

## 원자력발전소 유출계통의 과도현상에 대한 연구

김민\* · 정장규\* · 김은기\* · 노태선\*  
이성노\*\* · 유성연\*\*

### A Study on Hydraulic Transients of Letdown System of Nuclear Power Plant

Min Kim\*, Chang-Kyu Chung\*, Eun-Kee Kim\*, Tae-Sun Ro\*  
Soung-No Lee\*\*, Seong-Yeon Yoo\*\*

*Key Words* : Letdown Orifice(유출오리피스), Isolation valve(격리밸브), Letdown Heat Exchanger(유출열교환기)

#### ABSTRACT

The letdown system of pressurized water reactor (PWR) nuclear power plants had experienced instabilities in letdown system due to unacceptable flow characteristics of control valves. The Korean Standard Nuclear Power Plants (KSNPs) have three flow paths in parallel for letdown flow control. Each flow path consists of two orifices and one isolation valve. This study evaluates the effect of orifice arrangement and valve stroke time of letdown isolation valve on the system transients because sudden flow changes due to valve actuation can generate high pressure peaks in letdown line. A pressure transient analysis has been performed to evaluate the impact of dynamic transients. This analysis uses MMS which is a simulation code developed by EPRI based on the method of characteristics. The result shows that the pressure peak is reduced in the continuous arrangement but negligible. Additionally, it shows that the stroke time of linear type plug valve greater than 15 seconds can give more stable performance.

#### 1. 서 론

가압 경수형 원자력발전소는 고온과 고압하에서 운전되므로 유출계통에서는 과도현상이 발생할 가능성이 매우 높다. 유출계통의 이러한 특징으로 인해 유출관 조절밸브 및 배압 조절밸브의 부적절한 선정으로 인한 유출분기관의 손상을 경험하기도 했다. 이 때문에 원자력발전소의 유출계통의 운전성과 신뢰성을 향상시키기 위하여 유출관의 감압기기를 제어밸브 대신 오리피스 배열로 변경하였고 유출계통의 유량제어는 제어밸브에서 감압용 오리피스와 격리밸브(on-off 밸브)의 조합에 의하여 제어되는 형태로 설계를 변경하였다. 따라서 변경된 유출계통의 성능을 평가하고 예상되는 과도상황에 대하여 그 건전성을 확보하는 것이 절실히 요구되나 이에 대한 연구는 미흡하다. 본 연구에서는 설계 변경된 유출계통에 대한 원자력발전소의 과도현상을 분석하기 위하여 모사 전산프로그램인 MMS(Modular Modeling System)<sup>(1)</sup>를 이용하여 유출계통에 대한 모델을 개발하고 정상출력운전시 운전모드변화에 따른 유량변화에 대한 계통의 동적성능 분석을 수행하였다.

본 연구에 사용된 MMS는 1978년 미국의 전력연구소(EPRI)에서 발전소의 동적 성능 분석을 효율적으로 수행하기 위하여 개발되어 발전되어온 모사 전산프로그램이며, 지금은 20여개 이상의 전력회사에서 화력 및 원자력발전소 1차 및 2차 계통분석 등에 다양하게 응용하고 있는 신뢰도 높고 검증된 전산프로그램이다.<sup>(2)</sup> 원자력발전소의 정상운전 중 유출계통에서 유출오리피스 격리밸브(on-off 밸브)의 개방이나 폐쇄로 인한 갑작스러운 유출유량의 변화는 하부 배관이나 기기에 높은 과도압력을 유발시킬 수 있다. 본 연구에서는 (1) 유출 분기관(manifold)를 구성하는 오리피스와 격리밸브의 배열이 이격배열과 연속배열일 경우를 가정하여 정상 운전중 유출오리피스 격리밸브를 폐쇄하여 유량 변화에 대한 과도현상을 분석하고 (2) 유출 분기관이 이격배열일 경우를 가정하여 유출격리밸브의 행정시간을 5초로부터 30초까지 변경하면서 유량이 변화할 때 발생하는 유출분기관 후단의 과도현상을 분석하였고, (3) 이들 결과를 종합하여 유출관 오리피스의 배열에 대한 설계방향과 유출분기관 후단의 과도현상을 최소화 할 수 있는 유출오리피스 격리밸브의 행정 시간등 최적의 설계인자를 도출하고자 한다.

