

Orthotropic Fiber Reinforced Materials의 와전류 탐상 평가 기법과 프로브 설계 Eddy Current Method and Probe Design of Orthotropic Fiber Reinforced Materials

*#김철웅¹, 신용훈², 조준영², 서용범², 이호상³

*#Cheol Woong Kim(woong25@korea.ac.kr)¹, Yong Hoon Shin², Jun Young Cho², Yong Beom Seo², Ho Sang Lee³
¹고려대학교 공학기술연구소/(주)트리플씨메디칼, ²한국이씨앤유주식회사, ³(주)트리플씨메디칼

Key words : Eddy Current Method, Probe Design, Orthotropic Fiber Reinforced Material, Hole Defect, Phase Angle

1. 서론

탄소섬유강화복합재료(이하, CFRP)는 반복적인 하중에 대한 강한 저항력을 보유하고 있어서 개발초기에는 우주항공, 스포츠용으로 주로 이용되었으나, 최근 의료기기 및 재활, 노령화 등에 대한 관심 증대로 메디칼 분야까지 확대되고 있다. 또한, 수년전부터 각광받기 시작한 Carbon Nano-tube(이하, CNT)는 최근 대량생산 시스템 구축이 실현되면서 우수한 전기적 기계적 특성을 지닌 고밀도 중합체를 요구하는 분야에서 널리 적용되고 있다. CNT 측정은 광학적 관찰 또는 4-probe method를 이용한 저항 측정을 이용한 혼합비 평가가 기존방법이었다. Wakiwaka 등⁽¹⁾은 나이론과 CNT를 혼합한 화합물을 제작하여 Fig. 1과 같이 와전류를 이용한 비접촉식 측정원리로 CNT 화합물의 혼합비 범위 0.1% ~ 20%에 대한 동일성을 평가하였다. Wakiwara의 방법은 혼합비가 5%이거나 그 이하이더라도 정확한 측정이 가능하다. 게다가 상기 방법은 결과 차의 확대를 통해 0.1%의 차이도 구별할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최근까지 입자강화 금속기 복합재료에 한정되어 제한적으로 수행되는 와전류 탐상을 튜브형태의 CFRP 복합재료로 확대할 수 있는 방안을 모색하였다. 본 저자는 선행연구⁽²⁾를 통해 노치형상 및 결함의 깊이 변화에 따른 와전류 신호를 거시적으로 평가할 수 있게 되었고, 초음파 C-스캔 3차원 해석도 가능하게 되었다. 그러나 CFRP에 부하가 가해진 경우 그에 따른 손상거동과 와전류 신호의 변화를 평가한 연구는 아직까지 보고된 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 무부하 CFRP 튜브 및 레이디얼 하중이 가해진 부하 CFRP 튜브를 이용하여 결함 깊이 변화에 따른 와전류 신호 거동을 비교·평가하였다.

2. 와전류 탐상을 이용한 이방성 섬유강화복합재료의 탐상

CFRP 튜브의 재료로 사용된 UD Carbon/epoxy prepreg (USN-150, SK Chemical Co.)의 기계적 특성은 Table 1 과 같다. 시험편의 중방향과 섬유방향을 일치시켜 중방향의 기계적 특성을 강화하였다. CFRP 프리프레그와 같이 수지함유율이 40% 이상 되는 경우에는 전기전도도가 극히 낮아져 와전류 탐상이 불가능해지나, 본 연구자가 개발한 방법으로 시험편의 전기전도도를 향상시켰다. 시험편에 존재하는 원공결함은 미소드릴을 이용하여 지름을 1.5 mm로 하고 깊이를 시험편 두께대비 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 가공하였다. 실험절차는 Gerhard 등⁽³⁾의 보고를 응용하여 Fig. 2와 같이 수행하였다. 무부하 시험편과 레이디얼 하중이 가해진 부하 시험편을 각기 다른 탐상조건 하에서 수행하였다. 본 실험에 적용

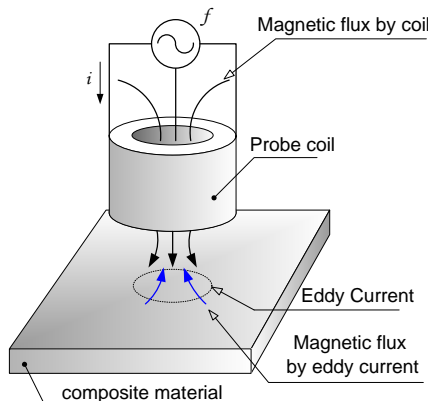


Fig. 1 Principle of non-contact measurement by eddy current

된 최적탐상조건은 Table 2와 같다. 부하 시험편은 무부하 시험편에 비해 탐촉자 회전수와 샘플검출수를 낮게 설정하고, 검출 주파수는 높게 설정하여 정확한 신호검출을 유도하였다.

