

## 직류전위차법을 이용한 배관 균열 길이 측정에 관한 연구

박재실\* · 석창성\*

(2003년 12월 16일 접수, 2004년 3월 15일 심사완료)

### A Study on the Measurement of the Crack Length Using the DCPD Method for the Fracture Test of the Pipe Specimen

Jae-Sil Park and Chang-Sung Seok

**Key Words:** DCPD Method(DCPD법), J-R Curve(J-R 곡선), Finite Element Analysis(유한요소해석), Crack Front Configuration(균열선단형상)

#### Abstract

In order to perform elastic-plastic fracture mechanical analyses, fracture resistance curves for concerned materials are required. The unloading compliance method and the DCPD(Direct Current Potential Drop) method have been widely used for measuring the crack length and the extension for a standard specimen fracture resistance curve test. However it is difficult to apply the unloading compliance method to a real pipe fracture resistance curve test. The objective of this paper is to propose the calibration equation between the normalized crack length and the normalized electric potential, and to apply to pipe fracture experiments. For these, finite element analyses were performed with various current input locations and crack front configurations. Also the 4-point bending jig was manufactured for a pipe test and the DCPD method was used to measure crack extensions and crack lengths for a pipe test. The calculated crack length by the DCPD method agreed with the measured crack length within 5% error.

#### 1. 서론

균열을 포함하고 있는 배관의 안정성을 평가할 때 사용되는 파괴인성치를 구하기 위해서는 배관 재료에 대한 파괴저항 시험을 수행하여야 한다. NUREG 1061, Vol. 3<sup>(1)</sup>에서는 LBB(leak-before-break) 해석을 위해 시편 두께가 배관의 두께보다 크거나 같고 시편의 잔여 길이가 충분히 큰 시편을 이용해서 파괴저항 시험을 수행하도록 하고 있다. 그러나 배관으로부터 큰 시편을 채취하는 것이 어렵기 때문에 1T-CT(compact tension) 표준 시험편에 대한 파괴저항 시험을 통하여 파괴인성치를 구한다. 그러나 기존의 표준 시험편은

실배관의 파괴 거동을 매우 보수적으로 평가하는 것으로 알려져 있으며 표준 시험편을 이용한 LBB 평가 결과도 매우 보수적이다.<sup>(2)</sup> 또한 시험편의 기하학적인 형상 및 가공 방향에 따라서도 변화하는 것으로 알려져 있다.<sup>(3-5)</sup> 따라서 앞서 언급한 바와 같이 배관 건전성 평가법의 타당성을 입증하고, 실배관의 거동을 정확하게 모사하여 추가적인 LBB 안전여유도를 확보하기 위해서는 실배관을 이용한 배관 파괴저항 시험을 수행해야 한다.

파괴저항 시험에 사용되는 표준 시험편의 경우에는 ASTM 등에 표준 시험법이 잘 정리되어 있다. 파괴저항 시험 시 J-R 곡선을 구하기 위해 사용되는 균열 길이 및 균열 진전량의 측정을 위해서 표준 시험편의 경우에는 ASTM E1820<sup>(6)</sup>에 제하 컴플라이언스법과 직류전위차(DCPD)법을 사용하도록 제시되어 있다. 하지만 실 배관을 이용한 파괴저항 시험의 경우에는 제하 컴플라이언스

\* 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : parkjs@skku.edu

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

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

법의 적용이 어렵고 균열 진전 시점 측정과 균열 진전의 연속적인 모니터링이 불가능하다. 또한 배관 실증 시험의 경우에는 표준화된 시험법이 제시되어 있지 않으며 연구 기관에서 자체적으로 장비를 구성하여 시험을 수행하고 있다. 따라서 시험 장비의 형태나 시험 방법 등이 연구자에 따라서 다르게 나타나고 있으며 배관의 크기에 따라서도 시험 설비의 형태가 다르게 구성되고 있다.<sup>(7-13)</sup> 배관 시험 방법으로는 4점 굽힘 시험(4-point bending) 방법,<sup>(7-11,13)</sup> 직접 시험편에 모멘트를 가하는 방법<sup>(12)</sup> 등이 사용되고 있으며, 균열 길이의 측정을 위해서는 직류전위차법,<sup>(7)</sup> 카메라를 이용한 화상 처리 방법<sup>(13)</sup> 등이 이용되고 있다.

