

## 준정적 하중속도 J-R 시험에 대한 정규화법 라운드 로빈 시험

### Round Robin Test on Normalization Method under Static Loading J-R Test

오영진<sup>1)</sup>, 황일순<sup>1)</sup>, James A. Joyce<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 서울대학교 원자핵공학과, 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

<sup>2)</sup> U.S. Naval Academy, Annapolis, MD, U.S.A.

#### 요 약

원자력 압력용기 및 배관의 안전성 평가를 위해, 탄소성 파괴 역학에 기초한 J-R 시험법이 널리 사용되고 있다. 지진 등의 동적하중의 영향을 고려하기 위해 배관재료의 J-R 시험을 동적하중 조건에서 시험하기 위해 직류전위차법 등의 방법이 시도되었으나, ferro-electric 현상 때문에 자성재료에 대해서는 충분한 신뢰성을 확보하지 못했다. 2001년의 개정된 ASTM 표준시험법에서는 직류전위차법이 제외되고 정규화법(normalization method)이 표준시험법으로 추가되었으나, 정규화법 역시 정량적 오차의 범위가 평가되지 않았다. 본 연구에서는, 준정적 하중 조건에서의 정규화법에 대한 국제 라운드 로빈 프로그램을 통해 정규화법의 신뢰성 및 특성을 파악하였다. 정규화법은 컴플라이언스법에 비해  $J_{Ic}$ 를 16 % 크게 예측하였으며, 평균값에 대해 42%의 최대오차가 발생하였다. 현재의 표준 절차에서의 문제점을 확인하였으며, 이에 대한 보완이 필요함을 확인하였다. 정규화법이 준정적 하중 조건에서 충분히 검증될 경우, 이는 동하중 조건 시험에 쉽게 적용될 수 있다.

#### Abstract

J-R test based on elastic plastic fracture mechanics, has been widely used in safety assessment of pressure vessel and pipe in nuclear power plant. DC-potential drop (DCPD) method has been employed by some researchers for use in dynamic loading J-R test to simulate seismic loading effect. But, the method has the significant shortcoming with ferromagnetic materials due to ferro-electric noise. In 2001, ASTM excluded DCPD method from standard test method for J-R test, and added normalization method. But still now, there are no quantitative comparison of normalization method and unloading compliance method in a controlled round-robin format. In this study, round robin on normalization method was conducted under static loading condition. Normalization method overestimated  $J_{Ic}$  by 16 % compared with unloading compliance method, and had maximum deviation of 42 % from mean

value. The problem of current standard procedure was confirmed. When normalization method is verified in static loading condition test, it is suitable for application to dynamic loading condition test.

## 1. 개 요

원자력 압력용기 및 배관의 안전성 평가에, 탄소성 파괴 역학에 기초한 J-R 및 CTOD-R 시험법이 널리 사용되어 왔다. 특히 J-R 시험의 경우 Rice[1]에 의해 J-integral 이 제안된 이후 광범위한 연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 다중시편법(multi-specimen method), 컴플라이언스법(unloading compliance method), 직류전위차법(dc-electric potential method, DCPD)이 ASTM[2,3] 표준 시험법으로 채택되었다. 이들 중 특히 컴플라이언스법과 직류전위차법이 J-R 곡선을 결정짓는 방법으로 가장 널리 사용되고 있다.

이 같은 시험 방법들의 현저한 발전에도 불구하고, 충격 하중을 포함하여 지진 등에 의해 발생하는 동적 하중 조건에서의 페라이트 강의 J-R 곡선을 측정하는데는 여전히 큰 어려움이 따른다. 특히, 페라이트 강은 하중 속도 및 온도의 변화에 따라 동적변형시효(Dynamic Strain Aging, DSA)[4,5] 현상을 일으키며, 이로 인해 특정 하중속도에서 파괴저항성이 준정적 하중속도에 비해 감소할 수 있음이 널리 알려져 있다. 이로 인해 Korean Standard Review Plan (KSRP) 3.6.3에서는 탄소강 배관에 대한 동하중 J-R 시험을 수행할 것을 규정하고 있다.

J-R 곡선의 결정에는 컴플라이언스법이 가장 널리 사용되고 있지만, 이 방법은 동하중 시험에 적용이 불가능하다. 대안으로서, 연속적인 동하중을 가할 수 있는 직류전위차법이 사용되어 왔지만, 이 또한 페라이트 강에서는 강자성 재료의 급격한 변형으로 인한 전위 피크가 발생하였고 이로 인한 균열시작점의 결정에 큰 오차가 발생하는 문제를 일으켰다.[6,7] 특히, 직류전위차법을 표준시험법으로 채택하고 있던 ASTM Standard E1737-96은 E1820-99로 개정되면서 직류전위차법이 표준시험법에서 제외되기도 했다. 그러나, 여전히 KSRP 부록 3.6.3-1에서는 동하중 J-R 시험에 직류전위차법을 사용할 수 있음을 언급하고 있다.

1980년대 이후 정규화법(normalization method)이 개발되어 왔으며, 이는 별도의 균열 길이 측정 장치 없이 하중-변위 곡선만으로 균열길이를 결정하는 획기적인 방법이다. [8-12] key-curve method에 이론적 기반을 둔 이 방법은, 힘 분리 원리 (load separation principle)을 기초로 하여 각각의 시편의 하중-변위 곡선으로부터 경화곡선을 결정하는 방법을 사용하고 있다. 이 방법이 충분한 신뢰성을 갖고 있다고 판단될 경우, 이는 동하중 J-R 시험에 적용하기에 매우 유리하며, 동하중 J-R 시험 뿐 아니라 기존의 모든 J-R 시험에 적용함으로써 J-R 시험의 난이성을 일시에 해소할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

## 2. 정규화법 Round Robin Test

정규화법은 하중-변위 곡선만으로 J-R 곡선을 결정할 수 있기 때문에, 동하중 파괴시험에의 적용이 용이하다. 정규화법에 대한 워크샵이 1998년 ASTM Committee E08.08.02의 주관으로 개최되었으며, High Rate Round Robin 프로그램이 Joyce의 제안 하에 수행되어 2000년에 결과가 발

표되었다. 이 round robin의 결과로 정규화법이 탄소성 파괴시험에 대한 ASTM 표준시험법의 하나로 채택되었으며, 이는 펄라이트 강의 동하중 파괴시험 방법에 대한 큰 방향을 제시해 주었다. 그러나 High Rate Round Robin에서는 정규화법의 신뢰성 평가가 이루어지지 않았으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이, 동하중 시험 조건에서 비교할 수 있는 다른 표준시험법이 없었기 때문이다. 따라서, 정규화법을 동하중 파괴시험에 적용하기 위해서는 이의 신뢰성을 평가하고 오차 범위를 정량화하여 이 방법의 신뢰성을 입증할 필요가 있다.

