

## Fluidic Valve의 유동 특성에 관한 연구

유성연\* · 지명석\*\* · 김기형\*\*\* · 김만웅\*\*\*\*

### A Study on the Flow Characteristics of Fluidic Valve

Seong-Yeon Yoo\*, Myoung-Seok Jie\*\*, Ki-Hyung Kim\*\*\*, Man-Woong Kim\*\*\*\*

Key Words: Fluidic Valve(유동밸브), Safety injection tank(안전주입탱크), Flow Characteristics(유동특성)

#### ABSTRACT

Fluidic valve is adopted in APR1400 to control passively the flow rate of cooling water from the safety injection tank. It is necessary to establish independent evaluation guideline for the flow characteristics of fluidic valve in order to secure safety. Three dimensional numerical model for fluidic valve is developed and numerical results are compared with experimental data obtained at KAERI in order to verify numerical simulation. Also influence of the grid number and the turbulence model were investigated. In addition, variation of flow rate is investigated at various elapsed times after valve operating, and flow characteristics are analyzed at low and high flow rate conditions, respectively.

#### 1. 서 론

냉각재 상실사고 (LOCA : Loss-Of-Coolant Accident)의 발생 시 원자로 노심(reactor core)을 냉각시키기 위한 안전장치에 관한 연구가 오랫동안 계속되어 왔다.<sup>[1,2]</sup> 최근에 기존의 원자로보다 안전성이 강화된 설계 개념을 채택하는 차세대 원자로 (APR1400: Advanced PWR)의 개발이 착수되었다.<sup>[3]</sup> 차세대 원자로가 채택하고 있는 고도화된 피동 안전개념 중의 하나는 냉각재 상실사고 발생 시 초기에는 파단부를 통해 방출된 냉각재를 보충하기 위해 대 유량의 냉각재를 공급하고, 일정 기간 이후에는 비교적 소유량(대유량의 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 가압 되어 있는 탱크 내의 압력을 이용하여

안전 주입수를 노심에 주입하는 것이다.<sup>[4]</sup> 기존의 안전 주입탱크는 대용량의 냉각수 공급을 필요로 하는 사고 발생 초기에는 소요 유량보다 더 많은 냉각수를 공급하게 되고, 이에 따라 일정 기간 이후에는 안전주입탱크 내의 냉각수가 고갈되어 원자로 계통의 냉각에 전혀 기여하지 못하게 된다.<sup>[5]</sup> 기존의 안전 주입장치인 축압기(accumulator) 또는 안전주입탱크 등의 내부에 Fluidic Valve와 같은 유체기구 등을 설치함으로써 운전원의 추가적인 조치 없이 피동적으로 요구 상황에 따라 필요로 하는 만큼 유량공급을 조절하는 개념을 적용할 수 있다.<sup>[6]</sup> 본 연구에서는 Fluidic Valve 내부의 유동특성을 분석하여 Fluidic Valve 설계에 대한 독자적인 평가능력을 확보하고자 수치해석을 통하여 Grid에 의한 영향, 난류 모델에 의한 영향 등을 파악하였고 그 결과를 실험치와 비교하여 Fluidic Valve의 유동특성을 분석하였다.

#### 2. 지배방정식

Fluidic Valve의 유동을 해석하기 위한 연속방정식, 운동량방정식과 난류 운동에너지  $k$ 와 난류 운동에

\*, \*\*\* 충남대학교 기계설계공학과

\*\* 대전대학 자동차기계학부

\*\*\*\* 한국 원자력 안전 기술원

너지 소멸을  $\epsilon$ 에 대한 방정식을 일반형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k}) + S_\phi \quad (1)$$

여기서 좌변 항은 대류항이고, 우변의 첫 번째 항은 확산항이며,  $S_\phi$ 는 생성항이다.  $\phi=1$ 인 경우는 연속 방정식을 나타내고,  $\phi=U_i$ 인 경우는 운동량 방정식,  $\phi=T$ 인 경우는 에너지 방정식을 나타내며,  $\phi=k$ 와  $\epsilon$ 인 경우는 난류방정식을 나타낸다. 생성항  $S_\phi$ 는 각각의 지배방정식에 대해서 다른 형태로 표시된다. 유한 체적법(FVM : Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (1)에 대한 차분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p \sum_f (A_f - S_p) = \sum_f (A_f \phi_f) + S_c \quad (2)$$

