

論文

타격음을 이용한 복합재료 구조물의 비파괴 검사법 개발

황준석*, 김승조**

Development of Non-destructive Evaluation Method for Composite Structures using Tapping Sound

Joon-Seok Hwang* and Seung Jo Kim**

ABSTRACT

A new non-destructive evaluation method using tapping sound is proposed. This method, named Tapping Sound Analysis, is using the difference between tapping sound data of healthy structure and defective structure as the criteria of determination of internal defect of composite structure. For the characterization of tapping sound, a feature extraction method based on wavelet packet transform is proposed. And a feature index is defined for the decision of existence of internal defects. To prove the possibility of proposed method as a non-destructive evaluation method, experimental study is performed. The tapping sound data of healthy structure and defective structure are measured and compared based on the proposed decision method. The experimental results showed that the feature index is a good indicator for the determination of internal defects.

초 록

본 연구에서는 타격음을 이용한 비파괴 검사법을 제안하였다. 제안된 방법(tapping sound analysis)은 건강한 구조물과 손상된 구조물의 타격음의 차이를 분석하여 구조물의 손상 유무를 판단하는 방법이다. 타격음의 직접적인 비교는 비효율적이므로 타격음으로부터 특성을 추출하기 위해 wavelet packet transform에 기반한 특성추출법을 제안하였다. 또한 추출된 특성 자료를 바탕으로 손상의 유무를 판단하는 지표로서 특성 지수를 정의하였다. 제안된 방법의 타당성을 밝히기 위해 실험적인 검증을 수행하였다. 복합재료를 이용하여 건강한 구조물과 손상된 구조물을 제작하고 타격음을 측정하였다. 제안된 손상 판단 기법을 이용한 결과로부터 특성 지수에 의한 손상 판단의 타당성을 밝혔다.

Key Words : 비파괴 검사법(non-destructive evaluation), 타격음(tapping sound), 웨이브릿 패킷 변환(wavelet packet transform), 복합재료(composite structure)

1. 서 론

일반적으로 복합재료 구조물은 판이나 각 등의 두께가 얇은 구조물의 형태로 라미나를 적층하여 제작한다. 이때

제작이 완료된 복합재료 구조물의 경우, 제작 과정에서 접착불량 등의 초기 손상이 발생할 가능성이 존재한다. 또한 판이나 각 형태로 제작된 복합재료 구조물은 구조적 특성상 횡방향 강성이 작아서 횡방향 하중에 취약하다. 특히

* 서울대학교, 기계항공공학부, 대학원

** 서울대학교, 기계항공공학부, 교신저자(E-mail:sjkim@snu.ac.kr)

저속충격을 받을 경우 외부에서는 보이지 않으나 내부적으로 치명적인 손상이 발생했을 가능성이 있다. 이와 같은 제작시 불량으로 인한 초기 손상이나 운용중에 발생하는 구조물 내부 손상은 일반적으로 사람의 눈으로 탐지하기가 불가능하므로 비파괴 검사법을 이용하여 탐지한다. 전통적인 비파괴 검사법은 구조 진동파를 이용하는 방법과 X-레이 촬영을 통한 방법 등을 들 수 있다. 이와 같은 방법은 오랜 기간 동안 사용되어 왔기 때문에 검사 결과에 대한 신뢰가 높다. 하지만, 기존의 방법은 부품의 검사를 위해 구조물을 해체해야 한다는 점, 특수한 검사장치를 이용하므로 검사장치가 설치된 검사실로 옮겨야 한다는 등 번거로움이 많다. 또한 검사 자체에 많은 비용이 들고, 구조물의 검사 기간 동안 구조물의 운용이 정지되는 부가 비용까지 감안한다면 상당히 고비용의 검사법이라고 할 수 있다.

한편, 숙련된 검사자들은 동전이나 타격망치 등을 이용하여 구조물을 두드렸을 때의 구조물의 반응을 살펴보는 타격 테스트를 이용하여 구조물의 내부손상을 파악할 수 있다. 일반적으로 타격 테스트를 이용해서 구조물을 검사할 때 손상의 유무를 알려주는 지표로서 많이 사용하고 있는 것은 타격체와 구조물간의 타격력의 시간이력과 타격시에 발생하는 타격음 등이다. 타격력의 시간이력 결과로부터 도출된 접촉 지속 시간(contact duration)을 이용하는 방법(coin tap method)[1]은 적용방법과 손상 판단 방법이 비교적 간단하므로, 타격음을 이용하는 방법에 비해 많이 채택되고 있다. 최근의 연구 결과로는 대상 구조물 표면 위의 다수의 검사점에 대한 접촉 지속 시간을 측정하고, 이를 바탕으로 구조물 내부의 손상 부위를 찾아내는 장치가 연구되었다[2]. 한편, 접촉 지속 시간을 이용하여 손상을 판단하는 방법은 비교적 간단하긴 하지만, 구조물의 두께가 두꺼워지면 민감도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한 타격력의 시간 이력 특성은 부식에 의한 표면 손상 등에 영향을 받게 되므로 표면 상태에 따라 민감도가 변하게 되며, 검사범위가 국소적이므로 구조물의 검사 면적이 넓은 경우 많은 검사점을 필요로 한다. 한편 타격음을 이용하는 방법은 검사범위가 국소적이지 않고, 상대적으로 두꺼운 구조물의 검사시에도 민감도가 떨어지지 않는 장점이 있다[3]. 또한 타격력과는 달리 타격음은 구조물의 표면 상태에 상대적으로 덜 민감함이 밝혀져 있다[4]. 이러한 타격 검사법은 기존의 비파괴 검사법에 비해 간단하고 저비용으로 구조물 내부의 손상을 탐지할 수 있으나, 현재까지는 숙련된 검사자의 경험에 의존하는 방법으로서 체계적으로 적용되어 있지 않다.

