

# 타격음을 이용한 복합재료 구조물의 손상탐지법의 개발

김승조\* · 황준석\*\* · 송준영\*\*\*

## Development of Damage Detection Technique in Laminated Composites using Tapping Sound

Seung Jo Kim, Joon Seok Hwang and Jun Yung Song

### ABSTRACT

In this paper, impact sound realization of composite structures is performed to investigate the possibility of a new NDE system – Tapping Sound Analysis (TSA). TSA detects the existence of damages inside the structures by comparing tapping sound with pre-computed sound data of healthy structures. Tapping on the structures is modeled as impact problem and solved using finite element method. Calculation of sound is formulated based on the coupled finite element and boundary element method. Numerical simulation of impact sound and feature extraction scheme show that the impact sound can be used in the identification of damages of laminated composites.

### 1. 서론

복합재료는 금속재료에 비해 많은 장점을 가지고 있으므로 항공기 구조물에 다양한 형태로 사용되고 있다. 일반적으로 복합재료 구조물은 판이나 각 등의 두께가 얇은 구조물의 형태로 라미나를 적층하여 제작한다. 이때 제작상의 실수로 인해 구조물 내부에 접착불량 등의 초기 손상이 있으면 구조물의 안전에 치명적일 수 있다. 이러한 복합재료 구조물 내부의 손상은 사람의 눈으로 탐지하기가 불가능하므로 비파괴 검사법을 이용하여 탐지한다. 전통적인 비파괴 검사법은 구조진동파를 이용하는 방법과 X-레이 촬영을 통한 방법들을 들 수 있다. 하지만 이와 같은 방법은 번거롭고 많은 비용이 든다.

한편, 숙련된 검사자들은 구조물을 두드려서 발생하는 소리를 이용하여 구조물의 건강상태를 알 수 있다. 손상된 구조물에서 발생하는 타격음과 건강한 구조물의 타격음 사이의 미묘한 차이를 이용하여 손상의 유무를 탐지한다. 이러한 방법은 간단하고 편리하지만, 손상탐지의 결과가 전적으

로 검사자의 경험에 의존한다.

본 연구에서는 타격음을 이용한 복합재료 구조물의 손상탐지법 (Tapping Sound Analysis [TSA])의 개발을 위해 수치해석을 이용한 기초 연구를 수행하였다. 수치해석은 크게 타격에 의한 복합재료 구조물의 진동의 수치적 모사와 진동하는 복합재료 구조물에서 방사되는 음향의 수치적 모사등의 두가지로 나뉜다. 복합재료 구조물의 진동을 모사하기 위해 유한요소법을 이용하였다. 또한, 방사음향의 해석을 위해 경계요소법을 이용하였다. 계산된 방사음향의 주파수 특성을 통해 건강한 구조물의 타격음과 손상된 구조물의 타격음을 비교하였다.

### 2. 타격에 의한 진동의 모사

타격체에 의한 복합재료 구조물의 타격을 충격문제를 이용하여 모사하였다. 일반적으로 충격문제는 충격체에 의한 하중의 전달이 충격체와 피충격체의 접촉을 통해 이루어지므로 풀기가 어렵다. 정확한 접촉영역과 접촉하중을 계산하기 위해서는 충격문제를 동적접촉 알고리즘을 이용하여 풀어야 한다[1].

본 연구에서는 정확한 충격특성의 계산을 위해 동적 접촉을 이용하여 충격을 모사하였다. 상용프로그램인 LS-DYNA 3D 를 이용하여 구조물의 타

\* 서울대학교 항공우주공학과

\*\* 서울대학교 항공우주공학과 대학원

\*\*\* 현대정공

격을 동적접촉 알고리즘을 이용한 충격문제로 모사하였다.

### 3. 타격음의 계산

구조물의 진동에 의해 방사되는 음향은 다음의 Helmholtz 방정식과 경계조건을 이용하여 표현할 수 있다[2].

