

이봉분포 마스터커브를 이용한 SA508 Gr. 3 원자로용기강의 파괴인성 평가

김종민[†]·김민철*·이봉상*

Evaluation of Fracture Toughness for SA508 Gr. 3 Reactor Pressure Vessel Steel Using Bimodal Master Curve Approach

Jong Min Kim[†], Min Chul Kim* and Bong Sang Lee*

(Received 8 December 2017, Revised 15 December 2017, Accepted 22 December 2017)

ABSTRACT

The standard master curve (MC) approach has the major limitation because it is only applicable to homogeneous datasets. In nature, materials are macroscopically inhomogeneous and involve scatter of fracture toughness data due to various deterministic material inhomogeneity and random inhomogeneity. RPV(reactor pressure vessel) steel has different fracture toughness with varying distance from the inner surface of the wall due to cooling rate in manufacturing process; deterministic inhomogeneity. On the other hand, reference temperature, T_0 , used in the evaluation of fracture toughness is acting as a random parameter in the evaluation of welding region; random inhomogeneity. In the present paper, four regions, the surface, 1/8T, 1/4T and 1/2T, were considered for fracture toughness specimens of KSNP (Korean Standard Nuclear Plant) SA508 Gr. 3 steel to investigate deterministic material inhomogeneity and random inhomogeneity. Fracture toughness tests were carried out for four regions and three test temperatures in the transition region. Fracture toughness evaluation was performed using the bimodal master curve (BMC) approach which is applicable to the inhomogeneous material. The results of the bimodal master curve analyses were compared with that of conventional master curve analyses. As a result, the bimodal master approach considering inhomogeneous materials provides better description of scatter in fracture toughness data than conventional master curve analysis. However, the difference in the T_0 determined by two master curve approaches was insignificant.

Key Words : Master curve(마스터커브), Bimodal master curve(이봉분포 마스터커브), Fracture toughness(파괴인성), Reference temperature(참조온도), Deterministic inhomogeneity(결정론적 불균질성), Random inhomogeneity(랜덤 불균질성)

기호설명

W = height of specimen
a = crack depth
m = Weibull slope

K_0 = scale parameter(MPa \sqrt{m})
 p_f = cumulative probability of failure
L = maximum likelihood function
 f_c = probability density function
 S_c = survival function
 σ_{YS} = yield strength(MPa)
 T_0 = reference temperature($^{\circ}$ C)
d = normalized distance from the inner wall
 K_{min} = threshold fracture toughness(MPa \sqrt{m})

[†] 회원, 한국원자력연구원 원자력재료연구부
jmkim@kaeri.re.kr
TEL: (042)868-4495 FAX: (042)868-8549

* 한국원자력연구원 원자력재료연구부

K_{JC} = fracture toughness(MPa \sqrt{m})

K_0 = Weibull mean fracture toughness(MPa \sqrt{m})

