

〈論 文〉

재료의 탄소성파괴인성치 J_{IC} 의 온도 의존성에 관한 연구(II) — 고온에서의 J_{IC} 해석 —

석창성* · 최용식** · 양원호*** · 김영진***

(1990년 1월 25일 접수)

A Study on the Effect of Temperature on the Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{IC} of Materials (II) — J_{IC} Analysis at High Temperature —

C. S. Seok, Y. S. Choy, W. H. Yang and Y. J. Kim

Key Words : Fracture Toughness(파괴 인성), J_{IC} Test Method(J_{IC} 시험법), Effect of Temperature(온도의 영향), High Temperature Extensometer(고온용 신장계), COD Gage(COD 게이지), ASTM E 813-87, R -Curve(R -곡선), A516 Gr70

Abstract

Elastic-plastic fracture toughness J_{IC} can be used as an effective design criterion in nuclear and thermal steam rasing systems. Most of these systems are operated at high temperature and J_{IC} values are affected by temperatuere. Therefore, the J_{IC} values at high temperature must be determined for use of integrity evaluation and designing of such systems. Usually, the J_{IC} value at hight temperatuer COD gage in an environmental chamber. In this paper, tests were performed by a high temperature extensometer in a split furnace. Elastic-plastic fracture toughness J_{IC} tests were performed on A516 Gr70 carbon steel plate and test results were analyzed according to ASTM E 813-87 at temperatures ranging from room temperature(20°C) to 600°C. Experimental results showed that, the J_{IC} value and R -curve determined by the high temeprature extensometer agreed well with those by the COD gage. Load-displacement results during the J -tests showed an evidence of strain aging phenomenon at temperatures above 200°C. It was concluded that, temperatures ranging from 20 to 600°C, fracture toughness J_{IC} values were decreased with increasing temperatures.

———— 기 호 설 명 —————
 C_1, C_2 : 상수
 J : J -적분 값
 J_{IC} : J 의 임계치, 재료의 평면변형 탄소성파괴 인성치

T : 실험온도(°C)
 Δa : 균열진전량
 σ_{fs} : (항복강도+인장강도)/2

1. 서 론

*정회원, 성균관대학교 대학원
**정회원, 성균관대학교 공과대학 기계공학과
***정회원, 성균관대학교 공과대학 기계설계학과

고인성재료의 파괴는 소규모 항복(small scale yielding) 조건을 만족하지 못하면서 일어나는 경

우가 많다. 이러한 경우, 구조물의 안정성을 확인하기 위하여, 탄소성파괴역학에 의한 탄소성파괴인성을 사용하여 안전성 평가를 하여야 한다. 여기에는 J -적분의 임계치인 J_{IC} 가 유용하게 사용되게 된다. 탄소성파괴인성치 J_{IC} 는 파괴역학적인 설계의 가장 중요한 인자로, 실제로 원자력발전소의 원자로 및 그 냉각계통을 포함한 핵증기 공급계통 내의 부품 및 배관계통과 그 지지구조물 등의 설계기준으로 사용되고 있다. 이러한 구조물들은 고온에서 사용되며, 재료의 파괴특성이나 파괴인성치 등은 온도의 영향을 받는 것으로 알려져 있다^(1~3). 따라서 이러한 구조물의 안전설계나 안전성평가를 위하여는, 고온에서의 J_{IC} 값이 구하여져야 하며, 여러 가지 재료에 있어서 J_{IC} 값의 온도 의존성에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

고온에서의 J_{IC} 측정에는 일반적으로 환경조 (environmental chamber)와 고온용 COD 게이지를 사용한다. 그러나, 여기에는 온도가 제한되어 있어 고온에서의 실험에는 많은 어려움이 따르기 때문에, 이에 대한 연구가 미흡한 상태에 있다고 하겠다.

본 연구에서는 전보의 J_{IC} 시험법 비교⁽⁴⁾에 이어, 전기저항 가열로(splic furnace)와 고온용 신장계(high temperature extensometer)를 이용하여, 고온에서의 J_{IC} 측정의 가능성을 검토하였으며, 고온용 신장계를 사용할 때와 COD게이지를 사용할 때의 J_{IC} 값의 차이를 비교 검토하였다. 또한, 20°C~600°C에서, 온도변화가 J_{IC} 값에 미치는 영향에 대하여 고찰하여 보았다.

