

2단 유량제어 Fluidic Device의 특성에 관한 연구

조보현* · 배윤영* · 박종균* · 유성연**

A Study on the Characteristics of Two-Step-Flow-Control Fluidic Device

Bong-Hyun Cho*, Yoon-Yeong Bae*, Jong-Kyun Park*, Seong-Yeon Yoo**

Key Words: Fluidic Device(FD), Flow Turn-down(유량전환), Vortex Chamber(와류실), Euler Number(오일러 수), Safety Injection Tank(안전주입탱크)

ABSTRACT

Vortex type Fluidic Device(FD) which is installed at the bottom of Safety Injection Tank(SIT) controls the discharge flow rate from the tank. In case of loss of coolant accident the injection water flows into primary system in two steps; initial high flow rate for certain period of time and subsequent low flow rate. By two-step control of the discharge flow rate, FD can ensure the effective use of water in the tank. A small-scale FD has been tested to obtain a required flow characteristics maintaining full pressure and height of prototype, which are the major contributing parameters. Through the testing of many different arrangements of internal geometry of FD, most appropriate one was selected and its performance data was obtained. As characteristics of FD, time dependent Euler number, flow rate and pressure are presented and discussed. Also a method to predict the full size FD is presented.

1. 서 론

한국형 차세대원자로인 APRI400에서는 Fig. 1과 같이 와류(vortex)를 형성시켜 배출유량을 피동적으로 조절하는 특성을 갖는 Fluidic Device(FD)를 안전주입 탱크(SIT) 내부 공간의 하단 방출부에 설치한다.^{(1),(2)} 이 기기의 설치 목적은 Fig. 2와 같이 원자로 배관 파단에 의한 대형냉각재상실사고 발생 시 안전주입 탱크로부터 원자로 내부로 주입되는 안전주입수의 유량을 2단으로 제어하여 탱크 내 제한된 봉산수를 효과적으로

이용하고자 하는 것이다.

FD에는 Fig. 3와 같이 원통형 와류실(vortex chamber)에 축 방향으로 한 개의 배출구(exit port)가 있고, 원통 면에 등 간격으로 배치된 각 4개의 반경방향 공급구(supply port) 및 접선방향의 제어구(control port)가 있다. SIT 내 수위가 일정한 위치로 떨어지면 유량이 자동으로 전환되도록(피동작동) 공급구의 전단에는 수관(stand-pipe)이 연결되어 있다. 와류실에서의 압력강하는 와류실로 유입되는 접선 및 반경방향의 속도분포 즉, 와류강도에 의해 결정된다. SIT 내의 수위가 수관의 선단인 수위 B로 떨어지면 FD를 통해 유량전환이 이루어지는데 이 때부터는 공급구로의 유입은 중단되고 와류실로 공급되는 물은 제어구를 통해서만 접선방향으로 유입되게 되므로 와류실 내에서는 큰 와류가

* 한국원자력연구소

** 충남대학교, 기계설계공학과

E-mail : syoooh@hanbat.chungnam.ac.kr

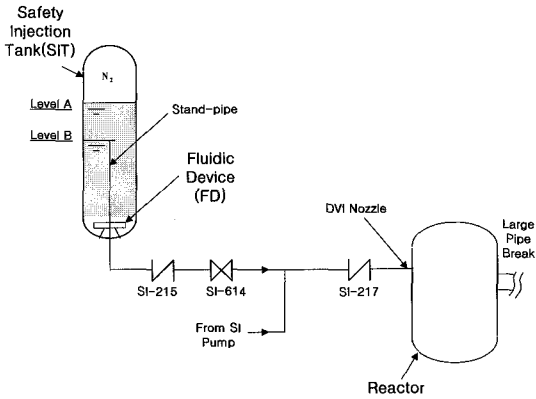


Fig. 1 APR1400 safety injection system

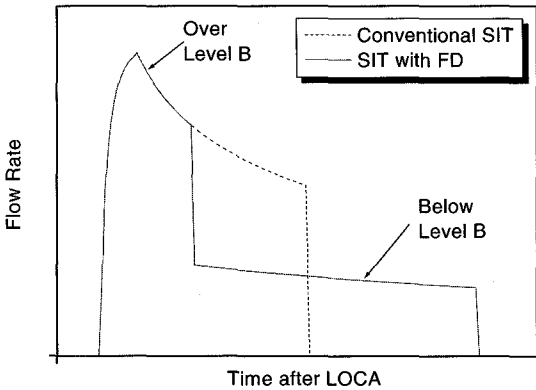


Fig. 2 Injection flow rate at large LOCA⁽³⁾

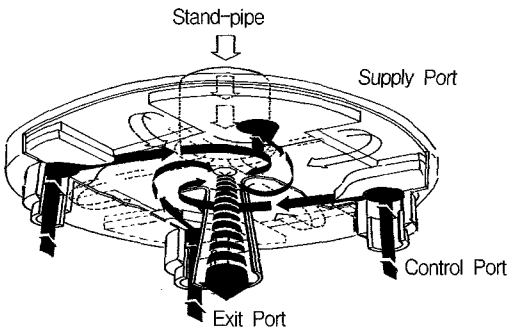


Fig. 3 Flow patterns in FD vortex chamber

형성되어 압력강하가 일어나게 되며 출구로 배출되는 전 유량은 감소하게 된다.

