

## 테라헤르츠파를 이용한 FRP 복합재료의 비파괴결함평가

임광희\*, 김지훈<sup>+</sup>, David K. Hsu<sup>++</sup>

(논문접수일 2011. 10. 17, 수정일 2012. 01. 19, 심사완료일 2012. 02. 15)

### Nondestructive Evaluation in the Defects of FRP Composites By Using Terahertz Waves

Kwang-Hee Im\*, Ji-Hoon Kim<sup>+</sup>, David K. Hsu<sup>++</sup>

#### Abstract

A study of terahertz waves was made for the nondestructive evaluation of FRP (Fiber reinforced plastics) composite materials. The terahertz systems were consisted of time domain spectroscopy (TDS) and continuous wave (CW). The composite materials investigated include both non-conducting polymeric composites and conducting carbon fiber composites. Terahertz signals in the TDS mode resembles that of ultrasound; however, unlike ultrasound, a terahertz pulse was not able to detect a material with conductivity. The CFRP (Carbon fiber reinforced plastics) laminates were utilized for confirming the experimentation in the terahertz NDE. In carbon composites the penetration of terahertz waves is quite limited and the detection of flaws is strongly affected by the angle between the electric field direction of the terahertz waves and the intervening fiber directions. A refractive index (n) was defined as one of mechanical properties; so a method was obtained in order solve the "n" in the material with non-conductivity. The usefulness and limitations of terahertz radiation are investigated for the NDE of FRP composites.

**Key Words :** Terahertz waves(테라헤르츠파), FRP(섬유복합재료), Refractive index(굴절계수), Time domain spectroscopy(시간영역 분광기), Continuous wave(연속파), Flaw(결함), Fiber direction(섬유방향)

## 1. 서론

최근에는 테라헤르츠파(Terahertz wave : T-ray)의 기술적인 응용상의 중요성이 인식되고 있다. T-ray(테라 헤르츠파) 기술과 계기들의 진보와 더불어 전자 스펙트럼에 의한 탐지 분야가 나타나게 되었으며 이는 테라헤르츠파가 갖는 마이크로 파 보다 더 짧은 파장과 비교적 높은 해상도를 가지고 있기 때문이다. 테라 헤르츠파는 공항에서의 보안 검색 장치, 의료 영

상, 유극성 액체, 각종 산업 시설 및 복합재료 등의 분광학적 평가에 결정적인 중요성을 갖고 있다<sup>(1)</sup>. 또한 테라헤르츠파 시간 영역 분광학(Terahertz Time Domain Spectroscopy: THz-TDS)은 복합재료에 내재하고 있는 각종 결함이나 손상을 비 접촉적으로 정밀하게 탐지하는데 있어 선도적인 역할을 하고 있다. 여기서 THz-TDS는 광 전도성에 기초를 두고 있으며 이것은 다시 펨토 초( $10^{-15}$ 초) 레이저를 이용하여 광 전도성 안테나를 여기 시켜서 필요한 저(Low) 싸이클의 테라헤르츠파형을 발

\* 우석대학교 기계자동차공학과 (khim@woosuk.ac.kr)

주소: 565-701 전북 완주군 삼례읍 후정리 490

+ 조선대학교 기계설계공학과

++ 미국 아이오와 주립대학교 CNDE

생시키는 것에 의존하고 있다<sup>(2)</sup>.

피코 초 이하의 THz 파를 발생 시킬 수 있어 결과적으로 잡음 대비 높은 신호(S/N)를 이용하여 탐상할 수 있게 되는 것이다. 이때 발생하는 에너지는 여러 개의 테라헤르츠로 분포되어 대단히 넓은 대역폭에 영향을 미치게 된다. 테라헤르츠파 송신기(Emitter)의 일시적인 변화는 테라 헤르츠 시간 척도 상 광전도성 스위치의 저항 때문에 발생하게 되는 것이다<sup>(3-6)</sup>. 이에 덧붙여, 또 다른 방법은 광학적인 이방성 변환 또는 광 혼합으로서 이것은 두 개의 연속파(Continuous wave: CW) 레이저를 이용하여 얻을 수 있다. 2개의 레이저를 혼합시키면 울림(Beating)을 발생시키는데 이 울림은 광 전도성 스위치의 콘덕턴스를 테라헤르츠 차등 주파수를 이용하여 변조시킬 수 있다. 이렇게 하여 연속파인 테라헤르츠파(CW-THz)를 얻을 수 있다. 경우에 따라서는 T-ray 이미지는 대상물의 화학적 성분까지 보여 줄 수도 있다. T-ray 이미지가 갖고 있는 이와 같은 특성 때문에 습도 분석, 플라스틱 제품의 품질 관리 및 포장 검사(감시) 등 다 방면에 걸친 상업적인 응용에 지대한 관심을 모으고 있다.

