

원주방향 균열의 균열열림에 미치는 압력유기굽힘의 구속 효과

김진원* · 박치용**

Effect of Restraint of Pressure Induced Bending on Crack Opening for Circumferential Crack

Kim Jin Weon and Park Chi Yong

Key Words: Pressure Induced Bending(압력유기굽힘), Leak-Before-Break(파단전누설), Crack Mouth Opening Displacement(균열개구변위), Restraint Length (구속길이)

ABSTRACT

This study evaluated the effect of restraint of pressure induced bending(PIB) on crack mouth opening displacement(CMOD) for circumferential through-wall crack in pipe by using both elastic and elastic-plastic finite element analyses. The analyses results showed the restraint of PIB was decreased crack opening for a given crack length and tensile stress, and the effect was considerable for large crack and short restraint length. Also, the restraint effect on CMOD was independent on the variation in pipe diameter and decreased with increasing pipe thickness, and it depended on not total restraint length but short restraint length for non-symmetrically restrained. Additionally, the effect of restraint of PIB was more significant in the elastic-plastic analysis results compared with in the elastic analysis results.

1. 서론

파단전누설(Leak-Before-Break, LBB) 개념은 원전 고에너지 배관에서 파단에 따른 배관의 동적 효과를 설계에서 배제하기 위한 수단으로 도입된 것으로, 실제 발전소의 건설 및 운영 측면에서 많은 경제적 이익을 주고 있다⁽¹⁾. 고에너지 배관에 LBB 개념을 적용하기 위해서는 허용누설균열 크기(Leakage-Size-Crack, LSC) 평가와 균열안정성 평가의 2단계 평가를 통해 배관의 건전성이 입증되어야 한다. 따라서, LBB 평가는 정상운전 조건에서 발전소의 누설감지계통이 감지할 수 있는 정도의 누설을 허용할 수 있는 관통균열의 크기를 평가하고, 평가된 관통균열이 정상하중과 안정정지 지진하중 조건에서도 불안전 균열전과가

발생하지 않는다는 것을 입증하는 절차이다⁽¹⁾.

이들 평가에서는 해석을 간략히 하기 위해서 하중이 작용되는 동안 균열이 있는 배관의 양 끝단이 자유롭게 회전하는 것으로 가정하고, 이러한 조건에서 균열 열림을 계산하여 주어진 누설량에 대한 허용균열 크기를 평가하고 균열의 안정성을 평가한다. 그러나, LBB가 적용되는 실제 발전소의 배관계통에서 가상균열이 존재하는 위치는 주로 노즐이나 연결배관에 인접하므로 배관의 양 끝단이 자유롭게 회전할 수 있다고 가정하기에는 구속이 심하다. 한편, 일부의 실험 결과들에 의하면 내압에 의해 발생하는 축방향의 인장응력에 대해서는 배관 끝단이 구속됨에 따라 배관 균열의 파단응력이 증가하고, 일정한 하중에서, 균열개구변위(Crack Mouth Opening Displacement, CMOD)가 감소하는 것으로 관찰되었다^(2,3). 따라서, 기존의 평가 방법에 의한 결과들은 내압에 대한 균열의 하중지지능력을 과소평

* 한전 전력연구원 원자력연구실

** 한전 전력연구원 원자력연구실

가하고, 균열을 통한 누설량을 과대 평가하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 내압에 의한 굽힘이 구속된 실제 배관계통에서는 누설허용균열 크기가 LBB 측면에서 비보수적으로 평가된다는 것을 의미한다.

이와 같이 내압에 의한 배관 굽힘의 구속효과를 고려하지 못하는 기존 평가 방법의 불확실성을 정량적으로 평가하기 위해 몇몇 연구들이 수행되었으며^(4,5), International Pipe Integrity Research Program (PIRG)-2 결과에서는 LBB 평가에 미치는 가장 중요한 불확실 인자중의 하나가 "CMOD에 미치는 압력유기굽힘(Pressure Induced Bending, PIB)의 구속효과"인 것으로 보고하고 있다⁽⁶⁾. 특히 이들 연구의 주 관심 사항은 하중지지능력의 증가보다 균열 열림의 감소로 인한 누설균열크기의 비보수성을 정량적으로 평가하는 것으로, 균열 크기와 균열에서 구속 위치까지의 거리에 따른 구속효과를 평가하였다. 평가 결과 PIB에 대한 구속효과는 구속 위치가 균열에서 멀어질수록 작게 나타나고 있으며, 이러한 구속효과는 균열이 큰 경우에 보다 뚜렷한 것으로 밝혀졌다. 그러나, 모든 평가는 하중이 작용되는 동안 균열이 탄성적으로 거동한다는 가정 아래에서 수행되었으며, 구속위치가 균열을 중심으로 대칭을 이루고 있는 제한적인 경우에 대해서만 수행되었다.

