

압전특성을 이용한 접착 조인트의 안전성 모니터링

권재욱* · 진우석** · 이대길†

(2003년 3월 10일 접수, 2003년 6월 30일 심사완료)

Reliability Monitoring of Adhesive Joints by Piezoelectricity

Jae Wook Kwon, Woo Seok Chin and Dai Gil Lee

Key Words : In-Situ Reliability Monitoring (실시간 안정성 모니터링), Adhesively Bonded Joint (접착 조인트), Piezoelectric Method (압전 방법), Joint Self-Sensor (조인트 자체센서)

Abstract

Since the reliability of adhesively bonded joints for composite structures is dependent on many parameters such as the shape and dimensions of joints, type of applied load, and environment, so an accurate estimation of the fatigue life of adhesively bonded joints is seldom possible, which necessitates an in-situ reliability monitoring of the joints during the operation of structures. In this study, a self-sensor method for adhesively bonded joints was devised, in which the adhesive used works as a piezoelectric material to send changing signals depending on the integrity of the joint. From the investigation, it was found that the electric charge increased gradually as cracks initiated and propagated in the adhesive layer, and had its maximum value when the adhesively bonded joint failed. So it is feasible to monitor the integrity of the joint during its lifetime. Finally, a relationship between the piezoelectric property of the adhesive and crack propagation was obtained from the experimental results.

1. 서 론

최근, 여러 분야에 걸쳐 섬유강화 복합재료의 사용이 증가하고 있으나 이를 사용한 구조물의 제작은 개별적으로 제작된 복합재료 부품을 서로 조립하기 위한 조인트에 의해 그 사용이 제약받고 있다. 이는 일반적으로 이러한 조인트를 통한 복합재료 부품의 신뢰성 있는 접합이 매우 어렵기 때문이다.

여러 개의 부품으로 이루어진 구조물에서 조인트의 설계는 중요한 연구 분야가 되어왔는데, 이는 구조물의 효율이 구조물 자체보다는 부품간의 접합부에 의해서 결정되기 때문이다.^(1,2) 이러한 조인트에는 기계적 조인트와 접착 조인트의 2 가지 종류가 있다. 이 중 접착 조인트는 기계적 접합에

비해 넓은 영역에 하중을 분산시켜 주고, 구조물에 리벳 (rivet)이나 볼트의 사용을 위한 구멍을 낼 필요가 없으며, 구조물에 무게를 거의 더하지 않아 무게 절감 효과를 가져올 수 있을 뿐만 아니라 우수한 피로 특성을 가지고 있어 최근 그 사용이 증가하고 있다. 그러나, 이러한 장점들에 반해 접착 조인트는 접합되는 물질의 기하학적 형상 및 치수, 표면처리 상태, 사용 온도 및 습도의 환경 변수, 경화 온도와 압력 등의 제조 공정 변수와 작용 하중 등에 많은 영향을 받기 때문에 접착 조인트의 피로 수명을 정확하게 예측하는 것이 어려우며, 접착 조인트의 유지/관리를 위하여 실시간으로 구조물의 안전성 (reliability)을 모니터링 하는 방법이 필요하다.^(2~5)

접착 조인트의 하중 전달 능력과 실시간 모니터링에 대한 많은 연구가 수행되었고, 구조물의 안전성을 실시간으로 진단하는 방법으로 광섬유 혹은 압전센서 (piezoelectric sensor)를 삽입하는 방법이 대부분을 이루었다.^(6~13)

기존의 센서를 사용하는 방식은 센서가 장착된 국부적인 부분에서만 측정이 가능하기 때문에 접

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : dglee@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3221 FAX : (042)869-5221

* LG 전자 디지털 디스플레이 연구소

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

착 조인트 전체의 실시간 모니터링이 어렵고, 취약한 부위에 센서가 설치되어 있지 않다면 구조물의 파괴 위험을 미리 감지할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 센서가 장착되지 않은 부분까지 적절한 검사를 수행하고 구조물 전체에 대한 모니터링 기법이 요구된다. 또한 기존의 센서를 구조물 내부에 삽입하는 방법은 삽입된 센서가 결함으로 작용하여 구조물의 수명을 저하시킬 수 있기 때문에 부가적인 센서를 사용하지 않고 구조물 자체를 센서로 사용할 수 있다면 구조물의 안정성 확보에 많은 도움이 될 것이다.

본 연구에서는 튜브형 단일 겹치기 접착 조인트 (tubular single lap adhesively bonded joint)의 비틀림 피로시험을 수행하여 접착층 내부의 전기적 변화를 측정하여 접착 조인트의 피로 수명과 전기적 특성과의 관계를 분석하였으며, 접착 조인트의 실시간 안전성 모니터링을 위해 강철을 피접착체 (adherend)로 가지는 접착 조인트 자체를 센서로 이용하는 자체센서기법 (self-sensor method)을 개발하였다. 조인트 제작에 사용되는 접착제는 압전재료 (piezoelectric material)로 조인트의 강건성 (integrity)에 따라 서로 다른 값의 전하량 (electric charge)을 방출하게 된다. 피접착체 자체를 센서로 사용하기 위해 도체인 강철로 조인트를 제작하였으며, 접착 조인트를 저항, 정전용량 및 전하량으로 구성되는 등가 병렬 회로 (equivalent parallel circuit)로 모델링 하였다. 접착 조인트의 피로시험을 수행하여 접착 조인트에 사용된 접착제의 압전 특성 변화를 측정하였으며, 이를 균열진전과 연관시켰다. 접착층 내부에 균열이 발생할 경우, 균열면의 안쪽과 바깥쪽 피접착체 간의 전기적 특성이 변하는 점을 이용하여 조인트의 피로수명과 측정되는 전하량의 관계를 분석하였고, 이를 통해 국부적 응력집중이 발생하는 구조물의 안정성 모니터링에 효과적인 강도 모니터링 기법을 제시하였다.