2. 고온에서의 J_{IC} 측정

J_{IC} 시험해석을 하기 위하여는, 하중과 하중선변위의 그래프를 그려야 한다. 상온에서는 Fig. 1과

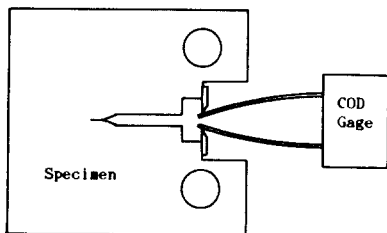


Fig. 1 Measurement of load-line displacement with COD gage

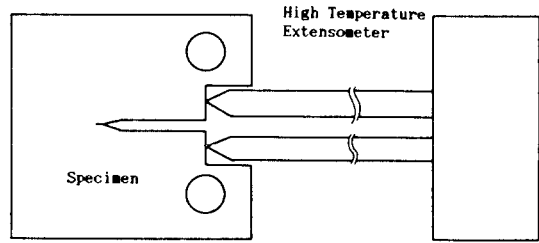


Fig. 2 Measurement of load-line displacement with high temperature extensometer

같이 균열개구부에 COD 게이지를 설치하여 하중선의 변위를 측정하고 있다. 일반적으로 고온의 J_{IC} 측정에서는, 환경조 내부에 고온용 COD 게이지를 설치하여 실험한다. 그러나 이 경우에는 환경조나 COD 게이지의 사용 가능한 온도범위에 제한이 있으며, 더욱 높은 온도에서의 J_{IC} 시험을 위하여는 별도의 가열로를 사용하여야 하고, 가열로 밖에서 하중선의 변위를 측정할 수 있는 고온용 신장계를 사용하여야 한다.

본 연구에서는 별도의 가열로로 전기저항 가열로를 사용하였으며, 열전도도가 낮고 열팽창과 열변형이 적은 수정봉 형태의 고온용 신장계를 Fig. 2와 같이 설치하여 하중선 변위를 측정하였다. 그러나 ASTM의 J_{IC} 표준시험법에서는, 균열개구부의 하중선에 COD 게이지를 설치하여 하중선의 변위를 측정하도록 하고 있다.

3. 측정위치에 따른 하중선 변형량 비교

고온용 신장계를 사용할 경우(Fig. 2), 하중선 변위의 측정위치가 ASTM 표준시험법의 측정위치(Fig. 1)와 서로 다르다. 이러한 측정위치의 차이나 측정기의 차이에 따라, 두 방법으로 측정된 변위가 서로 다르게 나타날 수 있으므로, 실험에 의하여 이를 검토하였다.

본 실험에서는 측정방법에 따른 변위를 비교하기 위하여, 본 연구에서 사용한 A516 Gr70 강의 시편에, 상온용 COD 게이지와 고온용 신장계를 동시

Table 1 Chemical composition of A516 Gr70 (Wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Mo	Al	Ni	V
.21	.24	1.070	.013	.004	.06	.035	.20	.38

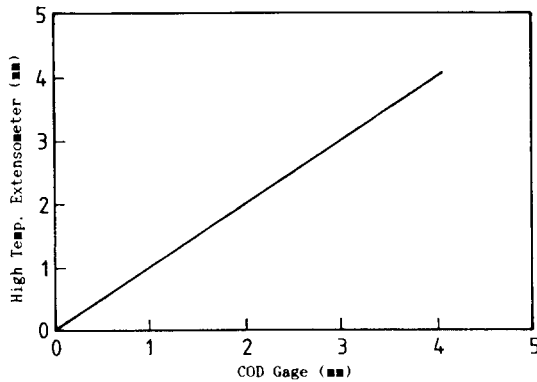


Fig. 3 Comparison of displacement with COD gage and high temperature extensometer

에 설치하여, 하중을 가할 때, COD 게이지의 변위와 고온용 신장계의 변위의 관계를 X-Y 기록계로 기록하였다. 그 결과, 두 변위 사이의 관계는, Fig. 3 과 같이 잘 일치하여 직선적으로 나타났다.

따라서, 고온용 신장계를 사용하여서도 J_{IC} 실험 해석을 할 수 있다고 판단하였다.

4. 고온 J_{IC} 시험

4.1 시편

시편재료로는 A516 Gr70 압연강을 사용하였으며, 화학성분과 온도변화에 따른 기계적 성질은 Table 2와 같다. 시편은 25.4mm 두께의 압연강판에서 Fig. 4와 같이 T-L 방향으로 채취하였다.

시편은, 고온용 신장계를 설치하기 위하여, Fig.

