

〈논 문〉

하중감소효과를 고려한 원자력 주증기 배관의 균열 안정성 평가

고봉환* · 김영진** · 석창성**

(1995년 12월 9일 접수)

Crack Stability Evaluation of Nuclear Main Steam Pipe Considering Load Reduction Effect

B. H. Koh, Y. J. Kim and C. S. Seok

Key Words : Leak-Before-Break(파단전누설), J-Integral(J-적분), Tearing Modulus(찢김계수), Load Reduction(하중감소), Optimization(최적화)

Abstract

The objective of this paper is to evaluate the crack stability of the nuclear main steam pipes, considering the load reduction effect due to the presence of a circumferential through-wall crack. Also, the optimization techniques are adopted to simulate the crack effect on the elbow component of the piping system. By using a general beam element which contains a discontinuous cross-section, the piping analysis is accomplished to acquire the reduced load. Considering this reduced load, it is feasible for the LBB application in nuclear main steam pipe. Also, by combining an optimization program and a general finite element analysis program, the appropriate dimensions of the simplified beam element which represents the effect of crack in elbow could be successfully determined.

기 호 설 명

- a : 균열길이
- L_* : 배관재의 탄성 유연도
- f : Conservatism 백터
- C_1, C_2 : 상수
- J : J-적분값
- J_{app} : 작용하중의 J-적분값
- J_{mat} : 배관재료의 J-적분값
- gpm : Gallons per minute
- T : 찢김계수
- σ_y : 항복강도
- σ_u : 인장강도
- I_a : 균열부의 면적관성모멘트
- H^{-1} : Hessian의 역행렬

1. 서 론

원자력발전소 배관계통 설계시 배관파단 순간의 동적효과(dynamic effect)를 고려하지 않도록 하는 파단전누설(leak-before-break : LBB)⁽¹⁾ 개념을 도입하려면 대상배관에 대한 파괴역학적 균열 안정성 평가를 하여야 한다. 이를 위해서는 먼저 대상배관에 대해 정적 및 동적 배관해석(piping analysis)을 수행하여 가장 큰 응력이 걸리는 위치에 균열이 존재한다고 가정한다. 이러한 가상균열의 크기는 일반적인 원자력발전소의 누설감지 능력에 충분한 안전여유를 두어 산출하는데, 감지가능한 누설률로부터 결정된 가상균열에 비정상운전조건하에서 대상배관이 받게 될 하중을 가하여 배관이 불안정하게

*회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

**회원, 성균관대학교 기계설계학과

파단되지 않음을 파괴역학적으로 입증하여야 한다. 따라서, 누설이 발생하게 될 관통균열(through-wall crack)이 존재하는 배관계의 안정성 여부는 대상 배관계의 LBB 설계적용을 위해 해결해야 될 가장 큰 과제이다.

일반적으로 LBB 적용을 위한 파괴역학적 균열 안정성 평가법에는 J/T법이 주로 사용되는데 이는 배관계재료의 파괴저항시험으로 얻은 J-적분과 찢김계수의 관계를 작용하중에 대한 J-적분과 찢김계수(tearing modulus)의 관계와 비교하여 균열의 안정성을 평가하는 방법이다. 즉, 균열길이를 a 라고 할 때 다음의 조건을 만족하게 되면 LBB설계 적용이 가능하다.

$$(dT_{app}/da) < (dJ_{mat}/da) \quad (1)$$

설계 초기단계부터 LBB를 적용한 최초의 발전소인 우리나라 영광 원자력 3/4호기를 비롯한 지금까지 세계 각국에 건설된 발전소의 주증기 배관(main steam line)에는 LBB 설계가 적용되지 못하였는데, 그 원인 중 하나는 균열 안정성 해석식식 (1)을 만족하지 못하였기 때문이다. 식 (1)을 만족시키지 못했던 이유는 균열 안정성 평가를 위해 배관계석으로 산출된 비정상운전하중이 실제 균열부의 발생하중보다 크게 평가되어 J_{app} 값이 현실적이지 못하였기 때문이라고 생각된다.

일반적으로 배관계통은 각종 지지물을 포함하는 부정정구조물(statically indeterminate structure)로 정정구조물(statically determinate structure)과는 상이한 파괴거동을 보인다. 그러나, 지금까지는 배관을 정정구조물로 가정하여 탄소성해석을 수행하여 왔다. 즉, 균열이 존재하지 않는 완전한 배관에 대한 응력해석을 통하여 구한 최대 발생하중을 외팔보(cantilever) 형상으로 가정된 배관모델에 적용하여 J_{app} 를 계산하였다. 배관에 큰 누설균열이 존재하면, 그 균열과 소성역의 영향으로 배관계 전체의 하중분포가 달라지게 된다. 따라서, 영광 3/4호기 주증기 배관의 경우 각종 지지 구조물 및 배관의 기하학적 형상에 의한 균열부의 하중감소 효과가 고려되지 못했다. 균열이 존재하는 배관계에 발생하는 실제 하중을 구하려면 균열을 포함하는 전체 배관계를 3차원으로 모델링하여 탄소성 유한요소해석을 수행하여야 하는데, 이는 막대한 해석시간과 계산비용 때문에 현실적으로 불가능하다.

한편, 유명준 등⁽²⁾은 일반적인 배관해석 프로그

램을 이용하여 균열의 효과를 고려한 배관해석 방법을 제안하였다. 또 이와 관련된 연구를 통하여 직경이 작고 균열의 크기가 클수록 하중감소효과가 크며 직경이 작은 배관의 경우에는(직경 305 mm 이하 배관), 50%까지 발생하중이 감소할 수 있음을 보인 바 있다.

