

論文

압전센서를 이용한 스마트 복합재료 패널에 대한 연구 :

I. 성형 및 구조적 건전성

김 인 결*

A Study on the Smart Composite Panels Based on Piezoelectric Sensors :

I. Fabrication and Structural Integrity

In-Gul Kim *

ABSTRACT

PZT piezoceramic sensors and PVDF piezopolymer sensors were evaluated for their suitability for impact detection in light weight composite skins and sandwich panels. Specific areas of investigation included manufacturing techniques, sensor strength and durability, and their effect upon strength of the host structure. Both sensors were successfully mounted on the laminated surface. Piezoceramic sensors were also successfully embedded in the core of sandwich panels. Tension tests showed that surface mounted sensors did not impair performance of the host structures but embedded PZT sensor deteriorated the strength of host structures. Tensile fatigue testing also showed that the responses of piezoceramic sensors were different not only from those of piezopolymer sensors but also depending upon the sensor attaching method during fatigue loading.

초 록

세라믹 압전센서, PZT와 고분자 압전센서, PVDF를 사용하여 저속충격을 탐지할 수 있는 경량 복합재료 외피 패널과 샌드위치 패널의 개발을 위하여 센서의 장착방법 및 이에 따른 센서/주 구조물의 구조적 건전성(Structural Integrity)에 대하여 고찰하였다. 두 종류의 센서를 여러 가지 부착/삽입 방법으로 복합적층판에 장착하고 접착층을 관찰하였다. 원판 모양의 PZT 센서를 샌드위치 패널의 허니컴 코아와 외피 사이에 삽입하였다. 인장시험 결과 적층판 표면에 부착된 센서는 주구조물의 강도 및 강성도에 거의 영향을 주지 않았으나 복합적층판에 삽입된 PZT는 예상대로 주구조물의 강도 저하를 초래하였다. 표면에 부착된 PZT 센서는 PVDF 센서와는 달리 정적 인장시험 및 인장 피로시험에서 센서의 응답성이 부착방법에 따라 서로 다른 양상으로 감소함을 관찰하였다.

* 충남대학교 공과대학 항공우주공학과

1. 서 론

고분자 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 많은 장점을 갖고 있어 항공우주 분야에서의 수요는 급증하고 있으나 저속충격에 의한 손상에 대한 많은 취약성을 갖고 있다. 특히, 저속충격을 받은 복합재료 구조물은 외형상으로는 전혀 손상이 없어 보이지만 내부에는 손상영역이 생길 수 있다. 이러한 손상은 정기적인 지상 점검이나 정비 과정에서 비파괴 검사를 통하여 발견될 수도 있지만 검사자의 숙련도에 크게 좌우되며 경제적인 측면에서 불리하다. 더구나 발견되지 않은 손상영역이 항공기 운용중에 커진다면 치명적인 구조적 파괴를 유발하여 커다란 인명 및 재산 피해를 야기할 수도 있다.

이러한 문제의 해결 방법으로 재료 분야에서는 저속충격에 보다 강한 고분자 기지재료와 보강섬유의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 항공/기계 분야에서는 외부환경에 의한 자극(여기서는 저속충격)에 대하여 생명체의 신경조직과 같은 센서를 구조물에 부착시켜 구조물의 이상유무를 연속적으로 자체 진단하고 이에 대처할 수 있는 능력을 가진 새로운 개념의 구조물에 대한 연구가 국내외적으로 시도되고 있다. 최근 여러 분야의 첨단기술-구조, 재료, 전자, 장치기술, 및 제어 기술 등-의 발달은 외부의 자극들을 감지하여 스스로 제어할 수 있는 이러한 스마트 구조물의 출현을 가능하게 하였다[1, 2].

현재까지 많은 스마트 구조물에 대한 연구는 주로 삽입된 광섬유를 이용하였고[3~7] 압전재료는 주로 진동 감지 및 제어 이론을 통한 능동제어 분야에 많이 이용되어 왔다[8~12]. 그러나 압전재료에 대한 대부분의 연구는 진동감지용 변형을 감지기(Sensor)와 이를 제어하기 위한 작동기(Actuator)로 압전재료를 사용하여 주구조물에 삽입 또는 부착하였으며 주구조물과 압전재료 사이의 접착층의 영향을 무시하고 완전 접착 조건으로 해석하였다.

본 논문에서는 압전센서를 구조물에 장착하여

저속충격에 의한 압전센서의 전기적 신호로부터 저속충격의 위치 및 충격력을 예측할 수 있으며, 이러한 정보는 저속충격의 크기에 따라 운용중인 항공기의 조종사에게 실시간에 전달되거나 지상점검시 정비사에게 정확한 충격위치 및 충격량을 제공하여 보다 정확한 손상 부위와 크기를 찾아낼 수 있는 스마트 복합재료 구조물을 개발하는데 먼저 고려해야 할 압전센서의 장착방법 및 장착된 센서가 주구조물에 대한 영향 및 외부하중에 의한 장착된 센서의 응답성에 대하여 고찰하였다. 주구조물은 Gr/Ep 복합재료 판재를 사용하였고 센서로는 세라믹 압전재료 PZT(lead zirconate titanate)와 고분자 압전재료 PVDF(polyvinylidene flouride)를 사용하였다. 1부에서는 항공기 외피를 대표할 수 있는 복합재료 판재와 샌드위치 패널에 압전센서를 여러가지 방법으로 부착 또는 삽입하는 기법과 인장 및 피로 시험을 통하여 부착/삽입 방법에 따른 주구조물의 구조적 건전성에 미치는 영향, 그리고 이러한 하중하에서의 센서의 응답에 대하여 고찰하였으며, 2부에서는 인장피로 시험시 주구조물의 변형율과 센서의 응답에 대한 실험결과를 센서와 주구조물 사이의 접착층의 영향을 고려하여 이론적으로 비교 분석하였다.

2. 스마트 복합재료 패널의 성형

스마트 구조물을 개발하는데 선행되어야 할 일은 압전센서를 복합재료에 어떻게 부착/삽입하는 일이다. 사용되는 센서는 복합재료 성형 온도와 압력에 견디어야 한다. 일단 부착/삽입된 센서는 주구조물의 기계적 특성에 최소의 영향을 미쳐야 한다. 센서에 연결된 전선의 굵기와 형태는 복합재료와 잘 조화되어야 하며 부착시 다루기가 쉬워야 한다[13]. 환경에 대한 민감도, 전기절연성, 그리고 최소의 구조적 성능 저하에 대하여 고찰하여야 한다. 이러한 여러조건 등을 고려하여 스트링거로 보강된 항공기 외피 구조물과 유사한 복합재료 판재와 샌드위치 판재에 압전센서를 장착할 수 있는 여러 가지 방법에 대하여 고찰하였다.

