



테라헤르츠파를 이용한 복합재의 투과특성과 비파괴검사 탐상기법

곽영환^a, 김선규^b, 정종안^c, 조영태^d, 우용득^e, 임광희^{e*}Nondestructive Evaluation (NDE) Techniques and
Penetration Characterization of Composites Using Terahertz WavesYoung-Hwan Kwak^a, Sun-Kyu Kim^b, Jong-An Jung^c, Young-Tae Cho^d, Yong-Deuck Woo^e, Kwang-Hee Im^{e*}^a Department of Mechanical System Eng., Chosun University Graduate School, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea^b Division of Mech. System Eng., Chonbuk Natl. University,

567, Backjeda-ro Duckjin-gu, Jeonju, Jeonbuk-do, 54896, Korea

^c Department of Mechanical and Automotive Engineering, Songwon University,

73, Songarm-ro, Nam-gu, Gwangju 33209, Korea

^d Department of Manufacturing Design Eng., Jeonju University, 303, Chunjam-ro, Wansan-gu, Jeonju, Jeonbuk-do, 55069, Korea^e Department of Automotive Eng., Woosuk University, 443, Samrae-ro, Wanju-kun, Jeonbuk-do, 55338, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 December 2018

Revised 10 April 2019

Accepted 12 April 2019

Keywords:

T-ray

FRP

Refractive index

Continuous wave

Shadow effect

Lens

ABSTRACT

Recent technology and instrumentation in terahertz waves have provided a reliable field in the electromagnetic spectrum, which is explored for material evaluation and composite testing. Here, we report an investigation of terahertz waves (T-ray) for the nondestructive evaluation of various materials, such as composite materials and lumbars. The T-ray system uses time domain spectroscopy (TDS) and continuous wave. The various materials and composites investigated include non-conducting materials and composites. Terahertz signals in the TDS mode are similar to that of ultrasound; however, unlike ultrasound, a terahertz pulse can detect a smaller crack hidden behind a larger crack without the shadow effect. These exterminations were demonstrated in thick glass fiber reinforced plastics (GFRP) laminates using saw slots and flat bottom holes. Additionally, two prepared lumbars were investigated using the TDS system through image analysis and refractive index measurement. The effectiveness and limitations of T-ray for the NDE of composites are discussed.

1. 서론

최근 비파괴평가분야에서 테라헤르츠파(Terahertz wave: T-ray)는 관심과 각광을 받고 있는 실정이다. 특히, 현재 테라헤르츠파는 NDE (Nondestructive evaluation) 검사분야 뿐 만 아니라 산업구조물과 재료특성평가에 이용이 되고 있다. 일반적으로

T-ray는 마이크로 파 보다 짧은 파장과 비교적 높은 해상도를 가지고 있다^[1]. 또한 시간영역 테라헤르츠파 분광학(Terahertz Time Domain Spectroscopy: THz-TDS) 기술은 재료 내부에 있는 다양한 손상, 결함 및 물성치를 비접촉 방식으로 탐상을 한다. 여기서 테라헤르츠파 시간영역 분광학은 광 전도성의 특성을 가지고 있으며 특히, 펄스 초(10^{15} 초) 레이저소스를 이용하여 광 전도성 안테나에

* Corresponding author. Tel.: +82-63-290-1473

Fax: +82-63-290-1681

E-mail address: khim@woosuk.ac.kr (Kwang-Hee Im).

집중화하여 필터링 하면 테라헤르츠 파형을 발생시킨다^[2,4]. 이때 발생되어진 테라헤르츠파는 잡음 대비 높은 신호(S/N)를 이용하여 탐상이 가능하다. 또한 연속파(Continuous wave: CW)는 광학적인 이방성 변환 또는 광 혼합함으로써 얻을 수 있다. 이 때 올림(Beating)은 2개의 레이저를 혼합시키면 발생하는데 이 올림은 광전도성 스위치의 콘덕턴스의 테라헤르츠파 주파수를 이용하여 변조시킨다^[2,3].

따라서 테라헤르츠파의 활용 측면을 보면 첨단분야에 널리 사용되는 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced plastics: FRP) 복합재에 대해 적용을 하고자 한다. 우선 FRP 복합재의 물성치의 하나인 굴절계수(n)를 측정하며 테라헤르츠파를 활용하여 Fused quartz, 목재, PMMA 및 GFRP 복합재의 특성평가를 한다^[7,9]. 특히, 결함이 내재한 GFRP 복합재 및 보존액을 처리한 목재에 대하여 테라헤르츠파를 적용해 투과모드기법에 따라 테라헤르츠파의 렌즈의 초점거리에 따른 피크대 피크 이미지해석 및 테라헤르츠파 속도를 측정하였다.

그리고 테라헤르츠파를 이용하여 인공결함인 FBH (Flat bottom hole) 내재한 GFRP 복합재의 C-scan 이미지를 보면 유리 섬유 (Woven fiber) 형태와 FBH의 경계선이 명확하게 나타나는 것은 테라헤르츠파의 빔사이즈의 크기에 영향을 평가하였다. 특히, 복합재 후판을 활용하여 2개의 결함을 가공하여 결함을 탐상을 위해 공기층을 투과하는 테라헤르츠파를 활용하여 “그림자 효과(Shadow effect)” 없이 검사 측정 기법을 제안했으며 천연 복합재인 목재에 보존액을 처리 유무에 따라 NDE 평가를 실시하였다. 우선 보존액을 처리하지 않은 경우에 테라헤르츠파 속도를 보면 가장자리보다 중앙부분이 높게 나타났다. 이는 나이테의 영향이 미쳤다고 사료된다. 특히, 보존액을 처리한 목재의 중앙부에서 테라헤르츠파 속도가 소폭증가하였으나 가장자리부분에서는 급격히 증가하였음을 확인하였다. 이는 보존액이 내부보다 가장영역에서 흡액량이 많아 테라헤르츠파 속도에 크게 영향이 크게 미쳤음을 분석하였다.

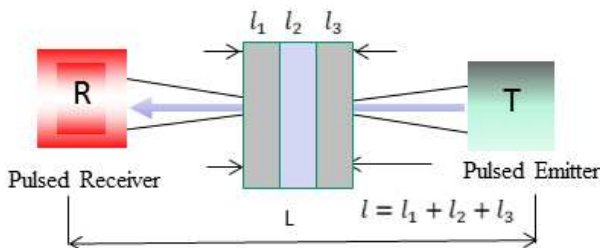


Fig. 1 Diagram showing the sandwiches geometry of the through-transmission mode

2. 테라헤르츠파 투과이론

2.1 복합재의 상당 굴절계수 측정

본 실험에서 시간영역의 테라헤르츠파에서 투과법 모드기법으로 복합재 시험편을 투과시켜 굴절계수(Refractive index)를 구하였다. 테라헤르츠파 신호의 진행방향을 Fig. 1에 나타냈다. 여기에서 테라헤르츠파 신호는 송신기(Transmitter:T)에서 수신기(Receiver:R)로 진행한다. 테라헤르츠파의 펄스 송신기(Pulsed emitter)에서 시험편을 투과 시킬 때 수신기(Pulsed receiver)에 도달시간과 시험편이 없이 투과 시킨 후 각각 비행거리(TOF)를 측정하여 굴절계수(Refractive index)를 얻을 수 있다.