1. 서 론

기존 마스터커브 (MC) 방법은 Wallin^(1,2)에 의해 제안되어 ASTM E1921⁽³⁾에 적용되어 널리 사용되고 있다. 마스터커브 접근방식은 페라이트계 및 강화 페라이트-마르텐사이트 강을 포함한 bcc 구조의 재료에 대해 거시적으로 균일한 강재의 취성파괴거동을 예측하는 데 사용된다. 그러나 현실 재료들은 샘플의 시편 채취 위치와 제조 공정중 자연적인 원인에 의해 불균질성을 갖게 되며 파괴시 벽계파괴로 이행되는 연성 찢김의 불확실성으로 데이터의 산포를 갖게 된다. 기존의 마스터커브 접근방식은 재료의 균질성을 전제로 하고 있기 때문에 이러한 한계를 극복하기 위해, SINTAP lower tail 분석 절차⁽⁴⁾, 2개의 확률분포를 가지는 이봉분포 마스터커브(BMC, Bimodal Master Curve)와 랜덤 불균질성 마스터커브(RIMC, Randomly Inhomogeneous Master Curve)등⁽⁵⁾이 도입된 바 있다. SINTAP lower tail 분석 방법은 불균일 강재의 보수적 하한곡선을 제시하고, 이봉분포 마스터커브는 용접 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)의 데이터 분균질성을 설명하는 데 매우 효율적으로 알려져 있으며, 랜덤 불균질성 마스터커브는 동일한 재질의 다른 heat로 구성된 데이터 집합에 적용될 수 있어 본질적으로 거시적 비균질재료로 구성된 데이터 세트에 적용할 수 있다. 이러한 향상된 마스터 커브 접근법을 이용한 연구들은 Sokolov⁽⁶⁾, Viehrig⁽⁷⁾, Choi⁽⁸⁾ 등에 의해 수행된 바 있다. Sokolov는 WWER-440 원자로 압력 용기용 강재에 SINTAP 절차를 적용하였으며, Viehrig는 F82H 강재를 이봉분포 마스터커브와 랜덤 불균질성 마스터커브 방법을 사용하여 파괴인성 특성분석을 수행하였다. Choi는 상한 및 하한 사이의 범위를 확대하기 위해 단일점 추정(SPE, Single Point Estimation) 방식을 수정하였다.

본 논문에서는 국내 원자로용기강 SA508 Gr. 3 단조재를 대상으로 기존 마스터커브 접근법과 이봉분포 마스터커브를 적용하여 특성분석을 수행하였다. 파괴인성 시험은 DBTT(Ductile-Brittle Transition Temperature) 영역에서 수행되었으며, 파괴인성 시편을 표면, 1/8T, 1/4T, 1/2T지점에서 추출하였다. 결정

론적 재료 불균질성(deterministic inhomogeneity)은 기존의 마스터커브 방식으로 평가하고, 랜덤 불균질성(random inhomogeneity)은 이봉분포 마스터커브로 평가하였다.

2. 파괴인성 시험

2.1 재료 및 시편

본 연구에 사용된 재료는 국내 원자로용기강 SA508 Gr. 3 이다. 그림 1은 시험에 사용된 원자로용기 블록을 나타낸 것으로 내면에서부터 중앙부까지 표면, 1/8T, 1/4T, 1/2T지점을 절단하여 T-L 방향의 파괴인성 시편을 준비하였다. 파괴인성 시험은 PCVN (Pre-cracked Charpy V-Notch) 3 점 굽힘 시험편(10mm × 10 mm × 55 mm)을 사용하였으며, -150 ~ -80°C의 온도에서 수행되었다. 초기 피로 균열의 길이(a/W)는 약 0.5이다. 인장시험은 상온에서부터 -196°C까지 수행하였으며 시험을 통해 도출된 항복강도를 그림 2에 나타내었다. 항복 강도는 다음 식과 같이 온도와 지수함수의 관계로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{YS} = 450.74 + 32.83 \exp\left(\frac{-T}{73.14}\right) \quad (1)$$

2.2 마스터커브 방법 검토

기존 마스터 커브 방법에서 파괴인성 값의 분포에 사용되는 누적파손확률 함수는 다음과 같다.

$$p_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K_{JC} - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right)^m\right] \quad (2)$$

여기서 와이블 기울기(m)와 K_{min} 은 각각 4와 20 MPa \sqrt{m} 로 고정되며 K_0 만이 최대가능성함수(maximum likelihood function)를 사용하여 결정된다.

