

## 표면균열 형상측정을 위한 다채널 DCPD 시스템의 개발

심도준·박호림·최재봉·김영진\*

\*성균관대학교 기계공학부

(2000년 1월 9일 접수, 2000년 3월 8일 채택)

### Development of Multi-Channel DCPD System for Surface Crack Measurement

D.J. Shim · H.L. Park · J.B. Choi · Y.J. Kim\*

\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon

(Received 9 January 2000 ; Accepted 8 March 2000)

#### 요 약

구조물에 존재하는 균열을 측정하기 위해 DCPD법이 널리 사용되고 있다. 본 연구를 통해 표면균열의 성장뿐만 아니라 형상변화도 측정 가능한 다채널 DCPD 시스템을 개발하였고, 이를 위한 전용 소프트웨어를 개발하였다. DCPD 시스템을 CT 시편에 적용하여 그 효용성을 검증한 후, 넓은 평판에 존재하는 표면균열 측정실험에 시스템을 적용하였다. 표면균열 성장시 개발한 다채널 DCPD 시스템을 적용함으로써 효과적이고 정확한 균열측정이 가능하다는 결론을 얻었다.

**Abstract** - The DCPD(Direct Current Potential Drop) method has been adopted for the crack measurement of a structure. The objective of this paper is to develop a multi-channel DCPD system not only for detecting crack depth, but also for determining the accurate shape of the surface crack. For this purpose, an exclusive software was also developed. In order to verify the developed DCPD system it was initially tested on a CT specimen, and subsequently was applied to a wide plate specimen. The developed multi-channel DCPD system was proven to provide an efficient and accurate measurement of a surface crack during the crack growth.

**Key Words** : DCPD Method, Multi-Channel, Surface Crack, Crack Configuration Measurement, Data Acquisition System

#### 1. 서 론

산업의 발달과 더불어 공공 구조물이나 산업 설비가 대형화, 고성능화 되면서 안전사고로 인한 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 인명 손실을 초래할 가능성이 높아지고 있다. 이러한

안전사고를 방지하기 위해서는 구조물의 수명 평가와 건전성평가가 필요하며, 이때 구조물 내에 존재하는 균열의 크기와 형상을 파악하여 파괴역학적인 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 균열검출을 위해 주로 사용되고 있는 비파괴검사방법으로는 육안검사법, 방사선투과법,

†주저자 : genesis@nppsafes.skku.ac.kr

초음파법 등이 있다. 방사선투과법과 초음파법은 균열의 크기와 형상을 정량적으로 검출할 수 있는 방법이나 상시계측을 위해 활용하기에는 어렵다는 단점이 있다.

균열형상을 측정할 수 있는 또 다른 방법으로 저항변화를 이용하는 직류전위차(Direct Current Potential Drop; DCPD)법이 있다. DCPD법은 30년 전에 최초로 시도되었으며, 측정방법이 간단하고 다채널을 사용하는 경우 표면균열의 형상도 정확히 검출할 수 있다. ASTM-E647<sup>(1)</sup>에서는 CT시편과 MT시편의 균열형상 측정법으로 DCPD법을 제시하고 있으며, Gilbey<sup>(2)</sup>는 얇은 평판에 존재하는 표면균열을 DCPD법을 이용하여 측정하였다. Mohaupt과 Costanza<sup>(3)</sup>는 넓은 평판(wide plate)에 존재하는 표면균열(surface crack)을 측정하는 식을 제안하였으며, S. Kanno등<sup>(4)</sup>은 균열의 대칭성을 이용한 연구를 수행하여 표면균열을 효율적으로 측정하였다. 또한 M. Saka등<sup>(5)</sup>은 전원입력단자와 측정단자 사이의 거리를 좁혀서 민감도가 높은 DCPD 시스템을 구현하였다.

