

유한요소 해석모델이 원자력 배관의 건전성 평가에 미치는 영향

허남수 · 김영진[†] · 표창률* · 유영준**

성균관대학교 기계공학부 · 인덕대학 기계과* · 국방과학연구소**

(2000. 2. 19. 접수 / 2000. 5. 14. 채택)

Effect of Finite Element Model on the Integrity Evaluation of Nuclear Piping

Nam-Su Huh · Young-Jin Kim[†] · Chang-Ryul Pyo* · Young-Jin Yu**

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Department of Mechanical Engineering, Induk Institute of Technology* · Agency for Defense Development**

(Received February 19, 2000 / Accepted May 14, 2000)

Abstract : Recently, the J/T analysis based on elastic-plastic finite element analysis is popularly used in the nuclear industry to assess the integrity of a cracked pipe. The objective of this paper is to evaluate the effect of stress-strain curve for weld metal, variation of crack incremental length(δa), and crack face pressure on the J/T analysis result. For this purpose, a parametric analysis was performed and the results calculated from finite element analysis were compared with those from the piping experimental data(stainless steel weldment pipe with circumferential through-wall crack). The numerical result using base metal material property is in agreement with the experimental one and the maximum load is decreased as the δa for J/T analysis is increased.

1. 서 론

균열이 존재하는 원자력 배관의 건전성을 평가하기 위해 사용되고 있는 평가 방법으로는 J/T 평가법, 임계하중법, 파손평가도(failure assessment diagram)법, 전변형을 파손평가도(deformation plasticity failure assessment diagram)법 등이 있다. 이 중에서 원자력 배관에 대한 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 해석을 위해서는 미국원자력 규제위원회(USNRC)에서 추천하고 있는 J/T 평가법이 가장 널리 사용되고 있다¹⁾. J/T 평가법은 탄소성 파괴역학 매개변수인 J -적분값을 사용하여 균열의 건전성을 평가하는 방법으로 작용하중에 의한 J -적분값과 재료의 파괴저항값을 필요로 한다. 작용하중에 의한 J -적분값을 계산

하는 방법으로는 크게 이론적인 방법, 공학적인 방법 및 수치해석적인 방법이 있다. 이론적인 방법은 해석상의 어려움으로 인해서 이론해가 규명되어 있는 경우가 많지 않으므로, 실제 문제의 적용에는 거의 이용되지 못하고 있다. 공학적인 방법은 균열이 있는 배관에 작용하는 하중조건, 균열의 형상, 균열의 크기 및 배관재료의 응력-변형을 관계로부터 쉽게 J -적분값을 계산할 수 있는 단순화된 방법이다. 현재 여러 가지 J -평가식(J -estimation scheme)²⁻⁴⁾이 제안되어 있으며 원자력 배관의 건전성 평가에 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 특정범위의 배관크기 및 응력-변형을 관계에 대해서만 해를 제공하고 있기에 사용이 제한적이다. 따라서 많은 경우에는 수치해석법을 이용하여 J -적분값을 구한다⁵⁾. J -적분값을 수치적으로 구하는 방법에는 경계적분법 및 유한요소법 등이 있으며, 현재 유한요소법이 가

[†] To whom correspondence should be addressed.
yjkim@yurim.skku.ac.kr

장 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 유한요소법을 기반으로 한 J/T 평가시 용접부의 재료물성치, 균열면의 압력, 균열길이의 미소증분값 등의 해석인자에 대한 일관된 기준이 없는 실정이다. 따라서 유한요소법을 이용한 배관 건전성 평가방법의 타당성을 입증하고, 위의 해석인자가 J/T 평가결과에 미치는 영향을 검토하는 것이 매우 중요하다.

최근 Ganta와 Ayres⁶⁾, 유영준⁷⁾ 등은 배관 용접부의 응력-변형을 관계가 J -적분값에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 그러나 아직까지 용접부의 재료물성치, 균열면의 압력, 균열길이의 미소증분값 등의 해석인자가 원자력 배관의 J/T 평가결과에 미치는 영향을 체계적으로 평가한 바는 없다.

본 논문의 목적은 실제 배관파단시험을 유한요소법으로 모사하여 용접부의 재료물성치, 균열면의 압력, 그리고 균열길이의 미소증분값 등의 유한요소 해석인자가 J/T 평가결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것이다.

