

(論 文)

材料的 彈塑性破壞韌性值 J_{IC} 의 溫度 依存性에 관한 研究(Ⅲ)
—低溫에서의 J_{IC} 解析—

石 昌 星* · 崔 鎔 湜**

(1990年 12月 19日 接受)

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

C. S. Seok and Y. S. Choy

Key Words : Fracture Toughness(파괴인성), K_{IC} , J_{IC} , Effect of Temperature(온도의 영향),
Low Temperature(저온), DBTT(천이온도), A516 Gr70

Abstract

The objective of this study are to determine whether the J_{IC} approach could be used to evaluate the ductile to brittle temperature performance of A516 Gr70 steel and to evaluate the J_{IC} value as a function of temperature. Fracture toughness J_{IC} and K_{IC} tests were performed on A516 Gr70 carbon steel plate and test results were analyzed according to ASTM E 813 and ASTM E 399 at temperatures ranging from -160°C to room temperature (20°C). It may be recognized in this study that the temperature ranging from -15 to 20°C is the upper shelf region of ductile-brittle transition temperature. In this temperature range, the elastic plastic fracture toughness J_{IC} values slightly decreased with increasing temperature. The transition temperature may be -30°C . In the transition region near -30°C , the tendency of J_{IC} decrease with decreasing temperature was significant. At temperatures ranging from -160°C to -15°C , the relation between the J_{IC} value and the test temperature was obtained.

기 호 설 명

B : 試片의 두께	K_{IC} : 응력확대계수 K 의 임계치, 재료의 평면변형 파괴인성치
C_1, C_2 : 상수	K_Q : ASTM의 조건을 만족하지 못하는 K 의 임계치
E : 영계수	P_Q : 作用荷重
J : J -적분 값	S : 지지점간의 거리
J_{IC} : J 의 임계치, 재료의 평면변형 탄소성파괴인성치	T : 실험온도($^{\circ}\text{C}$)
J_Q : ASTM의 조건을 만족하지 못하는 J 의 임계치	W : 試片의 폭
	a : 龜裂길이
	a : a/W
	Δa : 균열진전량

* 정회원, 성균관대학교 대학원

** 정회원, 성균관대학교 공과대학 기계공학과

ν : 프와송비

σ_{fs} : (항복강도+인장강도)/2

1. 序 論

材料的 破壞靱성은 溫度의 影響을 받는다(1~6). 특히 低溫에서는 脆性破壞로 인하여 破壞靱性值가 급격히 減少하는 경향이 있으며(4~6), 破壞靱性值가 급격히 減少하는 溫度를 遷移溫度(DBTT; ductile brittle transition temperature)라 한다. 材料的 遷移溫度는 安全設計의 重要한 基準으로서, 使用 最低溫度보다 충분히 아래에 있어야 하며, 破壞靱性值의 解析에 重要한 因子라 할 수 있겠다. 이러한 遷移溫度의 確認과 低溫에서의 破壞靱性의 溫度依存性에 관한 研究를 하기 위하여는, 低溫에서의 파괴인성치 解析이 필수적이나, 低溫에서의 J_{IC} 解析에는 脆性破壞로 인하여 ASTM의 조건을 만족하는 J_{IC} 試驗이 不可能하다는 문제점이 있다. 이 경우, K_{IC} 시험을 하여 파괴인성치의 거동을 고찰할 수 있으나, ASTM의 두께조건을 만족하기가 어렵다.

이에 본 연구에서는, 低溫에서의 溫度變化에 따른 파괴인성치의 變動을 알아보기 위하여, K_{IC} 와 J_{IC} 시험을 하였으며 다음 事項들에 대한 고찰을 하고자 한다.

- (1) 常溫(20°C)에서 低溫(零下 160°C)까지의 J_{IC} 와 K_{IC} 試驗 解析을 통한, 破壞靱性值의 溫度 依存性
- (2) A516 Gr70강의 遷移溫度에서의 破壞靱性值의 變化
- (3) K_{IC} 와 J_{IC} 시험에서 ASTM의 조건을 만족하지 못할 경우, K_0 와 J_0 의 파괴인성치로서의 타당성

