

# Simplified Elastic-Plastic Analyses 기반 열피로 시편의 균열 개시 수명 예측 비교 연구

박신제\* · 김윤재<sup>†,\*</sup> · 김진원\*\* · 김태순\*\*\* · 정재윤\*\*\*

## A Comparative Study of Simplified Elastic-Plastic Analyses for Predicting Thermal Fatigue Life

Shin Je Park\*, Yun Jae Kim<sup>†,\*</sup>, Jin Weon Kim\*\*, Tae Soon Kim\*\*\*, and Jae Yoon Jeong\*\*\*

(Received 25 September 2024, Revised 21 October 2024, Accepted 26 October 2024)

### ABSTRACT

In this study, the influencing factors of the four simplified elastic-plastic analysis methods (ASME B&PV Code Sec. III NB, ASME Code Cases N-779, N-904 and JSME EPD Code Case) for thermal fatigue loading were investigated via FE analysis of a simulated specimen. As expected, the ASME B&PV Code Sec. III NB method is the most conservative, because it applies the same  $K_e$ -factor to both primary and secondary stresses. The JSME EPD Code Case predicts a fatigue life 1 to 2 times longer than the ASME Code Sec. III method, depending on the restraint condition. The Code Case N-904 predicts a fatigue life 1 to 5 times longer. Finally, the Code Case N-779 provides the greatest reduction in conservatism, with a predicted fatigue life 3 to 7 times longer than the ASME Code Sec. III method.

**Key Words :** Thermal fatigue(열피로), Stainless steel(스테인리스강), Simplified elastic-plastic analysis(단순 탄소성 해석 방법),  $K_e$ -factor(탄소성 보정계수)

### 기호설명

$K_e$	= strain distribution factor
$N_f$	= Number of cycles at failure (fatigue life)
$m, n$	= material constants in Eq. (2)
$q$	= elastic follow-up factor
$S_{alt}$	= alternating stress intensity
$S_{lt}$	= local thermal stress
$S_m$	= design stress intensity
$S_n$	= range of primary plus secondary stress intensity

$S_p$	= range of total stress intensity
$S_{tb}$	= thermal bending stress
$\sigma_i (i = 1 \sim 3)$	= principal stress components

## 1. 서 론

소형 모듈 원전(Small Module Reactor, SMR)은 일체형 제작 및 조밀 배치로 기존 원전과 비교하여 열 하중과 기계적 구속이 증가한다. 또한 80년 설계 수명 및 탄력 운전 적용으로 열적 전이 현상과 열, 기계적 하중 횡수가 증가한다. 따라서 SMR은 설계 특성상 대형 원전에 비해 피로 손상에 취약하게 되고 기존 설계 코드 기반 열피로 평가 방법에서 설계 여유도를 확보하는 것이 중요한 이슈로 대두될 수 있다.

이에 따라 열피로 평가 방법의 설계 여유도 확보를 위

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학부  
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)9299-1718

\* 고려대학교 기계공학부

\*\* 조선대학교 원자력공학과

\*\*\* 한국수력원자력 중앙연구원

한 사전 대응으로 설계 코드 기반 열피로 평가 방법의 개선이 필요하다. 현재 대부분의 원전 설계에서 ASME B&PV Code Sec. III<sup>(1)</sup>에서 제시하는 기준을 따라 피로 건전성을 평가하고 있다. ASME B&PV Code Sec. III는 탄성 해석을 기반으로 하는 피로 평가 절차를 제시하고 있는데 소성에 의한 변형률 증가를 탄소성 보정 계수 ( $K_e$ -factor)로 보정하는 단순 탄소성 해석 방법(simplified elastic-plastic analysis)을 제시하고 있다. 이 단순 탄소성 해석 방법의  $K_e$ -factor가 과도하게 큰 보수성을 지니고 있다는 것이 문제가 되고 있다<sup>(2)</sup>. 따라서  $K_e$ -factor의 과보수성을 줄이기 위해 ASME Code Case N-779<sup>(3)</sup>, ASME Code Case N-904<sup>(4)</sup>, JSME EPD Code Case<sup>(5)</sup> 등에서 대체 평가 방법을 제시하고 있다.

