

열성층을 포함하는 원자력발전소 배관의 환경피로평가

김태순[†] · 김규형

한국수력원자력(주) 중앙연구원

(2018. 9. 5. 접수 / 2018. 9. 17. 수정 / 2018. 10. 12. 채택)

Environmental Fatigue Evaluation for Thermal Stratification Piping of Nuclear Power Plants

Taeseon Kim[†] · Kyuhyung Kim

Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Company

(Received September 5, 2018 / Revised September 17, 2018 / Accepted October 12, 2018)

Abstract : A detailed fatigue evaluation procedure was developed to mitigate the excessive conservativeness of the conventional environmental fatigue evaluation method for the pressurizer spray line elbow of domestic new nuclear power plants. The pressurizer spray line is made of austenitic stainless steel, which is relatively sensitive to the environmentally assisted fatigue, and has a low degree of design margin in terms of environmentally assisted fatigue due to the thermal stratification phenomenon on the pipe cross section as a whole or locally. In this study, to meet the environmental fatigue design requirements of the pressurizer spray line elbow, the new environmental fatigue evaluation has been performed, which used the ASME Code NB-3200-based detailed fatigue analysis and the environmental fatigue correction factor instead of the existing NB-3600 evaluation method. As a result, the design requirements for environmentally assisted fatigue were met in all parts of the pressurizer spray line elbow including the fatigue weakened zones by thermal stratification.

Key Words : environmental assisted fatigue, cumulative fatigue usage factor, spray line, fatigue evaluation, nuclear power plant

1. 서론

원자력발전소 가동 중에 발생하는 다양한 기계적 하중과 열적하중의 주기적인 변화는 원자로 압력경계 내의 주요 기기 및 배관에 반복적으로 작용하여 피로 손상을 일으키게 된다. ASME B&PV Code를 포함한 원전 기기 설계 기술기준에서는 안전등급 1 구조재료에 대한 설계피로곡선(design fatigue curve)을 명시하고 피로설계시 이를 적용하도록 하고 있다¹⁾.

원자로냉각재계통 기기 및 배관의 피로에 미치는 원자로냉각재 환경의 영향은 환경보정계수법 또는 환경피로곡선에 따라 평가할 수 있으며, 전반적인 환경피로평가 절차는 Fig. 1과 같다. Fig. 1의 절차에 나타낸 바와 같이, 먼저 보수적이고 단순한 방법을 활용하여 환경영향 평가를 수행하여 평가결과가 허용기준을 만족하면 평가를 종료한다. 만약 이러한 보수적인 평가 결과가 허용기준을 만족하지 못하는 부위에 대해서는

평가 방법 및 절차상의 보수성을 감소시킨 상세 평가 방법을 적용하여 평가해야한다.

최근 국내 신규원전의 가압기 살수배관 엘보우에 대해 기존의 ASME B&PV Code, Sec. III, NB-3600 설계공식기반 피로평가를 수행한 결과, 환경영향을 고려한 누적피로계수가 허용기준을 크게 초과하였다. 따라서 피로평가 보수성 저감을 위해서는 ASME B&PV Code, Sec. III, NB-3200 설계해석기반 피로평가 방법을 적용함으로써, 기존 설계공식기반 피로평가 방법이 갖고 있는 공기환경 피로평가 시의 과도한 보수성을 저감하여 환경피로 설계요건을 만족시킬 필요가 있다²⁾.

가압기 살수배관은 환경피로에 상대적으로 민감한 오스테나이트 스테인리스강으로 설계된 안전등급 1 배관으로, 비교적 고온 영역의 운전과도상태가 많이 발생하여 열적 피로에 매우 취약한 배관 중의 하나이다. 특히 가압기 살수노즐에 인접한 살수배관의 수평구간에서는 일차측 증기와 물의 성층화 유동현상으로 인해

[†] Corresponding Author : Taeseon Kim, Tel : +82-42-870-5415, E-mail : taeseon.kim@khnpp.co.kr
Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Company, 1312-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34101, Korea

