

고리 4호기 가압기 밀림배관 열성층 영향 평가

이선기, 이현, 김태룡, 김법년

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

배관내에서 서로 다른 온도의 유체가 밀도차에 의해서 층이 분리된 채 존재하는 현상을 열성층(thermal stratification) 현상이라 부르며, 이 현상에 의한 과도한 열응력은 배관의 건전성을 저해할 수 있다. 국내 원전의 경우 영광 3,4호기 이전의 밀림배관에서는 열성층 영향을 고려치 못하여 이에 대한 건전성 평가가 요구되고 있다.

본 연구에서는 고리 4호기 가압기 밀림배관을 대상으로 밀림배관내 유동해석 및 발전소 전 운전조건에 대하여 밀림배관 단면 온도분포 실측실험을 통하여 열성층화 현상의 발생 정도를 확인하였으며 실측 온도 데이터를 이용하여 열응력해석 등을 수행함으로써 밀림배관의 열성층 영향을 평가한 결과 건전함이 확인되었다.

1. 서론

배관내에서 서로 다른 온도의 유체가 밀도차에 의해서 층이 분리된 채 존재하는 현상을 열성층(thermal stratification) 현상이라 부르며, 이 현상에 의한 과도한 열응력은 배관의 건전성을 저해할 수 있다[1]. 해외 원전에서 이와 같은 열성층 현상과 이에 따른 결함이 발생한 사례로는 미국 Trojan 발전소 가압기 밀림배관의 이상변형, Farley 2호기 및 Tihange 1호기 안전주입 계통의 차단밸브 전후 배관에서의 결함 발생, 일본 Genkai 1호기 잔열제거 계통 차단밸브 전후 배관에서의 결함 발생 등 다수가 있다. 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는 Bulletin 88-08에서 기존 운전중인 발전소뿐만 아니라 설계중인 원전에 대해서도 주요 배관들을 대상으로 열성층화 현상의 존재 여부 검토 및 평가를 수행하여 배관의 건전성을 확인하고 설계 수명기간중의 건전성 유지방안을 촉구하였다[2]. 특히, 가압기 밀림배관에 국한한 열성층화 현상에 대해서는 NRC Bulletin 88-11에서 동 배관에 대하여 건전성 평가를 요구한 바 있다[3].

가압기 밀림배관(surge line)은 원자로 냉각재 계통의 가압기(pressurizer)와 고온관(hot leg)을 연결하는 배관으로서 이 관내에서 가압기측의 고온 냉각재와 이에 비해 상대적으로 낮은 온도인 고온관(hot leg)측의 냉각재가 만나는 곳으로 배관의 상하부간에 온도차가 항시 상존하고 있다.

본 논문에서는 고리 4호기 가압기 밀림배관을 대상으로 밀림배관내 유동해석 및 발전소 전 운전조건에 대하여 밀림배관 단면 온도분포 실측실험을 통하여 열성층화 현상의 발생 정도를 확인하였으며 실측 온도 데이터를 이용하여 열응력해석 등을 수행함으로써 밀림배관의 열성층 영향을 평가하였다.

2. 배관 열성층화 현상

열성층화는 배관 단면에 큰 온도차를 발생시키며 이는 배관벽면에 설계기준을 초과하는 열응력

및 이상변형과 함께 피로손상을 초래할 수도 있다. 이러한 열성층 현상은 다음의 복합적인 조건을 갖는 배관에서 발생한다.

- (i) 배관의 경사가 아주 적은 수평부분이 길고
- (ii) 교차하는 두 유체의 온도차가 비교적 크며
- (iii) 배관내의 유체 유동속도가 매우 작거나 정체되어 있을 때

원전 배관에서 위와 같은 조건이 형성되어 열성층 현상이 일어날 수 있는 배관은 가압기 밀림 배관의외에도 가압기 분무(spray)배관, 증기발생기 급수관 및 안전 주입계통과 잔열제거계통의 차단 밸브 전후의 배관 등이 있다[4~12].

