

제강 및 열처리 조건이 압력용기강의 피로 및 파괴특성에 미치는 영향

고승기* · 나의균* · 백태현* · 박승주** · 원삼용* · 이성우***

Influence of Steel-making Process and Heat-treatment Temperature on the Fatigue and Fracture Properties of Pressure Vessel Steels

S.K. Koh, E.G. Na, T.H Baek, S.J Park, S.Y. Won, and S.W. Lee

Key Words: Vacuum Degassing(진공탈가스), Electro-Slag Remelting(전기슬래그 재용융), Low-cycle Fatigue(저사이클 피로), Fatigue Crack Growth(피로균열성장), Fracture Toughness(파괴인성)

Abstract

In this paper, high strength pressure vessel steels having the same chemical compositions were manufactured by the two different steel-making processes, such as vacuum degassing(VD) and electro-slag remelting(ESR) methods. After the steel-making process, they were normalized at 955°C, quenched at 843°C, and finally tempered at 550°C or 450°C, resulting in tempered martensitic microstructures with different yielding strengths depending on the tempering conditions. Low-cycle fatigue(LCF) tests, fatigue crack growth rate(FCGR) tests, and fracture toughness tests were performed to investigate the fatigue and fracture behaviors of the pressure vessel steels. In contrast to very similar monotonic, LCF, and FCGR behaviors between VD and ESR steels, a quite difference was noticed in the fracture toughness. Fracture toughness of ESR steel was higher than that of VD steel, being attributed to the removal of impurities in steel-making process.

1. 서 론

반복적인 내압을 받는 압력용기의 탄성강도를 증가시켜 압력용기가 더 큰 내압에 견딜 수 있도록 하기 위해서는 증가된 항복강도를 지니는 소재가 필요로 된다. 그러나 단순히 더 높은 항복강도 또는 인장강도의 소재를 개발하여 압력용기로 사용하는 것은 예상치 못한 파손으로 인한 인명 및 경제적인 피해를 초래할 수 있다. 즉 소재의 항복강도의 증가는 오히려 피로균열의 생성 및 진전, 그리고 파괴에 대한 저항능력의 저하

등의 열등한 피로강도 및 파괴인성을 초래할 수 있기 때문이다[1]. 따라서 새로운 압력용기의 개발을 위해서는 사용될 압력용기의 응력수준에 따른 피로 및 파괴거동 해석 및 특성치 확보가 필요하다[2].

본 연구에서는 향상된 항복강도를 지니면서 파괴인성 및 피로특성이 우수한 고강도, 고인성의 압력용기 소재를 개발할 목적으로 화학적 성분이 동일한 소재를 진공탈가스(vacuum degassing: VD)공법과 전기슬래그 재용해(electroslag remelting: ESR)공법으로 제강한 후 각각 열처리 조건을 달리하여 얻어지는 소재를 대상으로 피로 및 파괴특성실험을 수행하였으며, 제강 및 열처리 조건에 따른 소재의 피로 및 파괴특성을 비교·평가하였다.

* 군산대학교 기계공학부
** 남성기업(주)
*** 국방과학연구소

2. 시험편 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 소재는 ASTM A723 압력용기 강으로 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 이 압력용기 강재의 강도를 개선하기 위하여 기존의 VD공법으로 제강된 소재의 템퍼링 온도를 조절하여 약 1172MPa(170ksi), 1310MPa(190ksi)의 서로 다른 항복강도를 갖도록 제작했다. 또한, ESR공법으로 제강한 후 VD공법으로 제조된 소재와 동일한 항복강도를 지니도록 열처리한 소재를 사용하였다.

저사이클 시험편은 실험 전 환봉 시험편의 표점거리부 표면의 미세한 원주방향 가공흔집에 의한 영향을 방지하기 위하여 400~2000 grit의 에머리 페이퍼를 이용하여 시험편의 길이방향으로 연마했으며, 피로균열진전속도 및 파괴인성평가용 CT 시험편은 관측을 용이하게 하기 위해 에머리 페이퍼 이외에도 0.3 μ m 다이아몬드 페이스트를 이용하여 균열 진전의 수직방향으로 연마하였다. 재료는 제강공법과 항복강도의 차이에 따라 VD공법의 170ksi, 190ksi 항복강도와 ESR공법의 170ksi, 190ksi 항복강도를 갖는 재료를 각각 VD170, VD190, ESR170, ESR190으로 표시하였다.