2. 연구현황 및 관련이론

2.1 연구현황

Joyce 등(4)은 -192°C~150°C의 溫度範圍에서, HY 130 강에 대한 破壞靱性值의 溫度依存性을 研究하였다. 이들은, Clarke 등(7)이 제안한 單一 試片法과, Gudas 등(8)이 제안한 컴퓨터를 이용한 J_{IC} 試驗方法에 따라 J_{IC} 試驗을 하여, Fig. 1과 같은 結果를 발표하였다. 이들의 연구에서, DBTT 부근에서는 균열성장(crack extension)없이 脆性破壞가 발생하므로, 최대하중점에서의 J 를 구하여 J_{IC} 로

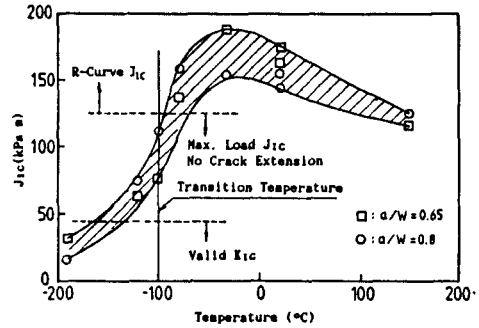


Fig. 1 J_{IC} vs. temperature of HY 130 steel(4)

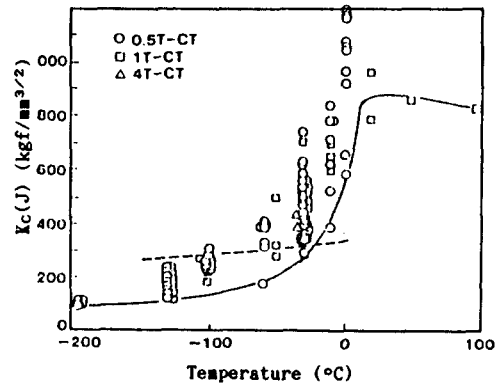


Fig. 2 J_{IC} vs. temperature of Ni-Cr-Mo-V rotor steel(5)

하였으며, DBTT 以下の 低溫에서는, K_{IC} 를 구하여 J_{IC} 로 換算하여 比較하였다.

Fig. 1에서, 材料的 破壞靱性值 J_{IC} 는 遷移現象을 보이며, 溫度變化에 따라, 遷移領域, 移轉의 領域, 遷移領域, 遷移領域 以後의 領域의 3領域으로 구분된다. 遷移領域에서는 溫度의 감소에 따라 J_{IC} 값이 급감소하며, HY 130 강의 경우 DBTT(ductile-brittle transition temperature; 遷移溫度)는 -100°C 부근으로 나타난다.

Fig. 2는 Watanabe 등(5)에 의한 Ni-Cr-Mo-V 로터 강의 K_{IC} 試驗結果이다. Fig. 2에서 실선은 安全設計의 基準이 되는 試驗데이터의 하한선(lower bound line)이며, 점선의 아래 부분은 平面變形率條件을 만족하는 K_{IC} 값들이다. Fig. 2에서도, Joyce 등(4)의 研究結果와 비슷한 거동을 볼 수 있다. 여기에서, Ni-Cr-Mo-V 로터강의 DBTT는 0°C 부근으로 나타내며, 遷移領域에서는 溫度의 減

소에 따라 J_{IC} 값이 급격히 감소함을 보인다.

Watanabe 등⁽⁵⁾의 연구에 따르면, 遷移領域에서는 거의 모든 試片들이 벽계파괴(cleavage fracture)를 일으키고, 溫度가 증가할수록 연성균열성장(ductile crack growth)이 크게 나타난 후에 破壞된다고 하였다.

일반적으로 破壞靱性에서의 DBTT는, 衝擊試驗에서의 DBTT(NDT; nil-ductility transition temperature)와는 다른 것으로 알려져 있다. 이에 대하여, 衝擊試驗으로부터 얻은 DBTT(NDT)와 K_{IC} 에서의 DBTT를 관련시켜보려는 연구가, 여러 研究者들에 의하여 시도되었고, Francois 등⁽⁶⁾은 하중속도나 두께가 다른 경우에 얻은 DBTT(NDT)와 K_{IC} 에서의 DBTT와의 관계를 研究하기도 하였다.

