

주조 스테인리스강 CF8M의 430℃ 열화거동에 관한 연구 (Ⅲ) - 탄소성 파괴인성 평가 -

권재도* · 인재현** · 박중철** · 최성중*** · 박윤원****
(1999년 9월 4일 접수)

A Study on the 430℃ Degradation Behavior of Cast Stainless Steel(CF8M) (Ⅲ) - Evaluation of Elastic-Plastic Fracture Toughness -

Jae Do Kwon, Jae Hyun Ihn, Joong Cheul Park,
Sung Jong Choi and Yun Won Park

Key Words: CF8M(주조 스테인리스강), Virgin Material(건전재), Degraded Material(열화재), Elastic-Plastic Fracture Toughness Test(탄소성 파괴인성 시험), Unloading Compliance Method(제하 컴플라이언스법), Stretch Zone Width Method(스트레치존 법)

Abstract

A cast stainless steel may experience an embrittlement when it is exposed to approximately 300℃ for long period. In the present investigation, The three classes of the thermally aged CF8M specimen are prepared using an artificially accelerated aging method. Namely, after the specimen are held for 300, 1800 and 3600hrs. at 430℃ respectively, the specimens are quenched in water to room temperature. Load versus load line displacement curves and J-R curves are obtained using the unloading compliance method. J_{IC} values are obtained following ASTM E 813-87 and ASTM E 813-81 methods. In addition to these methods, J_{IC} values are obtained using SZW(stretch zone width) method described in JSME S 001-1981. The results of the unloading compliance method are $J_Q = 485.7 \text{ kJ/m}^2$ for virgin material, J_{IC} of the degraded materials associated with 300, 1800 and 3600hrs are obtained 369.25 kJ/m^2 , 311.02 kJ/m^2 , 276.7 kJ/m^2 , respectively. The results of SZW method are similar to those of the unloading compliance method. Through the elastic-plastic fracture toughness test, it is found that the value of J_{IC} is decreased with increasing of the aging time. The results obtained through the investigation can provide reference data for a leak before break(LBB) of reactor coolant system of nuclear power plants.

1. 서 론

주조 스테인리스강(CF8M)은 원전 가압경수로형 1차 배관계통에 주로 사용되며, 운전온도인 290~330℃에서 장시간 사용될 때 기계적 특성이

변화하는 열화현상이 일어나게 된다. 이러한 열화현상으로 인하여 조직 및 기계적인 강도가 저하하게 되어 건전성에 위험이 초래될 수도 있다.^(1~6)

특히 파괴인성의 저하는 발전소 가동 중 갑작스런 파손 또는 누출로 인한 가동정지를 초래할 수 있기 때문에 원전의 1차 압력계통의 부품들에 대하여 파괴인성에 대한 기준치를 정하여 설비의 안전여부를 항상 확보할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 원자력 발전소 1차 계통의 배관 재료로 사용되는 주조 스테인리스강 CF8M을 430℃에서 모의 가속 열화방법으로 열화

* 회원, 영남대학교 기계공학부
E-mail : jdkwon@yucc.yeungnam.ac.kr
TEL : (053)810-2462 FAX : (053)813-3703

** 회원, 영남대학교 대학원

*** 영남대학교 공업기술연구소

**** 회원, 한국원자력안전기술원

시간을 달리하여 각 단계별 열화재를 제작하고,^(7,8) 건전재 및 각 단계별 모의 열화재에 대하여 ASTM 방법에 의한 J-R 곡선 및 탄소성 파괴인성치(J_{IC})와 JSME 방법중의 스트레치존법에 의한 파괴인성치를 구하여 두 방법에 의한 파괴인성치 값을 비교하였다. 또한 열적열화가 파괴인성치에 미치는 영향을 분석하고 건전성 평가에 활용될 수 있는 자료를 제시하고자 한다.

