

## 피동형 원자로의 Hydraulic Valve에 관한 연구

김 용 석, 김 상 녕

경희대학교

### 요 약

피동형 원자로에서 냉각수 펌프의 작동불능이나 계통 내의 강제 순환이 충분치 못할 경우, 냉각수와 분리된 비상 저온 고농축의 붕산수를 노심에 피동으로 주입시키고 자연 대류에 의한 잔열 제거가 이루어져야 한다. PIUS형 원자로나 SPWR형 원자로에서는 Honeycomb구조의 Density Lock을 사용하여 Shutdown 및 잔열 제거 기능을 수행하며 정상운전시에는 Primary Coolant(고온, 저농축 붕산수)와 Pool Water(저온, 고농축 붕산수)를 분리하고 있다. Density Lock을 사용할 경우, 기동 운전이나 출력 변경과 같은 비정상 운전시 Density Lock을 통하여 노심으로 Pool Water가 유입될 수가 있다. 따라서 불필요한 Pool Water의 유입을 방지하고 피동형 원자로의 설계 개념을 만족시키며, 피동적으로 강제 순환으로부터 자연 순환으로의 경로를 열어 줄 수 있는 Hydraulic Valve에 대한 이론적 해석을 수행하여 실제 밸브를 제작하여 실험을 통해 이론과 비교하고 Valve의 특성곡선을 개발한다.

### 1. 서론

#### 1.1 연구 배경 및 목적

피동형 원자로의 본래의 목적을 달성하기 위해서는 Primary Loop와 Poison Tank 사이에 일어나는 밀도경계면을 통한 질량과 에너지 전달을 제어 하면서 안전하게 피동형 기능을 수행할 수 있는 기기의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 정상상태시 Primary Recirculation Pump에 의해 강제로 순환되는 Primary Coolant를 Poison Tank의 보른수와 분리하고 과도상태시 강제 유동에서 자연 유동으로의 경로를 안정적으로 신뢰성 있게 보장하는 피동형 밸브 즉, Hydraulic Valve를 개발하고 이들의 실제 응용 현실화 및 밸브의 특성분석기법 개발에 그 목적이 있다.

## 2. Hydraulic Valve의 설계 및 제작

### 2.1 Hydraulic Valve의 작동 원리

원자로의 1차계통에 설치되는 피동형 수력 밸브는 냉각 펌프의 유량(수두)이 일정수준 이하가 되면 1차계통과 Poison Tank와의 미세한 압력차에 의해 개방되는 성능을 가져야 한다. 이러한 성능과 기능을 수행할 수 있는 밸브를 개발하기 위해 유체역학적 지배방정식을 세워 접근한 결과 두개의 유로를 갖는 모델밸브를 구상하였다. 두 개의 유로중 상부의 유로는 정상상태시(주냉각펌프의 수두가 충분할 경우) 1차계통의 냉각수의 강제유동에 의해 밸브내 피스톤에 압력이 걸리게 되어 밸브를 잠그게 된다. 이때 1차 냉각수는 상방유동하여 밸브의 윗부분의 배관을 통하여 빠져나가게 된다. 상부유로로 유입되는 냉각수의 유량이 감소하는 비정상상태시(주냉각 펌프수두가 감소하는 경우) 밸브내 상하에 걸리는 압력차가 감소하여 내려갈려는 힘이 더 커지므로 밸브의 피스톤과 Stem이 아래방향으로 움직이게된다. 즉, 피스톤과 Stem 그리고 추에 작용하는 힘이 압력차에 의한 힘보다 커지므로 힘의 균형이 무너지게 되어 피스톤이 아래로 움직이므로써 상부유로를 막게되고 이와 동시에 추와 밸브 Casing의 접촉부위가 열리게 된다. 밸브가 열림으로서 Coolant Loop는 잠기고 Core와 Pool 사이의 자연대류가 발생하여 원자로가 Shutdown되고 노심의 잔열이 제거 되는 것이다.