2-1. 사용재료

스마트 복합재료 구조물은 Gr/Ep 복합재료 판재로 된 주구조물, 압전센서, 그리고 센서를 주구조물에 장착하기 위한 접착제로 이루어졌다.

2-1-1. 복합재료 패널

두 종류의 Gr/Ep 프리프레그가 주구조물을 만드는데 사용되었다. 일방향 Gr/Ep 프리프레그(T650/35/ERL-1902; Amoco)로 $[0/90]_{4S}$ 적층판과 페브릭 Gr/Ep 프리프레그(T650/35-5HS/ERL-1902; Amoco)로 $[0/90]_{2S}$ 적층판을 제작하여 인장 및 피로 시험용 시편을 만드는데 사용되었다. 샌드위치 패널의 면재는 페브릭 Gr/Ep 프리프레그(T650/35-5HS/ERL-1902)와 심재는 노맥스 하니컴 코어(Hexcel, HRH-10-1/8-3)를 사용하여 일체 성형하였고 적층순서는 $[0/90]_S/\text{Core}/[0/90]_S$ 이다.

2-1-2. 압전센서

두 종류의 서로 다른 센서가 본 연구에서 사용되었다. 세라믹 재료로 만들어져 강성도가 크지만 잘 깨지기 쉬운 세라믹 압전센서(PC 센서) PZT, 주로 액추에이터로 항공우주 분야에서는 회전익의 피치 제어와 능동 진동감쇠용, 그리고 우주 구조물의 형상제어용으로의 응용이 제안되었다. 그러나 PZT는 깨지기 쉽기 때문에 변형율이 매우 작은 구조물에의 응용으로 제한되어 있고 비선형성과 히스테리시스 특성을 갖고 있다. 고분자 필름 형태의 고분자 압전센서(PP 센서) PVDF는 내피로성, 내마모성, 유연하고 질긴 특성이 있는 엔지니어링 플라스틱으로 되어 있다. 세라믹 압전센서에 비하여 액추에이션 기능은 떨어지지만 광범위한 전압과 변형율, 그리고 넓은 주파수 범위에서 사용될 수 있다. 이러한 특성과 저렴한 가격 때문에 스위치, 마이크로폰등과 같은 일반 응용 범위에서부터 정적 및 동적 변형율 측정, 충격탐지, 비파괴검사, 음향 방출 및 감지 등과 같은 분야에서의 연구도 활발히 진행되고 있다. PVDF의 단점은 100°C 이상에서는 압전효과를 상실하는 것이다.

세라믹 압전센서 PKI 500(Piezo Kinetic Co.) [14]는 두께 0.38mm, 직경 5.08mm의 원판형 센서이며 전극판의 모양은 Fig.1에 나타나 있다. 고분자 압전센서 DTI-028K(Atochem Sensor Inc.)는 길이 30mm, 폭 12mm, 두께 0.028mm의 직사각형 센서를 사용하였다[15, 16].

2-1-3. 접착제

3가지 종류의 다음과 같은 접착제를 사용하였다.

- 접착필름(NB-101, Newport Adhesives, Inc.,) 경화전 두께, 0.3mm
- 5분경화 에폭시(Devcon Co.)
- Gr/Ep 프리프레그 성형시 잉여수지

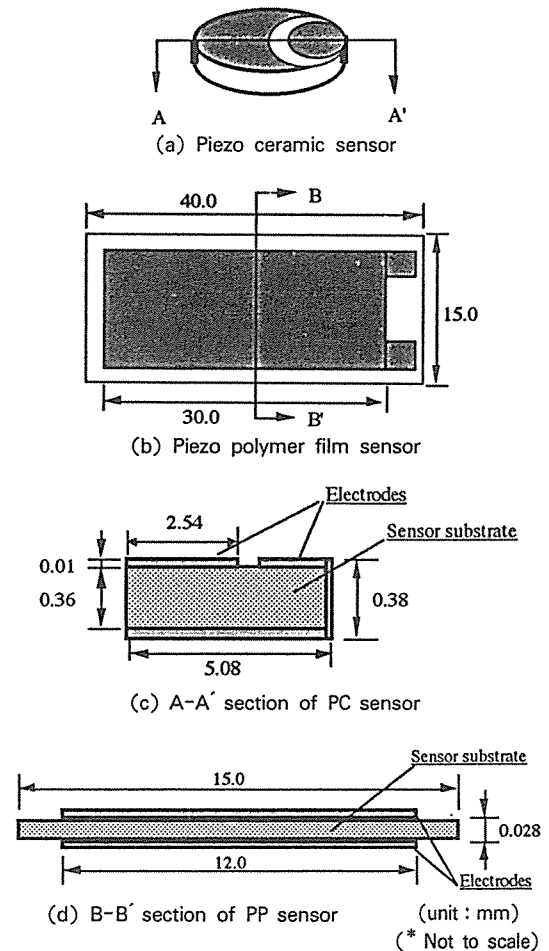


Fig. 1. Geometry of piezoelectric sensors

2-2. 압전센서의 부착방법

스마트 구조물에 센서나 액추에이터를 장착하는데에는 크게 2가지 방법이 사용된다. 가) 구조물 안에 직접 삽입하여 외부의 환경 요인으로부터 보호시키는 방법과 나) 겹사, 교환, 그리고 수리가 가능하게 구조물 외부에 부착시키는 방법이 있다. 광섬유 센서는 주로 삽입하며 세라믹 압전센서는 방법 가) 또는 나)로 가능하며 고분자 압전센서는 온도의 제약 때문에 구조물 성형후 표면에 부착하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 삽입방법과 부착방법에 대하여 고찰하였다.

5가지 다른 방법으로 압전센서를 장착하였으며 Fig.2에 장착방법이 나와 있다.

(1) 삽입된 PC 센서(T-1)

세라믹 압전센서를 적층판에 삽입하고 성형한다. 전선은 직경 0.203mm의 에나멜 코팅된 134-AWP(Micro Measurement 제품)를 사용하였다. 전선은 압전센서의 전극판에 납땜으로 직접 연결하였고 탄소섬유와 전극판 사이의 절연을 위하여 에폭시로 얇게 코팅하였다. Gr/Ep 프리프레그를 2개의 $[0/90]_4$ 로 적층한 후 압전센서를 삽입하고 전선은 0° 방향으로 배치하였다. 시편의 모서리 끝단에서는 전선을 테프론 테일로 끝처리하여 적층시와 오토크레이브 성형시 다루기를 용이하게 하였다. 적층판은 오토크레이브에서 프리프레그 성형조건에 따라 성형하였다.