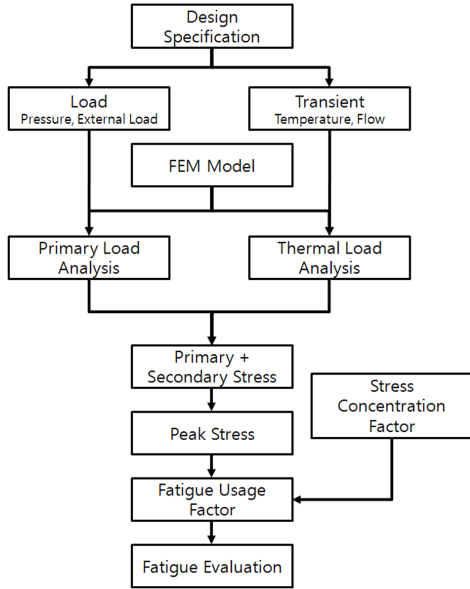


Fig. 1. Flow chart of fatigue evaluation by ASME B&PV code.

배관 단면에 전체적 또는 국부적으로 열성층(thermal stratification) 현상이 발생한다. 이러한 배관단면의 열성층 및 열성층 경계면의 열띠(thermal striping) 현상은 배관에 추가적인 저주기 및 고주기 열피로를 유발하므로 피로 측면에서는 부정적인 영향을 줄 수밖에 없다³⁾.

본 연구에서는 살수배관 엘보우의 상세 피로평가를 통해 최신 환경피로 관련 USNRC의 규제지침인 RG 1.207⁴⁾과 NUREG/CR-6909⁵⁾의 요건을 만족시키고자 한다. 이를 위해서 기존 ASME B&PV Code, Sec. III, NB-3600의 설계공식을 기반으로 한 배관계통 공기환경 피로평가 방법이 갖는 과도한 보수성을 저감시키고, 더 나아가 환경보정계수를 이용한 피로평가 방법의 보수성을 완화하기 위한 환경피로평가 상세해석 방법 절차를 수립하고자 한다.

2. 환경피로평가 방법론

본 연구에서는 환경피로평가에 앞서 ASME B&PV Code, Sec. III, NB-3222의 평가 절차에 따라 가압기 살수배관 엘보우에 대해 공기환경에서의 피로평가를 수행하였으며, 이렇게 구해진 공기환경 누적피로계수에 RG 1.207과 NUREG/CR-6909에서 제시한 지침에 따라 구한 환경보정계수를 곱하는 방법으로 환경피로평가를 수행하였으며, 그 상세한 절차는 다음과 같다.

2.1 기술 기준

본 환경피로평가와 관련한 주요 기술기준으로, 규제지침은 RG 1.207 및 규제지침의 기술배경서 NUREG/

CR-6909를 적용하였다. 공기환경 피로평가 절차는 ASME B&PV Code Sec. III, NB-3200 및 NB-3600에서 제시하고 있는 절차를 따랐으며, 그 외에 상세 피로평가 시 보수성 완화를 위해 관련 Code Case N-792⁶⁾ 및 N-779⁷⁾ 등을 적용하였다.

RG 1.207은 원전 안전등급 1 기기 및 배관의 피로평가에 원자로냉각재 환경영향을 추가로 고려하도록 요구하는 규제지침으로 NUREG/CR-6909 및 ASME B&PV Code Sec. III, NB에서 정한 절차에 따라 환경피로평가를 수행하도록 규정하고 있다. NUREG/CR-6909는 환경피로 영향평가에 사용되는 환경보정계수를 제시하고 있는 USNRC의 기술보고서로 탄소강, 저합금강, 스테인리스강 및 니켈합금 등 대표적인 금속재료에 대한 원자로냉각재 환경 보정식을 제시하고 있다.

2.2 응력 및 피로평가 절차

가압기 살수배관 엘보우의 피로평가를 위해서는 먼저 배관에 작용하는 하중들에 대해 응력 범주별로 각각의 응력강도를 계산한다. 각 하중별 응력분류를 위한 지침은 ASME B&PV Code, Table NB-3217-2에 기술되어 있으며, 여기에서 열성층에 의한 국부응력은 첨두응력(peak stress)으로 분류된다. 각 하중조건(load case)에 대한 응력강도(stress intensity)는 각 하중에 의한 응력이 각각 6개 성분을 갖기 때문에 이 성분들을 합하여 구하였다. ASME B&PV Code에 명기된 절차에 따라 응력강도를 구하는 절차는 앞의 Fig. 1에 나타내었다.

