

직류전위차법을 이용한 결함검출에 관한 연구

배 봉 국* · 석 창 성**
(1999년 4월 28일 접수)

A Study on Detecting Flaws Using DC Potential Drop Method

Bong-Kook Bae and Chang-Sung Seok

Key Words: DCPD(직류전위차), Four-Point Probe(4단자 탐촉자), Voltage Difference(전위차), Flaw(결함), Contact Resistance(접촉저항)

Abstract

In this paper, a DC potential drop measurement system was used to find the position of the flaw on a simple thin plate. Four-point probe test was evaluated and used for this study. In the four-point probe test, the more distance between current pins provides the more measurable scope, the less voltage difference, and the more voltage difference rate. In the other hand, the more distance between voltage pins provides the less voltage difference and the less voltage difference rate. An optimized four-point probe was applied to measure the relation between voltage and the relative position of flaw to the probe. The Maxwell 2D simulator was used to analyze the electromagnetic field, and it showed that the analytical result was similar to the experimental result within 11.4% maximum error.

1. 서 론

비파괴적인 결함검출을 위한 직류전위차법이란 결함이 있는 재료에 일정 전류를 인가할 때 결함이 존재하는 부분의 저항 변화를 이용하여 재료의 결함여부를 파악하는 비파괴 검사법이다. 이 방법은 부도체를 제외한 모든 재료에 적용이 가능하고 측정방법이 간단하며 측정된 신호의 가공이 용이하므로 현재 전기비저항 측정, 접촉상태 관찰, 균열진전 측정 등 다양한 분야에서 사용되고 있으며 점차 그 영역이 확대되어 가고 있다.

이러한 직류전위차법을 이용할 경우 4단자 탐촉자를 이용하여 반도체 박막(1.6mm 이하)의 전기비저항을 측정하거나^(1~2) 도체 재료의 열화도를 평가할⁽³⁾ 수도 있다. 또한 균열길이도 측정할 수 있으

나 이때에는 용접이나 끼워 맞춤 등의 방법으로 전선을 시편에 직접 고정시킨 후 실험하도록 되어 있다.^(4~9) 결함의 위치를 알 경우, 이 방법을 이용하여 결함 부분에 전선을 부착시키면 정밀하게 결함의 크기를 측정할 수 있지만 선박이나 배관과 같은 대형구조물에서 결함의 위치를 모르는 경우에는 사용하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 결함의 측정에 4단자 탐촉자를 이용하여 재현성을 보장할 수 있다면 전선을 부착시키는 대신 탐촉핀을 접촉시켜 측정함으로써 이동측정이 가능해 질 수 있을 것이며, 결함의 위치검출에도 사용될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 4단자 탐촉자와 유사하지만 이동 측정이 가능하고 접촉핀 사이의 간격을 조절할 수 있는 탐촉자를 제작하여 단자 간격에 따른 DCPD(Direct Current Potential Drop)를 관찰하고 효과적인 단자 간격을 선정하였다. 또한 이것을 이용하여 평판에서 결함의 위치와 DCPD와의 관계를 실험하였으며, 실험 결과를 전자기장 해석 결과와 비교 고찰하였다.

* 성균관대학교 대학원

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

TEL : (0331)290-7477 FAX : (0331)290-7482

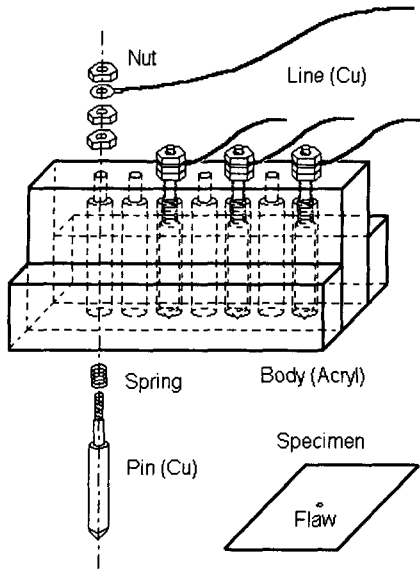


Fig. 1 Probe and specimen

2. 실험 장치

2.1 시편과 탐촉자

두께 0.5mm, 면적 600mm × 600mm인 3개의 철판을 준비하여 중앙에 각각 지름 3, 6, 9mm의 인위적인 결함을 내어 시편으로 사용하였다. 탐촉자는 이동 측정이 가능하고 접촉핀 사이의 간격조절이 용이하도록 Fig. 1과 같이 설계하여 제작하였다.