2. 원주방향 관통균열이 있는 배관에 대한 배관파단시험

USNRC에서 발간된 NUREG/CR-4878 보고서⁸⁾에서는 용접부에 존재하는 원주방향 관통균열 및 표면균열의 거동을 평가하기 위하여 직경이 168.3mm, 413mm, 그리고 711.2mm인 배관을 대상으로 7개의 실제 배관파단시험을 수행하고, 이를 통해 균열진전모멘트(crack initiation moment)와 배관파단에 필요한 최대 모멘트(maximum moment)를 구하였다. 본 논문에서는 유한요소 해석모델이 J/T 평가결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 NUREG/CR-4878에 수록된 배관시험 중 원주방향 관통균열이 존재하는 직경이 413mm이고 두께가 26.2mm인 배관의 경우를 유한요소법으로 모사하였다. 그리고 균열진전모멘트와 최대 모멘트를 예측한 후 실제 배관파단시험에서 구한 결과와 비교하였다. 배관파단시험에 사용된 배관 및 균열의 형상, 그리고 시험 결과는 Table 1에 정리하였다.

Fig. 1은 배관재인 SA358 TP304 스테인레스강의 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이며, Fig. 2는 파괴저항곡선을 나타낸 것이다. 파괴저항시험은 시편 평면크기의 변화가 파괴저항곡선에 미치는

영향을 평가하기 위해 두께는 25.4mm로 고정하고 평면크기를 1T, 3T, 그리고 9.5T로 변화시키며 수행되었다⁸⁾.

Table 1. Summary of cracked pipe geometry and results of pipe fracture experiment⁸⁾

Material	SA358 TP304
Weld Type	SAW
Outer Diameter (mm)	413
Wall Thickness (mm)	26.2
Crack Length, % of Pipe Circumference	36.4
Crack Initiation Moment (kN-m)	195
Maximum Moment (kN-m)	380

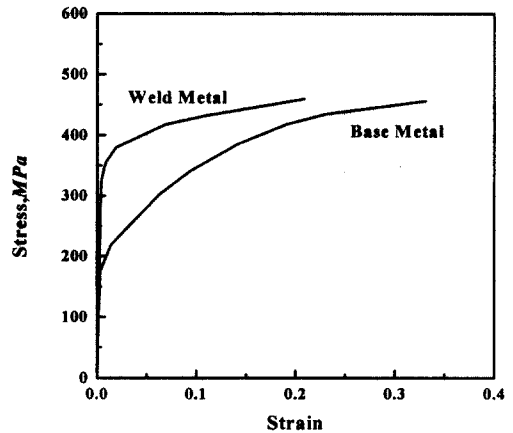


Fig. 1. Stress-strain curves for SA358 TP304 stainless steel base metal and weld metal⁸⁾

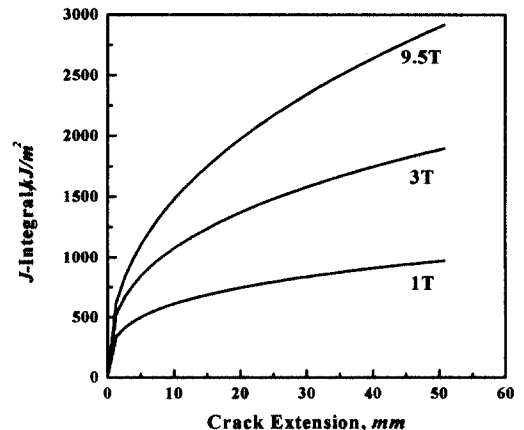


Fig. 2. J-R curves for SA358 TP304 stainless steel⁸⁾

Table 2. Results of J-R tests for SA358 TP304 stainless steel⁸⁾

SPEC_ID	Size	B ^(a) (mm)	W ^(b) (mm)	SG ^(c) (%)	JIC (kJ/m ²)
A45W_2	1T	25.0	50.0	0.0	120.0
A45W_3	3T	26.0	152.0	0.0	133.0
A45W_6	9.5T	29.0	483.0	0.0	524.0

(a) The specimen thickness (b) The specimen width
(c) The side-grooving percentage

또한 균열진전모멘트를 예측하기 위한 파괴인성(J_{IC})값은 Table 2에 정리하였다⁸⁾.

