

## 레이저 발생 초음파와 공기 정합 수신 탐촉자를 이용한 복합재료 적층판의 내부 박리 결함 평가

### Evaluation of Internal Defect of Composite Laminates Using A Novel Hybrid Laser Generation/Air-Coupled Detection Ultrasonic System

이준현\*<sup>†</sup>, 이승준\*, 변준형\*\*

Joon-Hyun Lee\*<sup>†</sup>, Seung-Joon Lee\* and Joon-Hyung Byun\*\*

초 록 복합재료의 내부 결함 평가를 위해 일반적으로 적용되어온 초음파 C-스캔 기법은 섬유자동 배열을 통한 정밀 성형 공정에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구는 복합재료의 정밀 성형 공정 중에 발생하는 각종 내부 결함들을 비파괴적, 비접촉으로 평가하기 위한 새로운 하이브리드 초음파 평가 기법을 확립하는데 목적이 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 초음파 산란 반사(scattering reflection) 방식을 토대로 한 새로운 이중 피치-캐치(dual pitch-catch) 기법을 확립하여 기존의 결함평가를 위해 시험편의 스캔에 소요되는 시간을 줄이면서 우수한 결함 영상을 얻을 수 있는 새로운 하이브리드 기법을 개발하였다. 즉 두 가지 종류의 열경화성 및 열가소성 복합재료(carbon/epoxy, carbon/PPS) 적층판의 내부 박리(delamination) 결함의 영상화를 위하여 레이저를 이용한 유도 초음파의 발생 및 이중 피치-캐치(pitch-catch)방식을 토대로 한 비접촉식 공기 정합 트랜스듀서(air-coupled transducer)를 이용하여 결함 영상을 얻기 위한 핵심 알고리즘을 확립하였다.

**주요용어:** 레이저 유도 초음파, 공기 정합 트랜스듀서, 신호 처리, 복합재료 적층판

**Abstract** Ultrasonic C-scan technique is one of very popular techniques being used for detection of flaws in polymer matrix composite(PMC). However, the application of this technique is very limited for evaluation of defects in PMC fabricated by the automated fiber placement process. The purpose of this study is to develop a novel ultrasonic hybrid system based on nondestructive and non-contact ultrasonic techniques for evaluation of delamination in carbon/epoxy and carbon/PPS composite laminates. It was shown that the newly developed ultrasonic hybrid system based on dual air-coupled pitch-catch technique with ultrasonic scattering reflection concept could provide excellent image with higher resolution of delamination in PMC compared with the conventional pitch-catch method. It is expected that this ultrasonic hybrid technique can be applied for on-line inspection of flaws in PMC during the fabrication process.

**Keywords:** Laser-Based Ultrasound(LBU), Air-Coupled Transducer, Signal Process, Composites

#### 1. 서론

섬유자동 배열기술은 복잡한 복합재 구조물을 제

조할 수 있기 때문에 다양한 형상의 구조물 제조가 가능한 설계의 유연성, 정확한 섬유배열에 의한 제품의 정밀도, 자동 배열/적층에 의한 높은 생산성

을 제공하는 기술이다. 최근 개발된 자동 섬유 적층 방식(automated fiber placement)은 몰드 위에 테이프(tape) 형태의 프리프레그(prepreg)를 설계된 순서와 두께로 적층시키는 성형 공정으로서, 노동력과 재료의 손실을 줄일 수 있고, 디자인과 적층 형태에서 유연하게 대처할 수 있으며, 재현성이 우수한 대체 공정으로 주목받고 있다[1]. 그러나 본 기술에 의하여 제조된 복합재료, 특히 3차원 섬유 강화재 프리폼 제작을 통한 고성능 복합재료에 대하여 기대되는 제품의 품질을 만족시키기 위해서는 제조 공정 중에 실시간으로 적용 가능한 실시간 평가 기술이 필요하다. 즉, 복합재료에서는 적층공정 중에 게재되는 기공, 적층불량에 의한 층간분리, 강화재 배향 이상 등 다양한 결함이 존재할 수 있으며, 이런 내부 결함이 발생하는 경우, 고가인 재료의 손실을 불러일으킬 뿐만 아니라, 근본적으로 제품의 강도를 떨어뜨리므로 제품의 안전성에 심각한 영향을 미친다. 따라서 이와 같은 내부 결함을 공정 중에 탐지할 수 있는 비파괴 평가 기법의 개발이 요구되고 있다.

