하이브리드 복합재 철도 차량의 결함검출에 관한 연구

이재헌*·김정석**·엄기영**·이동선***·정성균****

A Study on the Damage Dection of woven Cabon/Epoxy Laminates for the Hybrid Composite Train Bodyshell

Jaeheon Lee, Juugseok Kim, Kiyoung Yeom and Seongkyun Cheong

Abstract

Impact damages are very important in the perspective of residual strength of composite structures such as aircrafts, ships, and trains because those damages are sometimes not visible on the surface of the point of impact and the impact resistance of laminated composites is usually not so high. Thus, the impact characteristics of laminated composites should be investigated for the safety of composite structures. This paper investigates the low-velocity impact and damage detectionconducted on woven carbon/epoxy laminates. Experimental results show that the type of damage is dependent on the impact energy level and the delamination area becomes larger as the impact energy increases.

Key Words: low-velocity impact, impact damage, C-Scan, ESPI

1. 서 론

섬유강화 복합재료의 사용은 구조의 경량화를 추구하는 여러 산업분야에서 급속히 증가하고 있다[1-3]. 특히, 최근 들어 샌드위치 구조물(sandwich sutrcture)을 사용한 철도차량(Rolling stock)의 차체(bodyshell)를 유럽을 비롯한 여러 나라에서 개발하고 있다. 에너지 절약, 구조물의 성능 등을 고려하였을 때, 복합재료(composite)의 사용은 의미가 있는 것으로 볼 수 있다.

충격(impact)이나 피로하중(fatigue load)을 받는 섬유강화 복합재료 구조물에는 손상이 발생할 수 있으며, 구조물 내부에 존재하는 손상은 관찰하기 어려워서 전체적인 손상의 크기는 과소평가될 수 있다. 따라서 역학적으로 매우 복잡한 거동을 하는 복합재료 구조물의 손상에 대한 정확한 평가는 안전설계를 위해서 매우 중요하다.

복합재료 구조물의 결함검출(damage detection)에 많이 사용되는 기법으로 ultrasonic method, laser techniques[4-9], thermography method 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 복합재 차체 적용 샌드위치 구조물의 면재(face)에 대한 충격특성을 분석하고자 한다. 면재에 사용된 재료는 직조 탄소섬유 복합재료(woven fabric carbon/epoxy)이며, 충격실험(impact test)은 중량 낙하식 시험기(drop weight apparatus)를 사용하여 수행하였다. Carbon/epoxy 복합적층판의 결함은 전자스패클 패턴 간섭법(ESPI, Electronic Speckle Pattern Interferrometry)과 초음파 기법(C-Scan)을 사용하여 검출하였다.

2. 전자 간섭계이론

* 서울산업대학교 에너지환경대학원
** 한국철도기술연구원
*** 서울산업대학교 산업대학원
**** 서울산업대학교 기계공학과

2.1 ESPI의 면외변위 측정 기본원리

ESPI기법을 이용한 면외변위(out-of-plane)의 측정은 물체가 외력을 받기 전의 상태를 기록하고 물체에 변형을 발생시킨 후의 상태를 기록하여 변형전의 파면(wave front)과 변형된 파면을 중첩시켜 나타난 간섭무늬를 관찰하게 된다.

물체가 변형하기 전의 빛의 강도(intensity)는 다음과 같다.

$$I_1 = u_o^2 + u_R^2 + 2u_o u_R \cos[\Psi_o - \Psi_R] \quad (1)$$

여기서 u_o, u_R은 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)의 진폭(amplitude), Ψ_o, Ψ_R은 물체광과 참조광의 위상(phase)이다. 물체가 외력에 의해 변형되었을 때의 빛의 강도(intensity)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I_2 = u_o^2 + u_R^2 + 2u_o u_R \cos[\Psi_o - \Psi_R + \Delta\Psi] \quad (2)$$

여기서 $\Delta\Psi$는 물체가 변형함으로써 유발되는 물체광(reference beam)의 위상변화를 의미한다. I_1과 I_2의 관계에서 $\Delta\Psi$ 는

$$\Delta\Psi = 2\pi n \quad (3)$$

일 때 최대값이 되고

$$\Delta\Psi = (2n+1)\pi \quad (4)$$

일 때 최소값이 되며, 여기서 n은 정수이다.

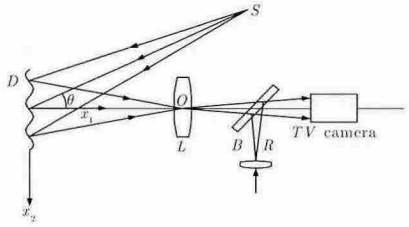


Fig. 1 An optical arrangement giving fringes representing out-of-plane displacement.

Fig. 1에서 변형전후의 물체광의 위상차는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi}{\lambda}\{d_1(1+\cos\Theta) + d_2\sin\Theta\} \quad (5)$$

여기서 d_1은 물체의 x_1방향의 변형량, d_2는 x_2 방향의 변형량, λ는 레이저의 파장(wave length)이다.

