

RT_{NDT} 결정과 K 곡선 도출을 위한 통계적방법

강성식, 지세환, 홍준화
한국원자력연구소

요 약

원자력 발전소의 안전성과 향후 수명연장에 있어 중요한 파괴인성 평가기준으로 사용되는 연성-취성 천이온도인 RT_{NDT}의 중요성과 값 결정에 있어서의 문제점을 살펴보고, 천이온도 영역에서 파괴인성의 통계적 분포를 이용한 RT_{NDT}예측과 충격시험결과로부터 K곡선을 유도하는 방법에 대한 가능성 등을 논의하였다.

1. 서론

원자로 압력용기강은 원자력발전소의 가동중 중성자 조사에 의해 열화 된다. 중성자 조사효과의 일반적인 현상으로는 항복응력과 인장응력의 증가, Charpy upper shelf 에너지 및 파괴인성의 감소, 그리고 DBTT(ductile to brittle transition temperature)의 상승 등이 있다. 이러한 열화 정도는 압력용기강에 조사되는 neutron fluence level과 조사온도 그리고 제조이력(processing history)과 화학조성에 많은 영향을 받는다. 조사취화에 의한 DBTT의 상승은 특히 가압열충격(PTS, pressurized thermal shock) 발생시 취성파괴의 위험을 증가시키며, 안전운전 여유도에 영향을 주기 때문에 천이온도의 증가는 안전운전의 중요한 인자가 된다. 현재 10 CFR 50.61 및 USNRC R.G. 1.99 Rev.2에 의해 RT_{NDT} 값은 다음과 같이 계산된다[1].

$$RT_{NDT} = (CF) f^{(0.28 - 0.1 \log f)} + (initial RT_{NDT}) + (Margin)$$

여기서 f 는 10^{19} n/cm², $E > 1\text{MeV}$ 로 나타낸 조사량 (fluence)이며, CF (chemistry factor) 는 재료 특성이다. RT_{NDT}는 PTS에 대한 천이온도, RT_{PTS}계산에서도 동일식이 적용되며, PTS에 대한 screening criteria는 원주방향의 용접부인 경우 용기내벽에서 300°F 이다. 이 식에서 첫 번째 항이 바로 조사에 의한 천이를 보여준다. 결국 뒷식에서 우선적으로 결정되어야 할 것이 바로 초기 RT_{NDT} 이며, 이것의 결정방법은 ASME B&PV Code Section III, NB-2331에 규정되어 있다. RT_{NDT}값은 안전운전 곡선(P-T limit curve) 및 안전가동 수명 결정, 가압 열충격해석, 그리고 압력용기강 건전성 평가 등에 중요한 역할을 한다.

본 글은 현재 사용중인 RT_{NDT} 결정법의 문제점과 천이영역(transition region)에서의 파괴인성의 통계학적 분석을 통한 RT_{NDT} 예측으로의 접근 및 이 방법의 SA508-C1.3 압력용기강에 대한 적용가능성을 살펴본다.

2. RT_{NDT} 결정

RT_{NDT}는 주어진 fluence에서 원자로 압력용기강의 beltline부근에서 실제 열화된 파괴 인성을 표현하기 위해 ASME Code reference fracture toughness (K_{IR} , K_{IC}) curve에 적용하여 조사취화의 정도를 나타내는 인자이다. 압력용기강의 기본적인 파괴인성 요구조건은 Code of Federal Regulations, Part 50 (10 CFR 50)에 있고, 10 CFR 50의 App. G에 RT_{NDT}의 결정을 명시하고 있으며, 결정과정은 ASME B&PV Code에 나와있다. 따라서 RT_{NDT}는 ASME Code의 Sec.III App.G와 Sec.XI App.A에 있는 Code reference fracture toughness curves의 중요한 부분을 차지한다. 또한 RT_{NDT}는 원자로 가동중 압력-온도 한계(P-T limits)와 RT_{PTS}를 위한 필수적인 입력자료가 된다. RT_{NDT}결정방법은 R.G. 1.99 Rev.2에 있으며, 조사후 재료에 대한 조정치 adjusted RT_{NDT}는 다음과 같다.

$$RT_{NDT} = IRT_{NDT} + \Delta RT_{NDT} + Margin \quad (1)$$

여기서 IRT_{NDT} = initial RT_{NDT}

ΔRT_{NDT} = the shift in RT_{NDT} due to irradiation

2.1 현재의 방법론 (NB-2331)