Table 2 Mechanical properties of A516 Gr70

Temperature (°C)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
20	58	39	22
100	57	38	26
200	56	38	29
300	55	37	31
400	59	37	27
500	53	31	34
600	45	27	37

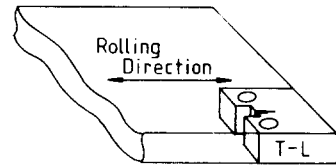


Fig. 4 Orientation of specimen

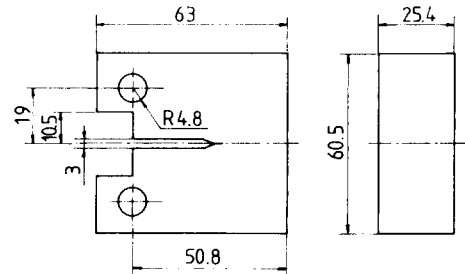


Fig. 5 Dimensions of CT specimen

5와 같이 된 직경이 $0.1875W$ ($=9.6\text{mm}$, $W=50.8\text{mm}$)인, ASTM의 CT 표준시편⁽⁵⁾으로 하였다.

4.2 시험장치 및 시험방법

시험방법은 ASTM E813-87법⁽⁵⁾에 따랐다. 시험기로는 25톤 용량의 서보 유압 컴퓨터제어 재료시험기(servohydraulic computer controlled materials testing system: Instron Model No. 1332)를 사용하였으며, 가열로로는 전기저항 가열로(high temperature split furnace, maximum temperature: 1000°C)를 사용하였다. 가열로의 온도조절에는, 300°C 까지는 자체 제작한 온도조절기를 사용하였으며, 400°C 에서 600°C 까지는 Instron사의 자동온도조절기(self adaptive temperature controller: Model No. 3120)를 사용하였다. 가열로 내의 온도분포가 균일하게 자동으로 조절되도록, 시편의 균열부와 가열로 내에 온도감지장치를 설치하여, 온도를 감지하고 조절하였다. 하중선의 변위는 고온용 신장계(high temperature extensometer, maximum temperature: 1000°C)를 사용하여 측정하였으며, 게이지 길이는 12.5mm 로 하였다.

Fig. 6은 본 시험에서 사용한 시험장치의 약도이다.

고온용 신장계를 사용하여 20°C , 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 500°C , 600°C 에서, COD 게이지를 사용할 때에는 20°C 와 100°C 에서 각각 J_{IC} 값을 구하고, 그 값의 차이를 각각 비교하였다. 이 때,

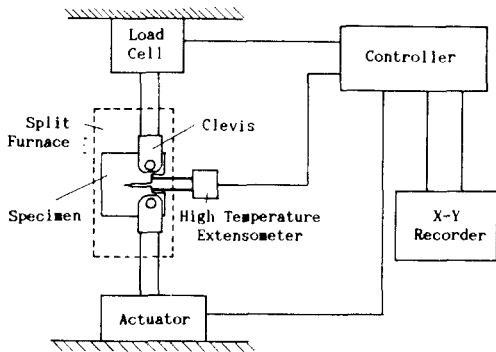


Fig. 6 Schematic diagram of J_{IC} testing system

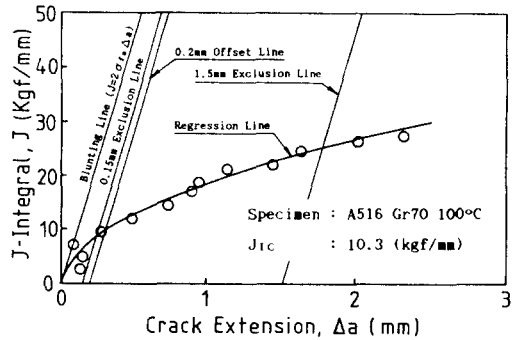


Fig. 8 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with high temperature extensometer at 100°C

온도조절에는, 사용범위가 $-70\sim 200^{\circ}\text{C}$ 인, 환경조 (environmental chamber system)를 사용하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 고온용 신장계와 COD게이지 사용에 따른 J_{IC} 값의 비교

하중과 하중선의 변위를 측정할 수 있으면, 제하 (unloading) 시의 컴플라이언스 (compliance)를 이용하여 균열 길이를 계산할 수 있으며^(6,7), 고온용 신장계를 사용할 때와, COD 게이지를 사용할 때의 하중선변위가 같게 나타나므로, 고온용 신장계를 사용하여 하중선의 변위를 측정하여도 J_{IC} 를 구할 수 있을 것이다.

