

APR-1400 원자로 Fluidic Device 유동특성평가 Assessment of Fluid Flow Characteristics for Fluidic Device of APR 1400

김만웅¹, 이상규¹, 이재훈¹, 김현균¹, 이종인¹, 지명석², 유성연²

¹한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

²충남대학교 기계설계공학과
대전광역시 유성구 궁동 220번지

요 약

차세대 원자로 (APR 1400)에서는 냉각재 상실사고 (LOCA)의 발생 시 원자로 노심의 장기적 냉각을 위하여 채택하고 있는 고도화된 피동안전개념 중의 하나는 냉각재 상실사고 발생 시 초기에는 파단부를 통해 방출된 냉각재를 보충하기 위해 대유량의 냉각재를 공급하고, 일정 기간 이후에는 비교적 소유량 (대유량의 20%정도)의 냉각수를 공급할 수 있는 기능을 가진 피동형 유량조절장치 (Fluidic Device)를 안전주입탱크 내에 설치함으로써 운전원의 추가적인 조치 없이 피동적으로 요구 상황에 따라 필요로 하는 만큼 유량 공급을 조절하도록 설계되어 있다. 본 연구에서는 피동형 유량조절장치인 Fluidic Device 내부의 유동특성을 분석하여 한국원자력연구소에서 수행중인 실험값 들과 비교하였으며, 이를 통하여 Fluidic Device 설계에 대한 독자적인 3차원적인 열유동 검증평가능력을 확보하였다.

ABSTRACT

The objective of this study is to establish evaluation and verification guideline for the APR 1400 and to investigate the thermal-hydraulic characteristics for fluidic device is analyzed using FLUENT. The Scope and major results of research are Flow characteristics for fluidic device. In this study, three-dimensional numerical model for fluidic device is developed, and results are compared with experimental data performed by KAERI in order to verify numerical simulation. In addition, variation of flow rate is investigated at various elapsed times after valve operating, and flow characteristics is analyzed at low and high flow rate conditions, respectively.

I. 서 론

냉각재 상실사고 (LOCA) 발생 시 원자로 노심 (reactor core)을 냉각시키기 위한 안전장치에 관한 연구가 오랫동안 계속되어 왔다. 이에 따라 최근에 기존의 원자로보다 안전성이 강화된 설계 개념을 채택하는 차세대 원자로 (APR 1400)가 개발되었다. 차세대 원자로가 채택하고 있는 고도화된 피동안전개념 중의 하나는 냉각재 상실사고 발생 시 초기에는 파단부를 통해 방출된 냉각재를 보충하기 위해 대용량의 냉각재를 공급하고, 일정 기간 이후에는 비교적 소용량(대용량의 20%정도)의 냉각수를 공급할 수 있는 기능을 가진 피동형 안전주입탱크 (SIT : Safety Injection Tank)이다. 원자력 안전계통을 구성하고 있는 안전주입탱크의 가장 중요한 기능은 원자력 발전소의 열 생성원인 원자로를 포함하는 원자로 냉각재 계통 (RCS : Reactor Coolant System)에서 압력 경계면의 파단에 따라 야기되는 냉각재 상실사고의 발생 시 능동 기기인 안전주입 펌프가 작동하기 이전에 신속히 대응하여 미리 질소가스로 가압되어 있는 탱크 내의 압력을 이용하여 안전주입수를 노심에 주입하는 것이다. 기존의 안전주입탱크는 대용량의 냉각수 공급을 필요로 하는 사고발생 초기에는 소용량보다 더 많은 냉각수를 공급하게 되고, 이에 따라 일정 기간 이후에는 안전주입탱크 내의 냉각수가 고갈되어 원자로 계통의 냉각에 전혀 기여하지 못하게 된다. 기존의 안전 주입장치인 축압기(accumulator) 또는 안전주입탱크 등의 내부에 Fluidic Device와 같은 유체기구 등을 설치함으로써 운전원의 추가적인 조치 없이 피동적으로 요구 상황에 따라 필요로 하는 만큼 유량공급을 조절하는 개념을 적용할 수 있다 [1,2]. 본 연구에서는 Fluidic Device 내부의 유동특성을 분석하여 Fluidic Device 설계에 대한 독자적인 평가능력을 확보하고자 한다.