3. 유한요소법을 이용한 탄소성 파괴해석

3.1. 유한요소 해석모델

Fig. 3은 해석에 사용된 배관의 유한요소모델로 해석을 단순화하기 위해 전체배관의 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델링하였다. 유한요소해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁹⁾를 사용하였다.

유한요소해석시 하중은 실제 배관파단시험과 동일하게 순수 굽힘 모멘트를 4점굽힘법으로 모사하였다. 또한 균열면에 작용하는 압력의 영향을 평가하는 경우에는 원자력발전소의 정상운전 압력인 15.5MPa의 내압을 추가로 작용시켰다. 일반적으로 관통균열에 대한 해석의 경우에는, 균열면에 내압의 50%에 해당하는 압력을 가정하여 작용시킨다. 본 논문에서는 균열면의 압력이 J/T 평가결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 균열길이에 따른 균열면 압력의 영향을 평가하였다.

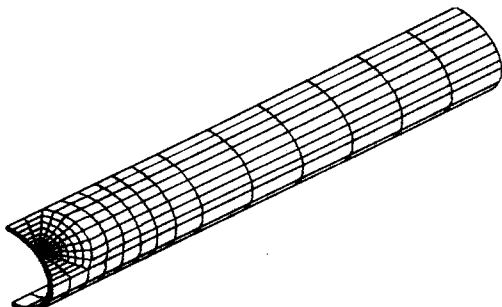


Fig. 3. Three dimensional mesh design for finite element analysis

3.2. 재료의 성질

일반적인 LBB 해석법에서는 배관에 대한 유한요소해석시 전체 배관의 응력-변형을 관계를 모재로 가정하여 해석한다. 그러나 균열이 존재하는 실제 배관은 모재부와 용접부로 구성되어 있으므로 용접부의 재료물성치가 해석결과에 미치는 영향을 평가해야할 필요가 있다. 본 논문에서는 용접부가 원자력 배관의 J/T 평가결과에 미치는 영향을 알아보기 위해서 배관의 응력-변형을 관계를 Fig. 4에 나타낸 바와 같은 3가지 경우로 가정하여 유한요소해석을 수행하였다.

첫번째는 용접부의 영향을 무시하고 전체 배관을 모재의 응력-변형을 관계로 가정하여 해석을 수행하였다. 두 번째는 실제 균열은 배관의 용접부에 존재하므로 균열의 거동이 용접재의 응력-변형을 관계에 의하여 좌우된다고 가정하여 전체 배관을 용접재의 응력-변형을 관계로 가정하여 해석을 수행하였다. 그리고 세 번째 경우는 모재와 용접재로 구성된 실제 배관의 용접상태를 유한요소해석으로 모사하였다. 해석에 사용된 모재와 용접재의 응력-변형을 관계는 Fig. 1에 나타낸 바와 같고, 최대 모멘트의 크기를 예측하기 위한 파괴저항곡선은 Fig. 2와 같다.

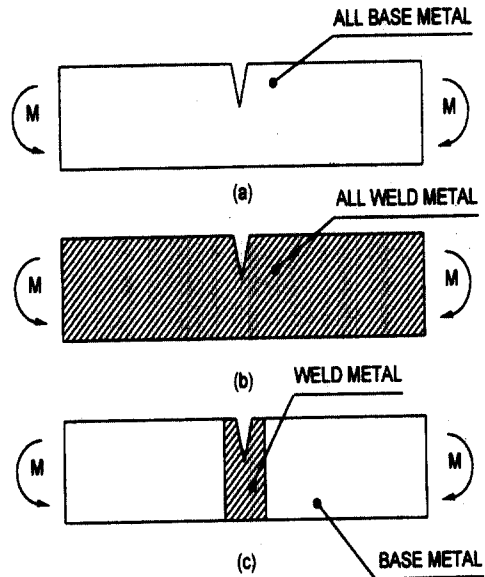


Fig. 4. Schematics of pipe with circumferential through-wall crack, for (a) all base metal, (b) all weld metal, and (c) weldment pipe

3.3. 균열진전 및 최대 모멘트 예측

균열진전모멘트는 다음의 조건을 만족하는 값으로 결정하였다.

$$J_{app.}(a, P) = J_{IC} \quad (1)$$

여기서, $J_{app.}$ 는 작용하중에 의한 J -적분값이며, a 와 P 는 각각 균열길이와 작용 하중이다.

