

# 복합재료 구조물 비파괴 검사법 Tapping Sound Analysis 의 실험적 검증

황준석\* · 김승조\*\*

## Experimental Verification of Tapping Sound Analysis for the Inspection of Laminated Composite Structures

Joon-Seok Hwang, Seung Jo Kim

### ABSTRACT

현재 개발 중에 있는 비파괴 검사법인 Tapping Sound Analysis 의 실험적 검증을 위한 연구를 수행하였다. 손상이 없는 복합재료 구조물과 손상이 있는 복합재료 구조물에 대한 타격 실험을 통해 타격음과 타격력을 측정하여 비교하였다. Wavelet packet transform 에 근거한 특성 추출법을 이용하여 타격음으로부터 손상 판단을 위한 특성을 추출하였다. 손상이 없는 구조물과 손상이 있는 구조물의 특성을 비교하기 위해, 특성 지수를 정의하였다. 정의된 특성 지수를 이용하여 손상이 없는 구조물과 손상이 있는 구조물의 타격음의 차이를 하나의 실수로 표현하였다.

### 1. 서 론

일반적으로 복합재료 구조물은 판이나 각 등의 두께가 얇은 구조물의 형태로 라미나를 적층하여 제작한다. 이때 제작시 불량으로 인한 초기 손상이 있으면 구조물의 안전에 치명적일 수 있다. 또한 구조물이 운용중에 충격하중 등에 노출될 경우 구조물 내부에 손상이 발생할 수 있다. 이러한 복합재료 구조물 내부의 손상은 사람의 눈으로 탐지하기가 불가능하므로 비파괴 검사법을 이용하여 탐지한다. 전통적인 비파괴 검사법은 구조 진동파를 이용하는 방법과 X-레이 촬영을 통한 방법 등을 들 수 있다. 하지만 이와 같은 방법은 번거롭고 많은 비용이 든다.

한편, 숙련된 검사자들은 동전이나 타격망치 등을 이용하여 구조물을 두드렸을 때의 구조물의 반응을 살펴보는 타격 테스트를 이용하여 구조물의 내부손상을 파악한다. 타격 테스트를 이용해서 구조물을 검사할 때 손상의 유무를 알려주는 지표로서 많이 사용하고 있는 것은 타격체와 구조물간의

접촉력의 시간이력과 타격시에 발생하는 타격음 등이다. 접촉력의 시간이력 결과로부터 도출된 접촉 지속 시간(Contact duration)을 이용하는 방법의 경우[1], 구조물의 두께가 두꺼워지면 민감도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한 접촉력의 시간이력 특성은 부식에 의한 표면 손상 등에 영향을 받게 되므로, 타격 테스트에 의한 구조물의 손상 유무를 판단하는 지표로서 타격력보다는 타격음이 보다 유용하다. 또한 접촉 지속 시간을 이용하는 방법은 검사 범위가 국소적이므로 구조물의 검사 면적이 넓은 경우 많은 검사점을 필요로 하는 단점도 있다.

본 연구에서는 타격음을 이용하여 구조물의 손상을 검사하는 방법인 Tapping Sound Analysis[2]의 검사 과정을 실험적으로 검증하였다. 타격음으로부터 손상 검사에 필요한 데이터를 추출하는 방법을 제안하고, 추출된 데이터를 이용하여 구조물의 손상 유무를 판단하는 과정의 타당성에 대해 검증하였다.

### 2. Tapping Sound Analysis 의 개요

구조물에 타격을 가했을 때 발생하는 타격음의 발생과정은 타격에 의한 구조물 표면의 진동에 의

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

해 음향이 방사되는 것으로 설명할 수 있다. 그러므로, 타격음은 구조물의 진동 특성과 연관이 있고 따라서 구조물의 특성을 반영한다. 구조물의 제작과정 또는 운용과정 중에 구조물 내부에 손상이 발생하면, 손상이 발생한 부위의 강성이 감소되는 등의 변화가 발생하고 이로 인해 손상이 있는 구조물은 외란을 받을 경우 손상이 없는 구조물과 다른 반응을 보인다. 이러한 반응의 차이는 타격음의 변화로 나타나게 되고, TSA 는 검사 대상 구조물과 손상이 없는 구조물의 타격음의 차이를 이용하여 구조물의 손상 여부를 판단하는 검사 방법이다.

