

복합적층판의 층간분리의 검출에 대한 연구

염영진

기계·자동차공학부

<요 약>

탄소/에폭시 복합재료 적층판의 층과 층 사이에서 발생하는 층간 분리량을 균열 진전에 따른 저항변화량을 이용하여 측정하였다. 탄소/에폭시 프리프레그를 16겹, 24겹, 32겹을 적층하여 두께 2, 3, 4 mm의 다양한 시편을 제작하였고, 브릿지 회로를 구성하여 Electric Potential Method를 적용하였다. 100 mm까지 균열이 진전할 때 저항 변화량의 경향을 파악한 결과 비선형성을 갖는 것을 알 수 있었고 이 관계를 실험식으로 제시하였다. 이 식을 이용하면 층간분리 발생 가능성이 높은 복합재료 구조물의 취약 부분의 결함을 쉽게 예측, 검사할 수 있을 것이다.

Study on the detection of delamination in composite laminate

Young-Jin Yum

School of Mechanical and Automotive Engineering

<Abstract>

The amount of delamination occurring between layers of graphite/epoxy composite laminate was detected by measuring resistance change. Specimens with various thicknesses were made by laminating 16, 24, and 32 plies of graphite/epoxy prepregs, and electric potential method was used by constructing bridge circuit. Resistance change at every 10mm of crack propagation up to 100mm was measured. It was found

* 이 논문은 2000학년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

that nonlinearity existed between the resistance change and crack propagation rate and empirical formulas were proposed. The amount of interlaminar fracture in composite structure will be detected and measured more easily with these formulas.

I. 서론

섬유 강화 복합재료는 구조물의 경량화 추세에 맞춰 사용범위가 항공우주산업, 방위산업, 레저산업 등 산업 전반에 걸쳐 급속히 증대되고 있다. 이에 따라 복합재료 구조물에 대한 검사를 보다 쉽고 정확하게 수행할 수 있다면 복합재료 구조물의 안전성을 보장할 수 있게 될 것이다. 복합재료는 기존의 금속재료에서는 보이지 않는 층간분리 현상이 발생하는 등 기계적인 거동이 다르기 때문에 해석방법이나 실험방법 등에서 새로운 것이 요구되곤 한다. 복합적층판은 층간파괴 인성치가 매우 낮기 때문에 층간분리에 의해 쉽게 파괴된다. 따라서 층간분리 검출에 대한 접근이 광범위하게 요구된다. 최근에는 삽입 센서나 actuators를 사용해서 균열이나 층간분리와 같은 결함을 검사하거나 수리할 수 있는 구조물이 주목을 받고 있다. 그 예로서 광섬유 센서를 삽입하여 복합재료를 만듦으로써 균열이나 층간분리와 같은 결함을 검사할 수 있는 방법이 연구되고 있다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 그러나 삽입센서에 의한 검사방법은 다음과 같은 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

- (1) 삽입 센서는 이전에 만들어진 구조물에는 적용될 수가 없다.
- (2) 삽입 센서의 삽입은 강도 감소를 야기할 수도 있다.
- (3) 삽입 센서가 손상을 입었을 때 수리가 불가능하다.
- (4) 삽입 센서와 기지 사이의 debonding 때문에 수명에 한계가 있다.

이런 배경에 근거하여 전기적으로 전도성이 있는 탄소 섬유와 전기적으로 절연성이 있는 수지 기지의 성질을 이용하여 센서의 수리도 쉽고, 구조물의 강도 감소도 없는 결함 검출방법이 최근 개발되었다.⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾ Electric Potential Method라고 하는 이 방법은 어떤 특별한 기구가 필요 없이 복합구조물의 표면에 전극을 붙이고 회로를 구성함으로써 균열길이와 진전함에 따라 발생하는 저항의 변화를 검출하여 이것을 층간분리의 양으로 환산하는 방법이다. Todoroki와 Kobayashi는 두께 2 mm의 T300/에폭시 복합재료(Toray P3051-25) 시편에 대하여 시편 길이에 대한 균열 진전 길이비($\Delta a/L$)가 0.25로 매우 작은 구간에서 저항변화를 측정하였다. 그 결과 이 구간에서는 균열길이 변화율과 저항변화율이 선형 관계를 밝혔다. 그러나 이 결과는 두께가 2 mm로 한 종류인 시편에서 층간분리량이 극히 작은 부분만을 다룬 것으로 두께가 다른 시편과 층간분리가 큰 경우에 대한 결과는 보이지 않는다.