이와 같은 배경하에 본 연구에서는 타격음을 이용하여 구조물 내부의 손상을 탐지하는 비파괴검사법인 Tapping Sound Analysis(TSA)를 개발하였다. TSA의 목표는 타격 검사시에 손상 여부를 판단하는 검사자의 경험적인 부분을 데이터 베이스화 된 기준 데이터(reference data)를 이용하여

판단하는 일종의 인공지능(Artificial Intelligence) 개념으로 대체하는 것이다. TSA의 개념과 검사 절차에 관해서 2장에서 논하였고, 3장에서는 타격음을 비교하여 손상을 판단하는 기법에 대해 설명하였다. TSA에서 필요한 기준 데이터를 확보하는 방법에 대해 4장에서 논하였다. 마지막으로 비파괴 검사법으로서의 TSA의 타당성을 밝히기 위해 실험을 수행하였으며 실험 절차와 결과를 5장에 기술하였다.

2. Tapping Sound Analysis의 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 구조물과는 다른 반응을 보인다. TSA는 검사 대상 구조물과 손상이 없는 구조물의 타격음의 차이를 이용하여 구조물의 손상 여부를 판단하는 검사법이다.

손상의 검사 과정은 검사 대상 구조물의 타격음과 손상이 없는 구조물의 타격음을 비교하는 과정이다.

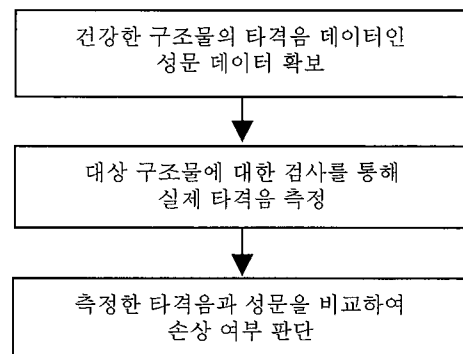


Fig. 1 Tapping Sound Analysis의 검사과정.

이때 손상이 없는 건강한 구조물의 타격음 데이터를 성문(聲紋, soundprint)으로 정의하고 TSA의 기준 데이터로 이용한다. 성문은 구조물의 고유한 특성 데이터이며 검사 전에 미리 확보해 두어야 한다. TSA의 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 구조물 샘플에 대한 반복적인 실험을 통해 타격음을 측정하여 평균화한 뒤 이를 데이터 베이스화 한다. 실험을 통

해 성문데이터를 획득하는 방법은 비교적 간편하게 실시할 수 있는 방법이긴 하지만, 때에 따라서는 객관성이 결여될 수도 있다. 예를 들어, 대상 구조물이 양산품이 아닐 경우에는 평균값을 도출할 만한 충분한 샘플을 확보할 수 없으므로 추출된 성문 데이터는 객관성을 잃을 수 있다. 또한 충분한 개수의 샘플이 확보되더라도 제작상의 반복된 오류로 인해 발생한 초기 손상이 있을 경우, 구조물의 건전성이 보장되지 않을 수 있으므로 성문의 객관성도 보장될 수 없다.

보다 객관적인 성문 데이터를 확보하는 방법으로 수치해석적 방법을 이용할 수 있다. 이 방법은 타격음이 발생되는 과정에 대한 고정밀 수치모델을 수립하고, 수치해석을 통해 성문 데이터를 확보하는 방법으로서, 구조물의 건전성이 보장되므로 보다 객관적인 성문 데이터를 얻을 수 있다. 또한 단품 생산 구조물에 대해서도 적용이 가능하며 구조물의 설계 단계에서부터 손상 검사를 위한 기준 데이터를 확보할 수 있다.

실험적인 방법 또는 수치해석적인 방법을 통해 대상 구조물에 대한 성문 데이터가 확보되면 실제 검사 과정은 대상 구조물의 타격음을 측정하고 이를 성문 데이터와 비교하여 손상의 유무를 판단하는 과정이다. 이때 일반적으로 손상의 정도가 적은 경우 타격음의 차이는 미묘하므로, 타격음의 단순 비교로는 차이점을 발견하기가 어렵다. 그러므로 타격 데이터로부터 타격음의 특성을 표현할 수 있는 데이터를 추출한 뒤, 특성 데이터를 비교함으로써 손상을 판단한다. 기존의 타격 검사법은 숙련된 검사자가 경험을 바탕으로 하여 손상 여부를 판단하였다. 하지만 본 연구에서 제시한 TSA는 인공지능 개념을 도입하여, 숙련되지 않은 검사자라 할지라도 신뢰성 있는 검사를 수행할 수 있다.

