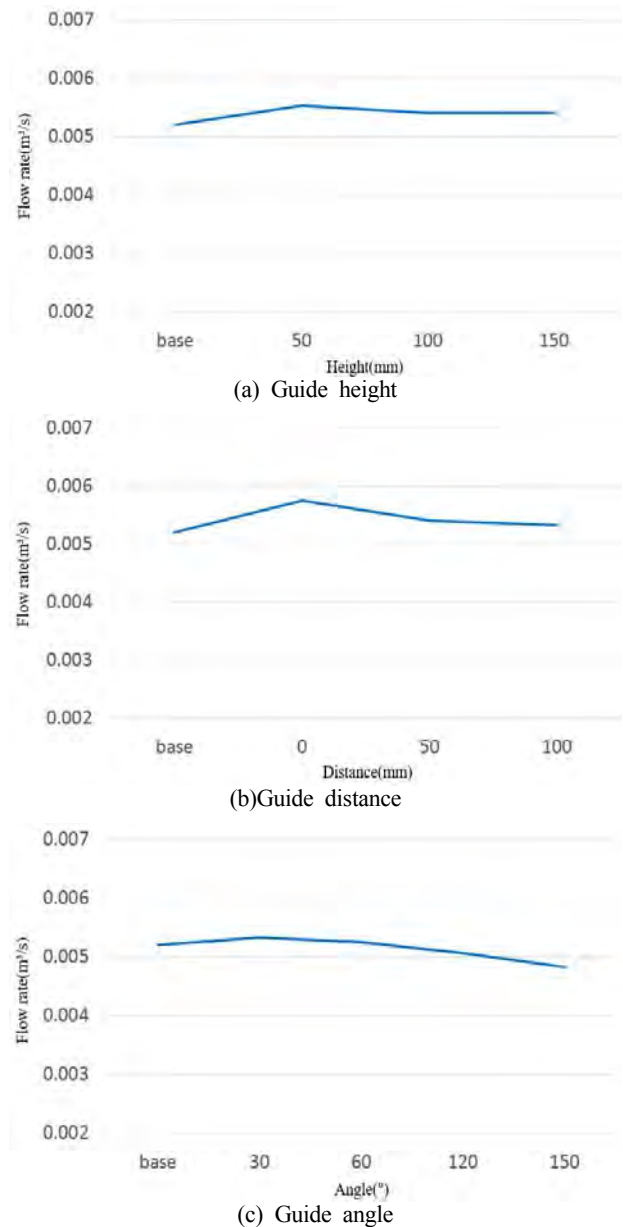


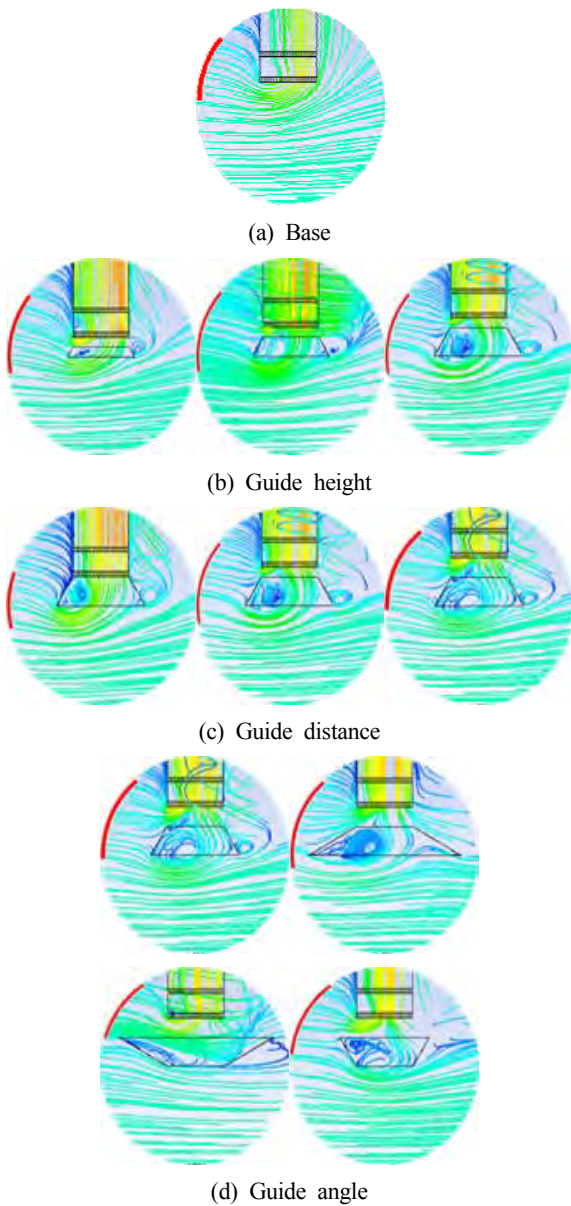
Figure 6: Induced hydrogen flow rate in the case of upward flow