이와 같이 DCPD법을 이용하면 균열의 크기와 형상을 정확하게 측정할 수 있으나, 지금까지의 연구는 표준시편이나 판통균열의 측정에 국한되어 왔다. 그러나 실제구조물에 존재하는 균열은 대부분 표면균열이며 이의 성장에 따른 균열형상의 측정방법은 확립된 바 없다. 따라서 본 연구의 목적은 표면균열의 성장뿐만 아니라 형상변화도 측정 가능한 다채널 DCPD 시스템과 이를 위한 GUI(Graphic User Interface)환경의 전용 소프트웨어를 개발하는 것이다.

## 2. DCPD법을 이용한 균열길이 측정

### 2.1. CT시편

Hicks와 Pickard<sup>(6)</sup>는 CT시편에 존재하는 균열의 길이와 측정 전압과의 관계식을 정의하고 유한요소법을 이용한 전기장 해석과 실험을 통해 식을 보정하였다. 보정된 식은 시편의 폭에 대한 균열길이의 비를 기준전압값에 대한 측정 전압값의 비의 함수로 나타내었으며 다음과 같다.

$$\frac{a}{W} = -0.5051 + 0.8857 \left( \frac{V}{V_0} \right) - 0.1398 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + 0.0002 \left( \frac{V}{V_0} \right)^3 \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 균열길이,  $V$ 는 측정된 전압값,  $V_0$ 는  $a/W$  값이 0.241일 때의 전압값, 그리고  $W$ 는 시편의 폭이다.

### 2.2. 넓은 평판

Gilbey는 평판에 존재하는 표면균열의 깊이를 측정하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{a}{t} = \frac{2}{\pi} \times \cos^{-1} \left[ \frac{(1-M_1)^2}{(M_2-M_1^2 M_3)} \right]^{1/2}$$

$$M_1 = \frac{e^{(v/k)} - 1}{e^{(v/k)} + 1} \quad (2)$$

$$M_2 = \operatorname{sech}^2 \left( \frac{\pi f}{2W} \right)$$

$$M_3 = \operatorname{sech}^2 \left( \frac{\pi d}{2W} \right)$$

여기서  $v$ 는  $(V-V_0)/V_0$ ,  $k$ 는 형상계수,  $a$ 는 균열길이,  $t$ 는 평판의 두께,  $f$ 는 균열과 전압측정단자의 간격,  $d$ 는 균열과 전원공급단자의 간격,  $W$ 는 평판의 폭이다. 식 (2)에서 평판의 폭이 좁을수록 정확한 결과를 얻을 수 있다. Mohaupt과 Costanza는 Gilbey식에 형상계수( $C$ )를 곱하여 넓은 폭의 평판에 적용 가능하도록 하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$C = 0.445 + 0.551e^{-2.299 W/2b} \quad (3)$$

여기서  $2b$ 는 표면균열의 길이이다.

## 3. 다채널 DCPD 시스템

본 연구에서 개발한 다채널 DCPD 시스템은 크게 하드웨어부(hardware part)와 소프트웨어부(software part)로 구성하였다.

### 3.1. 하드웨어부

개발한 다채널 DCPD 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다. DCPD 시스템의 하드웨어부는 신호처리부와 전원제어부로 구성된다. 신호처리부는 증폭기(amplifier)와 필터(filter) 및 A/D 변환기(A/D converter)로 구성되는데, 증폭기는 수십  $\mu V$ 의 진폭변화를 측정할 수 있도록 신호를 10,000배 증폭하였다. 또한 측정된 신호의 잡음 제거와 릴레이(relay) 작동을 고려하여 3Hz 저역통과필터(low pass filter)를 사용하였

다. A/D 변환기의 분해능은 12bit이고 0~10V 사이의 전압을 측정하며 릴레이 작동에 맞추어 측정하도록 구성하였다.

제어회로부는 채널제어회로(channel control circuit)와 전원제어회로(power control circuit)로 구성된다. 채널제어회로는 릴레이를 사용함으로써 한 set의 증폭기와 필터만으로 신호를 측정할 수 있도록 구성하였고, 프로그램을 이용하여 임의의 특정 채널을 통해서 전압을 측정하거나 모든 채널에서 교번식으로 측정할 수도 있도록 설계하였다. 전원제어회로는 열전기 효과의 영향을 제거하기 위하여 구성된 장치로서, 입력전원의 극을 변환하여 시험편의 온도변화를 방지하는 기능을 갖추고 있다.

