

R-곡선과 직류전위차(DCPD)에 의한 SS400강의 파괴인성 평가

장석기† · 한민수*

(원고접수일 : 2005년 4월 27일, 심사완료일 : 2005년 9월 9일)

An Evaluation of Fracture Toughness for SS400 Steel by R-curve and DCPD

Seok-Ki Jang† · Min-Su Han*

Abstract : Fracture toughness defined near the initiation of stable crack growth is investigated by R-curve and Direct Current electric Potential Determination(DCPD) under mode I plane strain conditions for CT specimen with 25.4mm thickness of SS400 steel. Fracture toughness, J_{IC} near crack tip of CT specimen by R-curve is $17.14 \text{ kg}_{\#}/\text{mm}$ and however, its value by DCPD is $22.82 \text{ kg}_{\#}/\text{mm}$. The value of fracture toughness by DCPD is larger than that by R-curve. Therefore, it is suggested that the evaluation of fracture toughness by R-curve is optimum than by DCPD, when considering amount of crack growth about each of fracture toughness.

Key words : Fracture toughness(파괴인성), Crack growth(균열성장량), DCPD(Direct Current electric potential determination, 직류전위차 법), R-curve(R-곡선법)

1. 서 론

연성재료의 안정균열성장 개시를 나타내는 파괴인성을 정확하게 검출하는 것이 대단히 중요하다. 재료에 따라서는 안정파괴개시는 명확하지 않으며 파괴인성의 검출은 큰 문제로 되어 있다. 또한 평면변형률상태가 가장 강한 시편 두께 중앙부에서 국부적으로 안정파괴개시가 먼저 발생하므로 이의 검출은 한층 어렵다. 그러나 안정파괴개시의 올바른 평가는 기계나 구조물 부재의 안정성 검사, 사용 수명의 예측, 설계 측면에서 대단히 중요하다.

연성재료의 탄소성파괴인성을 평가하는 방법에는 R-곡선 법, 광학현미경법, 제하 컴플라이언스 법, 전위차 법, AE법, 초음파법 등이 있다.

R곡선 법은 부하정도가 다른 여러 개의 시편을 사용하여, 실측한 R곡선과 가정된 둔화 직선과의 교점으로부터 J_{in} , δ_{in} 을 결정한다. 이는 장치가 간단하고 신뢰성과 측정 정도가 높다. 반면에 직류전위차 법은 단일시편만을 이용하여 직접 균열 개시점의 평가가 가능하고 효율적이지만 장치가 복잡하고 대 전류를 사용하므로 직류전위차 값의 변화 점을 정확하게 규정하여 엄밀한 파괴인성을 찾는 것

† 책임저자(목포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail:jansk@mmu.ac.kr, Tel : 061)240-7093

* 목포해양대학교 대학원

이 어렵다⁽¹⁾. 그래서 동일 시편에 R-곡선법과 직류전위차 법을 적용하여 실측된 재료의 안정균열성장 개시 점의 평가 결과를 비교하고, 나타난 문제점을 해결하여 정확한 파괴개시인성 J_{IC} 을 구하는 것이 바람직하다고 생각한다.

따라서 본 논문에서는 ASTM E 1737-96⁽²⁾의 시험 절차에 따라 R-곡선 법과 직류 전위차 법에 의한 안정균열 성장 개시 파괴인성시험을 실시하고 시편 폭에 대한 균열 길이의 비, a_0/W 에 따른 파괴개시인성, 균열선단개구변위, 균열성장량 및 저항곡선의 거동 등을 고찰함으로써 파괴인성의 a_0/W 의 의존성과 두 시험법의 결과를 비교하여 정확한 안정파괴개시인성을 구하고 이들 시험법의 신뢰성을 검증하고자 한다.

2. 시험재료 및 시험방법

2.1 시험 재료 및 시험편

시험에 사용된 판상재료는 조선소에서 선체구조에 사용되는 두께 25.4mm의 SS400 일반 구조용 압연강재이며, 그의 화학 조성 비는 Table 1과 같다. 만능재료시험기(Instron 8516)에 L-T인장시편을 장착하여 2mm/min의 속도로 실온에서 인장시험을 실시하여 얻어진 재료의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

안정 균열 개시 인성의 평가를 위한 CT시편은 ASTM E 1290-93⁽³⁾기준에 따라 L-T형으로 제작하였다.