탐촉자는 아크릴로 제작된 몸체에 1cm 간격으로 홈을 내고 그 안에 구리봉으로 만들어진 4개의 접촉핀들을 일렬로 배치하였다. 접촉핀에는 나사산을 내고 너트로 전선을 연결시켜 분해 조립이 쉽도록 하였다. 또한 접촉핀의 끝을 원뿔형으로 뾰족하게 가공하여 접촉점의 정밀도를 높였고 단자가 시편의 표면에 균일하게 접촉되도록 뒤쪽에 스프링을 내장시켰다. 추가적으로 몸체의 양 옆에는 받침대를 두어 측정시 좌우로 기울어지지 않도록 하였고 바닥에 1mm 간격으로 눈금선을 그어 움직인 거리를 정확히 알 수 있도록 하였다.

제작된 탐촉자를 사용하기에 앞서 신뢰성을 확보하기 위하여 Fig. 2와 같이 회로를 구성하여 시편과 탐촉자 접촉핀 사이의 접촉저항 변화가 측정 전압에 미치는 영향을 조사하였다. 이 그림에서 R_1 은 시편의 부분 저항으로 전압 측정핀 사이의 시

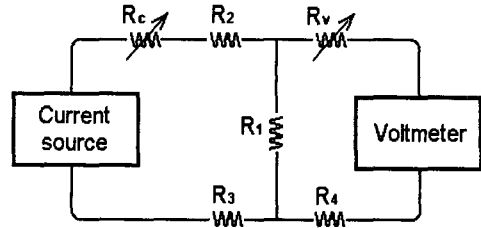


Fig. 2 Schematic diagram of contact resistance effect test circuit

Table 1 Troubles and solutions on applying DCPD method

Trouble	Reason	Solution
Volt. drift by time and temp.	Thermoelectric effect	Warm up, low current
Unstable contacting	Unstable force on probe	Use spring, poise
Unstable interval of pins	Loosed pin-holes	Fill up holes with grease
Not precise contacting	Blunted end of pins	Sharpen end of pins
Spark between specimen and current pins	Detached current pins from specimen	Keep attachment

편저항을 나타내며, R_2 역시 시편의 부분저항으로 전류 공급핀 사이의 시편저항을 나타낸다. 또한 R_3 와 R_4 는 전류 공급 도선과 전압 측정 도선의 저항을 나타내며, R_c 는 전류 공급핀의 접촉 저항, R_v 는 전압 측정핀의 접촉 저항을 각각 나타낸다.

Fig. 2에서 R_c 의 경우 접촉부의 단락으로 인해 전류의 흐름이 끊기지만 않는다면 R_c 의 값이 바뀌더라도 R_1 구간을 흐르는 전류가 일정하므로 전압은 변하지 않는다. 실제 실험에 사용할 5A의 전류를 가한 상태에서 R_v 를 0Ω에서 20kΩ까지 변화시키며 실험을 수행한 결과 전체 구간에서 R_v 에 따른 평균 전압 변화가 ± 1μV를 넘지 않았다. 또한 실제 실험에서 R_v 는 0.1Ω 이하의 값을 가지므로 접촉저항이 측정전압에 영향을 미치지 않음을 알

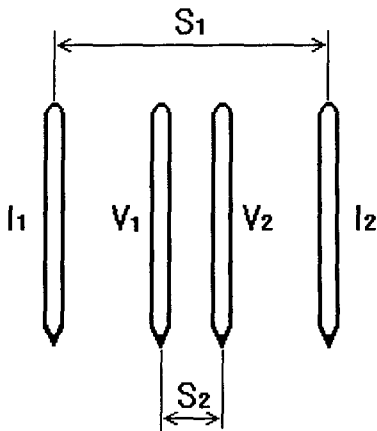


Fig. 3 Space between pins

수 있었다.

탐촉자를 이용하여 실험하는 중에 발생한 모든 문제점들과 개선방법을 Table 1에 나타내었다. 열기전력에 의한 전압변동은 최대 $2\mu V$ 까지, 스파크를 제외한 접촉관련 오차들은 최대 $20\mu V$ 까지로 나타났으나 수정 후에는 그 오차가 모두 $1\mu V$ 이하로 나타났다. 그러나 이들 중 접촉핀 사이의 미소한 간격변화로 인한 오차를 줄이기 위하여 무척 정밀한 제작을 필요로 하였으며, 이러한 제작 한계를 보완하기 위하여 모든 실험에서 5회 반복 측정 후 절사 평균값을 취하였다. 또한 전류를 공급하면서 탐촉자를 이동시킬 때 탐촉자를 시편에 약하게 누르고 있으면 시편과 접촉핀이 단락되어 스파크를 발생시키고 강하게 누르고 있으면 접촉핀이 시편에 마모되는 문제점이 있어 주의를 요하였다.

