

## 직류전압강하법에 의한 균열길이 측정에 미치는 도선의 위치 및 보정방법의 영향에 관한 연구

조종춘 · 김인수\* · 김상식 · 최승주\* · 허보영  
경상대학교, 항공기부품기술연구센터, 재료공학부  
\*한국기계연구원, 내열재료실  
(1997. 1. 10. 접수)

## Studies on effects of calibration methods and current lead position on the direct current potential drop method for crack length measurement

C. C. Cho, I. S. Kim\*, S. S. Kim, S. J. Choe\* and B. Y. Hur

*Dept. of Metallurgical and Materials Science, Gyeongsang National University, Chinju 660-701, Korea*

*\*Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon 641-010, Korea*

(Received Jan. 10, 1997)

**요약 :** 직류전압강하법을 이용한 균열길이 측정방법은 입력력 도선의 위치 및 보정방법에 큰 영향을 받는다. 본 실험에서는 CT 시편을 실제 시편보다 9배 크기로 제작하여, 입력력 도선의 위치, 열유도 EMF 및 기준전압의 위치가 기존의 보정곡선에 미치는 영향을 연구하였다. 연구 결과 입력전류 도선의 위치가 하중선에 위치할 때, Hicks-Pickard 관계식이 매우 정확하게  $a/W$ 와  $V/V_0$ 간의 관계를 나타내었으며, 이 때  $V_0$ 값을  $a/W=0.241$ 에서 측정 또는 계산된 값을 사용하고, 열유도 EMF를 보정함으로써 더욱 정확성을 향상시킬 수 있음을 알았다. 또한 입력도선이 하중선에 위치할 때 기준전압을 CT 시편에서 일반적으로 사용되는 위치인 시편 끝 하단에서 측정할 경우, 기준전압으로 보정한 전압값은 매우 큰 오차를 나타내었다.

**Abstract :** The effective resolution of the direct current potential drop (DCPD) method for crack length determination is strongly affected by a number of factors including wire locations and calibration method. In the present study, the effects of wire locations, thermal EMF and reference probe locations on the accuracy of calibration methods, including Hicks-Pickard equation and Johnson's equation, were examined with the CT specimens which were nine times larger than the standard specimen. In light of experimental results, it was found that Hicks-Pickard equation can accurately represent the  $a/W$ - $V/V_0$  relationship when current input wire is located at the load line. It was also found that the accuracy of DCPD method can be greatly improved with the thermal EMF calibration and the use of  $V_0$  value at  $a/W = 0.241$ . The use of reference potential was found to be impractical when current input wire is located at the load line.

**Key words :** DCPD method, thermal EMF, reference voltage

## 1. 서론

직류전압강하법(direct current potential drop, DCPD법)은 균열을 가진 시편에 전류를 흘려보낼 때 발생하는 전기장(electric field)이 시편의 형상과 균열 길이의 함수임을 이용하여, 균열길이의 변화에 따른 전압차(electric potential difference, EPD)를 측정하여 이 값으로부터 균열의 길이를 계산하는 방법이다.<sup>1,2</sup> 즉 일정한 세기의 전류하에서 균열이 증가함에 따라 균열면에서의 전압강하는 전류흐름의 혼란(perturbation)과 전기장의 변화에 따라 증가하게 된다. 균열 성장에 따른 전압변화간의 관계는 해석적(analytical) 보정방법이나 실험적(experimental) 보정방법에 의해 얻을 수 있다.