이에 본 연구진의 제안에 의해 정규화법에 대한 추가의 round robin 프로그램이 ASTM Committee E08.08.02에 제안되었으며, 2001년 8월 국내 6개 기관, 해외 7개 기관에 시험편이 발송되었다. 본 연구진이 프로그램 주관자로서 시험 데이터를 수집 및 재해석하여 오차를 분석하였으며, 일차적인 결과를 ASTM E08.08.02 Committee Meeting에 발표하였다.

본 round robin에서는 SA106Gr.C 원전 주증기 배관재를 사용하였으며, 이는 전형적인 펄라이트 펄라이트 강으로서 표 1에 화학조성을 나타내었다. 재료의 인장 곡선을 그림 1에 나타내었으며, 항복강도, 인장강도 등을 표 2에 정리하였다. 시험편은 1 inch 두께의 1TCT 표준시험편을 사용하였으며, TL 방향으로 채취되었다. 그림 2와 3에 시편 채취 방향 및 시편 도면을 나타내었다. 시편은 13개의 round robin 신청 기관에 배포되었으며, 참가 신청 기관을 표 3에 정리하였다.

표 4에 round robin 시험에 대한 실험 조건, 재료, 시편에 대한 내용을 요약하였다. Round robin 시험은 컴플라이언스법 및 정규화법으로 수행되었으며, "ASTM E1820-99a" 및 "Draft Annex A15. Normalization Data Reduction Technique"의 절차를 따랐다. [3, 13]

### 3. 결 과

#### 1) 결과 수집

13개의 참가 신청 기관 중 9개의 기관에서 시험 결과를 제출하였다. 각 시험편에서의 초기 균열 길이, 최종균열길이 등을 표 5에 정리하였으며,  $J_{Ic}$  분포를 그림 4에 나타내었다. 보고된  $J_{Ic}$  값을 표 6에 정리하였으며, 그림 5에서 이를 그래프로 나타내었다. 수집된 결과를 분석하였으며, 분석 결과는 다음과 같다.

##### \* 데이터 편차 분포

- $a_0/W=0.5$ 에서 시험된 컴플라이언스법(UC)의 경우, 평균값에 대해 44%의 최대 편차가 나타났다. 이런 큰 차이는 몇몇의 참여 팀의 균열 길이 데이터의 오차범위가 컸기 때문이다.
- $a_0/W=0.65$ 에서 시험된 컴플라이언스법의 경우, 평균값에 대해 최대 편차가 21%로 나타났다.
- $a_0/W=0.5$ 에서 시험된 정규화법(NM)의 경우, 평균값에 대해 최대 편차가 43%를 나타내었다.
- $a_0/W=0.65$ 에서 시험된 정규화법의 경우, 평균값에 대해 최대 편차가 32%를 나타내었다.

##### \* 평균값의 특성

- 평균적으로 정규화법이 컴플라이언스법에 비해  $J_{Ic}$ 를 13% 크게 예측하였다.
- 정규화법에서 평균적으로 연속하중조건의 경우가 unloading을 한 경우에 비해  $J_{Ic}$ 를 18% 크게 예측하였다.

#### 2) 재해석

제출된 하중-변위 곡선을 이용하여 본 연구진은 주관자로서 객관적 비교를 위하여 J-R 곡선을 다시 계산하였으며, 컴플라이언스법의 경우 제출된 균열길이를 그대로 사용하였다.  $J_{Ic}$ 의 결정을 위한 균열둔화곡선(blunting line)의 기울기는 ASTM E1820-99a의  $J=2\sigma_y\Delta a$ 를 사용하였다. 재해석에 의해 결정된  $J_{Ic}$  값은 그림 6에 나타내었으며, 이를 표 7에 요약하였다. 재해석 결과 일부 데이터는 ASTM E1820-99a의 criteria를 만족하지 못했으며 이를 표 7에 함께 표시하였다. criteria를 만족하지 못하는 경우 criteria를 벗어난 항목을 표 8에 정리하였다. 각 시험조건에 따른  $J_{Ic}$  데이터 분포 특성을 그림 7에 정리하였으며, criteria를 만족시키지 못하는 데이터들은 데이터 특성 분석에서 제외하였다. 재해석 결과를 아래에 정리하였다.

**\* 데이터 편차 분포**

- $a_0/W=0.5$ 에서 시험된 컴플라이언스법의 경우, 평균값에 대해 50%의 최대편차가 나타났으며, 이러한 큰 편차는 한 기관의 데이터에서 나타난 큰 오차 때문이었다. 이 데이터를 제외할 경우 최대 편차는 18%로 낮아진다.
- $a_0/W=0.65$ 에서 시험된 컴플라이언스법의 경우, 평균값에 대해 50%의 최대편차가 나타났다.
- $a_0/W=0.5$ 에서의 정규화법의 경우, 평균값에 대해 40%의 최대편차가 나타났다. 이러한 편차는 두 개의 데이터에서 나타난 fitting 문제로 인한 것으로 추측되며 이 문제가 나타난 데이터를 표 7에 표시하였다. 이 fitting 문제에 대해서는 토론에서 좀 더 자세히 다루었다.
- $a_0/W=0.65$ 에서의 정규화법의 경우, 평균값에 대해 18%의 최대편차가 나타났다.