2.2 탐촉자 접촉핀의 간격비 특성

제작한 탐촉자의 양단 전류 공급핀(Fig. 3의 I_1 , I_2 단자)에 시편이 가열되지 않는 범위에서 전압측정이 가능한 5A의 직류 전류를 공급하고 측정핀(Fig. 3의 V_1 , V_2 단자) 사이의 전압을 측정하였다. 이때 측정전압이 미소하므로 3Hz의 저영역 필터(LPF)로 필터링 한 후, 10000 배의 증폭을 하여 오실로스코프로 전압을 측정하였다. 단, 표와 그래프에는 증폭시키지 않은 전압 값을 기재하였다.

Fig. 3에서와 같이 탐촉자의 전류 공급핀 사이의 간격과 전압 측정핀 사이의 간격을 각각 S_1 , S_2 라

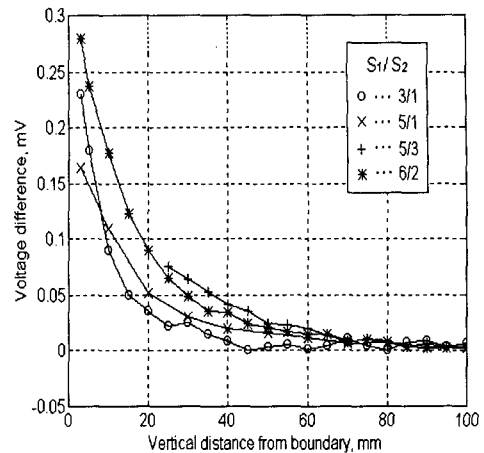


Fig. 4 Voltage difference near boundary

할 때 제작된 탐촉자에서는 1cm 단위로 간격을 조절할 수 있으므로 간격비 S_1/S_2 를 각각 3/1, 5/1, 5/3, 6/2 로 변화시키며 실험을 수행하였다.

2.2.1 경계면의 영향

시편의 경계면이 측정결과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 경계면 주위에서의 전압을 측정하였다. Fig. 4는 간격비의 변화에 따라 시편의 경계면에서 결함이 있는 중앙 쪽으로 탐촉자를 수직방향으로 이동시키며 전압을 측정한 결과이다. 이 결과에서 경계면으로부터 80~100mm 이상 떨어진 지점에서는 탐촉자의 간격과 관계없이 경계면의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

2.2.2 측정범위

탐촉자의 측정범위를 알아보기 위하여, 직경 6mm의 결함에 대하여 결함으로부터의 거리에 따른 전압을 측정하였다. Fig. 5는 간격비의 변화에 따라 시편의 중앙에 위치한 결함으로부터 경계면 쪽으로 탐촉자를 수직방향으로 이동시키며 전압을 측정한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 탐촉자의 전류 공급핀 사이의 간격과 전압 측정핀 사이의 간격의 비가 5/3인 경우는 잡음 대 신호비가 좋지 않았고, 모든 간격비에서 결함으로부터 30mm 이상 떨어진 지점에서는 결함으로 인한 전압변화가 더 이상 검출되지 않았다. 또한 결함으로부터 수평방향으로 탐촉자를 이동시켜서 결함이 두 전류 공급

