

RHR 계통 고온-저온 혼합유동에 따른 고주파 열피로 평가

Evaluation of High Cycle Thermal Fatigue Caused by Mixing Flow at RHR System

이선기, 이상국, 이육륜, 이한희, 김태룡
한국전력공사 전력연구원
대전시 유성구 문지동 130

이병의, 신선동
한국수력원자력(주)
서울 강남구 삼성동 167

요 약

원자력발전소의 경우 운전 및 정지시 마다 계통의 온도변화를 동반하기 때문에 기기/배관에 열피로가 생길 위험이 상존하여 건전성에 영향을 미치므로 설계시에 배관 재료별로 피로한계를 정하여 발전소 수명 기간 중에는 피로한계를 초과하지 않게끔 기기/배관이 설계되어 있다. 그러나 국부적으로 기기나 배관이 설계시 고려되지 않은 열피로를 받음으로써 기기/배관이 손상되어 운전에 지장을 초래한 사례가 다수 발생하고 있다(예를 들어, 미국 Trojan 발전소 가압기 밀림배관의 이상 변형, Farley 2호기 및 Tihange 1호기 안전주입 계통 차단밸브 전후 배관에서의 미세결함 발생, 일본 Genkai 1호기 잔열제거계통의 차단밸브 전후 배관에서의 미세결함 발생 등 다수). 현재 원전 설계시 고려치 못한 국부적인 열피로 발생 메커니즘이 점차 규명되고 있으며 본 논문에서는 국부적인 열피로 발생 메커니즘의 하나인 고온수와 저온수의 혼합에 의한 배관 내부 유체 온도변동이 배관 건전성에 미치는 영향에 대해서 평가하였다.

Abstract

In case of nuclear power plant, it is still room to bring pipe and instrument thermal fatigue because of carrying with changing temperature both under operation and in shutdown. Therefore pipe and instrument are designed not to exceed fatigue limit by

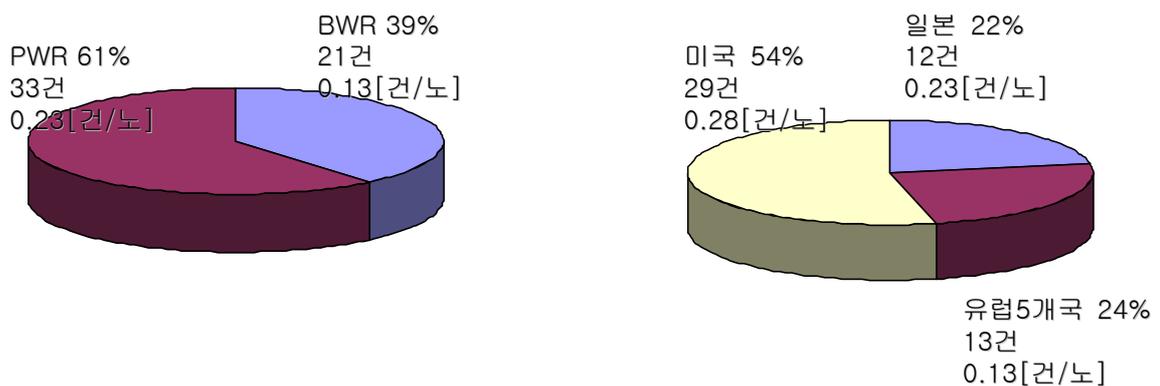
material until close. However local part of pipe and instrument is damaged by thermal fatigue out of design. Now it is slowly known to local thermal fatigue mechanism. So in this paper, it is evaluated that how fluid's temperature change in pipe from mixing hot water with cold water, one of local thermal fatigue mechanism, is relation to pipe integrity.

1. 서론

1998년 5월 프랑스Civaux-1호기 잔열제거계통(Residual Heat Removal System, RHR 계통) 열교환기 후단 배관에서 균열이 발생하여 다량의 냉각수가 누설되었다. 균열 발생 부위는 RHR 열교환기를 통과한 저온의 유체와 열교환기를 통과하지 않은(By-Pass) 고온의 유체가 합쳐져 흐르는 엘보우 부위이다. 균열 발생 당시 동 계통은 시운전 중으로써 고온 및 저온 유체는 약 140℃의 온도차를 갖고 혼합되는 상황에서 약 1600시간 운전되고 있었다.