우선 참고문헌^[4,6]으로부터 상당굴절계수(n_{equ})를 구하기 위하여 샌드위치 재료의 하나의 등방성 재료로 가정하여 즉, $l = l_1 + l_2 + l_3$ 으로 하여 상당 굴절계수(n_{equ})를 구한다. l 은 전체 샌드위치 시험편의 두께이며 l_i 는 각각 샌드위치의 재료의 두께이다. 시험편없이 테라헤르츠파의 비행시간(TOF)를 다음과 같이 구할 수 있다^[4,6].

$$t \quad (1)$$

여기에서 t 는 샌드위치 시험편없이 수신되는 비행시간이며 L 는 테라헤르츠파의 송신기와 수신기 사이의 길이를 나타낸다. C_{air} 는 공기중에서 빛의 속도(3×10^{10} cm/s)이다.

시험편에서 테라헤르츠파의 비행시간(TOF)을 구하면 시험편의 특성인 상당굴절계수(Equivalent refractive index)를 구할 수 있다. 따라서 다음 식을 이용하면 샌드위치시험편의 투과시간(Δt)을 구할 수 있다^[5,6].

$$\Delta t = t \quad (2)$$

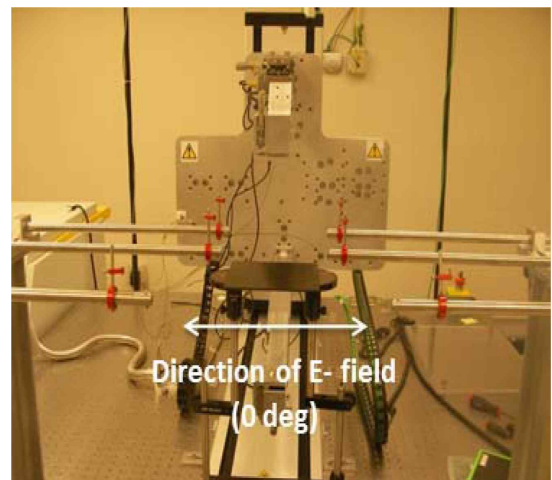


Fig. 2 THz TDS system for imaging and measuring material parameters

$$V_{air} \frac{\Delta t}{l} = \frac{C_{air}}{V_s} - 1 = n_{equ} - 1 \quad (3)$$

$$\therefore n_{equ} = 1 + \frac{\Delta t C_{air}}{l} \quad (4)$$

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

3. 실험시스템 및 측정

3.1 테라헤르츠파 시스템

Fig. 2는 NDE장치인 테라헤르츠파를 이용한 THz-TDS 시스템을 나타냈다. 본 장비는 샌드위치 시험편 재료특성과 물성치를 획득을 위한 것이다. 본 실험에서 영국 테라 뷰(TeraView)사에서 제작한 테라헤르츠 시스템을 이용하였다. 본 장비는 TDS 펄스 장치 및 CW 장치로 구성되어 있으며 특히, 이 TDS는 테라헤르츠파를 발생, 제어 또는 탐상하기 위한 것이다. 본 TDS 시스템은 스캔 이미지를 구현하고 고용량 데이터 수집을 할 수 있는 테라헤르츠파를 조작가능하다. 이 TDS 시스템에 있어서 50 GHz - 4 THz의 주파수 범위와 측정지연시간을 최대 300 ps까지 가능하다. 50 mm와 150 mm의 빔 초점 거리를 가지고 있으며 0.8 mm and 2.5 mm의 최대 빔 폭(Full width at half maximum: FWHM)을 갖는다. 본 TDS 시스템은 투과모드와 또는 소각도 피치캐츠 방법인 반사모드가 가능하다. CW 장치에 있어서는 50 GHz - 1.5 THz의 주파수 범위를 가지면 주파수가 100 MHz에서 우수한 해상도를 갖는다. CW 스템에 있어서도 50 mm 및 150 mm의 초점 거리를 갖는다. Fig. 3은 테라헤르츠파를 활용하는 구성도이다^[5,6].

3.2 측정방법

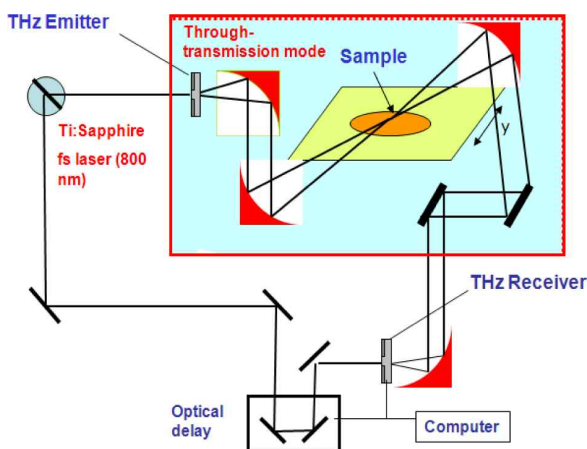


Fig. 3 THz measurement method with through-transmission mode

Fig. 3은 테라헤르츠파의 투과모드 기법을 나타냈다. 실험시에 테라헤르츠파는 송신기(Emitter)에서 발생하여 수신기(Receiver)에서 수신한다.

이때 필요한 시험편을 테라헤르츠파의 송신기와 수신기의 초점이 일치하도록 하여 시험을 수행한다. 이때 테라헤르츠파의 100 mm 및 150 mm의 초점렌즈를 사용하되 시험편의 두께를 고려하여 초점거리를 정하면 된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 테라헤르츠파 굴절계수

재료의 물성치를 나타내는 테라헤르츠파의 굴절계수를 측정하기 위해 Fused quartz의 반사모드에서 THz 펄스를 획득하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 표면파와 배면파의 시간차(Δt)를 명확히 볼 수 있다.

