

복합재료의 내부손상 평가

이재준(국민대 자동차공학대학원), 김태우(국민대), 김찬욱(국민대 자동차공학대학원)

Evaluation of Composite Material Damage

J. J. Lee(Graduate School of Automotive Eng. KMU), T. W. Kim(KMU), C. M. Kim(KMU)

ABSTRACT

Composite materials, when damaged under thermal or mechanical loadings, show property changes. Among many mechanical properties of composite materials, the stiffness tend to be reduced due to micro-cracking, debonding, or delamination caused by external loadings. This research presents results regarding the detecting technique of internal damages within composite that experienced low-velocity impacts. Post-damage evaluations were made experimentally using flexural and compression loadings. Preliminary finite element analysis was made and compared with analytical solutions. The experimental results to determine the degree of damage will be compared with finite element results.

Key Words : Composites (복합재료), Materials(재료), Internal-Damage (손상)

1. 서론

첨단 신소재의 하나인 복합재료는 단순 균질재료에 비해 비강도, 비강성 등의 기계적 성질이 우수하며 특히 역학적, 열적 기능 등을 동시에 만족시켜 재료에 요구되는 특성을 조절함으로써 재료성질을 최적화시킬수 있는 테일러링(tailoring)이 용이하여 그 응용이 날로 확대되어 가는 재료이다. 자동차나 항공기 등의 정밀부품의 설계분야에서도 기존의 금속재료를 복합재료뿐만 아니라 고분자재료, 세라믹재료 등으로 대체하거나 여러 가지 응용방법을 통해 응용범위를 넓혀가고 있다.

이중 특히, 폴리머 기지의 복합재료(PMC)는 비강성, 비강도가 좋아 구조물경량화에 크게 기여함으로써 친환경적인 차량개발 및 고효율의 구조체 설계에 있어 적용분야의 확대가 기대된다[1]. 그러나, 취성기지의 PMC 적층재는 일반적으로 외부충격에 대한 저항성이 금속에 비하여 약한 것으로 알려져 있다. 외부충격이 가해질 경우 복합재료 자체의 강도 저하가 예상되며 이러한 강도의 변화는 재료 내부에서의 층간분리, 모재균열, 섬유강화재파괴

등이 주원인이다[2-3]. 따라서 충격으로 인하여 발생하는 손상정도를 평가하여 설계에 적절히 적용시키는 것이 매우 중요하다.

최근 수년에 걸쳐 이방성 재료의 특성을 응용한 구조물의 주재료로 사용하기 위해 복합재료의 손상을 평가하는 방법이 여러 연구자들에 의해서 다각적으로 수행되어져 왔다. 복합재료에 충격이 가해질 때, 복합재 내부 또는 외부에 발생하는 손상의 정도는 복합재의 강도 또는 강성의 저하로 나타난다. 이러한 원리를 복합재 내의 손상정도 측정에 적용시키는 방법으로 좌굴파손을 야기하는 압축하중, 피로하중, 또는 굽힘하중을 가한 후 복합재의 잔류강도, 또는 강성을 측정하는 방법이 알려져 있다[4].

한편, 충격 후 동적인 특성을 고려하여 손상의 정도를 평가하는 방법이 있으며 이 방법의 경우 복합재료 보의 진동 특성으로 손상의 위치를 정확하게 확인할 수는 없지만 구조물의 고유진동수, 감쇠, 모드형상 변화를 이용하여 손상의 유무와 손상의 정도 검출이 용이하다.

비파괴적인 특성을 갖는 손상평가법으로 초음파

탐상법(ultrasonic scanning)과 X-ray 기법은 산업체에서 사용 중에 있으며, 레이저 사진술(laser holography) 및 음향 방출(acoustic emission) 방법 등이 다양하게 연구되어지고 있다. 그러나 이들 방법들은 복잡한 장비 등의 이유로 그다지 용이하지 않다. 이러한 단점을 극복하기 위해 압입하중을 손상의 원인이 아닌 손상평가의 기준으로 이용하는 방법이 있을 수 있으며 압입 접촉만을 이용하는 평가 방법을 제안하고, 굽힘강성 평가 자료와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 반 무한평판에서의 접촉하중