2. 시험 재료 및 시험방법

본 연구에 사용된 재료는 원자력 발전소의 1차 배관계통에 사용되는 재료로서, ASTM A351 Grade CF8M 주조 스테인리스강이며 화학성분 및 기계적 성질을 CF8M 열화재등에 관한 일련의 연구결과⁽⁸⁾에 나타내었다.

열화가 재료강도에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 장기 사용된 실제의 열화재로서 평가하는 것이 보다 이상적이지만, 현 상황에서 실제 사용된 열화재를 입수하기는 거의 불가능한 상태이다. 따라서 실험실에서 모의적으로 가속해서 열화재를 제작하는 방법을 선택하였다.⁽⁸⁾

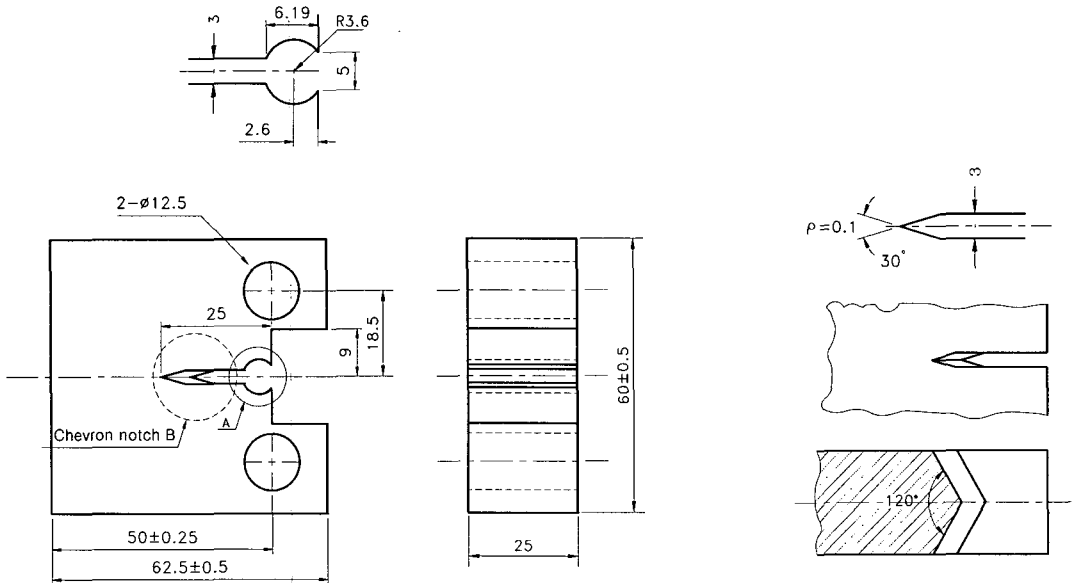
따라서 본 연구에서는 열화재 중에서 충격에너지의 차이가 현저한,⁽⁸⁾ 즉 430℃에서 300시간, 1800시간 및 3600시간 유지 후 수냉(water quenching)하여 제작한 것을 사용하였다.

본 실험에 사용된 탄소성 파괴인성 시험편은 ASTM E813-87⁽⁹⁾에 따른 CT 시험편(compact tension specimen)으로서 두께(B) 25mm를 기준으로 제작하였으며 그 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

시험편의 노치 선단에는 피로 예균열을 도입하기 위하여 ASTM E1152-87, E813-87의 조건을 만족시키는 범위내에서 수행하였으며, 사용된 시험기는 유압서보피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine)로 최대용량은 10ton이이고, 시험조건은 응력비, $R \leq 0.1$ 범위인 0.05로 하였다.

피로 예균열 도입 후 측면홈의 가공방법은 ASTM 규격에 따라 시험편 두께(B)의 10%씩, 전체 20%의 양측면홈(Side groove)가공을 하였다. 측면홈은 60° 각도의 노치커터를 이용하여 피로 예균열과 일치하도록 가공하였으며, 선단 곡률반경은 0.4mm로 하였다. 따라서 시험편의 두께가 25mm인 경우에 시험에 사용한 양 측면홈 가공부

Detail of A



(Dimension : mm)

Chevron notch B

Fig. 1 Geometry of J_{IC} specimen

시험편의 순두께(B_N)는 20mm이다.