3. 타격음 비교에 의한 손상 판단 기법

타격음 데이터의 단순 비교를 통해서는 차이점을 발견하기가 쉽지 않으므로 타격음의 특징을 표현할 수 있는 특성 데이터를 추출하는 기법이 필요하다. 효과적인 특성 데이터는 타격음의 특성을 잘 반영하면서, 비교 과정에서 다루기 쉽도록 소수의 데이터로 이뤄져야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 신호처리 분야에서 신호 압축에 사용되고 있는 방법 중의 하나인 wavelet packet transform[5]을 이용한 특성 추출법을 이용하였다. 특성 추출은 소수의 데이터로 원래 데이터를 표현한다는 측면에서 신호압축과 유사한 과정이라고 할 수 있다. Wavelet packet transform을 이용할 경우 basis wavelet의 선택과 분해 단계수에 따라 추출되는 특성 데이터의 개수와 집약도를 조절할 수 있는 장점이 있다. Wavelet packet transform을 수행한 뒤 계산된 각 packet의 계수를 이용하여 각 packet의 에너지를 계산하

여 특성 배열(feature array)을 구성한다. Packet의 에너지는 다음과 같이 정의된다[6].

$$E_j^i = \sum_k P_{jk}^i \tag{1}$$

여기서, E_j^i 는 i-레벨의 j번째 packet의 에너지를 나타내고, P_{jk}^i 는 i-레벨의 j번째 packet의 계수를 나타내며, j는 각 packet의 계수의 개수를 나타낸다. 계산된 특성 배열은 norm이 1이 되도록 정규화 과정을 거치고 정규화된 특성 배열을 특성 벡터라고 정의한다. 이때 건강한 구조물의 타격음에 대한 특성 벡터를 성문 데이터로 정의하고, 대상 구조물에 대한 검사를 수행할 때 손상 판단을 위한 기준 데이터로 이용한다.

건강한 구조물의 타격음 특성 벡터(성문)와 검사 대상 구조물의 타격음 특성 벡터를 이용하여 손상의 여부를 판단하는 과정으로서, 두 특성 벡터의 내적을 취하고 이를 특성 지수로 정의한다. 특성 지수는 0에서 1사이의 실수로서 1에 가까울수록 두 벡터가 유사하므로 손상이 없다고 판단한다. 반면 1보다 작아질수록 두 벡터가 차이를 보이므로 손상이 있다고 판단한다. 본 연구에서 제시하는 손상 판단 기법은 특성 지수를 도입함으로써 손상의 유무를 하나의 실수로 정량적으로 판단할 수 있다. 그러므로 기존의 타격 검사시에 검사자의 경험을 통해 손상의 유무를 판단하는 방법과 달리 컴퓨터 등의 디지털 시스템을 이용하여 판단할 수 있는 일종의 인공지능의 구현이 가능하다.

4. 성문 데이터의 획득 방법

4.1 실험적인 방법을 이용한 성문 획득

대상 구조물이 양산품이어서 충분한 샘플을 확보할 수 있고, 제작상의 반복적인 초기 손상의 가능성이 배제되어 건전성이 보장될 경우, 실험적인 방법을 이용하여 성문 데이터를 확보할 수 있다. 건강한 구조물에 대해 여러 군데의 검사점을 미리 설정하고, 타격장치와 신호처리 장치를 이용하여 타격음을 측정한다. 이때 타격속도가 너무 강하면 구조물에 손상을 유발시킬 수 있고, 너무 약하면 구조물이 제대로 가진되지 않을 수 있다. 따라서, 대상 구조물의 횡방향 탄성력과 강성을 고려한 타격속도를 정하고, 이를 이용하여 타격음을 측정한다. 측정된 타격음은 3장에서 설명된 특성벡터 추출과정을 거쳐서 성문 데이터로 저장된다.

4.2 수치해석을 이용한 성문 획득

대상 구조물이 양산품이 아닐 경우, 그리고 좀 더 객관

적인 성분 데이터가 필요할 경우 수치해석을 이용하여 성분 데이터를 획득한다. 타격음 발생과정은 타격과정의 모사, 타격에 의한 구조 진동의 모사 그리고 구조물의 진동에 의해 발생하는 타격음의 모사 등으로 나눌 수 있다.

4.2.1 타격과정의 모사

타격과정은 구조물에 대한 타격체의 충격 문제로 모사할 수 있다. 일반적으로 충격 문제는 구조물에 가해지는 하중이 충격체와 구조물의 접촉에 의해 전달되기 때문에 많은 어려움을 내포하고 있다. 충격 문제의 해결 과정에서 가장 중요한 부분은 정확한 충격력을 계산하는 것이므로 본 연구에서는 동적 접촉 알고리즘을 고려한 유한요소법을 이용하여 타격체와 구조물의 충격 과정을 모사하였다[7]. 구조물의 진동 거동을 모사하기 위해 동적 거동을 고려한 유한요소법을 이용하여 다음과 같은 공간 이산화된 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{m}\mathbf{a} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{m} 은 질량 행렬, \mathbf{k} 는 강성 행렬, \mathbf{a} 와 \mathbf{u} 는 각각 절점 가속도 벡터와 변위 벡터 그리고 \mathbf{f} 는 외력 벡터이다. 다른 외력이 없을 경우 \mathbf{f} 는 충격체에 의해 구조물 표면에 전달되는 충격력이다.

