

지진하중하의 안전성평가를 위한 파괴저항 특성 평가

원종일, 김수용, 박종주, 한지원, 우홍식, 석창성
 성균관대 대학원, 특허청, 호서대 기계공학과, 동국대 안전공학과
 성균관대 기계공학부

1. 서론

최근 우리나라에도 많은 지진사태가 보고되고 있으며, 이러한 지진하중은 원전설비 및 각종 기계설비등의 가동중 파손을 유발시킬 수 있는 잠재적 위험성이 높다. 이에 지진하중에 대한 안전성 확보의 필요성이 점차 대두되고 있다. 지진하중은 중·횡파에 의한 인장·압축이 반복되는 역사이클하중(reverse cyclic loading) 형태로, 현재까지는 이를 고려한 설계개념이 미흡한 실정이며 이에 대한 파괴물성치의 확보는 물론 파괴물성치 평가 절차도 확립되어 있지 않은 상태이다. 따라서 지진하중에 대한 안전성확보를 위해서는, 역사이클 하중이 재료의 파괴특성 특히, 파괴저항(J-R)곡선에 미치는 영향이 고찰되어야 할 것이다. 이러한 파괴저항 곡선은 파괴인성(J_{IC})의 결정이나 탄·소성 파괴역학적인 건전성 평가(integrity evaluation)등에 널리 사용되고 있으며, 시험에 의해서 이를 구해야 한다. 이러한 시험을 위하여, ASTM(American Society for Testing and Materials)에서는 ASTM E813⁽¹⁾과 E1152⁽²⁾등으로 시험법을 표준화하였다. 하지만 이들 시험법은 단순 인장형태의 하중을 기본으로 하고 있기 때문에, 지진하중 등과 같이 인장·압축하중 형태의 역사이클하중하에서 이들 시험법을 그대로 적용하기에는 미흡한 점이 있다.

이에, 본 연구에서는 지진하중하의 안전성평가를 위한 역사이클하중하의 파괴저항곡선을 결정하기 위한 시험절차 및 방법을 제안하고, 이것을 바탕으로 파괴저항곡선을 구하고자 한다.

2. 시험 개요

1) 인장·압축이 반복되는 역사이클하중하에서 금속재료의 파괴저항곡선을 결정하기 위해 단일시편법(single specimen method)을 이용한다. 역사이클하중이 파괴인성(Fracture Toughness)에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 하중비(R)와 증분소성변위(δ_{cycle}/δ_i)를 변화시키며 실험한다.

2) 직류전위차(Direct-Current Potential Drop: DCPD)법⁽³⁾을 이용하여 균열길이와 진전량을 결정한다. 이 방법은 일정한 전류가 인가될 때 균열의 증가로 인한 전기적인 포텐셜 변화에 따른 균열길이를 결정하는 방법이다. 또한 하중선의 변위를 이용한 제하 킴플라이언스법도 사용될 수 있다.

3. 시험장비

1) 시험기 및 측정장비는 ASTM E813 (Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness)과 E1152 (Standard Test Method for Determining 파괴저항 Curves)에 제시된 요구조건을 만족해야 한다.

2) 변위 계이는 하중-하중선 변위선도에서 면적으로부터 J-적분값의 계산 및 제하 컴플라이언스를 구하기 위해 사용된다.

3) 균열길이 및 진전량 측정을 위해 직류전위차법(Direct-Current Potential Drop Method, DCPD)을 이용하고 여기에 사용되는 장비는 ASTM E647⁽⁴⁾(Standard Test Methods for Fatigue Crack Growth Rates) ANNEXES A3의 요구조건을 만족하여야 한다.

4) 직류전위차법으로 균열길이를 측정할 경우에는 시험기와 시험편을 절연시킬 수 있는 절연그립이 사용되어야 한다. Fig. 1은 역사이클하중하의 파괴저항 시험용 실험장치의 개략도이다.

