

CFRP 튜브의 결함형상·결함깊이·레이디얼 하중에 따른 와전류 신호의 변화

김철웅[†] · 송삼홍* · 안형근*** · 이정순*** · 오동준** · 송 일***

(2004년 8월 23일 접수, 2004년 10월 25일 심사완료)

Variation of Eddy Current Signal According to the Defect Shape, Defect Depth and Radial Load in CFRP Tube

Cheol-Woong Kim, Sam-Hong Song, Houg-Kun Ann, Jeong-Soon Lee, Dong-Joon Oh and Il Song

Key Words: Eddy Current Signal(와전류 신호), CFRP Tube(탄소섬유강화 플라스틱 튜브), MRPC Probe(MRPC 탐촉자), Saw-cut Defect(소컷결함), Circular Hole Defect(원공결함), Signal to Noise Ratio(신호대 잡음비, S/N비), Phase Angle(위상각), Lissajous Figure(리사쥬 도형), Radial Load(레이디얼 하중), Delamination(층간분리)

Abstract

The applicability of the ultrasonic C-scan inspection is restricted due to the deterioration of mechanical properties of specimen during the test. Therefore, the aim of this research is applied to Eddy Current (EC) test substitute for the C-scan inspection in CFRP tube containing defects. This research is to evaluate the EC signals for the inspection of CFRP tube containing various circular hole defects (20% to 100% depth to the specimen thickness) using the unloading specimen and radial loading specimen. This study was considered the following points; 1) Analysis of EC signals for the inspection of saw-cut defect and circular hole defect, 2) The evaluation of defect depths and EC signals relationship. 3) Variation of EC signal owing to the radial load. In conclusions, the high frequency such as 300~500 kHz made it possible to the inspection of 40% to 100% defects. Particularly, in case of 20% defect, the EC signal was not detected due to the noise of micro-crack and delamination. While the depth of the hole defects were decreasing, the difference of the phase angle between unloading specimen and radial loading specimen was gradually increasing.

1. 서 론

최근들어 탄소섬유강화 플라스틱(이하, CFRP)의 활용방안이 극대화되면서 기계적 강도와 부식 저항 특성이 우수한 CFRP 튜브에 대한 활용방안이 구체화되고 있다. 따라서 튜브형태의 CFRP

적층재의 기계적 특성 및 피로거동에 대한 연구는 매우 중요하다. CFRP 적층재의 피로에 의한 파손은 반복하중에 의한 결함·균열·층간분리 등의 국부적 손상이 재료 전체의 피로저항성을 악화시키는 형태가 대표적이다. 따라서, CFRP 손상부의 비파괴적 관찰기법은 부하초기부터 끝까지 동일한 시험편을 이용하여 결함부의 변화양상을 관찰해야만 정확하고 일관된 결과를 유도할 수 있다. 현재, CFRP 적층재의 결함부 관찰을 위한 비파괴적 탐상기법은 주로 초음파 C-스캔 탐상법을 이용하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나 초음파 C-스캔 탐상은 접촉매질로 물을 사용하는 수침법이기에 때문에 탐상과 동시에 CFRP 적층재의 기계적 특성

† 책임저자, 회원, 고려대학교 공학기술연구소
E-mail : woong25@korea.ac.kr
TEL : (02)928-3608, FAX : (02)926-9290

* 회원, 고려대학교 기계공학과

** 회원, 안동대학교 기계교육과

***세안기술(주) 기술연구소

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 결함검출에 적용해 보았다. ECT는 검사속도가 빠르고 접촉매질이 필요 없는 직접접촉법을 취한다. 따라서, 동일 시험편을 매단계 적용하여도 탐상으로 인한 시험편의 손상 및 기계적 특성 저하가 발생하지 않는 장점이 있다.^(5,6) 그럼에도 불구하고 국내외적으로 ECT를 이용한 섬유강화 복합재료의 결함검출에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없다. 왜냐하면 입자강화 금속기 복합재료는 와전류 탐상이 가능하지만,⁽⁷⁻⁹⁾ 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 결함의 형상, 결함의 깊이, 레이디얼 하중에 따른 와전류 신호의 변화를 정량적으로 파악하였다. 본 연구에서 수행된 세부적인 내용은 다음과 같다. 1) 와전류 탐상을 위한 CFRP 튜브의 개발, 2) 소켓결함의 방향에 따른 와전류 신호 분석, 3) 원공결함의 깊이변화(시험편 두께대비 20%~100%)에 따른 와전류 신호의 분석, 4) 레이디얼 하중에 의한 원공결함 신호의 변화 등이다.