2. 튜브형 단일 겹치기 접착 조인트

본 연구의 튜브형 단일 겹치기 접착 조인트의 제작에 사용된 접착제는 에폭시 계열의 고무성분이 첨가된 IPCO 9923 (National Starch and Chemical, Korea)으로, Table 1은 접착제와 피접착체의 기계적 물성을 나타내고 있으며, Fig. 1은 접착제의 응력-변형률 관계를 보여주고 있다. 인성 강화 에폭시 접착제의 전형적인 특성인 항복 응력 이상에서의 넓은 소성 변형 구간을 볼 수 있다.

실험에 사용된 튜브형 단일 겹치기 접착 조인트의 형상은 Fig. 2와 같으며, Table 2는 접착 조인트

Table 1 Material properties of the epoxy adhesive and the steel adherend used

	Adhesive (IPCO 9923)	Adherend (Steel)
Young's modulus, E (GPa)	2.50	210
Poisson's ratio, ν	0.41	0.30
Tensile strength, S_t (MPa)	45.0	350
Shear strength, S_s (MPa)	29.5	200
C.T.E. α ($1/^\circ\text{C}$)	72×10^{-6}	11.7×10^{-6}
Cure temperature ($^\circ\text{C}$)	60	-
Cure time (hour)	3	-

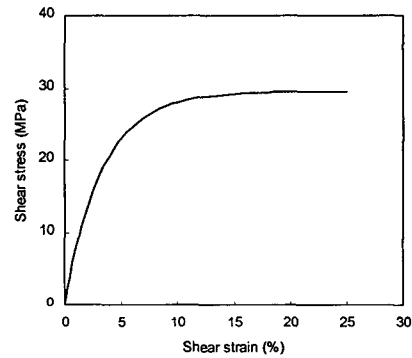


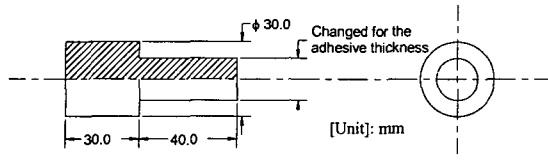
Fig. 1 Shear stress-strain curve of the cured epoxy adhesive (IPCO 9923) at room temperature

Table 2 Dimensions of the adhesively bonded tubular single lap joint with the bond thickness 0.2 mm

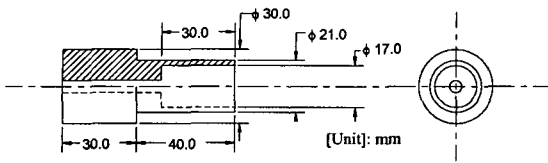
r_{2i} (mm); inner radius of the outer adherend	8.5
r_{2o} (mm); outer radius of the outer adherend	10.5
r_{1i} (mm); inner radius of the inner adherend	0.0
r_{1o} (mm); outer radius of the inner adherend	8.3
L (mm); bond length	15.0
η (mm); bond thickness	0.2

의 치수를 나타낸다. 바깥쪽 피접착체의 내경은 17.0 mm로 고정하였으며, 안쪽 피접착체의 외경을 변화시켜 0.1 ~ 0.5 mm의 범위에서 0.1 mm 간격으로 접착 두께를 조절하였다.

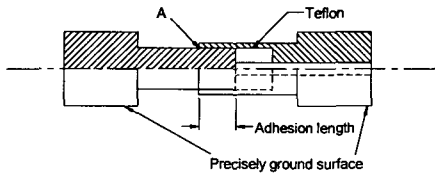
일반적으로 접착 조인트의 강도는 피접착체의 표면 상태에 민감하므로, 적합한 표면 처리가 필수적이다. 본 실험에서는 피접착체에 피로수명에 효과적이라고 알려진 #80의 사포를 이용한 기계적 표면처리를 가하였으며,⁽¹⁴⁾ 표면 처리된 피접착체 표면의 불순물을 아세톤을 이용하여 제거하였다. 안쪽과 바깥쪽 피접착체의 접착면에 접착제를 고르게 도포하여 조립한 후, 정밀하게 가공된 V-블록 위에 올려놓아 두 피접착체의 중심이 접착제



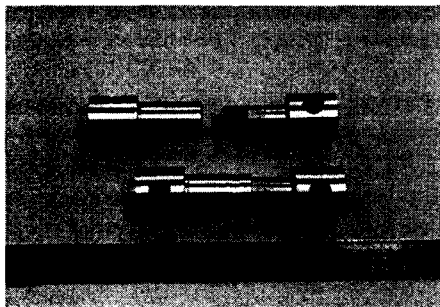
(a) Inner adherend



(b) Outer adherend



(c) Assemble adhesively bonded joint



(d) Adherends and assembled joint

Fig. 2 Configuration of the adhesively bonded joint specimen

의 경화 중 서로 일치하도록 유지하였다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 이렇게 조립된 접착 조인트는 60°C, 0.6 MPa의 압력 조건으로 오토클레이브 (autoclave)에서 경화시켰으며, 성형 후 접착부의 필렛 (fillet)은 칼로 제거하였다.