균열원인은 고온-저온수 혼합에 의한 온도변동이 고주파 열피로를 유발한 것으로 판명되었으며 대책으로 Civaux-1호기에서는 고온-저온수의 혼합 부위를 엘보우 위치에서 가능한 한 멀리 떨어지도록 설계 변경하였다.

참고로 그림 1에는 열피로로 인해 배관에 발생하였던 사고 건수를 국가별 및 노형별로 정리하여 나타내었다.



<그림 1> 해외 원전 배관 열피로로 인한 사고 발생 건수

2. 원전 배관 열피로 발생 메커니즘 분석

그림 1에 나타난 바와 같이 주요국가 원전에서 열피로로 인한 손상은 총 54건이다. 이

54건에 대한 손상 사례를 메커니즘별로 검토하면 다음의 7가지 case로 구분된다[1].

(1) Case 1

가압기 밀림관(surge line)은 원자로 냉각재 계통의 가압기(pressurizer)와 고온관(hot leg)을 연결하는 배관이며, 이 배관 내에서는 가압기 측의 고온 냉각재와 이에 비해 상대적으로 낮은 온도인 고온관(hot leg)측의 냉각재가 만나 배관 상하부간에 온도차가 항상 상존한다. 이 온도차에 의해 배관 구조물의 이상 변형, 지지구조물과의 접촉, 지지물 파손 등이 발생하였다.

(2) Case 2

주배관에서 분기관으로 고온의 유체가 스며들어(난류관통 현상, turbulent penetration) 분기관 수평 부위에 온도 경계층이 생기는 것으로 이 온도 경계층은 주배관 유동상태(유속, 유량)의 변동에 연동되어 열피로 발생하였다.

(3) Case 3

열교환기를 통과한 저온의 유체와 by-pass한 고온의 유체가 합류할 때 발생하는 온도 경계층의 변동에 의해 배관에 고주파 열피로 발생하였다.

(4) Case 4

주배관과 연결된 분기관 후단의 격리밸브에서 저온의 물이 주배관 쪽으로 누설(in leakage)됨으로 인해 분기관에 큰 온도 경계층이 발생하고 이 경계층의 변동으로 인해 열피로가 발생하였다.

(5) Case 5

상기 case 4와 유사하나 누설이 RCS측에서 분기관 쪽으로 누설(out leakage)이 주기적으로 발생함으로써 온도 경계층의 주기적인 변동으로 열피로가 발생하였다.

(6) Case 6

증기발생기에 저온의 물이 저속으로 유입될 때 배관 수평부위에 고온의 물이 정체하고 저온의 물은 배관 하부에서 유입됨으로 온도 경계층이 생기며 이 온도 경계층이 유동조건 변화와 더불어 변동하여 열피로를 유발.

(7) Case 7

이 경우는 일본에서 처음으로 발생하였던 사건으로 재생열교환기 출구배관이 손상되어 냉각재가 누설되었던 사례이다. 문제의 재생열교환기는 내부에 원통을 갖고 있는 특수한 형상의 열교환기로서 다음과 같은 메커니즘으로 열피로가 발생하였다.

우선 내부 원통과 몸통과의 간격이 하부에서 작게 설계되어 내부의 by-pass 유동이 하부에서 적었다. 때문에 열교환기 하부를 흐르는 유체는 상부의 by-pass 유체보다 냉각되어 열교환기 상하부에 온도차가 발생하고 열교환기 또한 변형이 발생하였다. 이 변형이 어느 한계를 넘으면 열교환기 상부의 유동영역이 좁아지고 하부에서는 반대로 넓어지며 유동은 처음과 반대의 현상이 발생하여 열교환기도 처음의 상태가 된다. 이에 따라 열교환기 출구 배관의 유체온도도 주기적으로 변하여 열피로가 발생하였다.

이상의 사고사례 및 메커니즘별로 검토한 결과 열피로에 의한 배관 결함발생은 설계시에 고려치 못한 국부적인 온도변화에 기인하고 있다.

본 논문에서는 상기의 열피로 발생 메커니즘 중 case 3에 해당하는 고온 유체와 저온 유체의 혼합에 의해서 발생하는 온도변동이 열응력 변동을 유발하는 경우의 건전성 평가에 대해서 고리 3,4호기 RHR 계통을 대상으로 평가하였다.

