<학술논문>

# 압전기법을 이용한 복합재료 손상모니터링의 가능성에 관한 연구

황 희 윤<sup>†</sup>

(2008년 8월 4일 접수, 2008년 9월 5일 수정, 2008년 9월 23일 심사완료)

# Feasibility Study of the Damage Monitoring for Composite Materials by the Piezoelectric Method

Hui-Yun Hwang

Key Words: Piezoelectric Method(압전기법), Damage Monitoring(손상모니터링), Composite Material (복합재료)

#### Abstract

Since crack detection for laminated composites in-service is effective to improve the structural reliability of laminated composites, it have been tried to detect cracks of laminated composites by various nondestructive methods. An electric potential method is one of the widely used approaches for detection of cracks for carbon fiber composites, since the electric potential method adopts the electric conductive carbon fibers as reinforcements and sensors and the adoption of carbon fibers as sensors does not bring strength reduction induced by embedding sensors into the structures such as optical fibers. However, the application of the electric method is limited only to electrically conductive composite materials. Recently, a piezoelectric method using piezoelectric characteristics of epoxy adhesives has been successfully developed for the adhesive joints because it can monitor continuously the damage of adhesively bonded structures without producing any defects. Polymeric materials for the matrix of composite materials have piezoelectric characteristics similarly to adhesive materials, and the fracture of composite materials should lead to the fracture of polymeric matrix. Therefore, it seems to be valid that the piezoelectric method can be applied to monitoring the damage of composite materials. In this research, therefore, the feasibility study of the damage monitoring for composite materials by piezoelectric method was conducted. Using carbon fiber epoxy composite and glass fiber composite, charge output signals were measured and analyzed during the static and fatigue tests, and the effect of fiber materials on the damage monitoring of composite materials by the piezoelectric method was investigated.

# 1. 서 론

높은 비강성과 비강도 및 우수한 감쇠특성으로 널리 사용되기 시작한 신소재 복합재료는 공작기계의 초고속 회전축, 로봇 매니퓰레이터 등의 정밀 기계 부품 및 고압선용 철탑, 건물,

Ť	회원, 안동대학교 기	계공학부	
	E-mail : hyhwang@andong.ac.kr		
	TEL: (054)820-6305	FAX : (054)820-5167	

교량의 유지/보수 등 사회간접시설에서부터 우주/항공 산업분야의 비행기, 우주선 동체, 인공위성 등에까지 많은 산업분야에서 이용되고 있다. 특히, 경량화가 중요시되는 자동차 및 우주/항공 기술 분야에서는 복합재료의 사용이 필수적이다.<sup>(1)</sup>

적층 기법으로 제작된 복합재료 구조물의 사용 중 안전성을 향상시키기 위해서는 복합 재료 구조물의 균열이나 손상의 지속적인 모니터링이 필요하다. 복합재료의 제작 시 불량으로 인한 초기 손상이나 사용 중 발생하는 구조물 내부 손상은 일반적으로 사람 눈으로 탐지하기가 어려우므로, 이를 감지하기 위한 다양한 비파괴 검사 기법이 개발되어 시도되고 있다.

지금까지 연구가 진행된 복합재료 손상 탐지 기법은 타격 시험, 방사선 투과법, 초음파 탐상법, 염료 투과법, 자분 탐상법, 와상 전류법, 음향 탐사법, 광섬유 이용법, 전기저항법, 전위법 등이 있다. 많은 연구가 진행된 광섬유 이용법이나 압전 센서를 이용하는 경우는, 복합재료 구조물에 광섬유 및 압전 센서를 삽입하여야 하므로, 센서가 결함으로 작용할 가능성이 높고, 구조물 전체의 손상을 모니터링 하기 위해서는 많은 수의 센서를 설치하여야 하므로, 미세 구조물이나 대형 구조물의 경우는 적용이 어렵거나, 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복한 방법이 전기 저항법과 전위법이다. 두 방법 모두 복합재료 구조물에 전극을 부착하여 전극으로부터 저항 변화 및 전위차를 측정하면 되므로, 추가적인 센서의 삽입이나 부착이 필요 없으며, 구조물 전체에 대하여 손상 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 전기저항법과 전위법은 전기 전도성이 있는 탄소섬유 복합재료와 같은 특수한 경우에만 적용이 가능하여, 유리섬유, 케블라 등의 비전도 섬유 혹은 입자로 강화된 복합재료에는 적용이 어렵다는 단점을 가지고 있다.(2~5)