3. 비틀림 피로시험

본 연구에서는 Instron 8032 (Instron Co., USA) 비틀림 전용 시험기를 사용해 접착 조인트의 피로

Table 3 Torsion tester specifications

Model	INSTRON 8032
Maximum torque amplitude (N·m)	± 2000
Range of angle (°)	- 140 ~ 140
Maximum rotational speed (°/s)	50
Actuator type	Hydraulic
Maximum specimen length (mm)	1000

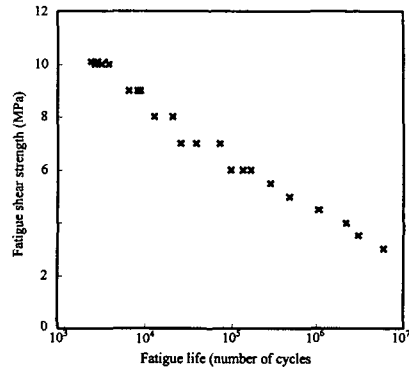


Fig. 3 Fatigue shear strength of adhesively bonded tubular joints w.r.t. the fatigue life (Average surface roughness: 1.18 μm, Adhesive thickness: 0.2 mm)

시험을 수행하였으며, Table 3 은 시험기의 사양을 보여준다.

하중 조절 (load control) 방식으로 1 Hz 의 가진 주파수, ± 19.5 ~ ± 65.0 N·m 의 비틀림 피로하중을 주었으며, 이는 접착층에 3.0 ~ 10.0 MPa 의 평균 전단응력 (average shear stress)으로 작용한다. 토크 T 가 가해 질 때, 접착층의 평균 전단응력은 다음의 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$\tau = \frac{T}{2\pi a^2 L} \tag{1}$$

여기서 T는 가해진 토크, a는 평균 접착반경, L은 접착길이이다.

피로수명에 대한 주위 온도의 영향을 제거하기 위해 피로시험이 진행되는 동안 주변 온도를 20 ± 1°C로 유지시켰으며, Fig. 3 은 비틀림 피로시험을 통해 얻은 피로수명 (fatigue life)과 비틀림 피로 전단강도를 보여준다. 피로 전단강도는 피로수명의 로그값에 반비례 함을 알 수 있다.

본 연구에서 사용한 접착제는 응력-변형을 관계에 비선형성이 존재하기 때문에, 이를 고려하기 위하여 다음과 같은 지수 응력-변형을 관계식을 사용하였다.⁽¹⁸⁾

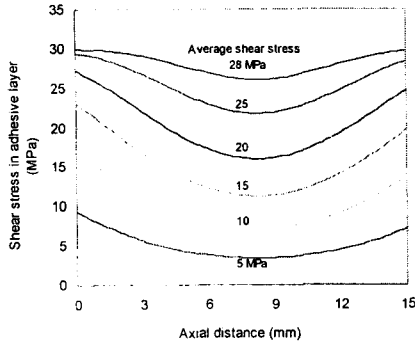


Fig. 4 Shear stress distributions in the adhesive layer of adhesively bonded tubular joints w.r.t. the axial distance and applied average shear stress (Adhesive thickness : 0.2 mm)

$$\tau = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{G}{\tau_m} \gamma} \right) \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단응력 (Pa), γ 는 전단변형률 (m/m), G 는 전단강성 (GPa), τ_m 은 전단강도 (Pa)이다.

Fig. 4 는 식 (2)를 사용하여 접착 두께가 0.2 mm 인 경우 접착층 내부의 전단응력 분포를 수치적으로 계산한 결과를 보여주며, 접착층의 길이방향으로의 평균 전단응력을 나타낸다.⁽¹⁸⁾

본 연구에서는 0.1 mm 에서 0.5 mm 까지 0.1 mm 의 간격으로 접착 조인트의 접착 두께를 바꿔가면서 조인트의 피로수명을 측정하여 Fig. 5 의 결과를 얻었으며, 접착두께와 피로수명은 서로 뚜렷한 관계가 없음을 알 수 있다.

접착제의 비선형 응력-변형률 관계를 고려하여 계산한 접착두께에 따른 접착층 내부의 최대 전단응력은 Fig. 6 과 같으며, 접착두께가 두꺼워질수록 접착층의 전단응력이 고르게 분포하는 경향을 볼 수 있다. 접착 조인트는 상온 이상의 온도에서 경화시키기 때문에 접착제와 피접착체 사이의 열팽창계수 (CTE; coefficient of thermal expansion) 차이에 의한 잔류 열응력 (thermal residual stress)이 발생하게 되므로, 본 연구에서는 잔류 열응력을 정량적으로 구하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다.

접착 조인트의 잔류 열응력을 계산하기 위한 유한요소해석에서는 4 절점 선형 확대칭 등매개변수

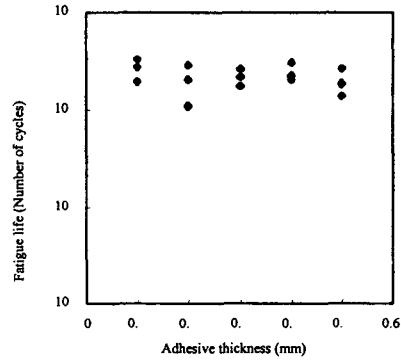


Fig. 5 Torsional fatigue life of adhesively bonded tubular joints w.r.t. the adhesive thickness (three tests for each adhesive thickness and the applied average shear stress: 8 MPa)

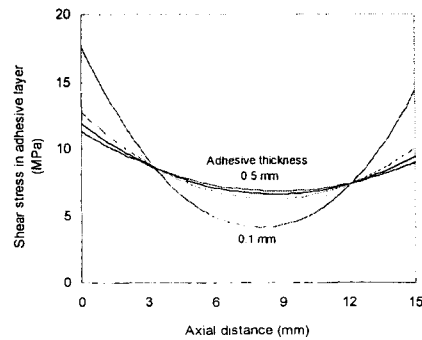


Fig. 6 Shear stress distributions in adhesively bonded tubular joints w.r.t. the axial distance and bond (adhesive) thickness (applied average shear stress: 8 MPa)

