

응력확대계수측정을 위한 하중에 의한 자속밀도변화의 실험적 연구 Experimental Research of Change in Magnetic Flux Density Due to Load for Measuring K_I

이정희*
Jeong-Hee Lee *

<Abstract>

In order to determine the effective way of measuring the Mode I stress intensity factor, K_I , by means of the alternating current potential drop(ACPD) technique for a material containing a two-dimensional surface crack, the change in magnetic flux density above the cracked specimen surface was studied experimentally. The change in magnetic flux in the air above the cracked specimen made of aluminum alloy is measured by changing the load by four-point bending. The magnetic flux in the air is almost not changed by increasing the load in the specimen. The change in potential drop due to load is not caused by the change in electro-motive force induced in the coiled measuring system. This experimental result agree to the result of theoretical analysis in reference 7).

Key Words : *Magnetic flux density, NDT, ACPD, Stress Intensity factor(K_I)*

1. 서론

기계구조물의 건전성을 선형파괴역학을 기초로 평가하려고 할 때 모드 I 응력확대계수, K_I 을 알면 용이하다. K_I 은 기계구조물의 형태 또는 하중조건이 복잡한 경우에는 경계조건의 모델화가 어려워 이론적 계산이 항상 용이한 것만은 아니다. 따라서 이러한 문제들을 극복

하기위하여 실험적으로 응력확대계수를 구하는 방법이 제시되고 있다¹⁾.

최근 Saka¹⁾는 교류전위차 (alternative current potential drop; ACPD)를 이용하여 실험적으로 K_I 을 구하는 새로운 방법을 제안했다. 이 방법은 고주파의 교류전류가 재료의 표면과 크랙면(crack surface)을 따라서 흐른다는 표피효과(The Skin Effect)를 이용하였다. 고주

* 대구한의대학교 보건학부 산업안전보건전공, 교수, 工博
712-715 경상북도 경산시 유곡동 290
jhlee@dhu.ac.kr

* Dept. of Industrial Safety and Health, Daegu Haany
University,
290, Yugok-dong, Gyeongsang-si, Gyeongsangbuk-do,
712-715, Korea

파 교류전류의 이러한 성질 때문에 응력에 의하여 변하는 교류전위차를 이용하여 응력확대계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d(\Delta E) = a_{EK} dK_I \quad (1)$$

$$K_I = a_{KQ} Q \quad (2)$$

$$d(\Delta E) = a_{EQ} dQ \quad (3)$$

$$a_{EQ} = a_{EK} a_{KQ} \quad (4)$$

여기서 ΔE 는 전위차변화, a_{EQ} , a_{EK} 및 a_{KQ} 는 비례상수, Q 는 하중이다. 먼저 실험실에서 시험편을 사용하여 전위차변화를 측정 후 a_{EK} 를 구한다. 그리고 실험실에서 전위차계측에 사용한 동일 계측계(measuring system)를 사용하여 이미 알고 있는 하중 Q 를 변화하며 실제 구조물의 a_{EQ} 를 구하면, 식 (4)를 이용하여 a_{KQ} 를 알 수 있다. 실제 구조물의 하중에 대한 응력확대계수는 식 (2)로 구할 수 있다. 기존의 방법과 비교할 때 이 방법의 가장 큰 장점은 응력확대계수를 재료의 표면에서 측정할 수 있다는 점이다.

이 정희 등은 교류전위차법을 이용하여 2차원 표면균열을 갖고 있는 강자성체와 상자성체의 시험편에 가하는 하중을 변화시키며 하중에 의한 교류전위차 변화를 계측하였다. 전위차 계측에 사용된 계측계는 계측계에 유도되는 유도기전력을 동축케이블(coaxial line)의 원리를 이용하여 극소화한 계측계와 코일과 같이 계측코일을 감아 유도기전력을 극대화한 계측계로 측정하였다^{2~6)}.

