

# 유효탄성계수를 이용한 균열 비선형 및 재료 비선형을 고려한 파단전누설(LBB) 평가 방법<sup>§</sup>

김만원\*† · 김성환\* · 이의종\*  
\* 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

## Leak-Before-Break (LBB) Assessment Method Considering Crack Nonlinearity Using Effective Elastic Modulus and Material Nonlinearity

Maan-Won Kim\*†, Sung-Hwan Kim\* and Eui-Jong Lee\*

\* Nuclear Engineering & Technology Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd

(Received December 14, 2010 ; Revised March 15, 2011 ; Accepted March 15, 2011)

**Key Words:** Leak-Before-Break(파단전누설), Crack Stability(균열안정성), Nonlinearity(비선형), Effective Elastic Modulus(유효탄성계수), Finite Element Analysis(유한요소해석)

**초록:** 최근 열출력이 향상된 신규 원자력발전소의 개발이 증가하고 있으며 배관계에 가해지는 모멘트 및 하중의 크기도 증가하는 경향이므로 배관의 파단전누설(LBB) 적용조건 여유도가 작아질 수 있다. 본 논문에서는 이러한 배관에서 LBB 적용조건을 만족시키기 위한 추가적인 여유도 확보의 한 방법으로써 균열의 비선형과 재료물성치를 고려하는 방법을 제시하였다. 균열 및 재료의 비선형을 고려하기 위하여 유한요소해석과 보(beam) 이론을 병용하였다. 원자력 배관을 모델로 하여 본 논문에서 제안한 방법으로 LBB 균열안정성 해석을 수행하였으며, LBB 여유도가 낮은 위치에서 균열 및 재료 비선형을 고려함으로써 추가적인 LBB 여유도를 확보할 수 있음을 확인하였다.

**Abstract:** With the increase in the thermal power output of recently developed nuclear power plants, the applied forces and moments are increased in some piping systems, so that the leak-before-break (LBB) application criteria would not be satisfied in those pipes. In this paper, we present a method for obtaining the additive LBB margin in the pipes by considering the nonlinearity of the crack and material properties. Finite element analysis and the moment-rotation equation of beam theory were used to calculate the nonlinearity of the crack and material properties. Moreover crack stability analysis was performed using the method proposed in this study. The LBB margin was increased effectively through consideration of the nonlinearity of the crack and material properties in the pipe.

- 기호설명 -

1. 서론

- $\theta_1, \theta_2, \theta_{eff}$  : 보의 처짐 회전각(radian)
- $M_1, M_2, M_C$  : 굽힘모멘트(in-lb)
- $E_i, E_C, E_{eff}$  : 탄성계수(psi), ( $i=1, \dots, n$ )
- $L_i, L_C$  : 보의 구간요소 길이(in), ( $i=1, \dots, n$ )
- $I_i, I_C, I_{eff}$  : 보의 구간요소의 단면이차모멘트 ( $in^4$ ), ( $i=1, \dots, n$ )

파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 개념은 원전의 안전성과 경제성을 확보할 수 있고, 기기 및 설비 검사를 위한 접근공간의 확보를 통해 원전 작업종사자의 방사선 피폭량을 저감시킬 수 있는 등의 장점이 있다. 최근에 개발된 신형원전인 AP1000(1117MW), US-EPR(1600MW) 및 US-APWR(1700MW)의 설계에도 LBB 개념이 적용되었다. 그러나 신형원전의 용량증대로 인하여 기존 원전에서 LBB 여유도가 작았던 부분에 대한 LBB 여유도 확보의 필요성이 요구된다. 최근 US NRC(National Regulatory Committee)는 누설감

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, mwkim@khnpp.co.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

지설비의 기술개발과 성능향상, 설치 및 운영 경험의 확보, 설비신뢰도 향상을 위한 여러 가지 기법의 도입 등의 영향을 반영하여 RG (Regulatory Guide) 1.45를 개정하면서 LBB 적용을 위한 누설을 감지 한계치를 1gpm에서 0.5gpm으로 낮추었다.<sup>(1)</sup> 현행 LBB 평가에서는 누설률 1gpm에 안전여유도 10을 곱하여 10gpm의 누설이 발생하는 균열길이를 가상누설균열길이(postulated leakage crack length)로 사용하였다.<sup>(2,3)</sup> 개정된 RG 1.45에 따라 가상누설균열길이를 계산할 경우 추가적인 LBB 여유도를 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

1986년 10 CFR Part50 App. A의 GDC-4<sup>(4)</sup>가 개정되어 부분적인 LBB 적용을 허용한 후, GDC-4의 이행을 위해 1987년에 SRP 3.6.3<sup>(3)</sup>이 Draft로 발간되었다. 그 후 누설감지능력이 향상되고 파괴역학 평가기법도 발전하였다.<sup>(5-7)</sup> 이러한 기술적 진보를 LBB 평가에 반영하기 위한 국제공동연구로 IPIRG(International Pipe Research Program), BINP(Battelle Integrity of Nuclear Piping) 등이 수행되었다. NUREG/CR-6765<sup>(8)</sup>에서는 3단계의 LBB 평가방법을 제시하였다. 제 1단계 평가방법은 간단한 수식과 한계하중법(Limit Load Method)을 사용하여 평가하는 방법으로 가장 큰 보수성을 가지는 방법이다. 제 2단계 평가방법은 현행 LBB 평가방법과 유사하나 압력유기굽힘, 용접잔류응력, 균열형상의 영향, 균열면에 작용하는 내압, 재료파괴인성치 등을 고려할 수 있도록 한다. 제 3단계 평가방법에서는 균열과 배관계가 가지는 비선형성을 고려하여 내재적인 여유도를 확보할 수 있도록 하였다.