Wormley⁽⁴⁾는 두 개의 주입구와 한 개의 배출구를 가진 전형적인 와류형 트라이오드(vortex triode)의 여러 가지 기하학적 조건의 변화에 대한 특성변화를 실험을 통해 확인하여 와류형 트라이오드의 설계방안을

제시하였으며, Lawley⁽⁵⁾는 와류실의 내부 유동을 관찰하여 Wormley의 설계조건의 범위를 확장시켰다. 그러나, 이들의 실험은 제어구의 압력조건에 제한이 없는 고전적인 FD에 대한 것이었다고 할 수 있다. 본 실험과 같이 공급구와 제어구가 거의 동일한 압력조건으로 작용되는 경우에 대한 실험은 Brombach⁽⁶⁾에 의해 수행되었는데 그는 입구조건이 자유 수면인 수력 댐의 수위조절용 FD에 대한 검증실험을 하였다. 공급구와 제어구의 압력이 동일한 조건에서의 또 다른 실험은 Shiraishi⁽⁷⁾와 조석⁽⁸⁾ 등에 의해 수행되었는데 Shiraishi는 원자로 안전주입탱크에 수관을 이용한 피동 유량전환 기기에 대한 실험을 1/5 및 1/3 축소모델로 수행하였고, 조석 등은 소규모의 유동가시화 실험을 하였다. 이들의 실험은 한 쌍의 비대칭형 입구를 갖는 FD 형상에 대한 것이었다.

본 연구에서는 공급구와 제어구의 압력이 거의 동일한 조건에서 작용하는 4쌍의 대칭형 입구를 갖는 FD의 유량제어 특성을 얻고자 유량 기준 1/4.8의 축소율을 가진 실규모 높이, 실규모 압력의 모델 실험을 하였다. 모델실험의 목적은 APR1400의 예비 안전해석 결과로 요구하는 약 3 : 1의 유량전환 성능을 갖는 FD를 개발하는 것이다.⁽³⁾ 모델실험을 통해 얻은 FD의 성능특성 변수와 실험 결과를 토대로 동역학적 상사법칙과 기하학적 상사법칙을 이용하여 실규모의 성능과 치수를 예측하였다. 본 논문에서는 이 모델 실험의 주요 내용을 기술하고 실험결과로부터 실규모 FD 성능을 예측하는 방법에 대해 논의한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 제원 및 구성

FD를 통한 유량전환 성능에 가장 큰 영향을 주는 것은 FD 전, 후단에 걸리는 압력이므로 모델 실험장치는 압력 조건이 실제환경의 값과 서로 같게 되도록 탱크 내압과 수위를 실규모로 설계하였다. 모델실험 장치의 축소율은 유량 또는 탱크의 횡 단면적을 기준으로 정하였다. 실험장치의 실제 치수는 표준품의 사용과 제작성 등이 고려되어 실험용 탱크의 높이는 실규모의 SIT보다 좀 더 키웠으며, 모델/실규모의 압력탱크(SIT)의 직경비가 1.25/2.74이므로, 실험장치는 유량 기준으로 1/4.8의 축소비를 갖는다. 실험장치의 주요 제원은 Table 1과 같다.

모델실험 장치(test loop)는 Fig. 4와 같은데 실험에

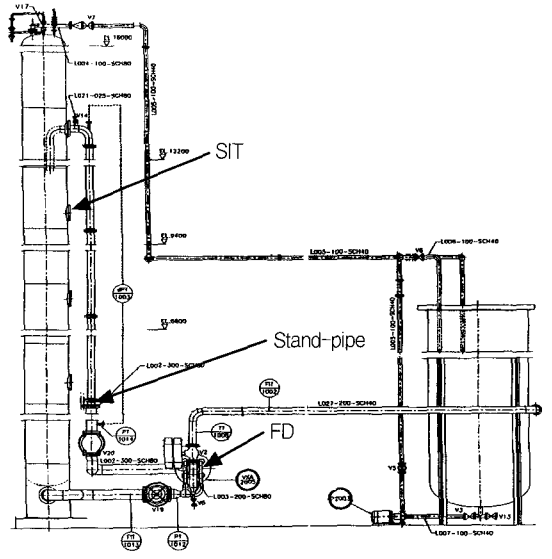
Table 1 Major design parameters of model test facilities

Description	Model	Ref. Full Scale
SIT Internal Diameter, m	1.25	2.74
SIT Internal Height, m	14.63	11.84
Initial Pressure, bar g	38-43	39.3
Water Volume in Tank, m ³	13.9	45.31
Peak Flow from Tank, m ³ /hr	448	2150
Nominal Flow Turn-down Ratio	2.9-5	5
Standpipe Height, m	Variable	14.267
Downstream Loss Factor	207 @0.0634 m ² duct	9 @0.0634 m ² duct
Nominal Scale of Model	1/4.8	-