Smith⁽³⁾는 양단이 고정되어 있는 배관계 전체의 탄성 유연도(elastic flexibility, L_*)를 고려하면 기존의 불안정 파괴가 일어나는 임계 균열길이의 결정은 누설균열길이 결정시의 비보수성(non-conservatism)을 감안하더라도 배관계 전체의 안정성면에서 보수적(conservative)임을 보였다. 특히, Smith는 원주방향의 관통균열을 가지는 배관에 대해 소성변형은 균열 단면에 국한되고, 균열부를 탄성거동을 하는 양쪽 배관을 연결하는 소성 힌지(plastic hinge)로 가정하였다. 여기서, 균열부에 단위 모멘트를 서로 반대방향으로 작용시키면 배관계의 탄성 유연도를 나타내는 L_* 값을 구할 수 있다. L_* 값은 배관계의 기하학적 형상에 의해 결정되는 파라미터로 L_* 값이 클수록 작용하중에 대한 전체 배관계의 탄성 복원력(elastic follow-up)이 큼을 의미한다. 일반적인 극한 하중법(limit load method)의 경우 균열이 없는 배관에 대한 해석으로 구한 모멘트(M_u)가 소성 극한모멘트(plastic limit moment, M_p)와 같아질 때 배관이 파단된다고 보고 있으나 실제 균열을 진전시키는 모멘트(M_{IN})에는 균열이 없는 부분의 탄성 복원력에 해당하는 여유가 존재하게 된다. 따라서, 이와같은 극한 하중법의 보수성을 $f = M_{IN}/M_u$ 라는 파라미터로 표현할 수 있으며 재료의 연성(ductility)이 클수록, 또한 배관계 전체의 강성도가 클수록 보수성(conservatism)이 커지게 된다. 기존의 LBB 평가과정에서 나타났던 이러한 보수성을 줄일 수 있다면 LBB 적용시 경제적 이득이 큰 주증기 배관에 대해서도 충분히 파괴역학적 균열 안정성을 입증할 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 다른 배관계통에 비해 비교적 직경이 큰 주증기 배관(직경 670 mm)에 대한 파괴역학적 균열 안정성 해석을 통하여 균열부의 하중감소효과가 대상배관의 균열 안정성 평가에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 또한 배관계 전체의 강성도에 큰 영향을 미치는 엘보우(elbow)에 원주방향 관통균열이 존재할 경우, 최적화(optimization) 기법을 이용하여 등가 강성을 가지는 보

요소로 단순화시킴으로써 직관(straight pipe)이 아닌 엘보우에 대해서도 배관 해석시 균열의 효과를 고려할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 주증기 배관의 균열 안정성 평가

2.1 해석대상

해석 대상은 울진 3/4호기 주증기 배관으로 설계 조건인 배관크기, 재질 및 운전온도는 Table 1과 같고, 배관해석으로 구한 주증기 배관의 정상 및 비정상운전하중은 Table 2와 같다.

여기서, 정상운전하중(normal operating load : NOL)의 크기는 자중과 열하중의 대수합으로 결정하며 원자력발전소의 정상적인 운전과정에서 대상 배관이 받게 될 하중을 나타낸다. 비정상운전하중은 원자력발전소가 경험할 수 있는 최악의 상황에서 대상배관이 받을 수 있는 최대 하중이며 그 크기는 정상운전하중에 안전정지지진하중(safe shutdown earthquake : SSE)과 주증기 배관에서

발생할 수 있는 수격하중(steam hammering : SH) 등을 대수적으로 합하여 구한다. LBB 적용을 위한 균열 안정성 해석시 사용되는 하중은 비정상운전하중으로 이 설계조건들을 해석의 입력자료로 사용하였다. 단, 위의 하중조건들은 균열에 의한 하중감소효과가 고려되지 않은 값으로 균열이 없는 완전한 배관계에 대한 응력해석으로부터 산출된 하중값들이다.

2.2 재료물성치

해석에 필요한 재료물성치는 영광 3/4호기 2차계통 LBB실험⁽⁴⁾을 통하여 얻은 데이터를 사용하였다. 재료의 인장특성과 파괴저항특성은 Table 3 및 Table 4와 같다.

일반적으로 누설균열길이 결정에는 배관재료에 대한 인장실험 결과 중 모재의 중간값인 best-fit 선도를 사용한다. 안정성 평가시 보수적인 해석을 위해 파괴저항특성은 용접재의 low-bound, 인장특성은 모재의 low-bound를 사용한다. 인장특성 변화

Table 1 Design condition for main steam line

System	Pipe size(mm)	Thickness(mm)	Material	Temperature(°C)
Main steam	670	28.6	SA106Gr. C	289

Table 2 Loading condition for main steam line

Load	Pressure(MPa)	Axial tension(kN)	Bending moment(kN-m)
NOL	7.3	19.24	790.4
NOL+SSE+SH	7.3	172.8	1365

Table 3 σ - ϵ properties of specimens ME21 & MF01

Identification		σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	α	n
Specimen	Category				
ME21	Best-fit	254	536	2.11	3.57
MF01	Low-bound	200	429	2.81	3.37

Table 4 J-R property of specimen MR21

Identification		J_{IC} (kJ/m)	C_1	C_2
Specimen	Category			
MR21	Low-bound	473.38	610.99	0.42

가 균열 안정성 해석에 미치는 영향을 고찰하기 위해 best-fit에 대하여도 해석하였다.