2.2 실험 절차

2.2.1 단순인장 및 저사이클 피로실험

단순인장실험은 변위 제어 하에서 0.25mm/min의 변위속도로 표점거리가 12.5mm인 신장계를 부착하여 실험하였다. 신장계와 하중계를 통해서 나오는 결과는 자료획득 프로그램을 이용하여 얻었으며, 이로부터 응력-변형률 선도를 구하였다.

저사이클 피로실험은 변형률 제어 하에서 변형률비($R = \epsilon_{\min} / \epsilon_{\max}$)를 -1로 하여 시험편에 반복적인 인장-압축 변형을 가하였다. 시험편에 작용하는 변형률은 일정한 변형률 속도를 유지하기 위해서 삼각파 형태로 설정하여 모든 재료에 0.01/sec로 일정하게 유지하였으며, 0.4, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2%의 일정한 변형률 진폭($\Delta\epsilon/2$)에서 실험이 수

행되었다[3].

2.2.2 파괴인성

각 소재의 파괴인성을 비교·평가하기 위하여 탄소성 파괴인성 J_{IC} 실험을 수행하였다. 모든 시험편은 가공 노치(chevron notch)로부터 피로 예균열을 발생시켰으며, 예균열의 길이 측정은 시험 앞뒷면에 CCD카메라가 부착된 이동현미경을 설치하여 화상처리장치를 이용하여 측정하였다.

균열진전량의 산출은 제하 컴플라이언스(unloading compliance)법을 이용하였으며 소성 변형에서 안정 파괴 과정에 영향을 미치고 있지 않다고 생각되는 10%정도의 하중범위로 반복하여 제하시켰다[8].

변위속도는 0.25mm/min로 설정하여, $0.4P_L$ 에 이르는 시간 t_p 는 2.5min 정도로 $0.1 \leq t \leq 10$ min 이 만족하도록 하였다. P_L 은 아래의 식 (1)을 이용하여 계산되어지며, 87~90kN의 값이 얻어졌다.

$$P_L = \frac{Bb^2\sigma_Y}{2W+a} \quad (1)$$

여기서, P_L 은 공칭 균열선단 항복하중, B 는 시험편 두께, b 는 리가멘트(= $W-a$), σ_Y 는 항복응력(σ_Y)과 인장강도(σ_u)의 평균, $(\sigma_Y + \sigma_u)/2$ 을 의미한다.

데이터 획득은 노치 선단부에 COD게이지를 부착하여 X-Y기록계를 이용하여 하중-변위($P-\delta$) 곡선을 구하였으며, 균열길이의 확인을 위해 반복 하중법과 500 $^{\circ}$ C에서 20분간 열처리하는 가열 착색법(heat tinting)을 이용하였다[4].

2.2.3 피로균열 진전실험

피로균열 진전실험은 하중제어로 실행하였으며, 가공 노치 선단으로부터 예균열을 낸 후 실험을 수행하였으며, $B/W \geq 0.15$ 의 시험편의 앞뒷면 균열길이를 광학적 방법으로 측정하였다. 균열측정을 용이하게 하기 위해 시험 앞뒷면에 일정한

Table 1 Chemical composition of ASTM A723 steel (%wt)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	V	Mo	Fe
0.31	0.60	0.006	0.002	0.14	2.37	0.98	0.103	0.53	base

간격으로 참조 눈금선을 그어 두었다[5].

응력비($R=P_{min}/P_{max}$)는 0.1, 0.5, 0.7로 최대하중 및 최소하중이 일정한 일정진폭으로 각각 시편마다 진행하였으며, 최대하중은 고하중에서 저하중으로 하중을 변화시키면서 피로균열진전속도가 10^{-9} m/cycle부근의 하한계 응력확대계수 영역(ΔK_{Ih})에서 시작할 수 있도록 하였다.