이들 결함은 초음파와 C-스캔에 의한 결함 영상화와 같은 기존의 초음파 기법으로 검출해낼 수는 있으나 기존의 방법은 복합재료의 제조 공정에서 실시간으로 평가할 수 없는 단점이 있다. 제조 공정 중에는 비접촉 기법이 필수적이므로 광학적 기법에 의한 레이저 유도 초음파 기법을 이용한 결함 평가 기술이 필수적으로 개발되어야 한다. 이에 최근 레이저를 이용한 레이저 초음파 기법과 공기 중에서 초음파의 송수신을 가능하게 하는 공기 정합 트랜스듀서(air-coupled transducer)를 이용한 방법이 그 대안으로 제시되고 있다[2-4]. 따라서 본 연구에서는 섬유 강화 복합재료(carbon fibre reinforced plastics: CFRP)의 건전성 평가를 위해 레이저 유도 초음파 기법을 이용한 비접촉식 송수신 기법을 개발 및 최적 기법을 도출하고자 한다.

## 2. 결함 검출을 위한 송수신 기법 및 신호 처리 방법

### 2.1. 기존의 하이브리드 타입의 송수신 기법

복합재료 내의 결함을 검출하기 위해 레이저 발생/공기 정합 트랜스듀서 수신 시스템을 이용한 유도초음파의 송수신하는 경우 Fig. 1(a)의 피치-캐

치 기법을 이용하는 경우가 일반적이다. 이 기법은 건전성 평가에 있어 동일한 평면에서 접근이 가능하기 때문에 비접촉 기법으로 아주 유용하지만, 공간 분해능이 발생원과 수신원 사이의 거리에 따라 결정되는 한계가 있다. 즉, 결함으로 인해 변한 신호의 특성은 결함을 지나서도 계속 수신되므로 결함의 크기가 실제보다 크게 측정되는 것이 일반적이다. 반면, Fig. 1(b)의 초음파 산란 반사 기법은 결함으로부터 반사되어 나온 신호를 수신하는 방법을 이용하므로, 결함의 위치 및 형상 정보를 보다 정밀하게 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다[5].

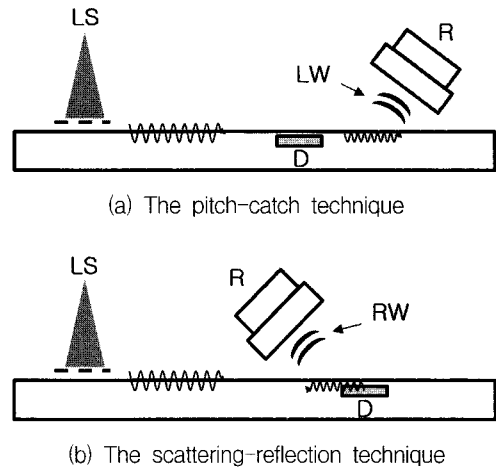


Fig. 1 Two different schematic diagrams of reception method: LS is the laser source, R is the receiver(air-coupled transducer), LW is the leaky wave, RW is the reflected wave, D is the defect

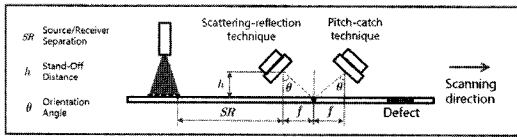
### 2.2. 개선된 하이브리드 타입의 송수신 기법

한 개의 발생원과 수신원을 이용하였을 경우 발생하게 되는 결함 위치와 형상에 대한 한계를 극복하기 위해서 두 개의 수신원을 이용한 신호 처리 방법을 제안해 볼 수 있다. Fig. 2는 앞서 언급한 피치-캐치 기법과 초음파 산란 반사 기법을 이용하여 얻은 결과를 신호 처리하는 과정을 개략적으로 나타내었다. 두 기법을 이용하여 얻은 각각의 결과 중 중복된 결함 위치를 추출하면 결함의 위치와 형상에 대한 정보를 얻어낼 수 있다. 식 (1), (2)와 같이 동일 위치에서 두 개의 수신원 A, B로부터 수신된 신호를 더하거나 곱함으로써 결함 신호의 특성을 강화할 수 있다[6].

