

SAR를 이용한 다층 유전체의 비파괴 검사

Nondestructive Inspecting for Multilayer Dielectric Material using Synthetic Aperture Radar

김 성 덕*[★]

Sung-Duck Kim*[★]

Abstract

A microwave NDI(Nondestructive Inspecting) method, based on SAR(Synthetic Aperture Radar) for inspecting such internal flaws or physical damage of FRP(Fiber Reinforced Polymer), is proposed in this paper. When a microwave is incident perpendicularly toward a multilayer dielectric FRP material, it gives a good response for the interfaces or transverse cracks. Interface depths or defect positions can be presented from the reflection waves, as using SAR imagery technique. As a result, it can be shown that such a SAR system can effectively inspect the type, size, or location of flaws within FRP composite material.

요 약

이 논문에서는 FRP(Fiber Reinforced Polymer)의 내부 결함이나 물리적 손상을 검출하기 위하여 SAR(Synthetic Aperture Radar)를 이용한 마이크로파 비파괴 검사법(Microwave Nondestructive Inspecting)을 제안한다. 전파가 다층 유전체인 FRP에 수직으로 입사되면 계면이나 횡축 균열과 같은 결함에 좋은 반응을 나타낸다. 이때 반사파로부터 계면 깊이나 결함 위치를 SAR 이미지 기법으로 결함을 형상화할 수 있다. 그 결과, SAR 시스템으로 FRP 복합 소재 내부 결함들의 종류, 크기나 위치를 효율적으로 진단할 수 있음을 확인하였다.

Key words : Fiber Reinforced Polymer, Nondestructive Inspecting, SAR(Synthetic Aperture Radar), Multilayer Dielectric Material, Electromagnetic Model.

* Dept. of Electronic and Control Engineering,
Hanbat National University

★ Corresponding author

e-mail: sdkim@hanbat.ac.kr tel: 042-821-1135

Manuscript received Sep. 2, 2016; Revised Nov. 22 :

Accepted Dec. 7, 2016.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

FRP(Fiber Reinforced Polymer)는 탁월한 강도와 연성을 가진 소재로 무게가 철보다 매우 가볍고 내 부식성이 양호하며 또한 가공하기 쉬운 장점을 갖고 있다. 따라서 FRP는 항공기, 선박, 자동차분야는 물론 레저용품, 컨테이너, 군수용품 등 매우 다양한 분야에 급속하게 확장 응용되는 소재이다. FRP는 유전체로써 유리, 탄소 혹은 아라미드와 같은 섬유를 폴리머에 의해 강화시킨 재료다. 그러므로 직조된 라미네이트를 수지에 침전하거나 코어 또는 샌드위치 형태로 제조하므로

대부분은 다층구조(multilayer structure)이다. FRP의 내부 공기층이나, 접착면의 이탈, 라미네이트나 평판의 접착 불량 등이 발생할 수 있다. 또한 대부분의 복합소재에서 나타날 수 있는 횡축 균열과 같은 구조적 손상, 충격에 의한 변형, 굴곡 등도 나타난다[2].

신소재인 FRP는 결함을 측정하는 THz(Terahertz) 광학기법[2]은 내부 결함을 측정하는데 한계가 있고 초음파 검사법은 비접촉 방식이 아니다. 와전류법이나 x선 검사도 각각 측정감도 및 안전성에 문제가 있다[3]. 하지만 유전체의 내부 특성을 비접촉으로 검사할 수 있는 마이크로파 비파괴 검사(Microwave Nondestructive Inspection)가 유용하다[4]. 전통적인 마이크로파 NDI 기법은 대개 단일 표적을 측정하며, 해독하는데 숙련이 요구되며, 신호와 노이즈의 분별이 거의 불가능할 뿐만 아니라 검사 속도도 늦은 편이다. 따라서 검사 속도를 높이고 정밀도를 개선하며 검사 결과를 이미지로 표현할 수 있는 방법이 요구된다. 최근에는 합성개구레이더(SAR: Synthetic Aperture Radar) [4][5]로도 마이크로파의 표면 침투 특성을 이미지로 표현할 수 있게 되었다. SAR는 송신신호를 표적에 방사하고 돌아오는 반향신호 사이의 지연시간으로 표적의 거리를 자동으로 추정하는 시스템으로 그 결과를 이미지로 표현할 수 있다. 따라서 본 연구에서 다층 유전체 구조인 FRP의 횡축 균열과 같은 결함을 검출하기 위해 SAR 시스템을 도입한다. 균열, 곡면, 절단, 변형 등을 가진 시료들을 기하학적으로 수치화하고 이들 검출 결과를 2D SAR 이미지로 설계한다. 결함의 형태, 적용 전파의 대역, SAR에 의한 이미지 프로세스를 검토한다.