탄소성 파괴인성을 평가하는 방법에는 하나의 시험편으로 실험하는 방법인 단일 시험편법(single-specimen method)과 여러개의 시험편으로 실험을 하는 복수 시험편법(multi-specimen method)이 있다.

복수 시험편법에는 R곡선법,⁽¹⁰⁾ 스트레치존(stretch zone width : SZW)법^(11,12) 등이 있고, 단일시험편법에는 제하 컴플라이언스(unloading compliance method)법,⁽¹³⁾ 전위차법,⁽¹⁴⁾ 초음파법 및 음향 검출법 등이 있다.

본 연구에서는 단일 시험편법 중에서 제하 컴플라이언스법 및 복수 시험편법 중에 하나인 스트레치존법을 이용하여 J-R곡선⁽¹⁵⁾ 및 J_{IC} 의 값을 구해보았다.

3. 실험 결과

3.1 제하 컴플라이언스법에 의한 J-R곡선 및 J_{IC} 실험

탄소성 파괴인성 시험방법에 따라 하중 및 하중선변위 선도를 그리고, 시험편을 파단하여 Δa 를 측정 한 후 J-R곡선 및 ASTM E 813-87법으로 J_{IC} 를 측정하였다.

건전재 및 각 단계별 열화재들의 탄소성 파괴인성 실험을 한 종류의 재료당 2개씩 수행한 결과 중의 작은 값을 가지는 하중 P와 하중선변위(COD)의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2로부터 J 값은 식 (1)을 사용하여 구하고, 균열의 길이는 식 (2)를 사용하여 구하였다. 이때 컴플라이

언스를 계산하기 위해 제하곡선에서 취한 데이터의 범위는 10~90%이다.

J값은 다음과 같이 탄성상태의 J_{el} 와 소성상태의 J_{pl} 과의 합으로 나타내어진다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \tag{1}$$

여기서 $J_{el} = K^2(1 - \nu^2)/E$,

$$J_{pl} = \eta A_{pl} / (B_N b_0)$$

$\eta = 2 + 0.522 b_0 / W$ 이다.

균열의 길이는 다음과 같이 제하시의 컴플라이언스의 변화로부터 구할 수 있다.

$$a/W = 1.00196 - 4.06319 U_L + 11.242 U_L^2 - 106.043 U_L^3 + 464.335 U_L^4 - 650.677 U_L^5 \tag{2}$$

여기서

$$U_L = 1 / [(BEC)^{1/2} + 1]$$

B : 시험편의 두께

E : 재료의 Young's modulus

C : 하중점에서 시험편의 컴플라이언스이다.

시험 종료 후에 파면의 두께방향 5점 평균의 균열길이와 식 (2)로부터 구한 균열길이의 차를 사용하여 균열선단의 만곡을 보정을 하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. J값은 열화시간이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있고, 1800시간 및 3600시간 열화재는 유사한 J값을 보였다. 이러한 경향은 충격특성⁽⁸⁾과 유사하였다.