한편, BINP Task 3 연구에서도 균열을 진전시키려는 에너지는 균열에서 멀리 떨어진 위치에서의 배관의 소성(plasticity)과 균열 자체에 의한 소성에 의해 어느 정도 흡수되어질 것으로 가정하고, 균열 거동과 배관계의 소성에 의한 비선형으로부터 LBB의 실제 여유도를 찾았다.<sup>(9)</sup> BINP는 배관계와 균열의 소성에 의한 비선형을 각각 비선형 소성해석과 스프링-슬라이더(spring-slider) 모델 해석으로 고려하였다. BINP 연구결과, 비선형을 고려하는 경우 굽힘모멘트의 크기가 크게 감소하였으며, 굽힘모멘트 감소의 정도는 균열에서 멀리 떨어진 부분의 소성만을 고려한 경우가 균열의 비선형만을 고려한 경우에 비하여 더 크게

**Table 1** Comparison of two methods for nonlinearity consideration in LBB analysis

	This Paper	BINP
Crack Non-linearity	Use effective elastic modulus calculated from moment-rotation relationship obtained from FEM analysis with straight cracked pipe	Use spring-slider model for modeling the crack behavior
Material Non-linearity	Use temperature-dependent elastic-plastic material properties	Perform nonlinear plasticity analysis

나타났다.

본 논문에서는 균열의 소성에 의한 비선형을 고려하기 위하여 스프링-슬라이더 모델을 사용하는 대신에 균열을 포함하는 3차원 직관을 모델링하여 유한요소해석을 수행하고, 균열이 존재함으로써 발생하는 소성의 영향을 보이론(beam theory)의 모멘트-회전 관계식을 사용하여 유효탄성계수(effective elastic modulus)로 계산하였다. 계산된 유효탄성계수를 실제 배관을 모델링한 균열을 포함하지 않는 3차원 유한요소 모델의 평가위치에 적용하여 균열에 의한 소성의 영향을 반영한 축하중과 굽힘모멘트를 계산하였다. 또한 균열에서 멀리 떨어진 부분의 소성을 고려하기 위하여 온도에 따른 탄성계수, 열팽창계수, 인장응력-변형률곡선 물성치를 입력하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

Table 1에 본 논문의 비선형 해석방법과 BINP의 해석 방법의 차이점을 비교하였다.

균열부의 유효탄성계수와 균열에서 멀리 떨어진 부분의 소성을 고려한 LBB 하중평가 및 균열 안정성 평가를 수행하고 각각의 결과를 비교 고찰하였다.

## 2. 비선형 고려방법

### 2.1 균열 비선형 고려방법

균열의 비선형은 균열의 존재로 인하여 균열이 있는 부분의 물성치가 변하는 것과 같은 효과를 낸다고 가정하고, 균열이 없는 배관계 모델에서 균열이 있는 것과 같이 소성 거동하도록 하는 유

효탄성계수를 보이론의 모멘트-회전 관계식을 이용하여 계산하고, 유효탄성계수를 적용하여 배관에서 LBB 하중을 구하는 방법으로 고려될 수 있다.

유효탄성계수의 개념을 설명하기 위하여 Fig. 1과 같은 보를 고려하였다. (a) 균열이 있는 직관에서 작용 모멘트와 회전각을 각각  $M_1$ 과  $\phi_1$  이라고 하고, (b) 동일한 크기이나 균열이 없는 배관에서 작용 모멘트와 회전각을 각각  $M_2$ 과  $\phi_2$  라고 하자. (a)에서  $M_1 - \phi_1$  관계를 구하고, (b)에서  $\phi_1$  이 되는 모멘트를  $M_C$  라고 할 때 균열이 없는 보 모델에서  $M_C$  가 되는  $\phi_2$ 를  $\phi_{eff}$  라고 하면,  $\phi_{eff}$  가 만족되는 탄성계수를 균열의 소성이 고려된 유효탄성계수라고 볼 수 있다.

Fig. 2는 Fig. 1의 배관 (b)를 상세하게 나타낸 것이다. 균열이 있는 부분의 길이  $L_C$ 를 제외한 나머지 부분을  $n$  등분하여  $L_1, L_2, \dots, L_n$  이라고 하고 보요소(beam element)라고 정의하자. 각 구간의 탄성계수와 단면이차모멘트를  $E_C, E_1, E_2, \dots, E_n$  및  $I_C, I_1, I_2, \dots, I_n$  이라고 할 때,  $M_C$ 와  $\phi_{eff}$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$\phi_{eff} = \frac{M_C L_C}{E_C I_{eff}} + \frac{M_1 L_1}{E_1 I_1} + \frac{M_2 L_2}{E_2 I_2} + \dots + \frac{M_n L_n}{E_n I_n} \quad (1)$$