**\* 평균값의 특성**

- $a_0/W=0.5$ 의 경우에  $a_0/W=0.65$ 의 경우에 비해 평균적으로  $J_{Ic}$ 를 5% 크게 예측하였다.
- 평균적으로 정규화법이 컴플라이언스법에 비해  $J_{Ic}$ 를 14% 크게 예측하였다.
- 정규화법에서 평균적으로 연속하중조건인 경우가 unloading을 하는 경우에 비해  $J_{Ic}$ 를 16% 크게 예측하였다.
- 정규화법과 컴플라이언스법의  $J_{Ic}$  예측결과의 차이가 컴플라이언스법이 균열진전 초기에 균열길이를 과대평가한 결과일 가능성이 한 참가기관에 의해 제기되었으나, confirmatory 시험 결과를 고려할 때, 컴플라이언스법의 문제일 가능성은 매우 낮을 것으로 판단되며 이를 그림 9에 나타내었다.
- 참가기관 3의  $a_0/W=0.5$  데이터와 참가기관 5의  $a_0/W=0.5$  데이터, 그리고 참가기관 9의  $a_0/W=0.5$  연속하중 데이터에서 정규화 함수(normalization function)의 fitting 문제가 발견되었고 이 문제가  $J_{Ic}$ 의 과소평가를 야기하였다.

**4. 토론**

**1) 정규화 함수(normalization function)의 fitting 문제**

27개의 시편 중 3개의 데이터에서 심각한 정규화 함수의 fitting 문제가 발견되었으며, 이를 표 7에 표시하였다. 이 fitting 문제는, 그림 9 (a)에 나타낸 것과 같이, fitting된 정규화 함수 곡선이 최종점으로 접선으로 그어진 직선으로 부터 크게 벗어나는 문제를 뜻한다. 그림 9 (b)에 이 fitting 문제가 J-R 곡선에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 정규화 함수가 fitting 문제를 일으키는 부분에서 균열길이가 과대평가되어 J-R 곡선을 외곡시키는 것을 알 수 있다.

Fitting 문제에 대한 위의 분석을 고려한다면, 정규화 곡선을 fitting에 의해 얻는 대신 접선 자체를 정규화 곡선으로 사용함으로써 fitting 문제를 없앨 수 있음을 알 수 있다. 접선 자체를 정규화 곡선으로 사용한 결과를 그림 9 (b)에서 보여주고 있으며, 표준 fitting 절차를 이용한 경우에 비해 컴플라이언스법 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

## 2) 선형 접선법

접선에 의한 정규화 곡선의 결정 방법에 대해 검토하기 위해, 모든 J-R 곡선을 "선형 접선법"을 이용하여 재계산하였다. 이 방법에서는 최종점으로부터 균열둔화가 고려된 정규화 곡선에 접선을 그었으며, 점점 앞부분의 균열둔화가 고려된 정규화 곡선과 점점 뒷부분의 접선을 합하여 최종 정규화 곡선을 결정하였다. 선형 접선법에 의해 결정된  $J_{Ic}$  값을 그림 10에 나타내었다. 각 시험 조건에 대한  $J_{Ic}$  값의 분포 특성을 그림 11에 정리하였으며, 전체  $J_{Ic}$  값을 표 9에 정리하였다. 선형 접선법의 적용 결과를 아래에 정리하였다.

### \* 데이터 편차 분포

- $a_0/W=0.5$ 에서 시험된 정규화법의 경우, 평균값에 대해 18%의 최대 편차를 나타내었다.
- $a_0/W=0.65$ 에서 시험된 정규화법의 경우, 평균값에 대해 16%의 최대 편차를 나타내었다.

### \* 평균값의 특성

- 평균적으로 정규화법이 컴플라이언스법에 비해  $J_{Ic}$ 를 24% 크게 예측하였다.
- 정규화법에서 평균적으로 연속하중조건의 경우가 unloading을 한 경우에 비해  $J_{Ic}$ 를 15% 크게 예측하였다.
- 선형 접선법은 정규화법의 표준 절차에 비해 평균값에 대한 최대편차를 감소시켰으며, 컴플라이언스법과 편차를 증가시켰다.
- 위를 통해 볼 때, 선형접선법에 의한 정규화법이 표준절차에 의한 정규화법에 비해 컴플라이언스법과의 편차를 증가시켰다. 그러나, 이는 그림 12에서 나타난 바와 같이 지나치게 과소 평가 된 세 개의 데이터를 평균값 근처로 옮겨놓은데 따른 결과이며, 따라서 이는 선형접선법의 문제라기 보다 정규화법이 처음부터 내포하고 있었던 문제였을 가능성이 크다.
- 선형접선법은 정규화 함수가 균열시작 이후로는 완전한 직선이라는 가정에서 출발한 것이며, 따라서 이 가정에 대한 추가의 평가가 필요하다.

## 5. 결론

1) 배관재료의 동적 하중 조건에서 J-R 시험에 사용된 직류전위차법은 자성재료의 경우에 적용성이 문제시 됨이 확인되어, 미국 ASTM은 이를 표준시험법에서 삭제하였다.

- KSRP 부록 3.6.3-1 에서는 여전히 직류전위차법을 시험방법으로서 언급하고 있으며, 이에 대한 추가 논의가 필요하다.
- 대체 방안으로 정규화법이 ASTM 표준시험법에 추가되었으며, 본 연구진의 주관으로 ASTM round robin 및 관련 연구가 진행 중이다.

2) 준정적 하중속도 J-R 시험에 대한 정규화법 라운드 로빈 프로그램이 수행되었으며, 이를 통해

다음의 결론을 얻었다.