본 연구에서는 실험배관 균열부의 거동을 정확하게 탄소성 파괴역학적인 해석에 반영하기 위한 배관 파괴 저항 시험 시 직류전위차법을 이용하여 균열 길이를 산출하기 위한 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 유한 요소 해석을 통하여 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계식을 산출하고 실험 배관에 대한 파괴저항 시험을 수행하여 산출된 관계식의 효용성을 입증하였다.

## 2. 시험 장비 및 시험편

### 2.1 시험 장비 구성

직접 시험편에 모멘트를 가하는 방법의 경우에는 2개의 유압 액추에이터(actuator)를 사용해야 하는 문제점이 있으므로, 본 연구에서는 배관의 파괴저항 곡선을 산출하기 위하여 4점 굽힘 시험 방법을 사용하였다.

시험에 사용된 재료시험기는 25톤 용량의 전기



Fig. 1 Pipe testing system

유압식 만능시험기이며, Fig. 1에 보이는 바와 같이 4점 굽힘 시험을 위하여 별도의 지그를 제작하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 배관 파괴 저항 시험용 실험 장치의 개략도이다.

하중과 하중선 변위의 측정은 시험기의 로드셀과 LVDT를 사용하였고, 3개의 COD 게이지로부터 균열 양 선단부와 중앙부에서의 CMOD(crack mouth opening displacement) 값을 측정하였다. 파괴저항 시험은 변위 제어 방식으로 수행되었으며 시험기의 제어와 신호의 처리는 PC를 통하여 수행되었다.

### 2.2 직류전위차법을 이용한 균열 길이 측정

본 연구에서는 균열 길이 및 진전량의 측정을 위하여 Fig. 2에 보이는 바와 같이 직류전위차법을 사용하였다. 전류 공급부와 전압측정부의 위치를 Fig. 3에 나타내었다. 배관 시험의 경우 양쪽 균열 선단에서의 균열 진전량과 균열 성장 개시 시점이 서로 다르기 때문에 균열의 중앙부에서만 전위차를 측정할 경우에는 정확한 균열 길이 및

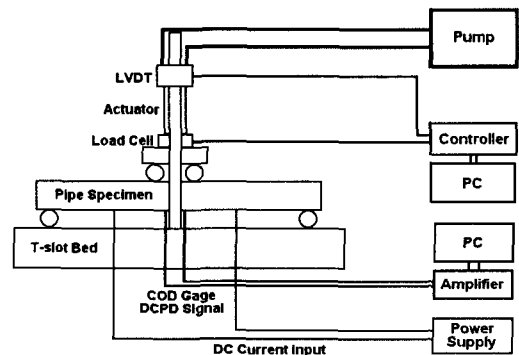


Fig. 2 Schematic diagram of a pipe testing system

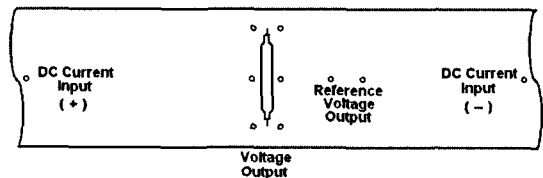


Fig. 3 Configuration of DCPD signal output location

진전량을 측정하기가 어렵다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 균열 선단 양 끝단에서 전위차를 동시에 측정하여 균열 양 끝단에서의 균열 길이 및 진전량을 측정하였다.

직류전위차 시스템은 정전류를 공급하기 위한 50암페어(A) 용량의 직류 전원 공급기(DC power supply)를 사용하였다. 전류의 크기는 측정되는 전압의 크기와 비례하므로 사용 가능한 최대 전류인 50A를 배관 시험편에 공급하였다. 균열이 진전함에 따라 4개의 전압 측정부(균열 양 선단부, 중앙부, 참조부)에서 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.

2.3 시험편 준비

본 연구에서 사용된 시험편은 SM45C 탄소강 배관이며, Table 1에 배관 시험편의 치수 및 피로 예비 균열 길이 등을 나타내었다. Fig. 4에 균열면의 형상과 4점 굽힘 시험 방법에 대하여 개략적으로 나타내었다. 배관 시험편은 먼저 기계적 가공을 통하여 관통 균열을 삽입한 후 원주 방향으로 65°까지 배관 파괴저항 시험을 위한 4점 굽힘 시험용 지그를 사용하여 피로 예비 균열을 가공하였다.