이때 Fig. 4은 시간차를 명확히 측정하기 위하여 배면파에 초점화를 실시하였다. Fused quartz시험편을 이용을 했으며 두께가 대략 3.23 mm 이다. 이때 투과모드로 하였으며 그리고 다양한 재료 시험편의 경우는 각 재료의 특성이나 함유량이 다르기 때문에 차이가 내재하고 있다^[6,7]. 테라헤르츠파의 광학적인 시간차를 측정하고 식 (4)을 이용하여 얻었다. 그리고 Table 1은

Table 1 Averaged THz refractive indices of the various materials

Materials	Refractive index (n)	Through transmission mode	Mean values
PMMA	1.61	1.62	1.62
Fused quartz	1.93	1.95	1.94
GFRP	2.07	2.14	2.08
Wood	1.23	1.25	1.24

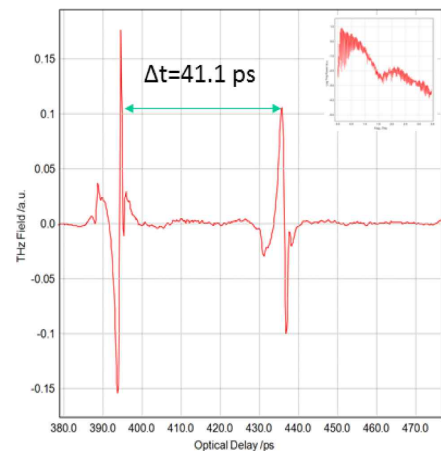


Fig. 4 Measurement of refractive index for fused quartz in reflection mode

각종 재료의 굴절계수를 측정하였다. 데이터의 표준편차는 1-2% 전후 차이밖에 나타나지 않았다. 이는 투과모드 실험 시에 테라헤르츠파의 측정기법이 샘플하고 실험이 용이하기 때문이다^[5,6].

4.2 테라헤르츠파 렌즈 특성

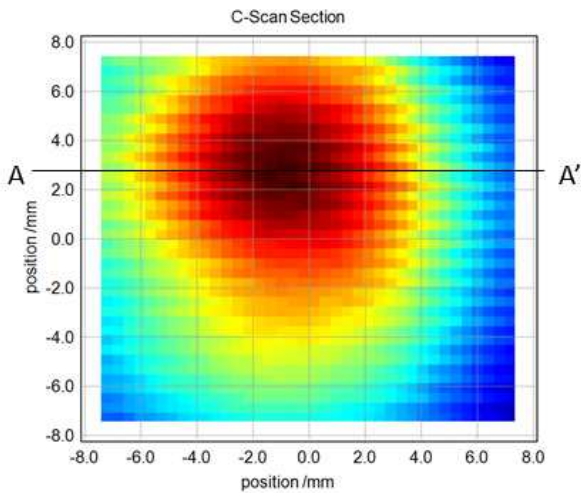
테라헤르츠파 시스템에서 수신렌즈의 감도 특성을 파악하기 위해서 수신렌즈를 고정하고 송신렌즈를 16×16 mm 스캔영역을 0.5 mm 스텝간격으로 스캐닝을 하였다. 이때 렌즈의 초점거리는 105

mm이다. Fig. 5(a)는 가로 세로 크기는 16 mm이다. 특히, 중앙부를 보면 피크 대 피크 진폭이 가장 크게 나타났으며 또한 지름은 대략 3 mm 내외이다.

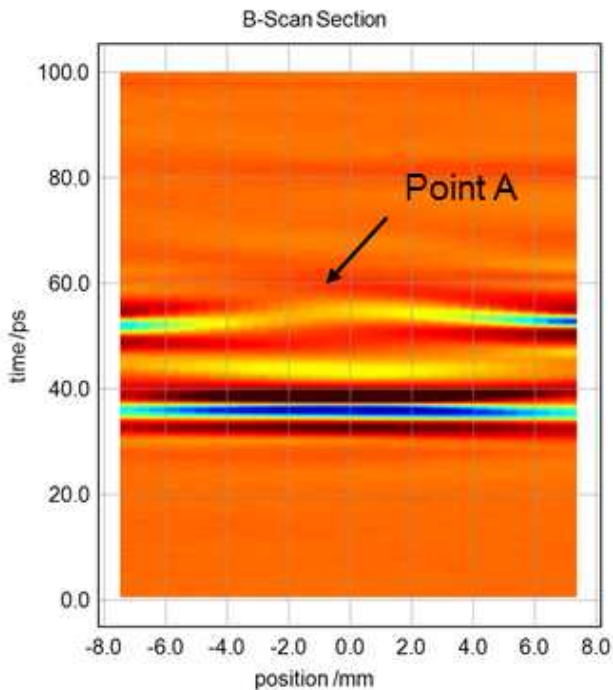
Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 A-A'의 단면인 B-scan 이미지이다. 중앙부의 Point A를 보면 약간 불룩하게 보이는 것은 테라헤르츠파의 렌즈가 볼록형으로 이루어졌기 때문이라 사료된다.

따라서 렌즈의 초점거리가 150 mm인 수신감도특성은 중앙부로 집중되어져 있음을 확인하였으며 다양한 높은 에너지가 필요로 하는 복합재 시험에는 적절할 것으로 판단된다.

본 실험에서 비도체를 갖은 GFRP, 목재, PMMA 및 Fused quartz 복합재는 스캔방향과 관계없이 테라헤르츠파의 신호가 변화가 없는 확인 할 수 있었으며 테라헤르츠파와 전기장(E-field) 방향과 관계없이 수신되었다. 이 테라헤르츠파의 피크 대 피크 진폭(Peak-to-Peak amplitude) 신호가 크게 변화하지 않음을 확인 할 수 있었다.



(a) Terahertz focal length (150 mm)



(b) B-scan image of A-A' section

Fig. 5 C- and B- scan images for the lens of Terahertz with the focal length of 150 mm

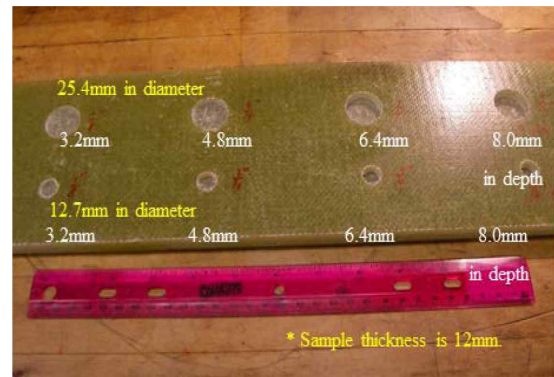
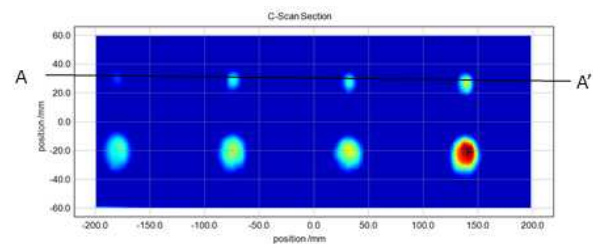
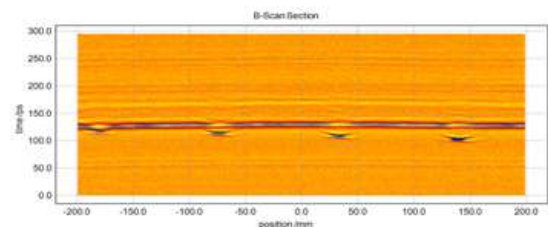