그리고 하중에 의한 교류전위차 변화를 전기회로 이론을 바탕으로 정성적으로 고찰하였으며, 탈자(demagnetization)와 균열길이(Crack length)가 하중에 의한 교류전위차 변화에 미치는 영향을 연구하였다. 참고문헌 [6]에서는 하중에 의한 전위차 변화는 하중에 의하여 균열선단의 전자기 물성치(투자율과 저항)가 변화하고 이로 인하여 시험편의 표면을 흐르는 전류의 흐름이 변화하여 시험편의 외부 인덕턴스와 시험편의 상호인덕턴스를 변화시키기 때문이라 정성적인 가설로 고찰하였다. 그리고 유도기전력을 극대화한 계측계로 하중에 의한 전위차 변화량을 측정할 경우 감도가 우수하여, 교류전위차법으로 응력확대계수를 계측하기 위한 가장 효과적인 방법으로 제안되었다.

교류전위차법으로 2차원 표면균열을 가진 재료의 응력확대계수를 효과적으로 계측할 수 있는 방법을 결정하기 위해 이 정희는 시험편에 하중을 가할 때 균열면사이와 시험편 위 공간상에서의 자속밀도의 변화를 Maxwell 방정식을 이용하여 전자기적인 이론적 해석을 하였다^[7]. 이론해석에서 균열면사이와 시험편 위 공간에서의 자속밀도는 시험편에 하중을 가하더라도 변하지 않았다. 응력확대계수를 효과적으로 계측하기 위해서는 참고문헌 7)의 이론적 해석을 실험적으로 증명할 필요성이 대두되었다.

따라서 본 논문에서는 작은 자속의 변화도 계측할 수 있도록 계측코일을 제작하였다. 계측코일은 시험편이 하중에 의하여 변형하더라도 계측코일과 전류입출력선의 상호위치관계가 변화하지 않도록 전류입출력선 고정치구에 설치하고 하중에 의한 시험편 표면 상부의 자속변화를 계측하여 표면균열 상부 공간상의 자속변화를 실험적으로 연구하였다.

2. 실험

시험에 사용된 시험편은 하중을 가하더라도 투자율(permeability)의 변화가 없고 단지 도전율(conductivity)만 변화하는 상자성체인 알루미늄합금(JIS H4000 A2017)이다. 시험편으로 상자성체를 선택한 이유는 상자성체는 하중을 가하더라도 투자율(permeability)의 변화가 없고 단지 도전율(conductivity)만 변화하기 때문에 참고문헌[7]의 이론을 보다 쉽게 증명하기 위함이다.

초기 시험편의 크기는 200×40×25mm 이며, 시험편 중앙에 두께방향으로 2차원 노치를 4.5 mm 도입한 후 4점굽힘으로 피로균열을 삽입하였다. 그리고 최초 노치가 있던 부분의 5 mm를 기계 가공하여 제거하여 시험편의 두께가 20mm가 되게 하였다. 본 연구에는 균열길이가 각각 4.12 mm와 6.88 mm인 2종류의 시험편을 준비하였다.

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 전류입출력선 고정치구는 Fig.2와 같이 제작하였다. 균열면 상부의 자속의 변화를 측정하기 위한 계측코일의 형상은 Fig. 3과 같으며, 아크릴에

직경 0.25 mm의 동선을 10회 감아 작은 자속의 변화도 계측코일에 유도되는 유도기전력으로 변환하여 계측할 수 있도록 제작하였다. 또 계측코일은 2차원 균열을 가진 시험편의 표면으로부터 1mm 이격시켜 전류입출력선 치구에 고정하여 시험편이 하중에 의하여 변형하더라도 전류입출력선과의 위치관계가 변화하지 않도록 제작하였다. 이는 계측계와 시험편의 상대적 위치 변화에 의한 자속밀도변화를 제거하도록 고안되었다.

실험에는 주파수 10 kHz이고 크기가 1 A인 교류전류를 사용하였다. 시험편에 4점굽힘 (four-points bending)으로 K_I 의 최소치를 $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 에서 최대치 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 의 범위로 하중을 변화시키며, 시험편위 공기중에서 변화하는 자속밀도의 변화를 측정하였다. 4점굽힘 시험의 핀 위치 및 시험편 표면의 전류공급점 및 전위차계측코일의 위치는 Fig. 4와 같다.