본 논문에서는 앞서 언급한 바와 같이 관통균열이 존재하는 배관의 최대 모멘트를 예측하기 위하여 J/T 평가법을 사용하였다. J/T 평가법은 재료에 대한 J -적분값($J_{mat.}$)과 찢김계수(tearing modulus, $T_{mat.}$)의 관계를 작용하중에 대한 J -적분값($J_{app.}$)과 찢김계수($T_{app.}$)의 관계와 비교함으로써 균열이 있는 배관의 안정성을 평가하는 방법이다. 재료에 대한 J -적분값은 파괴저항측정 시험에서 얻은 데이터를 식 (2)와 같이 곡선적합하여 균열길이의 함수로 나타내어 구한다.

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

여기서, C_1 과 C_2 는 파괴저항시험 결과의 곡선적합상수이다.

따라서, 재료의 찢김계수는 식 (2)를 균열길이에 대해 미분하여 다음과 같이 구한다.

$$\frac{dJ_{mat.}}{da} (= T_{mat.}) = C_1 C_2 (\Delta a)^{C_2 - 1} \quad (3)$$

작용하중에 대한 J -적분값은 균열길이에 대한 정확한 J -적분값의 변화를 알기 위하여 균열길이 $a - \delta a$, a , $a + \delta a$ 인 경우에 대해 각각 유한요소해석을 수행하고 J -적분값과 균열길이의 관계를 식 (4)와 같이 2차 다항식으로 나타내어 구한다. 여기에서 δa 는 균열길이의 미소증분값으로 본 논문에서는 δa 의 범위가 J/T 평가결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 각각 초기균열길이 a 의 5%, 10%, 20% 및 30%로 가정하여 해석을 수행하였다.

$$J_{app.} = c_1 a^2 + c_2 a + c_3 \quad (4)$$

여기서, c_1 , c_2 , c_3 는 작용하중에 대한 J -적분

값의 곡선적합상수이다.

작용하중에 의한 찢김계수는 재료의 찢김계수와 동일하게 식 (4)를 균열길이로 미분하여 다음과 같이 구한다.

$$\frac{dJ_{app.}}{da} (= T_{app.}) = 2c_1 a + c_2 \quad (5)$$

그러므로 배관에 대한 최대 모멘트의 크기는 다음의 관계식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$\frac{dJ_{app.}}{da} (= T_{app.}) = \frac{dJ_{mat.}}{da} (= T_{mat.}) \quad (6)$$

4. 해석결과의 비교

4.1. 유한요소법을 이용한 배관 파괴해석의 타당성 및 용접부의 영향 평가

Fig. 5는 유한요소해석으로 구한 J -적분값과 굽힘 모멘트의 관계를 나타낸 것이다. 해석결과 배관전체를 모재와 실제 배관의 용접상태로 가정한 경우는 서로 경향이 비슷하나 용접재로 가정한 경우는 두가지 경우와 다른 경향을 보였다. 이는 실제 균열은 배관의 용접부에 존재하지만 전체 배관의 치수에 비해서 용접부의 폭이 매우 작기 때문에 균열의 탄소성 거동은 모재의 영향을 받는다는 것을 의미한다.

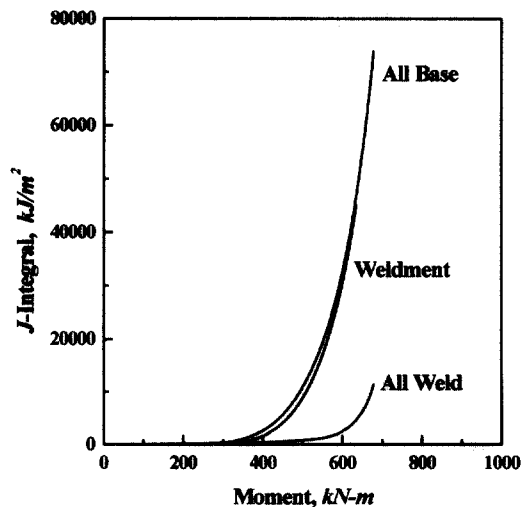


Fig. 5. Comparison of applied moment vs. J -integral curves for all base metal, all weld metal, and weldment pipe