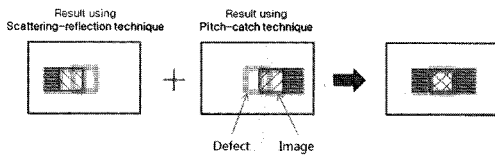
$$M(x,y) = \frac{[Normalized A(x,y) + Normalized B(x,y)]}{2} \quad (1)$$

$$M'(x,y) = [Normalized A(x,y) \times Normalized B(x,y)] \quad (2)$$

Fig. 3은 레이저의 조사점을 중심으로 동일한 거리만큼 떨어진 두 개의 수신원에 의해 수신된 신호를 서로 비교하여 결함을 판별하는 방법을 보여주고 있다. 동일한 수신 조건을 가지며, 결합과 비결합 특성의 구분이 뚜렷하다는 가정 하에 Fig. 3(a)에서와 같이 라인 스캔할 경우, 결합의 상대적인 위치는 ①에서 ⑤로 이동하게 되며, 이 때 두 수신원에 수신된 신호를 비교해 보면 Fig. 3(b)와 같은

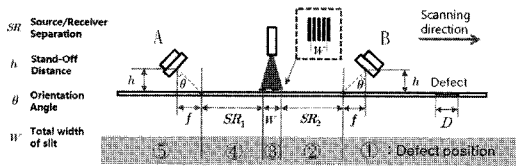


(a) Schematic diagram of hybrid system

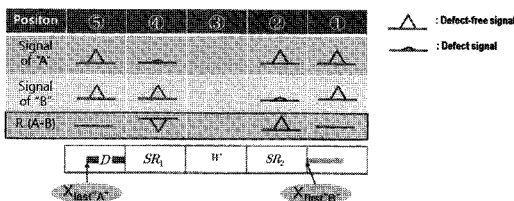


(b) Signal process

Fig. 2 Newly developed system and signal process using pitch-catch and scattering-reflection technique



(a) Schematic diagram



(b) Self-analysis signal process

Fig. 3 A hybrid system using dual pitch-catch technique

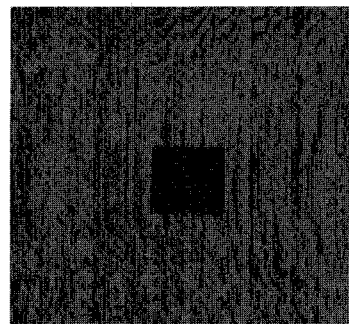
결과를 예상해 볼 수 있다. 결합이 수신원을 통과하게 되는 두 지점( $X_{firstB}$ ,  $X_{lastA}$ )에서 신호 차이가 뚜렷이 발생한다. 발생원과 수신원의 거리 ( $SR = SR_1 = SR_2$ )와 슬릿의 길이( $W$ )를 알고 있으므로, 이 두 지점 사이의 거리( $\Delta X(X_{firstB}, X_{lastA})$ )를 측정함으로써 결합의 위치와 길이( $D$ )를 평가할 수 있다. 결합의 길이와 위치는 식(3), (4)와 같다[7].

$$D = \Delta X(X_{firstB}, X_{lastA}) - (SR_1 + W + SR_2) \quad (3)$$

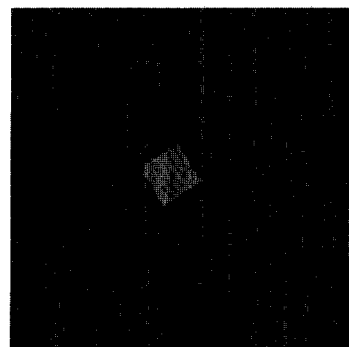
$$Defect\ location: (X_{firstB}) \sim (X_{firstB} + D) \quad (4)$$

