

피동형 촉매 수소재결합기 상단부 형상에 따른 자연대류 특성 수치 해석

박창진* · 응웬 득 하이* · 정재훈** · 박성군*†

Numerical Analysis of the Effects of Passive Auto-catalytic Recombiners(PAR) Upper Geometry on Convective Flow Characteristics

Chang Jin Park*, Duc-Hay Nguyen*, Jaehoon Jung**, Sung Goon Park*†

Key Words : Passive Auto-catalytic Recombiners(피동형촉매수소재결합기), Natural Convection(자연대류), Chimney Effect(굴뚝효과)

ABSTRACT

Passive auto-catalytic Recombiner (PAR) is used for hydrogen reduction when a severe accident occurs in a nuclear power plant. In the study, to evaluate whether PAR can overcome pressure drop, PAR with upper geometry and length variables are numerically simulated and compared to analyze the convective flow characteristics. PAR with straight upper geometry shows more effective convection than Y-shaped upper geometry, and a longer upper length shows a higher flow rate.

1. 서론

원자력발전소(nuclear power plant, NPP)의 중대사고 유형 중 하나인 냉각재상실사고(loss of coolant accident, LOCA)로 인해 격납건물 내에 고온 환경이 조성되면 핵 연료봉 피복재를 이루는 지르코늄(zirconium)과 수증기의 반응으로 수소가 생성되어 격납건물 내로 방출될 위험이 존재한다.⁽¹⁾ 방출된 수소는 특정 조건이 만족되는 경우 국소적인 폭발로 이어질 수 있으므로 중대사고 시 격납건물 내에서 수소 농도를 제어하는 것은 매우 중요하다. 피동형촉매수소재결합기(passive auto-catalytic recombiner, PAR)는 백금 등으로 코팅된 촉매판과 이를 둘러싸고 있는 챔버로 구성되며 내부의 촉매판이 유입된 기체에 존재하는 수소와 산소의 반응을 촉진시켜 수증기로 변환시키는 역할을 한다. 해당 과정은 수소와 산소의 화학반응으로 가열된 기체의 자연대류를 통해 지속되기 때문에 추가적인 외부전원이나 조작 없이 수

소 농도가 일정 수준에 도달하면 작동하는 피동적 특성을 지니고 있다.⁽²⁻³⁾

원자력발전소 중대사고 시, 기체상 또는 에어로졸 등 다양한 형태의 핵분열 생성물들이 격납건물로 방출되게 된다. 이러한 방사성 물질들을 격납건물 내부에서 저감시키기 위해 필터 또는 흡착제에 대한 선행 연구들이 수행되었다.⁽⁴⁻⁵⁾ 필터와 흡착제를 통해 부유 방사성 물질들을 효과적으로 저감시키기 위해서는 이들 장치에 지속적으로 유동이 유입되어야 하며, 외부 전원 공급이 차단되는 중대사고 시의 상황을 고려했을 때, 피동적으로 작동하는 시스템 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. PAR 시스템 내부의 발열반응으로 인해 자연대류가 발생하는 특성을 이용하는 경우 위의 피동적 작동 시스템의 필요성을 만족시킬 수 있다. 하지만 필터와 흡착제로 인해 추가적인 압력 강하가 발생할 수 있으며, 시스템이 정상적으로 작동하기 위해서는 PAR 시스템 내부의 발열반응으로 인해 충분히 강한 자연대류가 발생해야 한다.

* 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과(Dpt. Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