3. 실험결과 및 토론

교류전위차법으로 효과적으로 응력확대계수를 계측할 수 있는 계측계를 제작하기 위하여, 균열을 가진 시험편에 있어 하중에 의한 시험편 표면 위 공기중의 자속밀도변화를 실험적으로 연구하였다. 우선 계측계는 작은 자속변

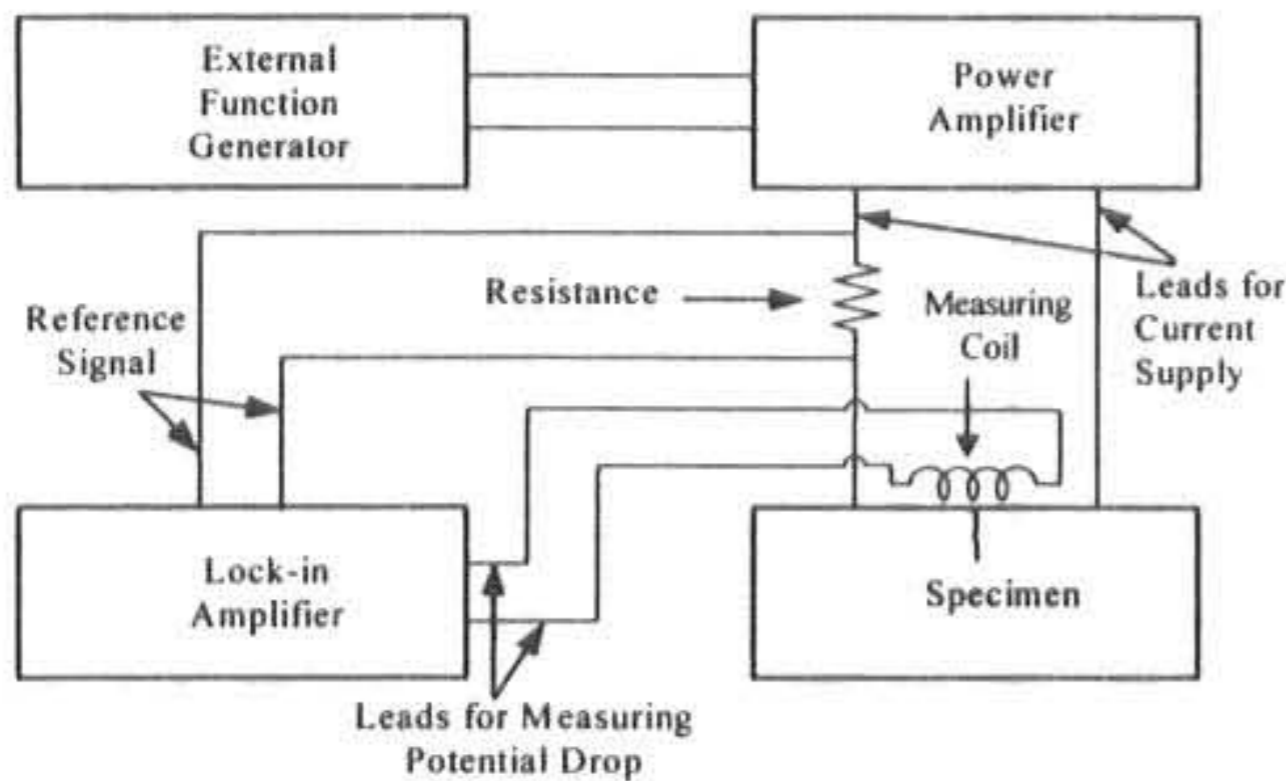


Fig. 1 Experimental setup

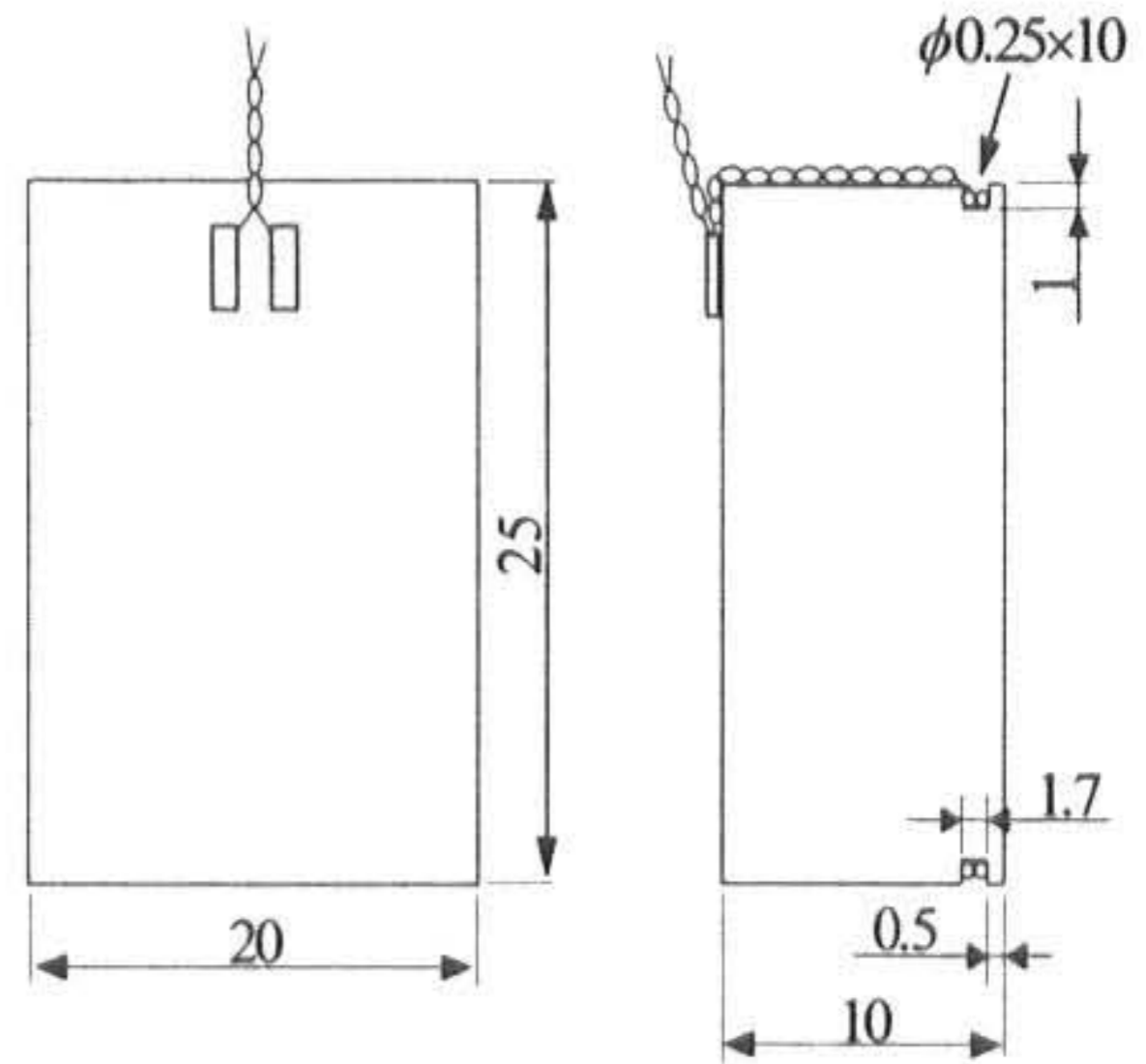


Fig. 3 Measuring coil

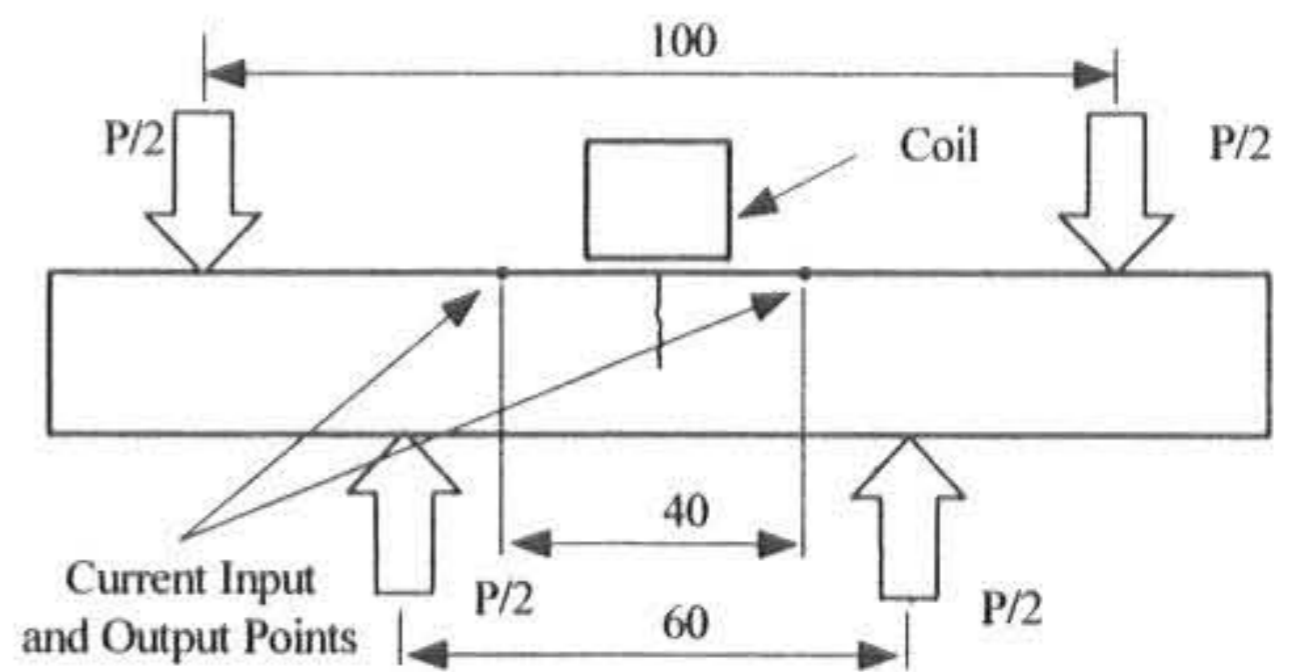