3. 균열 길이 측정을 위한 관계식 결정

3.1 유한요소 모델 및 해석 방법

직류전위차법을 이용하여 측정된 전위차를 균

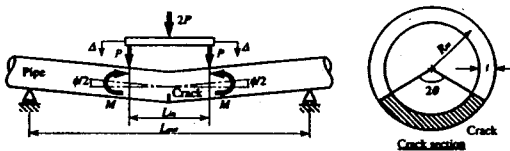


Fig. 4 Schematic diagram of 4-point bending test

열 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. 5는 60°원주 방향 관통 균열을 포함한 배관의 3차원 유한 요소 모델과 균열 진전면을 따른 리가먼트 부의 요소 형상이다. Fig. 5의 리가먼트 부의 균열 형상과 같이 원주 방향의 전체 60°균열로부터 140°균열까지 균열의 양쪽 선단으로부터 전체 5°씩 16 단계의 균열 진전 단계를 설정하였다.

3.2 전류 공급부 위치 결정

실제 구조물이나 배관의 경우 직류전위차법을 이용하여 균열 길이를 측정하기 위해서는 구조물이나 배관의 표면에 전류를 공급하여야 한다. 정전류 공급부 위치에 따라서 측정되는 전위차의 값이 변화하게 되므로 실제 구조물이나 배관 파괴저항 시험 시에 적용할 수 있는 최적의 위치를 찾아야 한다. 따라서 배관 양단 끝으로부터 균열 쪽으로 정전류 공급부의 위치를 변화시켜가며 유

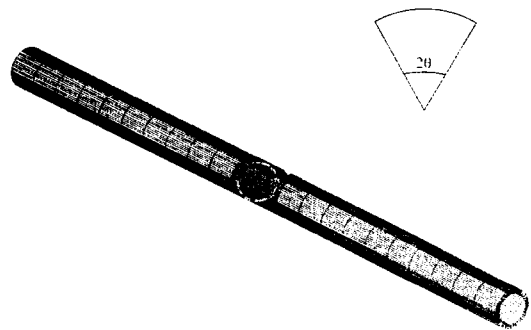


Fig. 5 Three dimensional mesh of pipe and detailed mesh of ligament part,  $2\theta=60^\circ$

Table 1 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, $L_{in}$
SM45C	152.5	11.0	50	65	2800	300

한 요소 해석을 수행하였다.

Fig. 6에는 전류 입력 위치에 따라 측정된 전압의 변화에 대한 해석 결과를 나타내었다. 전압 측정 위치를 고려하여 균열면과 균열면에서 10mm 떨어진 지점에서의 전압값의 변화를 살펴보았다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 배관 양 끝단에서 균열 방향으로 전류 공급부의 위치를 816mm 이

상 변화시켰을 경우, 즉 전류 공급부와 참조 전위차를 측정하는 위치가 가까워짐에 따라 무차원 전위차의 변화가 심하게 나타났다. 또한 Fig. 7에서 보는 바와 같이 전류 입력 위치에 따른 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계에서도 816mm 이상에서는 배관 양 끝단에서의 결과와 급격한 차이를 나타내었다. 따라서 전류 공급부의 위치를 배관 양 끝단으로부터 816mm로 정하였다.

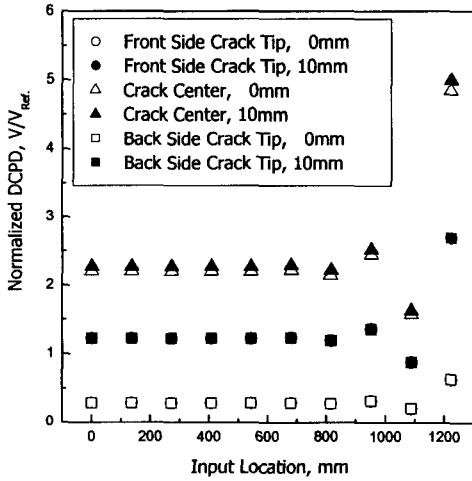


Fig. 6 Normalized electric potential with various current input location

3.3 균열 진전면 형상에 대한 고려

시험에 사용된 배관에 원주 방향 관통 균열의 가공하기 위해 4점 굽힘 방법을 사용하였다. 따라

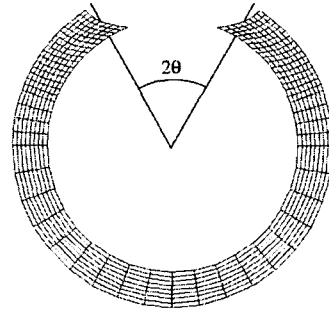


Fig. 8 Detailed mesh of ligament part with elliptical crack front,  $2\theta=60^\circ$