### 2.2 모델밸브의 이론적 해석

밸브의 작동을 위해 밸브에 작용하는 힘의 균형에 대한 방정식을 세우면 아래와 같다.

$$(P_2 - P_1)A_1 - (P_2 - P_3)A_2 = (\rho_s - \rho_w)V_s g + (\rho_B - \rho_w)V_B g + \dot{m}_C v_C + \dot{m}_v v_v - \dot{m}_L v_L$$

비정상상태로 밸브로 들어오는 유량이 40%이하로 감소하는 경우 자연대류가 되어 압력강하가 발생하게되어 피스톤을 들어올리고 있는 힘의 균형이 깨지게 되면서 추와 Stem에 작용하는 중력항에 의해 피스톤이 아래로 내려가게 된다. 이 압력강하식은 아래와 같다.

$$F_P = \rho g V_B, \quad F_d = mg, \quad F_T = F_P - F_d, \quad \Delta P = \left( \frac{F_d}{A_C} \right)$$

where  $F_P$  : 추에 대한 부력,  $F_d$  : 하향방향으로 작용하는 중력

SPWR형 원자로의 Hydraulic Pressure Valve에 대한 설계변수를 바탕으로한 원형밸브의 이론적 해석을 통해 모델밸브를 해석하였다. 모델밸브를 설계하기 위해서는 모델밸브의 주요 제원 및 Geometry를 결정하여야 한다. 여기서 무엇보다 중요한 것은 모델밸브를 상사성이 성립하도록 설계하는 것이다. Geometry Similitude는 원형밸브의 1/3 크기로 제원을 결정하였으므로 상사성이 성립한다 (표 1참조). 따라서 Dynamic Similitude가 성립하도록 모델밸브를 설계하여야 한다. 이것이 성립하기 위해서는 원형밸브의 지배무차원수인 Euler Number가 설계중인 모델밸브의 Euler Number와 동일하여야 한다.

단위 : mm

	Prototype Valve	Model Valve
Valve Port	200	66.7
Piston Diameter	290	96.7
Annular Space Gap	10	3.3
Pipe Diameter	108	36
Cylinder Diameter	300	100

표 1 원형밸브와 모델밸브의 주요제원

여기서 모델밸브의 추의 질량을 5kg으로 정하였을때 이 질량에 해당하는 모델밸브의 압력차는 6.67kPa이다. 작업유체를 20℃의 Water라 할때 6.67kPa에 해당하는 모델밸브의 속도는 1.73m/sec가 된다. 이 때의 모델밸브의 질량유량은  $(\dot{m}_C)_M = \rho V_C A_C = 0.88\text{kg/sec}$ 가 된다. 따라서 원형밸브와 모델밸브에 대한 이론적해석을 수행한 결과 설계중인 모델밸브의 설계변수는 다음의 표 2와 같다.

	유량		속도	압력차	Lifting Force
원형밸브	40%	13.2kg/sec	3.97m/sec	25.22kPa	170kg
	100%	36.1kg/sec	10.8m/sec	0.2MPa	1.26ton
모델밸브	40%	0.88kg/sec	1.73m/sec	6.67kPa	5kg
	100%	2.29kg/sec	3.958m/sec	34.79kPa	26kg

표 2 원형밸브와 모델밸브의 주요변수

### 2.3 Teeth에 대한 모델링 및 제원결정

표 2에서 알 수 있듯이 모델 밸브의 추무게를 5kg으로 했을 때 피스톤 상하에 걸리는 압력차가 6.67kPa이 되도록 모델밸브를 설계하여야 한다. 모델밸브의 압력강하는 피스톤의 Teeth에서의 압력강하에 의존한다. 그러므로 Teeth에서의 압력강하를 구하는 것이 매우 중요하다. Teeth의 각도를 그림1과 같이 70도로 정할때 그림2와 같이 Diffuser형태로 모델링할 수 있다.

