

복합재료 구조물의 태핑음에 대한 수치해석과 실험 결과의 비교

황준석* · 김승조**

Comparison of Experiment and Numerical Simulation of Tapping Sound of Laminated Composite Structures

Joon-Seok Hwang, Seung Jo Kim

ABSTRACT

현재 개발 중에 있는 비파괴 검사법인 Tapping Sound Analysis 의 검증을 위해 실험으로 측정된 타격음(태핑음)과 수치해석으로 구한 타격음을 비교하였다. 손상이 없는 복합재료 구조물과 손상이 있는 복합재료 구조물을 제작하고 타격 실험을 통해 타격음과 타격력을 측정하였다. 타격음의 수치 모사를 위해 동적접촉 알고리즘을 이용한 유한요소법과 경계요소법을 이용하였다. 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. 실험 결과와 수치해석 결과의 비교를 통해 타격음 계산에 사용된 수치모델의 타당성을 밝혔다.

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 구

조물을 검사할 때 손상의 유무를 알려주는 지표로서 많이 사용하고 있는 것은 타격체와 구조물간의 접촉력의 시간이력과 타격시에 발생하는 타격음 등이다.

복합재료 구조물의 타격음을 이용하여 구조물 내부의 손상의 유무를 판단하는 방법으로서 Tapping Sound Analysis 를 제안하였다[1]. Tapping Sound Analysis 는 손상이 없는 구조물에 대한 타격음을 구조물의 성문으로 정의하고, 검사 대상 구조물의 타격음과 성문을 비교하여 손상의 유무를 판단하는 방법이다. 특히 성문 데이터의 객관성을 위해 고정밀 수치해석을 이용하여 손상이 없는 구조물의 타격음의 획득하는 방법을 제안하였다. 이전의 연구[2]에서는 실험적인 방법을 이용하여 성문을 구하고 손상된 구조물의 타격음과 비교하여 Tapping Sound Analysis 가 비파괴검사법으로 사용될 수 있음을 밝혔다.

본 연구에서는 수치해석에 의한 타격음을 실험으로 구한 타격음 데이터와 비교하여 수치해석 모델의 타당성을 밝혔다.

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

2. Tapping Sound Analysis 의 개요

구조물에 타격을 가했을 때 발생하는 타격음의 발생과정은 타격에 의한 구조물 표면의 진동에 의해 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 성문(聲紋, Soundprint)으로 정의하고 TSA 의 기준 데이터로 이용한다. TSA 의 검사 성능은 성문 데이터의 정확성에 의해 좌우되므로 성문 데이터는 객관적이고 절대적이어야 한다. 성문 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 성문의 객관성도 보장될 수 없다. 보다 객관적인 방법으로 대상 구조물에 대한 고정밀 수치해석을 이용하는 방법이 있다. 타격음이 발생하는 과정에 대한 고정밀 수치모델을 수립하고, 수치해석을 통해 성문 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.

성문 데이터가 확보되면 실제 검사 과정은 대상 구조물의 타격음을 측정하고 이를 성문 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. 타격음의 수치모델링

타격현상의 수치 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[3]. 본 연구에서는 정확한 충격특성의 계산을 위해 동적 접촉을 이용하여 충격을 모사하였다. 유한요소법에 의해 구조물의 동적 지배방정식은 다음과 같은 이산화된 방정식으로 변환된다.

$$\mathbf{ma} + \mathbf{cv} + \mathbf{ku} = \mathbf{f} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{a} , \mathbf{v} , \mathbf{u} 는 각각 절점 가속도, 속도, 변위 벡터이고, \mathbf{m} , \mathbf{c} , \mathbf{k} 는 각각 질량, 감쇠, 탄성 행렬이고, \mathbf{f} 는 외력 벡터이다. 식 (1) 에서 \mathbf{f} 는 충격에 의해 구조물에 가해지는 외력 벡터로서 외부 별칭 함수법을 이용하여 구한다. 식 (1)로부터 각 절점에서의 변위를 구하기 위해 중앙차분법을 이용하여 시간적분을 수행한다. 속도와 가속도에 대한 가정을 이용하여 중앙차분법을 적용하면 식 (1)은 다음과 같은 식으로 변환된다.