Table 2 Mechanical properties of ASTM A723 steels

Properties	VD170	VD190	ESR170	ESR190
E (GPa)	218.9	214.4	212.3	208.9
σ_{ys} (MPa)	1226.0	1263.0	1245.6	1253.2
σ_u (MPa)	1302.0	1346.0	1327.5	1367.7
ϵ_f (%)	23.7	24.8	27.8	23.8
σ_n (MPa)	1232.8	1944.1	2013.4	1939.8
n	0.0208	0.0165	0.0182	0.0229
K (MPa)	1384	1413	1401	1477
HR_c	42.1	44.1	41.2	44.3

3. 결과 및 고찰

3.1 인장 및 저사이클 피로특성

각 재질에 대한 경도를 포함한 기계적 특성은 Table 2와 같으며, 단순 응력-변형률곡선은 Fig. 1과 같다. Table 2에서 보는 바와 같이 VD170, ESR170의 항복강도는 1170MPa, 그리고 VD190, ESR190은 1310MPa를 갖도록 열처리를 하였지만 목적하였던 항복강도에 정확하게 도달하지는 못한 것으로 판단된다.

일반적으로 ESR재질은 VD재질에 비하여 인장강도가 증가하는 경향을 보였으나 그 범위는 1~3% 이내로 재질간의 차이가 거의 없었다.

각 재질에 대한 저사이클 피로실험을 수행하여 히스테리시스 루프가 얻어졌으며, 변형률-수명식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$

식 (2)의 σ_f' , b , ϵ_f' , c 값은 저사이클 피로특성치이며 탄성변형률 진폭 또는 소성변형률 진폭과 반복수($2N_f$)의 테이터를 지수법 관계를 이용

하여 로그-로그 선형회귀해석하여 구하였다. 각 재료의 반복응력-반복변형률곡선은 완전역전 피로시험에서의 서로 다른 변형률진폭의 안정화된 히스테리시스 루프의 꼭지점을 연결하여 Fig. 2와 같이 얻어졌다.

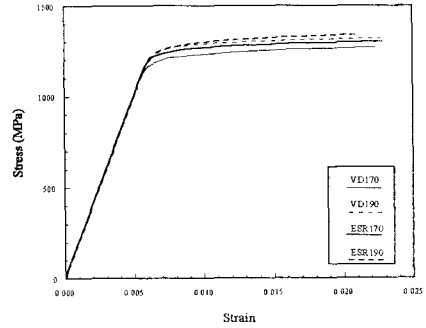


Fig. 1 Monotonic stress-strain curves of ASTM A723 steels

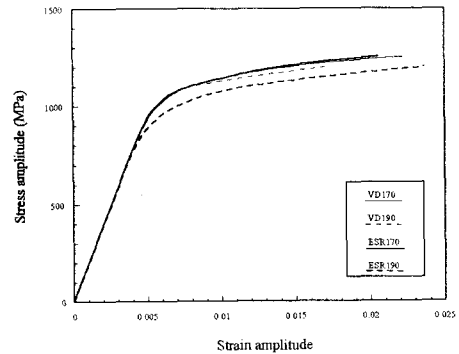


Fig. 2 Cyclic stress-strain curves of ASTM A723 steels

본 연구에서 사용된 ASTM A723강은 지속적인 반복하중을 받을 때 강도가 저하하는 피로연화(cyclic softening) 경향을 나타내고 있음을 Figs. 1 ~ 2의 비교로부터 알 수 있으며, 이러한 경향은 다른 재료에 비하여 ESR190과 VD190에서 상대적으로 뚜렷하게 나타났다.