DCPD법을 이용하여 성장하는 균열의 길이를 측정하는 방법은 미국에서 약 30년 전에 이미 소개되어, 이후 많은 수정과 보완을 거쳐 피로균열성장, 응력부식 균열성장, K-R 및 J-R 커브 등을 측정하는 데 널리 사용되고 있다.<sup>1-4</sup> DCPD법을 사용할 경우에, 균열성장 데이터처리를 쉽게 자동화할 수 있고, 균열선단이 활 모양으로 휘어져 있을 때 시편 표면에서 광학적으로 측정할 때에 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있다. DCPD법은 또한 낮은 가격으로도 실험장치를 갖출 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라, 0.0025mm 정도의 미세한 균열의 성장까지도 감지할 수 있다. 또한 고온에서의 균열성장실험이나 부식피로실험과 같이 이동 현미경(travelling microscope)과 같은 광학적 방법을 이용하여 균열을 측정할 수 없는 경우에도 사용이 가능하다. 따라서 1988년에는 ASTM의 규격 E647(피로균열성장속도 측정, standard test method for measurement of fatigue crack growth rates)의 균열측정방법의 하나로 정식으로 채택되었다.<sup>5</sup> 선진국에서는 이처럼 DCPD법을 이용해 균열길이를 측정하는 것이 보편화되어 있으나 국내에서는 아직 이 방법을 적용하여 파괴역학적 실험을 행하는 실험실이 거의 없는 실정이다.

DCPD법의 실제 균열길이 분해능<sup>1)</sup>은 전압측정기(voltmeter)의 분해능, 증폭기(amplifier)의 게인(gain), 입력전류의 크기, 시편형태, 전압 및 전류 도선의 위치 및 시편재료의 전기전도도 등의 여러 인자에 영향을 받는다. 그 중에서도 특히 입력 도선의 위치 및 calibration 방법이 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 세 가지 다른 입력도선의 위치에 따른 최적의 균열길이 보정방법에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 재료 및 시편

본 연구에서는 균열 길이에 대한 전압강하 변화와의 관계를 측정하기 위해 CT(compact tension) 시편을 탄소강판을 사용하여 실제 시편보다 9배 크기로 제작하였다. 이는 시편을 크게 제작함으로써 균열 길이 측정시 오차를 줄이기 위함이다. Fig. 1은 판상시편의 형상, 크기 및 본 실험에서 사용한 입력전류, 출력전압 및 기준전압 도선의 위치를 보여 주고 있다. 입력전류는

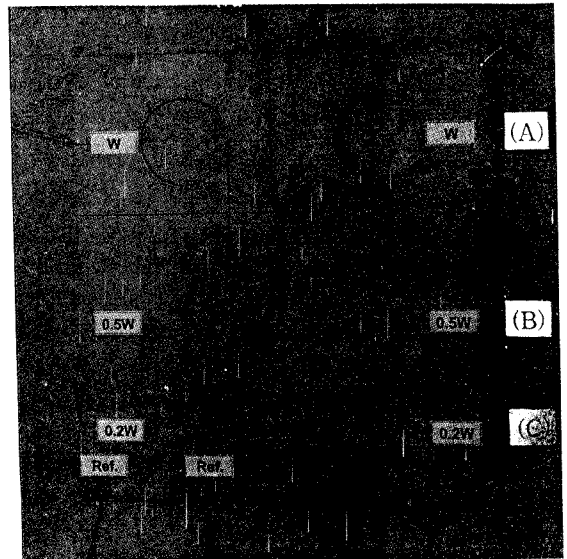


Fig. 1. Photograph of carbon-steel compact tension (CT) specimen.

- 1) 실제 균열길이 분해능이란 계측장비의 분해능이 아니라 균열길이의 미세변화에 대한 분해능을 말한다. 실험실에서 사용하는 정도 크기의 시편에서는, 입력전류의 범위는 5에서 50amps 정도이며, 측정전압 분해능이 약  $\pm 0.1\mu\text{V}$  정도일 때 이는  $V_0$ 의  $\pm 1.0\%$  정도에 해당하며, 이 때 시편너비의 0.1% 정도의 균열길이 분해능을 가진다. 매우 전도도가 높은 재료(예, Al, Cu)와 낮은 압력전류 레벨에서는 분해능이 감소하게 되며, 반면에 낮은 전기전도도를 갖는 재료(예, Ti, Ni)의 경우는 시편너비의 약 0.01% 이상의 균열길이 분해능을 얻을 수 있다.