2.2 K_{IC} 의 決定

材料의 平面變形率破壞靱性 K_{IC} 를 實驗的으로 決定하는 試驗法에는, ASTM에서 標準試驗法으로 정한, ASTM E 399가 있다⁽⁹⁾. 標準試片으로는 CT나 TPB 試片이 주로 使用된다. 각 試片에 예리한 疲勞豫備龜裂을 생성시킨 후 試驗을 하여야 하며, 노치와 疲勞豫備龜裂(fatigue pre-crack) 길이를 합한 龜裂길이를 a 는, W 가 試片의 폭 일때, 다음 條件을 滿足하여야 한다.

$$0.45W < a < 0.55W \tag{1}$$

標準試片의 폭 W 는 두께 B 의 2배이며, 이 標準試片을 대신하여 TPB試片에서는 $0.25W < B < 0.5W$ 인 試片을 使用할 수도 있다. 이러한 標準試

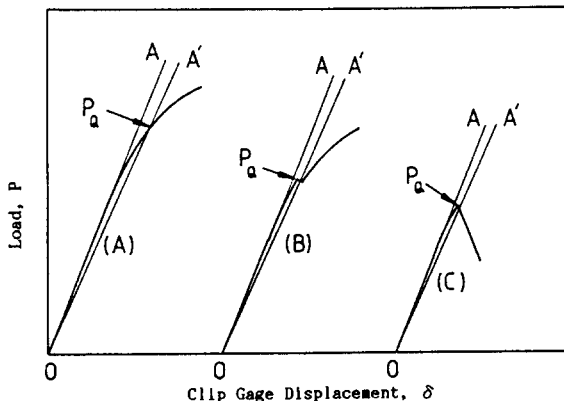


Fig. 3 Load-clip gage displacement curve

片을 準備한 다음, 試片에 荷重을 가하며 荷重 P 와 노치의 開口部에 設置한 COD 게이지의 變位 δ 와의 關係를 $X-Y$ 기록제로 자동으로 기록한다. 荷重 P 와 COD의 δ 와의 關係는, Fig. 3에 도시한 바와 같이, (A), (B), (C)의 세가지 類型으로 구분된다. 각각에 대하여 초기단계에서의 기울기(직선 OA 의 기울기) 보다 5% 낮은 기울기의 직선 OA' 를 긋는다. Fig. 3의 (A) 유형의 $P-\delta$ 선도에서는 직선 OA' 와 $F-\delta$ 선도의 교점에서 P_0 를 구하며, (B), (C)와 같은 유형의 $P-\delta$ 선도에서는 직선 OA 와 OA' 사이의 最大荷重을 P_0 로 하여 K_Q 를 계산한다.

TPB試片(3점굽힘試片)을 使用할 때에는, 다음 식에 의하여 K_Q 를 계산한다.

$$K_Q = \frac{P_Q S f(a)}{B W^{3/2}} \tag{2}$$

$$f(a) = [3a^{1/2} \{1.99 - a(1-a)(2.15 - 3.93a + 2.7a^2)\} / 2(1+2a)(1-a)^{3/2}] \tag{3}$$

CT試片(小型引張試片)에서는 다음식으로 K_Q 를 계산한다.

$$K_Q = \frac{P_Q f(a)}{B W^{1/2}} \tag{4}$$

$$f(a) = [(2+a)(0.886 + 4.64a - 13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.6a^4)] / [(1-a)^{3/2}] \tag{5}$$

以上の 方法에 따라 決定된 K_Q 가 다음의 식을 滿足하는 경우에는, K_Q 가 K_{IC} 로 認定된다.

$$B, a \geq 2.5(K_{IC}/\sigma_Y)^2 \tag{6}$$

2.3 K_{IC} 와 J_{IC} 의 關係에 대한 理論的 考察

J -積分은 단위두께당 龜裂이 전파하는데 所要되는 에너지(potential energy)로 定義되며, 龜裂의 크기에 비하여 塑性域이 아주 작은 小規模降伏(small scale yielding) 條件, 즉 線型彈性狀態에서는, J -積分 값이 전부 龜裂을 進展시키는 데 소요된다고 볼 수 있으므로 에너지해방률(energy release rate) G 와 같아진다. 이 경우 이들의 임계 값인 $J_{IC} = G_{IC}$ 의 關係도 成立되며, J 가 J_{IC} 될 때 K 도 K_{IC} 가 되므로, 다음 關係가 成立한다.