본 연구에서는 탄소섬유 복합적층판을 제작하여 2 mm, 3 mm, 4 mm의 여러 가지 두께의 DCB(Double Cantilever Beam)시편을 만들고 균열진전을 최대 100mm의 넓은 범위까지 관찰하여 균열 길이 변화율과 저항 변화량의 관계를 밝히고 궁극적으로 층간분리 검출 방법을 확립하려고 한다.

II. 실험

복합재료 시편의 전기저항 변화와 층간분리 균열 길이간의 관계를 알아보기 위해 모우드 I 층간분리 실험에 흔히 사용되는 쌍의팔보(DCB : Double Cantilever Beam) 시편을 제작하였다. 시편은 탄소/에폭시 프리프레그를 일방향으로 8겹 적층하고 인위적인 초기균열을 만들기 위하여 테프론 필름을 50 mm 깊이까지 삽입한 후 다시 8겹을 적층하였다. 16겹으로 프리프레그를 그림 1과 같이 다른 부자재와 같이 적층하여 오토클레이브에서 curing하고 2 mm 두께로 된 적층판을 diamond cutter로 길이 200 mm, 폭 20 mm로 절단하고 하중을 가하기 위하여 블록을 장착하여 DCB 시편을 제작하였다. 오토클레이브의 사진은 그림 2와 같고, 시편의 경화사이클은 그림 3과 같다. 위와 같은 방법으로 프리프레그를 24겹, 32겹을 적층하여 두께 3 mm, 4 mm의 시편을 제작하였다. 하중 증가에 따른 균열 진전길이를 측정하기 위하여 시편 옆면에 흰 색 수정액으로 코팅을 하고 눈금을 표시하여 20배 배율의 현미경으로 균열 진전길이를 측정하였다. 테프론 필름이 삽입된 끝부분은 수지과다 지역이므로 완전히 날카로운 균열로 볼 수 없다. 따라서 피로하중을 가하여 테프론 필름 끝에서부터 10 mm이상 되는 초기균열을 생성시켰다. 피로 균열을 갖는 시편을 재료시험기에서 변위 제어 모우드로 crosshead speed를 정적상태에 가까운 1 mm/min로 인장하중을 가하면서 균열을 측정하였다. 재료시험기의 사진은 그림 4와 같다. 균열의 길이가 10 mm 진전할 때마다 하중과 변위를 증폭기와 A/D 변환기를 이용하여 수집하였다. 균열길이에 따른 저항변화를 알아보기 위해 전극은 다음과 같은 절차를 거쳐 구성하였다.

- (1) 거친 사포로 시편 표면을 닦은 다음 아세톤으로 세척한다.
- (2) 실버 페이스트(silver paste)를 세척된 표면에 칠한다.
- (3) 전극을 형성하기 위해 한 쌍의 스트레인 게이지 터미널을 붙인다. 이 때 전극은 하중점으로부터 35 mm의 일정한 곳에 위치하게 한다.
- (4) 리드 선을 각 터미널에 납땜한다.
- (5) 리드 선과 시편사이에 실버 페이스트(silver paste)를 칠한다.

시편의 전극은 그림 5와 같이 시편 양쪽 면에 한 쌍으로 구성하고, 전기 전압변화를 얻기 위해 브릿지 회로는 그림 6과 같이 구성하였다. 실험이 진행되는 동안 균열길이에 따른 전압의 변화를 시그널 컨디셔너를 이용해서 측정하고 오옴의 법칙을 사용하여 저항값으로 변환시켰다.

III. 결과 및 토론

본 실험에서는 DCB시편의 두께를 2 mm, 3 mm, 4 mm 3종류로 제작하여 전원 공급장치를 통하여 3 volt의 전압을 전극을 통해 흘려 균열 진전에 따른 저항의 변화를 측정하였다. 결과 그래프에서 2 mm-1과 같이 표시한 것은 두께 2 mm인 첫 번째 시편의 데이터를 뜻한다. 시험 결과 그림 7과 같은 그래프를 얻을 수 있었는데, 균열 진전길이에 대한 저항 절대값의 관계는 저항 초기값에 따라 같은 두께의 시편에서도 값의 편차가 크기 때문에