- 컴플라이언스법에 의한  $J_{Ic}$  값은 평균값으로부터 53%의 큰 편차를 가진다. 그러나 본 연구진에 의한 재해석 결과, 일부 데이터가 ASTM E1820-99a 및 Draft Annex A15의 criteria를 만족하지 못하였다. criteria를 만족하지 못하는 데이터와 균열 측정에서 큰 오차가 발생한 한 개의 데이터를 제외하였을 경우 최대 편차는 30%로 감소하였다.
- 재해석 결과, unloading을 경험한 시편의 정규화법에 의한  $J_{Ic}$ 는 평균값에 대해 42%의 최대 편차를 나타내었으며, 이런 큰 편차는 몇몇 데이터에서 발생한 정규화 함수의 fitting 문제에 의한 것이었다.
- 평균적으로 정규화법이 컴플라이언스법에 비해  $J_{Ic}$ 를 16% 크게 예측하였다.
- 정규화법에서 평균적으로 연속하중조건인 경우가 unloading을 한 경우에 비해  $J_{Ic}$ 를 19% 크게 예측하였다.
- 정규화법의 fitting 문제의 해결 방안을 모색하기 위해, 선형 접선법을 이용한 정규화법의 적용을 시도하였으며, 이 방법이 fitting 문제를 배제할 수 있음을 확인하였다.

### <감사의 글>

저자는 라운드 로빈에 참가해 주신 국내 및 해외 참가자 모두에게 감사의 뜻을 전합니다. 본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업의 일환으로 수행되었습니다.

### <참고문헌>

- [1] Rice, J.R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notched and Cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol.35, 1968. pp 379-386.
- [2] "Standard Test Method for J-integral Characterization of Fracture Toughness, ASTM E1737-96", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.
- [3] "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM E1820-99", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.
- [4] C.W. Marschall, M.P. Landow, and G.M. Wilkowski, "Loading Rate Effects on Strength and Fracture Toughness of Pipe Steels Used in Task 1 of the IPIRG Program", NUREG/CR-6098, 1993
- [5] C.W. Marschall, R. Mohan, P. Krishnaswamy, and G.M. Wilkowski, "Effect of Dynamic Strain Aging on the Strength and Toughness of Nuclear Ferritic Piping At LWR Temperatures", NUREG/CR-6226, 1994
- [6] E.M. Hackett, M.T. Kirk, R.A. Hays, "An Evaluation of J-R Curve Testing of Nuclear Piping Materials Using the Direct Current Potential Drop Technique", U.S.N.R.C.NUREG/CR-4540, 1986
- [7] M.P. Landow and C.W. Marschall, "Experience in Using Direct Current Electric Potential to Monitor Crack Growth in Ductile Metals", Elastic-Plastic Fracture Test Methods: The User's Experience(Second Volume), ASTM STP 1114, J.A. Joyce, American Society for Testing and Materials, 1991, pp. 163-177
- [8] Landes, J.D. and Herrera, R., "A New Look at J-R Curve Analysis," International Journal of Fracture, Vol. 36, 1988, pp. R9-R14.

- [9] Herrera, R. and Landes, J.D., "Direct J-R Curve Analysis of Fracture Toughness Tests," Journal of Testing and Evaluation, Vol. 16, No. 5, Sept. 1988, pp. 427-449.
- [10] Herrera, R. and Landes, J.D., "Direct J-R Curve Analysis : A Guide to the Methodology," in Fracture Mechanics : Twenty-First Symposium, ASTM STP 1074, J.P. Gudas, J.A. Joyce, and E.M. Hackett, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 24-43.
- [11] Landes, J.D., Zhou, Z., Lee, K., and Herrera, R., "Normalization Method for Developing J-R Curves with the LMN Function," Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 19, No. 4, July 1991, pp. 305-311.
- [12] Lee, K. "Elastic-Plastic Fracture Toughness Determination under Some Difficult Conditions", Ph.D. Thesis, The university of Tennessee, Knoxville, 1995.
- [13] Joyce, J.A., "Analysis of the E08.08.02 High Rate Round Robin", Draft Report, August, 2000.
- [14] J.A. Joyce, et al. "ASTM E08.08.02 Workshop on Normalization", Presentation Overheads, November 4, 1998.

☒ 1. Chemical composition of round robin test material, A106Gr.C [wt%]

C	Mn	P	S	Si	Mo	Cr	Cu	V	Ni	Fe
0.24	1.08	0.011	0.011	0.23	0.04	0.09	0.09	0.007	0.11	balance

☒ 2. Tensile properties of round robin test material, A106Gr.C at room temperature

	Y.S. [MPa]	U.T.S. [MPa]	Elastic Modulus [GPa]
specimen 1	336.9	567.2	
specimen 2	344.8	569.9	
specimen 3	346.4	565.4	
Mean	342.7	567.5	204

☒ 3. Participants of ASTM E08.08.02 normalization round robin program

Organization	Representative
Seoul National University, Korea	Prof. I.S. Hwang
Sung-Kyun-Kwan University, Korea	Prof. C.S. Seok
Korea Atomic Energy Research Institute, Korea	J.H. Hong
Doosan Heavy Industries & Construction, Korea	J.T. Kim
Korea Advanced Institute of Science & Technology, Korea	Prof. I.S. Kim
Chonnam National University, Korea	Prof. K.J. Kang
United States Naval Academy, USA	Prof. J.A. Joyce
NSWCCD Carderock, USA	Rob Tregoning
ORNL, USA	Mikhail Sokolov
Fracture Technology Associates, USA	Ken George
Research Center Rossendorf, Germany	J. Boehmert
SCK, Belgium	Marc Scibetta
VTT, Finland	Kim Wallin

㉟ 4. Round robin test description.

Test condition	Static loading rate ( 1mm/min. ), room temperature ( 25. C )
Material	A106Gr.C hot-extruded nuclear piping
Specimen	1 inch thickness CT specimens machined in TL orientation, no pre-cracked, 20% depth side groove after pre-cracking
Test number	Four of A106 ( one for $a_0/W=0.5$ , second for $a_0/W=0.65$ , third for $a_0/W=0.5$ confirmation, fourth for optional ramp loading, respectively )
Tensile properties	Tensile test result provided by Seoul National University
Applied method	unloading compliance method (ASTM E1820-99), normalization analysis after test using the high rate annex procedure
Analysis	J-R curves determined by unloading compliance and normalization method $J_{Ic}$ 's determined by both methods

㉟ 5. Crack length information reported by participants. [unit in mm]