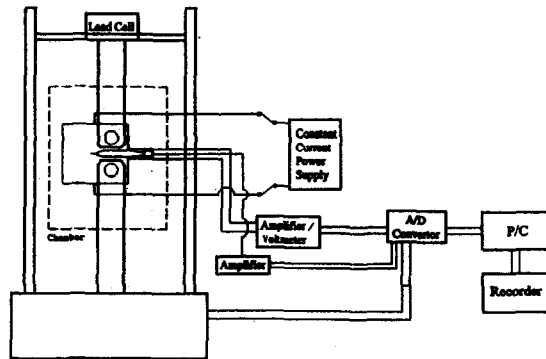


Fig. 1 Schematic diagram of the J-R test system

4. 시험편

ASTM E1152에 따라 단일평판으로부터 ASTM E399⁽⁵⁾에 제시된 방향으로 시험편을 채취한다. Table 1에는 시험에 필요한 시험편의 형상을 나타내었다.

5. 시험 절차

시험절차상의 모든 과정은 ASTM E813, ASTM E1152 시험법에 준하여 실시하며 추가된 사항은 다음과 같다.

Table 1 Recommended specimen geometry

	3점굽힘 시험편	CT 시험편
시험편 두께(B)	$B \geq 25 (J_{IC} / \sigma_Y)$	
시험편 폭(W)	2B	
스팬간격(S)	4W	
초기노치 형상	① 셰프론형 ② 스트레이트형 ③ 키이홀형	
초기균열길이(a_0)	$0.5 \leq a_0 / W \leq 0.75$	
피로예비균열길이(a_f)	$a_f \geq 0.05 a_0$ 또는 $a_f \geq 1.3\text{mm}$	
피로예비균열삽입시 하중비	$\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \leq 0.1$	
피로예비균열삽입 하중(P_{\max})	$P_M = 0.5 \frac{B b^2 \sigma_Y}{S}$ 또는 $\Delta K/E \leq 0.005\text{mm}^{1/2}$	$P_M = 0.4 \frac{B b^2 \sigma_Y}{2W + a}$ 또는 $\Delta K/E \leq 0.005\text{mm}^{1/2}$
Side Groove	총두께감소량 < 0.25B, 45° 의 노치각, 선단의 곡률반경 $\approx 0.4 \pm 0.2\text{mm}$	
치수공차	0.005W	

5.1 DCPD법에 의한 균열 길이 측정

DCPD법은 균열의 시작과 진전을 측정할 수 있는 비파괴 기법 중의 하나로 비교적 정확하고 효율적이어서 방법으로 파괴역학 시험에 널리 사용되고 있다. 이 방법은 전류가 흐르는 물체에 불연속성이 생길 때 변화하는 전기적인 포텐셜을 측정하는 방법으로, 포텐셜의 변화량은 불연속성의 모양과 크기에 의존한다. 일정한 전류가 흐를 때, 균열의 증가로 인한 전류 흐름과 전기장의 변화에 의해 균열 면을 가로지르는 전기적 전위 또는 전압 강하가 생기고, 이러한 전압 변화를 분석적, 실험적 관계 측정을 통해 식(1)과 같이 균열 크기와 관계 지을 수 있다.

$$a/W = f(V/V_0, a_0) \quad (1)$$

여기서, a는 균열길이, W는 시험편의 폭, V는 측정된 전압, V_0 는 기준 전압, a_0 는 초기균열길이이다.