Figure 3으로부터 2×10^2 reversals $< 2N_f < 10^5$ reversals의 저사이클 피로수명 영역에서 모든 재질의 저사이클 피로강도는 매우 유사한 경향을 지니고 있음을 알 수 있으며, ESR170이 다른 재질에 비하여 저사이클 피로강도가 상대적으로 약간 우수하였다. 흥미로운 것은 고사이클 수

명영역으로 갈수록 ESR강이 VD강에 비하여 상대적으로 긴 피로수명, 즉 우수한 피로강도를 보이고 있다. 이러한 현상은 ESR강이 제강공정에서 불순물 함유량 또는 결함이 적게 됨에 따라 VD강에 비하여 피로균열 생성 및 전파에 많은 수명이 소요됨에 기인하는 것으로 생각된다.

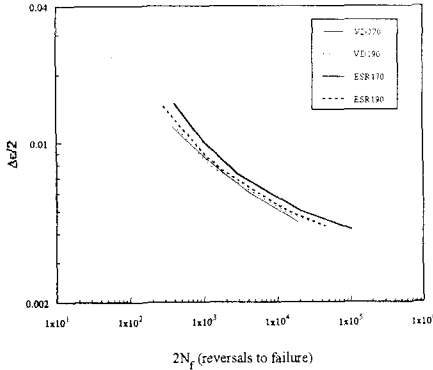


Fig. 3 Strain-life curves of ASTM A723 steels

3.2 탄소성 파괴인성, J_{IC}

탄소성 파괴인성시험은 단일시험편을 사용하여 제하 컴플라이언스법(unloading compliance method)으로 균열진전량을 평가함으로써 파괴인성을 얻었다[4]. 하중과 하중선변위(load-line displacement)의 그래프상의 임의의 점의 J값은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (3)$$

위에서 J_{el} 과 J_{pl} 는 J의 탄성 및 소성성분을 의미하며, 다음과 같이 구해진다.

$$J_{el(i)} = \frac{(K_i)^2(1-\nu^2)}{E}, \quad K_{(i)} = \frac{P_i}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (4)$$

$$J_{pl(0)} = \frac{\eta A_{PL(0)}}{Bb_0}$$

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_i}{b_i} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B} \right]$$

$$\left[1 - \gamma_i \frac{(a_i - a_{i-1})}{b_i} \right] \quad (5)$$

위에서 η_i 와 γ_i 는 각각 $\eta_i = 2.0 + 0.522 \frac{b_i}{W}$,

$\gamma_i = 1.0 + 0.76 \frac{b_i}{W}$ 로 나타내고, A_{pl} 은 하중-변위곡선 상의 면적(소성에너지)을 의미한다.

파괴인성시험시 균열 진전량은 시험의 컴플라이언스를 측정하여 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Delta a_i = \Delta a_{i-1} + \left(\frac{b_{i-1}}{\gamma_{i-1}} \right) \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{C_{i-1}} \right) \quad (6)$$

탄소성 파괴인성치, J_{IC} 는 하중이 작용하여 균열선단에서 균열이 진전하는 순간의 임계 파괴저항으로 정의된다. 따라서 식 (3)와 식 (6)로부터 얻어질 수 있는 J- Δa 곡선, 즉 파괴저항곡선(J-R curve)과 0.2mm 읍셋된 배제직선(exclusion line)과의 교점을 탄소성 파괴인성치로 결정하였으며, 각 재료의 파괴저항곡선은 Figs. 4 ~ 7과 같다.

Table 3 Elastic-plastic fracture toughness, J_{IC}

Materials	VD170	VD190	ESR170	ESR190
J_{IC}	100	47	122	77
K_{IC}	155	101	167	133

각 재료의 파괴인성치는 Table 3과 같으며, ESR강이 VD강보다 상대적으로 약 8% ~ 33% 높은 파괴인성치를 보였다. 열처리 뜨임온도가 낮을수록, 즉 190강이 170강에 비하여 파괴인성치가 낮았으며, 이러한 경향은 VD강에서 현저하였다. 제강공정이나 열처리조건에 따라 재료의 기계적 성질, 저사이클 피로특성의 변화가 거의 없이 유사한 경향을 보였던 것과는 달리 파괴인성특성은 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 즉, 파괴인성치는 다른 기계적, 피로특성과 달리 제강공정이나 열처리조건에 많은 영향을 받는다는 것을 의미하며 소재 개발 및 설계시 이에 대한 고려가 중요함을 알 수 있다.