Lab. No.	$a_0/W=0.5$			$a_0/W=0.5$			$a_0/W=0.5$ , ramp loading		
	$a_0$	$a_f$	$\Delta a$	$a_0$	$a_f$	$\Delta a$	$a_0$	$a_f$	$\Delta a$
1	27.59	32.77	5.18	-	-	-	25.87	35.97	10.10
2	25.97	30.35	4.38	34.07	38.38	4.31	25.97	30.57	4.60
3	25.96	28.42	2.46	33.16	35.26	2.10	-	-	-
4	26.67	30.51	3.84	35.69	38.76	3.07	26.62	30.75	4.13
5	25.95	29.55	3.60	33.44	35.29	1.85	-	-	-
6	24.69	28.54	3.86	31.68	35.03	3.35	24.90	27.93	3.03
7	27.10	30.90	3.80	35.20	37.60	2.40	-	-	-
8	26.60	30.29	3.69	34.15	36.37	2.22	26.70	29.97	3.27
9	25.50	29.40	3.90	33.40	35.40	2.00	25.70	29.10	3.40

㉟ 6.  $J_{Ic}$  values reported by participants. [unit in kJ/m<sup>2</sup>]

Lab.	Unloading $a_0/W=0.5$		Unloading $a_0/W=0.65$		Ramp $a_0/W=0.5$
	U.C.	N.M.	U.C.	N.M.	N.M.
1	273	294	-	-	292
2	266	366	178	320	392
3	222	159	183	187	-
4	234	251	269	275	336
5	163	223	219	271	-
6	279	271	223	262	282
7	365	303	260	282	-
8	277	361	218	301	370
9	203	269	229	298	350
Mean	254	277	222	275	337
Std. Dev.	57	65	32	40	43
Max. Dev. [%]	44	43	21	32	16



⌘ 7.  $J_{Ic}$  values determined by reanalysis with invalid data underlined.

Lab.	Unloading $a_0/W=0.5$		Unloading $a_0/W=0.65$		Ramp $a_0/W=0.5$
	U.C.	N.M.	U.C.	N.M.	N.M.
1	<u>339<sup>1)</sup></u>	<u>400<sup>1)</sup></u>	-	-	<u>430<sup>1)</sup></u>
2	284	<u>355<sup>1)</sup></u>	170	<u>302<sup>1)</sup></u>	<u>333<sup>1)</sup></u>
3	281	<u>159<sup>2)</sup></u>	196	223	-
4	292	274	292	311	<u>334<sup>1)</sup></u>
5	125	<u>195<sup>2)</sup></u>	189	256	-
6	265	316	268	292	321
7	<u>443<sup>1)</sup></u>	251	308	245	-
8	<u>277</u>	361	218	301	370
9	222	308	185	258	<u>245<sup>2)</sup></u>
Mean	249	266	217	274	321
Std. Dev.	60	71	46	32	46
Max. Error[%]	50	40	35	18	23
1)not valid					
2)fitting problem					

⌘ 8. Invalidation of  $J_{Ic}$  values determined by reanalysis

Test condition			Reasons for Invalidation
UC	Lab.1	$a_0/W=0.5$	$ \Delta a_p - \Delta a_{UC}  > 0.15 \Delta a_p$
	Lab.7	$a_0/W=0.5$	$R^2$ of J-R curve power fitting $< 0.96$
	Lab.7	$a_0/W=0.65$	$R^2$ of J-R curve power fitting $< 0.96$
NM	Lab.1	$a_0/W=0.5$	$\Delta a_f > 4$ mm
	Lab.1	Ramp loading	$\Delta a_f > 4$ mm
	Lab.2	$a_0/W=0.5$	$\Delta a_f > 4$ mm
	Lab.2	$a_0/W=0.65$	$\Delta a_f > 4$ mm
	Lab.2	Ramp loading	$\Delta a_f > 4$ mm
	Lab.4	Ramp loading	$\Delta a_f > 4$ mm

표 9.  $J_{Ic}$  values determined by linear tangent method.

Lab.	Unloading $a_0/W=0.5$		Unloading $a_0/W=0.65$		Ramp $a_0/W=0.5$
	U.C.	N.M.	U.C.	N.M.	N.M.
1	<u>339</u> <sup>1)</sup>	<u>398</u> <sup>1)</sup>	-	-	<u>435</u> <sup>1)</sup>
2	284	<u>339</u> <sup>1)</sup>	170	<u>296</u> <sup>1)</sup>	<u>353</u> <sup>1)</sup>
3	281	323	196	268	-
4	292	337	292	340	<u>349</u> <sup>1)</sup>
5	125	278	189	253	-
6	265	358	268	303	355
7	<u>443</u> <sup>1)</sup>	265	<u>308</u> <sup>1)</sup>	257	-
8	277	361	218	322	377
9	222	307	185	309	354
Mean	249	321	217	293	362
Std. Dev.	60	35	46	34	13
Max. Error[%]	50	18	35	16	4
1)not valid					

