

# 실배관 시험편의 균열 길이 측정에 관한 연구

박재실<sup>†</sup>·석창성<sup>\*</sup>

## A Study on the Measurement of the Crack Length for the Real Scale Pipe Specimen

Jae Sil, Park and Chang Sung, Seok

**Key Words:** Real Scale Pipe Specimen(실배관시험편), J-R Curve(파괴저항곡선), Unloading Compliance Method(제하 컴플라이언스법), Load Ratio Method(하중비법)

### Abstract

Fracture resistance curves for concerned materials are required in order to perform elastic-plastic fracture mechanical analyses. Fracture resistance curve is built with J-integral values and crack extension values. The objective of this paper is to apply the load ratio method to the measurement of the crack length for the real scale pipe specimen. For these, the fracture test using the real scale pipe specimen and finite element analyses were performed. A 4-point bending jig was manufactured for the pipe test and the direct current potential drop method and the load ratio method was used to measure the crack extension and the length for the real scale pipe test. Finite element analyses about the compliance of the pipe specimen were executed for applying the load ratio method according to the crack length.

### 1. 서 론

배관 계통 구조물의 파괴역학적인 건전성을 평가하기 위해서는 배관 계통 구조물의 파괴인성치를 구하여야 한다. 하지만 배관 계통 구조물의 파괴 시험을 통하여 파괴특성을 평가하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 표준 시험편을 이용하여 시험을 수행하고 시험편에 대한 파괴인성치를 구한 후에 이를 배관 재료의 파괴특성치로 사용한다. 이렇게 구해진 파괴특성치를 이용하여 실제 구조물의 구조 해석을 수행하고 전체 구조물의 파괴특성을 평가하게 된다.

배관 재료의 파괴특성치 중, 파괴저항 곡선(J-R curve)은 균열의 진진량에 대한 파괴저항값을 J적분으로 나타낸 것으로,  $J_{IC}$ 의 결정이나 탄소성과 파괴역학적인 건전성평가 등에 사용된다. 이러한 파괴저항 곡선을 구하기 위해서는 배관 재료에 대한 파괴저항 시험을 수행하여야 한다.

대형 구조물의 파괴특성은 대부분 표준 시험편에 대한 파괴특성 평가를 통하여 수행되고 있는데, 시험편의 경우 기하학적 형상이나 치수 등에 따른 구속 효과(constraint effect)에 의해서 파괴특성이 다르게 나타나며, 실 구조물의 경우에는 그 영향이 더욱 크게 나타나는 것으로 알려져 있다<sup>(1-3)</sup>. 이러한 문제점 때문에 ASTM의 표준 시험법에서는 시험편의 크기에 대한 규정을 하고 있다<sup>(4)</sup>. 따라서 시험편 시험 결과를 구조물에 적용하기 위해서는 시험편 및 구조물의 크기 및 형상에 따른 파괴저항 시험을 수행하여 구속 효과에 대한 평가가 선행되어야 한다.

파괴저항 시험에 사용되는 표준 시험편의 경우

<sup>†</sup> 성균관대학교 대학원 기계공학과

E-mail : parkjs@skku.edu

TEL : (031)290-7486 FAX : (031)290-7482

<sup>\*</sup> 성균관대학교 기계공학부

에는 ASTM 등에 표준 시험법<sup>(4)</sup>에 잘 정리되어 있다. 하지만 실 배관 시험편에 대한 실증 시험은 막대한 비용과 시간으로 인해 제한된 경우에 대해서만 시험을 수행하거나 축소 배관을 이용한 시험을 주로 수행하고 있다. 또한 국내에서 수행된 대부분의 연구는 외국의 설계 기준 절차에 준한 재료물성치 측정 시험이나 현장 적용을 위한 설계 데이터 제공을 중심으로 이루어 졌을 뿐, 시험기술 및 설비의 미비로 인해서 실 배관에 대한 실증 시험은 수행하지 못하고 있으며 관련 데이터를 모두 외국에 의존하고 있는 형편이다. 따라서 실 배관 시험편에 대한 실증 시험 기술의 확보가 필수적이다.

또한 현재 배관 계통의 파괴역학적 건전성 평가에 적용되고 있는 표준 시험편 시험 결과를 이용한 해석 방법의 보수성을 확인하고 배관의 실제 거동에 준한 파괴 역학적인 해석을 수행하기 위해서는 동일한 재료에 대하여 표준 시험편 시험과 실 배관 시험을 동시에 수행하여 결과를 서로 비교하여야 한다.

