

원주방향 관통균열 배관의 균열열림 평가에 미치는 압력유기굽힘의 구속효과

김진원* · 박치용*

(2001년 5월 14일 접수, 2001년 8월 14일 심사완료)

Effect of Restraint of Pressure Induced Bending on Crack Opening Evaluation for Circumferential Through-Wall Cracked Pipe

Jin-Weon Kim and Chi-Yong Park

Key Words: Pressure Induced Bending(압력유기굽힘), Leak-Before-Break(파단전누설), Through wall Crack(관통균열), Crack Opening Displacement(균열열림변위)

Abstract

The effects of restraint of pressure induced bending(PIB) on crack opening for circumferential through-wall crack in a pipe were investigated. In this study, the elastic and elastic-plastic finite element analyses were performed to evaluate crack opening displacement(COD) for various restraint conditions and crack size. The results showed the restraint of PIB decreased crack opening for a given crack size and tensile stress, and the decrease in crack opening was considerable for large crack and short restraint length. Also, the effect was more significant in the results of elastic-plastic analysis compared with in the elastic analysis results. In the elastic-plastic analysis results, the restraint effect was increased with increasing applied tensile stress corresponding to internal pressure. Additionally, the restraint effect on COD was independent on the variation in pipe diameter and decreased with increasing pipe thickness, and it depended on not total restraint length but shorter restraint length for non-symmetrically restrained.

1. 서론

원자력발전소에서 배관은 고온·고압의 유체를 이송하는 기기로 대부분이 압력유지경계를 이루고 있다. 따라서, 원전의 안전성 측면에서 배관의 건전성이 중요하게 인식되고 있으며, 최근 20여년간 배관의 건전성 평가와 관련한 많은 연구들이 수행되었다. 또한 이들 결과를 바탕으로 다양한 평가 방법과 절차들이 개발되어 원전 배관의 설계 및 운영에 적용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이들 방법은 해석상의 편의를 위해 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 균열이 직관의 중심에 존재하고, 아무런 구속이

없는 조건에서 외부하중을 받는 것으로 가정하고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 또한, 내압에 의한 축방향의 하중을 고려하기 위해 배관의 양 끝 단면에 내압과 등가한 인장응력을 작용시키는데, Fig. 2에서 보는 바와 같이 원주방향 균열이 존재하는 경우에 이러한 내압 고려 방법은 배관에 압력유기굽힘(Pressure Induced Bending, PIB)을 야기시킨다.⁽⁶⁾ 그러나, 실제 배관계통에서 배관은 다른 배관 또는 기기에 연결되어 있기 때문에 PIB 현상이 구속받게 된다. 배관계통실험 결과에 의하면, PIB에 대한 구속을 고려하지 못하는 기존의 평가방법은 원주방향 균열의 하중지지능력을 과소 평가하고, 균열열림변위 (Crack Opening Displacement, COD)를 과대 평가하는 것으로 나타났다.⁽⁷⁾

기존의 평가 방법에서 이러한 불확실성은 관통 균열을 가정하는 파단전누설 (Leak-Before-Break, LBB) 평가에서 특히 중요하게 인식되고 있다.^(6,8)

* 책임저자, 회원, 한전 전력연구원 원자력연구실

E-mail : jwkim@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5556 FAX : (042)865-5514

* 회원, 한전 전력연구원 원자력연구실

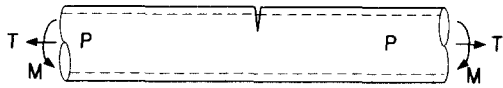


Fig. 1 Schematics pipe crack evaluation method

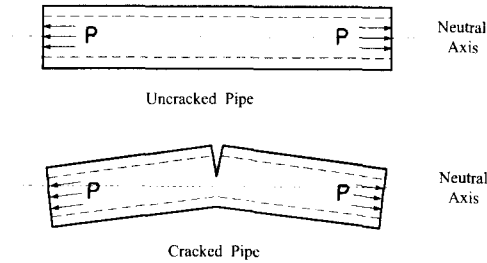


Fig. 2 Pipe rotation by pressure induced bending

왜냐하면, COD에 대한 과대 평가는 LBB 평가에서 누설허용균열크기(Leakage-Size-Crack, LSC)를 작게 예측하여 LBB 평가의 보수성을 저해할 수 있기 때문이다. 제2차 배관건전성 국제공동연구(International Pipe Integrity Research Program (IPIRG)-2)의 민감도분석 결과에서도 “COD에 미치는 PIB의 구속효과”는 LBB 평가의 중요한 불확실 인자중 하나로 평가되었다.⁽⁸⁾ 따라서, LBB 개념의 확대 적용과 기존 평가방법의 불확실성 제거를 위해서는 PIB의 구속효과에 대한 영향이 정확히 평가되어야 하며, 최근 이를 위한 몇몇 연구들이 수행된 바 있다.^(9,10) 이들 연구에서는 구속위치가 균열을 중심으로 대칭을 이루는 이상적인 구속조건에서 탄성거동 균열을 가정하여 COD에 미치는 PIB의 구속효과를 평가하였다.

