

균열을 가진 상자성체의 교류전위차에 미치는 하중의 영향 Loading Effect on ACPD of a Crack in Paramagnetic Material

이 정 회*
 Jeong-Hee Lee*

초 록 교류전위차법(alternating current potential drop: ACPD)을 이용하여 이차원 표면균열을 갖고 있는 상자성체(paramagnetic material)의 모드 I (opening mode) 응력확대계수(K_I)를 실험적으로 평가하기 위하여 하중에 따른 교류전위차 변화(change in ACPD)를 연구하였다. 아울러 하중에 의한 전위차 변화의 원인 그리고 전위차 변화에 미치는 자속(magnetic flux), 탈자(demagnetization) 및 균열길이의 영향을 연구하였다. 상자성체의 교류전위차는 인장하중을 증가시킬수록 선형적으로 감소하였다. 전위차 감소의 원인은 균열선단 주위의 도전율(conductivity)이 인장하중의 증가에 따라 증가하고 이는 시험편의 저항과 내부 인덕턴스를 감소시키기 때문이다. 도전율의 변화는 균열선단 주변의 응력상태에 의존하기 때문에 일정 K_I 변화에 따른 전위차 변화량은 균열길이에 의존하지 않는다. 하중에 의한 전위차 변화량은 시험편 주위의 자속의 유무에 영향을 받지 않지만 탈자의 유무에는 영향을 받지 않는다.

Abstract In order to determine the mode I stress intensity factor (K_I) by means of the alternating current potential drop(ACPD) technique, the change in potential drop due to load for a paramagnetic material containing a two-dimensional surface crack was examined. The cause of the change in potential drop and the effects of the magnetic flux and the demagnetization on the change in potential drop were clarified by using the measuring systems with and without removing the magnetic flux from the circumference of the specimen. The change in potential drop was linearly decreased with increasing the tensile load and was caused by the change in conductivity near the crack tip. The reason of decreasing the change in potential drop with increasing the tensile load was that the increase of the conductivity near the crack tip due to the tensile load caused the decreases of the resistance and internal inductance of the specimen. The relationship between the change in potential drop and the change in K_I was not affected by demagnetization and was independent of the crack length.

1. 서 론

기계구조물의 건전성을 선형파괴역학을 기초로 평가하려고 할 때 모드 I 응력확대계수를 알면 용이하다. 기계구조물의 형태 및 하중조건이 간단한 경우 응력확대계수는 이론적으로도 쉽게 구할 수 있다. 그러나 기계구조물의 형태 또는 하중조건이 복잡하면 경계조건의 모델화가 어려워 응력확대계수의 이론적 계산이 항상

용이한 것만은 아니다. 최근 Saka(1)는 고주파의 교류전류가 재료의 표면과 균열면을 따라서 흐른다는 표피효과(the skin effect)를 이용하여, 응력의 변화에 따라 변하는 교류전위차를 측정하여 실험적으로 응력확대계수를 구하는 방법을 제안하였다. 이 방법의 가장 큰 장점은 응력확대계수를 재료의 표면에서 계측할 수 있다는 점이다.

교류전위차법에 의한 응력확대계수의 계측에 있어 하

중에 따른 전위차 변화가 전류 입출력선과 전위차 계측선의 상대적 위치에 크게 의존하고 있음이 밝혀졌다 [2]. 이것은 전위차 계측선과 시험편의 표면에 의해 형성된 폐곡선(closed surface)을 통과하는 자속의 시간적 변화에 의한 유도기전력(induced electromotive force)이 전위차 변화에 크게 영향을 미치고 있음을 의미한다. 이정회[3,4]는 강자성체(ferromagnetic material)의 용력확대계수 결정을 위하여 자속에 의한 유도기전력의 영향을 받지 않는 계측계를 고안하고 이를 이용하여 하중에 의한 전위차 변화의 원인, 전위차 변화에 미치는 자속의 영향 그리고 하중 이력이나 잔류응력에 의한 강자성체의 국부적인 자화(magnetization)를 제거하기 위해 실시하는 탈자기 전위차 변화에 미치는 영향을 연구하였다. 아울러 용력 확대계수는 균열길이와 함수관계를 가지고 있으므로 균열길이가 전위차 변화에 미치는 영향을 연구하였다.

