

# Cr-Mo 강과 Cr 강의 J-R곡선의 측정 및 응용

안승균\* · 허용학\*\* · 박재학\*\*\*

## Measurement and Application of J-R Curves of Cr-Mo Steel and Cr Steel

Seung Gyun Ahn, Yong Hak Huh and Jae Hak Park

**Key Words:** J Integral(J-적분), J-R Curve(J-R 곡선), Compliance method(탄성해중법), Direct current potential drop method(직류전위차법), EPRI estimation(EPRI추정법)

### Abstract

Following the method described in ASTM E1737, J resistance curves are measured for Cr-Mo steel SA387, and Cr steel A240 which are used as piping materials in nuclear industry. Crack driving force diagrams are generated in order to find out instability points in crack growth. The  $J_{app}$  curves, which are used in the crack driving force diagram, are obtained from EPRI J estimation method and the finite element analysis. Crack growth instability points are plotted in load-crack length plane and the results are discussed.

### 1. 서론

원자력 및 화력발전설비 중 배관부의 균열의 생성과 성장은 원자력 발전설비의 건전성에 커다란 영향을 준다. 특히, 최근 원자력 배관설비의 설계와 건전성 평가 적용 시에 많이 사용하는 파단전 누설(LBB: Leak Before Break)설계개념의 도입으로 균열의 거동을 예측하는 것이 설비의 안전성 확보차원에서 중요한 비중을 차지한다. 또한 배관재료는 상대적으로 높은 파괴인성과 연성을 갖고 있으므로 탄성영역에서 거동하는 재료의 파괴변수로 널리 사용되어 왔던 응력강도계수(SIF: Stress Intensity Factor)는 이러한 재료에서는 사용이 불가능하다. 그러므로, 소성영역에도

적용이 가능한 탄소성 파괴역학 매개변수의 도입이 필요하다. Rice에 의해 제안된 J적분은 소규모 항복조건 하에서 상대적으로 연성이 큰 재료에 적용이 가능하며 균열선단을 정의하는 단일 매개변수로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 배관재료로 사용되는 SA387과 A240의 두 재료에 대하여 J-R 곡선을 측정하여 균열의 안정성 해석에 사용하였다.

현재 임의의 하중에 대한 J적분값을 얻는 방법으로 EPRI J 추정법이 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 이 EPRI J 추정법과 유한요소해석을 통해 얻은  $J_{app}$ 곡선과, 시험을 통하여 얻은 재료의 J-R곡선을 사용하여 행하는 연성 재료의 안정성 평가해석(ductile stability assessment analysis)을 통해 균열이 존재하는 배관재료에 임의의 하중이 가해졌을 경우에 균열의 거동과 불안정성을 예측하는 방법에 대하여 다루었다. 또한 구조물에 존재하는 균열의 방향을 고려하여 재료의 시편을 L-T와 T-L의 두 방향으로 제작하고 각각

\* 충북대학교 대학원 안전공학과  
 \*\* 한국표준연구원  
 \*\*\* 충북대학교 안전공학과

에 대한 J-R곡선을 얻어 이를 균열거동의 예측에 적용하였다.

## 2. 시험

### 2.1 재료 및 시편

실험재료로는 배관재료로 사용되는 SA387과 A240을 사용하였고 각 재료의 화학성분은 Table 1 및 Table 2 와 같다. SA387은 L-T방향과 T-L 방향으로, A240은 L-T 방향으로 시편을 가공하였다. 각 시편의 폭, W는 50mm이고 두께는 25mm로 하여 그 규격에 해당되는 표준 C(T)시편으로 제작하였다.

Table 1 Chemical composition of A240.

com.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co
wt%	0.13	0.50	0.019	0.002	0.25	12.39	0.14	0.02
com.	Cu	Mo	N	Cs	Ti	Al	Sn	
wt%	0.05	0.01	0.05	0.010	0.001	0.001	0.010	

Table 2 Chemical composition of SA387.

com.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
wt%	0.11	0.52	0.015	0.003	0.25	8.60	0.21
com.	V	Cu	Mo	N	Cb	Al	
wt%	0.226	0.19	0.91	0.05	0.079	0.009	

### 2.2 시험 방법

인장시험은 상온에서 MTS 25ton 유압식 시험기에서 실행되었으며 SA387과 A240 모두 L-T 방향으로 원형인장시편을 제작하여 시험하였다.

ASTM E1737-96의 규정에 따라 탄성해중법과 직류전위차법(DCPD)을 사용하여 표준C(T)시편에 대하여 J-R 곡선 측정 시험을 행하였다. 시험기는 MTS의 25kN 유압식 인장시험기를 사용하였으며, 시험의 개략도는 Fig. 1과 같다.