광범위한 응용 뿐 만 아니라 응용기술의 활용성이 우수하기 때문에, THz-TDS 는 실제로 사용되기에 충분할 만큼 소형이면서 휴대용이고 그리고 신뢰성이 있는 최초의 THz 이미지 장치가 될 가능성을 갖고 있다. 따라서 T-ray 응용 면에서 저자들의 연구는 당연히 2개의 부분으로 구분되었다. 첫 번째로 잘 알려진 진 바와 같이, 우주 및 민간 항공 분야에서 섬유 강화 플라스틱(Fiber reinforced plastics : FRP) 의 중요성이 일반적으로 알려져 있고 FRP 적층판이 널리 사용되고 있다. 두 번째로 섬유가 내재한 에폭시 매트릭스 복합재료의 굴절계수(n) 과 흡수계수(a) 및 전기 전도도, 그리고 탄소섬유복합재료(Carbon fiber reinforced plastics : CFRP)에 대한 THz 스캔 이미지에 관한 연구이다. 탄소 섬유가 전도성인 반면에 에폭시 매트릭스는 전도성을 가지고 있지는 않지만 CFRP 적층판의 탄소섬유는 전도성을 띠고 있다<sup>(7)</sup>.

본 연구에서 FRP 복합재료를 이용한 비파괴 평가에 사용된 테라 헤르츠파에 대한 조사 결과를 나타냈다. 테라헤르츠파를 이용해 다양한 재료의 물성치로 나타내는 굴절계수(Refractive index : n)의 측정기법과 전도성을 가지고 있는 CFRP 복합적층판의 섬유방향과 전기장(E-field)의 상관관계를 고려하였다.

따라서 탄소 섬유 강화 복합재료는 일반적으로 전도성이 너무 크므로 테라헤르츠파가 투과하기가 어려우나 탄소섬유복합재료에서의 테라헤르츠파의 투과 정도 특히 섬유 방향에 따라 정량적으로 검토하였다. CFRP 복합적층판의 결함을 섬유방향에 따른 테라헤르츠파의 검사 유효영역을 평가하였다.

## 2. 기초이론

### 2.1 굴절계수 측정

본 방법은 테라헤르츠파 시간 영역에서 투과모드로써 시험편 유무를 통하여 굴절계수(Refractive index)를 유도하였다. 테라헤르츠파 신호의 진행방향을 Fig. 1에 나타냈다. 테라헤르츠 펄스 송신기(Pulsed emitter)에서 T-ray가 시험편 없이 통과 할 때 수신기(Pulsed receiver)에 도달시간과 임의의 두께를 시험편을 통과할 때 각각 비행거리(TOF)를 구하여 굴절계수(Refractive index)를 구할 수 있다.

우선 시험편 없이 T-ray 비행거리(TOF)를 구하면 다음과 같다.

$$t_{total\ time\ without\ sample} = \frac{L}{V_{air}} \tag{1}$$

여기에서  $t_{total\ time\ without\ sample}$  는 T-ray는 송신기에서 발생시켜 수신기까지 도달 시간이며, L는 T-ray는 송신기와 수신기 사이의 길이이다.  $V_{air}$ 는 공기중에서 빛의 속도( $3 \times 10^{10}$  cm/s)이다.

그리고 T-ray 가 시험편을 통과 할 때 T-ray의 총 비행거리(TOF)를 구하면 다음과 같다.

$$t_{total\ time\ with\ sample} = \frac{L-d}{V_{air}} + \frac{d}{V_s} \tag{2}$$

여기에서  $t_{total\ time\ with\ sample}$  는 T-ray는 송신기에서 발생시켜 시험편을 투과하여 수신기까지 도달 시간이며,  $V_s$ 는 시험편에서 T-ray 속도이며 d는 시험편의 두께이다.