(2) 일체성형된 PC 센서(T-2)

세라믹 압전센서를 적층된 프리프레그 위에 놓고 오토크레이브에서 일체 성형시킨다. 압전센서의 위치를 고정시키고 절연을 막기 위하여 테프론 테일을 사용하여 고정시키고 성형후 제거한다.

(3) 접착필름장착 PC 센서(T-3)

성형한 적층판에 접착필름을 사용하여 세라믹 압전센서를 표면에 부착시킨다. 미니클레이브에서 온도 135°C , 압력 170 KPa로 45분 동안 성형한다.

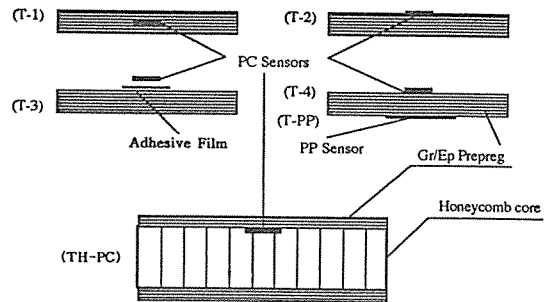
(4) 에폭시 접착 PC 센서(T-4)와 PP 센서(T-PP)

성형한 적층판에 상용 5분 에폭시 접착제를 사용하여 세라믹 압전센서와 고분자 압전센서를 접착하였다. 센서위에 가능한한 접합 압력 분포를

일정하게 하기 위하여 고무판과 얇은 알루미늄 판재를 덮고 집게로 몰린후 진공 오븐에서 $40\sim 43^\circ\text{C}$ 로 24시간 동안 경화시킨다.

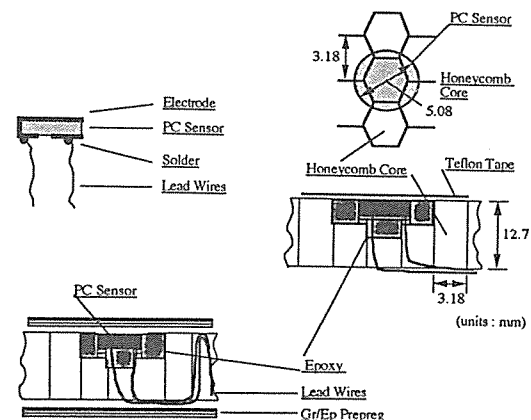
(5) 하니컴 코어 장착 PC 센서(TH-PC)

세라믹 압전센서를 코아와 적층한 프리프레그 사이에 두고 샌드위치 패널을 일체 성형한다. 첫 번째 방법은 코아에 압전센서가 위치할 공간을 확



- (T-1) **Embedded PC Sensor**; Embedding PC sensor into laminate during curing
 (T-2) **Co-cured PC sensor**; Attaching PC sensor with excessive resin from prepreg during curing
 (T-3) **Adhesive-bonded PC Sensor**; Attaching PC sensor with adhesive film after curing
 (T-4) **Epoxy-bonded PC and PP Sensor**; Attaching PC sensor and PP sensor with epoxy resin after curing
 (TH-PC) **Embedded PC Sensor into Sandwich Panel**; Embedding PC sensor into during curing

(a) Techniques for Incorporating the PC and PP sensors into composite panels



(b) Procedure for embedding PC sensor into sandwich panel

Fig.2. Piezoelectric sensor placement techniques

보호하기 위하여 코아의 일부를 가공한 후 에폭시로 압전센서를 코아에 고정시킨후 일체 성형하였다 (TH1-PC). 두번째 방법은 코아의 가공없이 압전 센서를 직접 면재와 코아 사이에 위치시킨후 일체 성형하였다(TH2-PC). 두 방법 모두 접착면은 프리프레그의 잉여 수지로 압전센서와 면재가 접착된다. 경화사이클은 적층판재의 경우와 같고 성형 압력을 586 KPa 대신 310 KPa를 사용하였다.

2-3. 적층 및 경화방법

복합재료 판재와 샌드위치 패널을 인장 및 피로 시험용으로 오토클레이브에서 성형하였다. 적층된 프리프레그는 알루미늄 판재 위의 이형 필름 위에 놓여졌고 Fig.3과 같이 여러가지 성형 부자재로 적층되었으며 경화사이클은 프리프레그 제작사의 기준을 따랐다.

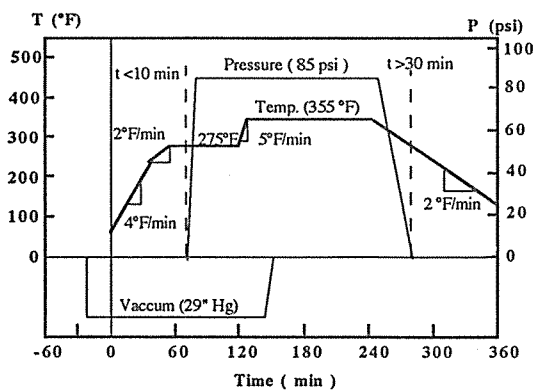
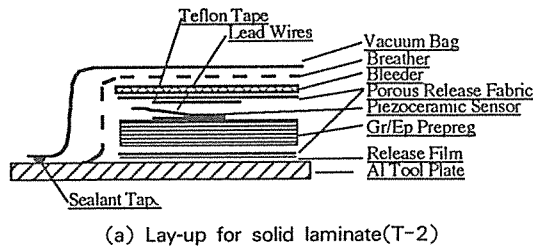


Fig.3. Schematic lay-up and cure cycle for solid laminates with PC sensor

2-4. 부착성 분석

부착된 압전센서와 주구조물 사이의 접착면을 분석하기 위하여 시편의 단면을 레이저 스캐닝 현미경으로 관찰하였다. Fig.4는 압전센서가 부착된 적층판의 도식적 그림이다. 압전센서는 압전재료와 전도성 물질인 전극판으로 구성되었으며 t_{pc} 와 t_{pp} 는 세라믹과 고분자 압전센서의 두께이다. 전극판과 접착층의 두께는 t_e 와 t_b 이다. 센서가 부착된 바로 아래의 적층판 두께를 t_1 으로 정의하고, t_2 는 센서가 부착된 곳에서 멀리 떨어진 곳의 적층판 두께이다.