3. CFRP 튜브의 하중조건에 따른 와전류 탐상평가기법

예비실험에서 다음의 결과를 얻을 수 있었다. 1) 저주파 영역은 신호대 잡음비(S/N비)가 낮아 결함검출이 불가능하였지만, 고주파영역은 결함검출이 가능하였고, 특히 300 kHz가 최적의 결함검출 주파수로 나타났다. 2) 결함의 깊이가 깊을수록 위상각(phase angle)은 저하하고 와전류 진폭은 증가하였다. 3) 결함 깊이가 시험편 두께대비 40% 이상일 때는 초음파 C-스캔 3차원 결함해석이 가능하였다. 4) CFRP의 강한 이방성과 자기벡터 포텐셜(magnetic vector potential)의 영향으로 원주방향 결함은 다소 왜곡되게 나타났다. 이상의 내용에서 CFRP의 섬유방향 및 강한 결함성에 대한 미시적 관찰은 Fig. 3과 같이 R. Lange 등⁽⁴⁾의 연구결과와 잘 부합됨을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 상기 내용을 바탕으로 무부하 시험편과 레이디얼 하중을 받은 부하 시험편의 와전류 신호를 비교해 보았다. 레이디얼 하중이 가해진 부하 시험편은 원공결함부 뿐만 아니라 시험편 전체에 걸쳐 무수히 많은 미세균열, 크레이지, 층간분리가 발생한다. 따라서, 스트립 차트 상에서 결함신호를 검출해내기는 불가능하였다. 그러나 300~500 kHz의 고주파 영역에서 신호를 확대한 후, 노이즈 성분의 위상각을 180° 로 설정하고 노이즈 성분을 소거한 결과 Fig. 4와 같은 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 4는 다중주파수 방식을 사용해서 여타신호 및 노이즈는 제거하고 결함신호만을 추출한 것이다. Fig. 4에서 (i)은 레이디얼 하중이 가해지기 전인 무부하 시험편을 탐상한 결과이고, (ii)는 레이디얼 하중에 의해 영향을 받은 부하 시험편의 탐상 결과이다. Fig. 4 (i), (ii)에서 상단은 신호의 리사주도형(Lissajous figure)을 나타낸 것이고 하단은 MRPC 탐촉자가

Table 1 Mechanical properties of CFRP prepreg (SK Chemical Co.)

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	ν_{21}	G_{12} (GPa)	X_t (MPa)	Y_t (MPa)	S (MPa)
120	7.5	0.31	0.02	3.2	2200	30	120

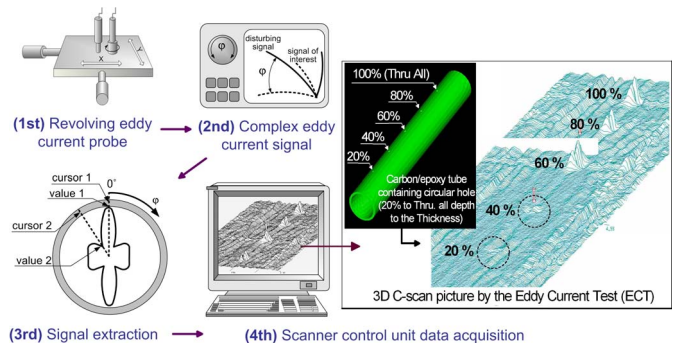


Fig. 2 Eddy current visualization system for the CFRP laminated tube

Table 2 Experimental setup of ECT equipments

Contents	Un-loading specimen	Loading specimen
MRPC probe RPM	520	400
Optimal frequency (kHz)	300	300~500
Sampling rate (samples/sec)	1391	800
Test speed (in/min)	0.2	0.2