실제 배관계통에서는 균열 위치를 중심으로 배관의 구속이 비대칭적으로 존재하며, 배관 균열의 거동이 탄소성적으로 거동하므로 CMOD에 미치는 구속의 영향이 탄소성 조건에서 평가되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 CMOD에 미치는 PIB의 구속효과를 배관의 직경과 두께에 따라 살펴보고, 특히 구속 조건의 비대칭성과 탄소성 균열거동에서의 CMOD에 미치는 PIB의 구속효과를 평가하였다.

2. 해석 방법

2.1 선행 연구의 PIB 구속효과 평가절차

PIB에 대한 구속이 배관 관통균열의 CMOD에 미치는 영향을 평가하기 위해서 선행 연구에서는 다음과 같은 평가 방법을 적용하였다^(4,5).

가. 배관 길이를 균열에서 구속위치까지의 거리(L_R)와 동일하게 관통균열배관에 대한 3차원

유한요소모델을 생성함. 이때 모델은 대칭 모델로서 응력에 따른 균열의 거동을 선형적으로 가정한 선형 탄성해석을 적용함.

나. 축방향 인장응력에 의한 배관의 회전이 완전히 구속된 상태를 모사하기 위해서 축방향의 임의의 변위(Δ)를 균열에서 L_R 위치에 있는 배관 단면(A-A)에 작용시킴. 이때의 CMOD를 δ_{uns} 로 정의하고 단면(A-A)에서의 응력중 축방향 인장성분을 σ_{ten} 으로 둠.

다. 선형 탄성해석이므로 임의의 축방향 인장응력, σ_{ref} 에 대한 CMOD(δ_s)는 $\delta_s = \delta_{uns} \times (\sigma_{ref} / \sigma_{ten})$ 와 같이 선형적으로 계산됨.

라. 배관의 회전에 대한 구속이 없는 상태에서 L_R 위치에 있는 배관 단면(A-A)에 σ_{ref} 을 작용시켜 CMOD를 구하고 δ_{no} 로 정의함.

마. 배관의 회전에 대한 구속효과를 정량적으로 나타내기 위해서 앞서 계산된 CMOD를 다음과 같이 $\delta_{NOR} = \delta_s / \delta_{no}$ 로 평준화 함.

위의 평가 절차에서는 배관의 회전이 구속된 상태에서 축방향 하중을 작용시키기 위해서 배관 단면에 축방향의 일정 변위를 가하고, 이때 배관 단면에서 생성된 축방향 인장응력과 관통균열의 CMOD를 기준으로 임의의 축방향 인장응력에 대한 CMOD를 선형적으로 계산함으로써 구속조건에서의 CMOD를 평가하였다.

2.2 평가 방법

PIB에 대한 구속효과를 평가하기 위해 앞선 연구에서 적용한 방법은 선형 탄성해석에만 적용이 가능하며, 임의의 축방향 변위에 따른 배관 단면(A-A)에서의 축방향 인장응력 성분(σ_{ten})을 정의하는 것이 명확하지 않으므로 결과에 임의성이 크게 작용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 배관의 회전을 구속하기 위한 적절한 경계조건을 적용하고, 축방향 변위 대신에 압력에 해당하는 축방향 인장응력을 배관 단면에 직접 작용시켜 CMOD를 계산하였다. 이것을 기존의 방법으로 평가한 CMOD와 비교함으로써 균열 열림에 미치는 PIB의 구속효과를 정량적으로 평가하였다.