3. 고온-저온 유체혼합 배관의 열피로 평가방법

3.1 평가방법

미국 및 한국에서는 고주파 열피로에 대한 체계적인 연구 및 정량적인 평가기준은 정립되지 않았다. 따라서 필요에 의한 국부적인 평가가 과도한 가정 및 일부 실험적인 접근으로 시도되고 있는 실정이다.

한편, 일본에서는 최근에 배관에서 발생하는 고주파 열피로의 평가를 위하여 기준책정 위원회를 설립하여 장기간의 연구결과를 종합하여 2003년 12월에 평가지침을 수립하였다.

본 논문에서는 일본기계학회(JSME)기준 '배관의 고 사이클 열피로에 관한 평가 지침(JSME S 017-2003)'에 의거 평가를 수행하기로 하였다[2]. 이하에 평가절차 및 방법에 대하여 간략히 소개한다.

3.2 평가절차

평가 절차의 개요를 그림2에 나타낸다.

1) Step1: 구조건전성 관련 판정 온도차를 고려한 평가(유체 온도차 평가)

합류전의 유체 온도차가 구조물에 생기는 온도와 동일하다는 가정 하에 평가. 이때의 온도차가 구조물의 피로한도와 대응한 온도차(판정 온도차) 미만일 것.

2) Step2: 온도변동폭의 감쇠효과를 고려한 평가(유체 온도차의 감쇠효과 고려)

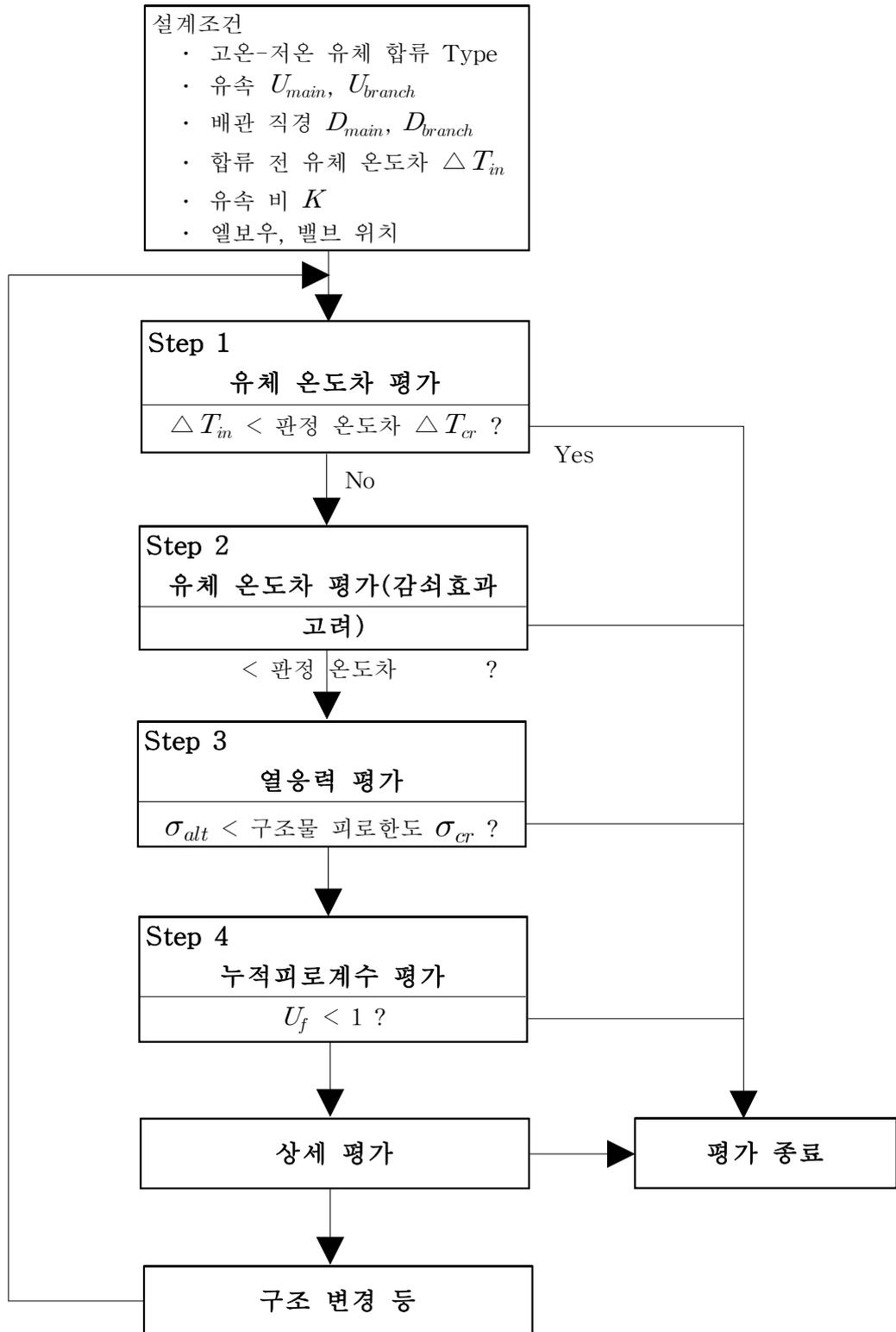
혼합 등에 의한 온도 변동 폭의 감쇠효과를 고려한 평가. 이때의 온도차가 판정 온도 미만일 것.

