

테라헤르츠 중첩 신호의 FWHM 분석을 통한 유리섬유 복합재료 내부 미세 박리 검출 기술

김헌수* · 박동운* · 김상일* · 김학성***†

Detection of Fine Delamination in Glass Fiber Reinforced Polymer Analyzing Full Width Half Maximum of Superimposed Terahertz Signal

Heon-Su Kim*, Dong-Woon Park*, Sang-Il Kim*, Hak-Sung Kim***†

ABSTRACT: Full width half maximum (FWHM) analysis of superimposed terahertz (THz) signals in the glass fiber reinforced polymer (GFRP) was studied to detect fine delamination inside GFRP. The THz signals were measured for each fine delamination size inside the GFRP using the reflection mode of the terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) system. Then, the FWHM of the superimposed THz signal reflected at the fine delamination was extracted. Thereafter, the complex refractive index of the GFRP was measured using transmission mode of the THz-TDS system. Based on this, the FWHM of the superimposed THz signal at the fine delamination were calculated and compared with respect to the fine delamination size. From the theoretically calculated superimposed signals, the relationship between the fine delamination size and the FWHM in the superimposed THz signal was derived. Consequently, the fine delamination size could be predicted through the analysis of the FWHM extracted from the THz signal at the fine delamination.

초 록: 유리섬유 복합재료(GFRP) 내부 미세 박리에서 나타나는 테라헤르츠(THz) 중첩 신호의 FWHM 분석을 통한 미세 박리 검출 기술을 연구하였다. 테라헤르츠 시간영역 분광(THz-TDS) 시스템의 반사모드를 통해 유리섬유 복합재료 내부의 미세 박리 크기 별 THz 신호를 측정하였고, 미세 박리 위치에서 반사되어 검출되는 THz 중첩 신호의 Full Width Half Maximum (FWHM) 값을 추출하였다. 이후, 유리섬유 복합재료의 복소굴절률을 측정하여 미세 박리 크기에 따른 미세 박리 위치에서의 THz 중첩 신호 및 FWHM 값을 계산하여 비교하였다. 이론적으로 계산된 THz 중첩 신호로부터 미세 박리 크기와 중첩 신호에서의 FWHM 값의 상관관계를 도출하였으며, 미세 박리 위치에서의 THz 신호로부터 추출된 FWHM의 분석을 통해 미세 박리 크기를 예측할 수 있었다.

Key Words: 비파괴검사(Non-destructive evaluation), 테라헤르츠(Terahertz), 복합재료(Composite materials), 미세 박리(Fine delamination)

1. 서 론

유리섬유 복합재료는 가벼우면서 강한 강성을 지니고 있는 장점으로 반도체 기판 재료, 항공기, 자동차 및 스포츠

등의 분야에서 많이 활용되고 있다[1]. 하지만, 유리섬유 복합재료 내부에 박리가 존재하게 되면 재료의 기계적 강도를 현저히 저하시키는 원인이 되기 때문에, 고도의 신뢰성 및 정밀함을 요구하는 현대 사회에서 내부의 박리를 분석

Received 14 June 2021, received in revised form 18 June 2021, accepted 22 June 2021

*Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul

**Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University, 222, Wangsimni-rom Seongdong-gu, Seoul

†Corresponding author (E-mail: kima@hanyang.ac.kr)

하는 것은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 시편을 파괴하여 내부를 검사하는 파괴검사법을 이용하면 내부 박리를 검사할 수 있지만 제품을 더 이상 사용할 수 없는 단점이 존재한다. 이에, 시편에 손상을 가하지 않고 내부의 박리를 검사하기 위한 초음파, X선 등의 비파괴검사법을 주로 사용하고 있다[2,3]. 최근에는 인체에 무해하며 별도의 매질 없이 공기 중에서 검사 가능한 THz 분광 기술로 유리섬유 복합재료 내부의 박리를 검출하는 연구가 진행되었다[4,5].

