

# 반타원 표면균열 형상측정을 위한 유한요소 전기장 해석에 기초한 직류전위차법의 개발

심도준\* · 최재봉\* · 김영진\*

(2001년 1월 30일 접수, 2001년 5월 14일 심사완료)

## Development of the DCPD Method Based on Finite Element Analysis for Measuring Semi-Elliptical Surface Cracks

Do-Jun Shim, Jae-Boong Choi and Young-Jin Kim

**Key Words:** DCPD Method(직류전위차법), Finite Element Analysis(유한요소해석), Surface Crack(표면균열), Crack Configuration Measurement(균열형상측정)

### Abstract

One of major problems in analyzing failure mechanism of real components is the accurate measurement of crack size and shape. The DCPD(Direct Current Potential Drop) method has been widely used for the crack measurement of a structure and finite element analysis has been used for the derivation of calibration equations, which relates the potential drop with the crack depth. In this paper, finite element analyses were performed for semi-elliptical surface cracks with various crack shapes( $a/c$ ) and crack depths( $a/t$ ). As a result, a calibration equation has been derived for the measurement of a semi-elliptical surface crack in wide plates. Analytical results are compared with experimental results to evaluate the validity and the applicability of the derived equation. The proposed method is expected to provide efficient and accurate measurement of a surface crack during crack growth.

### 1. 서론

산업의 발달과 더불어 공공 구조물이나 산업설비가 대형화, 고성능화 되면서 안전사고로 인한 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 인명 손실을 초래할 가능성이 높아지고 있다. 이러한 안전사고를 방지하기 위해서는 구조물의 수명평가와 건진성평가가 필요하며, 이때 구조물 내에 존재하는 균열의 크기와 형상을 파악하여 파괴역학적인 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 균열검출을 위해 주로 사용되고 있는 비파괴검사방법으로는 육안검사법, 방사선투과법, 초음파법 등이 있다. 방

사선투과법과 초음파법은 균열의 크기와 형상을 정량적으로 검출할 수 있는 방법이나 측정장비의 구성에 많은 비용이 소요되고 장비의 구성도 매우 복잡하다. 또한, 측정방법의 단일성으로 인해 상시계측을 위해 활용하기 어려운 단점이 있다.

균열형상을 측정할 수 있는 또 다른 방법으로 저항변화를 이용하는 직류전위차(Direct Current Potential Drop; DCPD)법이 있다. DCPD법은 측정방법이 간단하고 시편에 단자를 고정하기 때문에 원거리에서도 균열을 상시 감시할 수 있으며, ASTM-E647<sup>(1)</sup>에서는 CT시편과 MT시편의 균열형상 측정법으로 DCPD법을 제시하고 있다. 하지만 실제 구조물에 존재하는 균열은 대부분 표면균열이므로 DCPD법을 적용하기 위해서는 다채널(multi-channel)을 사용해야 한다. 저자들은 이와 같은 방법을 적용한 다채널 DCPD 시스템<sup>(2)</sup>을 개발한 바 있다.

DCPD법을 통해 측정된 전압값을 이용하여 실

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

제 균열깊이를 계산하기 위해서는 보정식이 필요하다. Enmark 등<sup>(3)</sup>은 실험을 통해 표면균열에 대한 보정식을 제시하였으나 전압측정단자의 위치에 따른 영향을 고려하지 못했다. 또한, Ikeda 등<sup>(4)</sup>은 수학적 방법을 통해 보정식을 제시한 바 있으나, 이 보정식에는 많은 가정이 내포되어 있어 적용범위가 한정되어 있다. 한편, Saka 등<sup>(5)</sup>은 유한요소 전기장 해석을 통해 전압입력단자와 전압 측정단자 사이가 좁고 민감도가 높은 DCPD 시스템을 구현하였으나, 일반적인 경우에 대한 보정식을 제시하지 못했다.