이러한 J-R곡선은 원자력 발전소 배관계통 설계시 파단전누설(leak before break: LBB)설계에

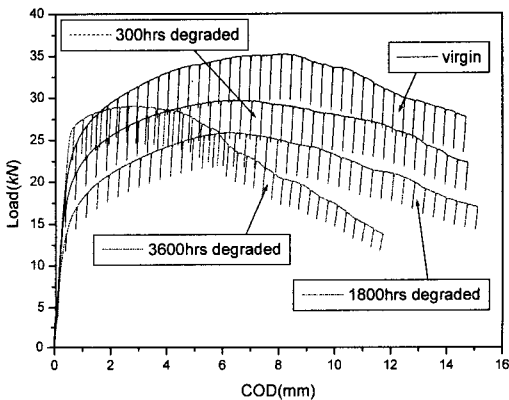


Fig. 2 Load-load line displacement curves

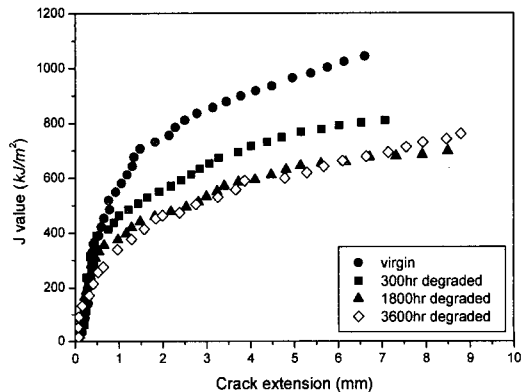


Fig. 3 J-R curves for virgin and degraded specimen

유용한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

ASTM E813-87법은 J-R 데이터를 식 (3)의 형태로 곡선맞춤(curve fitting)을 하여 C_1 및 C_2 를 구하여 J_{IC} 를 결정하는 방법이다.

$$J = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (3)$$

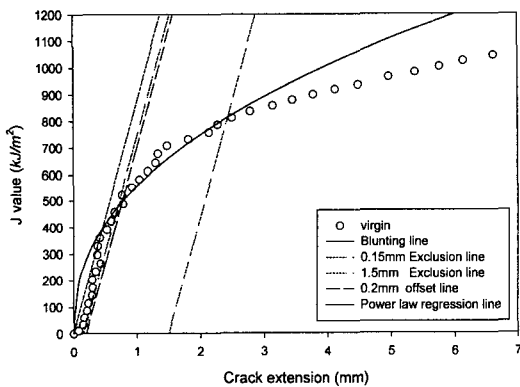
Fig. 4는 Fig. 3의 J-R선도를 곡선맞춤(curve fitting)하여 ASTM E813-87법으로 해석한 결과를 나타내었다.

J_{IC} 값을 결정하는 방법은 J-R곡선과 둔화직선(blunting line, $J = 2\Delta a \sigma_f$)의 0.2mm 오프셋선(offset line)이 만나는 점의 J 값을 J_Q 라 한다. σ_f 는 인장강도와 항복강도의 평균값이다.

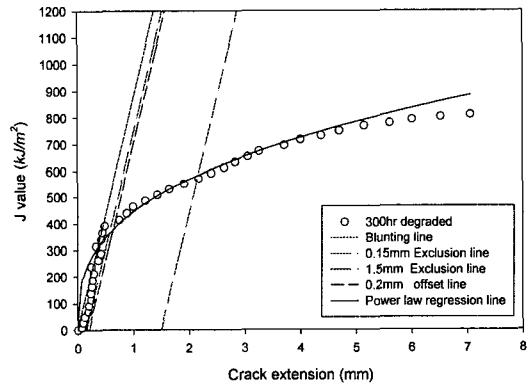
여기서 J_Q 값이 J_{IC} 가 되는 조건은 $B_N \geq 25J_Q/\sigma_f$ 를 만족해야 한다. 건전재의 경우는 $B_N \leq 28.8$ 이므로 J_{IC} 의 조건에 약간 미달하였다. 그러나 건전재를 제외한 각 단계별 열화재들의 J_Q 값은 J_{IC} 의 조건을 만족하였다.

건전재의 J_Q 는 485.70 kJ/m², 300시간 열화재의 J_{IC} 는 369.25 kJ/m², 1800시간 열화재의 J_{IC} 는 311.02 kJ/m², 3600시간 열화재의 J_{IC} 는 276.7 kJ/m²으로 나타났다.