그러나 강자성체와 함께 기계구조용 재료로 널리 사용되고 있는 상자성체의 용력확대계수를 교류전위차법을 이용하여 계측하기 위한 하중에 따른 전위차 변화에 대한 연구는 아직까지 수행되지 않았다. 그리고 하중에 따른 전위차 변화의 원인과 전위차 변화에 미치는 자속의 영향, 탈자의 영향 및 균열길이의 영향 등에 관한 정량적 연구도 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 시험편 주위의 자속을 전부 제거한 계측계와 자속을 제거하지 않은 계측계를 이용하여 하중에 의한 상자성체의 전위차 변화의 원인과 전위차 변화에 미치는 자속, 탈자 및 균열길이의 영향을 연구하였다.

2. 이 론

시험편 주위에 자속이 존재하지 않는 경우 코일 사이의 상호인덕턴스(mutual inductance)를 무시할 수 있으므로 시험편과 계측계를 Fig. 1과 같은 전기회로로 모델화 할 수 있다. 여기서 I 는 총전류, Z 는 전위차 계측에 사용된 lock-in amplifier의 임피던스(impedance), L_2 는 전위차 계측선의 인덕턴스(inductance), I_1 은 Z 쪽으로 흐르는 전류, L_3 은 전류 입출력선의 인덕턴스, 그리고 R 과 L_i 는 각각 시험편의 저항과 내부 인덕턴스(internal inductance)이다. Fig. 1의 점 A와 B사이에는 병렬회로이므로

$$ZI_1 + j\omega L_2 I_1 = R(I - I_1) + j\omega L_i(I - I_1) \dots\dots\dots (1)$$

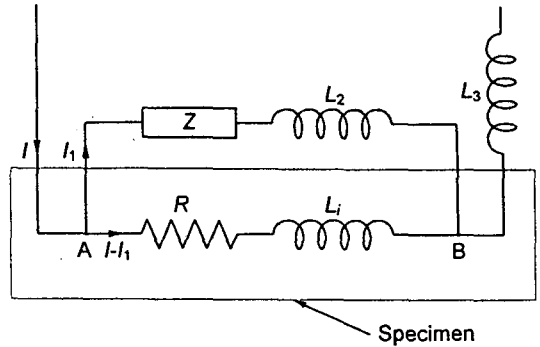


Fig. 1 Electric circuit model for the case without magnetic flux in the air

을 얻을 수 있으며, 여기서 ω 는 교류전류의 각주파수이다. lock-in amplifier에 계측된 전위차 E 는

$$|E| = Z |I_1| \dots\dots\dots (2)$$

이다. lock-in amplifier의 임피던스는 시험편의 임피던스보다 대단히 크기 때문에 식 (1)과 (2)로부터 전위차는

$$|E| = \sqrt{R^2 + (\omega L_i)^2} |I| \dots\dots\dots (3)$$

이 된다. 하중에 의한 전위차 변화는 식 (3)에서 교류전류의 크기 및 각 주파수가 일정한 경우 R 과 L_i 의 변화에 의한 것이라고 가정할 수 있다.

