

## 피동형 원자로의 Hydraulic Valve에 관한 연구

강신철, 김상녕

경희대학교

### 요 약

피동형 원자로에서 냉각수 펌프의 작동불능이나 계통내의 강제순환이 충분치 못할 경우, 냉각수와 분리된 비상저온 고농축의 붕산수를 노심에 피동으로 주입시키고 자연대류에 의한 잔열제거가 이루어져야 한다. PIUS형 원자로나 SPWR형 원자로에서는 Honeycomb구조의 Density Lock을 사용하여 Shutdown 및 잔열제거기능을 수행하며 정상운전시에는 Primary Coolant(고온, 저농축 붕산수)와 Pool Water(저온, 고농축 붕산수)를 분리하고 있다. Density Lock을 사용할 경우 기동운전이나 출력변경과 같은 비정상 운전시 Density Lock의 경계가 불안정하고 제어가 용이치 않으므로 Pool의 저온, 고농축 보론수가 Density Lock을 통하여 노심으로 유입될 수 있다. 따라서 불필요한 Pool Water의 유입을 방지하고 피동형 원자로의 설계개념을 만족시키며, 피동적으로 강제순환으로부터 자연순환으로의 경로를 열어줄 수 있는 Hydraulic Valve에 대한 이론적 해석을 수행하여 모델밸브의 주요변수와 제원을 결정하였다.

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

기존의 발전소와 비교하여 보다 안전하고 경제성 있는 원전을 공급하기 위해 기존 원자로의 개량으로부터 새로운 차원의 원자로개념에 이르기까지 수십여종의 신형 원자로들이 전세계적으로 연구·개발되고 있다. 이러한 원자로들은 일반적으로 개량형 원자로(Evolutionary Reactors), 피동형 원자로(Passive Reactors), 혁신적 원자로(Innovative Reactors)로 구분되는데 이러한 원자로들중 피동형 원자로에 대한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. 피동형 원자로의 본래 목적을 달성하기 위해서는 Primary Loop과 Poison Tank사이에 일어나는 밀도경계면을 통한 질량과 에너지 전달을 제어하면서 안전하게 피동형 기능을 수행할 수 있는 기기의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 정상상태시 Primary Recirculation Pump에 의해 강제로 순환되는 Primary Coolant를 Poison Tank의 보론수와 분

리하고 과도상태시 강제유동에서 자연유동으로의 경로를 안정적으로 신뢰성있게 보장하는 피동형밸브 즉 Hydraulic Valve를 개발하고 이들의 실제 응용현실화 및 밸브의 특성분석기법 개발에 그 목적이 있다.

## 2. Hydraulic Valve의 설계

### 2.1. Hydraulic Valve의 작동원리

원자로의 1차계통에 설치되는 피동형 수력밸브는 냉각펌프의 유량(수두)이 일정수준이하가 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 그림1과 같은 두개의 유로를 갖는 모델밸브를 구상하였다. 두개의 유로중 상부의 유로는 정상상태시(주냉각펌프의 수두가 충분한 경우) 1차계통의 냉각수의 강제유동에 의해 밸브내 피스톤에 압력이 걸리게 되어 그림1의 a)와 같이 밸브를 잠그게 된다. 이때 1차냉각수는 상방유동하여 밸브의 윗부분의 배관으로 빠져나가게 된다. 상부 유로로 유입되는 냉각수의 유량이 감소하는 비정상상태시(주냉각 펌프수두가 감소하는 경우) 밸브내 피스톤의 상하에 걸리는 압력차가 감소하여 내려갈려는 힘이 더 커지므로 밸브의 피스톤과 Stem이 아래방향으로 움직이게 된다(그림1의 b)참조). 즉 피스톤과 Stem 그리고 추에 작용하는 힘이 압력차에 의한 힘보다 커지므로 힘의 균형이 무너지게 되어 피스톤이 아래로 움직임으로서 상부유로를 막게되고 이와 동시에 추와 밸브Casing의 접촉부위가 열리게 된다. 밸브가 열림으로서 Coolant Loop은 잠기고 Core와 Pool사이의 자연대류가 발생하여 원자로가 Shutdown되고 노심의 잔열이 제거되는 것이다. 이러한 원리로 작동되는 밸브의 원리는 피동형 원자로의 개념과 일치한다.

