

소형시험편의 Master Curve 방법을 이용한 원자로 압력용기강의 파괴인성 천이특성평가

이봉상* · 양원준** · 허무영** · 김주학* · 홍준화*
(1999년 2월 2일 접수)

Evaluation of the Fracture Toughness Transition Characteristics of RPV Steels Based on the ASTM Master Curve Method Using Small Specimens

Bong-Sang Lee, Won-Jon Yang, Moo-Young Huh, Joo-Hag Kim and Jun-Hwa Hong

Key Words : Reference Temperature(특성온도), Transition Region(천이영역), Three Point Bend Test(3점 굽힘 시험), PCC_v(Pre-Cracked Charpy Specimen ; 샤프피크기의 파괴인성시험편), Cleavage Fracture(벽개파괴), RPV Steel(원자로 압력용기강)

Abstract

Fracture toughness of five different reactor pressure vessel steels was characterized in the transition temperature region by the ASTM E1921-97 standard method using Charpy-sized small specimens. The predominant fracture mode of the tested steels was transgranular cleavage in the test conditions. A statistical analysis based on the Weibull distribution was applied to the interpretation of the scattered fracture toughness data. The size-dependence of the measured fracture toughness values was also well predicted by means of the Weibull probabilistic analysis. The measured fracture toughness transition curves followed the temperature-dependence of the ASTM master curve within the expected scatter bands. Therefore, the fracture toughness characteristics in the transition region could be described by a single parameter, so-called the reference temperature (T_0), for a given steel. The determined reference temperatures of the tested materials could not be correlated with the conventional index temperatures from Charpy impact tests.

기호설명

J_C : 불안정 취성파괴시의 J-적분값
 K_{Jc} : 주어진 시편에서 탄소성 벽개파괴인성
 $K_{Jc(med)}$: 동일조건에서 K_{Jc} 값들의 중위평균
 T_0 : 파괴인성 천이특성 기준온도

1. 서론

ASME SA508-3 혹은 SA533-B-1 등의 페라이트계 저합금강으로 제조되는 가압 경수로형 원자로 압력용기는 가동 중 고속중성자에 조사되어서 파

괴인성이 열화되는 조사 취화 현상을 보인다.^(1,2) 이로 인하여 비상사고시 급작스런 취성파괴의 위험도가 높아지므로 원자력발전소의 운전조건 및 안전여유도는 용기재료의 파괴인성특성변화를 고려한 파괴역학 해석에 기초하여 결정되고 있다. 페라이트계 강은 특정온도이하에서 온도가 감소함에 따라 파괴인성이 급격히 감소하고 파괴모드가 연성 안정균열성장 모드에서 불안정 취성파괴 모드로 전환된다. 종래에는 이런 파괴모드의 변화 혹은 온도에 따른 파괴인성 특성의 변화를 평가하기 위하여 샤프피 충격시험⁽³⁾과 낙중시험(DWT, drop weight test)⁽⁴⁾ 등의 비교적 정성적인 노치인성 시험을 적용하여 왔다. 이는 소성변형 혹은 안정균열진전을 수반한 불안정한 취성파괴의 양상을 나타내는 천이온도구역에서 기존의 표

* 회원, 한국원자력연구소

E-mail : bogsl@nanum.kaeri.re.kr

TEL : (042)868-8561 FAX : (042)868-8346

** 회원, 고려대학교 재료금속공학부

준시험법⁽⁵⁾에 따라 파괴인성 K_{IC} 를 결정하기 위해서는 매우 큰 시험편이 요구되며, 비록 충분히 큰 시험편을 사용하더라도 측정된 파괴인성값의 편차가 크게 나타나기 때문이다.⁽⁶⁾

지난 십여년간의 연구결과에 따르면 벽개파괴가 발생하는 천이온도영역에서 균열을 포함한 시험편의 취성과파괴 특성은 3-파라미터 와이불(Weibull) 확률이론에 의해 평가될 수 있다.⁽⁷⁾ 또한 대부분의 페라이트계 강에서 온도에 따른 취성 파괴인성의 변화는 특성온도 (T_0)로 보정된 하나의 마스터 곡선(master curve)으로 잘 나타내어진다고 보고하고 있다.⁽⁸⁾ 이를 기초로 최근 ASTM⁽⁹⁾에서는 페라이트계 강의 저온 파괴인성 특성온도를 결정하는 새로운 통계적 파괴인성 시험/해석 방법을 제정하였으며, 현재 이의 적용에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.^(10,11)