II. Fluidic Device 유동특성평가

Fluidic Device는 형상에 따라 유동특성이 다르지만 일반적인 유동특성을 보면 크게 2가지의 경우로 구분할 수 있는데 주유 입구의 유동의 영향이 제어구의 유동보다 지배적인 경우(최대유량이 배출되는 경우)와 제어구의 유동영향만 지배적인 경우(최소유량이 배출되는 경우)로 나눌 수 있다. 나머지 영역은 주유 입구의 유동과 제어구의 유동이 비슷한 영역이다. 본 연구에서는 주유 입구와 제어구, 배출구의 경계조건으로 실험의 압력값을 사용하여 Fluidic Device의 내부 유동장과 유량을 해석하였다 [3].

본 연구에서는 Fluidic Device의 유동을 해석하기 위하여 연속방정식, 운동량방정식, RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 SIT 내의 수위의 변화에 따라 방출유량을 계산하고 그 결

과를 비교하여 보았다.

1. 지배방정식

원자로내 유동 및 열전달 특성을 구하기 위한 지배방정식인 연속방정식과 운동량방정식, 에너지 방정식과 난류모델 다음과 같다 [4].

연속방정식은 식 (1)과 같으며,

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_k} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식은 다음 식 (2)과 같고,

$$U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \overline{u_i u_k} \right) \quad (2)$$

본 연구에서는 표준 $k-\epsilon$ 모델과 함께 RNG $k-\epsilon$ 모델, Reynolds Stress 모델을 사용하여 각각의 모델에 대하여 계산하고 그 결과를 비교하여 보았다. 표준 $k-\epsilon$ 모델에 대한 난류 운동에너지 k 와 난류 운동에너지 소멸율 ϵ 에 대한 방정식은 식 (3), (4)와 같다.

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + P + G - \epsilon \quad (3)$$

$$U_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1(P + G) - C_2\epsilon) \quad (4)$$

Two-equation 모델인 $k-\epsilon$ model에 근거한 RNG $k-\epsilon$ model은 ReNormalization Group method라 불리는 수학적 통계기법에 근거하여 유도된 모델로 유체 유동의 난류 현상을 해석하는 방법이다. 난류 전달을 모사함에 있어서 semi-empirical approach가 아닌 수학적 기초를 근거로 하므로 더 일반적이고 기초적인 model을 제시하며 벽근처 유동, 굴곡을 가진 유동, 저레이놀즈수(low Reynolds number) 유동 등을 예측하는 것이 개선되었다. 표준 $k-\epsilon$ 모델과 비교할 때, strained 유동에 대한 정확도 개선, swirling 유동에 대한 정확도 개선, turbulent Prandtl number를 구하기 위한 analytical formula 사용(표준 $k-\epsilon$ 모델에서는 turbulent Prandtl number를 사용자가 상수로 준다.) 등을 특징으로 한다. 특히, RNG $k-\epsilon$ model 내의 상수와 함수는 실험식이 아닌 이론에 근거하므로 수정 없이 널리 사용될 수 있으며, RNG 이론 내에 저레이놀즈수 효과와 compressibility 효과가 포함되어 있으며 식 (5), (6)과 같다

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \nu_t S^2 - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_k} \alpha \nu_t \frac{\partial k}{\partial x_k} \quad (5)$$

$$U_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t S^2 - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R + \frac{\partial}{\partial x_k} \alpha \nu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \quad (6)$$

Reynolds Stress 모델은 와류와 회전 등 복잡한 난류유동에 대하여 비교적 정확한 예측을 할 수 있다. RSM은 Isotropic eddy viscosity의 가정이 필요하지 않고, 소산율 방정식과 함께 Reynolds 응력에 대한 전달 방정식을 풀어서 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식으로 나타내며 식 (7), (8)과 같다.

$$\frac{\partial(\rho U_k \overline{u_i u_j})}{\partial x_k} = \rho(P_{ij} - \epsilon_{ij} + \phi_{ji} + d_{ijk}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial(U_k \epsilon)}{\partial x_k} = C_\epsilon \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{x}{\epsilon} \overline{u_i u_i} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} + \frac{1}{2} C_{\epsilon,1} \frac{x}{\epsilon} P_{kk} - C_{\epsilon,2} \frac{\epsilon^2}{x} \right) \quad (9)$$

2. 전산해석기법

지배방정식과 난류방정식을 일반형으로 표시하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k}) + S_\phi \quad (6)$$

여기서 좌변 항은 대류항이고, 우변의 첫 번째 항은 확산항이며, S_ϕ 는 생성항이다. $\phi=1$ 인 경우는 연속방정식을 나타내고, $\phi=U_i$ 인 경우는 운동량 방정식, $\phi=T$ 인 경우는 에너지 방정식을 나타내며, $\phi=k$ 와 ϵ 인 경우는 난류방정식을 나타낸다. 생성항 S_ϕ 는 각각의 지배방정식에 대해서 다른 형태로 표시된다. 유한체적법 (FVM : Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (6)에 대한 차분방정식을 구하면 식 (7)과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \quad (7)$$