배관의 상세 피로평가는 각각의 운전 과도조건(transient)에 따라 배관에 작용하는 응력이 달라지고, 또한 각 과도조건에서는 시간에 따라 응력이 변동하기 때문에 ASME Code, Sec. III, NB-3216에 제시된 절차에 따라 정상 운전(normal operation) 시 발생하는 각각의 과도조건에서 시간에 따른 응력 S 와 교변응력강도(alternating stress intensity), S_{alt} 를 계산한다. 이때 국부 구조 불연속 부위에서는 응력의 집중을 고려해서 실험 및 해석으로 구해진 피로강도감소계수(fatigue strength reduction factors)를 적용하거나 ASME Code, Sec. III, NB-3228.5 등에 명시된 탄소성보정계수, K_c 등과 같은 응력집중계수(stress concentration factor)를 사용하여 응력집중효과가 고려된 최종 교변응력강도를 계산한다.

다음으로 상세피로평가 시에는 재료물성 중의 하나인 탄성계수(modulus of elasticity, E)도 피로해석 결과에 영향을 주기 때문에 설계피로곡선에 나와 있는 탄성계수(E_{Dr})와 해석에 사용된 탄성계수(E_{Ar})의 비를 아래 식과 같이 보정해주어야 한다.

$$S_{alt_r}^{E_r} = S_{alt_r} \times \frac{E_{D_r}(S-N Curve, d 800^\circ F)_r}{E_{A_r}(Analysis)_r} \Gamma \quad (1)$$

위와 같이 구한 반복피로응력강도 $S_{alt_r,1}^{E_r}, S_{alt_r,2}^{E_r}, S_{alt_r,3}^{E_r}$...에 대응하는 허용반복 횟수 $N_{1_r}, N_{2_r}, N_{3_r}$...는 ASME B&PV Code Sec. III, App. I Figure I-9.0에 주어진 설계피로곡선에서 읽어 낸다. 이렇게 1개의 과도조건에 대해서 N_{f_r} 를 구한 후, 다른 운전조건에 따른 과도조건 마다 응력 사이클에 대해 누적피로계수를 다음 식 (2)와 같이 구한다. 결국, 각각의 누적피로계수(U_i)를 식 (2)와 같이 합산하면 누적피로계수 U 를 얻을 수 있고, 이 U 값이 1.0 보다 작은지 확인하는 과정을 수행하여 피로평가가 절차를 마무리한다.

$$U = \sum_{i=1_r}^{k_r} U_i \quad (2)$$

2.3 환경피로평가 절차

NUREG/CR-6909 에서는 환경보정계수를 이용한 원자로냉각재 환경에서의 피로평가 방법을 제시하고 있다. 환경피로보정계수(Environmental fatigue correction factor, F_{en})를 이용한 방법에서는 ASME B&PV Code 요건에 따라 공기 환경에서 구한 피로평가 결과에 공기 환경에서의 피로수명과 냉각재 환경에서의 피로수명의 비율인 환경피로보정계수를 곱하여 냉각재 환경에서의 피로누적계수를 식 (3)과 같이 계산한다.

$$CUF_{en} = \sum U_{air} \frac{N_{air}}{N_{en}} = \sum U_{air} F_{en} \quad (3)$$

여기서, N_{air} 및 U_{air} 는 각각 ASME B&PV Code 요건

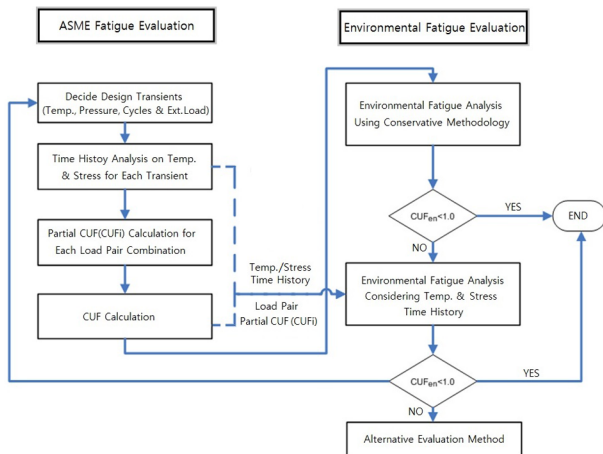


Fig. 2. Flow chart of environmental assisted fatigue evaluation.