** 한국원자력연구원 지능형사고대응연구부 (Intelligent accident mitigation research division Korea Atomic Energy Research Institute)

† 교신저자, E-mail : psg@seoultech.ac.kr

PAR 내외부의 형상이 수소제거율 및 자연대류에 미치는 영향에 대해 다양한 선행 연구들이 수행되었다. Park 등은⁽⁶⁾ PAR에 벌집(honeycomb)형상의 촉매판을 도입하였으며 촉매판과 유체간의 접촉 면적을 증가시켜 장비 내의 자연대류 효과가 강화되고 유량 및 수소제거율이 향상될 수 있음을 보였다. Park과 Khor는⁽⁷⁾ PAR의 하단부에 유도벽(guidinwall)을 설치하여 PAR의 기하학적 형상에 따른 성능 변화를 분석하였으며 설치된 유도벽이 더 많은 공기를 PAR 내부로 유입시킴으로써 수소 제거율과 유량이 향상됨을 보였다. Blanchat과 Malliakos는⁽⁸⁾ 단면적이 좁아지는 상단부 형상을 가진 PAR에 대한 실험을 통해 수축되는 형상의 상단부가 PAR 시스템 내부에서 발생하는 하류(downstream)를 줄이고 유량을 향상시킴을 보였다. Chantreau 등은⁽⁹⁾ PAR 시스템의 상단부 길이와 내부 수소 농도가 자연대류 특성에 미치는 영향을 분석하였으며 동일한 수소 농도 환경에서도 더 큰 길이의 상단부가 내부로 유입되는 유량을 유의미하게 향상시킴을 보였다. 이와 같이 PAR 시스템의 구조 및 형상에 대한 선행연구가 존재하나, PAR 상단부의 기하학적 형상이 자연대류에 미치는 영향을 분석한 선행연구는 비교적 제한적이다. 또한 일반적으로 굴뚝효과에 의해 관의 길이가 증가하는 경우 더 강한 자연대류가 형성된다고 알려져 있으나,⁽¹⁰⁾ PAR 시스템 내부에서 굴뚝효과가 어떻게 영향을 미칠지에 대한 이해가 부족하다.

본 연구에서는 PAR 상단부의 직관(straight) 및 Y관(Y-shaped) 형상에 따른 자연대류의 특성 및 세기를 분석하고자 한다. 또한 굴뚝효과를 PAR 시스템에 적용하여 자연대류의 세기에 대한 이론식을 도출하고, 전산해석 결과와 비교하고자 한다. PAR 시스템 내부 촉매판의 수소제거율은 유동의 속도, 수소 농도, 온도 등 다양한 주변 환경에 의해 영향을 받으며, 이에 따라 자연대류의 세기가 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 PAR의 수소제거 성능에 집중하기 보다는, PAR의 형상이 자연대류의 세기에 미치는 영향을 주로 분석하기 위해 화학반응식을 고려하는 대신 촉매판에 등은 조건을 부여하여 해석을 진행하였다. 이를 통해 PAR 시스템 상단부의 높이 및 형상이 자연대류에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다. 2장에서는 본 연구에 사용된 해석방법에 대해 기술하였으며, 3장에서는 해석결과를 나열하고 분석하고자 하였다. 4장에서는 본 연구의 결론을 도출하였다.

2. 해석 방법

본 연구에서는 ANSYS Fluent 2020 R2를 통해 해석을 진행하였다. Fig. 1은 해석도메인 및 PAR(직관형, Y관형) 형상의 개략도를 보여준다. PAR 시스템의 자연대류 특성을 분석하기 위해서 PAR 내부 촉매판에는 등온조건을 부여하였

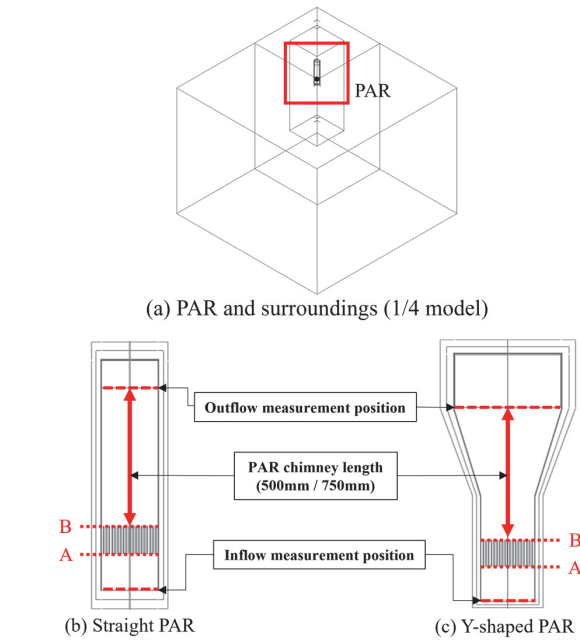


Fig. 1 (a) Computational domain and schematic diagrams of (b) straight and (c) Y-shaped PAR

으며, 이외의 PAR 벽면에는 단열조건을 부여하였다. 해석도메인이 자연대류에 미치는 영향을 최소화하기 위해 넓은 해석도메인(18,000mm × 18,000mm × 7,000mm)을 설정하였으며, 해석 비용을 줄이기 위해 1/4 축소 모델을 채택하였다. 이에 따라 각 경계에서는 대칭(Symmetry)조건을 부여하였다. PAR 상단부의 길이(촉매판 끝단부터 출구까지의 길이)가 자연대류에 미치는 영향을 분석하기 위해 길이가 각각 500mm와 750mm인 형상을 채택하였다. 길이가 500mm인 Y관형 시스템은 촉매판이 끝나는 지점부터 환관이 연결되며, 750mm의 경우 촉매판이 끝나는 지점부터 직관이 250mm 연장되며 그 후단부에 환관이 추가되는 형태이다. 즉 500mm와 750mm에 추가된 환관의 각도 및 출구에서의 면적은 동일하다. 촉매판의 길이는 0.15m, 폭은 5mm이며, 입구로부터 수직 방향으로 0.2m 위치에 총 19개의 판을 고려하였다.