그러나, 실제 배관계통에서 균열은 탄소성 거동을 보이며, LBB 해석에서 누설허용균열크기 예측을 위한 COD 평가가 탄소성 조건에서 수행된다.⁽³⁾ 또한, 가상균열의 위치가 주로 노즐 또는 엘보우와 배관의 연결부이므로 PIB에 대한 구속이 균열을 중심으로 비대칭적으로 작용된다. 그러므로, 실제 배관균열에 대한 PIB의 구속효과를 정확히 파악하기 위해서는 탄소성 균열거동을 고려하여 평가가 수행되어야 하며, 임의의 구속위치에 대한 구속거리의 영향이 파악되어야 할 것이다. 따라서, 본 논문에서는 탄성 및 탄소성 유한요소해석을 통해 탄성뿐 아니라 탄소성 균열거동에서 COD에 미치는 PIB의 구속효과를 평가하였으며, 내압의 크기와 배관의 크기 및 두께에

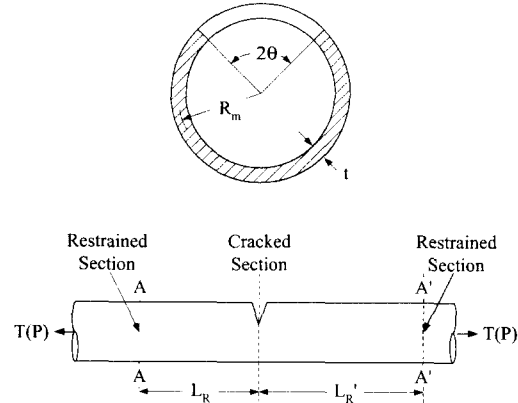
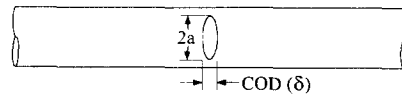


Fig. 3 Schematics of a through-wall cracked pipe under conditions of PIB restrained

다른 영향을 살펴보았다. 또한, PIB의 구속효과에 미치는 비대칭 구속거리의 영향을 분석하였다.

2. PIB에 대한 구속효과 평가 방법

2.1 평가 방법

COD에 미치는 PIB의 구속효과를 평가하기 위해서 Fig. 3과 같이 평균 반지름이 R_m 이고, 두께가 t 인 배관에 균열 각이 2θ 인 관통균열이 존재하고, 균열을 중심으로 임의의 거리(L_R , L'_R)에서 배관의 회전이 구속된 직관을 고려하였다. COD에 미치는 PIB의 구속효과는 식 (1)과 같이 구속

$$\delta_{NOM} = \frac{\delta_R}{\delta_F} \quad (1)$$

된 상태에서 COD(δ_R)를 구속이 없이 평가된 COD(δ_F)로 무차원화한 COD(δ_{NOM})로 정량화 하였다. 따라서, PIB에 대한 구속효과를 평가하기 위해서는 구속상태에 따른 COD를 각각 평가하여야 한다. δ_F 는 기존의 평가방법에 따라 회전에 대한 구속을 고려하지 않고 단순히 배관 단면(A-A, A'-A')에 인장응력만을 작용시켜 계산하였다. 한편, δ_R 은 균열로부터 구속거리(L_R 와 L'_R) 밖의 배관 일부를 직접 구속하여 회전을 제한한 상태에서 δ_F 평가와 동일한 방법으로 배관 단면

에 인장응력을 작용시켜 COD을 계산하였다.

선행 연구에서는 탄성 거동을 가정하여 균열로부터 L_R 떨어진 배관 단면에 임의의 변위(Δ)를 작용시키고, 이때 단면에서의 응력 성분중 축방향 인장응력(σ_{ten})과 COD(δ_{ref})를 기준으로, 임의의 인장응력(σ)에 대한 COD(δ_R)를 탄성거동의 선형성을 이용하여 $\delta_R = \delta_{ref} \times (\sigma / \sigma_{ten})$ 와 같이 계산하였다.^(9,10) 그러나, 이러한 방법은 탄성해석에만 적용이 가능하며, 배관 단면의 응력 성분중 축방향 인장응력을 정의하는데 어려움이 있다.

따라서, δ_R 를 평가하기 위한 본 논문에서의 접근방법은 탄성 및 탄소성해석에 관계없이 적용이 가능하며, 균열단면에서 축방향 인장응력 성분을 정의해야 할 필요가 없으므로, 앞서 언급된 선행 연구의 문제점들을 극복할 수 있다. 또한 실제 배관계통을 고려해 볼 때, 내압을 받고 있는 배관에 작용되는 하중은 축방향의 변위라기보다, 주위의 배관 또는 연결배관에 의해 회전이 구속된 상태에서 작용되는 인장응력에 가깝다. 따라서, 본 방법의 접근 방법이 선행 연구에 비해 보다 현실적인 것을 알 수 있다.