Table 1 Chemical composition of SS400 steel(wt.%)

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S
Wt(%)	98.41	0.17	0.20	1.11	0.0038	0.020

기계 가공된 CT시편 노치 선단에 2mm의 피로 예균열을 규정에 따라 삽입하여, CT시편 폭에 대한 균열길이 비(a_0/W)를 각각 0.45, 0.53 그리고 0.58로 제작된 3가지 형상에 대하여 각각 9개의 시편을 준비하였다.

Table 2 Mechanical properties of SS400 steel

Name of properties	Test value
Yield strength σ_Y (kgf/mm ²)	28.33
Tensile strength σ_U (kgf/mm ²)	47.19
Elongation, ϵ (%)	45.18
Elastic modulus E (kgf/mm ²)	2.1×10^4
Effective yield strength, σ_0 (kgf/mm ²)	37.76
Effective yield strain, ϵ_0	0.001798

또한 직류전위차 법에 의한 균열성장개시 파괴인성을 평가하기 위해 CT시편 전면과 측면에 직류 입력단자와 전압 측정단자의 위치(Fig.1)를 ASTM E 1737-96⁽²⁾의 기준에 따라 가공, 결선하였다⁽⁴⁻⁶⁾.

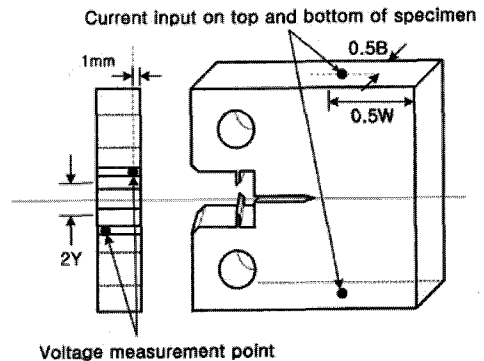


Fig. 1 Configuration of CT specimen with Input current and output voltage terminal position

2.2 시험방법

Fig. 2는 탄소성 파괴인성 평가에 사용된 장비의 전체 구성도를 나타낸 것이다. CT시편의 파괴인성 시험은 동적 재료인장 시험 장비인 INSTRON 8516을 사용하였다. 모드 I 하중 상태에서 변위제어로서 0.05mm/min의 속도로 부하하면서 하중선 개구변위와 균열성장량을 측정하고 하중-변위선도를 작성하였다. 하중선 개구변위(Crack Mouth Opening Displacement:

CMOD) 측정에 사용된 변위계의 유효 이동거리 (travel)는 4mm이며, 결보기 균열선단의 안정 균열성장량 Δa 를 계측하기 위하여 레이카(Leica)사의 MZ 12-5 광학현미경을 사용하였다.

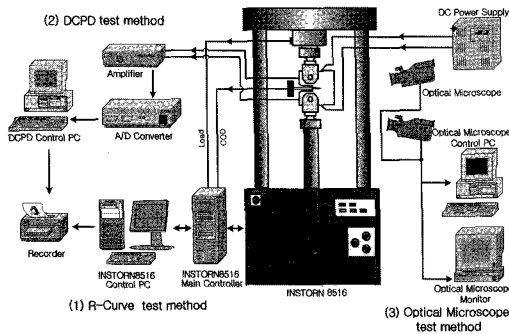


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus ; (1) R-Curve test system, (2) DCPD system (3) Optical microscope

결보기균열성장량과 CTOD의 측정을 위하여 시편 표면의 수직방향으로, 예균열 선단으로부터 50 mm 거리에 현미경의 대물렌즈를 고정하고 8배의 배율로 촬영하였으며, 화상이 현미경을 통하여 전송된 화상 데이터 처리는 프로그램(IMT(VT) IA)으로 균열 성장량을 계측하였다. 또한 시편 중앙부등에서의 균열성장량을 정확히 계측하기 위하여 각각의 최고 하중까지 부하한 후, 강제로 피로균열을 삽입하고 파단 시켰다. 파단면의 두께를 8등분한 9개의 균열길이를 측정하여, 시편의 균열성장량을 구하였다.