平面應力狀態(plane stress condition)에서

$$J_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} \tag{7}$$

平面變形率狀態(plane strain condition)에서

$$J_{IC} = \frac{(1-\nu^2) K_{IC}^2}{E} \quad (8)$$

K_{IC} 를 決定하는 데 있어서는 龜裂先端的 塑性域이 상대적으로 작아야 하며, 따라서 龜裂 및 試片의 크기가 커야 한다. 그러나 J -積分을 使用할 때에는 塑性域에 대한 제한이 없으므로, 작은 試片으로부터 J_{IC} 를 決定할 수 있는 장점이 있다.

따라서, 식 (7)이나 식 (8)의 有用성은, K_{IC} 에서 J_{IC} 로 換算할 수 있다는 점과, 大型試片에서 구하여야 하는 K_{IC} 를 작은 試片에서 구한 J_{IC} 로부터 구할 수 있다는 점에 있다.

3. 實 驗

3.1 試驗片

試片材料는 A516 Gr70 강을 使用하였으며, 化學成分과 溫度變化에 따른 機械的 性質은 Table 1,

Table 1 Chemical composition of A516 Gr 70[Wt.%]

C	Si	Mn	P	S	Mo	Al	Ni	V
0.21	0.24	1.07	0.013	0.004	0.06	0.035	0.20	0.38

Table 2 Mechanical properties of A516 Gr70

Temp.(°C)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
-30	64	46	18
-15	63	43	20
0	63	42	19
10	61	41	20
20	58	39	22

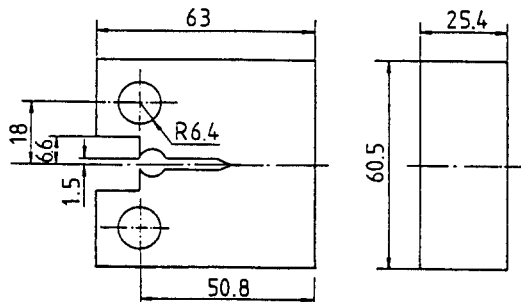


Fig. 4 Dimensions of specimen for COD gage

Tabel 2와 같다. J_{IC} 와 K_{IC} 의 試驗 모두에 ASTM E813⁽¹⁰⁾의 J_{IC} 試驗片인 CT 標準試驗片을 使用하였으며, 형상 및 치수는 Fig. 4와 같다. 25.4mm두께의 압연강판에서 Fig. 5와 같이 T-L 방향으로 試片을 採取하여 實驗하였다.

3.2 實驗裝置

本 實驗에서 使用한 試驗機는 Fig. 6과 같은, 25톤 유압작동식 컴퓨터제어 재료시험기(servohydraulic computer controlled materials testing system)이며, 荷重線의 變位測定은 변위 게이지(COD gage)를 使用하였다. 低溫試驗에서는 환경조(environmental chamber)에 액체질소를 분사시

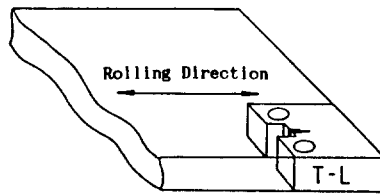


Fig. 5 Crack plane orientation of specimen

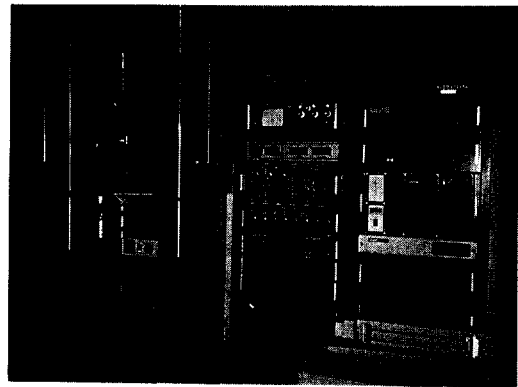


Fig. 6 Main parts of testing system

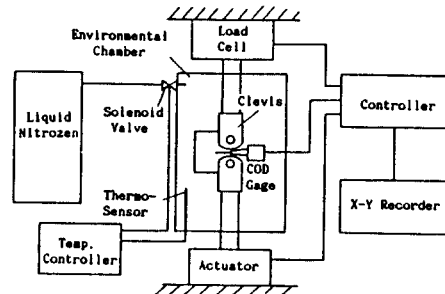


Fig. 7 Schematic diagram of testing system

켜 溫度調節을 하였다. 환경조의 내부에 試片을 設置하였으며, 溫度感知裝置를 設置하고 內部的 공기를 強制循環시켜 溫度를 一定하게 維持하였다. Fig. 7은 實驗裝置의 약도이다.

