

# 복합재료 구조물의 태핑 검사시 접촉시간의 수치 모사

황준석\* · 김승조\*\*

## Numerical Simulation of Contact Duration in the Tapping Test of the Composite Structure

Joon Seok Hwang and Seung Jo Kim

### ABSTRACT

태핑 검사법을 이용한 복합재료 구조물의 손상검사 과정을 수치해석을 이용하여 모사하였다. 타격체에 의한 태핑을 모사하기 위해 동적접촉 알고리즘을 이용한 유한요소법을 이용하였다. 손상의 유무를 판별하는데 사용되는 적도로서 타격체와 구조물의 접촉하중의 시간이력을 계산하였다. 손상이 없는 복합재료 평판과 층간 분리 손상이 있는 복합재료 평판에 대한 해석을 통하여 접촉특성의 변화를 고찰하였다. 또한 태핑 검사법의 민감도에 대한 해석도 수행하였다.

### 1. 서 론

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 방법등을 들 수 있다. 하지만 이와 같은 방법은 번거롭고 많은 비용이 든다.

한편, 숙련된 검사자들은 동전이나 타격망치등을 이용하여 구조물을 두드렸을 때의 구조물의 반응을 살펴보는 태핑 테스트를 이용하여 구조물의 내부손상을 파악한다. 태핑 테스트를 이용해서 구조물을 검사할 때 손상의 유무를 알려주는 지표로서 많이 사용하고 있는 것은 타격체와 구조물간의 접촉력의 시간이력과 타격시에 발생하는 타격음등

이다. Cawley는 접촉력의 시간이력을 이용하여 구조물의 손상을 파악하는 방법의 성능과 민감도에 대해 연구한 바 있다.[1] Cawley에 의하면 얇은 구조물의 경우 접촉시간이나 접촉력의 크기 등의 지표를 이용하여 구조물의 손상여부를 알아낼 수 있다고 밝히고 있다. 또한 Hsu는 실제 항공기 구조물의 여러 점에서의 접촉시간을 측정하여 구조물 내부의 이상을 진단하는 연구를 수행한 바 있다. [2]

본 연구에서는 기존의 연구를 바탕으로 태핑테스트를 이용하여 복합재료 구조물의 손상탐지 과정을 수치해석을 이용하여 모사하였다. 타격체에 의한 태핑을 충격문제로 모사하고 접촉 알고리즘을 이용한 유한요소법을 이용하여 충격 문제를 풀었다. 손상의 유무를 판별하는 지표로는 타격체와 구조물의 접촉시간을 이용하였다. 손상이 없는 복합재료 평판과 층간 분리 손상이 있는 복합재료 평판의 접촉시간을 계산하고 비교하였다.

### 2. 태핑 테스트를 이용한 구조물 검사법

구조물에 손상이 발생하면 외란에 의한 구조물의 거동에 변화가 생기게 된다. 손상에 의해 강성이 국소적으로 저하되면 구조물의 고유진동수가 바뀌거나 국소 진동이 발생하게 된다. 태핑 테스트는 이와 같은 구조물의 특성을 이용하여 손상을 검출하는 방법이다.

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

일반적으로 많이 사용되는 태핑 테스트는 접촉하중의 특성의 변화를 이용하는 방법과 타격음을 이용하는 방법이다. 구조물 내부에 손상이 발생하면 강성이 지하되고 지하된 강성으로 인해 구조물의 접촉특성이 변화하게 된다. 이와 같은 접촉특성의 변화는 접촉하중의 시간이력 형상의 변화를 가져온다. 이때 손상을 판단하는 지표로서 사용되는 것이 접촉시간이다.[2] 손상이 발생하면 강성이 감소되므로 접촉시간은 건강한 구조물에 비해 길어지게 된다. 이와 같은 특성을 이용하여 구조물의 여러 부위를 타격하고 접촉시간을 측정함으로써 구조물의 손상 유무를 판단한다. 접촉시간만으로 판단하는 방법은 간단한 방법이기 는 하나 실제 구조물의 구조가 복잡하거나 구조물의 표면이 부식등의 이유로 손상되어 있을 경우에는 효과적이지 못하므로 단독으로 사용되기에는 한계가 있다.[3] 그리므로 이와 함께 사용되는 방법으로는 구조물을 타격했을 때 발생하는 타격음을 이용하여 구조물의 손상의 유무를 판단하는 방법이다.[4] 이 방법은 건강한 구조물을 타격했을 때의 타격음에서 특성을 추출하여 데이터 베이스화 한 뒤 손상의 의심되는 구조물의 타격음의 특성과 비교하여 손상의 유무를 판단하는 방법이다.