3) Step3: 열응력을 고려한 평가

실측 데이터를 이용하여 산출한 유체와 구조물 표면 간의 열전달율로 온도 변동에 의한 구조물에 발생하는 열응력 진폭을 구함. 이 값이 피로한도 이하일 것.

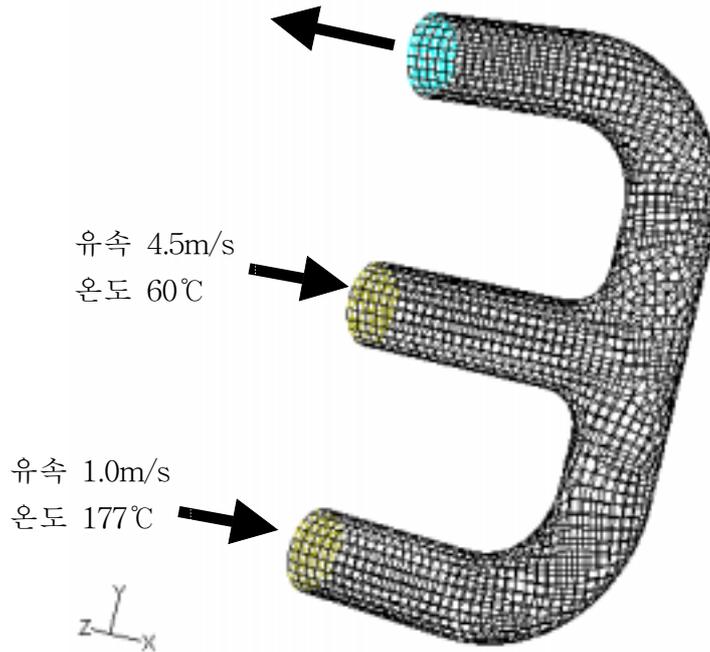
4) Step4: 누적피로계수를 고려한 평가

온도변동 감쇠를 고려한 피로평가로부터 평가 부위의 피로누적계수를 산출함. 이 값이 허용치를 만족 할 것.