본 연구에서는 원자로 압력용기 재료로 사용되는 SA508-3 및 SA533-B-1 저합금강의 5개 재료에 대하여 취성과파괴가 발생하는 저온 천이온도영역에서 샤르피 시험편 크기의 3점굽힘 파괴인성 시험 결과를 새로운 ASTM 시험방법에 따라 와이불 분포를 이용한 확률·통계적 방법으로 해석하였다. 이로부터 각 재료의 파괴인성 천이 특성온도(T_0)를 구하고 그 결과와 종래의 샤르피 충격 시험으로부터 얻을 수 있는 정보들과의 연관성을 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시편

본 연구에 사용된 재료의 화학성분 및 상온 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. H1, H2, H3는 한국중공업(주)에서 각각 서로 다른 정련과정으로 제조된 상용 원자로 압력용기 재료이며, H4와 H5는 국제공동연구를 위해 IAEA (국제원자력기구)로부터 공급받은 재료이다. 각 재료는 모두 두께 200mm 이상의 대형 실 구조품과 동일한 크기로, 두께의 1/4 길이 지점에서만 시료를 채취하여 샤르피 시험편 크기의 3점 굽힘시험편 (PCCv, pre-cracked Charpy specimen)을 T-L 방향으로 가공하였다.

PCCv 시편의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 시편의 예비 피로균열은 시편폭의 약 50% ($a/W = 0.5$) 정도 되도록 실온에서 생성하였으며, 이때 균열선단에 소성변형이 생기지 않도록 ASTM E1921-97의 하중조건에 따라 최대하중을 조절하였다. 피로균열 후에 시편의 측면 홈은 일반적으로 가공하지 않았으며, 비교를 위하여 일부 시험편에만 양쪽면에 10%씩의 측면 홈(side-groove)을 가공하였다. 또한 1인치 두께의 표준형 CT (compact tension) 시험편도 일부 시험하였다.

시험은 모두 0°C 이하의 저온에서 행해졌다. 이때 시험온도는 isopentane을 냉매로 하는 저온용 욕조와 액체질소를 사용하여 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내의 정밀한 온도조절을 하였으며, 각 시편에 열전대를 부착하여 실제 시험온도를 확인하였다. 시험속도는 PCCv 시편의 경우는 0.5 mm/min, 그리고 1T-CT 시편의 경우는 1.0 mm/min의 하중선 변위속도로 수행하였다. 동일 시험온도에서 6개 이상의 파괴인성 시험을 반복하여 표준절차에 따라

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of the tested materials

Material	Chemical Composition (wt.%)										Tensile Property		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elong. (%)
H1 (VCD)	0.18	0.08	1.43	0.008	0.003	0.78	0.04	0.52	0.005	0.06	408	547	24
H2 (VCD+Al)	0.18	0.10	1.46	0.006	0.003	0.86	0.15	0.51	0.018	0.03	430	584	27
H3 (Si+Al)	0.21	0.24	1.36	0.007	0.002	0.92	0.21	0.49	0.022	0.03	447	595	27
H4 (JFL)	0.17	0.25	1.44	0.004	0.002	0.75	0.20	0.51	0.016	0.01	468	607	22
H5 (JRQ)	0.18	0.24	1.42	0.017	0.004	0.84	0.12	0.51	0.014	0.14	484	622	22

* Materials H1~H4 : ASME SA508-3, Material H5 : SA533-B-1

특성온도(T_o)를 구하였으며, 비교를 위하여 액체 질소 온도로부터 천이구역의 상부온도영역까지 온도를 변화시키면서 추가의 시험결과를 확보하도록 하였다.

2.2 파괴인성 천이특성온도(T_o)의 결정

최근 ASTM에서 새로이 제정한 시험방법⁽⁹⁾에 따라 파괴인성 천이특성온도 (T_o) 및 천이곡선을 구하는 방법을 요약하면 다음과 같다.