ASME Code Case N-779와 ASME Code Case N-904에서는 응력 유형에 따른 구분을 하지 않는 ASME B&PV Code Sec. III와 다르게 1차 응력과 2차 응력을 구분하여 응력 유형에 따른 소성 영향을 다르게 고려하여 보수성을 완화하고 있다. CC N-779의 경우 응력을 세분화하여 각 응력의 소성 영향을 다르게 고려하고 있다. 하지만 CC N-779 평가법은 계산 과정이 복잡하고 기존 ASME B&PV Code Sec. III 평가 절차에서 요구하지 않는  $S_{p-lr}$ ,  $S_{p-rb-lr}$ ,  $S_{lr}$  등의 결과가 필요하다는 단점이 있다. 따라서 계산이 간단하면서도 기존 ASME B&PV Code Sec. III 평가 절차에서 요구하는 응력 결과를 이용한 평가 방법을 CC N-904에서 제시하였다. ASME B&PV Code, Sec. III, CC N-779, CC N-904 평가 방법의 경우  $K_e$ -factor 계산을 위해 응력 선형화와 응력 구분 과정이 필요하고 3차원 형상의 경우 응력 선형화와 응력 분류가 매우 복잡하다는 문제가 있다<sup>(6)</sup>. 따라서 JSME EPD CC에서 elastic follow-up factor  $q$ 를 통해 응력 선형화와 응력 구분 없이  $K_e$ -factor를 계산하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 과보수성이 문제되고 있는 ASME B&PV Code Sec. III NB에서 제시하는 단순 탄소성 해석 방법의 개선 방안을 모색하기에 앞서 ASME B&PV Code Sec. III NB의 단순 탄소성 해석 방법과 여러 Code Case에서 제시하는 개선된 단순 탄소성 해석 방법을 비교하였다. 각 방법의 영향 인자를 파악하기 위해 간단한 배관 형상과 하중, 구속 조건을 가정하여 탄성 해석을 수행하고 평가 방법론 적용에 따른 결과를 비교한다.

## 2. 피로 수명 계산 방법

### 2.1 ASME B&PV Code, Section III, NB

ASME B&PV Code, Sec. III NB-3200에서는 최대 전단 이론(Tresca Criterion)에 의한 응력 강도를 채택하고 있다. 따라서 교번 응력은 식 (1)과 같이 결정된다.

$$S_{alt} = \frac{1}{2} \max[(\sigma_1 - \sigma_2), (\sigma_2 - \sigma_3), (\sigma_3 - \sigma_1)] \quad (1)$$

ASME B&PV Code Sec. III NB-3228.5에서 소성에 의한 변형률 증가를 보정하기 위해 식 (2)와 같이 상한값을  $1/n$ 으로 하는  $K_e$ -factor 식을 제시하였다

$$\begin{aligned} K_e &= 1.0, \text{ for } S_n < 3S_m \\ &= 1.0 + \left[ \frac{(1-n)}{n(m-1)} \right] \left( \frac{S_n}{3S_m} - 1 \right), \text{ for } 3S_m < S_n < 3mS_m \\ &= \frac{1}{n}, \text{ for } S_n \geq 3mS_m \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $S_n$ 은 1차 막 응력과 굽힘 응력, 2차 막 응력과 굽힘 응력 강도의 합이다.  $S_m$ 은 ASME Code Section II, Part D<sup>(7)</sup>에 제시된 설계 응력 강도를 의미하고  $n$ 과  $m$ 은 재료상수로 ASME B&PV Code Sec. III에서 스테인리스강에 대해 각각 0.3, 1.7로 제시하고 있다.

$S_n$ 을 결정하기 위해 두계방향 응력을 막 응력, 굽힘 응력으로 구분하는 응력 선형화를 수행해야 한다. 막 응력과 굽힘 응력을 계산하는 식은 각각 식 (3), 식 (4)와 같다. 계산된 막 응력과 굽힘응력의 합이  $S_n$ 이 된다.

