

'98 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 월성 발전소에서의 비상노심냉각계통 유량 계산

### Calculation of Emergency Core Cooling System Flow Rates at Wolsong Plants

김 동하, 송 용만, 최 영, 진 영호, 김 희동  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

월성 원자력 발전소는 독립된 두개의 폐쇄회로로 구성되어 있고, 사고 진행 동안의 각 폐쇄회로의 압력이 다를 수 있으므로 각 회로로 주입되는 비상 급수 유량은 두 폐쇄회로의 압력조건에 따라 양쪽으로 나뉘어지거나 어느 한쪽으로부터만 공급되는 월성의 고유 특성을 갖는다. 따라서, 월성발전소에서의 각 회로로 공급되는 비상 급수 유량을 계산할 수 있는 독립 프로그램을 개발하여, 다양한 조건에서의 유량을 예측하였다. 독립 프로그램은 관 안에서 흐르는 유체의 점성으로 인한 저항력에 의한 압력 감소 관계식을 이용하였고, 양 폐쇄회로의 급수유량 분배 및 비상 급수 펌프 사용을 모사하기 위하여 반복 계산법을 이용하였다.

#### Abstract

As the Wolsong plants consist of two separated loops and the pressure behavior is different from each other, the amount of flow injected from emergency core cooling system may be either splitted between two loops or provided into the lower pressure loop, which is unique to Wolsong plants. A stand-alone program has been developed to predict the ECCS flow between two loops at Wolsong plants and tested for various conditions. The pressure drop inside the ECCS pipe mainly depends on frictional loss due to flow and an iteration technique is used to accommodate flow split between two loops and the characteristic curve of emergency core cooling pumps.

#### 1. 서론

월성발전소에서의 비상 노심 냉각 계통은 가동 압력에 따라 가압 경수로처럼 3단계로 나눌 수 있다. 고압 운전 모드는 약 4.4 MPa(a)로 가압되어 있는 ECC 탱크로부터 1차계통으로 냉각수를 공급하며, 중압 운전 모드는 격납건물 상부의 다우징 탱크에 저장되어 있는 냉각수를 펌프를 이용하여 1차 계통으로 제공한다. 마지막으로, 저압운전 모드는 격납건물 바

닥에 모인 냉각수를 역시 펌프를 이용, 냉각기를 거쳐 1차 계통으로 공급한다.

비상 급수 계통으로부터 공급되는 유량은 비상 급수원의 압력과 1차 계통간의 압력 차이에 따라 결정된다. PWR의 경우에는 비상 급수가 각 냉각관 (cold leg)으로 공급되며, 1차 계통이 노심을 중심으로 서로 연결되어 있어 각 냉각관의 압력이 유사하고, 따라서 냉각관 별로 주입되는 유량은 큰 차이를 나타내지 않는다. 그러나, 월성발전소의 경우 1차 계통은 2개의 독립된 폐쇄 회로로 구성되어 있고, 각 폐쇄 회로는 정상 운전 중에는 가압기를 통해 서로 연결되어 있다. 만일, 어느 한 폐쇄 회로에서 냉각재 상실 사고 (LOCA)가 발생하게 되면 가압기와 연결된 양 폐쇄회로의 고립 밸브를 닫아, 건전한 폐쇄 회로의 냉각수를 보호하도록 설계되어 있다. 따라서 LOCA시 고립 밸브가 닫히고 나면, 두 개의 폐쇄 회로는 서로 독립적인 압력 거동을 보이므로, 건전한 회로와 손상된 회로로 공급되는 유량은 다를 수 밖에 없다.