9개의 복수 시험편을 사용하여 ASTM E 1737-96⁽²⁾절차에 의거하여 R-곡선 법 시험을 실시하였다. 처음 3개의 시험편은 하중-변위 선도위에서 선형이 파괴되는 변곡점 근방에서, 나머지 6개의 시험편은 일정 균열성장이 달성될 때까지 하중을 부하한 다음 제하하여 하중-하중선 변위선도를 프로그램에 의해 작도하고 필요한 데이터를 식(1)에 대입하여 J-적분의 탄성(식 2) 및 소성(식 4) 성분을 계산하였다. 이와 같이 구해진 J-적분과 측정된 균열성장량을 이용하여 파괴개시인성 J_{IC} 평가를 위하여 Fig. 3과 같이 J- Δa 저항곡선을 그렸

다. 이 때 초기 3개의 시험편으로부터 균열 개시 이전의 균열 선단 둔화에 따른 균열성장량(blunting crack growth)을 실측하여 실측 둔화직선을 작성하였다. ASTM E 1737-96⁽²⁾에서 권장한 이론둔화직선 $J=2\sigma_y \Delta a_p$ 와 실측둔화직선과 저항곡선의 교점으로 파괴인성 J_{IC} 을 각각 구한 후, 이 값들을 서로 비교하였다.

한편 직류전위차 법의 시험을 위하여 시험기와 CT시험사이를 완전 절연시키고 프로텍스(Protex)사의 전원장치(DC Power Supply PWS-3020D)를 사용하였다. CT 시험편에 설치된 전류단자에 30A의 정전류를 공급하면서 시편의 전압출력단자의 전압을 3000배로 증폭시켜 전위차를 측정하고 그 결과를 프로그램(DASYLab 6.0)을 사용하여 전위차-변위선도를 구하고 ASTM E 1737-96⁽²⁾의 절차에 따라 파괴인성 J_{IC} 을 구하였다. 입력데이터의 A/D변환처리 때, DaqBook 2000필터(16비트, 60Hz)를 사용하여 잡음을 제거하였다.

또한 시험 전후에 시편과 실험실의 온도와 습도의 변화가 극미하였으므로 외부 환경적 요인은 무시하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 R-곡선 법을 이용한 파괴인성 J_{IC} 의 결정

시편 폭에 대한 균열길이의 비, a_o/W 가 다른 각 형상의 CT시험편들에 대한 J-적분 값의 계산은 ASTM E 1737-96⁽²⁾ 기준에 따라 그의 탄성 성분(J_{el})과 소성 성분(J_{pl})의 합으로 계산하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$J = J_{el} + J_{pl} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + J_{pl} \quad (1)$$

$$K = \left[\frac{P}{(BB_N W)^{1/2}} \right] f(a_o/W) \quad (2)$$

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

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B_N b_o} \quad (4)$$

여기서 K 는 응력확대계수, $f(a_o/W)$ 는 형상계수, 구속계수 $\eta = 2 + 0.522b_o/W$, ν 는 푸아송 비, a_o 는 초기 균열길이, W 는 CT시험편의 폭, B 는 CT시험편의 두께, P 는 CT시험편에 부하된 하중, A_{pl} 은 하중-하중선 변위 선도 아래의 면적을 나타내며, b_o 는 초기 리가먼트, B_N 은 시험편의 정미 두께이다.

