

전단간섭계를 이용한 복합재료 튜브의 결함검출 Defects Detection of Composite Tube using Shearography

*김경수¹, 정현철², 양성모³, 김동수¹, 전소영¹, #김경석²

*K. S Kim¹, H. C Jung², S. M Yang³, D. S Kim¹, S.Y Jeon¹, #K. S Kim(gsckim@chosun.ac.kr)²

¹ 조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과, ² 조선대학교 기계설계공학과, ³ 전북대학교 기계시스템공학부

Key words : Shearography, Composite Tube, Defects Detection

1. 서론

최근 산업분야에서 에너지 절약 및 신소재 개발등으로 인하여 복합재료의 활용도가 급격히 증가하고 있다. 그 중 복합재료의 대표적인 재료인 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)은 비강성(Specific stiffness), 비강도(Specific strength)가 기존의 금속재료보다 훨씬 높고 내화학성, 진동감쇄특성, 전기절연성, 치수안정성 등이 우수하기 때문에 선박, 항공기, 우주비행체, 자동차 및 기차에 이용되고 있으며 그 활용 범위도 점차 확대되어가고 있다[1-2]. 하지만 필라멘트 와인딩 기법을 적용하여 제작된 복합재 튜브는 섬유 및 수지의 특성으로 인하여 충격에 의한 결함의 발생 가능성이 높다는 단점이 있으며[3-4], CFRP 적층판의 경우 일방향성 프리프레그 시트(Prepreg sheet)를 이용하여 원하는 적층순서와 배향각에 따라 제작하기 때문에 적층과정에서 발생하는 미끄럼이나 적층불량에 의한 기공, 기포, 미세균열 등의 결함이 혼재될 수 있다. 또한, CFRP 복합재를 항공기 구조재료로써 이용할 경우 항공기 제조, 수리, 정비중 공구낙하, 항공기의 이착륙시 우박이나 새와의 충돌에 의한 이물충격손상을 받는 경우가 많으며 이러한 손상해석은 복합재료 안전설계에 있어 매우 중요한 문제로 제기되고 있다. 실제 항공기 날개나 동체, 압력용기, 배관, 로켓모터 케이스와 같은 적층복합재료 구조물들은 거의 쉘이나 튜브의 형태를 가지고 있기 때문에 복합재 튜브의 충격에너지에 따른 결함 측정의 연구가 필수적으로 요구된다[5].

따라서 본 연구에서 전단간섭계를 이용하여 복합재 튜브의 충격량에 따른 결함측정을 함으로써 복합재료 활용 분야에서 제품의 안전성 확보 및 충격손상기동 해석에 큰 도움이 될 것이다.

2. 이론

Fig. 1은 전단간섭계의 원리를 나타내고 있다. 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사되면 이 때 스펙클의 발생은 면외변형 측정 간섭계와 동일하며, 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror에 입사 후 반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Tilting mirror에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Tilting mirror에 임의의 기울기를 주면 기울어진 Tilting mirror에서 반사된 파면은 Mirror에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 CCD의 상면(Image plane)에 맺히게 된다. 이렇게 두 빛이 간섭하게 되는 것은 면외변형측정 간섭계와 동일하며, 변형 전 후 감산처리로 발생하는 간섭줄무늬는 면외변형측정 간섭계와 달리 대상물에 발생한 면외변형의 기울기를 표현하게 된다. Tilting mirror를 전단거울이라고 부르며, Tilting mirror가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 δx 로 표현하며, 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다. 이와 같이 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의 P_1 과 P_2 에 $\phi_1 = \phi(x, y)$ 와 $\phi_2 = \phi(x + \delta x, y)$ 와 관계되는 위상차를 가지게 되기 때문에, 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 Eqn. (1)과 같으며 변형전 위상차(ϕ)와 변형에 의하여 발생한 변형후 위상차(ϕ')의 변화 $\Delta\phi$ 는 Eqn. (2)와 같다[6].

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \phi' - \phi = (\phi_2' - \phi_2) - (\phi_1' - \phi_1) \quad (2)$$

전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 Eqn. (3)을 이용하게 된다. 이 식은 변형에 의한 전체의 위상변화를 나타내며, 모든 광계측의 기본식이 된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_i - \vec{n}_v) \cdot \vec{d} \quad (3)$$

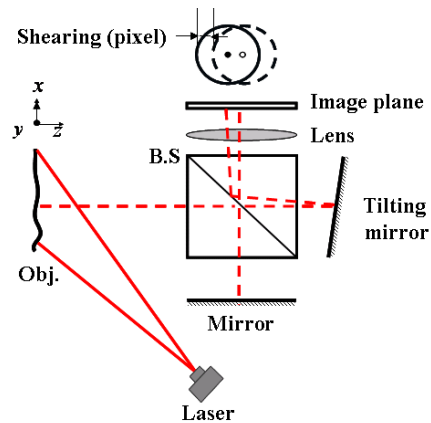


Fig. 1 Basic principle of Shearography

3. 실험방법

본 연구에서 사용한 복합재료 튜브 시험편은 지름이 $\phi 150$ mm 이며 필라멘트 와인딩 기법으로 제작되었다. 이 시험편에 충격하중에 따른 결함을 파악하기 위하여 시험편의 두께 방향으로 15 J의 충격하중을 주었다.