천이특성온도 T_o 는 IT-CT 시험에서의 파괴인성값이 $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 일 때의 온도를 의미하며, 이때 대부분의 시험편에서 파괴는 취성 벽개파괴모드로 나타난다. 각 시험편의 탄소성 벽개파괴인성 (K_{Jc})은 불안정 벽개파단까지 시험에 가해진 J-적분값 (J_o)으로부터 다음과 같이 정의되며, 이는 시험편의 크기에 의존하는 값이다.

$$K_{Jc} = \sqrt{E \cdot J_c} \quad (1)$$

주어진 시험편 크기에서 구해진 파괴인성값의 유효조건은 다음과 같다.

$$K_{Jc} \leq (E b_o \sigma_{ys} / 30)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 E 는 탄성계수, b_o 는 리거멘트 길이, σ_{ys} 는 항복강도이다. 동일한 시험온도에서 6개 이상의 유효한 파괴인성값이 얻어지면 모든 파괴인성값을 통계처리하여 기준 특성온도 (T_o)를 결정할 수 있다. 이때 식 (2)의 유효범위를 넘는 측정값들은 식 (2)의 최대 유효 상한값으로 고정된다.

각각의 시험편으로부터 얻어진 파괴인성값들은 다음과 같은 확률적 시험크기 보정식을 사용하여 IT-CT 시험에서 얻어질 수 있는 파괴인성값으로 환산된다.⁽¹²⁾

$$K_{Jc(1T)} = [K_{Jc} - K_{\min}] \times \left(\frac{B}{B_o} \right)^{\frac{1}{4}} + K_{\min} \quad (3)$$

여기서 B 는 시험편의 두께, B_o 는 기준이 되는 IT-CT의 두께로 1인치이며, K_{\min} 은 경험적으로 결정된 값으로 ASTM에서는 $20 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 제시하고 있다.

최소 6개 이상의 유효한 파괴인성값을 포함하는 모든 파괴인성값의 50% 확률적 평균값($K_{Jc(\text{med})}$)은 다음과 같이 구해진다.

$$K_{Jc(\text{med})} = (K_o - K_{\min})(0.9124) + K_{\min} \quad (4)$$

여기서

$$K_o = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - K_{\min})^4}{(r - 0.3068)} \right]^{1/4} + K_{\min} \quad (5)$$

이다. N 은 시험된 시험편의 총 숫자, r 은 그 중 유효한 파괴인성값의 개수를 의미한다.

1인치 두께의 시험편을 기준으로 페라이트계 강의 온도(T)에 따른 파괴인성 변화는 다음과 같은 단일곡선 (Master Curve)으로 나타내어진다.

$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 \cdot \exp[0.019(T - T_o)] \quad (6)$$

따라서 페라이트계 강의 천이온도 특성온도 (T_o)는 다음과 같이 결정된다.

$$T_o = T_{\text{test}} - \frac{1}{0.019} \ln \left[\frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70} \right] \quad (7)$$

3. 실험결과

시험온도 범위 내에서 모든 시험편의 최종 파괴모드는 불안정 취성파괴 양상을 나타내었으나, 하중-변위 곡선 상에서 파단시까지의 소성변형량은 재료 및 시험온도 뿐만 아니라 동일 조건에서도 각 시험편 사이에 편차를 보였다. 시험온도가 증가할수록 파괴가 일어나기 전까지의 소성변형량은 대체로 증가하였으며, 천이구역의 상부에서는 많은 소성변형후에 약간의 안정균열진전이 발생한 후에 불안정 취성파괴로 이어지는 전형적인

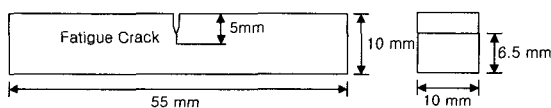


Fig. 1 Geometry of Charpy-size three point bend specimen

파괴모드의 천이현상을 보여주었다.

Fig. 2에는 각 재료별로 파괴인성시험 결과를 온도에 따라 도시하였다. 모든 시험결과는 식 (3)을 이용하여 1T-CT 시험편에 해당하는 파괴인성값으로 보정하였으며, 각 재료에서 구해진 기준특성온도(T_0)도 함께 도시하였다. 각 그림에서 실선과 점선은 각각 ASTM 표준시험법에 따라 결정된 파괴인성 천이특성곡선 및 90% 신뢰도 구간(5% 및 95% 상·하한선)을 나타낸다. 비교를 위하여 실제 1T-CT 시험편으로부터 얻어진 실험결과도 사각형 표시로 함께 도시하였다.