THz 신호는 굴절률이 다른 두 매질의 경계면에서 일부는 반사, 일부는 투과하는 성질을 가지고 있다. 따라서 THz 반사모드를 통해 신호를 측정하면 시편의 표면 및 바닥면에서 반사되는 THz 신호를 검출할 수 있으며, 내부에 박리가 존재하는 경우 박리의 윗면 및 바닥면에서 반사되는 THz 신호도 검출되게 된다(Fig. 1(a))[5]. 각 경계면에서 반사되는 THz 신호는 광 경로의 차이가 존재하기에 검출 시간의 차이가 존재하며, 신호의 peak 검출 시간을 기준으로 아래 수식을 통해 박리의 위치 및 크기 분석이 가능하다[6].

$$\Delta d = c/\Delta t \quad (1)$$

여기서 Δt 는 peak의 검출 시간 차이, Δd 는 광 경로 차이, c 는 빛의 속도를 나타낸다. 하지만 박리의 크기가 100 μm 이하의 수준으로 미세한 경우에는 박리 윗면 및 바닥면에서 반사되는 THz 신호 간의 중첩이 발생하며, 중첩으로 인해 원 신호에 내재된 박리 정보가 소실되어 버린다(Fig. 1(b)). 이는 박리 분석의 정확성을 현격히 저하시키는 원인이 되기 때문에 제품의 신뢰성 문제와 직결된다. 이러한 신호의 중첩 양상은 재료의 물성, 미세 박리의 위치 및 크기 등 여러

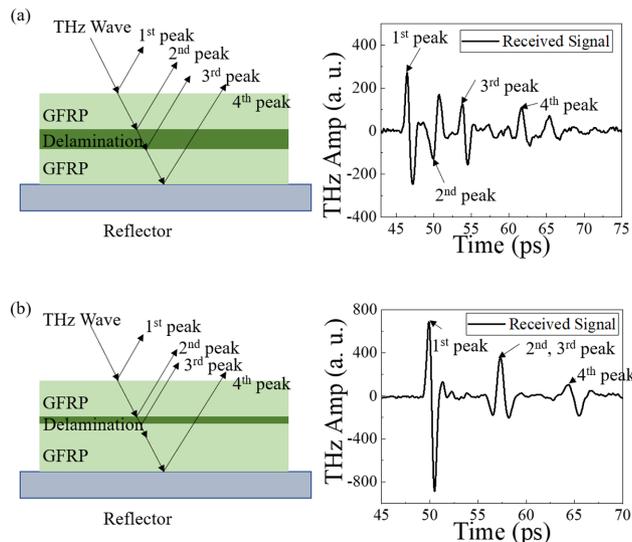


Fig. 1. Schematic of delamination inspection through THz system (a) for delamination larger than 100 μm and (b) smaller than 100 μm

요인들로 인해 변화하기에 이를 수식으로 계산하기에는 시간적인 비용이 많이 소요된다. 따라서 미세 박리로 인한 신호의 중첩을 정량적으로 분석하기 위한 새로운 지표를 고안할 필요가 있다.

본 연구에서는 유리섬유 복합재료 내부의 미세 박리를 검출하기 위해 THz 반사모드를 통해 미세 박리 크기 별 THz 중첩 신호를 수집하였으며, 미세 박리 크기에 따른 THz 중첩 신호의 FWHM 변화를 분석하였다. 또한, THz 투과모드를 통해 유리섬유 복합재료의 복소굴절률을 도출하였으며, 이를 이용하여 미세 박리 크기에 따른 THz 중첩 신호를 이론적으로 계산하였다. 실험 값과 이론 값에서의 THz 중첩 신호를 비교 검증하여 이론 모델의 타당성을 검증하였으며, 이론 값을 통해 미세 박리 크기 별 THz 중첩 신호의 FWHM 값을 도출하여 미세 박리 크기와 FWHM의 상관성을 분석하였다. 결과적으로 THz 중첩 신호에서의 FWHM 분석을 통한 미세 박리 크기 예측 모델을 제안하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

유리섬유 복합재료는 UD prepreg (UGN160B, SK Chemical) 4장을 단방향으로 적층한 뒤 Vacuum Bagging 방식을 이용하여 제작하였다. 사용된 prepreg의 물성은 Table 1과 같다. 적층된 prepreg는 0.6 MPa의 압력 내에서 Fig. 2(a)의 온도 조건으로 경화되었다. 제작된 유리섬유 복합재료 판의 두께는 0.5 mm이며, 미세 박리에서 발생하는 THz 중첩 신호 측정을 위해 2장의 유리섬유 복합재료 판 사이에 25, 50, 75, 110 μm 의 두께를 가지는 필름을 삽입하여 미세 박리 층

Table 1. Mechanical information of GFRP prepreg (UGN160B)

Properties	Value
Ply thickness (mm)	0.136
Resin content (%)	33
Fiber Areal Wt. (g/m^2)	160
Density of E-glass fiber (kg/m^3)	2.54×10^3
Density of epoxy resin	1.2×10^3