본 논문에서는 다양한 균열형상비( $a/c$ )와 균열 깊이비( $a/t$ )에 대하여 유한요소 전기장 해석을 수행하여 평판에 존재하는 반타원 표면균열에 대한 보정식을 제시하였다. 또한, 다채널 DCPD 시스템을 이용한 실험을 통해 제시된 보정식의 유용성을 검증하였다.

## 2. 반타원 표면균열 형상측정을 위한 보정식

### 2.1 DCPD법을 이용한 표면균열 형상측정

DCPD법은 균열에 의해 발생하는 전기저항의 변화를 이용하여 균열의 길이를 측정하는 방법으로서, CT시편 또는 MT시편과 같이 균열이 길이 방향으로만 성장하는 경우에는 단채널만 이용하여도 균열길이 측정이 가능하다.<sup>(1)</sup> 표면균열의 경우에는 균열이 길이방향뿐만 아니라 깊이방향으로도 성장하기 때문에, 그 형상을 측정하기 위해서는 다채널을 사용해야 한다. 일반적으로 DCPD

법을 이용하여 표면균열의 형상을 측정하기 위해서는 시편 또는 구조물의 표면에 균열깊이를 따라 일정간격으로 전압측정단자를 설치하고 각 위치에서의 전압값을 측정하는 방법이 사용되고 있다.

피로하중에 의해 표면균열이 성장하는 경우 균열깊이비( $a/t$ )와 균열형상비( $a/c$ )가 동시에 변화하며 성장한다.<sup>(6)</sup> 따라서 DCPD법을 이용하여 표면균열의 형상을 측정하기 위해서는  $a/t$ 와  $a/c$ 의 변화를 동시에 고려할 수 있는 보정식이 필요하다. 본 논문에서는 이와 같은 보정식을 제시하기 위해 유한요소 전기장 해석을 수행하였다. 먼저  $a/c$  값을 일정하게 고정시키고 다양한  $a/t$ 에 대한 해석을 수행하여 깊이 변화에 따른 각 위치에서의 전압값의 변화를 분석하였다. 이와 같은 방법으로 다양한 균열형상비에 대하여 동일한 방식으로 해석을 수행하였으며, 이를 통해 특정범위 내의  $a/t$ 와  $a/c$ 에 적용 가능한 보정식을 제시하였다.

### 2.2 유한요소모델 및 해석 방법

유한요소 전기장 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(7)</sup>를 사용하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 유한요소모델로서 정확한 전기장 해석을 위하여 3차원 모델을 이용하였으며, 모델의 치수는 Fig. 1에 도시한 바와 같다. 해석모델은 20절점 3차원 전기요소를 사용하여 구성하였으며, 전기전도율(electrical conductivity)은 일반 강철재료에 대한 값인  $2.0 \times 10^3 (1/(\Omega mm))$ 을 사용하였다.

본 논문에서는 4가지 균열형상비( $a/c = 1/1, 1/2, 1/3, 1/4$ )에 대하여 유한요소 전기장 해석을 수행

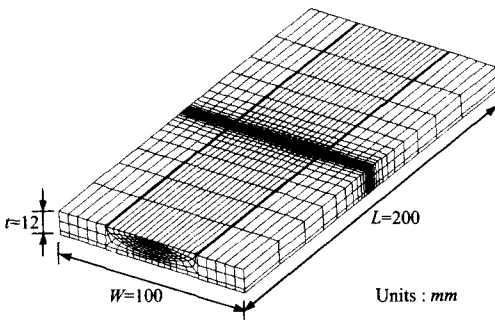


Fig. 1 A three dimensional mesh for finite element analysis

Table 1 Crack shapes and sizes for finite element analyses

Case	$a/c$	$a$ (mm)	$c$ (mm)	Case	$a/c$	$a$ (mm)	$c$ (mm)
A0	1/1	0	0	C0	1/3	0	0
A1		2	2	C1		2	6
A2		4	4	C2		4	12
A3		6	6	C3		6	18
A4		8	8	C4		8	24
B0	1/2	0	0	D0	1/4	0	0
B1		2	4	D1		2	8
B2		4	8	D2		4	16
B3		6	12	D3		6	24
B4		8	16	D4		8	32