Table 3 Relationship between J-values and crack growth Δa of the CT specimen by R-curve method

(1) $a_o/W=0.45$

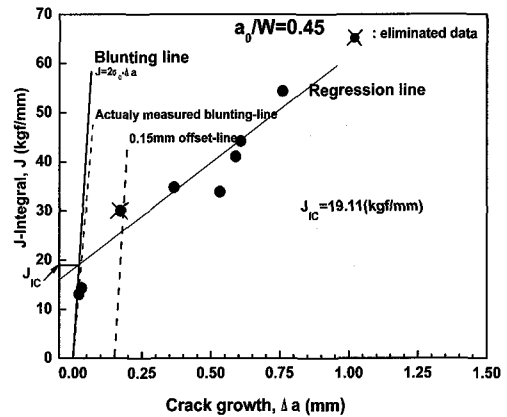
Max. Load (kg ρ)	J_{pl}	J_{el}	J value	Δa
3600	0.00	14.32	14.32	0.031
4600	11.32	18.77	30.10	0.171
4700	16.88	17.98	34.86	0.366
4800	16.54	19.61	36.16	0.560
4900	21.36	19.75	41.10	0.589
5000	24.64	19.59	44.23	0.607
5200	35.28	19.08	54.36	0.760

(2) $a_o/W=0.53$

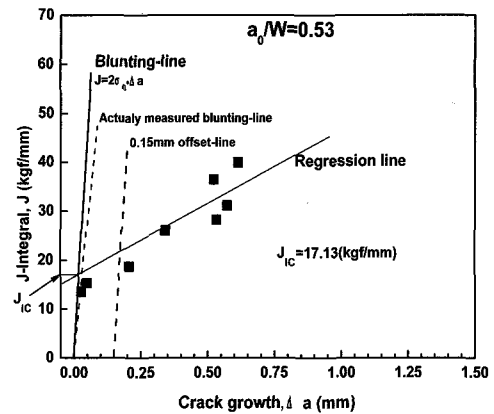
Max. Load (kg ρ)	J_{pl}	J_{el}	J value	Δa
3500	0.00	18.75	18.75	0.021
3650	8.63	17.45	26.08	0.342
3750	12.22	16.02	28.24	0.532
3800	14.26	16.94	31.20	0.571
3900	18.66	17.79	36.45	0.521
4000	22.09	17.86	39.95	0.621

(3) $a_o/W=0.58$

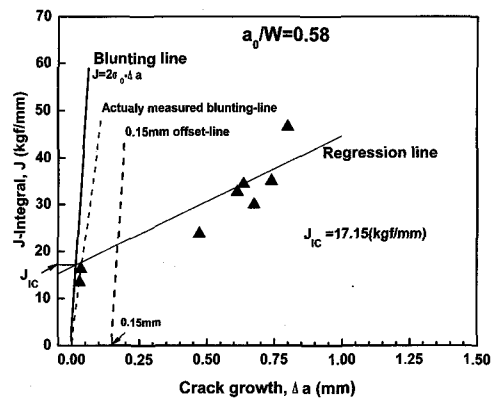
Max. Load (kg ρ)	J_{pl}	J_{el}	J value	Δa
2700	0.00	16.23	16.23	0.036
3050	16.99	19.24	36.24	0.612
3100	16.78	17.86	34.64	0.674
3150	18.05	17.57	35.63	0.635
3200	18.68	16.36	35.04	0.739



(1) $a_o/W=0.45$ CT specimen



(2) $a_o/W=0.53$ CT specimen



(3) $a_o/W=0.58$ CT specimen

Fig. 3 Blunting line and J- Δa curves of the CT specimen by R-curve method

Table 3-(1), (2), (3)은 균열비 a_0/W 가 다른 각각의 시편에 부하된 하중과 필요한 데이터를 식 (1)에 대입하여 계산된 J-적분 값과 현미경으로 측정된 파단면 균열 성장량을 함께 나타낸 것이다. 여기서 Δa 는 시편의 예균열 선단에서 균열 성장량이다.

Fig. 3-(1), (2), (3)는 시편의 폭에 대한 균열 길이의 비에 따른 J-적분과 균열성장량 Δa 와 관계를 나타내는 저항곡선이다.