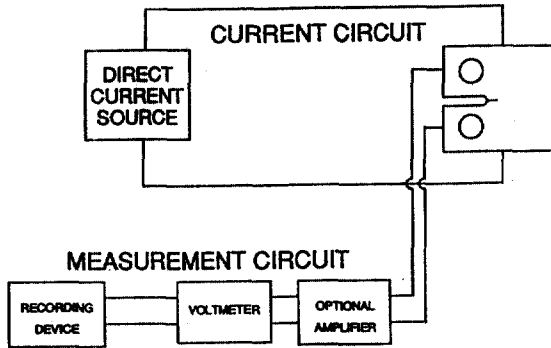


Fig. 2. Schematic illustration of experimental set-up for DCPD crack length measurement system.

Lambda model LLS7018 정전류장치를 이용하여 1.0A로 일정하게 유지하면서 시편에 통전시키고, 10mm 정도의 균열을 금속절단기를 이용하여 증가시키면서 변화하는 전압강하는 Hewlett Packard 3457A multimeter를 이용하여 측정하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치를 보여 주고 있다.

2.2. 보정방법의 기본원리

MT(middle tension)나 CT(compact tension) 표준시편에 대해서는 균열길이와 EPD 변화간의 관계식이 이미 유도되어 있다.<sup>1-4</sup> 이러한 관계식은 균열이 진전되면서 측정된 전압(V)을 초기균열에 대한 전압값(V<sub>0</sub>)으로 나누어 준 값과 초기균열(a<sub>0</sub>)의 함수로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$a = f(V/V_0, a_0) \tag{1}$$

- V: 균열 진전에 따라 측정된 전압값
- V<sub>0</sub>: 초기 균열에 대한 전압값
- a: 균열 길이
- a<sub>0</sub>: 전압이 V<sub>0</sub>일 때의 균열 길이

일반적으로는 식 (1)은 무차원 계수인 a/W(W는 시편폭)를 V/V<sub>0</sub>의 함수로 나타내며, 이러한 관계식은 재료, 시편 두께 및 입력 전류의 크기에 무관하다.

표준형태의 시편에 대해서도 실험적으로 a/W와 V/V<sub>0</sub>간의 관계를 유도해 낼 수 있다. 즉 시편의 균열 길이를 광학적으로 측정하고 그 때의 전압을 측정하여 a/W와 V/V<sub>0</sub>간의 관계를 회귀처리하여 관계식을 유도할 수 있다. 이러한 실험적 보정 방법은 시편의 형상

이 복잡하거나, 입력전류 도선의 위치가 기존의 관계식을 사용할 수 없는 위치에 장착될 경우에 주로 사용한다.

일반적으로 MT 시편의 경우에는 다음과 같은 관계식이 해석적인 방법에 의해 Johnson에 의해 유도되어 있다.<sup>1</sup>

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\cosh^{-1}[\cosh(\pi y/2W) / \cos(\pi a/2W)]}{\cosh^{-1}[\cosh(\pi y/2W) / \cos(\pi a_0/2W)]} \tag{2}$$

여기서

- a: 균열 길이
- a<sub>0</sub>: 초기 균열 길이
- V: 측정된 전압값
- V<sub>0</sub>: 초기 균열에 대한 전압값
- y: 전압 측정 단자간 거리의 반
- W: 시편폭의 반

식 (2)를 다시 균열길이 a에 관하여 풀면 다음과 같다.

$$a = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cosh\{(V/V_0) \cosh^{-1}[\pi y/2W] / \cos(\pi a_0/2W)\}} \tag{3}$$

CT 시편에 대한 EPD와 균열 길이와의 관계는 일반적으로 아래와 같이 나타낸다.

$$V/V_0 = 0.5766 + 1.9169(a/W) - 1.0712(a/W)^2 + 1.6898(a/W)^3 \tag{4}$$

여기서:

- a: 균열 길이
- V: 측정된 전압값
- V<sub>0</sub>: 초기균열 a<sub>0</sub>=0.241일 때의 전압값
- W: 시편 너비

식 (4)를 균열 길이비 a/W로 나타내면 아래와 같다.

$$a/W = -0.5051 + 0.8857(V/V_0) - 0.1398(V/V_0)^2 + 0.0002398((V/V_0)^3) \tag{5}$$

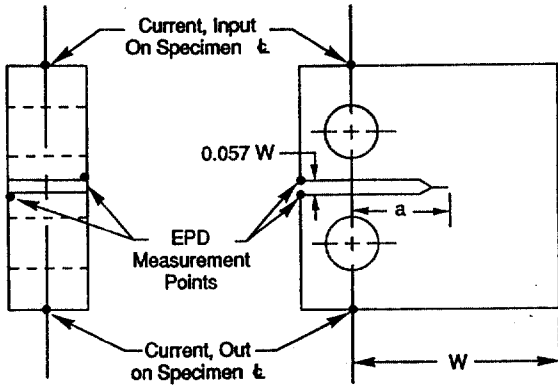


Fig. 3. Schematic illustration of CT specimen with input and output lead wires for current and potential measurement.

위의 관계식은 Hicks와 Pickard가 공동으로 유한요소해석법을 이용하여 얻은 관계식으로,  $a/W$  범위가 0.24에서 0.7 사이에서 실험적으로 구해진 결과와 매우 잘 일치한다. 한편, 식 (5)는 ASTM-E647 규격에서 CT 시편의 보정 곡선으로 채택하고 있다. Fig. 3은 식 (4)와 (5)를 사용하기 위한 CT 시편과 입력전류 도선 및 출력전압 도선의 위치를 보여주고 있다. 주의해야 할 것은 식 (4)와 (5)는 도선의 위치가 Fig. 3과 같을 때만이 적용되며, 기준 전압  $V_0$ 는  $a/W=0.241$ 에서 측정된 전압값이 된다. 실제 실험에서는 정확히  $a/W=0.241$ 인 위치에서 전압을 측정하기가 어려우므로, 어떤 알려진  $a/W$ 에서 전압을 측정하고  $a/W=0.241$ 에서의 전압값을 식 (4)를 이용하여 계산하여 이 때 값을  $V_0$ 값으로 한다.

### 3. 결과 및 고찰

출력전압 도선의 위치는 일반적으로 균열길이의 변화에 따른 민감도와 각각 시편에 따라 발생할 수 있는 약간의 위치 변화에 따른 오차를 고려하여 절충하여 결정한다. 즉 균열선단에 도선이 위치하게 되면, 균열길이 변화에 따른 민감도는 우수하나, 균열선단에서의 전기장은 매우 불균일하므로 시편에 따라 도선의 위치가 조금만 변화하여도 같은 균열길이에 대해 측정된 EPD값은 매우 큰 차이를 보일 수 있다.<sup>3</sup> 이는 일반적으로 균열길이 변화에 민감한 EPD 도선의 위치가 도선 위치변화에 따른 민감도도 크게 나타나기 때문이다. Fig. 4, 5, 6은 입력전류 도선의 위치가 각각 A, B,

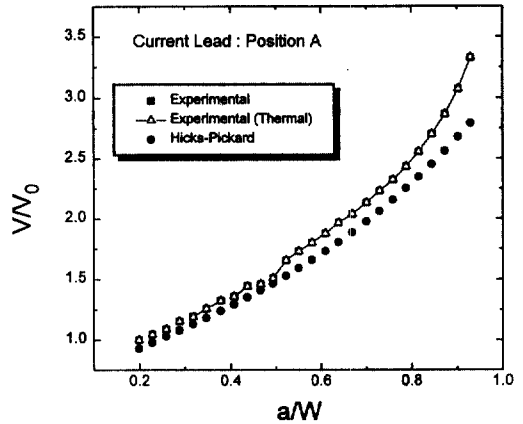


Fig. 4.  $A/W$  vs.  $V/V_0$  data obtained by experiment and Hicks-Pickard equation, respectively, for input current lead wire placed at position A.