매끄러운 표면을 갖는 두개의 물체가 접촉되어 하중을 전달하는 역학적인 상황은 Hertz[3]에 의하여 제안되었으며 서로 다른 곡률반경(r_1, r_2)의 구를 구의 중심을 향하여 동일재료에 압축하중을 가하는 경우, 가해지는 하중(P)과 접촉면에서의 압축변위 간에는 다음과 같은 관계가 알려져 있다.

$$\delta = 1.231 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2} \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}}$$

상기 식에 나타난 바와 같이, 발생하는 변위는 가해지는 접촉하중의 멱승에 비례하여 발생되며, 종종 변위와 하중간에는 다음과 같은 비례식이 설정된다.

$$P = K\delta^m$$

여기서 P 는 압입 시 가해지는 하중, δ 는 하중이 가해질 때 시편의 변위량을 나타내며, K 는 비례상수를 나타낸다. m 의 값은 상기식과 비교할 때, 1.5가 된다. 단순 균질 재료일 경우에는 탄성계수(또는 강성)이 큰 재료일수록 동일한 변위를 발생시키는 데 요구되는 하중의 크기가 증가된다.

2.2 보의 진동특성

본 연구의 직교복합재 적층보는 Euler 보를 적용하면 다음과 같은 지배방정식을 얻는다.

$$\frac{d^2}{dx^2} (EI \frac{d^2 y}{dx^2}) = p(x) = \rho \omega^2 y$$

여기서 E 는 충격 후 보의 탄성계수, I 는 보의 중립축에 대한 면적관성모멘트, $p(x)$ 는 단위길이당 하중이다. $p(x)$ 는 질량과 가속도로 인한 관성력과

같이 관성력을 조화운동으로 가정하면 상기 식과 같이 나타낼 수 있다,

$$\beta^4 = \rho \frac{\omega^2}{EI}$$

이와 같이 가정하여 대입하면 4차 미분방정식을 얻게 되고 이 미분방정식의 해는 다음과 같다.

$$y = A \cosh \beta x + B \sinh \beta x + C \cos \beta x + D \sin \beta x$$

여기서 상수 A, B, C, D 는 경계조건에 의해서 결정되는 값으로 본 실험에서는 프리-프리 상태의 경계조건을 이용하여 고유치 식을 얻는다.

이상의 식을 이용하여 얻을 수 있는 모드 별 보의 고유진동수는 다음과 같다.

$$\omega_n = (\beta_n l)^4 \sqrt{\frac{EI}{\rho l^4}}$$

n 은 각 모드의 차수를 나타낸다.[6]

3. 시험 절차

3.1 재료

한국 화이버(주)에서 제작된 유리섬유직물 / 에 폭시 복합재료를 사용하여 시험을 수행하였다. 각 시험에 대해 3회 이상 시험하여 평균값을 시험 값으로 선정하였다.

3.2 충격 실험

자유낙하식 충격시험 장치를 사용하여 에너지별 충격시험을 행하였다. 시험용 시편은 시험기 fixture의 크기를 고려하여 100mm x 100mm (가로 x 세로)로 선택하였다.

충격시험기의 충격체는 직경12.7mm의 반구 형태이며 낙하 높이를 조절하여 시편에 충격에너지 변화를 발생시켰다. 충격시험기는 일차 충격 후 시편에 대한 재충격을 방지하는 멈춤 블록(stop block), 공압 시편고정 지그(fixture), 충격체를 정확한 위치에 안내하는 안내봉 등으로 구성되어 있다.

본 실험에서는 충격 후 심한 변형은 생기나 관통이 되지 않고 충격에너지의 증가에 대한 강성변화의 폭이 감소가 관찰되는 약20.2J까지 충격을 가하였다.

3.3 압입 실험

비파괴적인 복합재 적층재의 충격손상정도 평가를 위해 압입시험을 수행하였다. 접촉자(indenter)는 열처리된 강구(steel ball)를 사용하였으며, cross-head의 속도는 1mm/min으로 일정하게 유지하며 충격이 가해진 시편의 반대면 충격지점에 압입을 가하였다.