### 3.2 Sideward flow

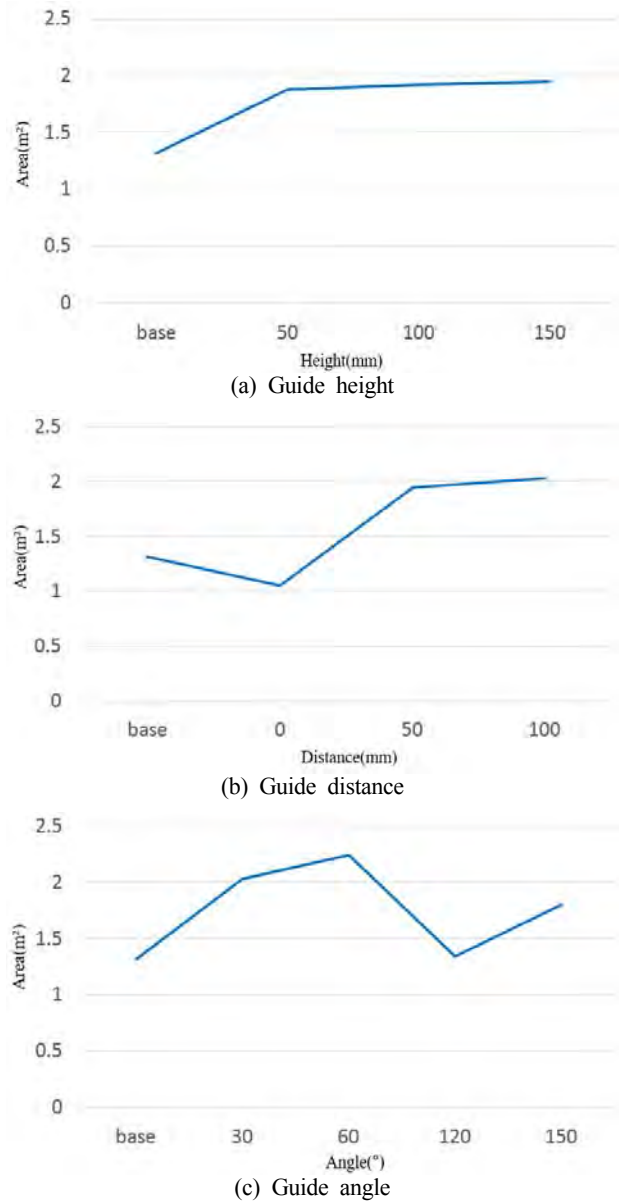
Figure 7는 유동의 방향이 옆으로 향할 때 각 조건들의 수소 유도 면적을 나타낸다. 가이드가 없는 경우 입구 주변의

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°까지 외벽에 부딪쳐 입구로 흡입되는 유량이 증가하여 유도면적이 증가한다. 가이드 각도 120°일 때에 비해 150°일 때 외벽에 부딪친 유동이 와를 생성하기 때문에 입구로 흡입되는 유량이 많아 유도면

