

자유수면모델을 활용한 APR1400 유량조절장치의 수치해석 연구[§]

임상규*[†] · 유성창* · 김한곤*

* 한국수력원자력 중앙연구원 신형원전연구소

Numerical Study of Fluidic Device in APR1400 Using Free-Surface Model

Sang Gyu Lim*[†], Sung Chang You* and Han Gon Kim*

* Advanced Reactor Development Laboratory, KHNP Central Research Institute

(Received December 22, 2011 ; Revised May 2, 2012 ; Accepted May 3, 2012)

Key Words: CFD(전산유체역학), Fluidic Device(유량조절장치), Free-Surface(자유수면)

초록: 신형경수로인 APR1400의 안전주입탱크에는 유량조절장치가 설치되어있다. 이러한 유량조절장치는 안전주입탱크 내부의 수위에 따라 유량조절장치 내부에 위치한 와류실의 유동양식이 변하도록 설계되어 있어, 피동적으로 유량이 조절되는 특성을 가지고 있다. 그러나 고유량에서 저유량으로 전환되는 과정에서 유동의 관성에 의해 상부 기체가 방출되는 현상이 존재하여, FD 성능에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 전산유체역학 코드인 CFX 코드를 활용하여 안전주입탱크의 유량전환현상시 기체의 방출현상에 대해 이상유체 자유수면 모델 적용하여 계산하였다. 이를 통해 안전주입수의 수위 및 상부 충전기체의 거동을 평가하여 FD 성능특성에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 유량전환구간에서 자유수면의 높이가 순간적으로 낮아지게 되어, 상부의 기체가 일부 방출되는 것으로 평가되었으나, FD 성능특성에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다.

Abstract: A fluidic device (FD) has been adopted in the safety injection tanks (SITs) of APR1400. A flow control mechanism of the FD was used to vary the flow regime in the vortex chamber corresponding to the SITs water level. The flow regime in the vortex chamber has a different pressure loss from low to high in accordance with the SITs water level. Nitrogen at the top of the SIT could be released owing to inertia of discharge flow when changing from a high flow rate to a low flow rate. This phenomenon is important to design improvement perspective because it can affect the performance of the FD. This paper shows a result of a preliminary numerical study to obtain the transient data related to air release in the flow turn-down period using a two-fluid free-surface model provided from ANSYS CFX 13.0. In conclusion, there is no significant effect on the performance of the FD, though a small quantity of air is released during the flow turn-down period.

- 기호설명 -

1. 서론

- ρ : 밀도(kg/m^3)
- y : y방향 전역좌표계(m)
- g : 중력 (m/s^2)
- p : 국부 압력(pa)
- v : 국부 속도(m/s)

1400MW급 신형경수로인 APR1400은 2002년 5월 표준설계인가를 취득하였고, 2008년 4월 건설허가를 취득한 신고리 3,4호기에 적용되어 현재 건설 중에 있다.

APR1400의 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System ; ECCS)은 기존 한국형 표준원전과 달리 설계에서 많은 개선이 이루어졌다. 특히 APR1400의 안전주입탱크는 대형냉각재상실사고(Large Break Loss of Coolant Accident ; LBLOCA) 발생 시 노심으로 주입되는 안전주입수를 효율적으로 주입하기 위해 유량조절장치(Fluidic Device

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, sglim@khnpp.co.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

; FD)가 도입되어 설계되었다.

기존 한국형 원전의 경우, 대형냉각재상실사고(LBLOCA)시 안전주입탱크의 안전주입수가 재관수 단계에서 과도한 유량이 노심으로 주입되어 많은 양의 안전주입수가 노심으로 유입되지 못하고 파단부를 통해 격납건물로 유출될 수 있음이 안전해석을 통해 평가되었다. 유량조절장치인 FD는 LBLOCA 재충수 단계에서는 많은 양의 안전주입수를 방출하도록 하고, 재관수 단계에서는 적은 양의 안전주입수가 지속적으로 주입될 수 있도록 유량을 조절하는 방식으로 설계되었다. 이러한 유량조절방식은 능동구동장치에 의해 조절되는 것이 아니라, 피동적 작동방식에 의해 조절되도록 설계되어 있어 작동 시 운전원의 개입이나, 어떠한 움직임은 부품이 없이도 작동된다. 이와 같은 피동적 작동개념으로 설계된 FD의 설치로 인해 궁극적으로 기존 원전과 비교하여 APR1400의 노심손상빈도(Core Damage Frequency)를 낮추는 효과에 기여하였다.