Fig. 6 T-Ray testing of flat bottom holes in GFRP solid laminates



(a) C-scan image of composite laminate



(b) B-scan at section A- A'

Fig. 7 T-ray images on GFRP Solid Laminate on through-transmission mode in case of 150 mm (focusing length)

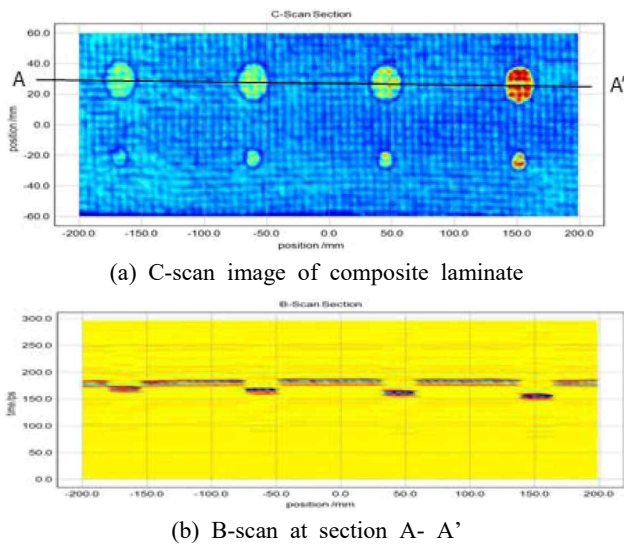


Fig. 8 T-ray images on GFRP Solid Laminate on through-transmission mode in case of 50 mm (focusing length) TOF gate length to get T-ray images in CFRP solid laminate on through-transmission mode

4.3 복합재 FBH 탐상

Fig. 6과 같이 12 mm 두께를 갖는 GFRP 복합재료판에 지름이 25.4 mm 및 12.7 mm 2가지와 깊이가 다른 3.2 mm, 4.8 mm, 6.4 mm 및 8.0 mm 인 FBH (Flat bottom hole)를 가공하였다. 이때 FBH를 배면을 향하게 하여 T-ray투과법으로 스캐닝을 실시하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 테라헤르츠파 렌즈의 초점거리가 150 mm와 50 mm의 2가지 경우를 사용하였다. Fig. 7은 렌즈 초점거리가 150 mm이고, Fig. 8은 렌즈 초점거리가 50 mm이다. 우선 Fig. 6(a)는 시험편 전면의 C-scan의 피크대 피크 이미지를 나타냈으며 Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 A-A'라인의 B-scan 이미지를 나타냈다. 이때 FBH의 지름이 12.7 mm인 경우의 B-scan 이미지를 추출하였다. FBH의 깊이에 따라 이미지가 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 이때 스캔사이즈는 400×120 mm이며 스캔스텝은 1.0 mm이다. 그리고 Fig. 8은 렌즈의 초점거리가 50 mm 경우이다. Fig. 8(a)은 FBH가 내재한 테라헤르츠파의 C-scan 피크대 피크 이미지이다. Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 A-A'라인의 B-scan 이미지를 나타냈다. 25.4 mm의 지름인 FBH의 깊이에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 특히, Fig. 8(a)의 C-scan 이미지를 보면 유리섬유(Woven fiber)의 영향과 FBH의 경계선이 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 테라헤르츠파의 빔사이즈의 크기에 영향이 미쳤다고 판단된다.

따라서 Fig. 9는 깊이가 다른 FBH의 최적화 시킬 수 있는 TOF 게이트 기법을 제안하였다. 이때 X축은 시간을 나타냈으며 Y축은

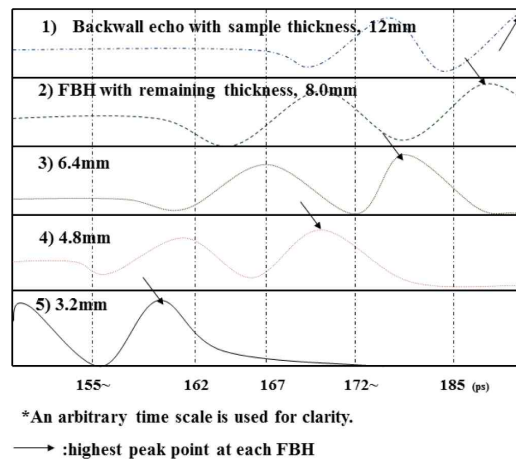
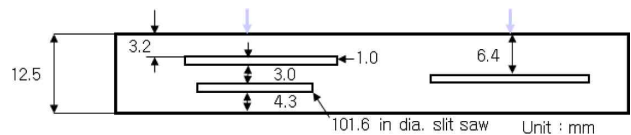


Fig. 9 TOF gate length to get T-ray images in GFRP solid laminate on through-transmission mode



(a) GFRP composite laminate with saw cuts



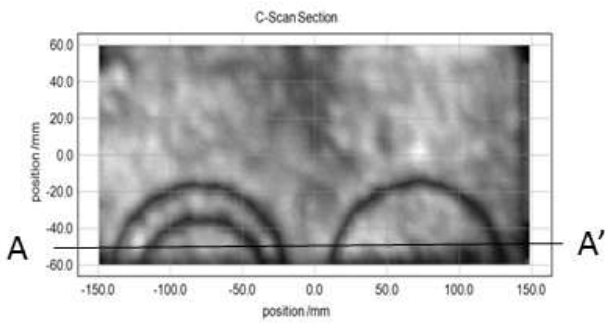
(b) Dimension of cross section in laminate

Fig. 10 T-Ray Testing of Saw cuts in GFRP Solid Laminates

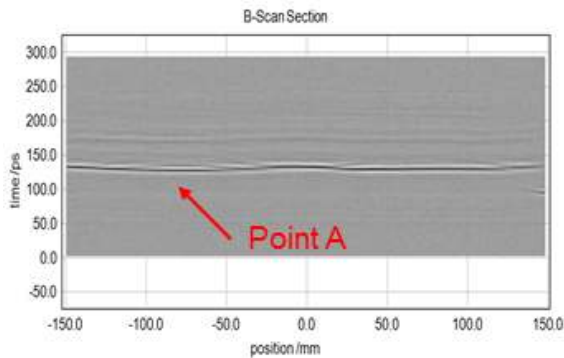
진폭이다. 그림에서 왼쪽상단 1)은 12 mm 두께를 갖는 배면에코 우 신호확인을 한다. 2)에서는 FBH깊이가 8 mm인 곳(화살표 표시)을 게이트 설정한다. 3)에서는 FBH깊이가 6.4 mm인 곳(화살표 표시)을 게이트 설정한다. 4)FBH깊이가 4.8 mm인 곳(화살표 표시)을 게이트 설정한다. 다음으로는 5)FBH깊이가 3.2 mm인 곳(화살표 표시)을 게이트 설정한다. 이렇게 원하는 곳을 최적화 이미지를 구현하기 상기와 같이 설정이 가능하였다.