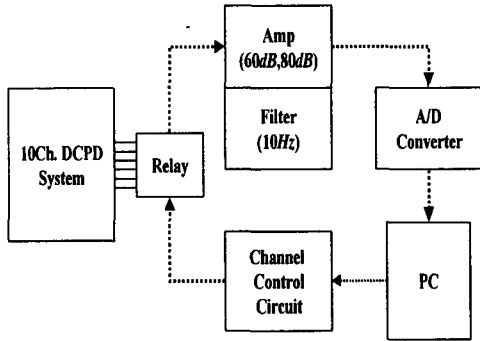


Fig. 1. A schematic diagram of the multi-channel DCPD system.

PC에서는 다채널 DCPD 시스템에서 발생하는 신호를 처리하고 시스템을 전체적으로 제어하는 프로그램을 구동한다. 특히 10개의 채널 중 사용하고자 하는 채널을 선택하고 측정된 데이터의 저장과 균열형상을 출력하는 기능을 한다.

### 3.2. 소프트웨어부

소프트웨어부는 GUI를 지원하는 Microsoft Visual C++로 작성하였으며 크게 입력부와 출력부로 구성하였다.

Fig. 2는 입력부의 초기화면으로서 사용하고자 하는 채널의 선택과 데이터 저장 파일의 지정이 가능하도록 구성하였다.

Fig. 3은 다채널 DCPD 시스템의 실행화면으로서 균열형상과 각 채널에서의 측정값을 나타낸다.



Fig. 2. Input window for the DCPD system software.

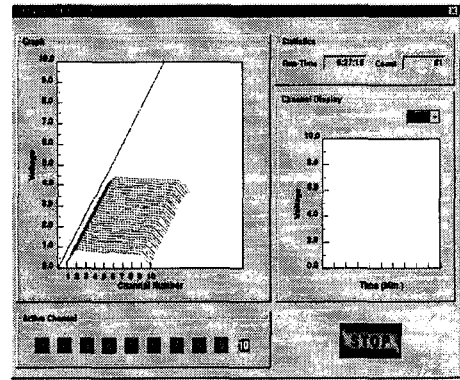


Fig. 3. Output window for the DCPD system software.

## 4. 실험방법

본 연구에서 개발한 다채널 DCPD 시스템의 성능은 CT시편의 균열과 평판의 표면균열을 이용하여 검증하였다.

Fig. 4는 CT시편 실험의 구성도이다. 균열 측정 실험에서는 시편의 양단에 10A의 정전류를 공급하고 균열을 증가시키면서 전압 변화를 측정하였다. 폭 60mm, 길이 75mm, 두께 10mm인 CT시편에 대하여 2회 반복실험을 수행하였고, 두께변화에 의한 영향을 고찰하기 위하여 폭 60mm, 길이 75mm, 두께 6mm인 CT시편에 대해서도 동일한 실험을 수행하였다. 측정값으로부터 식 (1)을 이용하여 균열길이를 산출하고 이를 실제 균열길이와 비교하여

DCPD 시스템의 정확도를 검증하였다.

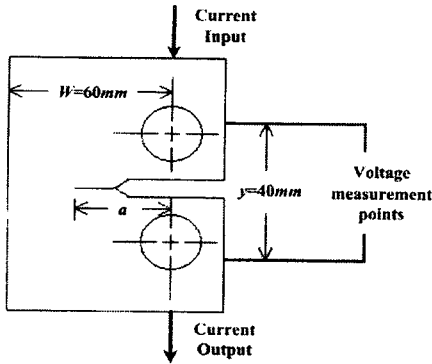


Fig. 4. Geometry of CT specimen and electric potential wire placement.

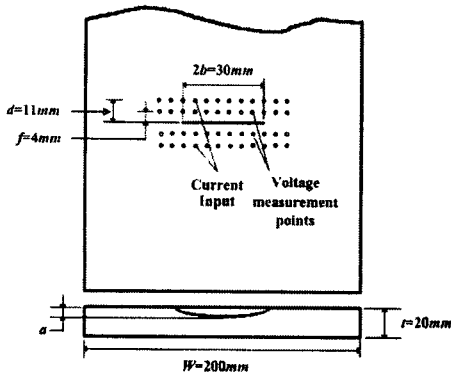


Fig. 5. Geometry of plate specimen and electric potential wire placement.