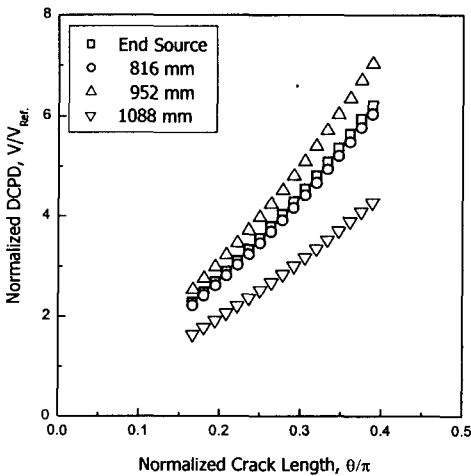


Fig. 7 Normalized electric potential versus normalized crack length with various current input location

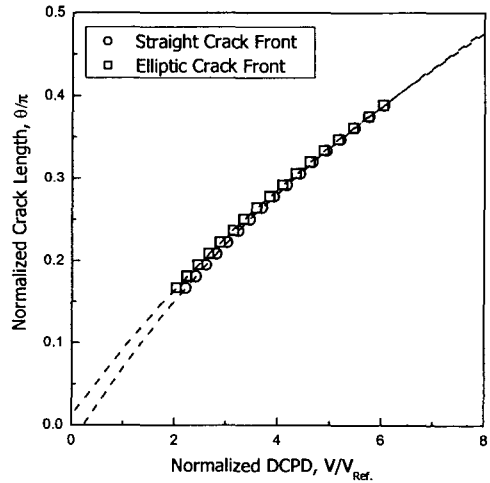


Fig. 9 Calibration curve for normalized crack length with two crack front geometries

서 배관의 바깥쪽부터 균열이 성장하게 되므로, 배관의 원주 방향과 평행하게 성장하는 것이 아니라 타원형의 진전면을 따라 성장하게 된다. 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.

해석 결과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 균열면의 형상이 타원형인 경우 같은 무차원 균열 길이에 대하여 작은 무차원 전위차 값을 갖는 것으로 나타났다. 균열이 진전할수록 균열 진전면의 형상이 직선과 가까워지므로 균열 진전면을 직선으로 가정한 결과와 비슷하게 나타났다.

3.4 재료물성치에 대한 고려

재료의 저항은 재료의 전기 비저항 값에 따라 다르게 나타난다. 따라서 재료에 관계없는 관계식을 얻기 위하여 재료물성치의 변화에 따른 전위차 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 재료인 SM45C 탄소강과 비저항 값이 다른 스테인리스강인 SA312 TP304L 재료의 물성치를 선택하여 그 결과를 비교하였다.

해석 결과 산출된 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 재료의 저항값에 따라 변화하는 전위차를 기준 전압으로 무차원화 하였으므로 재료의 물성치와 관계

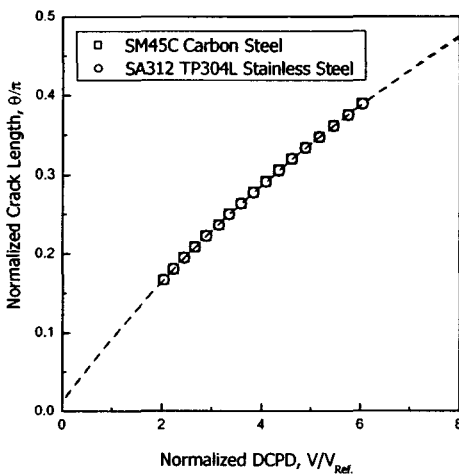


Fig. 10 Calibration curve of normalized crack length with two materials

없이 두 재료의 결과가 동일하게 계산되었다.

3.5 균열 길이 관계식

전기장 유한 요소 해석 결과를 종합하여 실제 배관 파괴저항 시험 시 균열 길이 측정을 위하여 사용할 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식을 산출하였다.