파괴인성이 상대적으로 낮은 H1 재료의 경우 비교적 분산범위가 크고, 시험편 종류에 따른 영향도 나타났으나 예상되는 신뢰도 구간에서 크게

벗어나지는 않았다. 다른 4개 재료의 경우에는 시험결과와 분산도 및 시험편 종류에 따른 영향이

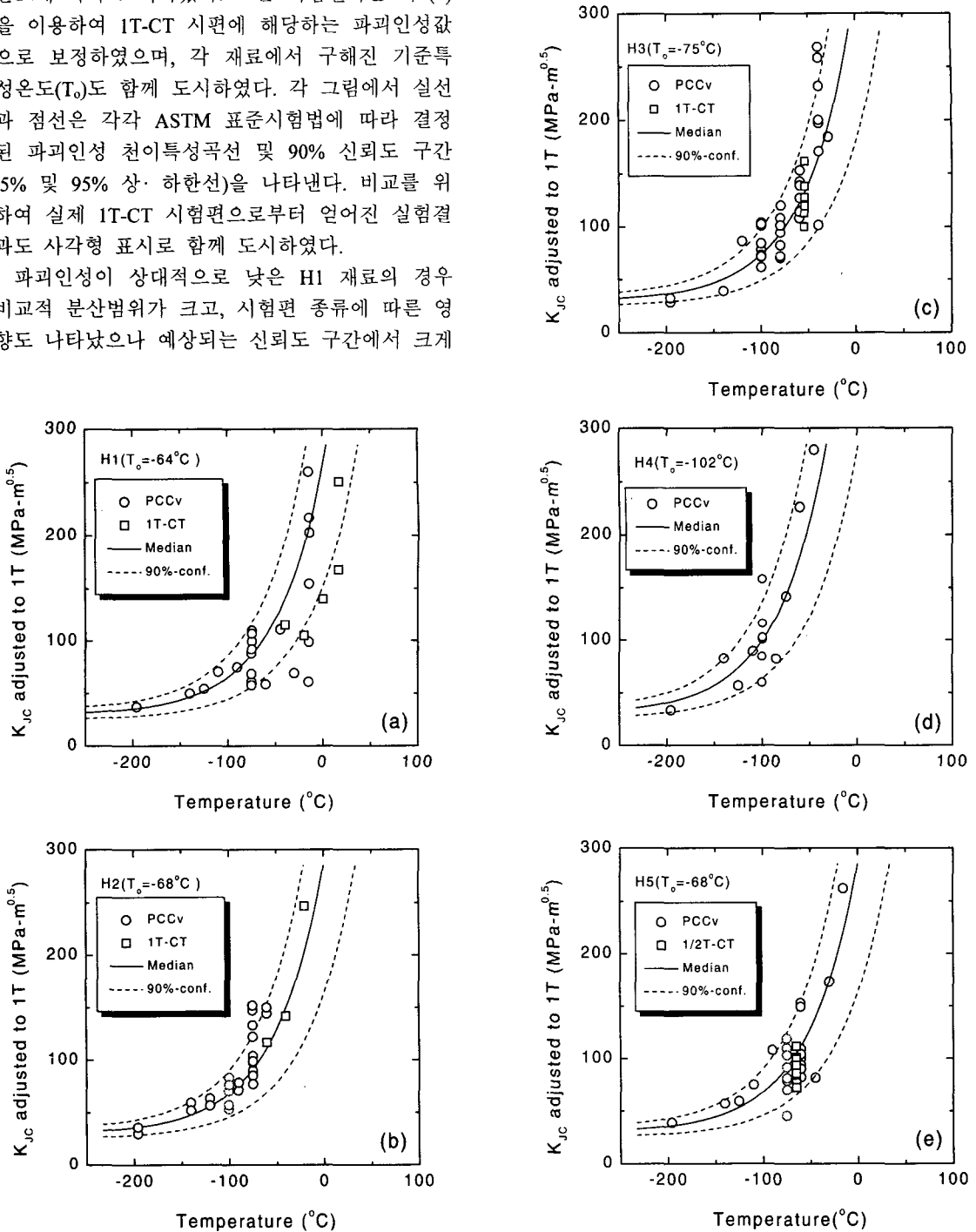


Fig. 2 Fracture toughness test results of the tested materials

그다지 크지 않았다.