비조사재의 RT_{NDT}를 초기 RT_{NDT} (IRT_{NDT})라고 한다. IRT_{NDT} 를 결정하는 순서는 ASME Code Sec.III NB-2331에 정해져 있는데 두 가지 test를 필요로 한다. 즉 Charpy V-notch impact(CVN) test와 drop weight test(낙중시험)이 그것이다. 낙중시험의 결과로 얻은 nil-ductility transition temp.(T_{NDT})와 CVN시험의 50ft-lb의 충격에너지를 가지는 온도에 60°F를 뺀 값을 비교해 더 큰 값을 RT_{NDT}로 정하게 된다. 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$RT_{NDT} : T_{NDT} \quad \text{또는} \quad T_{CVN}(50ft-lb) - 60^\circ F \quad \rightarrow \quad \text{둘중 더 높은온도 선택}$$

2.2 NB2331 Criteria 적용의 문제점과 새로운 접근 가능성

현재의 RT_{NDT}결정방법은 20여년전에 Code로 만들어 졌고, 그 당시에는 충분한 자료가 부족해서 어떤 재료에 대해서는 Code방법의 적합성 여부를 확인하는데는 부족한 점이 있다. 일반적으로 압력용기강에 대한 RT_{NDT}는 NB-2331의 T_{NDT} 기준에 의해 제어(control)된다. 그러나 낮은 upper shelf 재료에 대해서 RT_{NDT}가 CVN 기준에 의해 제어되기도 하고, shelf energy가 50ft-lb가 안되는 경우도 있다. 또한 CVN 결과의 scattering 이 낙중시험 결과의 scattering 보다 훨씬 큰 표준편차를 보인다. 이러한 경향을 보이는 대표적인 low upper shelf 재료가 고리 1호기의 용접재와 동일한 B&W의 Linde 80용접금속인 WF-70 용접재인데, 1992년 ORNL에서 Midland 1호기에서 WF-70용접금속으로 구한 RT_{NDT}가 예상 밖으로 scattering이 커서 현재의 RT_{NDT}결정법의 적용 적합성에 의문을 야기시켰다[2]. 즉 CVN data의 scattering이 낙중시험 data보다 커서 결국은 RT_{NDT}값에 큰 변화를 주고 있는 것으로 보인다.

한편, RT_{NDT}의 궁극적인 목표는 fracture toughness를 표현하는 것이므로 직접적인 방법으로 파괴인성 시험을 통한 RT_{NDT} 예측이 더 설득력이 있을 것으로 생각되며, 직접 구한 파괴인성결과를 상대적으로 scattering이 적은 낙중시험 결과와 비교해 보는 것이 타당할 것으로 생각된다. 최근 천이온도 영역에서 일련의 CT 시험결과로부터 파괴인성 곡선을 직접 구한 후 초기 RT_{NDT}값 설정에 낙중시험 결과만을 이용해서 그 타당성을 증명하는 통계적 방법이 발표되었다[3]. 본 연구에서는 이방법을 일부 변형시킨 접근법의 타당성, SA508 C1.3 압력용기강으로의 접근 가능성 그리고 통계 해석을 통해서 CVN 결과로부터 K 곡선을 도출하는 과정을 소개한다.

3. 천이온도영역에서의 파괴인성

유효한 K_{IC} 또는 J_{IC} 값을 얻을 수가 없는 천이온도 영역에서는 cleavage fracture를 보이는 초기 J값(J_c, 또는 instantaneous load drop이 일어나는 시점)을 파괴인성으로 사용하여 다음 식을 이용해 elastic-plastic K_{JC} 값으로 환산하게 된다.

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{J_c \cdot E}{(1 - \mu^2)}} \quad (2)$$

여기서 E는 elastic modulus이고 μ 는 Poisson's ratio이다.

이때 천이온도 영역에서 파괴인성값의 분포는 cleavage 파괴를 보이며, 이들의 변화분포는 특별한 통계분포로 다룰 수가 있는데, 이 분포를 Weibull 분포라 하고 다음의 3-parameter Weibull 식으로 표현할 수가 있다[4].

$$P_f = 1 - \exp\left(-\left(\frac{K_I - K_{\min}}{K_o - K_{\min}}\right)^b\right) \quad (3)$$

여기서 P_f = cumulative distribution function(CDF) at a stress intensity factor level K_I

K_o = specimen thickness and temperature dependent scale parameter

K_{\min} = low bound fracture toughness (location parameter)

b = Weibull slope (shape parameter)

온도 의존적인 K_o 는 다음 식으로 잘 설명된다[4].

$$K_o = \alpha + \beta \exp[\gamma(T - T_o)] \quad (4)$$

여기서 $\alpha + \beta = 108 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (for 25 mm thickness specimen)