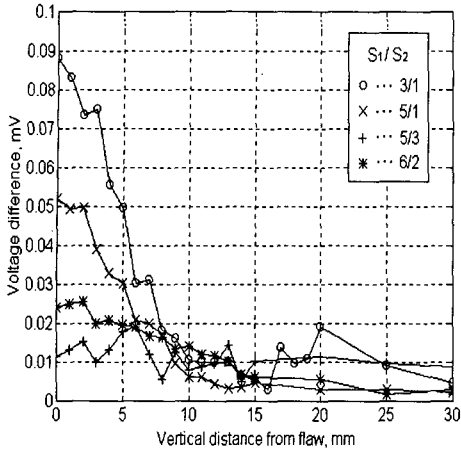


Fig. 5 Voltage difference near flaw

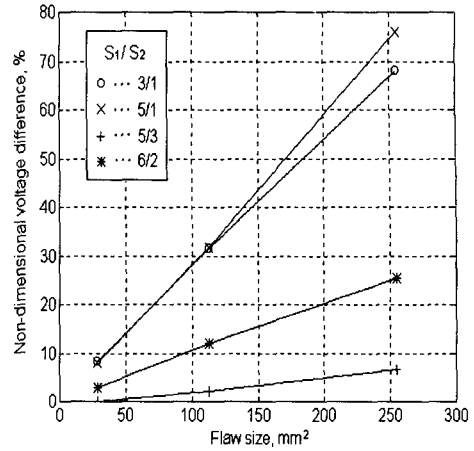


Fig. 7 Relation between non-dimensional voltage difference and flaw size

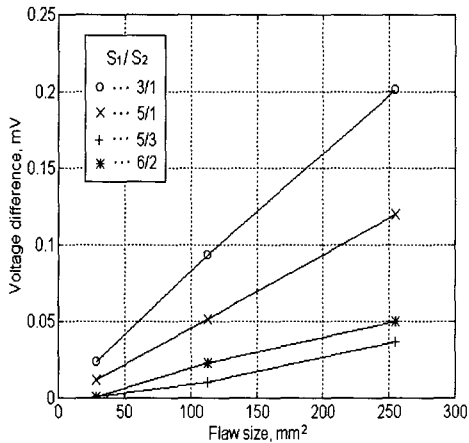


Fig. 6 Relation between voltage difference and flaw size

핀의 바깥쪽에 위치하는 경우 전압 변화가 거의 없었다. 따라서 제작된 탐촉자로 측정 가능한 범위는 수직방향으로는 약 30mm 이하, 수평방향으로는 S_1 이하였다.

2.2.3 간격비 특성

접촉핀의 간격에 따른 특성을 알아보기 위하여 간격비 별로 결함이나 경계면의 영향을 받지 않는 부분에서의 측정전압(기준전압)과 결함에서의 전압을 측정하였다. 기준전압은 결함부와 경계면의 영

향을 받지 않는 지점인 양쪽에서 150mm씩 떨어진 위치에서 측정하였다.

Fig. 6에는 간격비와 결함의 크기에 따라 측정전압에서 기준전압을 뺀 전압변화량을 나타 내었다. 이 그림에서 가장 큰 기울기를 가진 간격비는 3/1 이고 그 뒤로 5/1, 6/2, 5/3인 순서로 나타났다. 간격비가 3/1과 5/1인 시험결과에서 S_1 이 증가하면 전압변화량이 감소함을 볼 수 있다. 이는 S_1 이 큰 경우가 S_1 이 작은 경우에 비하여 결함 위치의 전류 밀도의 변화가 작으며 그 밀도도 작기 때문에 결함에 따른 전압의 변화가 작게 나타난 것으로 생각된다. 또한 간격비가 5/1인 경우와 5/3인 경우의 실험결과에서 S_2 가 증가할수록 전압변화량이 감소함을 볼 수 있다. 이는 S_1 이 같으므로 결함위치의 전류밀도의 크기나 변화량은 같으나 S_2 가 증가하여 결함에서 멀어짐으로 인하여 그 영향이 작게 나타난 것으로 생각된다. 결과적으로 S_1 , S_2 가 클수록 전압변화량이 작아짐을 알 수 있었다.

전압변화율은 전압변화량을 기준전압으로 나누어 백분율로 나타낸 값으로서 측정 민감도와 관련된다. Fig. 7은 간격비와 결함의 크기에 따른 전압 변화율을 나타낸 것이다. 결함이 3mm, 6mm인 경우까지는 간격비가 3/1과 5/1이 거의 같은 값을 가지면서 큰 기울기를 갖는데 간격비가 5/1 일 때가 약간 더 크게 나타났다. 그리고 간격비가 5/3일 때의 전압변화율이 가장 조금 변화였다.