식 (2)로 표현되는 구조물의 동적 거동 지배방정식에 대한 시간적분을 통해 구조물의 진동 거동의 시간 이력을 구할 수 있다. 시간적분 방법으로는 중앙차분법(central difference method)[8]을 이용하였다. 중앙차분법은 조건적 안정성을 가지는 시간적분법이므로 해의 수렴성을 위해 시간 스텝의 제한이 있지만, 연립방정식을 풀 필요가 없으므로 계산속도가 빠른 장점을 가지고 있다. 중앙차분법은 절점 가속도와 속도 그리고 변위에 대해 다음과 같은 가정으로 출발한다.

$$\mathbf{a}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(\mathbf{u}_{n+1} - 2\mathbf{u}_n + \mathbf{u}_{n-1}) \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_n = \frac{1}{2\Delta t}(\mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_{n-1}) \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 하절자 $n-1$, n , $n+1$ 은 각각 시간 $(t-\Delta t)$, t , $(t+\Delta t)$ 에서의 물리량을 나타낸다. 시간 적분법을 적용하기 위해 식 (2)를 이용하여 시간 t 에서의 동적평형방정식을 고려하고 식 (3)와 식 (4)를 대입하면 최종적으로 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{m}\right)\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{f}_n - \left(\mathbf{k} - \frac{2}{\Delta t^2}\mathbf{m}\right)\mathbf{u}_n - \left(\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{m}\right)\mathbf{u}_{n-1} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 시간 t 와 $(t-\Delta t)$ 에서의 변위값으로부터 시간 $(t+\Delta t)$ 에서의 변위를 구할 수 있다. 타격체에 의한 타격력 (\mathbf{f}_n)을 외력으로 고려하기 위해 구조물의 동적 거동 지배방정식과 동적 접촉 알고리즘을 연계한 수치해석 기법을 이용하였다 식 (5)에서 외력 \mathbf{f}_n 는 시간 $(t-\Delta t)$ 에서의 구조물과 타격체의 상대 거리로부터 외부벌칙 함수법을 이용하여 구할 수 있다.

4.2.2 타격음의 계산

진동하는 구조물 표면에서 방사되는 음향은 다음과 같은 Helmholtz 방정식으로 기술된다[9].

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad \text{in } \Omega(x) \quad (6)$$

여기서, $k = \omega/c$ 는 wave number 이다. 또한 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial n_s} = -\rho_0 \dot{v}_n \quad \text{on } \partial\Omega(x) \quad (7)$$

식 (6)에 대한 수치적 해법으로서 유한요소법이나 경계요소법이 사용되고 있다. 하지만 무한 영역을 다룰 수 있고 경계에서의 요소만을 이용하여 음장을 해석할 수 있다는 장점에 의해 경계요소법이 많이 사용되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 타격음의 계산을 위해 경계요소법을 이용하였다.

경계요소법의 적용을 위해 다음과 같은 fundamental solution을 도입하였다.

$$\nabla^2 p^* + k^2 p^* = \delta(x - x_s) \quad (8)$$

$$p^*(x, x_s) = -\frac{\exp(-jk|x - x_s|)}{4\pi|x - x_s|} \quad (9)$$

위의 fundamental solution을 이용하여 다음의 적분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} (p \nabla_s^2 p^* - p^* \nabla_s^2 p) dV = -\int_{\partial\Omega} \left[p \frac{\partial p^*}{\partial n_s} - p^* \frac{\partial p}{\partial n_s} \right] dS \quad (10)$$

그리고

$$\alpha p(x) = \int_{\partial\Omega} \left[p^* \frac{\partial p}{\partial n_s} - p \frac{\partial p^*}{\partial n_s} \right] dS(x_s) \quad (11)$$

여기서,

$$\alpha = \int_{\Omega} p \delta(x - x_s) dV \quad (12)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & x \in \Omega \\ 1/2 & x \in \partial\Omega \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

경계요소법을 이용하여 다음과 같은 경계면 $\partial\Omega$ 에서의 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$[A]\{P\} = [B] \left\{ \frac{\partial P}{\partial n} \right\} \quad (14)$$

$$\left\{ \frac{\partial P}{\partial n} \right\} = -\rho j \omega \{V_n\} = \rho \omega^2 \{U_n\} \quad (15)$$

여기서, $\{V_n\}$ 과 $\{U_n\}$ 는 각각 주파수 영역에서 표현된 구조물 표면에 대한 공기의 수직 속도와 수직 변위이고 최종적으로 다음의 관계를 얻을 수 있다.