3.3 實驗方法

J_{IC} 의 試驗은 ASTM E813⁽¹⁰⁾의 J_{IC} 試驗법에 따라 수행하였으며, K_{IC} 試驗은 ASTM E399⁽⁹⁾의 K_{IC} 試驗方法에 따라 수행하였다.

常溫에서 疲勞豫備龜裂을 발생시킨 다음, 환경조에 試片을 設置하고 액체질소를 분사시켜 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 正確度로 溫度調節을 하였다. 實驗溫度에 도달한 후 1시간 정도 維持시킨 다음에 試驗을 하였으며, 試驗結果를 ASTM E813과 E399의 方法에 따라 解析하였다.

3.4 J_{IC} 試驗結果

ASTM E813-87법에 따라 零下 160°C 에서 20°C 까지의 溫度에서 J_{IC} 試驗을 하였다. 0°C , 10°C , 20°C 에서는 Fig. 8~Fig. 10에서 보는 바와 같이

ASTM의 條件을 滿足하는 J_{IC} 값을 얻을 수 있었으나, -15°C 에서는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 ASTM의 條件을 滿足할 만큼 龜裂이 進展되지 않았다. -30°C 以下の 溫度에서는 龜裂의 연성찢어짐(ductile tearing)이 없이 破壞되어, 有用한 J_{IC} 값을 얻을 수 없었다. 이 경우 脆性破壞가 시작될 때까지의 J 값을 破壞靱性値로 하였으며, E813의 條件을 滿足하지 못하므로 J_Q 로 표시하였다. 이러한 試驗結果를 정리하면, Table 3의 J_{IC} 試驗結果와 같다.

3.5 K_{IC} 試驗結果

K_{IC} 試驗結果 $20^{\circ}\text{C} \sim -100^{\circ}\text{C}$ 까지는 E399에 따라 Fig. 3의 (A)와 같이 P_Q 를 決定하여 K_Q 를 決定하였으며, $-130^{\circ}\text{C} \sim -160^{\circ}\text{C}$ 의 溫度範圍에서는, Fig. 3의 (C)와 같이 脆性破壞되었으므로, 最大荷重을 P_Q 로 하여 K_Q 를 決定하였다. 그러나 모든 溫度範圍에서 두께 B 가 25.4mm 인 경우에는, $B \geq 2.5(K_Q/\sigma_Y)^2$ 의 條件을 滿足하지 못하였으므로 K_Q 로 표시하였다. 이 試驗結果를 정리하면 Table 3