Fig. 3에는 5개 재료의 시험결과를 종합하여 시험온도를 T_0 로 보정한 온도축에 대해서 도시하였다. 이는 ASTM에서 제시한 페라이트계 강 마스터곡선이 본 실험의 결과에 잘 적용이 되고 있음을 보여주며, 또한 이론적으로 제시된 90%와 98% 신뢰도 구간들은 실제 실험에서 얻어진 결과의 분산도와 잘 일치하였다.

4. 고찰

4.1 와이블 피팅

ASTM E1921-97 표준시험법은 취성파괴에 대한 weakest-link-theory와 3-parameter 와이블 확률 분포 이론에 기초하고 있다. 따라서 본 연구에서 얻어진 실험결과들이 그에 잘 일치하는지를 알아보기 위해서 와이블 피팅(Weibull Fitting)을 행하였다.

3-파라미터 와이블 함수에 의한 파괴확률은 다음과 같이 표현된다.

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_I - K_{\min}}{K_o - K_{\min}} \right)^m \right] \quad (8)$$

여기서 P_f 는 응력확대계수 K_I 에 해당하는 외부하중이 가해질 때 시험편이 파괴될 확률을 나타낸다. K_o 는 주어진 조건에서 재료의 특성값이며, 개념

적으로는 63.2%의 파손확률을 갖는 파괴인성값이다. 계수 m 은 와이블 분포의 기울기이며, Wallin⁽⁷⁾ 및 Anderson 등⁽¹³⁾에 의하면 균열 첨단 응력장(crack tip stress field)으로부터 유도된 이론적인 와이블 계수는 약 4 정도이다.

식 (8)로부터 양변에 더블 로그를 취하고 K_I 를 각 시험편에서 실제 측정된 K_{JC} 값으로 대체하면, 다음과 같이 $\ln \ln[1/(1-P_f)]$ 를 수직축으로 하고, $\ln[K_{JC} - K_{\min}]$ 를 수평축으로 하는 3-파라미터 와이블 그래프를 얻는다.

$$\begin{aligned} \ln \ln \left[\frac{1}{1-P_f} \right] &= m \cdot \ln(K_{JC} - K_{\min}) \\ &- m \cdot \ln(K_o - K_{\min}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 각 측정치의 발생확률(P_f)은 동일조건에서 얻어진 N 개 시험편의 파괴인성 측정값들을 크기 순서로 정렬한 후, i -번째 순위의 값에 대한 발생확률로 다음과 같이 근사적으로 정의된다.

$$P_{f,(i)} = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \quad (10)$$

Fig. 4는 예비균열처리된 샤르피 시험편에 대한 소형 3점굽힘 시험결과를 3-파라미터 와이블 그래프에 도시한 것이다. 대부분의 경우 이론적인 기울기 4에 잘 일치하고 있으나, Fig. 4(a)에서 온도가 높은 경우는 다소 차이를 나타내었다. 이는 고온에서 소성 구속력의 상대적인 효과가 작을 때므로 생각할 수 있다. 상대적인 소성구속력의 효과를 인위적으로 크게 하기 위하여, 보다 큰 시험편 (1T-CT) 및 양쪽면에 10%씩의 측면홈(side groove)을 가공한 샤르피 크기 소형시험편을 시험한 결과에서는 동일온도에서도 Fig. 4(b)에서와 같이 비교적 일정한 기울기의 분포를 얻을 수 있었다.

4.2 시험편의 크기효과

일반적으로 파괴인성 시험 결과의 큰 특징은 시험편이 클수록 측정되는 파괴인성치가 작아진다는 것이다. 이는 주로 소성구속력의 차이에 기인하는 효과⁽¹⁴⁾로 설명되어 왔으나 그 효과를 정량화 하기란 쉽지 않다. 한편, 불안정 취성파괴가 발생하는 경우에는 시험편의 크기효과(specimen size effect)를 확률적 취성파괴 이론으로 설명할

