

T-ray를 이용한 풍력터빈 블레이드 비파괴결합평가

임광희*, 정종안⁺, David K. Hsu⁺⁺, 이길성⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 10. 26, 수정일 2012. 01. 21, 심사완료일 2012. 02. 01)

Nondestructive Evaluation of the Turbine Blade of Wind Energy By Using T-Ray

Kwang-Hee Im*, Jong-An Jeong⁺, David K. Hsu⁺⁺, Kil-Sung Lee⁺⁺⁺

Abstract

A study of terahertz waves (T-ray) was made for the nondestructive evaluation of FRP (Fiber reinforced plastics) composite materials. The to-be-used systems were time domain spectroscopy (TDS) and continuous wave (CW). The composite materials investigated include both turbine blades of wind energy (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. This was demonstrated in CFRP (Carbon fiber reinforced plastics) laminates. Refractive index (n) was defined as one of mechanical properties; so a method was solved in order solve the "n" in the material with the cut parts of the turbine blades of wind energy. The defects and anomalies investigated by terahertz radiation were foreign material inclusions and simulated disband. Especially, it is found that the T-ray went through the turbine blade with greater thickness (about 90mm).

Key Words : T-ray(테라헤르츠파), FRP(섬유복합재료), Refractive index(굴절계수), Time domain spectroscopy(시간영역 분광기), Continuous wave(연속파), Turbine blades(터빈 블레이드), Wind energy(풍력)

1. 서론

최근 관심을 받고 있는 테라헤르츠파 (Terahertz wave : T-ray)활용이 활발히 진행이 되고 있다. 또한 테라헤르츠파는 비파괴검사분야 뿐 만 아니라 공항에서의 보안 검색 장치, 의료 영상, 유극성 액체, 각종 산업 시설 및 복합재료 등에 이용이 되고 있다. 이는 T-ray가 갖는 마이크로 파 보다 더 짧은 파장과 비교적 높은 해상도를 가지고 있기 때문이다⁽¹⁾. 또한 테라헤르츠 시간영역 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-TDS 는 광 전도성의 특성을 가지고 있으며 특히, 펨토 초(10^{-15} 초) 레이저를 이용하여 광 전도성 안테나를 여기 시켜서 필요한 저(Low) 싸이클의 테라헤르츠 파형을 발생시키는 것에 의존하고 있다⁽²⁾.

피코 초 이하의 THz 파를 발생 시킬 수 있어 결과적으로 잡음 대비 높은 신호(S/N)를 이용하여 탐상할 수 있게 되었다. 이때 발생하는 에너지는 여러 개의 테라헤르츠로 분포되어 대

* 우석대학교 기계자동차공학과 (khim@woosuk.ac.kr)
주소: 565-701 전북 완주군 삼례읍 후정리 490

+ 송원대학 자동차과

++ 미국 아이오와 주립대학교 CNDE

+++ DACC Aerospace Wind Energy

단히 넓은 대역폭에 영향을 미치게 된다. 테라헤르츠파 송신기(Emitter)의 일시적인 변화는 테라헤르츠 시간 척도 상 광 전도성 스위치의 저항 때문에 발생하게 되는 것이다⁽³⁾. 이에 덧붙여, 또 다른 방법은 광학적인 이방성 변환 또는 광 혼합으로서 이것은 두 개의 연속파(Continuous wave: CW) 레이저를 이용하여 얻을 수 있다. 이 때 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 있으며 화학적 성분까지 검사 및 탐상할 수 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 응용이 되어 지고 있어 현장 응용 뿐 만 아니라 적용기술의 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 및 적용면에서 우선 우주 및 민간 항공 분야에서 널리 사용되는 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced plastics : FRP) 적층판에 대해 적용을 하고자 한다. 섬유가 내재한 에폭시 매트릭스 복합재료의 굴절계수 (n)과 흡수 계수(α) 및 전기 전도도를 다루며 또한 탄소섬유복합재료(Carbon fiber reinforced plastics : CFRP)에 대한 THz 스캔 이미지 해석 및 평가이며 탄소 섬유가 전도성인 반면에 에폭시 매트릭스는 전도성을 가지고 있지 않지만 CFRP 적층판의 탄소섬유는 전도성을 띄고 있어⁽⁴⁾ 탄소섬유의 전도성 특성 검사 및 평가하였다.

