

균열선단 열림변위 δ_5 R-곡선과 δ_{BS} R-곡선의 비교연구

김엄기* · 남승훈** · 진 욱**** · 고성위***
(1999년 6월 26일 접수)

Comparative Study on Crack Tip Opening Displacement δ_5 R-Curve and δ_{BS} R-Curve

Amkee Kim, Seung Hoon Nahm, Wook Jin and Sung Wi Koh

Key Words: CTOD(균열선단 열림변위), R-Curve(파괴저항곡선), BS 7448(영국공업규격 BS 7448), J Integral(J 적분), DC Potential Drop Method(직류전위차법)

Abstract

Since the examination of CTOD problem revealed that the discrepancy among CTOD's was a matter of definition, the relationships among parameters based on different definitions have been studied. Particularly, the relationship between δ_{BS} R-curve based on BS 7448 and δ_5 R-curve based on the recently introduced δ_5 parameter was investigated in this research. For the comparison, compact tension specimens of used 1Cr-0.5Mo steel, heat treated 1Cr-0.5Mo steel to mimic the new one, Al2024-T6 and Al2024-T351 were prepared and tested. Consequently, the relationship between δ_5 and δ_{BS} R-curves for tested materials were established by shifting the rotational center which could be determined by rotation factor and ligament size.

1. 서 론

현대 산업구조물 및 설비의 안전성 확보와 경제적 운영이라는 측면에서 구성물의 건전성 평가가 요구된다. 이 경우에 구성물 내에 존재하는 균열(또는 결함)이 구성물의 안전성에 중요한 역할을 하기 때문에 파괴역학 파라미터에 기초한 균열 위험성(severity) 평가기술이 개발되어 왔다. 그 중에서도 최근에 Schwalbe 등이 제안한 δ_5 파라미터는 사용자가 비교적 간단한 방법으로 균열의 위험성(severity)을 평가할 수 있게 하는 특징이 있다.^(1~6) δ_5 는 예비 균열선단의 열림변위(CTOD ; crack tip opening displacement)를 나타내는 파라미터로서 균열이 성장하는 도중에도 예비 균열이 있던 위치에서 측정된다는 점이 영국 공

업규격 BS(British Standard) 7448가 규정하고 있는 기존의 CTOD 파라미터(본 논문에서 δ_{BS} 로 표기하였음)와 유사하다. 이 파라미터의 가장 큰 장점은 직접 측정할 수 있기 때문에 각종 시험편은 물론 기하학적 형상이 복잡한 실제 구조물의 균열 선단에서 하중형태와 관계없이 측정될 수 있고, 균열 구동력(driving force)을 비교적 간단한 공식에 의하여 계산할 수 있는 점이다. 또한 δ_5 값과 J 적분 값과의 사이에 일 대 일의 상관관계를 갖는 것으로 밝혀지고 있어 탄소성 파괴역학 파라미터로서의 δ_5 의 유효성이 인정되고 있다.

본 연구에서는 1Cr-0.5Mo 강과 Al2024 재료를 대상으로 BS 7448의 δ_{BS} 와 δ_5 파괴저항곡선(R-곡선)을 상호 비교 연구하여 두 파라미터 간의 상관관계를 규명하고자 하였다. 본 연구결과는 기존의 δ_{BS} R-곡선과 δ_5 R-곡선 데이터 베이스 간의 상호 호환 가능성을 제시하게 될 것이며, 아직 검토 단계에 있는 δ_5 평가법 표준절차 확립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

* 회원, 공주대학교 기계공학부
E-mail : amkee@knu.kongju.ac.kr
TEL : (0416)850-8616 FAX : (0416)854-1449

** 회원, 한국표준과학연구원

*** 회원, 부경대학교 제어기계공학과

**** 공주대학교 기계공학부

2. δ_5 , δ_{BS} 와 δ_{BS}^M 의 정의

Schwalbe와 Hellmann⁽²⁾은 Fig. 1에서 보인 바와 같이 CTOD를 예비 피로균열 선단을 가로지르는 게이지 길이(gage length) 5mm의 변위 δ_5 로써 평가하는 방법을 제안하고 있는데 이 방법은 CTOD를 직접 측정할 수 있다는 장점 때문에 비교적 얇은 구조물을 중심으로 활용되고 있다. δ_5 는 예비 피로균열 위치에서의 균열열림변위(COD)를 나타낸다는 점에서 BS 7448 CTOD 파라미터 δ_{BS} 와 유사하다.