APR1400 FD의 표준설계를 위해 한국원자력연구원에서는 반복실험⁽¹⁾을 통해 최종적으로 설계의 완전성을 검증하였다. 그러나 안전주입탱크 하단부의 사체적(Dead volume)이 존재하여 이에 해당하는 냉각수는 노심냉각에 기여하지 못하는 점, 상부 충전되어 있는 질소가스가 방출 후반기 안전주입수와 함께 유출되는 점, APR1400에 비해 출력이 증강되는 APR+ 노형까지 고려하였을 때 현재 FD 성능요건이 보다 개선될 필요성이 있는 점 등이 제기되었다.

이를 위해 한수원 중앙연구원은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic ; CFD)을 활용하여 FD의 성능평가를 수행하였다. 단상유체임을 가정하고 실험결과를 기반으로 적절한 경계조건을 수립하여 분석한 결과, FD의 성능분석에 CFD 코드 적용성을 검증하였으며, 사체적 활용방안 등 설계개선안에 대한 민감도해석을 통해 최적 설계안을 제안한 바 있다.⁽²⁾

미츠비시사와 웨스팅하우스에서 개발한 US-APWR에도 FD와 동일한 방식의 유량조절장치가 안전주입탱크에 적용되어 있다. Shiraiishi 등⁽³⁾은 축소모형실험을 통해 방출유량, 압력강하 등 유량조절장치의 성능특성을 분석하였고, 원형크기의 실험을 수행하여 성능을 최종적으로 확정하였다. Takata 등⁽³⁾은 저유량조건하에서 유량조절장치 중 와류

실 내부의 압력강하 특성을 CFD 코드의 단상유체조건임을 가정하여 예측하였으며, 실험과 일치하는 결과를 얻었다.

위와 같이 국내외에서 수행되어진 FD 관련 일련의 CFD 연구결과들은 단상유체를 활용하기 위해 적절한 경계조건을 도입하여 계산을 수행하였다. CFD 계산의 목적은 FD의 내부 압력강하특성을 분석하고 새로운 FD 설계특성의 변화추이를 예측하는데 집중하였다.

이러한 단상유체를 가정한 기존 해석연구는 고유량에서 저유량으로 전환시 안전주입탱크내부에서 발생하는 과도상태 즉 상부 충전 질소가스의 거동을 분석하지 못하는 점 등 제약사항이 존재한다.

따라서 본 논문은 상부 기체가 과도상태에서의 변화를 예측하여 상부기체의 거동이 FD 성능에 어떠한 영향을 주는 평가하고자 한다. 이를 위해 자유수면모델을 활용하여 상부기체와 유체의 거동을 모의하여, FD 설계특성을 예측하도록 하고, 이를 실험결과와 비교, 평가하고자 한다. 이를 통해 안전주입탱크의 자유수면인 안전주입수 수위의 거동 특성 및 상부 충전 질소기체의 거동을 평가하여 향후 설계개선에 기본 자료로 활용하고자 한다.

2. FD 설계 및 실증실험 결과

2.1 FD 설계⁽⁶⁾

Fig. 1과 같이 안전주입탱크 하단부에 FD가 설치되어 있으며, FD는 크게 수직관(Stand pipe), 와류실, 방출노즐로 구성되어 있다. 안전주입수는 수직관과 4개의 Control port 입구로 유입되어 와류실 내부로 이송된다. 수직관으로 주입된 안전주입수는 Partition plate를 지나 Supply port을 통해 와류실로 이송되며, 4개의 Control port 입구로 유입된 안전주입수는 곧바로 Control port를 통해 와류실로 이송된다. 이때 안전주입탱크의 수위가 수직관보다 높을 경우, 안전주입수는 수직관 및 Control port 입구 모두로 이송되며, 와류실에서는 각 주입구의 유동이 서로 상호작용하여 곧바로 방출노즐로 이동된다(Fig. 2(a)). 이러한 유동양식은 압력강하가 낮아 고유량의 안전주입유량이 형성된다. 반면에 안전주입탱크의 수위가 수직관보다 낮아지는 경우, 안전주입수는 수직관을 제외