### 3. 실험 장비 및 방법

본 연구에서는 Fig. 4에서와 같이 열경화성 수지와 열가소성 수지로 제조된 두 개의 시험편이 사용되었다. Fig. 4(a)는 가로와 세로의 길이가 각각 20 mm인 정사각형의 테프론(teflon) 필름을 첫 번째와 두 번째 층 사이에 삽입한 단방향의 열경화성



(a) carbon/epoxy



(b) carbon/PPS

Fig. 4 Ultrasonic C-scan image of CFRP specimen with artificial delamination using immersion test

복합재료(carbon/epoxy) 시험편으로 두께는 총 3 mm이며 적층판의 수는 총 24층(ply)이다. 반면 Fig. 4(b)는 가로, 세로 각각 10 mm인 알루미늄 호일(foil) 한 장을 첫 번째와 두 번째 층 사이에 삽입한 단방향의 열가소성 복합재료(carbon/PPS) 시험편으로 두께는 총 2.5 mm이며 적층판의 수는 총 16층이다.

Fig. 5는 본 연구에서 적용한 레이저 초음파의 송수신 방법을 나타낸 것으로 레이저 조사 지점과 동일한 평면에서 유도 초음파를 수신하는 방법을 적용하였다. 레이저 소스를 이용하여 재료의 국부적인 열탄성을 유도하고 이를 통해 발생된 유도 초음파를 조사 지점과 동일한 평면에서 일정거리의 간격을 두고 공기 정합 트랜스듀서로 수신하는 방법을 사용한다. 실험에서 사용된 선형 다중 슬릿(line array slit)은 유도 초음파의 방향성을 증가시켜 에너지 효율을 높이고 협대역의 신호 특성을 얻을 수 있게 한다.

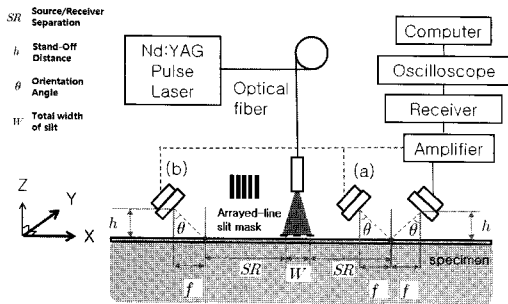


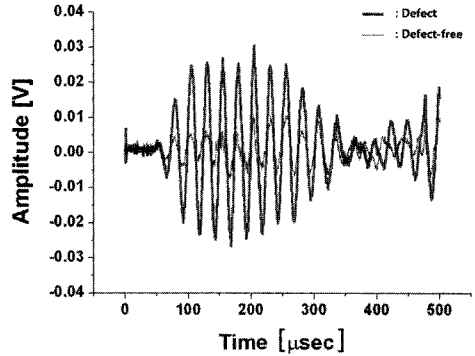
Fig. 5 Schematic experimental set-up of ultrasonic hybrid system

#### 4. 실험 결과 및 고찰

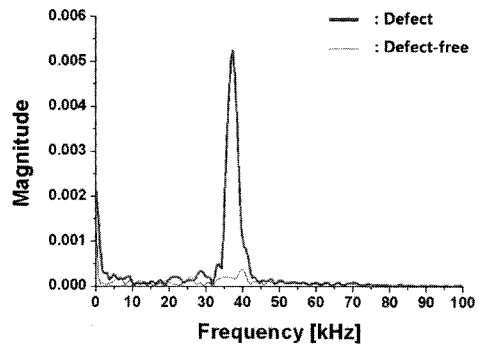
##### 4.1. 피치-캐치 기법과 초음파 산란 반사 기법을 이용한 내부 결함 평가

Fig. 6은 피치-캐치 기법을 이용하여 얻은 carbon/epoxy 시험편에서의 결함 특성을 바탕으로 결함 이미지를 얻은 것이다. 수신각을 변화함에 따라 신호 특성이 우수하게 나타나는 6.6도(°)를 최적의 수신각으로 하여 얻은 신호 특성은 Fig. 6(a), (b)와 같다. Fig. 6(a)는 결함에 따른 파형의 특성을 보여주며, Fig. 6(b)는 저주파 대역의 주파수 특성을 보여준다. 두 경우 모두 결함에서 신호의 크기가 증가하며, 이를 이용하면 Fig. 6(c)의 결함 영상

