

인장-압축하중 하의 파괴저항곡선의 감소현상 해석

석 창 성* · 윤 병 곤**
(1999년 3월 20일 접수)

Analyses of the Decrease Phenomenon of Fracture Resistance Curve Under Tension-Compression Loading

Chang Sung Seok and Byoung Gon Yoon

Key Words: *J*-Integral(*J*-적분), Fracture Resistance Curve(파괴저항곡선), Decrease Phenomenon(감소현상), Strain Hardening(변형경화), Residual Stress(잔류응력), Crack Opening(균열 열림)

Abstract

Fracture resistance (*J*-*R*) curves, which are used for elastic-plastic fracture mechanics analyses, decreased under tension-compression loading condition. This phenomenon was proved by several former researches, but the causes have not been clear yet. The objective of this paper is to investigate the cause of this phenomenon. On the basis of fracture resistance curve test results, strain hardening hypothesis, stress redistribution hypothesis and crack opening hypothesis were built. In this study, hardness tests, Automated Ball Indentation(ABI) tests, theoretical stress field analyses, and crack opening analyses were performed to prove the hypotheses. From this study, strain-hardening of material, generation of tensile residual stress at crack tip, and crack opening effects are proved as the causes of the decrease hypothesis.

기호설명

- J* : *J*-적분값
- R* : 하중비
- P* : 작용하중
- a* : 균열길이
- W* : 시험편 폭
- B* : 시험편 두께
- E* : 탄성계수
- σ_r : 항복강도
- σ : 균열선단 응력

1. 서론

최근 세계적으로 많은 지진사례가 보고되고 있으며, 이러한 지진하중은 원전설비 및 각종 기계 구조물에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 우리나라에서는 원자력발전소의 배관계통 설계에 파 단전누설(Leak Before Break: LBB) 설계개념을 적용하고 있으며, 이를 위한 원자력 배관재료의 파괴거동 해석에는 *J*-적분에 근거한 탄소성파괴역학(Elastic Plastic Fracture Mechanics: EPFM)이 널리 적용되고 있다. 이러한 해석을 위해서는 배관재료의 파괴저항곡선(*J*-*R* curve)을 알아야 하며 이를 시험에 의하여 구해야 한다. 이때, 단순인장하의 파괴저항곡선 시험법인 ASTM E813⁽¹⁾과 E1152⁽²⁾시험법에 준하여 시험을 수행하고 있다.

지진이 발생할 경우에는 그 진동에 의하여 인장과 압축 하중이 반복하여 작용되며, 이 때에는

* 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : csseok@yurim.skku.ac.kr
TEL : (0331)290-7477 FAX : (0331)290-7482
** 풍산 (주)

원전의 안전성 평가에 중요한 인자인 파괴저항곡선이 단순인장하중 상태일 때보다 현저히 작아짐을 보고하고 있다.^(3~7) 본 연구자들은 전보^(8,9)에서 이러한 파괴저항곡선의 감소현상에 대하여 보고한 바 있으며, 그 원인으로 균열열림 현상을 제시하였으며, 그 밖의 다른 원인에 대한 연구의 필요성을 제시한 바 있다. 이러한 파괴저항곡선의 감소현상이 반복하중하의 파괴해석에 중요함에도 불구하고 아직까지 원인에 대한 명확한 연구결과가 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 전보⁽⁹⁾의 시험결과를 바탕으로 하여 이러한 감소원인을 규명하고자 한다. 이를 위하여 균열선단에서 소성영역의 발생과 인장-압축에 의한 변형경화정도를 평가하고자 하며, 균열선단의 응력해석을 통한 인장 잔류응력 및 균열열림을 고려한 파괴저항치의 계산 방법에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 인장-압축 하중하의 파괴저항곡선

전보⁽⁹⁾에서 원자력발전소 배관 재료인 SA516 Gr.70 탄소강 CT 시편을 이용하여 파괴저항곡선 측정 실험을 수행하여 그 결과를 보고 한 바 있으며, 그 중 인장-압축 하중하의 파괴저항곡선 측정 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

