

월성 2,3,4호기 비상급수계통 성능평가에 관한 연구

오광석, 김창호, 이증섭, 김선철, 오종필
한국원자력연구소

요 약

CANDU-6형 원자력발전소인 월성 2,3,4호기 비상급수계통의 성능을 평가하기 위하여 설계기능 수행과 관련된 변수로서 격납건물내 집수조(sump) 온도와 열수송계통으로 주입되는 냉각재온도를 사용한 분석을 수행하였다. 이 온도들은 NTU(Number of Transfer Unit)방법을 이용한 비상노심 냉각계통 열교환기의 열전달속도와 열전달계수의 해석을 열평형관계식과 함께 조합한 프로그램을 사용하여 계산하였다. 또한 증기발생기 급수량과 추후 수조에 공급되는 보충수에 대한 설계요건을 검토하였다. 이러한 변수와 설계요건은 비상급수계통이 발전소 정상 열제거기능 상실후 노심의 붕괴열제거에 유효한 열침원으로서의 기능을 수행함을 보여 주었다. 또 격납건물의 건전성 유지와 관련된 집수조내 최고온도가 허용치 이하로 유지되었다.

1. 서 론

비상노심냉각계통(ECCS)은 냉각재상실사고(LOCA)후 원자로 노심의 잔류열과 붕괴열(decay heat)을 제거하도록 설계되어 있다. 냉각재상실사고후 3개월간 운전이 요구되는 비상노심냉각계통의 운전중에 발생가능한 common mode event중 부지설계지진(Site Design Earthquake, SDE)은 월성 2,3,4호기의 안전설계에 고려되고 있다. 부지설계지진은 정상 열제거기능의 상실을 야기하므로 비상급수계통(EWSS)은 정상 열제거기능의 상실후 붕괴열 제거에 충분한 열제거 능력을 제공하도록 설계된 계통이다.

냉각재상실사고후 24시간 이내에는 부지설계지진의 발생가능성이 확률적으로 매우 낮으므로, 본 논문에서는 냉각재상실사고후 24시간이 지난 후 부지설계지진이 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 냉각재상실사고는 하나의 발전소에서만 발생하고 다른 발전소는 보수적 계산을 위해 부지설계지진이 발생할 때까지 100% 출력 운전상태로 가정되었다. 부지설계지진이후 저압 비상노심냉각계통 열교환기 2차측의 냉각순환계통과 증기발생기 급수계통의 기능상실이 예상되어 붕괴열 제거를 위해 정상 냉각계통과는 독립된 비상급수계통의 비상급수가 공급된다.

비상급수계통 수조로부터 비상노심냉각계통 열교환기로 공급되는 급수는 수조로 재순환된다. 노심내 붕괴열은 열수송계통으로 부터 방출되는 유체에 의해 격납건물의 집수조에 전달되어 집수조내 온도를 상승시킨다. 이러한 열은 열교환기를 통해 비상급수계통의 수조에 전달되어 다시 수조 온도를 상승시킨다. 수조표면에서는 대기와의 열전달에 의해 냉각이 이루어진다.

본 논문은 이러한 과정을 간단한 열평형 방정식으로 모델링한 computer program을 통하여 열교환기의 출구 및 입구온도의 천이 과정을 얻었다. 냉각재상실사고에 이은 부지설계지진 이후 핵연료 냉각, 격납건물 건전성 및 비상급수계통의 설계기능수행을 평가하기 위하여 주요 인자인 열수송계통에 공급되는 저압 비상노심냉각계통 온도, 격납건물내 집수조 온도 및 비상급수계통 수조 온도의 천이거동을 알아보았다. 열교환기의 열평형관계는 NTU방법으로 모델링되었다.

냉각재상실사고에 이은 부지설계지진 이후 증기발생기에 필요한 비상급수유량과 추후 요구되는

수조보충수의 설계요건의 평가를 통해 현재 월성발전소 설계요건의 타당성을 검토하였다. 또한 비상노심냉각계통 열교환기의 2차측 냉각수 유량증가에 따른 천이온도의 변화를 통해 최소 요구유량을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 비상급수계통(EWSS)의 사고후 운전요건 및 거동

비상급수계통은 월성 1호기와 2호기, 3호기와 4호기가 서로 공유하며 최대 급수공급 요구량은 냉각재상실사고후 발생한 부지설계지진(LOCA+SDE)이후에 요구된다. 부지설계지진의 발생에 따라 증기발생기 급수공급과 저압 비상노심냉각계통의 열교환기 냉각순환계통이 기능을 상실한 후 비상급수공급이 요구되는 곳은 아래와 같다.