충격이 가해진 복합재에 대한 압입시험 중 압입 하중과 시편변위에 대한 곡선을 얻었으며, 분석해 시편의 손상 정도를 평가하는데 사용하였다. 압입 곡선 기울기(K)는 압입곡선(P- δ 커브)에서의 기울기를 나타낸다.

3.3 굽힘 실험

유리섬유 직물 복합재료의 내충격성을 평가하기 위한 다른 방법으로 충격을 가한 시편에 재료시험기를 이용 굽힘하중을 가하는 4점 굽힘시험을 수행하고 충격에너지별 굽힘강성계수를 구하였다. 굽힘 시험 지그 및 시편의 형상은 ASTM D790~792의 규격을 참고하여 외부 span은 76mm, 내부 span은 25mm로 선정하였다.

4점 굽힘시험 시편은 충격시편에서 충격지점을 중심으로 하여 세로방향으로 다이아몬드 커터를 사용, 100 x 25mm로 설정하였다. 하중과 변위의 곡선으로부터, 굽힘강성계수 (flexural modulus)를 얻었다.

3.5 고유진동수 해석

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 NASTRAN을 이용하여 modal 해석을 수행하였다.

고유진동수 해석 시 보 요소(Beam element)를 사용하였으며 경계조건은 프리-프리로 설정하였다. 그리고 탄성계수는 굽힘실험에서 얻은 유효굽힘강성계수를 대입하여 PMC 적층재의 충격 후 동적 응답의 경향을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압입 시험

압입 하중이 복합재료의 잔류강성과 어떠한 관계에 있는지 알아보기 위해 압입시험을 통한 하중-변위의 곡선을 얻어 시험의 결과를 분석하였다. Fig. 1은 전형적인 압입시 하중-변위의 변화를 나타낸다.

충격이 가해진 경우, 적은 하중 증가량으로도 동일한 변위를 발생시킨다. 즉, 기울기가 완만해지며 이 것으로 보아 충격이 잔류강성을 감소시킨 것으로 추정된다. 충격을 가하지 않은 시편과 비교할 때, 충격하중을 받는 시편에서는 기울기의 감소가

명확하게 관찰되었으며, 복합재내부(또는 외부)에 손상이 발생하는 것으로 추정되었다.

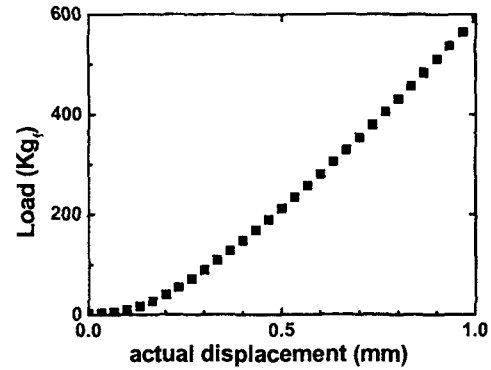


Fig. 1 Typical force-displacement graph from indentation

4.2 굽힘 실험

Fig. 2는 충격으로 충격에너지 변화에 따라 표준화된 굽힘탄성계수와 압입곡선계수의 변화를 비교하여 나타낸 것이다.

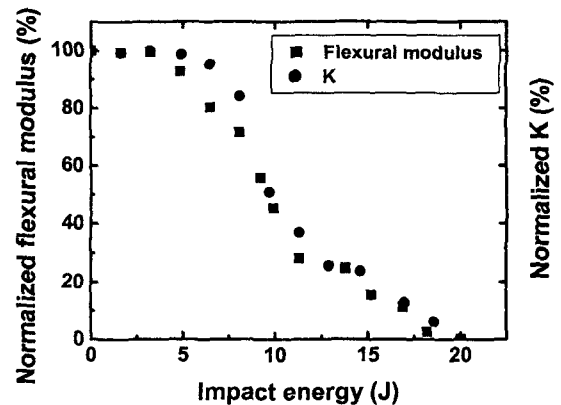


Fig. 2 Normalized flexural modulus versus normalized K

굽힘탄성계수의 변화는 약 5J 미만에서는 거의 나타나지 않는다. 반면에, 충격에너지가 약 5J부터 약 13J까지 증가함에 따라 접선의 기울기가 증가하며 이 구간에서 기울기의 증가는 확연한 강성의 감소를 나타낸다. 이후 구간에서 굽힘강성계수의 약한 변화가 나타난다. 15J이후에 기울기변화가 약한 현상은 충격에너지가 약 15J 이상으로 가해지게 되

면, 충격으로 인하여 시편 내부에서 기지균열 등의 손상이 차지하는 밀도가 거의 포화 단계에 이르렀기 때문이라고 생각된다.