시험에 사용할 시험편을 단일 평판으로부터 T-L 방향으로 채취하였으며, ASTM E813에 따라 두께 25.4mm(1inch)의 표준시험편(1T-CT 시험편)으로 가공하였다. 시험편에 피로예비균열을 발생시킨 후 두께의 20%의 측면홈을 가공하여 균열의 직진성과 평면변형률조건을 만족시키도록 하였다. ASTM E813⁽¹⁾과 E1152⁽²⁾ 시험법에 준하여 단일시험편법(single specimen method)으로 시험을 수행하였다. 균열길이 및 진전량 측정을 위하여 직류전위차법^(10~12)을 이용하였으며, 가압경수로형 원전의 실제 운전온도인 288℃에서 시험을 수행하였다. 전보^(9,13)에서 구한 균열진전시점 변위(δ_c)의 두 배인 3.84mm의 변위 동안 20회의 반복하중을 가하여 실험을 수행하였다.

단순증가하중인 경우($R=1$)와 하중비($R, P_{min}/P_{max}$)가 0.5인 경우($R=0.5$) 및 인장-압축이 반복되는 경우($R=-1$)에 대한 두 개씩의 시험결과를 Fig. 1에 나타내었다.⁽⁹⁾ 이 결과에서 보이는 바와 같이 하중비가 1인 경우와 0.5인 경우에는 파괴저항곡선

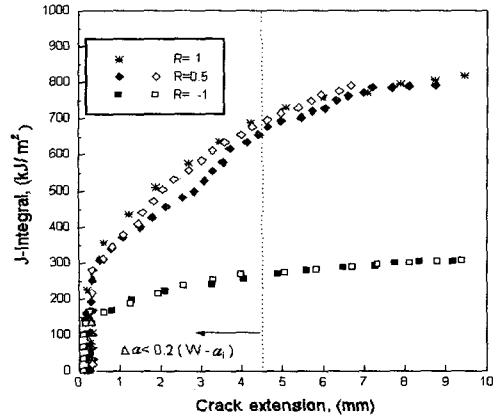


Fig. 1 Effect of load ratio on the fracture resistance curve of SA516 Gr.70 steel

이 비슷하지만 인장-압축 하중이 반복되는 경우(하중비가 -1인 경우)에는 파괴저항곡선이 현저히 감소되었음을 볼 수 있었다.

이러한 파괴저항곡선은 원전 배관재료의 파단 전누설해석이나 안전성 평가에 필수적인 것으로 이러한 차이는 해석 결과에 큰 영향을 미칠 수 있을 것이다. 따라서 이를 고려한 해석이 이루어져야 하며, 이를 위하여 그 원인이 확실히 밝혀져야 할 것이다.

3. 변형경화 평가

3.1 경도 시험

파괴저항시험을 수행한 후 시험편으로부터 Fig. 2와 같이 파괴저항시험동안 진전된 균열면에서 경도시편을 채취하여 미세 비커스(Vickers) 경도시험기로 경도시험을 수행하였다. 시험편 파단면으로부터 파단면에 수직방향으로의 거리에 따른 경도값을 측정하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 보이는 바와 같이 하중비가 -1일 때가 단순증가하중일 때보다 경도 값이 크게 나타났다. 이는 인장-압축을 받는 시험편이 더 많이 변형경화 되었음을 의미한다. 또한 균열표면에서는 경도의 차이가 있으나 균열면에서 멀어질수록 그 차이가 작아져서 약 2mm 이상에서는 그 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 균열선단 부근에 발생한 소성영역 내에서 변형경화가 일어났음을 의미한다.