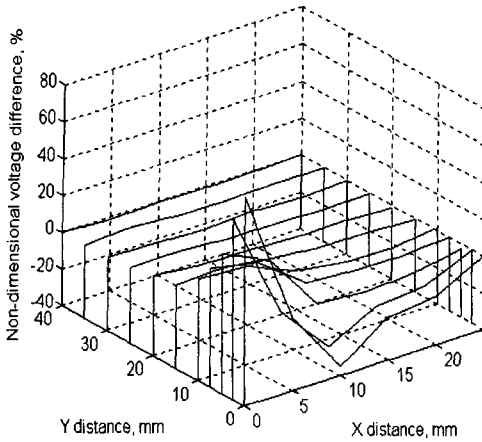


Fig. 8 Non-dimensional voltage difference by 5/1 probe

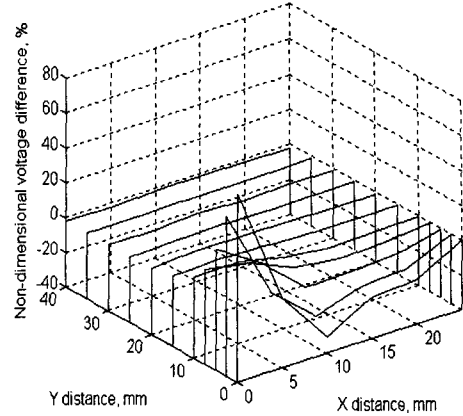


Fig. 10 Non-dimensional voltage difference by electromagnetic field analysis about 5/1

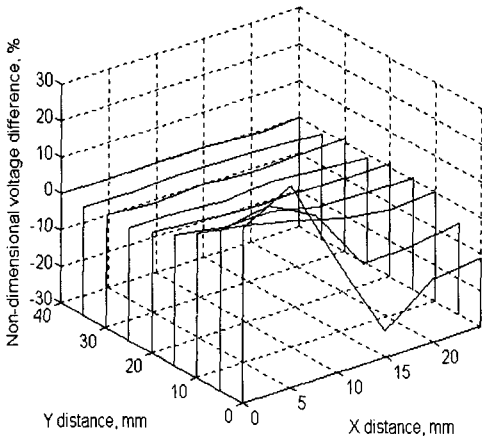


Fig. 9 Non-dimensional voltage difference by 6/2 probe

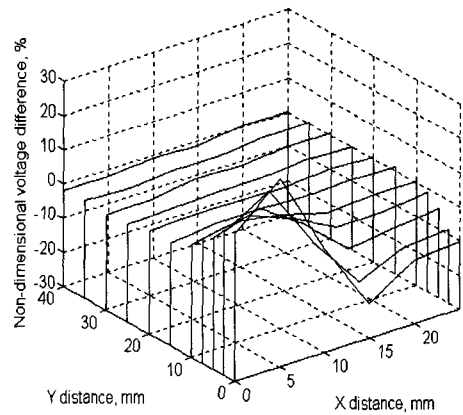


Fig. 11 Non-dimensional voltage difference by electromagnetic field analysis about 6/2

간격비가 5/1과 3/1일 때를 비교하면 전압변화량은 3/1인 경우가 크게 나타났으나 전압변화율은 거의 비슷하게 나타났다. 그 이유는 S_1 이 증가할 때 기준전압이 크게 감소하였기 때문이라 생각한다. 또한 간격비가 5/1과 5/3에서 S_2 가 증가하면 전압변화율은 감소하는 것으로 나타났다.

3. 실험과 해석

3.1 결함부의 전압변화 특성

간격비의 특성을 분석한 결과 민감도가 우수하고 측정범위가 넓은 간격비 5/1과 6/2인 탐촉자를 선정하여 평판에서의 결함의 위치 검출 실험을 수행하였다. 결함을 중심으로 전후좌우가 대칭이므로 결함을 원점으로 하여 탐촉자에 수평방향으로 5mm씩 25mm까지, 수직방향으로 5mm(혹은 2.5mm)씩 40mm까지 탐촉자를 이동하면서 제 1사분면에서만 총 60개 지점에서 전압을 측정하였다.

Fig. 8은 간격비가 5/1 일 때의, Fig. 9는 간격비가 6/2 일 때의 위치에 따른 전압변화율의 분포이

다. 결합으로부터의 위치가 탐촉자에 수직인 방향으로 증가할수록 전압변화가 작아져서 0에 수렴하였다. 결합으로부터의 위치가 탐촉자에 수평인 방향에 대해서는 탐촉자의 전류 공급핀과 전압 측정핀에 대한 상대적인 위치에 따라서 다른 경향을 보였다. 결합의 위치가 전류 공급핀의 바깥쪽에 위치하는 경우 전압의 변화가 없었고 전압 측정핀의 안쪽에 위치하는 경우 양(+)의 전압이 측정되었으며 전압 측정핀과 전류 공급핀의 사이에 위치하는 경우 음(-)의 전압이 측정되었다. 또한 결합의 위치가 전압 측정핀 쪽에 근접할수록 전압변화량의 절대 값이 크게 나타났다.

