

강도비를 적용한 Rice-저항곡선과 변형경화를 고려한 J_δ -저항곡선과의 비교

장 석 기*

On Reliability and Comparison of J_{Rice} – Resistance considering Optimal Strength Ratio and J_δ – Resistance Curves converted from CTOD using Appropriate Strength chosen according to Strain Hardening Level

S-K Jang*

Key words : Strength Ratio(강도비), J-Resistance Curve(J-저항곡선), Optimal Strength Ratio(최적강도비), CTOD(균열선단개구변위), Constraint Factor(구속 계수), Strain Hardening(변형율경화), Reference Strength(기준강도), Ultimate-Flow Strength(극한-유동 강도), Flow-Yielding Strength(유동-항복강도)

Abstract

The comparison of J_{Rice} -resistance considering a few strength ratio in Rice J -integral formula and J_δ -resistance curves converted from experimental CTOD using appropriate strength chosen according to strain hardening level, $n=10.6$ (A533B steel) and $n=8.1$ (BS4360 steel) is carried out.

The optimal dimensionless strength ratio like the factor of revision, $\left(2^{-\frac{1}{m}} \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right)^m$ reflecting strain

hardening level in Rice's experimental formula is found out and the reliability of appropriate reference strength chosen according to strain hardening level in different materials is investigated through doing that CTOD is transformed from J_δ -integral using relationship between J -integral and CTOD. The results are as follows;

1) The optimal factor of revision is when m equals to 3 in $\left(2^{-\frac{1}{m}} \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right)^m$ for Rice's and the above

optimal factor of revision multiplies by coefficient, η in Rice's experimental formula instead of $\eta=2$, 2) and the pertinent reference strength for high strain hardening material like BS4360 steel is ultimate strength, σ_u and for material like A533B steel is ultimate-flow strength, $\sigma_{u.f}$. The incompatible of the behavior of both experimental J -resistance curves using Rice's formula and CTOD-resistance curves for A533B and BS4360 steel by Gordon, et al., could be corrected using the optimal factor of revision in Rice's and the pertinent reference strength in $J=m_j \times \sigma_j \times CTOD$.

* 목포해양대학교 기관공학부

기호설명 및 정의

$$\sigma_{u-f} \left(= \frac{1}{2} (\sigma_u + \sigma_f) \right):$$

Ultimate-Flow Strength (극한 유동 강도)

$$\sigma_{f-y} \left(= \frac{1}{2} (\sigma_f + \sigma_{ys}) \right):$$

Flow-Yielding Strength(유동 항복강도)

$$\sigma_f \left(= \frac{1}{2} (\sigma_u + \sigma_{ys}) \right): \text{Flow Strength(유동강도)}$$

m_j : 기준강도선정시 재료의 변형경화에 따른 구속계수

m_{ys} : 기준강도로서 항복강도(σ_{ys})를 취하였을 때의 구속 계수값을 의미한다.

m_u : 기준강도로서 인장강도(σ_u)를 취하였을 때의 구속계수 값을 의미한다.

1. 서 론

항복강도를 기준강도로 선정하고 서로 다른 가공경화 지수, n 에 따른, 구속계수 m_{ys} 의 변화는 J -적분과 균열선단개구변위 CTOD에 대해 항상 유사한 경향이나 거동을 나타내지 않는다. 항복강도가 같은 두 재료에 대해, 하나는 $n=5$ 의 가공경화 지수를 가지며, 다른 하나는 $n=10$ 을 갖는 경우, J 값으로 표현되는 같은 파괴인성을 갖는다면, CTOD 값은 60% 차이가 난다. 즉, 높은 가공경화재($n=5$)의 CTOD 값이 중급가공경화재($n=10$)의 CTOD 값 보다 60% 정도 적다고 보고되고 있다.^[1]

J -적분 값이 서로 다른 경우에는 더 복잡하다. 예로서, 높은 가공경화재($n=5$)는 중급 가공경화재($n=10$) 보다 30% 높은 J 임계값을 갖는다. 이 경우 상당 CTOD 결과는 정확히 반대 경향을 갖는다. 즉, 중급 가공경화재($n=10$)가 높은 가공경화재($n=5$)보다 큰 CTOD(30%) 값을 갖는다. 다시 말하면, J 값에서는 높은 가공경화재가 중급 가공경화재 보다 인성이 크다. 반면에, CTOD 결과에서는 높은 가공경화재가 중급가공경화재 보다 인성이 적다는 것을 뜻한다.