기존의 마스터커브 방법과는 다르게 이봉분포 마스터커브 방법은 2개의 확률분포를 사용하여 3개의 매개 변수, 즉, K_{01} , K_{02} 및 p_a 를 결정한다.

$$p_f = 1 - p_a \cdot \exp\left[-\left(\frac{K_{JC} - K_{min}}{K_{01} - K_{min}}\right)^4\right] - (1 - p_a) \cdot \exp\left[-\left(\frac{K_{JC} - K_{min}}{K_{02} - K_{min}}\right)^4\right] \quad (3)$$

여기서 K_{01} 과 K_{02} 는 각각의 확률분포에서의 파괴

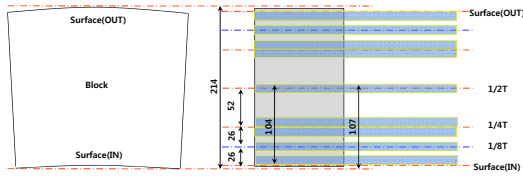


Fig. 1 Investigated RPV block and locations of specimen extraction

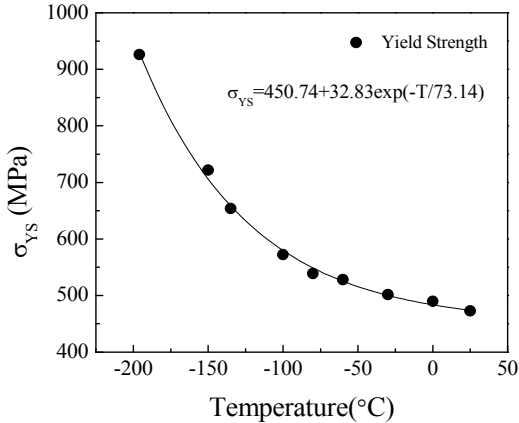


Fig. 2 Variation of yield strength over the temperature range from room temperature to -196°C

인성을 나타내고 p_a 는 첫번째 분포의 파손확률을 나타낸다.

이봉분포 마스터커브에서 다중온도범(multi-temperature analysis)을 사용하기 위해서는 최대가능성법(maximum likelihood method)을 사용해야 하며, 이때 최대가능성 함수는 확률밀도함수(probability density function)와 생존함수(survival function)의 곱의 합으로 나타낼 수 있다.

$$L = \prod_{i=1}^n f_{c_i}^{\delta_i} \cdot S_{c_i}^{1-\delta_i} \quad (4)$$

$$f_c = 4 \cdot p_a \cdot \frac{(K_{JC} - K_{\min})^3}{(K_{JC} - K_{\min})^4} \exp\left[-\left(\frac{K_{JC} - K_{\min}}{K_{01} - K_{\min}}\right)^4\right] \quad (5)$$

$$- 4 \cdot (1 - p_a) \cdot \frac{(K_{JC} - K_{\min}^3)}{(K_{JC} - K_{\min}^4)} \exp\left[-\left(\frac{K_{JC} - K_{\min}}{K_{02} - K_{\min}}\right)^4\right]$$

$$S_c = p_a \cdot \exp\left[-\left(\frac{K_{JC} - K_{\min}}{K_{01} - K_{\min}}\right)^4\right] + (1 - p_a) \cdot \exp\left[-\left(\frac{K_{JC} - K_{\min}}{K_{02} - K_{\min}}\right)^4\right] \quad (6)$$

이와 같이 기존의 마스터커브방법은 1개의 파라메터만 필요한 반면 이봉분포 마스터커브 방법은 3개의 파라메터가 결정되어야 한다. 이봉분포 마스터커브는 3가지 변수를 이용하여 마스터커브를 작성하므로 기존의 방법보다 다소 복잡하기는 하나 이봉분포를 사용하므로 비균질재료에 적용성은 우수한 것으로 알려져 있다.