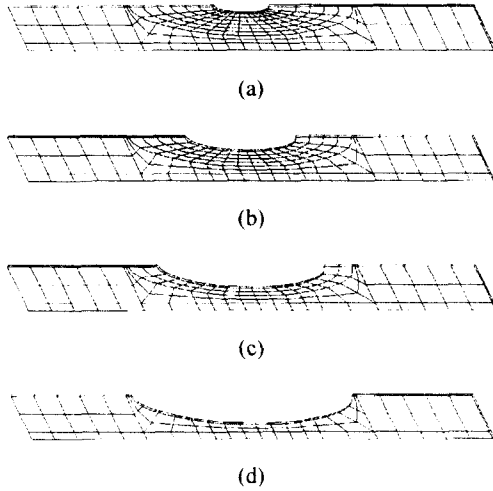


Fig. 2 Finite element mesh of crack layer for (a) Case C1 (b) Case C2 (c) Case C3 (d) Case C4

하였으며, 각 균열형상비마다 4가지 균열깊이비 ( $a/l = 1/6, 1/3, 1/2, 2/3$ )를 고려하여 해석을 수행하였다. 본 논문에서 수행한 균열형상비 및 균열깊이에 대한 세부적인 치수는 Table 1에 정리하였다. 절점의 위치에 따라 균열과 무관하게 발생하는 전압값( $V_0$ )을 측정하기 위해 각 균열형상비에 대해 균열이 없는 경우에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 2는 균열형상비가 1/3인 경우에 대한 유한요소 모델의 균열면을 나타낸 것으로서, 4가지 균열깊이에 대한 형상을 나타내고 있다. 이는 각각 Fig. 1에 도시한 전체 모델의 중앙부에 위치한 요소층(element layer)으로서 그 두께는 0.5 mm이다. 본 논문에서는 전기장 해석을 위해 균열면을 얇은 요소층으로 모델링한 다음 요소를 제거함으로써 균열부를 모델링하였다. 해석모델에 정전류(constant current)에 의한 전기장을 형성하기 위하여 Fig. 1과 같이 모델 양끝단면 중앙에 위치한 절점(node)에 각 8 A와 0 A를 입력하였다. 또한, 균열에 의해 발생하는 전압값의 차이( $V$ )를 측정하기 위해 균열면으로부터 상하 5 mm 떨어진 곳에 위치한 절점에서 각각의 전압값의 차이를 측정하였다. 전압측정단자의 위치가 균열면에 가까울수록 전압차가 크게 발생하여 민감도가 높아지지만,<sup>(5)</sup> 본 논문에서는 실험시편의 구성을 고려하여 5 mm로 설치하였다. 균열의 대칭성을 고려하여 전압값은 균열의 중심으로부터 한쪽 방향

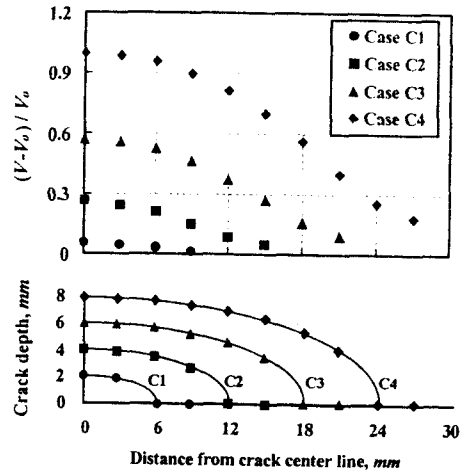


Fig. 3 Normalized potential drop versus distance from crack center line for four different crack depths,  $a/c=1/3$

으로 균열길이를 벗어나는 절점까지 일정간격을 두고 측정하였고, 그 간격은 균열형상에 비례하도록 설정하였다. 측정된 전압값( $V$ )을 무차원화하기 위하여 균열이 없는 경우 동일한 위치에서 측정된 전압값( $V_0$ )을 이용하여 다음과 같이 무차원화하였다.

$$\text{Normalized potential drop} = \frac{V - V_0}{V_0} \quad (1)$$

이와 같이 측정된 전압값을 무차원화함으로써 시편의 재질이나 두께에 따른 영향을 보정하였으며,<sup>(3)</sup> 또한 실제 실험에 적용하였을 경우에도 시편의 온도변화에 따른 전압값의 변화를 이를 통해 보정하였다.