시편의 종류에 관계없이 일반화된 균열 진전에 따른 저항 변화를 얻을 수가 없었다. 따라서 일반화된 경향을 얻기 위해 그림 8과 같이 균열 진전 변화율에 대한 저항 변화량의 값으로 바꾸었다. 아울러 저항 변화량을 초기 저항값으로 나누어 무차원시켜 초기 저항의 영향이 없도록 하여, 균열 길이 변화율에 따른 저항 변화율의 관계를 나타낸 것은 그림 9와 같다. 그림 8과 그림 9를 비교해보면 그림 8은 같은 두께의 시편에서는 일정한 경향을 가지며 두께에 따라 저항변화량의 값이 뚜렷이 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 즉 저항 변화량이 두께와 밀접한 영향이 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 9의 경우 저항변화량을 초기 저항으로 나눈 저항변화율은 균열 길이 변화율에 대해 두께가 두꺼워짐에 따라 감소하지만 그림 8보다 일관된 경향을 보이고 있지 않다. 즉 초기저항의 차이로 인해 두께에 대하여 확실한 경향을 가지지 못한다. 따라서 저항 변화값을 균열길이 변화율에 따라 결과를 정리, 검토하였다. 그 결과, 저항변화값은 탄소/에폭시 복합재료 시편의 두께가 얇은 것이 가장 큰 값을 나타내었다. 즉 2 mm 시편이 가장 크고 3 mm, 4 mm 순으로 나타났다. 그 이유는 초기 저항값의 영향도 배제할 수 없으나, 가장 큰 이유는 시편의 위쪽 전극에서 3 volt의 전압을 가할 경우 전류는 시편의 표면을 통해 다른 전극으로 흐르게 된다. 이 때 회로를 통해서 저항 값을 얻게 되는데, 균열이 진전되면서 전류가 흐를 수 있는 전기 전도 단면적이 감소하여 전기 저항이 증가한다. 또 두께에 따라서도 두께가 얇은 경우도 전기 전도 단면적이 두께가 두꺼운 시편에 비해 작기 때문에 역시 저항이 증가한다. 이런 이유 때문에 두께 2 mm의 시편의 저항 변화가 크게 나왔다. 그리고 같은 시편 사이에서도 그래프의 모양이 다른 이유는 초기 저항이 다르기 때문이다. 위와 같은 이유로 저항 변화량과 균열 진전을 그리고 두께는 서로 상관관계를 가진다. 이런 상호 관계를 정의하기 위해 그림 8에서 보여지는 같은 종류의 시편의 평균값을 구하여 하나의 그래프로 만들었다. 이 그림은 그림 10, 그리고 그림 11과 같다. 그리고 실험 데이터를 이용하여 각 두께에서의 균열 길이변화율에 대한 저항변화량의 일반식을 만든 결과 2차식으로 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

여기서, 균열 길이 변화율 $\frac{\Delta a}{L}$ 를 x , 저항변화량 ΔR 을 y 로 놓을 때 다음과 같이 표현된다.

$$y = 16.365 x^2 + 5.8292x \quad (\text{두께 } 2 \text{ mm 시편}) \quad (1)$$

$$y = 11.552 x^2 + 3.1952x \quad (\text{두께 } 3 \text{ mm 시편}) \quad (2)$$

$$y = 11.162 x^2 + 1.2668x \quad (\text{두께 } 4 \text{ mm 시편}) \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)은 2 mm, 3 mm, 4 mm에서의 평균값을 식으로 만든 것이다. 그리고 두께의 영향도 포함한 하나의 식을 더 만들었다.

$$y = C_1 x^2 + C_2 x \quad (4)$$

$$C_1 = 23.515 \frac{1}{t^{0.5722}} \quad (5)$$

$$C_2 = 28.12 \frac{1}{t^{2.1549}} \quad (6)$$

$$\Delta R = 23.515 \frac{1}{t^{0.5722}} \left(\frac{\Delta a}{L} \right)^2 + 28.12 \frac{1}{t^{2.1549}} \left(\frac{\Delta a}{L} \right) \quad (7)$$

여기서, t 는 각 시편의 두께를 나타낸다.

C1, C2와 두께와의 관계 그래프는 그림 13, 그림 14와 같다. 식 (4)는 식(1), (2), (3)을 하나의 식으로 만든 것이다. 그리고 식 (5), (6)은 균열 길이 변화율에 따라 저항변화량 식에 두께의 영향을 고려한 식이다. 식(5)는 89%의 정확도를 가지고 식(6)은 95%의 정확도를 가지고 있는 근사식이다. 이 식들을 사용하면 구조물의 층간 균열정도를 대략적으로 파악할 수 있을 것이다. 식 (7)에서 보여지듯이 저항 변화량은 시편이 두꺼워짐에 따라 감소하고 균열 진전 변화율에 따라 증가하는 2차 곡선임을 알 수 있다. Todoroki와 Kobayashi의 연구 결과 매우 작은 균열 진전율에서 얻은 선형그래프와 달리 2차 곡선이 되었음을 알 수 있었다.