2. CFRP 튜브 시험편 제작 및 실험방법

2.1 CFRP 튜브의 제작

본 연구에서 사용된 CFRP 튜브는 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(prepreg)로 제작하였으며 기계적 특성은 Table 1과 같다. 시트형태의 프리프레그를 튜브형태로 가공하였다. 이때 축방향과 섬유방향을 일치시켜 축방향의 기계적 특성을 강화하였다. 탄소섬유 자체는 전기전도도가 비교적 양호하여 와전류 탐상이 가능하지만,⁽¹⁰⁾ 탄소섬유 프리프레그와 같이 수지 함유율이 약 40% 이상 되는 경우에는 전기전도도가 극히 낮아져 와전류

Table 1 Mechanical properties of CFRP prepreg (USN-150, SK Chemical Co.)

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

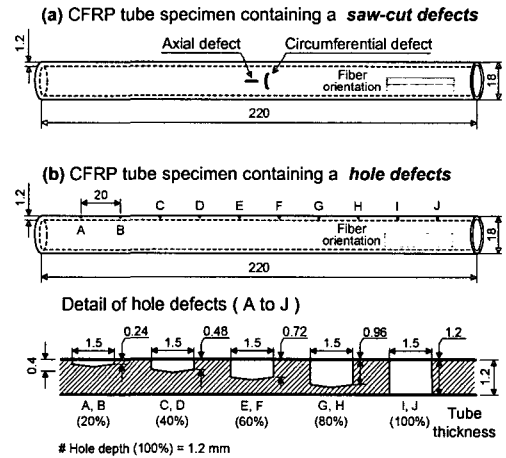


Fig. 1 Geometries of CFRP tube specimen

탐상이 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 아니었다. 시험편의 경화 조건은 80℃에서 30분간 예열을 거쳐 수지계의 가교형성을 촉진하였고, 130℃에서 60분간의 경화과정과 160℃에서의 후경화과정을 거쳐서 화학적·기계적으로 안정적인 시험편을 제작하였다.

2.2 소켓결함과 원공결함의 제작

결함의 형상 및 결함의 깊이변화에 따른 와전류 신호의 변화를 평가하기 위해 Fig. 1(a), (b)에 제시한 바와 같이 소켓결함과 원공결함을 내재한 CFRP 튜브 시험편을 제작하였다. Fig. 1(a)와 같이 시험편 중앙부에 길이 10mm, 두께 1mm 크기의 축방향 소켓결함과 원주방향 소켓결함을 가공하였고, Fig. 1(b)와 같이 원공결함의 깊이 변화에 따른 와전류 신호를 분석하기 위해 원공결함

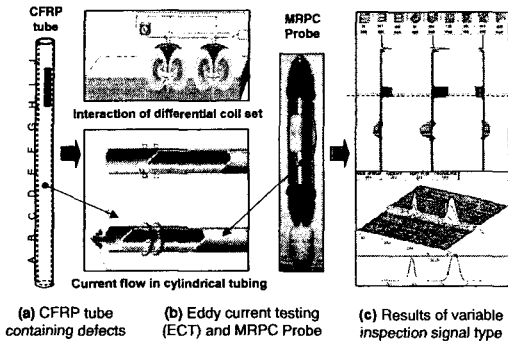


Fig. 2 Schematic illustration of Eddy Current Testing (ECT) for CFRP tube specimen

Table 2 Experimental setup of ECT equipments

contents	Unloading specimen	Loading specimen
MRPC probe RPM	520	400
Optimal frequency (kHz)	300	300~500
Sampling rate (samples/sec)	1,391	800
Test speed (in/min)	0.2	0.2

의 지름은 1.5mm로 동일하게 하고, 결함깊이는 시험편 두께 대비 20%(0.24mm), 40%(0.48mm), 60%(0.72mm), 80%(0.96mm), 100%(1.20mm)로 가공하였다.