가. 해석모델

PIB에 대한 구속효과 평가를 위해서 Fig. 1과 같은 원주방향 관통균열이 존재하고, 균열을 중심으로 임의의 거리(L_R & L_R')에서 배관의 회전

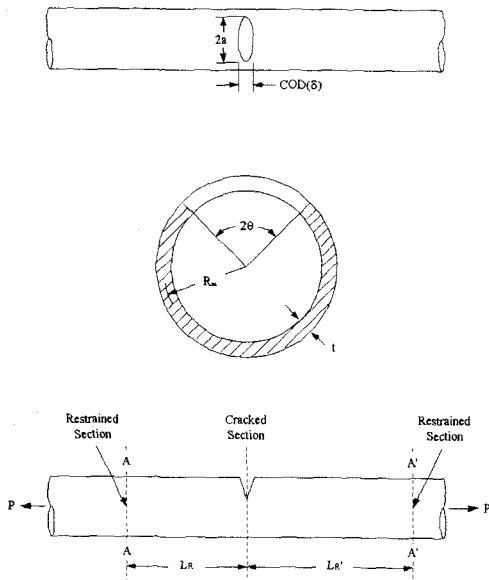


Fig.1 Schematics of a through-wall-cracked pipe under pure tension.

이 구속된 직관의 배관을 고려하였다. 균열을 중심으로 배관의 구속위치가 동일한 경우($L_R=L_R'$)에는 대칭 모델을 적용하고, 동일하지 않는 경우($L_R \neq L_R'$)에는 비대칭 모델을 적용하였다.

대칭 모델의 경우에는 배관의 1/4을 고려하여 균열면(대칭면)에서 축방향 변위를 구속하고, 균열에서 L_R 인 위치의 배관 단면(A-A)에 축방향의 인장응력을 작용시켰다. 비대칭 모델의 경우에는 배관의 1/2을 고려하였으며, 축방향의 인장응력을 균열에서 L_R 와 L_R' 인 위치의 배관 단면(A-A & A'-A')에 동시에 작용시켰다. 배관의 회전에 대한 구속은 균열면에서부터 L_R 과 L_R' 까지를 제외한 배관부에서 축방향 외에 모든 변위를 구속함으로써 고려하였다.

Fig. 2는 균열의 위치가 대칭인 경우와 비대칭인 경우에 대한 유한요소 모델로서 구속길이에 관계없이 동일한 균열 크기에 대해서는 각각 1개의 유한요소 모델을 범용적으로 적용하였다. 즉, 구속길이에 따라 응력이 작용되는 배관 단면(A-A, A'-A')의 위치와 배관 회전을 구속하는 경계조건을 적용하는 위치만을 변화시켰다. 배관 구속을 위한 경계조건을 적용하기 위해서 유한요소 모델의 배관 길이는 해석에서 적용된 최대 구속길이보다 크게 고려하였으며, 대칭 모델과 비대칭 모델의 배관 길이는 각각 $30D_m$ 과 $20D_m$

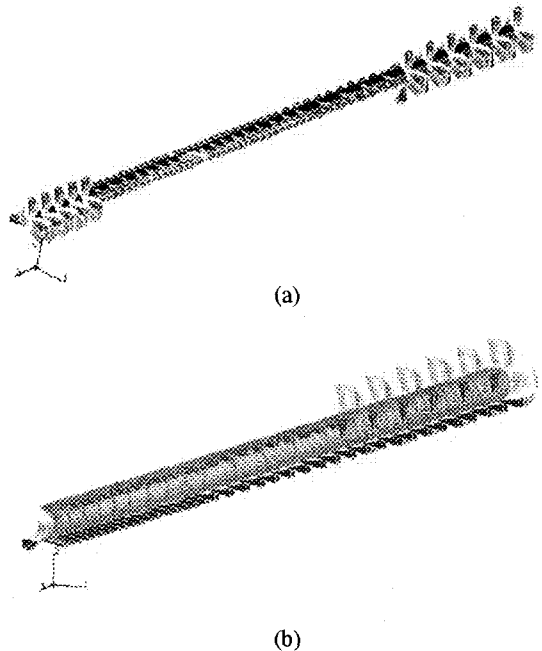


Fig. 2 Finite element mesh and boundary conditions used in analyses.

$30D_m$ 로 모델하였다. 적용된 유한요소는 20 절점의 육면체요소로서 대칭 모델은 776 요소, 4641 절점으로 구성되며, 비대칭 모델은 1160 요소, 6897 절점으로 구성된다. 두 모델에서 두께 방향으로 2개의 요소를 배열하였으며, CMOD는 최대 값을 보이는 균열 중심부의 중심 절점에서 주어진 z-방향의 변위로부터 계산하였다.