그리고 풍력터빈브레이드는 GFRP, 발사 및 에폭시로 다양한 복합재료로 구성되어 있다⁽⁵⁾. 일반적인 초음파 기법으로는 투과력에 대한 한계가 있어 투과력이 우수한 T-ray를 이용하였다. 0.1에서 1.0THz 의 주파수를 갖는 테라 헤르츠 펄스가 대략 100mm(4 inches)인 GFRP, 발사 및 에폭시로 구성된 풍력 터빈 브레이드의 꼬리 부분의 투과능을 나타냈다. 송신된 테라 헤르츠 펄스의 비행 시간(Time-of-flight : TOF)은 터빈 꼬리 부분의 GFRP, 발사 및 접착재 층에서 각각의 두께와 파형 속도(굴절계수)를 이용하여 계산하였으며 구성 요소의 굴절계수는 GFRP, 발사(Basal) 및 에폭시(Epoxy) 샘플을 가공하여 측정하였다. 풍력 터빈 브레이드의 꼬리 부분에서 떼어낸 샘플을 썬기 모양을 한 것이었다. 그 폭은 360mm 이며 두께는 두꺼운 쪽에서 85-95mm, 얇은 쪽에서 30mm 이었다. 송신된 테라 헤르츠 펄스의 비행 시간은 폭의 중앙을 따라가는 선을 따라 측정하였다. GFRP, 발사 및 에폭시 층 중앙부의 두께는 2 개의 노출된 가공 단에서 측정된 두께의 평균치로 정하였다. 이들 샘플은 또한 에폭시 내부에 공간을 갖고 있어 그 크기는 측정할 수 없었다. 실제로 측정된 비행시간과 계산된 비행 시간의 상호 비교 분석에서는 이들 공간의 여러 가지 추정 크기를

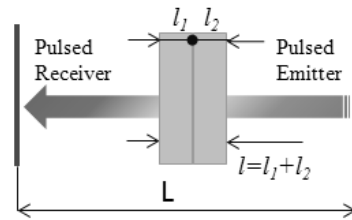


Fig. 1 Diagram showing the geometry of the through-transmission mode

사용하였다. 또한 테라헤르츠파를 이용해 다양한 재료의 물성치로 나타내는 굴절계수(Refractive index : n)의 측정기법과 전도성을 가지고 있는 CFRP 복합적층판의 섬유방향과 전기장(E-field)의 상관관계를 고려하여 테라헤르츠파의 적용 및 응용을 수행하였다.

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 n_{equ} 을 여러재료의 하나의 등방성 재료로 가정하여 즉, $l = l_1 + l_2$ 하여 상당 굴절계수(n_{equ})로 하였다. 시험편 없이 T-ray 비행시간(TOF)를 구하면 다음과 같다.

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

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

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

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

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

시험편에서 T-ray의 비행시간(TOF)을 구하면 시험편의 특



Fig. 2 THz TDS system for imaging and material parameter measurement

성인 굴절계수(Refractive index)을 구할 수 있다. 따라서 다음 식을 이용하면 시험편의 T-ray 투과시간 (Δt)을 구할 수 있다.

$$\Delta t = t_{total\ time\ with\ sample} - t_{total\ time\ without\ sample} \quad (3)$$

$$\Delta t = \left(\frac{L-l}{V_{air}} + \frac{l}{V_s} \right) - \frac{L}{C_{air}} \quad (4)$$

$$= -\frac{l}{V_{air}} + \frac{l}{V_s} - l \left(\frac{1}{V_s} - \frac{1}{C_{air}} \right)$$

$$V_{air} \frac{\Delta t}{l} = \frac{C_{air}}{V_s} - 1 = n_{equ} - 1 \quad (5)$$

$$\therefore n_{equ} = 1 + \frac{\Delta t C_{air}}{l} \quad (6)$$

여기에서 n_{equ} 는 시험편의 상당 굴절계수(Equivalent refractive index: n_{equ})이며, l 은 시험편의 두께이다.