앞의 해석 결과 정해진 전류 공급부의 위치와 타원형 균열 선단면의 형상에 대한 전기장 유한 요소 해석을 수행하여 균열 중심선에서 측정된 전위차를 기준으로 무차원 전위차와 무차원 균열 길이에 대하여 다음의 (1)식과 같은 관계를 산출하였다.

$$\frac{\theta}{\pi} = 0.0116 + 0.0857 \left( \frac{V_c}{V_{Ref}} \right) - 0.00501 \left( \frac{V_c}{V_{Ref}} \right)^2 + 1.93445 \times 10^{-4} \left( \frac{V_c}{V_{Ref}} \right)^3 \quad (1)$$

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

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

4. 배관 파괴 저항 시험

4.1 파괴 저항 시험

산출된 무차원 균열 길이와 무차원 전위차 관

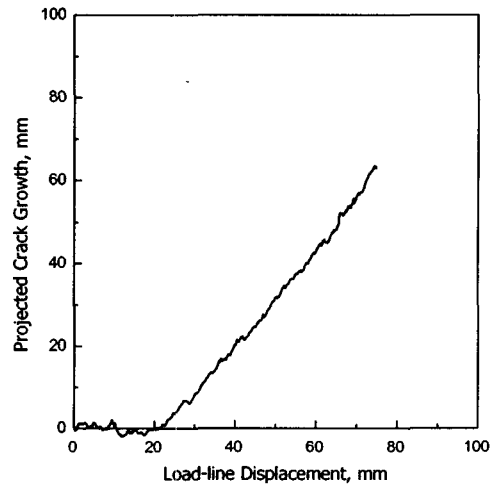


Fig. 11 Average projected crack growth versus load-line displacement

계식을 검증하기 위하여 실패관 시험편에 대한 파괴 저항 시험을 수행하였다.

균열 진전량의 산출을 위해 먼저 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계식으로부터 균열 진전면에 투영시킨 원주 방향 전체 균열 길이를 산출한 후에 Fig. 11에 나타난 바와 같이 초기 균열 길이로부터 원주 방향 전체 균열 진전량을 계산하였다. 계산된 균열 진전량과 하중-하중선 변위 선도로부터 계산된 J-적분값을 바탕으로 Fig. 12와 같이 실패관에 대한 파괴저항 곡선을 산출하였다.

4.2 시험 결과 고찰

Fig. 13에 배관 파괴저항 시험 후의 배관 시험편 형상을 나타내었다. ①로 표시된 부분은 피로

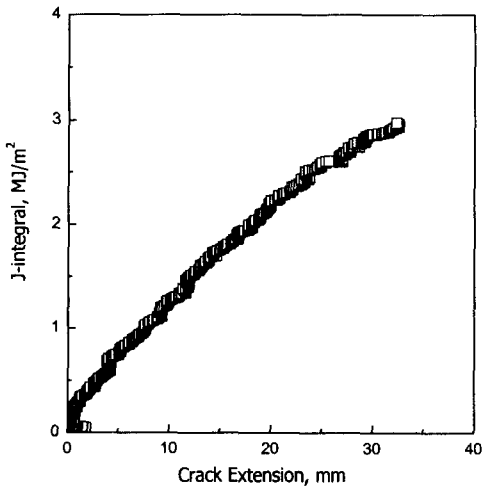


Fig. 12 J-R curve for pipe fracture test

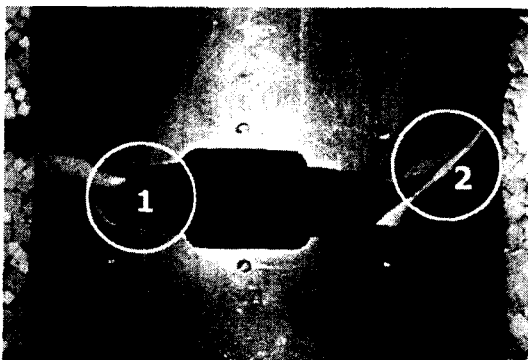


Fig. 13 Fracture appearance of pipe specimen

예비 균열에 해당하며 ②로 표시된 부분은 파괴 저항 시험 중에 진전한 균열에 해당된다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 실제 배관 파괴저항 시험 시 균열은 원주 방향 관통 균열의 양 끝 단에서 양쪽으로 진행하므로 균열의 중심에서 측정된 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식으로부터 산출된 균열 진전량은 양쪽 선단의 평균적인 균열 진전량이 된다.