특히, 높은 가공경화재 ($\frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}} \geq 1.5$)에 관하여 예측된

CTOD값이 잘 맞지 않는 것은 표준 CTOD 평가 절차에 문제점이 있는 것으로 보는 이도 있다.

이와 같이 파괴를 특징 지우는 적절한 변수인 J -적분과 CTOD를 사용하여, 재료에 대하여 똑 같은 재료의 파괴인성을 평가할 수 없는 경우, 이들 변수 중 하나는 파괴를 특징 지우는 적절한 변수라고 할 수 없는 문제가 야기될 수도 있다. 따라서 상기 두 파괴 변수가 공칭적으로 동일한 경향을 나타내어야 할 것이다. 이를 위해, CTOD로부터 변환된 J -적분 값들이 Rice씨가 제안한 식^[2]에 의한 J -적분 값들과 같은 경향을 갖거나 같은 거동을 하여야 한다고 사료된다. 지금까지는 주로 소성구속과 관련된 구속계수값에 초점을 맞추어 연구가 이루어지는 경향이 있어 왔으나 미흡한 점이 있었다. 따라서, 각 재료들에 대한 정확한 구속 계수 m_j 값을 평가하는 방법은 물론이고 Rice씨가 제안한 식의 재검토가 함께 필요하리라 생각된다. 따라서, 정확한 m_j 의 평가 방법이 확립되어야 하고 확립된 m_j ^[3]식에 의하여 계산된 m_j 값과 재료의 가공 경화 정도에 따라 σ_u , σ_{u-f} , σ_f , σ_{f-y} , σ_{ys} 중에서 선정한 적절한 기준강도를 선택하고 그리고 실험에 의하여 측정된 균열선단 개구변위 CTOD를 변환식^[1]

$$J = m_j \times \sigma_i \times CTOD \tag{1}$$

여기서,

m_j : 구속 계수(constraint factor),

σ_i : 경화정도에 종속하는 최적 기준강도 (optimal reference strength),

CTOD : 균열선단개구변위 (crack tip opening displacement).

에 적용한다. 식(1)은 J 와 CTOD를 관계짓는 Shih^[4]의 해석식과 매우 유사하며 HRR^{[5][6]} 응력 변형을 특이성에 기초한 것이다. 식(1)에 의하여 환산된 J_δ -적분 값을 이용한 J_δ - R 곡선들, 그리고 Rice^[2]의

$$J = \frac{\eta U}{B_N(W-a_0)} \tag{2}$$

단,

η : 계수

- B_N : 정미두께
- W : 시험편 폭
- a_0 : 초기 균열길이
- U : 하중-하중선 변위 선도 아래 면적

에서 계수 η 값 2를 식(2)에 대입한 J -적분과 재료의 가공경화정도가 반영된 무차원량인 강도 비를 고려하여 계산된 값들을 계수, η 에 곱하여 보정된 계수를 식(2)에 대입하여 평가된 J_{Rice} -적분 값을 이용하여 J_{Rice} -R 저항곡선들을 그린다. 이들 저항곡선을 비교, 고찰한 뒤, 가장 적절한 보정된 η 값을 선정하고 이후, 이들에 대한 고찰 결과에 따라 CTOD 및 J -적분인 두 파괴변수가 모두 적절한 재료의 파괴 저항을 나타내는 변수임을 증명하고자 한다.

2. 실험

A533B급 1과 BS4360 급 43E강으로서, 두께 25mm 폭 50mm SE(B) 시험편을 만들어, J -적분과 균열선단개구변위 CTOD에 대한 균열성장 저항곡선이 측정되었다. 시험편은 시험편 폭에 대한 균열길이의 비가 0.6이 되도록 노치 선단에 피로 균열을 형성시켰으며, 두께의 10%정도를 측면 홈 가공을 실시하였다.ESIS P1-92⁷⁾에 의거 제하 컴프라이언스 기법을 이용하여 시편의 $J-\Delta a$ 와 $CTOD-\Delta a$ 거동은 실온에서 측정되었다. 두 재료의 인장 성질은 Table 1과 같다.

초기 항복 변형 이상에서 두 강재의 변형을 경화 거동이 비슷하였다.

Table 1. Tensile Properties at room temperature

재 료	A533B.	BS4360.
	Class 1	Grade43E
항복강도(MPa)	501	318
극한강도(MPa)	654	468
연 신 율(%)	26	37
단면수축율(%)	68	79

A533B와 BS4360 강에 대한 강도비 $\frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}$ 는 각각

$$1.31 \text{과 } 1.47 \text{이며, 식 } \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}} = \frac{\left(\frac{1}{0.002n}\right)^{1/n}}{\text{EXP. } 1/n} \text{에 의해}$$

평가된 가공경화지수 n 은 A533B 강과 BS4360 강에 대해 각각 10.6과 8.1이다.