<그림2> 고온-저온 유체 혼합부에서의 온도변동에 의한 배관 구조건전성 평가 절차

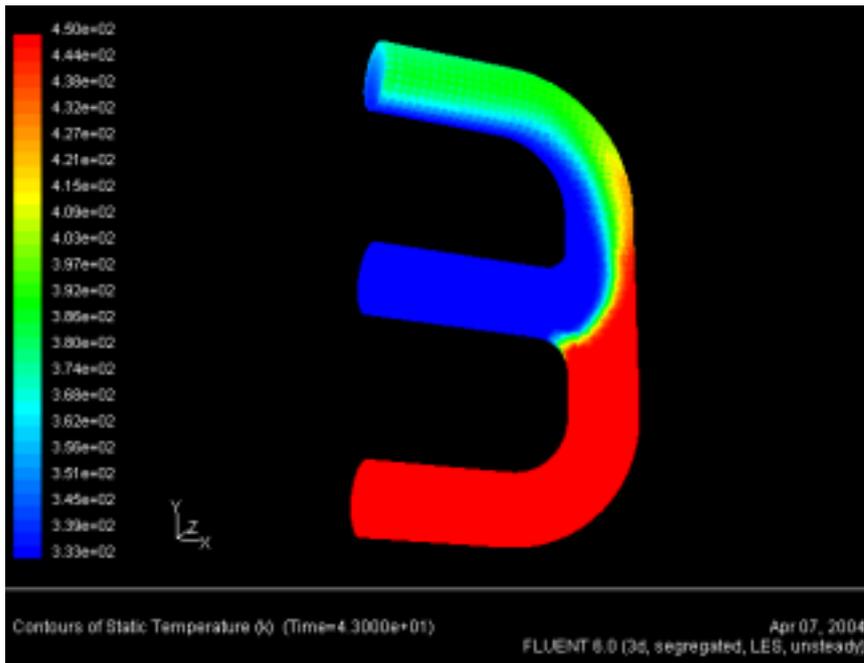
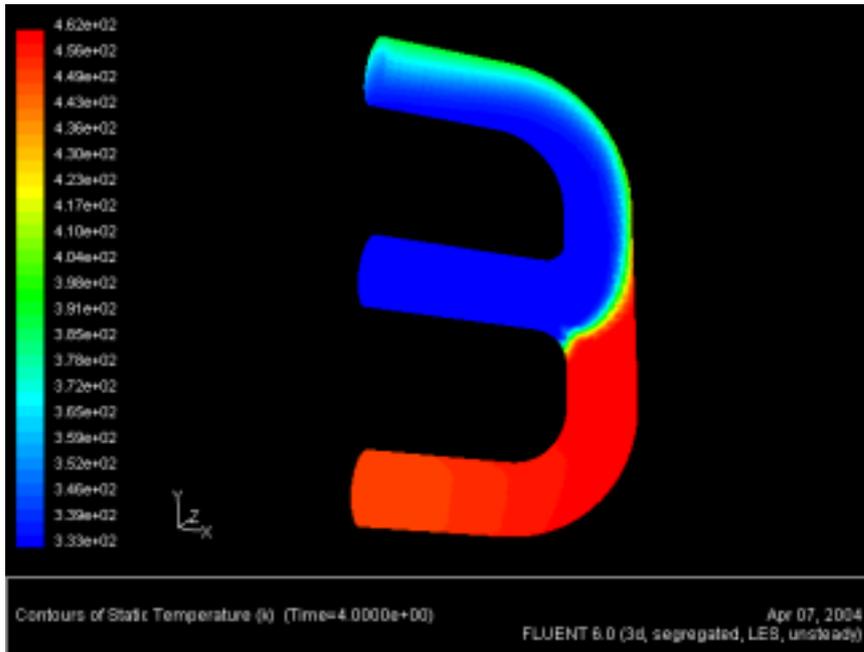
상 배관을 모델링하였다. 경계조건으로는 열교환기를 통과한 저온의 유체 유속 4.5 m/s, 온도 60℃, By-pass한 고온 유체 유속 1.0m/s, 온도 177℃가 배관 내부에서 혼합되어 하류로 흘러가는 모델이다.



<그림4> 대상 배관 열유동 해석 모델링

그림5에는 대상 배관의 내부 열유동 해석으로부터 얻어진 온도분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 고온의 유체와 상대적으로 저온의 유체가 만나 온도층이 형성되며, 이 온도층은 하류로 갈수록 혼합이 활발하여 온도차가 완화된다.

문제는 배관의 한정된 좁은 곳에서 고온의 유체와 저온의 유체가 만나서 온도층이 형성되는 부위으로써 유체 자신의 불안정성 및 계통 운전조건의 변화에 따라 온도층이 변화함으로써 열피로를 유발하는 것으로써 해석 결과에서도 시간 변화에 따라 온도층이 변하는 것을 확인할 수 있다.



<그림5> 열유동 해석 결과

4.3 건전성 평가

본 논문에서는 상기에서 기술한 일본기계학회(JSME)기준 '배관의 고 사이클 열피로에 관한 평가 지침(JSME S 017-2003)'에 의거 평가를 수행하였으며 이때 평가에 필요한 기초 입력자료를 표1에 정리하였다.