Diffuser형태로 Teeth를 모델링할때 그림2로부터 Diffuser의 사잇각은 40도이고  $D_2/D_1$ 의 비는 3임을 알 수 있다. 이때의 Loss Coefficient(K)는 0.82이다. Head Loss를 구하면 다음과 같다.

$$H_L = KN \frac{64}{81} \frac{V_1^2}{2g} = 0.09893 Nm \quad \text{where } N : \text{Teeth의 개수}$$

모델밸브의 Head Loss를 알고 있으므로 40%유량에서 압력차가 6.67kPa이 되게하는 밸브의 Teeth수는 약 7개정도가 되고 모델밸브의 피스톤 총 길이는 6Cm이다. 이러한 모델밸브의 이론적 해석을 바탕으로 Gap의 유량에 따른 모델밸브의 작동성을 이론적으로 예상할 수 있다.

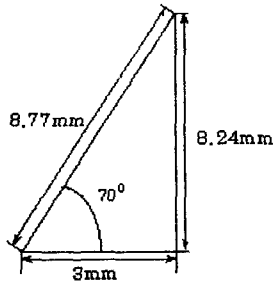


그림 1. 사잇각이 70도인 Teeth

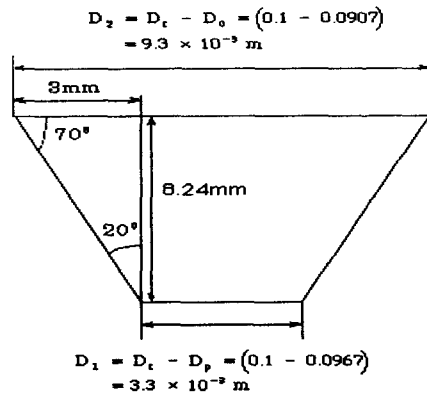


그림 2. 사잇각이 70도인 Teeth의 Diffuser모델링

## 2.4 모델밸브의 제작

원형밸브와 모델밸브의 Dynamic Similitude을 바탕으로 Hydraulic Valve를 설계, 제작 완료하였다. (그림 8. 참조)

- (1) 피스톤 상부 : 위로 Gap을 통한 유량이 통과하는 36mm의 직경을 가지고 있는 유로가 있고 차압계를 설치하기 위한 탭이 옆에 설치되어 있다.
- (2) 피스톤 : 피스톤의 길이와 Teeth의 갯수에 따른 압력강하를 알아보기 위해 표 3과 같은 제원을 가지는 4개의 피스톤을 제작하였다.

	(a)	(b)	(b)	(d)
Teeth의 갯수	8개	10개	13개	16개
Piston의 직경	97mm	97mm	97mm	97mm
Piston의 두께	5mm	5mm	5mm	5mm
Piston의 길이	63mm	102mm	102mm	102mm

표 3 피스톤의 제원

- (3) 밸브 Stem : 밸브내에서 상하로 움직이는 피스톤과 추를 연결해 주는 부분.
- (4) 밸브 Throat : 밸브의 하단부분으로 자연순환시 유동의 저항을 감소하기 위해 유선형으로 제작되었다.또, 추와 밸브케이싱의 접촉부위도 냉각수의 Leakage를 방지하기 위해 유선형으로 제작되었다.
- (5) 추 : 자연순환시 압력차를 극복할 수 있는 하향력을 가지게 되는 추는 실험수행시 질량 조절을 위해 1kg 2개와 2kg 1개를 제작하였다. 고정된 추의 질량은 2kg, 실험시에는 5kg을 추가하였다.