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma(x) dx \quad (3)$$

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} x \sigma(x) dx \quad (4)$$

최종적으로 피로 누적 계수(Cumulative Usage Factor, CUF)를 계산하기 위한 교번응력은 식 (5)과 같이 최대 전단 이론에 의한 응력 강도에 소성에 의한 변형률 증가를 고려한  $K_e$ -factor를 곱하여 계산된다.

$$S'_{alt} = K_e S_{alt} \quad (5)$$

### 2.2 ASME Code Case N-779 (CC N-779)

CC N-779에 따른 교번응력  $S_{alt}$ 은 식 (6)과 같다.

$$S_{alt} = \frac{1}{2} \cdot [K_e \cdot S_{p-tb-lt} + K_v \cdot (S_{lt} + K_n \cdot S_{tb})] \quad (6)$$

여기서  $S_p$ 는 전체 응력 강도 범위,  $S_{tb}$ 는 열급힘 응력,  $S_{lt}$ 는 국부 열응력을 의미한다. 열급힘 응력  $S_{tb}$ , 국부 열응력  $S_{lt}$ 는 2차 응력으로 구분되고 전체 응력 강도 범위  $S_p$ 에서 2차 응력을 뺀 응력  $S_{p-tb-lt}$ 를 1차 응력으로 구분하고 있다. 또한  $K_e$ 는 ASME B&PV Code Sec. III의 식 (1)과 동일하다.  $K_v$ 는 포아송 비 변화에 따른 소성 효과를 보정하기 위한 계수로 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} K_v &= 1.4, \text{ for } S_p > 3S_m \text{ and } S_{p-tb-lt} \geq 3S_m \\ &= 1.0 + 4.0 \left( \frac{S_p - 3S_m}{S_{tb+lt}} \right), \text{ for } S_p > 3S_m \text{ and } S_{p-tb-lt} < 3S_m \\ &= 1.0 \text{ for } S_p \leq 3S_m \end{aligned} \quad (7)$$

$K_n$ 는 노치와 같이 국부적인 불연속부에서 발생하는 소성 변형을 재분배를 보정하기 위한 계수로 식 (8)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} K_n &= 1.0 + \left[ \left( \frac{S_{p-lt}}{S_n} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[ \frac{S_{p-lt} - 3S_m}{S_{p-lt}} \right], \text{ for } S_{p-lt} > 3S_m \\ &= 1.0, \text{ for } S_{p-lt} \leq 3S_m \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $n$ 은 2.1절에서 설명한 상수와 동일하다.

### 2.3 ASME Code Case N-904 (CC N-904)

ASME Code Case N-904에 따른  $K_e^*$ -factor는 식 (9)과 같다.

$$\begin{aligned} K_e^* &= 1.0, \text{ for } S_n \leq 3S_m \\ &= \min \left[ K_e, 1.4(1-R)K_T^{\frac{1-n}{1+n}} + K_e R \right], \text{ for } 3S_m < S_n < 3mS_m \\ &= \min \left[ \frac{1}{n}, 1.4(1-R^*)K_T^{\frac{1-n}{1+n}} + K_e R^* \right], \text{ for } S_n \geq 3mS_m \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $K_T$ 는 응력 집중 계수를 의미하고  $n$ 은 2.1절에서 설명한 상수와 동일하다.  $R$ 과  $R^*$ 는 전체 응력 중 1차 응력의 비를 의미하며 식 (10)과 같이 계산된다.

$$R = \frac{S_n - S_{tb}}{S_n} \text{ and } R^* = \frac{S_n - S_{tb}}{3mS_m} \quad (10)$$

교번 응력은 식 (11)과 같다.

$$S_{alt} = \frac{1}{2} K_e^* S_p \quad (11)$$

### 2.4 JSME EPD Code Case (JSME EPD CC)

JSME EPD CC에서 제시하는  $K_e$ -factor는 식 (12)과 같다.

$$K_e' = 1 + (q_p - 1) \left( 1 - \frac{3S_m}{S_p} \right) \quad (12)$$

여기서 elastic follow-up factor  $q_p$ 는 식 (13)과 같다.

$$q_p = (q_1 - q_0) \left( 1 - \frac{3S_m}{S_p} \right) + q_0, \quad q_0 = 1.5, \quad q_1 = 4.0 \quad (13)$$

여기서  $q_0, q_1$ 는 여러 형상에 대한 탄소성 해석 수행 후 계산된  $q_p$ 를 bounding하기 위한 값으로 JSME EPD Code Case에서 각각 1.5, 4.0로 제시하고 있다<sup>(8)</sup>.