ASTM E 1737-96^[2] 절차에 따른, 시편 폭에 대한 균열길이의 비의 범위 $0.5 \leq a_0/W \leq 0.75$ 에 속하는 $a_0/W=0.53$ 과 $a_0/W=0.58$ 인 시편에 대한 파괴인성은 각각 $J_{IC}=17.13 \text{ kg}_f/\text{mm}$ 과 $17.15 \text{ kg}_f/\text{mm}$ 로서 거의 같으며, 균열성장량 Δa 는 각각 0.020mm와 0.062mm로 측정되었다. 규정된 a_0/W 범위 밖인 $a_0/W=0.45$ 의 시편의 인성은 $J_{IC}=19.11 \text{ kg}_f/\text{mm}$, $\Delta a=0.075\text{mm}$ 로서 J-적분값이 $1.97 \text{ kg}_f/\text{mm}$ 정도 크게 나타났다.

따라서 파괴인성은 시편형상에 종속하며 규정된 a_0/W 을 지켜야한다는 것을 의미한다고 말할 수 있다.

또한 ASTM E 1737-96^[2] 절차에 따른 가정된 둔화직선(blunting line: 실선)과 J-적분에 대응하는 실측 둔화직선(점선)의 기울기가 비슷하여 둔화직선에 따른 파괴인성의 영향은 무시할 수 있다.

예로서 $a_0/W=0.53$ 의 시편의 경우, 기울기 $J=2\sigma \Delta a_p$ 에 의한 파괴인성은 $J_{IC}=17.13 \text{ kg}_f/\text{mm}$ 이며 실측에 의한 것은 $J_{IC}=17.79 \text{ kg}_f/\text{mm}$ 로서 $0.66 \text{ kg}_f/\text{mm}$ 의 차이가 있다.

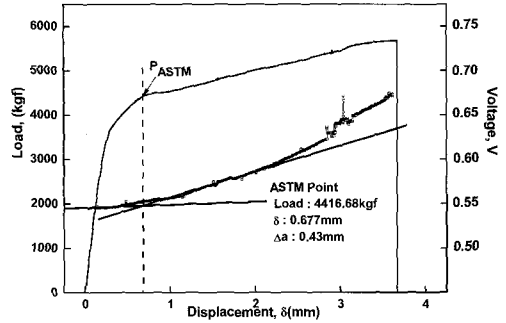
3.2 직류전위차(DCPD)법을 이용한 파괴인성 J_{IC} 의 결정

직류전위차 법에 의하여 파괴인성을 평가할 때 R-곡선 법과 결보기균열비가 같게 되도록 제작하여도 시편이 다르면 초기균열 비 및 가공정도의 차이가 존재할 수 있다. 이에 따라 파괴인성에도 약간의 차이는 피할 수 없을 것이다.

따라서 이에 따른 파괴인성의 오차를 방지하기 위하여 동일 시편에 대해 R-곡선 법과 직류전위차 법

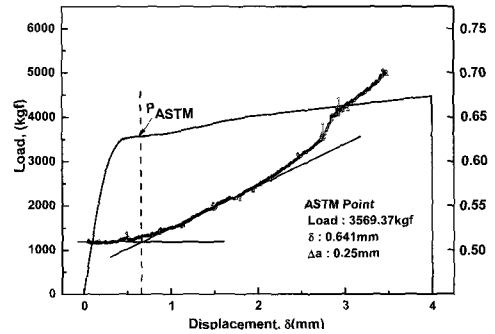
을 동시에 시험함으로써 두 시험법에 의한 파괴개시 인성의 신뢰성 있는 비교를 실시할 수 있을 것이다. (Fig.2 참조)와 Fig.4 (1), (2), (3)에 CT 시편의 균열길이 비 a_0/W 에 따른 하중-변위 선도, 전위차의 변화 거동 및 균열개시하중을 나타내었다.