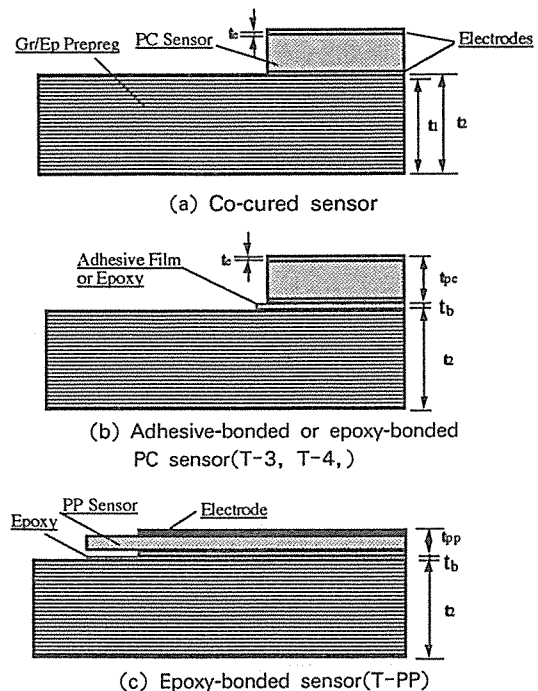


Fig.4. Schematic diagram of the cross-section of laminates with attached sensors

3. 실험방법 및 절차

압전센서가 부착된 복합재료 시편에 대한 기계적 시험은 두가지 목적으로 수행하였다. (1) 센서가 주구조물의 기계적 특성에 미치는 영향과 (2) 정적 및 피로 하중을 받을때 센서의 응답성에 대한 영향을 고찰하기 위하여 센서의 장착 방법에 따른 주구조물의 정적 강도 및 탄성계수 측정을 위한 정적

인장시험과 센서의 응답성 측정을 위한 인장피로 시험을 수행하였다.

3-1. 시편제작

압전센서가 부착된 복합적층판과 샌드위치 패널 시편을 인장시험과 피로시험을 위하여 제작하였다. 인장시험용 시편은 Fig.5(a)와 같고 복합적층판은 길이 38mm인 GI/Ep 탭을 양 끝에 접착하였다. 전기저항형 스트레인 게이지를 부착하여 탄성계수를 구하였다.

피로시험용 복합적층판 시편은 인장시편과 거의 같은 형상이며 시편의 길이는 229mm이다. 피로 시험용 샌드위치 시편은 피로시험용 만능시험기의 그림 크기의 제한 때문에 성형후 샌드위치 패널의

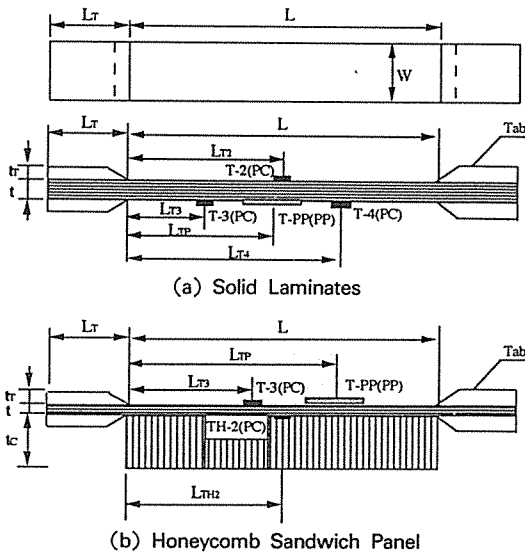


Fig. 5. Geometry of durability test specimens and locations of attached piezoelectric sensors

한쪽 면재를 제거하고 GI/Ep 탭을 Fig.5(b)와 같이 부착하였다. Table 1에 시편의 제원과 부착된 센서의 위치가 나와 있다.

3-2. 정적 인장시험

일방향 인장시험은 ASTM 규격 D3039-76 [ASTM, 1987]에 따라 수행하였다. 인장시편을 만능시험기에 장착하고 스트레인 게이지는 신호 취득장치를 통하여 컴퓨터에 연결하고 부착된 압전 센서는 오실로스코프에 연결하였다. 만능시험기는 변위를 0.635 mm/min로 제어하고 하중도 연속적으로 측정하였다. 인장시편의 파괴강도의 10%에 해당하는 하중을 가했다가 하중을 제거한 후, Engraver를 시편의 한쪽 면에 수직으로 접촉한 후 시편을 가진하고 이 때 시편의 진동에 의한 압전센서 신호의 최대, 최소 값을 측정하였다. 이러한 방법으로 시편이 파괴될 때 까지 하중을 파괴 강도의 10%씩 증가시키면서 Engraver에 의한 압전센서의 신호를 측정하였다.

3-3. 인장 피로시험

인장 피로시험은 ASTM 규격 D3479-76에 따라 수행하였다. 피로시험기에 시편을 장착하고 압전 센서를 오실로스코프에 연결하였다. 피로 시험기는 하중제어 모드로 조정하였고 반복 하중형태는 정현파이며 0부터 최대 인장하중을 시편의 파괴강도의 50% (시편 SUF-2는 25%)에 해당하는 하중으로 가하였다. 고분자 복합재료이기 때문에 반복 하중에 의한 시편의 온도 상승 영향을 최소화 하기 위하여 반복하중의 주기는 5 Hz로 선택하였다. 피

Table 1. Sensor locations and dimensions of durability test specimens

(unit : mm)

Specimen	L	W	t	L _T	L _{T2}	L _{T3}	L _{T4}	L _{Tp}
SUT-1 ^a	177.8	23.8	2.03	48.3	88.9	50.8	129.5	86.0
SFT-1 ^a	177.8	23.9	1.88	35.6	88.9	50.8	132.1	83.5
SUF-2 ^b	152.4	23.9	2.03	38.1	76.2	38.1	114.3	88.6
SUF-3 ^b	152.4	24.1	2.03	38.1	76.2	38.1	114.3	88.6
SFF-2 ^b	152.4	24.1	1.88	38.1	76.2	38.1	114.3	88.6

a : Tension specimen

b : Fatigue specimen

Table 2. Summary of microscopic bonding examination

(unit : mm)