CTOD를 실험적으로 결정하는 방법으로 가장 널리 이용되고 있는 방법은 BS 7448⁽⁸⁾에 기술되

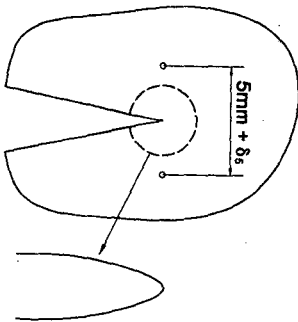


Fig. 1 Definition of δ_5

어 있는데, 이 방법은 앞서 설명한 δ_5 파라미터와 동일하게 CTOD를 예비 피로균열 위치에서의 균열열림변위(COD)로 정의하고, 식 (1)을 이용하여 소규모 항복(small scale yielding)에 의한 열림 변위 δ_{ssy} 와 완전 소성(fully plastic)에 기인한 열림 변위 δ_{pl} 의 합으로 계산하는 것이다. 식 (1)에서 δ_{ssy} 는 응력확대계수(stress intensity factor)를 이용하여 계산하고, δ_{pl} 는 Fig. 2(a, b)에서 나타낸 바와 같이 소성변형에 의한 CMOD(crack mouth opening displacement) V_{pl} 을 측정하여, V_{pl} 와 회전중심점 사이의 기하학적 선형관계를 이용하여 계산한다.

$$\delta_{BS} = \delta_{ssy} + \delta_{pl} = \frac{K^2(a_0)}{2\sigma_y E} + \frac{V_{pl}}{1 + k \frac{a_0}{W - a_0}} \quad (1)$$

여기서 σ_y , E , W , a_0 는 각각 0.2% offset 항복 응력, 탄성계수, 시험편의 폭, 예비 균열길이를 나타낸다. 또한 k 는 소성변형의 회전중심점의 위치를 나타내기 위한 회전계수(rotation factor)로서 예비균열 상태의 시험편 초기 리가먼트(ligament) ($W - a_0$)와 예비 피로균열선단으로부터 회전중심점까지의 거리, $(W - a_0)/k$ 의 비를 나타낸다. 그러나 파괴저항곡선 시험에서와 같이 시험도중에 균열이 성장하는 경우에는 균열성장과 동반하여 회전중심점도 균열성장 방향으로 이동하기 때문에 회전중심점의 위치를 고정시켜 유도한 식 (1)

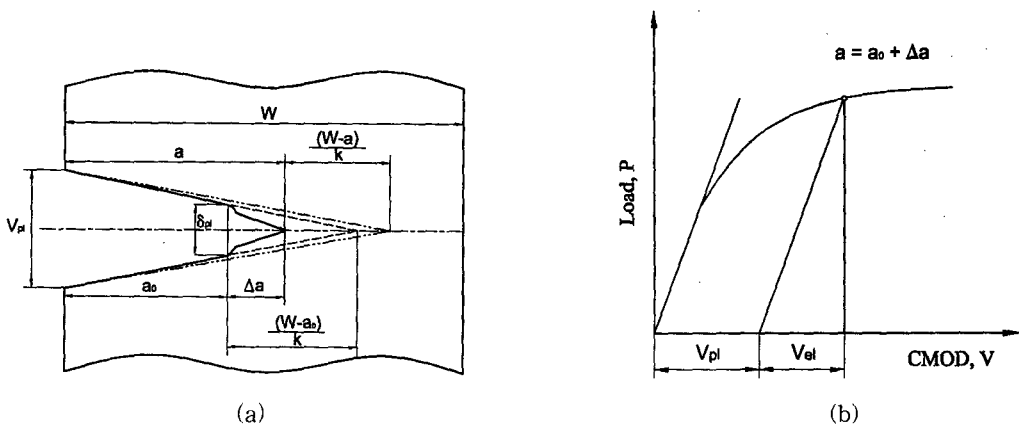


Fig. 2 A schematic diagram of crack: (a) V_{pl} , (b) determination of the plastic portion of CMOD

Table 1 Mechanical properties of 1Cr-0.5Mo steel

For used 1Cr-0.5Mo steel

Temp. (°C)	Yield Stress σ_{ys} (MPa)	Tensile Strength σ_{TS} (MPa)	Reduction of Area (%)	Elastic Modulus (GPa)
24	300	431	57.4	202

For heat treated 1Cr-0.5Mo steel

Temp. (°C)	Yield Stress σ_{ys} (MPa)	Tensile Strength σ_{TS} (MPa)	Reduction of Area (%)	Elastic Modulus (GPa)
24	348	492	54.2	203

Table 2 Mechanical properties of Al2024

For Al2024-T6

Temp. (°C)	Yield Stress σ_{ys} (MPa)	Tensile Strength σ_{TS} (MPa)	Reduction of Area (%)	Elastic Modulus (GPa)
24	345	457	17.3	71

For Al2024-T351

Temp. (°C)	Yield Stress σ_{ys} (MPa)	Tensile Strength σ_{TS} (MPa)	Reduction of Area (%)	Elastic Modulus (GPa)
24	403	497	18.3	70

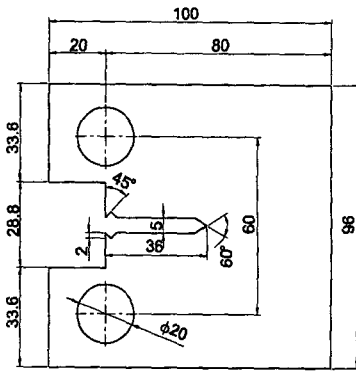


Fig. 3 Geometry of specimen (unit: mm)