### 2.3 해석결과 및 보정식

Fig. 3은 균열형상비가 1/3인 경우에 대한 유한요소 전기장 해석결과를 실제 유한요소 모델에서의 깊이와 함께 도시한 것으로서, 4가지 균열깊이비( $a/l = 1/6, 1/3, 1/2, 2/3$ )에 대하여 균열중심으로부터 일정 간격(3 mm)으로 측정된 전압값을 식 (1)을 이용하여 무차원화한 결과이다. 동일한 균열로부터 측정된 전압값은 측정절점에서의 균열깊이가 증가함에 따라 증가하였다. 이를 통해 해석으로부터 얻은 전압값이 측정절점에서의 균열

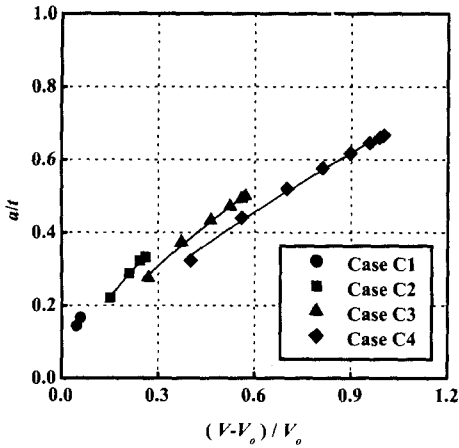


Fig. 4 Normalized crack depth versus normalized potential drop,  $a/c=1/3$

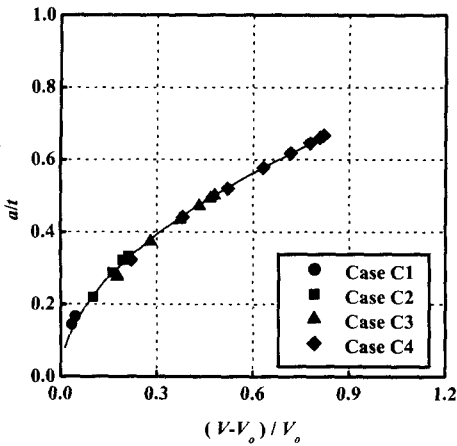


Fig. 5 Normalized crack depth versus normalized potential drop,  $a/c=1/3$

깊이 변화를 잘 나타내고 있다는 것을 확인하였다. 동일한 측정절점에서 측정한 전압값 또한 균열깊이비가 증가함에 따라 증가하였다. 그러나 모든 경우에 대한 전압값을 비교해보면 동일한 균열깊이에 대해서도 다른 전압값을 나타내고 있는 경우도 있다. 예를 들어, 각 균열길이의 끝점과 균열길이를 벗어나는 절점, 즉, 균열깊이가 동일하게 0인 절점에서 측정한 전압값은 일정한 값을 나타내지 않았으며 균열깊이비가 증가할수록 증가하였다. Fig. 4는 이와 같은 영향을 분석하기 위해 균열깊이가 0인 절점에서의 데이터를 제외

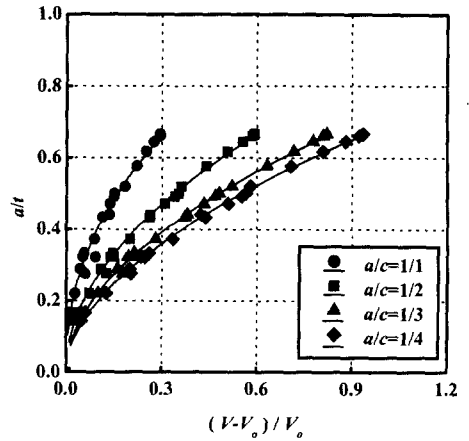


Fig. 6 Normalized crack depth versus normalized potential drop for four different crack shapes