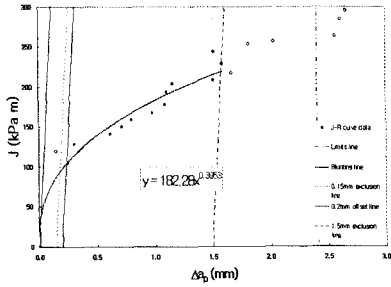


Fig. 4 J-R curves of VD170 steel

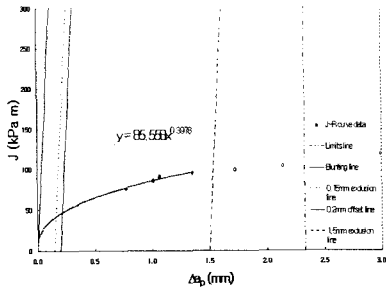


Fig. 5 J-R curve of VD190 steel

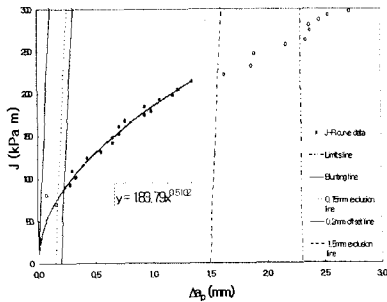


Fig. 6 J-R curves of ESR170 steel

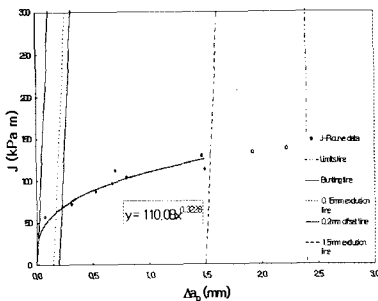


Fig. 7 J-R curves of ESR190 steel

3.3 피로균열진전 특성

응력비가 0.1인 경우 모든 재료의 피로균열진전속도는 Fig. 8과 같이 제 I영역, 즉 하한계영역(threshold region)에서는 재료에 따라 약간의 차이가 존재하지만 균열진전속도가 일정한 제 II 영역에서는 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 균열진전 하한계영역에서의 임계응력세기계수, ΔK_{th} 는 열처리 뜨임온도에 거의 영향을 받지 않았으며, VD강은 약 $8\text{MPa}\sqrt{m}$ 이었으나 ESR강은 VD강보다 약간 높은 $9\text{MPa}\sqrt{m}$ 수준을 보였다.

일반적으로 ESR강이 VD강에 비하여 피로균열진전의 하한계값이 높아 균열진전저항이 큰 것으로 생각되어질 수 있다. 그러나 제 I영역에서의 충분한 실험데이터가 확보되지는 않았지만 VD170은 다른 모든 재질에 비하여 큰 하한계 응력세기계수를 보였다. 이는 VD170 재질이 다른 재질에 비하여 상대적으로 심한 균열단합현상에 기인하였다. 모든 재질에 대한 피로균열진전실험 중 하중-균열개구변위(COD) 선도를 얻었으나 VD170을 제외한 모든 재질에서의 균열단합현상은 거의 나타나지 않았다.

응력비가 균열진전속도에 미치는 영향은 낮은 응력비($R=0.1$)의 ΔK_{th} 영역에서 VD170을 제외한 모든 재료에서 거의 나타나지 않고 있음을 Figs. 8 ~ 10으로부터 알 수 있다. 응력비가 균열진전속도에 미치는 영향은 균열선단에서의 균열단합현상에 기인하므로 본 연구에서 실험한 ASTM A723 강은 ΔK_{th} 영역을 제외한 Paris영역에서 균열단합현상이 거의 나타나지 않음을 의미하며, 이러한 현상은 실험 중 측정된 하중-개구변위($P-\delta$)선도에서 확인되었다.