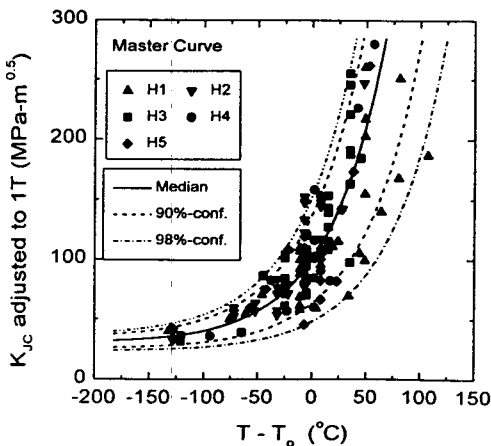


Fig. 3 Measured fracture toughness data sets with the ASTM master curve

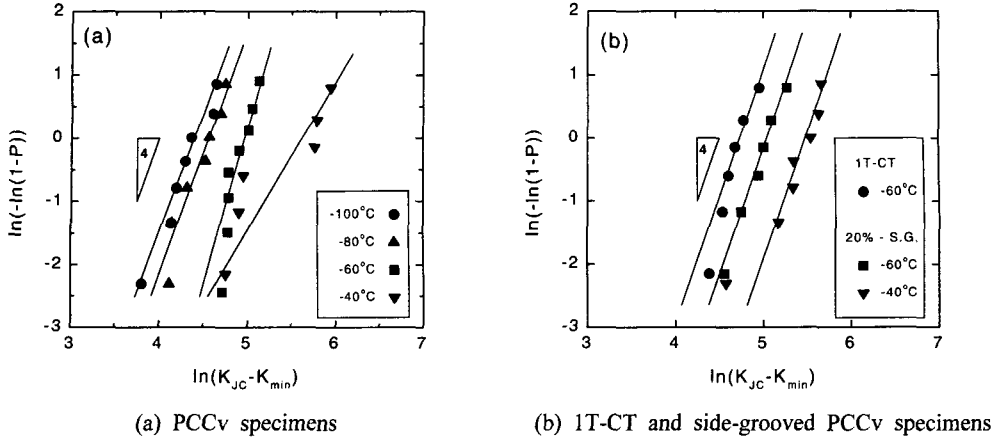


Fig. 4 3-parameter Weibull plots of the fracture toughness test results for H3 material

수 있다.⁽¹⁵⁾ 재료내에 무작위로 분포되어 있을 수 있는 작은 취약지역의 하나에 임계응력이 작용하여 벽개 파괴가 시작하면 시편전체가 파단된다는 최대취약결합설(Weakest Link Theory)을 가정하면, 재료내의 국부적인 취약지역이 시편의 균열선단 부근에 분포할 수 있는 확률은 균열선단의 폭(즉, 시편의 두께)에 비례하므로 파괴인성의 시편크기의존성을 다음과 같이 정량화 할 수 있다.

임의의 두께를 갖는 시험편의 균열선단은 단위 두께를 갖는 여러개의 시편이 직렬로 조합된 상태로 단순화 하자. 이중 한 개의 시편이 파단되면 전체 시편이 취성파괴되는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 시편의 전체두께를 X 라하면 이의 파손확률은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{f,X} = 1 - \{1 - P_{f,o}\}^X \quad (11)$$

여기서 $P_{f,X}$ 와 $P_{f,o}$ 은 각각 임의의 두께를 갖는 시편과 단위두께 시편에 대한 파괴확률을 의미한다. 식 (11)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음과

같다.

$$P_{f,X} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X^{1/m} \cdot (K_I - K_{min})}{K_o - K_{min}} \right)^m \right] \quad (12)$$

이를 식 (8)과 비교하면 단위 시편 (1T-CT) 크기에 대한 파괴인성값의 보정식이 식 (3)과 같이 얻어진다.

Table 2는 H3 재료의 -60°C에서 1T-CT 시험결과 및 샤르피 시험편으로 구한 파괴인성치를 확률적 크기 보정식으로 보정된 값들과 비교하였다. 또한 Table 2에는 인위적인 소성구속력을 주기위해 측면홈을 가공한 시편의 결과도 함께 제시하였는데, 표에서 보는 바와 같이 취성파괴 영역에서 측정된 파괴인성치에 측면홈의 영향은 별로 없는 것으로 나타났다. 따라서 천이온도영역에서 취성파괴시에 나타나는 시험편의 크기효과는 소성구속력 보다는 확률적인 영향이 주도하는 것으로 판단된다.

