

<論 文>

재료의 탄소성 파괴인성치 J_{IC} 의 온도 의존성에 관한 연구 (I)
— ASTM과 JSME의 J_{IC} 시험법에 관한 비교연구 —

석창성* · 최용식** · 양원호*** · 김영진***
(1989년 2월 2일 접수)

A Study on the Effect of Temperature on the Elastic-Plastic
Fracture Toughness J_{IC} of Materials (I)
— A Comparative Study of J_{IC} Test Methods Recommended by ASTM and JSME —

C. S. Seok, Y. S. Choy, W. H. Yang and Y. J. Kim

Key Words: Toughness(인성), J -Integral(J -적분), J_{IC} Test Method(J_{IC} 시험법), R -Curve (R -곡선), Blunting Line(둔화선), ASTM E 813-81, ASTM E 813-87, JSME S 001-1981, Conversion Method(환산법)

Abstract

Elastic-plastic fracture toughness J_{IC} can be used as an effective design criterion in elastic plastic fracture mechanics. In the J_{IC} test methods approved by ASTM and JSME, there are discrepancies such as the definition of J_{IC} , the slope of the blunting line, curve fitting method and the measurement of crack extension etc. The objective of this paper is to evaluate the effect of these discrepancies on the determination of J_{IC} values. Fracture toughness tests were performed on A516, SA508 and SCM415 steels, and test results were analyzed according to ASTM E 813-81, ASTM E 813-87 and JSME S 001-1981. Results showed significant differences depending on the analysis methods. Therefore, a conversion equation between two ASTM methods was proposed, and the conversion error was within acceptable range (less than 8.5%).

기 호 설 명

- | | |
|--|-------------------------------|
| Δa : 균열진전량 | M : R -곡선의 기울기 |
| C_1, C_2 : 상수 | SZW : Stretch Zone Width |
| J : J -적분 값 | SZW_c : SZW의 임계치 |
| J_{IC} : J 의 임계치, 재료의 평면변형 탄소성과 파괴인성치 | σ_{ys} : (항복강도+인장강도)/2 |
| J_{IC-81} : ASTM E 813-81법으로 구한 J_{IC} | |
| J_{IC-87} : J_{IC-81} 로부터 환산된 J_{IC} | |

1. 서 론

선형파괴역학이 적용되기 어려운 연성재료의 파괴해석인자로는, 1968년에 Rice⁽¹⁾가 제안한 J -적분이 널리 사용되고 있다. J -적분은, 단위두께당 균열이 전파하는데 소요되는 에너지로 정의되며, 그 임계치인 J_{IC} 는 탄소성파괴인성치로 구조물의

*정회원, 성균관대학교 대학원
**정회원, 성균관대학교 공과대학 기계공학과
***정회원, 성균관대학교 공과대학 기계설계학과

안전성 평가에 필수적인 재료의 고유한 특성치이다. 즉, J -적분 값이 그 임계치인 J_{IC} 값보다 작을 때 그 구조물은 안전하다고 할 수 있다.

이러한 J_{IC} 는 실험에 의하여 얻어지며, 이를 위하여 ASTM(American Society for Testing and Materials)과 JSME(Japanese Society of Mechanical Engineers)에서는 표준시험법을 규정한 바 있다. ASTM E-24 위원회는 1981년 J_{IC} 시험법인 E 813-81⁽²⁾을 제정하였으며, 1987년에 E 813-87⁽³⁾로 이를 개정하였다. JSME의 탄소성과파괴인성시험방법기준작성분과회도 1981년 J_{IC} 시험법인 JSME S 001-1981⁽⁴⁾을 제정하였다.

그러나 이들 표준시험법은 J_{IC} 를 정의하는 방법이나, 유효 데이터(data)의 범위, R -곡선의 정의, 둔화선(blunting line)의 기울기 측정방법, 균열길이의 측정방법이나 실험방법들에 있어서 다소 다른 점이 있고, 이 밖에도 많은 문제점을 내포하고 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 특히, ASTM의 개정된 J_{IC} 시험법인 E 813-87법으로 구한 J_{IC} 값은, 일반적으로, E 813-81법으로 구한 J_{IC} 값보다 크게 나타난다. 이러한 차이로 인하여 종전에 E 813-81법으로 해석된 많은 데이터들을 사용할 수 없게 되었다. J_{IC} 의 실험과 해석은 많은 시간과 경비가 소요되며 전문적인 지식이 요구되므로 종전에 E 813-81법으로 해석된 데이터들을 이용할 수 있다면 많은 잇점이 있을 것이다. 그러므로 종전에 E 813-81법으로 해석된 J_{IC} 값을 E 813-87법으로 해석된 J_{IC} 값으로 환산할 수 있으면 좋겠다.