한 나머지 데이터를 이용하여 측정절점 위치에서의 균열깊이비를 전압값에 대하여 나타낸 것이다. 각각의 균열깊이비에 대한 해석결과는 동일한 경향을 나타내었으나 균열깊이비가 증가함에 따라 데이터가 수평 이동되는 경향을 나타내었다. 이는 균열면의 면적의 영향으로 판단된다. 즉, 균열면의 면적이 넓을수록 균열이 위치한 단면에서의 전체적인 저항이 증가하며 이로 인해 전압값도 전체적으로 증가하는 것으로 판단된다. 이와 같은 영향을 보정하기 위해 Fig. 3의 전압값 중 균열길이를 벗어나는 절점, 즉, 균열깊이에 대한 영향은 없지만 균열면의 면적에 의한 영향이 나타나는 절점에서의 전압값을 각 경우에 대한 기준전압값( $0 V$ )으로 설정하였고 나머지 전압값은 이에 대한 상대값으로 나타내었다. Fig. 5는 균열깊이비를 보정한 전압값에 대하여 나타내고 이를 다음과 같은 식을 이용하여 곡선적합한 것이다.

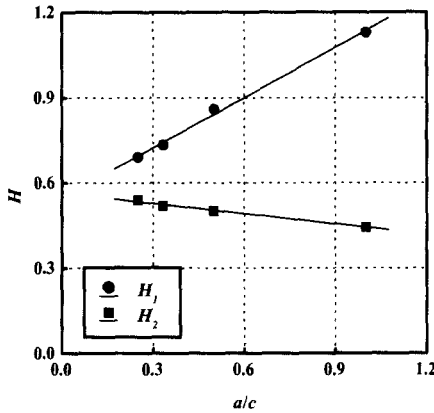
$$\frac{a}{t} = A_1 \left( \frac{V - V_0}{V_0} \right)^{A_2} \quad (2)$$

이와 같은 방법으로 얻어진 다항식은 균열면의 면적과 무관하게 균열형상비가 1/3인 표면균열에 대한 보정식으로 사용될 수 있다.

Fig. 6은 해석에서 고려한 4가지 균열형상비에 대한 해석결과를 각각 식 (2)를 이용하여 곡선적

**Table 2** Calibration equations for four different crack shapes

$a/c$	$A_1$	$A_2$
1/1	1.1297	0.4441
1/2	0.8604	0.5013
1/3	0.7327	0.5182
1/4	0.6895	0.5391



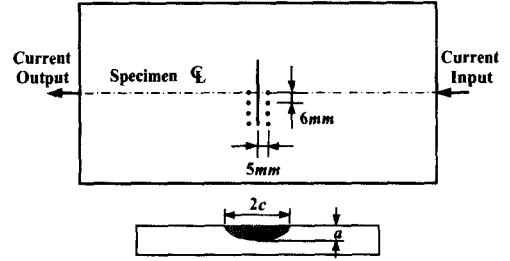
**Fig. 7** Coefficients for calibration equation in terms of polynomial fit

합한 보정식을 나타낸 것이며 이를 Table 2에 정리하였다. Fig. 6에서 제시한 보정식은 매우 제한적인 균열형상비( $a/c = 1/1, 1/2, 1/3, 1/4$ )에 대해서만 적용이 가능하다. 그러나, 실제 시편이나 구조물에 존재하는 표면균열의 형상비는 균열이 성장함에 따라 그 값이 변화하므로 임의의 순간에서 균열형상비를 결정하기는 불가능하다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 Table 2에 제시된 4개의 보정식의 각 계수( $A_1, A_2$ )를 균열형상비에 대하여 선형적합(linear fitting)하였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 결과로부터 표면균열에 대한 보정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{a}{t} = H_1 \left( \frac{V - V_o}{V_o} \right)^{H_2} \quad (3)$$