한 4개의 Control port 입구로 유동이 형성되므로, 결국 와류실에서는 Control port를 통해서만 안전주입수가 유입된다. Control port는 원형의 와류실에 접선방향으로 설계되어 있어 와류실 내부의 유동양식은 강한 와류의 형태를 띄게 되며, 이로 인해 큰 압력강하를 발생시킨다. 궁극적으로 와류실 내부에는 강한 압력강하력이 발생하므로 인해 안전주입수의 방출유량은 이전의 유동양식에 비해 현저히 줄어들게 된다(Fig. 2(b))

2.2 FD 실증실험 결과⁽¹⁾

앞 절에서 언급한 바와 같이 뚜렛이 2단계로 구분되는 방출유량 특성은 방출유량의 변화와 함께 와류실에서 발생하는 압력손실의 값으로 정의할 수 있다. 압력손실계수는 오일러(Euler)수 혹은 K-factor로 표현된다.

$$Eu = K - factor = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho v^2} = \frac{2\Delta p \rho A^2}{W^2} \quad (1)$$

여기서, Δp 는 상부 기체의 압력과 방출배관에서 압력차, W 는 방출유량, A 는 방출배관 면적

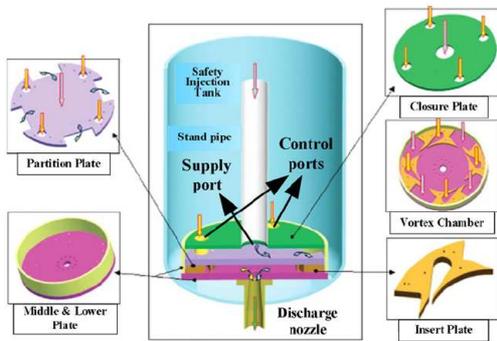


Fig. 1 Configuration of fluidic device

FD의 성능특성을 대표하는 압력손실계수는 식 (1)과 같이 상부기체의 압력과 와류실을 통과한 후 방출배관에서의 압력차와 방출유량에 의해 결정된다. FD의 고유한 설계특성은 와류실의 유동양식에 의해 결정되는데, 각 유량구간(고유량 및 저유량)에서는 시간에 따른 유동양식이 동일하도록 설계되어 있다(Fig. 2). 따라서 궁극적으로 FD의 성능특성인 압력손실계수는 각 구간내에서는 동일한 압력손실계수를 가져야 한다.

원자력연구원에서 수행한 실험결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)와 같이 초기 30초동안 1000kg/s에서 700kg/s의 고유량이 형성되는 반면, 30초 이후 유량전환이 일어나면서 300~100kg/s의 저유량이 형성되는 것을 실험결과를 통해 확인할 수 있었다. 각각의 방출단계에서 와류실 내부의 압력손실값은 Fig. 3(b)와 같이 고유량조건일 경우 약 10이고, 저유량조건일 경우 약 110정도로 뚜렛이 구분되어지고, 각 단계별로 일정한 압력손실계수를 가지고 있음을 확인하였다. 또한 반복실험을 통해 실험의 재현성과 신뢰성을 확인하였으며, APR1400 안전주입탱크 설계 및 성능기준에 부합함을 최종적으로 확인하였다.