2.2 유한요소모델

COD 평가에는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 균열을 중심으로 구속거리가 동일한 경우($L_R=L_R'$)와 동일하지 않는 경우($L_R \neq L_R'$)의 2종류 유한요소 모델이 적용되었다. 대칭모델의 경우(Fig.4(a)), 균열 잔여면(대칭면)에서 축방향의 변위를 구속하고, 균열에서 L_R 만큼 떨어진 위치의 배관 단면(A-A)에 인장응력을 작용시켰다. 비대칭모델(Fig.4(b))에서는 균열에서 L_R 와 L_R' 만큼 떨어진 위치의 배관 단면(A-A & A'-A')에 인장응력을 동시에 작용시켰다. 두 모델에서 회전에 대한 배관의 구속은 균열에서 구속거리(L_R 과 L_R') 밖의 일정 길이 배관을 모든 절점에서 z-방향을 제외하고 구속함으로써 모사하였다. 구속을 위해 경계조건이 적용된 배관의 길이는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 $10D_m$ 으로 구속부 길이가 δ_R 에 영향을 미치지 않도록 충분한 길이를 고려하였다.

구속거리에 관계없이 각각 1개의 유한요소모델이 해석에 적용되었다. 즉, 구속길이에 따라 응력이 작용되는 배관 단면(A-A, A'-A')의 위치와 회전을 구속하기 위해 경계조건이 적용된 위치만을 변화시켰다. 대칭모델과 비대칭모델에서 배관 길

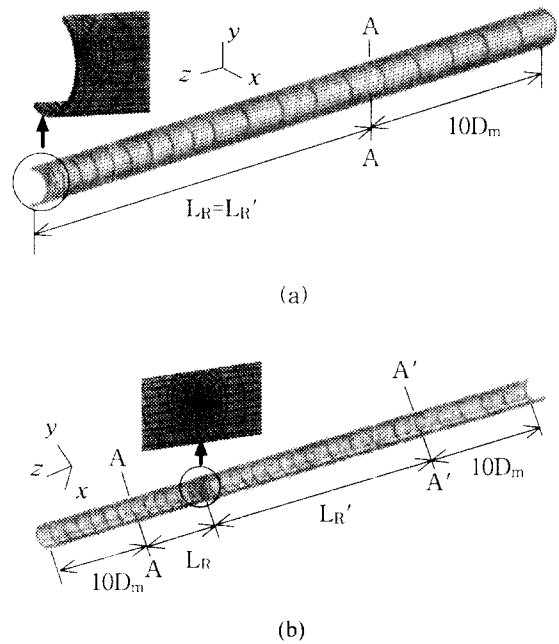


Fig. 4 Finite element mesh and boundary conditions used in analyses

이는 각각 배관 평균직경의 30배($30D_m$)와 $20D_m-30D_m$ 이고, 적용된 유한요소는 20 절점의 육면체 요소로서 두께 방향으로 2개의 요소를 배열하였다. 해석에는 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS code를 사용하였으며, COD는 균열 중앙부 중심 절점의 z-방향 변위로부터 계산하였다.

2.3 작용하중 및 재료물성치

PIB에 대한 구속효과를 평가하기 위해서 작용 하중으로는 내압에 등가한 인장하중만을 고려하였으며, 균열 면에 작용되는 압력, 반경방향의 압력, 그리고 굽힘하중은 배제하였다.

해석에서 적용된 배관 재료의 영률(E)은 200GPa이고 푸아송비(ν)는 0.3이다. 탄소성해석에 적용된 응력-변형률 곡선은 Fig. 5와 같으며, 배관재의 항복강도와 인장강도는 각각 200.0MPa와 443.5MPa이다.