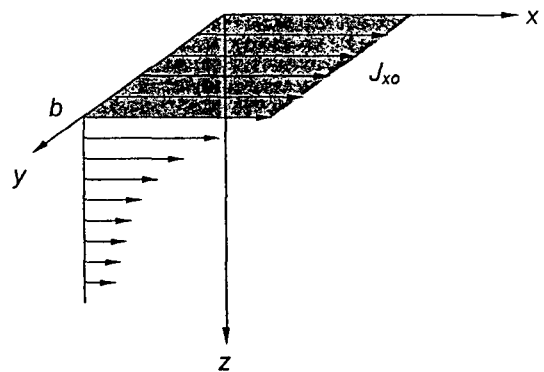


Fig. 2 Distribution of the current in a good conductor

고주파의 교류전류가 흐르는 도체의 \$L_i\$ 과 \$R\$ 을 다음과 같이 구할 수 있다. 폭이 \$b\$ 인 도체에 교류전류가 표면에서 표피두께 사이에 Fig. 2와 같이 균일하게 흐른다고 할 때 전체 전류는[5]

$$I = \int_0^{\infty} \int_0^b J_x dy dz \dots\dots\dots (4)$$

가 되고, 전류밀도의 \$x\$ 성분 \$J_x\$ 를 식 (5)와 같이 가정한다.

$$J_x = J_{x0} e^{-z/\delta} \cos(\omega t - \frac{z}{\delta}) \dots\dots\dots (5)$$

여기서 \$J_{x0}\$ 는 \$J_x\$ 의 크기, (\$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}\$)는 표피두께, \$f\$ 는 전류의 주파수, \$\mu\$ 는 투자율, \$\sigma\$ 는 도전율 그리고 \$t\$ 는 시간이다. 식 (4)와 (5)로부터 전체 전류는

$$I = \frac{J_{x0} b \delta}{\sqrt{2}} \cos(\omega t - \frac{\pi}{4}) = I_0 \cos(\omega t - \frac{\pi}{4}) \dots\dots (6)$$

이다. 전류밀도와 전계 \$E\$ 사이의 관계는

$$J = \sigma E \dots\dots\dots (7)$$

이며, 전계가 \$x\$ 성분인 \$E_x\$ 만 존재한다면 전계는 식 (5)와 (7)로부터 다음의 식으로 표시된다.

$$E_x = E_{x0} e^{-z/\delta} \cos(\omega t - z/\delta) \dots\dots\dots (8)$$

여기서 \$E_{x0}\$ 은 \$E_x\$ 의 크기이다. 그리고 전계와 자계 \$H\$ 의 관계는 Maxwell 방정식인 식 (9)와 같다.

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \dots\dots\dots (9)$$

식 (8)과 (9)로부터 자계의 \$y\$ 성분인 \$H_y\$ 는 식 (10)과 같다.

$$H_y = \frac{\sigma E_{x0} \delta}{\sqrt{2}} e^{-z/\delta} \cos(\omega t - \frac{z}{\delta} - \frac{\pi}{4}) \dots\dots\dots (10)$$

그리고 자계와 자속밀도 \$B\$ 와의 관계는 식 (11)과 같다.

$$B = \mu H \dots\dots\dots (11)$$

두 전위차 측정점 사이의 길이가 \$l\$ 일 때, 길이 \$l\$ 인 시험편 내부에 존재하는 \$y\$ 방향의 자속 \$\Phi_y\$ 는 식 (10)과 (11)로부터

$$\Phi_y = \int_0^{\infty} \int_0^l \mu H_y dx dz = \frac{\mu I_0 l \delta}{\sqrt{2} b} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \dots (12)$$

이다.

저항 \$R\$ 은 Ohm 의 법칙으로부터

$$R = \frac{l}{\sigma S} = \frac{l}{\sigma b \delta} = \sqrt{\pi f} \frac{l \sqrt{\mu}}{b \sqrt{\sigma}} \dots\dots\dots (13)$$

이며, 여기서 \$S\$ 는 전류가 흐르고 있는 도체의 단면적이다. 그리고 내부 인덕턴스 \$L_i\$ 는 식 (6)과 (12)로부터

$$L_i = \frac{|d\phi_y|}{|dI|} = \frac{1}{\sqrt{2\pi f}} \frac{l \sqrt{\mu}}{b \sqrt{\sigma}} \dots\dots\dots (14)$$

와 같이 된다.