시편의 노치는 각각 시편너비, W와 0.4의 비율로 가공하였고, ASTM E1737 규정에 따라  $K_{max}/E$ 의 비율이하로 피로균열을 생성한 후 시편 두께의 20%에 해당하는 길이와 90°의 각도로 측면홈을 가공하였다.

탄성해중법을 이용한 실험의 경우에는 MTS의 TeststarII 프로그램을 이용하여 해중(unloading)

과 재하중(reloading)을 프로그램하여 컨트롤러에 의해 제어된 하중이 시편에 가해지도록 하였고 이 하중값은 COD 게이지를 통해 얻어진 COD값과 함께 PC에 저장되었다. 시험시 하중과 해중 속도는 1000N/sec로 동일하게 하였다. 직류전위차법의 경우에는 시편에 나사로 체결된 강선에 입력 전류 5A를 가해 주었고 시편에서 나온 전압을 증폭기를 사용하여 100배 증폭하여 계측기에 기록하였다.

실험 후 초기균열길이와 최종 균열길이를  $10^{-3}$ mm까지 디지털 공구현미경을 사용하여 ASTM E1737 규정의 9점법으로 측정하였다.

탄성해중법에서 얻어진 하중과 COD값으로부터 각 해중점에 해당하는 하중과 컴플라이언스값을 얻었고, 각 해중점에서의 해중 컴플라이언스 값들로부터 Saxena-Hoodak의 식을 이용하여 균열 길이가 계산되었다. 평가된 균열 길이와 측정된 하중으로부터 각 해중점에서의 J적분값을 얻었다. 직류전위차법은 해중 시에 얻은 전압값을 가지고 Johnson 식을 이용하여 균열길이를 얻었고, 이로부터 J적분값을 얻었다.

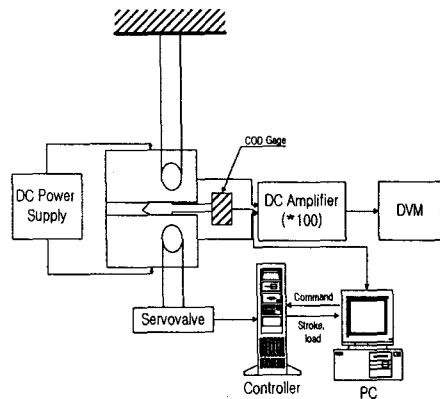


Fig. 1 J-R curve test diagram.

## 3. 시험 결과

### 3.1 인장시험결과

인장시험에서 얻어진 응력-변형률 곡선은 Fig. 2와 같다. 탄소성해석에 필요한 재료의 역학적 물성치를 Table 3에서 보여주고 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 SA387과 A240의 탄성계수는

거의 비슷하지만  $\sigma_{ys}$ 와  $\sigma_{uts}$ 는 SA387 쪽이 상당히 높다는 것을 알 수 있다. 탄소성해석에 사용된 응력-변형률 관계식은 다음과 같다<sup>(1)</sup>:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

Table 3 Mechanical properties.

Material	E (GPa)	$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\alpha$	n
SA387	209	549.5	705.9	1.04	11.4
A240	226.8	424.8	602.7	0.68	6.29

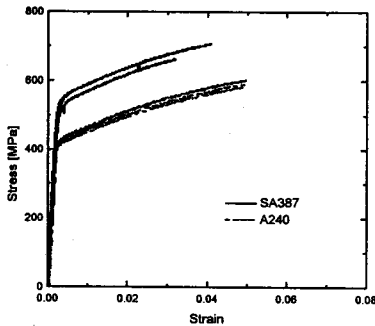


Fig. 2 Stress-strain curves of SA387 and A240.

Table 4 Values of  $J_{IC}$ ,  $C_1$  and  $C_2$ .

Materials		$J_{IC}$ (N/mm)	$C_1$	$C_2$
SA387 L-T	#1	281.9	478.77	0.60771
	#2	393.25	593.568	0.65107
	#3	370.74	579.03	0.60487
	평균	348.463	550.456	0.62127
SA387 T-L	#1	227.12	388.157	0.5573
	#2	216.17	358.225	0.51067
	#3	316.85	381.156	0.60292
	평균	253.38	375.846	0.5570
A240	#1	550.78	637.708	0.46763
	#2	584.10	649.66	0.40165
	평균	567.44	643.684	0.43464

### 3.2 J-R 곡선 시험 결과

J-R 곡선 시험은 SA387의 L-T 방향과 T-L 방향, A240 L-T 방향에 대하여 행하였다.