### 3. 타격의 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[5].

본 연구에서는 정확한 충격특성의 계산을 위해 동적 접촉을 이용하여 충격을 모사하였다. 상용프로그램인 LS-DYNA 3D를 이용하여 구조물의 타격을 동적접촉 알고리즘을 이용한 충격문제로 모사하였다.

### 4. 복합재료 구조물의 손상 특성

복합재료의 손상의 종류는 섬유절단, 기지균열, 층간분리 등의 세가지로 크게 나눌 수 있다. 이 가운데 층간분리는 복합재료 구조물의 독특한 손상 특성이다. 복합재료 구조물에 층간 분리가 발생하면 구조물의 고유 진동수와 감쇠 계수가 변화한다. 또한 압축하중에 의해 층간 분리영역은 더욱 벌어지게 되므로 구조물의 안정성을 크게 해치

게 된다. 본 연구에서는 복합재료의 손상 특성중에서 층간분리를 고려하였다.

## 5. 수치 해석 및 결과

### 유한요소 모델

크기가 150x150x2.5mm 이고  $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]$ 의 적층각을 갖는 단순지지된 복합재료 적층판을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 8 절점 고체요소를 사용하였으며, 각 층마다 하나의 요소를 사용하였고, 각 층은 40x40의 요소로 모델링하였다. 사용된 총 요소수는 6400 (40x40x4)개이다. 층간분리는 층 두께의 5%의 간극으로 모델링하였다. 층간분리 영역의 형상은 정사각형으로 가정하였고 구조물의 중앙 부분에 발생했다고 가정하였다. 사용된 유한요소 모델과 층간 분리 영역은 Fig. 1과 같다. 타격체는 초기 속도가 1m/s 이고 지름이 1cm 인 알루미늄 강체를 사용하였다. 정확한 구조물의 거동을 얻기 위해 타격체와의 접촉뿐만 아니라 층간분리가 있을 경우 층간분리 영역에서의 구조물의 내부 접촉 또한 고려하였다.

### 손상에 의한 접촉특성의 변화

복합재료 구조물에 손상이 존재할 경우 구조물의 강성에 변화가 생기므로 구조물의 특성은 변화게 된다. 손상으로 인해 구조물의 강성이 지하되면 접촉하중의 크기는 감소하고 접촉시간은 증가한다. Fig. 2에 손상이 없는 복합재료 평판의 구조물의 중앙을 타격했을 때와 45°층과 -45°층 사이에 Fig. 1과 같은 크기의 층간분리가 존재하는 구조물의 중앙을 타격했을 때의 접촉하중의 이력을 표시하였다. 그림에서 보듯이 손상이 존재하면 접촉하중의 크기가 감소하고 접촉 시간이 증가함을 알 수 있다. 즉, 이러한 접촉특성의 변화를 이용하여 구조물의 내부의 손상의 유무를 판단할 수 있다.

### 손상의 두께방향 위치에 따른 접촉특성의 변화

손상이 0°층과 45°층 사이(Case 1), 45°층과 -45°층 사이(Case 2) 그리고 -45°층과 0°층 사이(Case 3)의 경계면에 존재할 경우의 각각의 접촉하중의 시간이력을 계산하여 Fig. 3에 표시하였다. 손상이 존재하면 건강한 구조물에 비해 접촉시간이 증가하고 검사면과 손상부위의 거리가 가까울수록 접촉시간이 증가함을 알 수 있다. 특히 각각의 Case의 형상을 비교해 보면 접촉하중 이력의 형상이 많은 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한

접촉하중 이력 형상의 차이를 고찰하면 손상의 두께방향 위치를 파악할 수 있다.