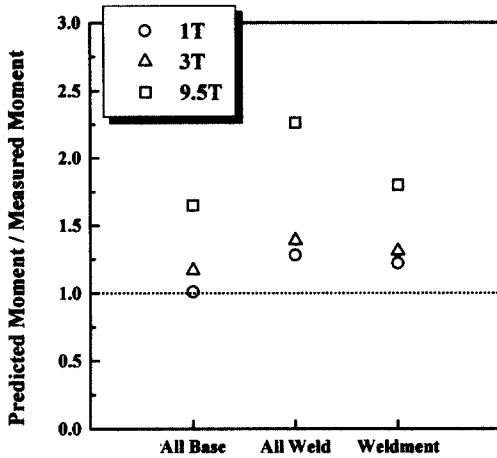


Fig. 6. Comparison of crack initiation moments for all base metal, all weld metal, and weldment pipe

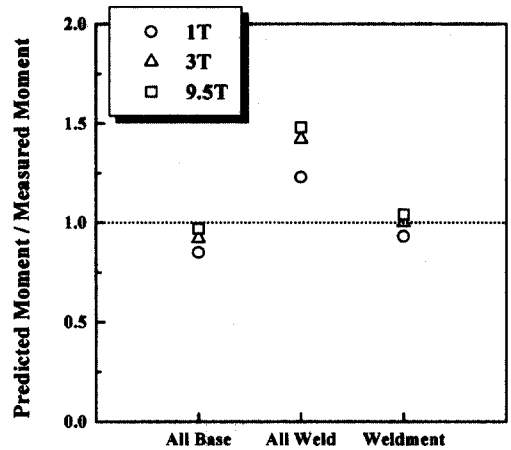


Fig. 7. Comparison of maximum moments for all base metal, all weld metal, and weldment pipe

Fig. 6은 유한요소해석으로 구한 균열진전모멘트를 실제 배관시험결과와 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서 보면 파괴인성치로 1T-CT 시편의 값을 사용하여 구한 경우가 시험결과와 잘 일치하였다. 그리고 전체 배관을 모재와 실제 배관의 용접상태로 가정한 경우가 전체 배관을 용접재로 가정하여 해석을 수행한 경우보다 잘 일치하였다. 그러나 균열진전모멘트의 경우는 전체적으로 유한요소해석으로 구한 결과가 시험에서 구한 결과보다 높은 경향을 보였다. 그러나 스테인레스강과 같이 인성이 큰 재료의 경우는 표준 1T-CT 시편으로 유효 J_{IC} 를 구하는 것이 매우 어려우며 동일한 크기의 시편이라도 시험 조건 및 방법에 따라 많은 차이가 있기 때문에 예측결과와 시험결과가 서로 일치하지 않는 것이 반드시 유한요소해석상의 문제라고 결론을 내릴 수는 없다고 판단된다. 이와 같이 재료의 성질에 따라 예측결과와 시험결과가 차이를 보이는 경우가 기존의 연구에서도 이미 보고된 바 있다^{3,10)}.

Fig. 7은 유한요소해석으로 예측한 최대 모멘트와 실제시험에서 구한 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서 보면 전체 배관을 모재의 응력-변형을 관계로 가정한 경우와 실제 배관의 용접상태로 가정한 경우가 시험결과와 잘 일치하였다. 또한 모재의 응력-변형을 관계로 가정한 경우는 균열 안정성 평가시 1T-CT 시편보다는 9.5T-CT 시

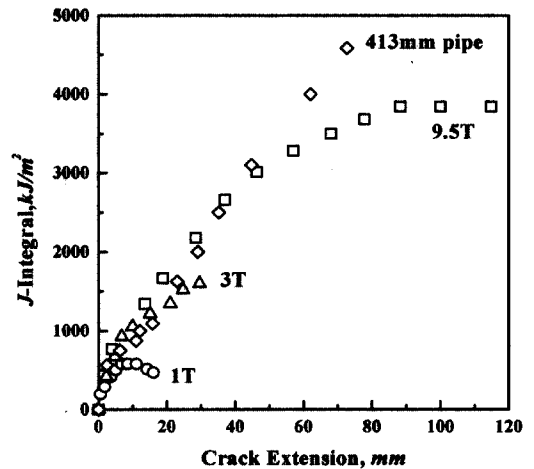


Fig. 8. Comparison of SA358 TP304 stainless steel J-R curves from various plane size CT specimens and pipe experiments⁹⁾

편의 파괴저항곡선을 사용한 경우가 시험결과와 잘 일치하였는데, 이는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 평면크기가 큰 시편의 파괴저항곡선이 배관의 파괴저항특성을 잘 반영하기 때문이다.

