

정밀수치해석을 기반으로 한 태핑음 비파괴 검사법

황준석* · 김승조**

An NDE Method using Tapping Sound based on High Precision Computation

Joon-Seok Hwang, Seung Jo Kim

ABSTRACT

정밀 수치해석으로 구한 태핑음 데이터를 기준으로 하여 복합재료 구조물 내의 층간분리 손상의 존재 여부를 판단하는 비파괴 검사법을 제안하였다. 태핑음의 수치 모사를 위해 동적 접촉 알고리즘을 이용한 유한요소법과 경계요소법을 이용하였다. 태핑음 수치해석 과정에 대한 정식화를 수행하고 실제 구조물의 태핑음과 비교하여 수치해석 기법의 타당성을 밝혔다. 웨이브릿 패킷 변환에 근거한 특성 추출법을 이용하여 태핑음으로부터 손상 판단을 위한 특성을 추출하고 손상 판단의 지표가 되는 특성 지수를 정의하였다. 복합재료 구조물에 대한 층간분리 손상 검출과정을 시연함으로써 제시된 태핑음 검사법의 타당성을 밝혔다.

1. 서론

항공우주 분야에 많이 사용되고 있는 복합재료 구조물은 일반적으로 판이나 각 등의 두께가 얇은 구조물의 형태로 라미나를 적층하여 제작한다. 이때 복합재료 구조물의 제작시 불량 접착등으로 인한 초기 손상이 발생할 수 있다. 또한 구조물이 운용중에 충격하중 등에 노출될 경우 구조물 내부에 손상이 발생할 수 있다. 이러한 손상은 비파괴 검사법을 이용하여 탐지하는데, 현재 사용되고 있는 비파괴 검사법은 오랜 기간 동안 연구되어서 신뢰를 받고 있지만 대부분 번거롭고 많은 비용이 든다.

한편, 숙련된 검사자들은 동전이나 타격망치 등을 이용하여 구조물을 두드렸을 때의 반응을 살펴보는 타격 테스트를 이용하여 구조물의 내부손상을 파악한다. Coin tap test 라고 불리는 이 방법은 간편하기는 하나 체계적인 정립이 아직 미흡하다.

Coin tap test 는 손상 판단에 사용하는 데이터를 기준으로 태핑시에 발생하는 접촉력을 이용하는 방법과 태핑음을 이용하는 방법으로 구분할 수 있

다. 태핑시에 발생하는 접촉력을 이용한 Coin tap test 에 대한 대표적인 연구로는 접촉시간을 이용하는 방법에 관한 연구[1]와 이를 바탕으로 한 자동 타격장치에 대한 연구[2]를 들 수 있다. 한편, 태핑음을 이용하는 방법으로 선행 연구[3]에서는 실험적인 방법을 이용하여 건강한 구조물의 태핑음과 손상된 구조물의 태핑음을 비교하여 복합재료 구조물의 손상을 판단하는 비파괴 검사법(Tapping Sound Analysis)의 가능성을 밝혔다. 이 과정에서 손상이 없는 구조물에 대한 태핑음을 구조물의 성문으로 정의하고, 검사 대상 구조물의 태핑음과 성문을 비교하여 손상의 유무를 판단하였다. 추가 연구[4]로서 성문 데이터의 객관성을 높이기 위해 태핑음에 대한 수치해석 기법을 제시하였다.

본 연구에서는 태핑음을 구하는 수치해석 기법의 타당성을 실험적 비교를 통해 밝히고, 실제 손상이 있는 구조물에 대한 손상 탐지 시연을 통해 태핑음을 이용한 복합재료 구조물의 비파괴 검사법(Tapping Sound Analysis)의 타당성을 밝혔다.

2. Tapping Sound Analysis 의 개요

TSA 의 기본 개념은 정밀 수치해석으로 구한 태핑음 기준 데이터와 손상이 의심되는 구조물의 태핑음을 비교하여 손상의 유무를 판단하는 것이

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

다. 이때 손상이 없는 건강한 구조물의 태핑음 데이터를 성분(聲紋, Soundprint)으로 정의한다. 성분 데이터를 확보하는 방법으로 간단히 실제 측정에 의한 방법을 생각할 수 있다. 이 경우 대상 구조물이 양산 제품이 아닐 경우는 충분한 샘플을 구할 수가 없다. 또한, 대상 구조물이 양산 제품이라고 하더라도, 초기 구조물의 무결성이 보장되지 않으면 성분의 객관성도 보장될 수 없다. 그러므로, TSA 에서의 성분은 기본적으로 고정밀 수치해석을 이용하여 구한다.