3. 실험시스템 및 측정

3.1 측정시스템

Fig. 2는 비파괴시험장치인 테라헤르츠 시간영역 분광학 (THz-TDS) 시스템을 나타냈다. 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, 제어 또는 탐상하기 위한 TDS 기술로 이루어져 있다. THz-TDS 시스템은 이미지를 구현하고 데이터 획득을

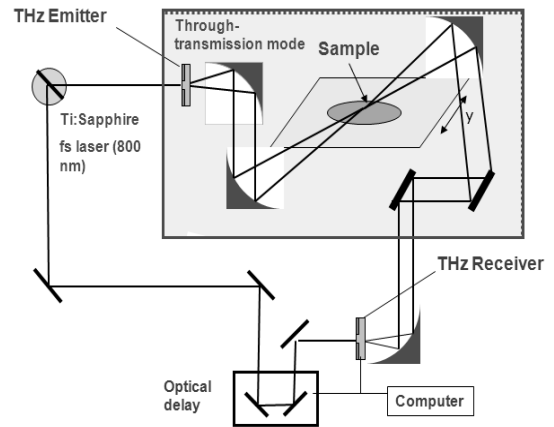


Fig. 3 THz measurement method with through-transmission mode

높일 수 있으며 테라헤르츠파를 직접 조작하는데 있어 광학 장치의 특유의 구조상의 특성은 이미지 제조 실험상 의미를 갖고 있다. 본 TDS 장치는 주파수 범위 50GHz - 4THz 와 최대 300ps 까지의 지연시간을 갖고 있다. T-ray 빔은 초점 거리 50mm와 150mm 에 집중되며 최대 빔 폭에서의 반(Full width at half maximum : FWHM)은 각각 0.8mm and 2.5mm 이다. 본 TDS 장치는 투과 또는 반사(소 각도 피치 캐치) 측정 용으로 설정할 수 있다. CW 장치의 주파수 범위는 50GHz - 1.5THz 이며 100MHz 에서 가장 좋은 해상도를 얻을 수 있다. CW 장치의 초점 거리는 역시 50mm 및 150mm 이다. TDS 및 CW 장치는 광 섬유로 서로 연결되어 있다. Fig. 3은 T-ray 시스템에 있어서 투과 모드 개략도를 나타냈다.

3.2 측정방법

Fig. 3은 투과모드인 테라헤르츠 측정시스템을 나타냈는데 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 150mm으로 구성되어 있으나 시험편의 두께를 고려하여 초점거리를 정할 수 있다.

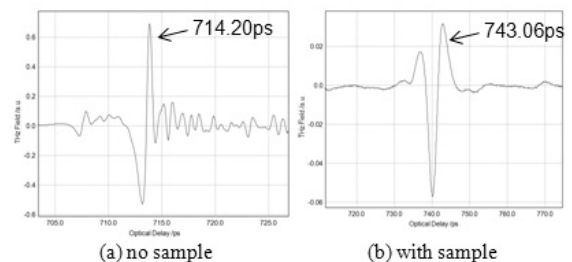


Fig. 4 THz TDS pulses from transmitted GFRP sample ($\Delta t = 28.86ps$ for GFRP 7.39mm thick)

4. 결과 및 고찰

4.1 테라헤르츠 굴절계수 측정

재료의 물성치를 나타내는 T-ray 파라메타를 측정하기 위해 GFRP 복합재의 투과모드에서 THz 펄스를 획득하였다. Fig. 4에서 시험편이 있는 경우와 시험편이 없는 경우의 시간차를 명확히 볼 수 있다. GFRP 시험편을 이용을 했으며 두께가 대략 6.0mm 이다. 풍력브레이드 시험편 두께를 고려하여 테라헤르츠의 렌즈초점거리는 150mm으로 하였으며 투과모드를 이용한 굴절계수를 구하기 위해 측정기법중 하나인 투과 모드를 이용하여 광학적인 시간차를 계산하며 식 (6)을 이용하여 계산하였다. 그리고 Table 1은 GFRP 복합재료와 Balsa, Epoxy 샘플 시험편을 투과모드방법을 이용해 측정하였다. 데이터의 표준편차는 1-2%전후 차이밖에 나타나지 않았다. 이는 실험 시에 테라헤르츠의 투과모드 측정기법이 여러 가지로 고려해야 할 파라메타가 없고 실험이 용이하기 때문이라 판단된다. 그리고 복합재료 시험편의 경우는 제조방법이나 특성이 다르기 때문에 기존 데이터와 비교의 어려움이 있었다⁽⁶⁻⁷⁾.