그러나 고온용 신장계를 사용할 때와 COD게이지를 사용할 때의 J_{IC} 값에 차이가 있는지를 검토하기 위하여, 두 가지를 사용한 시험결과를 서로 비교하였다.

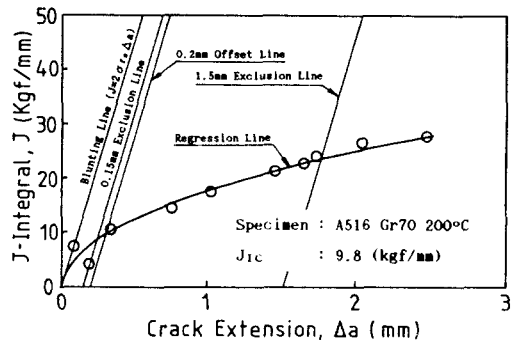


Fig. 9 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with high temperature extensometer at 200°C

20°C 에서 600°C 까지의 고온용 신장계를 사용한 J_{IC} 실험결과를 Fig. 7~Fig. 13과 같으며, 20°C 와 100°C 에서의 COD 게이지를 사용한 시험결과를 Fig. 14 및 Fig. 15와 같다.

20°C 와 100°C 에서, Fig. 7과 Fig. 8의 고온용 신

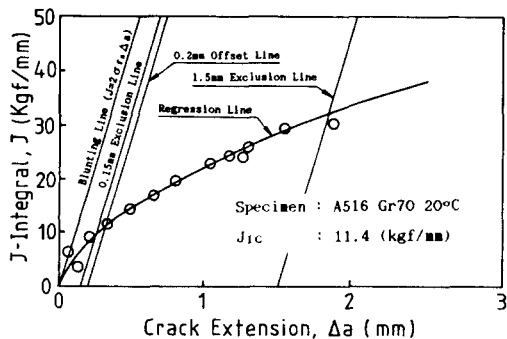


Fig. 7 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with high temperature extensometer at 20°C

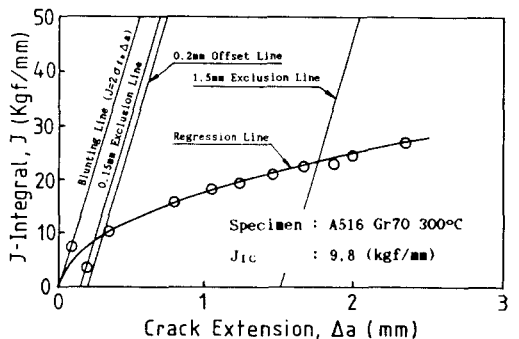


Fig. 10 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with high temperature extensometer at 300°C

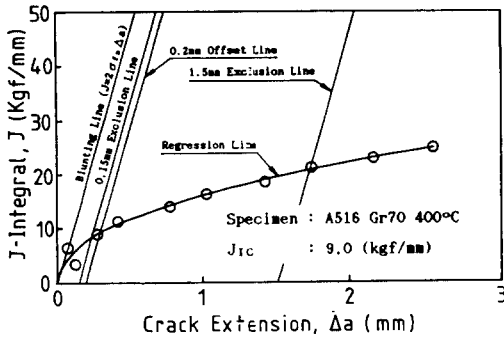


Fig. 11 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with high temperature extensometer at 400°C

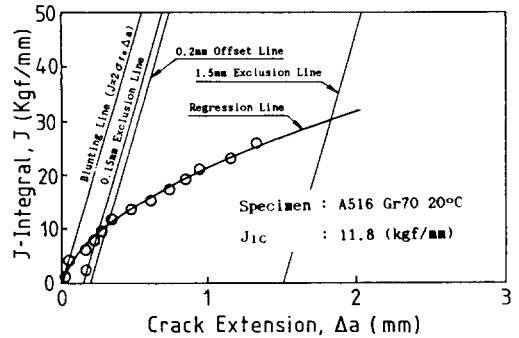


Fig. 14 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with COD gage at 20°C

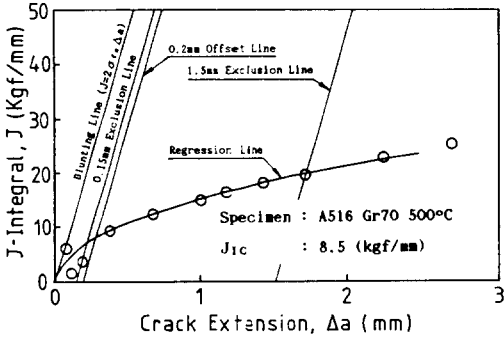


Fig. 12 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with high temperature extensometer at 500°C