3. COD에 미치는 PIB의 구속효과 평가

3.1 평가 방법의 검토

본 논문에서 적용한 평가방법의 타당성을 살펴 보기 위해서 선행 연구에서 수행하였던 직경이

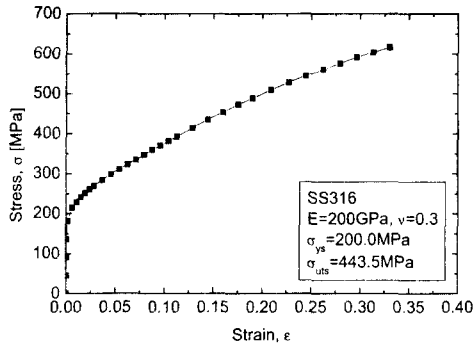


Fig. 5 True stress-strain curve used in elastic-plastic analysis

711.2mm이고 $R_m/t=10$ 인 배관의 대칭균열을 대상으로 탄성해석을 수행하고, 선행 연구결과와 비교하였다.⁽⁸⁾ Fig. 6은 균열 크기와 구속거리에 따른 δ_{NOM} 을 선행 연구의 결과와 함께 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 구속부의 위치가 균열에서 멀어질수록 δ_{NOM} 가 증가하다 점차 수렴하는 경향을 보였으며, 균열이 커질수록 δ_{NOM} 의 감소가 뚜렷이 관찰되었다. δ_{NOM} 의 정의상 1에 가까울수록 COD에 미치는 PIB의 구속효과는 없으며, 1보다 작아질수록 PIB에 대한 구속의 영향이 크다는 것을 의미한다. 따라서, 평가 결과에서 PIB에 대한 구속이 균열열림에 미치는 영향은 균열이 구속부에서 가깝고 큰 균열의 경우에 크게 나타나고 있으며, 이러한 경향은 선행 연구결과와 일치하는 것으로 PIB에 대한 물리적인 현상을 고려할 때 타당한 결과임을 알 수 있다.

PIB에 대한 구속효과를 선행 연구결과와 비교하면, 작은 균열($\theta/\pi=1/8$)에서는 선행 결과에 비해 δ_{NOM} 을 약간 작게 평가하고 있으나 거의 차이가 없었다. 그러나 균열이 커질수록 선행 연구결과와의 차이가 증가하고 있으며, 선행 결과에 비해 큰 δ_{NOM} 값을 보이고 있다. 이러한 차이는 δ_R 평가에서 PIB에 대한 구속을 고려하는 방법의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 선행 연구에서는 구속 상태에서의 COD를 평가하기 위해서 축방향 변위를 작용시킨 반면,^(9,10) 본 평가 방법은 배관의 회전을 경계조건으로 구속한 상태에서 인장응력을 배관 단면에 작용시킴으로써 PIB에 대한 구속을 묘사하였다. 전술한 바와 같이 실제 내압을 받고 있는 배관계통은 축방향의 변위를

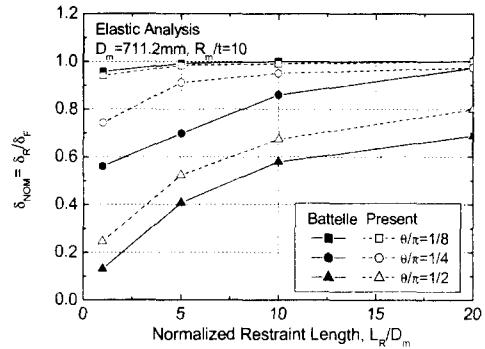


Fig. 6 Comparison of normalized CODs calculated by previous and present study for 711.2mm mean diameter pipe

받고 있다기보다, 주위의 배관 또는 연결배관에 의해 회전이 구속된 상태에서 인장응력을 받는 상태에 가깝다. 따라서, 여기서 적용한 구속조건과 하중조건이 실제 배관계통에서의 거동과 더 유사하며, 평가 결과가 실제 배관의 균열 거동에 보다 근사한 것으로 판단할 수 있다.

3.2 탄소성 거동 균열의 PIB 구속효과

앞에서 살펴본 바와 같이 탄성해석에 의한 PIB의 구속효과는 선행 연구를 통해 어느 정도 정량적인 경향을 파악할 수 있었다.^(9,10) 그러나, 실제 배관균열은 탄소성 거동을 보이므로, 여기서는 탄소성해석을 통해 COD에 미치는 PIB의 구속효과를 평가하고, 탄성해석 결과와 비교하였다. 평가는 직경이 323.9mm이고 $R_m/t=10$ 인 배관에 존재하는 대칭균열을 대상으로 하였으며, 해석에 적용된 축방향 하중(F_z)은 1000kN으로 원전 배관의 내압(9~15MPa)에 등가한 하중이다.

Fig. 7은 각 균열 크기에서 평가된 δ_{NOM} 을 구속거리에 따라 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 균열이 작은 경우($\theta/\pi=1/8$)에는 선행 탄성해석과 비교하여 약간 작은 값을 보이고 있으나 거의 차이가 없다. 그러나 균열 크기가 증가함에 따라 선행 탄성해석 결과와의 차이가 급격히 증가되는 경향을 보였으며, 균열 크기가 $\theta/\pi=1/2$ 의 경우에는 탄소성해석 결과가 탄성해석에 비해 5~10배 작은 δ_{NOM} 을 보였다. 따라서, 탄소성 거동을 보이는 실제 배관 관통균열의 경우 COD에 미치는 PIB의 구속효과는 선행 탄성해

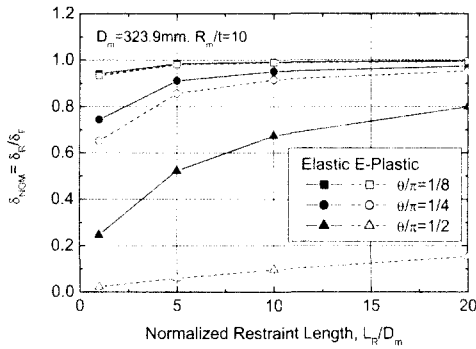


Fig. 7 Comparison of normalized CODs calculated by elastic and elastic-plastic analysis