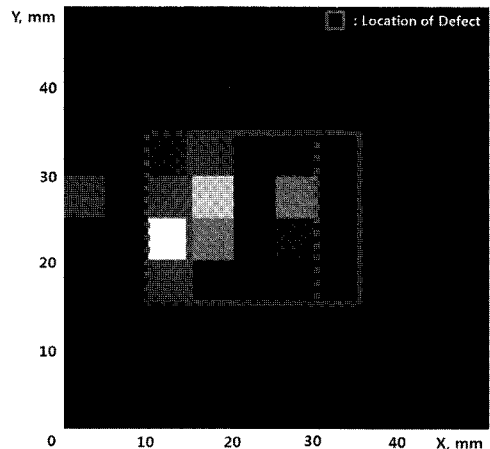
을 얻을 수 있다. 결함으로 인해 신호가 크게 증가하는 영역은 상대적으로 밝게 표시된다. 즉, 밝은 영역은 결함 특성을 나타내는 부분이다. 앞서 언급한 바와 같이 실제의 결함 크기보다 훨씬 긴 결함의 잔상이 남는 것은 확인할 수 있다.



(a) Waveform



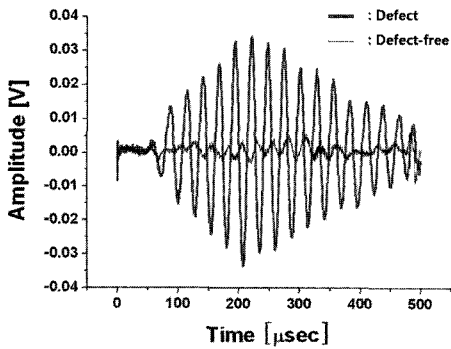
(b) Frequency spectrum



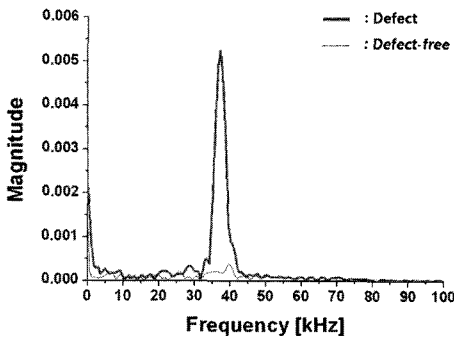
(c) Ultrasonic C-scan image

Fig. 6 Defect signal characteristics and image using pitch-catch technique

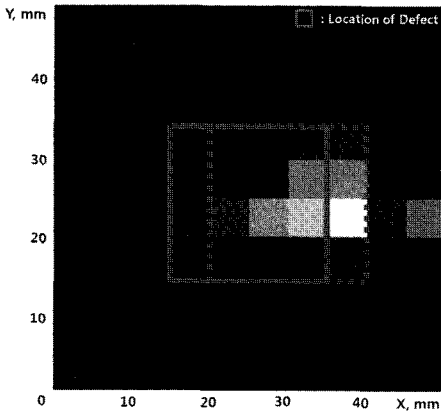
Fig. 7은 초음파 산란 반사 기법을 이용하여 carbon/epoxy 시험편에서의 결함 특성을 바탕으로 결함 이미지를 얻은 것이다. 결함이 없는 영역에서는 신호 특성이 나타나지 않다가 결함 영역에서는 신호가 커진다. 이는 결함이 존재할 경우 반사되어 나오는 신호의 특성을 잘 보여주고 있다. 이 기법을 이용한 경우 결함 형상에 아주 근접한 영상을



(a) Waveform



(b) Frequency spectrum



(c) Ultrasonic C-scan image

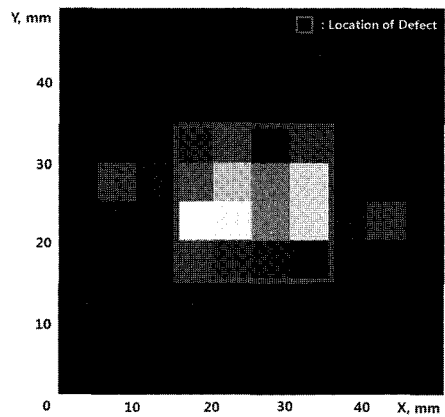
Fig. 7 Defect signal characteristics and image using scattering-reflection technique

얻을 수 있으나 보다 명확한 결함의 정보를 얻기 위해서는 앞선 피치-캐치 기법을 통해 얻은 결과를 이용해 볼 수 있다.