시험편에서 T-ray의 비행시간(TOF)을 구하면 시험편의 특성인 굴절계수(Refractive index)을 구할 수 있다. 따라서 다음 식을 이용하면 시험편의 T-ray 투과시간 ( $\Delta t$ )을 구할 수 있다.

$$\Delta t = t_{total\ time\ with\ sample} - t_{total\ time\ without\ sample} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \Delta t &= \left( \frac{L-d}{V_{air}} + \frac{d}{V_s} \right) - \frac{L}{V_{air}} \\ &= -\frac{d}{V_{air}} + \frac{d}{V_s} = d \left( \frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_{air}} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

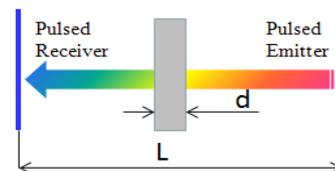


Fig. 1 Diagram showing the geometry of the through-transmission mode

$$V_{air} \frac{\Delta t}{d} = \frac{V_{air}}{V_s} - 1 = n - 1 \quad (5)$$

$$\therefore n = 1 + \frac{\Delta t V_{air}}{d} \quad (6)$$

여기에서  $n$ 는 시험편의 굴절계수(Refractive index:  $n$ )이며,  $d$ 는 시험편의 두께이다.

다음 투과 모드에서 시험편의 흡습계수( $\alpha$ ) Fig. 2에서 보인 바와 같이 일반적인 방법으로 유도 할 수 있다.

우선 두께가 다른 같은 종류의 2개 시험편의 T-ray 투과시간 ( $\Delta t$ ) 및 진폭(Amplitude)을 구한다. 먼저 두꺼운 시험편과 얇은 시험편의 투과 전기장(Transmitted E-field)의 차를 다음과 같이 구하여 흡습계수( $\alpha$ )를 유도 한다.

$$I_1 = I_0 T^2 e^{-\alpha d_1} \quad (7)$$

$$I_2 = I_0 T^2 e^{-\alpha d_2} \quad (8)$$

상기 식에서  $I_1$  및  $I_2$ 의 차를 이용하면 다음과 같이 흡습계수 ( $\alpha$ )를 구할 수 있다.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_0 T^2 e^{-\alpha d_2}}{I_0 T^2 e^{-\alpha d_1}} \quad (9)$$

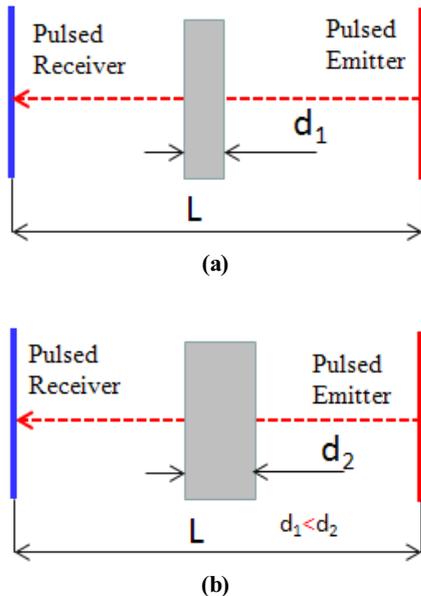


Fig. 2 Diagram showing the geometry of the through-transmission mode with two samples in (a) thinner and (b) thicker sample

$$\alpha = -\frac{\ln \frac{I_2}{I_1}}{d_1 - d_2} \quad (10)$$

여기에서  $I_1$  및  $I_2$ 는 얇은 시험편과 두꺼운 시험편의 투과전기를 각각 나타냈으며  $I_0$ 는 초기 T-ray 전기장이며  $T$ 는 투과 계수이다.  $d_1$  및  $d_2$ 는 각각 얇은 시험편과 두꺼운 시험편의 두께이며  $\alpha$ 는 흡습계수이다.