$$H_1 = 0.5886 \left( \frac{a}{c} \right) + 0.5465 \quad (4)$$

$$H_2 = -0.1206 \left( \frac{a}{c} \right) + 0.5635$$



**Fig. 8** A schematic diagram of the surface crack specimen and probe locations

식 (3)과 식 (4)를 이용하여 시편이나 실제 구조물에 존재하는 표면균열의 형상을 측정하기 위해서는 먼저 균열의 길이( $2c$ )를 측정된 후, 균열 길이를 따라 전압측정 단자(probe)를 설치하고 전압값을 측정한다. 그 중 가장 큰 전압값을 나타내는 위치가 균열의 중심이므로 그 전압값을 무차원화하여 식 (3)에 대입하고 균열의 길이( $c$ )와 시편의 두께( $t$ )를 대입하면 식 (3)은 균열깊이( $a$ )에 대한 방정식이 된다. 여기서 계산되는 균열깊이를 최심점에서의 균열깊이( $a_{max}$ )로 설정하면 균열형상비는  $a_{max}/c$ 이다. 이와 같이 계산된 균열형상비를 다시 식 (4)에 대입하면 보정식의 계수( $H_1, H_2$ )를 계산할 수 있으며, 이 값들을 식 (3)에 대입하고 각각의 전압측정 단자에서의 무차원화된 전압값을 입력하면 각 위치에서의 균열깊이( $a$ )를 계산할 수 있다.

앞서 서술한 바와 같이 전압측정단자의 위치에 따라 전압값의 민감도는 크게 변화하기 때문에 본 논문에서 제안한 보정식은 전압측정단자를 균열면으로부터 상하 5 mm 떨어진 위치에 설치할 경우에 대해서만 적용이 가능하다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장비 및 실험방법

유한요소 전기장 해석을 통해 제시한 보정식의 타당성과 유용성을 검증하기 위해 평판에 존재하는 표면균열에 대한 실험을 수행하였다. 시편의 형상은 해석에서 사용되었던 형상과 동일하게 제작하였으며, 재질은 SM45C를 사용하였다. Fig. 8과 같이 시편중앙에 깊이( $a$ ) 6 mm, 길이( $2c$ ) 36 mm, 폭 0.8 mm인 노치(notch)를 전기방전가공(Electric- Discharge Machining; EDM)을 이용하여

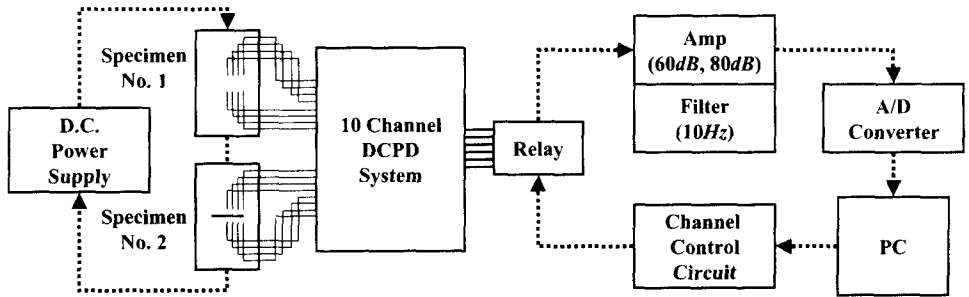


Fig. 9 A schematic diagram of the system for measurement of electrical potential drops

삽입하였다. 한편, 시편의 양끝단에 정전류를 공급하기 위해 전류공급단자를 아르곤 용접(argon welding)을 이용하여 부착하였다. 또한, 균열면과 전압측정단자간의 간격은 해석과 동일하게 5 mm로 설정하였으며, 각 단자간의 거리는 6 mm로 설정하였다. 전류공급단자와 전압측정단자는 시편과 동일한 재질을 사용하였으며 직경은 1.5 mm로 제작하였다. 한편, 균열이 없는 경우에 대한 각 측정단자의 기준전압( $V_0$ )을 측정하기 위하여 균열이 없는 시편도 동일한 방법으로 제작하였다.

