

레이디얼 하중에 따른 FRP 튜브의 와전류 신호의 변화

Variation of eddy current signal according to the Radial load in FRP Tube

*#김철웅¹, 심은섭², 서해용², 김희성²

*#Cheol-Woong Kim(woong25@korea.ac.kr)¹, Un-Shob Shim², Hae-Young Seo², Hee-Sung Kim²

¹고려대학교 공학기술연구소 / Triple-C Medical Corp., ²한국이씨엔유주식회사

Key words : Eddy Current Signal, CFRP Tube, Saw-cut Defect, Circular Hole Defect, Phase Angle, Lissajous Figure, Radial Load

1. 서론

CFRP 적층재의 피로에 의한 파손은 반복하중에 의한 결합부 열층간분리 등의 국부적 손상이 재료 전체의 피로저항성을 악화시키는 형태가 대표적이다. 따라서, CFRP 손상부의 비파괴적 관찰기법은 부하초기부터 끝까지 동일한 시험편을 이용하여 결합부의 변화양상을 관찰해야만 정확하고 일관된 결과를 유도할 수 있다. 현재, CFRP 적층재의 결합부 관찰을 위한 비파괴적 탐상기법은 주로 초음파 C-스캔 탐상법을 이용하고 있다. 그러나 초음파 C-스캔 탐상은 접촉매질로 물을 사용하는 수침법이기 때문에 탐상과 동시에 CFRP 적층재의 기계적 특성 저하가 수반된다. 따라서, 측정하는 단계마다 다른 시험편을 적용하여 결과를 유도해야 하므로 정확성과 일관성이 매우 낮은 실정이다. 본 연구에서는 이와 같은 C-스캔 탐상의 한계성을 극복하고자 와전류 탐상(Eddy Current Test, 이하 ECT) 기법을 CFRP 튜브의 결합검출에 적용해 보았다. ECT는 검사속도가 빠르고 접촉매질이 필요 없는 직접접촉법을 취한다. 따라서, 동일 시험편을 대다수 적용하여도 탐상으로 인한 시험편의 손상 및 기계적 특성 저하가 발생하지 않는 장점이 있다.^(1,2) 그럼에도 불구하고 국내외적으로 ECT를 이용한 섬유강화 복합재료의 결합검출에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없다. 왜냐하면 입자강화 금속기 복합재료는 와전류 탐상이 가능하지만,⁽³⁻⁵⁾ CFRP와 같은 섬유강화 복합재료는 수지층의 낮은 전기전도도와 유전률로 인해 와전류 탐상이 불가능하기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 한계성을 극복하고자 수지층에 전기전도도가 우수한 알루미늄 입자를 일정량 혼입하여 와전류 탐상이 가능한 CFRP 튜브 시험편을 제작하였다. 그리고 결합의 형상, 결합의 깊이, 레이디얼 하중에 따른 와전류 신호의 변화를 정량적으로 파악하였다.

2. FRP 튜브 시험편 제작 및 실험방법

본 연구에서 사용된 CFRP 튜브는 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(prepreg)를 튜브형태로 가공하였다. 이때 축방향과 섬유방향을 일치시켜 축방향의 기계적 특성을 강화하였다. 탄소 섬유 자체는 전기전도도가 비교적 양호하여 와전류 탐상이 가능하지만, 탄소섬유 프리프레그와 같이 수지 함유율이 약 40% 이상 되는 경우에는 전기전도도가 극히 낮아져 와전류탐상이 불가능해진다. 따라서 전기전도도 향상을 위해 에폭시 수지계에 알루미늄 입자를 일정량 혼입하고 교반한 후 프리프레그에 함침하였다. 그 결과 CFRP 튜브의 전기전도도가 향상되고 와전류 탐상이 가능하게 되었다. 물론, 알루미늄 입자가 CFRP 튜브의 기계적 특성에 미치는 영향도 간과할 수는 없지만 와전류 탐상 실험결과에 큰 영향을 미치는 정도는 아님을 확인할 수 있었다. 시험편의 경화조건은 80℃에서 30분간 예열을 거쳐 수지계의 가교형성을 촉진하였고, 130℃에서 60분간의 경화과정과 160℃에서의 후경화과정을 거쳐서 화학적·기계적으로 안정적인 시험편을 제작하였다. 결합의 형상 및 결합의 깊이변화에 따른 와전류 신호의 변화를 평가하기 위해 Fig. 1(a), (b)에 제시한 바와 같이 소켓결합과 원공결합을 내재한 CFRP 튜브 시험편을 제작하였다. Fig. 1(a)와 같이 시험편 중앙부에 길이 10mm, 두께 1mm 크기의 축방향 소켓결합과 원주방향 소켓결합을 가공하였고, Fig. 1(b)와 같이 원공결합의 깊이 변화에 따른 와전류 신호를 분석하기 위해 원공결합의 지름은 1.5mm로 동일하게 하고,