식 (1)에서 단면형상과 두께가 같으므로

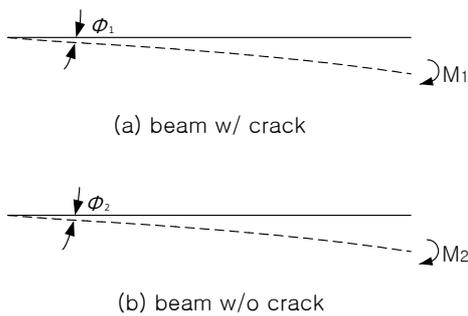


Fig. 1 Beam deflections with/without crack

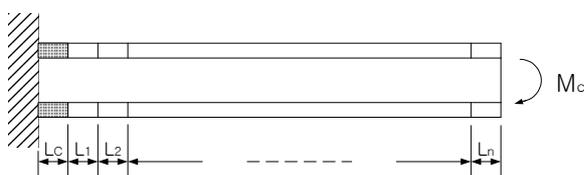


Fig. 2 Beam elements consisted of n+1 division

$$I_{eff} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2)$$

이다. 보요소의 길이  $L_C, L_i (i=1,n)$ 는 균등하게 혹은 불균등하게 나눌 수 있으며,  $\phi_{eff}$ 와  $M_C$ 는 Fig. 1(a)의 균열을 삽입한 직관을 유한요소해석하여 계산할 수 있다.

본 논문에서는  $M_C$ 를 LBB 평가에 사용되는 작용하중으로 놓고, 균열을 포함한 직관을 유한요소해석하여 Fig. 3과 같이 작용하중-회전각 관계를 구하였다. 선형구간을 직선 확장하여  $M_C$ 에 도달할 때의  $\phi$ 를  $\phi_{eff}$  라고 하였다. 보의 전체 길이를  $L(=L_C+L_1+L_2+\dots+L_n)$ 이라고 하면, 식 (1)로부터 유효탄성계수  $E_C$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E_C = \frac{M_C L_C}{I_{eff}} \frac{1}{\left( \phi_{eff} - \frac{M_C(L-L_C)}{E_1 I_1} \right)} \quad (3)$$

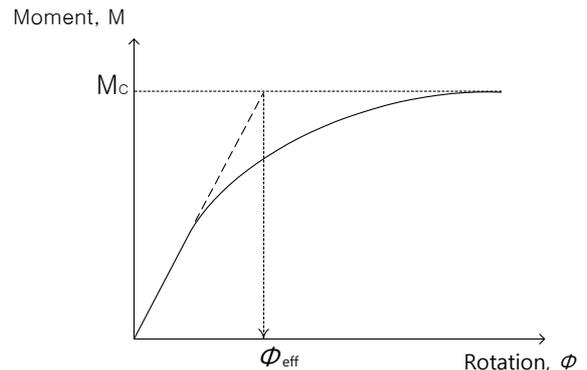


Fig. 3 Calculation of the effective rotation  $\phi_{eff}$ .

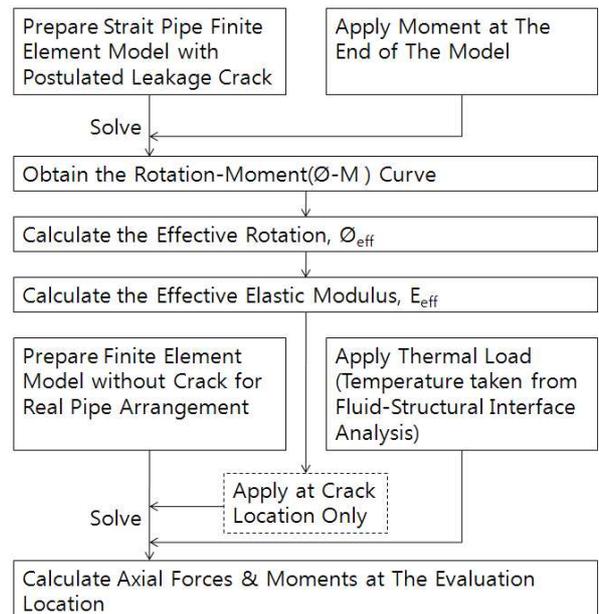


Fig. 4 Flow chart for crack nonlinearity consideration

실제 배관계 유한요소 해석모델을 작성하고 식 (3)에서 계산된 유효탄성계수를 해당 LBB 평가위치에 적용하여 힘과 모멘트를 계산하면, 이 하중은 균열부의 소성이 고려된 작용하중으로 생각할 수 있다. Fig. 4는 균열비선형을 고려하는 방법을 순서대로 나타낸 것이다.

2.2 재료 비선형 고려방법

본 논문에서 재료의 비선형은 실제 배관 형상과 치수를 사용하여 3차원 유한요소해석 모델을 작성하고, 물성치로 온도에 따른 탄성계수, 열팽창계수 및 소성 비선형 인장응력-변형률곡선 값을 적용하여 탄소성 구조해석을 수행함으로써 고려하였다. 유한요소해석 결과 해당 LBB 평가위치에서 구해진 힘과 모멘트는 균열에서 멀리 떨어진 부분의 소성에 의한 비선형이 고려된 LBB 작용하중으로 생각할 수 있다.

해석을 위하여 고려한 배관 소재는 SA-312 Type 347 스테인리스강이다.<sup>(10)</sup> Table 2는 배관 소재의 온도변화에 따른 탄성계수와 열팽창계수를 나타낸 것이다. Fig. 5는 온도별 소성 인장응력-변형률곡선을 나타낸 것이다. 소성 응력-변형률 곡선은 항복응력과 인장응력을 직선으로 이은 bi-linear stress-strain 곡선으로 하였고, 가공경화 법칙은 kinematic hardening rule을 따른다고 가정하였다.