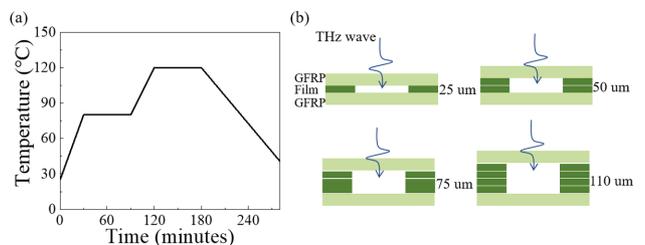


Fig. 2. (a) Curing temperature of the GFRP prepreg (b) The GFRP specimens with fine delamination (25, 50, 75, 110 μm)

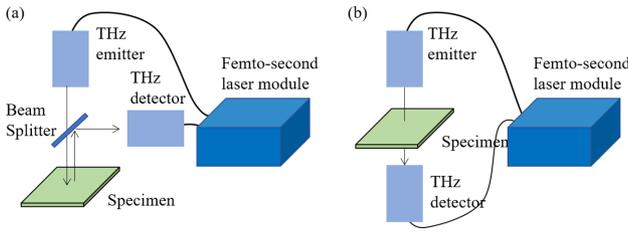


Fig. 3. Schematic of THz-TDS system (a) reflection mode (normal incidence) and (b) transmission mode

을 만들어 주었다(Fig. 2(b)).

2.2 테라헤르츠 검사 시스템

유리섬유 복합재료의 미세 박리에서의 신호 측정을 위해 테라헤르츠 시간영역 분광 (THz-TDS) 시스템을 이용하였다. 연구에서 사용된 THz-TDS 시스템(FiCOTM, Zomega Terahertz Corp.)은 femto-second laser 모듈, THz emitter 모듈, THz detector 모듈 및 광학 기구들로 구성되어 있다. 또한, 0.1-3.0 THz의 주파수 범위, 11 GHz의 주파수 해상도, 20 fs의 시간 해상도 및 60 dB의 signal-to-noise ratio(SNR) 성능을 가진다. 복합재료 내부의 미세 박리 크기에 따른 THz 신호 측정 시에는 0도의 입사각을 가지는 반사모드를 이용하여 신호를 측정하였으며, 유리섬유 복합재료의 복소굴절률을 측정 시에는 투과모드를 이용하여 신호를 측정하였다(Fig. 3).

2.3 전자기적 모델

재료의 전자기적 물성인 복소굴절률을 알면, 파동 전파에 따른 THz 검출 신호를 이론적으로 계산할 수 있다. 재료의 복소굴절률은 아래 수식과 같이 표현된다.

$$\underline{n}_s(\omega) = n_s(\omega) - ik_s(\omega) \quad (2)$$

여기서 \underline{n}_s , n_s , k_s 는 각각 재료의 복소굴절률, 굴절률 및 흡광계수이며, ω 는 각진동수를 의미한다. 굴절률 및 흡광계수는 투과모드를 통해 측정된 기준 신호와 시편 신호의 비교를 통해 아래 수식으로 계산할 수 있다[7].

$$n_s(\omega) = \phi(\omega) \cdot \frac{c}{\omega \cdot d} + n_{air} \quad (3)$$

$$k_s(\omega) = \ln \left(\frac{4n_s(\omega)}{\rho(\omega) \cdot (n_s(\omega) + 1)^2} \right) \cdot \frac{c}{\omega d} \quad (4)$$

여기서 $\phi(\omega)$, $\rho(\omega)$ 는 각각 주파수 영역에서의 기준 신호 대비 시편 신호의 위상 차이 및 신호 세기 비, d 는 시편의 두께를 나타낸다. 신호의 위상 차이 및 신호 세기 비는 아래 수식과 같이 기준 신호와 시편 신호의 고속푸리에변환(FFT)을 통한 주파수 영역 데이터로부터 얻을 수 있다.

$$\frac{S_s(\omega)}{S_r(\omega)} = \rho(\omega) \cdot e^{-i\phi(\omega)} \quad (5)$$

여기서 $S_s(\omega)$, $S_r(\omega)$ 는 각각 기준 신호와 시편신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 결과적으로 투과모드를 통해 측정된 기준 신호, 시편 신호 및 시편의 두께 정보를 이용하여 해당 수식들을 연립함으로써 재료의 굴절률 및 흡광계수를 도출할 수 있다. 반대로 재료의 굴절률, 흡광계수 및 기준 신호 정보를 알면 파동 전파에 따른 THz 신호의 위상, 세기 변화를 계산할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 테라헤르츠 검사 결과

Fig. 4(a)는 미세 박리가 존재하는 유리섬유 복합재료에 대한 미세 박리 크기 별 THz와 반사모드 측정 결과이다. Fig. 4(b)를 통해 미세 박리의 크기가 커질수록 표면에서 반사되는 신호의 peak 위치가 점점 더 빨리 검출되는 것이 확인되었다.