범용 열유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분방정식 식 (7)의 해를 구하였다. FLUENT는 유동, 열전달, 상변화, 연소 등과 관련된 현상의 수치해석을 위해 개발된 프로그램으로 전처리장치인 GAMBIT과 Solver인 FLUENT 및 후처리장치로 구성되어 있다. FLUENT는 완전내연기법(fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법 Code로서 속도 등 벡터량과 압력, 온도 등 스칼라 양을 같은 위치에 저장하는 비교차격자계

(non-staggered grid)를 사용하며, 대류항을 계산하기 위한 격자점간의 보간은 power-law법, 2차 상류차분법, 고차 상류차분법인 QUICK법을 선택하여 사용할 수 있다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 기본으로 사용하고 RSM(Reynolds Stress Model)과 RNG(Renormalization Group) 모델을 선택적으로 사용할 수 있다. 수치해법은 SIMPLE과 SMMPLEC를 채용하고 있다.

본 연구에서는 power-law scheme, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델, RNG $k-\epsilon$ 모델, Reynolds Stress 모델, SIMPLE algorithm을 사용하여 전산해석을 수행하였으며, 각각의 모델에 대한 수렴판정은 다음의 전영역 잔류항의 총합이 10^{-6} 이하가 되는 시점으로 하였다.

$$\bar{R} = \frac{\sum_{nodesP} | [A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P] |}{\sum_{nodesP} | (A_P \phi_P) |} \leq 10^{-6} \quad (12)$$

Fluidic Device 내부에서 최대 유량 배출시 복잡한 유동장이 형성되고 중심부분에서는 강한 와류가 형성되므로 RNG(Renormalization group) $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 표준 $k-\epsilon$ 난류모델과 Reynolds Stress 모델에 대한 영향을 분석하였으며, Fluidic Device 내부의 유동장과 속도 분포, 압력분포를 비교하였으며, 1차 풍상 차분법(First order upwind scheme), 그리고 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

4. Fluidic Device 실험

Fluidic Device 실증실험은 한국원자력연구소에서 수행하고 있으며, 실험장치의 설치도 (As-Built Drawing)는 그림 1과 같다. 실험용 압력기의 내경은 1.25m 이며, full scale SIT의 내경은 2.74m이다. 따라서 실제 Fluidic Device과는 면적에 있어 scale-down(또는 유량 scale-down) 비는 4.8이다. Full scale SIT의 계통설계 가스압력은 570 psig (39.3 barg)이며, 실험비는 610 psig (42.0 barg)를 기준으로 설계되었다. 따라서 실험에서는 탱크의 설정 가스 압력을 38 barg로부터 43 barg범위에서 선택하여 실험조건을 정한다. Full scale SIT의 초기 기체체적 (gas volume)은 22.8m³ (806 cu. ft)이다. 따라서 실험 scale을 고려하면 실험의 초기 gas volume은 4.78 m³이 되어야 한다. 초기 gas volume을 맞추기 위해 실험에서는 탱크의 수위를 탱크 바닥으로부터 10.6 m (단, 탱크차압수위계 하부 압력 transducer는 탱크 바닥으로부터 0.5 m 하부에 설치되므로 수위계의 지시 수위는 약 11.1 m)로 되어있다. Full scale에서는 standpipe가 노출되는 때까지 빠져나가는

물의 부피는 800 cu. ft이다. 따라서 scale-down한 물의 부피는 166.6 cu.ft (4.7 m³)이 되며, 이것은 내경 1.25 m의 탱크에서는 수위 변화 차 3.8 m에 해당된다. 즉, standpipe 상단의 높이는 탱크의 바닥으로부터 6.8 m 위치에 있다. Full scale의 계통에서는 vortex 밸브 하단의 배관에 의한 압력강하가 최대유량 2150 m³/hr에서 5 bar이므로 scale -down한 유량은 448 m³/hr가 된다. 따라서 압력강하/유량의 제곱(DP/Q^2)의 값은 $2.5 \times 10^{-5} hr^2/m^6$ 가 된다. 실험에서 이 값을 모사하여 주기 위해 butterfly 밸브의 개도를 0-100 % 사이에서 setting해 주며, 밸브가 완전히(또는 충분히) 개방되면 배관의 길이 또는 bend 등에 의한 유동저항이 더 커지므로 butterfly 밸브의 저항이 더 이상 유동 저항의 지배인자가 되지 않도록 하였다 [3].