### 3. 실험시스템 및 측정

#### 3.1 측정시스템

Fig. 3은 비파괴시험장치인 테라헤르츠 시간영역 분광학(THz-TDS) 시스템을 나타낸다. 이 시스템은 시험편 재료특성과 스캔 이미지를 수집하기 위한 것이다. 본 연구에서 사용된 테라헤르츠 시스템은 영국 테라 뷰(TeraView)사에서 제작한 것이다. 본 시스템은 시간 영역 분광기(TDS) 펄스 장치 및 주파수 영역 연속파(CW) 장치로 구성되어 있다. 테라 헤르츠 펄스를 발생, 조절 또는 탐상하기 위한 TDS 기술로 이루어져 있다. THz-TDS 시스템은 이미지를 획득하고 그리고 자료 획득을 높일 수 있으며 테라헤르츠파를 직접 조작하는데 있어 광학 장치의 특유의 구조상의 특성은 이미지 제조 실험상 의미를 갖고 있다. 본 TDS 장치는 주파수 범위 50GHz-4 THz와 최대 300 ps까지의 지연시간을 갖고 있다. T-ray 빔은 초점 거리 50mm와 150mm에 집중되며 반 최대 빔 폭에서의 전 폭(Full width at half maximum : FWHM)은 각각 0.8mm and 2.5mm이다. 본 TDS 장치는 투과 또는 반사(소 각도 피치 캐치) 측정용으로 설정할 수 있다. CW 장치의 주파수 범위는 50GHz-1.5THz이다. CW 장치의 초점 거리는 역시 50mm 및 150mm이다. 양 TDS 및 CW 장치는 광 섬유로 서로 연결되어 있다. Fig. 3은 T-ray 시스템에 있어서 전체 개략도를 나타냈다.

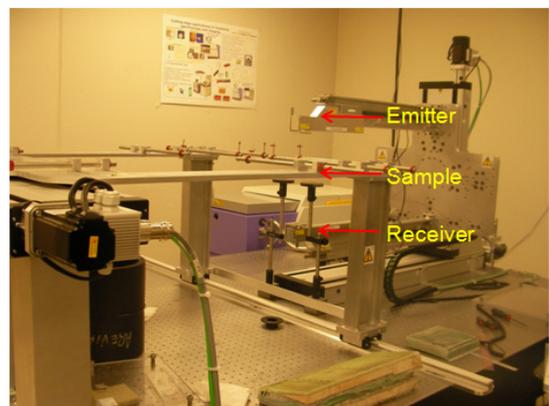


Fig. 3 THz TDS system for imaging and measuring material parameter

### 3.2 측정방법

Fig. 4는 투과모드인 테라헤르츠 측정시스템을 나타냈다. 여기에서 실험할 때 테라헤르츠파는 송신기(Emitter)에서 발생시켜 수신기(Receiver)쪽으로 보낸다. 이때 원하는 시험편을 송신기와 수신기의 초점이 일치하는 곳에 위치 시켜 수행을 한다. 이때 테라헤르츠 렌즈의 초점거리는 100mm 및 150mm가 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 테라헤르츠 굴절계수 측정

재료의 물성치를 나타내는 T-ray 파라메타를 측정하기 위해 GFRP 복합재의 투과모드에서 THz 펄스를 획득하였다. Fig. 5에서 시험편이 있는 경우와 시험편이 없는 경우의 시간차를 명확히 볼 수 있다. 시험편은 GFRP이용을 했으며 두께가 대략 6.0mm이다. 시험편의 유무에 따라 시간차( $\Delta t$ )를 구하면 23ps이다. 따라서 굴절계수를 구하기 위해 측정기법중 하나인 투과모드를 이용하여 광학적인 시간차를 계산하며 식(6)을 이용하여 계산하였다. 그리고 Table 1과 같이 GFRP 복합재료와 PMMA, Fused quartz 시험편을 투과모드방법을 이용해 측정하였다. 기존 참고문헌들의 데이터와 비교하면 1-2%전후 차이밖에 나타나지 않았다<sup>(8-9)</sup>.

이는 실험 시에 테라헤르츠의 투과모드 측정기법이 여러 가지로 고려해야 할 파라메타가 없고 실험이 용이하기 때문이라 판단된다. 그리고 GFRP 시험편의 경우는 제조방법이나 특성이 다르기 때문에 기존 데이터와 비교의 어려움이 있었다.