## 2.5 실험장치 설계

제작완료된 Hydraulic Valve의 작동성 확인과 특성곡선을 완성하기 위해 그림 4와 같은 실험장치를 설계하였다. 실험장치는 제작된 Hydraulic Valve와 냉각수를 공급하는 밸브상부의 Tank, 자연순환시(유량이 감소하는 비정상상태) 아래로 흐르는 냉각수를 통과시키는 하부 Tank가 설치되어 있으며 또한, 유량측정을 위한 2개의 유량계와 상부탱크에서 밸브로 강제순환을 일으킬 수 있는 펌프, 이 모든 부분을 연결해 주는 직경 36mm의 배관으로 구성되어 있다.(그림. 9 참조)

## 2.6 실험 방법

- 1) 차압계와 유량계가 실험범위에 맞도록 보정해 준다.
- 2) 상부의 냉각수 탱크에 냉각수를 채운다. 이 때 냉각수로는 상온의 물을 사용한다.
- 3) 냉각수를 흘려 밸브 및 모든 배관에 냉각수를 채운다.
- 4) 공기제거 밸브를 열어 펌프에 기체가 남지 않도록 한다. 기체가 남아 있으면 펌프가 공회전을 하게 되므로 이 점에 주의하도록 한다.
- 5) 펌프를 작동시키고 유량을 조절하면서 유량에 따른 밸브내의 차압을 기록한다.
- 6) 반복실험을 수행하고 이들 평균치를 계산하여 밸브의 특성곡선을 그린다.
- 7) 이론적 특성곡선과 실험적 특성곡선과 실험적 특성곡선을 비교하여 이론식이 실험값과 일치하도록 보정계수와 Teeth의 개수를 결정한다.

## 2.7 실험 결과

위에서 본 바와같이 제작된 피스톤 4가지를 먼저 실험하였다. 실험결과의 Data를 통해 밸브의 특성곡선을 그린 그래프가 아래의 그림.3~7과 같이 나타나 있다. Y축에 해당하는 Lifting Force는 밸브내 압력차로 인해 들어 올릴 수 있는 질량을 나타내며 아래와 같다