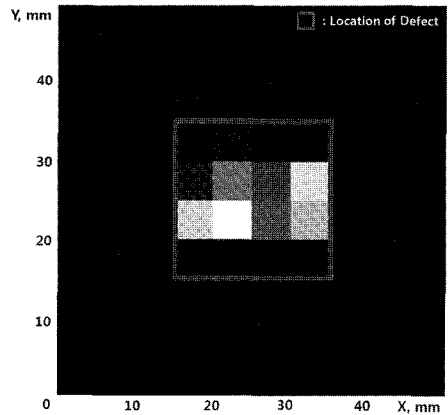
Fig. 8은 각 수신 지점에서 앞서 언급한 다른 두 기법을 이용하여 얻은 두 결함 데이터를 식 (1), (2)와 같이 더하거나 곱하므로써 결함의 특성을 강화하여 영상화한다. Fig. 8(a), (b)는 각각 각 포인트에서 표준화된 데이터의 평균과 곱으로 재처리되어 영상을 얻은 결과이다. 실제 결함의 크기와 유사한 결과를 보여주고 있다.

#### 4.2. 이중 피치-캐치 기법과 자기 비교 신호 처리 기법을 이용한 내부 결함 평가

초음파 산란 반사 기법이 결함은 존재할 경우 그 특성을 잘 나타내 줄 수 있지만, 결함 층이 얇은



(a) Image using mean value process



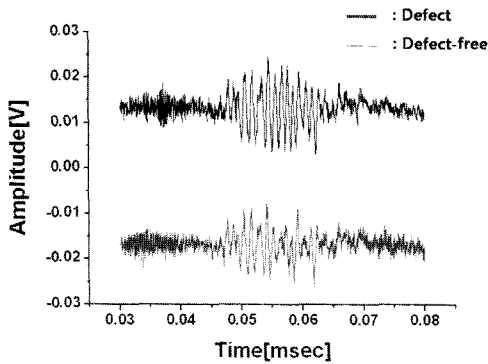
(b) Image using multiply process

Fig. 8 Ultrasonic C-scan images using signal process

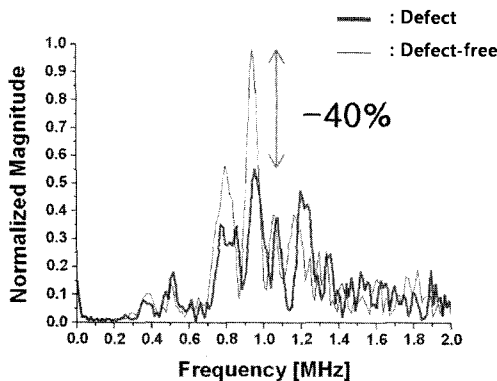
경우 반사되어 오는 신호가 미약하여 그 특성을 구분하기 어렵다는 한계를 가진다. 따라서 보다 안정적으로 결함 영상을 얻기 위해 기존의 피치-캐치 기법을 활용한 영상화 알고리즘을 제안하고자 한다. Fig. 9는 알루미늄 호일(foil) 한 장을 삽입한 carbon/PPS 시험편의 전전부에서 기존 피치-캐치 기법을 이용하여 가장 큰 신호 특성을 보이는 수신각을 결정하고, 이를 바탕으로 결함 신호의 특성을 분석한 결과이다. Fig. 9(a), (b)를 보면, 결함을 지날 경우 파형의 진폭이 줄어들며, 1 MHz 대역의 주파수의 크기는 최대 40% 정도까지 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