2.3 누설균열길이 결정

가상균열의 종류 및 형태는 원주방향 관통균열이며 누설균열길이 결정에는 PICEP⁽⁶⁾ 프로그램을 사용하였다. 누설균열길이는 일반적인 원자력발전소의 누설감지장치가 감지할 수 있는 능력인 1 gpm의 누설률에 10배의 안전율을 고려한 10 gpm에 해당하는 크기로 결정한다. 누설균열길이 결정에 사용된 하중은 정상운전하중이며, 해석결과 가상균열 길이는 254 mm로 계산되었다.

2.4 균열 안정성 평가

균열 안정성 해석을 위해 ABAQUS를 이용한 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. PICEP 프로그램에서 결정된 누설균열길이를 가상균열의 크기로 가정하였고, 작용하중은 비정상운전하중을 사용하였다. 균열의 크기와 작용하중의 변화가 배관의 안정성에 미치는 영향을 독립적으로 평가하기 위해 균열길이와 작용하중에 대해 서로 다른 안전계수를 부여한 두 가지 경우를 고려하였다. 즉, $\sqrt{2}$ 배의 비정상운전하중이 누설균열에 작용하는 경우(case 1)와 비정상운전하중이 2배 크기의 누설균열에 작용하는 경우(case 2)에 대하여 각각 균열해석을 수행하였다. 대상배관에 LBB 설계를 적용하기 위해서는 두 경우 모두 파괴역학적 균열 안정성이 입증되어야 한다.

Fig. 1은 탄소성 유한요소해석을 위해 구성한 요

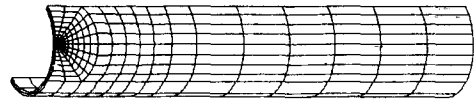


Fig. 1 Mesh for finite element analysis

소망으로서, 대칭성을 이용하여 주증기 배관형상의 1/4만 모델링하였다. 20-절점 등매개요소(20-node isoparametric element)를 사용하여 568개의 요소와 3441개의 절점으로 구성하였다. J-적분을 이용하여 균열의 안정성 여부를 평가하기 위해서는 주어진 하중에 대한 J_{app} 와 재료의 파괴저항값인 J_{mat} 를 구하여야 한다. J_{app} 는 탄소성 유한요소해석을 통하여 구하고 J_{mat} 는 파괴저항측정시험에 의하여 얻은 데이터를 다음식으로 curve fitting하여 균열길이 a 에 대한 함수로 나타낸다.

$$J_{mat}(a) = C_1(\Delta a)^{C_2} \tag{2}$$

탄소성 유한요소해석으로부터 T_{app} 를 구할때는 균열길이에 대한 정확한 J-적분의 변화율을 알기 위해 가상균열길이 a 의 10%에 해당하는 크기변화에 대해 각각 해석을 수행하여 J-적분과 균열길이의 관계를 식 (3)과 같이 2차 다항식으로 나타낸다.

$$J_{app}(a) = C_1a^2 + C_2a + C_3 \tag{3}$$

현재 파괴역학적 균열 안정성 평가법으로 J/T법이 널리 이용되고 있는데, J/T법은 식(4)와 같이 배관재료의 파괴저항 특성에 대한 J-적분과 찢김계수(tearing modulus)의 관계를 작용하중에 대한 J

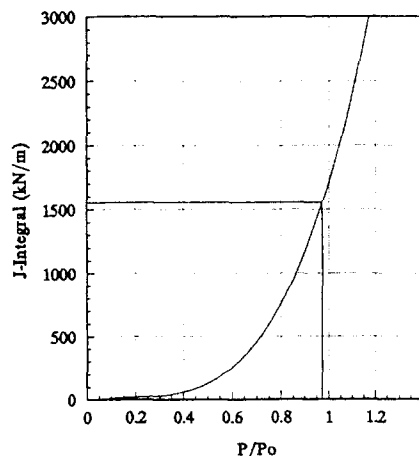
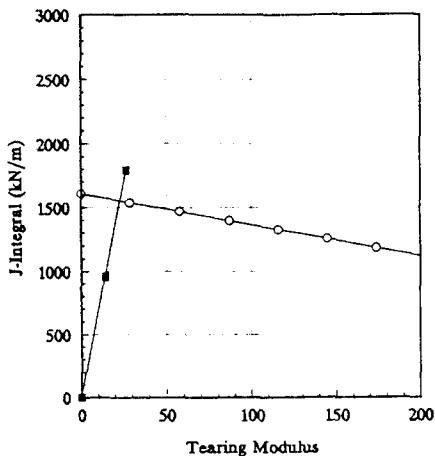


Fig. 2 J-T, J-P diagram for cas 1 (low-bound)

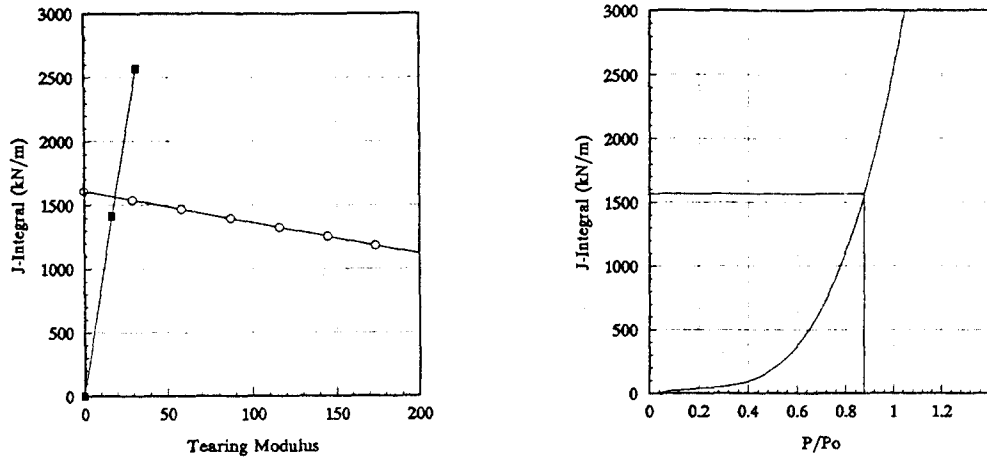


Fig. 3 J-T, J-P diagram for case 2(low-bound)