\* 한국전력기술(주) 원자로설계개발단

\*\* 충남대학교

## 2. 이론적 고찰

### 2.1. 기본 이론

각 구성요소들은 유로 내의 임의의 한 지점에 대한 동적 거동을 묘사하기 위하여 다음과 같은 가정하에서 편미분방정식 형태의 국소 순간 보존방정식으로 나타낼 수 있다.<sup>(3)(4)</sup>

1. 계(system)내에서는 어떤 에너지도 생성되거나 소멸되지 않는다.
2. 질량에 대한 전기장이나 자기장의 효과는 무시한다.
3. 체적 내에서는 어떤 화학반응도 일어나지 않는다.

#### 2.1.1 연속방정식(continuity equation)

국소연속방정식을 제어체적에 대해 적분하면,

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \int_V \frac{\partial \rho \bar{V}_i}{\partial x_i} dV \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \text{유체의 밀도} \\ \bar{V} &= \text{유체의 속도벡터} \\ i &= \text{벡터의 방향을 나타내는 첨자} \end{aligned}$$

가 되고, 좌측 항에 대해 Leibnitz 적분하여 발산정리(divergence theorem)를 이용하여 면적분(surface integral)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \int_S \rho \bar{V}_i dA - \int_S \rho \bar{V}_i dA \quad (2)$$

여기서 좌변의 적분 형태는 제어체적내의 총 순간질량을 나타내며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \frac{dM}{dt} \quad (3)$$

여기서 M은 제어체적내의 순간질량이다. 질량 유동(mass flux)을 제어 체적면을 통과하는 유동으로 정의하면

$$\frac{dM}{dt} = w_e - w_i \quad (4)$$

이 된다.

#### 2.2.2 에너지방정식(energy equation)

국소 에너지 방정식을 제어체적에 대해 적분하면 다음과 같다.

$$\int_V \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} dV = - \int_V \frac{\partial(\rho e \bar{V}_i)}{\partial x_i} dV - \int_V \frac{\partial(p \bar{V}_i)}{\partial x_i} dV + \int_V q dV$$

$$- \int_V \dot{W} dV - \int_V \frac{\partial(\sigma_{ij})}{\partial x_j} \bar{V}_i dV \quad (5)$$

$e$  = 단위 질량당 전에너지(=내부에너지+운동에너지+위치에너지)

$p$  = 압력

$q$  = 단위 체적당 단위 시간당 열전달량

$\dot{W}$  = 단위 체적당 단위 시간당 작동유체에 의해 행하여진 일

$\sigma_{ij}$  = 점성 전단응력

식(5)의 좌변의 항을 Leibnitz 공식을 이용하여 변환하고 이 때 제어체적내에서는 어떠한 에너지도 생성되거나 소멸되지 않는다는 가정을 적용하면 에너지항은 내부에너지만이 존재하게 된다. 따라서

$$e = u \quad (6)$$

이며 점성전단응력항(viscosity shear stress term)은 MMS에서는 무시하므로 플럭스(flux) 개념을 이용하여 표현하면

$$\frac{dU}{dt} = w_e h_e - w_i h_i + q - \dot{W}_s - p \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

여기서 h는 엔탈피(enthalpy)로 다음과 같이 정의된다.

$$h = u + pv \quad (8)$$

#### 3.2.3 운동량 방정식(momentum equation)

국소 순간 운동량방정식을 제어체적에 대해 적분하면

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{V}_i) dV = & - \int_V \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{V}_i \bar{V}_j) dV - g_c \int_V \frac{\partial p_i}{\partial x_i} dV \\ & - g_c \int_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV + \int_V \rho g \sin \theta dV \end{aligned} \quad (9)$$

$p$  = 압력

$\sigma_{ij}$  = 점성 전단력

$g$  = 중력 가속도

$\theta$  = 수평면과 유동방향의 각도

이 된다. 여기서 좌변항에 Leibnitz 법칙을 적용하여 발산정리를 이용하고 제어체적에 대한 적분을 하면 최종적인 제어체적에 대한 선형운동량 보존방정식(linear momentum conservation equation)은 다음과 같다.

$$\frac{dG}{dt} = w_e \bar{V}_e - w_i \bar{V}_i + g_c (A_e p_e - A_i p_i - F_w) + A \rho g (z_e - z_i) \quad (10)$$

### 3. 유출계통의 모델링

#### 3.1. 계통 설명

원자력발전소의 화학및체적제어계통은 운전중에 원자로 냉각재계통의 냉각재량과 냉각재 수질을 적절히 조절하는 계통으로서 유출계통과 충전계통으로 구별된다. 유출계통은 재생 열교환기, 유출수 열교환기와 유출관 오리피스 및 유출수 배압 제어밸브, 여과기, 방사선 감지기, 붕소 농도측정기, 이온교환기 등으로 구성된다. 원자로 냉각재계통에서 유출된 냉각재는 재생 열교환기를 거쳐 냉각되고, 유출관 오리피스를 통과하면서 감압되며, 필터와 탈염기를 통과하면서 부식 생성물과 핵분열 생성물이 제거된다.