5. 전산해석 결과 및 고찰

Fluidic Device의 유로구조에 대한 개략도가 그림 2에 제시되어 있다. 작동유체인 물이 stand-pipe위에 있으면 물은 stand-pipe와 연결된 주유입구 "나"와 제어구 "다"를 통하여 Fluidic Device의 내부로 들어와 "라" 출구로 빠져나가도록 되어있다. 이때 물은 주유입구와 제어구, 양쪽으로 들어오기 때문에 최대 유량이 배출된다. Fluidic Device에서의 압력강하는 Fluidic Device로 유입되는 접선 및 반경방향의 속도분포 즉, swirl의 크기에 의해 결정된다. 따라서, SIT 내의 수위가 stand-pipe 선단 이하로 떨어지면 제어구 "다"를 통해서만 Fluidic Device 내로 물이 유입되게 되므로 high swirl이 형성되어 출구로 배출되는 유량이 최소가 된다. Fluidic Device의 계산격자는 그림 3과 같이 주유구, 제어구 및 배출구의 위치가 원통형 구조에서 90° 회전할 때마다 반복되므로 계산격자는 전체의 1/4을 모델링하고, 대칭면에는 cyclic 경계 조건을 적용하였다.

가. Grid의 영향

Fluidic Device의 Grid에 의한 영향을 검토하기 위하여 3가지 case에 대하여 해석을 하였다. 첫 번째 case의 cell수는 91,360 cell이고 두 번째 case는 Grid 간격을 더욱 세밀하게 구분하여 209,266 cell이 되도록 하였다. 표 1의 결과를 보면 Grid를 세밀하게 할 경우 수렴 형태가 안정적이며, 수렴이 잘 되는 모습을 보여주었다. 그러나 이 모델에서는 유량이 많을 때 배출구에서 Recirculation이 발생하였으며 실험값과 차이가 나는 것으로 보인다. 이에 세 번째 case에서는 Recirculation이 존재하지 않도록 출구 쪽의 길이를 충분히 길게 하고, cell수는 165,529 개로 하였다. 난류 모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용한 결과 배출유량은 225.34 m³/hr 로 실험값 227.35 m³/hr 과 1% 미만의 오차로 잘 일치함을 보였다.

나. Turbulent Model의 영향

난류 모델에 의한 영향을 검토하기 위하여 case 3에 대하여 $k-\epsilon$ 모델과 RNG $k-\epsilon$ 모델 및 RSM을 사용하였으며 결과는 표 2와 같다. $k-\epsilon$ 모델과 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용할 경우에는 계산값이 잘 수렴하였으나, RSM을 사용할 경우 배출구 유량이 대유량과 소유량일 때 모두 수렴하지 않고 발산하는 모습을 보였다. RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용할 경우에는 $k-\epsilon$ 모델을 사용할 경우보다 대유량일 때 실험값과 매우 근사한 값을 보여주나 소유량일 때는 RNG $k-\epsilon$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델 모두 실험값과 큰 차이를 보이고 있다.

다. 실험 결과와 비교

실험값을 살펴보면 배출량은 안전주입수가 주입되기 시작하여 82초에서 100초경에 최대 유량이 배출되며 111초 이후 배출량이 급격히 감소하여 113초경부터 적은 유량이 400초가 될 때까지 지속되는 것으로 나타나고 있다.

그림 4는 안전주입수가 주입되기 시작한 후 80초, 100초, 115초, 260초에서 배출량을 계산하여 실험값과 비교한 것을 보여준다. 모델은 Case 3을 이용하였고 난류 모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 실험값과 계산값은 표 3에 제시되어있다.

안전 주입수 주입 후 80초일 때 배출구의 유량은 $225.336 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이다. 이때의 배출구 유량 실험값은 $227.345 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 오차는 0.9 %정도이다. 100초가 되었을 때의 배출구 유량은 $197.98 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이고 이때의 실험값은 $240.6955 \text{ m}^3/\text{hr}$ 으로 17.7%의 차이를 보이고 있다. 115초가 되었을 때는 안전 주입수의 수두가 stand pipe 밑으로 내려간 상태이다. 실험값에서는 주유구 유입 유량이 $-5.0985 \text{ m}^3/\text{hr}$ 으로 표시되고 있으나 실험 시 수위가 stand pipe의 높이보다 낮으므로 stand pipe로부터 물의 유입은 없으므로, 제어구의 유량만 유입되는 것으로 고려, 전산 해석 시에는 주유구의 입구조건을 wall로 처리하였다. 이때 배출구 유량의 계산값은 $133.545 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이며 실험값은 $-5.0985 \text{ m}^3/\text{hr}$ 으로 표시되어 있었으나 이때는 실험값을 가지고 보정하여 표시한 CALS 데이터를 이용하여 비교하였다. 보정된 CALS 데이터의 배출량은 $78.75 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 계산값과 71.8 %의 차이를 보이고 있다. 260초가 되었을 때 배출량 실험값은 CALS 데이터로 $64.8 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이나 계산값은 $116.08 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 81.9 %의 차이를 보여준다.