2.1.1 증기발생기의 비상급수 공급

열수송계통의 순환이 유지되는 한 증기발생기는 붕괴열을 제거하기 위한 장기간의 열침원으로 써 기능을 수행한다. 증기발생기의 주 급수펌프와 보조펌프는 각각 Class IV 와 Class III의 전원을 공급받는다. 부지설계지진의 발생은 이 펌프의 공급 전원 상실과 급수공급 배관의 파손이 예상되므로 주급수 및 보조급수의 상실이 야기된다. 이 경우 비상급수공급계통은 증기발생기에 독립적인 급수를 공급한다.

2.1.2 ECC 열교환기 2차측의 비상급수 공급

비상급수계통은 장기간의 비상노심냉각계통을 운전하는 동안 비상노심냉각계통의 열교환기 2차측에 공급되는 순환냉각수계통을 backup하는 기능을 수행한다. 부지설계지진으로 인한 순환냉각계통의 상실은 failed loop의 붕괴열을 제거하기 위하여 비상노심냉각계통의 열교환기 2차측에 비상급수의 공급을 요구한다.

2.2 열교환기의 모델링과 열평형 방정식

2.2.1. NTU 방법을 이용한 비상노심냉각계통 열교환기의 모델링

- 열전달속도방정식

$$Q = C_{\min} \varepsilon (T_{hi} - T_{ci}) \quad (1)$$

여기서, Q : 열전달속도

- Heat Transfer Effectiveness Term

$$\varepsilon_n = \frac{C_{hx}(T_{hi} - T_{ho})}{C_{\min}(T_{hi} - T_{ci})} = \frac{C_s(T_{co} - T_{ci})}{C_{\min}(T_{hi} - T_{ci})} \quad (2)$$

여기서, ε_n : 효율, T_{ci} : cold side inlet temperature, T_{hi} : hot side inlet temperature, T_{co} : cold side outlet temperature, T_{ho} : hot side outlet temperature,

- 열교환기 열전달 단위수(Number of Exchanger Transfer Unit)

$$NTU = \frac{A U_{ave}}{C_{min}} = \frac{1}{C_{min}} \int_0^A U dA \quad (3)$$

- 여기서, NTU : 열전달 단위수, A : 전체 열전달 표면적, U_{ave} : 평균전체열전달계수
 ◦ 열전달계수

$$U = \left[\frac{1}{h_{hx}} + \frac{\Delta X_w}{k_w} + \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f} \right]^{-1} \quad (4)$$

- 여기서, h : 열전달계수, k : 열전도도, ΔX : tube 두께, η : 온도효율, A : 열전달 표면적
 아래첨자 hx는 열교환기의 hot side, c는 열교환기의 cold side, w는 열교환기의 벽(hot/cold interface), f는 fouling을 각각 의미한다.

- Film 열전달계수

$$h = \frac{k}{k_d} \left(\frac{m/\mu}{(m/\mu)_D} \right)^{0.65} \left(\frac{\mu/k}{(\mu/k)_D} \right)^{0.4} h_D \quad (5)$$

2.2.2 수조표면에서의 냉각속도 방정식

$$H = 75 \times (1 + 0.1W) \times (V_w - V_a) + (1.8 + 0.12W) \times (T_w - T_a) - H_s \quad (6)$$

- 여기서, W: 기상보고에 의한 바람속도, V_w : 수조온도에서의 평형증기압,
 V_a : 대기중의 수분기의 부분증기압, T_w : 수조온도, T_a : 대기온도,
 H_s : solar heat gain rate

2.2.3 CANDU Channel Decay Power

CANDU 발전소의 원자로 정지후 channel decay heat를 얻기 위해 ORIGEN Program 을 이용한 해석이 수행되었으며 ^{235}U decay heat에 대해 만족스러운 결과를 얻었다. 본 논문은 여기서 얻어진 decay heat 곡선을 table 화시켜 사용하였다.