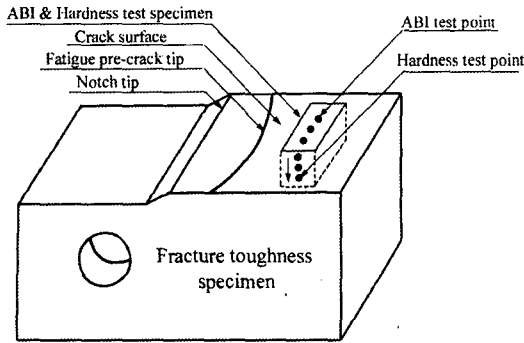


Fig. 2 Test specimen for ABI and hardness test

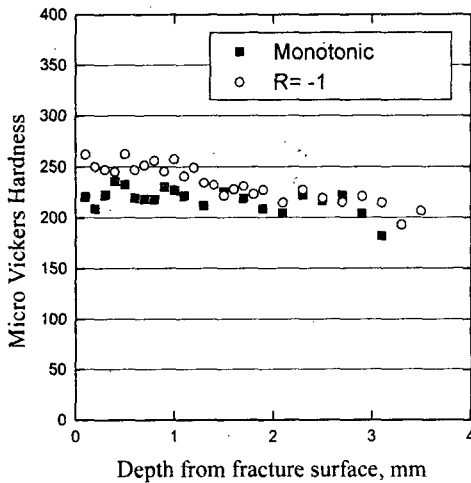


Fig. 3 Effect of load ratio on the strain-hardening degree

3.2 압입시험

변형경화되지 않은 원재료와 파괴저항시험을 수행한 시편의 파단면에 대한 자동압입(ABI; Automated Ball Indentation) 시험을 수행하였다. 실험장비로는 미국 ATC 사의 In-Situ Stress-Strain Microprobe System을 사용하였다.⁽¹⁴⁾ 압입시험이란 구형 압입자를 시험편에 단계적으로 압입하여 재료의 물성치를 얻는 방법이다. 자동압입시험기에서 직경 1.5748mm (0.062in)인 텅스텐 카바이드 강 압입자를 이용하여, 압입속도 0.00076mm/s, 하중반복(loadung-unloading) 회수는 8회로 하며 상온에서 실험을 수행하였다.

Fig. 2와 같이 채취한 경도 시편의 균열면에서 브리넬경도(Brinell Hardness), 항복강도, 인장강도 및 진응력-진변형률선도 등을 구하였으며, 그 중

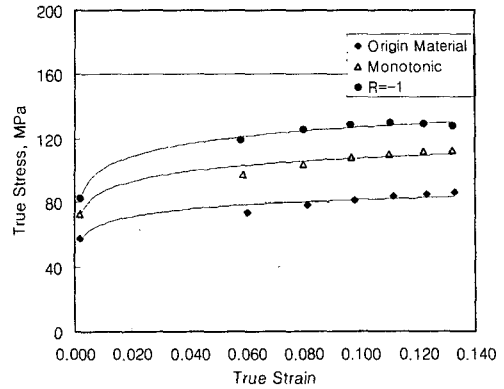


Fig. 4 Effect of load ratio on the true stress-true strain curve

에서 압입시험으로 구한 진응력-진변형률선도를 Fig. 4에 도시하였다. 이 그림과 경도측정 결과로부터 시험을 수행하기 전의 원재료 (Original Material)에 비하여 파괴인성 실험을 수행한 시편의 파단면이 많이 경화되었음을 알 수 있으며, 단순인장 파괴시험을 한 경우(Monotonic인 경우) 보다 인장-압축 하중하의 파괴시험을 수행한 경우(R=-1인 경우)가 더 많이 경화되었음을 알 수 있었다.

3.3 변형경화에 따른 파괴저항치의 감소

경도시험과 자동압입시험 결과로부터 인장-압축을 가하여 실험한 시편의 파단면이 단순인장 상태에서 실험을 한 파단면보다 더 많이 변형경화되었음을 알 수 있었다. 이는 인장시 균열선단에 응력이 집중되어 소성영역이 발생되고 압축시 다시 압축응력에 의한 소성변형을 하게되는데, 이의 반복에 의한 변형경화에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 변형경화에 의하여 파괴저항곡선의 감소가 야기된 것으로 생각된다.

4. 잔류응력 평가

인장-압축이 반복하여 작용될 경우의 균열선단의 잔류응력을 평가하기 위하여 Fig. 5와 같은 CT 시편에 Fig. 6처럼 하중을 0 → 1 → 2 → 3 → 4로 한 사이클(cycle) 동안 변화시킬 때의 응력장을 해석하였다.