요소를 사용하였고, 전체 요소의 개수는 78,000 개 세장비 (aspect ratio)는 2: 1 이었다. 또한 접착제의 경화는 60°C, 실험은 20°C 에서 수행되므로 40°C 의 온도차를 주었으며, 식 (2)를 사용하여 접착제의 비선형성을 고려하였다. Fig. 7 은 해석을 통해 계산한 접착 조인트의 잔류 열응력을 보여주며, 접착두께가 증가함에 따라 잔류 열응력이 증가함을 알 수 있다. 반면 가해진 토크에 의한 접착층의 최대 전단응력은 Fig. 6 과 같이 접착두께가 증가함에 따라 감소한다.

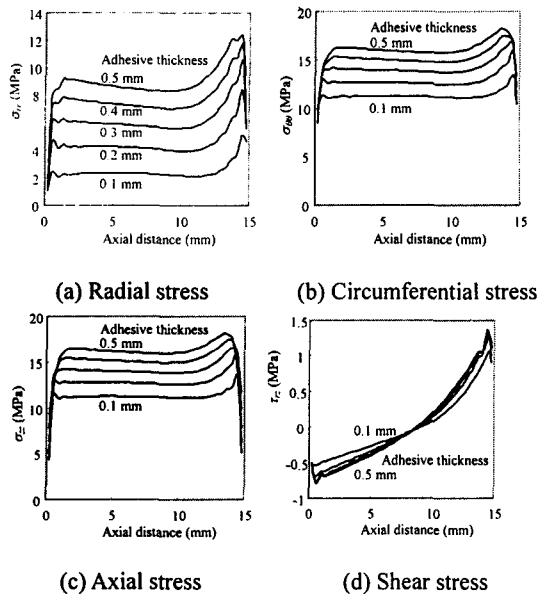


Fig. 7 Thermal residual stress distributions in adhesively bonded tubular joints w.r.t. axial distance and bond (adhesive) thickness

σ_z 를 제외한 모든 잔류 열응력 성분은 접착두께에 따라 5 ~ 6 MPa 의 차이를 보이며, 토크에 의한 최대 전단응력의 차이는 접착두께에 따라 약 6 MPa 이었다. 기계적 응력이 접착두께에 따라 차이를 보이는 하나의 성분을 갖는데 반해 잔류 열응력은 3 개의 성분을 가지므로, 접착두께에 따른 등가 잔류 열응력의 차이는 토크에 의한 최대 전단응력의 차이보다 크다. 접착두께에 따른 잔류 열응력의 차이가 최대 전단응력의 차이보다 크지만, Fig. 5 와 같이 접착 조인트의 피로수명은 접착두께와 특별한 연관성이 없다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 이는 잔류 열응력의 차이가 비록 그 값은 크지만 정적인 하중이므로, 계속해서 변화하는 동적인 하중인 최대 전단응력의 차이에 비해 접착 조인트의 피로수명에 미치는 영향이 상대적으로 작은 데 기인한다. 이러한 잔류 열응력의 영향과 최대 전단응력의 영향이 서로 상쇄되어 작용하게 되므로, 실험결과 튜브형 단일 겹치기 접착 조인트의 피로수명은 그 접착두께와는 무관함을 알 수 있었다.⁽¹⁹⁾

4. 압전현상을 이용한 측정방법

접착 조인트에 사용되는 접착제가 압전재료라 가정하고, 접착 조인트를 Fig. 8 과 같이 저항, 정전용량, 전하로 구성되는 병렬회로로 등가 모델링하였다.

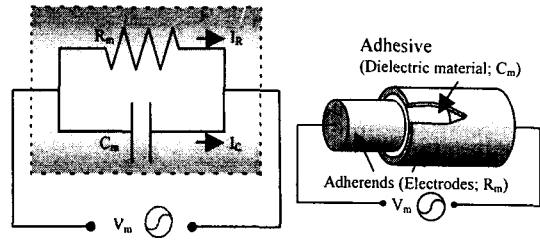


Fig. 8 An adhesively bonded joint and of which equivalent parallel circuit for modeling it

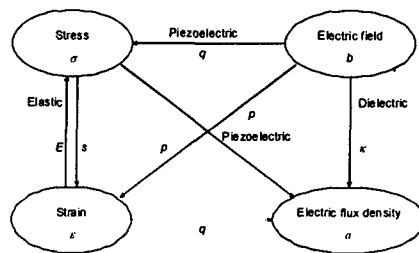


Fig. 9 Schematic diagram of the interaction mechanisms between the electrical system and the mechanical system

접착 조인트의 등가 회로모델은 응력 σ (Pa), 변형률 ϵ (m/m), 전기장 b (V/m), 전하밀도 a (C/m²) 등의 변수로 표현되며, 일반적인 응력-변형을 관계와 전기장-전하밀도의 관계는 다음의 식 (3), (4) 와 같다.⁽²⁰⁾

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \text{or} \quad \epsilon = s \cdot \sigma \quad (3)$$

여기서 E 는 인장강성 (Pa)이고, s 는 컴플라이언스 (compliance, m²/N)이다.

$$a = \kappa \cdot b \quad (4)$$

여기서 a 는 전하밀도(C/m²), b 는 전기장 (V/m), κ 는 유전상수 (dielectric constant; F/m)이다.