Panel		t_{pc}	t_{pp}	t_e	t_b	t_1	t_2
Gr/Ep ^a [0/90] _{4S}	T-2	0.38	—	0.010	—	1.91	1.95
	T-3	0.38	—	0.010	0.058	1.95	1.95
	T-4	0.38	—	0.010	0.010	1.95	1.95
	T-PP	—	0.045	0.010	0.010	1.93	1.93
Gr/Ep ^b [0/90] _{2S}	T-2	0.38	—	0.010	—	1.76	1.79
	T-3	0.38	—	0.010	0.058	1.78	1.78
	T-4	0.38	—	0.010	0.010	1.78	1.78
	T-PP	—	0.045	0.010	0.010	1.79	1.79

a : T650/35/ERL-1902 unidirectional prepreg

b : T650/35-5HS/ERL-1902 fabric prepreg

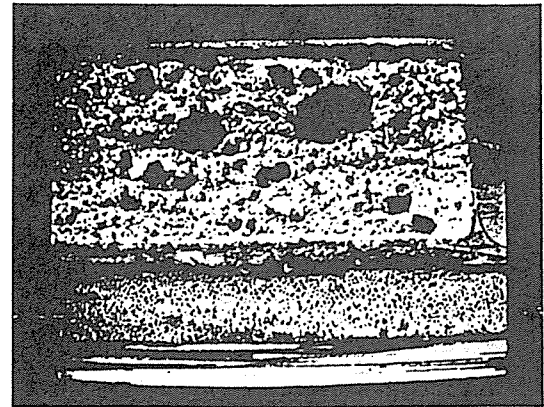
로시험중 초기, 1,000회, 10,000회, 100,000회에
서의 피로하중에 의한 압전센서 신호를 측정하였고
100,000회 이후 부터 1,000,000회까지는 200,000회
간격으로 센서신호를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

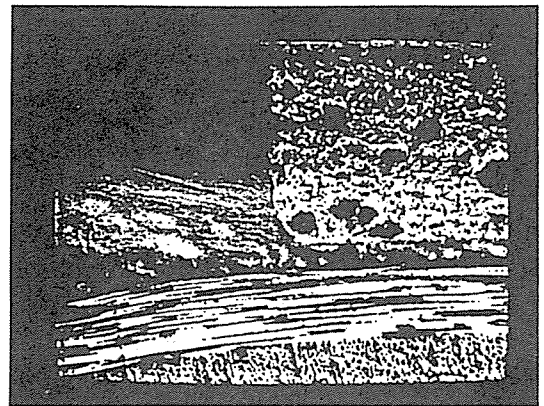
4-1. 접착층 분석

일체 성형된 PC 센서 바로 아래에서의 두께와
센서로 부터 멀리 떨어진 곳에서의 적층판의 두께
차이($t_2 - t_1$)는 일방향 프리프레그 1장 두께의 40%
정도의 두께 차이를 보였으며 PC 센서와 적층판
사이의 잉여수지층은 관찰되지 않았다. 접착필름을
사용한 경우는 접착층의 두께 t_b 가 0.058mm이었
으며 이것은 프리프레그 두께의 약 50%에 해당
되며 PC 센서 두께의 20%에 해당하는 두께이다.
이것은 PC 센서의 변형율이 주구조물의 변형율과
같지 않을 수 있다는 가능성을 보여준다. 이러한
두꺼운 접착층은 PC 센서가 주구조물의 과도한 변
형으로 부터 PC 센서를 어느 정도 보호해 줄 수
있는 반면 센서의 반응은 감소한다는 것을 의미한
다. 에폭시접착 센서의 접착 두께는 0.01mm로
접착필름 두께보다 훨씬 얇은 것으로 나타났으며
이것은 접착필름보다 점도가 낮기 때문이라고 생
각된다. PP 센서의 두께는 0.028mm이어야 하는데
실제로는 0.025mm 관찰되었다. 에폭시 접착층은
거의 PP 센서의 두께와 같았다. Fig.6은 시편의
단면조직 사진이다. Table 2는 부착방법에 따른

접착층 두께의 차이와 주구조물의 두께 변화를 정

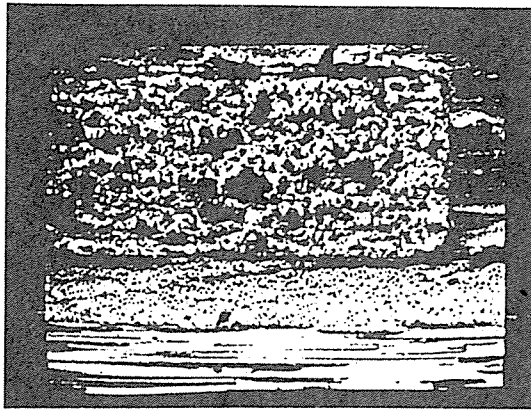


(a) Adhesive-bonded sensor, T-3
(Gr/Ep unidirectional prepreg)

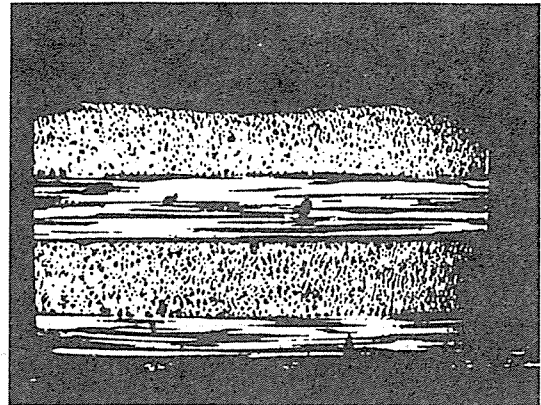


(b) Adhesive-bonded sensor, T-3
(Gr/Ep fabric prepreg)

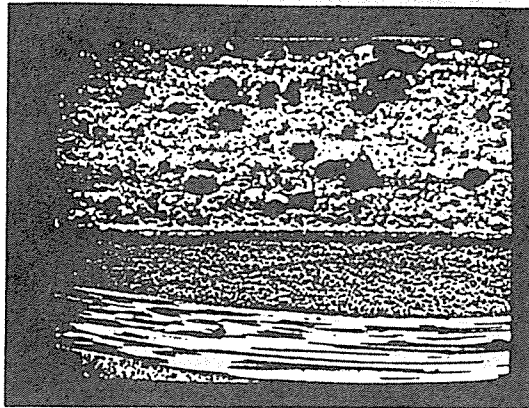
Fig.6. Microscopic examination of solid laminates
with attached piezoelectric sensors



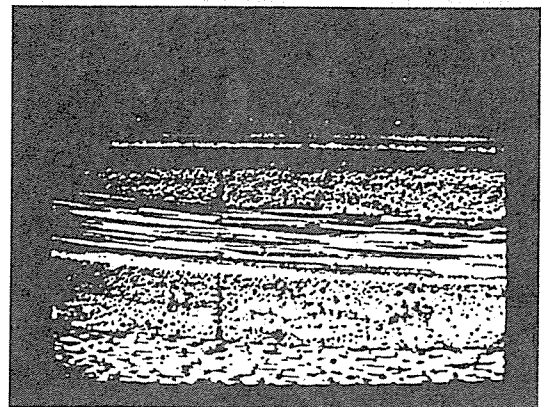
(c) Epoxy-bonded sensor, T-4
(Gr/Ep unidirectional prepreg)



(e) Epoxy-bonded PP sensor, T-PP
(Gr/Ep unidirectional prepreg)



(d) Epoxy-bonded sensor, T-4
(Gr/Ep fabric prepreg)



(f) Epoxy-bonded PP sensor, T-PP
(Gr/Ep fabric prepreg)

Fig. 6. Continued

리한 것이다.