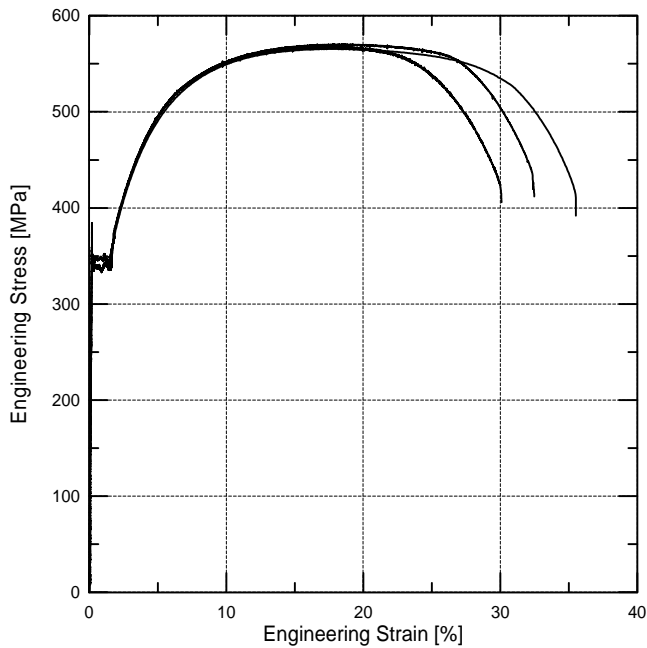


그림 1. Stress-strain curves of A106Gr.C

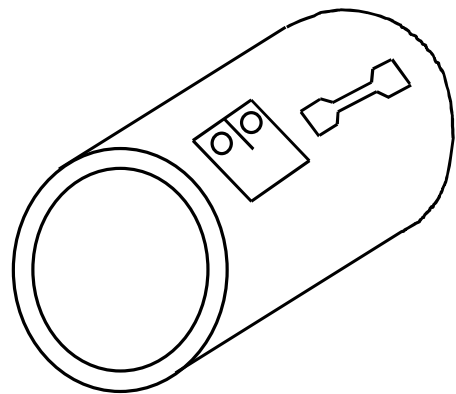


그림 2. CT 시편 및 인장 시편의 A106Gr.C 배관에서 채취 방향

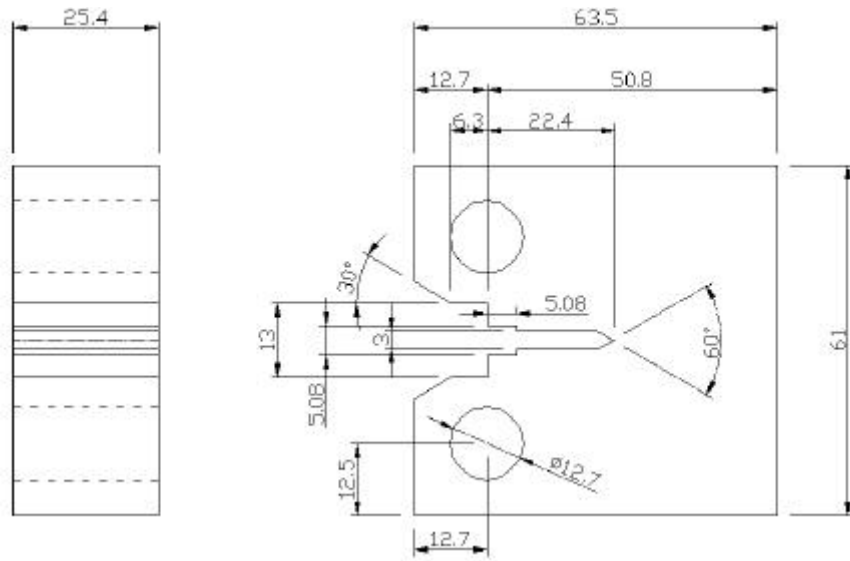


그림 3. Normalization round robin 을 위한 CT 시편 형상

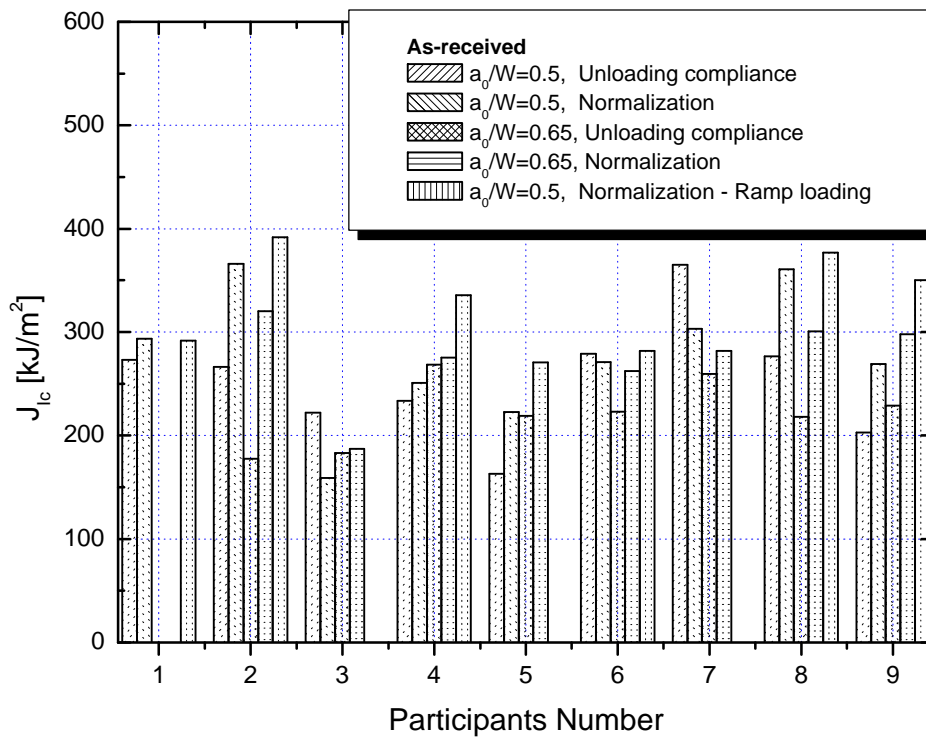
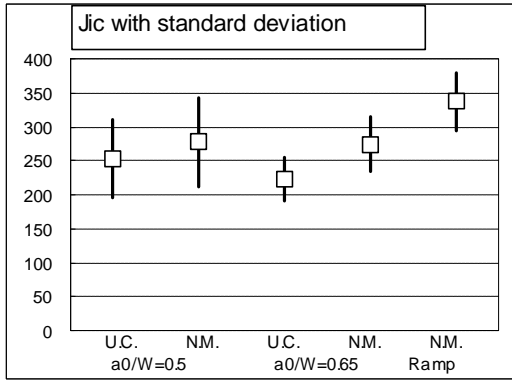
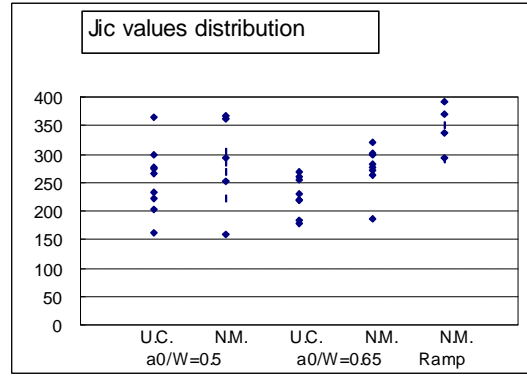


그림 4.  $J_{Ic}$  values provided by participants.