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{m} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{c}\right) \mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{f}_n - \left(\mathbf{k} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{m}\right) \mathbf{u}_n - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{m} - \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{c}\right) \mathbf{u}_{n-1} \quad (2)$$

여기서 lumped mass 기법을 이용하고 감쇠 행렬을 질량행렬의 상수배로 가정하였다.

식(2)로부터 타격에 의한 구조물의 각 절점에서의 변위의 시간 이력을 구할 수 있다.

타격음의 계산

구조물의 진동에 의해 방사되는 음향은 다음의 Helmholtz 방정식과 경계조건을 이용하여 표현할 수 있다[4].

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \text{ in } \Omega(x) \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \dot{v}_n, \text{ on } \partial\Omega(x) \quad (4)$$

일반적으로 유한요소법이나 경계요소법을 이용하여 식 (3)을 풀 수 있다. 하지만 무한 영역을 경계에서의 요소만으로 다룰 수 있는 등의 장점으로 인해 경계요소법을 많이 사용한다. 경계요소법을 이용하기 위해 다음의 기본해를 도입한다.

$$\nabla^2 p^* + k^2 p^* = \delta(x - x_s) \quad (5)$$

$$p^*(x, x_s) = \frac{\exp(-jk|x - x_s|)}{4\pi|x - x_s|} \quad (6)$$

그러면, 다음의 적분방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} (p \nabla_n^2 p^* - p^* \nabla_n^2 p) dV = - \int_{\Sigma} \left[p \frac{\partial p^*}{\partial n_s} - p^* \frac{\partial p}{\partial n_s} \right] dS \quad (7)$$

그리고

$$\alpha p(x) = \int_{\Sigma} \left[p^* \frac{\partial p}{\partial n_s} - p \frac{\partial p^*}{\partial n_s} \right] dS(x_s) \quad (8)$$

여기서

$$\alpha = \int_{\Omega} p \delta(x - x_s) dV \quad (9)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & x \in \Omega \\ 1/2 & x \in \partial\Omega \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

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

$$[A]\{P\} = [B] \left\{ \frac{\partial P}{\partial n} \right\} \quad (11)$$

그리고,

$$\left\{ \frac{\partial P}{\partial n} \right\} = -\rho j \omega \{V_n\} = \rho \omega^2 \{U_n\} \quad (12)$$

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

최종적으로,

$$[A]\{P\} = [C]\{U_n\} \quad (13)$$

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

경계에서의 음압 $\{P\}$ 를 이용하여 유체의 내부에서의 음압은 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다. 변환된 식은 다음과 같다.

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

4. 특성추출 기법

타격음 데이터의 단순 비교를 통해서만 차이점을 발견하기가 쉽지 않으므로 타격음의 특징을 표현할 수 있는 특성 데이터를 추출하는 기법이 필

요하다. 본 연구에서는 신호처리 분야에서 특성 추출에 사용되고 있는 방법중의 하나인 wavelet packet transform[5]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. 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 보이므로 손상이 있다고 판단한다.

5. 실험 및 수치해석

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 층간분리 손상을 가정하였다. 손상된 구조물에 층간분리 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. 타격장치의 유효 질량은 0.0588 kg 이며 타격 속도는 0.1701 m/s 이다. 타격장치의 회전팔의 길이는 $l = 0.198$ m 이다. 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 2 에 구성된 전체 실험장치를 나

타내었다. 그림 3 과 같이 총 다섯 군데의 검사점을 설정하였다. 검사점 1 와 2 는 손상영역 내에 위치하고 있으며, 검사점 3 은 손상영역의 경계, 그리고 검사점 4 와 5 는 손상영역 바깥에 위치하도록 하였다.