### 3. 전산해석기법

범용 열,유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분 방정식 (2)의 해를 구하였다. 본 연구에서는 SIT 내의 수위의 변화에 따라 토출유량을 계산하고 그 결과를 비교하여 보았다. Fluidic Valve는 형상에 따라 유동특성이 다르지만 일반적인 유동특성을 보면 크게 2가지의 경우로 구분할 수 있는데 주유 입구 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 Valve의 내부 유동장과 유량을 해석하였다. 최대 유량 배출시 Fluidic Valve 내부에는 복잡한 유동장이 형성되고 중심부에서는 강한 와류가 형성되므로

RNG(Renormalization group)  $k-\epsilon$  모델을 적용하여 Fluidic Valve 내부의 유동장과 속도 분포, 압력분포를 비교하였으며, 1차 풍상 차분법(First order upwind scheme), 그리고 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 수치 해석을 수행하였다. 수렴판정은 다음의 전영역 잔류항의 총합이  $10^{-6}$ 이하가 되는 시점으로 하였다.

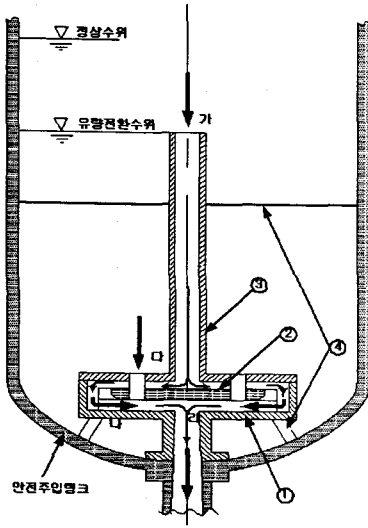
### 4. 전산해석 결과 및 고찰

Fig. 1은 Fluidic Valve의 구조 및 유로에 대한 개념을 보여준다. 작동유체인 물이 stand-pipe위에 있으면 물은 stand-pipe와 연결된 주유입구 "나"와 제어구 "다"를 통하여 Fluidic Valve의 내부로 들어와 "라"출구로 빠져나간다. 이때 물은 주유입구와 제어구, 양쪽으로 들어오기 때문에 최대 유량이 배출된다. Fluidic Valve에서의 압력강하는 Fluidic Valve로 유입되는 접선 및 반경방향의 속도분포 즉, swirl의 크기에 의해 결정된다. 따라서, SIT 내의 수위가 stand-pipe 선단 이하로 떨어지면 제어구 "다"를 통해서만 Fluidic Valve 내로 물이 유입되게 되므로 high swirl이 형성되어 출구로 배출되는 유량이 최소가 된다.

Fig. 2는 Fluidic Valve의 계산격자를 나타낸 것으로 Fluidic Valve는 원통형 구조이고 주유구, 제어구 및 배출구의 위치가 90° 회전할 때마다 반복된다. 따라서 계산격자는 전체의 1/4을 모델링하고, 대칭면에는 cyclic 경계 조건을 적용하였다.

#### 가. Grid의 영향

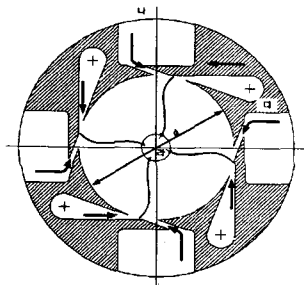
Fluidic Valve의 Grid에 의한 영향을 검토하기 위하여 3가지 case에 대하여 해석을 하였다. Table 1의 결과를 보면 Grid를 세밀하게 할 경우 수렴 형태가 안정되었으며 더욱 수렴이 잘 되는 모습을 보여주었다. 그러나 이 모델에서는 유량이 많을 때 배출구에서 Recirculation이 발생하였으며 배출구 유량이 실험값



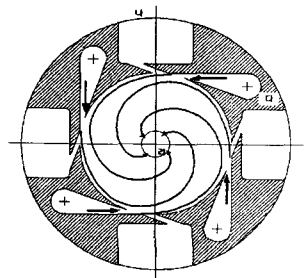
과 차이가 나는 것으로 보인다. 따라서 출구 쪽의 길이를 Recirculation이 존재하지 않도록 충분히 길게 한 것이 case 3이다. 난류 모델은 모두 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 이때 비교되는 배출구 유량의 실험값은  $227.35 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이다.