Fig. 4 Arrangement of probes in four-point bending

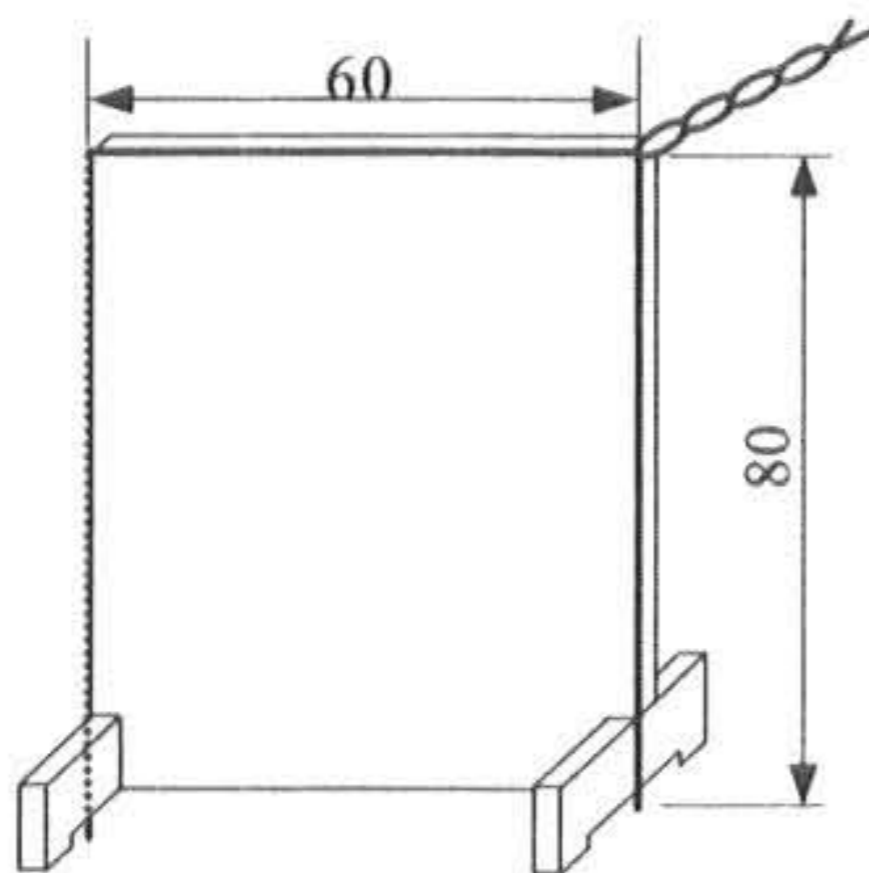


Fig. 2 Leads for current supply and fixture

화를 유도기전력의 변화로 치환하여 계측할 수 있도록 코일형태로 제작하였다. 그리고 시험편에 하중을 가함에 따라 시험편이 변형하더라도 계측코일과 전류입출력선의 상호위치관계가 변화하지 않도록 전류입출력선 고정치구에 고정하여 계측계를 제작하였다. 이렇게 제작된 계측계로 하중에 의하여 변화하는 시험편 표면 상부의 자속밀도변화를 계측하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 그림에서 횡축은 모드I 응력확대계수 K_I 의 증가량, ΔK_I 을 나타

내었으며, 종축은 K_I 의 증가에 따른 전압의 증가량, ΔV , 이다. Fig. 5로부터 하중을 가하여도 전압의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 균열을 가진 시험편에 하중을 가하여도 시험편 균열면 상부 공기중의 자속변화는 거의 없음을 알 수 있다.

위의 실험결과는 Maxwell 방정식과 균열선단과 균열면을 포함한 시험편 위 공간과 시험편 내부와의 경계조건을 이용하여 수행한 참고문헌 [7]의 이론적 해석결과와 일치한다. 따라서 전위차계측선과 계측계 사이 그리고 계측계와 시험편간의 상대적위치가 하중에 의하여 변화하지 않도록 한다면 하중에 의한 교류전위차변화는 시험편의 저항과 시험편의 내부 인덕턴스의 변화에 기인한다고 할 수 있다. 시험편의 저항과 시험편의 내부 인덕턴스의 변화는 균열선단의 변형량에 의존하기 때문에 균열길이에 의존하지 않는다고 할 수 있다.