4.4 복합재 Saw-cut 탐상

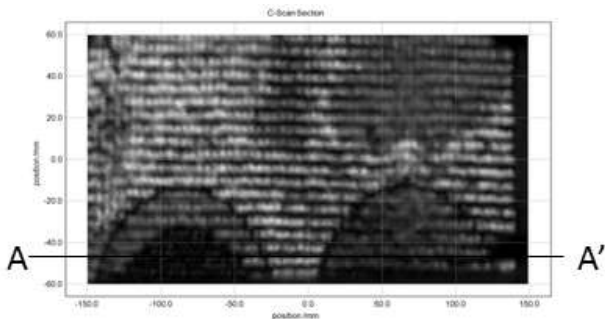
Fig. 10(a)는 GFRP복합재이며 크기는 가로×세로는 300×120 mm이며 두께가 12.5 mm이다. 그리고 Fig. 10(b)에서 왼쪽부분을 보면 2개의 Saw-cut 가공이 되었다. 상단은 지름이 127 mm이



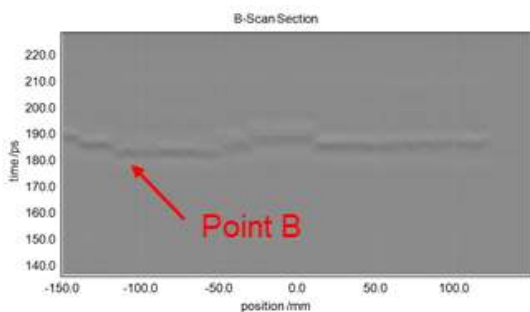
(a) T-ray C-scan image with lens focusing of 150 mm



(b) T-ray B-scan image with lens focusing of 150 mm at A-A' line of Fig. 11(a)



(c) T-ray C-scan image with lens focusing of 50 mm



(d) T-ray B-scan image with lens focusing of 50 mm at A-A' line of Fig. 11(c)

Fig. 11 T-Ray C-scan and B-scan images of saw cuts in GFRP Solid Laminates

고 하단을 지름이 101.6 mm인 Saw-cut으로 그림과 같이 가공하였다. 오른쪽은 지름이 127 mm Saw-cut으로 하나만 가공하였다. 이는 테라헤르츠파의 투과성여부를 판단하기 위해서는 실시하였

다. Fig. 11(a) 및 (b)은 렌즈 초점거리가 150 mm이고, Fig. 11(c) 및 (d)는 렌즈 초점거리가 50 mm이다.

Fig. 11(a)는 테라헤르츠파의 투과법을 이용하여 C-scan 피크대 피크 이미지를 구현하였다. 이때 왼쪽의 2개의 saw-cut이 이미지가 나타났으며 또한 오른쪽에 1개의 saw-cut 형상이 나타났다. 그리고 Fig. 11(b)를 보면 Fig. 11(a)의 A-A'라인의 B-scan 피크대 피크 이미지가 나타났다. 이때 왼쪽 2개의 saw-cut내재한 Point A를 보면 다소 일치를 뵈를 볼 수 있다. 이때 스캔영역은 300×120 mm이며 스캔스텝사이즈는 1.0 mm 이다.

Fig. 11(c)는 테라헤르츠파의 투과법을 이용하여 C-scan 피크대 피크 이미지를 구현하였다. 이때 왼쪽의 2개의 saw-cut이 이미지가 나타났으며 또한 오른쪽에 1개의 saw-cut 형상이 나타났다. 그리고 Fig. 11(d)를 보면 Fig. 11(c)의 A-A'라인의 B-scan 피크대 피크 이미지가 나타났다. 이때 왼쪽 2개의 saw-cut내재한 Point B를 보면 2개의 Saw-cut의 위치와 일치를 뵈를 확인 할 수 있었으며 또한 Fig.11(c)를 보면 GFRP복합재 유리섬유(woven fiber)의 영향을 명확히 확인 할 수 있었다.

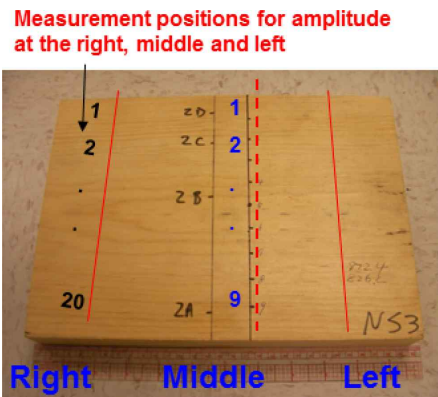
이는 테라헤르츠파에 있어서 50 mm 렌즈 초점거리 빔사이즈 (0.7-0.9 mm)의 크기에 영향이 미쳤다고 판단된다. 또한 스캔영역은 300×120 mm이며 스캔스텝사이즈는 1.0 mm 이다.

특히, 큰 saw-cut이 적은 saw-cut를 가리고 있다. 일반적으로 초음파 스캐닝시에는 큰결함이 적은 결함을 가리고 있을때에는 탐상의 어려움이 있다. 시간영역 TDS 모드의 시간 영역테라헤르츠파는 종래의 초음파 신호와 유사하여 T-ray 비행시간(TOF), 반사, 굴절 및 산란 등과 같은 파형 전파형태를 갖는다. 그러나, 전자기파인 테라헤르츠파와 기계파인 초음파로 탐상시에 근본적인 차이가 있다. 우선 사용되어진 테라헤르츠파는 매개체가 없이 진행하고 공기중이나 진공에서도 쉽게 투과할 수 있다. 특히, 후판 시험편에 커다란 공기층이있어도 테라헤르츠파가 투과가 가능하다는 것이다. 따라서“그림자 효과(Shadow effect)” 없이 검사측정이 가능하여 커다란 크랙에 묻혀 있는 작은 크랙을 탐지할 수 있는 특징이 있음을 확인할 수 있었다^[4-6].