성분 데이터가 확보되면 실제 검사 과정은 대상 구조물의 태핑음을 측정하고 이를 성분 데이터와 비교하여 손상의 유무를 판단하는 과정이다. 태핑음 데이터로부터 특성 데이터를 추출하여 손상 판단을 위한 비교 과정에서 사용하게 된다.

3. 태핑음의 수치모델링

타격현상의 수치 모사

타격체에 의한 복합재료 구조물의 타격과정을 충격문제를 이용하여 모사하였다. 정확한 충격특성의 계산을 위해 동적 접촉 알고리즘을 이용하였다. 유한요소법에 의해 구조물의 동적 지배방정식은 다음과 같은 이산화된 방정식으로 변환된다.

$$\mathbf{m}\mathbf{a} + \mathbf{c}\mathbf{v} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (1)$$

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

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

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

태핑음의 계산

구조물의 진동에 의해 방사되는 음향은 다음의 Helmholtz 방정식과 경계조건을 이용하여 표현할 수 있다[5].

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

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

경계요소법을 이용하기 위해 기본해를 도입하면 다음의 적분 방정식을 얻을 수 있다.

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

적분 방정식에 경계요소법을 적용하면, 구조물과 유체의 경계면에서 다음의 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$[A]\{P\} = [B] \left\{ \frac{\partial P}{\partial n} \right\} \quad (6)$$

그리고,

$$\left\{ \frac{\partial P}{\partial n} \right\} = -\rho_j \omega \{V_n\} = \rho \omega^2 \{U_n\} \quad (7)$$

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

최종적으로,

$$[A]\{P\} = [C]\{U_n\} \quad (8)$$

즉, $\{U_n\}$ 를 알면 주파수 영역에서의 음압을 계산할 수 있다. 경계에서의 음압 $\{P\}$ 를 이용하여 유체의 내부에서의 음압은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$P = \{A\}^T \{P\} + \{C\}^T \{U_n\} \quad (9)$$

4. 특성추출 기법

태핑음 데이터의 단순 비교를 통해서만은 차이점을 발견하기가 쉽지 않으므로 태핑음의 특징을 표현할 수 있는 특성 데이터를 추출하는 기법이 필요하다. 본 연구에서는 신호처리 분야에서 특성 추출에 사용되고 있는 방법 중의 하나인 웨이브릿 페킷 변환[6]을 이용한 특성 추출법을 이용하였다. 웨이브릿 페킷 변환을 수행한 뒤 각 페킷의 에너지를 계산하여 특성 배열을 구성한다. 계산된 페킷 배열은 norm 이 1 이 되도록 정규화 과정을 거치고 정규화된 페킷 배열을 특성 벡터라고 정의한다. 건강한 구조물의 태핑음 특성 벡터(성분)와 검사 대상 구조물의 태핑음 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. 태핑음 수치해석 기법의 검증

시편 제작 및 실험 장치의 구성

수치해석 기법의 실험적 검증을 위해 손상이 없는 건강한 구조물 시편을 제작하였다. SK 케미컬의 USN125BX 프리프레그를 적용하고 hot press

를 이용하여 성형하여 판 형태의 실험 시편을 제작하였다. 복합재료 평판은 크기가 15cm×15cm 이고 적층각은 $[0^\circ/90^\circ]_s$ 이다

실험 시편에 타격력을 가하는 장치를 그림 1 과 같이 구성하였다. 타격망치(PCB 086B01)를 이용하여 진자 형태의 타격장치를 구성하였다. 타격장치의 유효 질량은 0.0588 kg 이며 타격 속도는 0.1701 m/s 이다. 타격체에 의해 시편에 가해지는 접촉력은 타격망치에 장착된 힘 변환기를 이용하여 측정하였다. 타격에 의해 발생하는 태핑음은 시편의 중앙부에서 10cm 떨어진 지점에 위치한 마이크로 폰 (B&K4189)를 이용하여 측정하였다. 그림 2 와 같이 총 다섯 군데의 검사점을 설정하였다