따라서, 본 연구에서는 실험방법과 해석방법 등의 차이가 J_{IC} 값에 미치는 영향을 고찰하여 보았으며, E 813-81법으로 해석된 J_{IC} 값을 E 813-87법으로 해석된 J_{IC} 값으로 환산하는 방법을 제안하고 몇 가지 재료와 환경에서 그 오차를 검토하였다.

2. J_{IC} 시험법

2.1 ASTM의 J_{IC} 시험법^(2,3)

ASTM E 813의 J_{IC} 시험법에는 다 시편법(multiple specimen technique)과 단일 시편법(single specimen technique)이 있다. 먼저 다 시편법과 단일 시편법으로 J 와 Δa 를 구하고, J - Δa 좌표에 도시하여 R -곡선을 구한다. ASTM E 813-81법에서는 Fig. 1과 같이 직선으로 맞춘(fitting) R -곡선과 $J = 2\sigma_{ys}\Delta a$ 인 둔화선이 만나는

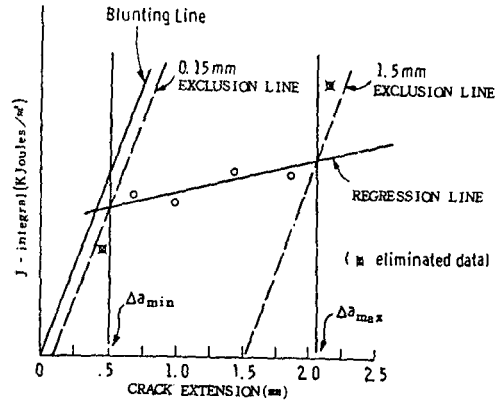


Fig. 1 ASTM E 813-81 method

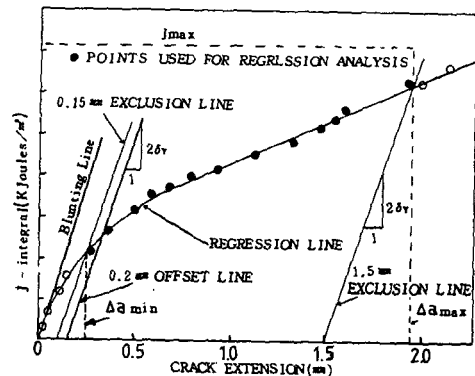


Fig. 2 ASTM E 813-87 method

점에서 J_{IC} 를 결정한다. 한편 ASTM E 813-87법에서는 Fig. 2에서와 같이 R -곡선을 $J = C_1(\Delta a)^{C_2}$ 로 맞추고, 둔화선을 0.2mm 이동시킨 $J = 2\sigma_{ys}(\Delta a - 0.2)$ 인 직선과 R -곡선이 만나는 점에서 J_{IC} 를 결정한다.

2.2 JSME의 J_{IC} 시험법^(4,8,9)

일본의 JSME S 001-1981의 J_{IC} 시험법에는 다 시편법인 R -곡선법과 SZW(stretch zone width)법, 단일 시편법인 초음파법, 전위차법 및 음향방출법이 있다. R -곡선법은 Fig. 3과 같이 둔화선을 실제 실험에 의하여 구하고, R -곡선을 그릴 때 Δa 가 1.0mm 이하인 데이터를 이용하여 직선으로 그리며, 둔화선과 R -곡선의 교점에서 J_{IC} 를 구한다. SZW법은 실험에 의하여 구한 J -SZW 데이터를 J -SZW 좌표에 도시하고 둔화선을 긋는다. 시편에 큰 하중을 가하여 SZW_C를 구한 다음, Fig. 4