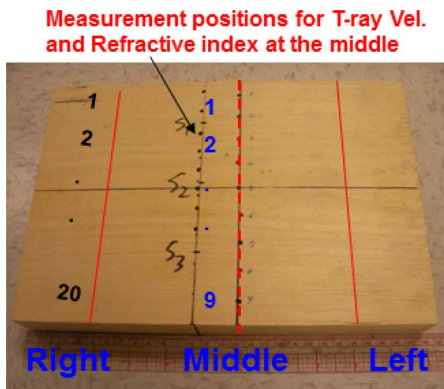
4.5 목재 복합재 NDE 탐상

Fig. 12(a)에서 목재의 가로x세로 크기는 300×220 mm이며 두께는 33.8 mm이다. 본 시험편은 통나무를 건조하여 목재로 가공하였다. Fig. 12(b)에서 목재의 가로x세로 크기는 290×210 mm이며 두께는 33.8 mm이다.

이때 목재내부의 박테리아로부터 티슈를 보호하기 위한 보존액에 24 hr 동안 침적하였다. 여기에서 중앙부에 1부터 9까지는 테라헤르츠파 속도와 굴절계수를 측정할 위치를 나타냈다. 그리고 3군데인 Right, Middle 및 Left의 라인에서 일정한 간격으로 1부터



(a) An non-preservative treated lumber



(b) An preservative treated lumber

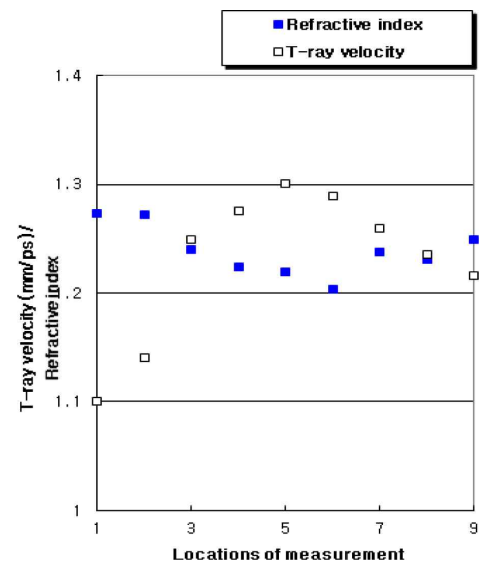
Fig. 12 Photos of an non-preservative treated and preservative treated samples

20까지 피크대 피크 진폭을 측정위치를 나타냈다.

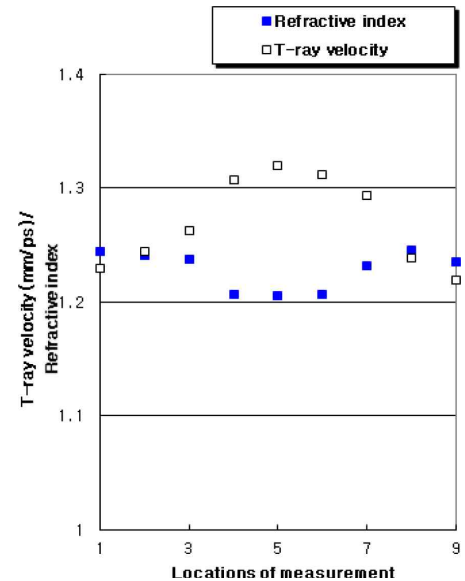
Fig. 13에서 X축은 Fig. 12의 중앙부의 1부터 9까지의 일정간격으로 위치를 나타냈다. Y축은 각 위치의 테라헤르츠파 속도와 굴절계수를 함께 나타냈다. 여기에서 □는 테라헤르츠파 속도이며 ■는 굴절계수를 나타냈다. Fig. 13(a)은 보존액을 처리하지 않은 경우로 테라헤르츠파속도를 보면 가장자리보다 중앙부분이 높게 나타났다.

이는 목재의 나이테 방향과 일치하여 중앙부분에서 테라헤르츠파가 다소 속도가 높았다고 판단된다. 그리고 목재의 굴절계수는 속도와 반비례 관계가 있으므로 역으로 나타났다. Fig. 13(b)는 티슈를 보호하기 위한 보존액을 처리한 경우를 나타냈으며 측정위치에 따라 테라헤르츠파 속도와 굴절계수는 보존액을 처리하지 않은 경우와 경향은 일치하였다. 특히 중앙부에서 테라헤르츠파 속도가 소폭증가 하였으나 가장자리부분에서는 급격히 증가하였다. 이때 보존액이 내부보다 가장영역에서 흡액량이 많아 테라헤르츠파 속도에 크게 영향을 미쳤다고 판단된다.

또한 Fig. 14는 Fig. 12의 목재에서 3군데인 Right, Middle 및 Left의 라인에서 일정한 간격으로 1부터 20까지 피크 대 피크 진폭을 측정하였다.



(a) Refractive index and T-ray velocity for an non-preservative treated lumber

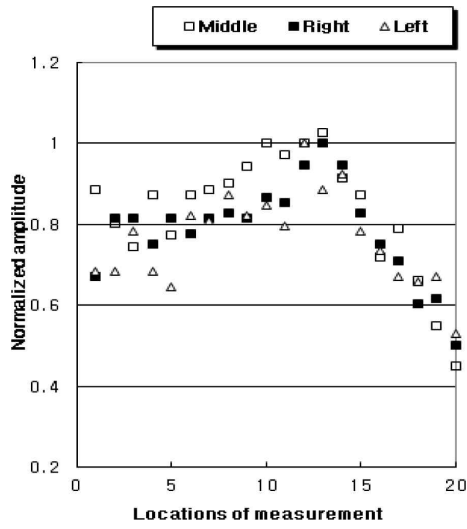


(b) Refractive index and T-ray velocity for an preservative treated lumber

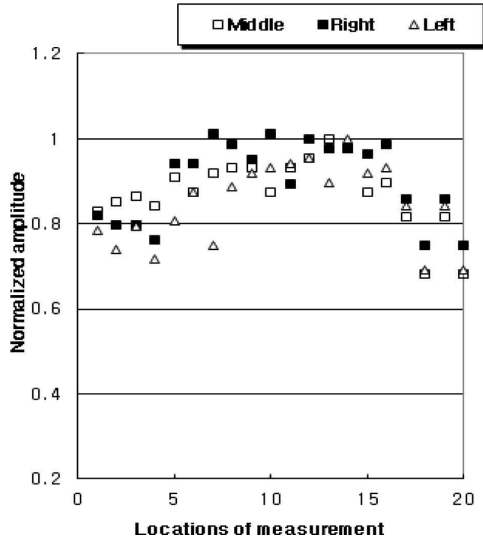
Fig. 13 Relations between Refractive index and T-ray velocity and locations of measurements for samples

X축은 측정위치이며 Y축은 피크대 피크 진폭을 1.0의 최대값으로 표준화하였다. 이때 Fig. 14(a)은 중앙부가 피크대 피크 진폭이 높게 나타났으며 가장자리는 다소 낮게 나타났다.