본 실험에서는 저항값을 멀티 테스터기로 일일이 측정하였으나 컴퓨터로 전압 변화값을 받아서 데이터를 처리하고 보다 다양한 두께의 시편에 대해 실험한다면 더욱 정확하고 체계적인 값을 얻을 수 있다. 그리고 전극의 위치를 바꾸어서 두께에 따른 저항변화를 측정하고, Mode II에서의 층간 균열 길이에 따른 저항의 변화를 알아보는 것은 향후 연구 과제이다.

IV. 결 론

탄소/에폭시 복합재료로 제작한 여러 가지 두께를 갖는 DCB시편에 1 mm/min의 인장하중을 가하여 100 mm까지 층간 균열이 진전함에 따라 저항 변화량을 측정하여 복합재료의 층간 분리량을 검출하는 방법을 모우드 I 층간파괴 실험을 통하여 고찰하였다. 복합재료 시편의 저항변화는 균열진전율에 따라 커지고 두께가 커지면 감소한다는 관계를 규명하였으며, 균열 진전율과 저항변화량이 비선형적 관계를 가진다는 것을 알 수 있었다.

Electric Potential Method를 적용하여 얻은 저항변화량과 균열 진전과의 관계로부터 실험식을 제시하였으며 이 식을 이용하면 복합재료 구조물의 층간분리와 같은 결함을 예측, 검사할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Kitade, S., Hukuda, T. and Oosaka, K., "Influence of Embedded Optical Fibers on Interlaminar Shear Strength of Composite Laminates", Proceedings of 22th FRP Symposium, (in Japanese), pp.309, 1992.
2. Hofer, B., "Fiber Optic Damage Detection in Composite Structures", Composites, Vol.18, No.4, pp.309, 1987.
3. Waite, S.R., and Sage, G.N., "The Failure of Optical Fibers Embedded in Composite Materials", Composites, Vol.19, No.4, pp.288, 1988.

4. Moriya, K. and Endo, T., A Study on Flaw Detection Method for CFRP Composite Laminates (1st Report) "The Measurement of Crack Extension in CFRP Composites by Electrical Potential Method", J. of the Japan Soc. for Aeronautical and Space Science, Vol.36, No.410, pp.139, 1988.
5. Todoroki, A. and Kobayashi, H. "Application of Electric Potential Method to Smart Composite Structures for Detecting Delamination" Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol.60, No.574, A, pp.1458 - 1463, 1994.