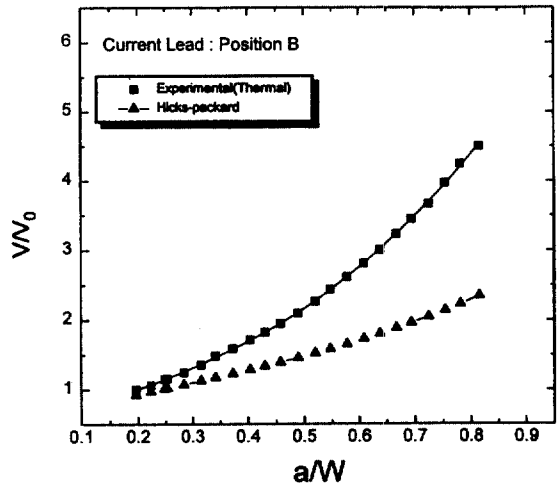


Fig. 5.  $A/W$  vs.  $V/V_0$  data obtained by experiment and Hicks-Pickard equation, respectively, for input current lead wire placed at position B.

C일 때 특정  $V/V_0$ 값에서 실험적으로 측정된  $a/W$ 값과 Hicks-Pickard 관계식을 이용한  $a/W$ 값간의 관계를 보여 주고 있다. 실험적 보정곡선은 증가된 각각의 균열위치에서의 전압강하를 측정하여  $a/W$ 에 대해  $V/V_0$ 간의 관계로 나타내었다. 여기서 균열( $a$ )은 시편의 폭으로 나누어 준 비율로 나타내었고 각 균열의 위치에서 나온 실제 전압은 초기균열에서 측정된 전압으로 나눈 비율로 나타내었다. 또한 본 실험에서는 열유도 EMF를 보정하기 위하여, 통전시 측정된 전압강하값에서 정전류를 끈 상태에서의 전압값을 빼줌으로써 보정하였다. 여기서 열유도 EMF란 전압강하 측정

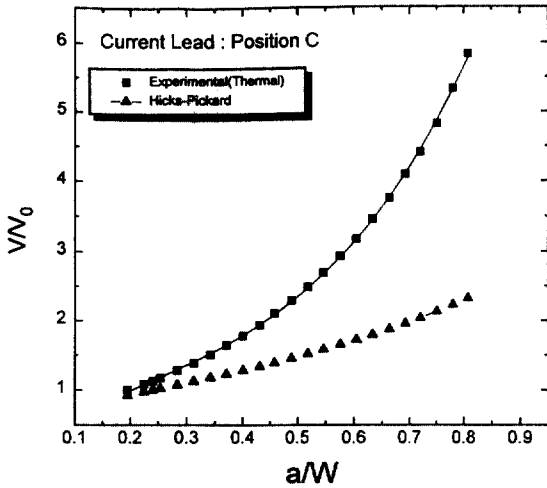


Fig. 6. A/W vs.  $V/V_0$  data obtained by experiment and Hicks-Pickard equation, respectively, for input current lead wire placed at position C.

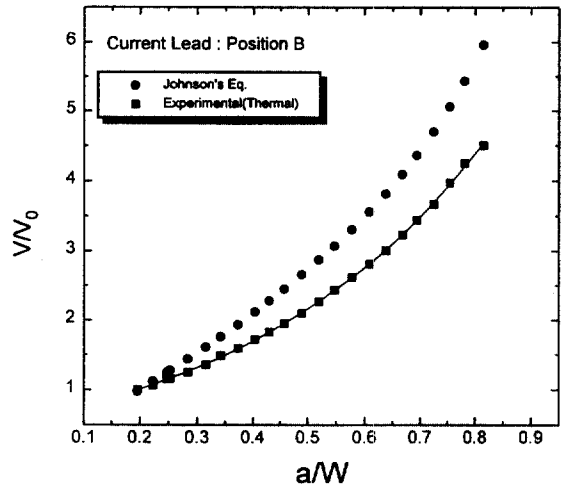


Fig. 7. A/W vs.  $V/V_0$  data obtained by experiment and Johnson's equation, respectively, for input current lead wire placed at position B.