<표1> 대상 배관 평가조건

	외경 [inch]	내경 [inch]	두께 t_s [inch]	유체온도 [°C]	유속 [m/s]	재질
주배관	10.75	9.75	0.5	60	4.5	SUS316 SCH60
분기관	8.625	7.813	0.406	177	1.0	SUS316 SCH60

(1) Step 1 : 구조건전성 평가 판정 온도차에 의한 평가

고-저온 유체의 혼합에 의한 배관내 유체의 온도 변동은 열전달로 배관에 전해진다. 배관에 생기는 열응력은 온도 변동에 따라 반복 작용함으로 피로로 축적된다. 여기에서 배관에 생기는 열응력과 피로 한도와와의 비교로부터 열응력을 고려할 필요성 유무를 판단하기 위하여 판정 온도차 ΔT_{cr} 을 도입한다. 판정 온도차 ΔT_{cr} 은 응력 범위 $\Delta\sigma(T)$ 가 재료의 피로한도 이하가 되는 최대 온도차 ΔT_{max} 를 ΔT_{cr} 로 정의한 것으로써 다음의 식으로 나타내어 진다.

$$\Delta\sigma(T) = \frac{E\alpha\Delta T_{cr}}{1-\nu} < \text{피로한도} \quad (1)$$

여기에서 판정 온도차 ΔT_{cr} 은 다음 식으로 주어지며 본 지침에는 배관의 각 재질에 대해서 A, B, C 의 계수가 주어진다.

$$\Delta T_{cr} = A \times T_h^2 + B \times T_h + C \quad (2)$$

여기에서 배관 재질이 SUS304의 경우에는

$A = 4.62E-05, B = -4.27E-02, C = 4.50E+01$ 을 사용한다.

위의 식으로부터 ΔT_{cr} 를 계산하면 $\Delta T_{cr} = 41^\circ\text{C}$ 이다.

한편 본 경우에는 고온-저온 유체의 온도차 $\Delta T_m = 177 - 60 = 117^\circ\text{C}$ 이다.

유체 온도차 $\Delta T_m < \text{판정 온도차 } \Delta T_{cr}$ 을 만족하지 못하므로 Step 2의 평가를 수행한다.

(2) Step 2 : 온도 변동폭 감쇠 효과를 고려한 평가

합류 전 주배관과 분기관 사이의 온도차는 합류 후에는 온도 변동폭이 감소한다. 온도 변동폭 감소는 분기관과 주배관의 구경비, 주배관 유속 및 주배관과 분기배관 사이의 유속비를 파라메타로 하여 합류전의 유체 온도차 ΔT_{in} 에 대한 감쇠계수 β 가 주어진다. 본 경우에는 $\beta_{max} = 0.9$ 를 적용한다.

합류 후 온도 변동폭 ΔT_f 은 다음 식으로 구한다.

$$\Delta T_f = \Delta T_{in} \times \beta_{max} \quad (3)$$

상기 식으로부터 로부터 $\Delta T_f = 105.3^\circ\text{C}$ 이다.

여기에서 $\Delta T_f < \Delta T_{cr}$ 을 만족하지 못하므로 Step 3의 평가를 수행한다.

(3) Step 3 : 열응력을 고려한 평가

주배관과 분기관의 혼합 후의 혼합유체 열적 평형 온도 T_{mix} 는 다음과 같다.

$$T_{mix} = \frac{170 \times 1.0 \times (7.813/9.75)^2 + 60 \times 4.5}{1.0 \times (7.813/9.75)^2 + 4.5} = 74.6^\circ\text{C}$$

이 온도에 대응하는 유체의 열전도율 λ_f 은 $0.671(\text{W/m/K})$, 동점성계수 $\nu_f = 0.366\text{E-}6(\text{m}^2/\text{s})$, 프란트수 $\text{Pr} = 0.23$ 이다.

뉴셀트수 Nu 는 다음 식으로 계산한다.

$$Nu = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \quad (4)$$

$$= 0.023 \times \left(\frac{V_{mix} D_{mix}}{\nu_f} \right)^{0.8} \times \text{Pr}^{0.4} = 3540 \text{ 이다.}$$

정상 열전달율 h_s 는

$$h_s = \frac{Nu \times \lambda_f}{D_{mix}} \quad (5)$$

= 9591(W/m²/K) 이다.

열전달을 증가계수 F_p 는 5.9가 되며, 비정상 열전달을 h_u 는 $h_u = F_p \times h_s$ 로부터 56589(W/m²/K)이다.

여기에서 배관 두께 $t_s=0.0127m$, 배관의 열전도율 $\lambda_s=50(W/m/K)$ 로 부터 비오수 B_i 를 구하면

$$B_i = \frac{h_u \times t_s}{\lambda_s} \quad (6)$$

=14.37이다.