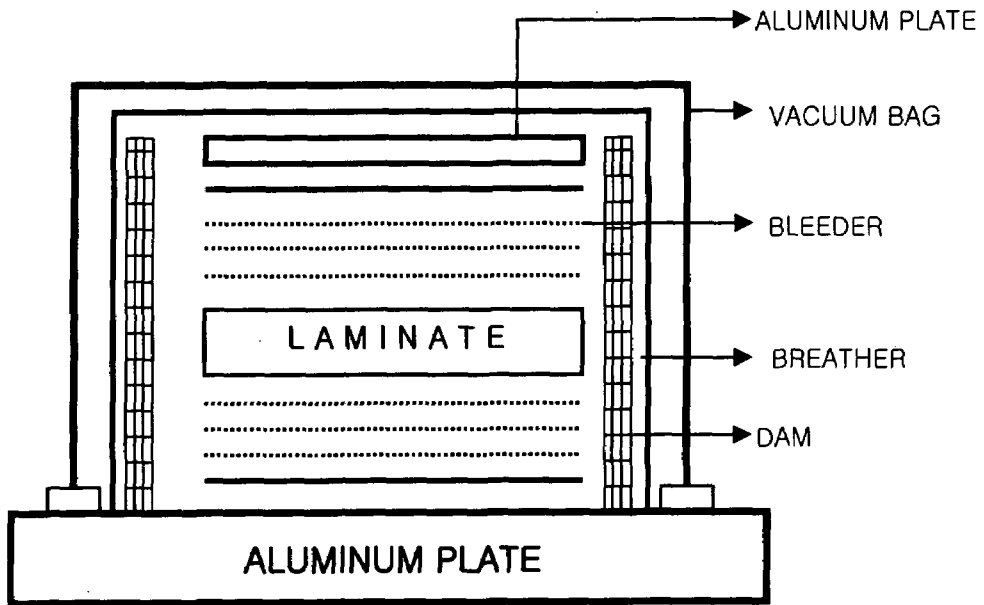


그림 1. 프리프레그와 다른 부자재의 적층방법

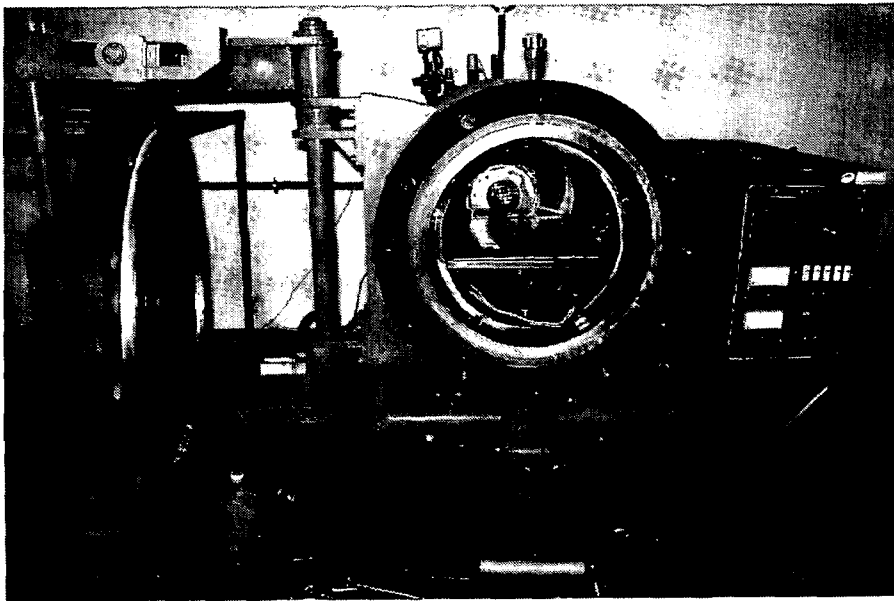


그림 2. 오토클레이브

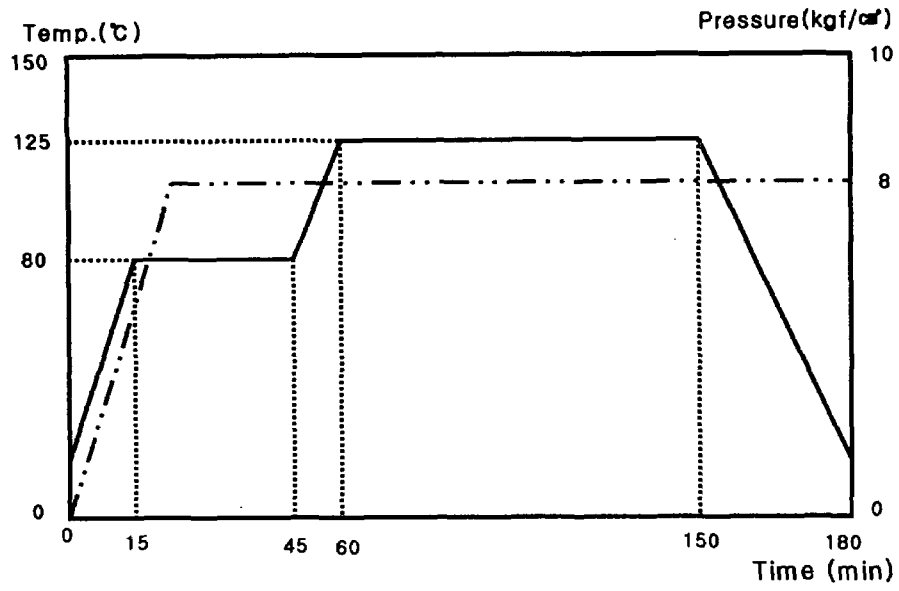