전위차의 변화를 균열길이와 관계지으면 측정된 전위차로부터 균열 길이를 계산할 수 있다. 이와 같이 측정된 전위차로부터 균열 길이를 계산하는 식으로는 다음 식(2)와 같은 Johnson식⁽⁶⁾이 있다.

$$A_{cal} = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cosh\left\{\frac{V}{V_0} \cosh^{-1}\left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a_0}{2W}\right)}\right]\right\}} \quad (2)$$

식(2)로부터 계산된 균열길기와 실제 시험편을 파단후 실측한 초기균열길이 및 최종균열길이 사이의 오차를 다음 식(3)을 이용하여 선형적으로 보정한다.

$$a = a_{cal} - \frac{V - V_0}{V_f - V_0} (a_{cal,f} - a_f) \quad (3)$$

여기서, V 는 측정된 전위, V_0 는 균열길이 a_0 에서의 전위, V_f 는 균열길이 a_f 에서의 전위, $2y$ 는 전압측정 단자사이의 거리, W 는 시험편의 폭, a 는 균열길이, a_0 는 시편파단후 측정된 초기균열길이, a_f 는 시편파단후 측정된 최종균열길이, a_{cal} 은 Johnson식으로 계산된 균열길이, $a_{cal,f}$ 는 Johnson식으로 계산된 최종균열길이이다. 이때 단자간의 거리 $2y$ 는 $0.35W$ 로 해야한다.

DCPD법에서 전류를 흘려주는 인가부의 위치와 전위 측정부의 위치는 측정 오차와 정밀도에 있어서 중요하다. 최적의 위치는 전위 측정부의 위치변화에 대해서는 신호가 크게 변화하지 않으면서도 균열길이 변화에 대해서는 민감하게 반응하는 곳이다. Aronson and Ritchie⁽⁷⁾에 의한 유한요소 해석 결과에 의하면, 전류인가는 상면에서 하면으로, 전위 측정은 균열입구에서 서로 교차되게 측정하는 것이 가장 좋은 방법으로 알려져 있다. 리드선을 시험편에 부착시키는 방법은 spot용접 혹은 은납땜이 이용된다. Fig. 2는 Johnson에 의해 제안된 CT시험편의 리드선 부착 위치이다.

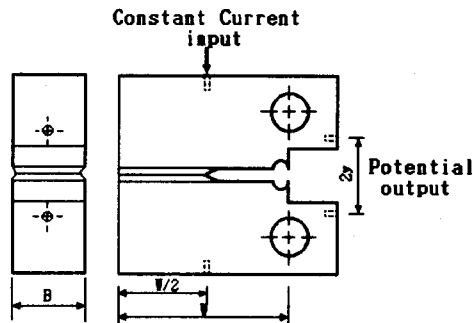


Fig. 2 CT geometry and electric potential wire placement locations

5.2 하중비(R)의 변화

하중비(R)는 다음 식(5)와 같이 최대하중에 대한 최소하중의 비로 결정되며, 하중비를 1에서 -1까지 변화시키며 파괴저항곡선의 변화를 관찰한다.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \text{Stress Ratio} \quad (5)$$

Fig. 3은 하중비가 -1인 경우의 대표적인 하중-하중선 변위선도이다.

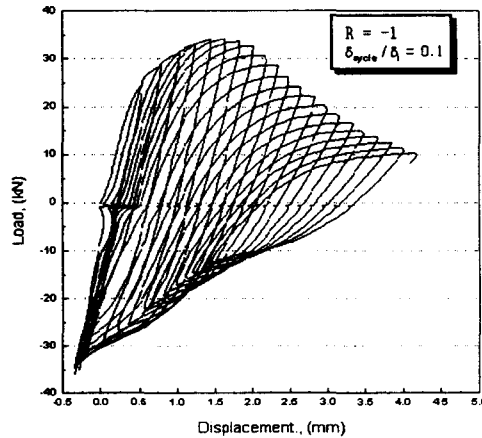


Fig. 3 Load versus load-line displacement curve for cyclic load test
($R=-1$, $\delta_{\text{cycle}}/\delta_i = 0.1$)

5.3 증분소성변위($\delta_{\text{Cycle}}/\delta_i$)의 변화

증분소성변위($\delta_{\text{cycle}}/\delta_i$)는 한 사이클 동안의 균열진전량과 관련된 인자로, 증분소성변위의 변화에 따라 파괴저항곡선이 다르게 나타난다. 이를 비교하기 위하여 직류전위차법을 이용하여 하중선 변위-전위차선도로부터 균열진전시점(δ_i)을 결정(참조5.4)한 후, 이를 기준으로 증분소성변위를 변화시키며 파괴저항곡선의 변화를 관찰한다. Fig. 4는 하중비가 0이고 증분소성변위가 0.1인 경우의 대표적 하중-하중선 변위선도를 나타낸 것이다.