γ = material constant

T_o = temp. (°C) at which the mean fracture toughness is $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

실험적으로 파괴인성 천이곡선(fracture toughness transition curve)은 재료와 항복응력에 대해 그 의존도가 낮고, 결국 이식의 α, β, γ 는 실제로 재료에 대해 독립적인 값을 갖

게 된다. 25mm의 시편 두께를 갖는 경우, 온도 함수로 나타나는 K_o 식은 다음과 같이 표현되며, master curve라고 불린다[4].

$$K_o = 31 + 77 \exp[0.019(T - T_o)] \quad , \quad /MPa\sqrt{m}/ \quad (5)$$

물론 시편 두께가 다를 경우에는 보정이 필요한데 이 보정식은 다음과 같고,

$$K_{B2} = (K_{B1} - K_{min}) \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1/4} + K_{min} \quad (6)$$

Charpy-type의 시편의 경우 다음 식으로 표현된다.

$$K_o = 34 + 97 \exp[0.019(T - T_o)] \quad , \quad /MPa\sqrt{m}/ \quad (7)$$

실험결과들은 시편에 따라 위식들(1인치 표준 CT시험편인 경우 식(3)과 (5))을 연결해서 온도, 시험편 두께, 그리고 CDF의 함수로 천이온도 영역에서 파괴인성의 천이곡선을 설명할 수가 있다. 즉, 특정온도에서 파괴인성값과 시험편 두께, 그리고 CDF가 알려지면 전체의 파괴인성 천이곡선을 알 수가 있다. 파괴인성의 관점에서 선택된 온도는 ductile fracture가 결과에 영향을 주지 않도록, ductile fracture initiation에 대응하는 파괴인성 아래의 온도여야 한다. 동시에 온도가 파괴인성에 영향을 미치는 천이온도 영역이 되기 위해서는 lower shelf 영역보다는 커야한다. 일반적으로 이 조건을 만족하는 온도선택은 K_{Jc} 값이 약 100 $MPa\sqrt{m}$ 가 되는 온도가 된다.

4. 천이온도 영역에서 통계해석 적용

4.1 파괴시험에 의한 RT_{NDT} 결정

먼저, 현재 ASTM에 제안되어[5] 있는 순서대로 식(3)의 인자(parameter)중 b 와 K_{min} 값을 각각 4와 20이라는 상수로 주고 Weibull Plot으로 계산한 결과와 3개의 인자를 non-linear fitting을 한 결과를 WF-70 weld metal에 대해서 비교해 보았다. 결과 비교를 위해 WF-70 용접금속의 동적파괴인성(dynamic fracture toughness) 결과중 $-17.8^\circ C$ 의 5개 J_c 자료를 식(2)에 의해 변환해서 K_{Jc} 값을 구하고[3], 식(3)과 (5) 그리고 CDF에 median ranking은 아래의 식을 이용했다[7]. 1인치 CT시험편을 이용한 자료이므로 식(6)과 (7)은 해당되지 않는다.

$$\text{median rank} = \frac{(j - 0.3)}{(N + 0.4)}$$

여기서 j 는 sample order number이고 N 은 sample size가 된다. 이에 해당하는 median K_{Jc} 의 master curve를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 인자 2개를 고정시키고 Weibull Plot에 의해 구해진 결과와 non-linear fitting에 의해 구한 결과가 거의 일치한다. 물론 이 경우 신뢰도 구간에 조금의 차이가 나겠지만 일단은 두방법에 의한 median K_{Jc} 의

master curve가 일치하므로, 앞으로 간단히 컴퓨터로 non-linear fitting을 행하는 것이 더 쉬워 보인다. 또한 그림 1에는 선택된 온도에서 sample의 최대와 최소 값을 알고 그사이의 1개 값을 알면 3개의 sample로도 median K곡선을 유도할 수 있음을 보인다. 따라서 자료가 부족한 곳에서는 3개의 sample도 사용이 가능할 것 같다. 한편, 그림 2는 그림 1의 median K_{JC} curve와 95% 신뢰도 곡선 그리고 신뢰도 확인을 위한 천이영역의 나머지 결과(open symbol)를 모두 나타낸 것이다. 이들 자료들이 동적파괴인성 자료들이므로 ASME K_{IR} 곡선을 비교 대상으로 함께 그렸다. Code K_{IR} 곡선은 다음과 같다.

$$K_{IR} = 26.78 + 1.233 \exp[0.0145(T - RT_{NDT} + 160)] \quad , \quad / \text{ksi in}^{1/2}, \text{ } ^\circ\text{F/}$$