SA387의 경우, Fig. 3에서와 같이 L-T방향의 J-R곡선이 대체적으로 T-L 방향의 곡선들보다 높게 나타났다. A240재료의 J-R곡선들은 SA387 L-T와 비슷한 J-R곡선들을 보여주는 경향이 있다. 또한 A240은 SA387보다  $\sigma_{ys}$ 와  $\sigma_{uts}$ 가 비교적 낮으면서 비슷한 J-R곡선을 보여준다. 또한 Table 4에서는 탄성해중법으로 얻어진 J-R 곡선의 상수,  $C_1$ ,  $C_2$ , 그리고  $J_{IC}$ 값을 나타내었다.

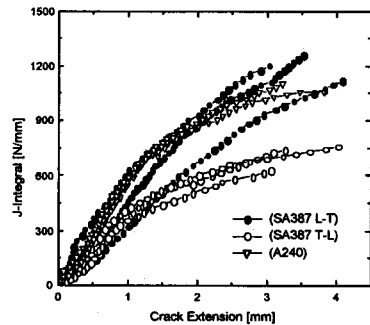


Fig. 3 J-R curves of SA387 L-T, SA387 T-L and A240.

### 4. FEM 해석

유한요소해석으로부터  $J_{appl}$ 를 계산하였다. 유한요소 해석에는 ANSYS5.5 프로그램을 이용하였다. Fig.4와 같이 1155개의 절점과 348개의 plane82 요소로 유한요소 모델을 구성하였다. 균열진전을 해석하기 위하여 ANSYS프로그램을 작성하고 각 균열길이에 대한 변수값을 입력함에 따라 새로운 유한요소를 생성하여 균열길이를 변화시켰다.

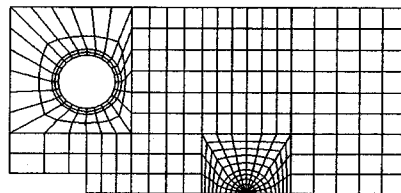


Fig. 4 2-D mesh of a C(T) specimen for the Finite Element Analysis.

## 5. EPRI J 추정

EPRI J 추정법을 사용하여  $J_{appl}$ 를 계산하였다. EPRI J 추정법에서는 J의 탄성부분과 소성부분을 각기 계산한 후 이를 더하여 전체 J값을 얻는다<sup>(2)</sup>.

$$J_{tot} = J_{el} + J_{pl}. \quad (2)$$

여기서,  $J_{el} = K_I^2/E'$  이고, 평면변형 조건 하에서  $E' = E/(1-\nu^2)$ 이다.

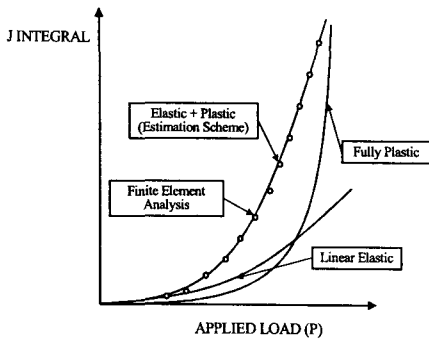


Fig. 5 The EPRI J estimation scheme.

Fig. 5에서와 같이  $J_{pl}$ 값은 낮은 하중에서는 무시할 만 하지만, 하중이 커질수록 지수적으로 증가하여, 하중이 큰 경우  $J_{el}$ 값은 전체의 적분값에서 미소한 부분이 된다. EPRI J의 소성부분 계산은 다음과 같다<sup>(2)</sup>:

$$J_{pl} = \alpha \epsilon_0 \sigma_0 b h_1 (a/W, n) \left( \frac{P}{P_0} \right)^{n+1}. \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 소성계수,  $\sigma_0$ 는 유동응력,  $\epsilon_0 = \sigma_0/E$ ,  $b$ 는 비균열부길이이고,  $C(T)$ 시편에 대한  $h_1$ 은 EPRI NP-1931의 표에서 얻을 수 있다.

균열의 불안정 성장의 판정은 다음의 식을 이용할 수 있다<sup>(2)</sup>:

$$\left( \frac{\partial J}{\partial a} \right)_{\Delta_T} \geq \frac{dJ_R}{da}. \quad (4)$$

여기서, 전체 변위,  $\Delta_T = \Delta + C_M P$ 이고,  $\Delta$ 는 균열체의 변위,  $C_M$ 은 시스템의 컴플라이언스

이다.