그림 1(a)~(d)에는 가압기 밀림배관을 모사하여 100℃의 온도차를 갖는 2차원 열유동을 단순화하여 Fluent 프로그램으로 해석한 결과로서 짙은색은 저온, 옅은색은 고온을 나타내고 있다. 모사된 내용은 저온(0℃)의 물로 채워진 배관내에 고온(100℃)의 물이 유속 (a) 0.01 m/s, (b) 0.10 m/s, (c) 0.15 m/s, (d) 0.20 m/s로 흐르고 있는 경우이다. 해석결과는 유속이 0.15 m/s 이하에서는 배관 단면내에 온도차가 확실히 나타나는 열성층화 현상이 발생하고 있으며, 유속 0.20 m/s 이상에서는 발생하지 않고 있다. 실제 원자력발전소 밀림배관에서는 유속 0.01 m/s(유량 1.0 gpm)의 유동이 형성됨으로 열성층화가 발생하고 있음을 알 수 있다.

3. 밀림배관 단면 온도분포 측정

상기의 유동해석 결과 밀림배관내에 열성층화가 발생하고 있음이 명확하므로 밀림배관의 6개 지점에 단면 온도분포 측정을 위한 총 24개의 온도 센서(RTD)를 부착하여 발전소 가열, 고온대기, 기동, 출력중발 및 냉각운전 중에 1분 간격으로 취득하였다. 그림 2에 발전소 상온정지에서 고온대기 상태 즉 원자로 냉각재 온도가 23℃에서 292℃까지 변화하는 70여 시간 동안 1분 간격으로 취득한 온도분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 발전소 가열조건중에 배관 상하면에서 최고 약 107℃의 온도차가 발생하고 있다. 한편, 그림 3(a), (b)에는 가열 및 고온대기조건에서의 배관단면 온도분포를 나타내고 있으며 고온대기조건시에는 배관단면 온도차가 약 65℃ 발생하고 있다.

4. 밀림배관 건전성 평가

가압기 밀림배관은 ASME Class 1 기기로 분류되기 때문에 응력해석 및 건전성 평가는 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section III NB-3600의 배관설계기준에 따라 응력해석 및 건전성 평가를 수행하였다. ASME Section III NB-3600은 설계조건과 A급 운전조건에서 배관의 하중지능력을 확인하는 응력해석을 하는데 있어 작용응력에 대한 허용한계치와의 비교를 수행하고, 그 값이 허용치보다 작아야 건전성이 확보된다. 본 해석에서는 실측한 밀림배관 단면 온도분포를 입력하여 밀림배관 주요 위치에서의 모멘트를 ANSYS로 계산하였으며, 그 결과를 ASME Section III NB-3600에서 규정한 다음 식으로 계산하여 허용치와 비교 평가하였다.

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

$$S_n = C_1 \frac{P_o D_o}{2t} + C_2 \frac{D_o}{2I} M_i \quad \text{<운전조건>} \quad (2)$$

$$+ C_3 E_{ab} \times |a_a T_a - a_b T_b| \leq 3 S_m$$

$$S_p = K_1 C_1 \frac{P_o D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} M_i + \frac{1}{2(1-\nu)} K_3 E_a |\Delta T_1|$$

$$+ K_3 C_3 E_{ab} |a_a T_a - a_b T_b| + \frac{1}{1-\nu} E_a |\Delta T_2|$$

<피로해석 : 누적피로계수 평가> (3)

5. 파괴역학적 해석

가압기 밀림배관에 대한 비파괴 검사 자료를 확보하여 취약부위에 결함의 존재 유무를 확인한 다음, 만약 결함이 있다면 그 결함자료를 이용하나 결함이 발견되지 않았으므로 ASME Section XI에서 지정하는 가상크기의 결함을 가정하여 파괴역학적인 관점에서 건전성 평가를 수행하였다. 가상의 균열 크기는 ASME Section XI Subsection IWB-3514.3에서 오스테나이트 배관에 대하여 규정한 허용결함 기준이며, IWB-3514.3의 규정은 ASME Section III Appendix G의 파괴역학해석에 의한 허용결함의 1/10로 추산된 값으로써, 이 크기를 초과할 경우에는 IWB-3600에 따라 파괴역학적 해석을 수행해야 한다. ASME Section XI의 IWB-3600에 의하면 가동중검사 결과 발견된 결함은 다음의 2조건중 하나를 만족시키면 보수를 하지 않고도 계속 가동 할 수 있다.