J -적분 값은 $J = \frac{\eta U}{B_N b}$ 를 이용하여 계산하였다.

여기서, $\eta=2$, U 는 하중-하중선 변위선도 아래의 면적, B_N 은 정미 두께, b 는 리가먼트(ligament)이다.

식(3)에 개구변위의 소성 성분($CMOD_p$)을 대입해서 CTOD 값이 구해졌다.

$$CTOD = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2E\sigma_{ys}} + \frac{r_p(W-a_0)CMOD_p}{r_p(W-a_0)+a_0} \quad (3)$$

단,

K = 응력확대 계수

ν = 포아송 비

E = 탄성계수

σ_{ys} = 항복 강도

r_p = 소성회전 인자⁹⁾

3. 결과 및 고찰

A533B강 과 BS4360강인 두 재료에 대한 $CTOD-\Delta a$ 와 $J_{Rice}-\Delta a$ 거동은 Fig. 1과 Fig. 2와 같다. Fig.1은 서로 다른 경화지수, n 을 갖는 A533B강 과 BS4360강에 대한 $CTOD$ -저항곡선으로서 동일 균열성장길이의 진전에 따른 BS4360강($n=8.1$)의 균열선단개구변위 $CTOD$ 값의 크기가 A533B 강($n=10.6$)의 $CTOD$ 값보다 더 크다.

Fig. 2는 Rice에 의해서 제안된 식(2)에서 계수인 $\eta=2$ 를 대입하였을 경우, 가공경화지수, $n=10.6$ 인 A533B 강재와 $n=8.1$ 인 BS4360강인 두 재료의 J -저항곡선을 비교한 것이다.

두 재료에 대한 J_{Rice} -저항곡선의 거동에 큰 차이가 있음을 보여준다. 즉, 가공경화정도가 다른 재료는 서로 다른 파괴저항을 갖는 것으로 나타났다.¹¹⁾ 이는 식(2)의 적용에서 재료에 따라 서로 다른 가공경화 정도를 계수 η 값에 반영하지 않은 결

과로 추정된다. 또한, 그림에서 가공경화정도가 낮은 A533B 강의 J -저항곡선에서 균열진전량에 따른 J -적분 값 자료가 가공경화정도가 높은 BS4360 강에 대한 같은 상당재료의 J -적분 값 보다 높게 나타났다¹¹⁾. Fig. 1과 Fig. 2에서 알 수 있듯이 J -저항곡선과 CTOD-저항곡선은 똑같은 경향이나 거동을 나타내지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 모순된 평가가 이루어지는 것을 알 수가 있다. 이는 재료의 인장성질에서의 차이, J 값과 균열선단 개구변위 CTOD를 관련짓는 인자인 계수 m_j 및 선정된 기준강도 σ_i 의 차이, 그리고 Rice의 J -적분 실험식에서 계수 η 값 등에 재료의 변형을 경화정도를 고려한 강도비의 적용여부로 설명될 수 있을 것이다.

A533B 와 BS4360 강에 대해 Gordon씨가 제안

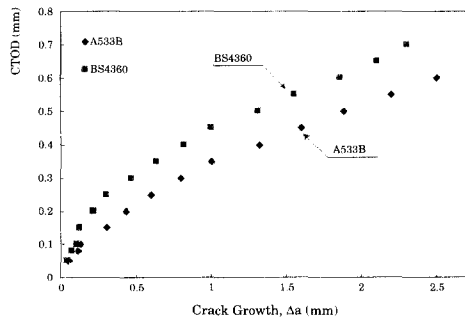


Fig. 1 Experimental CTOD-a Resistance Curves for A533B and BS4360 Steel

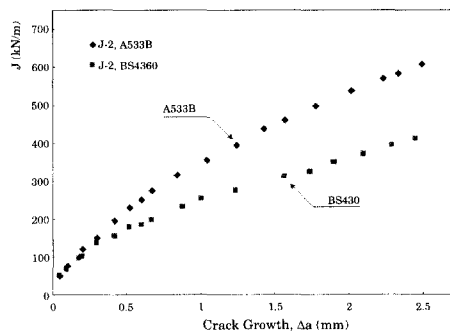


Fig. 2 Experimental J-a Resistance Curves for A533B and BS4360 Steel using Rice's Formula