5.4 균열 진전시점(δ_i) 결정^(8~10)

직류전위차법을 이용하여 균열길이를 측정하는 경우, 하중선 변위-전위차선도에는 초기의 탄성적 거동을 보이는 탄성변형영역, 소성변형에 의해 균열둔화가 일어나는 균열둔화영역 그리고 선형적으로 변화하는 안전성장영역의 세 영역이

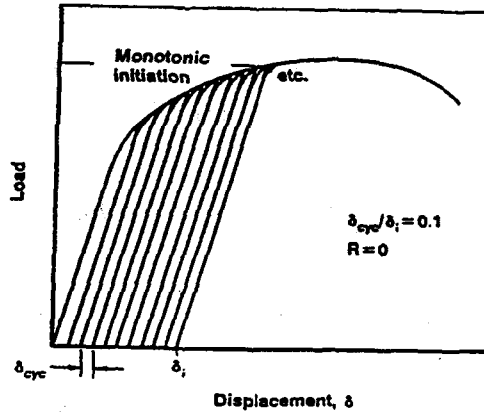


Fig. 4 Illustration of cycle load CT test ($R=0$, $\delta_{cycle}/\delta_i = 0.1$)

나타난다. 이 세 영역에서 곡선의 기울기가 다소 다르게 나타나는데, 이러한 현상을 이용하여 균열둔화로부터 안정균열의 전파시점을 추정할 수 있다. Fig. 5는 이를 나타낸 그림으로 기울기가 달라지는 점이 균열진전시점(δ_i)이 된다. 또한 이 때 계산된 J-적분값은 균열진전시점의 J-적분값이며 이를 J_i 로 표시하고, 이 때의 전압을 기준전압(V_0)으로 설정한다. 균열진전시점의 변위인 δ_i 를 기준으로 증분소성변위를 변화시키며 시험을 수행한다

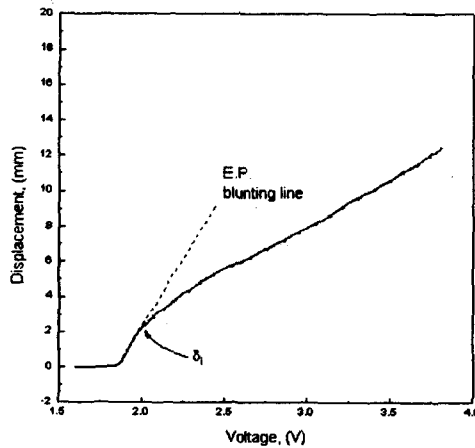


Fig. 5 Load-line displacement versus EP data for SA Gr.70 CT specimen (monotonic loading)

5.5 J-적분 계산

ASTM E1152 9장에 제시된 식을 이용하여 J-적분값을 계산하고, 그 시점의 직류전위차법으로 균열진전량을 구하여 파괴저항곡선을 구한다. J-적분값 계산시 이용되는 제하 컴플라이언스는 한 사이클 동안 제하될 때, 최고하중(P_{max})에서 10~15% 이내의 데이터만을 가지고 기울기를 구하여 결정한다.