### 2.5 피로 누적 계수 계산

ASME B&PV Code Section III NB에서 설계 피로 선도와 Miner's rule을 이용한 피로 평가 기준을 제시하고 있다. 교번 응력 계산 후 피로 선도와 비교하여 피로 사이클  $N_i$ 를 계산한다. 그 후 식 (14)와 같이 피로 누적 계수 (CUF)를 계산한다.

$$CUF = \sum_i \frac{n}{N_{f,i}(S_{alt}')} \quad (14)$$

여기서  $i$ 는  $i$ 번째 사이클을 의미하고  $n$ 은 사이클 수를 의미한다.

CC N-779, CC N-904, JSME EPD CC는 모두 ASME B&PV Code Section III NB-3228.5에서 제시된  $K_e$ -factor의 지나친 보수성을 개선하기 위한 방법으로 교번 응력 계산 후 피로 누적 계수와 피로 선도를 사용한 피로 수명 계산 절차는 ASME B&PV Code Section III NB와 동일하다.

## 3. 유한 요소 해석 절차

### 3.1 해석 모델

본 연구에서는 배관 두께의 영향을 확인하기 위해 외경이 달라지는 316L 스테인리스강 배관 시편 형상을 모델로 선정하였다. 배관 모델의 길이는 260 mm, 내경은

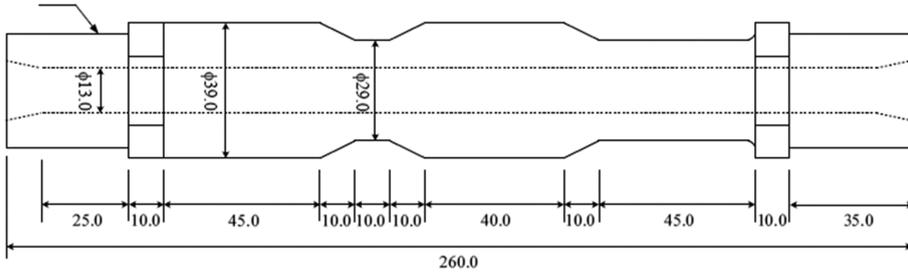


Fig. 1 Thermal fatigue test specimen.

13 mm, 얇은 부위와 두꺼운 부위의 외경은 각각 29, 39 mm이다. 해석에 사용된 모델의 형상은 Fig. 1과 같다.

### 3.2 가정된 열피로 하중 조건

시편에 가해지는 열피로 하중 및 절차는 기존 실험 논문<sup>(9,10)</sup>들을 참고하여 가정하였다. 시편 외부에 존재하는 induction heater를 통해 시편을 가열한다. 시편 전체가 350도가 되면 상온의 냉각수를 시편 내면에 흘려 냉각을 수행한다. 25초간 냉각 후 냉각수 공급을 정지하고 시편을 60초간 가열한다. 이후 25초 냉각, 60초 가열의 열하중 사이클을 반복한다.

### 3.3 경계조건 및 유한요소 해석 조건

가정된 실험 절차를 모사하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 유한 요소 해석 모델은 Fig. 2과 같다. 요소는 2D 2차 축 대칭 저감 요소를 사용했다. 열 해석을 수행하고 열 해석에서 계산된 온도 profile을 이용해 탄성 응력 해석을 수행하였다. 열 해석 및 응력 해석에 사용된 물성은 ASME Code Sec. II, Part D를 참고하였다.

열전달 해석 조건은 외면의 induction heater를 가정하여 시편 외면 온도를 350도로 고정하였다. 시편 내면에서 발생하는 냉각과 가열을 고려하기 위해 냉각 시에는 냉각수에 의한 강제 대류를 가정하여 열전달 계수를 15 kW/m<sup>2</sup>K로 부여하였으며 가열 시에는 공기에 의한 자연 대류

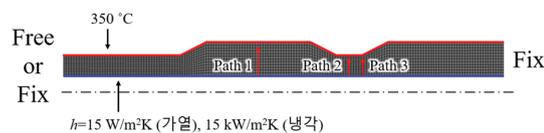


Fig. 2 FE model of the thermal fatigue test specimen.