실제 배관에서의 균열 진전은 원주 방향으로 직선적으로 진전하는 것이 아니라 Fig. 13에서 보는 바와 같이 배관 길이 방향으로 동시에 진전하게 된다. 또한 Fig. 14에서 보는 바와 같이 각각의 전위차 측정 위치에서 계산된 무차원 전위차 결과를 비교해 보면 양쪽 선단에서의 균열 진전 이 서로 다르게 나타남을 알 수 있다.

따라서 산출된 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계식의 적용성을 검증하기 위해서는 배관 균열의 양쪽 선단에서 산출된 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계식을 사용하여야 하며 이로부터 산출된 균열 길이와 실제로 측정된 균열 길이를 비교해 보아야 한다.

이를 위하여 전기장 유한 요소 해석 결과로부터 균열 양쪽 선단에서의 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계를 Fig. 15와 같이 구하였으며 그 관계식을 식 (2)와 같이 구하였다.

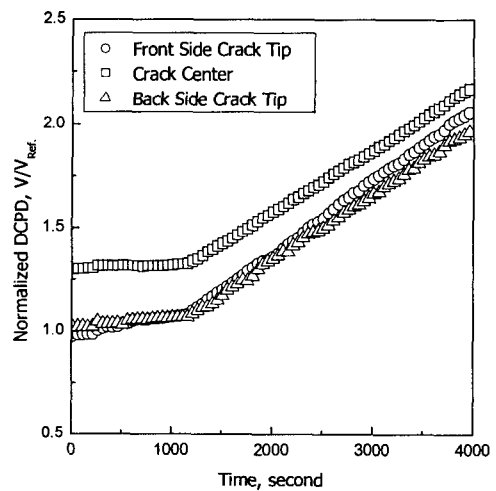


Fig. 14 Normalized electric potential with various measured locations

$$\frac{\theta}{\pi} = 0.09866 + 0.08309 \left( \frac{V_c}{V_{Ref.}} \right) - 0.0098 \left( \frac{V_c}{V_{Ref.}} \right)^2 + 8.3258 \times 10^{-4} \left( \frac{V_c}{V_{Ref.}} \right)^3 \quad (2)$$

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

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

구해진 계산식을 이용하여 균열 양쪽 선단으로부터 산출된 균열 길이를 Table 2에 나타내었다. 초기 균열 길이는 비교적 5% 정도의 오차 범위로 잘 맞으나 최종 균열 길이와 균열 진전량의 경우에는 많은 차이를 나타내었다. 균열 길이의 측정을 위해 DCPD법을 사용하는 경우, 리가먼트 부의 단면적에 의해 무차원 전위차 값이 결정되

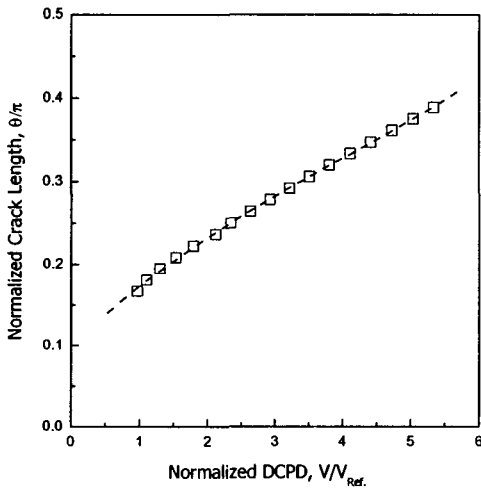


Fig. 15 Calibration curve of normalized crack length at initial crack front,  $\Theta=30^\circ$

게 된다. 그러므로 균열이 원주 방향과 평행하게 진전하지 않을 경우 오차가 발생되게 된다.

따라서 Fig. 13에 보이는 바와 같은 균열 진전 방향을 고려하여 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계식으로부터 계산된 균열 길이를 보정한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이 초기 균열 길이, 최종 균열 길이, 균열 진전량 모두에서 수정된 계산 값이 실제 배관 원주에서 측정된 값과 5% 이내의 오차로 비교적 정확하게 일치하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 실패관 시험편에 대한 파괴 저항 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 배관에 대한 파괴 저항 시험을 위하여 4점 굽힘 시험용 jig를 제작하였고 DCPD법을 이용한 배관 균열 길이 측정 시스템을 구성하였다.