- (1) 결함 크기에 근거한 허용기준(IWB-3611)
- (2) 응력확대계수에 근거한 허용기준(IWB-3612)

6. 평가결과

표 1에 설계 및 가열조건, 고온대기조건, 냉각조건에 대한 해석결과를 나타낸다. 설계조건은 ASME Code Sec. III Appendices에 따르면 응력강도 S_m 은 20.5 ksi($1.5 S_m = 30.75$ ksi)이며 해석값은 13.4 ksi로써 해석 결과가 코드의 요구조건을 충분히 만족시키고 있다. 발전소 가열조건, 고온대기조건 및 냉각조건시에서는 설계응력강도 S_m 은 20.5 ksi($3.0 S_m = 61.5$ ksi)로써 각 조건의 해석값은 모두 허용 응력 강도값 이내를 나타내고 있으므로 해석 결과가 Code의 요구조건을 충분히 만족시키고 있다.

누적 피로계수를 평가한 결과 가열조건에 대한 Design Transient상에서 수명기간 40년 동안 발생횟수(n)인 200과 S-N 곡선상에서 $S_{alt}(1/2 S_p)$ 인 19.67 ksi에 대한 N값인 3.8×10^6 을 비교($200 / 3.8 \times 10^6$), 피로 기여도는 계산결과 5.26×10^{-5} 으로 평가되었다. 고온대기 조건에서는 $S_{alt}(1/2 S_p)$ 인 18.71 ksi에 대한 N값인 4.2×10^6 을 비교($200 / 4.2 \times 10^6$), 피로 기여도는 계산결과 4.76×10^{-5} 으로 평가되었으며 냉각조건의 경우는 가열조건과 같은 결과인 $S_p = 39.34$ ksi이며, $S_{alt} = 1/2 S_p = 19.67$ ksi 이다. 그러므로 냉각조건의 경우에는 $S_{alt}(1/2 S_p)$ 인 19.67 ksi에 대한 N값인 3.8×10^6 과 비교한 결과, 피로 기여도는 7.9×10^{-4} 으로 평가되었다.

따라서 가열조건, 고온대기조건 및 냉각조건에 의한 누적 피로 기여도는 각 조건의 피로 기여도를 총합하면 8.9×10^{-4} 이다. 이 값은 피로평가 기준인 1보다 상당히 작아 그 영향은 매우 미미한 것으로 판단되었다.

한편, 표 2에는 밀림배관의 변위 해석 결과를 배관과단 구속장치(Pipe Whip Restraint)와의 간극 설계값과 함께 나타낸다. 해석 결과 밀림배관의 변위는 x방향으로의 구속이 없어 x방향으로의 변위가 대체로 크게 나타나고 있으나 전체적으로 열성층 현상 발생에 따른 밀림배관의 이상 변위 즉, 밀림배관과 PWR과의 접촉(즉, 간극이 0)에 의한 추가적인 응력은 발생하지 않고 있다.

피로결함 성장해석은 배관에 표면직하결함 모델을 적용하였으며 결함은 축방향균열이 배관단면의 최하부에서 발생한 것으로 가정하였다. 밀림배관의 열성층현상은 발전소 수명기간동안 200회의 가열조건, 고온대기조건, 냉각조건을 반복하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

그림 4에는 밀림배관 두께방향 응력분포를, 표 3에 각 주기별 결함성장량과 응력확대계수의 변

화를 나타낸다. 초기균열깊이 $2a = 0.2812$ inch는 200주기후 최종균열깊이 0.4169 inch로 성장하여 초기의 표면직하결합은 수명말기에도 표면결합으로 성장하지 않는 것으로 평가된다.