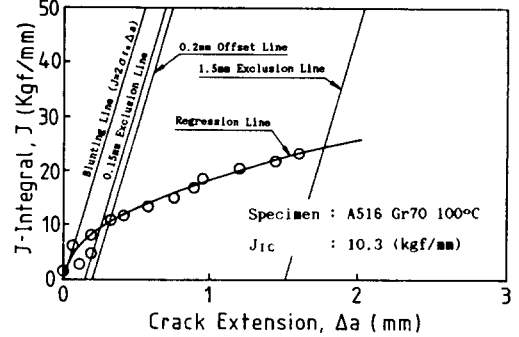


Fig. 15 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with COD gage at 100°C

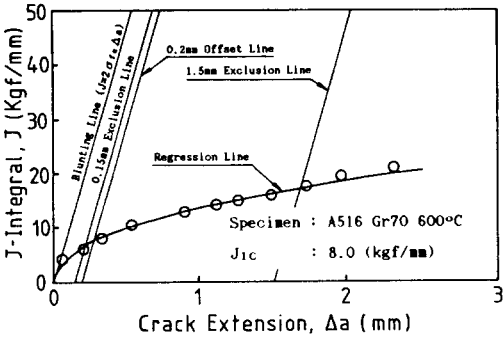


Fig. 13 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel with high temperature extensometer at 600°C

장계를 사용한 시험의 결과와 Fig. 14와 Fig. 15의 COD게이지를 사용한 결과를 비교할 때, 잘 일치하였다. 이와같이 고온용 신장계를 사용한 경우와 COD 게이지를 사용한 경우, 비록 두 온도역에서 비교한 실험결과이기는 하나, 실험 해석 결과에 차

이가 거의 없는 것이 확인되었으므로, 고온용 신장계와 전기저항 가열로(split furnace)를 사용하여, 고온에서의 J_{1C} 를 측정하기로 하였다. 이렇게 하여 600°C까지의 온도에서 실험해석을 하였고, 그 결과로부터 J_{1C} 의 온도 의존성에 대한 고찰을 하였다.

5.2 J_{1C} 값의 온도 의존성에 대한 고찰

Table 3에는, 본 연구의 시험결과인, 온도변화에 따른 J_{1C} 값과 R-곡선 [$J = C_1(\Delta a)^{C_2}$]의 상수 C_1 , C_2 를 나타내었다. Fig. 16은 Fig. 7~Fig. 15의 시험결과를 온도와 J_{1C} 와의 관계로 나타낸 것이다.

Table 3과 Fig. 16에서 보는 바와 같이, 온도가 증가함에 따라 J_{1C} 값이 감소함을 알 수 있겠다. 이 때, R-곡선의 식도 달라지는데, R-곡선의 식 [$J = C_1(\Delta a)^{C_2}$]에서 상수 C_1 과 C_2 값은 온도가 증가함에 따라 감소함을 볼 수 있다. 하중-하중선변위 곡선에서, 온도가 증가함에 따라 재료의 연성이 증가하고, 200°C에서는 시효변형(strain-aging)현

Table 3 The effect of temperature on J_{IC}

Test method	Temp. (°C)	R-curve $J = C_1(\Delta a)^{C_2}$		
		J_{IC} (kgf/mm)	C_1	C_2
With COD gage	20	11.8	22.3	0.56
	100	10.3	18.7	0.50
With high temperature extensometer	20	11.4	22.4	0.59
	100	10.3	18.8	0.51
	200	9.8	17.8	0.50
	300	9.8	17.8	0.50
	400	9.0	16.0	0.47
	500	8.5	15.3	0.49
	600	8.0	13.5	0.45

상⁽⁸⁾이 나타나기 시작하며, Fig. 17 에서와 같이 온도가 증가할수록 그 현상이 뚜렷하게 나타난다. 온도의 증가에 따라 J_{IC} 값이 다르게 나타나는 것으로 생각된다⁽⁹⁾. 그러나 이 온도구간에서는 온도의 상승에 따라 J_{IC} 값이 순차적으로 조금씩 감소하였으며, 600°C에서의 T_{IC} 값은 상온에서의 J_{IC} 값보다 약 39% 정도 작게 나타났다. 이러한 시험결과를 최소자승법(least square method)을 이용하여, J_{IC} (kgf/mm)와 T (°C)와의 관계로 나타내면, 다음과 같다.

$$J_{IC} = -0.0057T + 11.3$$

6. 결 론

고온용 신장계와 전기저항 가열로를 사용하여, 20°C ~ 600°C에서 J_{IC} 시험을 하였으며, 그 결과를 고찰하여 다음과 같이 결론을 얻었다.