파괴저항 곡선을 구성하는 J-적분 값은 여러 연구자들에 의해 제시된 J-적분 계산식으로부터 배관 파괴저항 시험 결과로부터 계산할 수 있다. 또한 균열 진전량도 배관 파괴저항 시험에서 측정하여야 한다.

균열 진전량을 측정하기 위해서 표준 시험편의 경우에는 표준 시험법<sup>(4)</sup>에 제하컴플라이언스법(unloading compliance method)을 사용하여 균열 진전량을 측정하도록 하고 있으며 이 외에도 직류전위차법(DCPD method) 등의 또 다른 균열 진

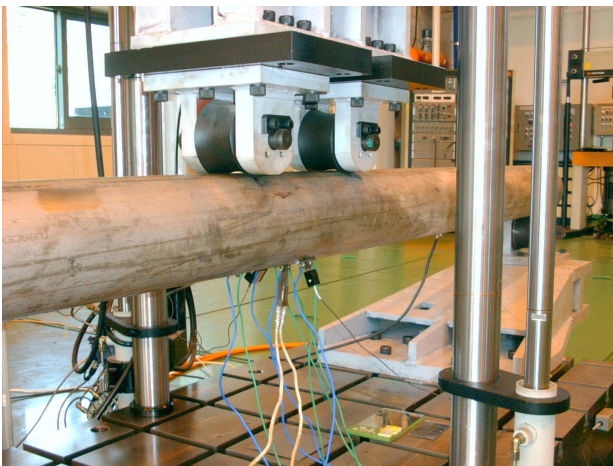


Fig. 1 Pipe testing system

전량 측정 방법이 있다면 적용이 가능하도록 규정하고 있다.

본 연구에서는 실 배관 시험편의 균열 길이를 측정하기 위하여 직류전위차법, 하중비법을 사용하여 실 배관 시험편에 대한 파괴저항 시험에서 균열 길이를 계산하는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 실배관 파괴저항 시험

### 2.1 시험 장치 구성

본 연구에서는 배관의 파괴저항 측정을 위하여 4점 굽힘 시험 방법을 사용하였다. 시험에 사용된 재료시험기는 25톤 용량의 전기유압식 만능시험기이며, Fig. 1에 보이는 바와 같이 4점 굽힘 시험을 위하여 별도의 지그를 제작하였다.

하중과 하중선 변위의 측정은 시험기의 로드셀과 LVDT를 사용하였고, 3개의 COD 게이지로부터 균열 양 선단부와 중앙부에서의 CMOD (crack mouth opening displacement) 값을 측정하였다. 또한 균열 길이 및 진전량의 측정을 위하여 직류전위차법을 사용하였다. 50암페어(A) 용량의 직류전원 공급기(DC power supply)를 사용하여 배관 시험편에 50A의 전류를 공급하였다. 균열이 진전

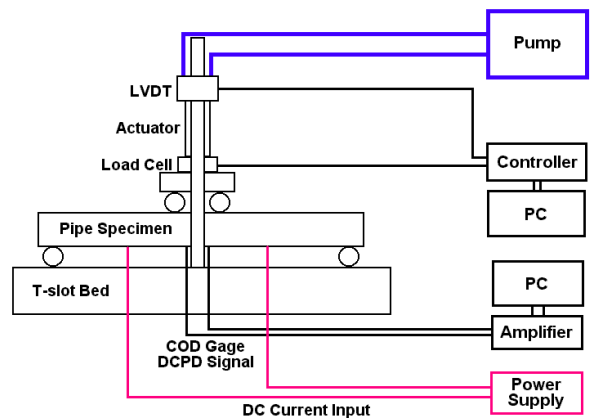


Fig. 2 Schematic diagram of a pipe testing system

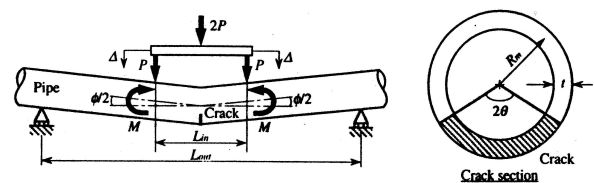


Fig. 3 Circumferentially through-wall-cracked pipe

함에 따라 4개의 채널(균열 양 선단부, 중앙부, 참조부)을 통하여 전위차를 측정하였고 1Hz 저역 통과형 필터(low pass filter)를 사용하여 잡음을 제거한 후 선증폭기를 사용하여 5,000배 증폭하였다. 시험기의 제어, 데이터 수집, 처리 및 결과

해석에는 A/D 변환기와 32비트 PC를 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 배관 파괴저항 시험용 실험 장치의 개략도이다.