Table 1 USN125BX의 물성치

| | |
|------------|------------|
| 두께 | 0.122 mm |
| E_1 | 137.85 GPa |
| E_2 | 9.83 GPa |
| ν_{12} | 0.295 |
| G_{12} | 5.6 GPa |
| G_{23} | 2.8 GPa |

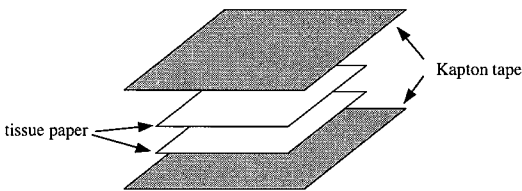


Fig. 2 층간분리를 위한 삽입체.

$$[A]\{P\} = [C]\{U_n\} \quad (16)$$

식 (16)으로부터 구조물 표면의 변위 값 입력 $\{U_n\}$ 을 이용하여 구조물 표면에서의 음압 $\{P\}$ 을 구할 수 있다. 구조물 표면에서의 음압 $\{P\}$ 를 이용하여 식 (11)로부터 타격음 측정지점에서의 음압(P)을 구할 수 있다.

$$P = \{A\}^T \{P\} + \{C\}^T \{U_n\} \quad (17)$$

식 (17)로부터 계산된 주파수 영역의 타격음을 푸리에 역변환을 통해 시간영역으로 변환하여 타격음 데이터를 획득한다.

5. TSA의 실험적 검증

TSA의 성능을 검증하기 위해 간단한 대상 구조물에 대한 실험을 수행하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 성문 데이터를 획득하는 방법 중 실험적인 방법을 이용하여 성문 데이터를 획득하였다. 기존의 타격력을 이용하는 방법과의 비교를 위해 타격음과 함께 타격력을 측정하였다.

5.1 시편 제작

실험적 검증을 위해 건강한 구조물과 손상이 있는 구조물에 대한 시편을 제작하였다. SK 케미컬의 USN125BX 프리프레그(Table 1)를 적층하고 hot press를 이용하여 판 형태의 실험 시편을 제작하였다. 복합재료 평판은 크기가 15 cm×15 cm이고 적층각은 $[0^\circ/90^\circ_3]$ 이다.

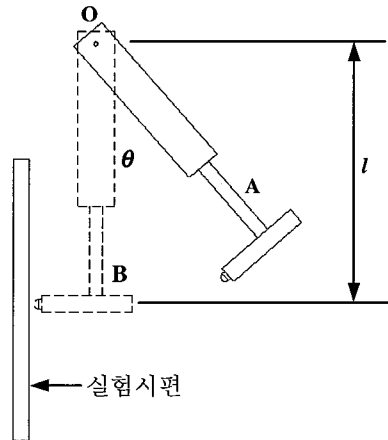


Fig. 3 타격장치 원리.

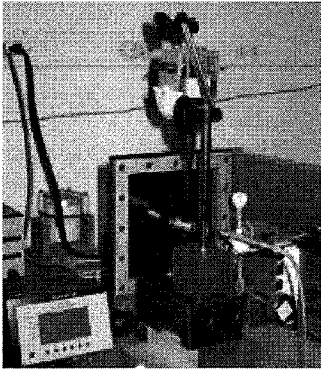


Fig. 4 Experimental setup.

본 연구에서는 구조물 내부의 손상으로서 층간분리 손상을 가정하였다. 손상된 구조물에 층간분리 손상을 만들기 위해서 tissue paper를 Kapton tape으로 둘러싸서 만든 삽입물(Fig. 2)을 층간분리 영역에 삽입한 뒤 성형하였다. 층간 분리 영역은 구조물의 가운데 부분으로 가정하였으며 층간 분리 영역의 크기는 $4.5\text{ cm} \times 4.5\text{ cm}$ 이다.

5.2 타격장치의 구성과 실험 장치

실험시편에 타격력을 가하는 장치를 구성하였다. Fig. 3과 같이 타격망치(PCB 086B01)를 이용하여 진자 형태의 타격장치를 구성하였다. 중력의 영향을 최소화하기 위해 실험시편을 지면과 수직이 되게 하였다. 초기 위치 A에서 출발한 타격장치가 시편과 부딪히는 B를 지날 때의 속도는 $v = \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)}$ 로 표현된다. 타격장치의 유효 질량은 0.0914 kg 이며 타격장치의 회전팔의 길이는 $l = 0.198\text{ m}$ 이다. 타격체에 의해 시편에 가해지는 타격력은 타격망치에 장착된 힘 변환기를 이용하여 측정하였다. 타격에 의해 발생하는 타격음은 시편의 중앙부에서 10 cm 떨어진 지점에 위치한 마이크로폰(B&K4189)를 이용하여 측정하였다.

Fig. 4에 구성된 전체 실험장치를 나타내었다. 손상 탐지 검사를 위한 검사점으로서 Fig. 5에 나타나 있는 것과 같이 다섯 군데의 검사점을 설정하였다. 검사점 1과 2는 손상영역 내에 위치하고 있으며, 검사점 3은 손상영역의 경계, 그리고 검사점 4와 5는 손상영역 바깥에 위치하도록 하였다.