한 식¹¹⁾을 사용하여 m_u 를 사용하여 평가했을 경우에 의하면 J -적분 값이 A533B강에 대해 측정된 J -적분 값과 잘 일치하나 가공경화 정도가 보다 높은 BS4360 강에 대해서는 일치도가 떨어진다고 하였다. 이러한 문제점의 해결을 위해서, SE(B) 시험편에 대해서 유한요소해석을 실시한 결과자료를 이용하고 재료의 가공경화정도 및 폭에 대한 균열길이의 비 a/W 등을 고려하여 m_j 값을 평가할 수 있는 식을 구했다¹³⁾. 그리고 인장실험에서 얻은 강도의 정의를 새로이 한 σ_i , 즉 $\sigma_u, \sigma_{u-f}, \sigma_f, \sigma_{f,y}, \sigma_{ys}$ 등과 실제 실험에서 측정된 균열선단개구변위를 자료로 이용하여 식(1)에 대입하여 J -적분 값을 평가하고 이 자료를 이용하여 저항곡선 즉, J - u -conv.등을 그렸다. 또한, Rice씨에 의해 소개된 J -값을 구하는 실험식 (2)에서 일률적으로 계수를 $\eta=2$ 만을 대입하여 평가되는 것을 지양하고 각 재료에 대한 변형을 경화정도를 반영하는 무차원량 강도비를 고려한 식(4)

$$\left(2^{-\frac{1}{m}} \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}} \right)^m \tag{4}$$

여기서, m 은 1, 2, 3으로 한다.

을 계산하여 Rice 실험식 (2)의 η 값에 각각 곱한 뒤 J -적분 값을 평가한 것들과 Rice 실험식의 계수 $\eta=2$ 인 경우의 J -적분 값 등을 이용하여 J -저항곡선들을 그렸다.

Fig. 3과 4는, 이들 J -저항곡선들의 경향과 거동으로부터 식(2)에서 $\eta=2$ 를 대입한 J -적분 값과 비교하며, 식(4)에 어떤 m 값을 대입하였을 때, Rice 실험식(2)의 η 값 보정으로 적정한 값인가를 결정하고 J -적분과 균열선단개구변위 상관 관계식 (1)에서 적절한 기준강도 등을 명시적으로 찾을 수 있도록 서로 비교 분석하기 위한 것이다.

Fig. 3은 A533B강에 대한 J -저항곡선들로서, 균열선단에서 실측된 CTOD자료를 이용하여 J -적분 값으로 변환하는 경우, 중정도의 변형을경화 $n=10.6$ 인 재료의 경우에는 기준강도로서 극한-유동 강도(ultimate flow strength), σ_{uf} 를 적용하여 식(1)에 의해 변환된 J -저항곡선을 J - uf -conv.,라

하고 기준강도로 인장강도(ultimate strength), σ_u 를 사용한 경우를 $J-u-conv.$, 그리고 항복강도(yielding strength), σ_{ys} 를 기준 강도로 이용한 경우의 J -저항곡선들을 $J-ys-conv.$ 등이라고 하였다. 그리고 실험식(2)의 경우, $\eta=2$ 로 하여 Rice식에 의해 평가된 J -저항곡선을 $J-2$ 라 하고, 강도비

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}} \text{가 } 1.3 \text{이며 } m=1 \text{의 경우에는 계수 보정식 } \left(2^{-\frac{1}{m}} \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right)^m \text{에 각각 이들의 값을 대입하면}$$

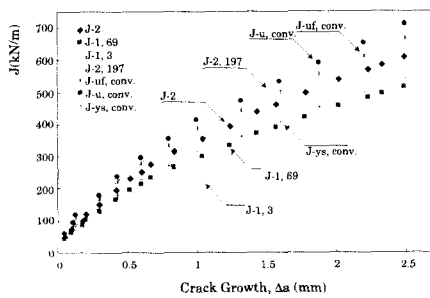


Fig. 3 Comparison of Experimental J-Resistance Curves considering Strength Ratio in Formula (2) and the J-Resistance Curves converted from CTOD using different reference Strength in Formula (1) for A533B steel

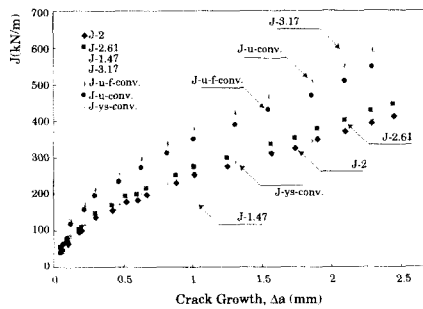


Fig. 4 Comparison of Experimental J-Resistance Curves considering strength Ratio in Formula (2) and the J-Resistance Curves converted from CTOD using different reference Strength in Formula (1) for BS4360 Steel

$$2^{-\frac{1}{1}} \cdot \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right)^m = 2^{-1} \cdot 1.3 \text{이 되므로 식(2)에 이 값을}$$