그림 3. 복합재료 시편 경화사이클

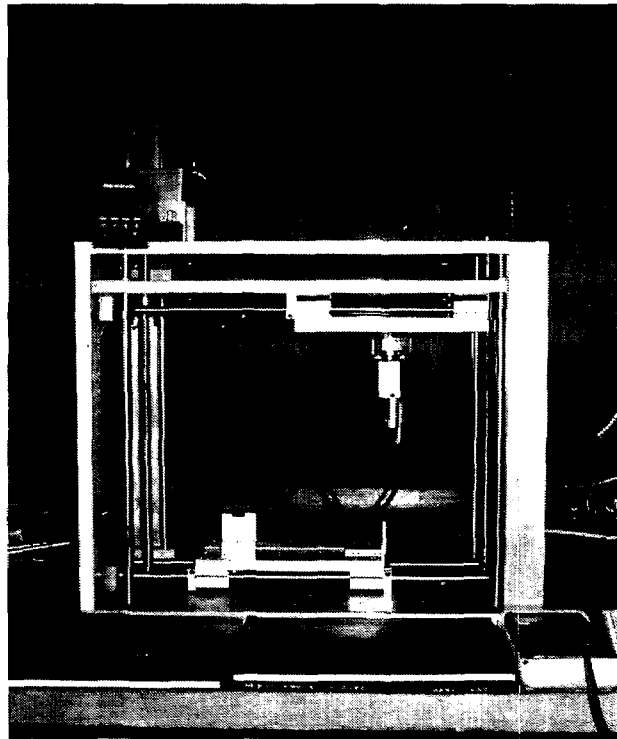


그림 4. 소형 인장 시험기

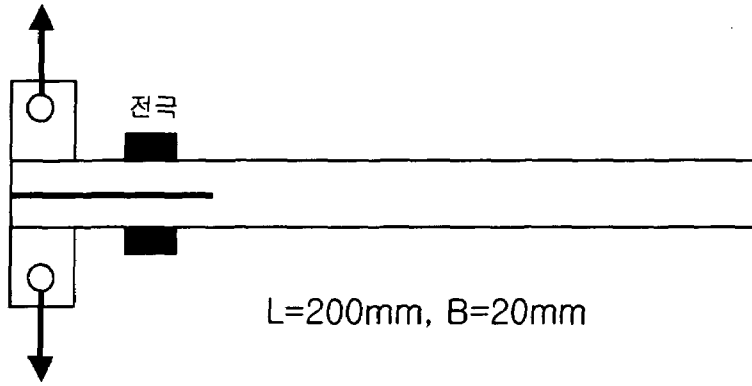


그림 5. 모드 I 시편 구성도

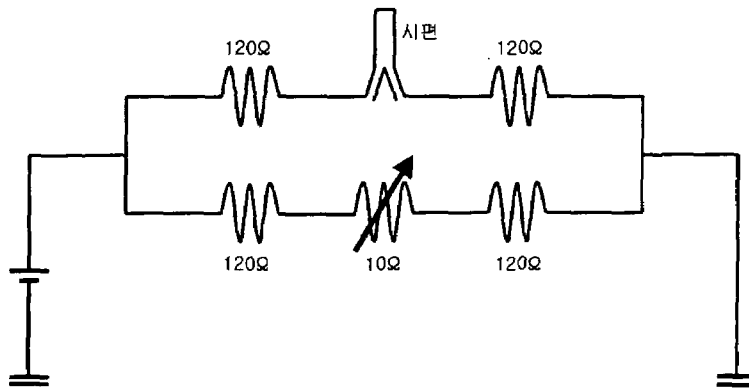


