

복합재료 평판의 헬스 모니터링

Health Monitoring of Composite Plates

김 당 원* · 전 흥 재** · 이 충 회*** · 변 준 형**** · 엄 문 광*****

Kim, Dang-Won · Chun, Heoung-Jae · Byun, Joon-Hyung · Yi, Choong-Hee · Um, Moon-Kwang

ABSTRACT

Real time health monitoring system was studied to detect the generation of defects in the composite structures during service life. The PZT sensors were embedded into the woven-glass/phenol composite plate during the fabrication. VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) process were used to fabricate the composite plate. A Teflon tape was embedded between glass fiber layers to mimic delamination induced during service. Normalized maximum amplitude and energy analyses were used for the acquired signals. Both amplitude and energy of acquired signals were extremely sensitive to the delamination. Therefore, it was successful to detect and to locate the defects in composite plate by monitoring signals from sensors and using the proposed method.

Keywords: Health monitoring, Embedded PZT sensors, Lamb wave, delamination

1. 서 론

복합재료는 기존의 재료보다 우수한 비강성 (Specific stiffness), 비강도 (Specific strength), 내식성 (Corrosion resistance)등을 가지고 있으며, 이러한 재료의 우수성으로 인해 많은 산업분야에서 그 사용빈도가 증가하고 있으며, 기존의 재료를 대체하여 사용하고 있다(Daniel, I.M. 1994). 복합재료는 내부에 미세균열이 발생하더라도, 외관상으로는 재료의 결함을 확인할 수 없다. 그러나 미세균열로 인해 재료의 강도는 급격히 감소하게 되어 복합재료가 사용된 구조물의 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 재료 내부의 미세균열에 대한 정보를 신속하고, 정확하게 취득하기 위하여 비파괴 기법이 널리 사용되고 있다. 복합재료는 등방성재료와 달리 방향성을 가지고 있으며, 각 방향에 따라 전파되는 위상속도 및 군속도가 모두 달라진다(Rose, J. L. 1999). Lamb wave는 결함의 탐상에 있어서 결함검출 민감도가 우수하고, 감쇄영향을 적게 받으며, 원거리를 전파하는 특징을 가지고 있다(조윤호, 2001). 이러한 장점들로 인해 구조물에 Lamb wave를 적

* 학생회원 · 연세대학교 기계공학과 석사과정 E-mail: chaken007@yonsei.ac.kr

** 정회원 · 연세대학교 기계공학부 교수 E-mail: hjchun@yonsei.ac.kr

*** 학생회원 · 연세대학교 기계공학과 석사과정 E-mail: sephirot@yonsei.ac.kr

**** 한국기계연구원 책임연구원 E-mail: bjh1673@kmail.kimm.re.kr

***** 한국기계연구원 선임연구원 E-mail: umk1693@kmail.kimm.re.kr

용하여 재료의 결함을 탐상하는데 널리 사용되어지고 있으며, 이를 위한 많은 연구가 진행되어지고 있다. 현재 이루어지고 있는 비파괴 검사의 단점 중에 하나는 구조물을 검사하는 동안 사용을 할 수 없다는 것이다. 이러한 기존의 비파괴 검사방법의 단점을 보완하고자 Health monitoring system이 대두되었다. 1999년 Wang 과 Chang은 Health monitoring을 위한 시스템 설계에 관한 연구를 하였고, 2002년에 Chang은 복합재료 내부에 삽입하기 위한 SMART layer에 관한 연구를 하였다. Health monitoring system은 실시간으로 구조물의 안전성 및 건전성을 확인할 수 있다는 장점을 가지고 있다. Health monitoring system에 있어서 대부분의 연구는 센서기술이나 구조물로부터 얻어지는 신호의 분석을 위한 소프트웨어개발에 중점을 두고 있다. 기존의 센서를 이용하지 않고, 피에조 센서를 이용하여 복합재료 구조물에 삽입함으로써 유지비용을 줄이기 위한 연구들 또한 이루어지고 있다.

이번 연구에서는 페놀유리섬유 복합재료 내부에 PZT센서를 삽입하여 기존의 비파괴검사 방식보다 실용적이고, 효과적인 실시간 결함검출 기술 개발에 초점을 두었다.