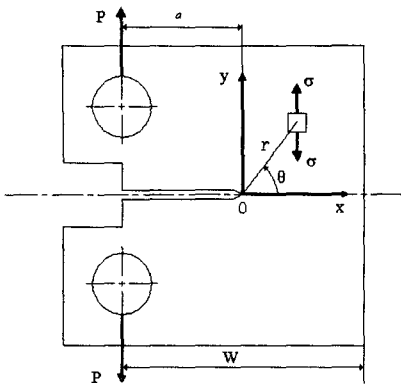


Fig. 5 Crack tip coordinate and stress system

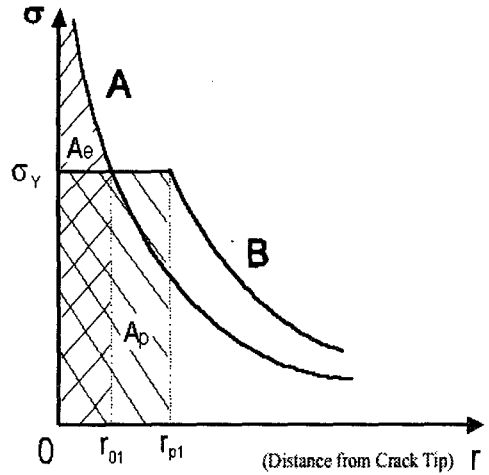


Fig. 7 Stress distribution of a crack tip at point 1

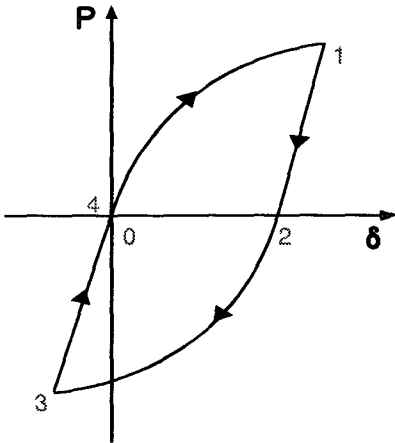


Fig. 6 Hysteresis loops for cyclic loading

Fig. 5와 같은 CT 시험편에 하중 P가 작용될 때, 균열선단에서 $\theta = 0$ 인 면의 거리 r에 따른 응력은 다음과 같다.⁽¹⁵⁾

$$\sigma = \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r}W} \quad (1)$$

여기서,

$$f(a) = [(2+a)(0.886 + 4.64a - 13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.6a^4)] / (1-a)^{3/2}$$

- a = a/W P : 작용하중
- a : 균열길이 W : 시편의 폭
- B : 시편의 두께
- r : 균열선단에서의 거리

4.1 인장하중 작용시의 응력장 해석

Fig. 6의 '0'에서 '1'로 인장 하중 P를 가할 때의 균열선단 부근의 응력상태는, 소성영역의 발생이 없을 경우 Fig. 7의 곡선 A와 같으며,⁽¹⁵⁾ 이때 균열선단 부근의 응력 σ_1 은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r}W} \quad (2)$$

이 식에서 보이는 바와 같이 실제 균열선단에는 응력집중에 의하여 매우 큰 응력이 작용하며 항복응력 이상의 응력에 의해 소성영역이 발생한다. 시편이 탄-완전소성 거동을 하는 재료라고 가정하면, 균열선단은 Fig. 7의 B와 같은 응력상태가 될 것이다.

Fig. 7에서 면적 A_e 는 면적 A_p 와 같아야 하며 이 조건으로부터 소성역의 크기 r_{p1} 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_Y \cdot r_{p1} = \int_0^{r_{01}} \sigma_1 dr = \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi}W} \cdot 2\sqrt{r_{01}}$$

$$\sigma_Y = \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r_{01}}W} \text{로부터}$$

$$r_{01} = \frac{1}{2\pi W} \left(\frac{Pf(a)}{B\sigma_Y} \right)^2 \quad (3)$$

$$r_{p1} = 2r_{01} \quad (4)$$

4.2 인장 후 하중제거시의 응력장 해석

인장하중을 작용시킨 후 하중을 제거할 경우, 즉, Fig. 6의 '1'점에서 '2'점으로 하중 P를 제거할

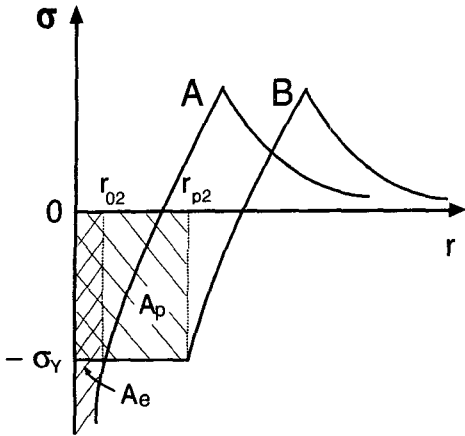


Fig. 8 Stress distribution of a crack tip at point 2

때의 응력 σ_2 는, 압축에 의한 소성변형을 고려하지 않을 경우, 항복응력에서 Fig. 7의 A_e 의 응력을 뺀 응력상태가 되므로 Fig. 8의 A와 같이 될 것이다. 이 응력 중에서 균열선단 부근의 응력을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_2 = \sigma_Y - \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r}W} \quad (5)$$

Fig. 8의 A에서 균열선단 부근의 응력은 압축 항복응력을 초과하므로 압축응력에 의한 소성영역이 발생하여 Fig. 8의 B와 같은 응력상태가 될 것이다.