유출제어밸브의 정상운전온도는 300°F 정도이고 유출 제어밸브를 통해 발생하는 압력강하는 약 1500 psid이다. 설계 개선된 유출계통에는 3개의 유출관 오리피스 및 유출오리피스 격리밸브 배관을 병렬로 하여 이를 통과한 유출수는 약 400 psig 까지 일차로 감압된다. 유출계통은 정상운전시 유출오리피스 격리밸브 # 1 및 유출오리피스 격리밸브 # 2를 통해 유로를 형성하게 되며, 자동모드 운전시 가압기 수위 제어계통으로부터 제어신호를 받아 유출관 격리밸브를 개폐하며 유량은 유출관 오리피스 조합에 따라 30, 75 및 135 gpm으로 불연속으로 제어된다. 유출오리피스 격리밸브를 통과한 유출수는 유출 열교환기를 통과하면서 기기냉각수에 의해 120°F까지 냉각되고 유출수 배압제어밸브 전단에 설치된 배압제어기에 의해 밸브전단에서의 압력이 400 psig로 유지 될 수 있도록 자동 제어되며 유출수 배압제어밸브를 통과하면서 적절한 압력으로 감압된다.

#### 3.2. 입력 자료

##### 3.2.1 유체의 온도

재생 열교환기 전단의 유출수 온도는 원자로 냉각재 온도와 동일하며 후단의 유출수 온도는 재생 열교환기의 운전조건에 따라 150°F (30gpm), 290°F (75gpm) 및 400°F (135gpm)로 변화한다. 그러나 유출수 열교환기 후단의 유출수의 온도는 항상 120°F로 일정하게 유지된다.

##### 3.2.2 경제 조건

유출계통의 경제조건은 체적제어탱크, 유출노즐의 압력으로써 경제조건은 가압기 압력, 가압기 압력조절기의 오차, 수두 및 냉각재의 수두손실을 고려하여 결정된 압력이다. 유출노즐 및 체적제어탱크의 압력은 2232 psia 및 39.7 psia이며 이때 각각의 출구 온도는 565 °F 및 120 °F이다.

### 3.3. 계통 모델링

#### 3.3.1 유출관 오리피스 및 유출오리피스 격리밸브

유출유량은 개방된 유출관 오리피스 및 유출오리피스 격리밸브의 조합에 따라 30, 75, 135 gpm이 형성되는데 본 모델에서 사용한 유출오리피스 격리밸브 제어는 On/Off 액츄에이터를 사용하였다. Fig. 1 및 2는 유출관 오리피스 배열에 따른 과도현상을 분석하기 위하여 MMS의 model builder로 작성된 모델로 Fig. 1은 유출관 오리피스 연속배열로 격리밸브가 감압용 오리피스와 유량 보정용 오리피스 후단에 위치하고 있으며, Fig. 2은 유출관 오리피스 이격배열로 격리밸브가 감압용 오리피스와 유량 보정용 오리피스의 중간에 위치하고 있는 모델이다. 모델에서 모사된 기기 및 배관의 압력손실자료는 연속배열과 이격배열이 동일하게 입력되었으며 이에 따라 오리피스 조합의 양단의 압력차는 서로 동일하다.

#### 3.3.2 유출 열교환기 온도제어

기기냉각수 유량제어기는 비례적분제어기(Proportional Integral controller)를 사용한다. 이 제어기는 유출 열교환기 출구 온도계기의 온도신호를 받아 유출 열교환기의 기기냉각수 조절밸브를 조절하여 유출 열교환기 출구의 유출수온도가 120 °F로 일정하게 유지되도록 한다. 제어 변수는 유출 열교환기 출구 온도가 120 °F가 유지되도록 여러 차례 프로그램을 수행하여 최적의 변수를 도출하였으며, 그 결과 비례이득이 5, 적분시상수는 40초를 산출하여 적용하였다.