Fig. 5는 표면균열을 측정하기 위한 시편의 형상으로서, 두께 20mm, 폭 200mm 평판에 초기 균열길이 30mm의 표면균열을 삽입하여 시편을 제작하였다. 이때 균열과 전압측정 단자간의 간격(f)을 4mm, 균열과 전류공급 단자간의 간격(d)을 11mm, 측정단자간의 간격을 7mm로 각각 구성하였다. 균열길이를 고려하여 전압측정은 4개 채널에서 수행하였으며, 각 측정단자에서의 균열깊이는 각각 0.6mm, 1.9mm, 1.4mm, 0.6mm로 설정하였다. 균열길이의 변화에 따른 이론적인 전압의 계산을 위해 식 (2)를  $a/t$ 에 대해 3차 곡선적합하여 사용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{V - V_0}{V_0} = 1.75\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 1.27\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0.19\left(\frac{a}{t}\right) \quad (4)$$

식 (4)는  $0 \leq a/t \leq 0.1$ 인 범위에서만 사용이 가능하다. 본 논문에서는 식 (4)로 표현되는 이론전압값과 실제 DCPD 시스템에서 측정된 전압값을 비교하여 개발한 DCPD 시스템의 정확성을 검증하였다.

### 5. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 폭 60mm, 길이 75mm, 두께 10mm인 CT시편에서 실제 측정된 균열길이를 DCPD 시스템을 이용하여 측정된 균열길이를 비교한 것으로서 오차범위 4.0% 내에서 잘 일치하였다.

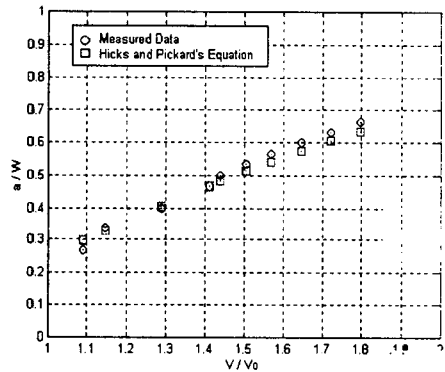


Fig. 6. Relationship between the ratio of voltage and the normalized crack length ratio ( $t=10mm$ ).

Fig. 7은 폭 60mm, 길이 75mm, 두께 6mm인 CT시편에서 균열길이를 측정된 결과로서 18mm에서 36mm까지 3mm간격으로 균열길이를 증가시키며 전압을 측정하였다. 식 (1)을 사용해 산출한  $a/W$ 와 실제 측정된  $a/W$ 는 4.0% 내에서 일치하였다. 따라서, 식 (1)을 적용하여 측정된  $a/W$ 는 CT시편의 두께와 무관하다는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 평판에 존재하는 표면균열에서 이론전압과 실제전압을 비교한 것으로서, 실선은 이론전압이고 각 점은 실제 측정된 전압이다.

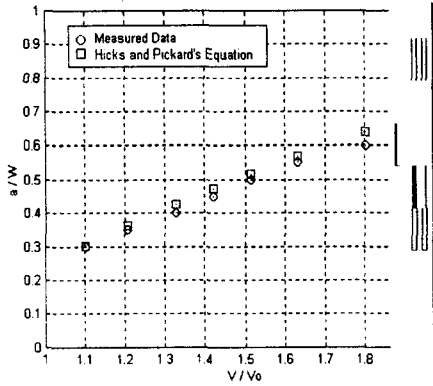


Fig. 7. Relationship between the ratio of voltage and the normalized crack length ratio ( $t=6mm$ ).