5.3 접촉 하중 이력을 이용한 손상 검사

기존의 타격 검사법에서 사용하는 방법인 접촉 하중의 시간 이력 데이터를 이용한 손상 판단에 대해 고찰하였다. 타격 실험을 수행하여 건강한 구조물과 손상이 있는 구조물의 타격력 시간이력을 비교하였다. Fig. 5에 표시된 검

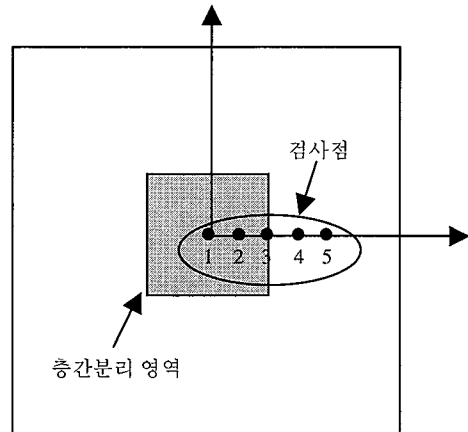


Fig. 5 층간분리 영역과 검사점 위치.

사점에 대해 타격 실험을 수행하였으며, 접촉하중 측정시에 사용한 타격체의 타격속도는 0.243 m/s (Fig. 3에서 $\theta = 10^\circ$)이다. Fig. 6에 다섯 개의 검사점에 대한 접촉 하중 이력 곡선을 나타내었다. 구조물 내부에 손상이 발생하면 국소적으로 구조물의 강성이 저하되는 효과가 나타난다. 이때 타격체와 구조물간의 타격력은 손상에 의한 강성 저하 특성이 반영되게 되는데, 일반적으로 강성이 저하될 경우 접촉지속 시간이 증가하고, 접촉 하중의 최대값이 감소되는 현상이 나타난다.

손상된 영역을 타격하는 경우(검사점 1, 2), 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, 4, 5) 뚜렷한 변화가 나타나지 않는다. 손상영역에 직접 타격이 가해질 경우 손상에 의한 타격력의 변화를 통해 손상 여부를 판단할 수 있지만, 손상이 없는 영역을 타격할 경우 타격부위 이외에 존재하는 손상을 탐지할 수 없다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 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 점에서 장점이 될 수도 있다. 하지만, 검사 대상 구조물의 크기가 크거나 또는 검사면이 넓을 경우, 많은 횟수의 검사가 필요하다는 단점이 될 수도 있다.

5.4 타격음을 이용한 손상 검사

본 연구에서 제안하는 TSA를 이용하여 손상 판단 실험을 수행하였다. 시각적 비교를 위해 손상이 없는 구조물과 손상이

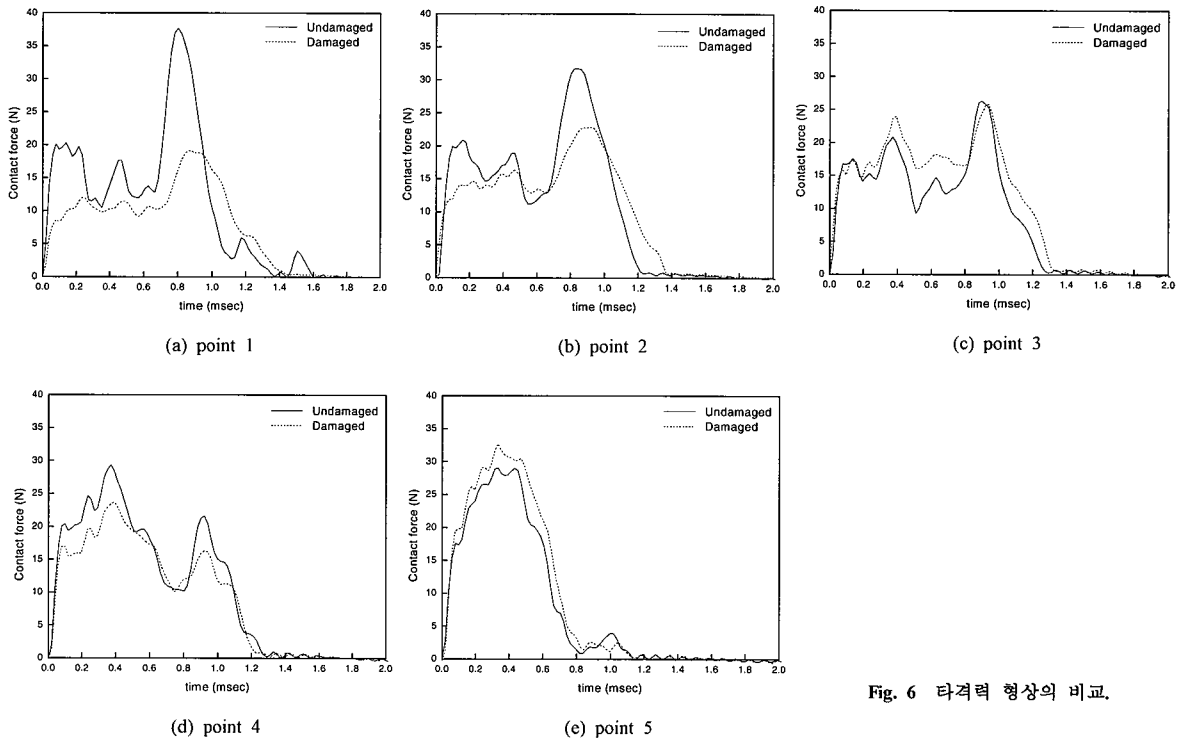


Fig. 6 타격력 형상의 비교.