2. Lamb wave 정의 및 특징

Lamb wave는 기존의 종파, 횡파와 같은 Bulk wave와는 다른 새로운 형태의 파로 볼 수 있다. Lamb wave는 2차원 평면변형률 (Plane strain)조건하에서 자유표면 (Traction free)경계조건을 갖는 균질판재의 단면을 파동전파방향에 평행하게 정의하였을 때 이 단면 내에서 정의되는 유도초음파이다(윤석왕, 2001; 조운호, 2001). Lamb wave는 입사되어진 후에 입사될 때의 파와는 전혀 다른 형태로 모드변환 (Mode conversion)이 발생하면서, 상호간섭 (Interference)과 중첩현상 (Superposition)이 발생하게 된다. Lamb wave는 파동간섭이 가능한 특징의 재료상수 (종파 및 횡파의 속도, 밀도), 두께, 주파수 하에서만 발생이 가능하며, 이들 조건의 변화에 따라 파동의 위상 속도가 다른 다양한 모드가 나타나게 된다. 파가 전파되면서 모드가 나타날 때에 대칭모드 (Symmetric mode)와 비대칭 모드 (Antisymmetric mode)로 두 가지 형태로 나뉘인다. 또한 Lamb wave의 대표적인 특징은 두께와 주파수의 곱의 변화에 따라 파의 전파속도가 변화하는 분산성 (Dispersive)을 가지고 있다는 것이다. 주파수와 위상속도의 사이의 관계에 따라 작성된 시편의 분산곡선 (Dispersion curves)은 비파괴검사 시에 모드를 확인하거나, 탐상결과를 검증하는데 중요한 정보로 활용될 수 있다.

3. 복합재료 시편 내부에 PZT센서 삽입방법 및 시편제조방법

복합재료 내부에 PZT 센서를 삽입하는 것은 복합재료를 적층하는 기존의 방식과 비슷하게 이루어진다. 복합재료 시편은 VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)기법을 이용하여 제작되어진다. VARTM 기법은 적층된 유리섬유에 비닐을 씌우고 재료 내부를 진공상태로 유지하면서 시편의 제조과정 중에 발생하는 기포를 제거하면서 시편을 제작하는 기법이다.

먼저 시편내부에 삽입될 PZT 센서를 제작하였다. PZT 센서는 직경이 8mm이고, 두께가 2mm인 원형모양이 사용되었다. PZT 센서를 제작하기 위해 먼저 PZT 센서위에 전도성 접착제 (Conductive adhesive)를 바른 후 동박지 (Copper sheets)를 붙이고, 열을 가해 접착제를 경화시킨다. 접착제가 경화된 후 동박지 위에 납땀으로 전선을 각각 연결한다. 연결되어진 전선을 통해 센서가 올바르게 작동하는지 확인하도록 한다. 그림 1은 위와 같은 공정을 통해 제작된 센서를 보여준다.

PZT센서는 유리섬유를 적층할 때 같이 삽입하는데, VARTM 제조공정의 특성상 레진이 흐르면서 센서의 위치가 변화될 수 있기 때문에 유리섬유를 이용하여 센서가 정확하게 위치하도록 센서를 고정시킨다. 센서를 고정된 후 재료 내부에 Delamination을 모사하기 위해 길이 69mm, 너비 15.5mm의 직사각형 모양의 테플론 테이프를 두 번째 층과 세 번째 층 사이에 삽입하였다. 테플론 테이프 역시 레진이 흐름에 따라 위치가 변할 수 있으므로 센서와 마찬가지로 유리섬유를 이용하여 고정하도록 하였다. 센서와 테플론 테이프가 삽입된 유리섬유의 적층이 끝나면 레진이 원활히 잘 통과할 수 있도록 적층된 유리섬유 밀면과 뒷면에 Flow nets를 설치한다. 경화 사이클은 일반적으로 복합재료 제조에 사용되는 경화 사이클을 가지고 시편을 제조 하였다. 시편의 경화를 위해 오븐에서 80℃온도로 2시간동안 가열하였다. 가열하는 동안 진공펌프를 이용하여 재료내부에서 발생 될 수 있는 기포를 제거하면서 재료를 경화시킨다. 경화되어 완성된 시험편은 그림 2에 나타내었다.