시 시편에 흐르는 전기장에 의해서만 아니라 열전기적 (thermoelectric) 효과에 의해 DC 전압이 발생할 수 있는데, 이러한 열유도 EMF(thermally induced EMF)는 전체 측정된 전압의 상당부분을 차지할 수 있으며, 이를 보정해 주는 것이 균열길이 측정 정확도를 높이는 데 매우 중요한 것으로 알려져 있다. 한편, 전류를 흘려보내기 전후 약 5분 정도의 안정화 시간을 둔 이후 전압강하를 측정하였다. Fig. 4에서는 열유도 EMF를 보정해 주지 않은  $V/V_0$ 값도 함께 나타내었다. 본 실험의 경우 비교적 짧은 시간(약 24시간)에 실험을 마침으로써 열유도 EMF의 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 피로실험과 같이 장시간의 실험시간을 요구하는 경우에는 열유도 EMF를 보정해 줌으로써 더욱 정확한 균열길이를 보정할 수 있는 것으로 알려져 있다.

도선위치에 따른 Hicks-Pickard 관계식의 정확성을 살펴보면 도선의 위치가 A일 때 측정된 균열길이가 가장 잘 일치하였으며,  $a/W$ 가 0.2에서 0.7 사이에서 특히 잘 일치함을 알 수 있다. 도선의 위치가 B와 C일 경우에는 일반적으로  $a/W$ 가 0.3미만일 경우에는 비교적 잘 일치하나 그 이상의 균열길이에서는 실제 균열길이와 Hicks-Pickard 관계식을 이용해 구한 균열길이의 차이가 현저함을 알 수 있다. 한편, Johnson 관계식의 경우는 3가지 도선위치 모두 실제 측정된 균열길이의 큰 차이를 보였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 위

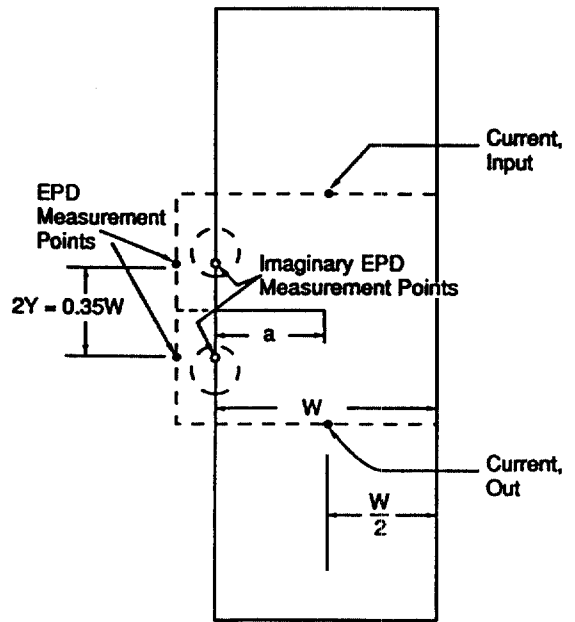


Fig. 8. Representation of CT specimen using Johnson's equation.