곱하여 보정된 계수가 $\eta=1.3$ 이 되므로 이를 사용하여 J -적분 값을 계산하였으므로 그 저항곡선을 $J-1.3$ 이라 하고, $m=2$ 인 경우에는 식(4)에 대입하여

$$\left(2^{-\frac{1}{2}}\right) \cdot (1.3)^2 = 2^{-1} \cdot 1.69 \text{가 되어 이 값을}$$

식(2)에 곱하여 보정된 계수가 1.69로 된다. 이 값을 J -적분 값에 사용한 저항곡선을 $J-1.69$ 라 하며, $m=3$ 의 경우는 $\left(2^{-\frac{1}{3}}\right) \cdot (1.3)^3 = 2^{-1} \cdot 2.197$

이므로 이 값을 식(2)에 대입한 결과, 식(2)의 보정된 계수가 2.197이 되므로 J -적분의 저항곡선을 $J-2.197$ 라 하였다.

대체적으로 $J-2$ 저항곡선과 실측된 CTOD로부터 변환된 저항곡선 $J-ys-conv.$ 등과 같은 여러 저항곡선과는 차이가 상당히 큰 거동을 보이거나 $J-2.197$ 저항곡선과 $J-ut-conv.$ 저항곡선은 거의 일치된 거동을 하고 있다. 이는 Rice 식에서 $\eta=2$ 을 대입하는 대신 실험식(2)의 계수를 보정하여 J -적분 값을 산출하는 것이 바람직하다는 것을 암시하는 것으로 사료된다. 즉 중정도의 변형경화재료에서는 가공경화정도를 반영하는 식(4)에 $m=3$ 즉, 무차원량인 강도비의 3제곱을 고려한 보정된 계수를 η 로 선정하는 것이 바람직하다는 것을 의미한 것으로 추정된다. 동시에 실측된 개구변위를 이용한 J -적분 변환식 (1)을 적용할 때, A533B 강과 같이 변형율경화정도가 중정도인 $n=10.6$ 인 재료의 경우에는 기준강도로서 극한-유동 강도(ultimate flow strength), σ_{uf} 를 선정하는 것이 바람직하다는 것을 보여 준다고 하겠다. 이러한 경향을 확인 검증하기 위하여 가공경화정도가 다른 BS4360강에 대해 저항곡선을 그리는 것이 Fig. 4이다. 여기서, 위와 같은 방법으로, 식(1)에 의해서 변환된 J -저항곡선들을 기준강도로서 인장강도를 선정한 경우의 저항곡선을 $J-us-conv.$,라 하며, 인장-유동강도를 선정 한 경우에는 $J-ut-conv.$, 그리고 항복강도를 기준강도로 선정한 경우에는 $J-ys-conv.$ 와 같이 표시하고 Rice 실험식 (2)에 의해 평가된

저항곡선을 J -2라 하며, 식(4)에서 강도비 $\frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}$ 가 1.47이며 $m=1$ 인 때는 계수 보정식 $\left(2^{-\frac{1}{m}} \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right)^m$ 에

$$\text{각각이들의 값을 대입하면 } 2^{-1} \cdot \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right)^1 = 2^{-1} \cdot 1.47$$

이 되므로 식(2)에 이 값을 곱하여 보정된 계수 $\eta=1.47$ 을 사용하여 J -적분 값을 계산하였으므로 그 저항곡선을 J -1.47라 하였다. 또한 $m=2$ 인 경우에 평가된 J -적분 값을 사용한 저항곡선을 J -2.1609라 하고 $m=3$ 인 경우의 저항곡선을 J -3.17이라 하였다. 그림에서 J -2와 J -ys-conv. 저항곡선의 거동이 거의 일치하며 또한 J -3.17과 J -u-conv.의 저항곡선의 경향도 상당히 비슷함을 볼 수 있다. 이는 가공경화지수, $n=8.1$ 로 비교적 경화지수가 큰 재료의 경우, 실험식 (2)에서는 $\eta=2$ 와 변환식 (1)에서는 기준강도로서 항복강도(yielding strength)를 사용하는 것이 바람직하다. 또한, 무차원 보정식 (4)을 적용하여 $m=3$ 을 취해 무차원량인 강도비를 실험식 (2)에 곱하여 보정된 계수 $\eta=3.17$ 를 사용하는 것과 변환식을 사용한 경우에는 기준강도로서 극한강도(ultimate strength)를 선정하는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었다. 그리고 식(1)에 의해서 변환된 저항곡선 J -u-conv.와 식(2)에서 $\eta=2$ 를 대입하여 평가된 저항곡선 J -2를 비교해보면 두 저항곡선의 거동은 상당한 차이가 있으며 변환된 J -저항곡선의 거동이 Rice가 제안한 J -값 보다 크게 나타나고 있다는 것은 Rice 실험식 (2)에서 $\eta=2$ 를 일률적으로 적용하지 않고 재료에 따라 변형경화가 다른 경우에는 무차원량인 강도비의 고려가 있어야 한다는 것을 보여준다고 하겠다.