3. 비선형을 고려한 LBB 평가

3.1 LBB 평가 모델

다음의 세 가지 경우에 대하여 비선형을 고려한 해석을 수행하였다.

- (a) 균열 비선형만을 고려한 경우
- (b) 재료 비선형만을 고려한 경우
- (c) 균열 및 재료 비선형을 모두 고려한 경우

비선형해석을 위하여 Fig. 6과 같은 형상의 울진 5,6호기 가압기 밀림배관을 대상으로 선정하였다. 해석대상의 형상 및 치수는 참고문헌 11에 상세히 기술되어 있다. Fig. 6에서 ①, ②A, ②B, ..., ⑩은 LBB 평가를 위한 하중 계산위치를 나타낸 것이다.

밀림배관의 소재는 직경 304.8 mm, 두께 33.35 mm의 SA-312 Type 347 스테인리스강이며, 운전

중 15.5132 MPa의 내압이 작용한다. 발전소 Heat-Up 조건에 대하여 계산된 배관의 각 위치에서 배관하중은 참고문헌 11을 참조하였다. 참고문헌 11에서는 가압기 밀림배관에서 나타나는 열성층을 고려하기 위하여 시간 천이 유체유동해석을 수행하고 Fig. 6의 각 계산위치에서 배관 단면의 상하 온도차가 가장 큰 때의 배관 온도분포를 구하였다. 열성층 이외의 하중은 배관해석 전용프로그램을 사용하여 구하였다. 참고문헌 12에서는 Fig. 6의 각 계산위치에서의 배관하중을 사용하여 응력을 계산하고 LBB 평가를 하였다.

본 논문에서는 비선형을 고려한 해석을 위하여 참고문헌 11과 12의 3차원 배관모델과 균열안정성해석 모델을 사용하였다.

Table 2 Temperature dependent material properties of pipe for nonlinear analysis

Temperature (°C)	Elastic Modulus (Pa)	Thermal Expansion (m/m/K)
21.1	1.95E+11	1.53E-05
93.3	1.90E+11	1.60E-05
148.9	1.86E+11	1.66E-05
204.4	1.83E+11	1.71E-05
260	1.78E+11	1.75E-05
315.6	1.74E+11	1.76E-05
371.1	1.71E+11	1.80E-05
426.7	1.66E+11	1.82E-05

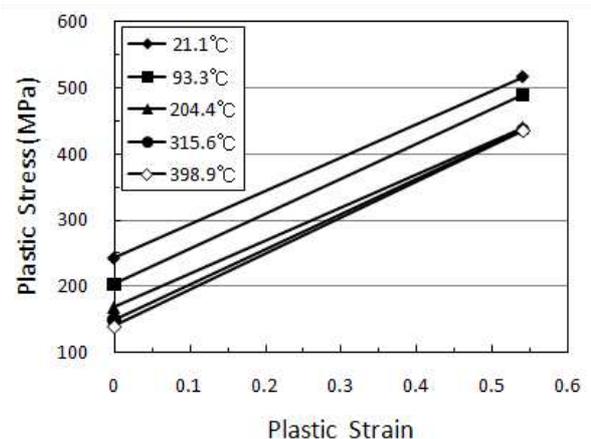
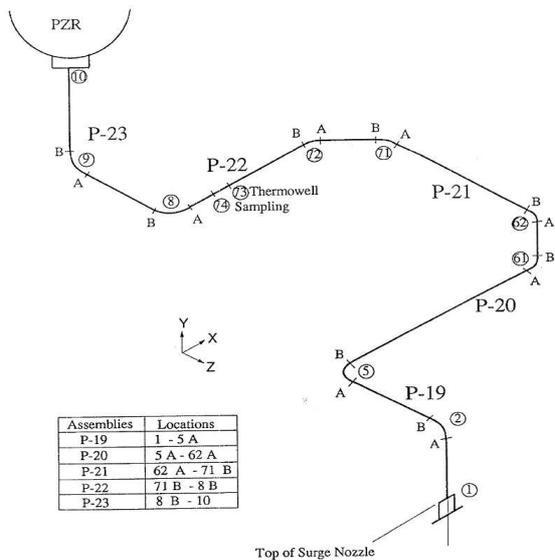


Fig. 5 Temperature dependent plastic stress-strain curves for a nonlinear analysis

**Table 3** Force and moments for LBB analysis at location ① (from Ref. 12)

Location	Fa (kN)	Ma (kN-m)	Mb (kN-m)	Mc (kN-m)	Meq (kN-m)
①	139.674	75.847	71.384	119.210	155.851



**Fig. 6** Surpline pipe and pipe stress calculation locations

3.2 균열 비선형을 고려한 LBB 하중 평가

균열 비선형을 고려하기 위하여 먼저 균열안정성평가에 사용된 하중<sup>(12)</sup>을 적용하여 균열이 포함된 3차원 직관에서의 모멘트-회전 관계를 계산하였다. 해석위치는 Fig. 6의 ①로 정하였다. Table 3은 ① 위치에서 균열안정성해석을 위하여 사용된 LBB 적용하중을 나타낸 것이다. F와 M은 각각 ① 위치의 단면 중심에서의 축하중과 굽힘모멘트를 나타내며, 하첨자 a는 축방향을, b와 c는 각각 축방향에 수직인 평면상의 직교축 방향을 나타낸다. Meq는 다음 식과 같이 조합한 등가굽힘모멘트(equivalent bending moment)이다.

$$M_{eq} = \left\{ M_b^2 + M_c^2 + \frac{\sqrt{3}}{2} M_a^2 \right\}^{0.5} \quad (4)$$

여기서 축방향 모멘트 Ma는 배관에 수직인 단면에서 비틀림하중으로 작용되므로 Ma 성분의

86.6% 만 고려하는 것을 나타낸다.