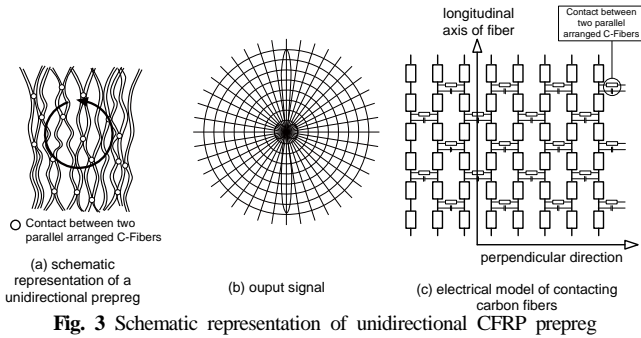


Fig. 3 Schematic representation of unidirectional CFRP prepreg

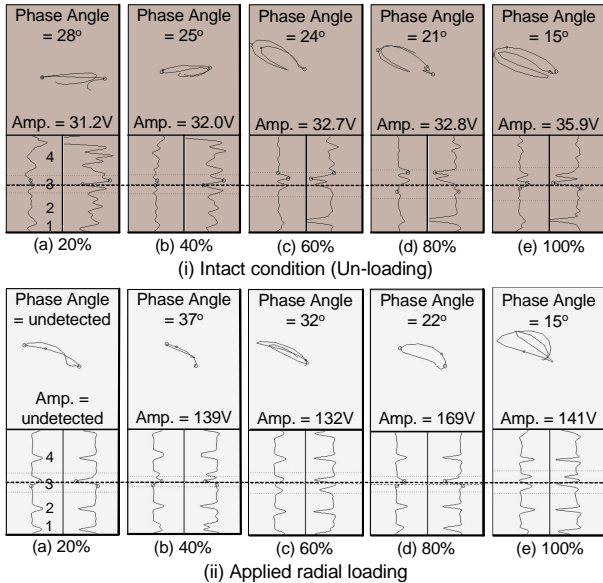


Fig. 4 Results of the phase angle measurement by the Lissajous figures

1회전하면서 수집한 신호를 증폭한 것이다. 원공결함 신호는 탐촉자 1회전당 4회의 신호가 검출된다. 결함신호가 비교적 잘 검출되는 무부하 시험편(Fig. 4(i))에서는 3번 신호에서 원공결함을 검출할 수 있었다. 그러나 부하 시험편은 1~4번 전체에서 결함신호, 노이즈, 미세균열신호가 복합적으로 발생하여 결함검출이 매우 어려웠다. 무부하 시험편과 부하 시험편의 탐상 결과를 비교해보면 다음과 같다. 1) 부하 시험편의 관통결함(100%)은 미세균열, 층간분리 등에 의한 신호와 교란되지 않고 무부하 시험편과 유사한 탐상신호 결과가 나타났다. 그 이유는 적층재인 CFRP 튜브의 특성상 균열 및 층간분리가 시험편 두께 전체에 걸쳐 연속적으로 나타나지 않고 불연속 구간이 존재하기 때문에 관통결함 신호와는 구분이 가능하였다. 그 결과, 무부하 시험편 및 부하 시험편 모두 위상각 15°에서 유사한 리사쥬 도형이 나타나고 전형적인 원공결함 신호 형태가 나타났다. 2) Fig. 5의 위상각과 결함깊이의 관계를 나타낸 그래프를 살펴보면 80% 결함도 무부하 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 간의 위상각 차이가 심화된다. 즉, 결함깊이가 낮아질수록 위상각의 편차는 심화되고, 부하 시험편의 위상각 증가 또한 급격히 이루어진다. 따라서 60% 이하의 결함은 미세균열에 크게 영향을 받아 와전류 신호 탐상이 어려워졌고 20% 결함은 위상각의 설정이 불가능했다. 그러므로 시험편 전체에 고루 발생된 미세균열은 시험편 두께방향으로 60% 이하의 크기임을 유추할 수 있다. 왜냐하면 80%, 100% 결함에서는 미세균열의 영향을 받지 않고 결함신호의 탐상이 가능하였기 때문이다. 4) Fig. 6에서 와전류 진폭(V)과 결함깊이의 관계를 살펴보면, 무부하 시험편은 결함의 깊이가 깊어질수록 와전류 진폭이 서서히 증가함을 관찰할 수 있다. 그 이유는 와전류는 교류이므로 시편 표면에서 많이 흐르고 내부로 갈수록 감소하기 때문이다. 와전류는 주파수, 전기전도도, 자기투자율의 함수로 결정되므로 이 인자들이 증가함에 따라 침투깊이는 감소한다. 즉, 주파수 또는 와전류 진폭이