Fig. 5와 6은 Fig. 3과 4의 내용중에서 거동이 비슷한 저항곡선들을 선별한 것이며, 식(2)에서 가공경화정도를 반영하여 무차원량인 최적 강도비를 고려하여 보정된 계수를 사용한 저항곡선 J -2.197,A533B 과 J -3.17,BS4360곡선 그리고 Rice가 제안한 원래의 실험식에 의한 J -저항곡선인 J -2,A533B과 J -2,BS4360 곡선들을 선별하여 그렸다. 또한 식(1)에 가공경화수준에 따라 선정된 적

정 기준강도를 적용하여 CTOD로부터 변환된 J -저항곡선 즉, 인장-유동강도를 적용한 J -u-f-conv.,A533B, 인장강도를 적용한 J -u-BS4360 등만을 선택해 재료별로 그린 것이다.

즉, 서로 다른재료에 대하여, 식(2)의 계수에 무

$$\text{차원량인 } \left(2^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right)^3 \text{을 곱하여 최적의 } \eta \text{값으로}$$

보정함으로써 계산된 J -적분값을 이용하여 그린 저항곡선의 경우와 식(1)에서 재료에 따른 가공경화정도를 고려하여 선택된 기준강도를 적용하여 그린 저항곡선의 결과들이다.

Fig. 5에서, $n=10.6$ 인 A533B 강재에 대한 J -2.197,A533B 및 J -u-f-conv, A533B의 저항곡선은 거의 일치하는 거동을 보이고 있으나 J -u-f-conv, A533B 와 J -2,A533B 저항곡선과는 약간의 차이가 있음을 알 수가 있다. 반면에, Fig. 6처럼 가공경화정도가 큰($n=8.1$) 재료의 경우에는 J -3.17, BS4360곡선과 J -u-BS4360은 거의 일치한 거동을 보이거나 J -u-BS4360과 J -2,BS4360 곡선은 많은 차이가 있음을 볼 수가 있다.

Fig. 7은 가공경화정도가 서로 다른 A533B강과 BS4360강에 대하여, 식(1)을 적용하여 실측된 CTOD 자료들로부터 변환된 J -적분 값을 균열길이에 따라 어떻게 거동하는 가를 그린 저항곡선들이다. Fig.1에서 두 재료에 대한 CTOD-저항곡선

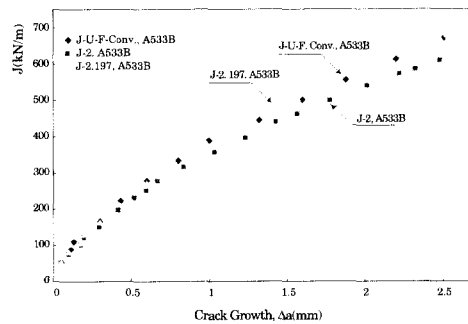


Fig. 5 Comparison of Experimental J -Resistance Curves considering Strain Hardening(Optimal Strength Ratio) and the J -Resistance Curve converted from CTOD using Optimal strength σ_{uf} chosen by Strain Hardening Level for A533B Steel

에서는, BS4360의 재료가 A533B강 보다 인성이 큰 것으로 거동하였으나 재료의 경화정도에 따라 기준강도를 달리 선정하여 적용하여 실측된 CTOD로부터 J -적분 값으로 변환된 저항곡선들 사이에는, 가공경화정도가 차이가 있는 재료들일 지라도 저항곡선의 거동이 거의 일치하는 것을 볼 수가 있다. 이는 식(1)에서 J -적분과 CTOD와의 관계식의 사용에 있어서 변형율경화지수 n 이 큰 경우부터 차례대로 σ_u , σ_{uf} , σ_f , σ_{fy} , σ_{ys} 와 같이, 가

공경화정도에 따라 기준강도를 달리 적용하는 것이 바람직하다는 것을 예시한다고 사료된다.