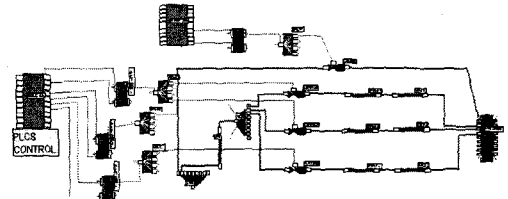


Fig. 1 Model of letdown orifices in continuous arrangement

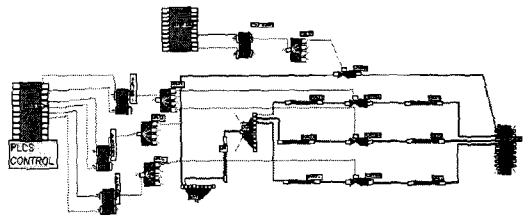


Fig. 2 Model of letdown orifices in separated arrangement

### 3.3.3 유출수 배압제어밸브

유출수 배압제어기는 유출수 배압제어밸브 상부의 압력이 포화증기압력 이하로 감소되지 않도록 유출계통의 압력을 400 psig로 유지하여 계통내의 공동화(cavitation) 현상을 방지한다. 이 밸브의 제어변수 설정이 계통 유동 안전성에 매우 중요하다. 최적의 제어변수를 도출하기 위하여 압력 방출밸브 개방여부 및 유출수 배압 제어밸브 전단 압력의 첨두 압력차 관점에서 서로 비교하여 가장 안정된 압력차를 선정하여 제어변수를 도출하였다.

Table 1은 MMS 계산 결과를 정리한 것으로 유출수 배압제어밸브에서 발생하는 압력 과도현상은 비레이더이 0.67이고 적분상수가 25초 일 때 가장 안정된 결과를 보여준다.

### 3.4. 해석방법

#### 3.4.1. 과도현상분석을 위한 운전모드 선정

정상 운전시 예상되는 운전 모드로부터 유출수 배압 제어밸브의 압력설정치가 400 psig일 때의 유출계통의 과도현상을 분석하기 위해 정상운전 모드중 프로그램에 적용할 제한 경우(limiting case)를 선정한다. 정상 운전시 예상되는 운전모드는 Table 2와 같다.

각각의 운전모드에 따른 유체계통의 제어밸브 및 제어기 운전조건은 상기 3.3항의 계산결과를 토대로 다음과 같이 가정한다.

- 유출오리피스 격리밸브의 행정시간 : 25초
- 유출오리피스 격리밸브의 특성 : 선형
- 유출수 배압제어밸브비례적분제어기의 비레이더 : 0.67
- 적분상수 : 25초

Table 1. Results on control parameters of letdown backpressure controller

Control parameter		Results	
Proportional gain	Integral time constant	Opening of safety relief valve	Differential Pressure of peak to peak (psid)
0.2	0.2	No	160
	10	No	120
	25	No	160
	40	No	150
0.67	0.2	No	160
	10	No	75
	25	No	65
	40	No	72
3.0	0.2	No	72
	10	No	80
	25	No	72
	40	No	72

Table 2. Operating mode

Case	Operating mode	Flow rate
1	Zero to minimum letdown flow	0 to 30 gpm
2	Minimum to normal letdown flow	30 to 75 gpm
3	Normal to maximum letdown flow	75 to 135 gpm
4	Maximum to normal letdown flow	135 to 75 gpm
5	Normal to minimum letdown flow	75 to 30 gpm

Table 2의 Case 1에서 5까지의 유출계통에 대한 과도 현상 분석결과 Case 3에서 유출수 배압 조절밸브에서의 압력이 500 psig 로 가장 큰 압력 과도현상을 나타낸 것으로 분석되어 과도현상분석을 위하여 Case 3을 제한 경우로 선정하였다.

#### 3.4.2. 과도현상분석 방법

##### 3.4.2.1 유출관 오리피스 배열에 따른 과도현상

유출관 오리피스의 연속 및 이격 배열은 세 개의 유로에 각각 한 개의 유출오리피스 격리밸브와 한 개의 감압용 오리피스 및 유량 보정용 오리피스로 구성되어 있다. 본 연구에서는 Table 2의 Case 3의 운전모드를 적용하여 유출오리피스 격리밸브 # 3을 개방하여 정상유량으로부터 최대유량으로 유출유량이 증가될 때 발생하는 유체의 온도변화와 압력방출밸브 및 유출수 배압제어밸브에서의 압력에 의한 수력학적 과도현상을 분석한다.