치에 따라서는 위치 B가 실제 균열길이와 Johnson 관계식에 의한 균열길이가 가장 근접하였으나 이 위치에서도 실제 측정된 균열길이의 약 20% 이상의 오차를 나타내었다. 실제로 Johnson 관계식의 경우는 MT 시편에 적용하기 위해 유한요소해석법을 이용하여 도출

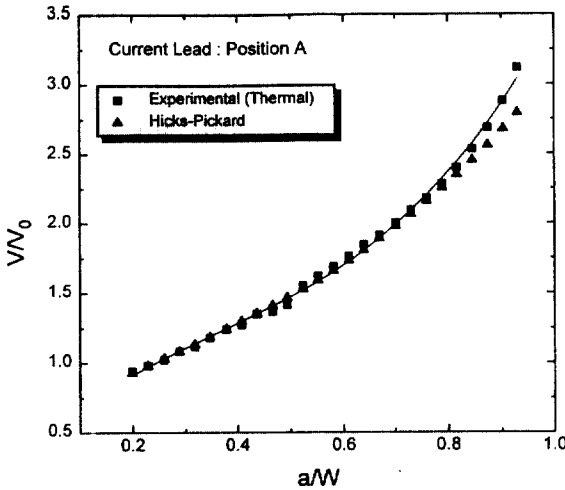


Fig. 9.  $a/W$  vs.  $V/V_0$  data obtained by Hicks-Pickard equation for input current lead wire placed at position A.  $V_0$  was a calculated value for  $a/W=0.241$ .

된 관계식으로 CT 시편에 적용되기에는 어려운 것으로 결론지을 수 있다. 실제로 Johnson 관계식을 CT 시편에 적용하기 위해서는 Fig. 8에서 보는 것과 같은 도선 위치를 사용하여야 한다. 본 실험의 경우에 위치 B가 Fig. 8의 위치에 가장 접근하며, 결과적으로 가장 근사한 균열길이를 얻을 수 있었다.

Fig. 9는 입력전류 도선위치 A에서 초기전압  $V_0$ 를 실제 초기균열  $a/W=0.20$ 에서 측정된 값을 사용하지 않고, 식 (4)를 이용하여  $a/W=0.241$ 에서 계산된  $V$  값을  $V_0$ 로 사용하여 Hicks-Pickard 관계식에 대입하여 얻은 값과, 실제 측정된  $a/W$ 값을 비교하였다. Fig. 4와 9를 비교하면 초기전압  $V_0$ 를  $a/W=0.241$ 에서의 값이 아닌 다른 값을  $V_0$ 로 사용하였을 경우는 실제 균열길이와 보정곡선을 이용한 균열길이간에 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. 따라서 Hicks-Pickard 관계식을 사용함에 있어서, 초기전압을  $a/W=0.241$ 에서의 값을 사용하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

DCPD법 사용자 외부의 온도 변화에 따라 측정 전압은 상대적으로 변화하게 되고, 잘못된 균열길이를 나타낼 수 있다. 예를 들어 알루미늄 합금에서 온도가  $3^{\circ}\text{C}$  변함에 따라 재료의 전기저항 변화에 따른 측정 전압은 약 1% 정도 변화할 수 있다. 또한 전압 증폭기나 power supply의 gain의 변화에 의해 측정 전압이 영향을 받을 수 있다. 이러한 영향을 보정해 주기 위하여 균열길이에 영향을 받지 않는 어떤 위치에서 측정된

전압값으로 실제 균열선단에서 측정된 전압값을 보정하여 줌으로써 정전류 변화 및 시편의 온도 변화에 따른 전압 변화를 보정하여 줄 수 있다. 이렇게 얻어진 기준 전압으로 실제 측정 전압을 보정할 경우에는, 실제 전압을  $V_{ref}/V_{ref,0}$ 의 비로 나누어 준다. 여기서  $V_{ref}$ 는 실제 전압이 측정될 때에 측정된 기준 전압이며,  $V_{ref,0}$ 는  $V_0$ 에서의 기준 전압을 각각 말한다. 이상적으로는 기준 전압은 균열길이의 변화에 영향을 받지 않는 위치에서 측정하여야 한다. 실제적으로는 그러나 균열길이의 변화에 영향을 받지 않는 위치에서 기준 전압을 측정하는 것이 항상 가능하지는 않다. 본 실험에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일반적으로 CT 시편에 사용되는 기준 전압 위치를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 기준 전압 측정 위치는 입력도선의 위치에 무관하게 균열증가에 크게 영향을 받았다. 즉 도선위치 A의 경우, 초기 균열에서  $a/W=0.8$ 까지  $V_{ref}$ 를 측정된 결과 약 400%의 전압증가를 나타내었다.