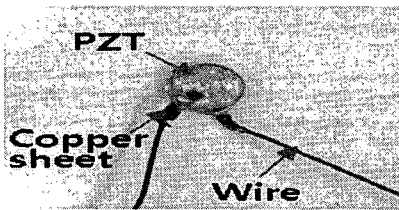


그림 1 시편 내부에 삽입된 PZT 센서

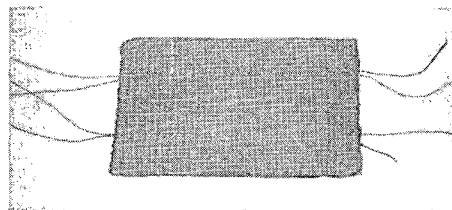


그림 2 센서가 삽입된 복합재료 시편

4. 결함 검출을 위한 실험

4.1 시편의 형상 및 규격

실험에 사용된 시편의 규격은 가로, 세로 18.7cm이고, 두께는 0.315cm 이며, 모두 4개의 layer로 구성되어있다. 시편으로부터의 결함검출을 위해 사용된 PZT 센서는 직경이 8mm이고, 두께가 2mm로서 각각 Transmitter와 Receiver로 사용되었다. 시편의 두 번째 층과 세 번째 층 사이에 길이 69mm, 너비 15.5mm의 직사각형 모양의 테플론 테이프를 삽입하였으며, 삽입된 테플론 테이프는 충격에 의해 발생한 시편 내부의 Delamination의 역할을 하게 된다. 그림 3은 시편에 삽입된 PZT 센서와 테플론 테이프의 위치를 보여준다.

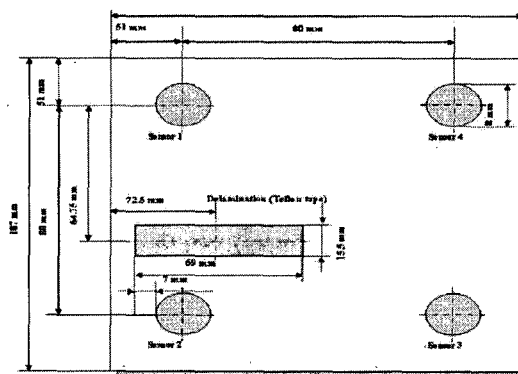


그림 3 PZT 센서와 테플론 테이프가 삽입된 시편의 형상

그림 3에서 보는 바와 같이 4개의 PZT 센서가 복합재료 내부에 삽입이 되어 있고, 가장자리로부터 51mm 떨어진 지점에 위치하고 있다. 센서는 왼쪽 면 위쪽부터 반시계방향으로 센서 1, 2, 3, 4의 순서로 삽입되어져 있으며 각 센서간의 거리는 8cm이다. Delamination을 나타내는 테플론 테이프의 중심은 시편의 왼쪽 가장자리로부터 각각 72.5mm 떨어진 지점에 위치하고 있다.

4.2 Lamb wave를 이용한 결함 탐상 실험

복합재료 시편 내부에 삽입된 센서를 이용하여 시편 내부에 존재하는 Delamination을 찾기 위하여 그림 4와 같은 실험장치 및 계통도를 구성하였다. 시편에 삽입된 PZT 센서는 High power ultrasonic analyzer (Krautkramer USIP12)를 사용하여 Lamb wave를 발생시키도록 가진 되었다. 시편에 대한 결함탐상을 위하여 센서로부터 발생된 신호를 오실로스코프 (Tektronix TDS2012)를 이용하여 수집하고, 컴퓨터를 이용하여 취득된 신호를 분석하는 시스템을 구성하였다.