에 따라 구한 공기환경에서의 허용 사이클수와 누적피로계수이며, N_{en} 및 CUF_{en} 은 원자로냉각재 환경에서의 허용 사이클수와 누적피로계수이다. 또한 F_{en} 은 환경피로보정계수로 가압기 살수배관 엘보우 재료인 스테인리스강에 대한 환경피로보정계수는 다음의 식 (4)와 같이 구해진다⁴⁾.

$$F_{en} = \exp(-T^* O^* \dot{\epsilon}^*) \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} T^* &= 0.0 && (T < 100^\circ C) \\ &= (T-100)/250 && (100 \leq T \leq 325^\circ C) \\ &= 0.90 && (T \geq 325^\circ C) \\ O^* &= 0.14 && (\text{모든 DO}) \\ \dot{\epsilon}^* &= 0.0 && (\dot{\epsilon} > 10\%/s) \\ &= \ln(\dot{\epsilon}/10) && (0.0004 \leq \dot{\epsilon} \leq 10\%/s) \\ &= \ln(0.0004/10) && (\dot{\epsilon} < 0.0004\%/s) \end{aligned}$$

식 (4)에 알 수 있듯이 환경보정계수를 결정하는 구성인자 중에서 가장 큰 영향을 주는 것이 바로 변형률 속도(strain rate)이므로, 각각의 세부 하중구간에서의 정확한 변형률속도를 구하는 것이 매우 중요하다. 세부 하중구간(k)에서 변형률속도를 구하는 방법은 다음의 식 (5)와 Fig. 3에 나타내었다.

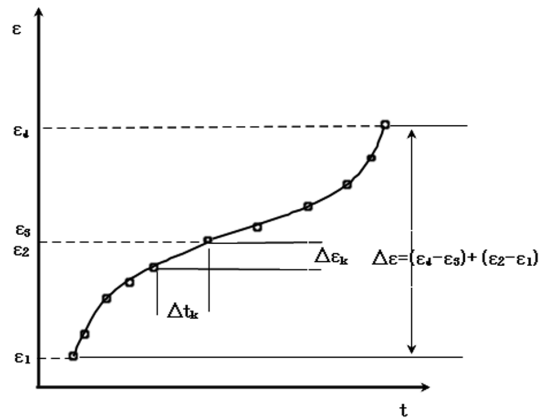


Fig. 3. Determination of strain rate by MRA (modified rate approach) method.

$$\dot{\epsilon}_k = \frac{\Delta \epsilon_k}{\Delta t_k} (\%/sec) \quad (5)$$

여기서, $\Delta \epsilon_k = SI_{range,k} \times \frac{100}{E}$ 이고, $SI_{range,k}$ 는 세부 구간 k 에서의 응력강도 변화량이고, E 는 재료의 탄성계수이다.

3. 피로평가 및 결과

3.1 형상 및 재질

본 연구에서 해석 대상으로 선정된 가압기 살수배관 및 살수배관 엘보우의 공칭직경(nominal diameter)이 101.6 mm, 두께(thickness) 13.5 mm로 형상은 Fig. 4와 같다. 또한, 엘보우와 수평, 수직관과 연결되는 용접부의 내면에는 카운터보링을 적용하였으며, 그 최소두께는 11.8 mm이다.

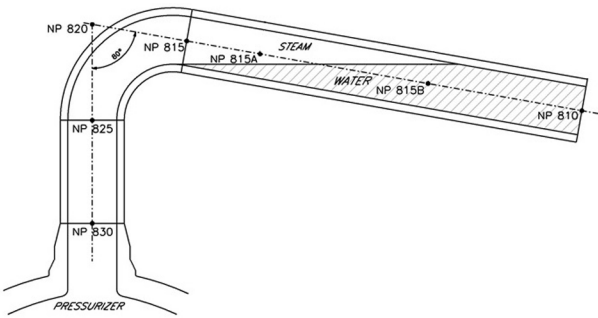


Fig. 4. Configuration of pressurizer spray line elbow.

Table 1 Material Properties of SA-312 TP316 stainless steel

Temp (°F)	E (GPa)	α (10-6 mm/mm/°C)	σ_y (Mpa)	σ_u (MPa)
RT	195	15.1	207	517
50	190	15.5	207	517
100	186	16.4	178	517
150	183	17.2	161	506
200	178	17.9	147	495
250	174	18.4	137	495
300	174	18.8	130	495
350	174	19.1	125	495

살수배관 및 엘보우, 용접부, 카운트보링부에 대해서 해석에 사용된 재료는 SA-312 TP316 스테인리스강이며, SA-312 TP316에 대한 온도에 따른 재료물성치는 Table 1과 같으며, 가압기 살수배관 엘보우의 열응력 및 구조응력 계산에 사용되었다⁸⁾.