그림 5와 6은 대유량과 소유량일 때 Fluidic Device 중심평면에서 속도장을 보여준다. 벨브 개방 후 80초가 되었을 때 제어구의 유량은 $157.15 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이고 주유구의 유량은 68.13

m³/hr이다. 100초가 되었을 때는 최대 유량이 유입되는 시간이며 제어구 유량은 60.997 m³/hr이고 주유구 유량은 136.99 m³/hr이다. 115초 일때의 제어구 유량은 133.53 m³/hr이며 260초일 때 제어구 유량은 116.08 m³/hr이다. 최대유량 배출시 주유구와 제어구로 들어오는 유체가 Fluidic Device의 입구영역에서 만나서 원만하게 출구로 진행해나가지만 Fluidic Device 외측에서 여러 개의 이차유동이 발생하고 배출구 부분인 축 중심영역에서는 와류가 발생하여 유동속도가 증가하면서 출구로 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 그리고 축 중심영역을 제외한 Fluidic Device 내부는 완전한 와류 유동이기보다는 여러 개의 이차유동으로 형성된 매우 복잡한 유동을 보여주고 있다. 이에 반하여 최소유량이 배출시 Fluidic Device 내부는 최대유량 배출 시와 마찬가지로 유사한 형태의 유동 구조를 보여주고 있으나, Fluidic Device 내부의 전영역이 강한 와류 유동 구조를 나타내고 있고, 주유구에서 작은 이차유동이 발생함을 볼 수 있다 [5-11].

그림 7과 8은 Fluidic Device의 압력분포를 나타냈다. 최대유량 배출 시에는 Fluidic Device 내부의 유동이 복잡하여 압력분포도 매우 복잡하게 나타났으며, 특히 출구영역의 축중심 부분과 목부분에서는 매우 낮은 압력이 형성되고 있는데 이는 축 중심영역의 와류유동에 의하여 낮은 압력이 형성이 되고 이 부분에서 이차유동이 발생한다고 여겨진다. 최소유량배출시의 압력분포를 보면 최대유량 배출시의 압력분포보다 상대적으로 덜 복잡하지만 축 중심영역에서는 전반적으로 낮은 압력분포가 형성됨을 확인할 수가 있는데 이는 Fluidic Device 내부의 전 영역에서 형성된 와류의 영향으로 여겨진다.

라. 시간변화에 따른 유량 변화

실험에서는 Fluidic Device가 외부에 장착되어 실험을 하였으나 본 계산에서는 Fluidic Device가 실험에 사용된 SIT의 제일 밑바닥에 설치되어 있다고 가정하고 입구압력 (Inlet pressure)을 구하기 위한 계산식은 다음과 같다.

$$P_t + \rho gh = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (13)$$

여기서 P_t 는 SIT내 압력이고, ρ 는 SIT내 물의 밀도이며, h 는 SIT내 수위를 나타낸다. 또한 V 은 입구 유속이고, P 는 입구 압력이다.

전산 해석은 SIT의 수두의 변화에 따라 아래와 같이 6개 지점을 선택하여 실시하였으며 난류 모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. SIT내의 초기의 위치수두는 10.6 m이며 stand pipe의 높이는 6.8 m이다. 밸브 개방 후 경과 시간은 SIT 수두가 해석 지점을 통과할 때의 실험값 나타낸다. 전산 해석에 있어서 배출 유량이 적을 때, 즉 제어구에만 유

량이 유입될 때는 수렴이 잘 되었으나 유량이 많이 배출되는 1,2,3 지점에서는 수렴이 잘 되지 않는 문제가 있었다. 전산 해석 결과는 그림 9와 같으며, 실험값과의 비교가 그림 10에 제시되어 있다. 밸브 개방 후 초기에는 안전 유입수가 많이 배출되다가 안전 주입수가 stand pipe 밑으로 내려가면 유량이 최대 유량보다 27% 이하로 감소하는 것을 보여준다. 이와 같은 배출 유량 형태는 Fluidic device의 역할에 적합한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