그림 6. 브릿지 회로도

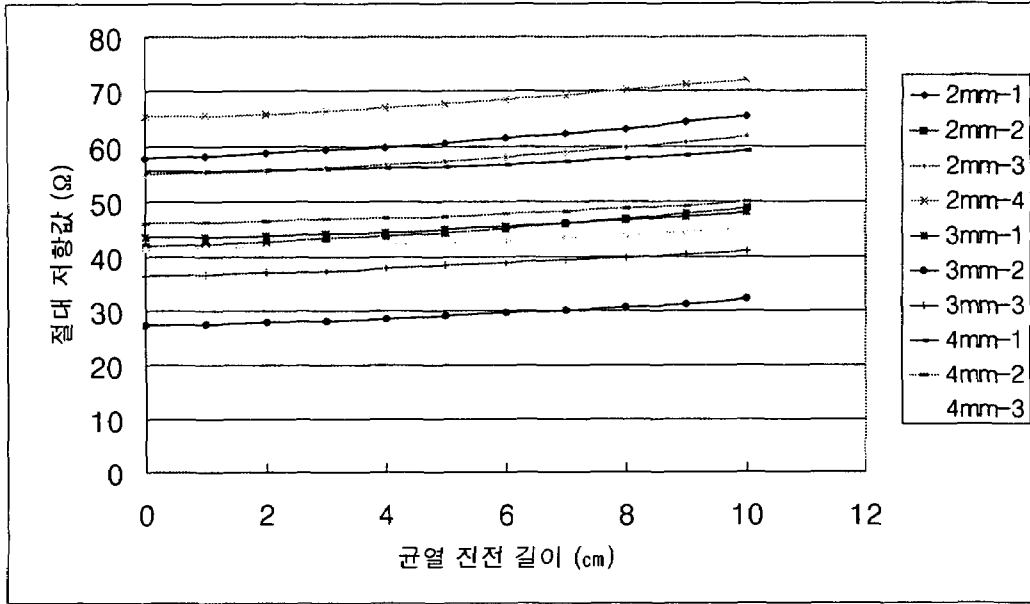


그림 7. 균열 진전 길이에 대한 저항절대값

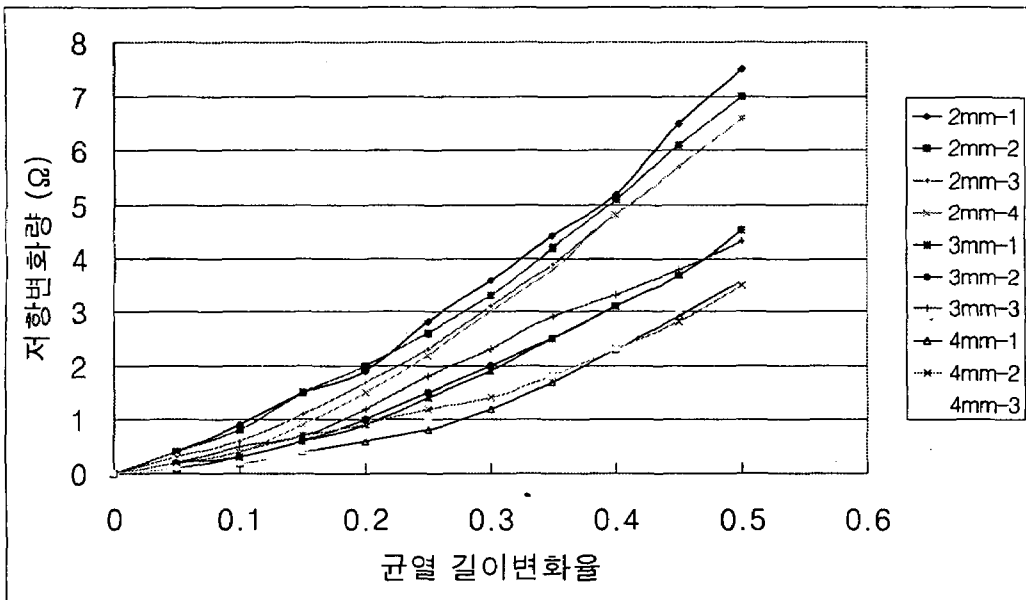
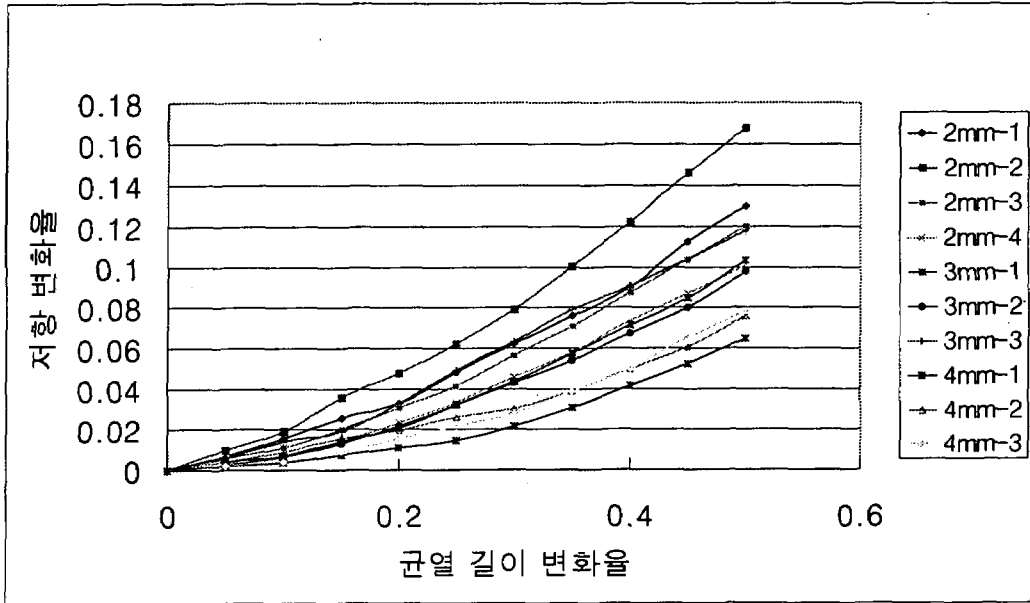