$$Lifting\ Force = \frac{(\Delta P A_p) M}{g}$$

<밸브의 특성곡선>

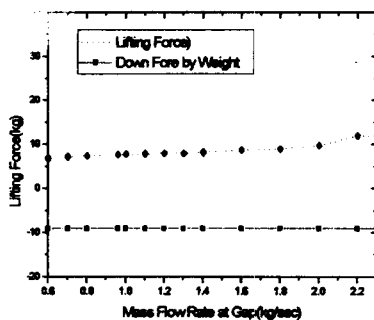


그림.3 Teeth 8개

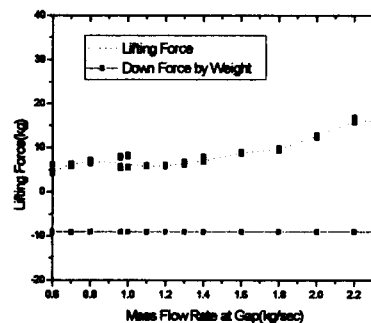


그림.4 Teeth 10개

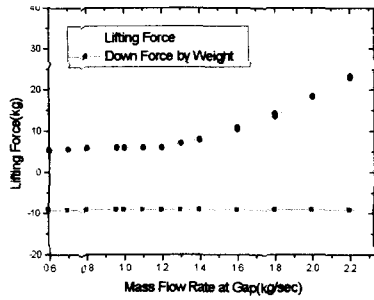


그림.5 Teeth 13개

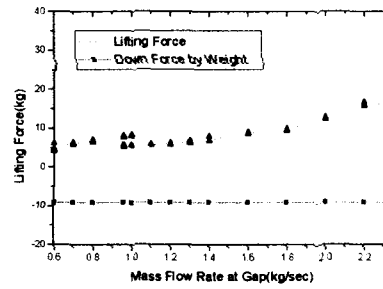


그림.6 Teeth 16개

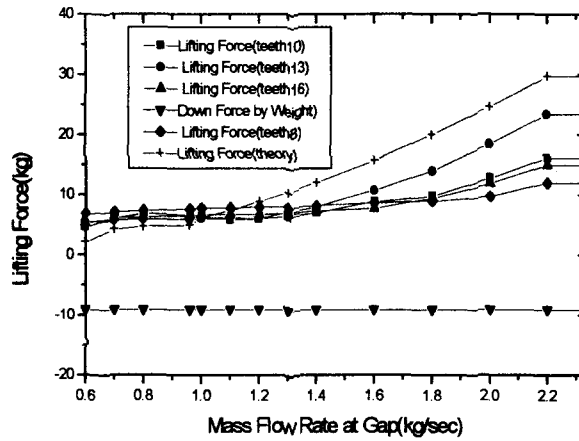


그림.7 실험적 특성곡선과 이론적 특성곡선과의 비교

### 3. 결론 및 향후 연구과제

피동형 원자로에서 Density Lock의 미비점을 보완하기 위하여 수력밸브의 개발 필요성이 대두됨에 따라 본 연구에서는 유체역학적 힘의 원리에 의해 작동되는 Hydraulic Valve에 대한 모델링을 통해 모델밸브를 설계, 제작하였고 모델밸브의 실험을 할 수 있는 실험장치의 제작을 하였다. 앞으로 이미 실험된 4가지 피스톤의 각도를 60°, 45°로 각각 바꾸어 압력차에 미치는 Teeth 각도의 영향과 실험을 통해 얻어진 변수를 이용하여 정확한 Teeth의 개수를 계산, 결정한다. 또한 냉각재 순환 펌프의 양정(유량)의 감소로 발생하는 자연순환시의 압력강하실험을 수행하고 실험을 통해 얻어진 각 변수에 대한 이론식과의 보정값을 구하고 자연순환시의 밸브에서의 압력강하 상관을 개발한다.

#### 4. 참고문헌

1. Hideo MURATA, Yoshinari ANODA etc, "Thermal Hydraulic Experiment for Stable Startup of a PIUS Type Reactor", pp 671-677
2. M. De.Salve, G. Del Tin, B. Panella etc, "Experimental Study of the Temperature along a Density Lock", pp 623-630
3. James H. Rust, "Nuclear Power Plant Engineering", Haraisan Publishing Company 1979
4. 양계형, 한국 원자력 연구소, "다목적 연구로용 플랩밸브 종류의 다양화에 관한 연구" 1993
5. 文將, 金子 etc. , "수동적 안정성을 높인 일체형 가압경수로인 SPWR의 일부하중특성에 대한 원자력선의 엔지니어링 시뮬레이터에 의한 예비해석" , JAERI -M91 - 075, 1991. 4.
6. 村田, 秀南 etc. , "PIUS형로에 있어서의 주순환 펌프에 대한 Ffeed Back Control", JAERI -M91 - 076, 1991. 4.

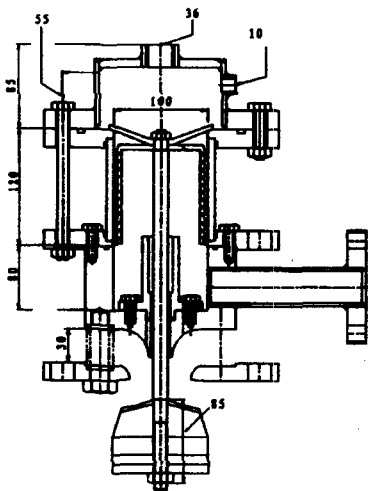


그림 8. Valve의 전체단면도

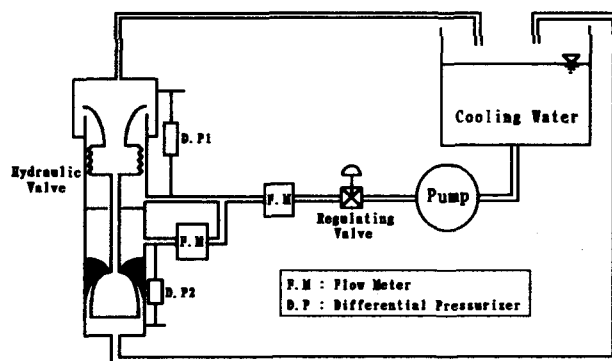


그림 9. 실험장치의 전체 단면도