작동 유체에 대한 연속방정식 및 운동량방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$(\nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p - [\nabla \cdot (\tau_{i,j})] + \rho g \quad (2)$$

\vec{u} 는 속도벡터, ρ 는 밀도, p 는 압력, g 는 중력가속도를 의미하며 $\tau_{i,j}$ 는 점성 응력 텐서를 나타낸다. 온도장 해석을 위한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho C_p \vec{T} u) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_T \quad (3)$$

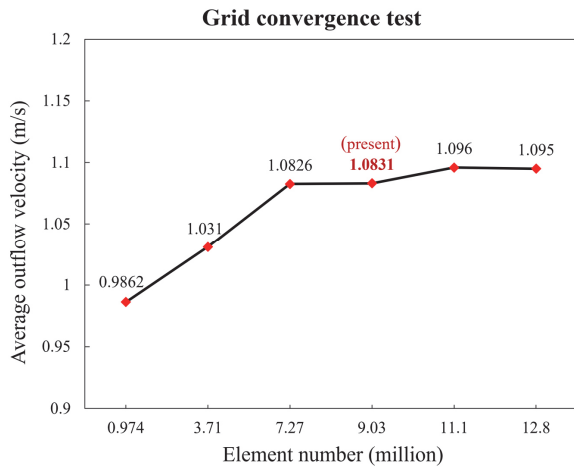


Fig. 2 Results of grid convergence test

C_p 는 비열, T 는 유체의 온도, k 는 열전도율을 의미하며 S_T 는 에너지 방정식에서의 소스항이다. 난류 모델은 k- ϵ 모델(standard k-epsilon model)을 채택하였다.

Fig. 2는 해석에 사용된 격자의 수렴성 테스트 결과를 보여 준다. PAR 시스템 출구에서의 유속을 기준으로 총 6가지 격자에서의 결과를 비교하였으며, 정확도와 해석 비용을 고려하여 약 9백만개의 요소로 구성된 격자시스템을 채택하였다. Fig. 3은 채택된 PAR와 주변 환경의 1/4 축소된 3차원 격자의 모습과 형상을 보여 준다.

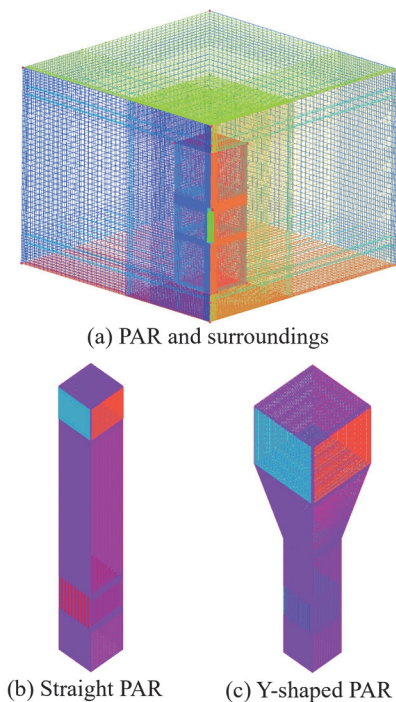


Fig. 3 Grid systems for (a) computational domain, (b) straight PAR and (c) Y-shaped PAR

