

# 대규모항복조건하에서 페라이트강의 파괴거동에 대한 하중속도의 영향

## Effect of Loading Rate upon Fracture Behavior of Ferritic Steel under Large Scaled Yielding

김헌중\*, 김시영\*\*, 강기주\*\*\*, 정대율\*\*\*\*

\* 전남대학교 대학원

\*\* 전남대학교 대학원

\*\*\* 전남대학교 기계공학과

\*\*\*\* 영광원자력발전소

### 1. 서 론

원자력발전소의 압력용기와 배관은 지진하중과 같은 동적하중에 대해 안전성이 입증되어야 한다. 그래서 압력용기나 배관 등에는 대규모항복이 되는 연성재료를 사용한다. 따라서 이러한 재료에 대해 동적하중과 대규모항복 하에서의  $J_i$ 과  $J-\Delta a$ 의 데이터가 LBB해석을 위해 필요하다. 직류전위차법(Direct Current Potential Drop method, DCPD)은 해중(unloading)에 의한 중단이 없이 연속적인 실험이 가능하고, 빠른 하중속도 하에서도 균열길이를 관찰할 수 있는 이점이 있다. 직류전위차법의 절차는 ASTM E1737-96에 의해 규정되어 있다. 그러나 초기 전압강하가 발생하여 동적하중 시에는 직류전위차법을 이용하여 ASTM의 규정에 따라 균열시작점 등을 찾을 수가 없다. 또한 소성변형이 전압신호에 영향을 주기 때문에 연성재료의 경우 충분히 고려되어야 한다.

Hackett 등<sup>(1)</sup>은 준정적하중 상태에서 대규모항복조건을 만족할 때 DCPD-COD(Crack Opening Displacement)관계에서 균열 개시점을 예측할 수 있음을 보였다. Landow과 Marshall<sup>(2)</sup>은 시험편에 가해지는 전류의 부가량이 증가함에 따라 상대적으로 전압펄스는 약화된다고 보고하였다.

저자에 의해 연성재료인 SA106 Gr.C강에 대하여 동적하중에서의 균열진전을 측정하기 위해 직류전위차법을 이용이 연구되어 왔으며 전류의 부가량 및 전압측정점의 위치에 따른 영향을 알아보았었다. 그리고 정적하중속도와 동적하중속도 하에서의 균열시작점을 CCD카메라와 고속카메라 이용하여 관찰하였다. 결과적으로 초기 전압강하가 비교적 적으면서 균열진전에 따라 가장 뚜렷한 포텐셜의 변화를 보이는 개구점이 가장 적합한 측정점으로 사료되었었다.

본연구에서는 SA106 Gr.C강의 시험편으로 다양한 하중속도하에서의 파괴저항 데이터, 즉  $J_i$ 과  $J-\Delta a$ 을 취득하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 재료 및 시험편

시험편 재료는 울진 3,4호기 원자력발전소의 주증기 배관재인 SA106 Gr.C강이다. 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1,2와 같다. 시험편은 669mm의 외경과 28.6mm의 두께를 갖는 원통형 배관으로부터 L-C방향으로 채취되었으며 ASTM E1737-96의 1인치 CT 시험편으로 가공하였다.

성분	C	Mn	P	S	Ni
wt %	0.24	1.08	0.011	0.011	0.11
성분	Cr	Mo	V	Cu	Si
wt %	0.09	0.04	0.07	0.09	0.23

Table 1. Chemical composition of SA106 Gr.C ferritic steel

$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\alpha$	n
320.3	536.9	6.73	3.8