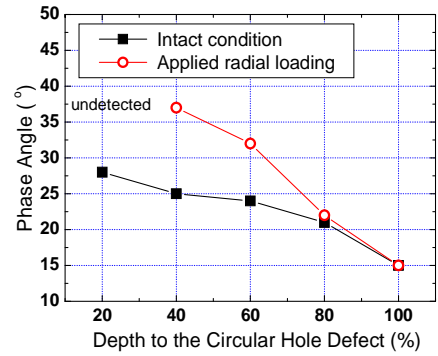


Fig. 5 Relationship between the phase angle and depth to the circular hole defects in intact specimen vs. radial loading specimen

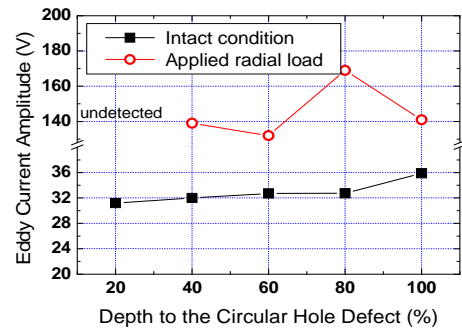


Fig. 6 Relationship between the EC amplitude and depth to the circular hole defects in intact specimen vs. radial loading specimen

낮을수록 침투깊이는 깊어지나 결함에 대한 감도가 저하되므로 측정하고자 하는 침투깊이를 만족하면서 가능한 높은 주파수 및 와전류 진폭을 선정해야 한다. 따라서 결함의 깊이가 깊어질수록 와전류 진폭이 증가하는 것이다. 그러나, 부하 시험편은 발생된 균열, 층간분리 등에 의한 노이즈의 영향으로 와전류 진폭과 결함깊이의 관계가 매우 불규칙적임을 알 수 있다.

4. 결론

- 1) 부하 시험편은 300~500 kHz의 고주파 영역에서 신호를 확대한 후, 노이즈 성분의 위상각을 180°로 설정하고 노이즈 성분을 소거한 결과 두께대비80% 이상의 결함에서 무부하 시험편과 유사한 와전류 신호를 검출할 수 있었다.
- 2) 시험편 두께대비 100%, 80% 결함은 무부하 시험편과 부하 시험편이 유사한 위상각과 리사쥬 도형이 나타났다. 그러나 60% 이하의 결함부터는 무부하 시험편과 부하 시험편 간의 위상각 차이가 점차 심화되었다. 따라서, 60% 이하의 결함은 미세균열에 크게 영향을 받아 와전류 신호 탐상이 매우 어려워졌고 20% 결함은 탐상이 불가능했다.
- 3) 부하 시험편 전체에 고루 발생된 미세균열은 시험편 두께방향으로 60% 이하의 크기임을 유추할 수 있다. 그 이유는 80%, 100% 결함에서는 미세균열의 영향을 받지 않고 무부하 시험편과 유사한 결함신호를 탐상할 수 있었기 때문이다.

참고문헌

1. H. Wakiwaka, M. Kodani, M. Endo, Y. Takahashi, "Non-contact Measurement of CNT Compounding Ratio in Composite Material by Eddy Current Method," *Sensors and Actuators A*, 129, pp.235-238, 2006.
2. C. W. Kim, J. S. Lee, T. G. Um, H. K. Ahn and I. Song, "Evaluation of Delamination Using a Eddy Current Testing for Hybrid Composite Material," *The 4th Korea-Japan Joint Symposium in Composite Materials*, pp.25-26, 2003.
3. Gerhard Mook, Rolf Lange, Ole Koeser, "Non-destructive Characterisation of Carbon-fiber-reinforced Plastics by Means of Eddy-currents," *Composites Science and Technology*, 61, pp.865-873, 2001.
4. R. Lange and G. Mook, "Structural Analysis of CFRP using Eddy Current Methods," *NDE&E International*, Vol.27, No.5, pp.241-247, 1994.