하중에 의하여 교류전위차가 변화하고, 시험편의 형상, 전류의 크기 및 각 주파수가 일정하다고 가정할 경우 식 (3), (13) 및 (14)로부터 하중에 따른 교류전위차 변화에 영향을 미칠 수 있는 인자는 전자기 물성치 즉 투자율 \$\mu\$ 및 도전율 \$\sigma\$ 의 변화에 의한 것이라고 할 수 있으므로 이들을 고려해 본다. 상자성체에 있어 하중에 의한 투자율의 변화는 매우 작아 무시할 수 있다 [6]. 그러므로 상자성체의 하중에 의한 교류전위차 변화는 도전율의 변화에 기인한다고 할 수 있다. 알루미늄 등의 많은 상자성체의 도전율은 이축인장응력 (biaxial tensile stress)을 증가할수록 증가한다[7]. 도전율의 증가에 따라 식 (13)과 (14)의 \$R\$ 과 \$L_i\$ 는 모두 감소한다. 따라서 균열을 가진 상자성체에 인장하중을 증가하면 교류전위차는 감소한다.

3. 실험

화학적 조성과 기계적 물성치가 Table 1과 같은 상자성체 알루미늄 합금(JIS H4000 A2017)으로 Fig.

3과 같은 형상의 시험편을 제작하였다. 시험편의 2차원 표면균열은 2mm의 초기 노치팁(initial notch tip)으로부터 3점굽힘(three-point bending)에 의한 피로로 삽입하였다. 이때 사용한 피로주파수는 10Hz, 파형은 사인파(sine wave)이었다. 또 피로시험중 시험편에 가한 최대하중은 응력확대계수의 값으로 13.6 MPa · m^{1/2}이었으며, 응력비(stress ratio)는 0.1이었다. 시험편은 균열길이가 각각 6.1, 10.4 및 12.4mm인 3종류를 준비하였으며, 균열길이는 전위차측정을 모두 끝낸 후 시험편을 파괴하여 측정된 값이다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of A2017

Chemical composition									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr+Ti	Al
0.73	0.31	3.92	0.68	0.54	0.02	0.04	0.02	0.03	93.71
Mechanical properties									
Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Hardness Hv						
349	507	17.5	135						

전위차를 측정하기 위해 1A, 10kHz의 일정한 교류 전류를 function generator와 power amplifier를 사용하여 시험편에 공급하였다. 그리고 lock-in amplifier와 전압계를 사용하여 3점굽힘에 의한 정하중 상태에서 교류전위차를 측정하였다. 이때 3점굽힘시험의 주지 span의 거리는 120mm, 시험편 위의 전류 입출력점 사이의 거리는 60mm 그리고 전위차 측정점 사이의 거리는 20mm이었다.

전위차를 계측하기 위하여 2종류의 계측계를 이용하였다. 이후 이들을 시스템 1과 시스템 2라고 하며, 각각의 개략도는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 시스템 1은