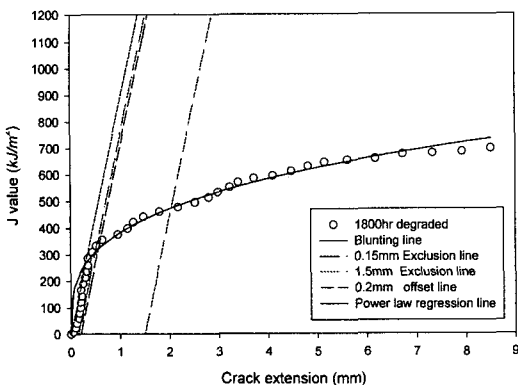
또한 참고자료로 이들 값을 ASTM E813-81법에 따라서 평가해 보았으며, 이 값들은 3.2.2절의 Fig. 9에 스트레치존법에 의하여 구한 값들과 비교하였다. ASTM E 813-81법은 J-R선도를 식 (4)에 의해 직선맞춤(linear fitting)하여 J_{IC} 를 구하는



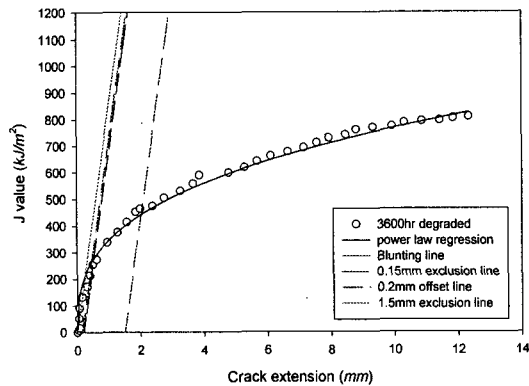
(a) Virgin



(b) 300hr degraded



(c) 1800hr degraded



(d) 3600hr degraded

Fig. 4 Determination of J_{IC} by ASTM E 813-87 method.