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \text{ in } \Omega(x) \quad (1)$$

여기서,  $k = \omega / c$ 는 파수이다. 또한 경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial n_s} = -\rho_0 \dot{v}_n \text{ on } \partial\Omega(x) \quad (2)$$

일반적으로 유한요소법이나 경계요소법을 이용하여 식 (1)을 풀 수 있다. 하지만 무한 영역을 경계에서의 요소만으로 다룰 수 있는 등의 장점으로 인해 경계요소법을 많이 사용한다. 경계요소법을 이용하기 위해 다음의 기본해를 도입한다.

$$\nabla^2 p^* + k^2 p^* = \delta(x - x_s) \quad (3)$$

$$p^*(x, x_s) = -\frac{\exp(-jk|x - x_s|)}{4\pi|x - x_s|} \quad (4)$$

그러면, 다음의 적분방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} (p \nabla^2 p^* - p^* \nabla^2 p) dV = -\int_{\partial\Omega} \left[ p \frac{\partial p^*}{\partial n_s} - p^* \frac{\partial p}{\partial n_s} \right] dS \quad (5)$$

그리고

$$\alpha p(x) = \int_{\partial\Omega} \left[ p^* \frac{\partial p}{\partial n_s} - p \frac{\partial p^*}{\partial n_s} \right] dS(x_s) \quad (6)$$

여기서

$$\alpha = \int_{\Omega} p \delta(x - x_s) dV \quad (7)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & x \in \Omega \\ 1/2 & x \in \partial\Omega \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

경계요소법을 이용하여 구조물과 유체의 경계면에서 다음의 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$[A]\{P\} = [B]\left\{\frac{\partial P}{\partial n}\right\} \quad (9)$$

그리고,

$$\left\{\frac{\partial P}{\partial n}\right\} = -\rho_j \omega \{V_n\} = \rho \omega^2 \{U_n\} \quad (10)$$

여기서  $\{V_n\}$ 와  $\{U_n\}$ 는 각각 구조물과 유체의 경계면에서 주파수 영역에서 표현된 유체의 수직 속도와 수직 변위이다.

최종적으로,

$$[A]\{P\} = [C]\{U_n\} \quad (11)$$

즉,  $\{U_n\}$ 를 알면 주파수 영역에서의 음압을 계산할 수 있다.

경계에서의 음압  $\{P\}$ 를 이용하여 유체의 내부에서의 음압은 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다. 변환된 식은 다음과 같다.

$$P = \{A\}^T \{P\} + \{C\}^T \{U_n\} \quad (12)$$

### 4. 복합재료 구조물의 손상 특성

복합재료의 손상의 종류는 섬유절단, 기지균열, 층간분리 등의 세가지로 크게 나눌 수 있다[3]. 이 가운데 층간분리는 복합재료 구조물의 독특한 손상 특성이다. 복합재료 구조물에 층간 분리가 발생하면 구조물의 고유 진동수와 감쇠 계수가 변화한다[4]. 또한 압축하중에 의해 층간 분리영역은 더욱 벌어지게 되므로 구조물의 안정성을 크게 해치게 된다. 본 연구에서는 복합재료의 손상 특성 중에서 층간분리를 고려하였다.

### 5. 수치 해석 및 결과

크기가  $150 \times 150 \times 2.5\text{mm}$  이고  $[0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ]$ 의 적층각을 갖는 단순지지된 복합재료 적층판을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 타격체는 지름이 1cm 인 알루미늄 강체구를 사용하였다. 타격체