그림 8. 균열 진전 길이 변화율에 대한 저항변화량



9. 균열 진전 길이 변화율에 대한 저항변화율

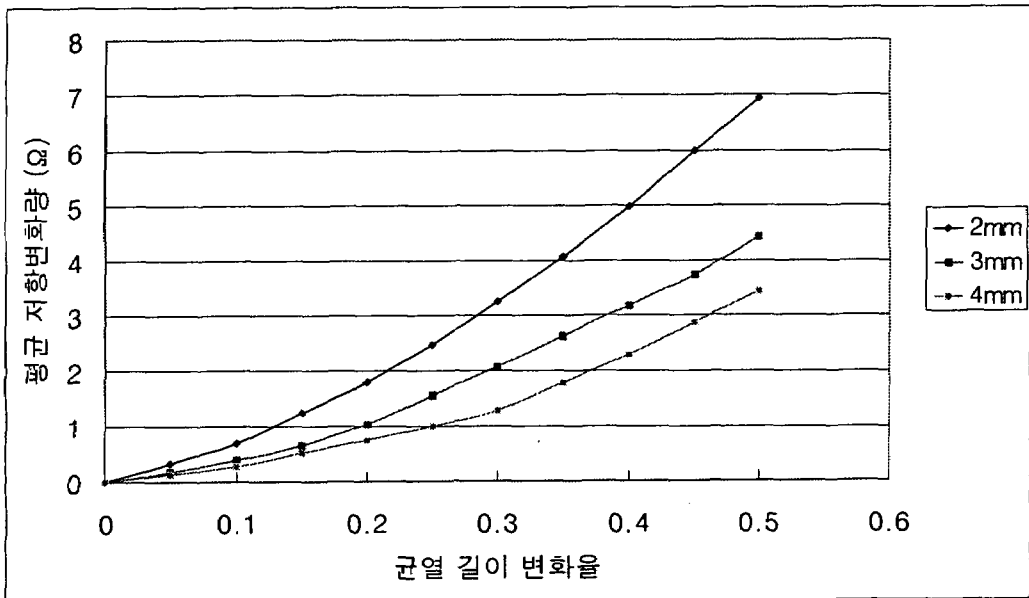
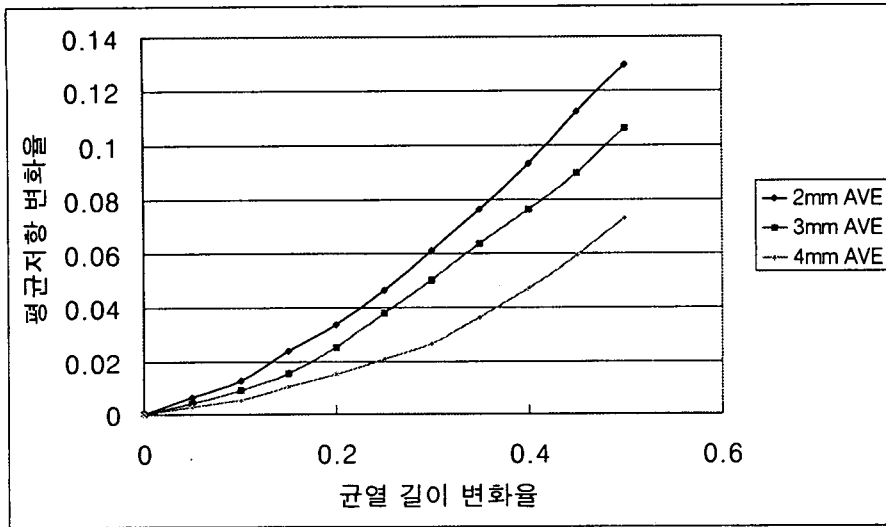


그림 10. 균열 진전 길이 변화율에 대한 저항변화량의 평균값



11. 균열 진전 길이 변화율에 대한 저항변화율의 평균값

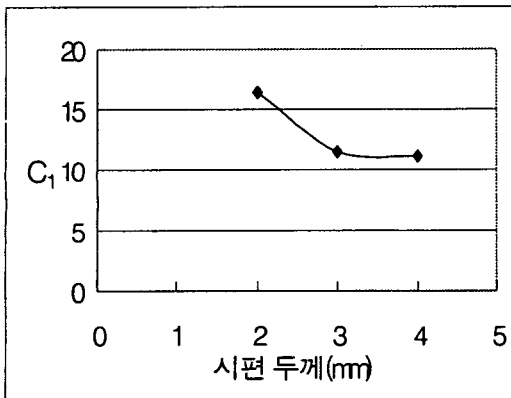


그림 12. 시편 두께에 대한 C₁의 변화

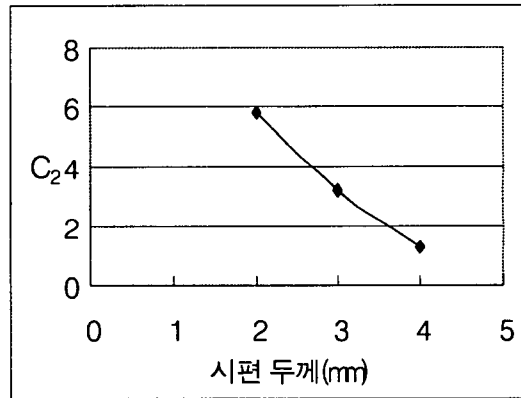


그림 13. 시편 두께에 대한 C₂의 변화