

## 가압기 밀림배관 열성층 영향 평가

이성호, 정백순

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요약

원자력발전소 가압기 밀림배관은 원자로냉각재계통 압력을 제어하는 기능을 가진 가압기와 원자로냉각재계통을 연결하는 ASME 1등급 기기로서 건전성 확보가 필수적이다. 그러나 현재 운전중인 국내·외 원전의 가압기 밀림배관은 설계시 열성층화(Thermal Stratification) 현상 발생 뿐만 아니라 동 현상이 배관 건전성에 미치는 영향이 전혀 고려되지 않아, 본 연구에서는 국내 운전중인 원전 가압기 밀림배관에서 발생하는 열성층화 정도를 확인하고, ASME 코드에 입각한 평가방법론을 정립, 설계조건과 운전조건에 대한 평가를 수행함으로써 건전성에 미치는 영향을 평가하였다.

### 1. 서론

원자력발전소 가열, 고온대기, 기동, 출력운전, 정지 및 냉각등 정상운전 범주에서의 과도운전 상태에서 주급수계통 및 원자로냉각재계통과 연결된 수평배관 내에 고온유체와 저온유체가 층을 이루어 존재하는 열성층화 현상이 발생하고 이에 따라 설계시 고려하지 않았던 추가적인 열응력이 배관에 가해져 건전성에 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 더욱이 미국 NRC (Nuclear Regulatory Commission)에서는 Bulletin 88-08을 고시하여 기존 원전뿐 만 아니라 설계중인 원전에 대해서 상기의 배관들을 대상으로 열성층화 현상의 존재여부 검토 및 평가를 수행하여 배관의 건전성을 확인하고, 설계수명 중의 건전성 유지방안을 마련토록 하였으며, 특히 가압기 밀림배관에 국한한 열성층화 현상에 대해서는 NRC Bulletin 88-11에 고시하여 건전성 평가를 수행할 것을 요구하였다. 본 연구에서는 가압기 밀림배관에 열성층 현상이 발생할 수 있는 조건들을 고찰하였고, 배관 건전성에 미치는 영향을 평가하기 위한 방법론을 정립하였으며, 고리4호기 운전중 발생하는 열성층 데이터 및 각종 주요 운전변수를 취득하여 ASME 코드에 근거한 해석을 수행함으로써 건전성을 확인하고자 하였다.

### 2. 가압기 밀림배관에서의 열성층화 현상 발생조건 고찰

일반적으로 배관에서의 열성층화 현상 발생은 수평부분이 비교적 길고, 교차되는 양 끝단 유체간의 온도차가 크며, 특히 배관내 유체의 유동속도가 느린 등의 여건이 복합적으로 조성되었을 때 발생하게 된다. 한편 가압기 밀림배관은 수평부분의 길이가 약 15m이며, 증기에 의한 압력저어로 전환하는 운전과정에서 가압기측과 원자로냉각재계통 간의 온도차가 발생하게 되고, 이때

가압기내 계통수의 온도상승에 따른 열팽창분과 기본 분사량(약 1gpm)만이 존재하여 유량은 매우 적으므로 발전소 운전모드 중 상기 운전상황에서는 열성층화 현상이 발생할 확률이 매우 높을 것으로 여겨진다.

### 3. 가압기 밀림배관의 건전성평가 기준 정립

#### 3.1 건전성 평가 체계 및 기준

ASME 1등급으로 분류된 가압기 밀림배관에 대한 응력해석 및 건전성 평가는 ASME Sec.Ⅲ NB-3600(배관 설계 관련) 규정을 따라 수행하며, 그 흐름도를 Fig. 1 에 표시하였다.