최근 에폭시 접착제의 압전 특성을 이용한 접착 조인트의 손상 모니터링 기법이 국내 연구진에 의하여 개발되었다. 압전 기법은 고분자재료 자체의 특성을 이용하므로, 결함을 유발할 수 있는 센서의 삽입이 필요하지 않으면서 구조물의 안전성을 실시간으로 모니터링이 가능하다는 장점이 있다.<sup>(6-9)</sup>

한편, 고분자 재료를 기지(Matrix)로 사용하는 복합재료의 경우도 복합재료의 파손이나 손상이 기지 재료의 파손과 손상을 동반하여 나타나게 되므로, 고분자 재료의 특성을 이용한 압전 기법의 적용이 가능하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 고분자 재료의 압전 특성을 이용하여 복합재료의 손상 모니터링의 가능성을 실험을 통하여 분석하였다.

## 2. 실 험

2.1 시험편 및 실험 방법

본 연구의 목적은 고분자 재료의 압전 특성을 이용한 복합재료의 손상 모니터링의 가능성을 분 석하는 것이다. 선행 연구에서 그 가능성이 입증 된 에폭시 재료를 기지 재료로 사용하며 강화 섬 유의 종류가 서로 다른 두 가지 복합재료 – 일방 향 탄소섬유 에폭시 복합재료 (USN150, SK Chemicals, Korea)와 일방향 유리섬유 에폭시 복합 재료 (UGN150, SK Chemicals, Korea) – 를 선정하였 다. 선정된 복합재료의 기계적 성질은 Table 1 에 나타나 있다.

시험편은 Fig. 1 과 같이 적층 복합재료 제작 시 테프론 필름을 삽입하여 인위적으로 균열을 생성 한 이중 외괄보 (Double cantilever beam) 형상으로 제작하였다.

제작된 시험편을 이용하여 정적 시험과 피로 시 험을 다음 절에 설명한 방법에 따라 수행하였다. 시험 중에 디지털 카메라를 이용하여 균열 진전을 지속적으로 관찰하였다.

#### 2.1.1 정적 시험

정적 파괴 시험에서 압전 기법을 이용하여 손상 측정이 가능한지를 분석하기 위하여 ASTM D 5528 의 방법에 따라 예비 균열을 가지는 이중 외팔보 형상 복합재료 시편을 이용한 층간분리 파괴 시험 을 수행하였다.

시험편의 너비 w, 두께 h, 길이 L, 예비 균열 길 이 L<sub>c</sub>는 각각 20mm, 8.8/11.7mm, 150mm, 65mm이며, 정적 만능 재료시험기 Instron 4206 (Instron CO., USA)를 이용하여 하중 속도 2mm/min으로 실험을 수행하였다.

Table 1 Mechanical properties of composite materials

	Carbon fiber	Glass fiber	
	epoxy composite	epoxy composite	
	(USN150)	(UGN150)	
Manufacturer	SK Chemicals, Korea		
$E_L$ (GPa)	131.6	43.3	
$E_T$ (GPa)	8.2	14.7	
$G_{LT}$ (GPa)	4.5	4.4	
$v_{LT}$	0.28	0.3	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1550	1980	



Fig. 1 Double cantilever beam specimen



Fig. 2 A composite material and of which equivalent parallel circuit for modeling it

2.1.2 피로 시험

복합재료의 사용 중 손상을 모사하기 위하여 피 로 시험을 수행하였다. 피로 시험 중의 손상 측정 이 가능한지를 분석하기 위하여 ASTM D 6115 의 방법을 따라 예비 균열을 가지는 이중 외팔보 형 상 복합재료 시편을 이용한 모드 I 피로 박리 시 험을 수행하였다.