Fig. 8은 Rice가 제안한 실험식 (2)에서 계수 η 값으로 2만을 대입하는 대신에, 재료의 변형경화정

도를 반영한 무차원량인 강도비 ($\frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}$)를 고려하여

식(4)에 $m=3$ 즉, $(2^{-\frac{1}{3}} \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}})^3$ 의 결과를 식(2)에 곱

하여 보정된 계수를 η 값으로 Rice의 실험식 (2)

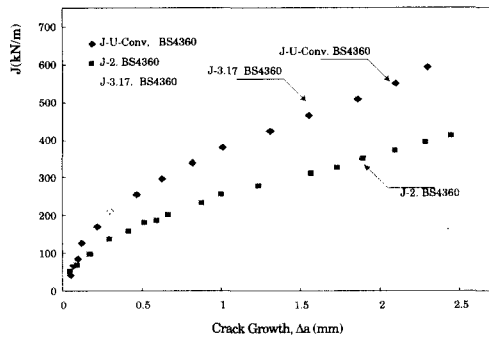


Fig. 6 Comparison of Experimental J-Resistance Curves considering Strain Hardening Level (Optimal Strength Ratio) and the J-Resistance Curve converted from CTOD using Optimal strength σ_u chosen by Strain Hardening Level for BS4360 Steel

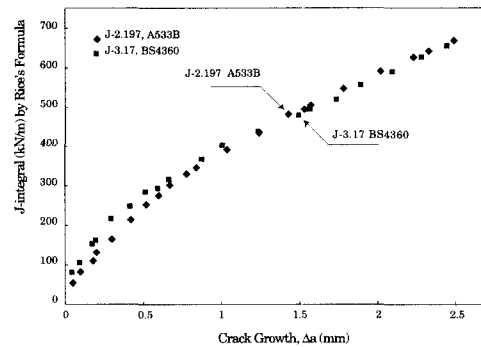


Fig. 8 Comparison of Experimental J-Resistance Curves considering Strain Hardening using Rice's J-integral Formula, (2) for A533B and BS4360 Steel

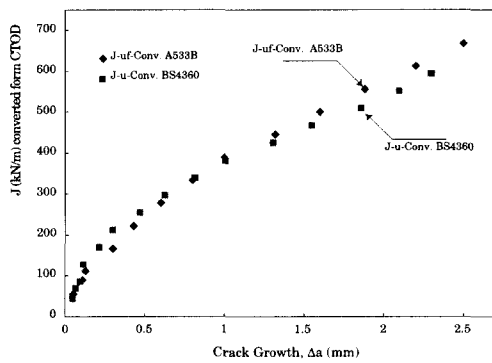


Fig. 7 Comparison between A533B and BS4360 steel of Experimental J-Resistance Curves converted from CTOD using Formula (1)

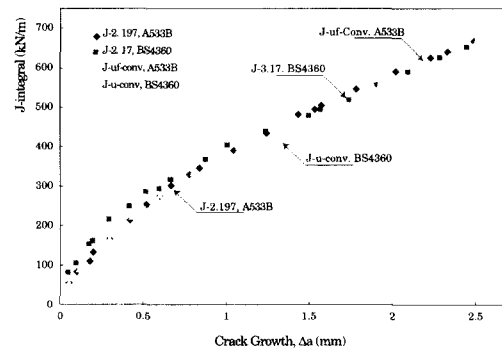


Fig. 9 Experimental J-Resistance Curves using Optimal Factor(η) in eq. (2) and Pertinent Strength chosen by Strain Hardening Level in eq. (1) according to different Materials

에 대입하여 J -적분 값을 재평가하고 균열진전량에 따른 저항곡선들을 그린 것이다. 그림에서 A533B강에 대한 저항곡선을 J -2.197, A533B라고 하고 BS4360강에 대한 저항곡선을 J -3.17, BS4360이라 하였다. Fig. 8을 Fig. 2와 비교해보면, Fig 2에서는 J -2, A533B 저항곡선의 거동이 J -2, BS4360의 거동보다 훨씬 크게 나타나 A533B강의 인성이 크다는 것을 볼 수 있으나 Fig. 8은 두 재료에 대한 거동이 거의 비슷한 경향을 보이고 있다.