적분과 찢김계수의 관계와 비교함으로써 균열이 있는 배관의 안정성을 평가하는 방법이다.

$$\frac{E}{\sigma_f^2} \frac{dJ_{app.}}{da} < \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{dJ_{mat.}}{da} \quad (4)$$

여기서, E 는 탄성계수이고 σ_f 는 유동응력(flow stress)으로 인장강도와 항복강도를 평균한 값이다. 3차원 탄소성 유한요소해석 결과로부터 얻은 J-T 및 J-P선도는 Figs. 2, 3과 같다. 그림에서와 같이 low-bound 인장특성의 경우, 대상배관에 작용하는 하중에 대한 J-T선도가 배관재료의 파괴저항특성으로 부터 구한 J-T선도 위쪽에 위치하여 파괴역학적 안정성이 입증되지 못하였다.

Tables 5, 6은 주증기 배관에 대한 균열 안정성 해석결과인데, 배관재료의 best-fit 인장특성(ME21)의 경우는 안전계수가 각각 1.17(case1)과

1.02(case2)로 두 경우 모두 안전함이 입증되었으나, low-bound 인장특성(MF01)에 대해서는 각각 0.97(case1), 0.87(case2)로 두 경우 모두 안전계수 1을 만족하지 못하였다. 따라서, 균열에 의한 하중감소효과를 고려하지 않았을 경우 주증기 배관 계통에 LBB가 적용될 수 없었다.

3. 균열에 의한 발생하중 감소

현재, 균열이 있는 배관에 대한 탄소성 파괴해석 시 배관의 기하학적 형상 및 각종 지지 구조물에 의한 영향을 전혀 고려하지 않고 있다. 배관에 관통 균열이 존재하면 균열의 크기와 균열부의 소성역으로 인해 배관계 전체의 하중분포가 달라지게 된다. 따라서 실제 균열부의 하중 역시 변하게 되는데 지금까지는 이와 같은 효과를 고려하지 않았다. 즉, 균열이 있는 배관의 안정성 해석을 위해 계산된 하중이 실제로는 균열이 없는 완전한 배관에 대한 응력해석으로부터 구해진 것이라는 모순을 가지고 있다. 따라서 기준에 계산되어진 최대 하중은 어느 정도 과대 평가되었고, 이로 인해 균열 안정성 해석시 $T_{app.}$ 역시 현실적이지 못하였다. 그러나, 균열의 효과를 고려한 배관해석은 기하학적 형상이 매우 복잡한 전체 배관계를 3차원으로 모델링해야 하므로 이는 해석시간과 계산비용면에서 거의 불가능하다. 만약, Fig. 4(a)의 균열이 존재하는 3차원 배관 형상을 Fig. 4(b)와 같은 균열을 가정한 부분의 단면적을 변화시켜 동일한 등가 강성을 가지는 보(bean)로 대체시킬 수 있다면, 기하학적

Table 5 Stability of case 1

Specimen	Category	Stability
ME21	Best-fit	1.17
MF01	Low-bound	0.97

Table 6 Stability of case 2

Specimen	Category	Stability
ME21	Best-fit	1.02
MF01	Low-bound	0.87

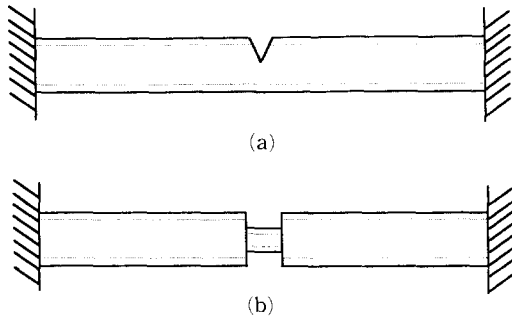


Fig. 4 Crack simulation in pipe analysis

형상이 매우 복잡하고 각종 지지구조물에 의해 구속되어 있는 실제 배관계에 대해서도 균열의 효과를 고려한 배관해석을 수행할 수 있다.

해석에 사용된 재료물성치 및 가상균열의 크기는 균열 안정성 평가시 해석조건을 사용하였고, 하중 조건은 하중감소에 가장 큰 영향을 주는 굽힘모멘트만 고려하였다.

3.1 균열을 포함한 1차원 배관해석

일정한 하중에 대해 균열을 가정한 beam 요소의 두께 및 직경을 임의로 감소시키면, Fig. 5와 같이 단면적이 감소함에 따라 균열부에 걸리던 하중이 고정된 양단 끝으로 재분배되어 균열부의 발생하중이 감소함을 알 수 있다. 따라서 임의의 강성도 변화에 대한 균열 주위의 발생하중 곡선을 구할 수 있다. Fig. 4(a)와 같이 원주방향 관통균열이 존재하는 실제 배관의 경우, 균열면에 해당하는 만큼의 중립축이 균열이 없는 배관의 경우 보다 아래로 이동하게 되나 Fig. 4(b)와 같이 단순화된 beam 모델에서는 해석시 이러한 효과를 고려하지 않았다.