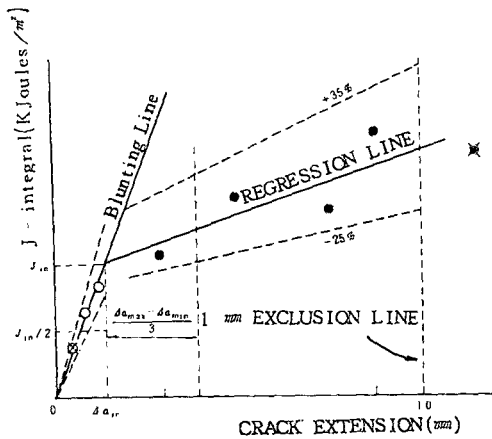


Fig. 3 R-Curve method

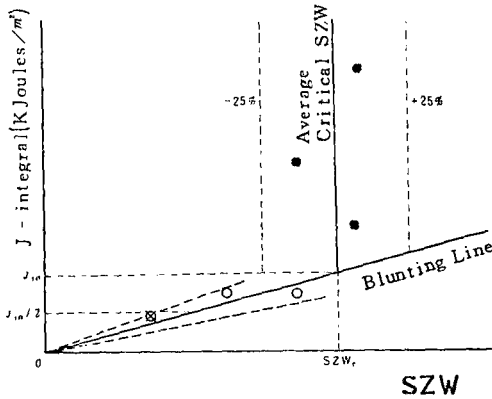


Fig. 4 SZW method

와 같이 $J-SZW_c$ 의 데이터를 $J-SZW$ 좌표에 도시하고, 그 평균값과 둔화선과의 교점에서 J_{IC} 를 결정한다.

3. 실험

3.1 시편

시편재료로는 A516 Grade 70 압연강, SA508 단조강 및 SCM415 압연강을 사용하였으며, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2와 같다.

A516 Grade 70 압연강의 시편은 25.4mm 두께의 압연강판에서 Fig. 5와 같이 T-L 방향으로 시편을 채취하였고, SA508 단조강의 시편은 250mm 두께의 원통형단조재의 내부 1/4 위치에서 채취하였으며, SCM415 압연강의 시편은 25.4mm 두께의 압연강판에서 L-T 방향으로 채취하였다. 시편은 ASTM E 813의 CT(compact tension) 표준시편으로 제작하였으며, 형상 및 치수는 Fig. 6과 같다.

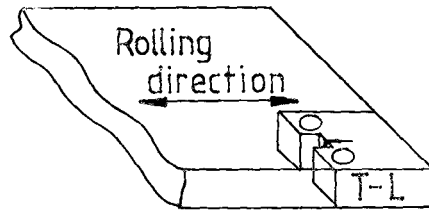


Fig. 5 Crack plane orientation

Table 1 Chemical composition of materials (Wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ni	V
A516	.21	.24	1.07	.013	.004	—	.06	.035	.20	.38
SA508	.17	.04	1.42	.004	.003	.22	.58	.003	.98	.003
SCM415	.15	.22	.71	.02	.01	1.0	.21	—	—	—

Table 2 Mechanical properties

	Tensile strength (kgf/mm²)	Yield strength (kgf/mm²)	Elongation (%)
A516	60.0	41.6	22
SA508	60.9	46.8	27.5
SCM415	85.1	65.0	21