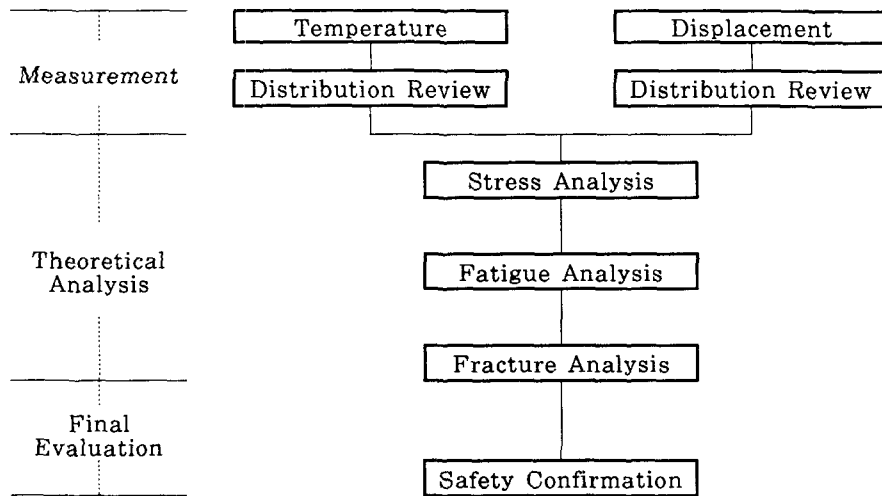


Fig. 1 Flow chart to evaluate the integrity of PZR Surge Line

#### 3.2 온도 및 변위 분포 측정 및 분석

가압기 밀림배관에서의 상하부 온도차 및 변위를 실측하고, 동시에 발전소 주요 운전변수를 취득하여 시간에 따른 열성층데이터 및 운전조건 변화자료를 확보·분석하고, 이를 배관 모델링시 기준자료와 입력데이터로 활용하며, 주요절점에 대한 분석결과는 응력해석·피로해석에 사용한다.

#### 3.3 응력해석

응력해석용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 가압기 밀림배관을 모델링하고 설계자료 및 열성층 데이터를 입력하여 결과를 도출한후 이를 설계조건과 운전조건에 대해 ASME Sec.Ⅲ NB-3600내에 있는 배관관련 공식의 변수로 사용하여 코드에서 요구하는 조건들을 만족시키는지 여부를 확인한다.

설계조건에 대한 해석. 설계하중에 따른 일차응력강도가 NB-3652에서의 다음 (1)식을 만족하는지 확인한다.

$$B_1 \frac{PD_o}{2t} + B_2 \frac{M_i D_o}{2I} \leq 1.5 S_m \quad (1)$$

$B_1, B_2$  : 일차응력강도 지수(Indices), NB-3680에 명시

$P$  : 설계압력 (MPa)

$D_o$  : 배관의 외경 (mm)

$t$  : 공칭벽두께 (Normal wall thickness : mm)

$S_m$  : 허용 설계응력강도치 (MPa)

$M_i$  : 설계상의 기계적 하중의 조합에 따른 합성모멘트(N·m)

배관의 주요 위치에서 ANSYS를 이용하여 모멘트(배관, 단열재, 유체의 자중 및 배관의 설계 압력을 고려하여야 함)를 계산하고, 이를 상기 (1)식에 대입하여 이 요구조건을 만족시키는지 여부를 판단한다.

운전조건에 대한 해석. 운전조건에서 일차 및 이차 합응력 강도치의 범위치인  $S_n$ 을 가지고 다음 (2)식의 관계를 검토한다

$$S_n = C_1 \frac{P_o(\tau) D_o}{2t} + C_2 \frac{D_o(\tau) M_i(\tau)}{2I} + C_3 E_{ab} | \alpha_a T_a - \alpha_b T_b | \leq 3 S_m \quad (2)$$

$C_1, C_2, C_3$  : 각 부품에 대한 이차 응력지수, NB-3680에 명시

$D_o, t, I, S_m$  : 앞의 (1)식에서와 동일

$M_i$  : 전후 하중단계에서 모멘트 차의 합성치로 반복성이 없는 자중은 제외

$T_a(T_b)$  : 구조 또는 재료의 불연속성에 따른 a, b 지점의 평균온도차

$\alpha_a(\alpha_b)$  : 상온에서 불연속성에 따른 a(b) 지점의 열팽창 계수

$E_{ab}$  : 상온에서 a, b 지점의 평균 영률 (MPa)

$P_o$  : 운전압력 범위 (MPa)

여기서도 (1)식에서와 유사하게 ANSYS를 이용하여 압력 및 열하중에 따른 모멘트를 구하고 이를 (2)식에 대입하여 합응력 강도 범위치  $S_n$ 을 구한다.