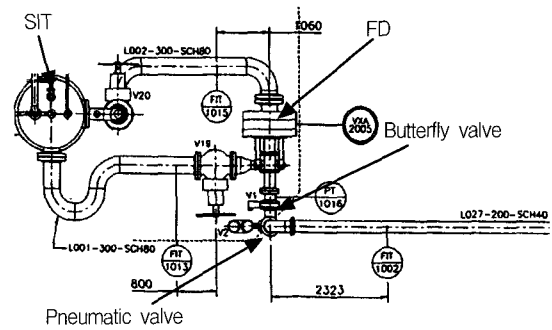
사용할 FD는 교체의 용이성과 설치장소의 제약 등을 고려하여 SIT의 외측에 수평으로 설치하였으며, 공급구로 연결되는 수관은 높이 및 구경을 조정할 수 있도록 하였다. FD의 전, 후단의 관로에 각각 유량계(FIT) 및 압력계(PT)를 설치하였고, 탱크 및 수관 내의 수위를 측정하기 위한 차압수위계(DPT)를 설치하였다. FD 후단에는 배관 손실계수를 모의하도록 집형 제어밸브(butterfly valve)를 설치하고 최 후단에는 실험에서 배출 통로의 신속한 개방을 위해 공압밸브를 설치하였다.

2.2 실험용 FD

FD의 유량전환 특성은 와류실 내로 유입되는 유입구의 크기와 형상 및 배출구 노즐의 크기에 따라 주로 결정되므로 실험에 사용된 FD는 Fig. 5와 같이 교체

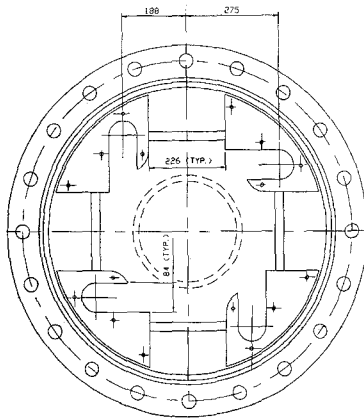


(a) Elevation view

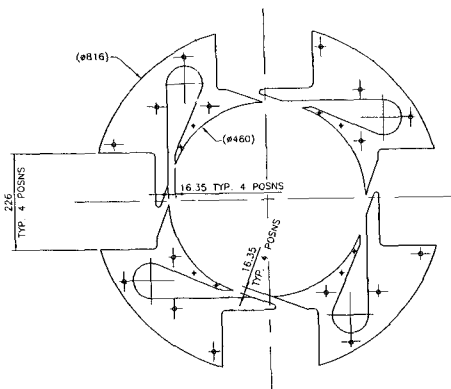


(b) Plan view

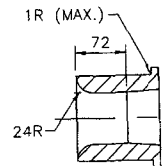
Fig. 4 FD model test loop



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 FD insert plate geometries: (a) insert I, (b) insert II, (c) exit nozzle insert

Table 2 Major dimensions of tested FD

FD Type	D (mm)	d_e (mm)	h (mm)	W_c (mm)	W_s (mm)	A'	Test run #	Remarks
1	460	75	45	84	226	0.29	1-20	Insert I
2	460	50	45	16.4	16.4	0.67	21-32	Insert II
3	460	50	60	16.4	16.4	0.50	33-36	"
4	460	75	60	16.4	16.4	1.12	37-41	"
5	460	58	60	16.4	16.4	0.67	42-45	"

Note :

D : Vortex chamber diameter d_e : Exit nozzle diameter,
 h : Vortex chamber height, W_c : Control port slot width
 W_s : Supply port slot width,
 A' : Area ratio of exit to control port

및 취급이 용이한 4쌍의 삽입판(insert plate)과 출구 삽입노즐(exit nozzle insert) 형태로 설계하였다. 실험에서는 2가지의 삽입판이 사용되었는데 삽입판 I(Insert I)은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 공급구와 제어구로 유입되는 유체의 흐름 방향이 서로 직각을 이루는 것이고, 삽입판 II(Insert II)는 이 두 가지의 유입 유체의 흐름 방향이 서로 마주보는 형태를 갖는 것이다. 초기의 실험에서 삽입판 I을 사용한 결과 수관내의 수위가 빨리 떨어지는 불리한 특성이 나타나 이후 대부분의 실험은 삽입판 II를 사용하였다. 삽입판은 두께도 조절이 가능하도록 제작되었으며, 출구 삽입노즐은 직경이 50, 58 및 75 mm의 3 종류가 사용되었다. 실험에 사용된 FD의 형상 조합은 Table 2와 같다.