나. Turbulent Model의 영향

난류 모델에 의한 영향을 검토하기 위하여 case 3

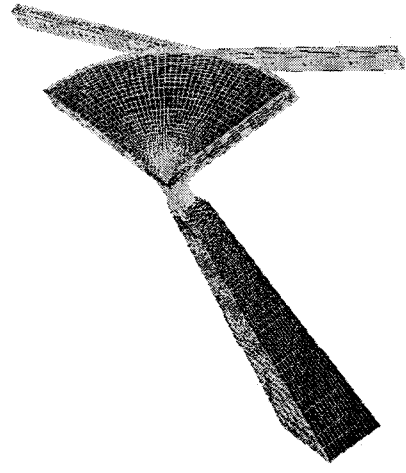


(a) maximum flowrate

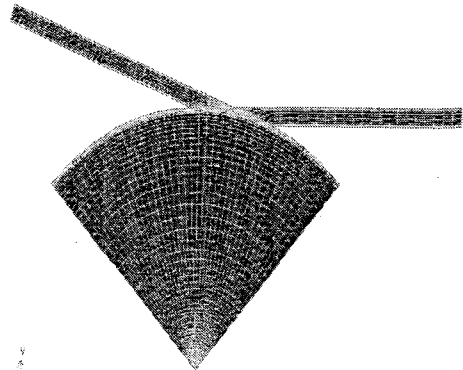


(b) minimum flowrate

Fig. 1 Schematic of flow pattern in fluidic Valve



(a) 1/4Section



(b) X-Y plane

Fig. 2 Schematic of grid for fluidic

에 대하여  $k-\epsilon$  모델과 RNG  $k-\epsilon$  모델 및 RSM(Reynolds Stress Model)을 사용하였으며 결과는 Table 2와 같다.  $k-\epsilon$  모델과 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용할 경우에는 계산값이 수렴하였으나 RSM을 사용할 경우 배출구 유량이 대유량과 소유량일때 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 80초에서 100초경에 최대유량이 배출되며 나타나고 있다. Fig. 3은 안전주입수가 주입되기 시작 후 적은 유량이 400초가 될 때까지 지속되는 것으로

111초 이후 배출량이 급격히 감소하여 113초경부터 후 60초, 80초, 100초, 115초, 260초에서 배출량을 계산하여 실험값과 비교한 것을 보여준다. 모델은 Case 3을 이용하였고 난류 모델은 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 실험값과 계산값은 Table 3에 정리하였다. 안전 주입수 주입 후 80초일 때 배출구의 유량은 225.336  $m^3/hr$ 이다. 이때의 배출구 유량 실험값은 227.345  $m^3/hr$ 로 오차는 0.9 %정도이다. 100초가 되었을 때의 배출구 유량은 197.98  $m^3/hr$ 이고 이때의 실험값은 240.6955  $m^3/hr$ 으로 17.7%의 차이를 보이고 있다. 115초가 되었을 때는 안전 주입수의 수두가 stand pipe 밑으로 내려간 상태이다. 실험 값에서는 주유구 유입 유량이 -5.0985  $m^3/hr$ 으로 표시되고 있으나 실험 시 주유구로 유입되는 stand pipe의 높이가 올라가지

Table 1 Comparison of computational stability for each grid number

Case	Grid number	Discharge flowrate ( $m^3/hr$ )	continuity	X-vel	Y-vel	Z-vel	k	$\epsilon$
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

Table 2 Comparison of discharge port flowrate for each turbulent model and experimental data

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	-

않았다고 하므로 제어구의 유량만 유입되는 것으로 판단된다. 따라서 전산 해석 시에는 주유구의 입구조건8을 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 CALS데이터로  $64.8 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이나 계산값은  $116.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 81.9 %의 차이를 보여준다.

Fig. 4와 Fig5는 대유량과 소유량일 때 Fluidic Valve 중심평면에서 속도장을 보여준다. 밸브 개방 후 80초가 되었을 때 제어구의 유량은  $157.15 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이고 주유구의 유량은  $68.13 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이다. 115초 일 때의 제어구 유량은  $133.53 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이며 260초일 때 제어구 유량은  $116.08 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이다. 최대유량 배출시 주유구와 제어구로 들어오는 유체가 Fluidic Valve의 입구영역에서 만나서 원만하게 출구로 진행해나지만 Fluidic Valve 외측에서 여러 개의 이차유동이 발생하고 배출구 부분인 축 중심영역에서는 와류가 발생하여 유동속도가 증가하면서 출구로 빠져나가는 것을 볼 수 있다.