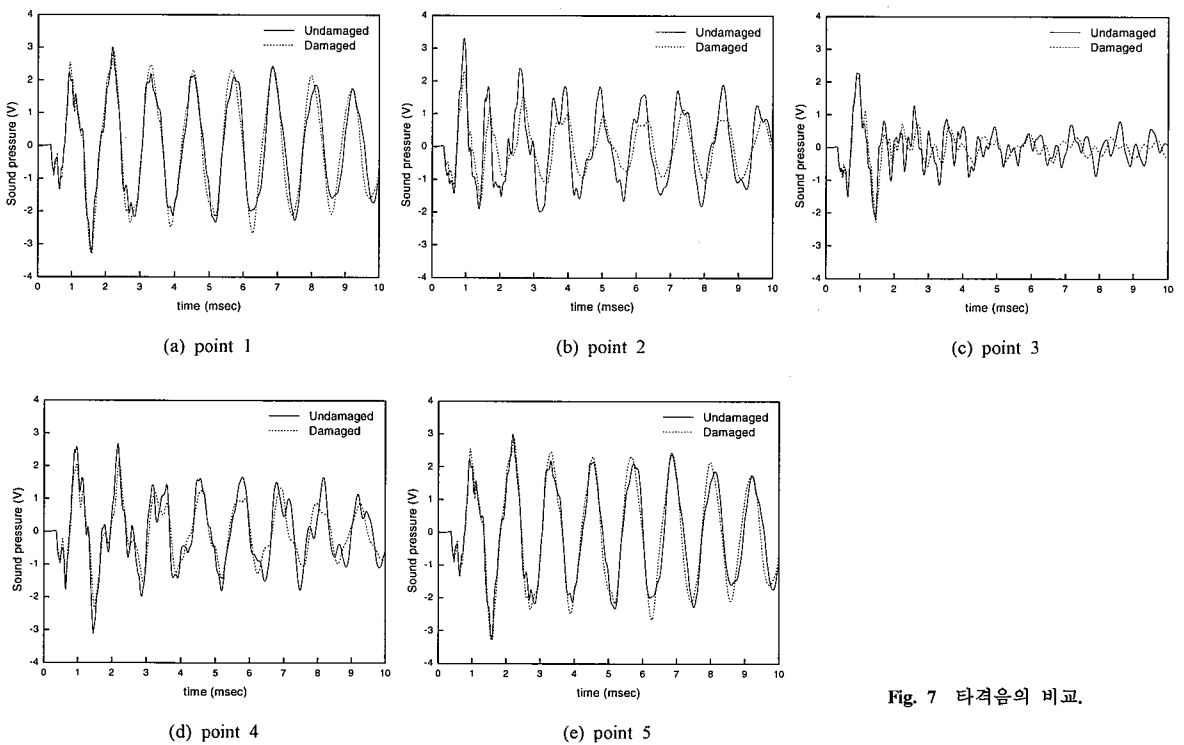


Fig. 7 타격음의 비교.

있는 구조물의 각 검사점에서의 타격음을 Fig. 7에 비교하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 타격음을 이용한 손상 판단의 결과는 성분(soundprint)데이터의 객관성과 정확성이 무엇보다도 중요하다. 객관적인 데이터라 함은 성분 데이터를 확보할 때 사용된 구조물의 건전성이 보장되어야 한다는 것이다. 하지만 건전성이 보장된다고 하더라도 성분 데이터를 획득하는 과정과 대상 구조물에 대한 타격음을 획득하는 과정이 다르다면 검사의 신뢰성을 확보할 수 없다. 따라서 타격음을 이용한 손상 판단에 앞서 실험적인 방법에 의한 성분 데이터의 획득 과정의 객관성을 확인하였다. 타격음에 영향을 미칠 수 있는 요소로서 타격체 질량의 변화와 타격 속도의 변화를 들 수 있다. 이때 검사 장비의 손상이 없는 한 질량은 변함이 없다고 할 수 있다. 반면, 타격 속도는 실제 검사과정에서 어느 정도 변화의 가능성이 있다고 할 수 있다. 실제로 망치 형태의 검사장비를 사용할 경우, 검사 과정에서 검사자가 성분 데이터를 획득하는 과정에서 사용된 타격속도를 정확히 구현하기가 매우 어려울 것이다. 따라서 본 연구에서는 타격 속도의 변화에 따른 성분 데이터의 민감도에 대해 살펴 보았다. 민감도 해석을 위해 타격 속도가 $0.243\text{m/s}(\theta=10^\circ)$, $0.484\text{m/s}(\theta=20^\circ)$ 일 때의 타격음을 측정하여 서로 비교하였다. 측정된 타격음 데이터를 이용하여 3장에서 제시한 절차에 따라 특성 벡터를 구하고, 각 검사점에 대해 타격속도의 변화에 대한 민감도를 살펴 보았다. 앞서 밝힌 바와 같이 특성 벡터는 정규화되어 있으므로 성분 데이터와 타격 속도가 선형관계를 나타낸다면, 두 종류의 타격 속도에 대한 특성 벡터는 일치할 것이다. Table 2에 서로 다른 타격 속도에 대해 타격음을 측정하고 특성 벡터를 구한 뒤, 특성 지수를 계산하여