2.2 시험편 준비

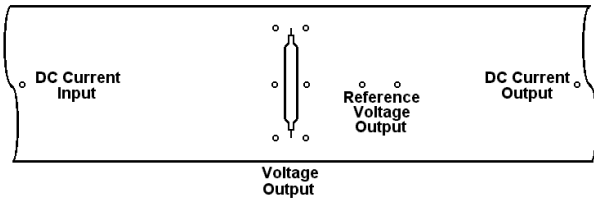


Fig. 4 Configuration of DCPD signal output location

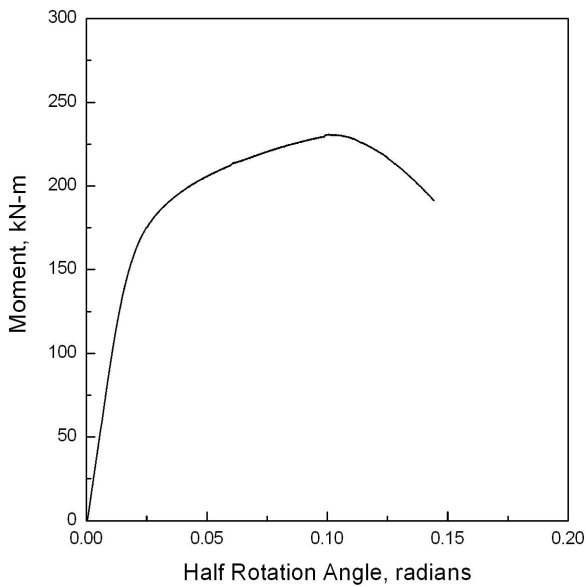


Fig. 5 Moment - half rotation angle curve for pipe fracture test

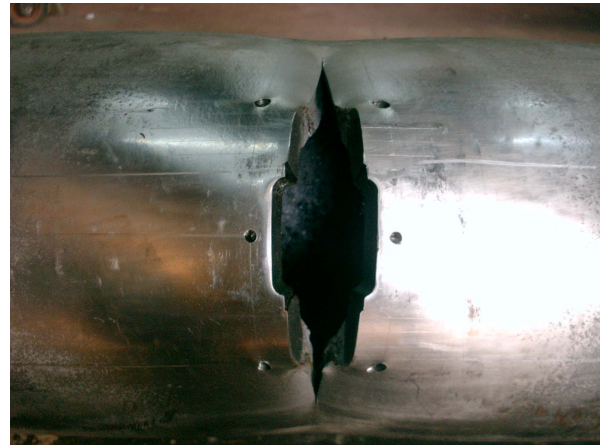


Fig. 6 Fracture appearance of pipe specimen



Fig. 7 Fracture appearance of pipe specimen

Table 1 Chemical composition of the test material

Material	Chemical Composition, (wt.%)							
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Fe
SA312 TP304L	0.023	1.44	0.32	0.035	0.006	10.10	18.35	Bal.

Table 2 Details of pipe test specimen

Material	Outer Diameter, (mm)	Wall Thickness, (mm)	Current Input, (A)	Pre-crack Angle, (degree)	Span, (mm)	
					Outer, $L_{out}$	Inner, $L_{in}$
SA312 TP304L	168.3	18.3	50	65	2800	300

본 연구에서 사용된 배관은 SA312 TP304L 스테인리스강이며, Table 1에 재료물성치를 나타내었다. 또한 본 연구에서 사용할 배관 시험편의 균열면 형상과 4점 굽힘 시험 방법을 Fig. 3에 개략적으로 나타내었다. Table 2에 본 연구에 사용된 배관 시험편의 치수 및 피로 예비 균열 길이 등을 나타내었다. 배관 시험편은 먼저 기계적 가공을 통하여 관통 균열을 삽입한 후 원주 방향으로 65°까지 4점 굽힘 시험용 지그를 사용하여 피로 예비 균열을 가공하였다.