나. 작용하중

배관에 작용되는 하중으로는 축방향 인장하중만을 고려하고 있으며, 내압과 굽힘하중에 의한 균열 열림은 해석에서 고려하지 않았다. 따라서, 해석 결과에서 주어진 CMOD에는 균열면에 작용되는 압력과 굽힘하중의 성분이 고려되지 않았다. 해석에 적용된 인장하중의 크기는 배관의 직경에 따라 약간씩 다른데, 직경(D_m)이 711.2mm(28in)인 배관에서는 앞선 연구결과와의 비교를 위해 선행연구에서 적용되었던 849.12MPa의 인장응력(σ_c)을 배관 단면에 적용하였으며, 직경이 323.85mm(12.75in)와 114.3mm(4.5in)인 배관에서는 60.75MPa와 60.91MPa의 인장응력을 각각 배관 단면에 적용하였다.

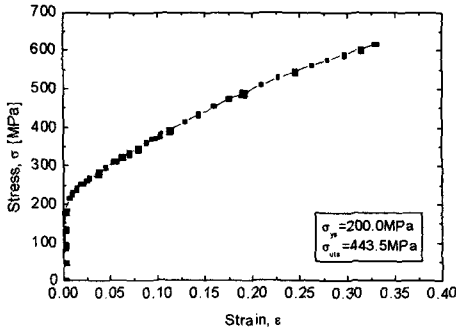


Fig. 3 Stress-strain curve used in elastic-plastic analysis

다. 재료물성치

해석에서 적용된 배관 재료의 영률(E)은 200GPa이고 포아송비(ν)는 0.3 이며, 탄소성 해석에 적용된 재료의 응력-변형률 곡선은 Fig.3과 같으며, 항복강도과 인장강도는 각각 200.0MPa와 443.5MPa이다.

3. 구속 영향 평가

3.1 선행 연구결과와의 비교

본 연구에서 적용한 방법의 타당성을 살펴보기 위해서 직경이 711.2mm이고 $R_m/t=10$ 인 배관의 중심에 존재하는 관통균열을 대상으로 선행 탄성해석을 수행하고, PIB의 구속효과를 선행 연구결과와 비교 평가하였다(4). 정량적 비교를 위해 평균화된 CMOD(δ_{NOM})로 평가 결과를 나타냈으며, Fig. 4는 균열 크기와 구속길이에 따라 δ_{NOM} 을 선행 연구의 결과와 함께 비교한 것이다. Fig.에서 보는 바와 같이 구속부의 위치가 균열에서 멀어질수록 δ_{NOM} 가 증가하다 점차 수렴하는 경향을 보이고 있으며, 균열이 커질수록 δ_{NOM} 의 감소가 뚜렷이 관찰되었다. δ_{NOM} 는 구속된 상태의 CMOD(δ_R)를 구속되지 않는 상태의 CMOD(δ_F)로 나눈 값으로, δ_{NOM} 가 1에 가까울수록 균열 열림에 미치는 PIB의 구속효과가 없는 것이며, 1보다 작아질수록 PIB의 구속효과가 크게 나타나는 것을 의미한다. 따라서, 평가결과에서 PIB에 대한 구속이 균열 열림에 미치는 영향은 균열이 구속부에서 가깝고 균열이 큰 경우에 크게 나타나고 있으며, 이러한 경향은 선행 연구결과와 일

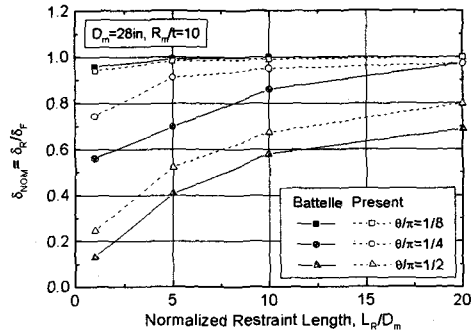


Fig. 4 Comparison of normalized CMODs calculated by Battelle and present study for 28in mean diameter pipe.

치하는 것으로 PIB에 대한 물리적인 현상을 고려할 때 타당한 결과임을 알 수 있다.