## 6. EPRI 추정법과 FEM 해석에 의한 $J_{appl}$ 의 적용

Fig. 6에서 J-R 곡선을 x축을 따라 이동시키면서  $J_{appl}$ 곡선들과의 각 접점에 해당하는 부분이 식 (4)를 만족하게 된다. 이 때의 하중과 균열길이를 가지고 이를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 8이 얻게 된다. 이로부터 얻어진 곡선을 기준으로 임의의 하중과 균열길이에 적용하였을 경우 곡선 아래 부분의 해당하는 때 이 균열은 안정한 상태이고 그 반대의 경우 불안정한 상태라고 판정할 수 있다.

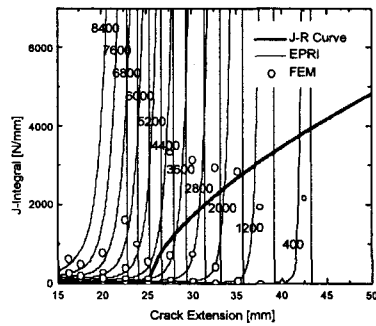


Fig. 6 Crack driving force diagram of SA387 L-T.

Fig. 7과 8를 보면 균열길이가 증가하고 하중이 작아질수록 비교대상의 선분들이 가까워지는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 6의 균열진전력 다이어그램에서  $J_{appl}$ 의 곡선들은 적용하중이 작아질수록 곡선들의 곡률이 커지면서  $J_{appl}$  곡선들이 J-R 곡선과 접할 수 있는 영역이 감소하기 때문이다. 이는 일축인장을 받는 구조물의 균열길이가 증가할수록 불안정균열성장이 상대적으로 낮은 하중 하에서도 짧은 시간 내에 이루어진다는 것을 의미한다.

Fig. 7에서는 SA387 L-T와 T-L을 비교하였는데 L-T 방향의 시편이 T-L 방향의 시편들보다 다소 넓은 안정된 부분을 갖고 있음을 알 수 있다. Fig. 8에서는 EPRI 측정법과 FEM 해석의 실험결과를 비교하였는데 EPRI 측정법의 결과가

FEM 결과보다 더욱 보수적이라는 것을 알 수 있다.

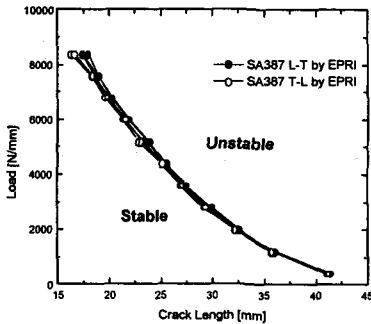


Fig. 7 Comparison of results of SA387 L-T and T-L by EPRI estimation.

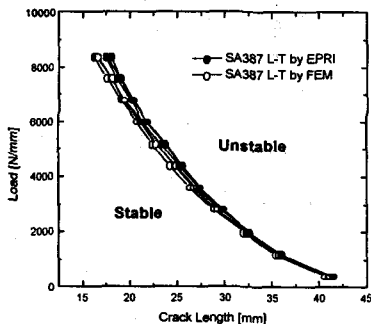


Fig. 8 Comparison of results of SA387 L-T by EPRI estimation and by FEM analysis.

## 7. 결론

원자력 발전설비의 배관 재료로 사용되는 Cr-Mo 강인 SA387과 Cr 강인 A240에 대한 J-R 곡선 측정시험을 행하였고, EPRI 추정법과 유한요소 해석을 통하여  $J_{appI}$  값을 계산하여 임의의 하중과 균열길이에 대한 불안정 조건을 구하였다. 시험 및 해석 결과는 다음과 같다.

(1) SA387과 A240의 J-R 곡선을 비교하면 항복

강도와 인장강도는 재료의 파괴인성에 크게 영향을 주지 않는다.

(2) 구조물에 존재하는 균열성장 방향이 L-T인 경우가 T-L의 방향을 가지고 있는 구조물보다 높은 파괴인성 값을 갖는다.

(3) EPRI 추정법을 통하여 얻은  $J_{appI}$  값이 FEM 해석으로 얻은 값보다 보수적이다.

## 후기

본 연구의 J시험에 많은 조언을 주신 한국표준과학연구소의 이해무박사님과 김시천 선생님께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Anderson, T. L., 1995, "Fracture Mechanics 2nd", CRC Press, Inc.
- (2) Kumar, V., German, M. D. and Sih, C. F., 1981, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", Topical Report No. EPRI NP-1931.
- (3) 김시영, 강기주, 정대울, 1999 "연성재료의 동적 파괴시험 시 직류전위차법에 의한 균열개시점의 결정", 대한기계학회 추계학술대논문집A, pp.147~152.
- (4) 김국철, 장운석, 석창성, 김영진, 최용식, 나인식, 1993, "SA106 Gr.C강 배관 용접재의 파단전누설해석", 대한기계학회논문집(I), pp.511~514.