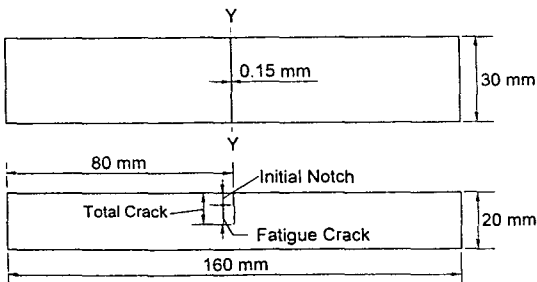


Fig. 3 Geometry of specimen

시험편 주위의 자속을 제거하기 위해 동축선의 특성을 이용하여 제작되었다. 구리상자와 시험편을 전선(wire)으로 연결하여 구리상자와 시험편에 흐르는 전류의 방향이 서로 반대가 되게 하였다. 구리상자와 연결된 전선의 접합부를 제외한 시험편의 모든 표면을 절연테이프로 구리상자와 절연하였다. 이상적인 동축선의 내부 도체와 외부 도체에 흐르는 전류의 최대치(amplitude) 및 위상(phase)은 동일하고 그 흐르는 방향만 서로 반대이다. 시스템 1의 경우 전류는 시험편의 표면을 따라 흐른 후 구리상자로 되돌아 흐르기 때문에 시험편과 구리상자를 흐르는 전류의 위상이 정확히 동일하지는 않다. 그러나 이론적으로 시스템 1에 흐르는 10kHz의 교류전류가 갖는 파장(wavelength)은 19km이므로 Fig. 4에 표시된 점 M에서의 전류와 점 N에서의 전류의 위상차는 거의 없어 구리상자의 외부에는 자속이 거의 존재하지 않는다[3]. 구리상자에 의한 자속 제거효과를 검증하기 위하여 gauss meter로 시험편의 표면으로부터 6mm 떨어진 지점의 자속밀도를 측정하였다. 구리상자를 사용할 경우 자속밀도는 60nT이며, 이는 구리상자를 사용하지 않을 경우의 1/110으로 무시할 만큼 작은 양이었다. 구리상자는 시험편에 하중을 가할 때에도 하중의 영향을 전혀 받지 않도록 고안되었다. 시스템 1의 결과를 공기중의 자속을 제거하지 않은 다른 시스템에서 얻은 것과 비교하기 위해 구리상자를 사용하지 않은 시스템 2를 사용하였으며, 시스템 2에 유도되는 기전력의 양은 1.6mV이었다. 시스템 2는 교류전위차 측정의 재현성을 높이기 위하여 전류공급선과 전위차 계측선을 합성수지판에 고정시켰다. 전위차 변화량의 오차범위는 측정된 하중범위 내에서 5% 미만이었다.

탈자는 Fig. 3의 Y-Y 방향으로 1.6mm의 전선을 100회 감아서 만든 전자석을 이용하여 수행되었다. 전

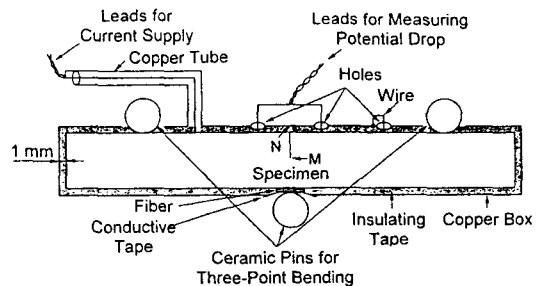


Fig. 4 Schematic diagram of system 1

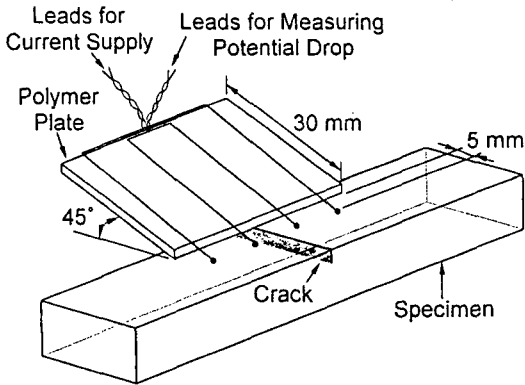


Fig. 5 Diagram showing system 2

자석에 처음 15A-20V의 교류전류를 공급한 후 이를 0까지 천천히 줄이면서 시험편을 탈자하였다(6).