석에서 예측된 것보다 크게 나타날 수 있으며, 특히 균열 크기가 큰 경우에 PIB에 대한 구속효과가 상당히 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

균열 크기가 작은 경우에 탄성해석과 탄소성해석 결과의 차이가 미미한 반면, 큰 균열에서 탄성해석과 탄소성해석 결과의 차이가 크게 나타나는 것은 균열 잔여면에서의 응력상태에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 균열 크기가 $\theta/\pi = 1/8$ 인 경우에는 해석방법과 PIB에 대한 구속에 관계없이 항복응력을 초과하는 영역이 균열선단에 제한되며, 대부분의 균열 잔여면이 항복응력 이하의 응력상태를 보인다. 따라서, 이 경우에는 탄소성 균열거동을 가정할지라도 균열부에서 배관의 강성이 탄성 균열거동과 유사하므로 해석방법에 따른 구속효과의 차이가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 균열 크기가 $\theta/\pi = 1/2$ 인 경우에는 해석방법과 구속조건에 따라 균열선단의 응력상태가 뚜렷하게 차이를 보이고 있다. 즉, Fig. 8(a), (b)에서 알 수 있는 바와 같이 탄성해석 결과에서는 항복응력을 초과하는 영역의 차이는 있으나 균열 잔여면에서 응력상태는 구속조건에 관계없이 항복응력 이하의 값을 보이고 있다. 그러나, 탄소성해석 결과에서는 PIB에 대한 구속 여부에 따라 균열 잔여면의 응력상태가 크게 변하고 있다. 구속이 없는 경우(Fig. 8(c))에는 균열 잔여면 전체에서 항복이 발생한 반면, PIB가 구속된 경우(Fig. 8(d))에는 대부분이 항복응력 이하의 응력상태를 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 탄성 거동 균열에 비해 탄소성 거동 균열의 경우에는 구속조건에 따라 균열부에서의 강성

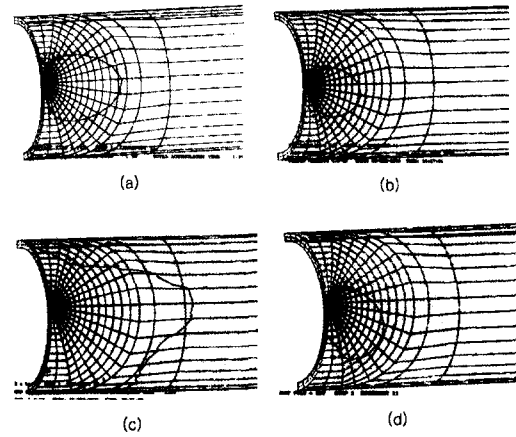


Fig. 8 von-Mises stress contour corresponding to yield stress in the ligament of $\theta/\pi = 1/2$ crack under conditions of (a) elastic ; rotation free, (b) elastic ; restrained, (c) elastic-plastic ; rotation free, and (d) elastic-plastic ; restrained

이 크게 달라지므로 PIB에 대한 구속의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.3 내압의 크기에 따른 PIB 구속효과

선형 탄성해석에서는 작용되는 내압에 등가한 인장응력의 크기가 COD와 선형적인 관계를 보이므로 PIB의 구속효과가 작용 하중의 크기에 무관한 δ_{NOM} 을 보일 것이다. 즉, 선형 탄성해석에서는 내압의 크기에 관계없이 COD에 미치는 PIB의 구속효과는 동일하게 평가된다. 그러나, 탄소성해석에서는 균열의 거동이 작용하중에 선형적이지 않으므로 인장응력의 크기에 따라 PIB의 구속효과는 상이하게 평가될 수 있다. 따라서, 내압에 따른 PIB의 구속효과를 평가하기 위해서 앞 절의 평가에서 적용되었던 축방향 하중(F_z)의 1/2과 2배에 해당하는 하중을 고려하여 탄소성해석을 수행하였다. 해석은 배관의 직경이 323.9mm이고 $R_m/t = 10$ 인 대칭균열을 대상으로 구속길이가 $1D_m$ 과 $10D_m$ 인 경우에 대해서 각각 수행되었다.