기존의 비교적 간단한 비상노심 냉각유량 모델은 급수원과 냉각관사이의 압력차이에 따라 유량의 공급 여부와 그 양을 계산할 수 있지만, 월성발전소에서처럼 하나의 급수관을 이용하여 공급된 유량이 양 폐쇄 회로의 압력 조건에 따라 분배되거나 혹은 어느 한쪽 회로로 공급되는 모델은 고려되어 있지 않다. 이 논문의 목적은 이러한 월성발전소의 특성을 고려한 비상 급수 유량을 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것이다. 고압 및 중/저압 계통의 특성에 따른 급수관 내의 압력 감소 관계식을 이용하여 각각의 경우의 유량을 예측할 수 있는 방법이 설명되어 있다. 이 모델은 월성발전소의 전반적인 중대사고를 해석할 수 있는 ISAAC 전산 코드 [1]의 모듈로 연계되어 비상 급수량 계산에 활용되고 있다 [2].

## 2. 비상 급수 유량 계산 모델 개발

### 2.1 압력 / 유량 관계식

관 안에서의 유량 흐름으로 인한 압력 변화량은 관성의 영향, 밀도나 단면적의 변화로 인한 가속 효과 영향, 유체의 점성으로 인한 저항력의 영향, 높이에 따른 영향, 그리고 펌프로 인한 압력 상승 영향 등으로 결정되며, 식으로 표시하면 다음처럼 나타낼 수 있다 .

$$P_i - P_o = \frac{L}{A} \frac{dw}{dt} + K' \frac{w^2}{2\rho A^2} + \rho g(z_o - z_i) - \Delta P_{pump} \quad (1)$$

$$K' = \left[ \left( \frac{\rho A}{\rho_o A_o} \right)^2 - \left( \frac{\rho A}{\rho_i A_i} \right)^2 \right] + e_i \quad (2)$$

여기서  $L$ 은 채널의 길이,  $A$ 는 평균 단면적,  $w$ 는 유량,  $\rho$ 는 평균밀도,  $z$ 는 높이를, 아래첨자  $o$ 와  $i$ 는 분석하고 있는 단위 유량 채널의 출구와 입구를 나타낸다. 또한  $K'$ 은 가속항과 점성항 계수를 간단히 통합한 계수로, 단상 유체가 균일한 파이프를 관통할 경우 form loss coefficient,  $K_j$ ,를 이용하여 식 (3)처럼 나타낼 수 있으며, 여기서  $j$ 는 Darcy-Weisbach 저항 계수이고,  $D_h$ 는 hydraulic diameter를 나타낸다.

$$K' = f\left(\frac{L}{D_h}\right) + K_j \quad (3)$$

관성으로 인한 압력 변화량은 무시하고, 높이의 영향은 각 위치에서의 압력에 반영하면, 비상 급수 파이프의 위치 1과 2에서의 압력 감소 관계식은 다음처럼 간단하게 나타낼 수 있다.

$$(P_1 + \rho g z_1) - (P_2 + \rho g z_2) = R w^2 - \Delta P_{pump} \quad (4)$$

$$R = \frac{K'}{2\rho A^2} \quad (5)$$

## 2.2 고압 계통

ECC 물탱크의 압력이  $P_a$ 이고, 높이까지 고려한 Loop 1 과 Loop 2의 대표 압력이 각각  $P_1$  과  $P_2$ , 비상 급수 파이프가 Loop 1과 Loop 2로 갈라지는 지점에서의 압력이  $P_i$ , 그리고 ECC 물탱크로부터 Loop이 갈라지는 지점까지, 그 곳부터 각 Loop 헤더까지 비상 급수 회로에서의 압력 손실 계수를 각각  $R_3$ ,  $R_1$ , 그리고  $R_2$ 라고 하면 (그림 1 참조), ECC 물탱크로부터의 유량인  $w_{flow}$ 와 Loop 1, Loop 2로 각각 공급되는 유량  $w_1$ 과  $w_2$ 는 각 위치의 압력과 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_a' - P_i = R_3 w_{flow}^2 \quad (6)$$

$$P_i - P_1' = R_1 w_1^2 \quad (7)$$

$$P_i - P_2' = R_2 w_2^2 \quad (8)$$

$$w_{flow} = w_1 + w_2 \quad (9)$$

여기서,  $P_a'$ ,  $P_1'$ , 그리고  $P_2'$ 은 유량이 공급되거나 방출됨에 따라 각 위치에서의 계통의 압력이 변화되고 이에 따라 방출량이나 공급량이 다시 바뀜으로 인한 수치 해석적인 불안정성을 피하기 위하여 적분 시간 간격 ( $\Delta t$ ) 동안의 질량 변화로 인한 압력 변화량을 고려한 예상 압력으로, 다음과 같이 정의된다.