2.3 실험방법 및 실험 matrix

실험은 실험용 FD를 설치한 다음 FD 배출구 후단에 설치된 공압밸브를 닫은 후 탱크 내 수위 및 질소압력을 실험 matrix의 설정 값으로 맞춘 다음 공압밸브를 다시 열어 탱크의 물이 FD를 통해 빠져 나오도록 하고 이때의 FD 입, 출구의 압력, 유량 및 탱크와 수관의 수위를 측정함으로써 수행된다. 실제 SIT의 계통 설계 가스압력은 39.3 bar g이나 실험에서는 탱크의 설정 압력을 38 bar g로부터 43 bar g 범위로 하였다. 실규모 SIT의 초기 탱크 내 가스 부피는 22.8 m³이므로 축소율을 고려하여 실험에서는 탱크 내의 초기 가스 부피를 4.78 m³이 되도록 실험에서 탱크수위를 탱크 바닥으로부터 10.6 m(단, 탱크의 차압수위계 하부 압력 트랜스듀서는 탱크 바닥으로부터 0.5 m 하부에 설치되므로 수위계의 지시 수위는 약 11.1 m)가 되도록 하였다.

실규모에서는 초기 수위에서부터 수관이 노출될 때까지 탱크를 빠져나가는 물의 부피는 22.8 m³이므로 실험에서의 물의 부피는 4.78 m³이 되고 이는 내경 1.25 m의 탱크에서 3.8 m의 수위에 해당되므로 수관 상단의 높이는 탱크의 바닥으로부터 6.8 m 위치로 하였다(단, 수위계의 지시 수위는 7.3 m). 실규모의 계통에서는 FD 하단의 배관에 의한 압력강하가 최대유량 2,150 m³/hr에서 5 bar이므로 실험에서는 유량이 448 m³/hr가 되며, 이를 실험에서 사용하기가 편한 “압력강하/유량의 제곱(DP/Q^2)”로 환산하면 $2.5 \times 10^{-5} \text{ hr}^2/\text{m}^6$ 가 된다. 이러한 압력강하 값을 얻기 위해 실험에서는 배출구 후단에 설치한 접형 제어밸브의 개도를 30~35% 범위가 되도록 조정하였다. FD의 형상 및 실험압력 등 실험조건을 조합하여 총 45회의 실험이 수행되었으며 이들에 대한 주요 실험조건은 Table 3과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

실험장치의 데이터 기록기(logger)는 각 계측기로부터 최대 4000 행의 데이터를 생산할 수 있다. 각각의 실험에서 생산된 실험 데이터는 각 10개의 데이터를 평균하여 총 400 행으로 압축시켜 유량, 수위, 압력 및 압력 손실계수(K)의 변화를 그렸다. 자료처리는 엑셀 스프레드시트를 사용하였다. Fig. 6에서 Fig. 9는 실험 35에 대한 실험결과를 대표적으로 보여주고 있다. 실험 데이터에서 시간 0은 공압밸브가 완전히 열린 시간이며, 공압밸브 작동신호로부터 밸브가 완전히 열리는 데 약 50초의 지연시간이 발생되었다.

Fig. 6은 유량 곡선으로 Q_c (제어유량), Q_s (수관 내를 흐르는 공급유량) 및 Q_c+Q_s (순 배출유량)의 변화를 보여준다. 탱크 수위가 수관의 상단에 도달하는 약 50초까지는 Q_c 와 Q_s 의 값이 서로 같았고 이 이후에는 유량전환이 이루어져 Q_s 가 0이 되는 것(측정된 데이터 값은 약 -3 m³/hr가 되었으나 이는 미소유량에서 유량계의 측정오차로 보이며, 이 때에 수관 내의 수위변화는 없는 것으로 확인되었으므로 실제로는 유량의 역류가 일어나지 않을 것임)을 볼 수 있다. Fig. 6에서 유량전환 비(flow turn-down ratio)는 약 3 : 1이 됨을 알 수 있다. 유량곡선 중 네모꼴로 표시된 데이터 점은 Fig. 7과 같은 수위 측정 데이터를 이용, 잠음 신호를 최대한으로 줄이기 위해 10초 간격으로 시간평균하여

Table 3 Test conditions and test matrix

Test Run #	Tank $P_{initial}$ (bar g)	Stand-pipe Loc.	Water Level (m)	Insert #	Valve Open (%)	d_e/h (mm)
8	42.3	3	12	I	35	75/4
9	"	"	"	"	"	"
10	"	"	12.1	"	"	"
11	"	"	"	"	50	"
12	"	"	"	"	65	"
13	"	"	"	"	35	"
14	"	"	6.1	"	"	"
15	"	"	12.1	"	5	"
16	"	"	11.2	"	"	"
17	"	"	"	"	10	"
18	40	"	"	"	"	"
19	38	"	"	"	15	"
20	40	"	"	"	20	"
21	42.3	"	"	II	10	50/45
22	"	"	"	"	15	"
23	"	"	"	"	20	"
24	"	"	"	"	25	"
25	"	"	"	"	23	"
26	"	"	"	"	27.5	"
27	40	"	"	"	25	"
28	42.3	"	"	"	30	"
29	"	"	"	"	35	"
30	38	"	"	"	30	"
31	"	"	"	"	25	"
32	"	"	"	"	"	"
33	40	"	12.1	"	35	50/60
34	"	"	11.2	"	30	"
35	"	"	"	"	35	"
36	38	"	"	"	"	"
37	40	"	12.1	"	"	75/60
38	"	"	11.2	"	30	"
39	"	"	"	"	35	"
40	38	"	"	"	"	"
41	40	"	12.1	"	"	"
42	"	"	"	"	"	58/60
43	"	"	11.2	"	40	"
44	"	"	"	"	35	"
45	38	"	"	"	"	"