3. 결과 및 토론

3.1 결정론적 재료 불균질성

결정론적 재료의 불균질성을 살펴보기 위해 시편 채취 위치에 따라 K_{JC} 값을 도출하였다. 그림 3은 모재의 시편채취 위치에 따른 기존 마스터커브 방법에 의한 참조온도 T_0 를 나타낸 것이다. T_0 는 내면에서의 냉각속도가 중앙부보다 더 빠르기 때문에 예상되는 바와 같이 내면에서부터 1/2T지점까지 증가하는 경향을 나타낸다. 원자로용기 제조시 표면에서의 빠른 냉각속도로 인하여 재료의 석출물 크기가 작아지며 여기서의 임계 크기가 균열개시와 연계되기 때문에, 석출물 크기가 작아질수록 파괴인성은 높아지고, T_0 값은 작아지게 된다. T_0 값은 내면에서부터의 정규화된 거리(d)를 이용하여 시험을 통해 다음과 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$T_0 = -91.88 - 41.97 \exp(-4.69 \times d) \quad (7)$$

Table 1 Summary of conventional master curve analysis

Location	N	T_0	$K_{JC(0.95)}$ n	$K_{JC(0.05)}$ n	Weibull Slope
Surface	29	-131.7	5(17.2%)	2(6.9%)	2.9
1/8T	25	-116.1	4(16.0%)	3(12.0%)	2.2
1/4T	23	-103.9	1(4.3%)	3(13.0%)	3.1
1/2T	23	-96.2	1(4.3%)	3(13.0%)	2.6

표 1은 ASTM E1921 기존 마스터커브 방법에 따라 표면에서 1/2T까지의 평가 결과를 요약한 것이다. 1/8T지점과 표면에서의 K_{JC} 값들 중 약 15% 이상의 시편에서 95% 허용신뢰도를 벗어났다. 반면, 1/4T, 1/2T 지점 등 중앙부에 근접한 시편의 경우, 대부분의 K_{JC} 값이 5%, 95%영역 내에 대부분 존재하였다. 그림 4는 표면 영역에서의 측정된 K_{JC} 값들과 마스터커브를 나타낸 것으로 표면 위치에서의 K_{JC} 값들이

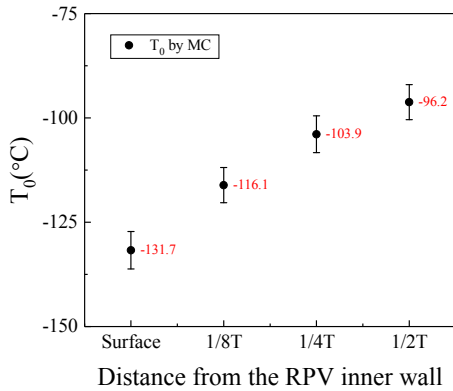


Fig. 3 Standard MC reference temperature T_0 at each location

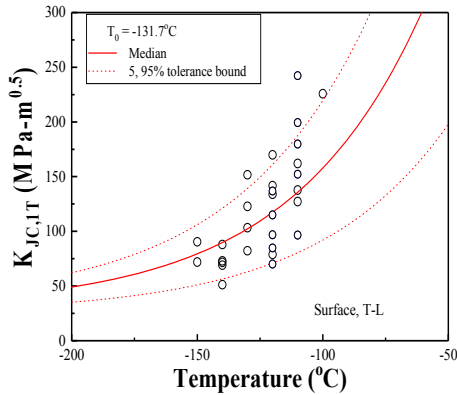


Fig. 4 Standard MC and measured K_{Jc} values at surface

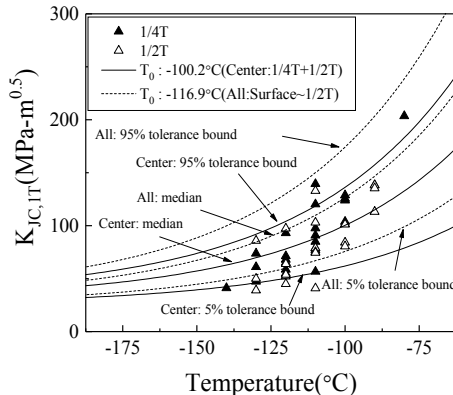


Fig. 5 Standard MC and measured K_{Jc} values at 1/2T and 1/4T

높은 산포를 보이고 있다. 본 연구에서 시행된 시험 횟수가 통계적인 분석을 수행하기에 불충분하다 하더라도 통상 마스터커브를 얻기 위해 요구되는 시험 횟수보다는 충분히 많이 때문에, 재료의 결정론적인