Table 2 타격음의 객관성 확인

| test point | (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 |

Table 3 TSA에 의한 손상 탐지 결과

| test point | (h1,d1) | (h1,d2) |
|------------|---------|---------|
| 1 | 0.7113 | 0.7394 |
| 2 | 0.8503 | 0.8165 |
| 3 | 0.8419 | 0.8369 |
| 4 | 0.9684 | 0.9766 |
| 5 | 0.9633 | 0.9647 |

표시하였다. h와 d는 각각 건강한 구조물과 손상이 있는 구조물의 특성 벡터를 나타내고, 1과 2는 각각 타격속도 0.243 m/s 와 0.484 m/s 의 경우를 나타낸다. 그리고 (a,b)는 특성 벡터 a와 b에 대한 특성 지수를 나타낸다. 특성 벡터는 정규화되어 있으므로, 두 개의 특성 벡터가 일치하면 특성 지수의 값은 1이고, 일치하지 않으면 1보다 작은 값이 된다. Table 2에서 대부분의 특성 지수 값이 1에 근접한 값을 나타내고 있으며, 이를 통해 비교적 작은 타격속도의 변화에 성분 데이터가 변하지 않는 객관성을 나타낼 수 있다. 즉, 검사자가 실제 검사시에 성분 데이터를 획득하는 과정에서 사용된 타격 속도와 다른 타격 속도로 검사를 수행할지라도, 타격 속도의 차이가 그리 크지 않을 경우 타격속도의 변화에 따른 검사결과의 변화는 그리 크지 않을 것이다.

성분 데이터의 객관성을 바탕으로 본 연구에서 제작한 구조물에 대해 TSA를 이용하여 손상 검사를 수행하였다. 손상 판단 과정에서는 타격 속도가 0.243 m/s 인 경우의 타격음 데이터를 성분 데이터로 이용하였다. 두 종류의 타격속도를 이용하여 손상된 구조물의 타격음을 측정된 뒤, 특성지수를 계산하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보는 바와 같이 손상 영역 내에 있는 검사점(검사점 1, 2)의 경우, 특성 지수가 0.85 이하의 값을 나타내고 있다. 특성 지수가 1보다 작은 값을 나타내므로 검사 대상 구조물 내에 손상이 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 또한 손상 영역과 손상이 없는 영역의 경계영역에 위치한 검사점(검사점 3)의 경우, 특성지수가 0.84 이하의 작은 값을 나타내므로 손상이 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 여기서 타격력 형상을 나타낸 Fig. 6을 살펴보면, 타격력을 이용한 방법의 경우 손상 영역 내의 검사점(Fig. 6-(a),(b))에서는 타격력의 형상에 많은 차이를 보이지만, 경계영역(Fig. 6-(c))에서는 건강한 구조물과 손상이 있는 구조물의 타격력의 차이가 뚜렷하지 않은 것을 알 수 있다. 더욱이, 타격력 형상의 차이가 거의 없는 검사점 4, 5의 경우에도(Fig. 6-(d),(e)) 타격음을 이용하는 방법은 손상이 없는 영역에 대한 검사 결과, 특성 지수의 소수점 두번째 자리 정도의 정확도를 가지고서 손상의 유무를 어느 정도는 파악할 수 있다. 이러한 특성은 앞서 설명한 접촉하중 이력을 이용하는 방법과 비교하였을 때 장점으로 부각될 수 있다. 하지만 타격력을 이용하는 방법이 검사 특성의 국소화로 인해 손상의 위치를 파악할 수 있는 것과는 달리 TSA를 이용하여 정확한 손상영역을 예측하는 것은 현재까지는 약간의 어려움이 있다

6. 결론

본 연구에서는 타격음을 이용하여 구조물 내부의 손상을 탐지하는 비파괴 검사법인 TSA를 개발하였다. 비파괴

검사법으로서의 가능성을 확인하기 위해 구조물 내부의 층간 분리 손상을 탐지하는 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 TSA가 구조물 내부의 손상을 탐지할 수 있다는 근거를 제시하였다. 손상 판단 과정에서 도입된 특성 지수를 이용하여 손상의 여부를 하나의 지수로서 표현할 수 있었다. 이를 이용하여 검사자의 경험에 전적으로 의존할 수 밖에 없었던 손상 판단 과정을 인공지능의 개념을 도입하여 기계적으로 판단할 수 있도록 하였다. 타격음을 이용하여 손상 여부를 판단하는 검사법인 TSA는 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.

후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업 (과제번호 00-N-NL-01-C-26)에 의해 지원되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

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) 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.
- 4) Pfund., B, Special Projects LLC, *Smart Hammer System*, 7 Windover Turn, Windover, RI 02891-4070.
- 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.
- 6) 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.

- 7) 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.
- 8) K. J. Bathe, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- 9) H. Kane, James, *Boundary Element Analysis in Engineering Continuum Mechanics*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.