Table 2. Mechanical properties of SA106 Gr.C ferritic steel

## 2.2 실험순서

실험은 250kN의 유압식시험기(INSTRON 8872)를 사용하여 상온에서 수행되었다. 모든 시험편은 ASTM의 절차에 따라 예비피로균열을 발생시켰다. 그리고 터널링효과를 줄이기 위해 60°의 커터각과 0.5mm의 커터날반경을 가진 커터로 측면홈(side-groove)을 가공하였다. 이때 한쪽 표면에서 10%(0.1B, W는 시험편 두께)씩 총 20%를 가공하였다. 시험편은 0.5mm/minute의 정적하중속도와 300,600,1200mm/minute의 동적하중속도 하에서 실험이 되어졌다. 전류는 Hewlett-Packard 사의 직류전원공급기(HP6573A)로부터 100A로 공급되었다. 직류전위차법을 사용하기 위해서는 전류의 누설이 없어야 한다. 전류가 로드셀과 시험기 자체로 흘러가지 않도록 그립과 로드셀사이에 연결봉을 만들어 여기에 절연체로 테프론 평판을 사용하였다. 전압측정을 위하여 1mm의 구리선을 개구점에 납땜하였으며 신호 증폭 및 노이즈 제거를 위하여 신호증폭기를 사용하였다. 이때 전압신호는 4000배 증폭하였으며 100Hz로 필터링을 하였다. 데이터는 PC를 통하여 저장하였으며 균열시작점을 관찰하기 위해 CCD 카메라와 고속카메라를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 균열개시와 균열진전

그림 1.(a),(b)는 고속카메라를 이용하여 초당 1000프레임으로 촬영한 결과로서 (a)는 균열둔화 및 시작을, (b)는 균열진전을 보이고 있다.

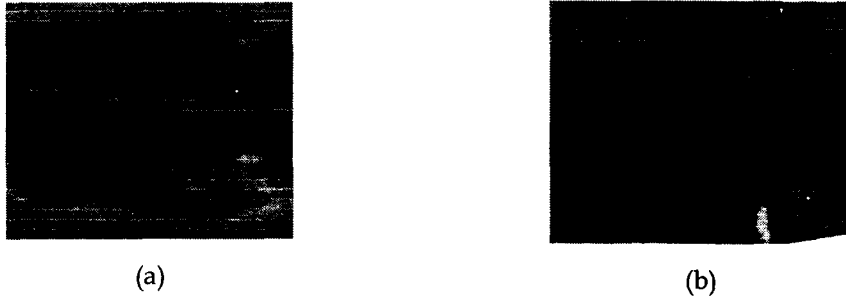


Fig. 1 (a) a small crack initiated on the blunted precrack tip, (b) crack propagation

예비피로균열의 끝에서 균열이 시작하며 균열의 진전은 지그재그양상을 보인다. 균열이 개시된 이후 최종 균열진전까지의 길이는 Johnson<sup>(3)</sup>식을 이용하여 구하였다.

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

실제 시험편의 파단면을 관찰하여 얻은 초기 균열길기와 최종 균열길기를 이용하여 보정을 하여주었다. J-적분은 ASTM E1737-96의 순서에 따라 구하여졌다.

### 3.2 하중과 COD 관계

그림 2는 다양한 하중에서 파단되지 않은 단면적에 대한 하중대 COD의 관계를 나타낸다. 이것은 하중속도가 하중-COD관계에 중요한 영향을 미치지 못한다는 것을 나타낸다.

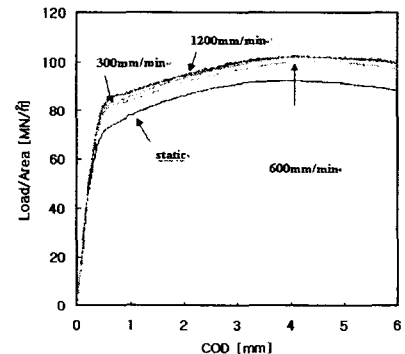


Fig. 2 Load per net uncracked ligament area versus COD plots under various rates of loading

### 3.3 DCPD와 COD관계

그림 3(a)~(d)는 다양한 하중속도에서의 DCPD-COD 곡선을 나타낸다. 각 곡선 위에서 사각형은 고속카메라로 촬영하여 얻은 균열시작점이다. ASTM E1737-96에서는 0.1P<sub>max</sub>와 0.5P<sub>max</sub>점