각 시스템에 대하여 Table 2에 표시한 4 종류의 시험을 수행하였으며, 이들을 각각 Case A, Case B, Case C 및 Case D라고 한다. Case A와 Case B는 각각 탈자하지 않은 시험편에 하중을 증가와 감소를 하면서 교류전위차 변화를 측정하였다. 하중의 증가 및 감소는 초기하중으로부터 시작되었으며, 초기하중의 K_I 값(K_{I0})은 Table 3과 같다. 하중 증가시의 초기하중은 loading fixture위에 시험편을 고정시키기 위하여 가했다. 한편 Case C와 Case D는 각각 탈자한 시험편에 하중을 증가와 감소를 하면서 교류전위차 변화를 측정하였다. 시험편의 탈자는 초기하중이 시험편에 가해진 상태에서만 수행되었다. 교류전위차의 측정은 실온에서 10 단계의 다른 정하중 하에서 수행되었다. 교류

Table 2 Four kinds of experiments

Case	Specimen	Loading
A	Not demagnetized	Increasing
B	Not demagnetized	Decreasing
C	Demagnetized	Increasing
D	Demagnetized	Decreasing

Table 3 Initial load, K_{I0} , used

Total crack length(mm)	K_{I0} MPa · m ^{1/2}	
	Increasing load	Decreasing load
6.1	0.58	11.1
10.4	0.66	12.4
12.8	0.60	11.2

전위차 변화를 측정하기 위해 시험편에 가한 최대하중의 K_I 값을 시험편에 피로균열을 삽입할 때 사용한 최대하중의 K_I 값보다 작다.

4. 결과

4.1. 자속의 효과

Case A 및 Case B의 교류전위차 변화량은 고려중의 하중에서의 교류전위차로부터 Case A의 초기하중에서의 교류전위차를 뺀 값이며, Case C 및 Case D의 교류전위차 변화량은 고려중의 하중에서의 교류전위차로부터 초기하중에서의 교류전위차를 뺀 값이다. Fig. 6은 실험결과의 대표로 균열길이가 6.1mm인 시험편의 Case A 및 Case B의 경우 K_I 의 변화에 대한 전위차 변화를 나타낸 그림이며, 시험편에 가해지는 인장하중의 증가 및 감소를 화살표로 표시하였다. 이 그림에서 $\Delta E - K_I$ 의 관계는 모두 선형적이며, 인장하중의 증가에 따라 교류전위차는 감소하였다. 시스템 1의 경우 시험편의 주위에 자속이 존재하지 않을 경우에도 하중에 의하여 전위차는 변화하였다. 시스템 1과 시스템 2로 얻은 결과의 차는 유도기전력의 변화에 의한 것으로 전위차 변화는 계측계에 유도되는 기전력에 의존함

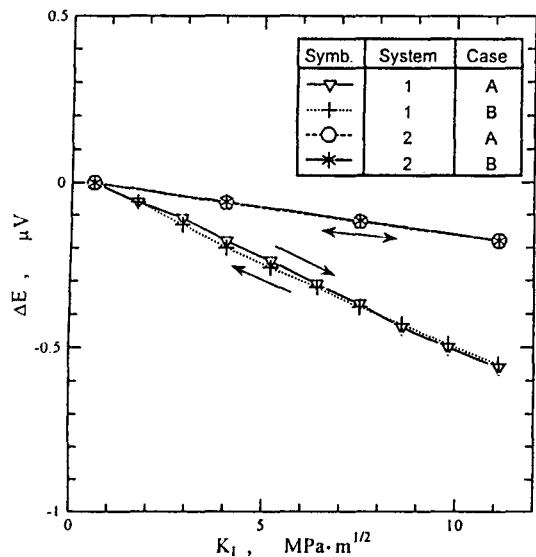


Fig. 6 Change in potential drop with that in K_I for not demagnetized specimen with total crack length of 6.1mm

을 알 수 있다.

시스템 1에서 얻은 결과는 전류공급선과 전위차 계측선의 상대적 위치에 관계없이 항상 일정하므로 응력확대계수를 계측하기 위하여 교류전위차법을 실제 기계구조물에 적용할 때 기초가 된다. 시스템 1과 2의 Case A의 경우 단위증가의 K_I 에 의한 전위차 변화량은 각각 -0.053 과 $-0.017 \mu V/(MPa \cdot m^{1/2})$ 이다.