적이 넓지만 60°일 때 비해 줄어든다. **Figure 8**는 **Figure 7**의 수소 유도 면적을 측정하여 나타낸 도표이고 **Figure 9**는 1단 촉매부를 지나는 수소의 유량을 도표로 나타낸 것이다. 두 그래프를 종합하면 가이드 높이가 증가함에 따라 빨려 들어오는 유동 폭이 감소화 하지만 넓어진 입구면적의 영향으로 수소유도면적은 증가, 가이드와 촉매사이 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 감소하는 모습을 보인다. 가이드의 설치는 유동 폭은 감소 시켰으나 촉매부와의 거리가 0mm 일 때를 제외하고 면적을 증가시켰다.



**Figure 7:** Flow behavior in the case of sideward flow



**Figure 8:** Induced area in the case of sideward flow

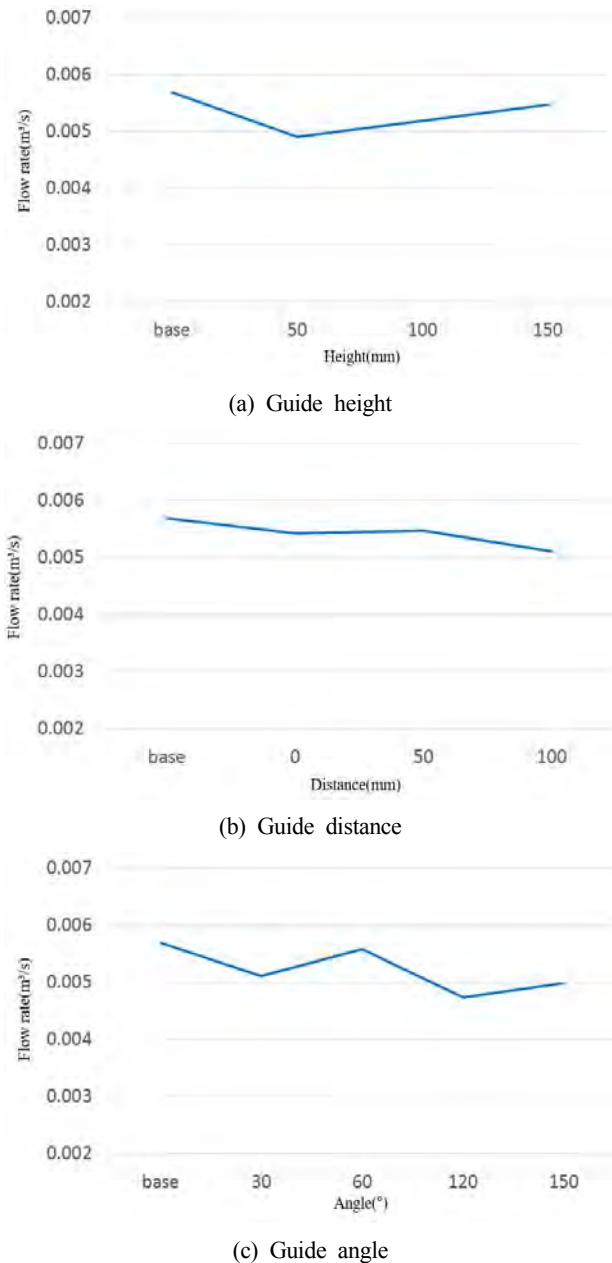


Figure 9: Induced hydrogen flow rate in the case of sideward flow

3.3 Downward flow

Figure 10는 유동의 방향이 아래로 향할 때 각 조건들의 수소 유도 면적을 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 흡입 면적을 증가시킨다. 가이드의 높이, 거리가 증가하면 내벽에 부딪치는 유량보다 외벽에 부딪치는 유량이 증가하여 유도면적이 감소한다. 가이드 각도 60°까지 외벽에 부딪치