본 연구에서는 균열 길이 및 진전량의 측정을 위하여 직류전위차법을 사용하였다. 전류 공급부와 전압측정부의 위치는 Fig. 4에 나타내었다. 배관 시험의 경우 양쪽 균열 선단에서의 균열 진전량이 서로 다르기 때문에 균열의 중앙부에서만 전위차를 측정할 경우에는 정확한 균열 진전량을 측정하기가 어렵다. 따라서 Fig. 4에서와 같이 균열 선단 양 끝단에서 전위차를 동시에 측정하여 균열 양 끝단에서의 균열 진전량을 측정하였다.

DCPD 시스템은 정전류를 공급하기 위한 50A 용량의 직류 전원 공급 장치와 측정된 전위차의 잡음을 제거하기 위한 저역 통과형 필터, 측정된 신호를 증폭하기 위한 선증폭기, 측정된 아날로그 신호를 디지털화 하기 위한 A/D 변환기, 디지털화된 측정된 전위차를 저장하고 균열 길이로 환산하기 위한 PC 등으로 구성하였다.

2.3 실배관 파괴저항 시험

구성된 장비를 사용하여 실 배관에 대한 파괴 저항 시험을 수행하였다. 하중-하중선 변위 선도로부터 구한 모멘트와 배관의 회전각에 대한 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 모멘트 값은 측정된

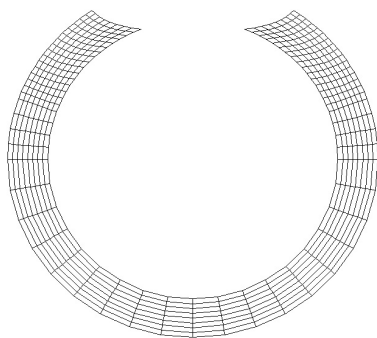


Fig. 8 Detailed mesh of ligament part,  $\theta=30^\circ$

하중 값과 하중 부하점과 배관 지지점 사이의 거리로부터 산출하였고, 배관 회전각은 하중선 변위의 증가에 따른 배관 지지점과의 각 변화량으로부터 산출하였다. Table 4에서 보이는 바와 같이 최대 모멘트는 230.8 kN-m이다. Fig. 6은 파단된 배관 시험편의 균열부 형상이며 Fig. 7은 실배관 파괴 저항 시험 후 파단된 배관 시험편의 파단면 형상이다.

3. DCPD법을 이용한 균열 길이 측정

3.1 전기장 유한요소 해석

직류전위차법을 이용하여 측정된 전위차를 균열 길이로 변환하기 위해서는 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식을 구해야 한다. 본 시험에서는 전기장 유한 요소 해석 방법을 이용하여 관계식을 유도하였다.

먼저 실제 배관 파괴 저항 시험에 사용할 배관에 대한 3차원 유한 요소 해석 모델을 구성하였다. Fig. 8은 60°원주 방향 관통 균열을 포함한 배관의 3차원 유한 요소 모델에서 균열 진전면에 따른 리가먼트 부의 요소 형상이다. Fig. 8과 같이 원주 방향의 전체 60°균열로부터 140°균열까지 균열의 중앙으로부터 5°씩 14 단계의 균열 진전 단계를 설정하였다.

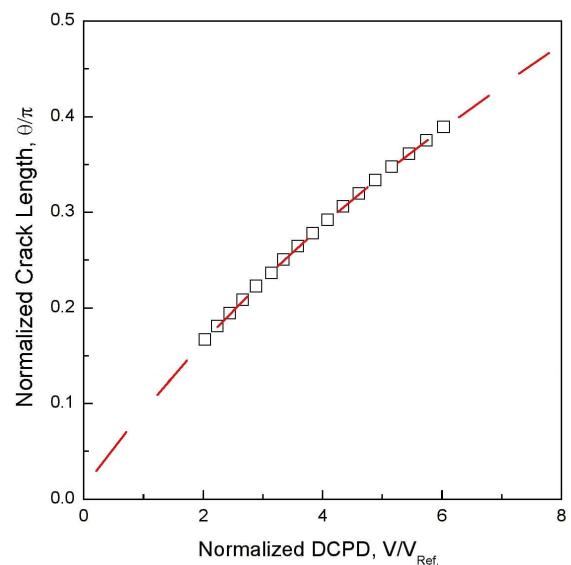


Fig. 9 Calibration curve for normalized crack length with potential drop value

배관에서 실제 균열의 성장은 균열 진전면과 평행하게 진행되는 것이 아니라 타원형으로 성장할 것이므로 이를 유한 요소 해석에 적용하기 위하여 실제 배관의 균열 형상에 적합한 유한요소 모델을 구성하여야 한다. 따라서 Fig. 8과 같이 균열 진전면이 타원형의 형상이 되도록 유한 요소 모델을 구성하였다.