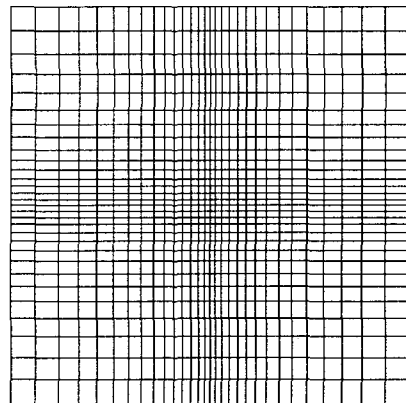


Fig. 1 복합재료 적층판의 유한요소 모델

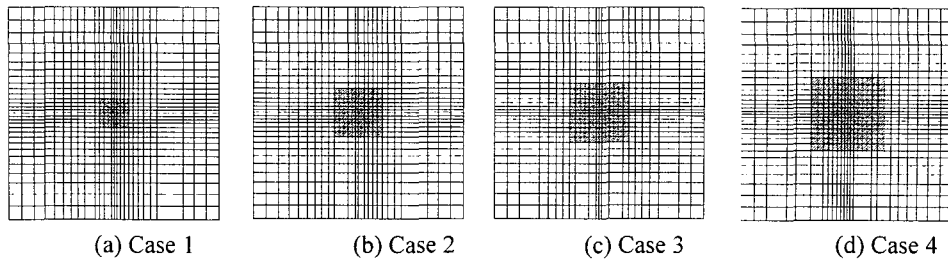


Fig. 2 층간 분리 영역

의 초기 속도는 1m/s 로 설정하였다. 층간분리는 타격의 반대쪽에  $-45^\circ$  층과  $0^\circ$  층의 사이에 발생한 것으로 가정하였다. 4 절점 고체요소를 사용하였으며, 각 층마다 하나의 요소를 사용하였고, 각 층은  $30 \times 30$  의 요소로 모델링하였다. 사용된 총 요소수는 3600 ( $30 \times 30 \times 4$ )개이다. 정확한 접촉해석을 위해 타격점 부근은 세밀하게 모델링하였다. 사용된 유한요소 모델은 Fig. 1 과 같다. 층간분리는 층 두께의 5%의 간극으로 모델링하였다. 손상이 없는 경우와 네가지의 층간분리 손상이 있는 경우를 고려하였다. 층간분리 영역은 타격부분을 중심으로 정사각형의 간단한 형태로 모델링하였다. 고려한 네가지의 층간분리 형상은 Fig. 2 와 같다. Fig. 2 에서 보듯이 각각의 경우는 Case 로 구분하였다.

사용된 경계요소는 4 절점 사각형요소로서 크기는 사용된 유한요소와 일치시켰다. 그러므로 사용된 경계요소의 개수는  $30 \times 30 = 900$  개이다. 가청주파수가 20Hz~20kHz 이므로 샘플주파수를 40kHz 로 선택하였다. 그러므로 LS-DYNA 3D 에서의 시간간격은  $1/40000 = 2.5 \times 10^{-5}$  초이다. 전체시간은 0.01 초로 선택하였다. 타격음은 타격점 바로 위 10cm 위치에서 계산하였다.

복합재료 적층판의 타격음의 계산과정은 다음과 같다.

1 단계: LS-DYNA 3D 를 이용하여 타격에 의해 발생하는 복합재료 적층판의 수직변위를 계산한다.

2 단계: 각 절점에서의 수직변위의 푸리에변환을 계산한다.

3 단계: 경계요소법을 이용하여 지정된 점에서의 음압을 계산한다.

## 6. 타격음의 주파수특성 해석

Fig. 3 에 다섯 가지 경우의 복합재료 적층판에 대한 타격음의 주파수응답을 표시하였다. Table 1 에 3 개의 peak 의 크기와 주파수를 나타내었다. Fig. 3 과 Table 1 에서 알 수 있듯이, 손상의 유무는 타격음의 주파수 특성을 변화시킨다. 우선, 첫 번째 peak 는 층간분리 손상에 영향을 받지 않는다. 하지만 두 번째 peak 는 손상의 영향으로 주파수가 9.5kHz 에서 9.4kHz 로 낮아졌다. 세 번째 peak 는 층간분리 손상에 상당한 영향을 받는다. 손상의 정도가 커질수록 크기가 작아지고, 주파수 또한 점점 작아짐을 알 수 있다. 건강한 상태와 층간분리가 가장 심한 Case4 의 경우 600Hz 의 차이를 보인다. 즉, 층간분리가 발생하면 구조물의 강성이 작아지므로 고유진동수가 낮아진다. 본 연구에서 고려한 복합재료 적층판의 경우는 세 번째 peak 가 층간분리 손상에 가장 민감하다고 할 수 있다. 14kHz 이후의 영역에서도 손상이 발생했을 때 주파수 특성이 많이 변했지만, 변화가 불규칙하고 타격음의 특색을 파악하기가 어렵다.

Table 1 타격음의 주파수 응답에서 나타난 peak 의 크기와 주파수

		Healthy	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Magnitude (dB)	1st	167.1	164.5	165.1	166.0	165.7
	2nd	156.6	156.5	150.9	157.7	152.4
	3rd	150.0	154.3	149.4	147.8	143.9
Frequency (Hz)	1st	3900	3900	3900	3900	3900
	2nd	9500	9400	9400	9400	9400
	3rd	10700	10700	10500	10400	10100