Table 1 Average THz refractive indices of the material studied

Materials	Refractive index(n)*
GFRP	2.17 ± 0.05
Balsa	1.18 ± 0.05
Epoxy	1.76 ± 0.06

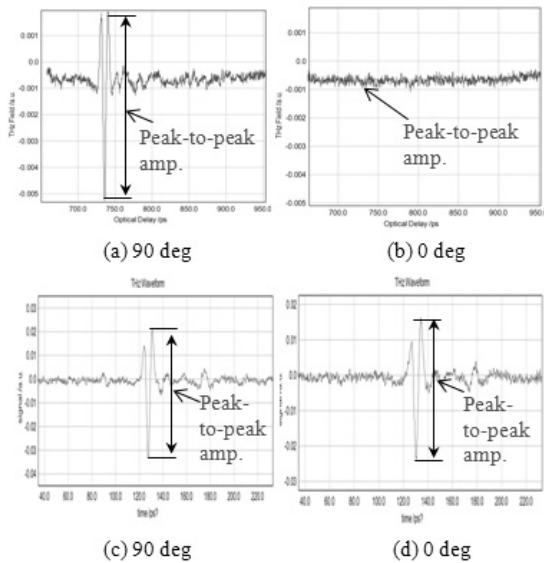


Fig. 5 Angular dependence of transmitted power of THz terahertz waves through (a) and (b) of a 10-ply unidirectional carbon composite laminate and (c) and (d) of GFRP laminate with 12 mm in thickness

4.2 전기장(E-field) 평가

테라헤르츠파는 비전도체 재료와는 다르게 전도체 재료에 투과력에는 한계를 가지고 있어 탄소섬유와 유리섬유의 비교측면에서 적용여부를 다루었다. 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 구성되어 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 구성되어 있고 다양한 적층구성으로 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(σ_l)의 값은 $1 \times 10^4 S/m$ 에서 $6 \times 10^4 S/m$ 에 이른다고 보고되고 있으며 횡방향의 전도성(σ_t)의 값은 그 범위가 훨씬 넓어 대략 $2 S/m$ 에서 $600 S/m$ 에 이른다고 보고되고 있다. 일방향재 프리프레그시트를 이용한 적층판의 횡방향 전도성 값은 제조 과정과 적층판의 품질에 따라 크게 달라진다고 판단된다. 일방향 CFRP복합재에서 섬유 축과 θ 각을 이루면서 흐르는 전류에 대한 평면 전도성은 θ 각에 크게 의존을 하고 있다⁽⁸⁾.

섬유길이 방향의 전도성이 매우 크기 때문에 일방향재 CFRP 복합재를 투과하는 테라헤르츠파는 전기장 벡터와 탄소섬유 축이 이루는 상대 각도에 따라 크게 달라진다.

따라서 Fig. 5에서 테라헤르츠 투과모드로 실험을 하였다. Fig. 5(a) 및 (b)은 CFRP복합적층판의 섬유방향⁽⁹⁾이 전기장(E-field)으로 90° 및 0° 로 투과여부를 검토하여 전기장과 섬유 방향이 일치하는 경우 ((b) 0° 경우)는 전도체인 섬유가 테라헤르츠파를 방해하고 있기 때문에 수신 테라헤르츠 피크 대 피크 진폭(Peak-to-Peak amplitude) 신호를 볼 수 없었다. 그러나 (a) 90° 경우는 섬유와 섬유사이로 테라헤르츠파가 진행하여 수신 테라헤르츠파 신호를 확인 할 수 있었다. 특히, CFRP 복합적층판의 섬유방향과 전기장이 90° 일 때 테라헤르츠파 신호가 가장 크게 나타났기 때문에 테라헤르츠파의 투과율이 매우 높아 비파괴 검사신호를 최적화 시킬 수 있다고 판단된다. 그러나 GFRP 복합적층판의 경우는 비도체이기 때문에 섬유와 전기장 방향과 관계없이 테라헤르츠 신호를 확인 할 수 있었다. 그러나 Fig. 5(c) 및 (d)는 GFRP적층판시험편을 사용했는데 T-ray와 전기장(E-field)방향과 상관없이 수신자에서 테라헤르츠 피크 대 피크 진폭(Peak-to-Peak amplitude) 신호를 확인 할 수 있었다. 이는 테라헤르츠파가 시험편 방향성에 따라 투과성을 나타낸다.