3. 결과 및 고찰

3.1 해석 결과

Fig. 4는 정상상태에 도달했을 때 각 케이스에 대한 온도장을 보여준다. Reinecke 등은⁽¹¹⁾ 수소 농도가 2%일 때, 주변 유체의 온도에 따라 촉매판의 온도가 약 500K에서 900K의 범위 내에서 형성되는 것을 확인하였다. 이를 반영하여 본 연구에서는 촉매판 및 주변 유체의 온도를 각각 600K, 300K로 설정하였다. 촉매판 주위의 유체가 가열되는 경우 밀도가 낮아져 부력이 발생하며 이로 인해 자연대류가 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)와 4(b)에서 확인할 수 있듯이 직관의 경우 PAR 내부에서 온도가 비교적 균일한 것으로 나타나며, 자연대류에 의해 위쪽 방향으로 발생한 유동이 PAR 상단부의 벽을 만나 PAR의 측면으로 빠져나가는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)와 4(d)는 Y형 PAR의 온도장을 보여주며, 직관 형태의 PAR와는 달리 PAR 내부의 온도가 비교적 불균일하다는 사실을 확인할 수 있다. 특히 관의 길이가 500mm(Fig. 4(c))일 때, PAR의 출구부 가장자리에서는 외부 유동이 PAR 내부로 일부 유입되는 현상을 보인다(Fig. 5(c)). 이로 인해 PAR의 중심부의 온도가 가장자리에 비해 더 높으며, 온도가 높은 영역이 다른 경우에 비해 더 좁게 나타남을 확인할 수 있다. 촉매판 끝단으로부터 250mm의 직관이 연장되고 그 후 단부에 환관이 추가된 경우(Fig. 4(d)), 외부 유동이 PAR 가장자리 주위에서 내부로 유입되는 현상은 현저히 줄었으며, PAR 내부의 온도가 더욱 균일해짐을 보인다. (Fig. 4(d)).

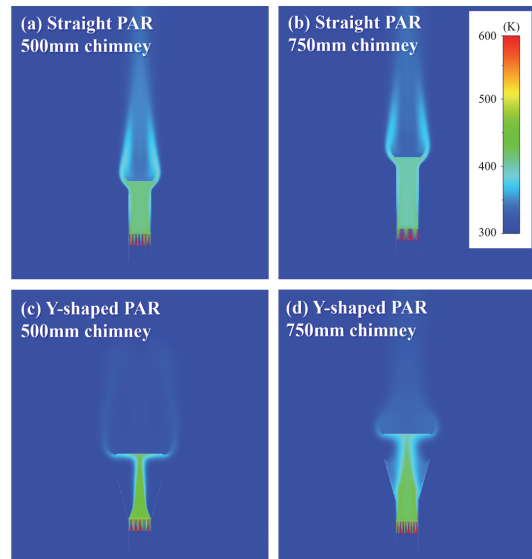


Fig. 4 Temperature contour for the cases of the straight PAR with the height of (a) 500mm and (b) 750mm, and the Y-shaped PAR with the height of (a) 500mm and (b) 750mm

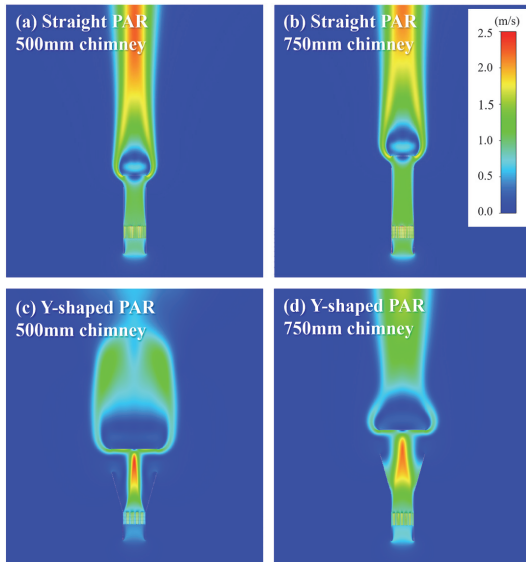


Fig. 5 Velocity contour for the cases of the straight PAR with the height of (a) 500mm and (b) 750mm, and the Y-shaped PAR with the height of (a) 500mm and (b) 750mm

Fig. 5는 각 케이스에 대한 속도장을 보여준다. PAR 모두 하단의 입구를 통해 외부 공기가 유입되며, 촉매판에서 가열된 후 자연대류로 인해 PAR 상단부의 출구로 빠져나감을 확인할 수 있다. Fig. 4의 온도장의 특성과 비슷하게, 직관의 경우 PAR 내부의 속도장이 비교적 균일한 반면 (Fig. 5(a), 5(b)), Y관의 속도장은 비교적 불균일하며, 가운데 영역에서 속도가 높으며 가장자리에서 속도가 낮은 형태를 보인다. Y관의 경우 주변의 유동이 PAR 끝단에서 외부로 유입됨에 따라 가장자리에 위치한 유체의 온도가 중심선 주위의 온도보다 비교적 낮으며, 이로 인해 중심부의 속도가 가장자리에 비해 더 크다는 사실을 확인할 수 있다. 500mm 높이의 Y관형 PAR의 경우 (Fig. 5(c)) 출구부 가장자리에서 외부의 유동이 내부로 유입되는 양상을 보인다.