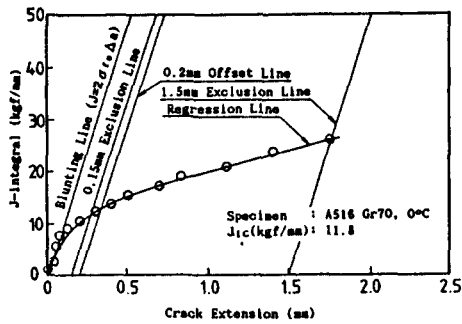


Fig. 8 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel at 0°C

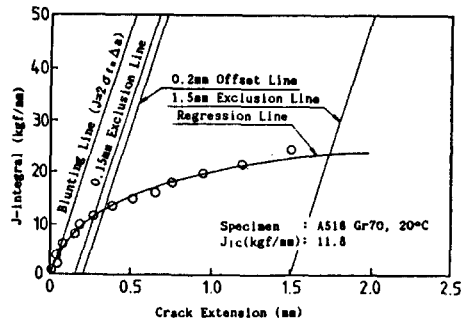


Fig. 10 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel at 20°C

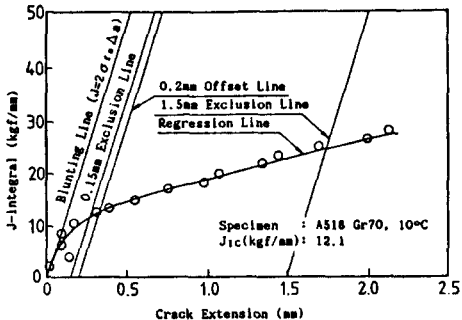


Fig. 9 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel at 10°C

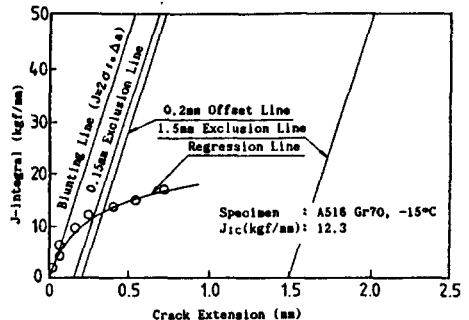


Fig. 11 $J-\Delta a$ curve for A516 Gr70 steel at -15°C

Table 3 Test results of J_{IC} and K_{IC}

Temp. (°C)	J_{IC} test results		K_{IC} test results		
	J_{IC} or J_Q (kgf/m)	Validity	K_Q (kgf/mm ^{3/2})	$J(K_Q)$ (kgf/mm)	Validity
20	11.8	○	186	1.5	×
10	12.1	○	191	1.6	×
0	11.8	○	182	1.5	×
-15	12.3	×	189	1.6	×
-30	6.3	×	197	1.7	×
-50	5.1	×	217	2.0	×
-100	4.0	×	234	2.4	×
-130	1.8	×	202	1.8	×
-140	1.8	×	203	1.8	×
-150	1.2	×	167	1.2	×
-160	1.2	×	166	1.2	×

의 K_{IC} 試驗結果와 같다. 이 K_Q 를 식 (8)을 利用하여 J_Q 값으로 換算하면, Table 3의 $J(K_Q)$ 와 같다. 이 때, 프와송비 ν 는 0.3, 탄성계수 E 는 $2.1 \times 10^4 \text{kgf/mm}^2$ 으로 하여 계산하였다.

4. J_{IC} 와 K_{IC} 의 시험결과 고찰

J_{IC} 試驗의 경우, 0°C ~ 20°C 범위에서는 ASTM의 條件을 滿足하는 J_{IC} 값을 얻을 수 있었으나, K_{IC} 試驗의 경우, 두께 25.4mm인 試片으로 實驗하여서는 K_Q 값이 166kgf/mm^{3/2}인 -160°C의 경우에도, E399의 平面變形率條件을 滿足하지 못하였다.

일반적으로 파괴인성시험에서는, 연성파괴가 발생할 때에는 J_{IC} 시험, 취성파괴가 발생할 때에는 K_{IC} 시험을 하여 파괴인성치를 검토한다. 그러나 온도변화에 따른 파괴인성치의 변화를 고찰하기 위해서는, 고온의 연성구간과 저온의 취성구간에 대한 시험을 모두 하여야 한다. 또, 이를 고찰하기 위하여 인자의 통일이 필요하다. 본 연구에서는 J_{IC} 로 파괴인성치로 통일하여 온도의 영향에 대한 고찰을 하였으며, K_{IC} 시험결과를 J_{IC} 값으로 환산한 것이 Table 3의 $J(K_Q)$ 값을 比較할 때 -130°C ~ -160°C의 低溫에서는 잘 一致하였으나, 常溫부근