을 선형적으로 그어 선형성을 벗어나는 점을 균열개시점으로 한다고 하였다. 따라서 그림 3의 곡선 위에  $0.1P_{max}$ 와  $0.5P_{max}$ 점을 표시하였다. 이 두점은 정적하중속도에서 조차도 고속카메라로 찾은 균열개시점에서 멀리 떨어져 있다. 균열개시점을 찾기위해 직류전위차법을 쓸 때는 균열이 개시되기 전에 모든 소성은 발생되고 DCPD-COD관계도 균열개시 전까지 선형성을 유지해야 한다는 가정을 한다. 그림 3처럼  $0.5P_{max}$ 점 이상에서도 많은 소성변형이 일어나므로 ASTM절차를 이용할 수 없다. 그림 3(b)~(d)는 균열초기에 발생하는 전압강하의 크기가 하중속도에 비례함을 보여주고 있다. 초기 전압강하는 빠른 하중하에서 ferromagnetic domain들이 순간적으로 하중을 받는 방향으로 재배열함으로써 발생된다. 그래서 균열개시전 DCPD-COD곡선이 선형성을 유지하지 못한다. 따라서 위에서 언급했다시피 직류전위차법이 빠른 하중하에서 큰 장점을 가지고 있지만 ferromagnetic 재료에는 사용할 수가 없다. 각 그림의 사각형은 균열개시점으로써 하중속도에 민감하다. 특히 300mm/minute의 경우 균열개시가 정적하중속도에서보다 더 빨리 일어난다.

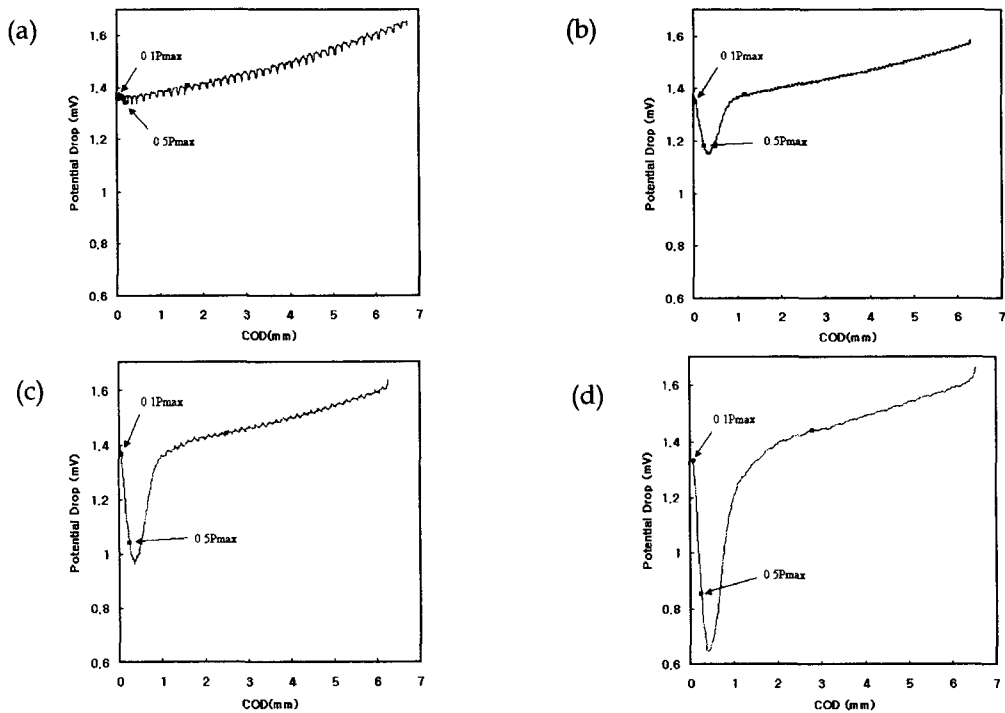
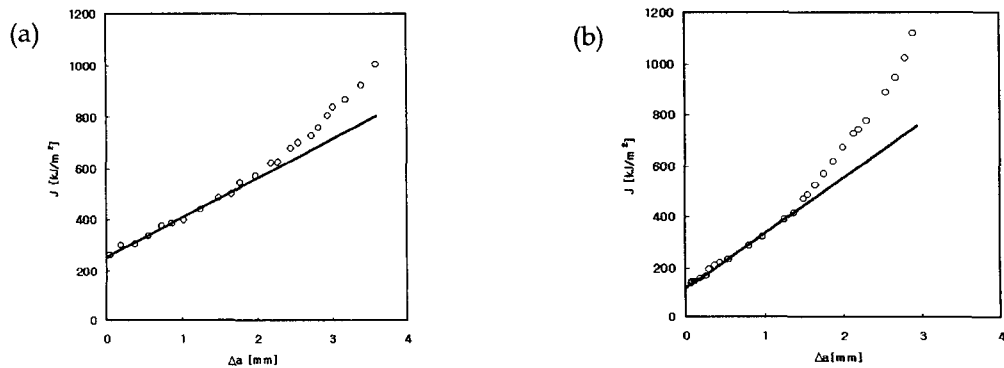