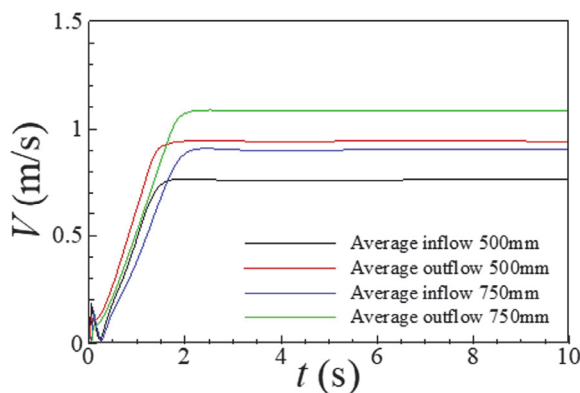


Fig. 6 Average in-outflow velocity of Straight PAR

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 직관형, Y관형 PAR의 시간에 따른 유입-유출 평균 유속을 보여주며, 측정 높이는 Fig. 1에 표시하였다. 직관형 PAR는 높이에 관계없이 유속이 증가하다가 일정 속도로 수렴하는 모습을 보인다. 500mm 직관의 PAR는 입구에서 평균 유속 0.76m/s, 출구에서 0.94m/s를 나타내며, 750mm 직관의 PAR에서는 각각 0.9m/s와 1.08m/s 이다. 직관의 경우 입구와 출구의 면적이 같으며, 촉매판의 가열된 유체의 밀도가 입구 유체에 비해 밀도가 더 낮으므로 질량 보존 법칙에 의해 일반적으로 출구의 속도가 더 크게 형성됨을 확인할 수 있다.

Fig. 7(a)는 500mm Y관의 입출구 속도를 보여주며, 약 0.5m/s 부근에서 속도가 진동하는 모습을 보인다. 이는 PAR 가장자리 부근에서 외부 유동이 PAR 내부로 유입됨에 따라 유속이 진동하는 형태를 나타낸다. 또한 Y관의 경우 출구의 면적이 입구의 면적에 비해 더 넓기 때문에 출구의 밀도가 더 낮더라도 평균 유속이 비슷하게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 750mm Y관은 가장자리의 외부 유동 유입 현상이 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있으며 (Fig. 5(d)), 정상상태에 도달함을 확인할 수 있다. 입구 유속은 약 0.61m/s이며, 출구 유속은 0.46m/s임을 확인할 수 있다.