### 태핑 테스트의 국소화 특성의 고찰

손상을 검출할 때 손상의 위치를 판단하는 것은 매우 중요한 사항이다. 층간분리 손상이 있는 복합재료 평판에 Fig. 4와 같은 타격점을 이용한 태핑 테스트의 결과를 Fig. 5에 표시하였다. 그림에서 보듯이 손상이 있는 구조물의 손상이 없는 부분의 결과는 손상이 없는 구조물의 같은 점에 대한 결과와 동일하고 손상이 발생한 영역에서만 접촉특성이 변화함을 알 수 있다.

### 태핑 테스트의 민감도 고찰

복합재료 구조물의 표면에서부터 층간 분리 손상이 발생한 지점까지의 거리에 대한 민감도에 대한 고찰을 수행하였다. 민감도를 살펴보기 위해  $[0^\circ_3/45^\circ_3/45^\circ_3/0^\circ_3]$ 의 복합재료 평판과  $[0^\circ_{10}/45^\circ_{10}/45^\circ_{10}/0^\circ_{10}]$ 의 비교적 두꺼운 복합재료 평판에 대한 해석을 수행하였다. 각각의 경우에 건강한 구조물의 경우와 검사면과 반대쪽 경계면 (-45°층과 0°층 사이)에 층간분리 손상이 존재할 경우에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 6과 Fig. 7에 각각 두 경우에 대한 접촉력의 시간 이력을 표시하였다. 비교적 두께가 얇은 구조물의 경우(Fig. 6), 손상이 검사면과 거리가 떨어져있어도 접촉시간과 접촉하중의 크기가 구분할 수 있을 만큼의 차이를 나타낸다. 하지만 두께가 상대적으로 두꺼운 구조물의 경우(Fig. 7), 손상의 위치가 검사면과 멀리 떨어져있으면 접촉하중의 시간 이력을 이용한 손상 검사법이 분별력이 떨어진다. 그러므로 태핑 테스트는 두께가 두꺼운 구조물의 경우는 손상된 영역이 검사면과 거리가 멀수록 민감도가 떨어짐을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 태핑 테스트를 이용하여 복합재료 구조물의 손상 검사과정을 수치해석을 이용하여 모사하였다. 타격체에 의한 태핑과정을 충격문제 모사하였다. 충격문제의 해석을 위해 동적접촉 알고리즘을 고려하는 유한요소해석을 이용하였다. 복합재료 평판의 3차원 모델을 이용한 수치해석을 이용하여 손상이 있는 구조물과 손상이 없는 구조물에 대한 접촉하중의 시간이력을 계산하고 이를 이용하여 손상을 판단하였다. 손상이 있을 경우 접촉하중의 시간이력에서 접촉시간은 증가하

고 접촉하중의 크기는 감소하는 특성을 이용하여 복합재료 구조물의 손상을 검사할 수 있다. 하지만 태핑 테스트의 민감도 해석 결과 두꺼운 구조물에서는 효과적으로 사용하기에 제한이 있다. 이를 보완하기 위해 타격시 발생하는 타격음을 분석하는 방법을 함께 사용하여 한 번의 타격시 접촉하중의 시간이력과 타격음을 동시에 분석하여 구조물의 손상을 판별하는 방법에 대한 연구가 진행 중이다.

## 후기

본 연구는 국가지정연구실사업에 의해 지원되었습니다. (과제번호 : 00-N-NL-01-C-026)

## 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. and Peters, J.J., "Nondestructive Evaluation of Repairs on Aircraft Composite Structures", 6th Annual Int'l Symp. on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, 2001
- [3] Pfund., B, *Special Projects LLC, Smart Hammer System*, 7 Windover Turn, Windover, RI 02891-4070
- [4] Kim, S.J. and Hwang, J.S., "New Nondestructive Evaluation Method of Laminated Composite Structures by Tapping Sound Analysis", 6th Annual Int'l Symp. on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, 2001
- [5] 구 남서, *지속충격 시 복합재료 구조물의 동적 거동 및 손상예측에 관한 연구* 서울대 대학원 박사학위 논문, 1996