3.2 균열주위의 발생하중 계산

실제 균열부에서의 강성도는 3차원 유한요소해석으로부터 배관 단면의 회전각(rotation angle), θ 를 구해 다음 식으로 계산하였다.

$$\theta = \int_0^a \frac{M}{EI_a} dx + \int_a^L \frac{M}{EI} dx \quad (5)$$

여기서, a 는 1차원 배관해석시 균열을 가정한 부분의 길이, Ia 는 균열이 있는 배관 단면의 관성모멘트이고 L 은 유한요소해석 모델의 전체길이를 나타낸다. 작용하중과 균열 주위의 강성도와의 관계를 구하여 보면 Fig. 6과 같이 하중이 커짐에 따

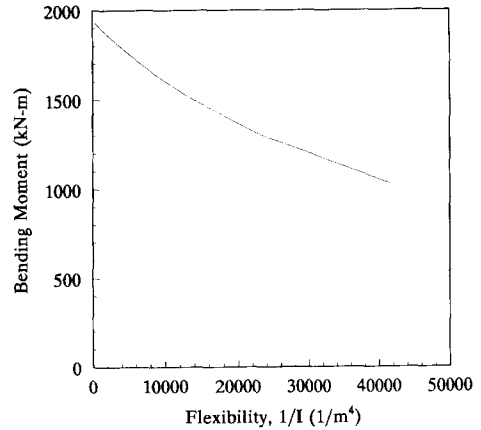


Fig. 5 Load distribution from pipe analysis

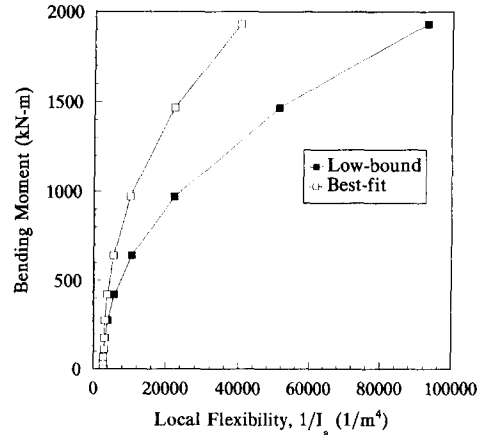


Fig. 6 Local flexibility at crack vicinity

라 균열 단면의 소성역에 의해 균열부의 강성도가 감소함을 알 수 있다.

특히 인장특성에 따라 강성도의 변화경향이 달라지는데, 배관재료의 low-bound 인장특성이 best-fit보다 감소율이 큼을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6의 관계곡선은 임의의 하중에 대한 균열부의 강성도 변화곡선이 된다.

Fig. 7과 같이 1차원 배관해석에서 구한 임의의 강성도에 대한 발생하중 변화곡선과 임의의 하중에 대한 강성도 변화곡선을 중첩하여 두 곡선의 교점에서 최대 발생하중을 예측할 수 있다.

해석결과 실제 균열부에서의 발생하중이 인장특성에 따라 작용 모멘트에 대해 각각 best-fit의 경우 약 30%, low-bound의 경우 약 40% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 기존의 균열 안정성

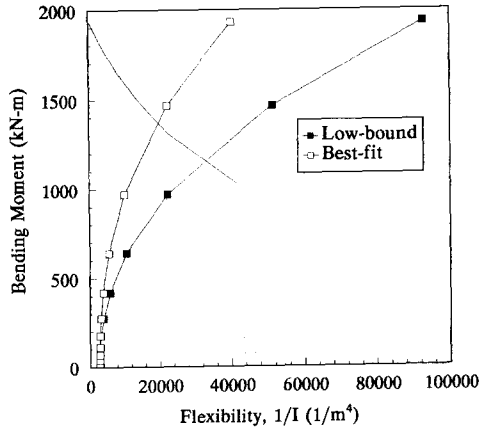


Fig. 7 Resulting load at crack vicinity

평가시 사용된 작용하중은 과대 평가되었다고 생각된다.

3.3 균열 안정성 해석

감소된 하중을 고려하여 주증기 배관에 대한 균열 안정성 해석을 수행하였다. 여기서, 축하중과 내압은 하중감소를 고려하지 않은 값을 사용하였다.

해석결과, Figs. 8, 9와 같이 배관재료의 low-bound 인장특성에 대하여도 LBB 적용을 위한 충분한 안전계수 (Table 7)를 확보할 수 있었다.

특히, 배관재료의 low-bound 인장특성이 best-fit 보다 하중감소효과가 커서 균열에 의해 감소된 하중만을 생각한다면 best-fit이 low-bound 보다 하

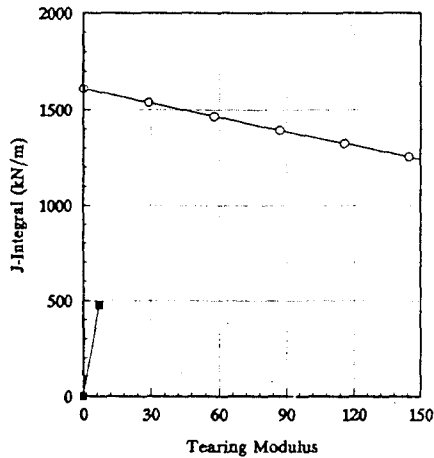


Fig. 8 J-T, J-P diagram for case 1 (reduced load)