전단간섭계 시스템은 독일 Etemeyer 사의 상용 시스템을 이용하였으며, 시스템의 구성은 Fig. 2와 같이 전단간섭센서, Laser, Controller, PC, 공압제어기, 진공펌프로 구성되어 있다. 레이저는 Nd:YAG Laser(파장: 532nm)를 사용하며, 광 파이버를 이용하여 레이저 빛을 센서로 전달하고, 센서 위쪽의 암(Arm)에 장착된 거울을 통해 물체에 조사된다. 전단량과 전단방향은 센서 뒷면의 수동식 조절장치를 이용하여 조절할 수 있다. 상용 프로그램(ISTRA)을 이용하여 최종 위상지도를 획득하고, 후 처리를 통하여 결함부의 변형을 측정한다. 이 때, 공압제어기를 이용하여 지그로 밀폐된 복합재료 튜브내에 일정한 압력을 가함으로써 압력증가에 따른 변형을 측정하였다.

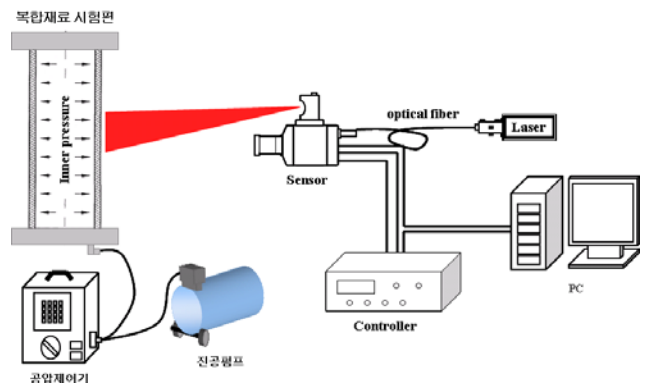


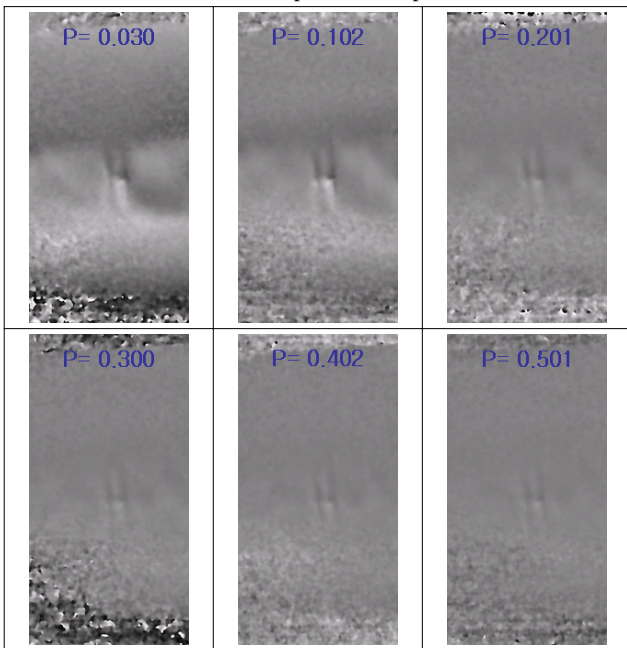
Fig. 2 Schematic of Shearography system

4. 실험결과 및 고찰

전단간섭계를 이용하여 압력 시스템의 최대 허용 압력인 0.501 MPa 까지 가압하여 압력 증가에 따른 복합재 튜브 충격부의 변형을 측정하였다. 압력 증가에 따른 충격부의 변형을 확인하기 위하여 본 실험에서는 15 J의 충격하중을 받은 $\varnothing 150$ mm 복합재료 튜브를 실험대상으로 선정하고, 압력차를 초기압(0.03 MPa)에서 0.501 MPa까지 증가시켜 이에 따른 변형을 전단간섭계를 이용하여 측정하였다.

실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 진공챔버와 공압제어기를 이용하여 지그로 밀폐된 복합재료 튜브 내부에 압력을 증가 시켰다. 초기압력(0.03 MPa)에서 0.003 MPa를 증가시킨 후 위상지도를 획득하고, 압력을 차례로 누적하여 최대 압력 $\Delta P = 0.471$ MPa 까지 증가시켰다.