EDM 노치를 반타원 표면균열로 성장시키기 위해 25 ton 용량의 전기유압식 만능시험기를 사용하여 시편에 3점 굽힘 피로하중을 가하였다. 하중을 가하는 동안 시편 표면에서 균열길이 성장하는 것을 관찰하였다.

전압값을 측정하기 위해서 저자들이 개발한 다채널 DCPD 시스템<sup>(2)</sup>을 사용하였으며, Fig. 9는 전체적인 시스템의 구성도이다. 균열이 없는 시편(Specimen No. 1)과 균열이 있는 시편(Specimen No. 2)을 직렬로 연결하고 8 A의 정전류를 공급하였으며, 다채널 DCPD 시스템을 이용하여 각 시편마다 4개의 채널을 설치하여 전압값을 측정하였다. 상하 피로균열면의 접촉에 의해 발생하는 전류의 흐름을 방지하기 위해 최대 피로하중을 시편에 가한 상태에서 전압값을 측정하였다.

전압값을 측정한 다음 피로균열에 의한 균열성장률 표시하기 위해 시편을 고온노에 넣고 350°C에서 약 1시간 동안 가열하였다. 시편의 파단면을 관찰하고 실제 균열의 형상을 측정하기 위해 시편에 3점 굽힘 피로하중을 가하여 시편을 파단시켰다.

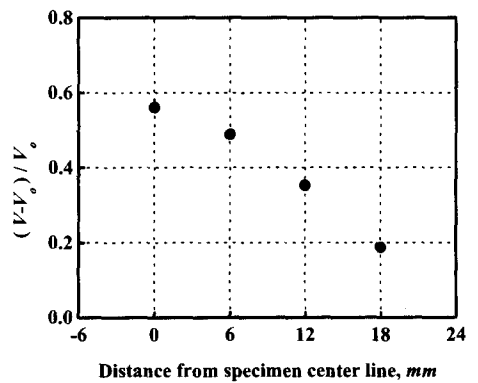


Fig. 10 Normalized potential values obtained from test

### 3.2 실험결과 및 고찰

3점 굽힘 피로하중을 시편에 가하는 동안 육안으로 균열길이의 성장을 측정하였으며, 실험 후 최종적으로 측정된 균열길이( $2c$ )는 43 mm로, 총 7 mm 성장하였다. Fig. 10은 균열이 있는 시편으로부터 측정된 전압값( $V$ )을 균열이 없는 시편으로부터 측정된 전압값( $V_0$ )을 이용하여 무차원화한 값을 나타내고 있으며, 균열중심에서 전압값이 가장 높게 측정되었다. 이 값을 시편두께( $t=12$  mm) 및 최종적으로 측정된 균열길이( $c=21.5$  mm)와 함께 식 (3)과 식 (4)에 대입하여 중심점에서의 균열길이( $a_{max}$ )를 계산한 결과  $a_{max}$ 는 6.3 mm이었다. 계산된  $a_{max}$ 와 측정된  $c$ 를 이용하여 식 (4)의  $H_1, H_2$ 를 계산하여 식 (3)에 대입한 다음 각 위치에서의 균열길이를 계산하였다.