에 의한 CTOD 평가는 실제 값과 차이를 나타내게 된다. 따라서 균열 성장에 따른 회전중심 이동을 고려한 수정 식이 필요한데, 본 연구에서는 Fig. 2 (a)에서 보인 바와 같이 균열이 성장하는 도중의 회전중심점 위치가 시험편 폭 W 에서 현재의 균열길이 a 를 제외한 리가먼트 ($W - a$)와 균열로부터 회전중심점까지의 거리, $(W - a)/k$ 의 비가 일정하게 유지되며 이동한다고 가정하여 유도한 식 (2)을 사용하였고, 이를 δ_{BS}^M 로 나타내었다.

$$\delta_{BS}^M = \frac{K^2(a)}{2\sigma_y E} + \frac{V_{pl} \left(a - a_0 + \frac{W - a}{k} \right)}{a + \frac{W - a}{k}} \quad (2)$$

여기서 a 는 현재의 균열길이를 나타낸다.

3. 실험

3.1 실험재료

본 연구에서 사용한 재료는 두 종류로 한 종류는 1Cr-0.5Mo 강으로 영월화력 발전소 2호기에서 약 30년간 사용되었던 보일러 헤더 재료로서 1965년 상업운전에 들어가 폐기될 때까지 약 22만 시간동안 사용된 열화재이며 또 다른 한 종류는 항공기 기체 제작에 사용되는 Al2024이다.

보일러 헤더 재료는 사용된 상태 그대로와 신재를 모사한 회복 열처리재를 실험에 사용하였으며, Al2024의 경우에는 용체화처리 후 인공시효 처리한 Al2024-T6와 용체화처리 후 냉간 가공하여 상온 시효한 Al2024-T351를 사용하였다. 각 재료의 상온에서의 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

3.2 시험편

1Cr-0.5Mo 강의 경우에는 원통형(두께: 33mm, 원통의 외경: 300mm) 부재로부터 시험편의 노치 방향이 원통의 길이 방향과 일치되도록 하고, Al2024의 경우에는 두께가 40mm인 판재를 균열 방향이 압연방향에 수직되도록 CT(compact tension) 시험편을 제작하여 사용하였다. 시험편의 모양 및 크기는 Fig. 3과 같다. 시험편의 두께는 5mm이고, 하중선 변위를 측정하기 위하여 클립 게이지(clip gage) 부착용 나이프 에지(knife edge)를 가공하여 사용하였다. 초기 예비 피로균열을 노치 선단으로부터 최소 1.3mm 이상이 되게 형성시켰다. 이때의 최대피로하중의 크기는 파괴저항곡선 시험 중에 발생하는 최대하중(P_{max})의 40%가 넘지 않도록 하였다. 1Cr-0.5Mo 강의 경우에는 예비 피로균열을 형성시킨 후 시험편 양쪽 측면에 시험편 두께의 10% 깊이씩, 전체 20% 깊

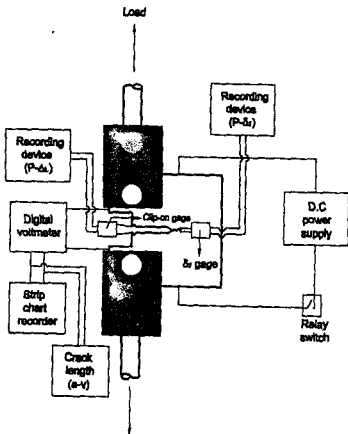


Fig. 4 Construction of experimental setup

이로 60° 측면홈(side groove)을 가공하여 시험하였다.

3.3 실험장치의 구성

서보 유압식 재료시험기(MTS Model 810 System)를 사용하여 R-곡선 시험을 수행하였다. Fig. 4는 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 하중 및 하중선 변위 측정을 위한 하중계(load cell)와 클립 게이지 등을 나타내고 있으며, δ_5 의 측정에는 기존의 MTS 변위 측정기(extensometer) 상용품을 본 연구 사용목적에 맞추어 개조하여 사용하였다. Fig. 5는 δ_5 측정 부위만을 확대하여 자세히 나타낸 그림이다.

3.4 실험방법

파괴저항곡선 측정을 위하여 단일 시험편 방법을 사용하였다. 예비 피로균열을 생성시킨 CT 시험편을 시험기에서 변위제어 하에 인장하여 준정적 균열성장을 발생시키며 연속적으로 하중과 하중선(또는 하중점) 변위, 균열길이 및 δ_5 를 측정하였고 균열길이 성장량 측정을 위하여 직류전위차법을 사용하였다(Fig. 5 참조). 이때 출력단에서 측정된 전위차에 의한 균열길이 평가는 Johnson 식 (3)을 이용하였다.⁽⁷⁾

$$a_p = \frac{2W}{\pi} \times \cos^{-1} \left[\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cosh \left[\frac{u(i)}{u_0} \cosh^{-1} \left[\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a_0/2W)} \right] \right]} \right] \quad (3)$$