### 4.2 탄소 섬유 함유의 전기장 평가

테라헤르츠파는 비전도체 재료와는 다르게 전도체 재료에 투과력에는 한계를 가지고 있다. 탄소섬유 복합재의 검사에 테라헤르츠파가 적용 및 응용을 실시하고 있으나 심층적인 연구결과를 찾아보기가 힘들다. 특히, 탄소섬유복합재료(Carbon fiber reinforced plastics : CFRP)는 전도성을 갖는 탄소섬유와 비전도성이 있는 수지로 구성되어 있다. CFRP 복합적층판을 현미경적으로 관찰 해 보면 섬유와 수지로 다양하게 구성되어져 있어 전도성에 크게 영향을 미칠 수 있어 테라헤르츠파의 탄소섬유복합재의 정량적으로 특성평가가 요구된다. 여기에서 기존 문헌에 의하면 탄소섬유축에 대한 전기 전도성(Electrical conductivity)은 탄소섬유의 반경방향의 전도성이 대략 3배 정도 크다. CFRP복합재는 일방향재로 구성되어져 있고 다양한 적층구조로 된 CFRP적층판에서 전도성은 영향을 받는다. 특히, 횡방향(섬유 축에 수직인)의 전도성 발생 기구는 인접한 섬유 사이에 일어나는 섬유접촉에 의존한다. 탄소섬유복합재의 전기 전도성은 관한 연구는 그리 많지가 않다. 일부 문헌에서는 종방향 전도성( $\sigma_l$ )의 값은  $1 \times 10^4 S/m$ 에서  $6 \times 10^4 S/m$ 에 이른다

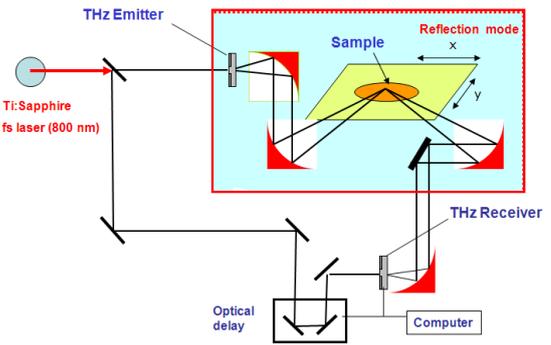


Fig. 4 Overview of THz measurement method

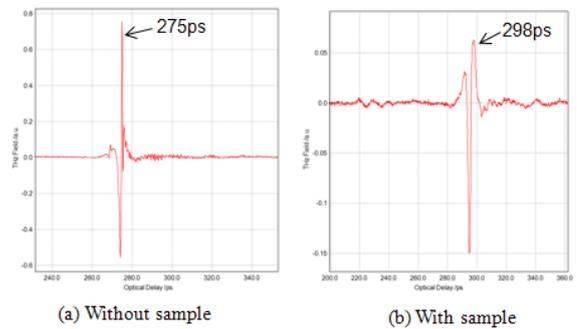


Fig. 5 THz TDS pulses from transmitted GFRP sample

Table 1 Average THz refractive indices of the material studied

Materials	Refractive index(n)*	Refractive index(n)
		Through-transmission mode
PMMA	1.60± 0.08	1.61± 0.07
Fused quartz	1.95 ± 0.05	1.95 ± 0.05
GFRP	-	2.17 ± 0.05

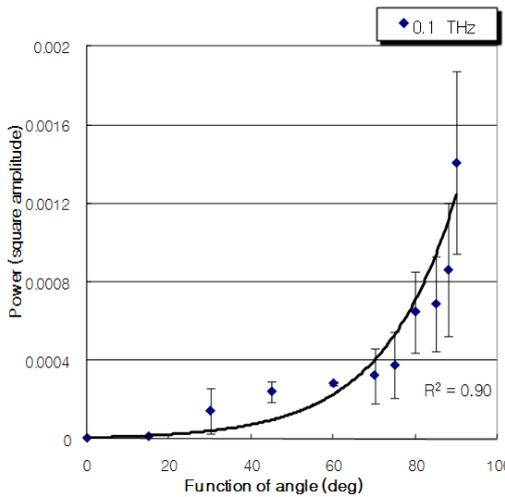
\*Data in References<sup>(8-9)</sup>

고 보고되고 있으며 횡방향의 전도성( $\sigma_t$ )의 값은 그 범위가 훨씬 넓어 대략 2S/m에서 600S/m에 이한다고 보고되고 있다.