2.3 CFRP 튜브의 와전류 탐상

와전류 탐상장치는 미국 ZETEC 사의 MIZ-30 Digital Data Acquisition System과 EddyNet98 Data Analysis System을 사용하였다. 전기전도도 특성을 개선시킨 CFRP 튜브의 와전류 탐상시험 순서는 Fig. 2에 제시한 바와 같다. Fig. 2(b)와 같은 MRPC 탐촉자를 이용하였고, 떠오름(lift-off) 효과를 최대한 억제시켰다. 무부하 시험편의 결함검출과 부하시험편의 결함검출 조건이 다르기 때문에 시행착오법을 통해 와전류 탐상 장치의 최적 조건을 찾을 수 있었다. 본 연구의 와전류 탐상 최적조건은 Table 2와 같다. 여기서, 무부하 시험편의 탐상조건은 레이디얼 하중이 가해지기 전 상태를 탐상한 것이고, 부하시험편의 탐상조건은 레이디얼 하중이 가해진 후의 상태를 탐상한 것

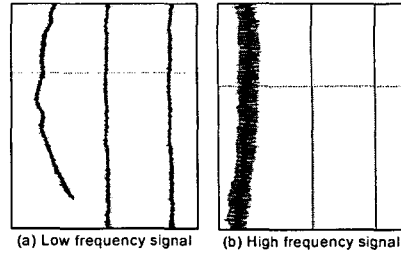


Fig. 3 EC signal results for inspection of saw-cut defect in CFRP tube without treatment

이다. 레이디얼 하중이 가해진 후 부하시험편은 전체적으로 미세균열, 층간분리 등이 발생되었다. 이러한 인자가 원공결함보다 상대적으로 클 경우 결함신호 검출을 매우 어렵게 한다. 따라서, 부하시험편은 무부하 시험편에 비해 탐촉자의 회전수와 샘플 검출수를 낮게 설정하고, 검출 주파수는 높게 설정하여 정확한 신호검출을 유도하였다. MRPC 코일에는 2개의 팬케이크 코일(pancake coil)과 1개의 플러스 포인트 코일(plus point coil)이 있는데, 무부하 시험편 및 부하 시험편 모두 플러스 포인트 코일에서는 결함신호가 확연하게 나타났으나, 팬케이크 코일에서는 신호검출이 다소 어려웠다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 와전류 탐상을 위한 CFRP 튜브의 개발

CFRP 프리프레그는 수지함유율이 40% 이상되므로 와전류 탐상이 불가능하다. Fig. 3은 CFRP 프리프레그만을 이용하여 CFRP 튜브의 소켓결함 검출을 시도한 결과이다. 저주파수인 경우[Fig. 3(a)], 고주파수인 경우[Fig. 3(b)] 모두 결함신호 검출이 불가능하였다. 따라서, 2.1절에서 언급한 방법으로 CFRP 튜브를 제작하고 소켓결함 탐상을 다시 시도한 결과 Fig. 4와 같은 결함신호를 얻을 수 있었다. 또한, 깊이가 다른 원공결함을 검출한 결과 Fig. 5와 같은 결함신호를 얻을 수 있었다. 결함형태, 결함깊이에 관계없이 시험주파수 100Hz, 300Hz, 500Hz, 1kHz의 저주파수에서는 결함검출이 불가능했고, 100kHz, 300kHz, 500kHz의 고주파수에서는 결함검출이 가능했다. 특히, 300kHz에서 가장 우수한 신호대 잡음비(signal to noise ratio, S/N ratio)가 나타났다.