Fig. 8에서 면적 A_e 와 면적 A_p 가 같다는 조건으로부터 소성영역의 크기 r_{p2} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_Y \cdot r_{p2} = - \int_0^{r_{p2}} \sigma_2 dr$$

$$-\sigma_Y = \sigma_Y - \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r_{02}}W} \quad \text{로부터}$$

$$r_{02} = \frac{1}{8\pi W} \left(\frac{Pf(a)}{B\sigma_Y} \right)^2 \quad (6)$$

$$r_{p2} = 3r_{02} \quad (7)$$

4.3 압축하중 작용시의 응력장 해석

Fig. 6의 3지점의 응력상태인 인장 후 압축하중 작용시의 응력장은 Fig. 6의 '1'지점의 응력에 식 (1)에 제시된 응력(σ)의 두 배만큼의 압축응력을 작용시키면 된다. 따라서 Fig. 9의 A와 같은 응력상태가 될 것이며, 이 응력 중에서 균열선단 부

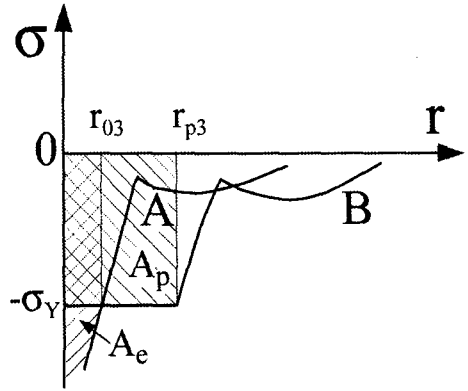


Fig. 9 Stress distribution of a crack tip at point 3

근의 응력을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_3 = \sigma_Y - 2 \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r}W} \quad (8)$$

균열선단에는 압축응력에 의해 또다시 소성변형이 발생하여 Fig. 9의 B와 같은 응력상태가 될 것이다. 여기에서 면적 A_e 와 면적 A_p 가 같다는 조건으로부터 소성영역의 크기 r_{p3} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_Y \cdot r_{p3} = - \int_0^{r_{p3}} \sigma_3 dr$$

$$-\sigma_Y = \sigma_Y - 2 \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r_{03}}W} \quad \text{로부터}$$

$$r_{03} = \frac{1}{2\pi W} \left(\frac{Pf(a)}{B\sigma_Y} \right)^2 \quad (9)$$

$$r_{p3} = 3r_{03} \quad (10)$$

4.4 압축 후 하중제거시의 응력장 해석

Fig. 6의 '4'지점의 응력장은 Fig. 6의 '3'지점의 응력장에 Fig. 7의 A 만큼의 응력을 더하면 된다. 소성변형을 무시할 경우의 응력장은 Fig. 10의 A와 같이 될 것이며 균열선단 부근의 응력을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_4 = -\sigma_Y + \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r}W} \quad (11)$$

인장응력에 의해 또 다시 소성영역이 형성되어 Fig. 10의 B와 같은 응력상태가 될 것이다. Fig. 10에서 면적 A_e 와 면적 A_p 가 같다는 조건으로부터 소성영역의 크기 r_{p4} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_Y \cdot r_M = \int_0^{r_{04}} \sigma_4 dr$$

$$\sigma_Y = -\sigma_Y + \frac{Pf(a)}{B\sqrt{2\pi r_{04}W}} \text{로부터}$$

$$r_{04} = \frac{1}{8\pi W} \left(\frac{Pf(a)}{B\sigma_Y} \right)^2 \quad (12)$$

$$r_M = 3r_{04} \quad (13)$$

4.5 잔류응력장 고찰

인장, 압축하중을 작용시킨 후 하중을 제거시켰을 때에, 처음에는 존재하지 않았던 인장잔류응력이 균열선단에 Fig. 10의 B와 같이 존재하였다. 이 상태에서 파괴저항시험을 수행한다면 더 작은 하중에서 균열진전이 시작될 것이며, 결국 균열진전에 필요한 J-적분 값도 감소하게 될 것이다.