일방향재 프리프레그시트(Prepreg sheet)를 이용한 적층판의 횡방향 전도성 값은 제조 과정과 적층판의 품질에 따라 크게 달라진다고 판단된다. 일방향 CFRP복합재에서 섬유 축과  $\theta$  각을 이루면서 흐르는 전류에 대한 평면 전도성은 다음과 같이 주어진다<sup>(10)</sup>.

$$\sigma = \sigma_l \cos^2 \theta + \sigma_t \sin^2 \theta \quad (11)$$

섬유길이 방향의 전도성에 비해 매우 크기 때문에 ( $\sigma_l \gg \sigma_t$ ) 일방향재 CFRP복합재를 투과하는 테라헤르츠파는 전기장 벡터와 탄소섬유 축이 이루는 상대 각도에 따라 크게 달라진다. 테라헤르츠파의 전기장이 탄소 섬유 축 방향과 평행일 때는 전

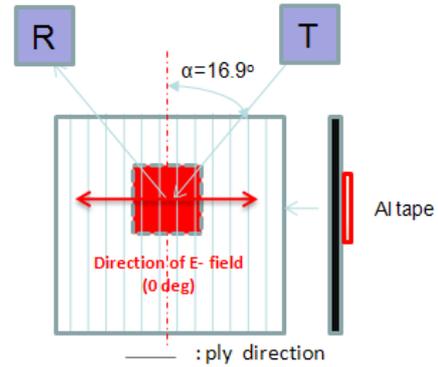


**Fig. 6 Angular dependence of transmitted power of THz terahertz waves through a 12-ply unidirectional carbon composite laminate**

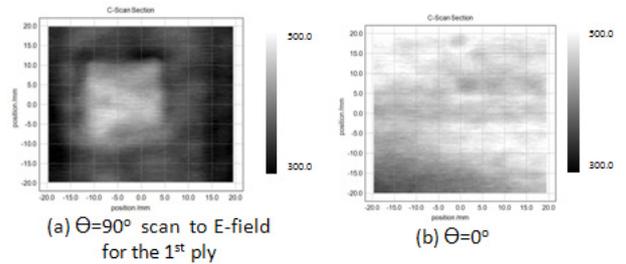
도성이 가장 크고 투과력은 가장 작게 된다. 반대로 전기장 벡터가 섬유 축과 직각을 이루면 전도성은 가장 낮고 투과력은 가장 높게 된다.  $\sigma_t=10S/m$ 의 값을 사용하여 테라헤르츠 파에 대한 일방향재 CFRP복합재 표면 깊이는 전기장의 방향이 섬유 축에 수직일 때 대략 1THz에서 0.2mm 및 0.1THz에서 0.5 mm가 된다. 실험적으로 CW 테라 헤르츠 장치를 이용하여 12-ply 일방향 CFRP복합재 적층판에서 투과력이 각도에 미치는 영향을 평가하였다. 주파수 스펙트럼의 낮은 쪽 부근( $f\sim 0.1$  THz)에서 투과력은 소음 층 보다 30dB 이상 이었다. 0.1THz 투과력의 각도 의존도는 Fig. 6에 나타냈다.

**4.3 전도성이 내재한 CFRP 적층판의 결함의 THz 이미지**

CFRP 복합재료에서 테라헤르츠의 전도성의 특성을 평가하기 위해서 CFRP 복합적층판의 후면에 부착한 알루미늄 테이프를 탐상하였다. 이때 사용한 알루미늄 테이프는 두께 0.05 mm이며 가로 및 세로는 20mmx20mm이다. 특히, 섬유길이방향에 전기장 방향은 수직이라 하고 섬유반경방향을 수평이라 할 때 이 각도 차이를  $\theta$ 라 한다. 여기서 TDS 테라헤르츠파의 반사 모드를 이용하여 결함을 탐상하고 T-ray 이미지를 얻었다. T-ray 결함 이미지의 S/N비와 전도성의 상관관계를 살펴보면  $\sigma_t \gg \sigma_l$ 이므로 식 (11)는  $\sigma \approx \sigma_t \cos^2\theta$ 로 쓸 수 있다. 1 ply 탄소섬유 프리프레그시트의 결함을 T-ray 스캔이미지를 해석하기 위하여 T-ray 전기장의 방향과 CFRP 복합재 적층판의 적층 방향을 고려하였다. 우선 1 ply를 T-ray가 관통하는 투과력은 섬유 방향과 전기장이 이루는 각도에 따라 달라지며 테라헤르츠는 시험편의 표면에 섬유배향에 따라 투과 및 반사를 한다. 여기서 단순한 저항 R 방정식인  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1}$ 로 고려하면 하나