삽입된 PC 센서는 비교적 얇은 적층판에서는 커다란 두께 불연속성을 만들어 내었으며 경화중에 전기적으로 완전한 절연이 이루어지지 않아 추가적인 절연방법이 요구되며 이것은 삽입된 센서의 두께를 더욱 증가시켜 주구조물의 기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 일체 성형된 PC 센서는 복합 적층판의 성형과 접착을 동시에 할 수 있다는 장점이 있으며 접착층 두께가 비교적 균일하며 50배 확대시까지 잉여 수지층이 거의 관찰되지 않았다. 이것은 센서와 적층판 사이의 접착이 우수하며 접착층이 탄성 변형한다면 센서에서의 변형율은 주구조물과 거의 같은 양으로 선형적으로 비례하여 나

타나는 완전접착 조건과 유사해질 수 있다. 그러나 이 방법은 성형시 PC 센서의 존재로 프리프레그에 가해지는 압력차이로 적층판의 두께가 센서가 부착된 곳과 되지 않은 곳에서 차이가 생길 수 있으며 이 부분에서 응력이 집중되어 먼저 균열이 성장할 수 있어 주구조물이 기계적 성능저하를 가져올 수도 있다. 하중을 받았을 때 접착층의 전단 파괴 또는 주구조물의 변형율을 그대로 전달받기 때문에 PC 센서 자체의 특성 저하 또는 반응 저하가 다른 방법에 의하여 부착된 센서보다 초기에 일어날 수 있다. 접착필름을 이용한 경우에는 접착층이 보다 두꺼워져 일체 성형인 경우보다 센서의 반응은 초기에는 적을지 몰라도 센서를 과도한 변

형상으로 부터 보호해 줄 수 있을 것이다.

4-2. 시편의 구조적 건전성

여러가지 장착 방법에 따른 주구조물의 강도 및 탄성계수에 미치는 영향을 고려하기 위하여 일 방향 프리프레그로 제작한 $[0/90]_{4S}$ 적층판에 여러가지 방법으로 센서를 장착하여 시편을 제작하였다.

첫번째 그룹의 시편은 삽입된, 접착필름, 그리고 에폭시로 접착된 PC 센서가 부착된 그룹이다. 이러한 시편의 인장강도는 센서가 부착되지 않은 시편보다 약 16%의 강도저하를 보여주었으며 파괴가 일어난 곳은 세라믹 센서가 삽입된 곳에서 관찰되었다. 그러나 탄성계수는 센서의 부착 방법에 따라 거의 변화가 없음을 보여주었다. 일체 성형된 PC 센서가 부착된 두번째 시편 집단은 인장강도가 압전센서가 없는 시편의 강도와 거의 같게 관찰되었으며 파괴가 일어나는 곳도 압전센서가 삽입된 경우와는 달리 일정하지 않았다. 이러한 실험 결과는 두꺼운 압전센서를 복합재료 적층판에 삽입할 경우는 기대했던 것과 같이 주구조물에 나쁜 영향을 줄 수 있다는 가능성이 있는 반면 표면에 부착된 센서는 주구조물의 기계적 특성에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다. 센서의 장착방법에 따른 시편의 구조적 건전성에 대한 결과가 Fig. 7에 나와 있다.

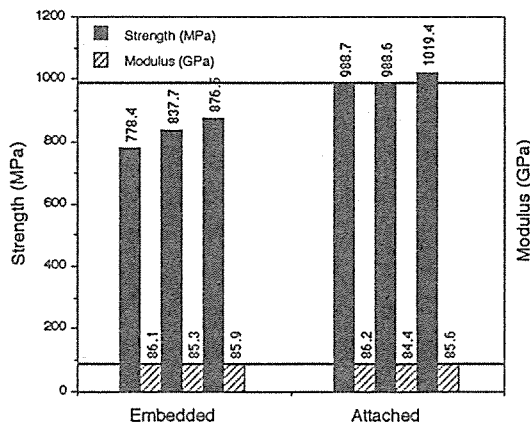
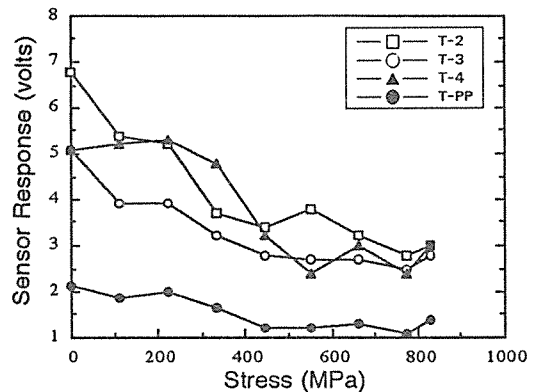


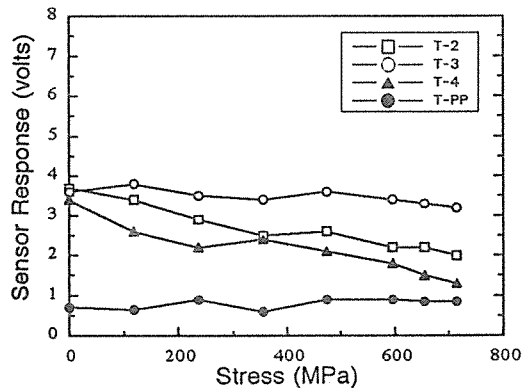
Fig. 7. The effect of sensor incorporating techniques on the host structures

4-3. 센서의 응답성

인장시험시 장착된 모든 센서는 시편이 파괴될 때까지 작동하였으나 센서의 응답성은 센서의 장착 방법에 따라 감소하였다. 일정 하중을 가한 후의 Engraver에 의한 센서의 응답성은 Fig. 8에 나와 있다. 고분자 압전센서의 응답성 변화는 거의 없었으나 세라믹 압전센서 특히 에폭시로 접착된 PC 센서는 상당한 폭으로 줄어드는 것을 관찰하였다. Fig. 8에 나타난 센서의 응답 크기는 신호의 최대, 최소 절대값의 합을 2로 나눈 평균값을 취하였다. 그러나 Engraver는 시편의 한 쪽 면에 수직으로 접촉되어 가진하고 이것에 의한 시편의 진동에 의하여 각 센서가 반응하므로 Engraver의 위치와 부