는 유량보다 내벽에 부딪쳐 입구로 흡입되는 유량이 증가하여 유도면적이 증가한다. 가이드 각도 150°일 때 비해 120°일 때 외벽에 부딪친 유동이 또 다른 작은 와를 생성하기 때문에 입구로 흡입되는 유량이 많아 유도면적이 넓지만 60°일 때 비해 줄어든다. Figure 11는 Figure 10의 수소 유도 면적을 측정하여 나타낸 도표이고 Figure 12는 1단 촉매부를 지나는 수소의 유량을 도표로 나타낸 것이다. 두 그래프를 종합하면 가이드 높이와 거리가 증가함에 따라 빨려 들어오는 유동 폭 및 면적 감소화, 각도의 경우 각도가 증가함에 따라 유동 폭은 감소화, 면적은 60°까지 증가 후 감소하였다. 가이드의 설치는 유동 폭을 크게 향상 시켰고 촉매부와와의 거리 100mm, 각도 30°, 150°를 제외하고 면적을 증가 시켰다.

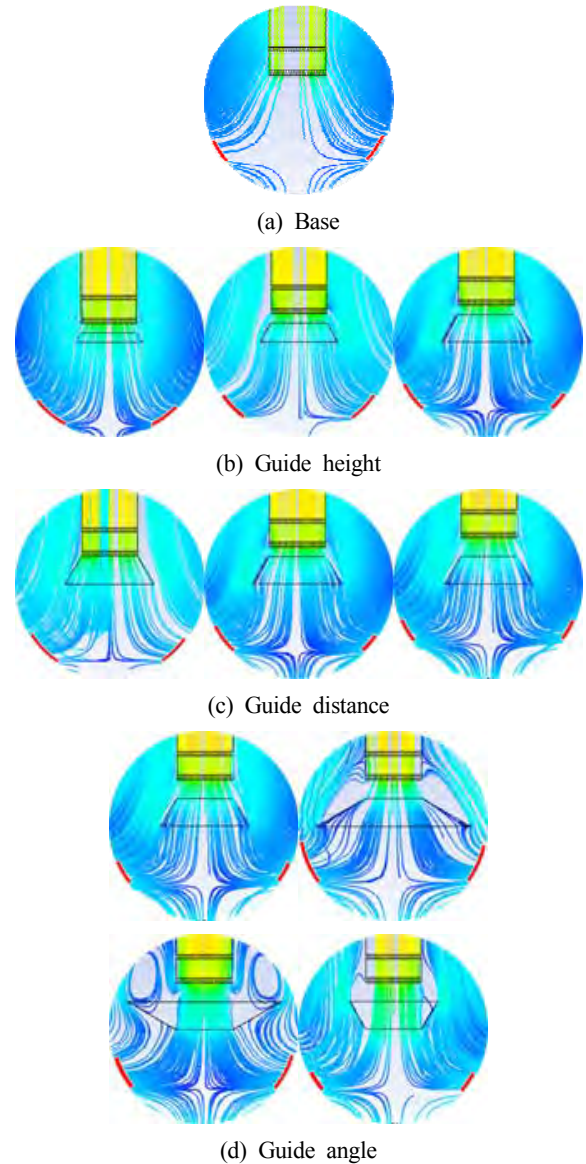
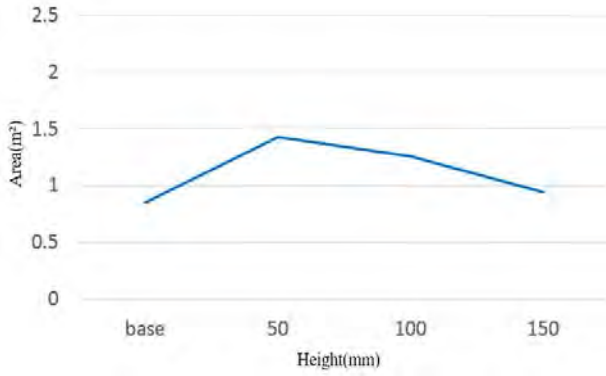
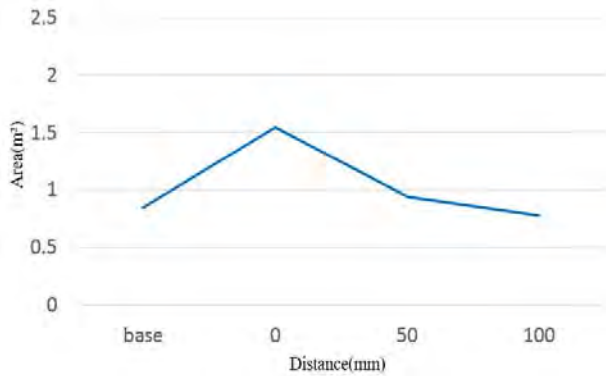