3.2 소켓결함의 방향에 따른 와전류 신호 분석

CFRP 튜브에 내재된 소켓결함의 방향에 따른 와전류 신호를 평가한 결과, Fig. 4와 같이 나타났다. Fig. 4는 CFRP 튜브의 소켓결함을 축방향과 원주방향으로 완전관통하게 가공하여 탐상한 결과이다. Fig. 4(a)는 원주방향 소켓결함의 탐상 신호이고, Fig. 4(b)는 축방향 소켓결함의 탐상신

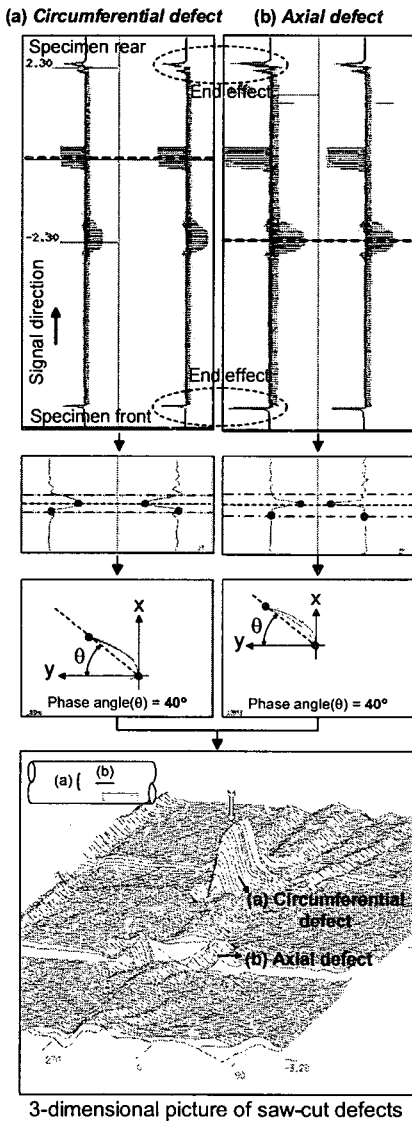


Fig. 4 ECT results for inspection of saw-cut defect in CFRP tube with treatment, (a) circumferential direction defect, (b) axial direction defect

호이다. 축방향 소켓결함의 신호가 원주방향 소켓결함 신호보다 길게 나타난 이유는 탐촉자가 회전하며 축방향으로 이동하므로 결함탐지 시간이 원주방향 결함보다 길어졌기 때문이다. 한편, CFRP 튜브의 경우, 표준시험편이 아직 개발되지 않은 상태이므로 위상각(phase angle)은 두 경우 모두 임의로 40°를 취하였다. 이때 결함신호는 축방향, 원주방향 모두 유사한 형태를 나타냈다. 소켓결함은 실제 재료 내부에 발생할 수 있는 균열을 모사한 것으로 대부분 폭이 작고 깊이만 존재하기 때문에 3차원 그림을 통한 분석이 필요하다. 따라서, Fig. 4 상단의 A-스캔 정보를 3차원으로 표현하면 Fig. 4의 하단그림과 같이 나타난다. A-스캔에서 얻은 정보와 달리 원주방향 결함과 축방향 결함이 확연히 다른 형태로 나타남을 알 수 있다. 원주방향 소켓결함은 돌출형으로 나타났고, 축방향 소켓결함은 함몰형으로 나타났다. 소켓결함의 크기는 동일하지만 결함의 방향에 따라 확연히 다른 형상을 나타낸 이유는 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 첫째, 본 연구에서 사용된 보빈(bobbin)형 와전류 코일에서의 마그네틱 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)의 방향성분은 대부분 원주방향으로 구성되며, 축방향의 분포는 코일의 위치에서 약간 벗어남에 따라 $\exp(r/\delta)/r$ 의 함수로 급격히 감소하기 때문이다.⁽¹¹⁾ 따라서 원주방향 결함은 원주방향으로 두 신호원이 존재하므로 마그네틱 벡터 포텐셜의 합 이외에 간섭성분도 고려되어 실제보다는 과장된 3차원 그림이 나타난 것으로 판단된다. 둘째, CFRP 튜브는 일반 금속재 튜브와 달리 강한 이방성을 나타내므로 이러한 특성이 와전류 탐상 신호에 반영된 결과라 생각된다.