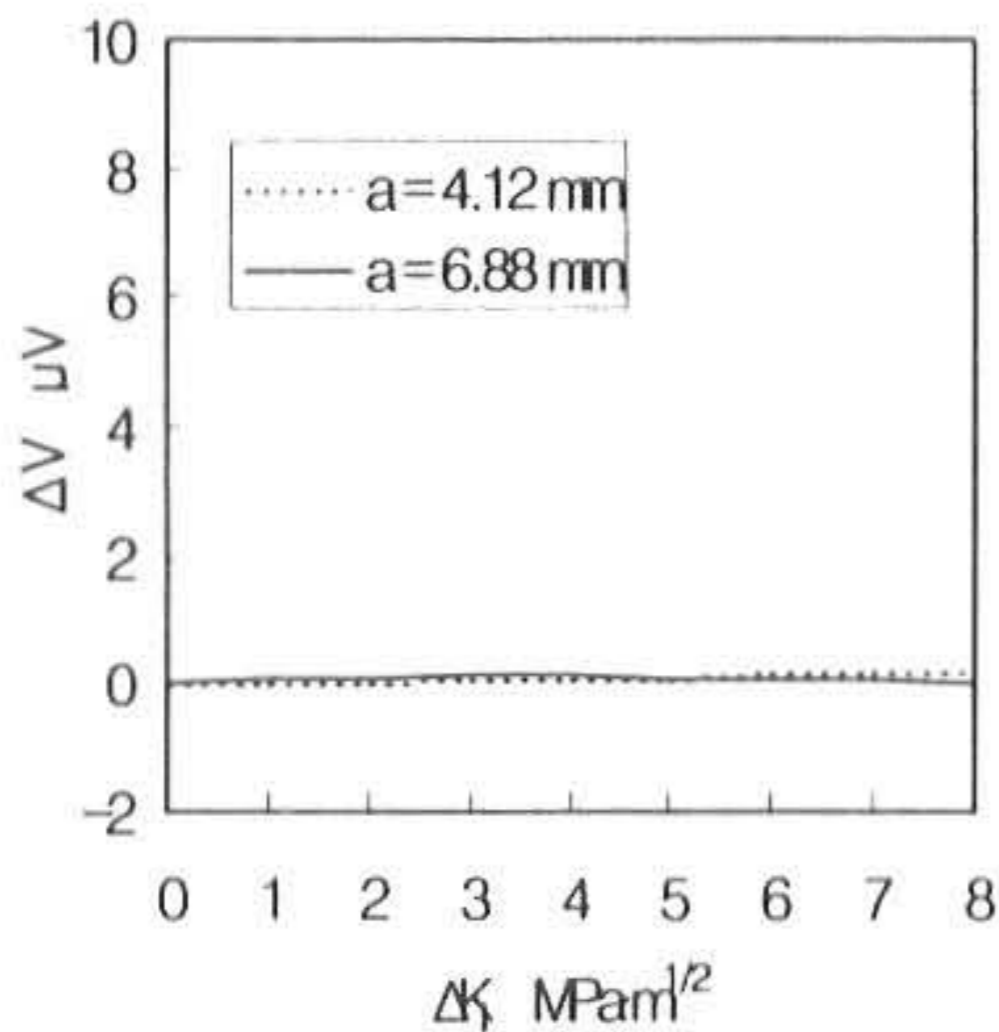


Fig. 5 The change in magnetic flux in the air due to load

4. 결론

2차원 표면균열을 가진 재료의 응력확대계수를 교류전위차법으로 효과적으로 계측할 수 있는 방법을 결정하기 위하여 균열을 가진 시험편에 하중을 가할 때 시험편 표면 위 공기중에서의 자속밀도변화를 실험적으로 연구하였다.

실험결과에서 균열면 사이의 자속밀도와 시험편위 공기중에서 자속밀도는 시험편에 하중을 가하여도 변하지 않음을 알았다. 이 실험결

과는 참고문헌 7)의 이론해석 결과와 일치함을 알 수 있다. 따라서 유도기전력을 많이 유도할 수 있도록 제작된 계측계에 있어 하중에 따른 교류전위차변화는 시험편의 내부 인덕턴스변화, 시험편 내부 인덕턴스와 계측계 사이의 상호인덕턴스 변화 그리고 시험편의 내부 인덕턴스와 전류공급선 사이의 상호인덕턴스 변화에 의하여 발생한다.

참고문헌

- 1) Saka M., Nakayama M., Kaneko T. and H. Abé, : Measurement of Stress-Intensity Factor by Means of A-C Potential Drop Technique. Experimental Mech., Vol. 31, pp. 209-212 (1991)
- 2) 이 정희 : 교류전위차법에 의한 강자성체의 응력확대계수 결정. 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제9호, pp. 1392-1399 (1997)
- 3) Lee J. H., Saka M. and Abé H. : Loading Effect on ACPD of a Crack in Ferromagnetic Material. Experimental Mech., Vol. 37, pp. 132-136(1997)
- 4) Lee J. H., Saka M. and Abé H. : The Effect of Magnetic Field on the Experimental Determination of K_I by Means of ACPD Technique. Post Conference Proceedings of the 1996 VIII International Congress on Experimental Mechanics, pp. 416-420 (1996)
- 5) 이 정희 : 균열을 가진 상자성체의 교류전위차에 미치는 하중의 영향. 비파괴검사학회지 제19권 제1호, pp. 1-7 (1999)
- 6) 이 정희 : 교류전위차법을 이용한 효과적인 응력확대계수의 측정 방법. 비파괴검사학회지 제19권 제1호, pp. 8-15 (1999)
- 7) 이 정희 : 응력확대계수 측정을 위한 하중에 의한 자속밀도변화의 이론적 해석, 한국산업응용학회논문집, 제6권, 제4호, pp.367-371 (2003)

(2003년 8월13일 접수, 2004년 2월 20일 채택)