PIB에 대한 구속효과를 선행 연구결과와 정량적으로 비교하면, 구속효과가 거의 나타나지 않는 작은 균열($\theta/\pi = 1/8$)에서는 선행 결과에 비해 δ_{NOM} 을 약간 작게 평가하고 있으나 거의 차이가 없는 결과를 보이고 있다. 그러나 균열이 커질수록 선행 연구결과와의 차이가 증가하고 있으며, 선행 결과에 비해 큰 δ_{NOM} 값을 보이고 있다. 따라서, 선행 연구결과와 비교하여 균열이 작은 경우에는 구속효과를 크게 평가하고 있으며, 큰 균열에 대해서는 구속효과를 작게 평가하는 경향을 보여주고 있다.

이것은 PIB에 대한 구속을 모사하는 방법의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 실제 배관계통에서 배관의 거동을 고려해보면, 내압이 작용되는 배관은 축방향 변위에 의한 하중을 받고 있다 기보다 배관이 주위의 배관 또는 연결배관에 의해 회전이 구속된 상태에서 축방향 인장응력을 받는 상태에 가까운 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 적용한 구속조건과 하중조건이 실제 배관계통에서의 거동과 보다 더 유사하며, 평가 결과가 실제 배관의 균열 거동에 근접하는 것으로 판단된다.

3.2 배관 직경 및 두께 영향

배관의 형상에 따른 PIB의 구속효과를 살펴보기 위해서 배관의 직경과 두께에 따라 δ_{NOM} 을 평가하였다. 배관 직경에 따른 영향을 평가하기

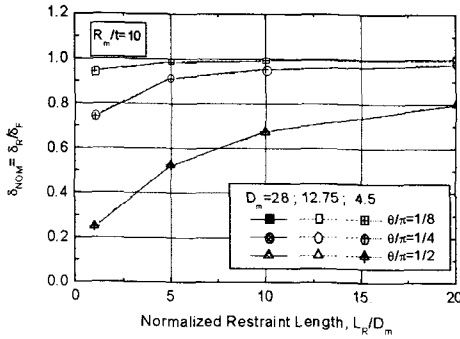


Fig. 5 Variation of normalized CMOD with pipe diameter.

위해 직경이 711.2mm, 323.85mm, 114.3mm이고 $R_m/t=10$ 인 배관을 고려하였으며, 두께에 따른 평가는 배관의 직경이 323.85mm이고 $R_m/t=5$ 인 배관을 대상으로 대칭 균열에 대한 선형 탄성해석을 적용하였다. Fig. 5는 배관의 직경에 따른 δ_{NOM} 을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 균열의 크기 및 평균화된 구속길이(L_R/D_m)에 관계없이 배관의 직경에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 한편, 동일한 직경의 배관에서 두께가 2배 증가함에 따라 δ_{NOM} 은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 균열 크기가 작은 경우($\theta/\pi=1/8$)에는 거의 변화가 없으나 균열이 큰 경우($\theta/\pi=1/2$)에는 5~22% 정도 큰 값을 보였다. 즉, PIB에 대한 구속효과는 배관의 직경 변화에 거의 영향을 받지 않지만, 배관의 두께가 증가됨에 따라 영향이 감소하는 것을 알 수 있다.

평가 결과에서 균열 크기, 구속길이, 그리고 작

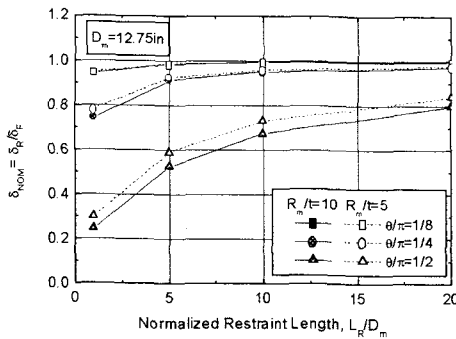


Fig. 6 Variation of normalized CMOD with pipe thickness.

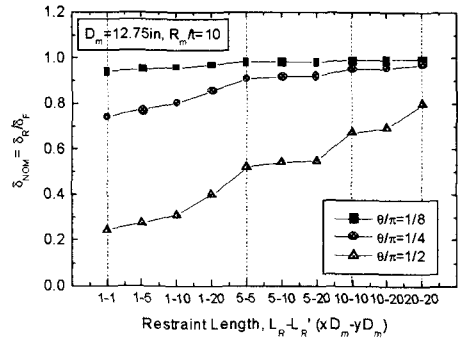


Fig. 7 Effect of total restraint length on normalized CMOD.