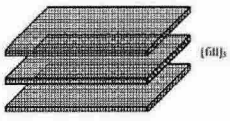
식(3), (4)와 (5)에서 물체의 면외방향 변형량과 간섭무늬와의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$d_1 = \frac{n\lambda}{(1+\cos\Theta)} \quad (6)$$

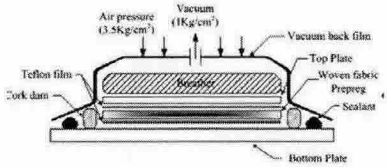
3. 실험

3.1 시험편

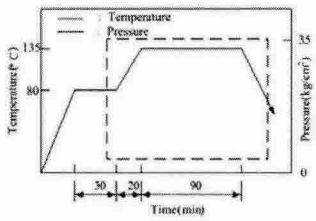
본 연구의 시험편 제작에 있어서 직조된 탄소섬유 프리프레그(woven carbon fabric prepreg)를 사용하였다. Fig. 2(a)는 적층구조를 나타내고 있으며, Fig. 2(b)와 같은 오토클레이브 성형법과 Fig. 2(c)와 같은 성형조건으로 시험편을 제작하였다. 시험편의 형상은 100mm X 100mm로 절단하여 충격시험편을 제작하였다.



(a) Lay-up



(b) Curing process



(c) Curing cycle

Fig. 2 Curing process by autoclave.

3.2 충격시험

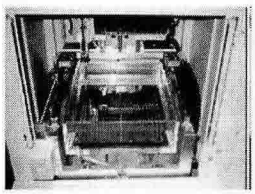
충격시험(low velocity impact test)은 자유낙하 방식의 충격시험기(INSTRON Dynatup 9250HV)를 사용하였으며 충격시험에 있어서 충격체의 질량은 1.39kg이며 지름은 12.7mm이다.

복합재(composite) 적층판(laminate)에 가해지는 외부 충격에너지의 변화에 따른 적층판의 거동을 분석하기 위하여 Fig. 2(a)와 같은 $[fill]_3$ 적층판에 대해 충격에너지를 변화시키며 충격시험을 실시하였다. 충격체의 높이를 조절하여 충

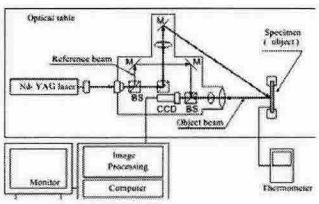
격에너지를 변화시켰으며, 충격에너지의 범위는 2J~12J이다.

3.3 결함검출

복합재 적층판 내부의 결함(damage)을 검출하기 위하여 Fig. 3(a)와 같은 25MHz 초음파 C-scan 장비(Mi-Scope, Hitachi)를 사용하여 충격 후 적층판 내부의 결함을 측정하였다. Fig. 3(b)는 결함측정에 사용된 ESPI광학계를 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 레이저 계측 시스템 장비의 광원은 Nd-YAG 레이저로서 출력은 500mW이고 파장(λ)은 532nm이다. 온도측정은 휴대용 디지털 온도센서(TSE-1300 digital thermometer)를 사용하였다. 하중 부가법으로 열하중을 선택하였다. 시험편을 약 50℃까지 가열한 후 상온으로 냉각하면서 스페클(speckle)의 변화를 CCD 카메라로 측정하였다.



(a) C-scan system



(b) ESPI system

Fig. 3 Damage detection system.

4. 결과 및 고찰

4.1 충격에너지 별 충격거동

Fig, 4는 시간에 따른 하중의 변화를 나타내고 있다. 2J~약 7J의 충격에너지 범위에서는 하중-시간곡선이 완만하다. 약 7J의 충격에너지에서부터 하중-시간곡선에 파형이 나타나기 시작하여 15J까지 증가할수록 파형은 더욱 넓은 범위에서 일어난다. 이와 같은 곡선의 변화는 손상형태와 깊은 관계가 있을 것으로 사료된다.

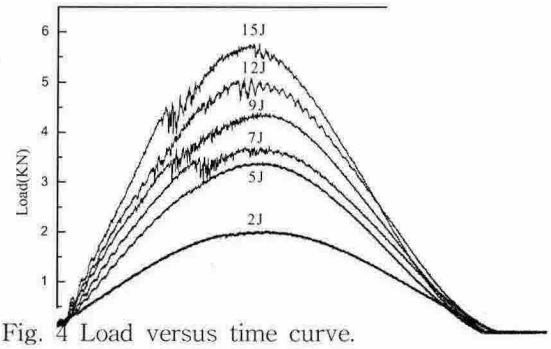


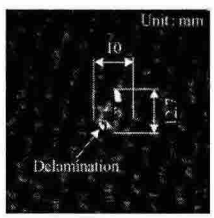
Fig. 4 Load versus time curve.