여기서 RT_{NDT} 값은 식(1)로부터 초기 RT_{NDT} 로 낙중시험에 의한 $T_{NDT}(-48.8^\circ\text{C})$ 를 이용한 -32.4°C 를 사용했다. 그림 2에서 보듯이 T_{NDT} -based $RT_{NDT}(-32.4^\circ\text{C})$ 를 이용한 K_{IR} curve가 95%신뢰도를 가지는 동적파괴인성 곡선보다 하향경계(lower bound)를 나타낸다. 그러므로 T_{NDT} -based RT_{NDT} 접근이 WF-70 천이영역의 파괴인성에 대해 유효함을 알 수 있다. 한편, 정적파괴인성 (static fracture toughness)에 대한 접근을 위해 T_{NDT} 가 -12.2°C 로 RT_{NDT} 를 지배하는 SA508 Cl.3 강에 대한 파괴시험을 수행하여 위에서 접근한 순서대로 행한 결과를 그림3에 종합적으로 나타내었다. 여기서 ASME K_{IC} 곡선은 다음과 같다.

$$K_{IC} = 33.2 + 2.806 \exp[0.02(T - RT_{NDT} + 100)] \quad , \quad / \text{ksi in}^{1/2}, \text{ } ^\circ\text{F/}$$

그림에서 closed symbol은 median K_{JC} 를 구하는데 사용된 시험결과이고, open symbol은 backup자료이다. 이 결과 역시 천이온도 영역에서 T_{NDT} -based $RT_{NDT}(-12.2^\circ\text{C})$ 를 사용한 K_{IC} 곡선이 95% 신뢰도 곡선보다 lower bound를 보인다. 따라서 T_{NDT} -based RT_{NDT} 를 이용한 ASME의 Code 곡선 K_{IC} 와 K_{IR} 곡선과 일련의 천이온도 영역에서의 파괴시험으로 간단히 RT_{NDT} 값에 접근이 가능하다고 생각된다.

4.2 CVN 결과를 통한 K곡선 예측

Charpy v-notch(CVN) test와 K_{IC} 값에 대한 correlation 문제는 구조설계에 있어서 중요한 의미를 지니며, 현재 여러 가지 관계식들이 발표되었다. 여기서는 천이온도 영역에서 일련의 시험으로 앞에서 설명한 통계적 방법을 사용해 K곡선을 간단히 유도해 보았다. 먼저 천이온도 영역에서 CVN- K_{IC} 관계식으로는 39-246 ksi의 항복응력을 갖는 재료에서 Rolfe[6]가 증명한 다음 식을 사용했다.

$$\frac{K_{IC}^2}{E} = 2(CVN)^{3/2}$$

SA508 Cl.3 표준 CVN시험편으로 먼저 천이온도 영역에 해당하는 0°C 에서 4개의 CVN시험자료로 K_{IC} 로 환산한 후(closed symbol in Fig.4), 3절의 통계해석을 통해 median 과 95% 신뢰도를 갖는 K곡선을 얻었다. 여기서는 인자를 $b=4$, $K_{min}=20\text{MPam}^{1/2}$ 로 고정시켰고, Weibull Plot로부터 계산된 K_0 에서 median K_{IC} 를 얻었고, 최종적으로 master curve를 구했다. 그림4는 median, 95% 신뢰도 곡선과 함께 신뢰도의 확인을 위해 천이온도 영역에서의 K_{IC} 값을 함께 표시했다. 거의 모든 data들이 95%신뢰도를 만족하고 있으며, 따라서 천이온

도 영역에서 한 온도에서 일련의 CVN시험으로 천이온도 전체의 K곡선 경향을 쉽게 얻을 수가 있겠다.

5. 결론 및 문제점.

지금까지 살펴본 바에 의하면 한 온도에서 간단한 파괴인성시험이나 CVN시험으로 RT_{NDT} 접근이 가능하거나, K_{IC} 곡선을 유추할 수가 있었다. 천이온도 영역에서의 파괴인성 분포가 Weibull 분포를 따르고, 온도와 파괴인성과의 master curve 관계식으로부터 변형된 RT_{NDT} 예측과 K곡선 유도방법이 시험의 간편성과 직접성을 가지고 있는 것으로 생각된다. 그러나 RT_{NDT} 예측에 있어서 가끔씩 CVN시험결과가 control factor가 되는 경우도 있고, T_0 와 RT_{NDT} 관계의 불완전성, 그리고 무엇보다도 천이온도 영역에서의 파괴인성 시험법이 1994년도 현재 ASTM E-08 committee에 제안되어 있는 상태로 표준화가 되어 있지 않다는데 확대적용의 어려움이 있다.