수치해석 모델

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 3 과 같다. 타격을 위한 충격체로는 실험에서 사용된 타격체의 질량을 가지는 직경 1cm 강체구로 모델링하였다. 4 번의 경계 조건은 실제 구조물의 경계조건과 유사한 조건을 찾아서 변경하였다. 시간적분시의 시간 간격은 1×10^{-7} 초이며, 전체 시간은 0.02sec 이다. 실험과 마찬가지로 총 5 군데의 검사점에 대한 수치해석을 수행하였다

결과 비교

실험에 사용된 다섯 개의 타격점에 대한 수치해석을 수행하였다. 감쇠특성을 모사하기 위해 질량행렬에 150 을 곱하여 감쇠행렬을 구성하였다. 그림 4 에 타격력의 시간 이력에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림에서 보듯이 타격력의 시간 이력 형상을 거의 정확히 예측함을 알 수 있다. 그림 5 에 태핑음의 시간 이력에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 시간 영역에서 태핑음 데이터가 근접함을 알 수 있다.

실험으로 구한 태핑음과 수치해석으로 구한 태핑음 데이터의 근접성을 살펴보기 위해 4 장에서 제시한 특성지수를 구하여 표 1 에 나타내었다. 특성지수의 크기가 거의 1 에 가까운 값을 보인다는 사실로부터 수치해석 과정의 타당성을 알 수 있다.

충간분리 손상의 탐지

태핑음을 이용한 검사법의 유용성을 살펴보기 위해 충간분리 손상 탐지를 시연하였다. 손상된

구조물에 충간분리 손상을 만들기 위해서 Tissue paper 를 Kapton tape 으로 둘러싸서 만든 삽입물을 충간분리 영역에 삽입한 뒤 성형하였다. 충간 분리 영역은 구조물의 가운데 부분으로 가정하였으며 충간 분리 영역의 크기는 4.5cm×4.5cm 이고 그 위치와 영역은 그림 2 와 같다.

충간분리가 있는 구조물의 태핑음을 측정하고, 특성 백터를 구한 뒤, 수치해석으로 구한 특성 백터와의 특성지수를 계산하여 표 2 에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 손상이 존재하는 영역(그림 2 참조)에 위치한 검사점 1, 2, 3 의 특성지수가 1 과 많은 차이를 보이는 것으로부터 손상의 존재 여부를 판단할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 태핑음을 이용하여 복합재료 구조물의 손상을 탐지하는 방법인 Tapping Sound Analysis 에서 사용된 수치모델링의 타당성을 검증하였다. 실험으로 측정된 타격력 및 태핑음 데이터와 수치해석으로 계산한 타격력 및 태핑음 데이터를 비교하였으며, 일치된 결과로부터 사용된 수치해석 모델링의 타당성을 밝혔다. 또한 실제 손상이 존재하는 구조물에 대한 손상탐지 시연을 통해 제시된 검사법의 유용성을 밝혔다.

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) Hsu, D.K., Barnard, D.J., Peters, J.J., Dayal, V., Kommareddy, V., "Nondestructive Inspection of Composites and Their Repairs," *6th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference*, Sept. 16-19, 2002
- (3) 황준석, 김승조, "복합재료 구조물 비파괴 검사법 Tapping Sound Analysis 의 실험적 검증," 2002 년 한국 복합재료 학회 춘계학술대회 논문집
- (4) 황준석, 김승조, "복합재료 구조물의 태핑음에 대한 수치해석과 실험 결과의 비교", 2002 년 한국복합재료 학회 추계학술대회 논문집
- (5) H. Kane, James, *Boundary Element Analysis in Engineering Continuum Mechanics*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994
- (6) 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: 태핑음 실험 장치