5.6 오프셋법을 이용한 둔화에 의한 균열진전량 보정⁽¹¹⁾ 및 고찰

J-적분값과 균열진전량 Δa 를 결정하여 이를 J- Δa 좌표상에 표시하여 Fig.6과 같은 파괴저항곡선을 구한다. 시험편에 하중이 가해지면, 파괴저항곡선에서 J-적분값과 균열길이는 증가한다. 이때, 초기에는 균열선단부의 둔화에 의하여 균열길이가 증가하다가 균열의 찢어짐(tearing)이 시작된다. 여기에서 J-적분값과 균열둔화에 의한 균열진전량의 관계를 그래프로 나타낸 것이 둔화선(blunting line)이다. 그러나, 직류전위차법을 이용하여 균열길이를 계산할 경우 이와 같은 둔화에 의한 균열진전량이 고려되지 못한다. 이는 해석상의 문제점이며, 균열의 찢어짐(tearing)이 시작되기 전에는 둔화선상의 점까지 균열이 진전함으로 이를 고려해야 한다. 따라서, Fig. 6에서 A 데이터와 둔화선 사이의 거리 만큼 균열길이를 보정해야 한다.

오프셋법으로 균열둔화에 의한 균열진전량을 보정할 경우 둔화선이 재료마다 다르게 나타나지만, 일괄적으로 ASTM의 둔화선식($J = 2\sigma_{fs} \Delta a$)을 사용할 수 있을 것이다.

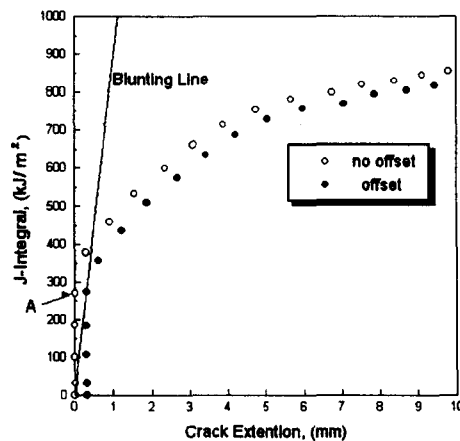


Fig. 6 Correction of initial crack growth by the offset method

6. 사례연구

6.1 하중비의 변화에 따른 파괴저항 시험

Fig. 7은 SA 516 Gr.70 탄소강에 대한 하중비(R)의 변화에 따른 파괴저항곡선의 변화를 나타낸 것으로, 유효범위($\Delta a < 0.2(W-a_i)$)내에서 하중비가 감소할수록 J_i 와 파괴저항곡선이 비례적으로 낮아지는 것으로 나타났다. 그러나, 하중비(R)가 1인 monotonic하중과 하중비(R)가 0.5인 경우에는 J-R 곡선의 변화가 거의 없었다. 이것은 ASTM E1152에서 제시하고 있는 제하킴플라이언스법에 의한 균열길이 계산시 unloading하중이 최고하중의 50% 넘지 않도록 하는 규정을 잘 입증해 주고 있다.

6.2 증분소성변위의 변화에 따른 파괴저항 시험

Fig. 8은 SA 516 Gr.70 탄소강에 대한 증분소성변위 변화에 따른 파괴저항곡선의 변화를 나타내었다. 하중비를 R=-1로 두고 증분소성변위를 변화시켰다. 유효범위($\Delta a < 0.2(W-a_i)$)내에서 증분소성변위가 감소할수록 J_i 와 파괴저항곡선이 비례적으로 낮아지는 경향을 보이고 있다. 특히, 증분소성변위가 1/10과 1/20사이에서 다소 큰 변화를 보이고 있다.

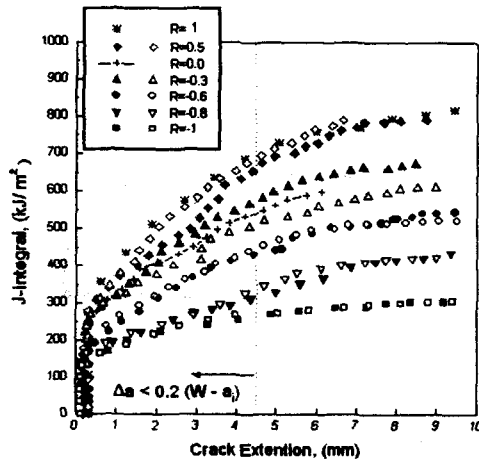


Fig. 7 Cyclic J-R curves for SA516 Gr. 70 steel at 288°C ($\delta_{\text{cycle}}/\delta_i=0.1$)