한편, 200주기후의 최대 응력 확대계수는 $22.985 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$ 로써 허용응력 확대계수 허용한계치인 $63.25 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$ 보다 작은 것으로 평가되어 가정한 결함은 향후 수명말기까지 ASME Section XI의 허용기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

7. 결론

고리4호기 가압기 밀림배관에서 취득한 온도데이터를 기초자료로 하여, 응력해석, 누적피로 기여도 분석, 밀림배관 변위해석, 파괴역학적 해석 등을 수행하여 열성층 현상에 발생에 따른 건전성을 평가하였다. 평가결과, 가압기 밀림배관에서의 열성층화 현상 발생이 건전성에 미치는 영향은 미미하여 전혀 우려할 정도는 아닌 것으로 확인되었다.

참고문헌

- [1] Westinghouse Report WCAP-12218, "Evaluation of Thermal Stratification for the VOGTLE Unit 2 Pressurizer Surge Line", 1989
- [2] NRC Bulletin 88-08, "Thermal stress in piping connected to reactor coolant system", 1988
- [3] NRC Bulletin 88-11, "Pressurizer surge line thermal stratification", 1988
- [4] G. A. Pierfederici, "Design and Analysis of Surge Line for Stratified Flow", 1988
- [5] Miksch. M, "Loading Conditions in Horizontal Feedwater Pipes of LWRs Influence by Thermal Shock and Thermal Stratification Effects", Nucl. Eng. & Design v.84 n2, Jan, 1985
- [6] Wolf, L, "Thermal Stratification Tests in Horizontal Feedwater Pipelines", Proc. of US Nucl. Reg. Comm. 5th Reactor Sefty, NUREG/CP-0091-Vol.5, 1988
- [7] Smith. W., "A Solution for the Temperature Distribution in a Pipe Wall Subjected to Internally Stratified Flow", Proc. of the 1988 Joint ASME-ANS Nucl. Power Conference, 1988
- [8] Blumer. U., "Fatigue in Piping by Fluid Stratified Flow in Horizontal an Extension to Piping Codes", ISBN 90-6191-765-4, 1987
- [9] Kokal. S., "Evaluation of the Models of Stratified Flow in Horizontal and Inclide Pipes", CONF-861146, 1986
- [10] Cutrim. J. H., "A Simplified Method to Calculate the Stress in Straight Pipes due to Laminar Flow of a Stratified Medium with Two Different Temperatures", ISBN-BR-400, 1984
- [11] Schrock. V. E., "Steam Water Critical Flow through Small Pipes from Stratified Upstream Regions", ISBN 3-540-16896-6, 1986
- [12] "Framatome Capabilities in Dealing with Surge Line Stratification Phenomena", FRAMATOME S. A., Feb., 1989