Fig. 9는 작용하중의 크기에 따른 δ_{NOM} 의 변화를 균열 크기에서 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 PIB에 대한 구속효과가 작은 $\theta/\pi = 1/8$ 의 경우에는 구속거리 관계없이 하중 크기에 따라 약간씩 감소하는 경향을 보이고 있으나 거의 유사한 δ_{NOM} 를 보이고 있다. 균열 크기

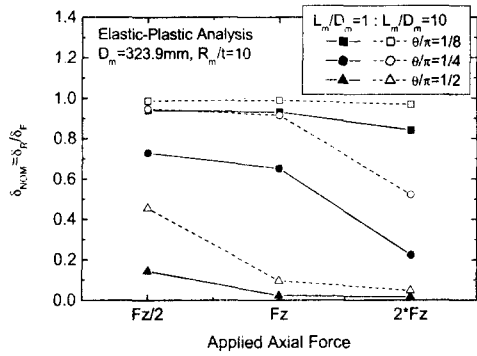


Fig. 9 Effect of applied axial load on normalized CODs for elastic- plastic analysis

가 $\theta/\pi = 1/4$ 인 경우에 Fz 까지는 δ_{NOM} 의 감소가 크지 않았으나, $2 \times Fz$ 로 하중이 증가함에 따라 δ_{NOM} 은 급격히 감소하였다. 한편, $\theta/\pi = 1/2$ 의 균열에서는 하중이 Fz 에서부터 δ_{NOM} 이 급격히 감소하여 일정한 값을 유지하고 있다. 따라서, PIB의 구속효과에 미치는 하중 크기의 영향은 균열 크기에 의존하는 것을 알 수 있으며, 일정한 균열 크기에서 하중이 증가함에 따라 구속효과는 급격히 증가하다 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다.

이와 같이 구속효과가 작용하중과 균열 크기에 복합적으로 영향을 받는 것은 앞서 언급된 바와 같이 탄소성 조건에서 PIB에 대한 구속효과는 균열 잔여면의 응력상태에 영향을 받고, 작용하중과 균열 크기가 균열 잔여면의 응력상태를 지배하기 때문이다. 주어진 균열 크기에서 작용하중이 증가함에 따라 δ_{NOM} 이 급격히 감소하는 것은 균열 잔여면의 응력상태가 탄성에서 소성조건으로 변하면서 균열부에서 배관의 강성이 크게 감소하기 때문이며, 주어진 균열에서 하중이 증가할지라도 δ_{NOM} 의 변화가 크지 않은 영역은 균열 잔여면에서의 응력상태가 탄성이나 소성영역에 일정하게 놓여있기 때문이다.

3.4 PIB 구속효과에 미치는 배관 형상의 영향

배관의 형상에 따른 PIB의 구속효과를 살펴보기 위해서 배관의 크기와 두께에 따라 δ_{NOM} 을 평가하였다. 배관 크기에 따른 영향을 평가하기 위해 직경이 711.2mm, 323.9mm, 114.3mm이고 $R_m/t=10$ 인 배관을 고려하였으며, 두께에 따른 평

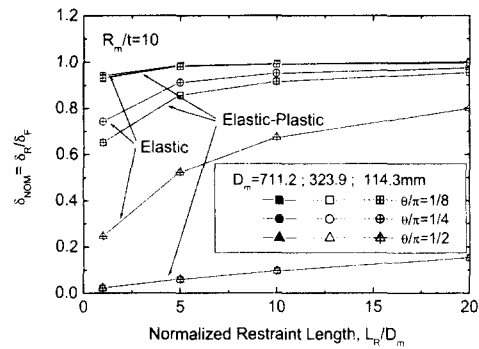


Fig. 10 Variation in normalized CODs with pipe diameter

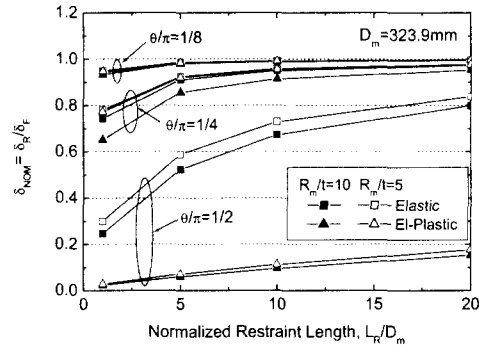


Fig. 11 Variation in normalized CODs with pipe thickness

가는 배관의 직경이 323.9mm이고 $R_m/t=5$ 인 배관을 대상으로 하였다. Fig. 10은 일정한 R_m/t 에서 배관의 직경에 따른 δ_{NOM} 을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 탄성해석과 탄소성해석 결과 모두에서 균열의 크기 및 평균화된 구속거리 (L_R/D_m)에 관계없이 배관 크기에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다. 한편, 동일한 직경의 배관에서 두께가 증가함에 따른 δ_{NOM} 은 Fig. 11에서 보는 바와 같다. 균열 크기가 작은 경우($\theta/\pi = 1/8$)에는 거의 차이가 없으나, 균열 크기가 큰 경우에는 두께가 감소함에 따라 PIB 구속효과는 증가하는 경향을 보였다. 즉, PIB에 대한 구속효과는 동일한 균열크기에서 배관의 크기 변화에 거의 영향을 받지 않지만, 배관의 두께가 증가됨에 따라 영향이 감소하는 것을 알 수 있다.