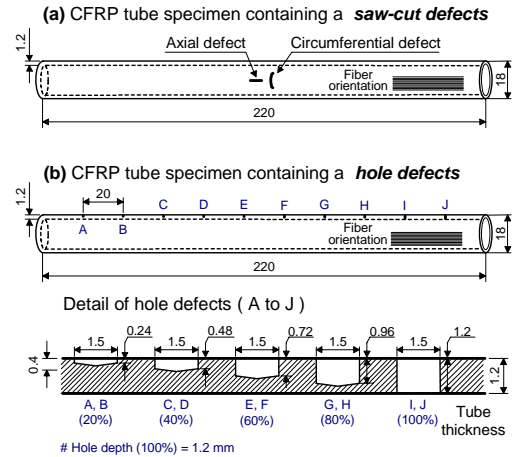


Fig. 1 Geometries of CFRP tube specimen

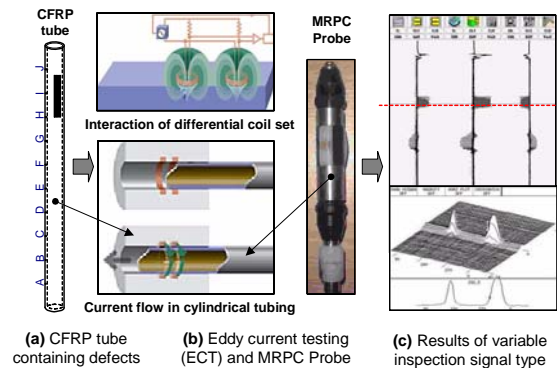


Fig. 2 Schematic illustration of Eddy Current Testing (ECT) for CFRP tube specimen

결합깊이는 시험편 두께 대비 20%(0.24mm), 40%(0.48mm), 60%(0.72mm), 80% (0.96mm), 100%(1.20mm)로 가공하였다.

3. 레이디얼 하중에 의한 원공결합 신호의 변화

레이디얼 하중이 부하된 CFRP 튜브 시험편에서 원공결합의 깊이에 따른 와전류 신호를 평가해 보았다. 변형량 5mm의 레이디얼 하중이 가해진 부하시험편은 원공결합부 뿐만 아니라 시험편 전체에 걸쳐 무수히 많은 미세균열, 크레이지, 층간분리가 발생하였다. 따라서, 스트립차트 상에서는 결합신호 검출이 불가능하였다. 그러나 300~500 kHz의 고주파 영역에서 신호를 확대한 후, 노이즈 성분의 위상각을 180°로 설정하고 노이즈 성분을 소거한 결과, Fig. 3과 같은 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 3(i)은 부하가 가해지지 않은 시험편을 탐상한 결과이고, Fig. 3(ii)는 레이디얼 하중이 작용된 후의 부하시험편 탐상 결과이다. Fig. 3(i),(ii)에서 상단그림은 와전류 신호의 리사주 도형(Lissajous figure)을 나타낸 것이고, 하단그림은 MRPC 탐촉자가 1회전하면서 수집한 신호를 증폭한 것이다. 원공결합 신호는 탐촉자 1회전당 4회의 신호가 검출된다. 결합신호가 비교적 잘 검출되는 무부하시험편에서는 3번 신호에서 원공결합을 검출할 수 있었다. 그러나 부하 시험편에서는 1~4번 전체에서 결합신호, 노이즈,