지침에는 비오수 B_i 와 최대 무차원 응력범위 $\Delta\sigma_{max}^*$ 의 관계가 주어져 있으며 이에 따라 최대 무차원 응력범위 $\Delta\sigma_{max}^*$ 를 구하면 $\Delta\sigma_{max}^*=0.65$ 가 된다.

고온-저온 유체 혼합에 의한 온도 변동에 의해서 구조물에 발생하는 열응력 진폭 σ_{alt} 는 다음 식으로 구한다.

$$\sigma_{alt} = (1/2) \times K_t \times \frac{E \alpha \Delta T_f}{1 - \nu_s} \times \Delta\sigma_{max}^* \quad (7)$$

=118.3(MPa)

여기에서, K_t : 응력할증계수, E : 구조물의 종탄성계수, α : 열팽창계수, ν_s : 포와송 비이다.

한편 본 배관재질에 해당하는 피로한계치 σ_{cr} 는 94(MPa)이며 이는 $\sigma_{alt} < \sigma_{cr}$ 을 만족하지 않으므로 Step 4를 수행한다.

(4) Step 4 : 피로 손상을 고려한 평가

지침에는 고온-저온 유체 혼합시의 온도 변동폭(ΔT_k^*) 및 발생빈도(N_{sk}^*)가 유속비, 주 배관 유속 및 평가대상 위치별로 무차원화하여 제시되어 있다. 표에 무차원 온도변동폭 및 발생빈도를 나타낸다.

a. 실 단위로의 환산

실 단위로의 환산 후 온도 변동폭 ΔT_{pk} 는 다음 식으로 구한다.

$$\Delta T_{pk} = \Delta T_k^* \times \Delta T_{in} \quad (k=1,2,3,\dots,n) \quad (8)$$

예로써 무차원 온도 변동폭 $\Delta T_k^* = 84(k=42)$ 에 대해서 유차원화하면

$$\Delta T_{pk} = 0.84 \times 117 = 98.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

한편, 무차원 발생 빈도(N_{sk}^*)에 대하여 다음 식으로 유차원화하면

$$N_{sk} = \frac{N_{sk}^* \times U_{mix}}{D_{mix}} \quad (k=1,2,3,\dots,n) \quad (9)$$

$$= 7.87 \times 10^{-3} \times 5 / 0.24765 = 15.9 \times 10^{-2} (s^{-1})$$

여기에서 N_{sk} 는 단위 시간당 발생 횟수이다.

b. 온도 변동폭(양진폭)의 열응력 진폭으로의 변환

상기의 온도 변동폭 ΔT_{pk} 에 대응하는 열응력 진폭 σ_{altk} 으로의 변환은 다음 식으로 계산한다.

$$\sigma_{altk} = (1/2) \times K_t \times \frac{E \alpha \Delta T_{pk}}{1 - \nu_s} \times \Delta \sigma_{max}^* \quad (k=1,2,3,\dots,n) \quad (10)$$

$$= (1/2) \times 1.0 \times \frac{1.95 \times 10^{11} \times 1.32 \times 10^{-6} \times 98.3}{1 - 0.3} \times 0.6 = 117.5 \text{ (Mpa)}$$

c. 단위 시간당 누적 피로계수 산출

상기의 열응력 진폭 $\sigma_{altk}=117.5(\text{MPa})$ 에 대응하는 허용반복 회수 N_k 를 피로선도에서 구하면 8.0×10^6 이다.

단위 시간당 누적 피로계수를 다음 식으로부터 구하면

$$Uf_k = \frac{N_{sk}}{N_k} \quad (k=1,2,3,\dots,n) \quad (11)$$

$$= 1.99 \times 10^{-8} (s^{-1}) \text{ 이다.}$$

여기에서 상기의 a.부터 c.까지의 과정을 $k=1 \sim n$ 에 대해서 수행한 결과를 표2에 나타낸다.

단위 시간당 합계 누적피로계수 $\sum Uf_k$ 는 $1.46E-07$ 이다.

d. 피로누적계수 평가

운전은 발전소 냉각중 16시간 동안 고온 유체(177°C)와 저온 유체(60°C)가 혼합되는 조건으로 운전된다고 가정하면

$$Uf = 1.46 \times 10^{-7} \times 3600 \times 16 \times 40 = 0.34$$

즉, 상기의 결과는 발전소 40주기 운전동안 누적피로계수는 0.34로써 고온-저온 유체 혼합에 따른 고주기 열피로로부터 건전함을 알 수 있다.