시험편의 너비 w, 두께 h, 길이 L, 예비 균열 길 이 L<sub>c</sub>는 각각 20mm, 11.7mm, 150mm, 65mm이며, 동적 만능 재료시험기 Instron 8801 (Instron CO., USA)를 이용하여 하중 범위 0~150N을 5Hz 속도 로 실험을 수행하였다.

#### 2.2 압전 기법을 이용한 측정 방법

복합재료에 사용되는 기지 재료인 고분자 재료는 상용 압전 재료에 비하여 낮은 수준이지만 압전 특 성을 가지고 있다. 따라서, 복합재료를 압전재료라고 가정하면 Fig. 2 과 같이 저항, 정전용량, 전하로 구성 되는 병렬회로로 등가 모델링이 가능해 진다. 복합 재료의 등가 회로모델은 응력  $\sigma$ (MPa), 변형률 ε(m/m), 전기장 b (V/m), 전하밀도 a (C/m<sup>2</sup>) 등의 변 수로 표현되며, 일반적인 응력-변형률 관계와 전기 장-전하밀도의 관계는 아래식과 같다.(10)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{or} \quad \varepsilon = s \cdot \sigma \tag{1}$$

l) 여기서 E는 인장강성 (GPa)이고, s는 컴플라이언스 (m<sup>2</sup>/N)이다.



Fig. 3 Schematic diagram of the interaction mechanisms between the mechanical and electrical systems



Fig. 4 Schematic diagram for signal monitoring setup

압전 현상 (Piezoelectricity)은 전기-기계 시스템의 상호 작용에 의해 발생하며, Fig. 3와 같이 표현된다. 여기서 d 와 e 는 각각 압전응력상수 (Piezoelectric stress constant, C/N)과 압전변형률상수 (Piezoelectric strain constant, C/m2)로서, d는 인가된 응력에 대하여 발생한 전하밀도를, e 는 인가된 변형률에 대하여 발 생한 전하밀도를 의미하며, 다음의 식들로 표현된다.

$$d = \left[\frac{\partial a}{\partial \sigma}\right]_{b} = \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial b}\right]_{\sigma}$$
(3)

$$e = \left[\frac{\partial a}{\partial \varepsilon}\right]_{b} = \left[\frac{\partial \sigma}{\partial b}\right]_{\varepsilon}$$
(4)

따라서, 외력에 의하여 재료에 변형이 발생하거나 손상으로 인하여 동일 외력에 재료의 변형 상태가 달 라지게 되면, 식 (3)과 (4)에 의해 재료 내부에서 전하 가 방출된다. 본 연구에서는 재료로부터 방출되는 전 하를 측정하기 위하여 Fig. 4 과 같은 장치를 구성하였 다. 전하 측정을 위한 전극을 복합재료 표면에 부착 하고, 복합재료를 재료 시험기에 절연하여 장착한 후, B&K 사의 Type 2626 (Bruel&Kjaer Co., Denmark) 전하 증폭기를 이용하였으며, AD 보드가 장착된 컴퓨터를 통해 신호 처리 및 분석을 수행하였다.

# 3. 결과 및 토의

#### 3.1 정적 시험 결과

예비 균열을 가지는 이중 외팔보 형상의 복합재 료 시험편을 이용하여 정적 층간 분리 파괴 시험 을 수행하면서 복합재료에 부착된 전극으로부터 방출된 전하 신호를 측정하였다.