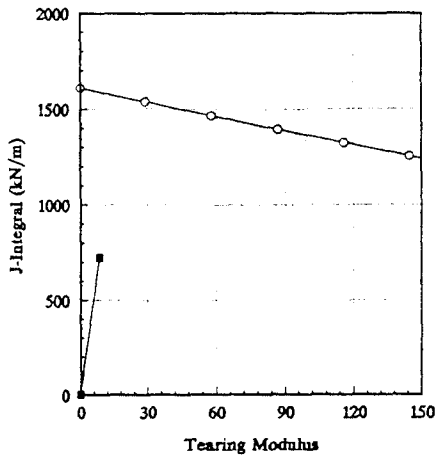


Fig. 9 J-T, J-P diagram for case 2 (reduced load)

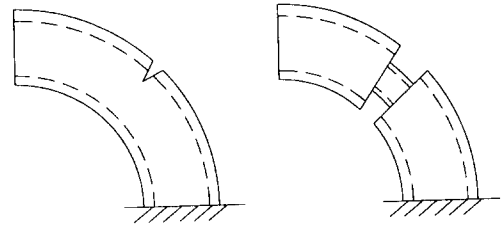
Table 7 Stability of case 1 & case 2 with reduced load

Specimen	Case	Stability
MF01	1	1.44
	2	1.30

중감소 효과 측면에서 더 보수적이라고 할 수 있다. 이는 안정성 해석의 경우와는 반대되는 결과로, 보다 엄밀하게 배관계의 안정성을 평가하기 위해서는 인장특성의 변화에 따른 하중감소율과 이를 고려한 균열 안정성 해석결과를 전체적인 보수성 측면에서 서로 비교해 보아야 할 것이다. 또한, 균열에 의한 하중감소는 감지가능한 누설균열의 크기를 결정하는 과정에서 하중감소를 고려하지 않은 경우와 비교하여 누설균열의 크기가 커지게 되는 결과를 초래할 수 있으므로 균열 해석시 오히려 불리하게 작용될 수도 있다. 물론 균열길이 결정시 사용되는 하중은 정상운전조건이고, 인장특성은 best-fit을 고려하도록 하고 있으므로 하중감소효과가 그다지 크지 않을 것으로 예상되나 누설균열길이와 임계 균열길이를 결정할 때는 반드시 서로 상반되는 보수성을 가지는 하중감소효과에 대한 고려가 필요할 것이다.

4. 최적화 기법을 이용한 엘보우의 균열효과 모의

실제 원자력발전소 배관계통에 대한 응력해석시 가장 큰 하중이 걸리는 부분은 대부분의 경우 직관 (straight pipe)이 아닌 엘보우의 용접부이다. 특히, 엘보우는 전체 배관계의 강성도에 가장 큰 영향을 주는 배관계의 구성요소 중 하나이다. 따라서 균열이 존재하는 엘보우의 거동에 대한 정확한 해석은 배관계 전체의 안정성 확보 차원에서 매우 중요하다. 엘보우는 shell-type 거동으로 큰 규모의 난형화(ovalization) 현상이 일어나 동일하중에 대해 직관보다 5~20배 큰 유연도(flexibility)를 가지게 된다.^(6,7) 현재 엘보우의 유연도계수(flexibility factor)나 응력확대계수(stress intensity factor) 등은 선형 탄성해석으로 정확히 구할 수 있고 또 이는 실험적으로 잘 검증이 되어 있다. 그러나, 비선형 해석에 대해서는 아직도 그 거동이 이론적

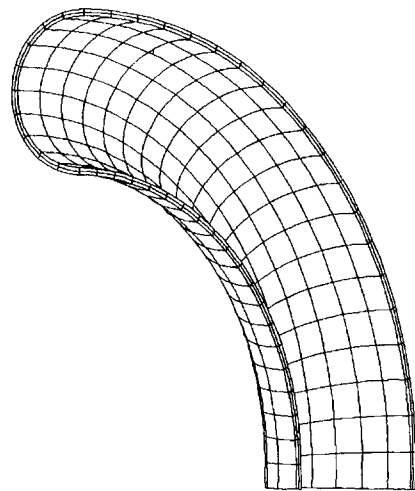
**Fig. 10** Crack simulation in elbow

으로 명확히 규명되지 못하고 있는 실정이다. 본 장에서는 균열이 존재하는 엘보우의 비선형 거동을 규명하기 위해 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 엘보우에 존재하는 균열의 효과를 고려한 1차원 배관계 해석을 수행할 수 있도록 하기 위해 단순화된 beam 요소를 사용하였다. 엘보우 배관에 존재하는 균열에 의한 하중감소효과를 1차원 배관계 해석시 고려할 수 있도록 최적화 프로그램을 이용하여 Fig. 10과 같이 원주방향 관통균열이 있는 3차원 모델을 1차원 beam 모델로 등가시키고자 하였다.

4.1 최적설계의 개요

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 균열이 없는 엘보우와 균열이 있는 엘보우의 유한요소해석을 위해 구성된 3차원 요소망을 나타내고 있는데 대칭성을 이용하여 배관계상의 1/2만을 모델링하였다.