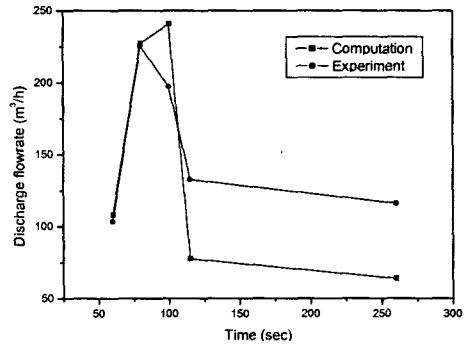


Fig. 3 Comparison of discharge flowrate for computational data and experimental data

그리고 축 중심영역을 제외한 Fluidic Valve내부는 완전한 와류 유동이기는보다는 여러 개의 이차유동으로 형성된 매우 복잡한 유동을 보여주고 있다. 이에 반하여 최소유량이 배출시 Fluidic Valve 내부는 최대 유량 배출 시와 마찬가지로 유사한 형태의 유동 구조를 보여주고 있으나, Fluidic Valve 내부의 전영역이 강한 와류유동 구조를 나타내고 있고, 주유구에서 작은 이차유동이 발생함을 볼 수 있다.

Table 3 Comparison of each port flowrate for experimental and computational data

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

\* 실험값의 ( )의 숫자는 실험값을 가지고 보정한 CALS Data 임

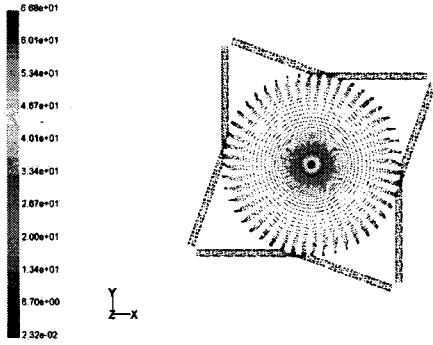


Fig. 4 Velocity vector in fluidic Valve at 80 sec

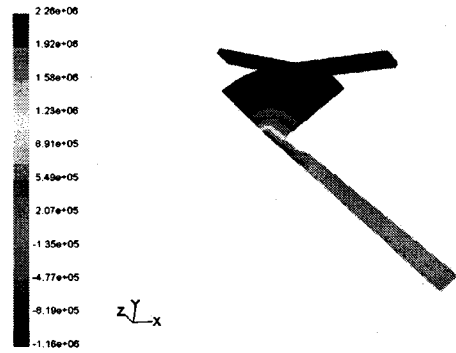


Fig. 6 Pressure contour in fluidic Valve at 80 sec

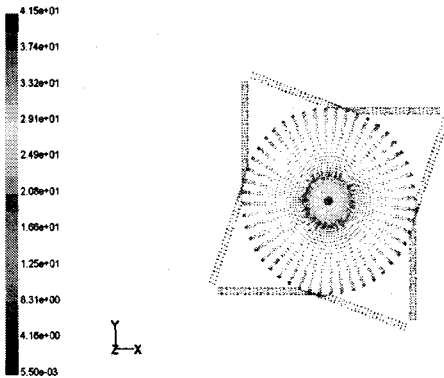


Fig. 5 Velocity vector in fluidic Valve at 115 sec

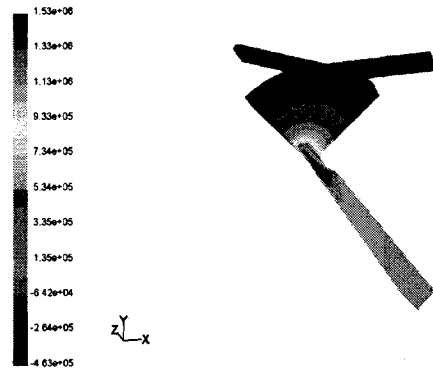


Fig. 7 Pressure contour in fluidic Valve at 115 sec

Fig. 6과 Fig. 7은 Fluidic Valve의 압력분포를 나타냈다. 최대유량 배출 시에는 Fluidic Valve 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.