한편 실제 배관의 용접상태를 유한요소법으로 모사한 경우는 3T-CT 시편의 결과를 사용한 경우는 잘 일치하나 9.5T-CT 시편의 결과를 이용하는 경우에는 실제 배관시험보다 크게 평가하였다. 이는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 유한요소 해석시 용접부의 폭을 실제 용접부보다 크게 모델링했기 때문으로 판단된다.

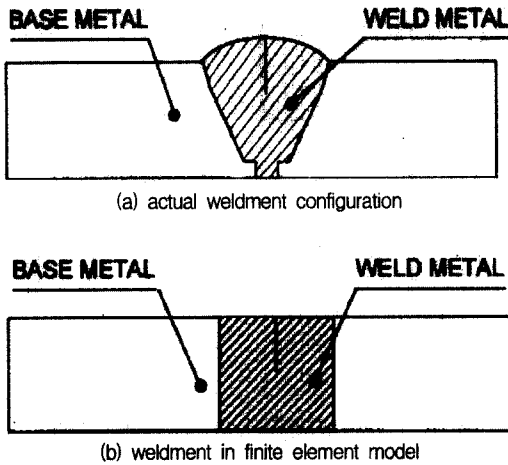


Fig. 9. Modeling of weldment for finite element analysis

그러나 균열진전모멘트 예측결과와 마찬가지로 용접재의 응력-변형을 관계로 가정하여 최대 모멘트를 구한 경우는 시험결과보다 과대하게 예측하고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 배관에 존재하는 균열의 거동이 용접재보다는 모재의 영향을 받기 때문이다. 따라서 LBB 해석과 같이 보수적인 해석이 요구되는 경우에는 전체 배관을 모재의 응력-변형을 관계로 가정하여 해석을 수행하는 것이 바람직하다. 그러므로 모재의 응력-변형을 관계로 사용한 기존의 설계방법의 타당성이 잘 입증되었다.

본 논문에서는 유한요소법을 이용한 배관 파괴해석의 타당성 및 용접부의 영향 평가를 위해서 배관시험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였다. 그러나 한가지의 경우에 대해서만 비교가 이루어졌기 때문에 타당성 검증 방법 및 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 동일한 배관시험에 대해 다른 공학적 평가방법^{11~14)}을 이용하여 예측한 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였다. Fig. 10은 균열진전모멘트에 대해서 유한요소해석으로 얻은 결과와 여러 가지 평가방법으로 예측한 결과를 비교한 것이다. 유한요소해석 결과는 배관 전체를 모재로 가정하고 1T-CT 시편의 파괴인성치를 사용하여 구한 것이다. 그림에서 보면 유한요소해석 결과와 다른 평가방법을 이용한 결과가 비교적 잘 일치하였으나 모든 방법이 균열진전모멘트를 실제 시험에서 구한 모멘트보다 약 20%~50% 정도 크게 예측하고

있다. 이는 유한요소해석 결과와 마찬가지로 다른 방법도 균열진전모멘트를 과대예측할 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 11은 배관 전체를 모재의 응력-변형을 관계로 가정한 경우에 대해 유한요소해석으로 예측한 최대 모멘트를 다른 평가방법으로 예측한 결과와 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 유한요소해석으로 예측한 결과와 다른 평가방법으로 예측한 결과가 서로 잘 일치하였다. 따라서 본 논문에서 사용한 유한요소해석 방법의 타당성이 잘 입증되었다.