APR-1400 원자로 안전주입탱크내 피동형 유량조절장치 (Fluidic Device)의 유동특성을 FLUENT를 사용하여 해석하고 결과를 한국원자력연구소에서 수행중인 실험값 들과 비교하였다. 본 연구에서는 주유 입구와 제어구, 배출구의 경계조건으로 Fluidic Device의 내부 유동장과 유량을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 안전주입 배출유량에 대한 계산값과 실험값과 비교한 결과, RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 적용할 경우 비교적 잘 일치하였다. 그러나 안전 주입수의 수두가 stand pipe 밑으로 내려간 상태에서는 실험값과 차이가 발생하는 데 이는 Fluidic Device 내부에서의 유동이 완전한 와류 유동이기는 여러 개의 이차유동으로 형성된 매우 복잡한 유동을 갖게되므로 이에 대한 실험 및 계산에서 추가 검토가 필요하다.
2. Fluidic Device의 압력분포는, 축 중심영역의 와류유동에 의하여 낮은 압력이 형성이 되고 이 부분에서 이차유동이 발생하여 출구영역의 축중심 부분과 목부분에서는 매우 낮은 압력이 형성되고, 최소유량배출시의 압력분포는 축 중심영역에서는 전반적으로 압력분포가 최대유량배출시보다 낮게 형성되었다.

참고문헌

- [1] 한국전력공사, "APR 1400 표준안전성분석보고서", 2000.
- [2] 한전전력연구소, "차세대원자로 기술개발 2단계 보고서, NSSS 설계기반기술개발", 1997
- [3] 한국원자력안전기술원, "차세대원전 피동안전설비의 열유동 특성평가", KINS/HR-405, 2001.
- [4] FLUENT User's Guide, Version 5, 1998
- [5] T.J. Lawley, "Vortex Fluid Amplifier-an Experimental Study of Flow Characteristics and Internal Flow Field", pp. 11-57, pp.151-155, paper of Ph.D paper, southern Methodist University, 1970.
- [6] F.W. Paul, "Survey of Steady-state Fluidic Diode Performance", ASME Winter Annual Meeting, November, Los Angeles, 1969.

- [7] Moyer, "Large single vortex valve analysis", pp. 233-250, the 1967 Fluidics Symposium, Chicago, Illinois, May, 1967.
- [8] D. N. Wormley "A Design Basis for Vortex-Type Fluid Amplifier Operating in the Incompressible Flow Regime", *Trans. ASME, J. Basic Engineering*, June, pp. 369-376, 1970
- [9] D. N. Wormley "An Analytical Model for the Incompressible Flow in Short Vortex Chamber," *Trans. ASME, J. Basic Engineering*, Vol. 91, pp. 264~276, 1969.
- [10] A. Ogawa, "Vortex Flow", pp. 129~152, CRC Press, 1993.
- [11] C. W. Forsberg, "A Process Inherent Ultimate Safety Boiling Water Reactor", *Nuclear Technology*. Vol.72, pp. 121-134, 1986.

표 1 모델 및 격자조건별 민감도분석결과

Case	Grid number	Discharge flowrate (m ³ /hr)	continuity	X-vel	Y-vel	Z-vel	k	ε
case 1	91,360	188.26	3.76e-3	3.81e-5	4.26e-5	4.86e-5	2.42e-5	4.9e-5
case 2	209,266	170.69	8.15e-4	4.19e-6	2.51e-6	1.23e-5	1.01e-5	1.63e-5
case 3	165,529	225.34	8.76e-3	1.67e-4	2.02e-4	1.52e-4	2.57e-4	5.1e-4

표 2 계산 조건별 실험결과와의 비교

Turbulent model	Discharge port flowrate (maximum flowrate)			Discharge port flowrate (minimum flowrate)		
	Experiment (m ³ /hr)	Computation (m ³ /hr)	error (%)	Experiment (m ³ /hr)	Computation (m ³ /hr)	error (%)
$k-\epsilon$	227.35	274.26	20.64	77.74	155.13	99.54
RNG $k-\epsilon$		225.34	0.89		133.54	71.78
RSM		Diverse	-		Diverse	-

표 3 배출량에 대한 계산값과 실험값의 비교표

		Time			
		80 sec	100 sec	115 sec	260 sec
Experimental data	Supply port flowrate(m ³ /hr)	130.74	132.15	-3.0	-3.84
	Control port flowrate(m ³ /hr)	132.22	129.41	80.77	67.64
	Discharge port flowrate(m ³ /hr)	227.35 (254.8)	240.70 (263.5)	-5.08 (78.78)	-6.78 (64.81)
Computational data	Supply port flowrate(m ³ /hr)	68.13	136.99	0	0
	Control port flowrate(m ³ /hr)	151.15	60.99	133.53	116.08
	Discharge port flowrate(m ³ /hr)	225.34	197.98	133.54	116.09

※ 실험값의 ()의 숫자는 실험값을 가지고 보정한 CALS Data 임.