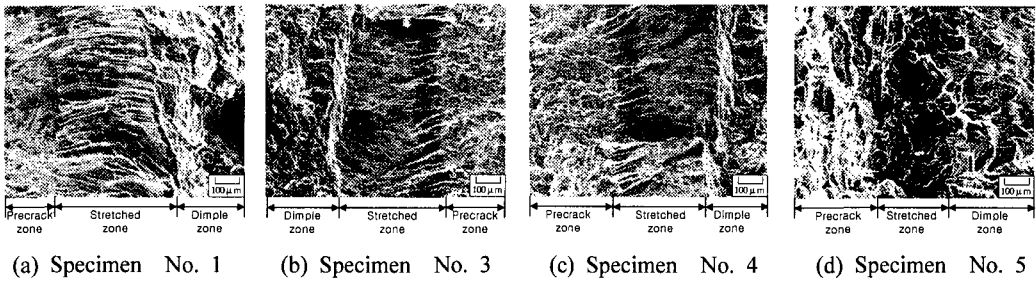


Fig. 5 Fractograph of virgin specimen stretched zone

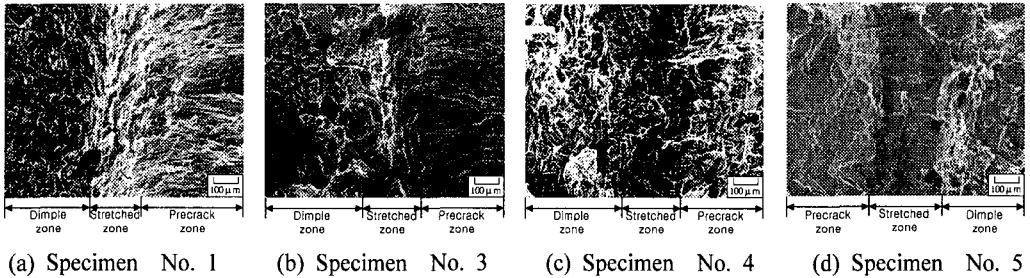


Fig. 6 Fractograph of 300hr degraded specimen stretched zone

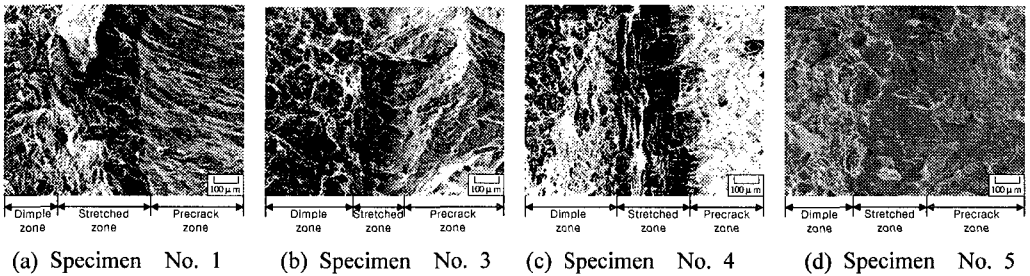


Fig. 7 Fractograph of 1800hr degraded specimen stretched zone

방법이다.

$$J = B + M(\Delta a) \quad (4)$$

3.2 SZW법에 의한 J_{IC} 의 결정

3.2.1 스트레치존 폭(SZW)의 측정

건전재의 제하 컴플라이언스법에 따라 구한 J_Q 의 값이 J_{IC} 가 되는 조건을 만족하지 못하였다. 따라서 건전재의 J_{IC} 값을 스트레치존법에 의해 결정해 보고 또한 단계별 열화재의 J_{IC} 도 스트레치존법에 의해 구하여 제하 컴플라이언스법과 비교하였다.

피로예균열을 넣은 시험편을 정적으로 부하하

면 예균열의 선단에 미끄럼면 분리에 의해 생김 사행미끄럼이나 잔물결 모양이 형성되는데 이것을 스트레치존(stretched zone)⁽¹¹⁾이라 한다.

Fig. 5, 6 및 7에는 각각 건전재, 430℃ 300시간 열화재 및 1800시간 열화재에 대하여 시험 후 파단면을 전자현미경(SEM)에서 100배의 배율로 관찰한 사진중의 대표적인 예를 나타낸 것이다.

스트레치존을 측정하는 방법은 피로 예균열 구간과 딴플 구간 사이에 있는 스트레치존을 8등분하여 3/8, 4/8 및 5/8지점의 3점에서 거리를 측정하여, 그 평균으로 SZW를 정한다.⁽¹⁰⁾

$$\text{즉, } SZW = \frac{\sum_{i=1}^n SZW_i}{n} \quad (i = 1 \sim n)$$

위의 사진으로부터 스트레치존의 폭을 구한 결과 건전재는 530 μm , 300시간 열화재는 312 μm , 1800시간 열화재는 292 μm 로 폭이 좁아짐을 확인할 수 있다.

또한 J적분 값은 식 (5)를 사용하여 구하였다.⁽¹¹⁾

$$J = \frac{A}{B b_0} f\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (5)$$

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = 2 \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha^2}$$

$$\alpha = \left[\left(\frac{2a_0}{b_0} \right)^2 + 2 \left(\frac{2a_0}{b_0} \right) + 2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{2a_0}{b_0} + 1 \right)$$

여기서,

- A : 하중-하중선변위 선도아래의 면적
- B : 시험편의 두께 (측면홈 가공시 = B_N)
- b_0 : 리가먼트 ($W - a_0$)
- a_0 : 피로 평균열 길이
- W : 시험편 폭이다

Table 1 SZW and J-value of virgin and each degraded materials

		SZW (μm)	J-value (kJ/m^2)
virgin	No. 1	503.27	784.21
	No. 2	530.01	896.41
	No. 3	353.17	314.54
	No. 4	437.20	412.80
	No. 5	266.33	199.76
300 hr degraded	No. 1	288.34	625.42
	No. 2	312.09	698.51
	No. 3	216.67	307.03
	No. 4	185.97	188.96
	No. 5	201.45	203.45
1800 hr degraded	No. 1	283.07	562.50
	No. 2	292.37	593.75
	No. 3	224.14	289.07
	No. 4	205.34	234.60
	No. 5	188.56	190.46

Table 1에는 여기서 구한 건전재 및 430 $^{\circ}\text{C}$ 에서 300시간 열화재 및 1800시간 열화재의 J값 및 스트레치존을 나타내었다.