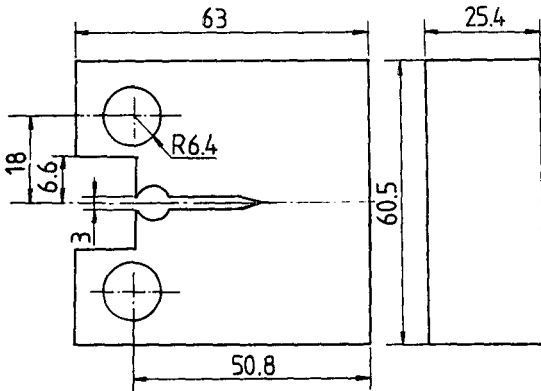


Fig. 6 Dimensions of specimen

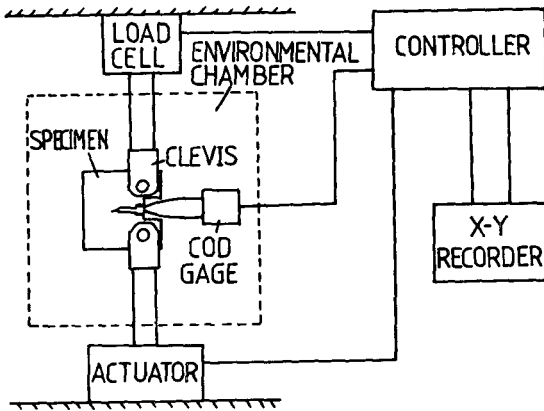


Fig. 7 Schematic diagram of testing system

3.2 실험장치

시험기로는 인스트론사, 25톤 용량의 Servohydraulic Computer Controlled Materials Testing System을 사용하였다. 실험온도는 인스트론사의 3111 모델인 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 정확도를 가진 Environmental Chamber System을 사용하여 조절하였다. 하중선의 변위는 인스트론사의 변위게이지(COD gage)를 사용하여 측정하였다. Fig. 7은 본 실험에서 사용한 실험장치의 약도이다.

3.3 실험방법

A516 Grade 70 압연강의 시편을 ASTM E 813법에 따라 다 시편법(multiple specimen technique)으로 실험을 하였으며, 그 결과를 ASTM E 813-81법과 ASTM E 813-87법으로 해석하였다. 또 ASTM법과 JSME법을 비교하기 위하여, JSME S

001-1981법에 따라 다 시편법인 R-곡선법과 SZW 법으로 실험을 하였다. 실내온도 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 실험을 하였으며, 실험 후 300°C 전기로에서 10분간 가열착색(heat tinting)을 한 후 시편을 파단하여 균열길이를 측정하였다. SZW와 SZW_c는 전자현미경(SEM)으로 100배 확대하여 측정하였다.

SA508 단조강과 SCM415 압연강의 J_{IC} 실험은 ASTM E 813의 단일 시편법으로 실험을 하여 그 결과를 E 813-81법과 E 813-87법으로 해석하였다. 이때 기계적 성질은 상온의 값을 이용하였다. 실험온도는 Environmental Chamber System을 사용하여 0°C , 20°C , 40°C , 60°C , 80°C 로 변화시켰다. 단일 시편법의 실험해석은 컴퓨터를 이용하여 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

A516 Grade 70 압연강을 이용하여 ASTM법과 JSME법의 다 시편법으로 J_{IC} 실험을 하였다.