평가 결과에서 균열 크기, 구속거리, 그리고 작

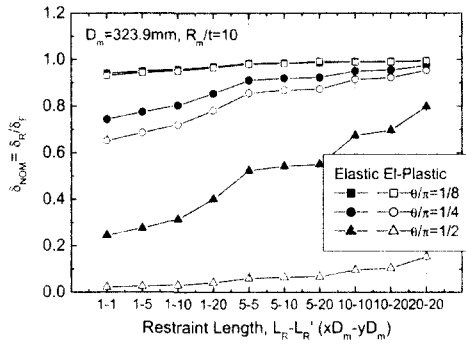


Fig. 12 Variation in normalized CODs with combinations of restraint lengths

용되는 인장응력의 크기에 관계없이 균열열림에 대한 PIB의 구속효과가 배관의 크기에 영향을 받지 않는 것은 직경이 다를지라도 θ/π 와 R_m/t 이 일정한 경우에는 외부구속에 따른 배관의 강성 변화가 동일하기 나타나기 때문이다. 반면, 배관의 두께가 증가되는 경우에는 균열 크기가 동일할지라도 배관의 강성이 증가하므로 자체적으로 배관의 회전을 구속시키는 효과가 증가하고, 상대적으로 외적인 구속의 영향이 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 배관의 강성이 큰 경우에는 배관의 끝단을 구속하는 경우와 구속하지 않는 경우의 COD 차이가 상대적으로 작게 나타나는 것이다.

3.5 PIB 구속효과에 미치는 구속거리의 영향

앞 절의 결과들은 구속부 위치가 균열을 중심으로 대칭인 경우에 평가된 것이다. 그러나, 실제 배관계통에서 가상균열이 존재하는 위치가 대부분 노출 또는 엘보우와 직관의 용접부이므로 비대칭적인 구속이 이루어진다. 따라서, 균열을 중심으로 배관의 구속이 비대칭인 경우에 COD에 대한 PIB의 구속효과를 살펴보았다. 이를 위해서 균열 면에서 구속부까지 구속거리를 변수로 평가를 수행하였으며, 직경이 323.9mm이고 $R_m/t=10$ 인 배관을 대상으로 탄성 및 탄소성해석을 수행하였다. Fig. 12는 평가 결과 주어진 δ_{NOM} 를 구속거리의 조합(L_R-L_R')에 따라 나타낸 것이다. 대칭 모델에서와 같이 균열 크기가 증가됨에 따라 δ_{NOM} 의 감소가 뚜렷이 관찰되었으며, 전반적으로 구속거리가 증가됨에 따라 δ_{NOM} 이 증가되는 경향

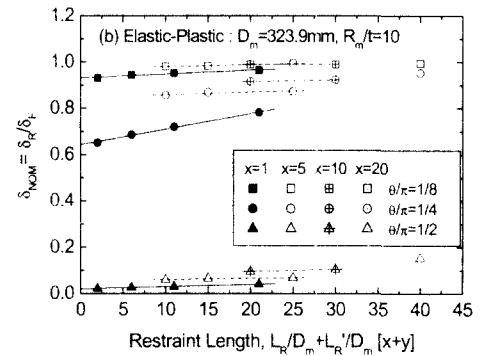
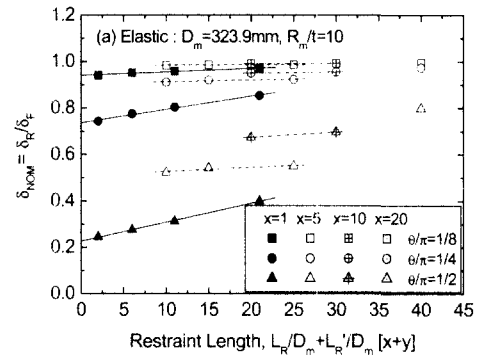


Fig. 13 Effect of non-symmetrical restraint length on normalized CODs for (a) elastic analysis and (b) elastic-plastic analysis

을 보였다. 그러나, 구속 거리에 따른 δ_{NOM} 의 증가는 탄성해석과 탄소성해석에서 모두 균열에서 가까운 쪽의 구속거리(L_R)에 따라 증가의 경향이 급격히 달라지고 있다. 즉, 전체 구속거리(L_R+L_R')에 따른 δ_{NOM} 의 변화보다 균열에서 가까운 쪽의 구속 거리에 따른 변화가 크게 관찰되었다.