이는 미세 박리 크기의 차이만큼 전체 시편의 높이 차이가 존재하기에, THz 신호의 광 경로 차이가 달라 발생하는 현상이다. 반면, Fig. 4(d)를 통해 시편의 바닥면에서 반사되어 검출되는 신호에서는 미세 박리의 크기에 관계없이 peak 위치가 동일한 것이 확인되었다. 이는, 시편의 높이 차이가 존재하지만 바닥면에서 반사되는 신호의 전체적인 광 경로는 동일하기 때문이다. Fig. 4(c)는 미세 박리의 크기 별 미세 박리 위치에서 반사되어 검출된 THz 중첩 신호를 나

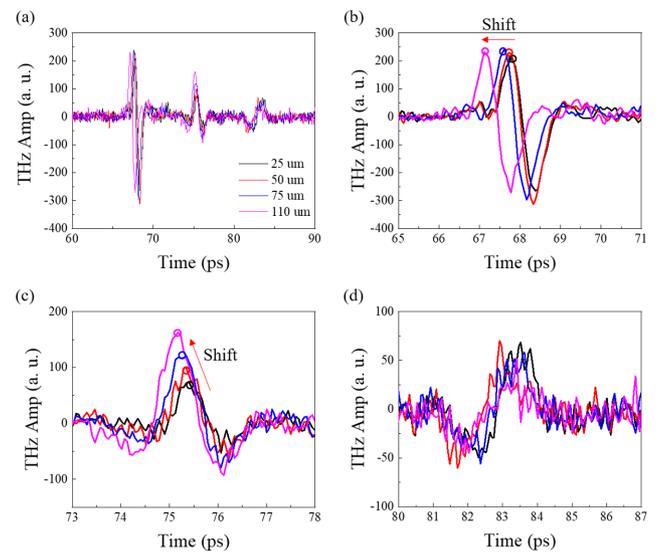


Fig. 4. (a) THz signals measured by reflection mode with respect to the fine delamination size, and the magnification of the signals (b) reflected from top surface, (c) reflected from fine delamination and (d) reflected from bottom surface of the GFRP specimens

타내며, 미세 박리 크기 별 THz 중첩 신호의 형태가 다른 것이 확인되었다. 그 중에서도 몇 가지 경향성을 확인할 수 있는데, 미세 박리의 크기가 클수록 THz 중첩 신호의 세기가 점점 증가하고 중첩 신호의 peak가 더 늦게 검출되는 것을 확인할 수 있다. 이는 미세 박리의 크기가 커질수록 신호의 중첩 효과가 점점 낮아지기 때문이다.

이와 같이 미세 박리 크기 별 THz 중첩 신호의 세기 및 검출 시간의 변화가 발생한다는 것이 확인되었으나, 이는 미

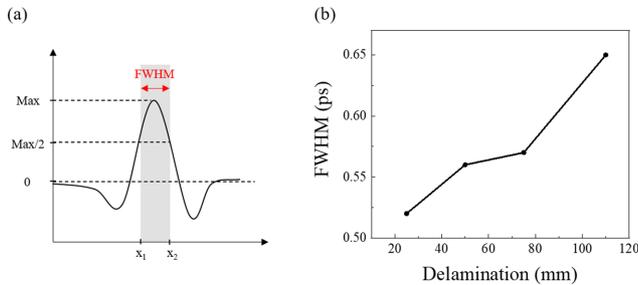


Fig. 5. (a) Definition of Full Width Half Maximum (FWHM) and (b) FWHM with respect to the fine delamination size (25, 50, 75, 110 μm)

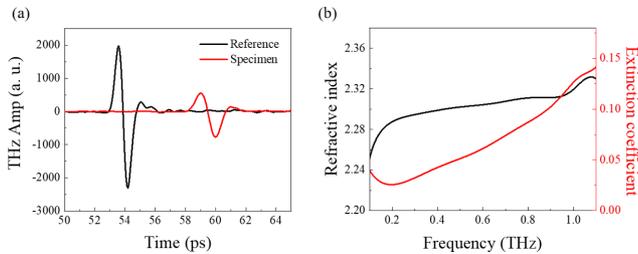


Fig. 6. (a) THz signals for reference (air) and specimen measured by transmission mode and (b) complex refractive index