3.2 배관 운전 및 구조 하중

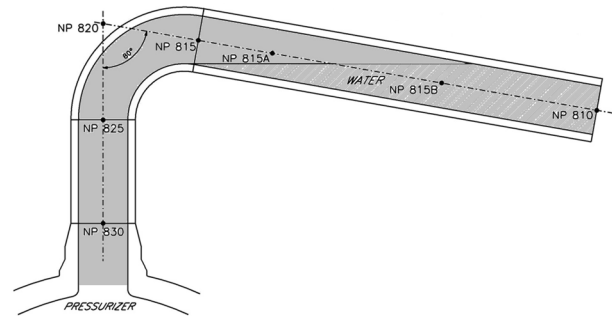
가압기 살수배관 엘보우에 작용하는 하중은 설계기준하중을 주요 절점에 대한 하중으로 계산하여 사용하였으며, 배관 해석에 적용된 하중의 종류는 내압 및 열하중, 열성층하중, 지진하중 등을 포함한 배관하중이다. 각 과도조건에 따른 압력을 적용하였으며, 각 과도조건별 최대 및 최소압력은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Occurrence and pressure for transients(assumed)

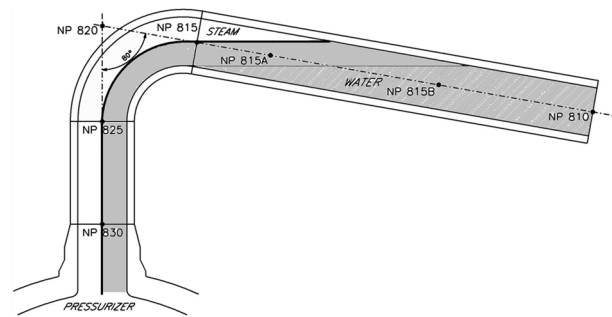
Event Description	Cycles	Prsssure(ksig)	
		Max.	Min.
Daily Load Power Ramp Change	44,000	2.335	2.285
Turbine Step Load Change	3,620	2.355	2.185
Turbine Ramp Load Change	3,200	2.400	2.230
Non-Load Change Events	13,960	2.355	1.610
Plant Heatup/Cooldown	250/250	2.235	0
RCS Hydrostatic Test	15	3.125	0
Heat Removal by the 2ndary System	150	2.590	1.965
Decrease in RCS Flow Rate	30	2.165	0.285
Change in RCS Inventory	50	2.355	1.500
SSE load	320	2.355	2.285
IRWST load	900	2.355	2.285

본 연구에서 사용된 운전 과도조건은 국내 건설 중인 신규원전의 운전 과도조건과 유사하게 가정된 과도조건을 적용하였으며, 열전달계수는 유량 및 유속을 반영하여 계산하였다. 각 과도조건의 종류 및 발생횟수는 Table 2에 나타냈다. 또한, 실제 해석에서는 Fig. 5과 같이 살수배관 엘보우 내부 유량에 따른 열성층 경계부위의 위치를 달리하여 적용하였다.

일반적으로 원전배관의 설계기준에 따르면 수평배관 전체 또는 배관 단면에 국부적으로 저주기 열피로를 유발시키는 열하중만을 열성층 하중으로 고려하며,