4.2. 탈자의 효과

Fig. 7은 실험결과에의 대표로 시스템 1에서 균열길이가 6.1mm인 시험편의 Case C와 Case D의 경우 K_I 의 변화에 대한 교류전위차 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 7과 Fig. 6을 비교해보면 하중에 의한 교류전위차 변화 탈자에 영향을 전혀 받지 않고 있다. 따라서 상자성체의 하중에 의한 교류전위차 변화는 자화와 관계가 없음을 알 수 있다.

4.3. 균열 길이의 효과

전위차 변화에 대한 균열길이의 영향을 평가하기 위하여 각각 다른 균열길이를 가진 3종류의 시험편을 사용하여 얻은 결과의 일부는 Fig. 8과 같으며, 이 그림

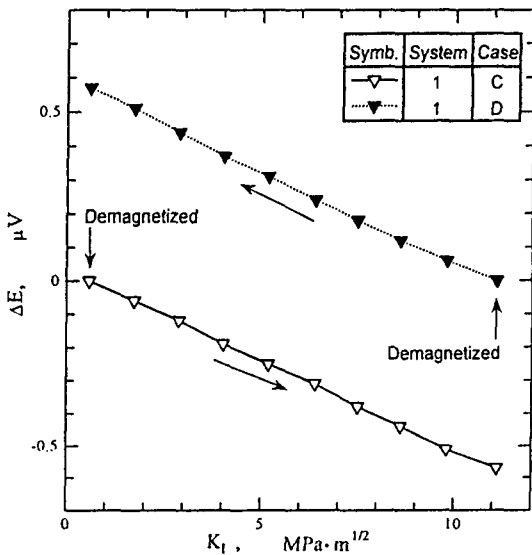


Fig. 7 Change in potential drop with that in K_I measured by SYSTEM 1 for demagnetized specimen with total crack length of 6.1mm

의 횡축의 양 $K_I - K_{II}$ 는 서로 다른 K_{II} 값에서 얻은 결과를 동일한 점에서 시작하도록 결과를 정리하기 위하여 사용하였다. 그림에서 동일한 계측계를 사용하여 일정 K_I 변화에 의한 전위차 변화량은 균열길이에 의존하지 않음을 알 수 있다.

5. 고 찰

Fig. 6의 실험결과에서 시험편 외부에 자속이 존재하지 않을 경우에도 상자성체의 교류전위차는 하중에 의하여 변화하였으며, 인장하중을 증가할수록 감소하였다. 시험편 외부에 자속이 존재하지 않을 경우에도 전위차가 변화한 이유는 이론부분에서 언급한 바와 같이 전위차 변화는 시험편의 균열선단 부근의 변형률이 하중변화에 따라 변화하여 전기물성치인 도전율을 변화시키므로써 시험편의 저항과 내부 인덕턴스가 변화하여 발생한다고 볼 수 있다. 그리고 실험에서 인장하중을 증가할수록 전위차가 감소한 것은 인장하중을 증가할수록 균열선단의 도전율이 증가하므로 식 (13)과 (14)의 저항과 내부 인덕턴스가 감소하여 식(3)의 전위차가 감소한다는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 이론부분의 계측계에 관한 모델이 유효함을 알 수 있다.

단위 K_I 변화에 대한 전위차 변화량이 균열길이에 의

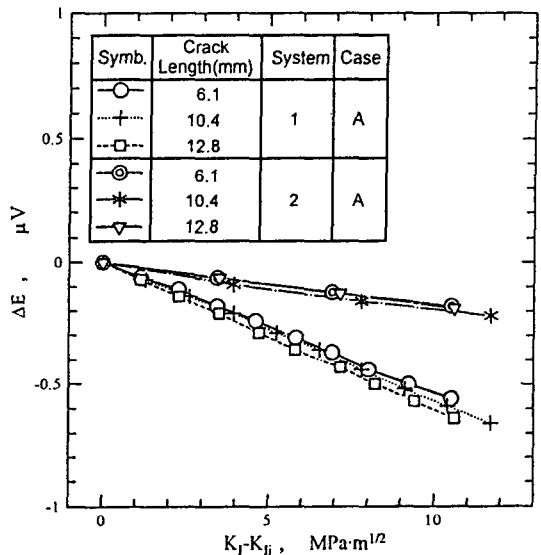


Fig. 8 Change in potential drop with that in K_I for three different values of total crack length in two systems