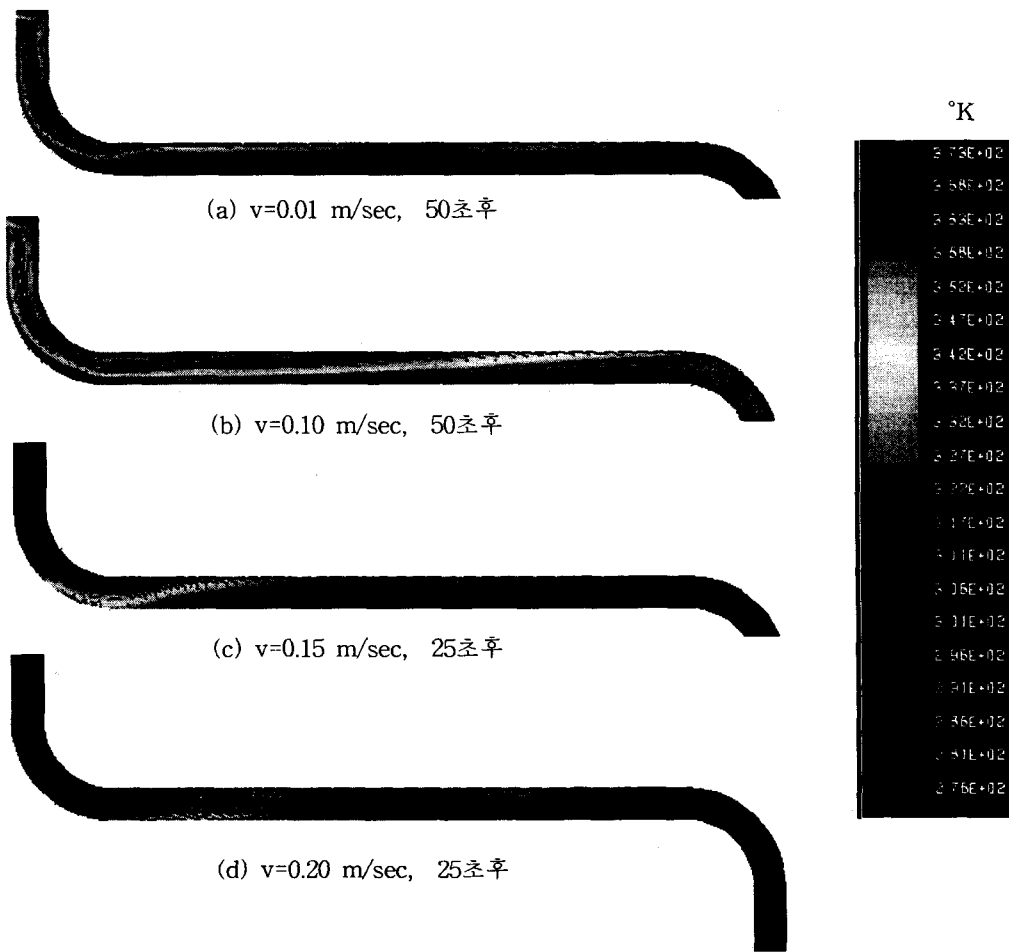


그림 1 밀림배관 내부의 열유동 해석결과(Fluent Code 사용)

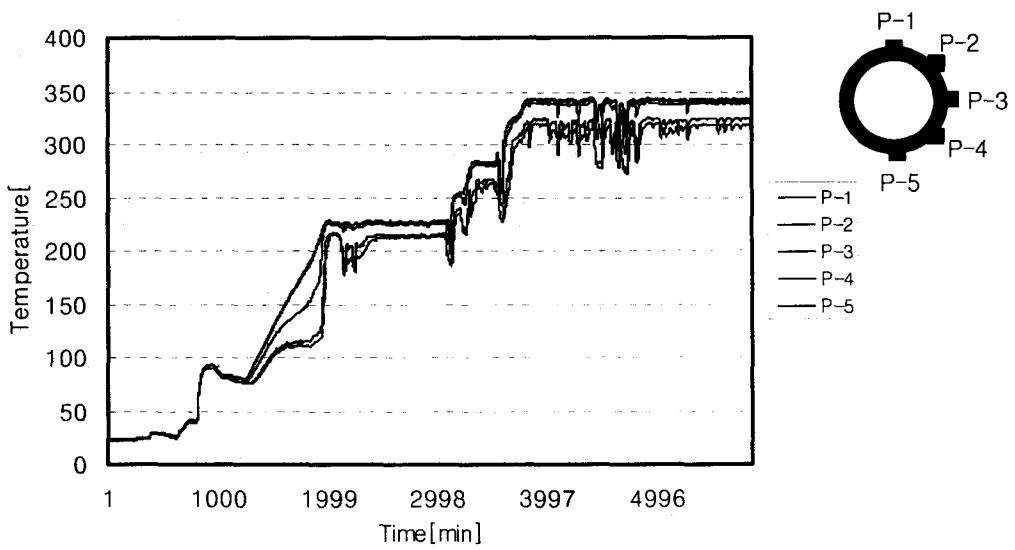
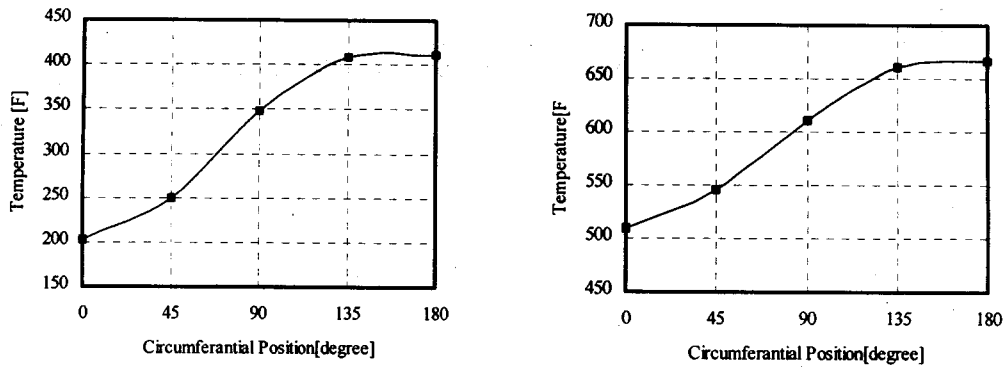