3.3 원공결함의 깊이변화에 따른 와전류 신호 분석

CFRP 튜브의 원공결함 깊이에 따른 와전류 신호의 변화를 분석하기 위해서 Fig. 5와 같이 나타내었다. Fig. 5의 상단그림은 MRPC 탐촉자가 시험편 전체를 관통하면서 발생시킨 와전류 신호를 나타낸 것이고, 중간그림은 전체신호 중 결함부의 신호만을 증폭한 것이다. 하단그림은 원공결함의 깊이에 따른 결함신호 및 위상각을 나타낸 것이다. 완전관통 결함을 100%라 했을 때, 60% 이상의 결함에서는 결함검출에 대한 신호가 비교

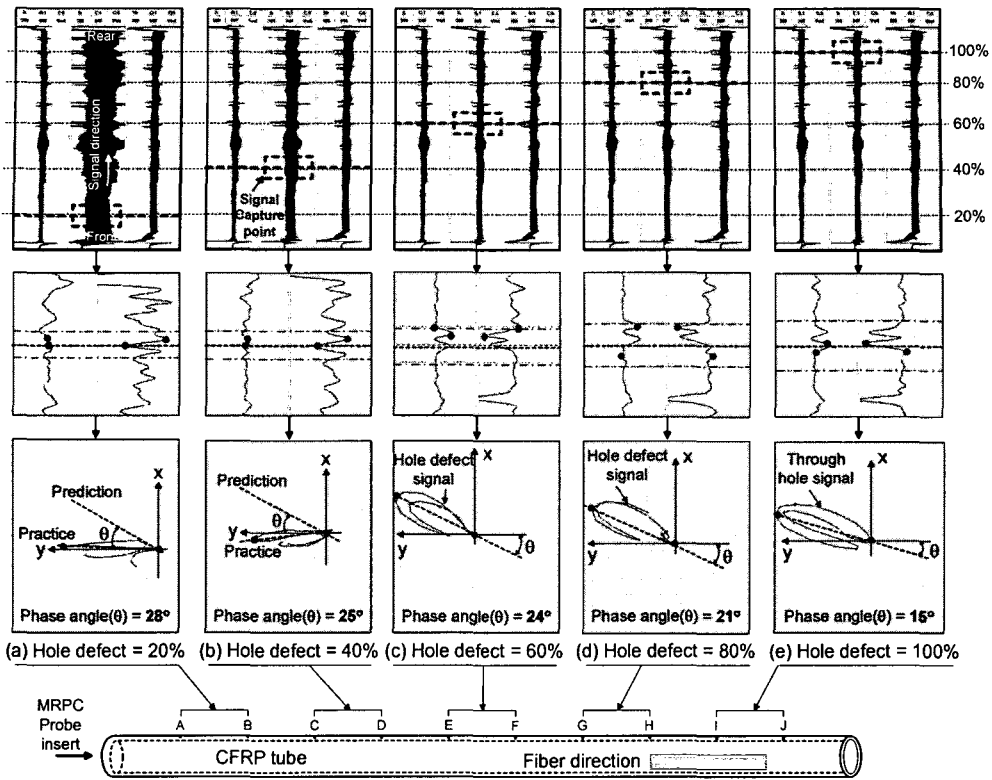


Fig. 5 The results of ECT inspection of the circular hole defects (20% to 100% depth to the CFRP tube thickness)

적 잘 관찰되었다. 그러나 40% 결함의 경우는 미약하게 관찰되었고, 20% 결함의 경우는 관찰이 거의 불가능하였다. Fig. 4 및 Fig. 5는 다중주파수 방식을 사용하여 여타신호 및 노이즈는 제거하고 결함신호만을 추출한 것이다. 이러한 주파수 혼합과정은 서로 다른 주파수에서 결함신호만을 취한 후 위상각 이동 및 진폭 조절을 통해 상호 관계성이 일치하도록 조정하여 산술적인 감산을 행한 것이다. 따라서, Fig. 5에서 얻어진 결함의 깊이에 따른 와전류 진폭, 위상각과의 관계는 Fig. 6과 같이 정리할 수 있다. Fig. 6에서 결함의 깊이가 깊어질수록 위상각은 저하하고, 와전류 진폭은 서서히 증가함을 관찰할 수 있다. 그 이유는 와전류는 교류이므로 시편의 표면에서 많이 흐르고 내부로 갈수록 감소하는 현상이 있기 때문이다.⁽¹²⁾ 또한, 와전류는 주파수, 전기전도도, 자기투자율의 함수이므로 이들이 증가함에 따라 침투깊이는 감소한다. 즉, 주파수 또는 와전류 진폭이 낮을수록 침투깊이는 깊어지나 결함에 대한 감도가 저하되므로 요구되는 침투깊이를 만족하