손상의 검사 과정은 검사 대상 구조물의 타격음과 손상이 없는 구조물의 타격음을 비교하는 과정이며, 이때 손상이 없는 건강한 구조물의 타격음 데이터를 성분(聲紋, Soundprint)으로 정의하고 TSA 의 기준 데이터로 이용한다. TSA 의 검사 성능은 성분 데이터의 정확성에 의해 좌우되므로 성분 데이터는 객관적이고 절대적이어야 한다. 성분 데이터를 확보하는 방법으로 우선 실험적인 방법을 들 수 있다. 손상이 없다고 생각되는 구조물에 대해 반복적인 실험을 통하여 타격음을 측정하고 이를 데이터 베이스화 한다. 그러나, 실험적인 방법은 손상이 없음이 보장되지 않으면 성분의 객관성도 보장될 수 없다. 보다 객관적인 방법으로 대상 구조물에 대한 고정밀 수치해석을 이용하는 방법이 있다. 타격음이 발생하는 과정에 대한 고정밀 수치모델을 수립하고, 수치해석을 통해 성분 데이터를 확보하는 방법이다. 이와 같은 방법은 구조물의 설계 단계에서부터 손상 검사를 위한 기준 데이터를 확보할 수 있고, 또한 실제 측정에 의한 데이터보다 객관적인 데이터를 얻을 수 있다.

성분 데이터가 확보되면 실제 검사 과정은 대상 구조물의 타격음을 측정하고 이를 성분 데이터와 비교하여 손상의 유무를 판단하는 과정이다. 일반적으로 손상의 정도가 적은 경우 타격음의 차이는 미묘하므로, 타격음의 단순 비교로는 차이점을 발견하기가 어렵다. 그러므로 타격음 데이터로부터 특성 데이터를 추출하여 손상 판단을 위한 비교 과정에서 사용하게 된다.

### 3. 특성추출 기법

타격음 데이터의 단순 비교를 통해서만 차이점을 발견하기가 쉽지 않으므로 타격음의 특징을 표현할 수 있는 특성 데이터를 추출하는 기법이 필요하다. 본 연구에서는 신호처리 분야에서 특성 추출에 사용되고 있는 방법중의 하나인 wavelet

packet transform[3]을 이용한 특성 추출법을 이용하였다. Wavelet packet transform 은 discrete wavelet transform 과 유사하나 detail 부분도 하위 레벨로 분해가 되는 점이 다르다. Wavelet packet transform 을 수행한 뒤 각 packet 의 에너지를 계산하여 특성 배열을 구성한다. Packet 의 에너지는 다음과 같이 정의된다[4].

$$E'_j = \sum_k P'_{jk} \quad (1)$$

$E'_j$  는 i-레벨의 j 번째 packet 의 에너지를 나타내며,  $P'_{jk}$  는 i-레벨의 j 번째 packet 의 계수를 나타내며, J 는 각 packet 의 계수의 개수를 나타낸다. 계산된 packet 배열은 norm 이 1 이 되도록 정규화 과정을 거치고 정규화된 packet 배열을 특성벡터라고 정의 한다. 건강한 구조물의 타격음의 특성벡터(성문)와 검사 대상 구조물의 타격음의 특성벡터를 이용하여 손상의 여부를 판단하는 과정으로서 두 특성 벡터의 내적을 취하고 이를 특성 지수로 정의한다. 이때 특성지수가 1 에 가까울수록 두 벡터가 유사하므로 손상이 없다고 판단한다. 반면 1 보다 작아질수록 두 벡터가 차이를 보므로 손상이 있다고 판단한다.

## 4. TSA 의 실험적 검증

### 시편 제작

실험적 검증을 위해 건강한 구조물과 손상이 있는 구조물에 대한 시편을 제작하였다. SK 케미컬의 USN125BX 프리프레그를 적층하고 hot press 를 이용하여 성형하여 판 형태의 실험 시편을 제작하였다. 복합재료 평판은 크기가 15cm×15cm 이고 적층각은  $[0^\circ/90^\circ]_s$  이다.

본 연구에서는 구조물 내부의 손상으로서 층간 분리 손상을 가정하였다. 손상된 구조물에 층간 분리 손상을 만들기 위해서 tissue paper 를 Kapton tape 으로 둘러싸서 만든 삽입물을 층간분리 영역에 삽입한 뒤 성형하였다. 층간 분리 영역은 구조물의 가운데 부분으로 가정하였으며 층간 분리 영역의 크기는 4.5cm×4.5cm 이다.

### 타격장치의 구성과 실험 장치

실험시편에 타격력을 가하는 장치를 구성하였다. 그림 1 과 같이 타격망치(PCB 086B01)를 이용하여 진자 형태의 타격장치를 구성하였다. 중력의 영향을 최소화하기 위해 실험시편을 지면과 수직이 되게 하였다. 초기 위치 A 에서 출발한 타격망치가 시편과 부딪히는 B 를 지날 때의 속도는

$v = \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)}$  로 표현된다. 타격장치의 유효 질량은 0.0914 kg 이며 타격장치의 회전팔의 길이는  $l = 0.198$  m이다. 타격체에 의해 시편에 가해지는 접촉력은 타격망치에 장착된 힘 변환기를 이용하여 측정하였다. 타격에 의해 발생하는 타격음은 시편의 중앙부에서 10cm 떨어진 지점에 위치한 마이크로폰 (B&K4189)를 이용하여 측정하였다. 그림 2에 구성된 전체 실험장치를 나타내었다. 그림 3와 같이 총 다섯 군데의 검사점을 설정하였다. 검사점 1와 2는 손상영역 내에 위치하고 있으며, 검사점 3은 손상영역의 경계, 그리고 검사점 4와 5는 손상영역 바깥에 위치하도록 하였다.