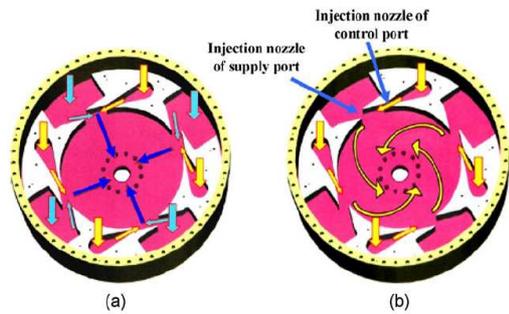


Fig. 2 Flow regime in the vortex chamber : (a) High flow mode, (b) Low flow mode

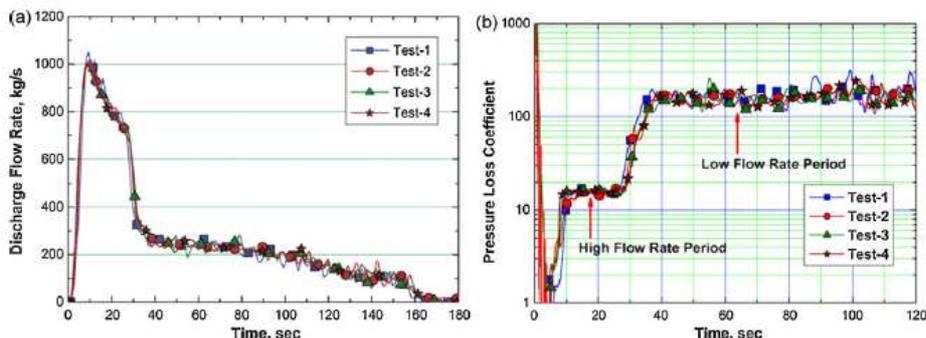


Fig. 3 FD experimental results - (a) Discharging flow rate, (b) Pressure loss coefficient

3. 수치해석모델 및 경계조건

3.1 수치해석 모델

본 절에서는 FD 설계와 관련된 이전 연구^(2,4)와 구별되게 사용된 수치해석모델에 대해 기술한다. 단상유체를 가정한 CFD 해석연구와 달리 본 논문에서는 자유수면모델(Free-surface model)을 사용하여 공기와 물의 이상유동을 모사하였다. 각 상의 물성치는 비압축성, 등온으로 고려하였다. 같은 속도장으로 계산하는 균질모델(Homogeneous model)을 사용하였다. 열전달은 고려하지 않고 등온으로 설정하였다. 이에 대한 2상유체 지배방정식은 아래와 같이 정리할 수 있다.⁽⁵⁾

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_\alpha r_\alpha) + \nabla \cdot (\rho_\alpha r_\alpha U_\alpha) = \sum_{\beta=1}^{N_p} (\dot{m}_{\alpha\beta} - \dot{m}_{\beta\alpha}) \quad (2)$$

여기서 r_α 는 α 상의 체적분율, 균질모델인 경우, U_α 는 U 로 대체, 우변항은 상간의 질량전달이 없기 때문에 0이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_\alpha r_\alpha U) + \nabla \cdot [r_\alpha \{\rho_\alpha U \otimes U - \mu_t (\nabla U + [U]^T)\}] \\ = r_\alpha (B - \nabla p_\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 B 는 External body force로 0이다.

각 상의 체적보존 방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha = 1 \quad (4)$$

각 상의 체적분율의 합은 1이 되어야 한다.

$$\begin{aligned} \sum \alpha \frac{1}{\rho_\alpha} \left(\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U) \right) \\ = \sum \alpha \frac{1}{\rho_\alpha} (S_M - \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 S_M 은 소스항이므로 0이고, $\Gamma_{\alpha\beta}$ 은 상간의 질량전달이므로 역시 0이다. 좌변의 두 번째 항은 비압축성과 소스항이 없는 경우 0이다.

부력 및 정수압을 고려하여 계산을 수행하였다. 아래의 식과 같이 자유수면의 높이에 따른

체적분율을 정의하고, 이를 활용하여 정수압을 계산하여 정의하였다. 물과 공기의 체적분율은 STEP 함수를 활용하여 아래와 같이 정의한다.

$$\text{물의 체적분율} = \text{step}((8.9m - y)/1[m]) \quad (6)$$

$$\text{공기의 체적분율} = 1 - \text{step}((8.9m - y)/1[m]) \quad (7)$$

여기서 8.9m는 안전주입탱크내의 초기 수위이며, 전역좌표계 y방향으로 8.9보다 큰 경우, 체적분율이 0이 되어 기체로 설정되며, 8.9보다 작은 경우, 체적분율이 1이 되어 물로 설정된다.

$$\text{정수압} = \rho g(8.9m - y) \cdot \text{물의 체적분율} \quad (8)$$

와류실에서는 강한 난류와 함께 유동의 혼합, 분리가 빈번히 일어난다. Shear Stress Transport 모델은 $k-\omega$ 계열의 모델로 경계층 내부 유동을 정확하게 계산하여, 유동박리의 위치를 정확하게 예측하는 경향이 있어, 2방정식모델(Two-equation model) 계열에서 가장 널리 사용되고 있는 모델이다. 따라서 본 연구에서는 SST 모델을 사용하여 난류를 모의하였다.