### 2.2 원형밸브에 대한 이론적 해석

SPWR형 원자로의 Hydraulic Pressure Valve에 대한 설계변수를 바탕으로 원형밸브에 대한 이론적 해석을 수행하였다. 원형밸브의 Full Power시 윗방향(+)으로 1.26t에 해당하는 힘으로 작용한다. 이때의 유동은 100%이다. 이 힘에 해당하는 압력차는 0.2MPa이고 원형밸브의 Gap을 통하여 Leakage되는 Volumetric Flow Rate는  $Q_p = 50 \text{ l/sec} = 0.05 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이므로 원형밸브의 Gap을 통한 속도를 구할 수 있다.

$$V_G = \frac{A_G}{Q_l} = 10.8 \text{ m/sec}$$

원형밸브의 100%유동시 Gap에서의 속도를 구하였으므로 이때의 질량유량은 다음과 같다.

$$(\dot{m}_G)_P = \rho V_G A_G = 36.1 \text{ kg/sec}$$

질량유량과 원형밸브의 피스톤 상하에 걸리는 압력차( $\Delta P$ )를 구하였으므로 모델밸브와 원형밸브의 Dynamic Similitude를 맞추기 위해서는 밸브를 지배하는 무차원수에 대한 해석을 수행하여야 한다. 이 결과 밸브를 지배하는 무차원수는 Euler Number이고, 따라서 원형밸브에 대하여 밸브의 지배무차원수인 Euler Number를 구하여 보면 다음과 같다.

$$(Eu)_P = \left( \frac{\Delta P}{\rho V^2} \right)_P = 2.22$$

Main Circulation Pump의 유량이 100%일때 밸브의 Annular Gap에서의 주요변수 및 무차원수를 파악하였다. Hydraulic Valve는 40%유량시 밸브가 열려야 하므로 이 유량에서의 밸브의 작동성 및 주요변수에 대한 해석이 매우 중요하다. 따라서 SPWR형 원자로의 설계변수를 바탕으로 Main Pump의 40%유량시 Down Force를 계산하면 1.666kN이다. 이 힘에 해당하는 피스톤상하의 압력차가

$$(\Delta P)_P = \left( \frac{F_d}{A_G} \right)_P = \frac{1.666 \text{ kN}}{6.605 \times 10^{-2} \text{ m}^2} = 25.22 \text{ kPa}$$

와 같으므로 40%의 유량시 이 압력차에 해당하는 밸브의 속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(V_G)_P = \sqrt{\left( \frac{\Delta P}{\rho Eu} \right)_P} = \sqrt{\left( \frac{25.22 \text{ kPa}}{722 \text{ kg/m}^3 \times 2.22} \right)} = 3.967 \text{ m/sec}$$

40%유량시의 속도를 알고 있으므로 이때의 질량유량은 (9)식과 같이 계산할 수 있다.

$$(\dot{m}_G)_P = \rho V_G A_G = 13.2 \text{ kg/sec}$$

## 2.2 모델밸브의 이론해석

원형밸브에 대한 해석을 수행하였으므로 모델밸브를 설계하기 위해서는 모델밸브에 대한 주요제원 및 Geometry를 결정하여야 한다. 여기서 무엇보다 중요한 것은 모델밸브를 상사성이 성립하도록 설계하는 것이다.

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

Geometric Similitude는 원형밸브의 1/3크기로 재원을 결정하였으므로 상사성이 성립한다(표1 참조). 따라서 Dynamic Similitude가 성립하도록 모델밸브를 설계하여야 한다. 이것이 성립하기 위해서는 원형밸브의 지배무차원수인 Euler Number가 설계중인 모델밸브와 동일하여야 한다. 여기서 설계중인 모델밸브의 추의 질량을 5kg으로 정했을때 이 질량에 해당하는 모델밸브의 압력차는 6.67kPa이다. 작업유체를 20℃의 Water라 할때 6.67kPa에 해당하는 모델밸브의 속도는 1.73m/sec가 된다. 이때의 질량유량은  $(\dot{m}_C)_M = \rho V_C A_C = 0.88 \text{ kg/sec}$ 과 같다. 따라서 원형밸브와 모델밸브의 대한 이론적 해석을 수행한 결과 설계중인 모델밸브의 설계변수는 표2와 같다.