Table 2 Correction of the specimen size effect on the measured fracture toughness based on the probabilistic theory of the cleavage fracture

Material	Specimen	No. of tests	K _{JC} (measured)	K _{JC} (size corrected)
H-3 (-60°C)	1T-CT	6	124	124
	PCCv	8	148	122
	PCCv (20% S.G.)	8	152	125

4.3 샤르피 충격시험 결과와의 연관성

전통적으로 충격시험 결과로부터 천이온도 특성을 나타내는 특성 값으로는 FATT, T_{NDT} , $T_{50ft-lb}$, $T_{30ft-lb}$, T_{2ft} 및 T_{35mil} 등 여러 가지 값들이 적용되어왔다. Fig. 5는 각각의 재료들에 대하여 충격시험 결과로부터 얻어질 수 있는 여러가지 특성 온도들을 본 연구에서 구한 파괴인성 특성온도(T_0)에 대하여 도시하고 그 상관관계를 알아본 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 충격시험으로부터 결정된 천이온도 지시값들은 파괴인성시험으로 구한 기준특성온도 T_0 와 상관관계가 그다지 좋지 않았다. 이는 노치충격인성과 균열의 파괴인성 시험시에 미소 파괴기구가 다르기 때문일 것이다.

Wallin⁽¹⁶⁾은 충격시험으로부터 구한 T_{2ft} 값과 T_0 사이에 대략적으로 일대일의 관계가 성립한다고 보고하였으며, Fig. 5(c)와 같이 표준편차 ($\pm 2\sigma$) 범위를 제시하였다. 금번의 시험결과는 비록 그 수량이 많지는 않음을 고려하더라도 상관관계의 편차범위가 매우 크고, 그 관계도 선형적인 거동을 보이지는 않았다. 따라서 정량적인 파괴역학 해석에 노치인성 결과로부터의 경험적 관계식 등을 이용할 때는 신중을 기해야 하리라 사료된다. 샤르피 충격시험의 간편성 및 과거에 축적된 많은 시험자료의 유용성을 고려하면 그 결과와 파괴인성 시험결과와의 연관성에 대해 이론적/실험적으로 보다 많은 연구가 필요할 것이다.

5. 결론

원자로 압력용기재료인 SA508-3와 SA533-B-1 저합금강의 5개 재료에 대해서 연성-취성 천이온도 영역에서 새로운 ASTM E1921-97 표준시험법에 따라 샤르피 충격시험편 크기의 소형 3점 굽힘시험에 의한 탄소성 벽개파괴인성 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 천이영역에서의 파괴인성값은 3-파라미터 와이불 확률분포 이론에 근거하여 잘 설명될 수 있었다. 이때 와이불 기울기도 이론치인 4에 비교적 잘 일치하였다.
- (2) 취성파괴에 대한 확률이론에 근거하여 천이영역에서 측정된 파괴인성값에 대한 시험편의 크기효과를 잘 보정할 수 있었다.
- (3) 샤르피 크기의 소형시험편을 이용한 실험결과