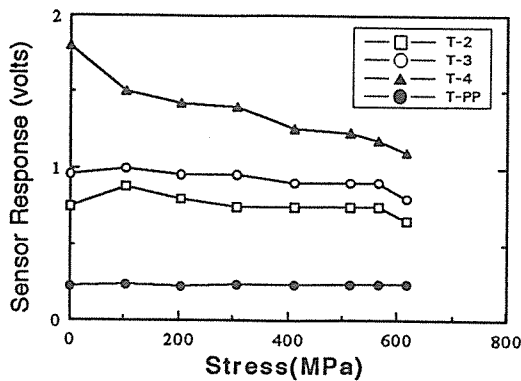


(a) Solid laminate (SUT-1) with U.D. prepreg ($\sigma_f = 832$ MPa)



(b) Solid laminate (SFT-1) with fabric prepreg ($\sigma_f = 743.3$ MPa)

Fig. 8. Peak sensor response due to engraver after static loading

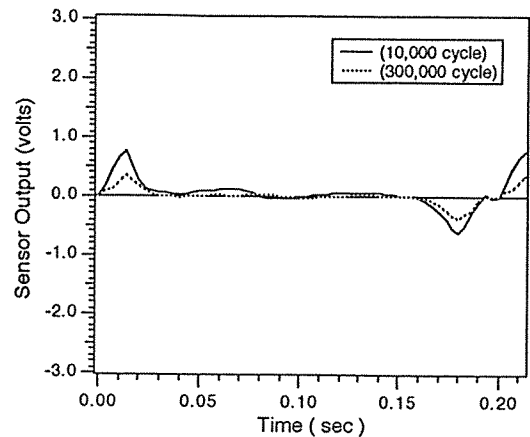


(c) Honeycomb sandwich specimen(HFT-1)
with fabric prepreg($\sigma_f = 669$ MPa)

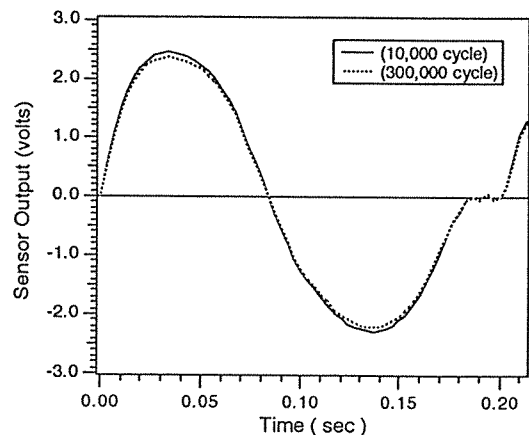
Fig.8. Continued

착된 센서의 위치 그리고 Engraver와 시편간의 접촉력에 따라서 센서의 거동이 다를 수 있으므로 센서간의 정량적 비교 보다는 각 센서의 정성적인 반응저하만을 알 수 있는 단점이 있다. 비접촉 방법으로 시편의 일정 변형을 후의 센서의 응답 특성을 규명할 수 있는 연구가 향후 필요하리라 생각된다.

주기적 반복하중에 의한 대표적 압전센서의 신호 파형은 Fig.9에 나와 있다. Fig.10에는 반복 횟수에 대한 센서의 응답 크기를 보여준다. 인장 피로시험 시편에 부착된 센서와 주구조물은 1,000,000번의 피로 하중 후에도 육안으로는 뚜렷한 손상을 발견하지 못하였다. 고분자 압전센서는 1,000,000번 후에도 센서 응답성의 변화가 거의 없었으나 세라

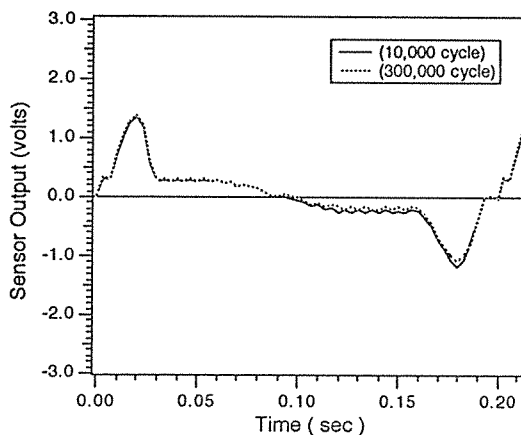


(b) Epoxy-bonded PC sensor, T-4



(c) Epoxy-bonded PP sensor, T-PP

Fig.9. Continued

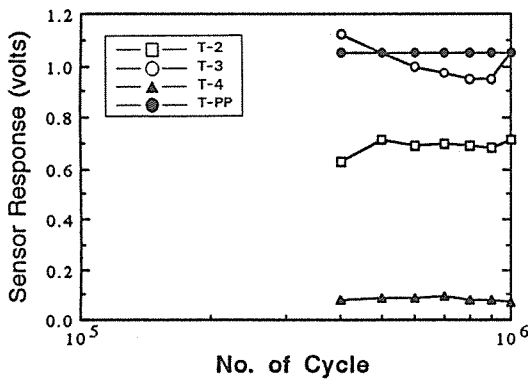


(a) Adhesive-bonded PC sensor, T-3

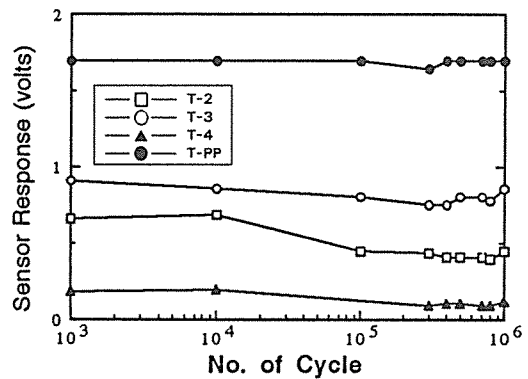
Fig.9. Typical sensor waveform due to fatigue loading

믹 압전센서의 응답성은 급격히 감소함을 알 수 있었다. 피로시험에서 모든 센서는 1,000,000번 후에도 기능을 하였으나 일체 성형과 에폭시 접착 방법으로 부착된 세라믹 압전센서는 반복 횟수가 증가할수록 센서의 응답 크기는 감소함을 보였다. 접착필름을 사용하여 부착한 센서는 다른 부착 방법으로 부착한 센서보다 센서의 응답성 감소가 적었다. 에폭시로 부착된 고분자 압전센서는 피로하중에 거의 영향을 받지 않는 것을 보여주었다.