불균질성이 아닌 랜덤 불균질성이 일부 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

식 (2)와 표 1과 같이 1/4T 위치에서 얻어진 Weibull 기울기는 3.1이었으며, 표면, 1/8T, 1/2T에서 얻어진 와이블 기울기는 3.0 이하였다. 실험결과와 Weibull 기울기가 Wallin의 마스터커브에서 사용되는 기울기 값 “4”와는 많은 차이를 보였다. 와이블 기울기 도출에 사용된 시험편의 수가 상대적으로 적은 것이 이러한 차이를 보이는 여러가지 원인중 하나로 분석된다. 와이블 기울기는 충분히 많은 샘플(100개 이상)이 있을 때 정확히 평가가 가능한 것으로 알려져 있다. 다른 원인으로는 미세 조직의 비균질성과 같은 내재적인 요인들을 고려할 수 있다. 서론에서 언급한 바와 같이, 용접부와 같이 비균질성이 크게 나타나는 재료들이 이에 해당하며, 제조 과정에서 전 영역에서 이상적으로 균질한 미세조직을 나타낼 수 없기 때문에 비균질성을 나타낼 가능성이 있다. 본 연구에서는 이러한 비균질성에 연구 초점을 두었다.

그림 5는 1/2T지점 및 1/4T지점과 같이 중간 영역에 도출된 K_{Jc} 값들을 이용한 마스터커브와, 표면에서부터 1/2T 지점까지 모든 영역에서의 K_{Jc} 데이터를 이용한 마스터커브 결과들의 차이를 보여준 것이다. 여기서 실선은 중간 영역의 데이터 세트를 사용한 마스터커브에 해당하고, 점선은 모든 영역의 데이터 세트를 사용한 마스터커브에 해당한다. 1/2T와 1/4T 지점의 중간영역을 사용하여 얻어진 마스터커브는 상한 및 하한 곡선 내에 대부분의 데이터가 존재하지만, 몇 개의 outlier가 존재한다. 이는 결정론적 불균질성이 아닌 임의의 불균질성 효과가 존재하는 것으로 분석된다.

그림 5의 중심영역 데이터(1/4T+1/2T)들을 사용하여 결정된 T_0 기준 온도는 -100.2°C로 표 1과 같이 1/4T지점만을 평가한 -103.9°C와 1/2T지점만을 평가한 -96.2°C와 비슷하였다. 만약 그림 5와 같이 전체 영역에서의 데이터를 하나의 영역에서만 추출한 것으로 가정(점선)하면 표면과 1/8T 지점의 K_{Jc} 값이 중앙부의 K_{Jc} 값보다 상대적으로 높기 때문에, 마스터커브의 하한곡선 보다 낮은 K_{Jc} 데이터들이 발생하게 되는 반면, 상한곡선은 높은 K_{Jc} 값을 아우르게 되어 T_0 값은 -116°C로 변하게 된다.

또한, 그림 5에서 실선으로 나타난 중앙부 데이터를 사용한 T_0 (-100.2°C) 값은 기존의 마스터커브를

이용한 표 1의 1/4T지점의 T_0 값 (-103.9°C)과 비슷한 참조온도를 보여주었다. 이는 원자로용기 조사취화 건전성 평가시 사용되는 1/4T지점에서의 파괴인성 데이터가 중앙부의 파괴인성을 대변할 수 있음을 보여준다. 하지만, 전체 영역에서의 K_{JC} 값을 이용한 T_0 값 (-116.9°C)이 1/8T지점의 T_0 값 (-116.1°C)과 거의 동일함을 고려하면 원자로용기 건전성 평가시 응력 상태에 따라 평가지점에 대한 신중한 고려가 필요함을 알 수 있다.