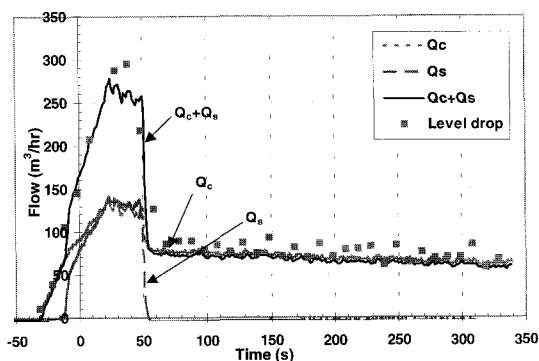


Fig. 6 Flow vs time curves

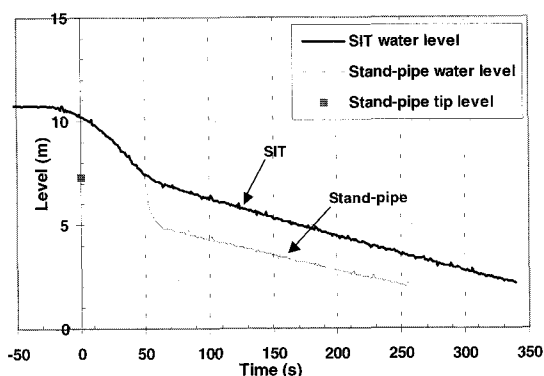


Fig. 7 Water level vs time curves

탱크의 수위 감소에 따른 유량감소율을 계산하여 그려 넣은 것으로 이것과 유량계로 측정된 유량은 10% 내, 외의 오차를 보이고 있다. 유량계는 실험전 보정을 거쳤으므로 이를 신뢰하여 분석에는 유량계로 측정된 값을 사용하였다.

Fig. 7은 수위 곡선으로 탱크 내의 수위와 수관 내의 수위변화를 보여준다. 수관 선단의 설치 위치는 y축에 사각점으로 표시되어 있으며 이 수위에 도달한 이후 즉, 유량전환이 되면 수관 내의 수위가 갑자기 탱크 내의 수위보다 약 1.9m 정도 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이때 수위의 일시적 과도현상은 관찰되지 않았으며 거의 일정한 수위 차를 보이며 배출이 진행되는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 압력 곡선으로 P_c (제어구 압력), P_s (공급구 압력), P_e (FD 배출구 후단 압력), P_{out} (제어밸브 후단 압력) 및 탱크 압력의 변화를 보여준다. 그림에서 보면 유량전환 직후에 입구와 출구의 차압이 크게 발생됨을 볼 수 있다. 다음과 같은 식으로 탱크 내 기체부피의

변화에 따른 압력변화를 예측하여 비교하였다.

$$P^i = P_o \left[\frac{V_{air,o}}{V_{air}^i} \right]^{1.16} \quad (1)$$

$$V_{air}^i = [V_{air}^{i-1} + Q_e^i] \frac{\Delta t}{3600} \quad (2)$$

여기서, P_o 는 탱크 내 압력, V_{air} 는 탱크 내 기체부피, Q_e 는 배출유량이며, i 는 i 번째 time step에서의 값을 뜻한다. 실험에서 얻은 압력변화 곡선을 가장 가깝게 재현하는 기체 팽창계수는 1.16이었다. 기체 팽창계수를 1.16로 탱크 압력을 계산하여 측정된 값과 비교해보면 초기에는 단열팽창의 특성을 보이며 유량전환 후에는 등온팽창의 특성을 갖는 것을 볼 수 있다. 유량전환 후 수관에서의 온도측정 결과 온도강하가 크지 않아 유량전환 후에는 등온팽창 특성을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 압력 손실계수(K)의 변화를 보여준다. 압력 손실계수는 다음의 식으로 정의된다.