최소 유량 배출시의 압력분포를 보면 최대유량 배출시의 압력분포보다 상대적으로 덜 복잡하지만 축 중심영역에서는 전반적으로 낮은 압력분포가 형성됨을 확인할 수가 있는데 이는 Fluidic Valve 내부의 전 영역에서 형성된 와류의 영향으로 여겨진다.

라. 시간변화에 따른 유량 변화

실험에서는 Fluidic Valve가 외부에 장착되어 실험을 하였으나 본 계산에서는 Fluidic Valve가 실험에 사용된 SIT의 제일 밑바닥에 설치되어 있다고 가정하여 Fluidic Valve Inlet pressure를 실험값이 아닌 계산값을 사용하였다. Inlet pressure를 구하기 위한 계산식은 다음과 같다.

$$P_t + \rho gh = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3)$$

$P_t$ 는 안전 주입탱크(SIT)내의 압력이며  $\rho$ 는 안전 주입수의 밀도이다.  $h$ 는 안전 주입수의 수두를 의미하며  $V$ 는 Fluidic Valve 입구의 속도이고  $P$ 는 입구의 압력이다. 전산 해석은 SIT의 수두의 변화에 따라

아래와 같이 6개 지점을 선택하여 실시하였으며 난류 모델은 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. SIT내의 초기의 수두는 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 유량이 유입될 때는 수렴이 잘 되었으나 유량이 많이 배출 되는 1,2,3 지점에서는 수렴이 잘 되지 않는 문제가 있었다. 전산 해석 결과는 Fig. 8과 같다. 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 Valve의 역할에 적합한 것으로 판단된다

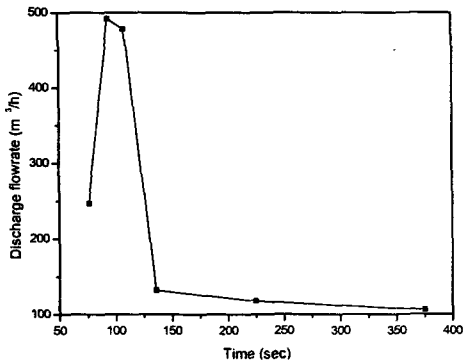


Fig. 8 Variation of discharge flowrate

## 5. 결론

Fluidic valve의 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fluidic valve에 주유구와 제어구의 유량이 동시에 유입되는 최대 유량시에는 유량의 복잡성으로 인해 수렴에 어려움이 있다.

2. 주유구 유량과 제어구 유량이 실험값과 계산값이 차이를 보이지만 안전주입수가 유입되는 초기의 배출량은 실험값과 계산값이 잘 일치하고 있다. 주유구 유량이 더 이상 유입되지 않을 때 제어구 유량의 실험값과 계산값은 차이가 많음을 보여준다.

3. Fluidic valve가 SIT 밑면에 있다고 가정하고 수두의 높이 변화에 따라 계산된 압력을 입력조건으로 Fluidic valve를 평가한 결과 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 valve의 역할에 적합한 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison of head, time, discharge port flowrate at each point

	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 (m³/hr)	246.89	491.91	478.37	131.80	117.68	106.16

## 참고문헌

- [1] C. W. Forsberg, "A Process Inherent Ultimate Safety Boiling Water Reactor", *Nuclear Technology*. Vol.72, pp. 121-134, 1986.
- [2] T. Shiraishi, H. Watakabe, N. Nakamori, Y. Tabuchi, Y. Takayama, T. Sugizaki, "Development of the Flow Controlled Accumulator", Mitsubishi Heavy Industry & Mitsubishi Atomic Power Industries, 1993.
- [3] 김영인 외 4인, "축압기 유량조절용 Vortex 밸브의 유동특성", 한국 원자력학회 96년도 춘계 학술 발표회 논문집, pp. 17~22, 1996.
- [4] C. W. Forsberg, "Passive Emergency Cooling System for Boiling Water Reactors (PECOS-BWR)", *Nuclear Technology*, Vol.76, Jan. 1987.
- [5] T. Shiraishi. et al., "Development of the Flow Controlled Accumulator", *Proceedings of ANP92*, 1992.
- [6] 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.