**Fig. 7 Schematics for T-ray reflection mode and one ply CFRP laminate with boned with Al tape(20×20mm) at the back side**



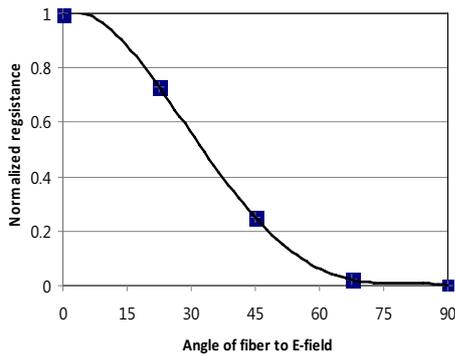
**Fig. 8 TDS reflection mode terahertz scan images of embedded flaws in a CFRP composite laminate**

의 저항체가 된다. 이 하나의 저항식으로 전도성  $\sigma_l$ 을 구할 수 있으며 T-ray 탐상 이미지에서 결함의 전도성도 잡음비와의 상관관계를 알아 낼 수 있다. 식  $\sigma \approx \sigma_t \cos^2\theta$ 을 이용하여 전기장이 한개 ply에서 90도 각을 이룰 때 전도성 값이 최소가 됨을 알 수 있다. 결함 이미지의 S/N 비는 따라서 샘플이 이 각도에 있을 때 가장 크게 된다. 이와 같이 최대치의 전도성을 갖는 시험편 각도 즉  $\theta=0^\circ$ ( $\sigma=1.0\sigma_t$ )에서는 S/N 비가 가장 나쁘게 된다. 결함 탐상능의 이런 경향은 전도성에 기초를 둔 S/N 비의 예상이 실험과 정성적으로 일치하는 것을 나타내고 있다.

따라서 결함 탐상능은 전기장과 섬유 방향과의 관계에 따라 달라짐을 알게 되었다. Fig. 7에서 전기장과 섬유 방향 사이의 여러 가지 각도에 따른 반사 모드 이미지를 나타내고 있다. 특히 Fig. 8은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 테라헤르츠 반사모드를 방법을 이용하여 결함신호에서 시간게이트(Time gate)를 C-scan 이미지를 얻었으며 Fig. 8(a)에서는 가장 높은 S/N 비를 갖는 T-ray 이미지를 보여 주는 반면 Fig. 8(b)에서는 낮은 S/N 비를 갖는 T-ray 이미지를 보여 주고 있다. 결국 테라 헤르츠파를 이용한 탄소섬유 복합재의 검사는 1-ply 탄소섬유강화복합재료의 경우에 적용될 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 8은 CFRP 복합적층판에 심어 놓은 결함의 TDS 반사 모드 스캔 이미지들

**Table 2 Modeled conductivity of one ply**

Angle	0°	22.5°	45.0°	67.5°	90°
Resistance					
$\theta$	0	22.5	45	67.5	90
$\sigma_1$	1.0	0.85	0.5	0.15	0
$\sigma$	1.0 $\cos^2\theta$	0.85 $\cos^2\theta$	0.5 $\cos^2\theta$	0.15 $\cos^2\theta$	0 $\cos^2\theta$
$R_{eq}$	1	0.73	0.25	0.022	0



**Fig. 9 Relation between angle of fiber to E-field and normalized resistance in unidirectional carbon composite laminate**

이다. 그리고 Table 2는 CFRP 복합적층판의 전도성을 모델링 식을 이용하여 구하였다. 여기서  $\theta$ 는 1겹의 섬유 축과 전기장 벡터가 이루는 각도이며  $\psi$ 는 섬유의 두 번째 겹 축과 전기장 벡터가 이루는 각도이다. (a)  $\theta=90^\circ$  (b)  $\theta=67.5^\circ$  (c)  $\theta=45.0^\circ$  (d)  $\theta=22.5^\circ$  그리고 (e)  $\theta=0.0^\circ$ 의 경우를 나타내고 있다. 식 (11)에서 보는 바와 같이 전기장(E-field)이 섬유방향인  $90^\circ$ 인 경우가 저항값이 최소치가 되고 특히  $0^\circ$ 인 경우에는 저항값이 최대가 되기 때문에 테라헤르츠파가 CFRP복합적층판을 전혀 투과못해 Fig.8(b)처럼 결함을 전혀 탐상 할 수 없었다. 또한 Fig. 9는 CFRP복합적층판의 섬유배향에 따른 전기장(E-field)의 수신크기를 나타냈다. 특히, CFRP 복합적층판의 섬유배향과 전기장이  $90^\circ$ 일때 가장 적게 나타났기 때문에 테라헤르츠파의 투과율이 매우 높아 결함신호를 최적화 시킬 수 있다고 판단된다.