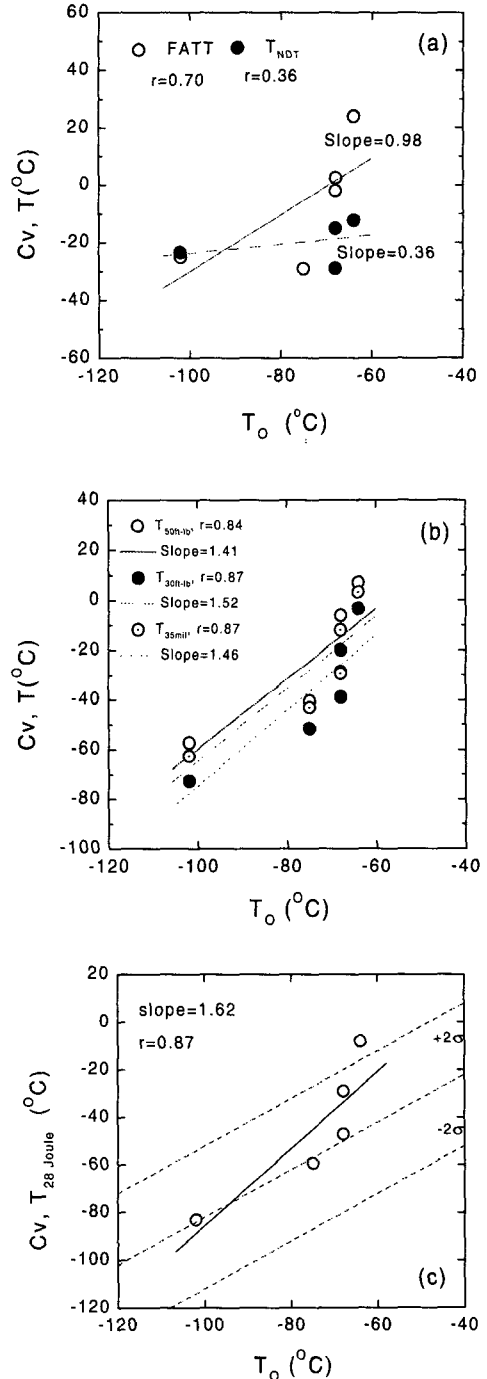


Fig. 5 Correlation between the fracture toughness reference temperature (T_0) and various index temperatures obtained from Charpy impact tests

들은 ASTM에서 제시한 페라이트계 강의 마스터 곡선에 잘 일치하였다.

(4) 전통적으로 샤르피 충격시험결과로부터 얻어지는 천이특성온도 값들과 새로운 ASTM 파괴인성시험법으로 구한 기준특성온도 T_0 사이의 상관관계는 그다지 좋지 않았다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기사업 중 원자로압력경계재료 과제에 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Hong, J. H., 1990, "Radiation Embrittlement and Integrity Assurance of Nuclear Reactor Pressure Vessels," *Bulletin of the Korean Institute of Metals*, Vol. 3, No. 2, pp. 159~168.
- (2) Odette, G. R., 1983, "On the Dominant Mechanism of Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessel," *Scripta Metallurgica*, 17, pp. 1183~1188.
- (3) ASTM, 1988, "Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials," ASTM E 23-88.
- (4) ASTM, 1987, "Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels," ASTM E 208-87
- (5) ASTM, 1983, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," ASTM E 399-83.
- (6) Iwodate, T., Tanaka, Y., Ono, S., and Watanabe, J., 1983, "An Analysis of Elastic-Plastic Fracture Toughness Behavior for J_{IC} Measurement in the Transition Region," *Elastic-Plastic Fracture, ASTM STP 803*, Volume II, pp. II531~II561.
- (7) Anderson, T. L., Stienstra, D., and Dodds, R. H., 1994, "A Theoretical Framework for Addressing Fracture in the Ductile-Brittle Transition Region," *Fracture Mechanics : Twenty-Fourth Volume, ASTM STP 1207*, pp. 184~214.
- (8) Wallin, K., 1991, "Fracture Toughness Transition Curve Shape for Ferritic Structural Steels," *Fracture of Engineering Materials & Structure*, pp. 83~88.
- (9) ASTM, 1997, "Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range," ASTM E 1921-97.
- (10) 이봉상, 홍준화, 1997, "압력용기용 페라이트계 철강소재의 파괴인성 천이특성 평가기술," 대한기계학회지, Vol. 37, No. 11, pp. 40~42.
- (11) Kang, S. S., Chi, S. H., and Hong, J. H., 1998, "Statistical Evaluation of Fracture Characteristics of RPV Steels in the Ductile-Brittle Transition Region," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 30, No. 4, pp. 364~376.
- (12) Landes, J. D. and Shaffer, D. H., 1980, "Statistical Characterization of Fracture in the Transition Region," *Fracture Mechanics : 12th Conference. ASTM STP 700*, pp. 368~382.
- (13) Anderson, T. L. and Steinstra, D., 1989, "A Model to Predict the Sources and Magnitude of Scatter in Toughness Data in the Transition Region," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 17, No. 1, pp. 46~53.
- (14) Irwin, G. R., 1960, "Fracture Mode Transition for a Crack Traversing a Plate," *Journal of the Basic Engineering, ASME*, 82, pp. 417~425.
- (15) Wallin, K., 1995, "Validity of Small Specimen Fracture Toughness Estimates Neglecting Constraint Corrections," *Constraint Effects in Fracture : Theory and Application, ASTM STP 1244*, pp. 519~537.
- (16) Wallin, K., 1989, "A Simple Theoretical Charpy V - K_{IC} Correlation for Irradiation Embrittlement," *Innovative Approaches to Irradiation Damage and Fracture Analysis, PVP-Vol.170, ASME*, pp. 83~85.