Table 3의 축하중과 굽힘모멘트는 각각 다음과 같은 조합으로 계산되었다.

$$\begin{aligned} F_a &= |(F_a)_{DW}| + |(F_a)_{TH}| + |(F_a)_P| + |(F_a)_{SSE}| \\ M_a &= |(M_a)_{DW}| + |(M_a)_{TH}| + |(M_a)_{SSE}| \\ M_b &= |(M_b)_{DW}| + |(M_b)_{TH}| + |(M_b)_{SSE}| \\ M_c &= |(M_c)_{DW}| + |(M_c)_{TH}| + |(M_c)_{SSE}| \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 하첨자 DW는 자중, TH는 Heat-Up 열성층, P는 내압, SSE는 안전정지지진하중을 나타낸다. Heat-Up 열성층에 의한 하중은 3차원 유한요소해석으로부터 구하였고, 자중과 안전정지지진하중은 배관해석 전용코드로부터 계산하였다.<sup>(11,12)</sup>

Fig. 7은 균열안정성해석에서 사용된 균열을 포함한 직관 유한요소해석 모델과 경계조건을 나타낸 것이다. 유한요소모델은 배관의 균열에 대한 대칭성을 고려하여 직관의 1/4만 모델링하였으며 사용된 요소는 20-node brick element 이다. 배관의 두께 방향으로 4 층의 요소를 배치하였고, 균열선단에서는 응력 특이요소(singularity element)를 사용하였다. 작용하중은 Table 3의 하중을 사용하였고, 균열길이는 434.086 mm 이다. 이는 가상누설균열길이에 2를 곱한 길이이다. 유한요소해석은 ABAQUS V.6.7 을 사용하여 해석하였다.

Fig. 7의 유한요소해석 결과로부터 굽힘모멘트-회전 관계를 구하여 Fig. 8에 나타내었다. Mc를 Table 3의 등가굽힘모멘트 155.851 kN-m로 놓으면, 선형구간을 확장하여 Mc에 도달할 때의 회전 각은  $\theta_{eff}=0.0121$  rad (0.6933°) 이 된다. 탄성계수  $E_i=174.0237$  GPa (i=1, n), 단면이차모멘트  $I_c=I_i=416231.4$  mm<sup>4</sup> (i=1, n) 이며, 유한요소모델의 전체 길이는 L=3238.5 mm 이다.  $L_c/L=0.00784$ 로 가정하면, 식 (1)로부터 유효탄성계수는  $E_c=3750.748$  MPa이다.

일반적으로 균열에 의한 비선형성은 균열에 의한 응력 재분배로 인한 현상으로 설명될 수 있다. 본 논문에서 고려한 유효탄성계수 방법은 균열을 실제 배관 모델에 삽입한 것이 아니라 균열에 의한 응력 재분배로 나타나는 효과를 등가의 탄성계수로 표현하는 방법을 사용하였다. Fig. 7과 같이 직관 유한요소모델에 균열을 삽입하여 굽힘모멘트와 배관 굽힘각도의 관계로부터 유효탄성계수를 구하였으므로 실제 균열부근의 응력 재분포를 고려한 것과 같은 효과를 얻을 수 있

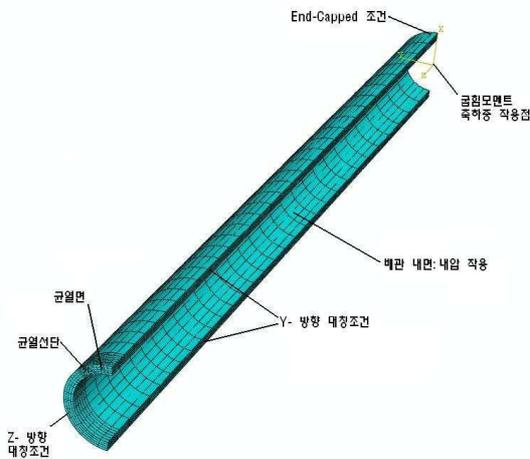


Fig. 7 Finite element mesh and boundary conditions for LBB crack stability assessment

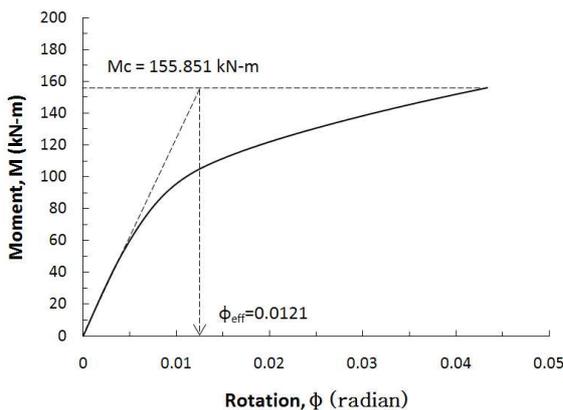


Fig. 8 Estimation of the effective rotation

다. 다만,  $L_c$  값의 크기를 어느 정도로 하는가에 따라 유효탄성계수의 정확성이 달라질 것으로 예상된다.