시편의 채취 위치로 인한 결정론적 비균질 효과를 랜덤 불균질성으로 가정하면, 점선과 같이 모든 영역의 데이터를 이용한 T_0 값 적용이 가능하다. 그러나, 기존의 마스터커브 방법은 앞서 기술한 바와 같이 단일분포만을 사용하게 되어 상한곡선 이상의 값들은 포함하게 되나 하한곡선 아래에 존재하는 낮은 K_{JC} 값들의 개수가 늘어나게 된다. 따라서, 다음 장에서는 상한/하한을 벗어나는 데이터들을 단일 영역에서 나타나는 랜덤 불균질성으로 취급하고, 데이터의 산포를 두개의 확률분포를 이용한 통계적인 방법으로 처리할 수 있는 이봉분포 마스터커브 방법을 적용하여 파괴인성 평가를 수행한 결과를 기술하였다.

3.2 이봉분포 마스터커브 방법의 적용

이봉분포 마스터커브방법에 사용되는 3가지 파라미터는 다중온도 해석을 통해 식(3)-(6)을 사용하여 각각 $P_a = 0.62$, $K_{01} = 69 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_{02} = 130 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 으로 결정되었다. 다중온도 해석에서는 표 1과 같이 기존 마스터커브 방법을 이용한 분석 결과로부터 표면에서 1/2T지점까지의 T_0 온도의 각 중간값에 해당하는 -100°C, -110°C, -120°C의 온도가 사용되었다. 이 온도는 예상되는 참조온도를 결정할 수 있는 시험온도 범위에 해당한다. 그림 6과 같이, 각 온도에 대한 모든 K_{JC} 값은 K_{JC} 값의 온도 의존성을 고려하여 각각의 K_{JC} 값을 -120°C에 해당하는 값으로 변환한 후 이봉분포확률을 따르도록 하였다. 모든 영역 데이터에 대한 -120°C에서의 이봉분포 마스터커브 파라미터들은 그림 7의 (a)-(c)와 같이 다시 -100°C, -110°C, -120°C에 대한 와이블 기율기를 생성하기 위해 사용되었다. 그림 7에서 실선은 기존의 마스터커브 해석결과이고 점선은 이봉분포 마스터커브 해석 결과를 나타낸 것이다.

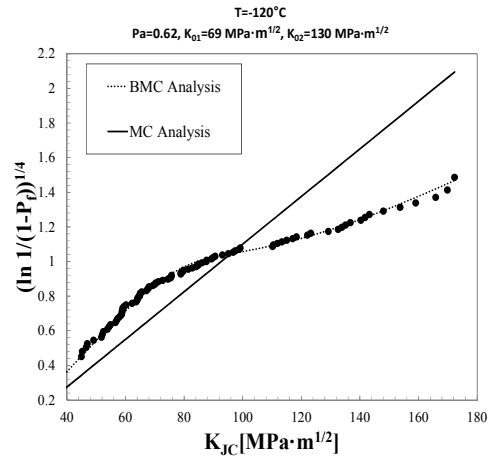


Fig. 6 Comparison of the bimodal and conventional MC analyses for all datasets corresponding to temperature dependence

그림 7과 같이, 다중온도 해석에 의해 결정된 이봉분포 마스터커브 파라미터들을 단일온도에 사용하게 되면, -120°C 데이터를 제외하고 기존의 마스터커브 방법보다 차이가 더 발생한다. 특히 저인성 데이터들은 -100°C, -110°C 에서 기존의 마스터커브 방법이 실제 데이터를 더 잘 예측하는 것으로 분석된다. 또한 실제 데이터와 마스터커브와의 차이는 인성이 증가할수록 커졌다. 여기서 주목할만한 점은 이봉분포 마스터커브의 경향이 실제 데이터와 일치한다는 것이다. 이봉분포 마스터커브 파라미터를 결정할 때 -120°C로 K_{JC} 값들을 재계산하였으므로, 그 이동량을 고려하면 이봉분포 마스터커브가 재료의 불균질성을 잘 예측하고 있음을 보여준다.