3.2 경계조건

Fig. 4와 같이 안전주입탱크 및 FD에 대한 형상설계 및 격자를 생성하였다. 약 백사십만개 요소를 생성하였으며, 경계층해석을 위해 경계층 격자를 7개를 생성하여 모의하였다. 안전주입탱크는 전체 형상을 생성하지 않고 상부 안전주입탱크 체적을 생략하여 생성하였다. 실험결과에서 알 수 있듯이 안전주입탱크의 총 방출시간은 180초로 CFD 코드로 180초 전체를 해석하기에는 현실적으로 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 고유량에서 저유량으로 전환되는 일정한 과도상태구간을 설정하여 해석을 수행하였으며, 이를 위해 상부 안전주입탱크 체적이 간략화된 모델을 생성하였다.

안전주입수 방출유량 형성의 근본 힘이 되는 가압된 상부기체의 압력은 경계조건으로 처리되었으며, 이는 실증실험에서 계측된 상부기체압력을 입력하였다. 또한 방출배관에서 빠져나가는 유량 역시 실험결과를 그대로 경계조건에 적용하여 해석을 수행하였다.

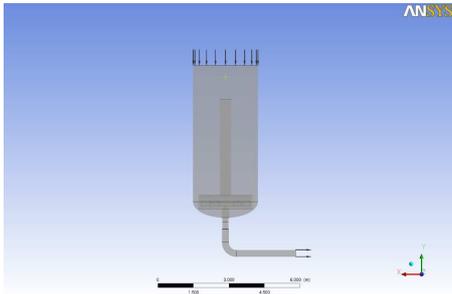


Fig. 4 CFD Grid model

해석시간은 실증실험에서 고유량 구간 중 유량 전환이 발생하기전인 15초부터 계산을 수행하였으며, 저유량 구간이 충분히 발달된 75초까지 계산을 수행하였다.

4. CFD 해석결과

4.1 압력강하 특성 분석

Fig. 5와 같이 구간별 압력손실계수를 실험과 비교하였다. 약 30초부터 시작되는 유량전환 전까지 고유량 안전주입수가 형성된다. 이때 압력손실계수는 실험과 거의 일치하게 잘 예측되고 있음을 알 수 있다. 또한 유량전환시점이 시작되는 시간 및 증가율도 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

실제 실험에서 계산된 압력손실계수는 저유량 구간 진입 이후 많은 진동성분이 존재한다. 식 (1)에서 제시된 바와 같이, 압력손실계수는 차압과 방출유량에 의해 결정된다. 이러한 진동성분이 야기되는 원인은 Chu 등⁽¹⁾의 연구결과에서 다음과 같이 설명하고 있다. 실증실험에서 방출유속은 약 15m/s에 달하고, 120초 이후 저유량구간에서는 상부기체의 혼입이 발생하기 때문에 상용유량계를 이용하여 정확한 계측의 어려움이 있었다. 따라서 실험에서는 다음의 식을 활용해 방출유량을 예측하였다.

$$W(t) = \rho A_{dis} \frac{h_{SIT}(t) - h_{SIT}(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (9)$$