### 3.4 피로해석

누적 피로계수 평가. 본 배관의 피로평가는 ASME Sect.Ⅲ NB-3600에서 제시하는 다음의 첨두응력 강도 범위치(peak stress intensity range,  $S_p$ ) 관련식을 이용하여 수행한다

누적 피로계수를 계산하기 위해서는 아래의 (3)식을 이용하여 교변응력( $S_{alt}=1/2S_p$ )을 계산하고, 배관재질에 해당하는 S-N 곡선을 이용하여 피로파괴가 일어나는 값(N)을 구하며, 실제 발생횟수(n)를 고려하여 각 하중 싸이클에 대한 피로계수를 구하여 합산한다. 이 합산된 누적 피로계수가 1.0이면 피로파괴가 발생하는 것으로 간주한다.

$$S_p = K_1 C_1 \frac{P_o(\tau) D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o(\tau) M_i(\tau)}{2I} + \frac{1}{2(1-\nu)} K_3 E_a | \Delta T_1 | + K_3 C_3 E_{ab} | \alpha_a T_a - \alpha_b T_b | + \frac{1}{1-\nu} E_a | \Delta T_2 | \quad (3)$$

$K, C$  : 표 NB-3681(a)에 제시된 지수(indices)

$P_o(\tau)$  : 운전압력 진폭으로서 시간( $\tau$ )의 함수

$M_i(\tau)$  : 모멘트 합인 범위치(resultant range of moment)로서 시간의 함수.

$D_o$  : 외경,  $t$  : 두께,  $I$  : 관성모멘트,  $E$  : 영률.

$E_{ab}$  : 상온에서 구조적 혹은 재료의 불연속이 있는 경계 양쪽에서의 평균영률

$T_a(T_b), \alpha_a(\alpha_b)$  : 구조적 혹은 재료의 불연속 경계 양쪽에서의 온도, 열팽창률

$| \Delta T_1 |$  : 배관 내외 벽면의 선형온도 진폭의 절대치

$| \Delta T_2 |$  : 배관 단면의 비선형 온도구배 진폭의 절대치

#### 4. 열성층 데이터의 취득 및 분석

응력해석을 위해 필요한 온도 데이터는 고리 4호기 동 배관에 RTD센서를 부착하고, 특수 설계·제작 및 설치한 DAS을 이용하여 발전소 가열, 고온대기, 기동, 출력상승 및 냉각운전 중에 취득하였으며, 발전소 주요 운전변수는 온도 데이터와는 별도로 주제어실에 설치되어 있는 운전 지원전산시스템(OACS)을 이용하여 취득 하였다. 본 시스템의 구성도와 RTD 부착 현황을 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 표시하였다.

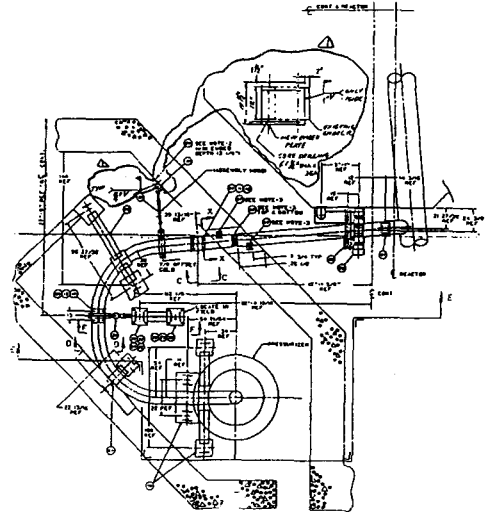
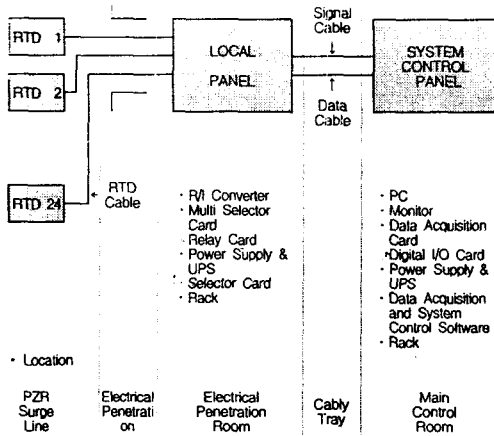


Fig. 2 Architecture of Data Acquisition System

Fig. 3 RTD Sensor installation

위의 시스템을 이용하여 10주기 운전을 위한 가열운전 중 취득한 온도데이터 가운데 가장 큰 상하부 온도차(107.3℃)가 실측된 지점에서의 온도 변화추이를 Fig. 4에 표시하였으며, 원자로 냉각재 온도가 23℃에서 292℃까지 변화하는 70시간 동안 1분 간격으로 취득한 것이다. 이 온도분포 곡선으로부터 운전상황을 분석하면 다음과 같다.