II. FRP 및 EM 모델

FRP는 탄소섬유나 유리섬유를 격자형으로 배열하여 폴리머나 플라스틱과 같은 수지를 이용하여 만든 얇은 천과 형태이다. 적층하거나 기포형 수지나 벌집형 샌드위치 등을 접착하여 제조함으로써 다층 구조이다[1]. FRP의 결함들은 주로 재료 내부에서 발생하고 크기가 매우 작다. 따라서 다층 구조의 FRP 내부까지 침투할 수 있는 신호원이 필요하고 또한 결함 특성에 의해 변화되는

신호를 검출하여 정량화할 수 있어야 한다. 그러므로 비접촉 방식이며 주파수 대역에 따라 시료의 내부까지 침투할 수 있는 마이크로파 검사법이 유용하다. 유전체인 FRP에 대해 적당한 주파수 신호를 사용하면 반사파의 정보로 결합위치나 깊이를 정밀하게 측정 가능하다.

FRP의 결함 대부분은 계면과 평행하게 횡축으로 발생한다. 따라서 마이크로파 특성이 계면이나 결함 부분에서 변화되는 반사파의 전파속도로 거리를 산출하여 결함의 형태나 구조를 판단할 수 있다. 이때 다층 유전체인 FRP 복합소재 내부의 결함에 대한 깊이, 길이 또는 면적 등은 마이크로파의 전파속도로 계산된 길이로 구해진다.

다층 유전체(multilayer dielectric slab)의 EM 모델은 유전체 벽 투과 레이더의 이미지 설계에 이용된다[6]. EM 모델은 SAR와 결합시켜 다층 결함을 2D 또는 3D로 구현할 수 있다. 결국 FRP 결함의 이미지 진단은 다층소재의 EM 모델과 SAR의 이미지 기법을 복합적으로 응용하는 방식인 것이다. 다층 유전체의 EM 모델은 잘 정립되어 있으므로 여기서는 자세한 기술은 생략한다[7].

III. SAR 측정시스템

SAR는 센싱 축과 병렬로 미지의 표적 방향으로 직접 주사되는 빔폭이 작은 안테나가 사용된다. 그림 1은 다층 복합소재 평판의 계면이나 횡축 결함을 검출하는 비파괴 검사 구조를 나타낸다[4][6]. 여기서 x , y 및 z 는 각각 해석목적으로 주어진 시료의 길이, 폭 및 깊이를 나타내고 그림 1은 y 를 고정시킨 상태이다.

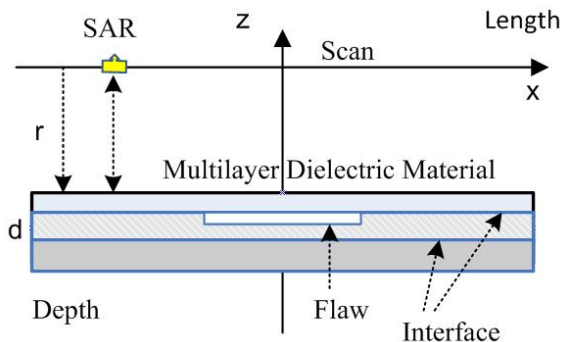


Fig. 1. A schematic diagram of NDT SAR.
그림 1. NDT SAR의 구성도

센서는 x 축인 2D 그리드를 따라 일정하게 움직이고 이때 레이더는 마이크로파를 다층 유전체 평판에 수직으로 입사한 후, 소재의 계면에서 돌아오는 반사파를 측정한다. 여기서 B 스캔 방식은 초음파 스캔 방식의 하나로 선형 위치에서 반사기의 깊이를 찾아내는 전통적인 결함 검출 방식을 의미한다.

본 연구에서는 다층 FRP의 EM 모델을 구현하기 위해 FMCW (frequency modulation continuous wave) SAR 이미지 기법을 이용한다. 일반적으로 FMCW 레이더는 다음과 같은 LFM(linear frequency modulation) chirp 신호를 전송한다[4,5,8].

$$s_t(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi\left(f_o + \frac{K_r}{2}t\right)t\right) \quad (1)$$

여기서 $T_p = BW/K_r$ 는 chirp 펄스반복시간(chirp pulse repetition time)이고 이때 K_r 는 LFM chirp 비율, BW 는 chirp 신호의 대역폭이다. t 는 거리 축에 의한 고속시간을 나타내고 f_o 는 중심주파수이다. 또한 $\text{rect}(t)$ 는 구형파 함수로 $|t| \leq T_p/2$ 영역에서만 1이고 나머지 구간에서는 0인 함수를 나타낸다.