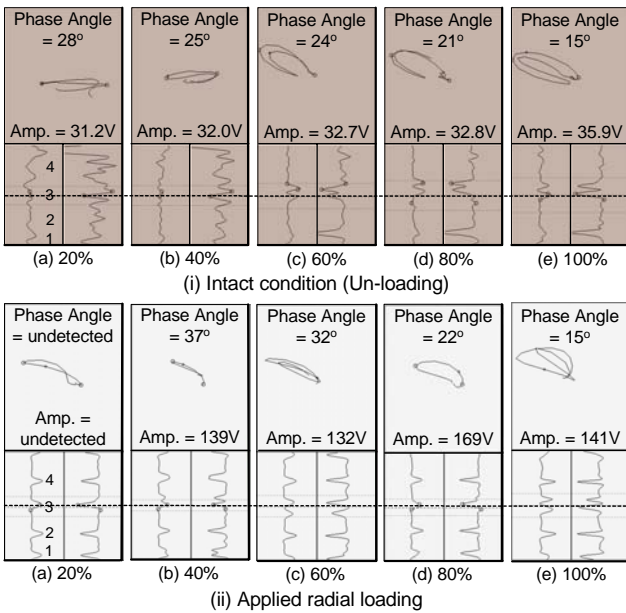


Fig. 3 Phase angle measurement by the Lissajous figures

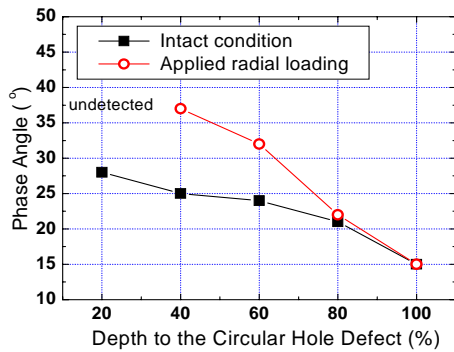


Fig. 4 Relationship between the phase angle and depth to the circular hole defects in intact specimen s. radial loading specimen

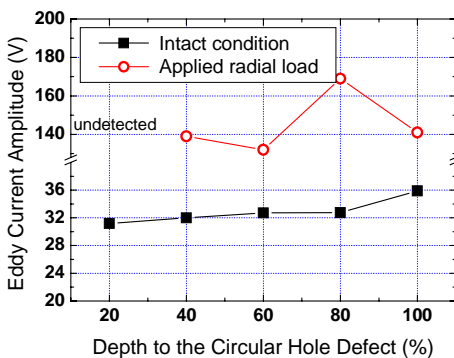


Fig. 5 Relationship between the EC amplitude and depth to the circular hole defects in intact specimen s. radial loading specimen

미세균열신호가 복합적으로 발생하여 결함검출이 매우 어려웠다. 따라서 무부하 시험편을 기준으로 판독한 결과 3번 신호에서 결함신호 검출이 가능하였다. Fig. 3의 결과를 이용하여 Fig. 4와 Fig. 5의 그래프를 얻을 수 있었다. Fig. 4는 원공결함 깊이에 따른 위상각의 변화를 비교한 그래프이고, Fig. 5는 원공결함 깊이에 따른 와전류 증폭의 변화를 비교한 그래프이다. Fig. 3~Fig. 5의 결과를 이용하여 무부하 시험편과 레이디얼 부하 시험편의 와전류 탐상 특성을 비교해보면 다음과 같다. 1) 레이디얼 부하 시험편의 관통결함(100%)은 미세균열, 층간분리 등에