(a) maximum



(b) half

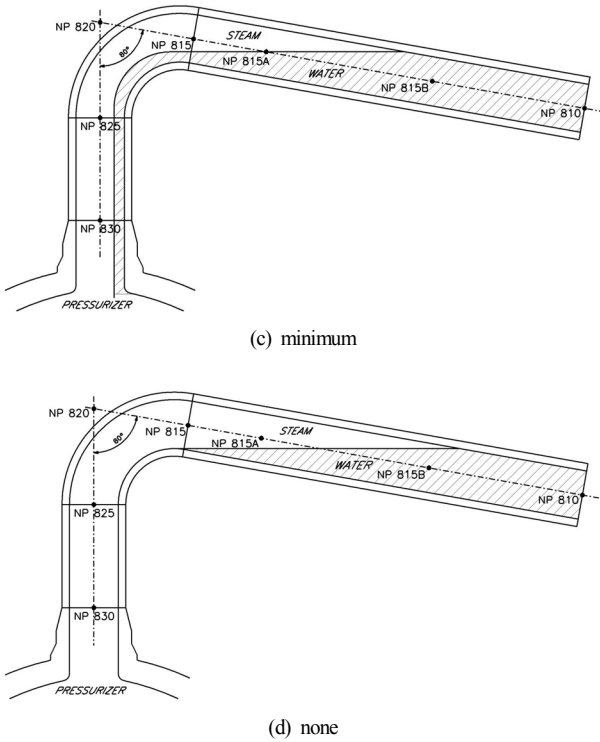


Fig. 5. Thermal stratified layer according to flow rate of spray line.

열성층 유체의 경계면에서 나타나는 열피 현상에 의한 경계면의 국부적인 고주기 열피로 영향은 열성층 하층으로 고려하지 않는다⁹⁾.

3.3 피로 평가

가압기 살수배관 엘보우의 피로해석을 위해 앞의 3.1절과 3.2절에 명시한 형상, 재질 및 하중 관련 자료를 기초로 하여 가압기 살수노즐에서부터 엘보우, 수평 배관을 포함하는 범위에 대해 모델을 구성하였다. 엘보우를 지난 후단 수평 배관의 경우 아래로 10° 기울어져 있기 때문에 이를 모사할 수 있도록 3차원 해석 모델을 이용하여 열해석 및 열응력 해석을 수행하였다. 본 연구에서 배관 모델링 및 해석에 사용한 상용 프로그램은 ANSYS 15.0¹⁰⁾이다. 가압기 살수배관 엘보우의 3차원 해석 모델은 원주방향으로 대칭인 1/2 모델로 구성하였으며, 해석 모델의 절점(node) 수는 235,062개, 요소(element) 수는 212,370개이다. 또한, 열해석에 사용된 ANSYS 요소는 SOLID70, 응력해석에 사용된 요소는 SOLID185이다.

Fig. 6은 살수배관 해석모델을 나타낸 것이고, Fig. 8은 국부응력 및 압력응력을 구하기 위하여 사용된 상세 구조해석 모델 및 경계조건을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 7에는 누적피로계수를 평가하기 위한 평가위치를

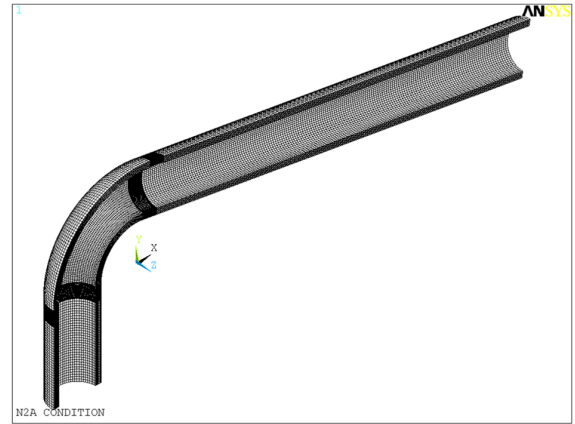


Fig. 6. Finite element model of spray line elbow.

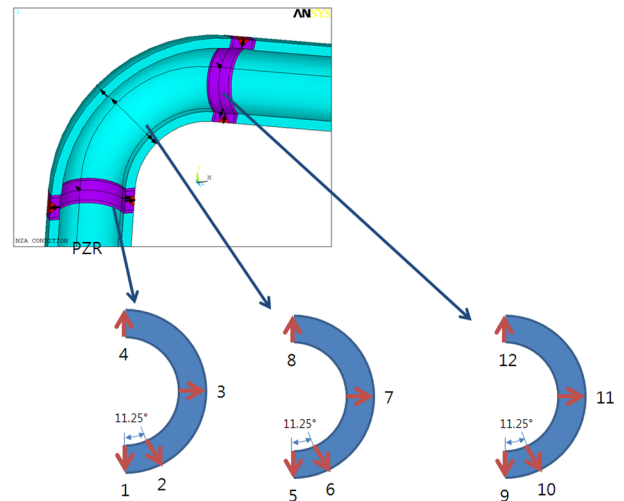


Fig. 7. Locations for fatigue evaluation of spray line elbow.