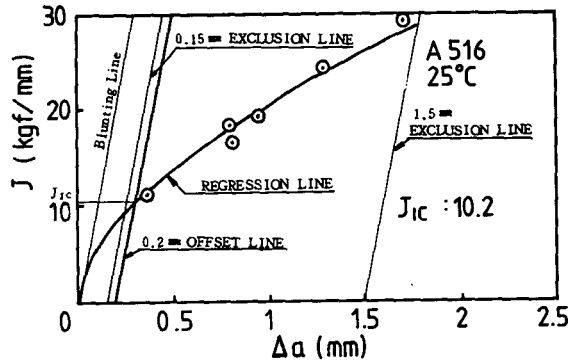


Fig. 8 $J-\Delta a$ curve by ASTM E 813-87

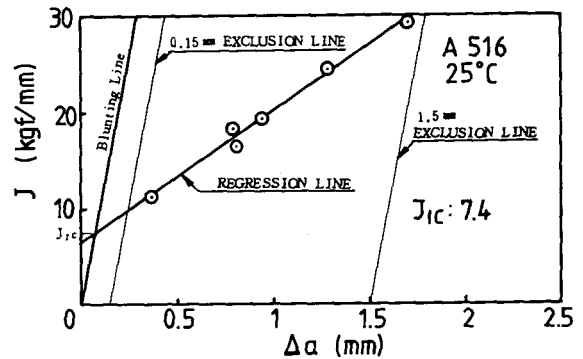


Fig. 9 $J-\Delta a$ curve by ASTM E 813-81

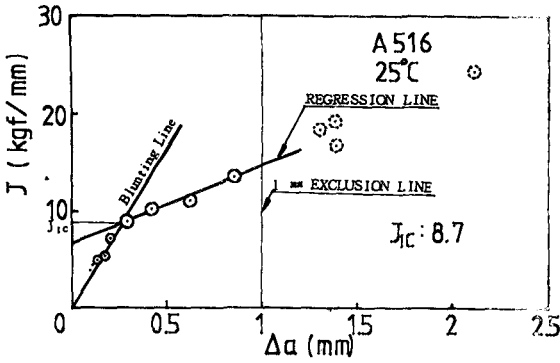


Fig. 10 $J-\Delta a$ curve by JSME S 001-1981

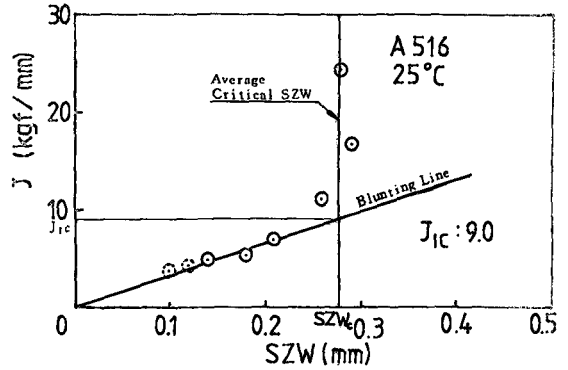


Fig. 11 $J-SZW$ curve

Table 3 Test results

Material	Temp. (°C)	J_{IC} (kgf/mm)		Initial crack length (mm)	Crack extension (mm)
		E 813-81	E 813-87		
SA508	0	28	57	31.3	1.78
	20	60	73	33.4	2.14
	40	69	80	32.5	2.27
	80	73	81	31.6	2.26
SCM415	20	41	47	30.8	1.69
	40	44	51	29.8	1.62
	60	44	54	29.3	1.75
	80	55	57	31.1	2.16

ASTM E 813의 다 시편법인 R-곡선법으로 실험을 하여, ASTM E 813-87법으로 해석한 결과는 Fig. 8과 같으며, 여기에서 J_{IC} 는 10.2kgf/mm로 나타났다. 같은 실험결과를 ASTM E 813-81법으로 해석하면 Fig. 9와 같으며 이 해석결과 J_{IC} 는 7.4kgf/mm로 나타났다.

JSME의 S 001-1981의 실험방법에 따라 R-곡선법으로 실험한 결과는 Fig. 10과 같으며, 이 때의 J_{IC} 값은 8.7kgf/mm로 나타났다. 또, JSME S 001의 SZW법으로 실험한 결과는 Fig. 11과 같으며, J_{IC} 값은 9.0kgf/mm로 나타났다.

한편 SCM415강과 SA508강에 대하여는 단일 시편법으로 실험을 하였으며, 온도변화에 따른 J_{IC} 값은 Table 3과 같다.

4.2 R-곡선에 관한 고찰

A516 Grade 70강의 25°C에서의 실험결과를 이용

하여 각 시험법에 따라 최소자승법으로 구한 R-곡선의 식은 다음과 같다.

$$\text{ASTM E 813-81} : J = 13.6 \Delta a + 6.4 \quad (\text{Fig. 9})$$

$$\text{ASTM E 813-87} : J = 20.5 (\Delta a)^{0.58} \quad (\text{Fig. 8})$$

$$\text{JSME S 001-1981} : J = 7.8 \Delta a + 6.6 \quad (\text{Fig. 10})$$

ASTM E 813-81법과 JSME S 001-1981법으로 구한 R-곡선의 식을 비교하면, J 축 절편은 6.4와 6.6으로 비슷하나, 기울기는 13.6과 7.8로 ASTM법의 경우가 훨씬 크게 나타났다. 이러한 기울기의 차이는 균열진전량 Δa 의 측정방법이 서로 다르기 때문인 것으로 생각된다. Δa 의 측정시 ASTM법에서는 전체 9점에서 측정하여 그 평균값을 Δa 로 하지만, JSME법에서는 중앙 3점에서 측정하여 그 평균값을 Δa 로 한다^(3,4). 따라서 JSME법으로 측정된 Δa 가 ASTM법으로 측정된 Δa 보다 크게 나타나며, 그로 인하여 R-곡선의 기울기가 달라진다고 생각된다.