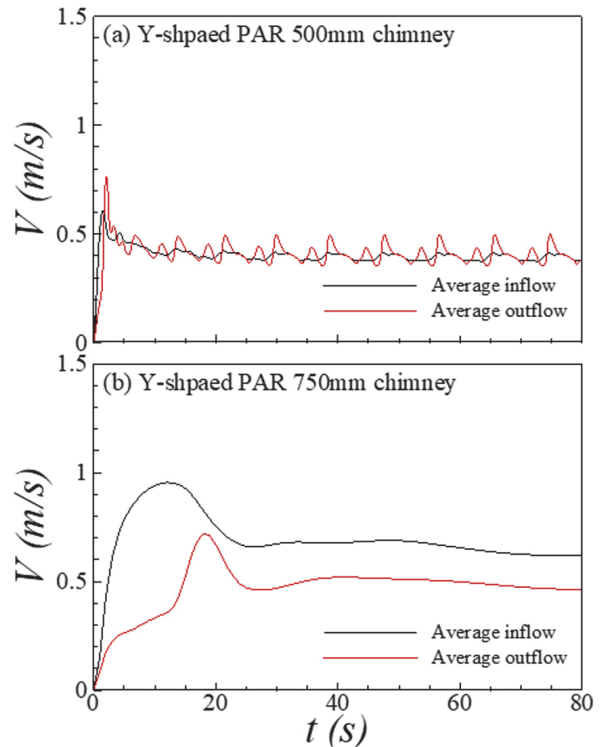


Fig. 7 Average in-outflow velocity of Y-shaped PAR

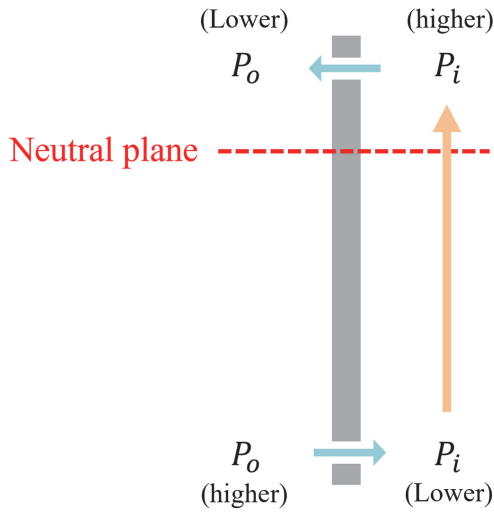


Fig. 8 Schematic diagram of simple stack effect

3.2 관의 길이 효과

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 직관형 PAR에서 관의 길이가 길어지면 입출구에서의 유속이 모두 빨라지는 현상이 나타난다. 이는 고층 구조물이나 굴뚝, 가스관 등에서 내부 유체가 가열 등의 이유로 부력을 받아 유동이 발생하는 현상인 굴뚝 효과(stack effect)와 관계되어 있으며 이때 유속은 유입-유출부 간의 수직 거리가 길어질수록 빨라진다.⁽¹²⁾ PAR의 경우, 관의 길이가 수직 길이를 결정하기 때문에 자연대류 특성과 성능 해석에 있어 중요한 요소가 된다.

Fig. 8은 구조물에서 발생하는 굴뚝 효과를 간단히 나타낸 그림이다. 굴뚝 효과로 인해 유도되는 유동은 구조물 내부 유체의 가열, 밀도 변화로 인한 내/외부 유체간의 압력차에서 비롯되며 식으로 다음과 같이 유도된다.⁽¹³⁾

$$\Delta p = gh(\rho_o - \rho_i) = \frac{1}{2}\rho_o v_i^2 \quad (4)$$

$$\frac{T_o}{\rho_i} = \frac{T_i}{\rho_o} \quad (5)$$

$$v_i = C\sqrt{2gh\frac{(T_i - T_o)}{T_i}} \quad (6)$$

g 는 중력가속도, h 는 중립면부터 유입부까지의 수직거리, T_i 는 굴뚝 내부 기온, T_o 는 외부 기온, ρ_i 는 내부 밀도, ρ_o 는 외부 밀도를 의미한다. 중립면은 내부와 외부 기압이 같아지는 경계면으로, 유동의 입구와 출구 사이에 위치한다. C 는 이론값에 대한 손실 보정 계수이다.

식 (4)와 식 (5)를 통해 확인할 수 있듯이, 구조물 내부 유체의 온도 상승으로 인해 밀도가 낮아지면 같은 높이에서 압력차가 발생하게 되며 하단의 입구에서는 외부 압력이 더 높아 구조물로 유체가 유입된 후 부력을 받아 상승하게 된다. PAR 내부 유체의 온도가 일정하다고 가정하면 유체의 압력은 높이에 따라 점점 감소하게 되고 그 기울기는 $\rho \cdot g$ 항으로 표현된다. 비교적 온도가 높은 내부 유체의 밀도가 더 낮기 때문에 내/외부 유체간의 높이에 따른 압력 감소량에 차이가 발생하고 구조물 상단의 출구 지점에서는 내부 유체의 압력이 더 높아 구조물에서 유체가 빠져나가게 된다.

Fig. 9는 500/750/1000mm 길이의 굴뚝을 가진 직관형 PAR에서의 입구 유속을 식 (6)을 이용해 예측한 값과 CFD 해석을 통해 계산된 값의 비교를 보여 준다. 이때 식을 이용한 예측값 계산에서 h 는 각 PAR의 굴뚝 길이, T_i 는 축매판 끝단부터 출구 직전에 위치하는 유체의 평균 온도이며 T_o 는 외부 유체 온도인 300K이다. 보정계수 C 가 0.45일 때, 이론값과 해석값의 차이가 1% 내외임을 확인하였다. 일반적으로 보정계수 C 는 0.5~0.65의 범위에서 형성되며, 가열된 유체에 의해 관 내외의 압력에너지가 자연대류로 인한 유체의 운동에너지로 모두 전환된다고 가정하는 경우 C 는 1에 가깝다. 하지만 PAR 시스템의 경우 유동이 PAR 내부로 유입될 때 발생하는 입구 손실, 축매판을 지날 때 발생하는 마찰 손실 등이 기존의 시스템에 비해 더 크기 때문에 일반적으로 알려진 범위(0.5~0.65)보다 더 낮음을 확인할 수 있다.