a/W=0.45 (25.4mm), CT specimen 10 for determining crack growth initiation



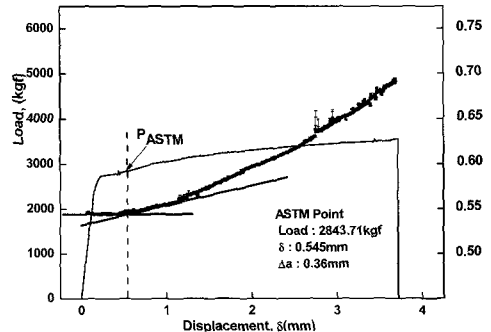
(1) $a_0/W=0.45$ CT specimen

a/W=0.53 (25.4mm), CT specimen 08 for determining crack growth initiation



(2) $a_0/W=0.53$ CT specimen

a/W=0.58 (25.4mm), CT specimen 09 for determining crack growth initiation



(3) $a_0/W=0.58$ CT specimen

Fig. 4 Displacement vs. Load and DC electric potential curves for determining crack growth potential curves for determining fracture toughness on the CT specimen by DCPD method.

ASTM E 1737-96⁽²⁾ 절차에 따라 전위차-변위 곡선상의 두 접선의 교차점에 해당하는 하중 값, 즉 균열개시를 나타내는 하중 P_{ASTM} 을 구하고 이때의 균열선단개구변위(Crack Tip Opening Displacement) δ_{IC} 을 측정했다. 시험에서 얻은 하중과 하중-변위곡선아래 면적 등의 데이터를 사용하여 파괴인성 J_{IC} 을 계산하고 각 P_{ASTM} 하중에 해당하는 균열성장량 Δa 을 측정하였다.

Table 4 J_{IC} , Δa values, δ and P_{ASTM} measured and estimated by ASTM E 1737 -96

a_o/W	Max. Load (kg f)	δ (mm)	P_{ASTM} (kg f)	J_{IC} (kg f/mm)	Δa (mm)
0.45	4900	0.664	4342.29	26.40	0.340
	5000	0.571	4345.67	25.17	0.350
	5680	0.677	4416.68	27.02	0.430
0.53	3900	0.621	3518.13	22.80	0.230
	4000	0.683	3574.89	23.33	0.250
	4480	0.641	3569.37	22.66	0.250
0.58	3150	0.704	2786.13	23.87	0.150
	3400	0.679	2869.05	22.35	0.370
	3560	0.545	2843.71	21.92	0.360

Table 5는 a_o/W 와 파괴인성 측정법에 따른, 즉 직류전위차 법 및 R-곡선 법으로 구해진 평균 파괴인성 J_{IC} 값과 상응하는 균열개시성장량, Δa 을 비교한 것이다.

1) a_o/W 에 따른 파괴인성의 비교

시험 방법에 관계없이 균열길이의 비가 $a_o/W = 0.5$ 보다 작은 $a_o/W = 0.45$ 인 시험편의 파괴인성 값이 균열길이의 비가 0.5보다 큰 $a_o/W = 0.53$ 또는 0.58인 시험편의 파괴인성 값보다 상대적으로 약간 큰 파괴인성 값을 보였다.

2) 시험 방법에 따른 파괴인성의 비교

동일한 $a_o/W = 0.53$ 인 시험편의 파괴인성에서 R-곡선 법은 $J_{IC} = 17.13 \text{ kg f/mm}$ 이나 직류전위차 법에서는 $J_{IC} = 22.93 \text{ kg f/mm}$ 로 나타났으며, a_o/W

$= 0.58$ 인 시험편의 경우도 비슷한 결과를 보였다. 즉, R-곡선 법에 의한 파괴인성 J_{IC} 값은 직류전위차 법에 의한 파괴인성 J_{IC} 보다 작은 값을 나타냈다.

3) 균열성장량의 비교

시험 방법에 따른 각 J_{IC} 에 해당하는 균열 성장량은 $a_o/W = 0.45$ 인 경우, R-곡선 법에서는 균열 개시성장량은 $\Delta a = 0.0735 \text{ mm}$ 였으나 직류전위차 법에 의해서 측정된 $\Delta a = 0.373 \text{ mm}$ 로서 R-곡선 법에 의하여 측정된 Δa 보다 약 5배 크게 나타났다. 또한 $a_o/W = 0.53$ 인 경우, R-곡선 법에서는 균열개시성장량은 $\Delta a = 0.020 \text{ mm}$ 였으나 직류전위차 법에서는 $\Delta a = 0.243 \text{ mm}$ 로서 약 12배의 차이가 나타났다. 따라서 둔화에 의한 균열성장량을 고려할지라도, 균열 개시 순간에서의 균열 성장량을 적절하게 나타내는 시험법은 R-곡선 법이라고 사료된다.