	유 량		속 도	압 력 차	Lifting Force
원 형 밸 브	40%	13.2kg/sec	3.97m/sec	25.22kPa	170kg
	100%	36.1kg/sec	10.8m/sec	0.2MPa	1.26ton
모 델 밸 브	40%	0.88kg/sec	1.73m/sec	6.67kPa	5kg
	100%	2.29kg/sec	3.958/sec	34.79kPa	26kg

표 2 원형밸브와 모델밸브의 주요변수

### 2.3 Teeth에 대한 모델링 및 재원결정

표2에서 알 수 있듯이 모델밸브의 추무게를 5kg으로 했을때 피스톤상하에 걸리는 압력차가 6.67kPa이 되도록 모델밸브를 설계하여야 한다. 모델밸브의 압력강하는 피스톤의 Teeth에서의 압력강하에 의존한다. 그러므로 Teeth에서의 압력강하를 구하는 것이 매우 중요하다. Teeth의 각도를 그림2와 같이 70도로 정할때 그림3과 같이 Diffuser형태로 모델링할 수 있다.

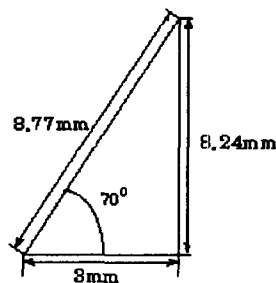


그림 2. 사잇각이 70도인 Teeth

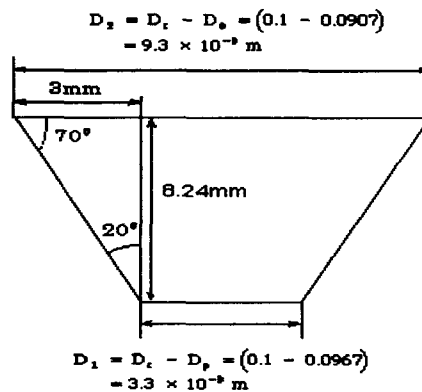


그림 3. 사잇각이 70도인 Teeth의 Diffuser모델링

Diffuser형태로 Teeth를 모델링할때 그림3.으로부터 Diffuser의 사잇각은 40도이고  $D_2/D_1$ 의 비는 3임을 알 수 있다. 이때의 Loss Coefficient(K)는 0.82이다. Head Loss를 구하는 식을 이용하여 Head Loss를 구하면 다음과 같다.

$$H_L = KN \frac{64}{81} \frac{V_1^2}{2g} = 0.09893 Nm$$

여기서 N은 Teeth의 갯수를 말한다. 모델밸브의 Head Loss를 알고 있으므로 40%유량에서 압력차가 6.67kPa이 되게하는 밸브의 Teeth수는 약 7개정도가 되고 모델밸브의 피스톤 총 길이는 6Cm이다(그림4참조). 이러한 모델밸브의 이론적 해석을 바탕으로 Gap의 유량에 따른 모델밸브의 작동성을 이론적으로 예상할 수 있다. 이론적으로 밸브의 작동성을 예상할 수 있는 밸브특성곡선은 그림4와 같다.

### 3. 결 론

피동형 원자로에서 Density Lock의 기능상의 미비점을 보완하기 위하여 수력밸브의 개발 필요성이 대두됨에 따라 본 연구에서는 유체역학적 힘의 원리에 의해 작동되는 Hydraulic Valve에 대한 지배방정식인 질량보존 방정식과 운동량 방정식 및 밸브의 작동에 영향을 미치는 주요 변수(유량, 밸브구조, 밸브 Stem의 체적, 부피, 압력강하, 추의 무게 등)들을 파악하였다. 또한 이를 토대로 지배 무차원수(Euler Number)를 결정하였으며 1/3 Scale의 Hydraulic Valve를 설계하였고 이론적 밸브특성곡선을 완성하였다. 앞으로 이들 연구결과를 바탕으로 설계된 모델밸브와 실험장치를 제작·설치하고 Hydraulic Valve의 작동성, 작동특성곡선, 자연대류 유량결정을 위한 밸브내에서의 압력강하, Valve모델링을 위한 주요 현상과 변수파악에 필요한 이론개발을 수행할 것이다.

### 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 안전성을 높인 일체형 가압수형로인 SPWR의 일부하중특성에 대한 원자력선의 엔지니어링 시뮬레이터에 의한 예비해석", JAERI - M91 - 075, 1991. 4.