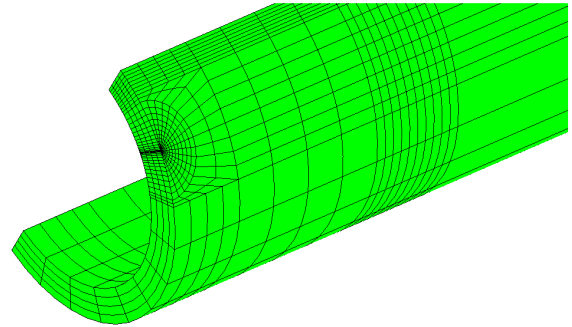


Fig. 11 3D mesh for the pipe specimen

3.2 전위차와 균열길이와의 관계식 결정

직류전위차법을 이용하여 측정된 전위차를 균열 길이로 변환하기 위해서는 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식을 구해야 한다. 본 시험에서는 전기장 유한 요소 해석 방법을 이용하여 관계식을 유도하였다.

전기장 유한 요소 해석 결과를 종합하여 실제 배관 파괴인성 시험 시 균열 길이 측정을 위하여 사용할 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식을 산출하였다. Fig. 9에 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계를 나타내었고 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\theta}{\pi} = 0.0116 + 0.0857 \left( \frac{V_c}{V_{Ref.}} \right) - 0.00501 \left( \frac{V_c}{V_{Ref.}} \right)^2 + 1.93445 \times 10^{-4} \left( \frac{V_c}{V_{Ref.}} \right)^3$$