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

3.3 배관의 비대칭성의 영향

균열을 중심으로 배관의 구속 위치가 비대칭적으로 존재하는 경우에 균열 열림에 대한 PIB의 구속효과를 살펴보기 위해 균열 면에서 구속부까지의 거리를 변수로 평가를 수행하였다. 평가에는 직경이 323.85mm이고 $R_m/t=10$ 인 배관을 대상으로 여러 가지 균열 크기에 대한 선형 탄성해석을 적용하였다. Fig. 7은 평가 결과 주어진 CMOD의 비(δ_{NOM})를 균열 면에서 구속위치까지 구속길이의 조합(L_R-L_R')에 따라 나타낸 것이다. 대칭 모델에서와 같이 균열 크기가 증가됨에 따라 δ_{NOM} 의 감소가 뚜렷이 관찰되었으며, 전체적으로 구속길이가 증가됨에 따라 δ_{NOM} 이 증가되는 경향을 보이고 있다. 그러나, 구속길이에 따른 δ_{NOM} 의 증가는 균열에서 가까운 쪽의 구속길이(L_R)에 따라 증가의 경향이 달라지고 있다. 즉,

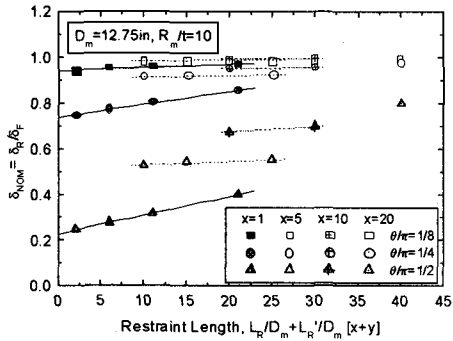


Fig. 8 Effect of non-symmetrical restraint length on normalized CMOD.

전체 구속길이(L_R+L_R')에 따른 δ_{NOM} 의 변화보다 균열에서 가까운 쪽의 구속길이에 따른 변화가 크게 관찰되었다.

구속부 위치의 비대칭성에 따른 영향을 보다 자세히 살펴보기 위해서 Fig. 8과 같이 δ_{NOM} 를 전체 구속길이에 따라 나타내고, 일정한 L_R 과 균열 크기에 따라 데이터를 분류하였다. Fig.에서 보는 바와 같이 δ_{NOM} 은 전체 구속길이보다 L_R 에 의해 결정되며, 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 나타나고 있다. 따라서, PIB에 대한 구속이 균열을 중심으로 비대칭적으로 존재하는 경우에 균열 열림에 미치는 구속효과는 전체 구속길이에 관계없이 균열에서 가까운 쪽의 구속길이에 의해 지배되고 있으며, 균열을 중심으로 한쪽 방향의 구속 위치가 일정하면 균열 열림에 대한 PIB의 구속효과는 다른 쪽 구속길이에 따라 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

이들 결과로부터 비대칭적으로 구속되어 있는 배관균열에 대해서 대칭 모델을 적용하여 구속효과를 예측한 것은 어려움이 있으며, 균열에서 가까운 쪽 구속위치를 대칭 구속길이로 적용한 평가는 균열 열림에 대한 PIB의 구속효과를 실제보다 보수적으로 계산하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 대칭모델의 보수성은 PIB에 대한 구속효과가 크게 나타나는 균열이 크고 구속길이가 짧은 경우에 더욱 심하게 나타나고 있다.

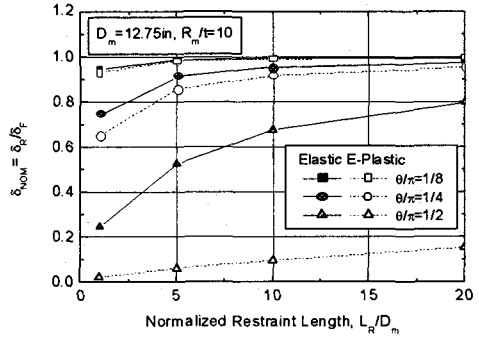


Fig. 9 Comparison of normalized CMODs calculated by elastic and elastic-plastic FE analysis.