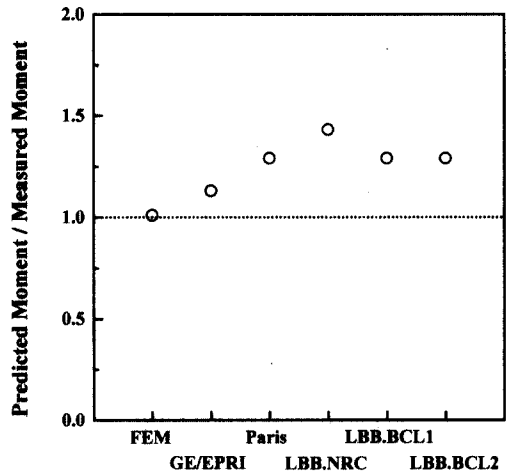


Fig. 10. Comparison of crack initiation moments calculated from FEA and other J -estimation scheme

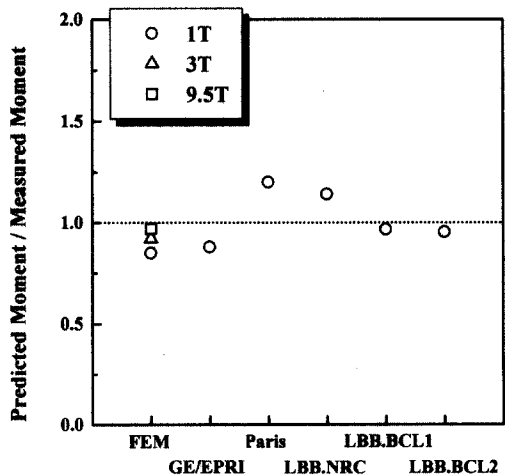


Fig. 11. Comparison of maximum moments calculated from FEA and other J -estimation scheme

4.2. 균열길이의 미소증분값의 영향

Fig. 12는 균열길이의 미소증분값을 초기균열 길이 a 의 5%, 10%, 20% 및 30%로 변화시키며 수행한 J/T 평가결과를 나타낸 것이다. 여기서, 유한요소해석 결과는 전체 배관을 모재의 응력-변형을 관계로 가정하여 구한 결과이며, 균열 안정성 평가를 위한 파괴저항곡선은 1T-CT 시편의 결과를 사용하였다. 해석결과 균열길이의 미소증분값이 증가할수록 균열의 불안정 성장점 (instability point)이 낮아졌다. 즉, 균열길이의 미소증분값이 증가하면 최대 모멘트가 작게 예측된다. 따라서 유한요소해석을 이용한 J/T 평가시 균열길이의 미소증분값을 10% 이상으로 가정하면 LBB 적용 측면에서 매우 보수적인 해석 결과를 초래할 수 있다.

4.3. 균열면 압력의 영향

앞서 언급한 바와 같이 관통균열에 대한 해석의 경우는 균열면에 내압의 50%에 해당하는 압력을 가정하여 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 균열면에 작용하는 압력의 영향을 균열길이에 따라 정량적으로 평가하였다. Fig. 13은 해석결과를 나타낸 것으로 균열길이는 배관 원주의 10%, 25%, 그리고 36%로 변화시켰다. 해석결과 균열면에 내압의 50%에 해당하는 압력을 작용시킨 경우가 균열면에 압력을 고려하지 않은 경우에 비해 최대 3% 정도 최대 모멘

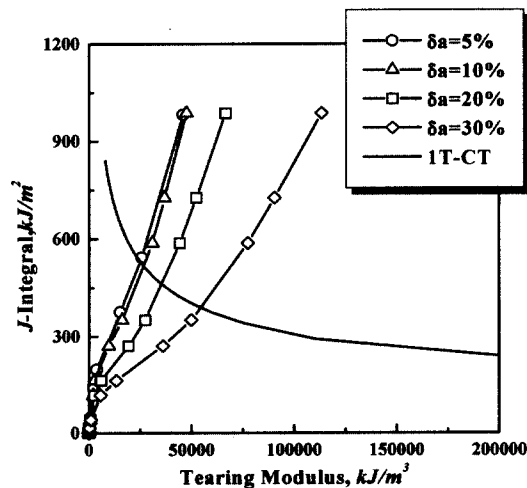


Fig. 12. Comparison of J/T analysis results for various δa values using 1T-CT specimen data