$$P_a' = \left[ P_a - \left( \frac{dP}{dm} \right)_a w_{flow} \Delta t \right] \quad (10)$$

$$P_1' = \left[ P_1 + \left( \frac{dP}{dm} \right)_1 (w_1 - w_{brk1}) \Delta t \right] \quad (11)$$

$$P_2' = \left[ P_2 + \left( \frac{dP}{dm} \right)_2 (w_2 - w_{brk2}) \Delta t \right] \quad (12)$$

또한, 각 Loop 에서의 파손 방출 유량인  $w_{brk1}$  과  $w_{brk2}$  도 공급되는 유량인  $w_1$ ,  $w_2$  와 연 관되며, 관계식은 다음과 같다.

$$w_{brk1} = \frac{P_1 + \left(\frac{dP}{dm}\right)_1 w_1 \Delta t}{R_{brk1} + \left(\frac{dP}{dm}\right)_1 \Delta t} \quad (13)$$

$$w_{brk2} = \frac{P_2 + \left(\frac{dP}{dm}\right)_2 w_2 \Delta t}{R_{brk2} + \left(\frac{dP}{dm}\right)_2 \Delta t} \quad (14)$$

여기서  $\frac{dP}{dm}$  항은 각 Loop에서의 질량 변화에 따른 압력 변화량을 나타내며,  $R_{brk}$  는 파손 부위에서의 저항으로 계통 압력의 파손 유량에 대한 비로 정의된다.

식 (13)과 (14)가 대입된 식 (11)과 (12)를 식 (7)과 (8)에 대입한 후 유량  $w_1$ 과  $w_2$ 에 대하여 정리하면 다음의 2차 방정식을 구할 수 있다.

$$A_1 w_1^2 + B_1 w_1 + C_1 = 0 \quad (15)$$

$$A_2 w_2^2 + B_2 w_2 + C_2 = 0 \quad (16)$$

여기서,

$$A_j = R_j \quad (17)$$

$$B_j = \frac{R_{brkj} \left(\frac{dP}{dm}\right)_j \Delta t}{R_{brkj} + \left(\frac{dP}{dm}\right)_j \Delta t} \quad (18)$$

$$C_j = P_j - P_i - \frac{P_j \left(\frac{dP}{dm}\right)_j \Delta t}{R_{brkj} + \left(\frac{dP}{dm}\right)_j \Delta t} \quad (19)$$

로,  $j$  (1 또는 2)는 Loop 1과 2를 나타낸다.

식 (15)와 (16)의 해인 유량  $w_1$ 과  $w_2$ 는 양수인  $A_j$ ,  $B_j$  와 음수인  $C_j$ 로부터, 다음과 같이 결정된다.

$$w_j = \frac{\sqrt{B_j^2 - 4 A_j C_j} - B_j}{2 A_j} \quad (20)$$

식 (20)은 식 (19)에서 보듯이 비상 급수 회로가 각 Loop으로 갈라지는 지점에서의 압력인  $P_i$ 를 상수로 포함하고 있다. 그러나  $P_i$ 는 식 (6)으로부터 얻어지는  $w_{flow}$ 에 따라 정해지고, 또한  $w_{flow}$ 는 식 (9)에서 처럼  $w_1$ 과  $w_2$ 의 합으로 제한된다. 따라서, 이러한 조건들을 만족시킬 수 있도록 반복 계산을 통하여 각 Loop으로 공급되는 유량을 계산한다.