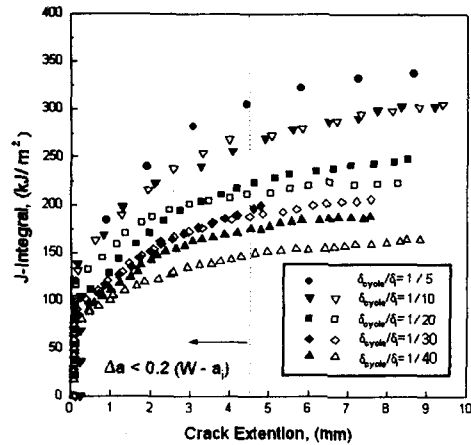


Fig. 8 Cyclic J-R curves for SA516 Gr. 70 steel, at 288°C (R=-1)

7. 결론

지진하중하의 안전성평가를 위한 역사이클하중하의 파괴저항곡선을 결정하기 위하여 시험절차 및 방법을 제안하였으며, 사례연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 직류전위차법을 이용하여 역사이클하중하의 파괴저항곡선을 결정할 수 있었으며, 이를 이용하여 구한 균열길이는 시험후 시험편을 파단하여 실측한 균열길이와 잘 일치하였다.

(2) 직류전위차법에 의한 균열길이 계산시 균열둔화에 의한 균열진전량을 보정해 주어야 하며, 오프셋법을 이용할 경우 더 정확한 균열진전량과 파괴저항곡선을 구할 수 있었다.

(3) SA516 Gr. 70 탄소강의 경우, 하중비(R)가 감소할수록, 증분소성변위(δ_{cycle}/δ_i)가 작을수록 J_I 와 파괴저항곡선이 비례적으로 낮아지는 경향을 보였다. 특히, 증분소성변위의 변화보다는 하중비의 변화에 더욱 민감함을 보였다.

8. 참고문헌

(1) Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, ASTM E813.

(2) Standard Test Method for Determining 파괴저항 Curves, ASTM E1152.

(3) J. K. Donald and J. Ruschau, "Fatigue crack measurement", EMAS, 1991.

(4) Standard Test Methods for Fatigue Crack Growth Rates, ASTM E647.

(5) Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM E399.

(6) H. H. Johnson, "Calibrating the Electrical Potential Method for Studying Slow Crack Growth", Material Research and Standards, Vol. 5, No. 9, pp. 442. ~445, 1965.

(7) G. H. Aronson and R. O. J. Ritchie, Journal of Testing and Evaluation, Vol. No. 4, p.208, 1979.

(8) G. M. Wilkoski, J. O. Wambaugh and K. Prabhat, "Single Specimen J Resistance Curve Evaluation Using the Direct-Current Potential Drop Method and Computerized Data Acquisition System" Fracture Mechanics : 15th Symposium, ASTM STP 833, pp.553 ~ 576, 1984.

(9) M. G. Vassilaros and E. M. Hackett, " J-Integral R-Curve Testing of High Strength Steels Utilizing the Direct-Current Potential Drop Method", Fracture Mechanics : 15th Symposium, ASTM STP 833, pp.535 ~ 552, 1984.

(10) Ad. Bakker, "A DC Potential Drop Procedure for Crack Initiation and R-Curve Measurements During Ductile Fracture Tests", Elastic-Plastic Fracture Test Method, ASTM STP 856, pp.394 ~ 410, 1985.

(11) 석창성, 최용식, "파괴저항곡선에서의 균열길이 감소현상에 관한 연구 (II)", 대한기계학회논문집 제16권 9호, pp. 1627~1631, 1992.