Fig. 11은 시편의 파단면을 나타낸 것으로서 피로하중에 의해 성장한 피로균열의 형상을 확인할

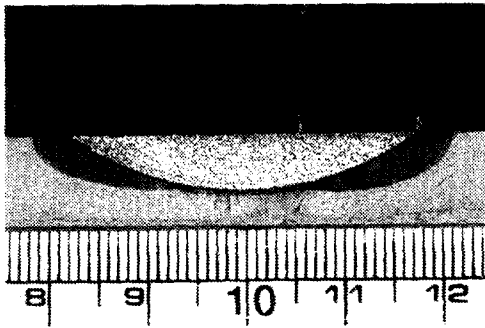


Fig. 11 Photograph of semi-elliptical surface crack

수 있다. 균열은 길이방향으로 많은 성장량을 보인 반면 깊이방향으로는 미세한 성장량을 나타내었다. 하지만 전체적인 피로균열의 형상이 반타원 표면균열의 형상을 나타내어서 본 논문에서 제시한 보정식을 검증하기에는 적합하다고 판단하였다. Fig. 12는 실험을 통해 측정된 전압값을 보정식에 대입하여 계산한 균열형상과 Fig. 11을 통해 실제 측정된 균열형상을 비교한 것이다. 보정식을 이용하여 계산한 결과는 균열의 중심을 기준으로 대칭적으로 나타내었으며, 균열의 길이는 실제 측정된 값을 사용하였다. 두 결과는 최대 5%의 오차를 나타내었으나 전체적인 균열의 형상은 잘 일치하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 보정식은 시편이나 실제 구조물에 존재하는 반타원 표면균열의 형상을 예측하는데 적용 가능할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 균열의 형상을 반타원 표면균열로 가정하고 이에 대한 보정식을 제안하였고 실험에서도 균열중심으로부터 한쪽 방향으로만 측정단자를 설치하였다. 하지만, 때로는 균열이 대칭적으로 성장하지 않을 수도 있기 때문에 특정 위치에서의 균열깊이를 계산할 수 있는 보정식에 대한 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 유한요소 전기장 해석을 통해 반타원 표면균열에 대한 보정식을 제안하였으며 제안된 보정식은 시편 또는 구조물의 재질이나 두께에 무관하게 적용할 수 있다. 또한 다채널 DCPD 시스템을 이용하여 시편 또는 구조물에 존재하는 반타원 표면균열의 깊이뿐만 아니라 균열

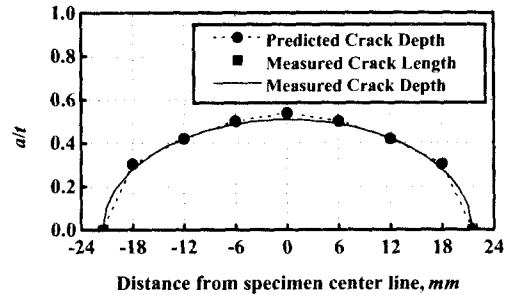


Fig. 12 Comparison of predicted and measured crack depth

의 형상까지도 실시간으로 측정할 수 있는 기법을 개발하였다. 이와 같은 기법은 간단한 시스템으로 구성되어 있고 경제적이므로 균열의 상시감시를 위해 널리 적용될 수 있을 것이다.

#### 후기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) ASTM E647, 1995, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 1995 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, pp. 594~599.
- (2) 심도준, 박호림, 최재봉, 김영진, 2000, "표면 균열 형상측정을 위한 다채널 DCPD 시스템의 개발," 한국가스학회지 제4권 제1호, pp. 49~54.
- (3) Enmark, M., Lucas, G. and Odette, G.R., 1992, "An Electric Potential Drop Technique for Characterizing Part-Through Surface Cracks," *Journal of Nuclear Materials* 191~194, pp. 1038~1041.
- (4) Ikeda, K., Yoshimi, M. and Miki, C., 1991, "Electrical Potential Drop Method for Evaluating Crack Depth," *International Journal of Fracture*, Vol. 47, pp. 25~38.
- (5) Saka, M., Hirota, D., Abe, H. and Komura, I.,

1998, "NDE of a 3-D Surface Crack Using Closely Coupled Probes for DCPD Technique," *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*, Vol. 120, No. 4, pp. 374~378.

- (6) 주식재, 1996, "안정파로성장 중인 표면균열 형상변화의 해석," 대한기계학회논문집(A) 제 20권 제9호, pp. 2843~2853.
- (7) ABAQUS User's manual, 2000, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.