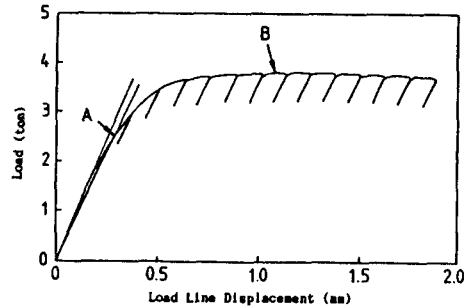


Fig. 12 $P-\delta$ curve for A516 Gr70 steel at 20°C

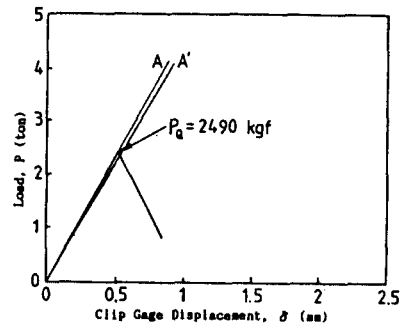


Fig. 13 $P-\delta$ curve for A516 Gr70 steel at -130°C

에서는 그 차이가 매우 크게 나타났다. 低溫區間에서는, E813의 條件을 滿足하지 못하는, J_Q 값이지만 脆性破壞가 발생하였으므로 그 값이 거의 一致하였으나, 상온부근에서는 延性破壞가 발생하였으므로 그 차이가 크게 나타난 것으로 생각된다. 상온(20°C)에서의 K_Q 값은 Fig. 12의 $P-\delta$ 선도의 A 점에서 決定되었으나, ASTM E813에 따른 J_{IC} 값은 B점에서 決定되었다. B점은 ASTM E813의 定義에 따라, 龜裂先端的 鈍化 後에, 龜裂이 0.2 mm進展(tearing) 되었을 때의 위치이며, A점은 ASTM E399의 K_{IC} 決定方法에 따른 龜裂進展의 시작점이다. 따라서 $J(K_Q)$ 값과 J_Q 값에 큰 차이가 나타난 것으로 생각된다. 低溫(-130°C ~ -160°C)에서의 K_Q 감소가 J_Q 값은 Fig. 13과 같이 P_Q 점에서 決定되었다. ASTM의 J_{IC} 試驗法에서는 J 값을 계산할 때, 彈性成分과 塑性成分으로 나누어 그 합을 구하도록 되어 있다. Fig. 13의 경우에는 塑性成分이 없어 彈性成分만으로 J 값을 계산하였으며, J 값의 彈性成分은 K 값으로부터 환산하므로, 이 경우의 J_Q 값과 $J(K_Q)$ 값은 당연히 一致하여야 한

다. Table 3에서 보는 바와 같이, $-130^{\circ}\text{C} \sim -160^{\circ}\text{C}$ 의 試驗結果에서는 J_0 값과 $J(K_0)$ 값이 一致하는 것으로 나타났다.

일반적으로 脆性破壞가 일어나는 경우에는 K_{Ic} 를 設計의 基準으로 사용한다. 그러나 J_0 값이, ASTM E813의 條件을 滿足하지 못하는 값이더라도 취성파괴가 발생할 때의 값이라면, J 의 臨界值로 有用하게 使用될 수 있을 것이다. A516 Gr70강의 試驗結果에서도, 低溫에서는 ASTM E813의 條件을 滿足하지 못하지만, 이 때의 J_0 값은 破壞發生時의 J 값임이 확실하므로, 設計의 基準으로 有用하게 使用될 수 있을 것이다.

5. J_{Ic} 값의 溫度依存性

저온에서의 試驗結果를 도시하면 Fig. 14와 같다. $J(K_0)$ 값을 考察할 때에, 溫度가 減少하여 따라 $J(K_0)$ 값이 增加하다가 $-100^{\circ}\text{C} \sim -160^{\circ}\text{C}$ 의 溫度에서는 다시 減少하는 것으로 나타나지만, 前章에서 考察한 바와 같이 $J(K_0)$ 값의 信賴性이 없으므로 확실하지 않다. 따라서, J_{Ic} 試驗法으로 구한 J_0 와 J_{Ic} 값을 利用하여 溫度의 影響을 考察하는 것이 타당할 것이라고 생각하며, 이를 利用하여 溫度의 影響을 考察하였다. -15°C 以上の 溫度에서는 J_{Ic} 값의 큰 변동이 없으며, 溫度의 增加에 따라 조금 씩 減少하는 경향을 보인다. -15°C 以下の 溫度에서는 J_{Ic} 값이 급격히 減少하였으며, 이 때 遷移溫度는 -30°C 부근인 것으로 판단된다. 이러한 遷移溫度 以下인 -150°C 부근에서는, 遷移溫度 以上の 溫度에서와 比較하여 破壞靱性值가 급격히 減

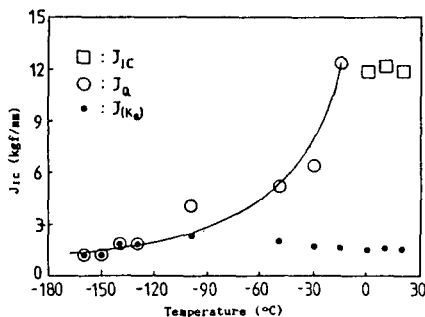


Fig. 14 The effect of temperature on the J_{Ic} of A516 Gr70 steel

少하였으며, 그 값이 遷移溫度 以上の 溫度에서의 10% 정도로 나타났다.