Fig. 3 DCPD versus COD curves under various rates of loading, (a) 0.3mm/minute, (b) 300mm/minute, (c) 600mm/minute, (d) 1200mm/minute

### 3.4 $J_i$ 과 J-R곡선

그림 4(a)~(d)는 다양한 하중속도하에서 J-R곡선이다. J-R곡선 역시 하중속도에 민감하였다. 하중속도 600과 1200mm/minute은 파괴특성이 더 좋았으나 300mm/minute의 경우 균열발생에 대한 재료의 저항이 오히려 적어졌다. 하중속도에 대한  $J_i$ 의 값은 Table 3과 같다.



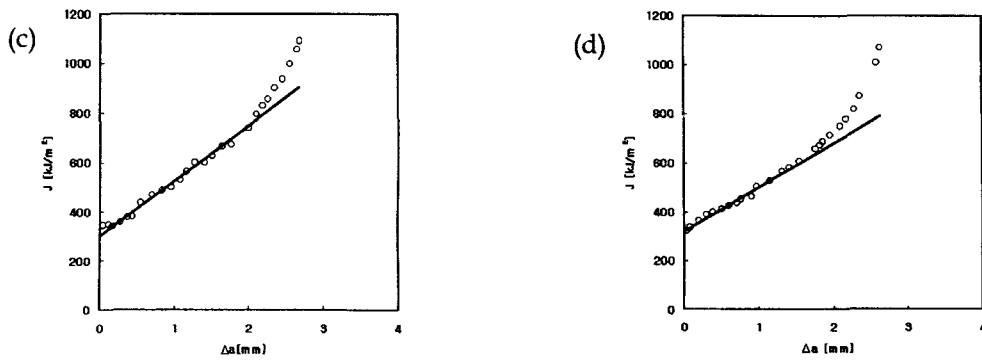


Fig. 4 J-R curves under various rates of loading, (a)0.3mm/minute, (b)300mm/minute, (c)600mm/minute, (d)1200mm/minute

	Loading Rates [mm/minute]			
	0.5	300	600	1200
$J_i$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	220.096	128.713	317.820	303.029

Table 3.  $J_i$  values under various loading rates

#### 참고문헌

- (1) Hackett, E.M., Kirk, M.T. and Hays, R.A., "An evaluation of J-R curve testing of nuclear piping materials using the direct current potential drop technique." USNRC, NUREG/CR-4540, 1986.
- (2) Landow, M.P. and Marschall, C.W., "Experience in using direct current electric potential to monitor crack growth in ductile metals", in Elastic-Plastic Fracture Test Method, ASTM STP 1114, 1991, pp. 163-177
- (3) Johnson, H.H., "Calibrating the electric potential method for studying slow crack growth." Materials Research and Standards, vol. 5, 1965. pp. 442-445