4.3 풍력 터빈 브레이드 스파 캡(Spar cap)의

“히든(hidden)” 박리

TDS 모드와 시간 영역 테라헤르츠 파형은 초음파 신호와 유사하다. 비행시간(TOF), 전송 및 반사 계수, 굴절 및 산란 등과 같은 파형 전파형태는 두 가지 파형에서 공통적이다. 그러나, 전자기 파의 일종인 테라헤르츠파와 기계파의 일종인 초음파로 탐상 할 때는 근본적인 차이가 있다. 첫 번째로 무엇보다 테라헤르츠파는 초음파와는 달리 파가 진행 할 때 매개체를 필요로 하지 않는다는 점이며 이것은 진공이나 공기 중을 쉽게 투과할 수 있다. 그러나 이러한 영향으로 후판 시험편에 커다란 박리 뒤에 감추어져 있는 작은 박리의 초음파로 검사 및 탐상에 있어서 “그림자 효과(Shadow effect)” 때문에 지장을 받게 된다. 따라서 커다란 크랙 때문에 작은 크랙을 탐지할 수 없다. 이와는 대조적으로 테라헤르츠파에서는 그러한 제약이 없다.

이런 그림자 효과를 규명하기 위해 풍력 터빈의 스파 캡(Spar cap)에 2개의 반원형 톱날 홈을 직경 101.6mm, 직경 127mm 으로 각각 박리를 가공했다. 이때 스파 캡의 두께 28.7 mm이며 작은 박리(직경 101.6mm)는 큰 박리(직경 127mm) 바로 아래에 났다. 2개의 박리는 Fig. 6에 보인 바와 같이 표면에 평행하게 났다. T-ray 시험 시에는 TDS 테라헤르츠시스템에서 투과모드를 사용하여 두 개의 톱날 홈을 갖고 있는 시험편에 대한 T-ray 스캔이미지를 구현하였다. 여기에서 테라헤르츠렌즈 초점거리는 150mm으로 하였다. Fig. 7(a)에서 보인 바와 같이 투과된 테라헤르츠 펄스 진폭의 이미지는 이중의 톱날 홈을 명확하게 보여 주었다. 시험편의 아래쪽에 2개의 톱날 박리를 갖고 있다. Fig. 7(b) 및 (c)는 Fig. 7(a)의 A-A', B-B'의 T-ray B-scan이미지를 나타내고 있다. A-A'의 위치는 박리가

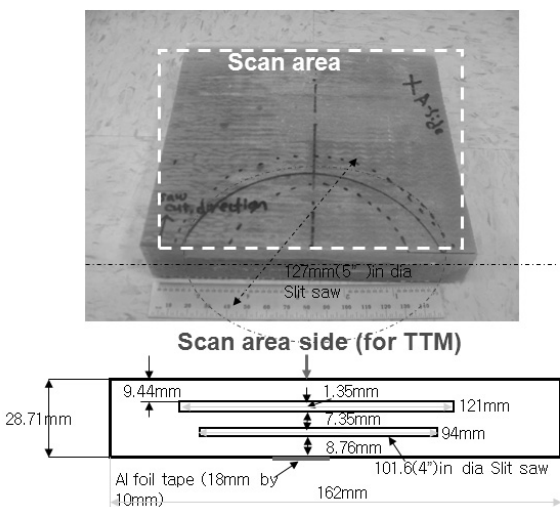


Fig. 6 Spar cap of wind turbine blade with two simulated delaminations in the same location of sample by using a saw cutter