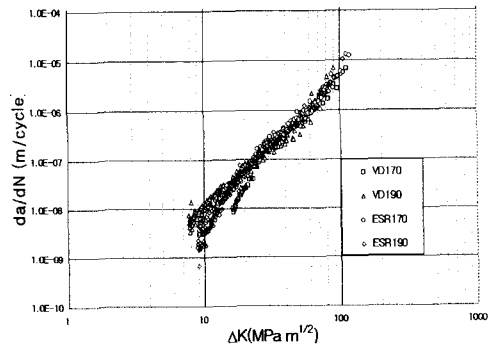


Fig. 8 Fatigue crack growth rate of ASTM A723 steels for $R=0.1$

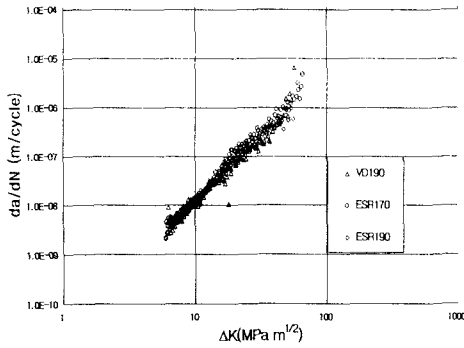


Fig. 9 Fatigue crack growth rate of ASTM A723 steels for R=0.5

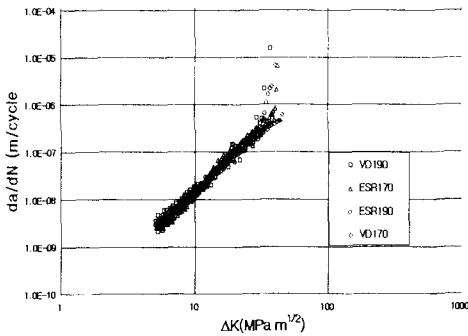


Fig. 10 Fatigue crack growth rate of ASTM A723 steels for R=0.7

4. 결론

압력용기 소재의 제강과 열처리 조건이 재질의 피로·파괴특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 서로 다른 4종류의 고강도 압력용기소재의 피로 및 파괴시험 및 해석이 수행되었다.

일반적으로 ESR재질이 VD재질보다 항복응력 및 인장강도가 증가하는 경향을 보였으며, 190재질이 170재질에 비하여 항복응력 및 인장강도가 증가하는 경향을 보였으나, 그 범위는 1 ~ 3% 이내로 재질간의 차이가 없이 매우 유사하였다.

고사이클 수명영역으로 갈수록 ESR강이 VD강에 비하여 상대적으로 긴 피로수명, 즉 우수한 피로강도를 보이고 있다. 이러한 현상은 ESR강이 제강공정에서 불순물 함유량 또는 결함이 적게 됨에 따라 VD강에 비하여 피로균열 생성 및 전파에 많은 수명이 소요됨에 기인하였다.

일반적으로 ESR강이 VD강에 비하여 높은 파괴인성치를 나타냈다. ESR강이 VD강보다 상대적으로 약 7% ~ 24% 높은 파괴인성치를 보였다. 열처리 뜨임온도가 낮을수록, 즉 190강이 170강에 비하여 파괴인성치가 낮았으며, 이러한 경향은 VD강에서 현저하였다. 파괴인성치는 다른 기계적, 피로특성과 달리 제강공정이나 열처리조건에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

응력비가 0.1인 경우 모든 재료의 피로균열전속도는 하한계 영역에서는 재료에 따라 약간의 차이가 존재하지만 균열전속도가 일정한 영역에서는 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며, 이는 균열단합현상이 거의 발생하지 않는 소재의 특성에 기인한다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 및 위아(주)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Hertzberg, R.W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Wiley, New York, 1996
- (2) Koh, S.K. et al., "Fatigue Design of an Autofrettaged Thick-walled Pressure Vessel using CAE Technique," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol.74, No.1, 1997, pp.19-32.
- (3) ASTM Designation E606, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, 1999, pp. 632-646.
- (4) ASTM Designation E813, "Standard Test Methods for JIC, A Measure of Fracture Toughness," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, 1999, pp. 738-752.
- (5) ASTM Designation E647, "Standard Test Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, 1999, pp. 679-706.