먼저 엘보우에 균열이 없는 경우와 원주방향 관통균열을 있는 경우에 대하여 탄소성 유한요소해석

**Fig. 11** Finite element model of uncracked elbow

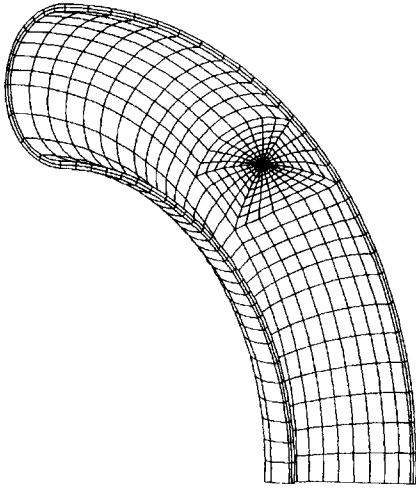


Fig. 12 Finite element model of cracked elbow

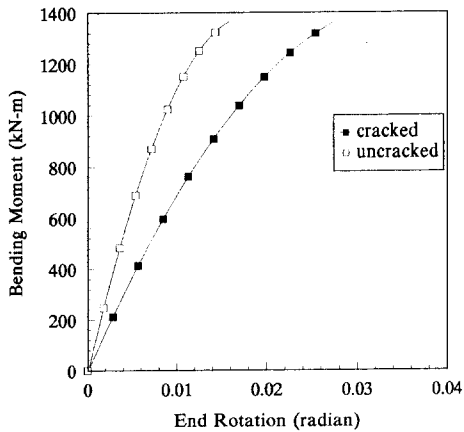


Fig. 13 Stiffness change of cracked elbow

을 각각 수행한 뒤 작용 모멘트와 배관 단면의 회전각의 관계(Fig. 13)를 구하였다. 여기서 작용하중은 균열 안정성 해석시 사용했던 굽힘모멘트만 고려하였고 균열의 크기와 형태는 2배의 누설균열 길이와 45° 래디얼(radial)방향의 관통균열로 가정하였다. 해석결과, 배관에 균열이 존재하는 경우 균열이 없는 완전한 배관에 비해 강성도(stiffness)가 감소함을 알 수 있다.

이러한 강성도의 감소는 균열과 균열부의 소성역에 의한 영향이므로 보 요소를 이용한 탄성 배관해석시 균열이 있을 때와 동일한 강성도 감소율을 갖도록 균열로 가정된 부분의 길이, 직경 및 두께를 변화시키면서 반복해석을 수행하였다. 이를 위해

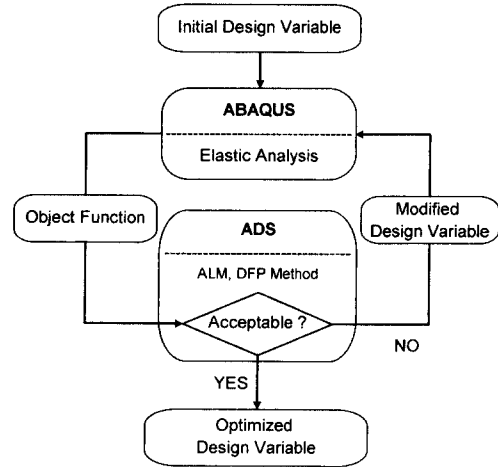


Fig. 14 Flow chart for optimization and analysis

균열이 있는 3차원 모델과 동일한 엘보우 곡률과 크기를 가지는 1차원 모델의 요소망을 구성하였고 Fig. 14와 같이 최적화 프로그램, ADS⁽⁸⁾를 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS와 연결하는 algorithm을 구성하였다.

해석시 설계변수(design variable)는 1차원 요소망에서 균열을 가상한 부분의 길이(x_1), 직경(x_2), 두께(x_3)이고, \bar{x}_i 는 각 설계변수에 대한 최대 허용 크기이다. 목적함수(objective function)는 두 해석 모델간의 회전각 변화율의 차로 정의하여 반복되는 해석과 최적화 과정에서 이를 최소화하도록 하였다.

$$\text{Minimize : } [(\Delta\theta/\theta_{UNC}) - (\Delta\phi/\phi_{UNC})]^2$$

$$0.01 < x_i < \bar{x}_i; (i=1,2,3 : \text{Unit mm})$$

(6)

여기서, θ_{UNC} , ϕ_{UNC} 는 각각 균열이 없는 3차원 solid 모델과 1차원 beam 모델의 작용하중에 대한 단면 회전각을 나타내고, $\Delta\theta$, $\Delta\phi$ 는 균열에 의한 회전각의 증분을 나타낸다. 먼저 초기 설계 값을 설정한 뒤, 유한요소해석을 수행하여 그 결과 값을 ADS에 제공하였다. ADS는 이 값을 평가한 뒤 다시 새로운 설계변수를 ABAQUS를 위한 입력 값으로 제공하게 된다. 이러한 해석과 최적화의 과정이 반복하다가 목적함수가 최소화되는 최적점(optimum point)에 도달하여 Kuhn-Tucker 조건을 만족하게 되면 해석 루프를 빠져나가도록 하였다.