6. 村田, 秀南 etc. , "PIUS형로에 있어서의 주순환 펌프에 대한 Feed Back Control", JAERI  
 - M91 - 076, 1991. 4.

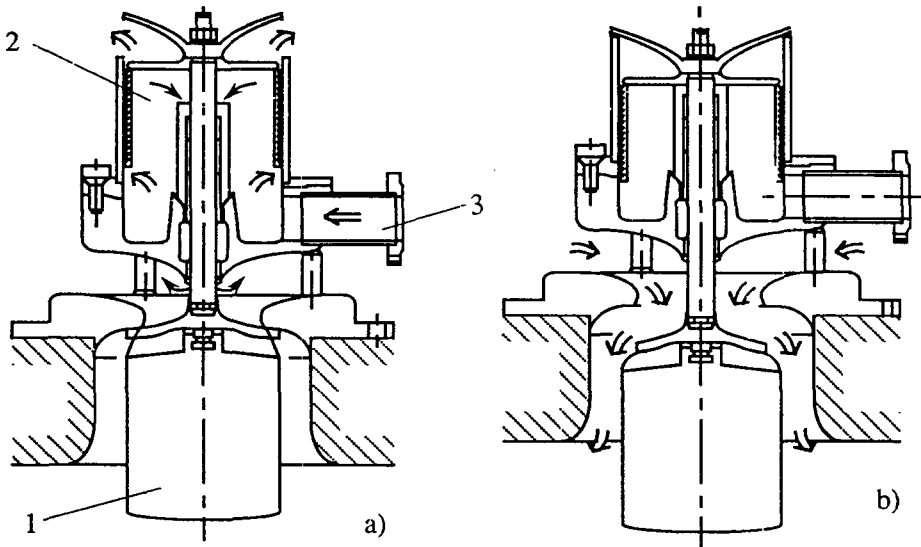


그림 1. Scheme of the hydraulic valve operation under nominal conditions (a) and in reactor shutdown (b):  
 1- weight for passive valve opening; 2- hydraulic cylinder with piston for valve opening in MCP operation; 3- supply of water from MCP.

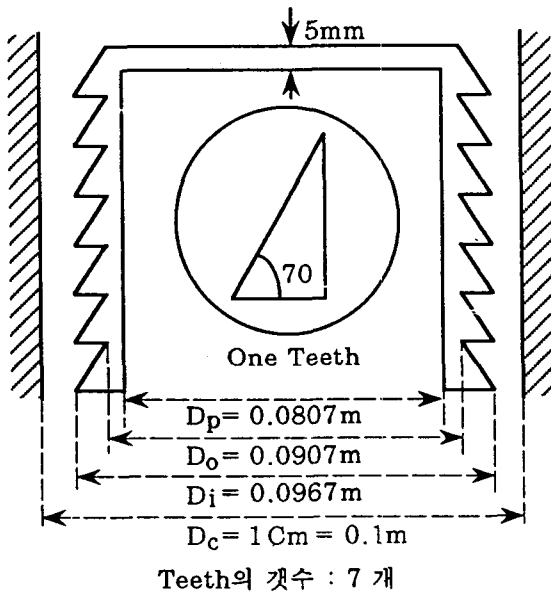


그림 4. 모델밸브의 피스톤 단면도

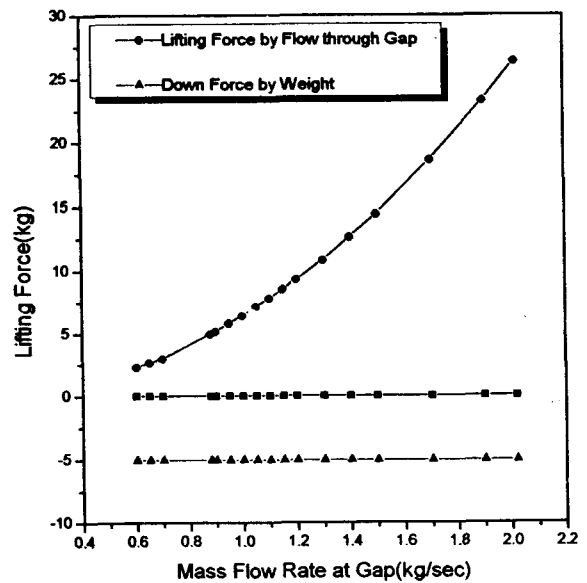


그림 5. 밸브의 이론적 특성곡선