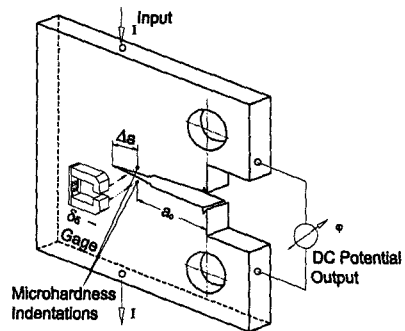


Fig. 5 Setup for measuring the crack tip opening displacement δ_5

여기서 a_p 는 출력단의 전위차 $u(i)$ 가 측정된 순간의 균열길이를 나타내며 a_0 는 초기예비균열길이, u_0 는 초기예비균열길이 상태에서 출력단의 전위차를 나타낸다.

본 연구에서 사용한 입력단 전류의 크기는 10 Amp 이다. 시험 정지 후 실제 파단면에서 실측한 균열길이가 식 (3)으로 계산된 값과 차이를 보일 때는 식 (4)을 이용하여 보정하였다.

$$a_c = a_p + (a_p - a_0) \frac{a_{mf} - a_{pf}}{a_{pf} - a_0} \quad (4)$$

여기서 a_0 는 초기예비균열길이, a_{mf} 는 시험 정지점에서 실측한 균열길이, a_{pf} 는 시험 정지점에서의 계산된 균열길이이며, a_c 는 a_p 의 보정값을 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 J R-곡선과 소성구속의 영향

CTOD R-곡선들을 고찰하기에 앞서 ASTM 1820의 표준절차⁽⁹⁾를 따라 J R-곡선을 작성하여 시험재료간 차이를 고찰하였다. Fig. 6은 1Cr-0.5Mo 강과 Al2024의 J R-곡선을 함께 나타낸 것이다. 곡선의 수준(level) 순위가 1Cr-0.5Mo 강 회복 열처리재, 1Cr-0.5Mo 강 사용재, Al2024-T351, Al2024-T6 순으로 나타나고 있다. 특히 Al2024 R-곡선의 경우 항복응력이 1Cr-0.5Mo 강의 항복응력에 비하여 상대적으로

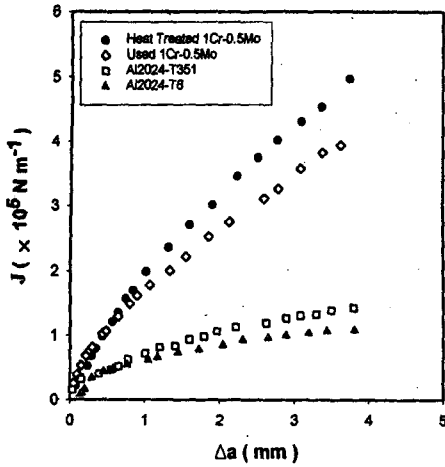


Fig. 6 J R-curves

비슷하거나 높음에도 불구하고 1Cr-0.5Mo 강의 J R-곡선에 비하여 매우 낮은 저항 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 Fig. 7은 균열이 성장하는 도중에 발생한 균열선단에서의 면외(out of plane) 방향 소성구속(plastic constraint) 크기를 조사하기 위하여 시험편의 파단면으로부터 두께 수축률을 측정하여 나타낸 것이다. 여기서 두께 수축률은 시험편이 파단된 상태에서 줄어든 두께 감소량 ΔB_N 을 본래 두께로 나누어 계산하였다. 이때 측면홈이 제작되어 있는 1Cr-0.5Mo 강의 경우에는 측면홈의 깊이를 제외한 순 두께 B_N 로 나누어 계산하였다. 1Cr-0.5Mo 강의 두께 수축률이 Al2024의 경우에 비하여 크게 나타나고 있는데, 두께 수축률 크기 순이 Table 1과 2에 나타난 재료의 단면 수축률 크기 순과 일치하고 있음을 알 수 있다. 두께 수축률이 면외 소성구속 크기와 상관관계에 있음에 비추어 Al2024 균열 선단부가 1Cr-0.5Mo 강의 균열 선단부에 비하여 더 큰 3축 응력상태(stress triaxiality)에 있었음을 알 수 있다. 참고로 Ramberg-Osgood 응력-변형률 구성관계식에서의 변형경화지수(strain hardening exponent) n 을 식 (5)를 이용하여⁽¹⁰⁾ 구해본 결과, 1Cr-0.5Mo 강 사용재는 8.48이고 회복 열처리재 8.78이며, Al2024의 경우에는 Al2024-T6가 10.25이고 Al2024-T351은 12.73로 나타나고 있어, 두께 수축률의 차이가 변형경화 지수와 밀접한 관계가 있음을 짐작케 한다.