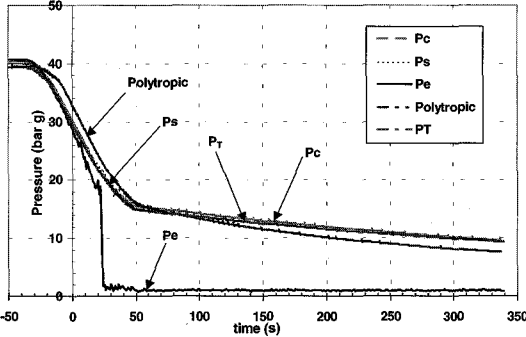


Fig. 8 Pressure vs time curves

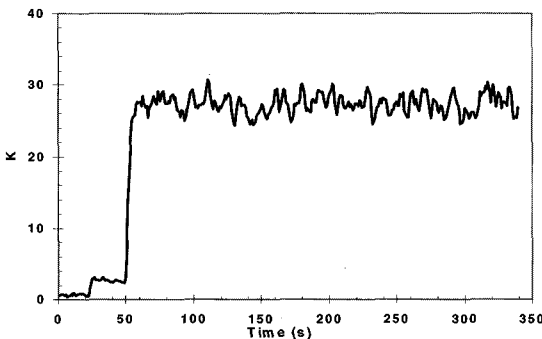


Fig. 9 K value vs time curves

$$K = \frac{P_c - P_e}{0.5\rho u^2} \quad (3)$$

3.2 FD 성능변수의 평가

측정된 실험결과를 분석하기 위해 q' , p' , ΔL , Q_{max} , Eu_L 및 Eu_H 과 같은 5가지의 FD 주요 성능변수를 정의하였다. 여기에서, q' 는 FD의 성능에 대한 가장 중요한 평가 기준이 되는 값으로 와류강도가 작은 값에서 큰 값으로 순간적으로 변할 때의 배출 유량전환비 ($q' = Q_{high}/Q_{low}$)이다. 본 실험에서 이 유량전환비의 목표 값은 대략 3이었으며, FD가 실제로 설치되는 시스템 요건을 고려하여 적합성이 평가된다.

p' 은 유량전환 압력비로서 다음과 같이 정의된다.

$$p' = \frac{\rho g \Delta L}{DP_{se}} \quad (4)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, ΔL 은 탱크와 수관의 수위차이며 DP_{se} 는 입, 출구의 압력차이다. 압력비는 본 실험과 같은 경우에는 가능한 한 작은 값이 되어야 한다. 왜냐하면, 식에서도 알 수 있듯이 ΔL 이 작아야 FD가 장시간 동안 수관을 통해 질소가스를 통과시키지 않고 안정적으로 운전될 수 있기 때문이다.

Q_{max} 은 FD의 작동 초기의 최대 배출유량이다. 이것은 FD 본체의 주요 치수를 스케일링하는 것과 밀접한 관계가 있다.

오일러 수는 관성력과 유동저항(압력손실)의 비율 의미하는 무차원 수로 압력 손실계수(K)와 같은 의미를 가진다. Eu_L 은 저(低)저항, 고유량일 때의 오일러 수를 의미하며 다음과 같이 배출 초기의 고배출유량 운전에서의 오일러 수이다.

$$Eu_L = \frac{P_c - P_e}{0.5\rho u^2} \quad (5)$$

한편, Eu_H 는 고(高)저항, 고유량일 때의 오일러 수를 뜻하며 유량전환 후의 저배출유량 운전에서의 값으로 식 (5)와 같은 방법으로 계산된다. 여기서, u 는 배출구 노즐 목에서의 정상상태의 유속이다.

Table 2의 5 가지 형태의 FD에 대한 실험결과로 얻은 각 변수들의 평균값은 Table 4와 같다. 여기서 Eu_L 과 Eu_H 는 각 FD의 출구노즐의 직경을 기준으로 한 것이다.

Table 4 Summary of FD performance parameters

FD type	q'	p'	$\Delta L(m)$	Q_{max} (m ³ /hr)	Eu_L	Eu_H
1	2.8	0.038	4.52	565	1.7	17.6
2	3.4	0.018	2.53	219	4.2	39.6
3	3.5	0.015	1.90	261	2.6	26.4
4	3.8	0.036	3.85	386	3.7	55.0
5	3.8	0.021	2.75	334	3.0	35.4

Table 4에서 FD 형태에 따른 성능특성을 비교하여 보면 다음과 같다.

- 1) 유량전환 비는 삽입판 I을 사용한 type 1 FD가 2.8 인 반면 삽입판 II를 사용한 FD에서는 이보다 더 큰 3.4 - 3.8의 값을 얻을 수 있었다.
- 2) 압력비(p') 또는 수위차(ΔL)는 type 3의 FD가 가장 작으므로 이 형태가 상대적으로 가장 안정적인 유량전환 특성을 갖는다.
- 3) FD type 2($h=45$)와 type 3($h=60$)을 비교해보면 삽입판 I의 두께가 약 33% 증가한 경우 유량은 약 20% 증가하였으나 유량전환비는 거의 차이가 나지 않음을 볼 수 있다. 따라서 유량전환비에 대한 와류실 높이(h)의 영향은 크지 않음을 알 수 있다.
- 4) 최대유량은 삽입판 I의 경우에서 가장 큰 값을 얻었는데 type I으로 실규모의 FD를 설계한다면 그 크기를 가장 작게 할 수 있다.