(a) Mean value with standard deviation



(b) Measured value distribution

그림 5.  $J_{Ic}$  value distributions for each test conditions

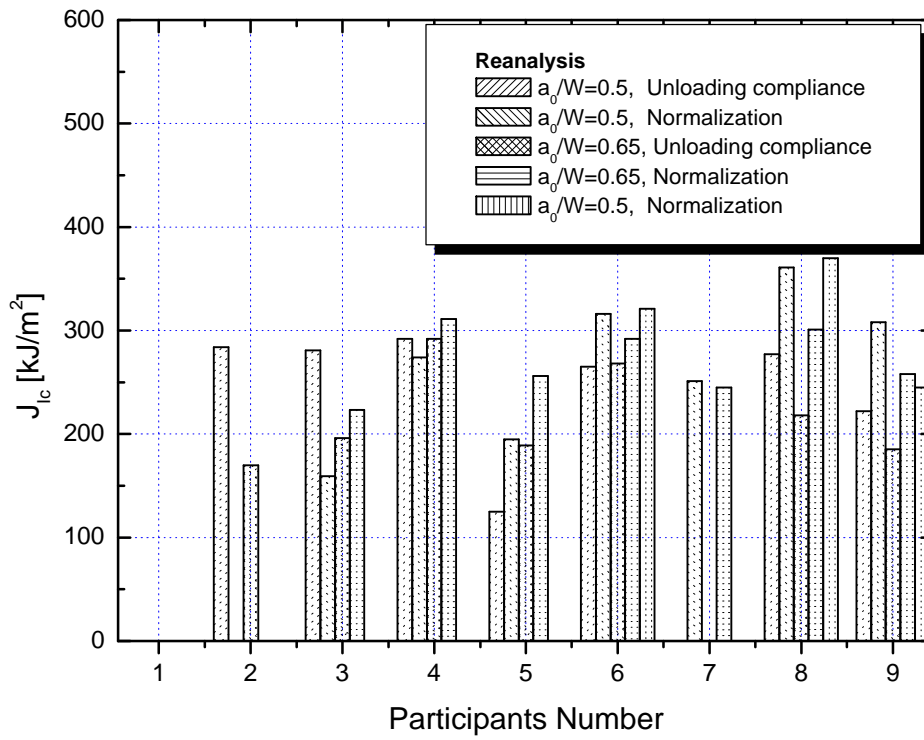
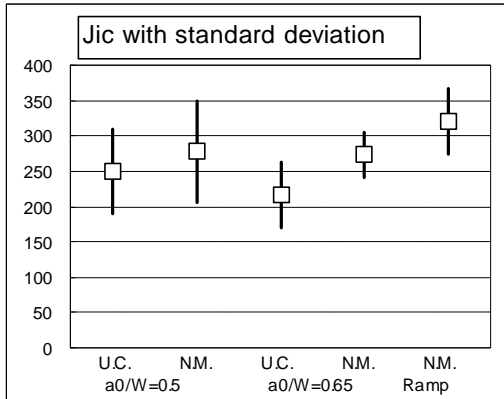
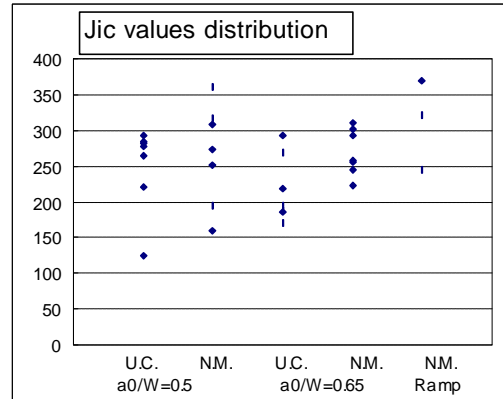


그림 6.  $J_{Ic}$  values determined by reanalysis.



(a) Mean value with standard deviation



(b) Measured value distribution

그림 7.  $J_{Ic}$  value distributions for test conditions determined by reanalysis.

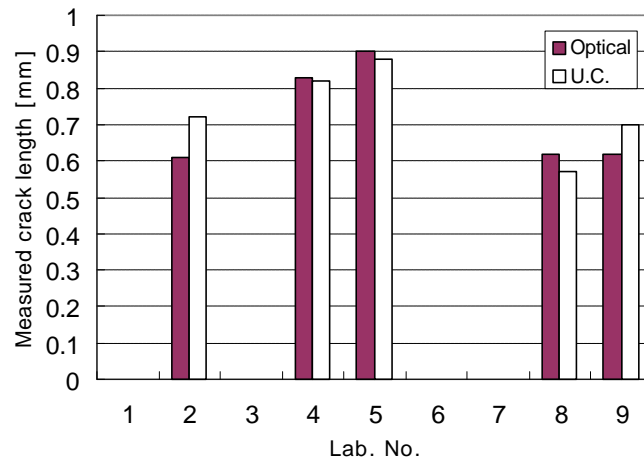
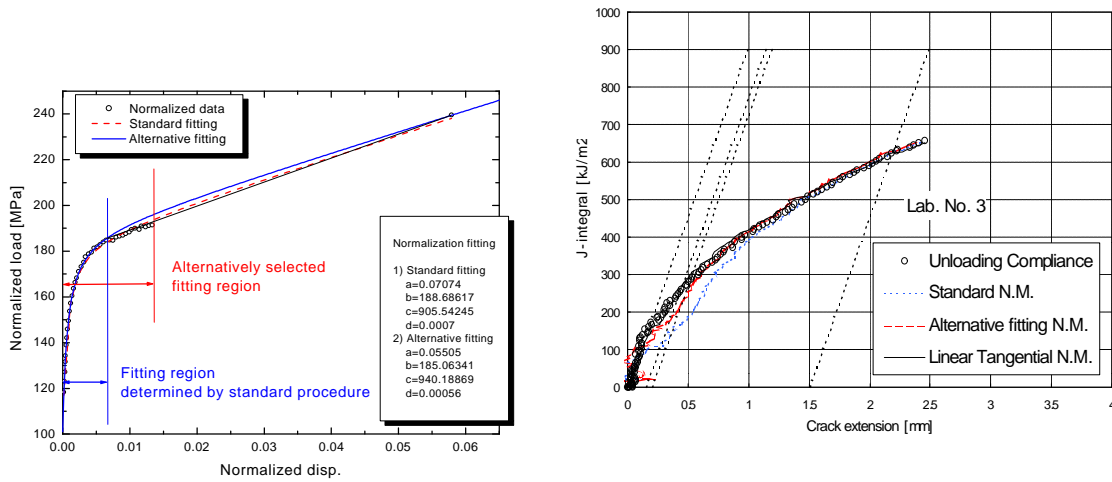