2.2.4 비상노심냉각계통 열교환기의 해석 및 증기발생기에 요구되는 유량해석

냉각재상실사고후 원자로 노심에서 발생하는 열은 두개의 열제거 매체에 의해 제거된다. failed loop에서는 ECC 열교환기에 의해 열이 제거되며 intact loop에서는 증기발생기에 의해 열이 제거된다. 그림 1은 decay heat의 열흐름을 보여주며 이러한 과정을 해석하기 위해 Fortran program 을 사용하였다.

- 비상노심냉각계통의 열교환기를 통한 열제거

$$QH_{X,i} = C_{min} \epsilon (T_{sum,j,i} - T_{rev,i}) \quad (7)$$

- 여기서 $T_{sum,j,i}$: time step i에서 격납건물내 집수조 온도
 $T_{rev,i}$: time step i에서 비상급수계통 수조의 온도

- 증기발생기를 통한 decay heat 제거

$$M_{s/g} = \frac{D_{decay}}{(HHU + HL)} \quad (8)$$

여기서 HHU : 비상급수를 그 온도에서 boiling point까지 상승시키는데 필요한 엔탈피,
HL : 그 급수의 잠열, M_{sg} : 증기발생기에서 요구되는 유량

2.3 결과 및 논의

2.3.1. 비상노심냉각계통 열교환기의 온도 천이 곡선의 해석

그림 2는 열교환기의 hot side 입구 및 출구 온도의 시간에 따라 변화를 보여준다. LOCA 이후 78시간에 입구온도는 최고 148 °F까지 상승하며 출구온도는 최고 144.5 °F까지 상승한 후 감소함을 보여준다. 이러한 온도변화는 원자로노심내 붕괴열의 시간에 따른 감소율과 열교환기를 통한 열전달 속도 감소율의 차이 때문이다.

그림 3은 열교환기의 cold side 입구와 출구의 온도변화를 보여준다. 열교환기 cold side 입구 온도는 EWS 수조온도를 나타내며 LOCA후 86시간에 최고 약 132.2 °F까지 도달함을 보여준다. 이러한 온도변화는 열교환기의 열전달 속도에 직접적으로 영향을 주어 열전달속도는 시간에 따라 감소한다.

LOCA+SDE 이후에 2120 Igpm의 비상급수공급시 예상되는 최고 저압 ECC 주입 온도는 144.5 °F이다. 이 온도는 저압 ECC 주입단계에서 순환냉각계통에 의해 열교환기가 냉각될 때 예상되는 최고온도인 120 °F보다 높지만 같은 시간에서 안전해석결과 핵연료냉각이 성공적으로 이루어지는 것으로 평가된 152 °F보다 낮다. 따라서 2120 Igpm의 비상급수공급에 의한 장기 핵연료냉각은 수용가능한 것으로 평가된다. 또한 격납건물 건전성에 관련되는 집수조온도가 허용치인 최고 150 °F보다 낮은 148 °F까지 상승하므로 격납건물의 건전성유지에 타당한 것으로 검토되었다.

2.3.2. 비상급수유량 증가에 따른 격납건물내 집수조 온도의 변화

현재 월성발전소의 비상급수계통에 설치되어 있는 펌프의 개수는 3개로 LOCA+SDE 발생후 이중 두개가 사용된다. 그림 4는 집수조온도가 열교환기 2차측 유량의 증가에 따라 감소하는 것을 보여준다. 표 1은 열교환기의 2차측 공급유량의 증가에 따른 집수조내 최고온도를 나타낸다.

표 1. 비상급수유량 증가에 따른 격납건물내 집수조의 최고온도의 변화

Flow Rate (Igpm)	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
Max. Temp. (Deg.F)	154.1	152.1	150.5	149.2	148.1	147.1	146.3	145.6

열교환기로의 공급유량이 1950 Igpm이상 공급되어야 집수조의 최고온도가 허용치 이하로 유지됨을 알 수 있다. 이는 설계요건인 2120 Igpm 보다 낮으므로 기존 설계요건은 타당한 것으로 평가된다.