다음으로 계산된 유효탄성계수를 밀립배관 3차원 유한요소모델(Fig. 9)에 적용하여 해석한 후, 각 평가위치에서 축하중과 굽힘모멘트를 계산하였다. 이때 유효탄성계수는 균열이 위치해야 할 평가위치에 있는 요소들을 원주방향으로 선택한 후 재료물성치로 적용하였다. 유한요소해석은 ANSYS V.10을 사용하였다. Fig. 9의 유한요소 모델은 SOLID45 요소와 SHELL63 요소로 구성하였다. 총 절점수는 98202개 이며 총 요소수는 98000개이다. 구성된 유한요소모델에는 균열이 포함되어 있지 않다.

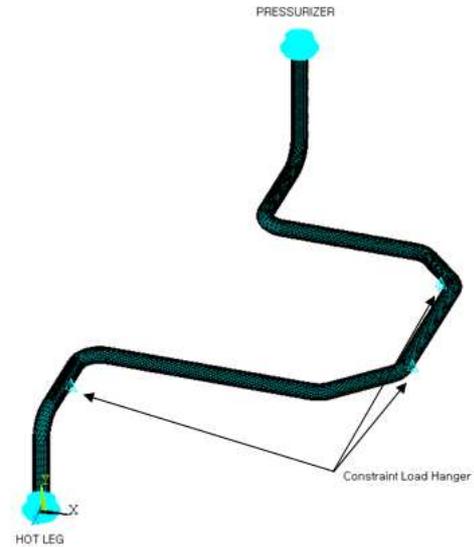


Fig. 9 Pipe stress analysis model and boundary conditions

Fig. 9의 유한요소해석 모델은 참고문헌 11에서 사용되었던 모델로, 가압기 밀립관의 열성층을 모사하기 위한 시간 천이 유동해석결과 얻어진 배관의 온도분포를 체적하중으로 가하는 유한요소모델이다. 따라서 Fig. 9의 유한요소해석 결과 얻어지는 축하중과 굽힘모멘트는 가압기 밀립관의 열성층에 의해 나타나는 배관의 온도분포에 대한 값이며, 식 (5)에서 하첨자 TH로 표시한 하중을 나타낸다. Table 3의 LBB 하중은 식 (4) 및 식 (5)의 조합으로 계산된 값이며, 균열 및 재료 비선형을 고려하지 않은 하중이다.

Fig. 9에서 ① 위치와 ⑩ 위치는 각각 가압기 및 주냉각재 배관의 고온관과 연결된 양 끝단을 나타내며, 유한요소해석 시 절점의 변위와 회전을 구속하였다. Hanger의 위치에 해당하는 절점들은 각 방향별로 변위를 구속하였다. 열변형을 계산을 위한 참조온도(reference temperature)와 초기온도(initial temperature)는 상온(21.1 °C)으로 설정하였다.

유한요소해석 결과로부터 평가위치 ①에서의 축하중과 굽힘모멘트를 계산하여 식 (5)의 열성층항에 대입하여 LBB 하중을 계산하였다(Table 4의 Nonlinear Case1). 등가굽힘모멘트를 비교하면 균열 비선형을 고려한 경우와 비선형을 고려하지 않은 경우의 비는 0.456 (2.19배 감소)이다.

3.3 재료 비선형을 고려한 LBB 하중 평가

재료 비선형은 균열의 소성이 아닌 균열에서 멀리 떨어진 부분에서의 소성변형에 에너지가 사용됨으로써 균열 진전력을 낮추는 개념이다. 소성변형을 고려한 재료 비선형해석을 위하여 Fig. 9의 밀립배관 3차원 유한요소모델에서 열성층에 따른 온도별 재료물성치(Table 2와 Fig 5)를 입력하여 해석하였다. 유한요소모델과 경계조건 및 하중조건은 3.2절에 기술한 바와 동일하다.

BINP 연구에서는 균열에서 멀리 떨어진 부분의 재료 비선형을 고려하기 위하여 비선형 소성 해석을 하였으며, 여러 하중을 고려하였다. 본 논문에서 재료 비선형은 열성층의 경우를 모사한 것으로 Fig. 9의 3차원 탄소성 구조해석 모델에 온도별 재료물성치를 적용하였으며, 내압, 자중, 지진하중의 경우는 참고문헌 11에서 설계하중을 적용하여 배관해석 전용프로그램으로 계산된 값이다.

유한요소해석 결과로부터 평가위치 ①에서의 축하중과 굽힘모멘트를 계산하여 식 (5)의 열성층 항에 대입하여 LBB 하중을 계산하였다(Table 4의 Nonlinear Case2). 등가굽힘모멘트를 비교하면 재료 비선형을 고려한 경우와 비선형을 고려하지 않은 경우의 비는 0.483 (2.07배 감소)이다.