이와 같은 결함 특성을 바탕으로 결함의 위치 및 길이에 대한 정보를 얻기 위해 Fig. 5(b)와 같은 시스템을 이용하여 X, Y 두 축으로 라인스캔을 실시하였다. Fig. 10(b)는 결함을 지나도록 Y 축 방향으로 라인 스캔할 경우, A'와 B' 수신원에서 수신한 신호의 주파수 크기를 도시한 그래프이다. 결함이

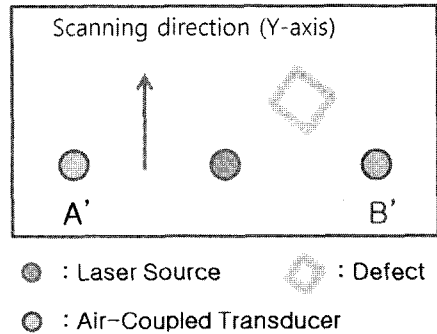
있는 영역을 지날 때 결함에 의해 변화되는 뚜렷한 특성을 확인할 수 있다. Fig. 10(c)는 A' 수신원에서 수신한 신호를 기준으로 B' 수신원의 신호 크기를 빼주므로써 얻어지는 신호 특성을 도시한 것이다. 이와 같은 결과를 바탕으로 스캔 간격과 개수를 고려하여 결함의 Y축 길이 및 위치를 예측할 수 있다. 또한 기존 단독 수신원을 이용하는 경우보다 2배 넓은 영역을 동시에 평가하므로 실제 탐



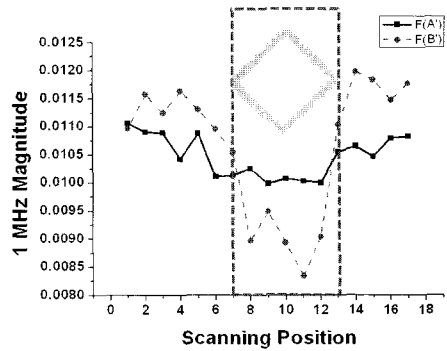
(a) Waveform



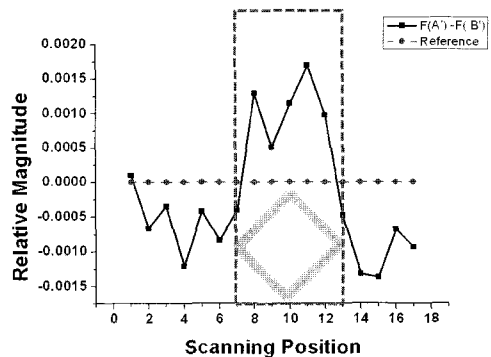
(b) Frequency spectrum



(a) Schematic diagram of y-directional line scan



(b) Analysis of magnitude at 1 MHz in defect region



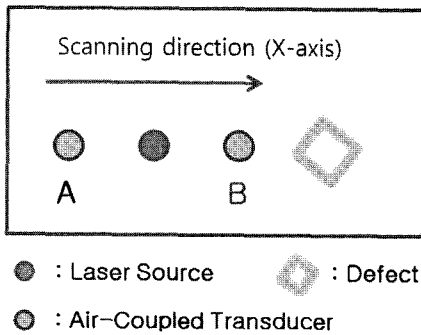
(c) Relative magnitude of both signals received

Fig. 9 Characteristic of defect in carbon/PPS specimen

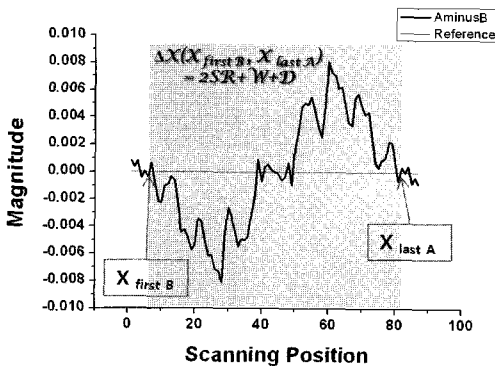
Fig. 10 Method and result of y-directional line scan using self-analysis system