수신신호는 거리가 R_n 인 n 번째 점표적에 대하여 송신신호가 $\tau_n = 2R_n/c$ 만큼 지연된다. 이와 같은 방법으로 반사파가 측정된다. 이러한 데이터를 이용하여 SAR 이미지를 얻게 되는데 이 결과가 시료의 계면 특성이다.

IV. 수치 해석

적층 구조로 제조된 FRP 평판을 가정하여 계면의 굴절, 절단이나 변형 등을 가정하여 수치 해석할 시료를 설계하였다. 시료는 길이, $L=100[\text{cm}]$, 폭, $W=12[\text{cm}]$ 로 하고, 계면 사이의 거리, 즉 두께를 표면으로부터 차례로 $d=1, 1$ 및 $2[\text{cm}]$ 인 3층 유전체로 가정하였다. 각층의 비유전율은 $\epsilon_r=4.0$ 로 균질의 FRP라 하고 도전율은 $\sigma=0$ 이라 한다. 우선, y 축을 고정시키고, x 축으로 센서를 이동시키면서 반사파를 수신한다. 이렇게 측정된 데이터를 이용하여 SAR 이미지 프로세스로 xz 에 대한 2D 이미지를 얻는다.

거리 감도는 chirp 신호로 설계된 전송신호의 대역폭으로 결정된다. 실용적인 FRP 재료들은 층간 두께가 mm 정도로 매우 얇기 때문에 계면이나 결합 위치에 대한 정확한 정보를 얻기 위하여 검출감도를 적당하게 유지하는 것이 중요하다. 범용 레이더에서는 마이크로파 대역 중에서 초광대역(ultra-wide band: UWB) 신호를 많이 사용한다. 일반적으로 주파수 대역폭에 의해 거리감도가 정해지므로 FRP 패널처럼 수 mm의 라미네이트를 적층하더라도 10[cm] 이하의 시료의 내부결함을 검출하는 경우에는 UWB로는 곤란하다. 가정된 FRP 시료에 대한 두께 등을 측정하기 위한 주파수 특성도 검토하기 위하여 K 대역에서 12[GHz]의 대역폭을 가진 FMCW를 가정하였다. 이 주파수 대역에서 거리 감도는 1.25[cm]이다. 또한 길이, x 축으로 0.5[cm]마다 이동하면서 측정한다고 가정한다.

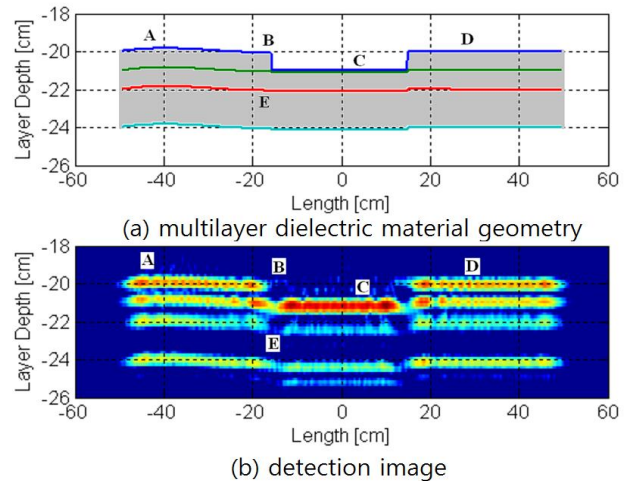


Fig. 2 A sample in the first layer having a cutting part on the center. (a) multilayer dielectric material geometry, (b) detection image.

그림 2. 제1층 중앙이 절단된 시료, (a) 다층 유전체 구조, (b) 검출 이미지.

FRP는 고강도를 가진 소재이므로, 적층된 소재에 심한 굴곡이 생기는 경우는 거의 없다. 센서의 이동 위치에서 입사파가 표면에 항상 수직인 것은 아니다. 이러한 경우는 표면에 굴곡이 생긴 경우와 유사한 특성의 신호들이 측정된다. 그림 2(a)는 시료에 약간의 굴곡이 발생하고 동시에 제1층의 중앙의 30[cm]가 절단된 시료를 기하학적으로 설계한 것이다. 이때 위치 A와 D는 3층 모두 곡면인 경우이고 B는 수직절단 위치, C 부분

은 절단부분이다. 측정시료와 SAR 센서 사이의 간격은 20[cm]로 비접촉 상태로 길이 방향으로 이동하며 시료의 계면 두께가 측정된다. 그림 2(b)는 그림 1의 SAR로 측정된 신호에 백색잡음이 혼재되었다고 가정하고 구한 계면결함 이미지다. 측정계면에서 약간의 편차가 나타났지만 굴곡 형태나 절단면의 특성은 확인할 수 있다.