여기서 A_{dis} 는 방출배관의 면적, h_{SIT} 는 안전주입탱크의 높이

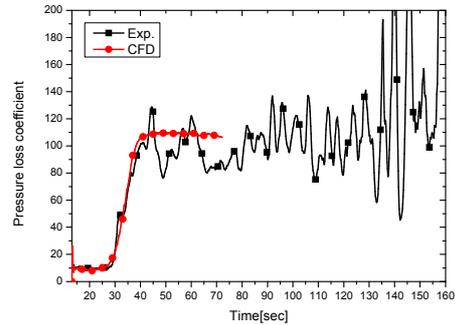


Fig. 5 Comparison of pressure loss coefficient

이와 같이 실험에서는 압력손실계수를 평가하기 위해 사용되는 유량을 직접 측정하지 못하기 때문에 기체방출 전 압력손실계수의 요동은 실험의 오차 등에 기인하는 것으로 평가되었으며, Curve fitting된 압력손실계수로부터 설계기준을 만족하는지 평가하였다. 반복 실험결과를 종합하여 보면 저유량구간에서 평균 110정도의 압력손실계수를 가지는 것으로 평가되었다. 그러므로 CFD 해석에서 도출된 저유량 압력손실계수는 비교적 적절하게 예측되고 있음을 알 수 있다.

4.2 유량구간별 와류실 내부 유동분포

Fig. 6에는 각 조건별 와류실 내부의 유동벡터를 도시화하고 있다. Supply port와 Control port 모두를 통해 안전주입수가 유입되는 고유량 조건의 경우(Fig. 6(a)) Supply port와 Control port로 유입되는 유동이 상호작용하여 곧바로 방출노즐쪽으로 이송되고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 낮은 압력강하력을 가지고 있다. 이러한 와류실의 유동양식은 궁극적으로 재관수단계에서 필요한 고유량의 안전주입수를 노심으로 이송할 수 있게 되는 것이다.

Fig.6(b)에서는 유량전환시 발생하고 난 후 저유량 조건에서의 와류실 내부 유동벡터를 나타낸다. 유량전환 후 Control port로만 유동이 형성되므로 와류실 내부에는 강한 와류가 형성된다. 이로 인해 FD의 압력강하가 크게 증가하므로 재충수단계에서 필요한 적정량의 안전주입수가 지속적으로 주입되게 되는 것이다. 각 단계별 와류실의 유동벡터를 분석해 본바, CFD 해석이 적절히 계산되며, FD의 유동특성을 비교적 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 수직관내 차압분포와 공기의 방출

Fig. 7에서는 각 구간별 자유수면의 거동분포를 도시화하고 있다. Fig. 7(a)와 같이 고유량조건에서는 수직관 위로 자유수면이 존재한다. 자유수면의 높이가 수직관에 근접하면, 자유수면은 수직관내로 유입되면서 유량전환이 시작된다. 수직관의 높이보다 자유수면의 위치가 높은 경우, 수직관 내부의 유동은 같은 높이의 안전주입탱크 내부의 속도보다 빠르다. 이는 수직관과 수직관 외부의 안전주입탱크 내부와의 차압을 보면 쉽게 알 수 있다. Fig. 8과 9를 참조하면, 유량전환이 일어나기 전에(27초 이전) 일정량의 차압이 존재하며, 유량전환이 시작되면 위치별로 차압이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 수직관 내부와 수직관외부의 압력차에 의해 수직관에서는 유동의 가속이 발생하게 되므로 궁극적으로 유량전환이 시작되면 수직관 내부유동의 관성에 의해 수직관 내부의 자유수면이 빠르게 감소하게 된다. 유량전환시 급격히 감소한 자유수면에 의해 상부의 기체 역시 수직관으로 유입된다. Fig. 7(b)에서 도시한 바와 같이, 관성에 의해 수직

관의 수위가 급격히 낮아질 때 상부의 기체가 와류실로 끌려 들어간다. Fig. 10에서 보면 유량전환이 시작되는 시점인 25초부터 기체의 방출유량이 증가되고, 유량전환이 종료되는 40초 이후에는 기체의 방출유량이 없어진다. 그러나 방출되는 기체의 양은 매우 작아서 기체의 유입으로 인해 FD 성능특성인 압력손실계수의 변화는 미미했다.

유량전환이 종료된 뒤에는 수직관의 수위가 다시 회복되고 일정한 수위를 유지하고 있기 때문에 상부 기체의 방출은 종료되고 일정한 저유량의 안전주입이 형성된다(Fig. 7(c)).