### 2.3 중압 및 저압 계통

그림 2에서 보듯이 중압 및 저압 계통의 경우 고압 계통과의 차이는 비상 급수 펌프를 통하여 각 Loop의 헤더로 냉각수를 공급하는 점이다. 따라서 식 (6)은 다음처럼 바뀌게 된다.

$$P_s + \Delta P_{pump} - P_i = R_3 w_{flow}^2 \quad (21)$$

여기서  $P_s$ 는 비상 급수 펌프의 흡입 부분에서의 압력이고  $\Delta P_{pump}$ 는 펌프를 통한 압력 상승을 나타낸다. 그 외의 모든 관계식은 고압 주입 계통과 같으며, 유량을 구하는 과정도 유사하다. 다만,  $\Delta P_{pump}$ 는 공급되는 유량에 따라 펌프의 특성 곡선으로부터 결정되므로  $w_{flow}$ 에 따라 매번 바뀌며, 따라서 모든 조건이 만족될 때까지 반복 계산을 수행한다.

## 3. 급수량 예제 계산

2장에서 언급된 관계식을 근거로, 다양한 초기 조건에서 각 Loop로 공급되는 비상 급수 유량을 계산할 수 있는 독립 프로그램인 GENFS를 개발하였다. 이 프로그램은 ECC 물탱크의 초기 압력 (Pa), 각 Loop의 압력( $P_1, P_2$ ), 압력 손실 계수 ( $R_1, R_2, R_3$ ), 각 Loop에서의 질량 변화에 따른 압력 변화량 ( $(dP/dm)_1, (dP/dm)_2$ ), 그리고 파손 위치에서의 저항 계수 ( $R_{brk1}, R_{brk2}$ )를 코드의 입력으로 요구하며, 출력으로는 각 폐쇄회로로 공급되는 유량 및 수렴 기준을 만족하기 위한 반복 계산 횟수를 보여준다.

### 3.1 고압계통 급수유량 예제 계산

Loop 1과 Loop 2의 압력조건에 따라 각 Loop로 공급되는 급수 유량을 계산하기 위해 가장 간단한 경우로 급수량이나 방출량에 의한 압력 변화량을 무시하였다. 즉  $(dP/dm)$  항을 모두 0으로 가정하였다. ECC 물탱크의 압력을 4MPa(a)로 고정하고 가정한 압력 손실 계수 (R) 값 (1.095, 1.095, 3.408)을 사용하여, 대표적인 세 가지 경우에 대한 급수 유량 (w)을 프로그램 GENFS를 이용하여 분석, 정리하였다.

- 1)  $P_1 = 2 \text{ MPa}, P_2 = 2 \text{ MPa}; w_1=368.265 \text{ kg/s}, w_2=368.265 \text{ kg/s},$  계산반복횟수=13
- 2)  $P_1 = 3 \text{ MPa}, P_2 = 2 \text{ MPa}; w_1= 0 \text{ kg/s}, w_2=666.067 \text{ kg/s},$  계산반복횟수=11
- 3)  $P_1 = 2 \text{ MPa}, P_2 = 1 \text{ MPa}; w_1= 0 \text{ kg/s}, w_2=815.763 \text{ kg/s},$  계산반복횟수=11

1)의 경우 각 Loop의 압력이 동일하게 2 MPa일 때 비상 급수관이 나뉘어지는 위치에서의 압

력 ( $P_i$ )은 식 (6)에 따라 2.15124 MPa이 되고, 이 값이  $P_1$ ,  $P_2$ 보다 높으므로 Loop 1과 Loop2로 각각 368.265 kg/s의 유량이 공급된다. 이 유량은 2장의 관련된 관계식을 0.14% 오차로 만족시키며, 이를 위한 반복 계산의 횟수는 13회였다. 2)와 3)의 경우는 비상 급수가 한 쪽 Loop으로만 공급되는 월성 고유의 특성을 나타낸다. 2)의 경우  $P_i$ 는 2.48806 MPa이며, 이때  $P_1$ 은  $P_i$ 보다 높으므로 비상 급수는 Loop 2로만 공급되며, 유량은 666.067 kg/s이다. 3)의 경우도  $P_i$ 는 1.73208 MPa로 2)의 경우처럼 Loop 2로만 공급되며 유량은 815.763 kg/s이다.