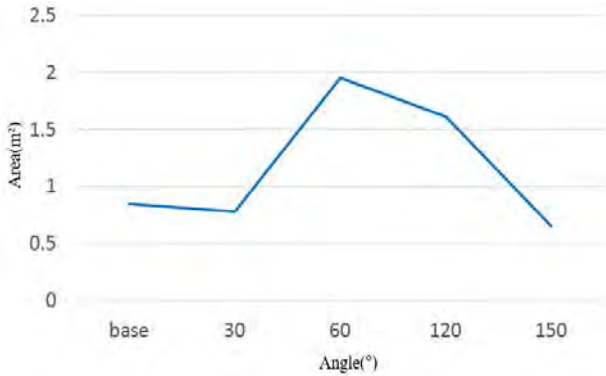
Figure 10: Flow behavior in the case of downward flow



(a) Guide height



(b) Guide distance



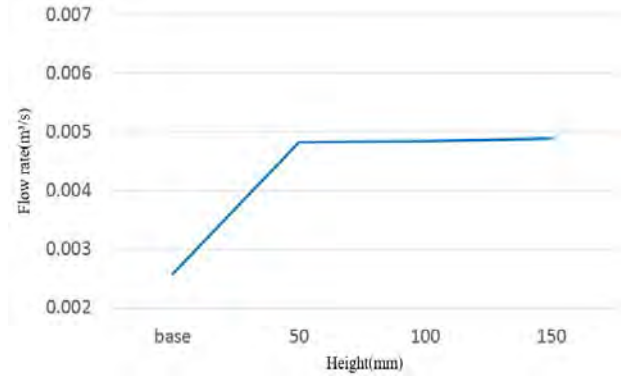
(c) Guide angle

Figure 11: Induced area in the case of downward flow

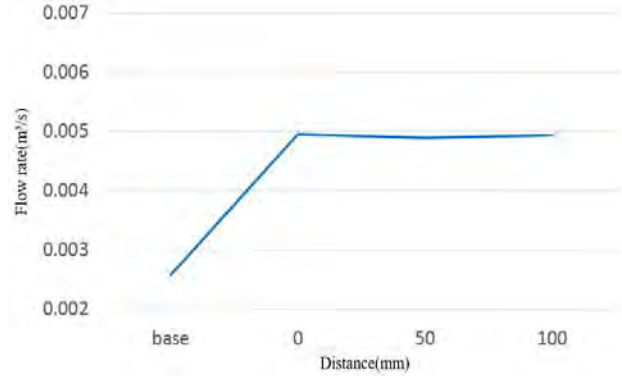
#### 4. 결 론

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

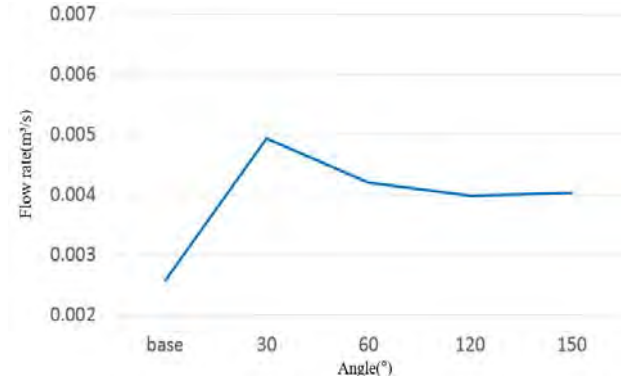
- 1) Upward flow(아래에서 위로 유동)의 경우는 가이드 높이 150mm, 촉매와 가이드 직접 부착, 가이드 각도가 60°인 구조가 최적으로 판단된다.
- 2) Sideward flow(횡방향의 유동)의 경우는 가이드 높이 150mm, 촉매와 가이드 거리 100mm, 가이드 각도가 60°인 구조가 최적으로 판단된다.
- 3) Downward flow(위에서 아래로 유동)의 경우는 가이드