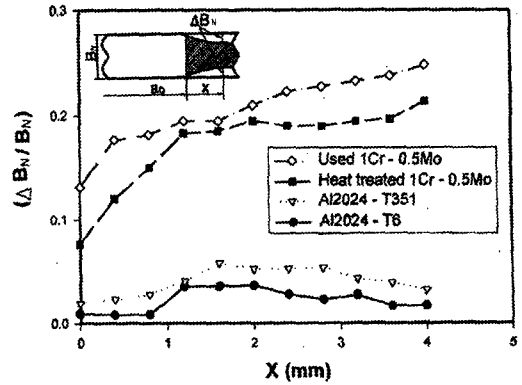
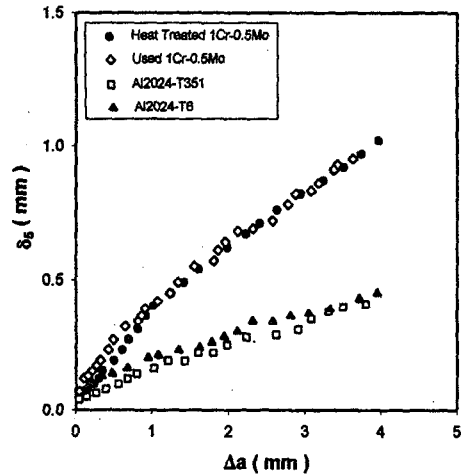


Fig. 7 Thickness reduction curves measured from fracture surfaces

Fig. 8 δ_5 R-curves

$$\frac{\sigma_{TS}}{\sigma_{ys}} = \frac{\left(\frac{1}{0.002n}\right)^{\frac{1}{n}}}{\exp^{\frac{1}{n}}} \quad (5)$$

본 연구에서 사용한 1Cr-0.5Mo 강의 사용재와 회복 열처리재의 기계적 물성(항복응력, 인장강도, J R-곡선 등)의 차이는 장시간 사용에 의한 재료 내의 조직학적 변화에 기인하는 것으로 믿어지며, Al2024-T6와 Al2024-T351 경우에서도 기계적 물성에 대한 용체화 처리후 시효처리의 영향이 비교적 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.2 δ_5 R-곡선의 특성

Fig. 8은 δ_5 파라미터로 나타낸 CTOD R-곡선

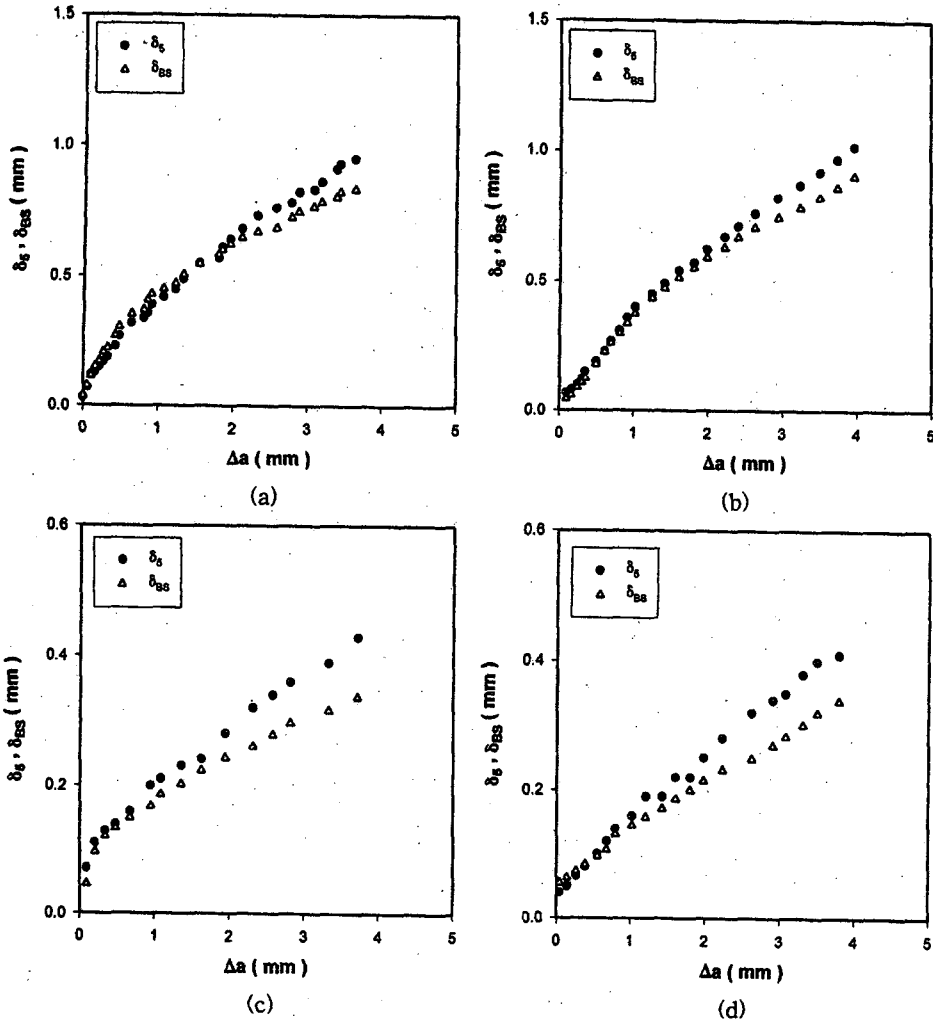


Fig. 9 Comparison between δ_5 R-curve and δ_{BS} R-curve (a) used 1Cr-0.5Mo steel (b) heat treated 1Cr-0.5Mo steel (c) Al2024-T6 (d) Al2024-T351