면서 가능한 높은 주파수 및 와전류 진폭을 선정해야 한다. 그러므로 결함의 깊이가 깊어질수록 와전류 진폭은 증가한다. Fig. 7은 CFRP 튜브의 두께 대비 20%, 40%, 60%, 80%, 100% 깊이의 원공결함을 3차원 형태로 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 두께 대비 100% 원공결함을 기준으로 위상각과 와전류 진폭을 설정하였기 때문에 60% 이상의 원공결함은 비교적 양호한 3차원 결함정보를 얻을 수 있었다. 그러나 20%, 40% 결함에 대해서는 3차원 결함정보를 유도하기 힘들었다.

3.4 레이디얼 하중에 의한 원공결함의 신호 변화
본 절에서는 원공결함의 깊이에 따른 와전류 신호가 레이디얼 하중을 받은 시험편에서는 어떻게 달라질 것인가에 대해 평가해 보았다. 변형량 5mm의 레이디얼 하중이 가해진 부하시험편은 원공결함부 뿐만 아니라 시험편 전체에 걸쳐 무수히 많은 미세균열, 크레이지, 층간분리가 발생하였다. 따라서, 스트림차트 상에서는 결함신호 검출이 불가능하였다. 그러나 300~500 kHz의 고주파 영역에서 신호를 확대한 후, 노이즈 성분의 위상각을 180°로 설정하고 노이즈 성분을 소거

결과, Fig. 8과 같은 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 8(i)은 부하가 가해지지 않은 시험편을 탐상한 결과이고, Fig. 8(ii)는 레이디얼 하중이 작용된 후의 부하시험편 탐상 결과이다. Fig. 8(i), (ii)에서 상단그림은 와전류 신호의 리사주 도형(Lissajous figure)을 나타낸 것이고, 하단그림은 MRPC 탐촉자가 1회전하면서 수집한 신호를 증폭한 것이다. 원공결함 신호는 탐촉자 1회전당 4회의 신호가 검출된다. 결함신호가 비교적 잘 검출되는 무부하 시험편에서는 3번 신호에서 원공결함을 검출할 수 있었다. 그러나 부하 시험편에서는 1-4번 전체에서 결함신호, 노이즈, 미세균열신호가 복합적으로 발생하여 결함검출이 매우 어려웠다. 따라서, 무부하 시험편을 기준으로 판독한 결과 3번 신호에서 결함신호 검출이 가능하였다.

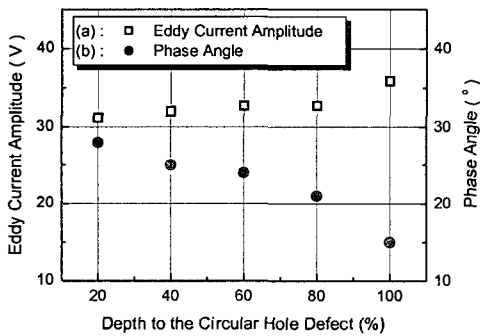


Fig. 6 The Influences of depth to the circular hole defect on the EC amplitude and the phase angle

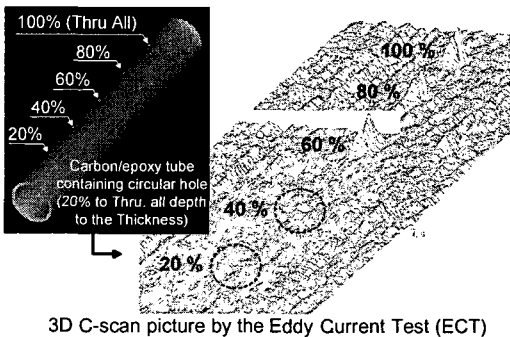


Fig. 7 Three dimensional picture by the ECT in CFRP tube containing circular hole defects (20% to 100% depth to the thickness)