4.3 둔화선에 관한 고찰

둔화선(blunting line)은 ASTM법에서는 $J=2\sigma_{ys}\Delta a$ 로 되어 있고, JSME법에서는 실험에 의하여 구하도록 되어 있다^(3,4). 본 실험에서는 A516 Grade 70 압연강에 대하여 구한 둔화선의 식은 다음과 같다.

$$\text{ASTM법} : J = 2\sigma_{ys}\Delta a = 101.6\Delta a$$

$$\text{JSME법} : J = 0.64\sigma_{ys}\Delta a = 32.6\Delta a$$

J_{IC} 값은 둔화선과 R-곡선의 교점에서 결정되므로, 둔화선의 차이가 J_{IC} 값에 영향을 미치게 될 것이다. ASTM E 813-81법의 결과에 실제 실험에서 구한 $J = 0.64\sigma_{ys}\Delta a$ 인 둔화선을 적용하면 J_{IC} 값이 11.0kgf/mm로 되어 ASTM E 813-81법으로 구한 J_{IC} 값인 7.4kgf/mm보다 훨씬 크게 나타난다. 즉, 둔화선을 $J = 2\sigma_{ys}\Delta a$ 로 함으로서 실험으로 구할 때보다 J_{IC} 값이 과소평가 되는 것으로 나타난다. 그러나 JSME법에 따라 실험적으로 둔화선을 구할 경우 전자현미경을 이용하여 SZW를 측정하여야 하므로 비경제적이며, 전자현미경을 이용하여도 SZW를 명확히 관찰하기가 어렵다는 단점이 있다.

ASTM E 813-81법으로 구한 J_{IC} 값보다 JSME의 R-곡선법으로 구한 J_{IC} 값이 크게 나타났다. 그 차이는 주로 둔화선의 기울기 차이에서 연유된다고 생각되며 Δa 측정법의 차이에 따른 R-곡선의 차이에도 연유된다고 생각된다.

JSME법의 R-곡선법의 결과와 SZW법의 결과는 거의 비슷하게 나타났는데, 이는 동일한 둔화선의 식을 사용하였기 때문일 것이다. SZW법의 경우도 R-곡선법에서와 같이 둔화선의 기울기가 J_{IC} 값에 큰 영향을 미친다. 따라서 정확한 둔화선을 구하여야 한다는 어려움이 있다. 그러나 SZW법의 경우, 둔화선만 구하여지면 균열진전률이 커서 유효 데이터 범위 안에 적절한 데이터를 얻기 어려운 경우에도 쉽게 J_{IC} 를 구할 수 있는 장점이 있다⁽⁵⁾.

4.4 유효 Δa 의 범위에 대한 고찰

ASTM법과 JSME법에서 유효 Δa 의 범위가 서로 다르다. 따라서 본 연구에서는 JSME의 R-곡선법으로 해석한 Δa 의 사용범위가 J_{IC} 값에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 10에서 유효 Δa 의 범위에 따른 R-곡선의 식과 J_{IC} 값을 다음과 같다.

$$\Delta a < 1.0\text{mm} : J = 7.8 \Delta a + 6.6, J_{IC} = 8.7\text{kgf/mm}$$

$$\Delta a < 1.5\text{mm} : J = 8.8 \Delta a + 6.1, J_{IC} = 8.4\text{kgf/mm}$$

$$\Delta a < 2.5\text{mm} : J = 8.7 \Delta a + 6.1, J_{IC} = 8.4\text{kgf/mm}$$

Δa 의 사용 범위에 따라 R-곡선의 식에는 약간의 차이가 있으나 J_{IC} 값에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.5 ASTM E 813법에 대한 고찰

ASTM E 813-81법으로 해석한 J_{IC} 값은 7.4kgf/mm이나 같은 데이터를 E 813-87법으로 해석하면

Table 4 Conversion errors

Material	Test method	Temp. (°C)	E 813-81			E 813-87 J_{IC} (kgf/mm)	Error (%)
			J_{IC-81} (kgf/mm)	Slope (kgf/mm ²)	J_{IC-87} (kgf/mm)		
A516	Multiple specimen technique	25	7.4	13.6	10.5	10.2	2.9
SA508	Single specimen technique	0	28	61.9	57	57	0
		20	60	48.6	78	73	6.8
		40	69	43.0	83	80	3.8
		80	73	42.3	87	81	7.4
SCM415	Single specimen technique	20	41	38.7	51	47	8.5
		40	44	36.4	54	51	5.9
		60	44	36.1	54	54	0
		80	55	16.3	59	57	3.5