그림 8은 모든 영역과 온도에서 기존의 마스터커브방법과 이봉분포 마스터커브 방법에 의한 결과를 비교한 것이다. 기존의 마스터커브방법에 의한 T_0 는 -116.9°C 였으며, 이봉분포 마스터커브방법에 의한 T_0 는 -111.3°C 였다. 두가지 마스터커브방법에 의한 결과를 비교하면, T_0 값의 차이는 미미하였으나, 분산에서 차이가 나타났음을 확인할 수 있다. 전반적으로, 붉은 점선으로 표시된 이봉분포 마스터커브의 5%, 95% 한계곡선은 기존의 마스터커브 방법보다 더 넓은 영역을 나타내고 있다. 이것은 이봉분포 마스터 커브 방법이 2개의 확률분포를 사용하고 있기 때문으로 분석되며, 이봉분포 마스터커브 방법이 파괴인성 데이터의 넓은 산포를 효과적으로 표현하면서

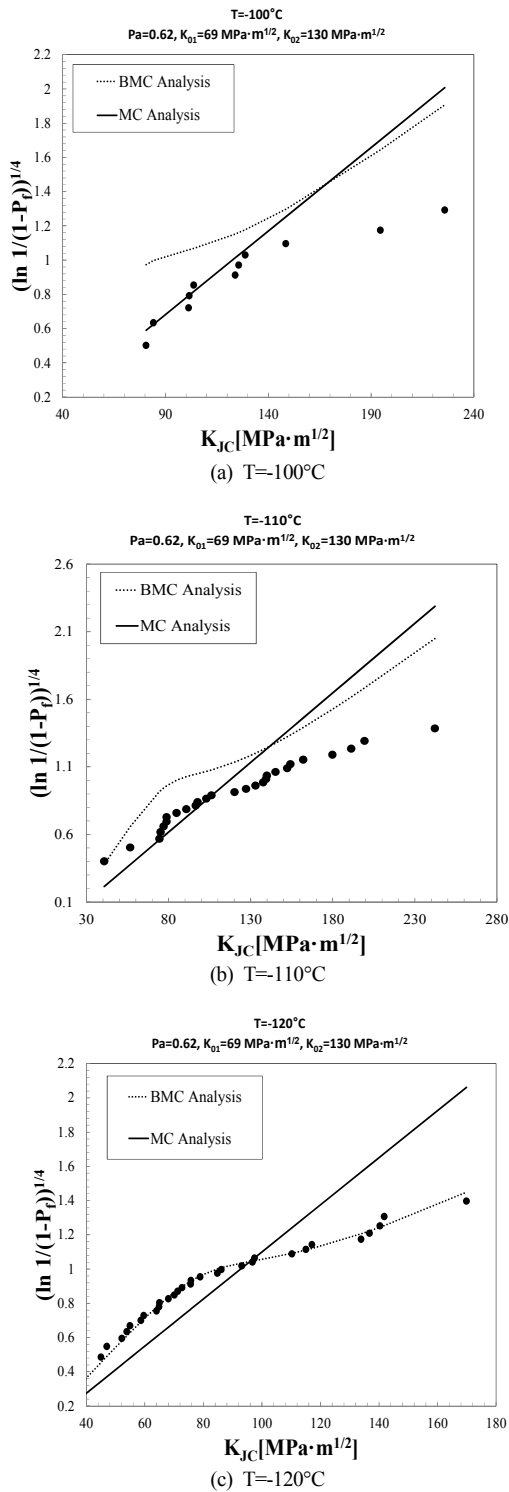


Fig. 7 Comparison of the bimodal and conventional MC analyses at various temperatures