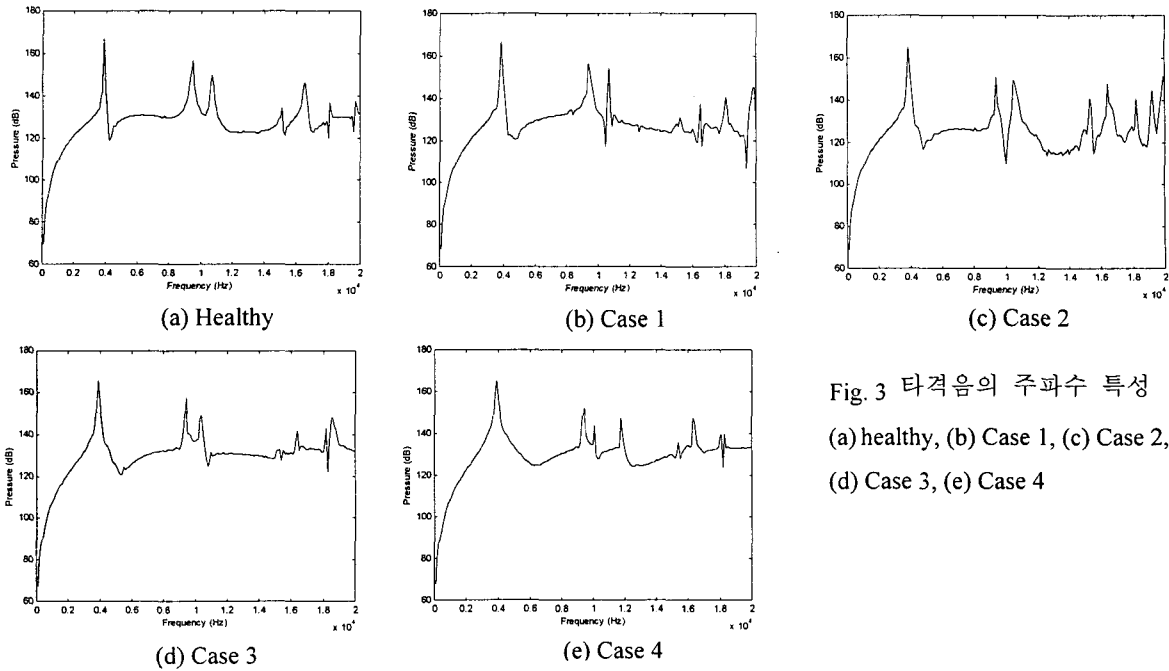


Fig. 3 타격음의 주파수 특성  
(a) healthy, (b) Case 1, (c) Case 2,  
(d) Case 3, (e) Case 4

타격음의 주파수 응답 해석으로부터 다음의 사항을 확인할 수 있다.

- (1) 복합재료 적층판의 타격음의 주파수 특성은 층간분리 손상의 영향을 받는다.
- (2) 본 연구에서 고려한 복합재료 적층판의 경우 세번째 peak 가 층간분리 손상에 가장 민감하다.
- (3) 세번째 peak 의 크기와 주파수를 이용하여 복합재료 적층판의 층간분리 손상의 유무를 판단할 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 타격음을 이용하여 복합재료 적층판의 층간분리 손상을 탐지하는 새로운 비파괴 검사법의 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 체계적인 정립을 위해 수치해석에 기반을 둔 연구를 수행하였다. 타격에 의한 구조물의 거동을 동적 접촉을 고려하는 유한요소법을 이용하여 모사하였다. 진동하는 구조물에서 방사되는 타격음을 경계요소법을 이용하여 계산하였다. 복합재료 적층판의 파단양상중에 층간분리를 고려하였다. 여러 크기의 층간분리를 가정하고 계산을 수행하였다. 계산된 타격음의 주파수 응답을 통해 층간분리 손상이 타격음의 주파수 응답에서의 peak 의 크기와 주파수를 변화시킴을 알 수 있었다. 본 연구의 해석에서 사용된 복합재료 적층판의 경우, 세번째

peak 가 층간분리 손상에 가장 민감하며 층간분리 손상의 탐지에 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국가지정연구실사업에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 구 남서, 저속충격 시 복합재료 구조물의 동적 거동 및 손상예측에 관한 연구 서울대 대학원 박사학위 논문, 1996
- [2] H. Kane, James, *Boundary Element Analysis in Engineering Continuum Mechanics*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994
- [3] Jones, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, Scripta, Washington, DC, 1975
- [4] Lin, D., Sun, C.T. and Malvern, L.E, "Structural Degradation of Impacted Graphite/Epoxy Laminates," *the 56<sup>th</sup> Shock & Vibration Bulletin*, 1986, pp. 51-60