Fig. 8의 결과를 이용하여 Fig. 9와 Fig. 10의 그래프를 얻을 수 있었다. Fig. 9는 원공결함 깊이에 따른 위상각의 변화를 비교한 그래프이고, Fig. 10은 원공결함 깊이에 따른 와전류 증폭의 변화를 비교한 그래프이다. Fig. 8~Fig. 10의 결과를 이용하여 무부하 시험편과 부하 시험편의 와전류 탐상 특성을 비교해보면 다음과 같다. 1) 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 리사주 도형이 나타나고 전형적인 원공결함 신호 형태가 나타났다. 2) Fig. 9를 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 시험편 간의 위상각의 편차는 심화되고, 부하 시험편의 위상각 증가 또한 급격히 이루어짐을 알 수 있다. 따라서, 60% 이하의 결함은 미세균열과 층

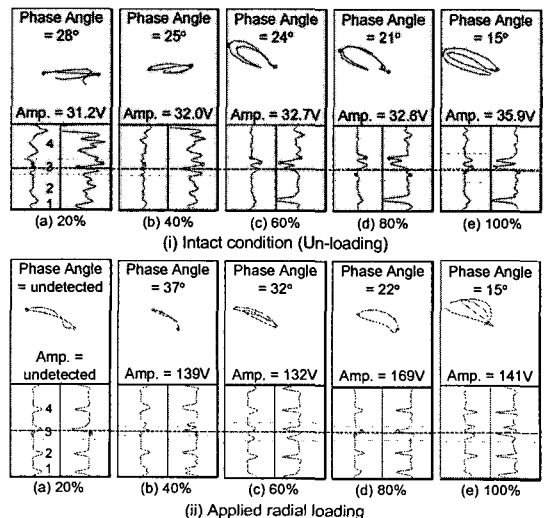


Fig. 8 The results of the phase angle measurement by the Lissajous figures

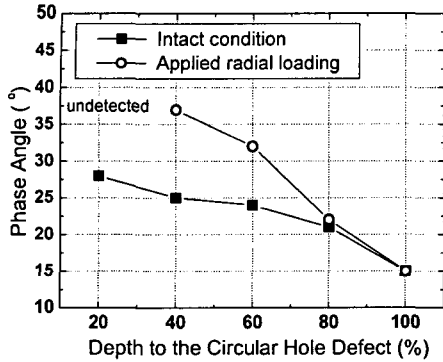


Fig. 9 Relationship between the phase angle and depth to the circular hole defects in intact specimen vs. radial loading specimen

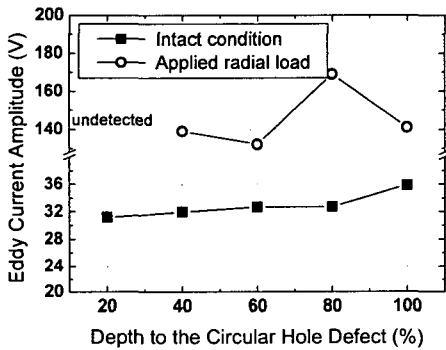


Fig. 10 Relationship between the EC amplitude and depth to the circular hole defects in intact specimen vs. radial loading specimen

간분리 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. 10에서 와전류 진폭(V)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 완전판통

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) 기존의 CFRP 튜브는 수지계의 전기전도도가 매우 낮아 와전류 탐상을 이용한 결함검출이 불가능하였다. 그러나, 본 연구에서 CFRP 튜브의 전기전도도를 향상시켜 시험편을 제작한 결과, 와전류 탐상을 이용한 결함검출이 가능하였다. 특히, 300kHz에서 가장 우수한 S/N비가 나타났고, 탐상신호도 가장 정확했다.