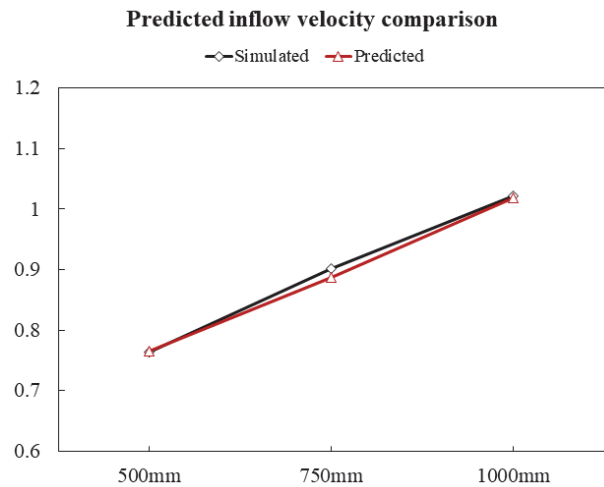


Fig. 9 Comparison of inflow velocity obtained by the theoretical analysis and computational simulations

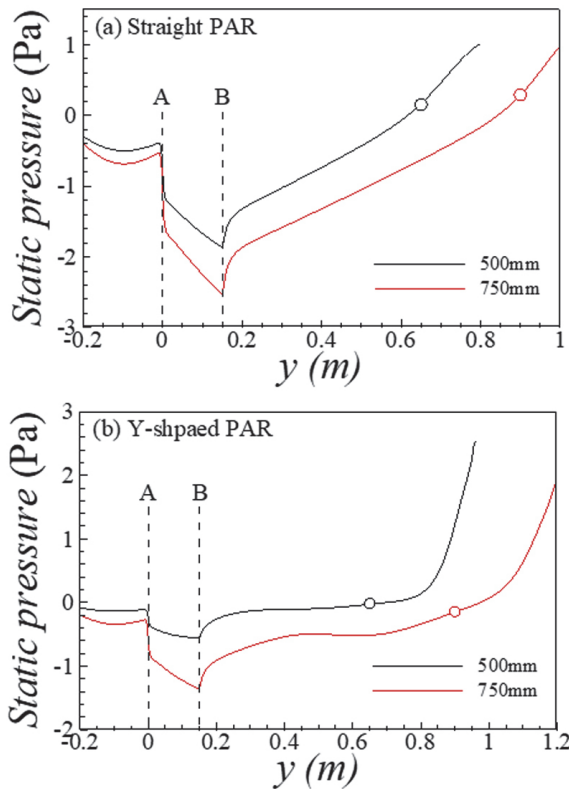


Fig. 10 Average-pressure inside PAR in the y-direction. The positions of A and B denote the start and end of the catalytic plates. The circular symbols denote the start of the outlet

3.3 내부 압력 분석

Fig. 10은 PAR 내부에서의 평균 압력 변화를 y 방향에 따라 표현한 그림이다. 그림에 표시된 A($y = 0$)와 B($y = 1.5$) 지점은 각각 촉매판의 시작점과 끝점을 가리키며, 원형 심볼은 각 경우의 출구 위치를 나타낸다. PAR의 입구에서부터 촉매판 하단부(A) 영역에서는 음압이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 유체는 입구에서 PAR 내부로 유입된다. A지점 주위에서 유동이 촉매판을 만남에 따라 일부 구간에서 정체 발생하며, 이로 인해 A 지점 직전에 압력이 작게 증가하는 모습을 보인다. 촉매판 구간에 해당하는 A-B 구간은 유체가 가열되는 구간이며 B 지점에서의 압력이 최소값이 된다. 이후 유체는 관을 지나며 감소했던 압력이 점차 회복되며, 출구 지점을 기점으로 외부 압력에 비해 큰 압력을 보인다. A-B 구간에서의 기울기는 촉매판을 지나면서 발생하는 압력에너지의 손실과 연관이 있으며, 관의 길이가 길수록 더 빠른 속도의 유동이 발생하여 압력에너지 손실(기울기)도 더 커짐을 확인할 수 있다.