Fig. 5는 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료의 실험 결과를 나타내고 있다. 시험편의 두께가 두꺼운 경 우 최대 하중과 방출되는 전하량의 크기는 증가하였 나, 두 경우 모두 방출되는 전하 신호의 경향은 유 사함을 알 수 있다. 특히, 하중이 최대가 되기 전, 균열부의 변형이 상당히 커져서 거시적인 균열의 진 전 이전 시점에서 측정 전극으로부터 매우 큰 전하 량이 감지되었으나, 균열이 지속적으로 진전함에 따 라서는 상대적으로 작은 전하를 방출하였다. 또한, 예비 균열에 가까운 곳의 전극과 먼 곳의 전극에서 측정되는 전하 신호가 유사한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 6 의 일방향 유리섬유 에폭시 복합재료의 실험결과는 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료와 다른 경향을 보임을 알 수 있다. 유리섬유 에폭



**Fig. 5** Static test results of carbon fiber epoxy composites (a) *h*=8.8mm (b) *h*=11.7

시 복합재료의 경우는 균열이 진전됨에 따라서 상대적 은 낮은 전하량이 지속적으로 관찰되며, 그 크기는 평 균적으로 매우 완만하게 증가하다가, 최종적으로 층간 분리가 완료되는 시점에서 비교적 큰 전하량을 방출하 고 있다. 또한, 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료와는 달리, 예비 균열에 가까운 곳과 먼 곳의 전극에서 측정 되는 전하 신호가 서로 다른 것을 확인할 수 있었다.

강화섬유의 종류에 따라서 측정되는 신호의 차 이는 섬유의 물리적 성질로부터 기인된다. 탄소섬 유는 전기 전도도가 매우 우수하여 에폭시 재료의 변형으로 인하여 방출되는 전하가 섬유 방향을 따 라서 매우 빨리 전달되므로 예비 균열로부터의 전 극 위치에 관계없이 유사한 신호가 관찰되는데 비 해, 유리섬유는 전기 전도도가 매우 낮아 전극의 위치에 따라 서로 다른 신호가 관찰되는 것이다.

#### 3.2 피로 시험 결과

예비 균열을 가지는 이중 외팔보 형상의 복합재 료 시험편을 이용하여 모드 I 피로 박리 시험을 수행하면서 복합재료에 부착된 전극으로부터 방출 된 전하 신호를 측정하였다.

Fig. 7과 8에 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료 와 일방향 유리섬유 에폭시 복합재료의 실험결과 를 나타내었다.



Fig. 6 Static test results of glass fiber epoxy composites (a) h=8.8mm (b) h=11.7

황 희 윤



Fig. 7 Fatigue test results of carbon fiber epoxy composite

일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료는 피로 시험 중 변위가 완만히 증가하다 완전 분리 시점 근처 에서 다소 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 측 정된 전하 신호를 분석해 보면, 변위가 완만히 증 가하는 영역에서는 상대적으로 낮은 전하 신호가 거의 일정하게 측정되었으며, 파괴 시점에서야 비 로서 큰 전하 신호가 관찰되었다.

이에 비하여 일방향 유리섬유 에폭시 복합재료는 피로 시험 중 변위가 완만히 증가하다, 어느 시점이 되어 급격히 증가하여 일방향 탄소섬유 에폭시 복합 재료에 비해 큰 변위에 도달해서야 완전 분리가 됨을 관찰할 수 있었다. 특이할 점은, 균열 진전의 속도가 빨라지는 시점이 변위가 급격히 증가하기 시작한 시 점이라는 것이다. 측정된 전하 신호의 경우 변위 곡 선과 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 변위가 완만히 증가하는 구간에서는 전하 신호도 완만히 증가하였으 며, 변위가 급격이 증가하는 시점부터 전하 신호도 급격히 증가하여 완전 분리 시점에 최대가 되었다.

정적 및 피로 시험 중 측정된 전하 신호의 분석 결과는 Table 2 와 같이 정리할 수 있다. 정적 시험 에서 균열의 검출은 탄소섬유 에폭시 복합재료가 유리하였으나, 균열의 위치 판단은 어려웠으며, 피 로 시험에서는 유리섬유 에폭시 복합재료의 전하

Tuble 2 building of state and fungue test results				
		Carbon fiber	Glass fiber	
		epoxy	epoxy	
		composite	composite	
		(USN150)	(UGN150)	
	Crack	Good	Not good	
Static	detection		Not good	
State	Crack	Bad	Good	
	position			
Fatima	Crack	Bad	Good	
raugue	detection			

Table 2 Summary of static and fatigue test results



Fig. 8 Fatigue test results of glass fiber epoxy composite

신호가 시험편의 피로 거동과 매우 유사하였다.