이상과 같이 5가지의 FD에 대해 성능변수를 평가하여 가장 효과적인 FD의 성능을 갖는 것으로 type 3의 FD를 선택하였다. Type 3 FD는 유량전환비가 목표 값에 가깝고, 특히 압력비(p')가 매우 작아 탱크 내의 가스의 유입 없이 안정적인 유량전환이 가능할 것으로 보며, 최대유량은 목표 값보다 작으나 이것은 FD의 크기를 크게 함으로써 해결이 가능할 것이다. 따라서 type 3 FD의 성능변수를 이용하여 실규모의 FD를 설계하게 되며 이 때에 사용되는 주요 무차원 성능변수는 $p'=0.015$, $Eu_L=2.6$ 및 $Eu_H=26.4$ 가 된다.

3.3 FD 성능변수에 대한 검증

Type 3 FD에 대해 동일한 모델 실험장치를 이용하여 Table 5와 같이 압력, 수위 및 후단밸브의 개도에 대해 실험범위를 넓혀서 실험을 수행하여 본 실험에서

Table 5 Validation test conditions

Test Parameter	Nominal test	Validation test
Initial tank pressure, bar g	39.3	36-44
Tank water level, m	11.2	10.7-12.6
Valve opening, %	35	35-100
Stand-pipe dia., m	0.203	0.152

Table 6 Comparison of FD performance parameters

Test type		Eu_L	Eu_H	p'
Main test(Type 3 FD)		2.6	26.0	0.015
Validation test	Test 46	2.59	26.3	0.0160
	47	2.76	26.3	0.0156
	48	2.61	24.9	0.0160
	49	2.78	25.0	0.0165
	50	2.72	26.6	0.0158
	51	2.47	29.6	0.0174
	Mean	2.66	26.5	0.0162

얻은 FD 성능변수에 대한 신뢰성을 검증하였다. 또한, 수관의 높이 및 관 직경도 변화시켜 총 6회의 추가실험이 수행되었으며 그 실험의 범위 및 결과는 Table 5 및 Table 6과 같다. Table 6에서 보는 바와 같이 세 가지 주요 특성변수는 변화된 실험조건에 큰 변화를 보이지 않았으며 이로 미루어 보아 본 실험에서 얻은 주요 무차원 수가 FD 특성을 대표할 수 있는 값임을 확인할 수 있다.

3.4 실규모 FD 유량특성 예측

유량주입 특성은 FD 전, 후단의 압력에 의해 지배되므로 FD의 성능은 오일러 수를 이용한 유동장 상사가 가능하다. 즉, 모델과 실규모의 사이에는 다음과 같은 상사관계가 성립한다고 가정한다.

$$\frac{(Eu)_p}{(Eu)_m} = \frac{(K)_p}{(K)_m} = \frac{(Q^2/d_e^4)_m}{(Q^2/d_e^4)_p} \quad (6)$$

여기서, 하첨자 p 는 prototype를, m 은 모델을 뜻한다. 따라서 모델 실험에서 구한 오일러 수를 이용하여 실규모 FD의 성능을 예측할 수 있으며 그 절차는 Fig. 10과 같다.

FD가 설치될 시스템의 조건에서 주어지는 FD 후단 배관의 압력손실 값을 이용하여 다음과 같이 최대 배

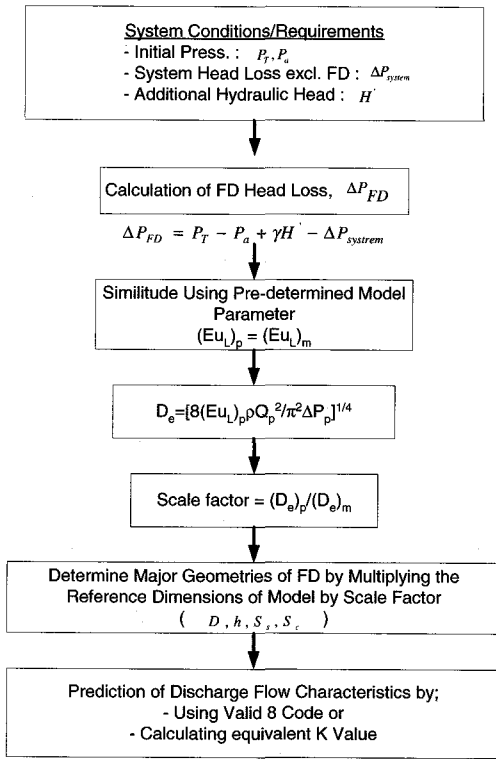


Fig. 10 Procedures of scaling-up to full scale from model test data

출유량 시의 FD에 의한 압력손실을 계산한다.

$$\Delta P_{FD} = P_T - P_a + \gamma H' - \Delta P_{system} \quad (7)$$

단, 여기서 P_T 는 탱크 압력, P_a 는 원자로 주입구의 압력이고, H' 은 원자로와 SIT의 수위차이다. 기하학적 유사법칙으로 실규모 FD의 치수를 결정하기 위한 인자인 출구직경, d_e 를 결정하기 위해서는 다음과 같은 식을 사용한다.