Table 1 Phasemaps at each pressure



초기압력(0.03 MPa)에서부터 최종 압력(0.501 MPa)까지 압력을 증가시키면서 획득한 위상지도를 Table 1과 같이 얻을 수 있었다. 각 구간에서 획득된 위상지도에서 충격이 가해진 중앙부분을 기준으로 Fig. 3과 같이 y축 방향으로 프로파일을 그어 각 구간에서의 변형을 측정 한 다음 이를 누적하여 압력구간의 변형을 계산하였다.

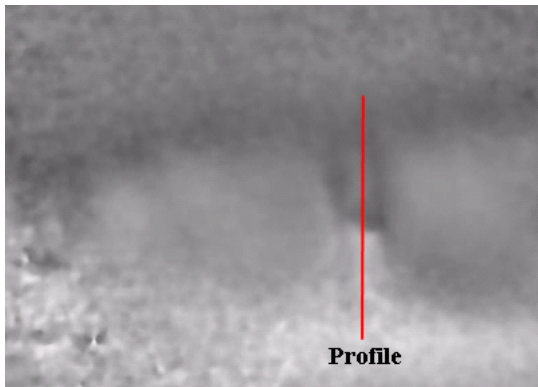


Fig. 3 Phasemap and profile for measuring deformation

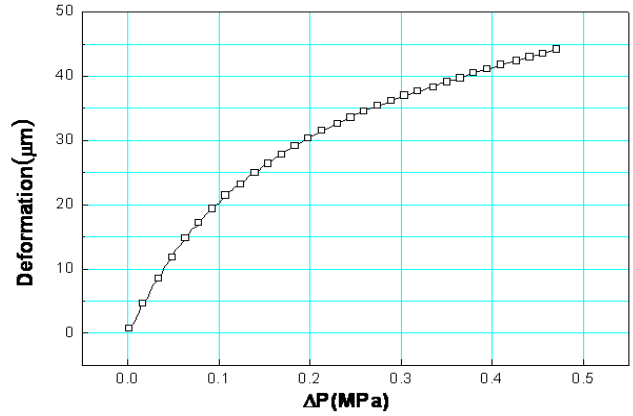


Fig. 4 Deformation of maximum pressure

Fig. 4는 초기 압력(0.03 MPa)에서부터 0.501 MPa까지 압력을 증가시키면서 측정한 복합재료 튜브 충격부의 변형을 나타내었다. 그 결과 압력증가에 따른 변형량의 증가가 비선형적으로 나온다는 것을 알 수 있었다. 또한, 압력이 점차 증가함에 따라 변형의 증가 기울기는 점차 감소함을 나타내었다.

5. 결론

산업현장에서 활용도가 높아지고 있는 복합재료 튜브는 저속 충격에 의하여 균열이 발생할 우려가 있다. 이러한 균열에 의한 제품의 파손을 방지하기 위해 본 논문에서는 전단간섭계를 이용하여 복합재 튜브의 내부결함을 측정하여 측정결과를 분석하였다. 복합재료 튜브의 충격하중을 받은 결합부를 압력차이를 증가시키면서 측정한 결과 첫째, 전단간섭계를 이용하여 충격손상을 입은 복합재료 튜브의 결합부위를 검출할 수 있었다. 둘째, 충격부위에서 압력증가에 따른 변형량의 증가가 일정하지 않고 비선형적으로 나타났고 압력이 증가함에 따라 변형의 증가 기울기는 감소하였다. 이는 복합재료 활용 분야에서 제품의 안전성 확보 및 충격손상거동 해석에 기초자료가 될 것이다.

후기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. A. G. Mamalis, D. E. Manolaks., "Crashworthy Behavior of Thin-Walled Tubes of Fiberglass composite Materials Subjected to Axial Loading." J. Composite Materials, 24, 72-91, 1990.
2. C. H. Chiu, C. K. Lu., "Crushing Characteristics of 3-D Braided Composite Square Tubes." J. Composite Materials, 31, 2309-2327, 1997.
3. Highsmith, A. L, Ledbetter, F. E., Nettles, A. and Russel, S. S., "Low Velocity Impact Damage in Filament-Wound Composite Pressure Bottles," Journal of Composites Technology & Research, 18 - 2, 109-117, 1991.
4. Poc Jr., C. C., "Impact Damage and Residual Tension Strength of a Thick Graphite/Epoxy Rocket Motor Case", Journal of Spacecraft & Rockets, 29 - 3, 394-404, 1991.
5. G. L. Farley, R. M. Jones. "Energy-Absorption Capability of Composite Tubes and Beams." NASA TM 101634, 1989.
6. 김경석, 정현철, 장수옥, 정성욱, 최태호, 장호섭, "두 종류의 레이저와 스펙클법을 이용한 변형 측정", 한국정밀공학회지, 24-11, 7-14, 2007