그 결과 열화시간이 길어짐에 따라 SZW 및 J값이 감소함을 알 수 있다.

3.2.2 J_{IC} 의 결정

Fig. 8에는 건전재 및 430 $^{\circ}\text{C}$ 에서 300시간 열화재 및 1800시간 열화재에 대하여 J-SZW관계를 나타낸 것이다. 스트레치존 법으로 구한 그래프에서도 열화시간이 길어짐에 따라 J_{IC} 의 값이 떨어짐을 알 수가 있으나, 앞서 ASTM의 방법으로 구한 J_{IC} 보다는 다소 작게 나타났다.

건전재, 430 $^{\circ}\text{C}$ 300시간 열화재, 1800시간 열화재 및 3600시간 열화재로서 탄소성 파괴인성 시

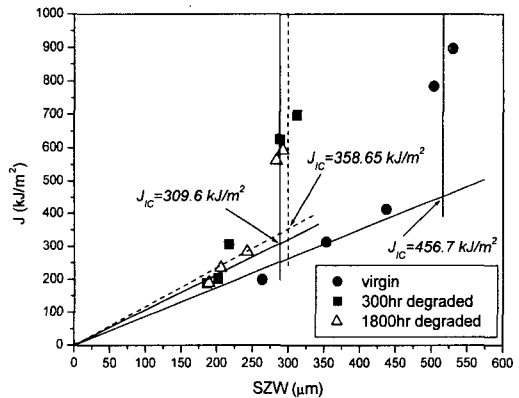


Fig. 8 Determination of J_{IC} for virgin and degraded specimen by the SZW method

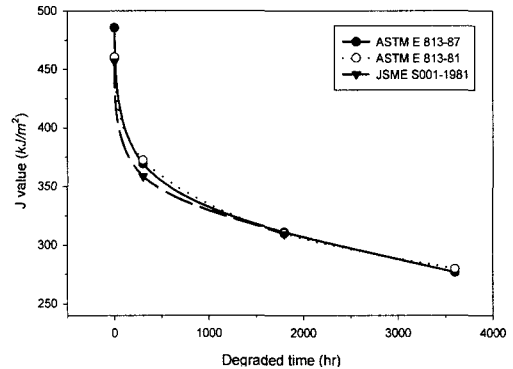


Fig. 9 Relationship between ASTM E 813-87, ASTM E 813-81 and JSME S 001-1981 SZW method for J_{IC}

험을 수행하여 ASTM E 813-87법으로 해석하여 본 결과, 모든 열화재는 J-R 데이터의 유효성 및 J_{IC} 의 유효성 판정에서 만족하였다. 그러나 건전재의 경우, J_{IC} 의 유효성을 판정하는 기준을 만족시키지 못하였다.

따라서 5개의 시험편을 이용하여 JSME S 001-1981법의 기준인 SZW법을 이용하여 해석해 보았다. 그 결과 J_{IC} 의 유효성 판정에서 모든 조건을 만족시켜 그 값을 J_{IC} 라고 할 수 있다.

Fig. 9에는 ASTM E 813-87, E 813-81 및 JSME S 001-1981 방법에 따라 구한 J_Q , J_{IC} 와의 관계를 나타낸 것이다. 그 결과 열화시간이 진행됨에 따라 J_{IC} 의 값이 감소함을 알 수 있고, J_{IC} 값의 크기는 ASTM E 813-81, ASTM E 813-87, JSME S 001-1981 방법 순으로 작아지나 전반적으로 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

제하 컴플라이언스법에 의한 ASTM E 813-87법과 스트레치존법에 의해 구해진 J_Q 및 J_{IC} 의 값을 비교해 본 결과 그 값에 큰 차이가 없었다.