3.2 결합부의 전자기장 해석과 비교

실험과 같은 조건에서 맥스웰 2차원 시뮬레이터(Maxwell 2D Simulator)의 직류 전기장 해석기(DC conduction field solver)를 이용하여 전기장 해석을 수행하였으며 해석결과는 다음의 Fig. 10, Fig. 11과 같다.

해석결과(Fig. 10, Fig. 11)를 실험결과(Fig. 8, Fig. 9)와 비교할 때 두 경향이 잘 일치함을 알 수 있었다. 간격비가 5/1인 경우 Fig. 10과 Fig. 8에서 실험 결과의 전압변화율이 약간 크게 나타났으며 최대 오차는 11.4%로 나타났다. 전압변화율은 결합의 중심에서 70%, 수평으로 10mm 이동한 지점에서 -30%로 나타나, 최대 100%의 변동폭을 나타내었다. 간격비가 6/2인 경우 Fig. 11과 Fig. 9에서 최대오차가 6.6%로 나타났고 전압변화율은 결합의 중심에서 수평으로 각각 5mm, 15mm 이동한 지점에서 25%와 -20%로 최대 45%의 변동폭을 나타내었다. 간격비가 6/2인 경우가 5/1인 경우에 비하여 오차가 작은 반면 민감도도 작는데 그 이유는 간격비가 6/2인 경우가 5/1인 경우에 비하여 S₁과 S₂가 크기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 4단자 탐촉자를 개선하여 이동식 탐촉자를 개발하고 재료내의 결합의 위치를 찾아내기 위한 기초 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 탐촉자에서 전류 공급핀 사이의 간격을 넓히면 측정가능한 범위가 넓어지고 전압변화량이 감소하며 전압변화율은 커진다. 또한 탐촉자에서 전

압 측정핀 사이의 간격을 넓히면 측정 전압값은 커지지만 전압변화량과 전압변화율은 줄어든다.

(2) 탐촉자의 측정능력이 우수한 두 개의 단자간격 비율을 선정하였으며 이를 이용하여 결합의 위치에 따른 전압분포를 측정하였다.

(3) 전기장 해석을 수행하고 그 결과를 탐촉자를 이용한 실험결과와 비교하여 두 경향이 거의 일치함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) ASTM F84-93, 1993, "Standard Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers with an In-Line Four-Point Probe," pp. 135~147.
- (2) ASTM B193-87, 1992, "Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials," pp. 308~311.
- (3) Nahm S. H., Kim A., Yu K. M., Suh C. M. and Park J. S., 1996, "Evaluation of Toughness Degradation of Cr-Mo-V Steel Using Electric Resistivity," *KSME*, Fall, pp. 292~297.
- (4) ASTM E647, 1995, "Guidelines for Electric Potential Difference Determination of Crack Size," pp. 594~599.
- (5) Hartman G. A. and Johnson D. A., 1987, "D-C Electric-Potential Method Applied to Thermal/Mechanical Fatigue Crack Growth," *Experimental Mechanics*, pp. 106~112.
- (6) Valerio Bicego, Dino Liviero, Carlo Fossati, and Enrico Lucon, E., 1990, "J-R Curve Testing Utilizing the Reversing Direct Current Electrical Potential Drop Method," *Applications of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing*, ASTM STP 1092, A. A. Braun, N. E. Ashbaugh, and F. M. Smith, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 143~166.
- (7) Wilkowski, G. M., Wambaugh, J. O., and Prabhat, K., 1984, "Single-Specimen J-Resistance Curve Evaluations Using the Direct-Current Electric Potential Method and a Computerized Data Acquisition System," *Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium*, ASTM STP 833, R. J. Sanford, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 553~576.

- (8) Costanza, V. and Mohaupt, U. H., 1990, "A Local Field Potential Drop Crack Measurement System for Sizing and Characterizing Cracks," *Canadian Fracture Conference 21*, pp.351~357.
- (9) Marsh, K. J., Smeth, R. A. and Ritchie, R. O., 1992, "Fatigue Crack Measurement Techniques and Applications," *Engineering Materials Advisory Service Ltd.*, pp.11~37.