(2) 소켓결함의 위상각을 40°로 취했을 때 원주방향과 축방향 결함은 비슷한 A-스캔 신호가 나타났다. 그러나 3차원 C-스캔 이미지는 원주방향 결함이 돌출형, 축방향 결함이 함몰형으로 나타났다. 그 이유는 보빈형 와전류 코일에서 마그네틱 벡터 포텐셜이 원주방향으로 구성되어 영향을 미쳤기 때문이고, CFRP 튜브의 강한 이방성도 신호에 영향을 주었기 때문이다.

(3) 원공결함이 깊어질수록 위상각은 저하하고 와전류 진폭은 서서히 증가하였다. 와전류 진폭이 낮을수록 신호의 침투깊이는 증가하지만 결함에 대한 감도가 저하되므로 CFRP 튜브의 두께대비 60% 이상의 원공결함은 결함신호 검출이 용이하였으나, 20%, 40%의 원공결함의 신호검출은 불가능하였다.

(4) 레이디얼 하중이 가해진 부하 시험편은 시험편 전체에 미세균열, 크레이지, 층간분리 등이 발생하여 결함탐상이 매우 어려웠다. 그러나 300~500kHz의 영역에서 신호를 증폭하고 노이즈 성분을 소거한 결과, 시험편 두께대비 80% 이상의 결함에서는 결함신호 검출이 가능했다.

(5) 시험편 두께대비 80%, 100% 결함은 무부하 시험편 및 레이디얼 하중이 가해진 부하 시험편 모두 유사한 위상각과 리사쥬 도형을 나타냈다. 그러나 60% 이하의 결함에서는 무부하 및 부하 시험편 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) Song, S. H. and Kim, C. W., 2003, "The Fatigue Crack and Delamination Behavior on the Fuselage-Wing Intersection Containing Variable Notches," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 17, No. 8, pp. 1540~1546.
- (2) Song, S. H. and Kim, C. W., 2003, "The Fatigue Behavior and Delamination Properties in Fiber Reinforced Aramid Laminates, Case (I) AFRP/Al Laminates-," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 353~359.
- (3) Song, S. H. and Kim, C. W., 2003, "The Analysis of Fatigue Behavior Using the Delamination Growth Rate (da_D/da) and the Fbier Bridging Effect Factor (F_{BE}) in Al/GFRP Laminates," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 27, No. 2, pp. 317~326.
- (4) Kim, C. W., Song, S. H. and Oh, D. J., 2004, "Development of the Delamination Evaluation Parameters (I) -The Delamination Aspect Ratio and the Delamination Shape Factors-," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 11, pp. 1934~1942.
- (5) Gramz, M. and Stepinski, T., 1994, "Eddy Current Imaging, Array Sensors and Flaw Reconstruction," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 5, pp. 157~174.
- (6) Atherton, D. L. and Sullivan, S., 1986, "The Remote Field Through-Wall Electromagnetic Inspection Technique for Pressure Tube," *Materials Evaluation*, Vol. 44, pp. 1544~1550.
- (7) Liaw, P. K., Shannon, R. E. and Clark, W. G., 1990, "Fundamental Relationships Between Micro Structure and Mechanical Properties of Metal Matrix Composites," *TMS-AIME*, Warrendale, PA, pp. 581~615.
- (8) Liaw, P. K., Shannon, R. E., Clark, W. G. and Harrigan, W. C., 1992, "Cyclic Deformation, Fracture and Nondestructive Evaluation of Advanced Materials," *ASTM STP 1157*, pp. 251~277.
- (9) Jeong, H. J., 1998, "Nondestructive Determination of Reinforcement Volume Fractions in Particulate Composites: Eddy Current Method," *Journal of KSNT*, Vol. 18, No. 2, pp. 112~120.
- (10) Cheong, Y. M., 1993, "Eddy Current Testing (II)," *Journal of KSNT*, Vol. 13, No. 3, pp. 39~45.
- (11) Sager, A., 1981, "Eddy Current Characterization of Materials and Structures," *ASTM STP 722, G. Birnbaum and G. Free Eds., ASTM*, pp. 269~297.
- (12) Cheong, Y. M., 1994, "Introduction to Nondestructive Testing," *Journal of Korean Welding Society*, Vol. 12, No. 4, pp. 1~10.