$$(Eu)_p = (Eu)_m, \quad Eu = \frac{\Delta P}{0.5\rho u^2} = \frac{\Delta P \pi^2 d_e^4}{8Q^2 \rho} \quad (8)$$

이 식에서 FD의 설계의 기초가 되는 배출구의 크기를 다음과 같이 계산하고 규모의 비(scale factor)를 결정한다.

$$(d_e)_p = \left[\frac{8(Eu)_p Q_p^2}{\pi^2 (\Delta P)_p} \right]^{1/4} \quad (9)$$

Table 7 Full scale pressure loss coefficient(K value at a reference low area of FD downstream piping)

FD conditions	Pressure loss coefficient		Total
	Down-stream piping	FD	
Before FD turndown (high flow)	6	8.5	14.5
After FD turndown (low flow)	6	85	91

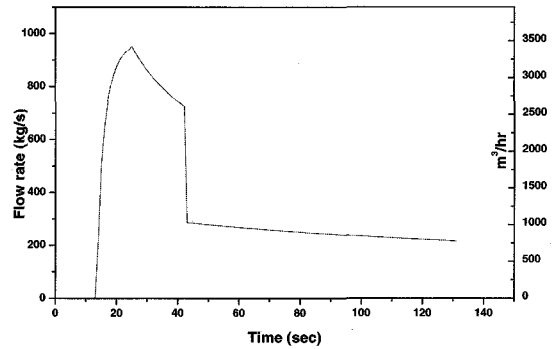


Fig. 11 Injection flow rate per SIT

단, 규모의 비가 커져서 규모에 의한 영향으로 압력손실계수의 변화가 있게되면 오일러 수만을 이용한 상사는 제한이 있을 수 있다.

실규모의 탱크 및 FD 유량성능 예측의 한 예로서 초기의 가스압력 39.3 bar g 및 정격 탱크수위 7.9 m의 조건을 가정하여 계산을 수행하면 FD 후단 배관 직경을 기준으로 한 실규모 FD의 K 값은 Table 7과 같으며 이 때의 주입유량 예측곡선은 Fig. 11과 같다. 단, 배관손실계수 $K=6$ 은 시스템에서 주어지는 값이다.

4. 결 론

원자로 안전주입탱크 내에 설치되는 4쌍의 대형형 입구를 갖는 FD의 모델실험을 수행하여 가장 안정된 상태로 유량이 효과적으로 제어되는 기기의 특성변수를 찾아내고 이를 이용하여 실규모의 FD 성능을 예측하는 방법을 개발하였다. 모델실험은 5 가지의 FD 형상에 대해 유량기준 4.8대 1의 축소실험을 수행하여 주요 성능변수를 확인, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 챔버 입구에서 공급구 중심축과 제어구 중심축이 160°를 이루며 배출노즐의 직경이 50 mm인 FD

type 3가 APR1400에서 요구하는 성능에 가장 적합한 것으로 평가되었다.

- 2) 실규모 FD의 설계에 사용될 주요 무차원 성능변수는 $p'=0.015$, $Eu_L=2.6$ 및 $Eu_H=26.4$ 이다.
- 3) Type 3 FD에 대한 추가 검증실험을 통해 주요 무차원 성능변수의 신뢰성을 확인하였다.
- 4) 모델 실험결과를 이용한 실규모 FD 성능예측 절차를 개발하고 이것을 이용하여 실규모 FD의 주입유량 성능곡선을 예측하였다. 단, 규모에 의한 오일러 수 상사의 제한성은 실 규모실험을 통해 확인되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Cho, B. H. et al., 1996, "Development of Fluidic Device in SIT for KNGR Design," The 11th KAIF/KNS Annual Conference, pp. 475~484.
- (2) Park, J. K. et al., 1999, "Development of Fluidic

Device in SIT for KNGR Design(II)," The 14th KAIF/KNS Annual Conference, pp. 159~170.

- (3) 조봉현 등, 1999, 차세대원자로 SIT 내 Fluidic Device 개발(I), 한국원자력연구소 기술보고서, KAERI/TR-1363/99.
- (4) Wormley, D. N. and Richardson H. H., 1970, "A Design Basis for Vortex-Type Fluid Amplifiers Operating in the Incompressible Flow Regime," Trans. ASME, J. Basic Engineering, Vol. 92.
- (5) Lawley, T. J. and Richardson H. H., 1972, "Design of Vortex Fluid Amplifiers with Asymmetric Flow Field," Trans. of the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 94.
- (6) Brombach, H., 1974, "Flow Control by Use of Digital and Analogue Switched Vortex Amplifier," Proc. of the 6th Cranfield Conference.
- (7) Shiraishi, T. et al., 1992, "Development of the Flow Controlled Accumulator," Int. Conf. Design and Safety of Next Generation Nuclear Power Plants, Tokyo, Japan.
- (8) 조 석 등, 1998, 피동형 안주입탱크내의 유체기구 유동특성에 관한 실험적 연구, 한국원자력연구소 기술보고서, KAERI/TR-993/98.