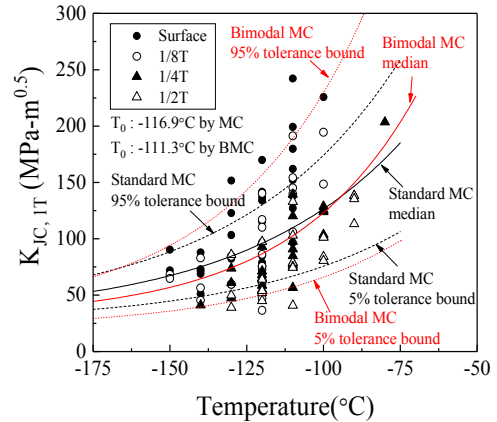


Fig. 8 Standard and bimodal MC with all measured K_{JC} values

기존의 마스터커브 방법에서 도출된 T_0 값과 유사한 결과를 줄 수 있음을 의미한다. 따라서, 냉각속도와 같은 결정론적인 불균질성을 랜덤 불균질성으로 가정한다면, 이봉분포 마스터커브방법이 파괴인성 데이터의 산포를 설명하는데 더 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 원자력발전소 원자로용기에 사용된 SA508 Gr. 3강을 대상으로 표면, 1/8T, 1/4T, 1/2T 등 4개 영역에서 수행한 파괴인성 시험 결과를 통해 결정론적 재료 불균질성의 영향과 이봉분포 마스터커브 방법의 적용성을 평가하였다. 기존 마스터커브방법을 이용하여 결정된 T_0 값은 예상대로 표면에서의 높은 냉각속도로 인하여 낮은 값을 보였다. 그러나 1/8T지점과 표면에서의 값들 중 약 15%는 95% 상한곡선을 넘어섰으며, 이는 재료의 랜덤 불균질성이 존재함을 의미하는 것으로 판단할 수 있었다. 이봉분포 마스터커브 방법의 적용성 평가에서는 시편 채취 위치에 기인한 결정론적인 불균질성을 임의의 불균질성으로 가정하여 평가를 수행하였다. 그 결과, 이봉분포 마스터커브 방법을 적용하면 기존 마스터커브방법보다 파괴인성값의 넓은 산포를 효과적으로 표현할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 원자력연구개발사업의 “압력경계 재료

열화 파괴역학적 대응기술 개발” 과제에 일환으로 수행된 연구입니다.

참고문헌

- (1) Wallin, K., 1984, “The Scatter in K_{IC} -Results,” *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1085-1093.
- (2) Wallin, K., 1999, “The Master Curve: A New Method for Brittle Fracture,” *Int. J. of Mater.*, Vol. 12, pp. 342-354.
- (3) ASTM, 2010, “Standard Test Method for Determination of the Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range,” *ASTM E1921-10*.
- (4) SINTAP, 1999, “Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry,” Project BE95-1426. Final Procedure, British Steel Report, Rotherham.
- (5) Wallin, K., Nevasmaa, P., Laukkanen, A. and Planman, T., 2004, “Master Curve Analysis of Inhomogeneous Ferritic Steels,” *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 71, pp. 2329-2346.
- (6) Sokolov, M. A. and Tanigawa, H., 2007, “Application of the Master Curve to Inhomogeneous Ferritic/Martensitic Steel,” *J. Nucl. Mater.*, Vol. 367, pp. 587-592.
- (7) Viehrig, H. W., Scibetta, M. and Wallin, K., 2006, “Application of Advanced Master Curve Approaches on WWER-440 Reactor Pressure Vessel Steels,” *Int. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol. 83, pp. 584-592.
- (8) Choi, S. B., Choi, S., Choi, J. B., Chang, Y. S., Kim, M. C. and Lee, B. S., 2012, “Enhancement of Master Curve Methods for Inhomogeneous Material,” *J. of Mech. Sci. & Tech.*, Vol. 26, No. 9, pp. 2727-2734.