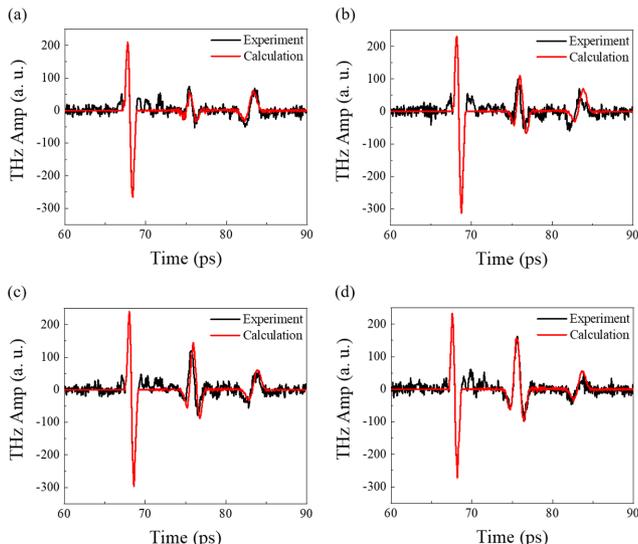


Fig. 7. Comparison between the THz signals from measurement and theoretical model; (a) 25 μm , (b) 50 μm , (c) 75 μm , and (d) 110 μm

세 박리가 아니더라도 시편을 투과하면서 발생할 수 있는 변화이다. 따라서 미세 박리를 판단하는 지표가 될 수 없으며, 미세 박리만으로 인한 THz 중첩 신호에서의 변화 인자를 찾아야 한다. 이를 위해 Fig. 5(a)와 같이 THz 중첩 신호로부터 최댓값의 절반이 되는 위치에서의 신호 폭을 나타내는 FWHM 값을 분석하였다. Fig. 5(b)는 미세 박리 크기에 따른 THz 중첩 신호의 FWHM 값을 나타낸다. 이를 보면 미세 박리의 크기가 작을수록 THz 중첩 신호의 FWHM 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 신호의 중첩이 더 크게 일어날수록 FWHM 값이 증가하는 경향을 보이며, FWHM 분석을 통해 신호의 중첩 정도를 판단할 수 있다.

미세 박리 크기 별 THz 반사모드 측정 결과를 검증하기 위해, 전자기 모델을 이용하여 미세 박리가 존재하는 유리섬유 복합재료에 대한 THz 반사 신호를 수식적으로 계산하였다. 먼저, THz 투과모드를 이용하여 공기를 투과한 기준 신호와 유리섬유 복합재료를 투과한 시편 신호를 측정하였으며(Fig. 6(a)), 이를 통해 유리섬유 복합재료의 복소굴절률을 측정하였다(Fig. 6(b)). 이를 기반으로 미세 박리 크기 별 예상되는 THz 신호를 수식적으로 계산하였으며(Fig. 7), 전자기 모델을 통해 계산된 THz 신호와 실제 측정된 THz 신호가 거의 유사한 것을 통해 THz 실험 결과가 타당하다는 것을 검증하였다.

3.2 전자기 모델을 통한 미세 박리 예측 모델

유리섬유 복합재료 내부의 미세 박리 크기(25, 50, 75, 110 μm)에 따라 THz 중첩 신호의 FWHM 값이 변화한다는 것을 확인하였다. 이를 기반으로 미세 박리 크기와 FWHM의 상관성을 분석하기 위해, 전자기 모델을 이용하여 10 μm 크기부터 120 μm 크기까지 1 μm 단위로 미세 박리 크기가 증가하는 경우의 THz 중첩 신호를 수식적으로 계산하였다(Fig. 8(a)). 실제 미세 박리 크기 별 반사모드로 측정된 THz 신호에서의 경향과 동일하게, 박리 크기가 클수록 중첩 신호의 세기가 증가하며, peak가 점점 늦게 검출되는 것을 확인하였다.