3.4 균열 및 재료 비선형을 모두 고려한 경우

균열 비선형과 재료 비선형을 모두 고려하기 위하여 3.2절과 3.3절의 유효탄성계수 및 온도에 따른 물성치를 동시에 적용하여 Fig. 9의 밀립배관 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과로부터 평가위치 ①에서의 축하중과 굽힘모멘트를 계산하여 식 (5)의 열성층 항에 대입하여 LBB 하중을 계산하였다(Table 4의 Nonlinear Case3). 등가굽힘모멘트를 비교하면 균열 및 재료 비선형을 고려한 경우와 비선형을 고려하지 않은 경우의 비는 0.451 (2.22배 감소)이다.

3.5 비선형 평가결과 및 고찰

Table 4에서 Elastic의 경우는 Table 3의 LBB 하중으로 비선형을 고려하지 않은 경우이며, Nonlinear Case 1, 2 및 3은 각각 균열 비선형만 고려한 경우, 재료 비선형만 고려한 경우 및 균열과 재료 비선형을 모두 고려한 경우에 대한 LBB 하중을 나타낸다. 비선형 고려 효과는 Case3

Table 4 Force and moments considering nonlinearity of material plasticity at location ①

	Fa	Ma	Mb	Mc	Meq	Ratio to Elastic
	(kN)	(kN-m)	(kN-m)	(kN-m)	(kN-m)	
Elastic	139.7	75.847	71.384	119.210	155.851	1
Nonlinear Case1	25.8	11.547	56.199	42.121	71.056	0.456
Nonlinear Case2	25.8	13.581	61.735	41.093	75.237	0.483
Nonlinear Case3	24.91	10.248	55.295	42.414	70.344	0.451

> Case1 > Case2 의 순서로 나타났으며, 세 경우 모두 탄성해석만 수행하는 경우에 비하여 큰 LBB 하중 감소가 나타났다. 균열 비선형과 재료 비선형을 모두 고려한 경우의 효과는 어느 하나만 고려하는 경우에 비하여 큰 차이를 나타내지 않았다. 이와 같은 경향은 BINP 연구결과에서도 찾아볼 수 있다. BINP 연구에서는 균열길이에 2를 곱한 균열크기에 대하여 평가하고 원래 균열길이에 대한 평가 결과와 비교한 결과, 소성의 효과는 균열길이가 2배 증가만큼 비례하여 나타나지 않았다. 본 논문의 경우 균열 비선형을 해석할 때 균열길이의 2배에 해당하는 긴 균열을 대상으로 해석하였기 때문에 각 비선형 해석 결과 간에 차이가 크게 나타나지 않았을 것으로 판단된다.

평가위치 ①의 균열안정성평가에 사용되는 균열길이는 434.086 mm로 가상누설균열길이의 2배 길이이며 균열각은 약 171.2° 이다. 이것은 거의 단면의 반이 되는 크기로 Nonlinear Case1에서 큰 비선형 감소량을 나타내는 원인 중 하나일 것으로 생각된다. 따라서 본 논문의 방법으로 균열의 비선형을 고려할 때 추가적으로 확보되는 여유도의 크기는 균열의 크기에 영향을 받을 것으로 생각된다.

그러나 재료 비선형의 경우는 균열에서 멀리 떨어진 부분의 소성변형에 의한 것이므로 Fig. 9의 평가위치 중 균열의 존재를 가정하는 평가위치에 따라 영향을 받을 것으로 생각된다.

비선형 효과에 영향을 주는 요인은 많이 존재한다. 예를 들면, 균열 비선형과 재료 비선형 모두 배관계의 강성도와 구속조건, 하중이력에 의해 영향을 받을 것이다. 하중이력의 예로 열성층

에 의한 동적하중을 들 수 있다. 본 논문에서는 가압기 Heat-Up 시 발생하는 밀립배관의 열성층을 고려하였으나 Fig. 6의 평가위치 중 배관 단면 상하온도차가 가장 크게 나타나는 한 시점에서의 배관 전체 온도분포하중을 사용하였을 뿐 열성층에 의한 짧은 시간 동안 동적하중 변화는 고려하지 않았다.

위 결과로부터 균열 비선형과 재료 비선형을 고려하는 것은 추가적인 LBB 여유도 확보에 큰 영향을 주는 인자임을 알 수 있다.

3.6 LBB 균열안정성 평가

각 비선형 Case에 대하여 탄소성 유한요소해석을 통하여 J-T 평가법으로 균열안정성 평가를 수행하였다. J-T 평가법은 재료와 작용하중 간의 J-적분값과 찢김계수(tearing modulus) T 의 관계를 비교하여 균열진전의 안정성 여부를 판단하는 평가방법으로서 NUREG 1061, Vol. 3<sup>(2)</sup>에 구체적으로 기술되어 있으므로 상세한 설명은 생략하였다. 균열의 크기는 가상누설균열길이에 2를 곱한 길이이며 직관으로 모델링하였다.