다음에는 급수량과 방출량의 차이로 인한 계통의 재고량 변화로 생기는 압력 변화량 ( $dP/dm$ )이 유량 계산에 미치는 영향을 분석하였다. 예로 다음의 두 가지 경우에 대한 급수량을 계산하여 정리하였다.

4)  $P_1 = P_2 = 2$  MPa,  $(dP/dm)_{1,2}=1000$  Pa/kg,  $w_{brk1,2}=500$  kg/s;

$w_1=377.513$  kg/s,  $w_2=377.513$  kg/s, 계산반복횟수=12

5)  $P_1 = 2$  MPa,  $P_2 = 1$  MPa;  $(dP/dm)_2=500$  Pa/kg,  $w_{brk2}=1000$  kg/s;

$w_1= 0$  kg/s,  $w_2=824.128$  kg/s, 계산반복횟수=11

4)의 경우는 1)의 경우에  $(dP/dm)$ 과 방출 유량이 추가되었다.  $P_i$ 는 2.05722 MPa이고, Loop 1과 Loop 2의 예상 압력  $P'_1$ 과  $P'_2$ 는 식 (7)과 (8)에 따라 1.90117 MPa로 계산된다. 다시 식 (11)과 (12)로부터  $P'_1$ 과  $P'_2$ 를 구해보면 1.914016 MPa로 그 오차는 약 0.68%이다. 각 Loop의 초기 압력이 2 MPa이지만, 급수 계통에서 예측하는 압력은 방출량이 급수량보다 많아 약간 낮아진 약 1.9 MPa로 따라서 경우 1)보다 약 2.5% 많은 377.5 kg/s이 공급된다. 5)의 경우는 Loop 1과 Loop 2의 압력이 다르고, Loop 2에만  $(dP/dm)$ 과 방출 유량이 있다고 가정하였다. 식 (6)으로부터  $P_i$ 는 1.685331 MPa이고, 따라서 급수는 Loop 2로만 공급된다.

### 3.2 중/저압계통 급수량 예제 계산

중저압 계통으로부터의 급수량을 계산하기 위해 3.1에서처럼  $(dP/dm)$  항은 모두 0으로 가정하고, 펌프 입구 압력은 중압 계통인 경우 다우징 탱크의 높이에 의한 수두가 있지만 여기서는 1기압 (0.1 MPa)으로 가정하여 다음의 세 가지 경우에 대한 급수량을 계산, 정리하였다.

6)  $P_1 = 1.0$  MPa,  $P_2 = 1.0$  MPa;  $w_1= 34.286$  kg/s,  $w_2= 34.286$  kg/s, 반복횟수=10

7)  $P_1 = 0.5$  MPa,  $P_2 = 0.5$  MPa;  $w_1=174.117$  kg/s,  $w_2=174.117$  kg/s, 반복횟수=14

8)  $P_1 = 1.0$  MPa,  $P_2 = 0.5$  MPa;  $w_1= 0$  kg/s,  $w_2=317.508$  kg/s, 반복횟수=11

6)의 경우 각 Loop의 압력이 1 MPa일 때 펌프를 통한 총 예상 급수량은 68.572 kg/s 이다. 이때 ECC 펌프로부터의 압력 상승은 펌프 데이터로부터 약 0.91723 MPa이며, 식 (21)로부터 계산되는  $P_i$ 는 1.001205 MPa이다. 식 (11), (12)로부터 역 계산한  $P_1$ 과  $P_2$ 는 0.9999176 MPa로 초기 조건인 1 MPa과 약 0.008% 차이로 예상 급수량이 관계식들을 만족시키고 있음을

알 수 있다. 7)의 경우에는 각 Loop의 압력을 0.5 MPa로 낮춘 경우로, 총 예상 유량은 348.234 kg/s이다. 이 때의 펌프 상승 압력은 0.853483 MPa로 계산되며,  $P_i$ 는 0.540205 MPa이다. 8)의 경우에는  $P_1$ 과  $P_2$ 가 서로 다른 경우로 예상 유량 317.508kg/s가 모두 Loop 2로 공급된다. 이때의 펌프로 인한 압력 상승은 0.86232 MPa이며,  $P_i$ 는 0.618752 MPa로,  $P_i$ 가  $P_1$ 보다 낮으므로 Loop 1으로는 급수가 공급될 수 없다.