6. 참고문헌

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Radiation Embrittlement Damage to Reactor Vessel Materials, Regulatory Guide 1.99, Revision 2, May 1988.
- [2] R.K. Nanstad, D.E. McCabe, R.L. Swain, and M.K. Miller, "Chemical Composition and RT_{NDT} Determinations for Midland Weld WF-70," NUREG/CR-5914, ORNL, Dec. 1992.
- [3] K.K. Yoon, "Fracture Toughness Characterization of WF-70 Weld Metal," BAW-2202, Babcock & Wilcox, Lynchburg, Virginia, September 1993.
- [4] K. Wallin, "The Scatter in K_{IC} Results," Eng. Frac. Mech., Vol.19, pp.1085-1093, 1984.
- [5] Proposed ASTM Standard (draft #6), "Test Method for Fracture Toughness in Transition Range," ASTM, Committee E-08 Meeting, Atlanta, Georgia, 1994.
- [6] J.M. Barsom and S.T. Rolfe, "Correlations Between K_{IC} and Charpy V-notch Test Results in the Transition-Temperature Range," in Impact Testing of Metals, ASTM STP 466, pp.281-302, 1970.
- [7] C. Lipson, in Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments, McGraw-Hill, 1973.

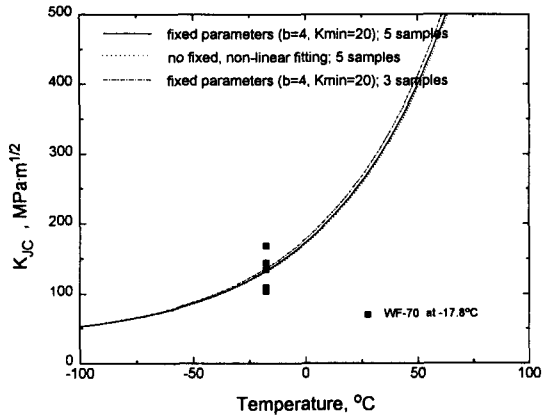


Fig.1 Comparison of median K_{JC} curves

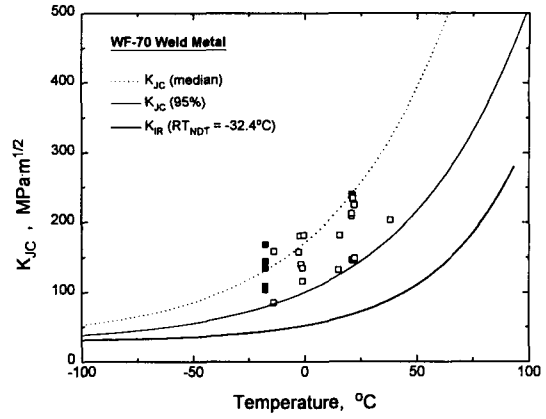


Fig.2 Fracture toughness curves and dynamic toughness data

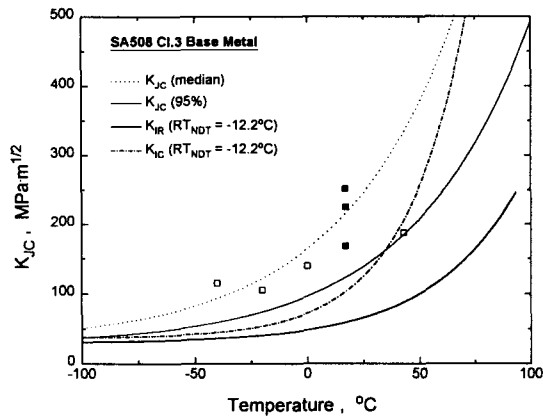


Fig.3 Fracture toughness curves and static toughness data

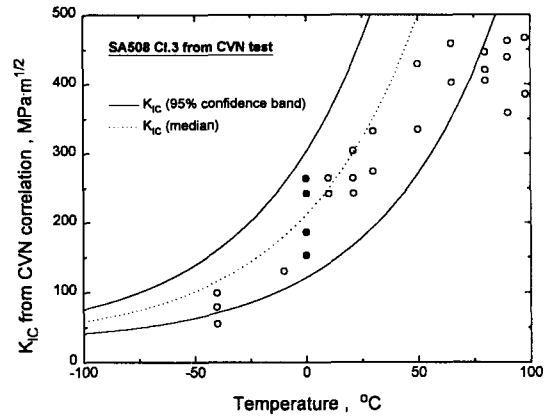


Fig.4 K_{IC} prediction curves and K_{IC} data obtained from CVN test