구속부 위치의 비대칭에 따른 영향을 보다 자세히 살펴보기 위해서 그림 Fig. 13과 같이 δ_{NOM} 를 전체 구속 거리에 따라 나타내고, 각 균열 크기에서 일정한 L_R (가까운 쪽 구속거리)에 따라 데이터를 분류하였다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 δ_{NOM} 은 전체 구속거리보다 L_R 에 따라 데이터들이 잘 정렬되며, 일정한 L_R 에서 L_R' 이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 일정한 L_R 에서 L_R' 에 따른 δ_{NOM} 의 증가율은 L_R 이 작을수록 그리고 균열이 클수록 크게 나타났다. 따라서, PIB에 대한 구속이 균열을 중심으로 비대칭을 이루는 경우에 균열열림에 미치는 구속효

과는 전체 구속거리 보다 균열에서 가까운 쪽의 구속거리에 의해 지배되고 있으며, 균열을 중심으로 한쪽 방향의 구속 위치가 일정하면 균열열림에 대한 PIB의 구속효과는 다른 쪽 구속거리에 따라 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서, 비대칭적으로 구속되어 있는 배관균열에 대해서 전체 구속길이를 이용한 대칭 모델을 적용하여 구속효과를 예측하는 것은 COD를 비보수적으로 평가할 수 있으며, 균열에서 가까운 쪽 구속위치를 대칭 구속거리로 고려한 평가는 균열열림에 대한 PIB의 구속효과를 실제 보다 보수적으로 평가하게 되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

탄성 및 탄소성해석을 통해 압력유기굽힘(PIB)의 구속이 배관 관통균열의 균열열림에 미치는 영향을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 균열열림에 대한 PIB의 구속효과는 균열이 크고 구속부의 위치가 균열에서 가까울수록 크게 나타났다.
- (2) 선형 탄성거동을 가정한 균열에서 보다 탄소성 거동을 보이는 균열에서 PIB의 구속효과는 크게 나타나며, 특히 균열이 큰 경우에 탄소성해석에서 균열열림에 대한 PIB의 구속효과는 상당히 증가하였다.
- (3) 탄소성 거동 균열에서 내압의 크기에 따라 PIB에 대한 구속효과는 증가하였으며, 증가의 경향은 균열크기에 의존하였다.
- (4) 균열열림에 대한 PIB의 구속효과는 배관의 직경 변화에는 영향이 없으나, 두께가 증가함에 따라 감소하였다.
- (5) 균열을 중심으로 구속부가 비대칭을 이루는 경우에 균열열림에 대한 PIB의 구속효과는 전체 구속길이보다 균열에서 가까운 구속부 거리에 직접 영향을 받으며, 한쪽의 구속거리가 고정된 경우에 반대쪽 구속거리에 따라 구속효과는 선형적으로 변화하였다.

참고문헌

- (1) Pipe Break Task Group, 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Breaks," NUREG-1061, Vol. 3.
- (2) Zahoor, A., 1989, "Ductile Fracture Handbook,"

EPRI NP-6301-D.

- (3) Norris, D.M. and Chexal, B., 1987, PICEP : Pipe Crack Evaluation Program (Revision 1), EPRI NP-3596-SR, Rev.1.
- (4) 최영환, 정연기, 이정배, Gery Wilkowski, 1996, "페라이트 강 배관내의 원주방향 표면균열 평가를 위한 새로운 Z-Factor의 개발," 대한기계학회논문집A권, 제20호, 제5권, pp. 1798~1809.
- (5) 허남수, 임창주, 김영진, 표창률, 박치용, 2000, "원자력발전소 주요기기의 건전성 평가를 위한 3차원 탄소성 해석 시스템의 개발," 대한기계학회논문집A권, 제24권, 제8호, pp. 2015~2021.
- (6) Wilkowski, G.M., Ahmad, J., Barnes, C.R., Brust, F., Ghadiali, N., Guerrieri, D., Jones, D., Kramer, G., Landow, M., Marschall, C.W., Olson, R., Papaspyropoulos, V., Pasupathi, V., Rosenfeld, M., Scott, P., and Vieth, P., 1989, "Degraded Piping Program-Phase II : Summary of Technical Results and Their Significance to Leak-Before-Break and In-Service Flaw Acceptance Criteria," NUREG/CR-4082, Vol. 8.
- (7) Schmidt, R.A., Wilkowski, G.M., and Mayfield, M.E., 1991, "The International Piping Integrity Research Group (IPIRG) Program : An Overview," Proc. SMIRT-11, Vol. G2, pp. 177~188.
- (8) Ghadiali, S., Rahman, S., Choi, Y.H., and Wilkowski, G.M., 1996, "Deterministic and Probabilistic Evaluations for Uncertainty in Pipe Fracture Parameters in Leak-Before-Break and In-Service Flaw Evaluations," NUREG/ CR-6443.
- (9) Rahman, S., Ghadiali, N., Wilkowski, G.M., Moberg, F., and Brickstad, B., 1998, "Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes-Part III : Off-center Cracks, Restraint of Bending, Thickness Transition and Weld Residual Stresses," International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 75, pp. 397~415.
- (10) Rahman, S., Brust, F., Ghadiali, N., Choi, Y.H., Krishnaswamy, P., Moberg, F., Brickstad, B., and Wilkowski, G.M., 1998, "Refinement and Evaluation of Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes," NUREG/ CR-6300.