J_{IC} 값이 10.2kgf/mm가 된다. 이 밖에도 Table 3에서와 같이 E 813-81로 해석한 J_{IC} 값과 E 813-87로 해석한 J_{IC} 값에는 큰 차이가 있는데, 이들 값의 차이는 J_{IC} 를 균열이 0.2mm 안정성장했을 때의 J 값으로 정의한 데 기인한다고 하겠다. 이런 관점에서 볼 때 ASTM E 813-81법에 따른 직선의 R -곡선과, 둔화선을 0.2mm 이동시킨 선이 만나는 점에서의 J_{IC} 를 구하면 10.5kgf/mm가 되어, ASTM E 813-87법으로 해석한 J_{IC} 값과 비슷하게 나타난다. 즉, E 813-87법으로 해석할 때 R -곡선을 직선으로 하여도 R -곡선에 따른 J_{IC} 값에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 ASTM E 813-87법으로 J_{IC} 를 구할 때, R -곡선을 직선으로 하거나 곡선으로 하거나 J_{IC} 값이 같다고 가정하고 직선 R -곡선의 기울기 M 을 알면, ASTM E 813-81로 구한 J_{IC} 값을 ASTM E 813-87로 구한 J_{IC} 값으로 환산할 수 있다고 보며, 그 환산식은 다음과 같다.

$$J_{IC-87} = J_{IC-81} + \frac{0.4M \sigma_{ys}}{2\sigma_{ys} - M} \quad (1)$$

A516 강에 대한 해석결과에서 얻어진 환산식 (1)의 타당성을 검토하기 위하여, (1)식을 SA508 및 SCM415강의 해석결과에도 적용하여 보았다. Table 4는 이 때 얻어진 환산오차를 나타낸다. Table 4에서 재료의 특성과 환경이 다르더라도, 최대 환산오차가 8.5%로, 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

ASTM과 JSME의 J_{IC} 시험법으로 J_{IC} 를 측정하고, 시험법상 J_{IC} 값에 영향을 주는 여러 인자들에 대하여 고찰하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험적으로 구한 A516 Grade 70 압연강의 둔화선(blunting line)의 식은 $J = 0.64 \sigma_{ys} \Delta a$ 로 ASTM E 813의 $J = 2\sigma_{ys} \Delta a$ 와는 큰 차이가 있었다. 따라서 ASTM E 813-81법으로 구한 J_{IC} 값보다 JSME법으로 구한 J_{IC} 값이 크게 나타났다.

(2) Δa 의 사용 범위를, $\Delta a < 1.0\text{mm}$ 에서 $\Delta a < 2.$

5mm까지 확장하여도 J_{IC} 값에는 영향을 미치지 않았다.

(3) ASTM E 813-87법으로 J_{IC} 를 해석할 때, R -곡선을 직선으로 하여도 J_{IC} 값에는 거의 영향이 없다.

(4) ASTM E 813-87법으로 구한 J_{IC} 값은 ASTM E 813-81법으로 구한 J_{IC} 값보다 크게 나타나며, 아래식에 의하여 E 813-81법의 결과를 E 813-87법의 결과로 환산할 수 있고, 본 연구의 경우 그 오차는 8.5% 이하였다.

$$J_{IC-87} = J_{IC-81} + \frac{0.4M \sigma_{ys}}{2\sigma_{ys} - M}$$

참 고 문 헌

- (1) Rice, J. R., 1968, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 379~386.
- (2) "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness", ASTM E 813-81.
- (3) "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness", ASTM E 813-87.
- (4) "彈塑性破壞靱性 J_{IC} 試驗方法", JSME S 001-1981.
- (5) Schwalbe, K. H. and Heerens, J., 1985, "Suggestion for a Modification of ASTM E 813", ASTM STP 856, pp. 411~416.
- (6) Voss, B. and Mayville, R. A., 1985, "The Use of the Partial Unloading Compliance Method for the Determination of J - R Curves and J_{IC} ", ASTM STP 856, pp. 117~130.
- (7) Futato, R. J., Aadland, J. D., Van Der Sluys, W. A. and Lowe, A. L., 1985, "A Sensitivity Study of the Unloading Compliance Single Specimen J -Test Technique", ASTM STP 856, pp. 84~103.
- (8) 平野一美, 1984, "彈塑性破壞靱性", 破壞力學實驗法, 朝倉書店, pp. 85~107.
- (9) Kobayashi, H., Nakamura, H. and Nakazawa, H., 1985, "Comparison of J_{IC} Test Methods Recommended by ASTM and JSME", ASTM STP 856, pp. 3~22.