(1) 고온용 신장계와 전기저항 가열로를 이용하여 고온에서의 J_{IC} 를 측정하였으며, 그 해석결과를 COD 게이지를 사용할 때와 잘 일치하였다.

(2) 20°C ~ 600°C에서, A516 Gr70 압연강의 $T-L$ 방향의 J_{IC} 값(kgf/mm)은 온도의 상승에 따라 조금씩 감소하였으며, 600°C에서의 T_{IC} 값은 상온(20°C)에서의 J_{IC} 값보다 약 30% 정도 작게 나타났다.

또한, 이를 온도 T (°C)와의 함수관계로 나타내면 다음과 같다.

$$J = -0.0057T + 11.3$$

(3) A516 Gr70 압연강의 R -곡선의 식 $J = C_1(\Delta a)^{C_2}$ 에서, 상수 C_1 , C_2 는 온도가 증가할수록 감소하였다.

참 고 문 헌

- (1) Mills, W.J., 1987, "Fracture Toughness of Two Ni-Fe-Cr Alloys", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 26, No. 2, pp. 223~228.
- (2) Gentilcore, V. J., Pense, A.W., and Stout, R.Dr., 1970, "Fracture Toughness of Pressure Vessel Steel Weldments", Welding Journal, Vol. 49, No. 8, pp. 341~353.
- (3) Shimomura, K., Shoji, T., and Takahashi, H., 1987, "Evaluation of Intergranular Fracture Initiation in Transition Region of Retired Steam Turbine Rotor Steel Using Small Specimens and the Acoustic Emission",

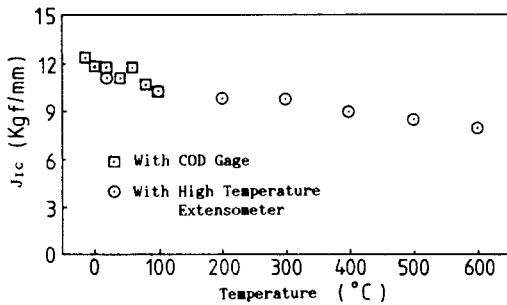


Fig. 16 The effect of temperature on the J_{IC} of A516 Gr70 steel

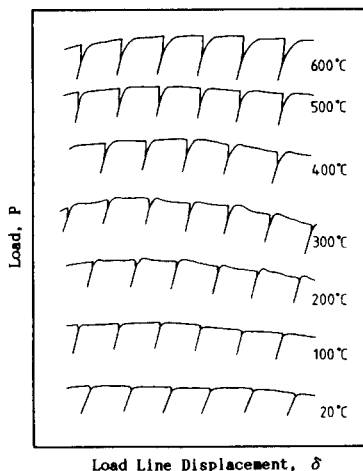


Fig. 17 $P-\delta$ curve for A516 Gr70 steel at several test temperature

- sion Technique", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 15, No. 5, pp. 257~264.
- (4) 석창성, 최용식, 양원호, 김영진, 1989, "재료의 탄소성파괴인성치 J_{IC} 의 온도 의존성에 관한 연구 (I)", *대한기계학회논문집*, 제13권 제4호, pp. 653~659.
- (5) "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness", 1987 *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM E 813-87.
- (6) Simth, R.F., and Doig, P., 1986, "Crack Length Measurement by Compliance in Fracture Toughness Testing", *Experimental Mechanics*, Vol. 26, No. 2, pp. 122~127.
- (7) Neal, B. K., and Priest, R.H., 1985, "The Unloading Compliance Method for Crack Length Measurement Using Compact Tension and Precracked Specimen", *ASTM STP 856*, pp. 375~393.
- (8) Miglin, M.T., Van Der Sluys, W.A., Futato, R.J., and Domian, H.A., 1985, "Effect of Strain Aging in the Unloading Compliance J Test", *ASTM STP 856*, pp. 150~165.
- (9) Ross, E., and Eisele, U., 1988, "Determination of Material Characteristic Values in Elastic-Plastic Fracture Mechanics by Means of J -Integral Crack Resistance Curves", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 16, No. 1, pp. 1~11.