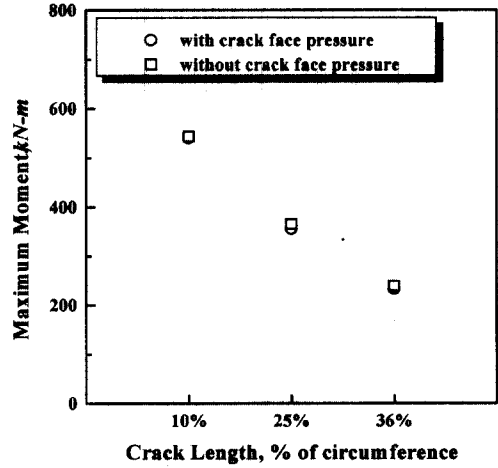


Fig. 13. Effect of crack face pressure on maximum moment of through-wall cracked pipe

트를 작게 예측하였으나 이 경우에는 모든 균열 길이에 대해 그 차이를 무시할 수 있을 정도인 것으로 판단된다. 따라서 향후 보다 실제적인 균열면 압력의 모델링이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 관통균열이 존재하는 원자력 배관의 유한요소 해석모델이 J/T 평가결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 배관에 존재하는 균열의 탄소성 거동은 응집재보다는 모재의 응력-변형을 관계에 큰 영향을 받았다.

(2) 유한요소해석으로 예측한 균열진전모멘트와 최대 모멘트는 배관파단시험에서 구한 결과와 잘 일치하였으며, 다른 공학적 평가방법으로 예측한 결과와도 잘 일치하였다.

(3) J/T 평가결과, 모재의 응력-변형을 관계로 가정하여 예측한 최대 모멘트가 가장 보수적인 결과를 나타내어 전체 배관을 모재의 응력-변형을 관계로 가정하여 설계한 기존의 해석법의 타당성이 잘 입증되었다.

(4) 균열길이의 미소증분값을 변화시켜 최대 모멘트를 예측한 결과, 미소증분값이 증가할수록 최대 모멘트를 작게 예측하였다. 또한 정확한 J/T 평가를 위해서는 균열길이의 미소증분값을

초기균열길이의 10% 이하로 가정하는 것이 바람직하다.

(5) 균열면의 압력을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 최대 3% 정도 최대 모멘트를 작게 예측하였다.

감사의 글 : 본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 허남수, 김영진 등, "원전배관의 LBB 적용을 위한 간략 설계기법의 개발," 한국산업안전학회지, Vol. 14, No. 2, pp. 32~41, 1999.
- 2) 김현수, 장윤석 등, "배관 표면균열 해석을 위한 파괴역학 평가방법 비교," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A권, pp. 603~608, 1999.
- 3) H. S. Kim, Y. S. Chang, et al., "A Parametric Study on the Fracture Mechanics Analyses of Through-Wall and Surface Cracked Pipe," Transactions of the 15th International Conference on SMiRT, Vol. 5, pp. 303~310, 1999.
- 4) A. Zahoor, "Ductile Fracture Handbook, Vol. 1 ~ Vol. 3," Electric Power Research Institute, 1989.
- 5) 허남수, 김영진 등, "원자력발전소 주요기기의 건전성 평가를 위한 3차원 탄소성 해석 시스템의 개발," 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 1999.
- 6) B. R. Ganta, D. J. Ayres, "Analysis of Cracked Pipe Weldments," EPRI Report NP-5057, 1987.
- 7) 허남수, 김영진 등, "차세대 원전배관의 LBB 적용을 위한 수정배관평가선도의 개발," 대한기계학회 논문집 A권, Vol. 23, No. 5, pp. 763~771, 1999.
- 8) "Analysis of Experiments on Stainless Steel Flux Welds," NUREG/CR-4878, USNRC, 1987.
- 9) "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1999.
- 10) "The Second International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) Program - Final Report," NUREG/CR-6452, USNRC, 1997.
- 11) V. Kumar, M. German, et al., "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis," EPRI Report NP-1931, 1981.
- 12) P. C. Paris, H. Tada, "The Application of Fracture-Proof Design Methods Using Tearing-Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Through-Wall Cracks," NUREG/CR-3464, USNRC, 1983.
- 13) R. Klecker, F. W. Blust, et al., "NRC Leak-Before-Break Analysis Method for Circumferentially Through-Wall Cracked Pipes under Axial Plus Bending Loads," NUREG/CR-4572, USNRC, 1986.
- 14) F. W. Brust, "Approximate Method for Fracture Analyses of Through-Wall Cracked Pipes," NUREG/CR-4853, USNRC, 1987.