상 시간을 반으로 줄이는 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 11은 동일한 시스템을 이용하여 X 방향 스캔할 경우, 결함의 위치와 크기를 예측하기 위한 신호 처리 방법론을 적용한 결과이다. Fig 10(b)은 스캔을 할 경우 두 수신원에 수신된 신호의 1 MHz 대역의 크기 차이를 도시한 것이다. 식 (3)에 의하면 최초로 결함 신호를 수신한 곳에서부터 마지막으로 결함 신호를 수신할 때까지 결함 신호가 수신되는 총 거리( $\Delta X(X_{first,B}, X_{last,A})$ )에서 각 수신부와 발신부 간의 거리( $SR$ )와 슬릿 폭( $W$ )를 빼주면 결함 길이를 예측할 수 있다. 실험 결과를 보면 결함이 총 이동한 거리(약 146 mm)에서 각 수신부와 발신부간 거리(각 58 mm)와 슬릿 폭(13.2 mm)을 빼면 16.8 mm의 예측 결함 길이를 얻을 수 있다. 다소의 오차를 보이고 있으나 이는 실제 결함의 최대 길이인 13.4 mm에 근사하다. 이는 X 방향의 결함 길이를 예측할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.



(a) Schematic diagram of x-directional line scan



(b) Relative magnitude of both signals received

Fig. 11 Method and result of x-directional line scan using self-analysis system

## 5. 결론

본 연구에서는 기존의 레이저 발생원/에어커플 트랜스듀서 수신원의 하이브리드 타입 초음파 검사 시스템을 응용하여 복합재료의 표면 직하의 결함을 검출하고자 하였다. 내부 결함이 존재하는 영역을 지나서 수신되는 신호와 반사되어 수신되는 신호의 특성을 비교, 분석하면 결함에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 이 같은 특성을 적용하여 재료를 라인 스캔할 경우 신속히 내부 결함 영역을 판별할 수 있었고, 레이저 초음파 C-스캔 기법을 적용할 경우 결함 영상을 얻을 수도 있었다. 본 연구는 평판 형상 시편만을 고려한 결과이나 본 시스템을 적용할 경우 곡면을 갖는 시편에서도 결함 평가가 가능할 것으로 예상된다. 이상에서의 결과들이 비접촉 비파괴 방식에 의한 송수신 방법을 적용한 사례라는 점을 고려할 때 실제 온라인 공정 중에도 본 실험 방법론의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 "차세대 소재 성형 기술 개발" 사업과 기본연구사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] M. J. Shuart, N. J. Johnston, H. B. Dexter, J. M. Marchello and R. W. Grenoble, "Automated fabrication technologies for high performance polymer composites," NASA Langley Technical Report Server, Technical Report: NASA-98-AGARD-mjs, USA, (1998)
- [2] B. B. Djordjevic, T. Berndt, M. Ehrlich, K. Baldwin, D. Palmer and S. Holmes, "Advances in NDE for on-line fiber placement process," Proceedings of the 43rd International SAMPE Symposium, pp. 2169-2177, Anaheim, USA, (1998)
- [3] K. C. Baldwin, T. P. Berndt and M. J. Ehrlich, "Narrowband laser generation/air-coupled detection: ultrasonic system for

- on-line process control of composites," *Ultrasonics*, Vol. 37, Issue 5, pp. 329-334, (1999)
- [4] F. Lanza di Scalea and R. E. Green, Jr., "A hybrid non-contact ultrasonic system for sensing bond quality in tow-placed thermoplastic composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 21, pp. 1860-1880, (2000)
- [5] R. Kažys, A. Demčenko, E. Žukauskas and L. Mažeika, "Air-coupled ultrasonic investigation of multi-layered composite materials," *Ultrasonics*, Vol. 44, Supplement 1, pp. e819-e822, (2006)
- [6] Joon-Hyun Lee, Seung-Joon Lee, Sang-Woo Choi and Joon-Hyung Byun, "Quantitative evaluation of delamination in CFRP using laser-based ultrasound," *Journal of the Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 11, pp. 29-36, (2007)
- [7] Seung-Joon Lee, Joon-Hyun Lee and Joon-Hyung Byun, "Development of 2-dimensional internal defect imaging technique in carbon steel pipe using laser-based ultrasound," *Proceedings of the KSNT 2007 Fall Annual Meeting*, pp. 43-50, Seoul, Korea, (2007)