표 4 부위별 압력, 방출유량의 비교

	1	2	3	4	5	6
Head (m)	9.5	8.5	7.5	6.7	4.5	2.5
Time (sec)	76	94	108	136	225	375
Discharge port flowrate (m ³ /hr)	246.89	491.91	478.37	131.80	117.68	106.16

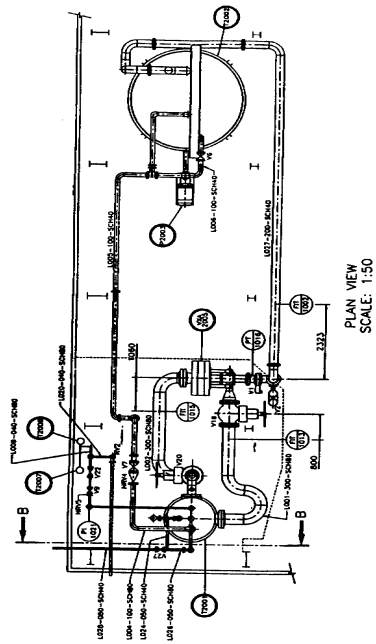


그림 1 SIT Valve Test Rig Layout

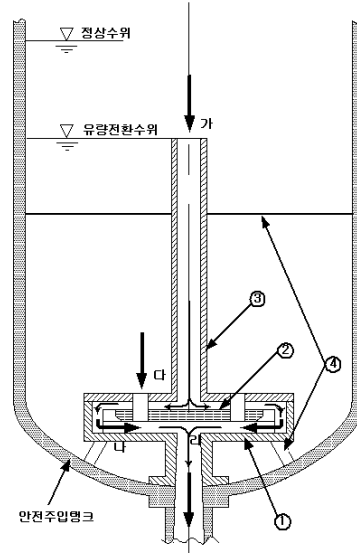
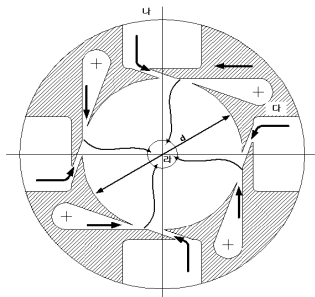
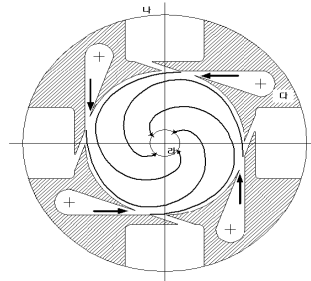