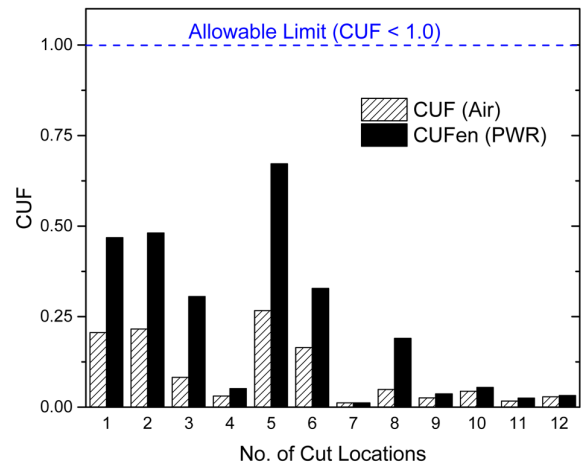


Fig. 8. CUFs of spray line elbow in air and PWR environments.

표시하였다. 평가 위치는 엘보우 용접부 및 엘보우 중심에 대해서 열해석 결과를 토대로 열성층에 의한 열응력이 가장 크게 발생하는 부위를 선정하였다. 피로

에 영향을 미치는 응력 중 가장 큰 부분을 차지하는 것도 열응력이므로 본 선정부위에 대해 피로해석을 수행하였다.

Fig. 7에서와 같이 피로해석 부위로 선정된 12개의 단면들(cut locations)에 대해 각각 공기환경 누적피로계수를 구한 후 환경보정계수를 곱한 환경피로누적계수와 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 살수배관 엘보우 중심 내호면(intrados)에서의 그림에서 환경피로누적계수가 가장 높게 나왔으나 허용치인 1보다는 적은 값을 보여 환경피로 설계기준을 만족시킴을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

국내 신규원전 가압기 살수배관 엘보우를 대상으로 기존의 환경피로평가 방법이 갖는 과도한 보수성을 완화하기 위해 전통적인 NB-3600의 평가방법 대신 NB-3200 기반의 공기환경 상세 피로해석 및 환경보정계수를 적용한 환경피로평가를 수행하였다. 그 결과, 피로에 취약한 열성층 발생 위치를 포함한 살수배관 엘보우의 모든 평가 부위에서 환경영향을 고려한 누적피로계수가 1 미만의 값을 나타내 환경피로 허용 설계기준을 만족하였다.

아울러 NB-3600을 기반으로 설계된 배관계통에 대해 NB-3200 기반 상세 피로해석 및 환경피로 기술기준의 적용 방법과 절차를 수립하여 환경피로평가 관련 보수성을 최적화하였다. 따라서 향후 본 연구 결과를 토대로 열성층을 포함하고 있는 다른 안전등급 배관계통들에 대한 환경피로평가에 적용할 경우 환경피로 설계 여유도를 크게 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

References

- 1) ASME, B&PV Code, Section III, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Component", ASME B&PV Code Section III, 2007.
- 2) T. Kim and B. S. Kim, "Development and Application of Detailed Procedure to Evaluate Fatigue Integrity for Major Components Considering Operating Conditions in the Nuclear Power Plant", J. Korean Soc. Saf., Vol. 21, No. 6, pp. 20-25, 2006.
- 3) T. Kim and J. G. Lee, "Effect of Stress Concentration Factors on the Fatigue Evaluation of the Direct Vessel Injection Nozzle", J. Korean Soc. Saf., Vol. 25, No. 6, pp. 53-59, 2010.
- 4) USNRC, "Guidelines for Evaluating the Effects of Light-Water Reactor Environments in Fatigue Analysis of Metal Components", Regulatory Guide 1.207, Rev.1, 2018.
- 5) USNRC, "Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials", NUREG/CR-6909, Rev. 1, ANL-12/60, 2018.
- 6) ASME, "Code Case N-792 ; Fatigue Evaluations Including Environmental Effects", ASME B&PV Code Section III, Division 1, 2010.
- 7) ASME, "Code Case N-779 ; Alternative Rules for Simplified Elastic-Plastic Analysis Class 1", ASME B&PV Code Section III, Division 1, 2010.
- 8) ASME, "Materials ; Properties", ASME, B&PV Code Section II, Part D, 2010.
- 9) EPRI, "Thermal Stratification, Cycling, and Striping (TASCS)", EPRI Report No. TR-103581, 1994.
- 10) Computer Code ANSYS, Revision 15, Swanson Analysis System, Inc, 2016.