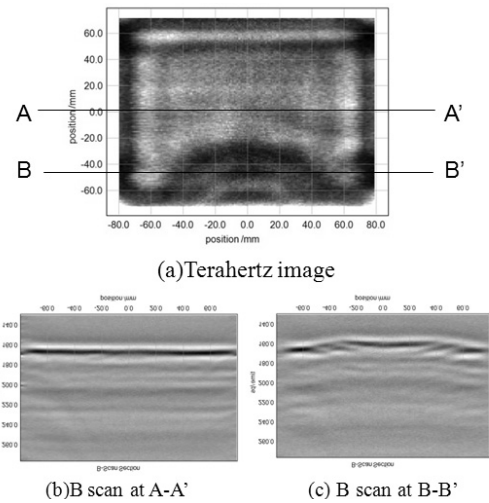


Fig. 7 Detection of double saw cuts in wind blade spar cap. Scan size is 160 x 144mm, step size is 1.0 mm and focal length is 150mm. Through-transmission mode was utilized

없는 경우이고 B-B'의 위치는 2개의 박리가 있는 경우이다. 이때 B-B'의 스캔이미지를 보면 TOF 차이를 보이고 있다. 이는 박리가 있어 TOF가 변화가 있어 짧아 졌다는 의미이고 또한 2개의 박리가 있는 경우는 더욱 큰 차이를 보이고 있었다. 따라서 후판인 풍력터빈 스파 캡에 있어 테라헤르츠파는 “그림자 효과” 로부터 아무런 방해받지 않는 것을 알 수 있었다.

4.4 풍력 터빈 브레이드 투과력

풍력터빈 브레이드는 전형적으로 3가지 다른 재료로 이루어져 있다. GFRP복합재료, 발사나무 및 에폭시가 그 자체이다. 이들 3가지 재료는 모두 비 전도성을 가지고 있으므로 풍력 터빈을 검사하는 데는 테라헤르츠파를 이용할 수 있다. 이 테라헤르츠파의 풍력 터빈 브레이드의 투과현상을 평가하기 위하여 풍력터빈 브레이드의 꼬리 끝 부분으로부터 샘플을 잘라 내어 테라헤르츠시스템을 이용해 반사 및 투과모드 시험에 사용하였다. 이들 샘플은 주로 썩기모양을 하고 있으면서 여러 발사나무 코어를 이루고 있고 유리섬유복합재 표피를 갖고 있는 것이다. 2개의 인접 표피는 Fig. 8에서 보인 바와 같이 두꺼운 층의 에폭시 접착재로 접합하였다. 두께는 썩기의 두꺼운 끝에서 대략 95mm 얇은 끝에서 45mm 이었다. 이들 꼬리 끝 부분의 샘플에 대한 시험에 들어가기 전에 각 구성 부분에 대한 굴절계수를 날개의 다른 부분에서 절단하여 가공한 6mm 두께의 평판을 이용하여 측정하였다. 측정된 굴절계수는 발사 나무 코어에서 1.18, 에폭시에서 1.76 그리고 유리섬유 복합재에서 2.17로 나타났다.

우선 투과모드에 있어서 비행시간(TOF) 측정은 꼬리 끝 부분의 7개 위치에서 실시하였다. 풍력 터빈의 브레이드 꼬리 끝에서의 T-ray 지연 비행시간 (Δt)의 계산치와 실험치의 결과