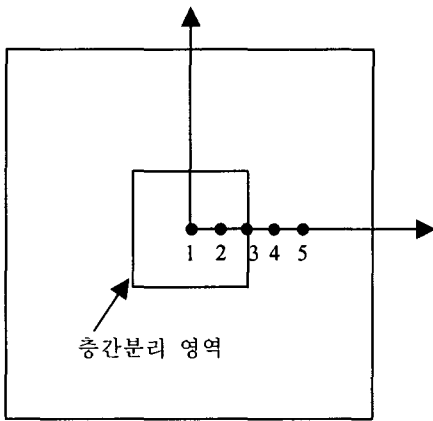


그림 2: 층간 분리 영역과 검사점의 위치

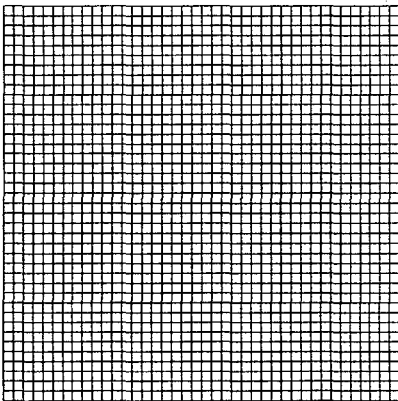


그림 3: 유한요소 및 경계요소 모델

표 1: 태핑음의 근접성

검사점	1	2	3	4	5
특성지수	0.9427	0.9655	0.9623	0.9639	0.9795

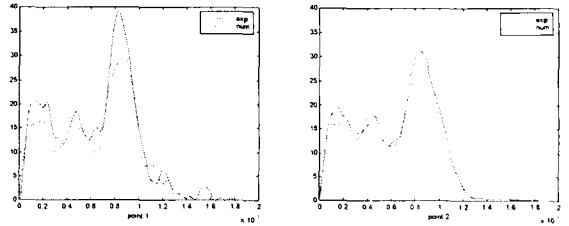


그림 4: 타격력의 비교

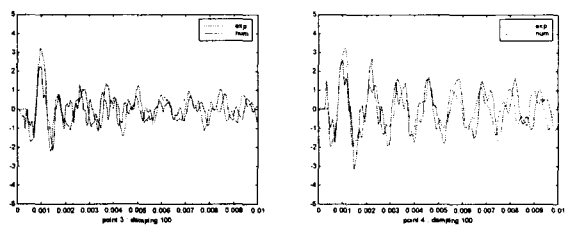
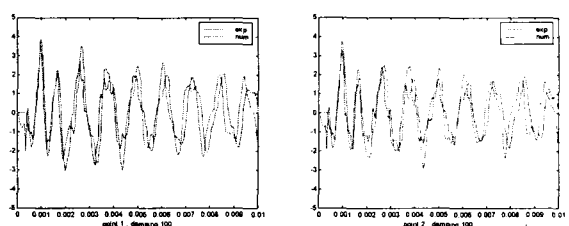
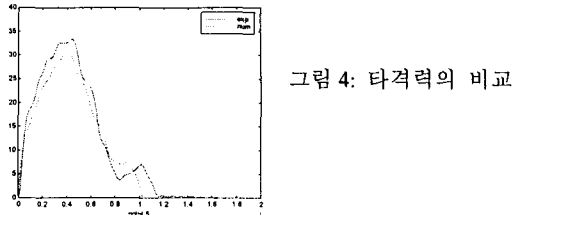
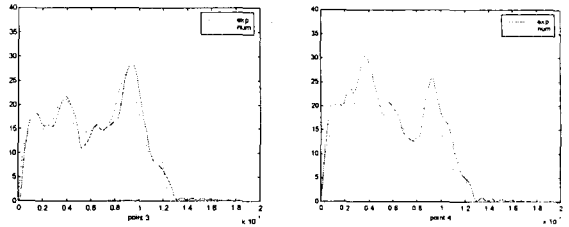


그림 5: 태핑음의 비교

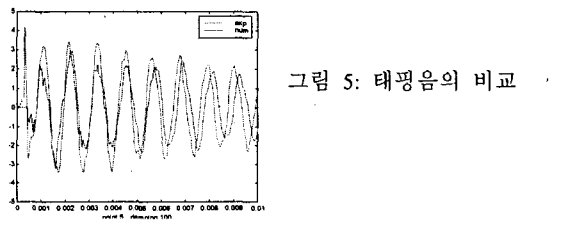


표 2: TSA 손상탐지 결과

검사점	1	2	3	4	5
특성지수	0.7242	0.5569	0.7986	0.8570	0.9255