결론적으로 본 실험에서 사용한 기준 전압 측정 위치는 입력전류 도선위치 A와 B를 사용하기에는 부적절함을 알 수 있었다. 이것은 입력전류의 도선위치가 기준전압의 측정 지점에서 멀리 떨어져 있어 작은 전압 강하값을 얻게 됨으로써, 미소 전압 변화에 따른 오차가 상대적으로 크게 작용하게 된다. 한편, 입력도선의 위치가 A에서 C로, 즉 균열선단과 멀어지면서 기준 전압 측정 위치와 가까워짐에 따라, 균열에 대한 영향이 줄어들고 적절한 기준전압강하값을 얻어 미소 전압 변화에 의한 오차의 영향이 작아지는 것으로 보인다. 위치 B와 C의 경우, 초기 균열에서  $a/W=0.8$ 까지 균열 성장시 측정된  $V_{ref}$ 가 각각 2.3배와 1.3배로 기준 전압이 균열 성장에 적게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 결론적으로 위치 A와 B의 입력도선 위치에서 측정된 기준 전압으로는 측정 전압을 보정할 수가 없었다. 한편, 위치 C의 경우는 기준 전압으로 측정 전압을 보정할 수는 있었으나, 보정한 후의 값에 대한 신뢰성이 매우 의심스럽다. 따라서, 위치 A를 입력전류 위치로 하여, Hicks-Pickard 관계식을 사용하고자 할 때는, 동일 환경에서 동일 전류흐름하에 놓인 동일 재료의 시편을 실제 실험용 시편과 직렬 연결하여 기준 전압을 측정하거나, 동일 전류흐름하에 shunt resistor를 연결하여 기준 전압을 측정하는 것이 바람직한 것으로 보인다.

#### 4. 결론

본 실험에서는 입력전류 도선의 위치를 각각 하중선,  $a/W=0.5$  및  $a/W=0.8$ 로 하여 균열을 증가시키면서 측정된 전압강하값으로 Hicks-Pickard 관계식 및 Johnson 관계식을 이용하여 계산한 균열길이와 측정된 균열길이를 비교함으로써 최적의 입력도선 위치를 선정하고자 하였다. 본 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 입력전류도선의 위치가 하중선에 위치할 때, Hicks-Pickard 관계식은 매우 정확하게  $a/w$ 와  $V/V_0$ 간의 관계를 나타내 주었다.
- 2) 이 때  $V_0$ 값을  $a/W=0.241$ 에서 계산된 값으로 보정함으로써 Hicks-Pickard 관계식의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있었다.
- 3) 본 실험의 경우 비교적 짧은 시간에 실험을 마침으로써 열유도 EMF의 영향은 크지 않았다.

- 4) CT 시편에서 기준 전압을 사용할 때, 일반적으로 사용되는 위치인 시편 끝 하단에서 기준 전압을 측정한 경우, 기준 전압이 균열성장에 크게 영향을 받았으며, 입력도선이 하중선에 위치할 때 기준 전압으로 보정한 전압값은 매우 큰 오차를 나타내었다.

#### 참고문헌

1. R. P. Gangloff, *Fat. of Eng. Mats. and Strs.*, 4(1), 15-33(1981).
2. G. Clark and J. F. Knott, *J. Mech. Phys. Solids*, 23, 265-276(1975).
3. R. O. Ritchie and K. J. Bathe, *Int. J. of Fracture*, 15(1), 47-55(1979).
4. H. H. Johnson, *Materials Research and Standards*, September, 442-445 (1965).
5. ASTM-E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", 1988.