을 나타낸 것이다. 전체적으로 J R-곡선에서와 같이 1Cr-0.5Mo 강의 δ_5 R-곡선의 수준이 Al 2024에 비하여 크게 나타나고 있으나, 동종인 1Cr-0.5Mo 강 사용재와 회복 열처리의 경우 16%의 항복응력 차이에도 불구하고 δ_5 R-곡선이 서로 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Al2024의 경우에도 항복응력이 15% 큰 Al2024-T351의 δ_5 R-곡선의 수준이 상대적으로 항복응력이 작은 Al2024-T6의 δ_5 R-곡선의 수준에 비하여 비록 그 차이는 작지만 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 고찰한 에너지 파

라미터인 J 적분으로 나타냈을 때 보였던 재료간의 뚜렷한 수준 차이와 대비되는 결과로서 변위 파라미터인 CTOD로 파괴저항곡선을 나타냈을 때 동종 재료간의 파괴저항력 등급을 제시하는데 불리하다는 사실을 보여주고 있는 것이다. 더 나아가 파라미터의 특성 차이로 인한 파괴인성 순위(ranking)의 역전도 예상할 수 있는 결과이다.

한편 Fig. 8에 나타낸 δ_5 R-곡선들 모두가 균열성장 초기를 제외하면 비교적 일정한 직선으로 나타나고 있는데, 이 직선의 기울기가 균열을 형성하고 있는 양 균열면의 사이각을 의미하기 때문에, 예비 피로균열로부터 균열이 발생하여 어

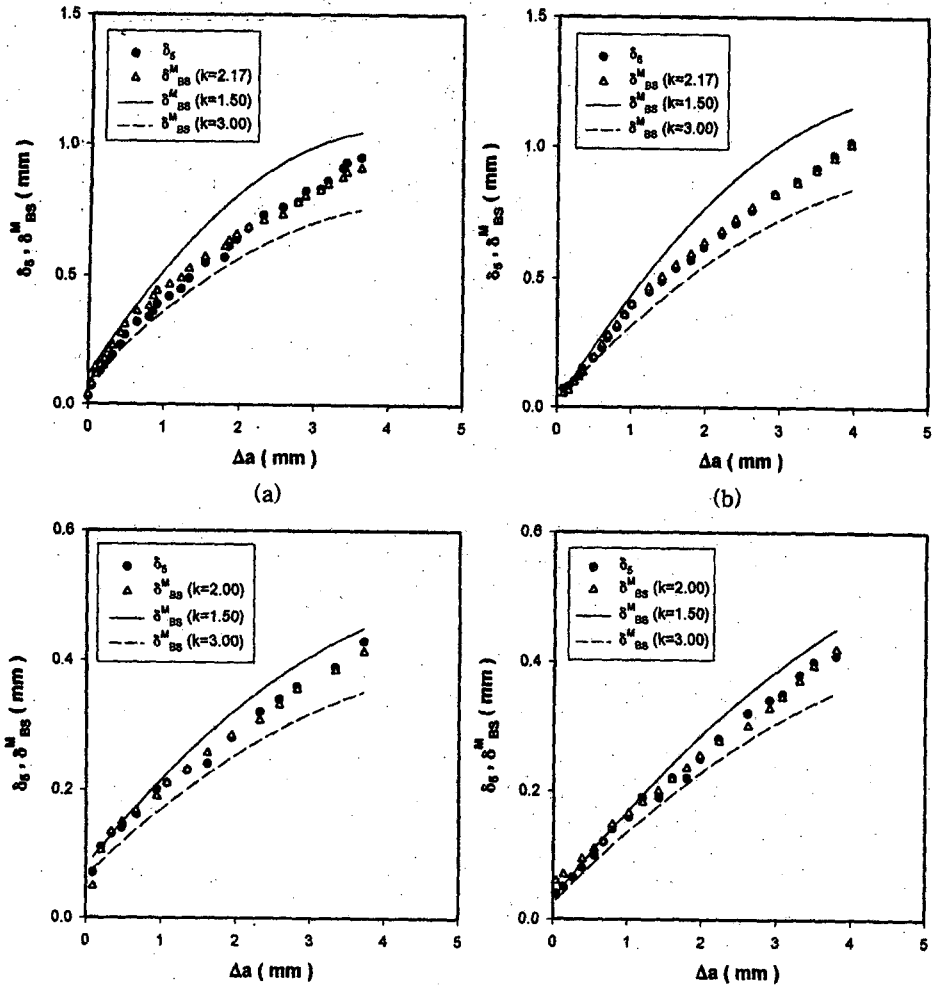


Fig. 10 Comparison between δ_5 R-curve and δ_{BS}^M R-curve (a) used 1Cr-0.5Mo steel (b) heat treated 1Cr-0.5Mo steel (c) Al2024-T6 (d) Al2024-T351