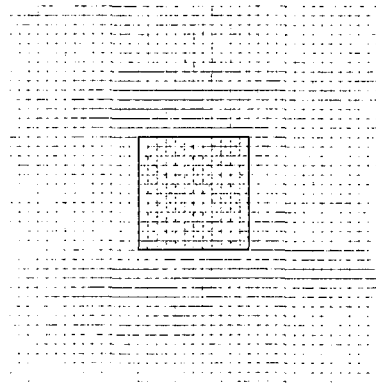


Fig. 1 유한요소 모델과 층간분리 영역

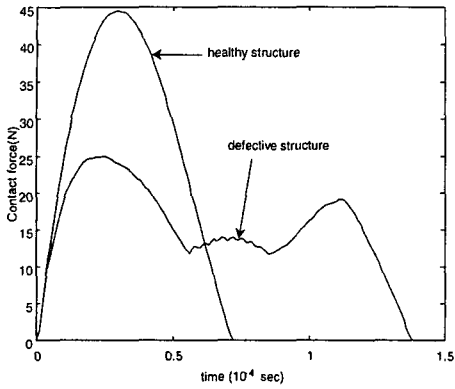


Fig. 2 접촉하중 이력의 비교

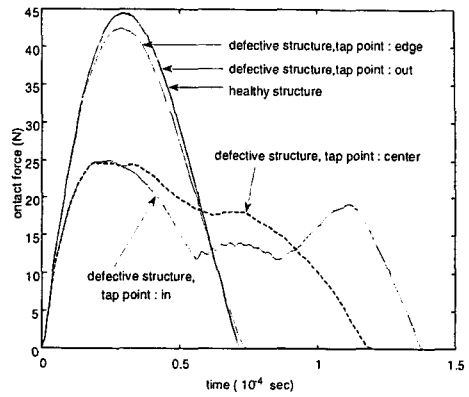


Fig. 5 테핑 테스트의 국소화 특성의 고찰

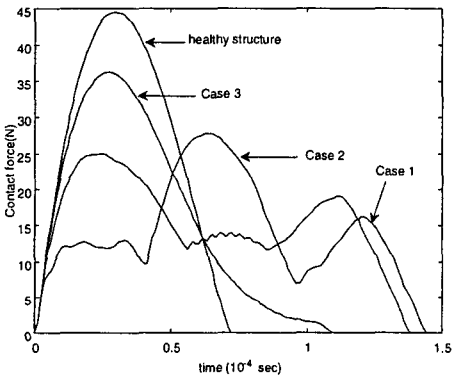


Fig. 3 손상의 두께 방향 위치에 따른 변화

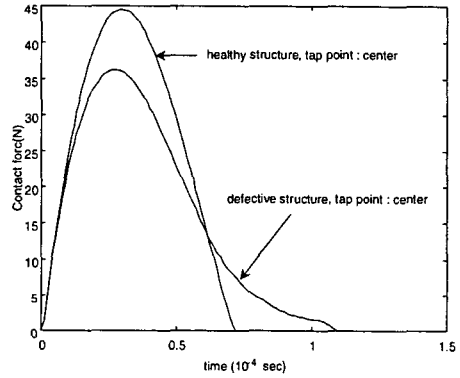


Fig. 6 얇은 구조물의 민감도 해석

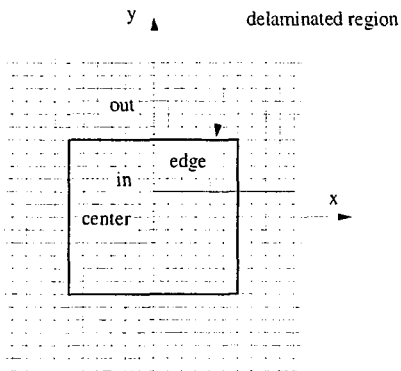


Fig. 4 타격점의 위치

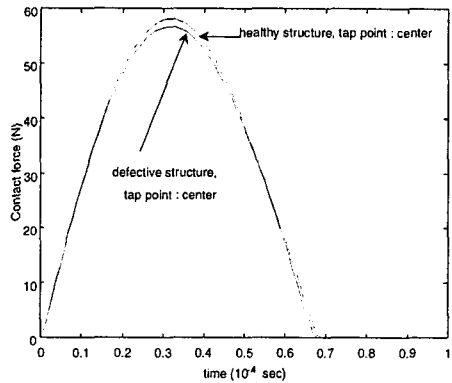


Fig. 7 두꺼운 구조물의 민감도 해석