그림 2 가열조건시의 배관단면 온도 실측 데이터 예



(a) 가열조건

(b) 고온대기조건

그림 3 밀림배관 단면 온도분포

표 1 응력해석 결과

운전조건	배관 단면 온도차 [°C]	작용 압력 [psi]	계산 응력강도 [ksi]	허용 응력강도 [ksi]	비고
설계조건	-	2500	13.4	30.75	만족
가열조건	107	350	34.0	61.5	만족
고온대기조건	65	2300	39.3	61.5	만족
냉각조건	105	350	34.0	61.5	만족

피로 기여도	가열조건	5.26×10^{-3}	8.9×10^{-4}
	고온대기조건	4.76×10^{-3}	
	냉각조건	7.90×10^{-4}	

표 2 밀림배관 변위해석 결과

Location	설 계 값 (mm)				계 산 값 (mm)		
	상	하	좌	우	Δx	Δy	Δz
PWR 1	25.4	25.4	12.7	12.7	3.18	3.85	0.62
PWR 2	25.4	25.4	12.7	12.7	6.52	6.81	2.39
PWR 3	25.4	25.4	25.4	25.4	15.18	12.17	4.66
PWR 4	25.4	25.4	25.4	25.4	19.82	15.1	3.55
PWR 6	25.4	25.4	12.7	44.5	16.02	4.1	0.64
PWR 9	25.4	25.4	25.4	25.4	39.66	26.2	9.2
PWR 10	25.4	25.4	25.4	25.4	5.97	6.67	1.73

* Δx : 밀림배관 길이방향

Δy : 밀림배관 상하방향, 설계 및 측정값의 상하와 대응

Δz : 밀림배관 좌우방향, 설계 및 측정값의 좌우와 대응

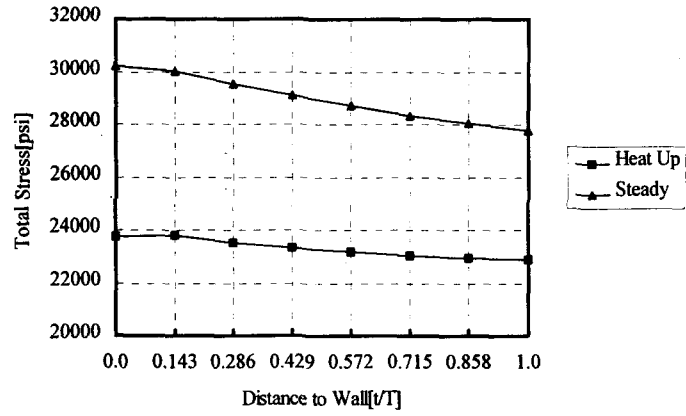


그림 4 배관 두께별 전체 응력분포

표 3 각 주기별 결함성장 깊이 및 최대응력 확대계수의 변화

Cycle	Depth (inch)	Length (inch)	Klmax (ksi · inch ^{1/2})
1	0.2817	0.8451	18.89
20	0.2913	0.8738	19.21
40	0.3019	0.9058	19.56
60	0.3133	0.9397	19.92
80	0.3253	0.9759	20.30
100	0.3381	1.0144	20.70
120	0.3518	1.0555	21.11
140	0.3665	1.0994	21.55
160	0.3821	1.1463	22.00
180	0.3989	1.1968	22.48
200	0.4169	1.2501	22.99