2.3.3 증기발생기에 요구되는 유량에 대한 고찰

그림 5는 LOCA후 SDE 발생 시에 LOCA Unit 와 Non-LOCA Unit 의 증기발생기에서 붕괴열

제거를 위해 요구되는 유량의 시간에 따른 변화를 보여주고 있으며 붕괴열의 시간에 따른 감소에 의하여 요구되는 유량이 시간에 따라 감소됨을 보여준다. 상기 두 Unit에 동시에 요구되는 유량은 비상급수시스템의 한 개의 펌프에 의해 가동되는 유량 ($1500 \text{ Igpm} = 7.5 \times 10^5 \text{ lb/hr}$)보다 작다.

2.3.4. 비상급수시스템 수조의 추후 보충에 관한 요구사항에 대한 평가

월성발전소의 비상급수시스템의 설계에서는 LOCA후 SDE 발생 시에 LOCA 후 5일 이내에 $6.0 \times 10^4 \text{ lb/hr}$ 의 용수 보충을 요구한다. LOCA후 SDE 발생 시에 LOCA 및 Non-LOCA Unit의 증기발생기로의 급수공급은 수조내 급수량을 감소시킨다. 본 논문에서 고려한 시간(LOCA후 10일) 동안에 수조내 급수량의 감소는 비상급수가 열침원으로써 그 기능을 수행하는 데 영향을 주지 않는다.

따라서 비상급수시스템 설계에서 요구하는 급수보충시간이 본 논문에서 고려한 시간 이내이고 그 보충 유량이 증기발생기로의 공급요구량($4.5 \times 10^4 \text{ lb/hr}$)보다 많으므로 LOCA후 5일 이내의 $6.0 \times 10^4 \text{ lb/hr}$ 유량 보충은 추후 계속되는 증기발생기로의 급수공급에 의한 수조내 급수량 감소를 보충하기에 충분하다.

3. 결 론

본 논문에서 수행한 비상급수공급시스템의 설계기능을 해석을 통해 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

가. 냉각재상실사고후 발생한 부지설계지진 이후에 예상되는 최고 냉각재주입온도는 $144.5 \text{ }^\circ\text{F}$ 로 안전해석 결과 핵연료냉각이 성공적으로 이루어지는 온도인 $152 \text{ }^\circ\text{F}$ 보다 낮으나 저압 비상노심냉각시스템에 의해 주입될 때 예상되는 최고온도인 $120 \text{ }^\circ\text{F}$ 보다는 높다.

나. 격납건물의 건전성을 유지하기 위한 질수조 온도는 최대 허용치인 $150 \text{ }^\circ\text{F}$ 이내로 유지되어야 하며 이때의 열교환기 2차측의 최소유량은 1950 Igpm 이다. 이는 기존설계유량보다 작으므로 설계요건은 타당한 것으로 평가된다.

다. 냉각재상실사고후 10일 동안 수조내 급수량의 감소에 의한 열제거능력은 저하되나 핵연료냉각과 격납건물의 건전성에는 영향을 주지는 않는다.

4. 참고문헌

- [1] Frass, A.P., and M.N.Ozsisik, " Heat Exchanger Design", New York, John Wiley, 1965
- [2] A. Keith Escoe, " Mechanical Design of Process System", Gulf Publishing company
- [3] Kays, William M. and A.L.London, " Compact Heat Exchangers", Third Edition, Mcgraw-Hill Book Company, New York, 1984
- [4] J.W.Langhaar, " Cooling Pond May Answer Your Water Cooling Problem", Aug. 1953, Chemical Engineering, P.194-198
- [5] A.C.Wittier, D.W.Black and C.R.Boss, " CANDU Channel Decay Power", AECL-5704, SPRC, Jan., 1977
- [6] M.L.Goel, " CANDU 600 Emergency Water Supply Reservoir Make-Up Requirements", 50-T-108, Jan., 1984