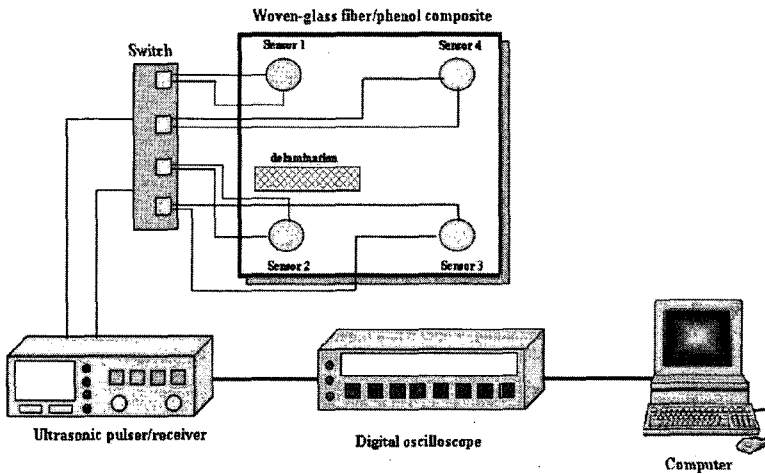


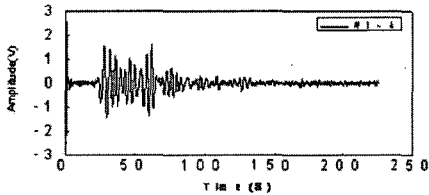
그림 4 실험을 위한 시스템 계략도

시편에 대한 결함탐상은 각각의 경로에 따라 수행되었다. 시편형상의 그림에서 보는 바와 같이 시편 내부에 4개의 PZT 센서가 삽입되어 있으므로 모두 12쌍의 Transmitter와 Receiver의 경로에 대한 신호분석이 가능하게 된다. 복합재료는 등방성 재료와 달리 이방성을 가지고 있으므로, 방향에 따른 파형이 모두 다르게 나타나므로 각 방향에 대한 실험을 수행하였다. 실험은 두 개의 센서 사이에 Delamination이 존재하는 곳과 존재하지 않는 곳에서의 파형의 변화를 살펴보기 위해, Delamination의 여부에 따른 경로별로 실험을 수행하였다.

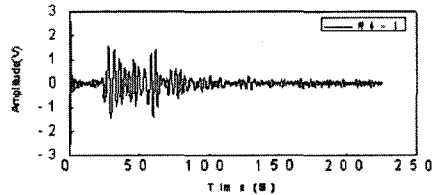
5. 결 과

시편내부에 결함이 존재하지 않는 경로에서 취득하여 분석한 신호를 그림 5에 나타내었다. 결함이 존재하지 않는 부분에서 PZT 센서를 이용해 취득된 신호는 경로에 따라 크게 차이를 보이지 않고 비슷한 경향을 가

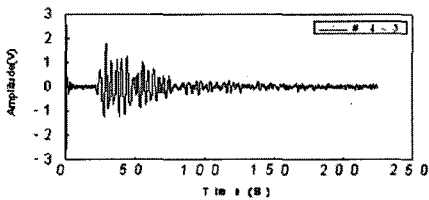
지고 나타났다. 한편 시편내부에 결함이 존재하는 부분에서의 파형은 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 결함이 존재하지 않는 부분에서의 파형과 비교해 볼 때 Amplitude 및 전파특성이 변화된 것을 알 수 있다.



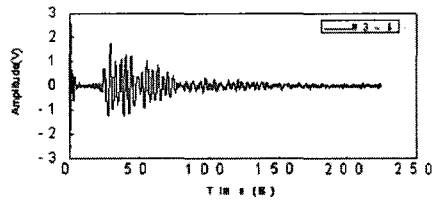
(a) 1번 센서 (Transmitter), 4번 센서 (Receiver)



(b) 4번 센서 (Transmitter), 1번 센서 (Receiver)

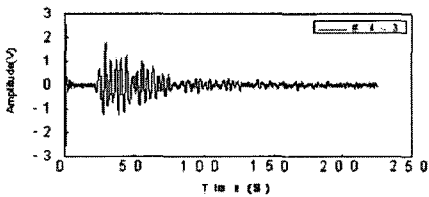


(c) 3번 센서 (Transmitter), 4번 센서 (Receiver)

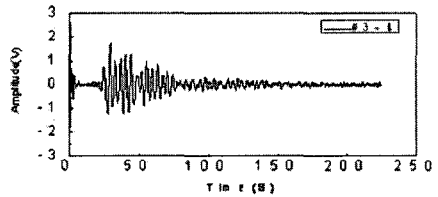


(d) 4번 센서 (Transmitter), 3번 센서 (Receiver)

그림 5 Delamination이 존재하지 않는 경로에서의 Stress waves



(a) 1번 센서 (Transmitter), 2번 센서 (Receiver)