이와 같이 위에서 언급한 결과로 볼 때, ASTM E 1737-96의 절차에 따른 $0.5 < a_o/W < 0.75$ 에 해당하는 2종류의 시험편에 대하여 R-곡선 법에 따라 시험된 평균 파괴인성 값은 $J_{IC} = 17.14 \text{ kg f/mm}$ 이다. 따라서 이 값을 이 시험에 사용된 재료가 갖는 기계적 물성치로 간주하는 것이 바람직하며 직류전위차 법에 의한 평균 파괴인성 값은 약 5.68 kg f/mm 만큼 과대평가 되었다.

Table 5 Relationship between fracture toughness values and crack growth at the initiation of crack by both R-curve method and DCPD method

a_o/W	R-curve method		DCPD method	
	J_{IC} (kg f/mm)	Δa (mm)	J_{IC} (kg f/mm)	Δa (mm)
0.45	19.11	0.0735	26.20	0.373
0.53	17.13	0.020	22.93	0.243
0.58	17.15	0.062	22.71	0.29

결과적으로 ASTM E 1737-96^[2]에 의한 직류 전위차 법만으로 측정된 파괴인성의 평가 기법의 적용에는 신중을 기할 필요가 있다고 사료된다.

4. 결 론

R-곡선 법 및 직류전위차 법을 이용한 두께 25.4mm인 SS400 일반구조용 압연강재 에 대한 파괴인성평가 시험의 결론은 다음과 같다.

- 1) R-곡선 법에서 이론둔화직선과 J -적분에 대응하는 실측 둔화직선에 의한 파괴개시인성의 차이는 거의 없다.
- 2) ASTM E 1737-96의 절차에 따른 $0.5 < a_o/W < 0.75$ 에 해당하는 시편에 대한 파괴인성 값은 규정된 a_o/W 범위 밖인 $a_o/W=0.45$ 인 시편의 파괴인성 값보다 $1.97 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}$ 작게 나타났다. 즉 파괴개시인성은 균열길이의 비에 의존하였다.
- 3) R-곡선 법에 의한 파괴개시인성 J_{IC} 값은 직류 전위차 법에 의한 파괴개시인성 J_{IC} 보다 작은 값을 나타냈다.
- 4) 파괴개시이전의 균열선단 둔화에 따른 균열진전량을 고려할 때, R-곡선 법은 직류전위차 법보다 안정균열성장 개시 인성을 적절하게 나타내었으며, 재료의 파괴개시인성 값은 $J_{IC} = 17.14 \text{ (kg}\sqrt{\text{mm}})$ 이다.

참고문헌

- [1] 國尾武 外3人 “破壞力學實驗法”, 朝倉書店, 1984.
- [2] ASTM E 1737-96, “Standard test method for J-integral characterization of fracture toughness”, ASTM, 1996.
- [3] ASTM E 1290-93, “Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement”, ASTM, 1998.
- [4] Aronson, G. H. and Ritchie, R. O. J., Journal of Testing and Evaluation, Vol. No. 4, pp. 208, 1979.
- [5] 원종일, 석창성, “역사이클하중하의 파괴저항 특성평가방법에 관한 연구”, 대한기계학회, 제 23권, 제 2호, pp. 246-253, 1999.
- [6] 배성인, “직류전위차법을 이용한 랜덤하중하의 피로균열 진전율에 대한 신뢰성 공학적 연구”, 대한기계학회, 제20권, 제4호, pp. 473-480, 1996.

저 자 소 개



장석기 (張石基)

1973년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1988년 전남대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1998. 1~1999년 2 University of South Carolina 연수 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수



한민수 (韓民洙)

1974년 4월생, 1997년 목포해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 2004년 목포해양대학교 대학원 기관시스템공학부 응용역학·재료공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 박사과정