이러한 J_{Ic} 의 遷移舉動은 전장의 研究現況에서 소개한 Joyce 등⁽⁴⁾, Watanabe 등⁽⁵⁾의 研究結果와 비슷한 舉動을 하는 것으로 나타났다. 이들의 研究에서도 遷移領域에서는 溫度의 減少에 따라, 破壞靱性值가 급격히 減少하였으며, 遷移領域 以上에서는 溫度增加에 따라 J_{Ic} 가 서서히 減少하는 것으로 나타났다. 이러한 定性的인 舉動은 비슷하지만, 材料에 따라 遷移溫度나 J_{Ic} 의 定量的인 舉動은 다르게 나타났다. 遷移溫度는, 本 研究의 경우 -30°C 부근으로 나타났지만, Ni-Cr-Mo-V 로터강의 경우 0°C 부근⁽⁶⁾, HY 130 강 of 경우 100°C 부근⁽⁴⁾으로 나타났다.

本 研究의 試驗結果를 利用하여 -15°C 以下の 溫度에서 ($-15^{\circ}\text{C} \sim -160^{\circ}\text{C}$) A516 Gr70 강 of 溫度 $T(^{\circ}\text{C})$ 와 $J_0(\text{kgf/mm})$ 와 의 關係를 식으로 나타내면, 다음과 같다.

$$J_0 = -\frac{400}{(T-15)} - 1.0 \quad (9)$$

6. 結 論

A516 Gr70강을 利用하여 $-160^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 의 溫度範圍에서 J_{Ic} 와 K_{Ic} 試驗을 하였으며, 그 結果의 考察로부터 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) A516 Gr70 강 of 遷移溫度는 -30°C 부근으로 나타났으며, 遷移溫度 以下에서는 破壞靱性值(J_0)가 급격히 減少하며, 遷移溫度 以上の 溫度에서의 10% 정도로 나타났다.

(2) $-160^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$ 溫度範圍에서, A516 Gr70 강 of 溫度 $T(^{\circ}\text{C})$ 와 $J_0(\text{kgf/mm})$ 와 의 關係는 다음과 같다.

$$J_0 = -\frac{400}{(T-15)} - 1.0$$

(3) 脆性破壞가 發生할 경우의 J_0 값은 ASTM의 조건을 만족하지 못하더라도 파괴인성치로 신뢰할 수 있으나, ASTM의 조건을 만족하지 못하는 K_0 값은 그 신뢰성이 不確實하다.

참 고 문 헌

- (1) Carpinteri, A., Marega, C., and Savadori, A., 1985, "Ductile-Brittle Transition by Varying Structural

- Size", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 2, pp. 263~271.
- (2) Mills, W.J., 1987, "Fracture Toughness of Two Ni-Fe-Cr Alloys", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 26, No. 2, pp. 223~228.
- (3) Gentilicore, V.J., Pense, A.W., and Stout, R.D., 1970, "Fracture Toughness of Pressure Vessel Steel Weldments", Welding Journal, Vol. 49, No. 8, pp. 341~353.
- (4) Joyce, J.A., and Hasson, D.F., 1980, "Characterization of Transition Temperature Behavior of HY 130 Steel by the J_{IC} Fracture Toughness Parameter", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 13, pp. 417~430.
- (5) Watanabe, J., Iwadate, T., Tanaka, Y., and Yokobori, T., 1987, "Fracture Toughness in the Transition Region", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 28, No. 516, pp. 589~600.
- (6) Francois, D., 1986, "Relation between Various Fracture Transition Temperatures and the K_{IC} Fracture Toughness Transition Curve", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 23, No. 2, pp. 455~465.
- (7) Clarke, G.A., Andrew, W.R., Paris, P.C., and Schmidt, D.W., 1976, "Single Specimen Test for J_{IC} Determination", ASTM STP 590, pp. 27~42.
- (8) Joyce, J.A., and Gudas, J.P., 1979, "Computer Interactive J_{IC} Testing of Navy Alloys", ASTM STP 668, pp. 451~468.
- (9) "Standard Method of Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", 1986, Annual Book of ASTM Standards, ASTM E 399-83.
- (10) "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness", 1987, Annual Book of ASTM Standards, ASTM E 813-87.