Fig. 6와 Fig. 10(a)에서 확인할 수 있듯이 직관형 PAR의 경우 최저 압력이 낮은 750mm 굴뚝에서의 유속이 더 빠르며 최저 압력이 낮을수록 유속이 증가하게 된다. 이러한 압

력 구배는 유체의 밀도 변화와 관계되어 있으며 3.2절에서 소개한 굴뚝 효과와 함께 PAR에서 발생하는 자연대류 특성을 결정하는 중요한 요소임을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 서로 다른 형상을 가진 PAR에 대한 수치 해석을 통해 PAR 상부 형상과 길이에 따른 유속과 내부 압력 변화를 분석하여 자연대류 특성을 결정하는 주요 요인들을 파악하는 연구를 진행하였다. 상부 형상과 길이가 자연대류 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 직관형, Y관형 PAR 시스템에서 관 길이가 500mm, 750mm 인 케이스를 해석하였다. 직관형 PAR의 경우 상부 길이가 길어질수록 유속이 빨라져 체적유량이 증가했으나 Y관형 PAR는 유출부에서 발생하는 외부 공기의 유입으로 인해 유동이 불안정해져 유속이 일정하게 유지되지 않는 모습을 보였다. 직관형 PAR는 굴뚝 효과(stack effect)에 의해 상부 길이가 길어질수록 더 높은 유속을 갖게 되며 이론적으로 예측된 값과 수치 해석을 통해 계산된 값은 약 1% 내외의 정확도를 보여 주었다. PAR 내부의 압력 구배를 비교 분석하여 유속 변화와의 관계를 살펴보고 최저 압력이 낮을수록 빠른 유속을 갖게 됨을 확인하였다. 본 연구를 통해 PAR 시스템 내부의 자연대류 특성에 영향을 미치는 주요 요인들을 분석하였으며, 이를 바탕으로 PAR의 성능 개선 및 타 저감 기술과의 결합을 위한 설계 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 가동원전 안전성 향상 핵심 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-RS-2022-00144236).

References

- (1) Kim, J., Park, S. Y., Ha, K. S., Hong, S. W., and Kim, S. B., 2009, "Hydrogen safety analysis of the OPR1000 nuclear power plant during a severe accident by a small-break loss of coolant," Proceeding of Korea Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea.
- (2) Reinecke, E-A., Bentaib, A., Kelm, S., Jahn, W., Meynet, N., and Caroli, C., 2010, "Open issues in the applicability of recombiner experiments and modelling to reactor simulations," Progress in Nuclear Energy, Vol. 52, No. 1, pp. 136~147.
- (3) Blasewitz, A. G., and Judson, B. F., 1955, "Filtration of radioactive aerosols by glass fibers," Air Repair, Vol. 4, No. 4, pp. 223~229.

- (4) Arnould, F., Bachellerie, E., Auglaire, M., Boeck, B. de., Braillard, O., Eckardt, B., Ferroni, F., Moffett, R., and Van Goethem, G., 2001, "State of the art on hydrogen passive auto-catalytic recombiner," INIS-FR-1014.
- (5) Lee, M. H., Yang, W., Chae, N., and Choi, S., 2020, "Performance assessment of HEPA filter against radioactive aerosols from metal cutting during nuclear decommissioning," Nuclear Engineering and Technology, Vol. 52, No. 5, pp. 1043~1050.
- (6) Park, J. W., Koh, B. R., and Suh, K. Y., 2011, "Demonstrative testing of honeycomb passive autocatalytic recombiner for nuclear power plant," Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, No. 10, pp. 4280~4288.
- (7) Park, K. and Khor, C. L., 2016, "CFD analysis of PAR performance as function of inlet design," Nuclear Engineering and Design, Vol. 296, pp. 38~50.
- (8) Blanchat, T. K., and Malliakos, A. C., 2000, "Testing a passive autocatalytic recombiner in the Surtsey facility," Nuclear technology, Vol. 129, No. 3, pp. 356~373.
- (9) Chantereau, P., Diaz, S., Maros, A., Bleyer, A., and Bentaib, A., 2022, "Development and evaluation of a new concept of high efficiency passive autocatalytic recombiners.", International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin/Potsdam, Germany, TU-1.F.2
- (10) Klote, J. H., 1991, "A general routine analysis of stack effect," NIST-IR-4588
- (11) Reinecke, E-A., Boehm, J., Drinovac, P., Struth, S., Tragsdorf, I M., 2005, "Modelling of catalytic recombiners. Comparison of REKO-DIREKT calculations with REKO-3 experiments," INIS-SI-06-002
- (12) Steve, I., Brian, Ford., David, E., 2005, "Natural ventilation in non-domestic buildings", CIBSE, London, UK.
- (13) McGuire, J. H., and Tamura, G. T., 1975, "Simple analysis of smoke-flow problems in high buildings," Fire Technology, Vol. 11, pp. 15~22.