이상과 같이 두 가지 서로 다른 종류의 강화섬 유로 제작된 복합재료의 정적 및 피로 시험 중 측 정한 전하 신호를 분석한 결과, 강화섬유 재료에 따라 균열의 검출 정도가 다르기는 하였으나, 에 폭시 재료를 기지 재료로 사용하는 복합재료를 압 전 기법을 이용하여 정적 및 피로 하중 하에서의 손상 검출이 가능하다는 것을 입증할 수 있었다.

향후, 본 연구의 결과를 바탕으로, 기지 및 강화 섬유의 종류, 적층 순서, 섬유의 표면 처리 및 첨 물 등에 따른 복합재료의 압전 특성의 변화와 손 상에 따른 전하 신호의 변화에 대한 실험 데이터 를 확보하여 정량적으로 손상 혹은 결함을 검출할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서 에폭시 재료를 기지로 사용하는 복 합재료의 정적 및 피로 시험 중 압전 기법을 이용 하여 재료로부터 방출되는 전하 신호를 측정하고, 분석하였다.

정적 시험에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 경 우 균열 진전의 검출이 가능하였으며, 유리섬유 에폭시 복합재료는 균열의 위치 판별이 가능하였 다. 피로 시험에서는 유리섬유 에폭시 복합재료의 경우 피로 파괴 거동과 측정된 전하 신호가 유사 한 경향을 가짐을 알 수 있었다.

이상의 실험결과로부터, 손상 혹은 균열의 검출 능력 정도의 차이는 있으나 에폭시 재료를 기지 재료로 사용한 복합재료를 압전 기법을 이용하여 정적 및 피로 하중 하에서의 손상 검출이 가능하 다는 결론을 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

- Mallick, P. K., 1988, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, New Yourk, pp. 417~425.
- (2) Scott, I. G. and Scala, C. M., 1982, "A Review of Non-Destructive Testing of Composite Materials," *NDT international*, Vol. 15, No. 2, pp. 75~86.
- (3) Kitade, S., Fukuda, T., Osaka, K. and Hamamoto, A., 1996, "Detection of Damages in Composite Laminates with Embedded Optical Fibers," *Smart Materials &*

Structures, Vol. 4, No. 2, pp. 283~290.

- (4) Wang, X. and Chung, D. D. L., 1997, "Real-time Monitoring of Fatigue Damage and Dynamic Strain in Carbon Fiber Polymer-matrix Composite by Electrical Resistance Measurement," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, No. 4, pp. 504~508.
- (5) Todoroki, A. and Suzuki, H., 1998, "Evaluation of Orthotropic Electrical Resistance for Delamination Smart Detection of Graphite/Epoxy Composites by Electric Potential Method," *Proceedings of 1st Asian-Australian Conference on Composite Materials*, pp. 630~633.
- (6) Kwon, J. W., Chin, W. S. and Lee, D. G., 2003, "Reliability Monitoring of Adhesive Joints by Piezoelectricity," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 8, pp. 1388~1397.
- (7) Kwon, J. W., Chin, W. S. and Lee, D. G., 2003, "Piezoelectric Monitoring of the Reliability of Adhesive Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 17, No. 6, pp. 777~796.
- (8) Hwang, H. Y. and Lee, D. G., 2005, "Diagnosis Criterion for Damage Monitoring of Adhesive joints by the Piezoelectric Method," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 19, No. 12, pp. 1053~1080.
- (9) Hwang, H. Y., Kim, B. J., Chin, W. S., Kim, H. S. and Lee, D. G., 2005, "Prediction of the Crack Length and Crack Growth Rate of Adhesive Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 19, No. 12, pp. 1081~1111.
- (10) Ikeda, T., 1996, *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford Science Publication, Oxford, pp. 15~30.