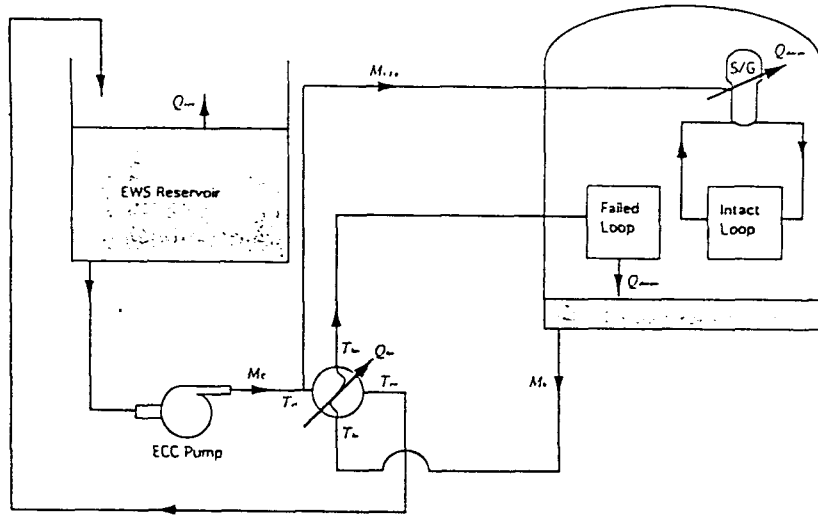


Fig. 1. Schematic diagram showing the removal process of the decay heat

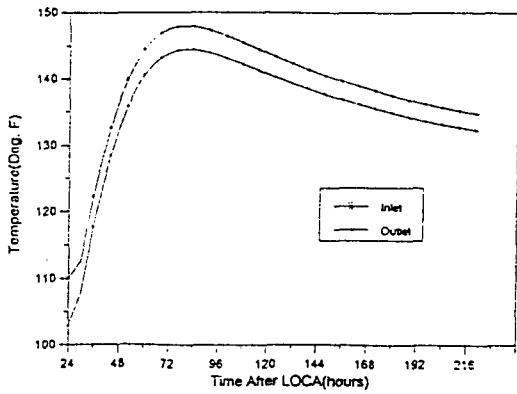


Fig. 2. Change of the hot side inlet temperature (sump temperature) and outlet temperature (PHT injection temperature) in heat exchanger

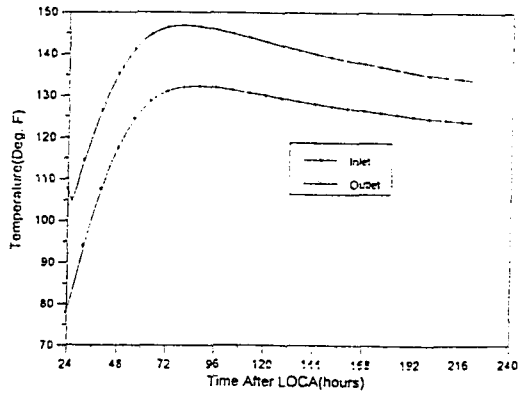


Fig. 3. Change of the cold side inlet temperature (reservoir temperature) and outlet temperature in heat exchanger

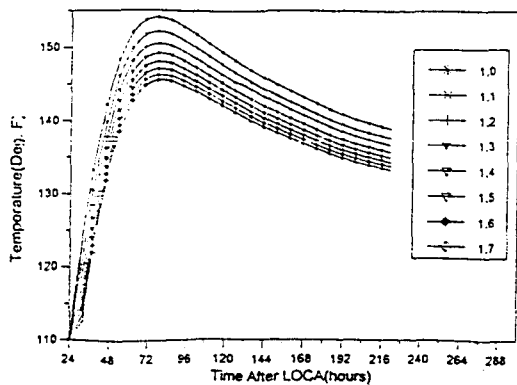


Fig. 4. The temperature variation of the water injected into Primary Heat Transfer system with increasing emergency water flow rate (the number in the legend mean the multiple number for the flow rate developed by one EWS pump)

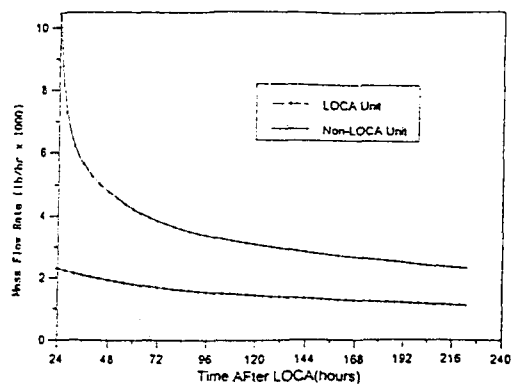


Fig. 5. The flow rate required to the steam generators in LOCA unit and Non-LOCA