#### 4. 결론

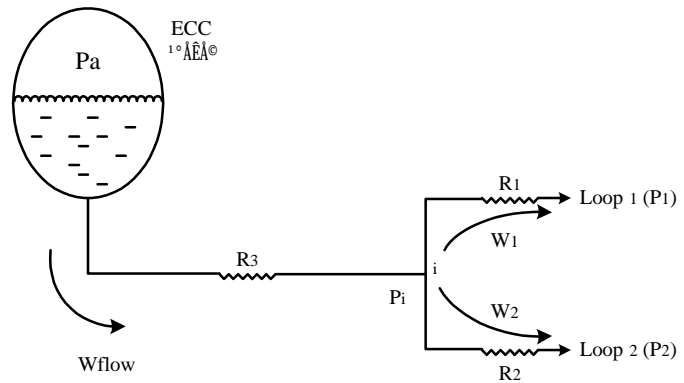
독립 프로그램을 개발하여 여러 가지 초기 조건에 따라 월성발전소에서의 고압 및 중/저압 계통의 비상 급수 유량을 예측하였다. 반복 계산의 수렴 기준 값에 따라 예측된 독립 모듈로부터의 유량은 관련된 식들을 1% 내외로 잘 만족시키며, 다양한 초기 조건에서도 급수 유량을 계산하고 있다. 이러한 능력은 월성발전소의 중대사고 해석시 가장 중요한 완화기능의 하나인 ECCS 계통을 정확하게 모사하는데 필요하다. 다만, 이 논문에서 분석된 예제 계산에서의  $dP/dm$  값은 코드의 일반성을 특성을 나타내기 위하여 급수량 및 방출 유량과는 무관하게 임의로 가정된 값이 사용되었다. 그러나 이 모듈이 연결된 전체 사고해석 프로그램인 ISAAC에서는 월성 발전소의 급수량 분석을 위해 모든 정보가 프로그램 안에서 서로 연결되어 일관성 있게 변수 값을 계산하고 있고, 고압 및 중/저압 계통으로부터의 유량 계산의 입력에 대한 검증 작업이 진행 중에 있다.

#### 감사의 글

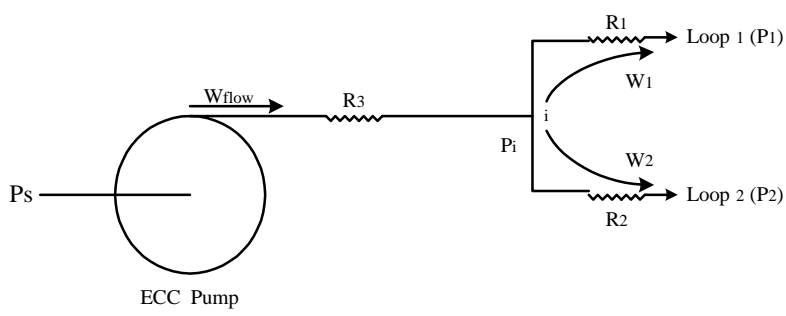
본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. "가압 중수로형 원자력 발전소의 2단계 PSA를 위한 전산코드 개발," KAERI/RR-1573/95, 한국원자력연구소, 1995.12
2. "가압 중수로 원전 2단계 확률론적 안전성 평가," 최종보고서, TR.93NJ10.97.67-2, 전력 연구원, 1997.8



±x<sub>s</sub> ≈ 1. °i³DÄÖÄÖ°èÄë °³. «μμ



±x<sub>s</sub> ≈ 2. Áß³D ¹× Äú³D ÄÖÄÖ°èÄë °³. «μμ