를 가정하여 열전달 계수를 15 W/m<sup>2</sup>K로 부여하였다. 시편 내부의 공기와 냉각수의 온도는 25도로 가정하였다.

응력 해석 조건은 두 가지 경우를 가정하였다. 첫 번째 조건은 시편 한쪽 끝단의 축 방향 변위를 구속하고 반대쪽 끝단의 경우 자유롭게 변형되도록 하였다. 두 번째 조건은 시편 양 끝단의 축 방향 변위를 구속하였다. 이때 구속은 시편이 첫 번째 가열 사이클에서 팽창이 완료된 후 부여하였다.

## 4. 해석 결과

### 4.1 탄성 해석 결과

응력 해석 결과는 냉각, 가열 시점에서 Fig. 2와 같이 시편의 두꺼운 영역의 중심 Path 1과 얇은 영역 중심인 Path 2를 따라 두께방향으로 산출했다. 또한 불연속부의 영향을 확인하기 위해 두께가 변화하는 Path 3에서 두께 방향 응력을 산출하였다.

Figs. 3, 4는 Free 조건, Fix 조건에서 Path 1을 따라 산출한 응력 분포이고 Figs. 5, 6은 Free 조건, Fix 조건에서 Path 2를 따라 산출한 응력 분포이다. 가열 시 시편 내부의 온도는 시편 내부에 온도 구배가 발생하지 않아 응력이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 냉각 시 시편 외면의 온도는 고정되어 있지만 시편 내면은 냉각되어 수축이 발생하여 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 구속 조건과 위치에 상관없이 축 방향, 원주 방향 응력의 경우 시편 내면에서 인장 응력이 발생하고 시편 외면의 경우 압축 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 반경 방향 응력의 경우 시편 내면과 외면에서 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 균열은 시편 내면에서 발생할 것으로 예측된다.

Figs. 3과 4는 Path 1에서 Free 조건과 Fix 조건에 따라

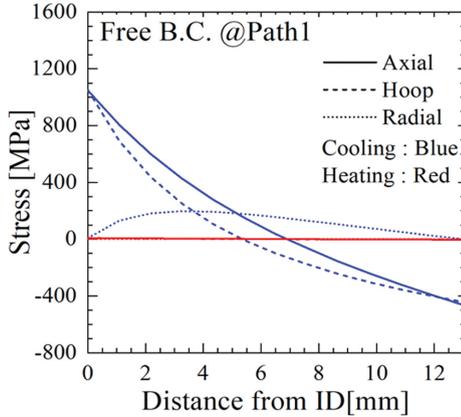


Fig. 3 Stress distribution through Path 1 at Free B.C.

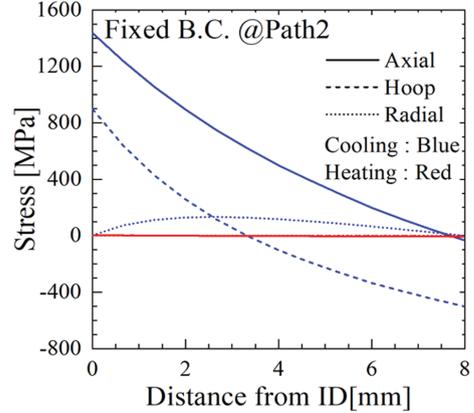


Fig. 6 Stress distribution through Path 2 at Fixed B.C.

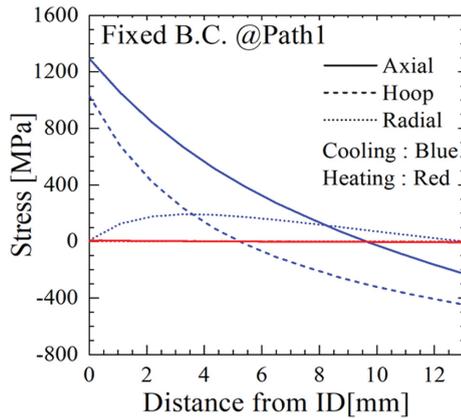


Fig. 4 Stress distribution through Path 1 at Fixed B.C.