균열의 안정적인 성장(stable growth)을 위한 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial J_{applied}}{\partial a} < \frac{\partial J_{material}}{\partial a} \quad \text{at } J_{applied} = J_{material} \quad (6)$$

여기서 J는 J-적분(J-integral) 값을 나타낸다.  $J_{applied}$ 는 작용하중 하에서 주어진 균열크기에 대한 J-적분값으로 균열이 있는 Fig. 7의 유한요소 모델을 해석하여 계산하였고,  $J_{material}$ 은 연성균열

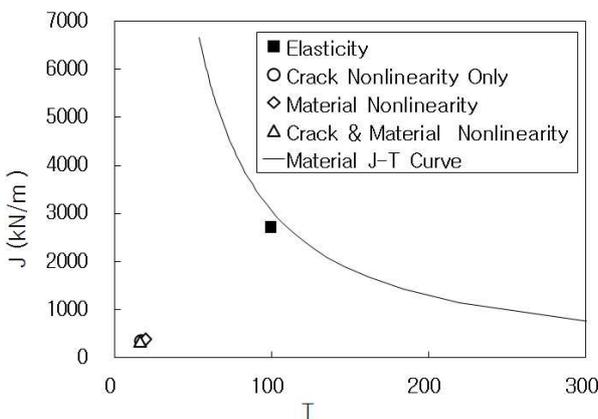


Fig. 10 J-T Curve for fracture stability analysis

진전에 대한 재료의 저항 물성치로 시편을 사용하여 J-R시험으로 구해지는 값으로 참고문헌 12와 동일한 값을 사용하였다.

Fig. 10은 탄성 및 각 Nonlinear Case에 대한 J-T 평가선도를 나타낸 것이다. 비선형 Case의 J-적분값들이 J-T 선도의 안정적인 균열성장 영역에서 비선형을 고려하지 않은 경우에 비하여 더 많은 여유도를 가짐을 알 수 있다. 한편, 비선형을 고려하는 경우 추가적인 여유도 확보는 가능하나 보수성이 낮아지므로 비선형해석을 통한 LBB 평가시 정밀한 누설감지설비 능력과 세밀한 수치해석 평가 및 검토가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

추가적인 LBB 여유도 확보를 위한 방법으로 균열 거동에서 오는 비선형과 재료의 소성변형에서 오는 비선형을 고려하여 LBB 적용하중을 계산하였다. 본 논문에서는 균열의 비선형 거동을 고려하는 방법으로 보이론의 모멘트-회전 관계식을 이용하여 유효탄성계수를 계산하는 방법과 균열에서 멀리 떨어진 부분의 소성변형에 의한 비선형을 고려하는 방법으로 배관계 전체를 3차원 유한요소해석 모델로 작성하여 해석하는 방법을 사용하였다. 원자력발전소 밀립배관을 선정하여 사례 평가를 수행한 결과, 비선형을 고려하는 경우 LBB 적용하중이 2.07~2.22 배 낮아졌으며, 낮아진 하중을 사용하여 균열안정성평가를 수행한 결과, 추가적인 LBB 여유도를 확보할 수 있었다.

본 논문에서 제시된 방법은 비선형을 고려한 추가적인 LBB 여유도 확보를 위한 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 본 논문의 방법은 간편하게 균열 및 재료 비선형을 고려할 수 있는 장점이 있으나, 정확성 및 유효성 향상을 위한 후속 연구로 실제의 배관 및 균열의 거동을 고려하기 위하여 관성효과가 고려된 동적하중을 사용한 해석방법, 유효탄성계수를 적용하는 범위에 대한 민감도 분석, 원주방향 균열길이 변화에 따른 유효탄성계수의 정의 기준 및 타당한 범위에 대한 연구, 균열의 방향을 고려한 유효탄성계수 적용방법 등의 연구가 필요하다.

참고문헌

(1) US NRC Regulatory Guide 1.45, Rev.1, 2008,

- Guidance on Monitoring and Responding to Reactor Coolant System Leakage.
- (2) NUREG-1061, Vol. 3, 1984, Evaluation of Potential for Pipe Breaks, Report of the U.S. NRC Piping Review Committee.
- (3) NUREG-0800, 2007, U.S. NRC Standard Review Plan 3.6.3, Revision 1, Leak-Before-Break Evaluation Procedures.
- (4) 10 CFR Part50 App. A, General Design Criteria for Nuclear Power Plants, Rev.4.
- (5) Yu, Y. J. and Kim Y. J., 1996, "Effects of Nozzle on LBB Evaluation for Small Diameter Nuclear Piping," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 20, No. 6, pp. 1872~1881.
- (6) Huh, N. S., Kim, Y.-J. and Kim, Y.-J., 2001, "Application of Enhanced Reference Stress Method to Nuclear Piping LBB Analysis : Finite Element Validation," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 25, No. 4, pp. 741~747.
- (7) Lee, C. Y., Kwon, J. D., Lee, Y. S. and Sul, I. C., 2001, "Application of the Leak Before (LBB) Concept to A Heat Exchanger in A Nuclear Power Plant," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 10~20.
- (8) NUREG/CR-6765, 2002, *Development of Technical Basis for Leak-Before-Break Evaluation Procedures*, Battelle, U.S. NRC.
- (9) NUREG/CR-6873, Vol.2, 2005, The Battelle Integrity of Nuclear Piping (BINP) Program Final Report Appendices, Battelle, U.S. NRC.
- (10) ASME, 2007, An International Code 2007 Boiler & Pressure Vessel Code, Section II, Part D, Materials
- (11) Kim, B. S. and Jang, Y. H., 2007, "Reduction of Conservativeness in Thermal Stratification Analysis for LBB Application," *Trans. of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 10, 2007.
- (12) Kim, M. W., Kim, Y. J. and Jang, Y. H., 2008, "Level 2 LBB Assessment of A Pressurizer Surgeline in Accordance with NUREG/CR-6765," *2008 Annual Conference of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, pp. 185~186.