이러한 잔류응력은 사이클이 반복됨에 따라 증가됨을 확인하였으며 이러한 잔류응력이 인장-압축하중하의 파괴저항곡선 감소의 한 원인으로 생각된다. 또한 균열선단의 응력상태가 Fig. 6의 '3' 지점에서는 압축상태로 닫혀있으나 '4' 지점에서는 인장이므로 균열이 이미 열려있음을 의미한다.

잔류응력장이 Fig. 6의 '3' 지점과 '4' 지점 사이에서 압축에서 인장으로 바뀔 수 있다. 이는 이 두 점 사이에 잔류응력이 '0'이 되는 점이 있고, 이 점에서 닫혀있던 균열이 열림을 의미한다. 이로부터 외부하중이 '0'이 되기 전에 압축상태에서 균열이 열리기 시작함을 알 수 있다.

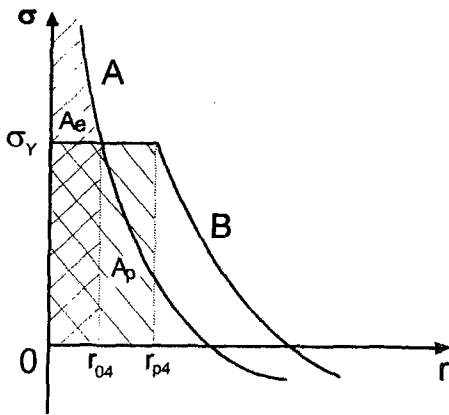


Fig. 10 Stress distribution of a crack tip at point 4

5. 균열열림 현상에 대한 고찰

전 절에서 고찰한 바와 같이 인장-압축 하중이 반복하여 작용될 경우 압축하중상태에서 균열열림 현상이 발생하며 이러한 현상이 인장-압축 하중하의 파괴저항곡선 감소의 한 원인이라 생각된다. 전보⁽⁹⁾에서 이러한 균열열림점을 수치해석적으로 찾아보고 그 결과를 고찰한바 있으며 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

5.1 균열열림점의 해석

균열열림점을 수치해석적으로 찾아내기 위하여 상용유한요소 코드인 ABAQUS를 이용하여 2차원 CT 시험편에 대한 탄소성 해석을 수행하였다. 인장-압축 하중하의 균열열림 하중을 결정하기 위해서 a/W를 변화시키면서 인장→압축→인장 형태 (R=-1)인 하중을 가하였을 때에 균열선단 절점의 변위를 측정하여, 균열선단의 절점의 변위가 양의 값을 가지기 시작할 때의 하중을 균열열림 하중(P_{open})으로 결정하였다. Fig. 11에는 a/W 변화에 따른 역사이클하중하의 균열열림 하중을 압축하중시의 최고하중(P_{max})으로 무차원화시켜 나타내었다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 a/W가 증가할수록 균열열림 하중비가 높아지는 경향을 나타내었다. 그러나, 이러한 유한요소해석 결과를 실험으로 입증하지는 못하였으며 해석상의 여러 문제점으로 실제 시험상의 결과치와 다소 다른 결과를 나타낼 수도 있을 것이라 판단된다. 그러나 전 절에서 고찰한 바와 같이 이론적으로 해석한 결과와 정성적으로는 잘 일치함을 알 수 있었다.