Fig.9는 이종 재료 사이에 변형율경화를 고려하여 선택한 기준강도를 적용하여 식(1)에 의해 계산된 J -적분과 식(2)에서 보정된 계수를 사용하여 구해진 J -적분에 대한 J -저항곡선들을 함께 도시한 것이다. 일정한 범위 내에서 이들 저항곡선들은 거동과 경향이 거의 비슷함을 볼 수가 있다. 이는 재료의 인장성질에서 오는 차이 등을 재료가 갖는 변형율경화정도를 고려하여,

첫째, 식(1)의 사용시에 적절한 기준강도의 선정과 둘째, Rice 실험식 (2)에서 계수에 적절한 강도비의 보정 등을 시행하여 J -적분을 평가함으로써 Fig.1과 2에서 나타난 모순된 평가를 바로잡을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

일반으로 재료의 파괴를 특징짓는데 두 매개변수인 J -적분과 CTOD가 대등하게 타당하다는 것이 알려져 있다. 그러나 Gordon씨 등의 실험에서 변형율경화가 다른 재료에 대한 J -저항곡선과 CTOD의 저항곡선사이에는 상반되는 거동이 있음을 적시하며 J -적분과 CTOD의 파괴변수에 대한 문제점을 적시하였다.

본 논문에서는 재료의 기계성질의 차이에서 오는 변형율경화정도를 고려하여,

첫째, 식(1)의 사용시에 적절한 기준강도의 선정과 둘째, Rice 실험식 (2)에서 계수에 적절한 강도비의 보정 등을 시행하여 J -적분을 평가함으로써 문제점을 해소할 수 있었다. 즉, 실측된 개구변위 CTOD를 이용한 J -적분 변환식 (1)의 적용에서는

A533B 강과 같이 변형율경화정도가 중정도인 $n=10.6$ 인 재료의 경우에는 기준강도로서 극한-유동 강도(ultimate flow strength), σ_{uf} 를 선정하고, 가공경화정도가 큰 $n=8.1$ 인 재료의 경우에는 기준강도로서 인장강도 σ_u 를 선택하여 J -값을 계산하는 것이 바람직하였다. 또한, Rice씨에 의해 소개된 J -값을 구하는 실험식에서 각 재료에 대한 변형율 경화정도를 반영하는 무차원량인 강도비를 고려한 식

$$\left(2^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right)^m \tag{4}$$

여기서, m 은 1, 2, 3으로 한다.

의 보정식을 식(2)에 곱하여 J -적분 값을 산출하였다. $m=3$ 일 때가 적절한 계수보정값을 나타내었다.

따라서 식(1)에 변형율경화를 반영한 기준강도의 선택과 Rice식에서 η 값에 무차원량인 강도비를 보정하여 재평가한 저항곡선의 거동이 거의 일치함을 보임으로써 J -적분과 CTOD가 재료의 고유한 파괴특성을 규정짓는 매개변수라 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Robin Gordon, Brian K. Neale and Young-Yi Wang, "A Comparison of J and CTOD as Elastic-Plastic Fracture Characterizing Parameter," ASTM STP 1324, pp 425-444, 1997
- [2] Rice, J. R. "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks," Journal of Applied Mechanics, pp 376-386, June 1968
- [3] 장석기, "J-적분과 균열선단개구변위에 관한 구속 계수 m 의 평가" 박용기관학회지, 제24권 제6호 pp696-705, 2000.11
- [4] Shih, C.F., "Relationship Between the J -Integral and the Crack Opening Displacement for Stationary and Extending Cracks," Journal of Mechanics and Physical Solids, Vol. 29, p. 305, 1981
- [5] Hutchinson, J.W., "Singular Behavior at the end of a Tensile Crack in a Hardening Material, "

- Journal of Mechanics and Physical Solids, Vol. 16, p. 13, 1968
- [6] Rice, J. R. and Rosengren, G. F., "Plane Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power Law Hardening Material," Journal of Mechanics and Physical Solids, Vol. 16, p. 1-12, 1968
- [7] ESIS P1-92, ESIS Recommendations for Determining the Fracture Resistance of Ductile Materials, January, 1992 ESIS University of Technology.
- [8] Kirk, M. T. and Dodds, R. H., "J and CTOD Estimation Equations for Shallow Cracks in Single Edge Notch Bend Specimens," University of Illinois Research Report UILV-ENG-91-2013.
- [9] BS7448: Part 1: 1991, "Fracture Mechanics Toughness Tests, Part 1. Method for the Determination of K_{Ic} , Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials" (this standard replaced BS5447: 1977: K_{Ic} Tests, and BS5762:1979: CTOD Tests)

저 자 소 개



장석기(張石基)

1951년생. 1973년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1988년 전남대학교 대학원 기계공학과 박사학위 취득. 1998년 University of South carolina 객원교수. 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수.