수치해석 모델

건강한 구조물의 타격음 데이터 획득을 위한 수치해석을 수행하였다. 유한요소 정식화 과정에서 비적합모드를 가지는 8 절점 고체 요소를 이용하였다. 복합재료 평판 구조물의 면 내에는 40x40 의 유한요소로 모델링하였고, 두께방향으로는 4 층으로 모델링하였다. 경계요소법에 사용된 모델은 면내 유한요소모델과 동일하다. 유한요소 해석과 경계요소해석을 위한 수치해석 모델은 그림 4 와 같다. 타격을 위한 충격체로는 실험에서 사용된 타격체의 질량을 가지는 직경 1cm 강체구로 모델링하였다. 4 번의 경계조건은 안전지지 경계조건을 가정하고, 수치해석을 수행하면서 실제 구조물의 경계조건과 유사한 조건을 찾아서 변경하였다. 시간적분을 위한 시간 간격은 1×10^{-7} 초이며, 전체 시간은 0.02sec 이다. 타격을 계산을 위한 샘플링 시간 간격은 2.5×10^{-5} 초이다. 실험과 마찬가지로 총 5 군데의 검사점에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 계산된 시간영역에서의 타격음 데이터를 저역통과필터에 통과시켜서 고주파 잡음을 제거하였다.

결과 비교

실험에 사용된 다섯 개의 타격점에 대한 수치해석을 수행하였다. 감쇠특성을 모사하기 위해 질량행렬에 100 을 곱하여 감쇠행렬을 구성하였다. 그림 5 에 타격력의 시간 이력에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림에서 보듯이 타격력의 시간 이력 형상을 거의 정확히 예측함을 알 수 있다. 자세히 살펴보면, 타격력의 크기는 약간의 차이를 보이지만, 타격력 지속 시간은 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 6 에 타격음의 시간 이력에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 시간 영역에서 타격음 데이터가 근접함을 알 수 있다.

6. 결론

Tapping Sound Analysis 를 이용하여 구조물의 손상을 검사하고자 할 때, 대상 구조물이 양산품일 경우는 손상이 없다고 판단되는 시편에 대한 충분한 횡수의 실험을 통해 건강한 구조물의 타격음 데이터를 획득할 수 있다. 그러나, 대상 구조물이

양산품이 아니거나, 또는 대상 구조물의 건강성이 입증되지 않을 경우는, 실험적인 방법으로 측정된 성분데이터는 객관성을 상실한다. 그러므로, 수치해석을 이용하여 보다 객관적인 성분 데이터를 획득할 수 있다.

본 연구에서는 Tapping Sound Analysis 에서 사용된 수치모델링의 타당성을 검증하였다. 실험으로 측정된 타격력과 타격음 데이터와 수치해석으로 계산한 타격력과 타격음 데이터를 비교하였으며, 일치된 결과로부터 사용된 수치해석 모델링의 타당성을 밝혔다.

참고문헌

- (1) 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
- (2) 황준석, 김승조, "복합재료 구조물 비파괴 검사법 Tapping Sound Analysis 의 실험적 검증," 춘계 학술대회 논문집, (2002 년 5 월 17 일, 전남대학교)(한국 복합재료학회)
- (3) Goo, N.S., and Kim, S.J., "Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact", *AIAA Journal*, Vol.35, No.9, Sept, 1997, pp.1518-1521
- (4) H. Kane, James, *Boundary Element Analysis in Engineering Continuum Mechanics*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994
- (5) 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