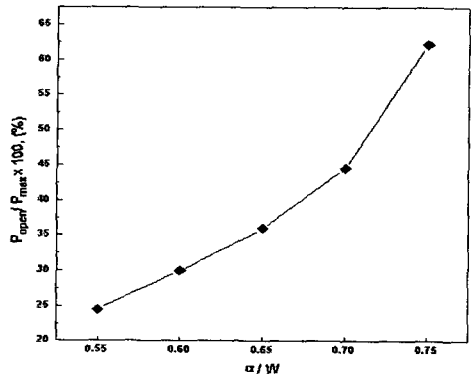


Fig. 11 Crack opening load

5.2 파괴저항곡선의 저하현상 고찰

단조증가하중하의 J -적분 값 계산을 위한 면적은 Fig. 12의 S_{BCD} 와 같다. Dowling의 연구^(16,17)에 의하면 인장-압축 하중이 반복하여 작용될 때에는 균열단립 및 균열열림 현상이 나타나게 되며, 본 연구에서도 압축하중상태에서 균열열림 현상이 발생됨을 잔류응력해석과 유한요소해석을 통하여 확인하였다. 이 경우, 실제 균열진전에 사용되는 에너지는 압축하중 후 균열이 열리기 시작하는 균열열림 하중(P_{open})에서부터인 면적 $S_{(ABCDE)}$ 로부터 계산되어야 할 것이다. 인장-압축 하중하의 J -적분 값 계산을 위한 면적을 $S_{(BCD)}$ 와 $S_{(ABDE)}$ 의 합이라고 가정하면, 균열열림점을 무시하고 J -적분 값을 계산할 때에는 면적 $S_{(ABDE)}$ 만큼 과소평가될 것이다. 인장-압축 하중하의 파괴곡선을 구하기 위한 J -적분 값을 계산할 때, 단순 인장하의 J -적분 값을 계산할 때와 같이 압축하중의 영향을 무시하고 인장하중 부분만을 고려하여 J -적분 값을 계산할 경우 파괴저항곡선이 과소평가될 수 있으며, 이러한 계산상의 차이가 인장-압축 하중시의 파괴저항곡선 감소현상의 한 원인이 될 수 있을 것이다.

Fig. 13에서는 Fig. 11에서 구한 균열열림 하중을 고려하여 J -적분 값을 다시 계산했을 경우의 파괴저항곡선과 이를 고려하지 않은 경우의 파괴저항곡선을 비교하였다. 여기에서 'Reference A'는 단조증가하중($R=1$)하의 파괴저항곡선이며, 'Raw A'와 'Raw B'는 균열열림 현상을 고려하지 않고 구한 파괴저항곡선이고 (Fig. 1의 $R=1$ 인 경우와 동일), 'Modified A'와 'Modified B'는 균열열림 현상을 고려하여 구한 파괴저항곡선이다. 균열열림

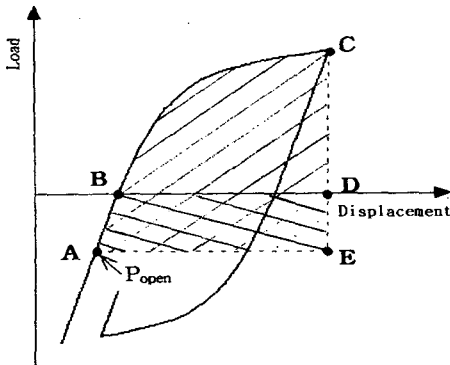


Fig. 12 Definition of area for the J calculation under reverse cyclic loading

하중을 고려하여 J -적분 값을 계산할 경우, 파괴저항곡선이 균열열림 하중을 고려하지 않은 경우보다 약 20~40% 정도 높게 나타나, 압축상태에서의 균열열림 현상도 인장-압축 하중하의 파괴저항곡선의 감소원인의 하나라고 판단된다.

6. 결론

- (1) 인장-압축 하중이 작용함에 따라 균열선단 부근의 응력집중과 소성변형에 의한 변형경화가 발생하며, 이러한 변형경화가 파괴저항곡선을 저하시키는 것으로 판단된다.
- (2) 이론적 해석모델로부터 압축하중을 작용한 후 하중을 제거할 때 균열선단 부근에는 인장잔류응력이 발생하고 사이클 수가 증가할수록 그 크기가 커짐을 확인하였다. 이러한 인장잔류응력은 균열진전에 필요한 인장하중의 크기를 저하시키고 그만큼 재료의 파괴저항치를 감소시킨다.
- (3) 인장-압축 하중이 작용할 경우 압축하중을 완전히 제거하기 전에 균열이 열리기 시작하므로 이를 고려하여 J -적분 값을 계산하여 파괴저항곡선을 구하여야 하며, 이를 고려하지 않고 파괴저항곡선을 구하는 것도 인장-압축 하중하의 파괴저항곡선 감소의 한 원인이라 생각된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산