느 정도 진전한 이후에는 균열선단부 균열면의 사이각(열림각), 즉 CTOA(crack tip opening angle)가 균열성장 도중에 일정하게 유지되고 있음을 나타내는 것이다. 다시 말하면 균열선단부의 기하학적 자기 유사성(self similarity)이 유지되고 있다고 할 수 있다. 이는 Kanninen 등⁽¹¹⁾이 정적인 상태로 성장하고 있는 알루미늄 합금 균열 선단부의 균열면 모양(profile)에 대한 generation phase analysis 연구결과와 일치하는 것이다.

4.3 δ_5 R-곡선과 δ_{BS} R-곡선의 비교

Fig. 9는 1Cr-0.5Mo 강과 Al2024의 δ_5 R-곡선

과 δ_{BS} R-곡선을 비교하여 나타낸 것이다. δ_{BS} R-곡선은 영국 공업규격 BS 7448 표준절차를 따라 하중 하중선-변위 곡선으로부터 V_{pl} 을 구한 후 식 (6)에 대입하여 계산하였다. 식 (6)은 회전계수가 $k=2.174$ 인 경우의 앞서 유도된 식 (1)과 동일한 식이다.

$$\delta_{BS} = \left[\frac{P}{BW^{0.5}} \times f \left(\frac{a_o}{W} \right) \right]^2 \frac{(1-\nu^2)}{2\sigma_y E} + \frac{0.46(W-a_o)V_{pl}}{0.46W+0.54a_o} \tag{6}$$

여기서 P , B , W , a_o , ν 및 E 는 각각 시험하중, 시험편의 두께, 폭, 초기 예비 균열길이, 포아송비 및 탄성계수이며, $f\left(\frac{a_o}{W}\right)$ 는 응력확대계수의 수정계수로서 본 연구에서 사용한 CT 시험편의 경우에는 다음 식 (7)과 같다.

$$f\left(\frac{a_o}{W}\right) = \frac{(2 + a_o/W)(0.886 + 4.64a_o/W - 13.32a_o/W^2 + 14.72a_o^2/W^3 - 5.6a_o^4/W^4)}{(1 - a_o/W)^{3/2}} \quad (7)$$

Fig. 9에서 보면 1Cr-0.5Mo 강과 Al2024의 δ_5 R-곡선과 δ_{BS} R-곡선은 균열증분 Δa 가 작은 구간에서 서로 일치하고 있으며 균열증분이 증가함에 따라 δ_{BS} R-곡선이 δ_5 R-곡선에 비하여 작게 나타나기 시작하여, 그 차이가 균열증분이 증가함에 따라 점차 커지고 있음을 알 수 있다. 이 같은 현상이 발생하는 이유는 δ_5 의 경우 예비균열 위치에서의 균열 열림변위로서 직접 측정된 값임에 비하여 BS 7448의 δ_{BS} 의 경우 예비 피로 균열 위치에서의 균열 열림변위를 균열 성장에 따른 회전중심의 이동을 고려하지 않은 식 (1)을 사용하여 간접 측정되었기 때문이며, 이것은 δ_{BS} 가 실제에 비하여 과소 평가되고 있음을 나타내는 것이다. 즉 BS 7448 표준절차에 따라 측정된 CTOD 평가는 실제 CTOD를 보수적으로 평가하고 있다고 할 수 있다.

한편 Fig. 10은 균열성장에 따른 회전중심의 이동을 고려하여 수정된 식 (2)으로 계산한 δ_{BS}^M R-곡선과 δ_5 R-곡선을 비교한 것이다. 데이터 점들이 1Cr-0.5Mo 강의 경우에는 회전계수 k 가 2.17, Al2024의 경우에는 회전계수 k 가 2.00일 때 서로 잘 일치되고 있어 균열진전에 따른 회전중심의 이동이 있었음을 뒷받침한다. 참고적으로 Fig. 10에 나타난 실선과 점선은 k 가 각각 1.5와 3.0인 경우에 예상되는 δ_{BS}^M R-곡선을 나타낸 것으로, 회전계수 k 의 변화에 따른 δ_{BS}^M R-곡선의 변화를 보여주기 위한 것이다. 따라서 식 (2)를 이용하여 δ_5 R-곡선과 동일한 δ_{BS}^M R-곡선을 얻기 위해서는 재료에 따라 적합한 회전계수 k 가 주어져야

한다는 사실을 알 수 있다. 앞서 논의한 균열 선단부의 면외(out of plane) 소성구속 크기와 관련시켜 보면 소성구속이 큰 경우에(앞서 논의한 두께 수축률 크기로 판단 가능함) 더 작은 회전계수(rotational factor) k 값을 가져야 한다는 것을 의미한다.