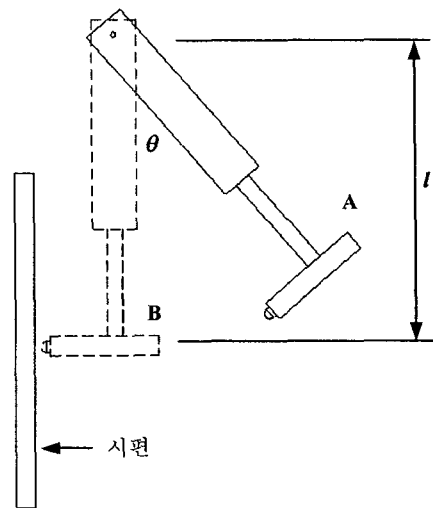


그림 1: 타격장치의 개념도



그림 2: 타격음 실험 장치

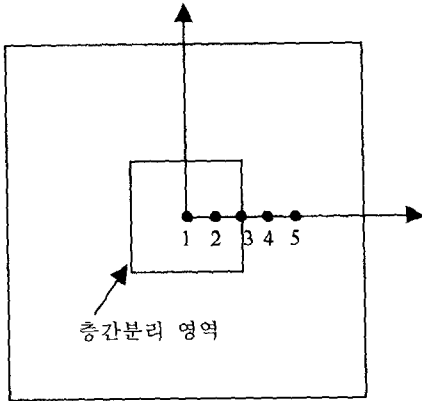


그림 3: 충간 분리 영역과 검사점의 위치

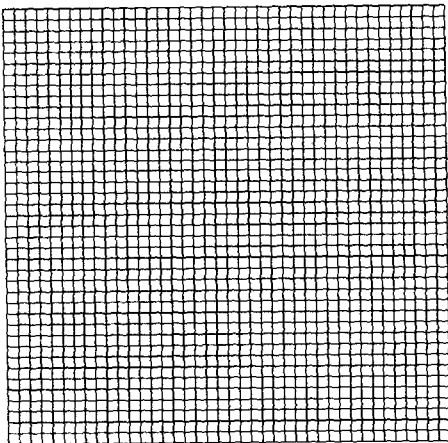


그림 4: 유한요소 및 경계요소 모델

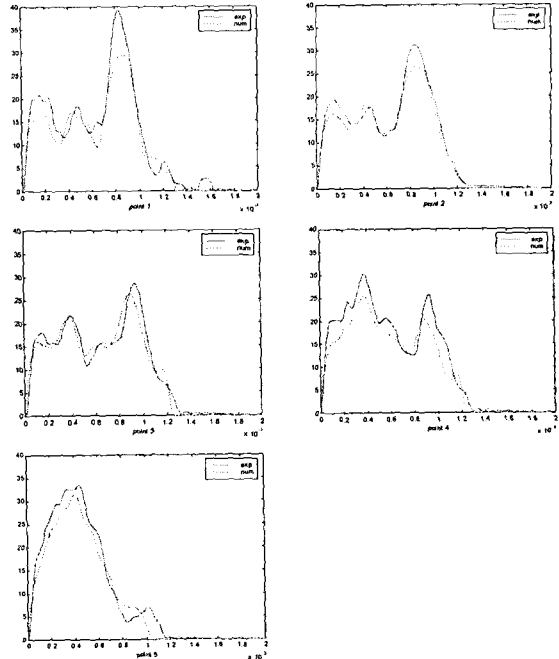


그림 5: 타격력 시간 이력의 비교

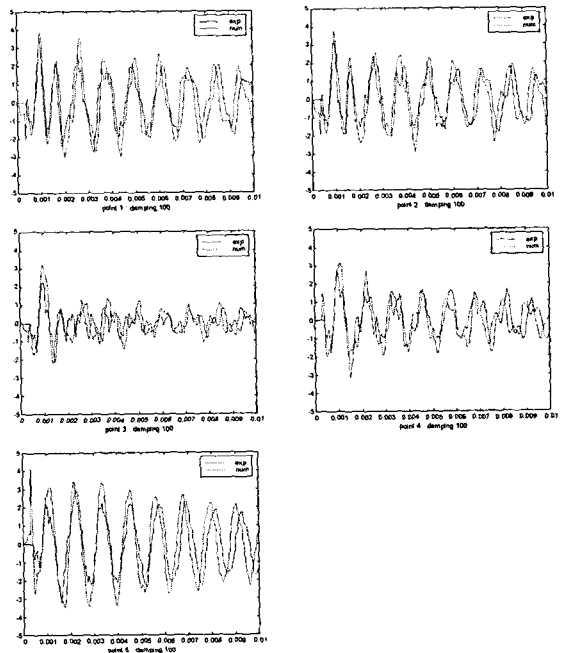


그림 6: 타격음의 비교