발전소는 가압기 만수위 상태에서 화학 및 체적제어계통을 이용하여 원자로냉각재계통의 충전 유량 및 취출유량이 조절하므로써 냉각재 계통 압력이 25-26kg/cm<sup>2</sup>로 유지되고 있었으며, 고온관 및 가압기측 온도는 약 90℃로 유지되고 있었다.

원자로냉각재계통의 가열에 따른 열팽창에 의한 체적변화를 수용하며, 또한 동 계통의 압력을 가압기를 이용하여 제어하기 위해서는 만수위 상태의 가압기 수위를 정상운전수위로 감소시켜야 하는데, 이를 위해 배관 상하부간 최대온도차가 발생한 시점으로부터 약 10시간 전에 가압기의 가열기를 가동하여 원자로냉각재계통과는 별도로 가열기를 단독으로 가열시키기 시작하였다. 이로 인해 가압기내의 냉각재 온도가 점차적으로 상승하여 열팽창되며 여기에 기본 가압기 분사유량(약 1gpm)이 더하여져 밀립배관내에 유량이 형성되므로 동 지점의 Top부분의 온도가 점차로 증가하게 되었다. 한편 고온관측, 즉 원자로냉각재계통은 90℃ 정도로 유지, 제어되고 있어 고온관과 가압기와의 온도차가 점차로 커지게 되고 결국, 가압기 상부에 증기부가 형성되어 원자로냉각재계통에 대한 압력제어가 가능하게 된 시점에서는 가압기는 압력 25-26kg/cm<sup>2</sup>에 대한 포화온

도인 230℃근처에서 유지되며, 고온관측은 90℃로 유지되므로 인해 밀림배관 양단의 온도차가 140℃이상 나게 되었고 배관 길이방향으로의 가운데 지점에서는 최대 107.3℃의 상하부간 온도차가 발생하는 것을 확인하였다.

이 시점 이후 약 1시간에 걸쳐 가압기의 수위를 감소시키기 위한 운전을 수행하였으며 Out Surge 동안 Top부분의 온도는 변화가 거의 없는 반면에, Bottom부분에서의 온도는 급격하게 증가되어 그 온도 차이가 20℃ 내외까지 줄어들었으며 25%에서의 자동 수위제어 과정에서 3%의 수위상승 과도상태를 겪으면서 Insurge 발생에 의해 온도차가 다시 증가하였다. 이후 냉각재 계통의 가열에 따른 고온관측 온도상승으로 인해 Bottom의 온도가 증가하게 되었고 상하부 온도차가 감소되는 과정을 겪었으며, 그 이후 292℃까지의 압력, 온도 상승과정과 고온대기 안정상태에서는 온도차가 최대 65℃ 이내로 유지되는 것으로 분석되었다.

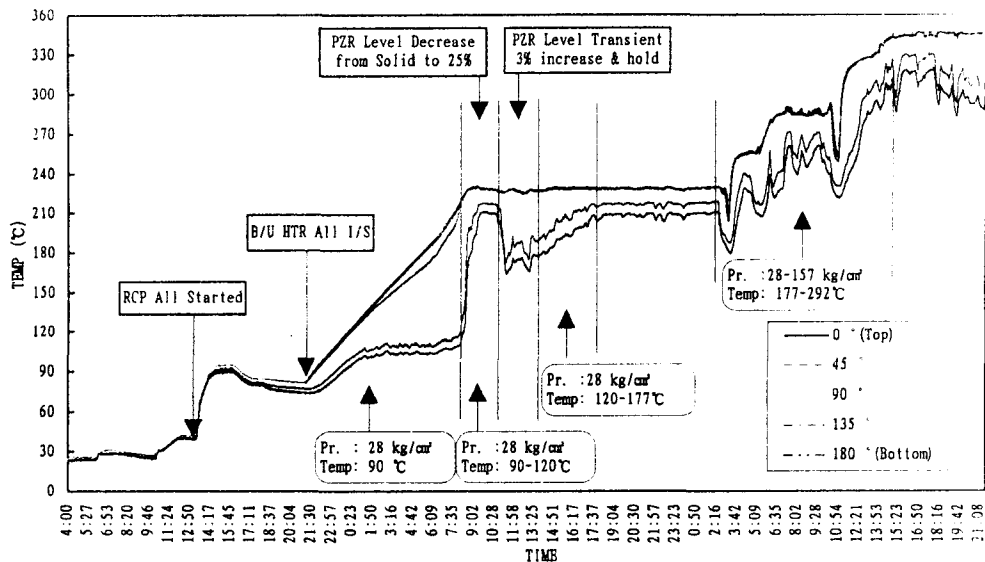


Fig. 4 Temperature Distribution

## 5. 응력해석 수행 및 결과

가압기 밀림배관을 ANSYS 프로그램을 이용하여 3차원으로 모델링한 후 다음 각 조건에 대해 해석을 수행하기 위한 모멘트값을 계산하였으며, ASME 코드에서의 요구조건 만족여부에 관한 결과를 도출하였다.