4.2 최적화 수행결과

목적함수를 최소화하기 위한 전략과 탐색법은 ALM (Augmented Lagrange Multiplier)⁽⁹⁾과 DFP (Davidon-Fletcher-Powell)^(10,11)을 이용하였다. DFP법은 현재 널리 사용되고 있는 탐색법 중 하나인데, 최적화 과정에서 단지 1계 미분만을 이용하여 Hessian 행렬의 역행렬(inverse matrix)을 구하는 방법이다. 최적화를 위한 반복계산시 q 번째 탐색방향(search direction)은 다음과 같이 정의될 수 있다. 여기서, S 는 탐색방향, H^{-1} 는 Hessian 행렬의 역행렬 그리고 $\nabla F(X)$ 는 목적함수의 설계 변수에 대한 구배(gradient)이다.

$$S_q = -H^{-1}\nabla F(X_q) \quad (7)$$

Fig. 15는 누설감지가 가능한 크기의 균열이 엘보우에 존재할 경우 작용하중에 대한 배관 단면 회전각의 변화곡선을 나타내고 있다. 최적화과정에서 다수의 국부 최적점(local optimum)이 있을 가능성이 있으므로 초기 설계 값을 적절히 변화시키면서 해석을 수행하였다. 해석결과, 최적 설계점은 $x_1^* = 127$ mm, $x_2^* = 588$ mm, $x_3^* = 30.7$ mm 이었고, 목적함수, 즉 두 모델간의 회전각 변화율의 오차가 약 1.33% 정도로 Fig. 15와 같이 두 결과가 비교적 잘 일치되었음을 알 수 있다. 특히, 설계변수 중 두께(x_2)가 목적함수를 최소화하는데 가장 크게 기여하는 것으로 나타났으며, 균열부의 길이(x_3)가 가장 낮은 설계 민감도(design sensitivity)를 보였다. 최적 설계점에 도달하기 위한 반복해석 횟수는 약 75회였다.

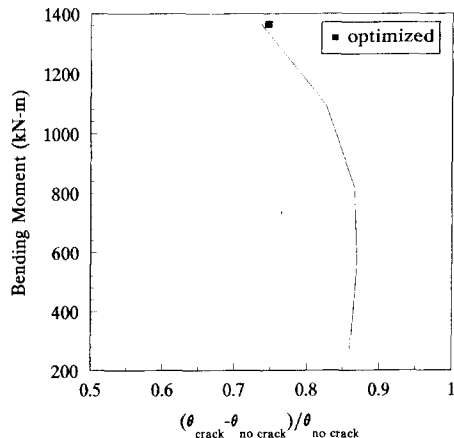


Fig. 15 Optimized results

균열의 크기는 감지가 가능 누설량을 결정할 때 이미 정해지는 값이다. 따라서, 하중에 대한 회전각 변화율을 최적화과정에서 목적함수로 정의하면 해당 하중에 대해 등가강성을 가지는 보 요소의 크기를 결정할 수 있다. 한편, 최적화된 보 요소망으로부터 균열로 가정된 부분의 발생하중을 구하여 보면 균열이 없는 경우와 비교하여 발생하중이 굽힘 모멘트에 대해 약 40% 까지 감소하였다.

5. 결 론

원자력 주증기 배관에 LBB 설계 개념을 적용하기 위하여 균열부의 하중감소효과가 균열 안정성 평가에 미치는 영향을 고찰하는 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 울진 3/4호기 주증기 배관에 대한 균열 안정성 해석에서 배관재료의 low-bound 인장특성을 고려할 경우 LBB 적용을 위한 파괴역학적 안정성이 입증되지 못하였다.

(2) 균열부에서 발생 모멘트가 배관재료의 인장특성에 대해 best-fit은 약 30%, low-bound 는 약 40%까지 감소하는 것으로 나타나 감소된 하중을 고려할 경우 대상 배관에 대한 LBB 적용은 충분히 가능하였다.

(3) 균열 안정성 평가와는 달리 low-bound 인장특성이 best-fit 보다 하중감소효과에 대해 덜 보수적이었다.

(4) 최적화기법을 이용하면 균열이 존재하는 엘보우 배관에 대하여도 등가 강성을 가지는 보 요소로 단순화시켜 배관해석시 균열의 효과를 고려할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(과제번호: 94-053)주관으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) U. S. NRC Piping Review Commission, 1983, "Evaluation of Potential for Pipe Break," *Report of the U. S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, NUREG-1061, Vol. 3.*

- (2) Yu, Y. J., Kim, Y. and Park, S. H, 1993, "Evaluation of Large Leakage Crack Effect on the Distribution of Loads in a Small Diameter Pipe," *SMiRT-12, G05/4*, pp. 75~79.
- (3) Smith, E., 1995, "The Effect of System Flexibility on the Formulation of Leak-Before-Break Case for Cracked Piping," *Int. Pressure Vessels and Piping Codes and Standards*, Vol. 1, Current Application.
- (4) 김영진, 석창성, 김종욱, 장윤석, 1995, "영광 원자력 배관소재의 재료물성치 평가 (Ⅲ)," 대한 기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1460~1468.
- (5) Okamoto, A. and Norris, D. M., 1983, "Pipe Crack Instability Program," *Topical Report No. EPRI*.
- (6) Markl, A. R. C., 1955, "Piping-Flexibility Analysis," *Trans. of ASME for Feb.*, pp. 127~149.
- (7) Rodabaugh, E. C., 1957, "Effect of Internal Pressure on Flexibility and Stress-Intensification Factors of Curved Pipe or Welding Elbows," *Trans. of ASME for May*.
- (8) Vanderplaats, G. N., 1985, *ADS-A Fortran Program for Automated Design Synthesis*, Engineering Design Optimization, Inc.
- (9) Imai, K., 1978, "Configuration Optimization of Trusses by the Multiplier Method," Ph. D. Thesis, University of California, Los Angeles.
- (10) Davidon, W. C., 1959, "Variable Metric Method for Minimization," Argonne National Laboratory, ANL-5990 Rev., University of Chicago.
- (11) Fletcher, R. and Powell, M. J. D., 1963, "A Rapidly Convergent Method for Minimization," *Computer J.*, Vol. 6, No. 2, pp. 163~168.