$\frac{\theta}{\pi}$  : Normalized average crack length

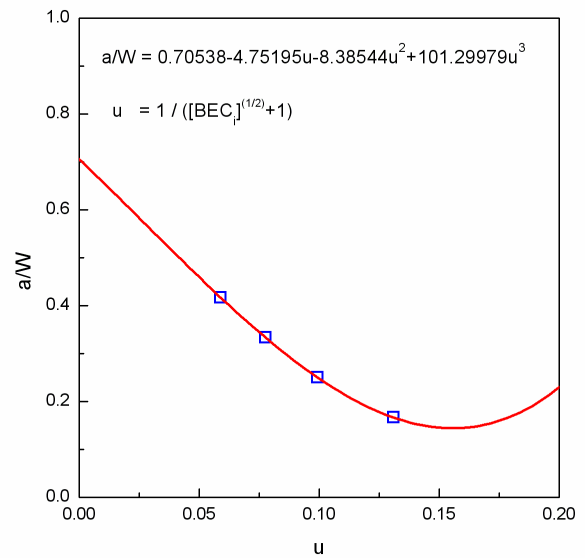


Fig. 12 Calibration curve for normalized crack length with elastic compliance

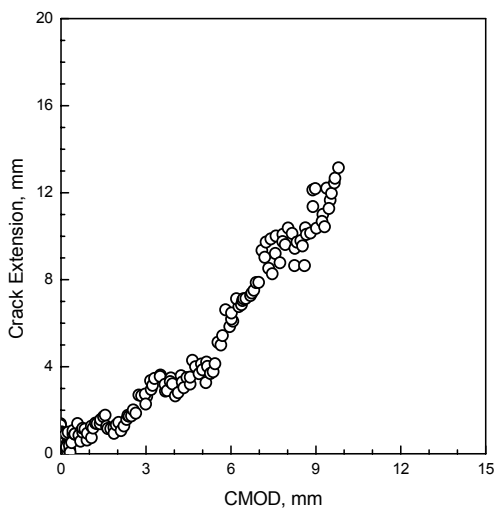


Fig. 11 Crack Extension by DCPD method

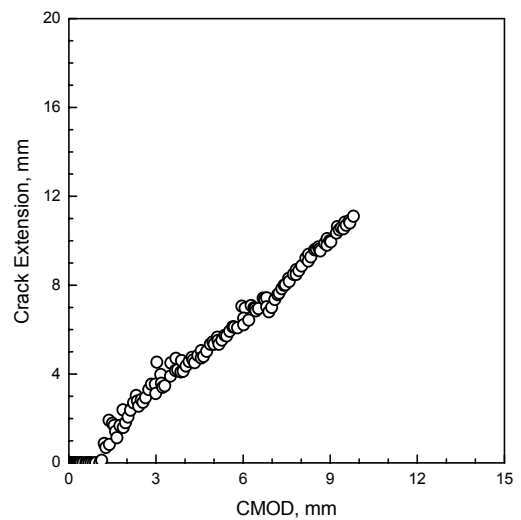


Fig. 13 Crack Extension by Load ratio method

$$\frac{V_c}{V_{Ref.}} : \text{Normalized centerline electric potential}$$

### 3.3 계산 결과

파괴 저항 시험 결과로부터 DCPD법을 이용하여 균열 길이를 계산하였다. 먼저 앞서 산출된 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식을 이용하여 균열 길이를 산출하였다. 산출된 균열 길이를 초기 균열 길이와 비교하여 균열 진전량을 계산하였다. 계산 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

## 4. 하중비법<sup>(5)</sup>을 이용한 균열 길이 측정

### 4.1 유한요소 해석

균열 길이의 계산을 위해 하중비법을 사용하기 위해서는 컴플라이언스와 무차원 균열 길이와의 관계식을 구하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 해석을 이용하여 관계식을 구하였다. 균열 길이 별로 Fig. 11과 같은 모델을 작성하여 유한요소 해석을 수행하였다. 배관 시험편의 대칭성을 고려하여 1/4 모델을 구성하였다.

### 4.2 Compliance와 균열길이와의 관계식 결정

원주 방향 관통 균열의 크기가 60°에서 150°까지 네 가지 모델에 대하여 유한요소 해석을 수행하여 Fig. 12와 같은 무차원 균열 길이와 컴플라이언스와의 관계식을 구하였다.

### 4.3 계산 결과

파괴 저항 시험 결과로부터 하중비법을 이용하여 균열 길이를 계산하였다. 먼저 앞서 산출된 무차원 균열 길이와 컴플라이언스와의 관계식을 이용하여 균열 길이를 산출하였다. 산출된 균열 길이를 초기 균열 길이와 비교하여 균열 진전량을 계산하였다. 계산 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

계산 결과 DCPD법으로 구한 균열 진전량에 비해 균열 길이를 다소 과소평가하는 결과로 나타났다. 또한 기존의 하중비법은 균열이 일직선을 진전하는 경우에 대하여 체계화된 방법이므로 DCPD법과 오차가 나타난 것으로 보인다. 따라서 하중비법의 유용한 적용을 위해서는 다른 조건에서 여러 종류의 배관 시험편에 대한 추가적인 연

구가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 SA312 TP304L stainless 배관에 대한 파괴저항 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 배관 시험편에 대한 파괴 특성을 얻기 위하여 직류 전위차법과 하중비법을 사용하여 배관 시험편의 균열 길이와 진전량을 계산하였다.

2) 직류 전위차법을 이용한 배관 시험편의 균열 길이 측정을 위하여 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계식을 산출하였다.

3) 배관 시험편의 균열 길이 계산에 대한 하중비법의 적용성을 검토하기 위하여 무차원 균열 길이와 컴플라이언스와의 관계식을 산출하였다.

4) 배관 시험편에 하중비법을 적용하기 위해서는 여러 종류의 배관 시험편에 대한 다양한 조건에서의 추가적인 시험이 필요하다.

## 참고문헌

- (1) N. P. O'Dowd and M. T. Kirk, 1993, "A Framework for Quantifying Crack Tip Constraint", Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, pp. 2-20
- (2) J. A. Joyce, E. M. Hackett and C. Roe, 1993, "Effects of Crack Depth and Mode of Loading on the J-R Curve Behavior of a High-Strength Steel", Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, pp. 239-263
- (3) C. S. Seok and S. Y. Kim, 2002, "Effect of specimen configurations on the fracture resistance curve", Nuclear Engineering & Design, Vol. 214, Issue 1-2, pp. 47-56
- (4) ASTM, 1999, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", ASTM Standard E1820-99a
- (5) B. S. Lee and J. H. Hong, 1997, "J-R Characterization of CT Specimens by the Load-Ratio-Method", Proceedings of '1997 KSME Fall Conference, pp. 990-995