### 접촉 하중 이력의 비교

각 검사점에 대한 접촉 하중 이력을 측정하였다. 측정에 사용된 타격 속도는 0.243 m/s ( $\theta=10^\circ$ )이다. 그림 4에 검사점 1,3,5에 대한 접촉 하중 이력 곡선을 나타내었다. 손상된 영역을 타격하는 경우(검사점 1), 접촉하중 이력 곡선의 형태에 많은 변화가 있음을 알 수 있다. 손상에 의한 영향으로 접촉하중의 최대값이 작아지고 접촉지속 시간이 길어지는 현상을 보인다. 반면, 손상이 없는 부분을 타격하는 경우(검사점 3, 5) 뚜렷한 변화가 나타나지 않는다. 이러한 사실로부터 손상영역이 타격력에 미치는 영향이 국소적인 것임을 알 수 있다. 이와 같은 국소적인 특성은 타격력 이력, 특히 접촉 지속 시간을 이용하여 손상의 유무를 판단하는 검사법을 이용할 경우 손상 영역을 정확히 판단할 수 있다는 장점이 된다. 하지만, 검사 대상 구조물의 크기가 크거나 또는 검사면이 넓은 경우, 많은 횡수의 검사가 필요하다는 단점이 될 수도 있다.

### 타격음의 비교

그림 5에 타격속도 0.243 m/s로 타격했을 때의 건강한 구조물과 손상된 구조물의 타격음 측정 결과를 나타내었다. 손상판단에 앞서 특성 데이터의 객관성을 확인하기 위해 타격속도의 변화에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 타격 속도가 0.243 m/s ( $\theta=10^\circ$ ), 0.484 m/s ( $\theta=20^\circ$ ) 일 때의 타격음을 측정하여 서로 비교하였다. 표 1에 서로 다른 타격 속도에 대한 특성 지수를 계산하여 표시하였다. **h**와 **d**는 각각 건강한 구조물과 손상이 있는 구조물의 특성 벡터를 나타내고, **1**과 **2**는 각각 타격속도 0.243 m/s와 0.484 m/s의 경우를 나타낸다. 그리고 **(a,b)**는 특성 벡터 **a**와 **b**에 대한 특성 지수를 나타낸다. 특성 벡터는 정규화되어 있으므로, 두

개의 특성 벡터가 일치하면 특성 지수의 값은 1이고, 일치하지 않으면 1보다 작은 값이 된다. 표 1에서 대부분의 특성 지수 값이 1에 근접한 값을 나타내고 있으며, 이는 곧 비교적 작은 타격속도의 변화에 성문 데이터가 민감하지 않은 객관성을 나타냄을 알 수 있다. 표 2에 손상이 있는 구조물에 대해 TSA를 수행한 결과를 특성지수로 표현하였다. 손상이 있을 경우 특성 지수가 1보다 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. 타격점이 손상의 중심으로 이동할수록 특성 지수는 작은 값을 나타낸다. 더욱이 손상이 없는 영역의 검사점(4,5)의 경우에도 특성 지수를 통해 구조물에 손상이 존재한다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 앞서 설명한 접촉하중 이력을 이용하는 방법에 대한 장점으로 부각될 수 있다. 하지만 TSA를 이용하여 정확한 손상영역을 예측하는 것은 현재까지는 약간의 어려움이 있으며, 따라서 TSA에 의한 전체적인 검사를 수행하여 손상의 여부를 판단하고, 접촉하중을 이용하는 방법에 의해 손상의 정확한 위치를 찾아낼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 Tapping Sound Analysis의 성능 검증에 위한 실험적 연구를 수행하였다. 타격음을 이용하여 손상 여부를 판단하는 검사법인 Tapping Sound Analysis는 기존의 접촉 하중 이력을 이용하는 방법과는 달리 손상이 없는 영역에 대한 검사에서도 구조물 내부의 손상 여부를 알아낼 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 현재의 단계에서 손상 영역을 정확히 알아내기에는 미흡함이 있으며 지속적인 연구를 통해 보완해야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) Cawley, P., Adams, R.D., "The Mechanics of the Coin-Tap Method of Non-destructive Testing," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 122, No. 2, 1988, pp. 299-316
- (2) Kim, S.J. and Hwang, J.S., "New Nondestructive Evaluation Method of Laminated Composite Structures by Tapping Sound Analysis", SPIE's 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, Newport Beach, California, U.S.A, March, 2001
- (3) Coifman, R. and Wickerhauser, M., "Entropy-based algorithms for best basis selection," *IEEE Transaction on information theory*, Vol 38, No. 2, 1992, pp.713-718
- (4) Staszewski, W.J., "Wavelet based Compression and Feature Selection for Vibration Analysis," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 211, No. 5, 1998, pp. 735-760