의한 신호와 교란되지 않고 무부하 시험편과 유사한 탐상신호 결과를 나타냈다. 그 이유는 적층재인 CFRP 튜브의 특성상 균열 및 층간분리가 시험편 두께방향 전체로 관통하여 나타나지 않고 층간에서 불연속 구간이 존재하였기 때문에 관통결함 신호와 균열, 층간분리 신호는 상호 구분이 가능하였다. 그 결과, 무부하 시험편 및 부하 시험편 모두 위상각 15°에서 유사한 리사쥬 도형이 나타나고 전형적인 원공결함 신호 형태가 나타났다. 2) Fig. 4를 살펴보면 80%의 결함깊이도 무부하 시험편 및 부하 시험편의 위상각이 거의 같음을 알 수 있다. 3) 60% 이하의 결함부터는 부하 시험편이 미세균열, 층간분리, 노이즈 등의 영향을 크게 받기 시작하여 무부하 및 부하 시험편 간의 위상각 차이가 심화되어 갔다. 즉, 결함깊이가 낮아질수록 무부하 및 부하 시험편간의 위상각의 편차는 심화되고, 부하 시험편의 위상각 증가 또한 급격히 이루어짐을 알 수 있다. 따라서, 60% 이하의 결함은 미세균열과 층간분리 등에 크게 영향을 받아 와전류 탐상이 매우 어려워졌고 20% 결함은 위상각의 설정 자체가 불가능하였다. 80%, 100% 결함에서는 미세균열에 의해 신호가 왜곡되고 않고 무부하 시험편과 부하시험편이 거의 유사한 위상각과 전기적 신호를 발생한 결과로 유추해 보았을 때 레이디얼 하중에 의해 시험편 전체에 발생된 미세균열의 크기는 시험편 두께방향으로 60% 이상을 초과하지는 않았다고 판단된다. 4) Fig. 5에서 와전류 진폭()과 결함깊이의 관계를 살펴보면, 무부하 시험편은 결함의 깊이가 깊어질수록 와전류 진폭이 서서히 증가하는데 비해 부하 시험편은 발생된 균열, 층간분리 등에 의한 노이즈의 영향으로 와전류 진폭과 결함 깊이의 관계가 매우 불규칙적으로 나타났다. 특히 80% 결함이 완전관통 결함(100%)에 비해 와전류 진폭이 증가한 이유는 80% 결함에서 관통되지 않은 잔여 20% 부위에 많은 미세균열이 집중했기 때문에 노이즈가 증가하여 와전류 진폭이 증가한 것이라고 생각된다.

4. 결론

(1) 레이디얼 하중이 가해진 부하 시험편은 시험편 전체에 미세균열, 크레이지, 층간분리 등이 발생하여 결함탐상이 매우 어려웠다. 그러나 300~500 kHz의 영역에서 신호를 증폭하고 노이즈 성분을 소거한 결과, 시험편 두께대비 80% 이상의 결함에서는 결함신호 검출이 가능했다. (2) 시험편 두께대비 80%, 100% 결함은 무부하 시험편 및 레이디얼 부하 시험편 모두 유사한 위상각과 리사쥬 도형을 나타냈다. 그러나 60% 이하의 결함에서는 무부하 및 레이디얼 부하시험편 간의 위상각 편차가 심화되었고, 부하시험편의 60% 이하 결함은 미세균열에 의한 노이즈의 영향을 크게 받아 결함검출이 불가능했다. 결과적으로 부하에 의해 발생된 미세균열의 크기는 두께방향으로 60% 이하임을 유추할 수 있다.

참고문헌

1. M. Gramz and T. Stepinski, "Eddy Current Imaging, Array Sensors and Flaw Reconstruction," *s a c i N d s c i E a a i* , Vol. 5, pp. 157-174, 1994.
2. D. L. Atherton and S. Sullivan, "The Remote Field Through-Wall Electromagnetic Inspection Technique for Pressure Tube," *Ma i a s E a a i* , Vol. 44, pp. 1544-1550, 1986.
3. P. K. Liaw, R. E. Shannon and W. G. Clark, "Fundamental Relationships Between Micro Structure and Mechanical Properties of Metal Matrix Composites," *T M M E*, Warrendale, PA, pp. 581-615, 1990.
4. P. K. Liaw, R. E. Shannon, W. G. Clark and W. C. Harrigan, "Cyclic Deformation, Fracture and Nondestructive Evaluation of Advanced Materials," *T M T* , pp. 251-277, 1992.
5. H. J. Jeong, "Nondestructive Determination of Reinforcement Volume Fractions in Particulate Composites: Eddy Current Method," *a f N T*, Vol. 18, No.2, pp. 112-120, 1998.