본 CFD 해석에서 기체와 유체의 난류를 예측하기 위해 SST모델을 사용하였다. 실제 유체의 경우, 복잡한 내부 유로를 거쳐 방출되므로 난류의 영역에 존재할 것으로 예상되나, 기체의 경우 대부분 유체의 상부에 존재하여 층류영역일 것이 자명하다. 자유수면으로 구분되어 있는 안전주입탱크의 내부유동해석에서는 기체의 난류를 계산함으로써 인해 궁극적으로 상간의 계면마찰에 영향을 줄 것으로 예상된다.

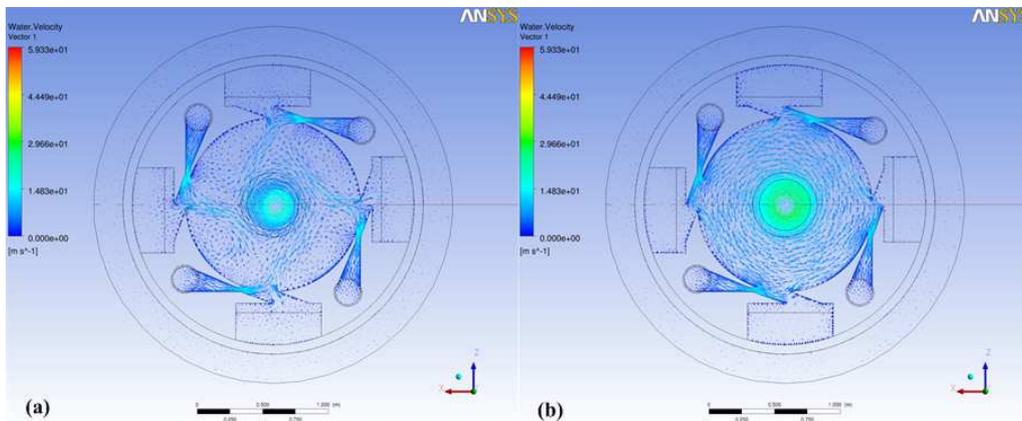


Fig. 6 Flow velocity vector in the vortex chamber : (a) High flow, (b) Low flow

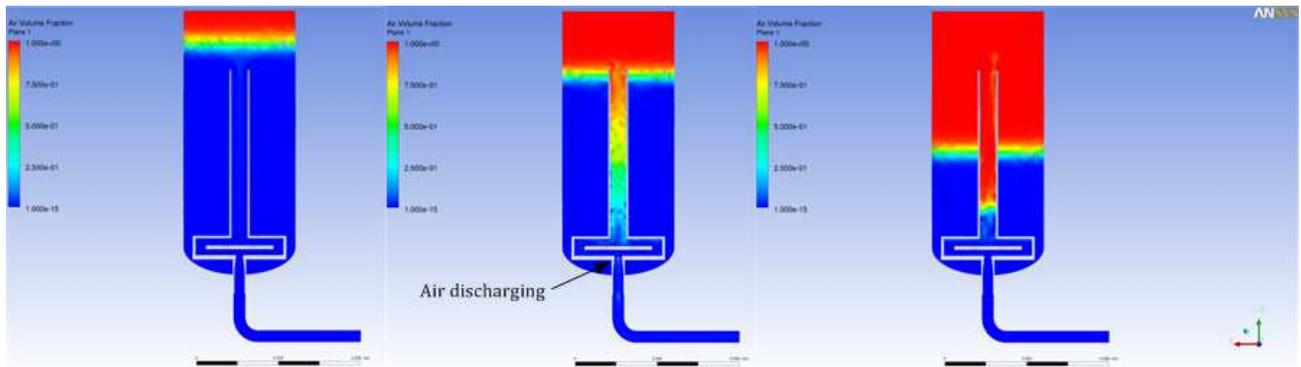


Fig. 7 Free-surface movement in SIT : (a) High flow, (b) Turn-down, (c) Low flow

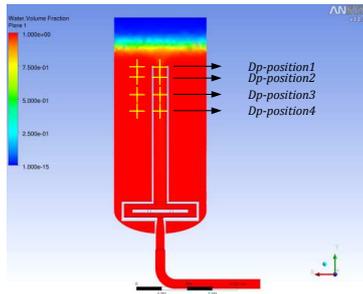


Fig. 8 Monitoring point for difference pressure in period of turn-down

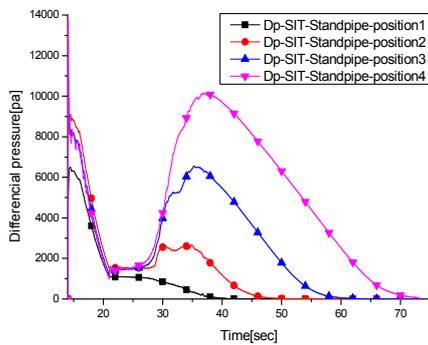


Fig. 9 Differential pressure in period of turn-down

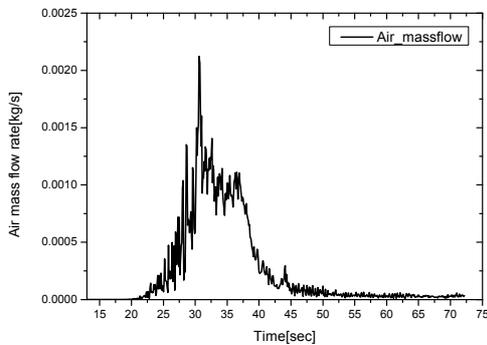


Fig. 10 Air discharge flow rate

그러나 상부기체의 속도는 매우 낮을 뿐만 아니라, 안전주입탱크 내부의 존재하는 자유수면의 변화는 상간의 마찰에 의해 결정되는 것이 아니라 안전주입탱크와 수직관, 수직관과 와류실의 내부 압력분포에 의해 결정된다. 또한 수직관 내부에서 형성되는 자유수면의 면적은 수직관의 내부직경에 국한되므로, 기체의 난류를 모의한다 하더라도 계면마찰의 변화에 의해 수치해석 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고, Homogeneous 모델뿐만 아니라 각 상의 난류 및 유동장을 개별적으로 계산하는

In-homogenous 모델을 적용하여 상호 결과의 차이점을 분석하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

일련의 단상유체 가정을 통해 수행했던 CFD 해석의 경험을 바탕으로 본 연구에서는 균질 자유수면모델과 함께 이상유체모델을 적용하여 안전주입탱크와 FD의 CFD 해석을 수행하여 실험 결과와 비교 평가를 수행하였다.