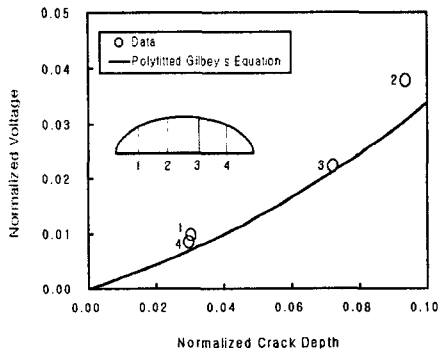


Fig. 8. Relationship between the ratio of voltage and the normalized crack depth ratio.

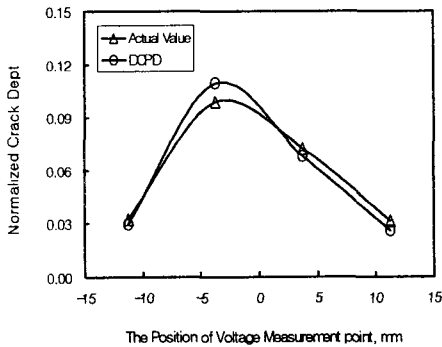


Fig. 9. Comparison between actual crack depth and DCPD measured value.

Fig. 9는 균열깊이가  $0.65mm$ ,  $1.97mm$ ,  $1.45mm$ ,  $0.63mm$ 인 위치에서 식 (4)를 사용해 산출한 균열깊이와 실제 측정된 균열깊이를 비교하여 나타낸 것이다. 각 점에서의 균열깊이는 약 10%의 오차를 나타내고 있는데 이는 균열의 가공과정에서 균열의 형상이 정확한 타원이 아닌 기울어진 타원형으로 가공되었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 문제는 유한요소 해석을 이용한 전기장 해석결과와 실제 실험결과를 고려하여 기존의 Gilbey식을 보정함으로써 해결될 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 10개의 채널을 이용하여 표면 균열의 형상을 10% 오차범위 내에서 측정할 수 있는 다채널 DCPD 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 열전기 효과를 고려하여 장시간 측정시에도 적용이 가능하며 추후 채널의 추가나 적용대상 변경이 용이하도록 관련장치를 모두 자체 개발하였다. 개발된 다채널 DCPD 시스템을 CT시편의 균열 측정과 넓은 평판의 표면균열 측정에 적용한 결과, CT시편의 균열길이는 기존의 제시된 식을 이용해 산출한 결과와 오차범위 4% 내에서 일치하였으나, 표면균열의 경우 약 10% 이내의 오차를 보였다. 개발한 다채널 DCPD 시스템을 이용하여 표면균열의 형상을 정확하게 측정하기 위해서는 유한요소해석을 이용한 전기장 해석결과와 실험결과를 고려하여 관련식을 보정하는 것이 필요하다고 판단된다.

## 감 사

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터와 한국표준과학연구소의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## Nomenclature

- $a$  : 측정 균열길이
- $a_0$  : 기준 균열길이
- $V$  : 측정 전압
- $V_0$  : 기준 전압
- CT : Compact Tension

MT : Middle Tension  
W : 시편 폭  
t : 시편 두께  
y : 전압측정단자간 거리

### 참 고 문 헌

1. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM standard E647.
2. Gilbey, D.M. and Pearson S., "Measurement of the Length of a Central or Edge Crack in a Sheet of Metal by Electrical Resistance Method," RAE Technical Report No. 66402 (1966).
3. Costanza, V. and Mohaupt, U.H., "A Local Field Potential Drop Crack Measurement System for Sizing and Characterizing Cracks," Canadian Fracture Conference 21, pp. 351-357 (1990).
4. Kanno, S., Hayashi, M., Miyazaki, K., "Monitoring of Fatigue Crack Shape Change in Elevated Temperature Water by DC Potential Drop Method," NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp. 267-270 (1995).
5. Saka, M., Oouchi, A., Abe, H., "NDE of a Crack by Using Closely Coupled Probes for DCPD Technique," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 118, pp. 198-202 (1996).
6. Hicks, M. A. and Pickard, A. C., "A Comparison of Theoretical and Experimental Methods of Calibrating the Electrical Potential Drop Technique for Crack Length Determination," *International Journal of Fracture*, No. 20, pp. 91-101 (1982).