따라서 3600시간 열화재에 대해서는 스트레치존법으로 실험을 하지 않아도 ASTM E 813-87법으로 구한 J_{IC} 와 유사한 값을 가질 것으로 사료된다.

4. 결 론

건전재, 430°C 300시간 열화재, 1800시간 열화재 및 3600시간 열화재를 사용하여 탄소성 파괴인성시험을 제하 컴플라이언스법에 따라 수행한 후 ASTM E 813-87법으로 해석하였으며, 아울러 JSME S 001-1981의 스트레치존법을 이용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) J_{IC} 값이 열화시간의 증가에 따라 건전재에 비하여 크게 감소한다. 그리고 열화시간이 3600시간 이상이 되면 미소하게 변화할 것으로 사료된다.
- (2) ASTM E 813-87법에 의한 경우 건전재의 J_Q 값이 스트레치존법에서는 J_{IC} 의 조건을 만족하였다.
- (3) ASTM E 813-87법과 스트레치존법을 비교하여 보면 J_{IC} 의 값에 큰 차이는 없으나, 전반적으로는 후자의 방법이 작은 값을 가졌다.
- (4) 건전재 및 열화재들의 J-R 선도는 원전배관계통의 건전성 평가(LBB 등)에 유용한 자료를 제공할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Solomon, H. D., and Levinson, Lionel M., 1978, " Mossbauer Effect Study of 475°C Embrittlement of Duplex and Ferritic Stainless Steels," *Acta Metallurgical*, Vol. 26, pp. 429~442.
- (2) Chung, H. M., and Leax, T. R., 1989, " Embrittlement of Laboratory and Reactor Aged CF-3, CF-8 and CF-8M Duplex Stainless Steel," *International Workshop on Intermediate-Temperature Embrittlement Processes in Duplex Stainless Steel*, August 1-2, Oxford, England.
- (3) Chopra, O. K., and Chung, H. M., 1989, " Initial Assessment of the Process and Significance of Thermal Aging in cast stainless Steels," *NUREG/CP-097*, Vol. 3, pp. 519~546.
- (4) Chopra, O. K., and Chung, H. M., 1989, " Aging Degradation of Cast Stainless Steels : Effect on Mechanical Properties," *Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, pp. 737~748.
- (5) International Atomic Energy Agency Advanced Incident Reporting System 분석자료, 1996.
- (6) 日本原子力研究委員会, 1993, 原子力発電プラントの保守・経年化対策に関する国内シンポジウム.
- (7) 권재도, 1992, " 장기사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴인성평가와 수명예측," 대한기계학회 논문집, 제16-8, pp. 1421~1428.
- (8) 권재도, 박중철, 이용선, 이우호, 박운원, 2000, " 주조 스테인리스강 CF8M의 430°C 열화거동에 관한연구(I) (열화기구, 정적 및 피로강도평가)," 대한기계학회 논문집 제24권, 제8호, pp. 1910~1916.
- (9) ASTM, 1989, " Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness," *ASTM E813-87*.
- (10) Landes, J. D., and Begley, J. A., 1974, " Test Results from J-Integral Studies : An Attempt to Establish a J_{IC} Testing Procedure," *Fracture Analysis ASTM STP 560*, pp. 170~186.
- (11) JSME " 弾塑性破壊靱性J試験方法," 日本機械學會基準 JSME S 001~1981.
- (12) Kobayashi, H., Hirano, K., Nakamura, H., and

- Nakazawa, H., 1977, *Proc. ICF 4*, p. 583.
- (13) Clarke, G. A., Andrews, W. R., Paris, P. C., and Schmidt, D. W., 1976, *ASTM STP 590*, p. 27.
- (14) Lowes, J. M., and Fearnough, G. D., 1971, *Engineering of Fracture Mechanics*, 3, p. 103.
- (15) ASTM, "Standard Test Method for Determining J-R Curves," *ASTM E1152-87*.