본 CFD 해석에서 FD의 주요 유동변수를 비교적 정확히 예측하는 것으로 평가되었다. 또한 자유수면모델을 적용한 결과, 상부기체의 거동예측 측면에서 유량전환기간에 자유수면의 급격한 감소와 함께 일정량의 상부기체가 방출됨을 예측하였다. 그럼에도 불구하고 FD 성능특성에는 큰 영향이 없었다.

본 연구를 통해 수행된 일련의 CFD 해석을 통해 와류실 내부의 유동양식 및 과도상태하에서의 자유수면 거동에 대한 이해가 증진되었다. 이러한 일련의 연구결과를 토대로 차후 설계변경에 따른 CFD 해석 및 FD의 주요 특성변화 추이분석의 기본자료로 적용될 예정이다.

후기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 2010151010002C)

참고문헌

- (1) Chu, I.C., Song, C.H., Cho, B.H. and Park, J.K., 2008, "Development of Passive Flow Controlling Safety Injection Tank for APR1400," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp 200~206.
- (2) Lim, S.G., Lee, S.H. and Kim, H.G., 2010, "Benchmark and Parametric Study of a Passive Flow Controller (Fluidic Device) for the Development of Optimal Designs using a CFD Code," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, pp 1139~1150.
- (3) Shiraishi, T., Watakabe, H., Nakamori, N., Tabuchi, K. and Takayama, Y., 1994, "Characteristics of the Flow Controlled Accumulator," *Nuclear Technology*, Vol. 108, pp

- 181~183.
- (4) Takata, T., Ogino, T., Ishibashi, T. and Shiraishi, T., 2009, "CFD on Small Flow Injection of Advanced Accumulator in APWR," *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, Vol. 46, pp 54~60.
- (5) ANSYS, 2011, "CFX 13.0 User Guide," ANSYS SYSTEM
- (6) Kim, H.G., 2000, "A Safety Injection System for Advanced Power Reactor 1400," Patent-10-2001-0076568, Korea.