그림 8. Confirmatory test result



(a) Normalization function fitting compared with tangent line

(b) J-R curve

그림 9. Fitting problem example of  $a_0/W=0.5$  of Lab. No.3

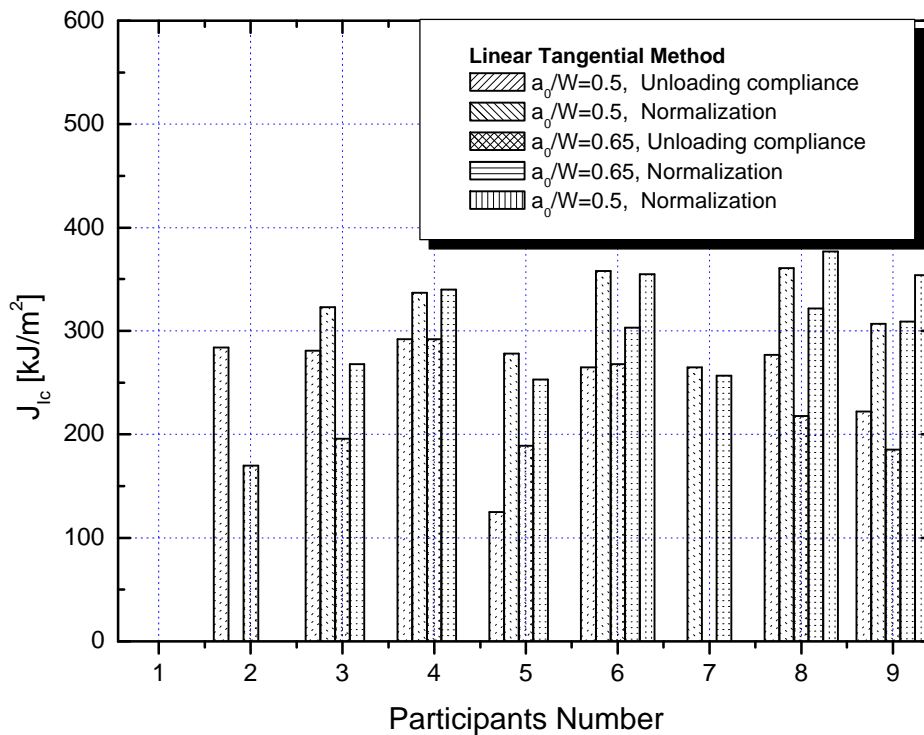


그림 10.  $J_{Ic}$  values determined by linear tangent normalization method.

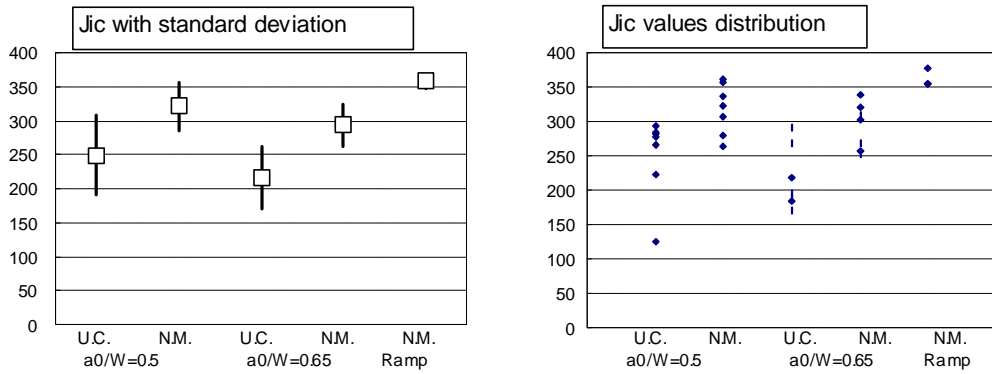


그림 11.  $J_{Ic}$  values distributions for each test conditions determined by linear tangent normalization method.

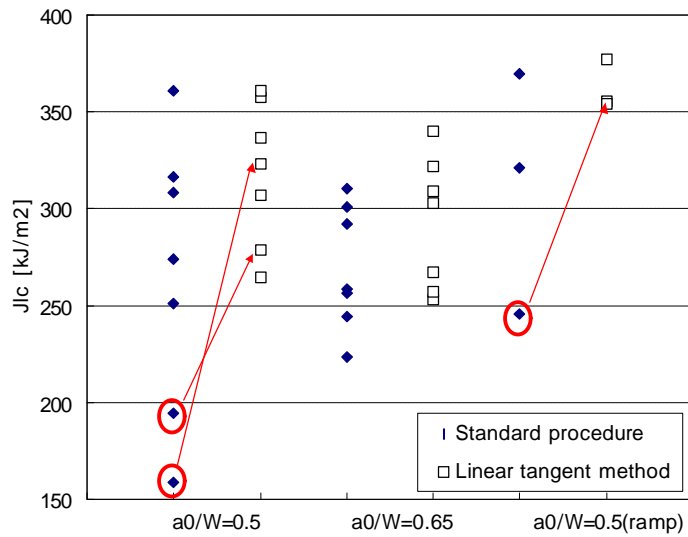


그림 12. Comparison of  $J_{Ic}$  determined by linear tangent method with  $J_{Ic}$  determined by standard procedure