### 5. 결론

복합재 비파괴 검사에 테라헤르츠파(THz)의 적용 및 응용에 관한 연구로써 재료 물성치의 하나인 테라헤르츠파의 굴절계수(Refractive index)의 측정기법을 확립하였다. 또한 FRP복합재료의 전도성의 특성에 따라 CFRP의 섬유적층 각에 따라 테라헤르츠파의 에너지 투과능의 한계성을 검토하여 복합재의 THz 결과는 다음과 같이 얻을 수 있었다.

- (1) FRP 복합재료에 대한 테라헤르츠파를 이용해 투과모드하에서 굴절계수를 측정할 수 있었다.
- (2) 테라헤르츠파는 탄소섬유 복합재내에 있어서 제한된 투과력을 가지고 있어 이방성 전기 전도성은 전기장 방향과 상호 작용함을 알 수 있었다.
- (3) 테라 헤르츠파가 CFRP복합재료의 섬유배향에 영향이 미치므로 전기장의 상관관계를 고려하면  $90^\circ$ 에서 최적의 결함을 평가 할 수 있다.
- (4) 테라헤르츠 시스템이 비용이 저렴해지고 휴대용으로 되어 지다면 매우 유용한 비파괴검사 도구가 될 것으로 전망된다.

### 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2011-0008391).

### 참 고 문 헌

- (1) Chiou, C. P., Blackshire, J. L., Thompson, R. B., and Hu, B. B., 2009, "Terahertz Ray System Calibration and Material Characterizations," *Review of QNDE*, Vol. 28, pp. 410~417.
- (2) Huber, R., Brodschelm, A., Tauser, A., and Leitenstorfer, A., 2000, "Generation and Field-Resolved Detection of Femtosecond Electromagnetic Pulses Tunable up to 41 THz," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 22, pp. 3191~3199.
- (3) Rudd, J. V., and Mittleman, D. M., 2000, "Influence of Substrate-Lens Design in Terahertz Time-Domain Spectroscopy," *J. Opt. Soc. Amer.(B)*, Vol. 19, No. 2, pp. 319~329.
- (4) Gregory, I. S., Baker, C., Tribe, W., Bradley, I. V., Evans, M. J., and Linfield, E. H., 2000, "Optimization of Photomixers and Antennas for Continuous-Wave Terahertz Emission," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 41, No. 5, pp. 717~728.
- (5) Brown, E. R., Smith, F. W. and McIntosh, K. A., 1993, "Coherent Millimeterwave Generation by Heterodyne Conversion in Low-Temperature-Grown GaAs Photoconductors," *J. Appl. Phys.*, Vol. 73, No. 3, pp. 1480~1484.
- (6) Brown, E. R., McIntosh, K. A., Nichols, K. B., and Dennis, C. L., 1995, "Photomixing up to 3.8 THz in Low-Temperature-Grown GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, No. 3, pp. 285~287.
- (7) Chakrapani, S. K., Dayal, V., Hsu, D. K., Barnard, D.

- J., and Gross, A., 2011, "Characterization of Waviness in Wind Turbine Blades Using Air Coupled Ultrasonics," *Review of Progress in QNDE*, Vol. 30, pp. 956~962.
- (8) Schueler, R., Joshi, S. P., and Schulte K., 2001, "Damage Detection in CFRP by Electrical Conductivity Mapping," *Composite Science and Technology*, Vol. 61, No. 6, pp. 921~930.
- (9) Hsu, D. K., 1985, "Characterization of a Graphite/Epoxy Laminate by Electrical Resistivity Measurements," *Rev. Prog. in Quantitative NDE*, Vol. 4, pp. 1219~1228.
- (10) Tse, K. W., Moyer, C. A., and Araj, S., 1981, "Electrical Conductivity of Graphite Fiber Epoxy Resin Composites," *Materials Science and Engineering*, Vol. 49, No. 1, pp. 41~46.