Fig. 15는 테라헤르츠파를 이용하여 투과법으로 피크대 피크 진폭기준으로 목재의 이미지를 구현하였다. Fig. 15(a)은 테라헤르츠파의 C-scan 이미지를 나타냈다. 이때 C-scan 이미지의 중앙부를 보면 진폭이 매우 높게 나타나고 가장자리부분은 매우 낮게 나타났다. 이는 목재의 나이테방향과 일치함을 볼 수 있었다. 그리고 본 실험의 목재는 보존액처리를 하지 않았으며 스캔영역은 290×



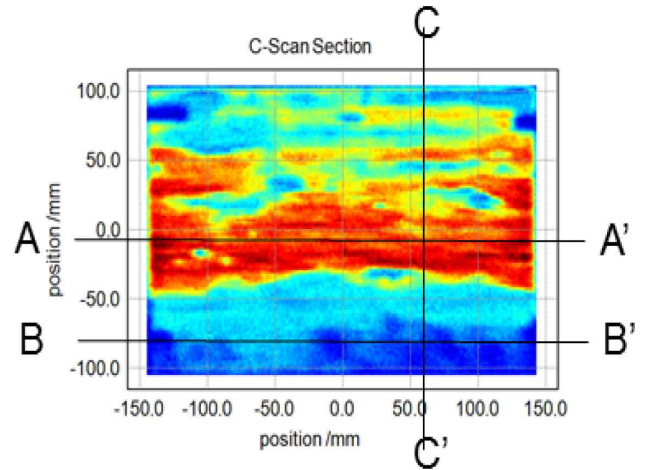
(a) Normalized amplitude and locations of measurements for an non-preservative treated lumber



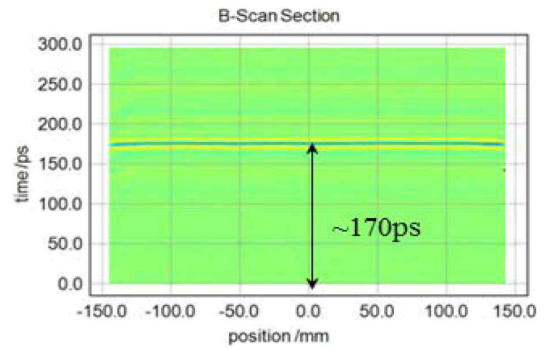
(b) Normalized amplitude and locations of measurements for a preservative treated lumber

Fig. 14 Relations between Normalized amplitude and locations of measurements for samples

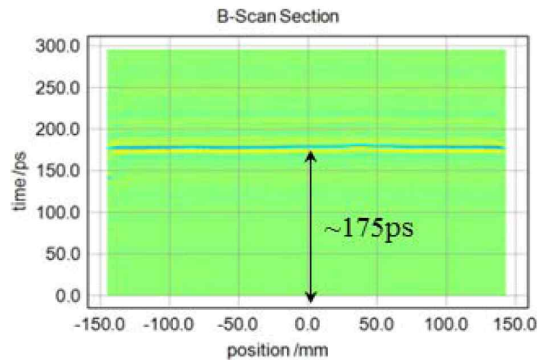
210 mm이며 스캔 스텝 사이즈는 2.0 mm이다. Fig. 15(b)은 Fig. 15(a)의 A-A'라인의 B-scan 이미지를 나타냈다. 이때 테라헤르츠 파 투과시간이 대략 170 ps이다. Fig. 15(c)은 Fig. 15(a)의 B-B'라인의 B-scan 이미지를 나타냈다. 이때 테라헤르츠파 투과시간이 대략 175 ps이다. 이때 Fig. 15(b)와 Fig. 15(c)의 목재의 투과시간을 비교해보면 중앙부의 A-A'부분이 짧게 나왔다. 이는 중앙부분이 테라헤르츠파 속도가 빠르게 나타남과 일치하였다. 그리고 Fig. 15(d)를 보면 Fig. 15(a)의 C-C'의 라인의 B-scan 이미지를 나타냈다. Point A를 보면 오른쪽부분보다 투과시간이 상대적으로 다소 길게 나타났다. 이는 목재에서 가장자리의 나이테가 영향이 미쳤다고 판단된다.



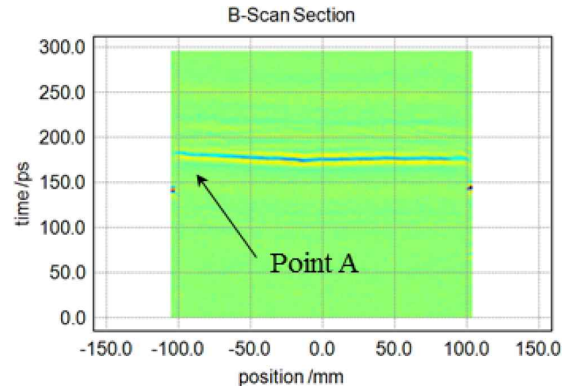
(a) C-scan image of non preservative-treated lumber