(b) 2번 센서 (Transmitter), 1번 센서 (Receiver)

그림 6 Delamination이 존재하는 부분에서의 Stress waves

경로에 따라 취득된 신호를 이용하여 경로에 따른 Normalized maximum amplitude와 Normalized energy를 비교 하였다. 분석결과 결함이 존재하지 않는 부분의 Amplitude와 Energy가 결함이 존재하는 경로에서 보다 크게 나타났다. 그림 7은 경로에 따른 Normalized maximum amplitude와 Normalized energy를 나타낸다. Normalize된 결과를 보면 결함이 존재하는 부분에서의 값들이 그렇지 않은 부분에서의 값에 비해 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 Delamination이 존재하는 경로에서 Transmitter와 Receiver사이에서 Delamination의 위치를 살펴본 결과 동일한 경로이지만, 그림 7에서 보면 Delamination의 위치가 Transmitter에 가까운 #2-1 경로에서 Amplitude 및 Energy 감소가 Delamination이 Receiver에 가까운 위치인 #1-2경로에서 보다 크다는 것을 확인 하였다.

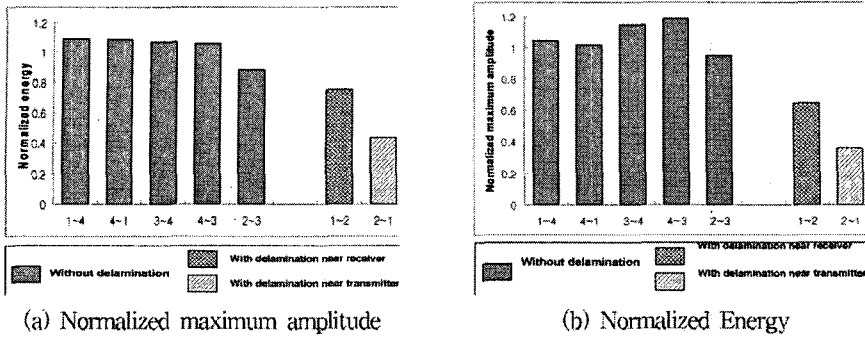


그림 7 경로에 따른 Normalized maximum amplitude 및 Normalized energy

6. 결론

이번 연구에서는 복합재료 내부에 센서를 삽입하여 재료 내부에 존재하는 결함에 대한 탐상이 수행되었다. 센서를 재료 내부에 삽입하여 기존의 전통적인 비파괴검사 방법과 다른 방법을 이용한 결함탐상을 수행함으로써 Health monitoring system을 구현하였다. 이번 실험에서 센서를 시편의 표면에 부착하지 않고, 재료 내부에 삽입하여 경로에 따른 결함 탐상을 시도한 결과 결함이 존재하는 부분에서의 Amplitude 및 Energy가 감소됨으로서 시편 내부에 결함이 존재함을 알 수 있었으며, 본 실험방법이 구조물 내부에 존재하는 결함 탐상에 있어서 사용될 수 있는 기술임을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구 사업 차세대 소재성형 개발 사업단이 지원하는 연구과제로 수행되었으며, 본 연구를 가능케 한 프론티어 사업단에 감사드립니다.

참고문헌

Mark Lin, Fu-Kuo Chang (2002) The manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics, *Composite Science and Technology*, 62, pp.919~939

윤석왕 등 (2001) 물리음향학2, 아카넷, 서울

조윤호 (2001) 유도초음파에 대한 이해와 응용, 비파괴검사 학회지, 221(4), pp.446~460

Rose, J. L. (1999) *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge university press, New York.

S. P. Pelts, Rose, J.L (1996) Source influence parameters on elastic guided waves in an orthotropic plate, *Journal of Acoustic Society of America*, 99(4), pp.2124~2129.

Daniel, I. M, Ori Ishai. (1994) *Engineering mechanics of composite materials*, Oxford university press, New York.

Wang CS, Chang F-K (1999) Built-in diagnostics for impact damage identification of composite structures, *Structural Health Monitoring*, pp.612~621

Zhongqing Su, Lin Ye, Xiongzhu Bu (2002) A damage identification technique for CF/EP composite laminates using distributed piezoelectric transducers, *Composite Science and Technology*, 57, pp.465~471