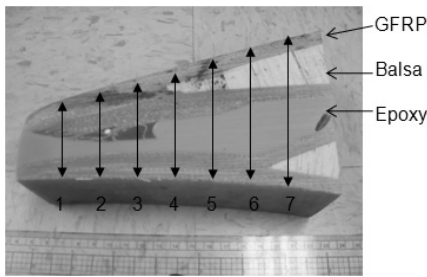


Fig. 8 Complex structure with GFRP, epoxy and balsa

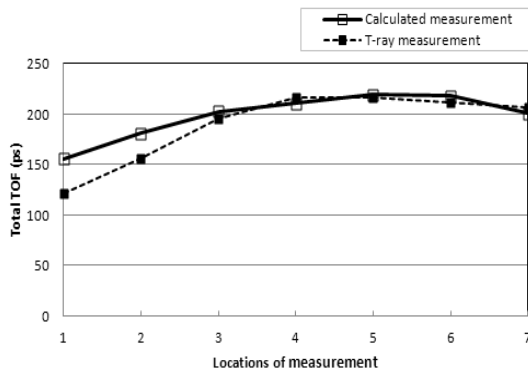


Fig. 9 Transmission of terahertz pulse through the trailing edge of a wind turbine blade

를 계산하였다. 각각의 시험편을 측정할 때 각 시험편을 블레이드에서 잘라 내고 가공하여 굴절계수(Refractive index: n)를 측정하였다. 각각의 위치에서 TOF 값은 실측된 굴절계수와 각 부품의 추정 두께를 가지고 계산하였으며 특히, 2면의 노출 단의 평균 층 두께를 사용하였다. 각층의 두께는 길이 방향으로 서로 크게 다르게 되어 Fig. 9에서 보인 바와 같은 TOF 실측치와 계산치가 서로 일치할 하고 있으나 위치 1, 2 위치에서 다소 차이를 나타내고 있다. 이는 두꺼운 에폭시 층에는 일부 보이드, 유리섬유와 수지 결핍 등이 나타나 영향을 미쳤다고 사료된다.

5. 결론

풍력블레이드의 복합재 비파괴 검사에 테라헤르츠파(THz)의 적용 및 응용에 관한 연구로써 재료 물성치의 하나인 테라헤르츠파의 굴절계수(Refractive index)의 측정기법을 수행하였으며 또한 테라헤르츠파의 전기장(E-field)특성을 검토하였다. 특히, 풍력터빈 블레이드 복합재에 대하여 테라헤르츠파를 이용해 투과모드에 따라 테라헤르츠파의 비행시간(TOF)을 측정하여 풍력터빈 블레이드 복합재의 평가결과를 다음과 같이 얻을 수 있었다.

- (1) 풍력블레이드 복합재료에 대한 테라헤르츠파를 이용해 투과모드하에서 굴절계수를 측정할 수 있었다.
- (2) 테라헤르츠파는 탄소섬유방향에 따라 제한된 투과력을 가지고 있었지만 비도체인 GFRP복합재는 영향을 받지 않았다.
- (3) 테라 헤르츠는 스파 캡(Spar cap)에 낸 이중의 톱날 홈에 대한 초음파 비파괴 검사의 경우와는 달리 “그림자 효과(Shadow effect)”의 영향을 받지 않았다.
- (4) 풍력터빈 블레이드 꼬리부분의 테라헤르츠파 시스템을 사용하여 투과 비행시간의(TOF) 실측치와 계산치가 잘 일치 하였으나 일부분은 다소 차이가 발생하였다. 이는 블레이드의 복잡성으로 인해 기인 한 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2011년도 (재)전북테크노파크의 전라북도 지원 R&D사업에 의해 지원 받았음.

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, 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) Hsu, D. K., 1985, “Characterization of a Graphite/Epoxy Laminate by Electrical Resistivity Measurements,” *Rev. Prog. in Quantitative NDE*, Vol. 4, Plenum Press, pp. 1219~1228.
- (5) Habalia S. M., and Salehb L. A., 2000, “Local Design, Testing and Manufacturing of Small Mixed Airfoil Wind Turbine Blades of Glass Fiber Reinforced Plastics Part I: Design of the Blade and Root,” *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, pp. 249~280.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Tse, K. W., Moyer, C. A., and Araj, S., 1981, “Electrical Conductivity of Graphite Fiber epoxy Resin Composites,” *Materials Science and Engineering*, Vol. 49, pp. 41~46.
- (9) Im, K. H., Zhang, G. L., Choi, S. R., Ye, C. H., Ryu, J. S., Lim, S. H., Han, M. G., and Hsu, D. K., 2011, “One-Sided Nondestructive Evaluation of CFRP Composites By Using Ultrasonic Sound,” *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 47~52.