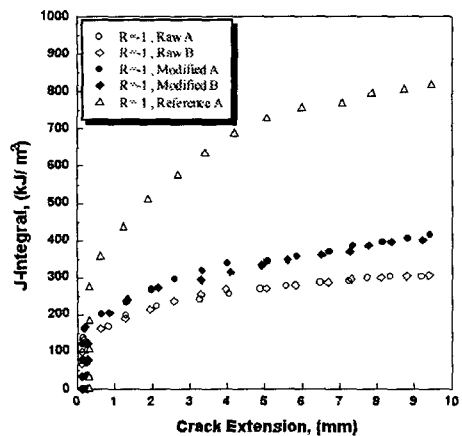


Fig. 13 Modified J - R curve considering crack opening load

업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) ASTM E813-89, 1996, "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness," *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 646~660.
- (2) ASTM E1152-87, 1996, "Standard Test Method for Determining Fracture Resistance Curves," *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 763~773.
- (3) Scott, P., Kramer, G., Vieth, P., Francini, R. and Wilkowski, Gery M., 1994, "The Effect of Dynamic and Cyclic Loading During Ductile Tearing on Circumferentially Cracked Pipe: Experimental Results," *ASME PVP Vol. 280*, pp. 207~220.
- (4) Wilkowski, Gery M., Kramer, G., Vieth, P., Francini, R. and Scott, P., 1994, "The Effect of Dynamic and Cyclic Loading During Ductile Tearing on Circumferentially Cracked Pipe: Analytical Results," *ASME PVP Vol. 280*, pp. 221~239.
- (5) Naoki Miura, Koichi Kashima, Katsumasa Miyazaki and Satoshi Kanno, 1997, "Effect of Negative Stress Ratio on Crack Growth for Cracked Pipe Subjected to Cycle Loading with Large-Scale Yielding," *ASME PVP Vol. 350, Fatigue and Fracture 1*. Book No. G01062.
- (6) Naoki Miura, Terutaka Fujioka, Koichi Kashima, Satoshi Kanno, Makoto Hayashi, Masayuki Ishiwata and Nobuho Gotch, 1993, "Evaluation of Dynamic Fracture Strength for Japanese Carbon Steel Pipes," Komae Research Laboratory.
- (7) 최영환, 1995, "배관 건전성 국제공동연구 (PIRG-2 Program) 해외파견 수행보고서," 한국원자력안전기술원, p. 292.
- (8) Seok, C. S., Kim, Y. J. and Weon, J. I., 1988, "Effect of Reverse Cyclic Loading on the Fracture Resistance Curve in C(T) Specimen," *2nd International Workshop on The Integrity of Nuclear Components*, The Japan Welding Engineering Society Atomic Energy Research Committee, pp. 249~257.
- (9) 원종일, 석창성, 1999, "역사이클하중이 원자력 배관재료의 파괴저항곡선에 미치는 영향," 대한기계학회논문집, 제23권, 7호.
- (10) Wilkoski, G. M., Wambaugh, J. O. and Prabhat, K., 1984, "Single Specimen J Resistance Curve Evaluation Using the Direct-Current Potential Drop Method and Computerized Data Acquisition System," *Fracture Mechanics : 15th Symposium*, ASTM STP 833, pp. 553~576.
- (11) Vassilaros, M. G. and Hackett, E. M., 1984, " J -Integral R -Curve Testing of High Strength Steels Utilizing the Direct-Current Potential Drop Method," *Fracture Mechanics : 15th Symposium*, ASTM STP 833, pp. 535~552.
- (12) Bakker, Ad., 1985, "A DC Potential Drop Procedure for Crack Initiation and R -Curve Measurements During Ductile Fracture Tests," *Elastic-Plastic Fracture Test Method*, ASTM STP 856, pp. 394~410.
- (13) 원종일, 석창성, 1999, "역사이클하중하의 파괴저항 특성 평가방법에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제23권, 제2호, pp. 246~253.
- (14) Haggag, Fahmy M., 1993, "In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System," *Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension*, ASTM STP 1204, pp. 27~44.
- (15) Anderson, T. L., 1995, "FRACTURE MECHANICS Fundamentals and Applications", CRC, 2nd Edition, pp. 72~81.
- (16) Dowling, N. E., 1976, "Geometry Effects and the J -Integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth," *ASTM STP 601*, pp. 19~32.
- (17) Dowling, N. E., and Begley, J. A., 1976, "Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and the J -Integral," *Mechanics of Crack Growth*, ASME STP 590, pp. 82~103.