4.3 고유진동수 해석

Fig. 4는 충격에너지 변화에 따라 FEM을 한 1차 모드의 고유진동수 값의 변화를 나타내고 있다.

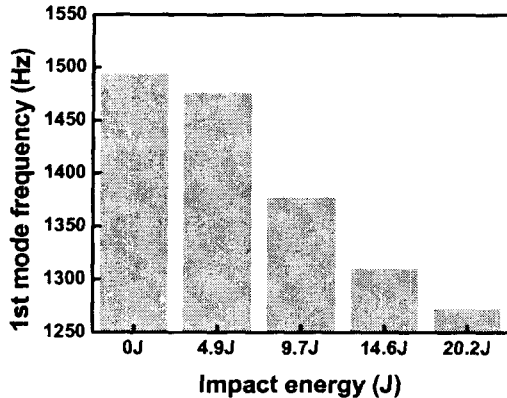


Fig. 3 1st mode frequency after impact as a function of energy

PMC에 충격이 가해진 후 재료의 강성이 저하하게 되고 이와 같은 강성의 저하는 구조물의 고유진동수를 저하시키고 감쇠의 증가를 초래하게 된다. 충격에너지가 증가할수록 각 시편의 1차고유모드의 진동수가 떨어지며 약 5J~15J 사이의 충격에너지 구간에서 가장 많은 진동수의 변화가 있음을 확인할 수 있다.

5. 요약 및 결론

복합재료의 손상정도를 평가하기 위해 충격 후 복합재료에 압축, 피로, 또는 굽힘하중을 가하는 방법으로 손상정도가 평가되어져왔다. 본 연구에서는 다양한 방법으로 충격하중 후에 복합재내에 발생되는 손상정도를 평가하였다.

압입하중을 이용한 손상 평가의 경우 실험에서 얻은 에너지별 압입곡선계수의 값은 충격에너지의 증가에 따라 굽힘탄성계수의 결과와 유사하게 변화되는 것으로 관찰되었다. 이러한 방법은 피로하중, 또는 굽힘이나 좌굴과 같이 재료시편에 완전한 재료파괴의 과정 없이, 압입시험만을 통해 적층재의

충격 후 손상정도를 평가할 수 있었다. 또한, 재료의 고유진동수를 이용하는 동적 특성평가법으로 고유진동수가 감소되는 정도를 기준으로 하여 복합재료의 손상정도를 평가할 수 있다. 유한요소해석을 이용하여 재료의 고유진동수를 유추할 수 있으며, 유한요소해석과 실험결과를 적절히 조합하여 복합재료에 대한 내부손상의 정도를 평가할 수 있다.

후기

본 연구는 BK21(국민대학교 자동차공학전문대학원)의 지원에 의하여 진행되었습니다.

참고문헌

1. E. E. Gdoutos, K. Pilakoutas, and, C. A. Rodopoulos, *Failure Analysis of Industrial Composite Materials*, McGraw-Hill, 2000
2. D. Hull, and T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge Univ. Press, 1996
3. B. Harris, *Engineering Composite Materials*, IOM Communications, 1999
4. M. Mitrovic, H.T. Hahn, G. P. Carman, and P. Shyprykevich, "Effect of Loading Parameters on the Fatigue Behavior of Impact Damaged Composite Laminates," *Composite Science and Technology*, Vol.59, 1999
5. H. Hertz, "On the Contact of Elastic Solids, *J. Rein Angew. Math*, 9, 156-171, 1882
6. W. T. Thomson, M. D. Dahleh, *Theory of Vibration with Application*, Prantice Hall, Vol. 5, pp. 281-284, 2001.