존하지 않는 이유는 다음과 같다고 생각한다. 재료에 하중을 가하면 균열선단에 응력은 집중되고 변형률도 가장 크다. 균열선단 주위는 변형률에 의하여 도전율이 변화하고, 이에 따라 식 (3)의 시험편의 저항과 내부 인덕턴스가 변화하므로 전위차는 변화한다. 여기서 균열선단의 변형률은 응력확대계수에 의존하기 때문에 단위 K_I 변화에 대한 전위차 변화량은 균열길이에 의존하지 않는다.

6. 결 론

이차원 표면균열을 가진 상자성체의 응력확대계수를 예측하기 위하여 하중에 의한 교류전위차 변화의 원인과 교류전위차 변화에 미치는 자속의 영향, 탈자의 영향 그리고 균열길이의 영향을 연구하였다. 전위차 변화는 시험편 주위의 자속을 제거한 계측계(시스템 1)와 제거하지 않은 계측계(시스템 2)를 사용하여 인장하중을 변화시키면서 측정하였다. 각각의 계측계에서 얻은 단위증가의 K_I 에 의한 전위차 변화량은 -0.053 과 $-0.017 \mu V / (MPa \cdot m^{1/2})$ 으로 하중에 의한 교류전위차 변화가 계측계의 자속에 영향을 받고 있으며, 인장하중을 증가시키면 교류전위차는 선형적으로 감소하였다. 전위차가 하중증가에 따라 감소한 원인은 균열선단 주변의 변형률에 의한 재료의 전기물성치인 도전율이 증가하여 시험편의 저항과 내부 인덕턴스를 감소시키기 때문이다.

전위차 변화와 응력확대계수 변화 사이의 관계는 탈자에 의존하지 않는다. 그리고 일정 K_I 변화에 의한 전위차 변화량은 균열길이에 의존하지 않는다.

후 기

이 연구에 많은 유익한 논의와 지원을 해주신 일본 동북대학 공학부 Abé Hiroyuki 교수 및 Saka Masumi 교수에게 감사드립니다.

참고문헌

[1] M. Saka, M. Nakayama, T. Kaneko and H. Abé, "Measurement of stressintensity factor by means of A-C potential drop technique", *Experimental Mech.*,

Vol. 31, pp. 209-212, (1991)

- [2] T. Kayaba, M. Saka and H. Abé, "Relation between A-C potential drop and measuring system in evaluation of stress-intensity factor (in Japanese)", *Proc. of the 1993 Annual Meeting of JSME/MMD*, 930-73, pp. 35-36 (1993)
- [3] 이정희, "교류전위차법에 의한 강자성체의 응력확대계수 결정," *대한기계학회논문집(A)*, 제 20권, 제 9호, pp. 1392-1399, (1997)
- [4] J. H. Lee, M. Saka and H. Abé, "Loading effect on ACPD of a crack in ferromagnetic material", *Experimental Mech.*, Vol. 37, pp. 132-136, (1997)
- [5] 박한규, 윤상원, "전자기학," pp. 334-372, 회중당, 서울, (1992)
- [6] R. M. Bozorth, "Ferromagnetism", pp. 595-768, D. Van Nostrand Company, New York, (1951)
- [7] F. P. Bundy and H. M. Strong, "Behavior of metals at high temperatures and pressures", *Solid State Physics*, 13, pp. 81-146, (1962)