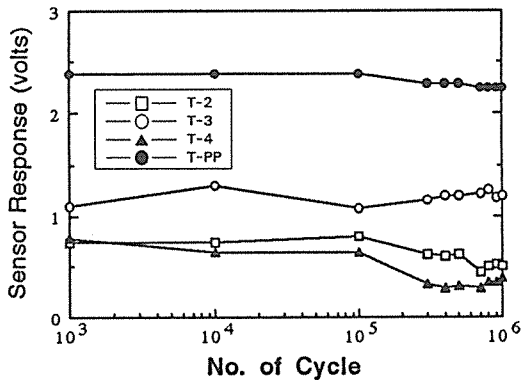
반복 피로 하중에 의한 센서의 응답성은 2부에서 접착층의 영향과 반복하중의 주기 등을 고려하여 해석적인 방법으로 실험 측정치와의 상관관계를 고찰하였다.



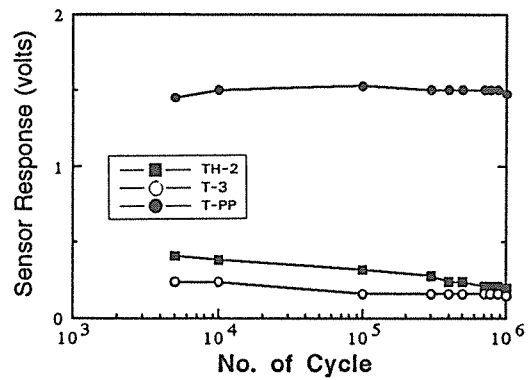
(a) Solid laminate(SUF-2) with U.D. prepreg ($\sigma_a = 250$ MPa)



(c) Solid laminate(SFF-2) with Fabric Gr/Ep prepreg ($\sigma_a = 341.5$ MPa)



(b) Solid laminate(SUF-3) with U.D. prepreg ($\sigma_a = 500$ MPa)



(d) Sandwich specimen(HFF-3) with Fabric Gr/Ep prepreg($\sigma_a = 341.5$ MPa)

Fig. 10. Sensor responses due to fatigue loading

5. 결 론

본 연구에서는 세라믹 압전센서와 고분자 압전센서를 여러 가지 부착 방법으로 복합재료 패널에 장착하여 성형하였으며 주구조물의 기계적 특성과 센서의 응답성을 정적 인장시험 및 인장 피로시험을 통하여 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세라믹 압전센서와 고분자 압전센서를 주구조물의 기계적 특성 저하 없이 복합재료 적층판의 표면에 부착하였으며 세라믹 압전센서를 샌드위치의 코아와 복합재료의 면재 사이에 삽입하였다.

(2) 복합적층판 내부에 삽입된 세라믹 압전센서는 주구조물의 인장강도를 약 16% 정도 감소시켰으며

절연성 문제 및 성형시 성형압력에 의해 파괴될 수 있기 때문에 세라믹 압전센서를 복합적층판 내부에 삽입할 경우 세심한 주의와 다른 삽입 방법이 연구되어야 할 것이다.

(3) 부착방법에 따른 접착면의 두께가 달리 관찰되었으며 이것은 주구조물의 기계적 특성저하 보다는 주구조물이 정적 인장하중이나 피로하중을 받을 때 센서 자체의 특성변화나 센서의 응답성에 영향을 미친다.

(4) 고분자 압전센서는 세라믹 압전센서 보다 정적 인장하중과 인장 피로하중에 거의 영향을 받지 않으며 온도 제약을 제외하고는 센서로서 우수한 특성을 보여주었다.

참 고 문 헌

1. Rogers, C.A., Baker, D.K., and Jaeger, C.A., "Introduction to Smart Materials and Structures," ARO Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues Workshop Proceedings, Blacksburg, VA, Sep. 1988, pp.17-28.
2. Mazur, C.J., Serdeckyj, G.P., and Stevens, D.M., "Air Force Smart Structures/Skin Program Overview," *SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins*, Vol.986, 1988, pp.19-29.
3. Glossop, N.D.W., Dubois, S., Tsaw, W., Leblance, M., Lymer, J., Measures, R.M., and Tennyson, R.C., "Optical Fiber Damage Detection for an Aircraft Composite Leading Edge," *Composites*, Vol.21, 1990, pp.71-80.
4. Kuhlman, R., Duncam, B., and Claus, R.O., "Fiber Optic Composite Impact Monitor", Proceedings of IEEE Southeast Conference, Apr. 1987, pp.414-417.
5. Demuts, E., Whitehead, R.S., and Deo, R.B., "Assesment of Damage Tolerance in Composites," *Composite Structures*, Vol.4, 1985, pp.45-58.
6. Measures, R.M., "Damage Assessment for Composite Smart Structures," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.9, 1990, pp.1185-1198.
7. 권일범, 김천곤, 홍창선, "복합재 보의 삽입된 광섬유 마이켈슨 센서에 의한 모재균열 파손의 연속적인 검출," 한국항공우주학회지, 제24권, 제5호, 1996, pp.86-96.
8. Hagood, N.W., Crawley, E.F., de Luis, J., and Anderson, E.H., "Development of Integrated Components for Control of Intelligent Structures," ARO Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues Workshop Proceedings, Blacksburg, VA, Sep. 1988, pp.80-104.
9. Crawley, E.F. and de Luis, Javier, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol.25, No.10, 1987, pp.1373-1385.
10. Dosch, I.J. and Inman, D.J., "A Self-sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control," *J. of Intelligent Material System and Structures*, Vol.3, No.1, Jan. 1992, pp.166-185.
11. 이창배, 한재홍, 이 인, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 보의 최적 진동제어 실험," 한국항공우주학회지, 제24권, 제5호, 1996, pp.97-107.
12. Hwang, W.S. and Park, H.C., "Finite Element Modelling of Piezoelectric Sensors and Actuators," *AIAA Journal*, Vol.31, No.5, 1993, pp.930-937.
13. Calder, C.A. and Koury, J.L., "Study of Embedded Sensors in Graphite-Epoxy Composites," Proceedings of the 1989 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics, May 1989, pp.451-456.
14. Piezo Kinetics Inc., Application Note and Property and Characteristics.
15. Atochem Sensors Inc., Technical Manual, 1991.
16. Cairns, D.S., Campbell, J.F., Abdallah, M.G., Vanderheiden, E.G., and Martinez, L.A., "Multi-purpose Sensor for Composite Laminates," AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 32nd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1991, pp.1371-1378.