한편, 2층 FRP 시료 제1층 내부에서 30[cm] 길이의 횡축균열이 발생한 경우의 xz 특성을 그림 3(a)에서 보여준다. 만약, 균열이 폭 전체에서 일정하게 발생하였다고 가정하여 y 축을 변화시키면서 xz 데이터를 측정할 수 있다. 이와 같은 데이터로부터 만약 z 축이 20 및 21[cm]인 경우에 그림 3(b)와 같은 xy 이미지를 얻을 수 있다.

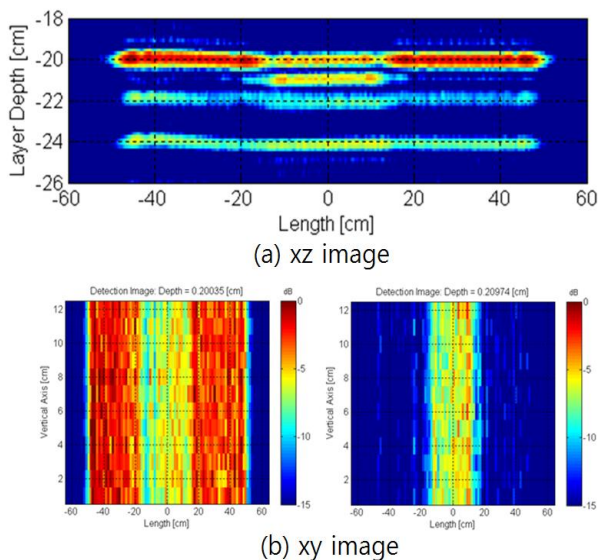


Fig. 3. Transverse crack. (a) xz image (b) xy image.
그림 3. 횡축 균열. (a) xz 이미지, (b) xy 이미지

V. 결론

전파를 시료에 방사하면 다층 유전체의 경계면에서 일부는 투과하고 일부는 반사된다. 시료 내부에 결함에서 반응하는 전파의 투과, 반사 특성으로부터 계면과 같이 결함의 위치를 거리로 환산할 수 있다. SAR는 송신신호를 표적에 방사하고 돌아오는 반향신호 사이의 지연시간으로 표적의 거리를 추정하는 시스템으로 표적을 이미지로 표현한다. 따라서 본 연구에서 다층 유전체 구조인 FRP의 횡축 균열과 같은 결함 검출을 위하여 SAR 시스템을 도입하였다. 균열, 곡면, 절단, 찌

그러짐, 변형 등을 가진 시료들을 기하학적으로 수치화하고 이들 검출 결과를 2D SAR 이미지로 설계하였다. 결함의 형태, 적용 전파의 대역, SAR에 의한 이미지 프로세스 등이 검토되었다. 그 결과, 다층 FRP 복합소재의 결함을 측정하는 비파괴검사 방법으로 SAR 시스템을 유용하게 응용할 수 있음을 밝혔다.

References

- [1] L .M. Gao, etc., "Sensing of damage mechanisms in fiber-reinforced composites under cyclic loading using carbon nanotubes," *Advanced Functional Materials*, vol. 19, no. 1, pp. 123-130, 2009.
- [2] F. Ospald, etc., "Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 3, pp. 1-14, 2014.
- [3] K. Dragan and W. Swiderski, "Studying efficiency of NDE techniques applied to composite materials in aerospace applications," *Acta Physica Polonica A*, vol. 117, no. 5, pp. 878-883, 2010.
- [4] E. Cristofani, etc., "In-depth high-resolution SAR imaging using omega-k applied to FMCW systems," *Proc. of the IEEE Radar Conference*, Atlanta, USA, pp. 725-730, 2012.
- [5] C. Ozdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [6] G. L. Charvat, etc., "A through-dielectric radar imaging system," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. vol. 58, issue 8, pp. 2594-2603, 2010.
- [7] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, Chapter 5-6, ECE Department Rutgers University, 2008.
- [8] T. Y. Lee, V. Skvortsov, and M. H. Ka, "Radar-based security system: Implementation for cluttered environment," *Journal of IKEEE*, vol.19, no.2, pp. 160~167, 2015.