<표2> 무차원 온도 변동폭(ΔT_k^*) 및 발생빈도(N_{sk}^*)에 따른 피로계수 계산 결과

k	ΔT_k^*	N_{sk}^*	ΔT_{pk}	N_{sk}	σ_{altk}	N_k	Uf_k
1	0.02	9.90E-02	2.34	1.998789	2.7965		
2	0.04	6.64E-02	4.68	1.340602	5.5929		
3	0.06	4.89E-02	7.02	0.98728	8.3894		
4	0.08	3.37E-02	9.36	0.680396	11.1859		
5	0.1	3.26E-02	11.7	0.658187	13.9823		
6	0.12	2.81E-02	14.04	0.567333	16.7788		
7	0.14	1.91E-02	16.38	0.385625	19.5753		
8	0.16	1.46E-02	18.72	0.294771	22.3717		
9	0.18	1.46E-02	21.06	0.294771	25.1682		
15	0.3	1.12E-02	35.1	0.226126	41.9470		
20	0.4	1.01E-02	46.8	0.203917	55.9293		
21	0.42	6.75E-03	49.14	0.136281	58.7258		
22	0.44	9.56E-03	51.48	0.193014	61.5223		
25	0.5	5.62E-03	58.5	0.113467	69.9117		
26	0.52	2.25E-03	60.84	0.045427	72.7081		
29	0.58	2.81E-03	67.86	0.056733	81.0975		
30	0.6	5.62E-03	70.2	0.113467	83.8940		
31	0.62	1.12E-03	72.54	0.022613	86.6905		
32	0.64		74.88	0	89.4869		
33	0.66	2.25E-03	77.22	0.045427	92.2834		
34	0.68	2.25E-03	79.56	0.045427	95.0799	1.00E+09	4.54E-11
35	0.7	3.37E-03	81.9	0.06804	97.8764	6.00E+07	1.13E-09
36	0.72	2.25E-03	84.24	0.045427	100.6728	3.00E+07	1.51E-09
37	0.74	2.25E-03	86.58	0.045427	103.4693	2.00E+07	2.27E-09
38	0.76	6.75E-03	88.92	0.136281	106.2658	1.50E+07	9.09E-09
39	0.78	2.25E-03	91.26	0.045427	109.0622	1.30E+07	3.49E-09
40	0.8	2.25E-03	93.6	0.045427	111.8587	1.00E+07	4.54E-09
41	0.82	1.12E-03	95.94	0.022613	114.6552	9.00E+06	2.51E-09
42	0.84	7.87E-03	98.28	0.158894	117.4516	8.00E+06	1.99E-08
43	0.86	4.50E-03	100.62	0.090854	120.2481	7.00E+06	1.30E-08
44	0.88	7.87E-03	102.96	0.158894	123.0446	6.00E+06	2.65E-08
45	0.9	4.50E-03	105.3	0.090854	125.8410	5.00E+06	1.82E-08
46	0.92	2.25E-03	107.64	0.045427	128.6375	4.50E+06	1.01E-08
47	0.94	3.37E-03	109.98	0.06804	131.4340	4.20E+06	1.62E-08
48	0.96	2.25E-03	112.32	0.045427	134.2304	4.00E+06	1.14E-08
49	0.98	1.12E-03	114.66	0.022613	137.0269	3.50E+06	6.46E-09
50	1		117	0	139.8234	2.00E+05	0.00E+00
						Ufk	1.46E-07

5. 결론

본 논문에서는 국부적인 열피로 발생 메커니즘의 하나인 고온수와 저온수의 혼합에 의한 배관 내부 유체 온도변동이 배관 건전성에 미치는 영향에 대해서 고리 3,4호기 RHR 열교환기 후단 배관을 대상으로 평가하였다.

평가 결과, 발전소 40주기 운전동안 누적피로계수는 0.34로써 고온-저온 유체 혼합에 따른 고주기 열피로로부터 건전한 것으로 나타났다.

참고문헌

[1]가압기 밀림관 열성층 영향평가 및 열성층배관 정밀검사 부위 선정, 2003.03, 한국수력원자력(주).

[2]배관의 고 사이클 열피로에 관한 평가 지침(JSME S 017-2003), 2003.12, 일본기계학회(JSME).