압전현상 (piezoelectricity)은 전기 및 기계 시스템간의 상호작용에 의해 발생하며, 그 메커니즘은 Fig. 9 와 같이 표현된다.

여기서 p 와 q 는 압전상수 (piezoelectric constant)로서, p 는 인가된 응력에 대하여 발생한 전하밀도를 의미하고 q 는 인가된 변형율에 대하여 발생한 전하밀도를 의미하며, 다음의 식들로 표현된다.

$$p = \left[\frac{\partial a}{\partial \sigma} \right]_b = \left[\frac{\partial \epsilon}{\partial b} \right]_\sigma \quad (5)$$

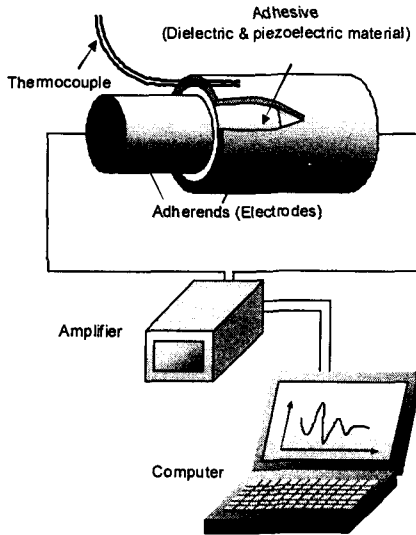


Fig. 10 Schematic diagram for fatigue monitoring of adhesively bonded joints

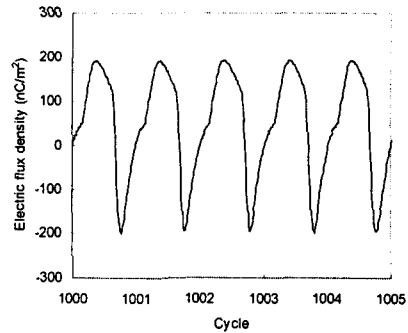
$$q = \left[\frac{\partial a}{\partial \varepsilon} \right]_b = \left[\frac{\partial \sigma}{\partial b} \right]_e \quad (6)$$

여기서 p 는 압전응력상수 (piezoelectric stress constant, C/N)를, q 는 압전변형률상수 (piezoelectric strain constant, C/m²)를 나타낸다.

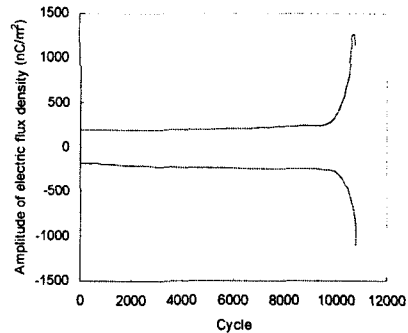
5. 접착 조인트의 피로시험 모니터링

접착제의 압전특성을 이용하여 튜브형 단일 겹치기 접착 조인트의 피로시험 중 온도, 저항, 정전 용량 및 전하량을 측정하고, 측정결과를 바탕으로 접착 조인트의 피로수명과 전기적 특성과의 연관 관계를 분석하였다. 먼저 비틀림 피로시험기 (Instron 8032)에 접착 조인트를 장착하고 Fig. 10 과 같은 방법으로 피로시험 중 접착 조인트의 전하량의 변화를 측정하였으며, 전하량 측정을 위해서 B&K 사의 Type 2626 (Brüel&Kjær Co., Denmark) 전하 증폭기를 사용하였다. 측정된 전기 신호는 AD 보드가 장착된 컴퓨터를 통해 처리되었다.

피로시험 초기 1000 사이클 근처에서의 전하밀도는 Fig. 11(a)와 같으며, Fig. 11(b)는 전체 피로시험을 통해 얻은 전하밀도의 진폭 (amplitude)을 보여준다. 피로시험의 초기에는 전하밀도의 진폭이 일정하다가 접착 조인트의 파괴시점이 다가오면 그 값이 증가하는 것을 관찰할 수 있다.



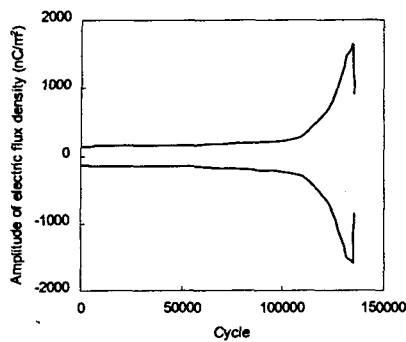
(a) Electric flux density around 1000 cycles



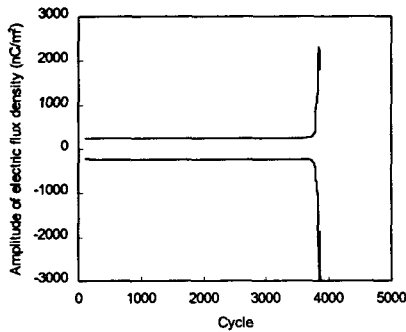
(b) Amplitude of electric flux density

Fig. 11 Typical electric flux density during fatigue monitoring of an adhesively bonded joint using piezoelectricity (Applied average shear stress amplitude 8 MPa at a frequency of 1 Hz and stress ratio of -1)

인가하중이 상대적으로 낮은 경우 (평균 전단응력 6 MPa, 가진 주파수 1 Hz, 응력비 -1)에는 Fig. 12(a)와 같이 전하밀도의 점진적 증가현상이 오랫동안 나타난 반면, 인가하중이 높은 경우 (평균 전단응력 10 MPa, 가진 주파수 1 Hz, 응력비 -1)에는 Fig. 12(b)와 같이 전하밀도의 급격한 증가현상이 관찰되었다. 이와 같은 전하밀도 증가경향의 차이는 인가하중에 따라 변화하는 균열진전 속도 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 인가하중이 낮은 경우 시험 후반에 균열이 발생한 후 점진적으로 성장하기 때문에, 그 성장에 따라 전하밀도가 증가하지만, 인가하중이 큰 경우에는 균열이 발생한 후 급격히 성장하여 접착 조인트가 파괴되므로 전하밀도의 점진적 증가구간이 나타나지 않는 것으로 판단된다.