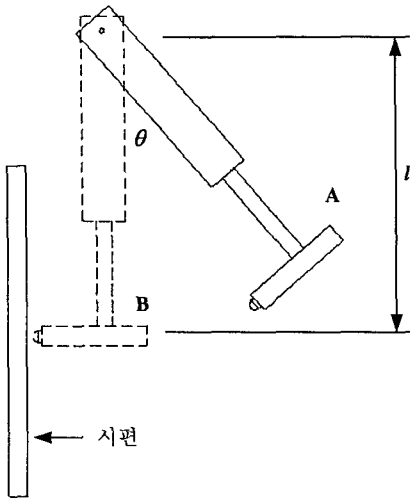


그림 1: 타격장치의 개념도



그림 2: 타격음 실험 장치

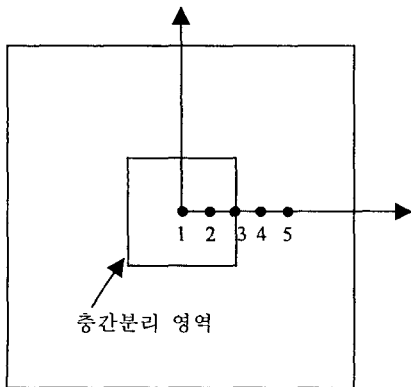
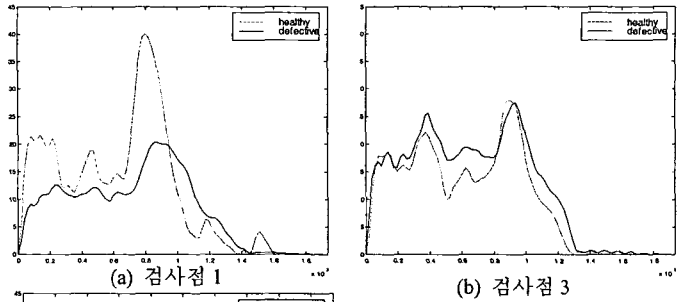


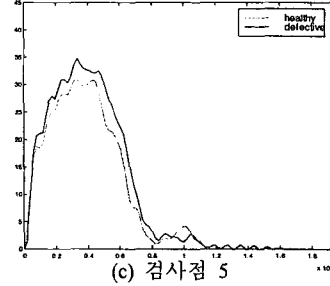
그림 3: 충간 분리 영역과 검사점의 위치



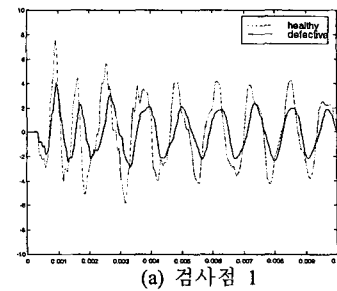
(a) 검사점 1

(b) 검사점 3

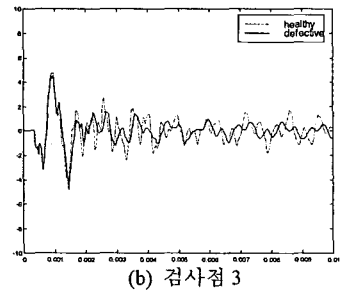
그림 4: 접촉 하중 이력의 비교



(c) 검사점 5

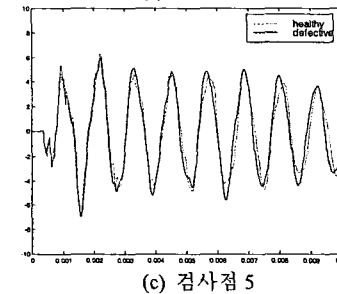


(a) 검사점 1



(b) 검사점 3

그림 5: 타격음의 비교



(c) 검사점 5

표 1: 특성 벡터의 객관성 검증

검사점	(h1,h2)	(d1,d2)
1	0.9992	0.9984
2	0.9930	0.9948
3	0.9853	0.9899
4	0.9970	0.9984
5	0.9993	0.9976

표 2: TSA 검사 결과

검사점	(h1,h2)	(d1,d2)
1	0.7113	0.7394
2	0.8503	0.8165
3	0.8419	0.8396
4	0.9684	0.9766
5	0.9633	0.9647