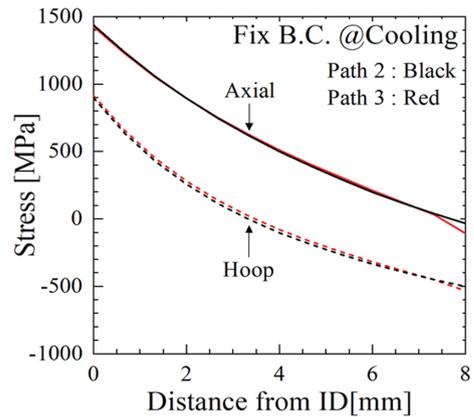


Fig. 7 Stress distribution through Path 2 and Path 3 at Fixed B.C.

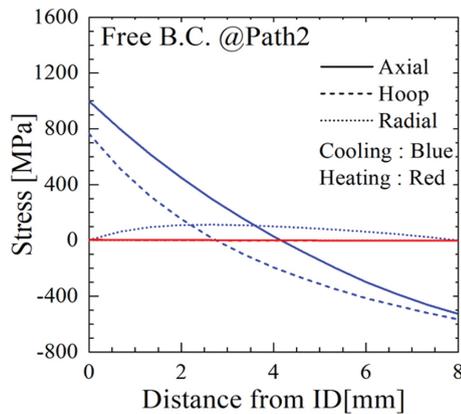


Fig. 5 Stress distribution through Path 2 at Free B.C.

산출한 그림이고 Figs. 5와 6은 Path 1에서 Free 조건과 Fix 조건에 따라 산출한 그림이다. 축 방향 구속이 존재하

면 축 방향 응력이 증가하고 원주 방향 응력과 반경 방향 응력의 경우는 축 방향 구속의 영향이 없는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Path 2와 불연속부 Path 3에서 냉각 시 발생하는 축 방향 응력과 원주 방향 응력을 나타낸 것이다. 시편 내면에서 발생하는 응력은 Path 2와 Path 3에서 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 시편 외면의 온도는 변화하지 않고 시편 내면의 온도만 변화하므로 시편 외면에 존재하는 불연속부가 시편 내면의 응력에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

#### 4.2 설계코드 기반 열피로 평가 결과

4.1절에서 시편 내부에서 균열이 발생될 것으로 예측되었으므로 Path 1과 Path 2 내면을 평가 지점으로 선정하

였다. 시편 내면의 응력은 축 방향 응력이 최대이고 모든 경우에서 가열 시 시편 내면의 응력은 0이므로 응력 강도는 축 방향 응력과 같게 된다. 따라서 축 방향 응력이 최대 전단 이론의 최대 응력 강도가 되어 축 방향 응력을 평가에 사용하였다.

선형화된 응력과  $S_m$ 을 Table 1에 나타내었다.  $S_m$ 은 350도에서의 값을 사용하였다. 열 하중은 큰 차이가 없으므로 열 하중에 의한 굽힘 응력 또한 큰 차이가 없지만 막 응력의 경우 축 방향 구속에 의해 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 모든 경우에서  $S_n$ 이  $3mS_m$ 보다 크게 계산되므로 ASME B&PV Code Section III 방법으로 계산된  $K_e$ 는 모두 3.33으로 계산되는 것을 알 수 있다.

CC N-779에서 탄성 응력 기반 평가를 수행하기 위해 전체 응력 강도 범위  $S_p$ 와 열굽힘 응력  $S_{tb}$ , 국부 열응력  $S_{lt}$ 를 계산해야 한다. 현재 하중 조건은 열하중만 존재하므로 굽힘 응력은 모두 열굽힘 응력이다. 또한 ASME B&PV Code Section III NB-3213.13에서 반경 방향 온도 구배로 인해 발생한 응력 구배에서 실제 응력과 선형화된 응력의 차이가 국부 열응력이라고 정의하므로 전체 응력 강도 범위  $S_p$ 와 선형화된 응력  $S_n$ 의 차이가 국부 열응력  $S_{lt}$ 가 된다. 계산된 응력 성분을 Table 2에 나타내었다.