(a) Applied average shear stress is 6 MPa

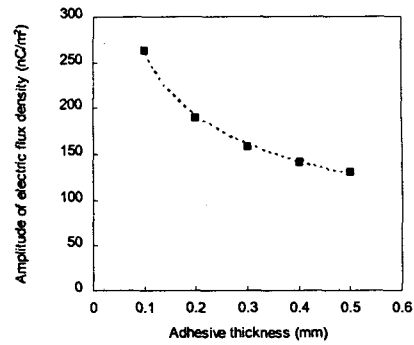


(b) Applied average shear stress is 10 MPa

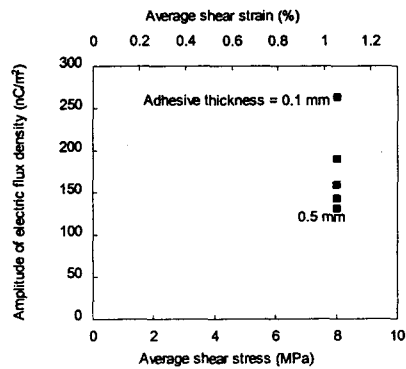
Fig. 12 Amplitude of electric flux density of adhesively bonded joints during fatigue tests using piezoelectricity

본 연구에서는 일정한 평균 전단응력 (8 MPa, 가진 주파수 1 Hz, 응력비 -1) 하에서 접착 조인트의 접착두께를 0.1 ~ 0.5 mm 까지 0.1 mm 단위로 변화시켜가며 비틀림 피로시험을 수행하고, 접착층에 작용하는 전하밀도를 측정하여 Fig. 13의 결과를 얻었다. Fig. 13(a)는 1000 사이클 근처에서의 전하밀도를 보여주며, 접착두께가 증가할수록 전하밀도가 감소함을 알 수 있다. 일정한 토크가 접착 조인트에 가해질 때, 접착두께에 따라 접착층에 작용하는 평균 전단응력은 8 MPa 로 모두 일정하므로, 접착두께에 따른 전하밀도의 변화는 Fig. 13(b)와 같이 평균 전단응력과는 무관한 것으로 판단된다.

접착 조인트에 일정한 평균 전단응력이 가해질 때, 접착층의 최대 전단응력 및 전단변형율은 Fig. 6 과 같이 접착두께에 따라 변화하므로 이를 전하밀도와 연관 지었으며, Fig. 14 와 같은 선형 비례관계가 존재함을 알 수 있었다. 접착두께에 따른 접착층 내의 전하밀도는 평균 전단응력과 상관없이 같은 접착두께에 작용하는 최대 전단응력 및



(a) w.r.t. the adhesive thickness



(b) w.r.t. the average shear stress and strain

Fig. 13 Amplitude of electric flux density at 1000 cycles (Applied average shear stress amplitude 8 MPa at a frequency of 1 Hz and stress ratio of -1) when the adhesive thickness is varied

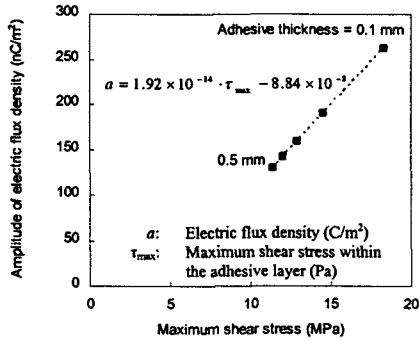
변형율에 비례하였다. 전하밀도의 진폭이 Fig. 12 와 같이 가해지는 평균 전단응력에 따라 변하지만 균열이 최대 응력이 발생하는 지점에서 생성되고 전파되기 때문에 최대 전단응력과 전하밀도 간의 선형 비례관계는 평균 전단응력 값에 영향을 받지 않을 것이다.

이와 같은 선형 비례관계를 최소자승법을 이용하여 표현하면, 직선의 기울기는 다음의 식 (7), (8)과 같다.

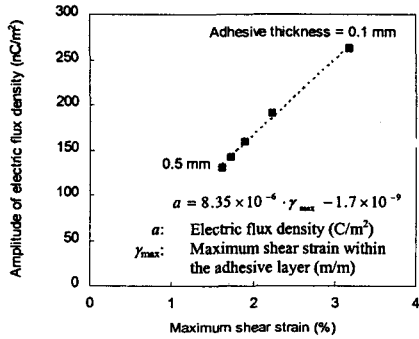
$$p = \frac{\partial a}{\partial \tau_{\max}} = 0.0192 \text{ pC/N} \quad (7)$$

$$q = \frac{\partial a}{\partial \gamma_{\max}} = 8.35 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2 \quad (8)$$

여기서 τ_{\max} 는 접착층의 최대 전단응력 (Pa)이며 γ_{\max} 는 접착층의 최대 전단변형율 (m/m)이다.