Fig. 8(b)는 신호의 중첩이 발생하는 10 μm 부터 120 μm 까

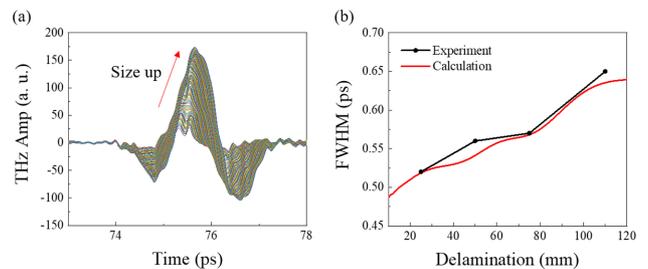


Fig. 8. (a) The superimposed signal with respect to the fine delamination size derived from the electromagnetic model of THz signal and (b) FWHM with respect to the fine delamination size

지의 미세 박리 크기에 따른 THz 중첩 신호의 FWHM 이론 값 및 실제 실험 값과의 비교 그래프를 나타낸다. Fig. 5(b)에서의 결과와 유사하게 미세 박리의 크기가 클수록 FWHM이 증가하는 경향이 확인되었다. 결과적으로, Fig. 8(b)에서 도출된 미세 박리 크기와 FWHM의 상관관계로부터 유리섬유 복합재료 내부의 미세 박리 예측이 가능하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 THz 중첩 신호의 FWHM 분석을 통해 유리섬유 복합재료 내부의 미세 박리 크기 예측 모델을 제안하였다. 먼저, THz 반사모드를 통해 유리섬유 복합재료 내부의 미세 박리 크기에 따라 THz 중첩 신호의 FWHM 신호가 변화하는 것을 확인하였다. 이후, THz 투과모드로부터 도출된 유리섬유 복합재료의 복소굴절률을 이용하여 미세 박리 크기 별 예상되는 THz 반사 신호를 수식적으로 계산하였고, 이를 통해 실험 결과를 검증하였다. 전자기 모델을 기반으로 10-120 μm 크기의 미세 박리에 따른 THz 중첩 신호를 생성한 뒤 FWHM을 추출하였으며, 미세 박리 크기와 FWHM과의 상관관계를 도출하였다. 미세 박리 크기와 FWHM 값이 양의 상관관계를 가짐을 확인하였으며, 이를 통해 미세 박리 크기를 예측할 수 있었다. FWHM을 이용한 THz 중첩 신호의 분석은 시편이 두껍거나 탄소섬유 복합재료, 시멘트 등과 같이 대부분의 THz 신호가 흡수되는 재료 및 THz 신호가 투과하지 못하는 금속 재료에서는 중첩 신호의 검출이 어려워 적용되기 힘들다는 한계가 존재한다. 하지만, EMC, PFA, 퀴즈, 실리콘 등의 THz 파형이 잘 투과되는 재료에서는 해당 기술의 적용이 가능할 것으로 사료되며, 미세 박리에 대한 평가를 통해 제품의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행된 수중운동체 장기체류 특화연구실(UD200012DD)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Palanikumar, K., Prakash, S., and Shanmugam, K., "Evaluation of Delamination in Drilling GFRP Composites," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 23, No. 8, 2008, pp. 858-864.
2. Yang, R.S.H., Braden, D.R., Zhang, G.-M., and Harvey, D.M., "An Automated Ultrasonic Inspection Approach for Flip Chip Solder Joint Assessment," *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, No. 12, 2012, pp. 2995-3001.
3. Wang, F., and Wang, F., "Void Detection in TSVs with X-ray Image Multithreshold Segmentation and Artificial Neural Networks," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 4, No. 7, 2014, pp. 1245-1250.
4. Kim, D.-H., Ryu, C.-H., Park, S.-H., and Kim, H.-S., "Nondestructive Evaluation of Hidden Damages in Glass Fiber Reinforced Plastic by Using the Terahertz Spectroscopy," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 4, No. 2, 2017, pp. 211-219.
5. Ryu, C.-H., Park, S.-H., Kim, D.-H., Jhang, K.-Y., and Kim, H.-S., "Nondestructive Evaluation of Hidden Multi-delamination in a Glass-fiber-reinforced Plastic Composite Using Terahertz Spectroscopy," *Composite Structures*, Vol. 156, 2016, pp. 338-347.
6. Park, D.-W., Oh, G.-H., Kim, D.-J., and Kim, H.-S., "In-situ Thickness Measurement of Epoxy Molding Compound in Semiconductor Package Products Using a Terahertz-Time of Flight System," *NDT & E International*, Vol. 105, 2019, pp. 11-18.
7. Jin, Y.-S., Kim, G.-J., and Jeon, S.-G., "Terahertz Dielectric Properties of Polymers," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 49, No. 2, 2006, pp. 513-517.