##### 3.4.2.2 밸브 행정시간에 따른 과도현상

Table 2의 Case 3의 운전모드를 적용하여 유출관의 유출유량이 정상유량인 75 gpm으로부터 최대 유출유량인 135 gpm으로 증가될 때 밸브의 행정시간에 따라 유출관 오리피스 후단의 압력 방출밸브 및 유출수 배압제어밸브에서 발생하는 압력 과도현상을 분석한다. 행정시간은 각각 5, 10, 15, 20, 25 및 30초인 경우에 대해서 실행하였으며 이 경우 최적의 행정시간을 평가한다.

## 4. 연구결과 및 고찰

### 4.1 유출관 오리피스 배열에 의한 압력변화

Fig. 3에서와 같이 MMS에 의해 유출관 오리피스 배열에 따른 해석결과 발전소의 정상상태의 운전조건에서 유량이 정상유량에서 최대유량으로 증가할 때 유출수 배압제어밸브의 압력조절로 인해 압력 방출밸브에서 발생하는 첨두압력에 대한 압력차는 유출관 오리피스 이격배열의 경우, 81.1 psid로 연속배열의 경우의 압력차인 80.6 psid 보다 큰 것으로 분석되었으며 차이가 미미하며 무시할 수 있는 정도이다.

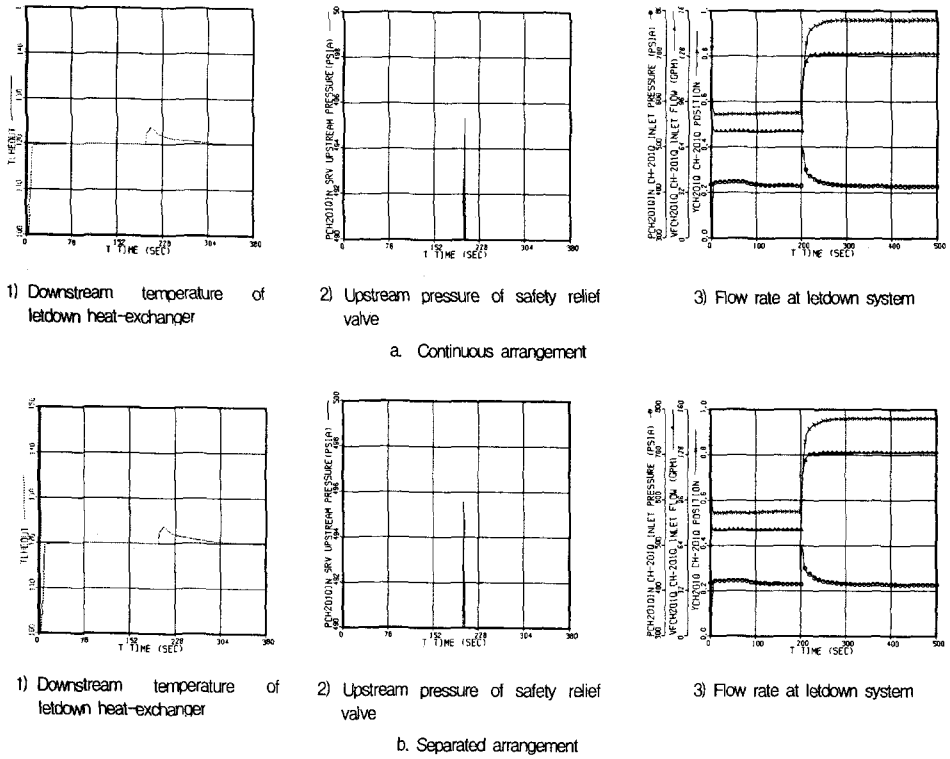


Fig. 3 Comparison of parameters between continuous arrangement and separated arrangement