끝으로 본 연구에서 얻은 시험결과는 두께가 5mm인 경우에 한정하여 얻어진 결과이기 때문에 시험편 두께가 변화하게 되면 그로 인한 영향이 나타날 것으로 예상되지만, 본 연구에서 얻은 결과를 참고하여 3차원 유한요소법과 보조적 실험을 행하면 그 영향을 충분히 예측할 수 있다고 생각된다.

5. 결 론

두께가 5mm인 1Cr-0.5Mo 강과 Al2024의 δ_5 R-곡선과 δ_{BS} R-곡선을 비교 연구하여 다음 결론을 얻었다.

(1) 1Cr-0.5Mo 강의 두께 수축률이 Al2024에 비하여 크게 나타나고 있음에 비추어, Al2024가 1Cr -0.5Mo강에 비하여 더 큰 3축 응력상태에서 균열이 진행되었음을 알 수 있었다.

(2) 1Cr-0.5Mo 강의 경우에 사용재와 회복 열처리재의 δ_5 R-곡선은 서로 수준이 비슷한 거동을 보이고 있고, Al2024의 경우에는 Al2024-T6의 경우가 Al2024-T351에 비하여 조금 높게 나타나고 있었다. 이 결과는 J R-곡선이 1Cr-0.5Mo 강의 회복 열처리재, 사용재, Al2024-T351, Al2024 -T6 순으로 뚜렷이 차이를 나타내고 있는 것과 대비되는 것으로 파라미터의 차이로 인한 재료인성 순위(ranking) 변화의 가능성을 나타내는 것이다.

(3) 균열생성 후 균열이 어느정도 진전된 후에는 균열성장 중의 균열선단부의 열림각(CTOA)이 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있었다.

(4) 균열이 성장하는 경우에 BS 7448의 δ_{BS} 는 회전중심점의 이동으로 인하여 실제 CTOD를 보수적으로 평가하고 있었다.

(5) δ_5 R-곡선과 수정 파라미터 δ_{BS}^M R-곡선은 1Cr -0.5Mo강의 경우에 회전계수 k 가 2.17일 때, Al2024의 경우에는 k 가 2.00일 때 서로 일치하고 있었다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 방재기술연구센터에서 주관하는 방재기술사업의 일환으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- (1) Schwalbe, K. H., Heerens, J., Hellmann, D., and Cornec, A., 1986, "Relationships Between Various Definitions of the Crack Tip Opening Displacement," *The Crack Tip Opening Displacement in Elastic-Plastic Fracture Mechanics Workshop on CTOD Methodology*, Schwalbe, K. H. Ed., Springer Verlag, pp. 133~153.
- (2) Hellmann, D., Schwalbe, K. H., 1986, "On the Experimental Determination of CTOD Based R-Curves," *The Crack Tip Opening Displacement in Elastic-Plastic Fracture Mechanics Workshop on CTOD Methodology*, Schwalbe, K. H. Ed., Springer Verlag, pp. 115~132.
- (3) Schwalbe, K. H., 1986, "The Prediction of Failure Situations Using the CTOD Concept Based on the Engineering Treatment Model(ETM)," *The Crack Tip Opening Displacement in Elastic-Plastic Fracture Mechanics Workshop on CTOD Methodology*, Schwalbe, K. H. Ed., Springer Verlag, pp. 315~340.
- (4) Heerens, J., Schwalbe, K. H., Nix, C., 1993, "Influence of Specimen Size on J -, J_m - and δ_5 -R-Curves for Side-Grooved Compact Tension Specimens," *Constraint Effects in Fracture*, ASTM STP 1171, Hackett, E. M., Schwalbe, K. H. and Dodds, R. H., Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp. 429~472.
- (5) Saxena, A., Dogan, B., Schwalbe, K. H., 1994, "Evaluation of the Relationship Between C^* , δ_5 and δ , during Creep Crack Growth," ASTM STP 1207, Landes, J. D., McCabe, D. E., and Boulet, J. A. M., Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp. 510~526.
- (6) Schwalbe, K. H. and Hellmann, D., 1981, "Application of the Electrical Potential Method to Crack Length Measurements Using Johnson's Formula," *Journal of testing and evaluation*, Vol.9, No.3, pp. 218~221.
- (7) Johnson, H. H., 1965, "Calibrating the Electrical Potential Method for Studying Slow Crack Growth," *Material Research and Standard*, Vol.5, No.9, pp. 442~445.
- (8) BS 7448, 1991, "Fracture Mechanics Toughness Test," *British Standards Institution*.
- (9) ASTM 1820, 1996, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," *ASTM Philadelphia*.
- (10) Gordon, J., R., Neale, B., K. and Wang, Y. Y., 1995, "A Comparison of J and CTOD as Elastic-Plastic Fracture Characterizing Parameters," *ASTM STP 1244*, pp. 425~444.
- (11) Kannien, M., F., and Popelar, C., H., 1985, *Advanced Fracture Mechanics*, Oxford University Press, New York, pp. 367~370.