3.4 탄소성 해석의 영향

실제 배관 균열의 파괴해석 및 LBB 평가에서 균열의 거동은 탄소성 거동을 보이며, LBB 평가의 허용누설균열 크기 계산에서 CMOD는 탄소성 재료거동을 가정하여 평가하고 있다. 따라서, 균열 열림에 대한 PIB의 구속효과를 탄소성 조건에서 평가하는 것이 중요하다. 여기서는 탄소성 거동을 보이는 균열에서 PIB에 대한 구속효과를 살펴보기 위해서 직경이 323.85mm이고 $R_m/t=10$ 인 배관을 대상으로 대칭균열을 가정하여 탄소성 해석을 수행하고, 앞서 평가된 선형 탄성해석 결과와 비교하였다.

Fig. 9는 각 균열 크기에서 평가한 δ_{NOM} 을 배관의 구속길이에 따라 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 균열이 작은 경우($\theta/\pi=1/8$)에는 선형 탄성해석과 비교하여 약간 작은 값을 보이고 있으나 거의 차이가 없다. 그러나 균열 크기가 증가함에 따라 선형 탄성해석 결과와의 차이가 급격히 증가되는 경향을 보이고 있으며, 균열 크기가 $\theta/\pi=1/2$ 의 경우에는 탄소성 해석 결과가 선형 탄성해석에 비해 5~10배 작은 δ_{NOM} 을 보이고 있다. 따라서, 탄소성 거동을 보이는 실제 배관 관통균열의 경우 CMOD에 미치는 PIB의 구속효과는 선형 탄성해석에서 예측된 것보다 크게 나타날 수 있으며, 특히 균열 크기가 큰 경우에는 PIB에 대한 구속효과는 상당히 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

균열 크기가 작은 경우에 탄성해석과 탄소성 해석 결과의 차이가 미미한 반면, 큰 균열에서

탄성해석과 탄소성 해석결과의 차이가 크게 나타나는 것은 균열 잔여면에서의 응력상태에 기인하는 것으로 판단된다. 균열 크기가 $\theta/\pi = 1/8$ 인 경우에는 탄성해석과 탄소성 해석 모두 PIB의 구속에 관계없이 균열선단에서 항복응력을 초과하는 영역이 제한되며, 대부분의 균열 잔여면이 탄성영역으로 존재한다. 그러나 균열 크기가 $\theta/\pi = 1/2$ 인 경우에는 PIB의 구속에 따라 균열선단에서 항복응력을 초과하는 영역의 크기 변하며, 특히 탄소성 조건에서는 PIB에 대한 구속이 없는 경우에 균열 잔여면이 모두 항복응력을 초과하고 있으나 PIB가 구속되는 경우에는 상당한 부분이 탄성범위의 응력 크기를 보이고 있다. 따라서, 균열이 큰 경우에 탄소성 해석에서 PIB에 대한 구속의 영향이 크게 나타나고 있는 것은 균열 잔여면에서의 응력상태가 PIB 구속에 따라 크게 변하기 때문인 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 내압에 의한 배관굽힘(PIB)이 구속되는 경우에 배관 관통균열의 균열열림에 미치는 영향을 배관 회전에 대한 구속조건을 직접 적용하여 평가하였다. 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열열림에 대한 PIB의 구속효과는 균열이 크고 구속부가 균열에서 가까운 경우에 크게 나타났다.

(2) 균열열림에 대한 PIB의 구속효과는 배관의 직경 변화에는 영향이 없으며, 두께가 증가함에 따라 감소하였다.

(3) 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.

(4) 선형 탄성거동을 가정한 균열에서 보다 탄소성 거동을 보이는 균열에서 PIB의 구속효과는 크게 나타나며, 특히 균열이 큰 경우에 탄소성 해석에서 균열열림에 대한 PIB의 구속효과는 상당히 증가하였다.

참고문헌

- (1) Pipe Break Task Group, 1984, NUREG-1061 vol.3.
- (2) Wilkowski, G.M. et.al, 1989, NUREG/CR-4082, vol.8.
- (3) Schmidt, R.A., 1991, Proc. SMiRT-11, Vol.G2, pp.177~188
- (4) Rahman, S., 1998, Int. J. Press. Ves. & Piping, Vol.75, pp.397~415.
- (5) Rahman, S. et. al, 1998, NUREG/ CR-6300.
- (6) Ghadiali, S. et.al, 1996, NUREG/ CR-6443.