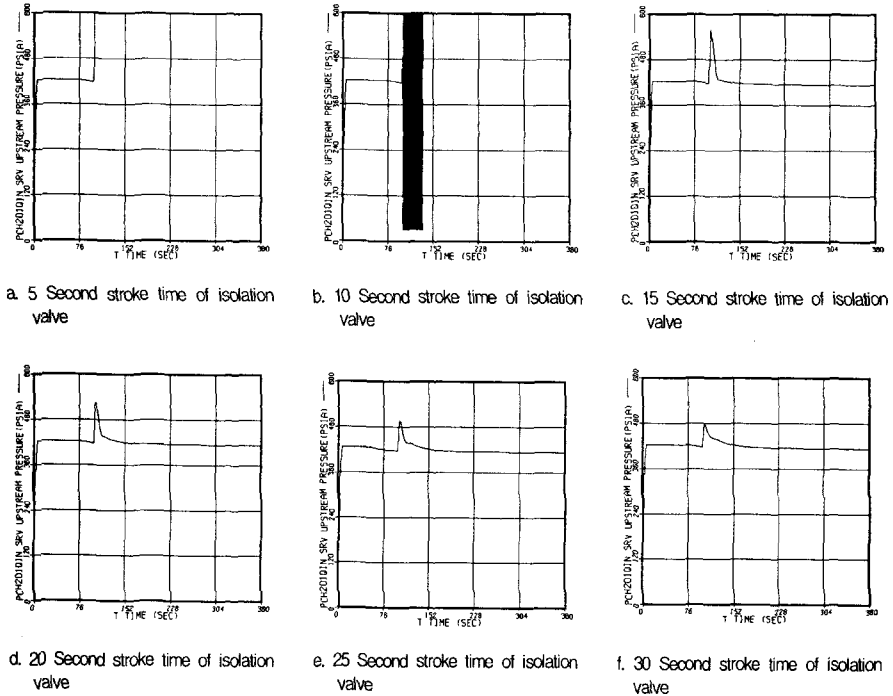


Fig. 4 Downstream pressure of safety relief valve at various stroke time

#### 4.2 격리밸브 행정시간에 따른 압력변화

압력방출밸브의 압력설정치는 600 psig로서 계통의 압력이 이를 초과할 경우 밸브가 개방되어 유출수가 기배수탱크로 방출된다. Fig. 4에서 행정시간이 5초 및 10초에서 압력 방출밸브가 개방되어 유출유량이 손실되었다. 그러나 격리 밸브의 행정시간이 15초 이상일때 압력 방출밸브가 개방되지 않으며 행정시간이 길수록 압력방출 밸브에 걸리는 침두 압력이 낮아져 30초일때, 침두압력이 465 psig로, 압력방출밸브의 압력설정치인 600 psig로부터 가장 낮은 압력까지 감소되는 것으로 분석되었다.

#### 5. 결 론

유출관 오리피스가 설치된 가압 경수로형 원자력발전소의 유출계통을 모델로 하여 MMS를 이용한 유출관 오리피스 배열 및 밸브 행정시간에 따른 과도현상을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유출열교환기 후단에서 발생하는 온도에 대한 과도현상의 차이는 발견되지 않으나 계통후단 압력을 설정치인 400 psig로 유지하기 위한 배압제어 밸브의 거동에 따른 압력 방출밸브에서 발생하는 침두 압력차는 이격배열이 연속배열보다 높은 침두차를 보인다. 하지만 그 차이가 미미하므로 배열에 의한 영향은 없다.

2. 압력 방출밸브는 격리밸브의 행정시간이 5, 10초일 때 계통압력이 압력설정치인 600 psig를 초과하여 개방되고 이에 따라 유출유량이 상실되며 15초 이상일 때, 침두 압력이 압력 방출밸브 압력 설정치보다 낮아지며 30초일 때 가장 작은 압력 침두치를 보인다. 그러므로 행정시간은 적어도 15초 이상이어야 한다.
3. 유출 열교환기 온도제어를 위한 기기냉각수 유량 제어기의 제어변수는 비레이득이 5, 적분시상수가 40초일 때 후단온도가 120 °F로 가장 일정하게 유지되며, 유출수 배압제어기는 비레이득이 0.67, 적분시상수가 25초일 때 압력방출밸브에서 가장 작은 침두 압력차를 보인다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Framatome Technologies, 1989 April, Modular Modeling System(MMS) Model Builder User's Guide
- (2) EPRI, 1983, Modular Modeling System Validation, EPRI-CS/NP-2945
- (3) Framatome Technologies, 1998, Modular Modeling System(Reference, Introduction and General Theory for MMS Modules
- (4) 김무환외 2인, 1993, 이상유동열전달, 대영사