4.2 결함검출

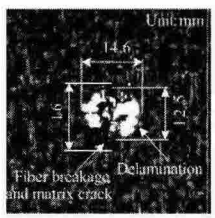
Fig. 5는 충격에너지 5J, 7J, 12J에 대한 충격손상(impact damage)을 C-scan을 통하여 검출한 결과이다. 낮은 충격에너지를 가했을 때에는 층간분리(delamination)가 주요 손상형태임을 알 수 있다. 그러나 7J 이상의 높은 충격에너지가 가해졌을 때에는 층간분리 뿐만 아니라 섬유파단(fiber breakage), 모재균열(matrix crack)이 함께 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferrometry) system을 이용하여 적층판 내부의 결함을 검출한 결과이다. ESPI system을 활용한 복합재 적층판의 결함검출 결과 적층판 내부 결함의 크기는 다소 작게 평가되었다.

실제 복합재료 구조물의 결함을 검출할 때 레이저응용기법과 초음파기법을 동시에 사용하면 결함검출시간을 크게 단축할 수 있을 것으로 본다. 먼저 레이저응용기법으로 구조물의 넓은 범위를 검사하고, 결함이 예측되는 부분에 대해서는 초음파기법으로 정밀하게 조사할 경우 보다 빠르고 정확하게 결함을 검출할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Impact energy (5J)



(b)Impact energy (7J)

(c)Impact energy (12J)

Fig. 5 Detection of damage in woven carbon/epoxy laminates by C-San.

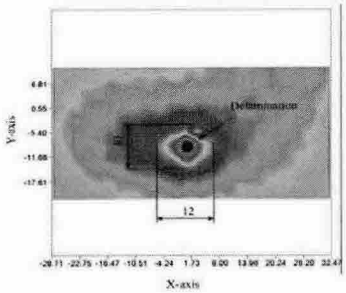


Fig. 6 Detection of damage in woven carbon/epoxy laminates by ESPI system.

4. 결 론

복합재 차체적용 샌드위치 구조물의 면재에 대한 충격특성과 적층판의 결함 검출에 관한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다

(1) 직조 탄소섬유 복합적층판의 충격특성 평가 결과 충격에너지가 약 7J 미만일 때에는 층간분리가 주요 에너지흡수기구이며, 7J 이상일 때에는 섬유파단(fiber breakage), 모재균열(matrix crack)이 새로운 에너지흡수기구로 추가된다.

(2) 초음파를 이용한 직조 탄소섬유 복합적층판의 결함검출 결과 충격에너지가 증가함에 따라서 결함의 크기는 증가하였으며, 결함의 형상은 기존의 일방향 탄소섬유 복합적층판에서와는 달리 타원형으로 검출되었다.

(3) ESPI system을 통한 결함검출 결과 초음파를 이용한 검출과는 달리 복합적층판 내부의 결함을 정량적으로 정확히 측정하기는 어려웠으나 결함의 위치와 형상을 보다 빠르고 쉽게 측정할 수 있었다.

(4) 실제 복합재료 구조물의 결함검출에 있어서 레이저를 이용한 결함검출과 초음파를 이용한 결함검출 기법을 동시에 사용할 경우 보다 빠르고 정확한 결함검출을 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Swanson. S. R. "Introduction to Design and Analysiswith Advanced Composite Materials", Prentice Hall,1997, pp. 22~24.

(2) ASM International, Section12. Applications and Experience.Engineered Materials Handbook Composites. Vol. 46,1997, pp. 799~845.

(3) M, D, Isaac and O. Ishai. "Engineering Mechanics ofComposite Materials", Oxford University Press, Vol. 2, pp.10~11, 1994.

(4) H. Kaczmar, "Ultrasonic Detection of Damage in CFRP,"J. Composite Materials, Vol. 29(1), 1995, pp.59~95.

(5) K. V. Steiner, "Defect Classifications in CompositesUsing Ultrasonic Nondestructive Evaluation Techniques",Damage Detection in Composite Materials, ASTM STP1128, J.E. Masters, Ed., American Society for Testing andMaterials, Philadelphia, 1992, pp.72~84.

(6) O. J. Lekberg and J.T. Malmo, "Detection of Defects inComposite Materials by TV Holography", NDTInternational, Vol. 21(4),1988, pp.223~228.

(7) L. X. Yang, W. Steinchen, M. Schuth and G. Kupfer,"Precision Measurement and Nondestructive Testing byMeans of Digital Phase Shifting Speckle Pattern andSpeckle Pattern Shearing Interferometry", Measurement,Vol. 16, 1995, pp. 149~160.

(8) Y. Y. Hung, "Searography: A New Optical Method forStrain Measurement and Nondestructive Testing", OpticalEngineering, Vol. 21, No. 3, 1982, pp. 391~395.

(9) Y. Y. Hung, "Shearography: A Novel and PracticalApproach for Nondestructive Inspection", Journal ofNondestructive Evaluation, Vol. 8, No. 2, 1989, pp.55~67.