그림 2 유로구조에 대한 개략도



(a) 최대유량



(b) 최소유량

그림 3 Fluidic Device내에서 유동의 개략도

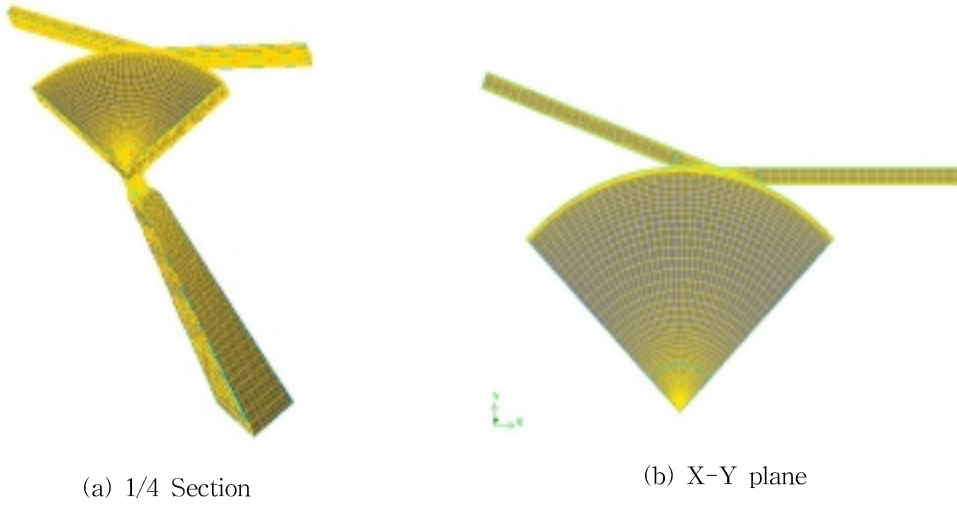


그림 4 Fluidic Device 계산격자

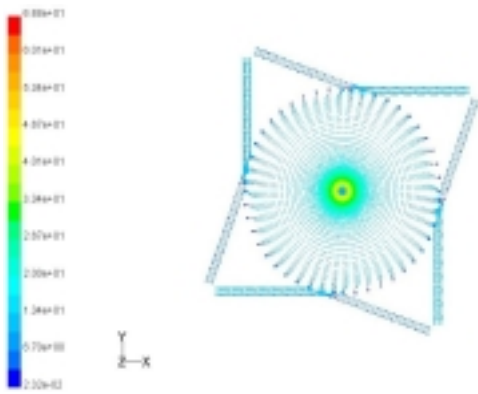


그림 5 Fluidic Device에서의 속도분포 (80초)

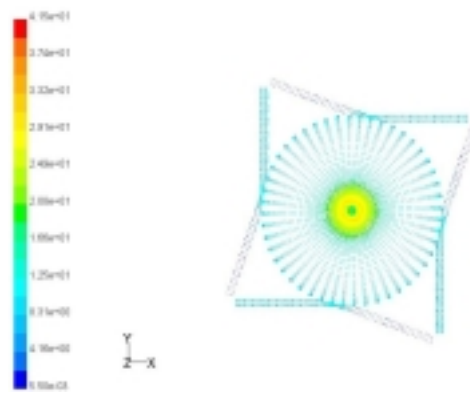


그림 6 Fluidic Device에서의 속도분포 (115초)

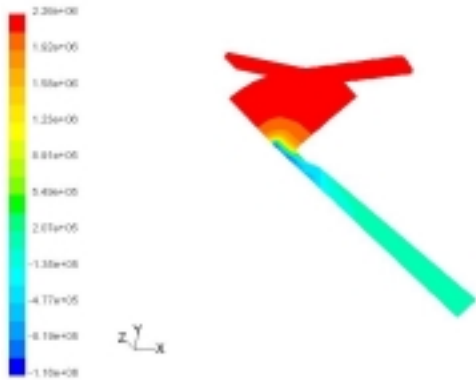


그림 7 Fluidic Device에서의 압력분포 (80초)

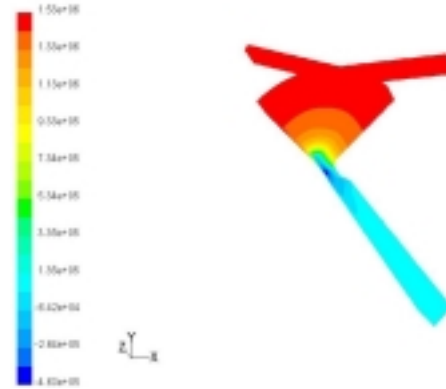


그림 8 Fluidic Device에서의 압력분포 (115초)

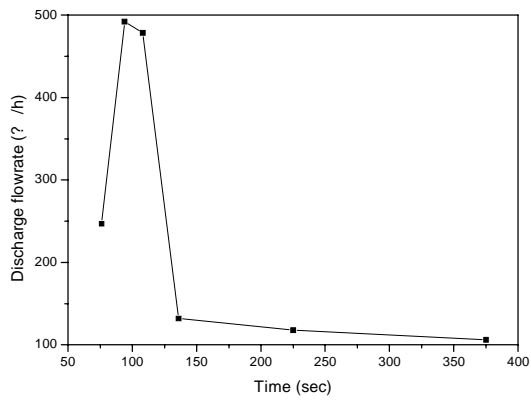


그림 9 Fluidic Device에서의 배출량 변화

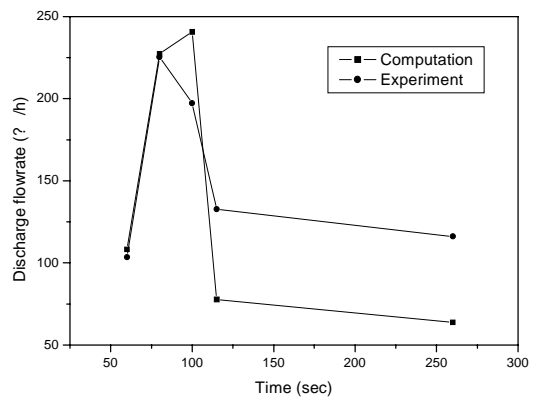


그림 10 배출량에 대한 계산값과 실험값의 비교