(a) Guide height



(b) Guide distance



(c) Guide angle

Figure 12: Induced hydrogen flow rate in the case of upward flow

높이 50mm, 촉매와 가이드 거리 0mm, 가이드 각도가 60°인 구조가 최적으로 판단된다.

이상을 종합하면 수소유동이 아래에서 위로 올라오는 격납건물 중심부에는 높이 150mm, 각도 60°의 촉매부에 직접 부착된 가이드를, 수소유동이 옆으로 이동하는 격납건물 하부 및 상부에는 높이 150mm, 촉매부와의 거리 100mm, 각도 60°인 가이드를 부착하고 수소유동이 위에서 내려오는 격납건물 측면에는 높이 50mm, 촉매부와의 거리 0mm, 각도 60°인 가이드를 부착하는 것이 PAR의 수소유도 및 제거 효율을 증가 시킬 것으로 판단된다.

## References

- [1] 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).
- [2] M. R. Ryu and K. H. Park, "Effect of hydrogen at containment building in severe accident," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 40, no. 3, pp. 165-173, 2016 (in Korean).
- [3] K. H. Park and K. C. Lee, "Consideration on hydrogen explosion scenario in APR1400 containment building during small breakup loss of coolant accident," Nuclear Engineering and Design, vol. 293, pp. 458-467, 2015.
- [4] U. J. Lee and G. C. Park, "Experimental study on hydrogen behavior at a subcompartment in the containment building," Nuclear Engineering and Design, vol. 217, no. 1-2, pp. 41-47, 2002.
- [5] E. A. Reinecke, A. Bentaib, S. Kelm, W. Jahn, N. Meynet, and C. Caroli, "Open issues in the applicability of recombiner experiments and modeling to reactor simulations," Progress in Nuclear Energy, vol. 52, no. 1, pp. 136-147, 2010.
- [6] E. A. Reinecke, A. Bentaib, S. Kelm, W. Jahn, N. Meynet, and C. Caroli, "Open issues in the applicability of recombiner experiments and modeling to reactor simulations," Progress in Nuclear Energy, vol. 52, no. 1, pp. 136-147, 2010.
- [7] F. Fineschi, M. Bazzichi, and M. Carcassi, "A study on the hydrogen recombination rates of catalytic recombiners and deliberate ignition," Nuclear Engineering and Design, vol. 166, no. 3, pp. 481-494, 1996.
- [8] Z. Liang, T. Clouthier, and B. Thomas, "Experimental study of combustion behavior during continuous hydrogen injection with an operating igniter," Nuclear Engineering and Design, vol. 298, pp. 99-108, 2016.
- [9] R. Heck, G. Kelber, K. Schmidt, and H. J. Zimmer, "Hydrogen reduction following severe accidents using the dual recombiner-igniter concept," Nuclear Engineering and Design, vol. 157, no. 3, pp. 311-319, 1995.
- [10] X. G. Huang, Y. H. Yang, X. Cheng, N. H. A. Al-Hawshabi, and S. P. Casey, "Effect of spray on performance of the hydrogen mitigation system during LB-LOCA for CPR1000 NPP," Annals of Nuclear Energy, vol. 38, no. 8, pp. 1743-1750, 2011.
- [11] 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," Korean society for computational fluids engineering, vol. 10, no. 3, pp. 9-18, 2005 (in Korean).
- [12] M. R. Ryu and K. H. Park, "Proposal and analysis of new design concept of recombiner structure to reduce spontaneous ignition," Contemporary Engineering Sciences, vol. 9, no. 18, pp. 863-872, 2016.