2.2절에서 설명한 바와 같이 세분화된 소성 보정 계수  $K_v$ ,  $K_n$ 은 계산된 응력 성분과 허용 응력  $S_m$ 을 비교하여 결정한다. CC N-904의 경우 ASME B&PV Code Section III와 동일한 응력 결과로 계산이 가능하다. 불연속부예

**Table 1** Calculated bending stress, membrane stress,  $S_n$  and allowable stress  $S_m$

		Bending stress [MPa]	Membrane stress [MPa]	$S_n$ [MPa]	$S_m$ [MPa]
Path 1	Free	709	118	827	282.9
	Fix	716	355	1,071	
Path 2	Free	754	95	849	
	Fix	713	565	1,278	

**Table 2** Calculated  $S_p$  and  $S_{lt}$

		$S_p$ [MPa]	$S_{lt}$ [MPa]
Path 1	Free	1,036	209
	Fix	1,278	207
Path 2	Free	990	141
	Fix	1,431	153

**Table 3** Calculated  $K_e$ ,  $K_v$ ,  $K_n$

		$K_e$	$K_v$	$K_n$	$K_T$
Path 1	Free	3.33	1.32	1	1
	Fix		1.4		
Path 2	Free		1.31		
	Fix		1.4		

**Table 4** Calculated  $S_{alt}$

		$S_{alt}$ [MPa]			
		ASME	N-779	N-904	JSME
Path 1	Free	2,028	941	1,001	1,635
	Fix	2,504	1,447	1,953	2,184
Path 2	Free	1,940	858	962	1,534
	Fix	2,802	1,828	2,802	2,532

의한 소성 보정 계수  $K_n$ 과 응력 집중 계수  $K_T$ 는 평가 지점이 시편 내면으로 응력 집중이 발생하지 않으므로 1로 계산하였다. 계산된 소성 보정 계수  $K_e$ ,  $K_v$ ,  $K_n$ 을 Table 3에 나타내었고 각 평가 방법으로 계산된 교변응력을 Table 4에 나타내었다.

앞선 탄성 해석 결과와 각 평가 방법을 사용해 피로 수명 평가를 수행하였다. 계산된 피로 수명은 Table 5에 나타내었다. 피로 수명 평가 시 피로 선도는 ASME design curve를 사용하였다.

피로 수명 평가 결과를 보면 ASME B&PV Code Sec. III 평가법이 가장 보수적인 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. CC N-779의 경우 응력을 세분화하여 계산하므로 ASME B&PV Code Sec. III 평가법과 비교하여 피로 수명은 약 3~7배 길게 계산된다. CC N-904의 경우 CC N-779와 다르게 국부 열응력은 계산에 포함하지 않고 열 굽힘 응력만 2차 응력으로 고려하여 보수성을 완화한다. 따라서 ASME B&PV Code Sec. III 평가법과 비교하여 피로 수명은 약 1~5배 길게 계산되어 CC N-779보다 보수성 완화가 적게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 식 (9)와 식 (10)에서  $S_n - S_{tb}$ 가  $3mS_m$ 보다 큰 경우 CC N-904에

**Table 5** Calculated  $N_f$

		$N_f$ [cycles]			
		ASME	N-779	N-904	JSME
Path 1	Free	95	546	469	152
	Fix	61	198	103	81
Path 2	Free	104	694	517	174
	Fix	48	119	48	59

서 제시하는  $K_e$ -factor가 ASME B&PV Code Sec. III 평가법에서 제시하는  $K_e$ -factor와 같아지는 것을 알 수 있다. 따라서 구속에 의한 축 응력이 매우 크게 발생하는 Path 2, fix 조건에서  $S_n-S_{ib}$ 가  $3mS_m$ 보다 커지게 되어 ASME B&PV Code Sec. III 평가법에서 제시하는  $K_e$ -factor와 CC N-904에서 제시하는  $K_e$ -factor가 같게 계산된 것을 확인할 수 있다. JSME EPD CC의 경우 ASME B&PV Code Sec. III 평가법보다 약 1~2배 수명이 길게 계산되었지만 CC N-779, CC N-904보다 보수적인 결과가 계산됨을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

기존 열피로 평가 방법의 설계 여유도 확보를 위해 설계 코드 기반 열피로 평가 방법의 개선이 필요하다. 기존 설계 코드 기반 열피로 평가 방법의 영향 인자를 파악하기 위해 간단한 배관 형상과 하중, 구속 조건을 가정하여 평가 방법론에 따른 결과를 비교하였다. 평가 결과를 통해 내린 결론은 아래와 같다.