(b) B-scan image of A-A' section



(c) B-scan image of B-B' section



(d) B-scan image of C-C' section

Fig. 15 C-and B-Scan images for non preservative-treated lumber

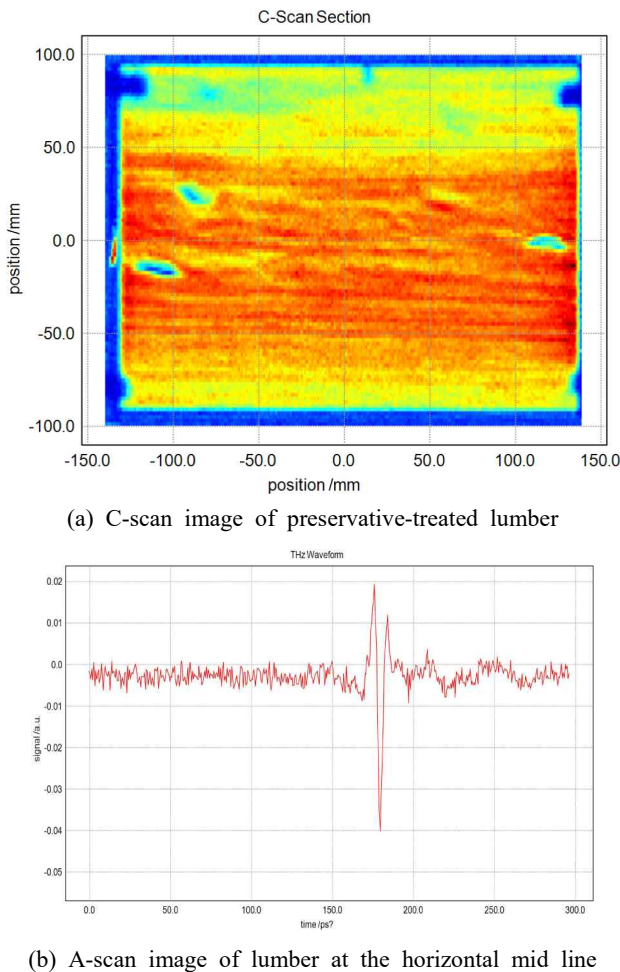


Fig. 16 C-and A-Scan images for a preservative-treated lumber

Fig. 16은 테라헤르츠파를 이용하여 투과법으로 피크 대 피크 진폭기준으로 목재의 이미지를 구현하였다. 본 시험편 목재는 티슈를 보호하기 위해 보존액 처리를 실시하였다. Fig. 16(a)은 테라헤르츠파의 C-scan 이미지를 나타냈다. 이때 C-scan 이미지의 중앙부를 보면 진폭이 매우 높게 나타나고 가장자리부분은 상대적으로 다소 낮게 나타났으나 Fig. 15에 비하면 가장자리 진폭이 높게 나타났다. 이는 목재의 가장자리에 보존액의 흡액량이 증가하여 진폭이미지에 영향을 미쳤다고 보인다.

그리고 목재의 스캔영역은 280×200 mm이며 스캔 스텝 사이즈는 2.0 mm이다. Fig. 16(b)은 Fig. 16(a)의 중앙부의 A-scan 이미지를 나타냈다. 테라헤르츠파의 투과법을 활용한 수신된 신호이다. 이때 수평중앙부에서 테라헤르츠파 투과시간이 대략 179 ps이다. 이때 목재의 투과시간을 비교해보면 상단 가장자리부분보다 중앙부가 다소 길게 나왔다. 이는 가장자리부분이 테라헤르츠파 속도가 다소 낮게 나타났다. 이는 목재에서 가장자리의 보존액 흡액량이 증가하여 영향이 미쳤다고 판단된다.

5. 결 론

복합재 NDE검사에 테라헤르츠파(THz)의 적용 및 응용에 관해 접근함으로써 테라헤르츠파의 굴절계수(Refractive index) 및 속도측정기법을 제안하였다. 이때 Fused quartz, 목재, PMMA 및 GFRP복합재의 테라헤르츠파의 특성평가를 실시하였다. 특히, 결합이 내재한 GFRP복합재 및 보존액을 처리한 목재에 대하여 테라헤르츠파를 적용해 투과모드기법에 따라 테라헤르츠파의 렌즈의 초점거리에 따른 피크대 피크 이미지해석 및 테라헤르츠파 속도를 측정하여 다음과 같이 결과를 얻었다,

1) Fused quartz, 목재, PMMA 및 GFRP복합재에 대한 테라헤르츠파를 이용해 투과모드 및 반사모드 하에서 굴절계수를 측정비교할 수 있었다.

2) 테라헤르츠파를 이용하여 FBH내재한 GFRP복합재의 C-scan 이미지를 보면 유리섬유(Woven fiber)형태와 FBH의 경계선이 명확하게 나타나는 것은 테라헤르츠파의 빔사이즈의 크기에 영향이 미쳤다고 판단되며 FBH 스캐닝 타임기법을 제안하였다.

3) 테라헤르츠파는 후판 시험편에 커다란 공기층이 있어도 테라헤르츠파가 투과가 가능하여 “그림자 효과(Shadow effect)” 없이 검사측정이 가능하여 커다란 Saw cut이 묻혀 있는 작은 Saw cut를 탐상할 수 있는 특징이 있음을 확인할 수 있었다.

4) 목재에 있어서 보존액을 처리하지 않은 경우로 테라헤르츠파 속도를 보면 가장자리보다 중앙부분이 높게 나타나는 것은 나이테의 영향이라고 보인다. 이는 중앙부 나이테가 가장자리부분보다 좀더 조밀하게 구성되어 밀도가 높아 테라헤르츠파 속도를 증가시켰다고 사료된다. 특히, 보존액을 처리한 목재의 중앙부에서 테라헤르츠파 속도가 소폭증가 하였으나 가장자리부분에서는 급격히 증가하였다. 이때 보존액이 내부보다 가장영역에서 흡액량이 많아 테라헤르츠파 속도에 크게 영향이 미쳤다고 판단된다.

Knowledgegments

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) (No.2018R1D1A1B07049775).

References

- [1] Chiou, C. P., Blackshire, J. L., Thompson, R. B. and Hu B. B., 2009, Terahertz Ray System Calibration and Material Characterizations, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 28:1 410-417.
- [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.*, 76:1 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*, 19:2 319-329.
- [4] Im, K. H., Lww, K. S., Yang, I. Y., Yang, Y. J., Seo, Y. H. and Hsu, D.K., 2013, Advanced T-ray Nondestructive Evaluation of Defects in FRP Solid Composites, *Int. J. of Precision Eng. and Manufacturing*, 14:6 1093-1098.
- [5] Im, K. H. Hsu, D. K., Chiou, C. P., Bardnard, D. J., Jung, J. A. and Yang, I. Y., 2013, Terahertz Wave Approach and Application on FRP Composites, *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 563962, 10 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/563962>, 2013.
- [6] Hsu, D. K., Lee, K. S. Lee, Park, J. W., Woo, Y. D. and Im, K. H., 2012, NDE Inspection of Terahertz Waves in Wind Turbine Composites, *Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing*, 13:76 1183-1189.
- [7] Schueler, R., Joshi, S. P. and Schulte K., 2001, Damage Detection in CFRP by Electrical Conductivity Mapping, *Composite Science and Technology*, 61:6 921-930.
- [8] Tse, K. W., Moyer, C. A. and Araj, S., 1981, Electrical Conductivity of Graphite Fiber epoxy Resin Composites, *Materials Science and Engineering*, 49 41-46.
- [9] Im, K. H., Zhang, G. L., Choi, S. R., Ye, C. H. Ye, Ryu, J.S., Lim, S. H., Han, M. G., Hsu, D. K., 2011, One-Sided Nondestructive Evaluation of CFRP Composites By Using Ultrasonic Sound, *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 20:1 47-52.