(2) 실제 배관에서의 균열 길이 측정을 위하여 유한 요소 해석을 통하여 전류 공급부의 위치를 결정하였으며, 타원형 균열 진전면 형상을 고려한 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식을 유한 요소 해석을 통해 제시하였다.

(3) 배관 파괴 저항 시험을 수행하여 배관에 대한 J-R 선도를 구하였으며 산출된 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식의 효용성을 입증하였다.

(4) 실제 배관에서의 균열 진전은 원주 방향과 평행하지 않으므로 이에 대한 보정이 필요하며, 균열 진전 방향을 고려하여 계산된 균열 진전량을 보정한 결과 균열 길이 및 균열 진전량 모두 실제 시험 결과와 5% 정도의 오차로 잘 일치하였다.

Table 2 Comparison of test result and calculation result

	Initial Crack Length, (mm)		Final Crack Length, (mm)		Crack Extension, (mm)	
	Front Side	Back Side	Front Side	Back Side	Front Side	Back Side
Directly Measured Result	66.0	65.5	106.0	114.5	40.0	49.0
Result from Calibration Equation	63.8	62.6	93.9	96.9	30.1	34.3
Modified Result	63.8	62.6	106.4	111.1	42.6	48.5

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터 및 두뇌한국 21 사업의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) U. S. NRC Piping Review Commission, 1983, "Evaluation of Potential for Pipe Break," Report of the U. S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, NUREG-1061, Vol. 3.
- (2) Joyce, J. A., Hackett, E. M. and Roe, C., 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) Hong, J. H., Lee, B. S. and Oh, J. M., 1993, "Fracture Resistance (J-R) Characteristics of the Primary Piping materials for Yonggwang 3/4 Nuclear Power Plants," *Proceedings of 1st KINS Workshop on the Integrity of Piping*, pp. 41~52.
- (4) Seok, C. S. and Kang, B. G., 1999, "Evaluation of Fracture Resistance Characteristics of SA508 Cl.1a Carbon Steel for Piping System," *Transactions of the KSME A*, Vol. 23, No. 7, pp. 1147~1154.
- (5) Park, J. S. and Seok, C. S., 2001, "A Study on the Characteristic of Fracture Toughness in the Multi-Pass Welding Zone for Nuclear Piping," *Transactions of the KSME A*, Vol. 25, No. 3, pp. 381~389.
- (6) ASTM International, 2001, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," E1820-01.
- (7) Rudland, D. L., Scott, P. M. and Wilkowski, G. M., 1996, "The Effect of Cyclic and Dynamic Loads on Carbon Steel Pipe," NUREG/CR-6438.
- (8) Wilkowski, G. M., Ahmad, J., Barnes, C. R., Broek, D., Kramer, G., Landow, M., Marschall, C. W., Maxey, W., Nakagaki, M., Scott, P., Papaspyropoulos, V., Pasupathi, V. and Popelar, C., 1984, "Degraded Piping Program Phase-II," NUREG/CR-4082, Vol. 1-Vol. 8.
- (9) Wilkowski, G. M., Ahmad, J., Brust, F., Ghadiali, N., Krishnaswamy, P., Landow, M., Marschall, C. W., Scott, P. and Vieth, P., 1994, "Short Cracks in Piping and Piping Welds," NUREG/CR-4599, Vol. 1-Vol. 4.
- (10) Scott, P., Wilson, M., Olson, R., Marschall, C., Schmidt, R. and Wilkowski, G. M., 1991, "International Piping Integrity Research Group Program - Final Report," NUREG/CR-6233, Vol. 1-Vol. 4.
- (11) Hopper, A., Wilkowski, G. M., Scott, P., Olson, R., Rudland, D., Kilinski, T., Mohan, R., Ghadiali, N. and Paul, D., 1996, "The Secondary International Piping Integrity Research Group Program - Final Report," NUREG/CR-6452.
- (12) Stadtmuller, W. and Sturm, D., 1997, "Leak-Before-Break Behavior of Austenitic and Ferritic Pipes Containing Circumferential Defects," *Nuclear Engineering & Design*, Vol. 174, Issue 3, pp. 335~342.
- (13) J. Chattopadhyay, B. K. Dutta and H. S. Kushwaha, 2000, "Experimental and Analytical Study of Three Point Bend Specimen and Throughwall Circumferentially Cracked Straight Pipe," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 77, Issue 8, pp. 455~471.