### 5.1 설계조건에 대한 해석

압력 2500 psi, 온도 650°F의 설계조건에 대한 ANSYS 해석결과는 가압기측 노즐 하부에서 최대 합성모멘트 값을 나타내었으며, 식(1)의 좌변항의 결과가 17.073ksi로 계산되어 1.5 S<sub>m</sub>값인 30.75ksi 이하조건을 충분히 만족시켰다.

### 5.2 운전조건에 대한 해석

가열, 압력 355.56psi, 상하부 최대 온도차 195°F의 가열운전 조건에서의 ANSYS 해석결과, 배관에 설치된 두 개의 hanger중 가압기 측에 있는 hanger 지점에서 최대의 모멘트차 합성치

값을 나타내었으며, 식(2)의  $S_n$ 값이 31.92ksi로 계산되어  $3S_m$ 인 61.5ksi이하 조건을 만족시켰다.

고온대기. 압력 2234 psi, 상하부 최대 온도차 117°F의 가열 종료시점과 고온대기의 과도조건에서 ANSYS 해석결과 가압기측 노즐에서 최대의 모멘트 차 합성치를 나타내었으며, 식(2)의  $S_m$ 값이 34.84ksi로 계산되어  $3S_m$ 인 61.5ksi 이하 조건을 만족시켰다.

### 5.3 피로기여도 평가

가열. 가열조건에 대한 Design Transient상의  $n$ 값과 S-N곡선 상에서  $S_{alt}(1/2S_p)$  인 21.43ksi에 대한  $N$ 값을 비교한 결과 피로기여도는  $5.26 \times 10^{-5}$ 으로 평가 되었다.

고온대기. 가열 종료시점과 고온대기 조건에 대한 Design Transient상의  $n$ 값과 S-N곡선 상에서  $S_{alt}(1/2S_p)$ 인 26.39ksi에 대한  $N$ 값을 비교한 결과 피로기여도는  $4.76 \times 10^{-5}$ 으로 평가 되었다.

따라서 위의 두 운전조건에 대한 누적 피로기여도는 매우 적은 것으로 확인되었다.

## 6. 결론

본 연구를 통해 가압기 밀림배관에 특정 운전상황하에서 매우 큰 열성층화 현상이 실제로 발생하고 있음을 확인하였고, 또한 정상 출력운전중에도 가압기와 원자로냉각재계통 간의 온도차로 인해 약 40°C의 배관 상하부 온도차가 상존하고 있음을 확인하였다. 그리고 열성층화 현상 발생이 건전성에 미치는 영향을 평가한 결과 ASME 코드에서의 건전성유지 판정을 위한 요구조건들을 충분히 만족시키고 있어 대상 배관의 건전성이 유지되고 있음을 확인하였다. 정립된 건전성 평가방법 및 기술은 차후 원자력발전소 기타 배관계통에 대한 건전성 및 안전성 확인의 기반기술로 정착시킬 계획이다.

### 참고문헌

1. NRC, 1988, "Thermal Stress in Piping Connected to Reactor Coolant System", *NRC Bulletin 88-08*
2. NRC, 1988, "Pressurizer Surge Line Thermal Stratification", *NRC Bulletin 88-11*
3. EPRI, 1994, "Thermal Stratification, Cycling, and Striping", *TP-103581*
4. Westinghouse, 1989, Evaluation of Thermal Stratification for the COMANCH Park Unit 1 Pressurizer Surge Line, *WCAP-12248*
5. SIA, 1990, "Evaluation of Pressurizer Surge Line Thermal Stratification for Maanshan Nuclear Power Station Unit 1 and 2", *SIR-90-052 Vol. 1 and 2*
6. ABB-Combustion Engineering Inc, 1994, "Evaluation of Surge Line Stratification Test for Yonggwang Nuclear Power Unit3", *Z190-TE-500-00*