(a) w.r.t. applied maximum shear stress



(b) w.r.t. applied maximum shear strain

Fig. 14 Amplitude of electric flux density at 1000 cycles (Applied average shear stress amplitude 8 MPa at a frequency of 1 Hz and stress ratio of -1)

이상의 연구결과에서 접착 조인트의 접착층에 작용하는 전하밀도는 평균 전단응력 등의 평균값보다는 최대 전단응력 및 변형을 등의 최대값과 연관되므로, 전체적인 응력수준은 낮지만 국부적으로 집중하중 혹은 응력집중이 발생하는 구조물의 안정성을 평가하는 데 본 연구의 방법이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 다양한 재료의 압전응력상수 및 압전변형률상수의 값은 Table 4 및 5 와 같다.

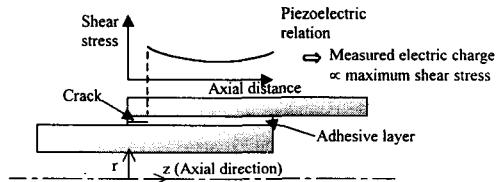
시험에 사용된 에폭시 접착제의 압전상수 값은 일반적인 압전재료인 PZT, PVDF 등이나 열가소성 수지에 비해 매우 작는데, 이는 열경화성 수지의 불규칙한 분자구조에 기인한다. 비록 에폭시 수지의 압전특성이 일반적인 압전재료에 비해 약할지라도, 이를 접착 조인트의 안전성 모니터링의 용도로 사용하는 데에는 무리가 없음을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 균열길이와 측정된 전하밀도의 관계를 설명하기 위해, Fig. 15 와 같이 내부에 균열을 갖는 접착층 모델을 사용하였다.

Table 4 Piezoelectric stress constant of various materials (Unit: pC/N)

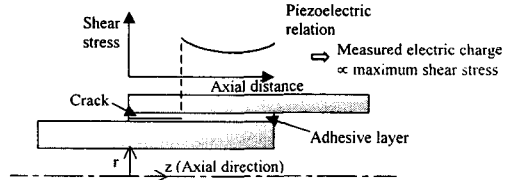
PZT (Pb(Zr-Ti)O ₃)	120
PVDF, poly (vinylidene fluoride)	30
PVC, poly (vinyl chloride)	1
Nylon 11	0.3
Rubber	~ 0.1
Epoxy (Rubber toughened, IPCO 9923)	0.019

Table 5 Piezoelectric strain constant of various materials (Unit: × 10⁻³ C/m²)

PZT (Pb(Zr-Ti)O ₃)	18
PVDF, poly (vinylidene fluoride)	16
PVC, poly (vinyl chloride)	3
Nylon 11	0.5
Rubber	0.0001
Epoxy (Rubber toughened, IPCO 9923)	~ 0.001
	0.00835



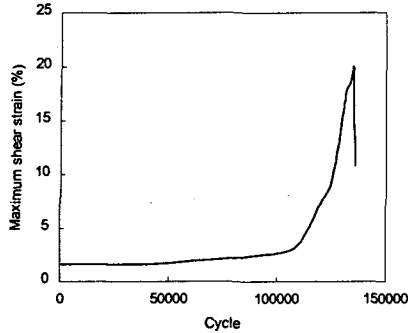
(a) Initial state of the fatigue test



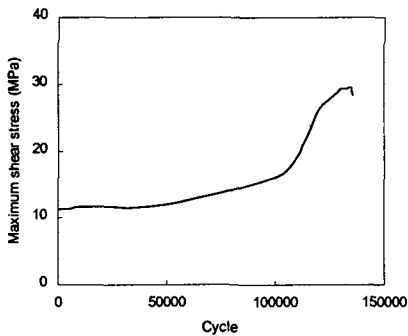
(b) Increase of crack length due to the crack propagation

Fig. 15 Simplified models of the adhesive layer with an inside crack used for explaining the relationship between the crack length and the measured electric charge

피로시험의 초기에는 Fig. 15(a)와 같이 균열길이가 상대적으로 짧지만, 시험이 진행될수록 Fig. 15(b)와 같이 균열이 점진적으로 전파하게 된다. Fig. 15(a)의 경우와 같이 접착층 내의 균열길이가 짧을 때에는 가해지는 하중을 전달할 수 있는 영역이 넓기 때문에 접착층에 작용하는 최대 전단응력 및 변형률의 값이 상대적으로 낮아 측정되는 전하밀도의 값이 작다. 반면, 접착층 내의 균열이 성장하여 하중을 전달할 수 있는 영역이 줄어들면 접착층 내부의 최대 전단응력 및 변형률이 높아지게 되어 측정되는 전하밀도의 값이 증가하게 된다. 즉, 접착층 내의 균열이 진전하여 하중을 전달할 수 있는 영역이 줄어들수록 접착층에 작용하는



(a) Maximum shear strain



(b) Maximum shear stress

Fig. 16 Estimated results from the electric flux density of an adhesively bonded joint using the modified piezoelectric stress constant (p) during the fatigue test

최대 전단응력 및 변형율이 증가하게 되어, 피로 시험의 중반부에는 Fig. 12(a)와 같이 측정되는 전하밀도의 값이 증가하게 되는 것이다.

본 연구에서 사용된 접착제는 비선형 특성을 가지므로 작용하중이 높아지면 응력과 변형율의 변화가 서로 달라지게 된다. 특히 접착 조인트의 파괴 직전에는 전단강도에 가까운 전단응력이 작용하므로 정확한 피로 모니터링을 위해서는 응력-변형율의 비선형성에 대한 고려가 필수적이다.