- ASME B&PV Code, Sec. III 평가법은 응력 구분 없이  $K_e$ -factor를 적용하는 반면, CC N-779, CC N-904는 1차 응력과 2차 응력을 구분하여 탄소성 보정을 다르게 적용한다.
- CC N-779의 경우 열 굽힘 응력, 국부 열 응력을 2차 응력으로 분류하여 보수성을 완화한다. 계산된 수명의 경우 ASME Code Sec. III 평가법과 비교하여 3~7배 길게 계산된다.
- CC N-904의 경우 국부 열응력은 고려하지 않고 열 굽힘 응력만 2차 응력으로 구분하므로 본 문제에 대해서는 CC N-779보다 보수적으로 계산된다. 또한 구속에 의한 membrane stress가 1차 응력으로 계산되는 Fix 조건의 경우 큰 1차 응력으로 인해 ASME Code Sec. III와 동일한 결과로 계산된다. 계산된 수명의 경우 ASME Code Sec. III 평가법과 비교하여 1~5배 길게 계산되었다.
- JSME EPD CC의 경우 응력 분류 없이 여러 형상에 대한 upper bound로 계산된 탄성 추중 계수  $q$ 를 통해 탄소성 보정을 수행한다. 계산된 수명의 경우 ASME Code Sec. III 평가법과 비교하여 1~2배 길게 계산되었다.

## 후 기

본 논문은 한국수력원자력(주)에서 재원을 부담하여 수행한 연구결과입니다(제 2023-기술-05호 No. 2023-TECH-05, 과제명: 탄력유전 적용에 따른 SMR 기기의 열피로 실험 및 손상 안전여유도 평가 기술 개발).

## 참고문헌

- (1) ASME BPVC Sec.III, 2003, "Rules for Construction of Nuclear Facility Components," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (2) Pan, S. H., and Deardorff, A. F., 1998, "An Improved Approach for Performing Simplified Elastic-Plastic Fatigue Analysis," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, TR-107533.
- (3) ASME BPVC Code Case N-779, 2003, "Alternative Rules for Simplified Elastic-Plastic Analysis," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (4) ASME BPVC Code Case N-904, 2020, "Alternative Rules for Simplified Elastic-Plastic Analysis," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (5) Asada, S., Okamoto, A., Nishiguchi, I., Aoki, M., and Asada, Y., 2004, "Technical Bases for Alternative Stress Evaluation Criteria in Japan Based on Partial Inelastic Analyses," *Proc. of ASME 2004 PVP Conference*, San Diego, CA, July 25-29, PVP2004-46679.
- (6) Asada, S., Hirano, T., and Kasahara, N., 2010, "Overview of Code Case on Alternative Design Methodology by Using Elastic-Plastic Finite Element Analysis for Class 1 Vessels in the JSME Rules on Design and Construction," *Proc. of ASME 2010 PVP Conference*, Bellevue, Washington, July 18-22, PVP2010-49200.
- (7) ASME BPVC Sec.II, 2010, "Materials, Part D – Properties (Metric)," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (8) Asada, S., and Nakamura, T., 2011, "Simplified Elastic-plastic Analysis Methods in the JSME Rules on Design and Construction," *J. Environ. Eng.*, Vol. 6, pp. 753-764. doi:https://doi.org/10.1299/jee.6.753.
- (9) Johns, D. P., Holiday, J. E., Leax, T., and Gordon, J. L., 2004, "Analysis of a Thermal Fatigue Test of a Stepped Pipe," *Proc. of ASME 2004 PVP Conference*, San Diego, CA, July 25-29, PVP2004-46776.
- (10) Nilsson, K. F., Dolci, F., Seldis, T., Ripplinger, S., Grah, A., and Simonovski, I., 2016, "Assessment of Thermal Fatigue Life for 316L and P91 Pipe Components at Elevated Temperatures," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 168, pp. 73-91. doi:https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.09.006.