식 (8)을 이용하여 Fig. 12(a)의 전하밀도를 피로 사이클에 대한 최대 전단변형율의 추정값으로 표현하면 Fig. 16(a)와 같으며, 파괴 시점의 최대 전단변형율 (20%)이 IPCO 9923 접착제의 정적 파괴 변형율 (25%)보다 약간 낮음을 알 수 있다. 식 (2)와 같은 접착제의 비선형 응력-변형율 관계를 고려하여 피로 시험 중 피로 사이클에 대한 최대 전단응력의 변화를 나타내면 Fig. 16(b)와 같으며, 최대 전단응력이 점진적으로 증가하다가 파괴 직전에 전단강도까지 상승한 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 접착 조인트에 사용되는 접착제의 압전특성을 이용하여, 튜브형 단일 겹치기 접착 조인트의 비틀림 피로시험을 실시간으로 모니터링하고 이를 분석하는 방법을 제시하였다. 접착 조인트의 피로시험 중에 접착층 내부의 전하밀도를 측정하여 이를 균열진전 및 피로특성 등에 연관 지었으며, 측정된 전하밀도가 접착층 내부의 평균 전단응력이 아닌 최대 전단응력 및 변형율에 따라 민감하게 변화함을 규명하였다. 따라서 전체적인 응력수준은 낮지만 국부적으로 집중하중 혹은 응력집중이 발생하는 구조물의 경우, 본 연구의 방법을 통해 임의의 시점에서의 구조물의 안정성을 실시간으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 별도의 센서를 삽입하는 기존의 안정성 모니터링 방법은 삽입된 센서 자체가 구조물의 결함으로 작용할 수 있으나, 본 연구의 방법은 접착 조인트 자체를 센서로 이용하므로 구조물에 영향을 미치지 않으며 구조물 전체의 안정성을 연속적으로 모니터링 할 수 있다는 장점을 가진다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업, 두뇌한국 21 사업과 한국기계연구원의 스마트 무인기 기술개발 사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Reinhart, T. J. (Ed.), 1987, *Composites*, ASM International, Metals Park, OH, Vol. 1, pp. 479-495.
- (2) Vinson, J. R. and Sierakowshi, R. L., 1987, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Martinus Nijhoff Publishers, pp. 239-283.
- (3) Kinloch, A. J., *Adhesion and Adhesives*, Chapman and Hall, pp. 2-3, pp. 18-55.
- (4) Mallick, P. K., 1988, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, New York, pp. 417-425.
- (5) Bikerman, J. J., 1968, *The Science of Adhesive Joints*, 2nd ed., Academic Press, pp. 309-316.
- (6) Adams, R. D. and Peppiatt, N. A., 1977, "Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints," *Journal of Adhesion*, Vol. 9, pp. 1-18.
- (7) Lee, S. J. and Lee, D. G., 1996, "Development of a Fatigue Failure Model for the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint under Dynamic Torsional Loading," *Journal of Adhesion*, Vol. 56, pp. 157-169.
- (8) Kwon, J. W. and Lee, D. G., 2000, "The Effects of

- Surface Roughness and Bond Thickness on the Fatigue Life of Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," *Journal of Adhesion Science Technology*, Vol. 14, pp. 1085~1102.
- (9) Tang, B., Mommaerts, J., Duncan, R. K., Duke, J. C., Jr. and Dillard, D. A., 1993, "Nondestructive Evaluation of Model Adhesive Joints by PVDF Piezoelectric Film Sensors," *Experimental Mechanics*, Vol. 33, No. 2, pp. 102~109.
- (10) Anderson, G. L., Robertson, R. C., Peterson, B. L. and Dillard, D. A., 1994, "Embedded Piezoelectric Sensors to Measure Peel Stresses in Adhesive Joints," *Experimental Mechanics*, Vol. 34, No. 3, pp. 194~201.
- (11) Salvini, P., Scardecchia, E. and Demofonti, G., 1997, "A Procedure for Fatigue Life Prediction of Spot Welded Joints," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 1117~1128.
- (12) Giurgiutiu, V., Reynolds, A. and Rogers, C. A., 1999, "Experimental Investigation of E/M Impedance Health Monitoring for Spot-Welded Structural Joints," *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 10, pp. 802~812.
- (13) Park, G., Muntges, D. E. and Inman, D. J., 2001, "Self-Monitoring and Self-Healing Jointed Structures," *Key Engineering Materials*, Vol. 204, pp. 75~84.
- (14) Lee, D. G., Kim, K. S. and Lim, Y. T., 1991, "An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," *Journal of Adhesion*, Vol. 35, pp. 39~53.
- (15) Choi, J. K. and Lee, D. G., 1995, "Torque Transmission Capabilities of Bonded Polygonal Lap Joints for Carbon Fiber Epoxy Composites," *Journal of Adhesion*, Vol. 48, pp. 235~250.
- (16) Lee, S. J. and Lee, D. G., 1992, "Development of a Failure Model for the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint," *Journal of Adhesion*, Vol. 40, pp. 1~14.
- (17) Choi, J. H. and Lee, D. G., 1996, "An Experimental Study of the Static Torque Capacity of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint," *Journal of Adhesion*, Vol. 55, pp. 245~260.
- (18) Lee, D. G., Jeong, K. S. and Choi, J. H., 1995, "Analysis of the Tubular Single Lap Joint with Nonlinear Adhesive Properties," *Journal of Adhesion*, Vol. 49, pp. 37~56.
- (19) Lee, D. G., Kwon, J. W. and Cho, D. H., 1998, "Hygrothermal Effects on the Strength of Adhesively Bonded Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 12, pp. 1253~1275.
- (20) Ikeda, T., 1996, *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford Science Publication, Oxford.