

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.5.401>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

레이저 스캐닝 및 정상파를 이용한 평판 구조물의 손상탐지

강세혁* · 전준영* · 김두환* · 박규해** · 강 토** · 한순우**

* 전남대학교 기계공학부, ** 한국원자력연구원

Damage Detection on Thin-walled Structures Utilizing Laser Scanning and Standing Waves

Se Hyeok Kang*, Jun Young Jeon*, Du Hwan Kim*, Gyuhae Park**, To Kang** and Soon Woo Han**

* School of Mechanical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.,

** Nuclear Convergence Technology Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received November 29, 2016 ; Revised December 23, 2016 ; Accepted January 4, 2017)

Key Words: Laser Doppler Vibrometry(레이저 도플러 진동계), Damage Detection(손상 탐지), Wave Propagation(웨이브 전파), Wavenumber Filtering(파수 필터링)

초록: 본 연구에서는 레이저 스캐닝 및 단일 주파수 정상파 가진과 파수 분석을 통해 구조물의 손상을 탐지하는 기법을 개발하였다. 구조물에 부착된 압전소자를 통해 단일 주파수로 가진하고, 이때 발생한 구조물의 정상상태 응답을 레이저 도플러 속도계와 거울 방향조절 장치를 통해 측정하였다. 구조물의 결함을 탐지하기 위해 정상상태 응답에서 파수 필터링을 이용한 손상 탐지 기법을 개발 및 적용하였다. 부식결함이 발생한 알루미늄 평판과 층간 분리가 발생한 복합재료 구조물에 대한 손상 탐지를 수행하여 손상의 위치와 크기를 정확히 파악할 수 있었다.

Abstract: This paper describes wavenumber filtering for damage detection using single-frequency standing wave excitation and laser scanning sensing. An embedded piezoelectric sensor generates ultrasonic standing waves, and the responses are measured using a laser Doppler vibrometer and mirror tilting device. After scanning, newly developed damage detection techniques based on wavenumber filtering are applied to the full standing wave field. To demonstrate the performance of the proposed techniques, several experiments were performed on composite plates with delamination and aluminum plates with corrosion damage. The results demonstrated that the developed techniques could be applied to various structures to localize the damage, with the potential to improve the damage detection capability at a high interrogation speed.

1. 서 론

평판 구조물은 항공기, 건축물, 차량 등 다양한 분야에서 활용중이며 유지관리의 부실은 파단과 같은 재산피해와 인명피해가 발생할 수 있다.^(1,2) 이에 따라 구조물 내부의 결함을 탐지 및 평가하는 비파괴검사는 침투탐상검사,⁽³⁾ 자분탐상검사,⁽⁴⁾ 와전류검사⁽⁵⁾ 등이 있다. 이상의 검사방법은 사전 조치 작업이 필요하고 검사자의 접근하기 때문에

작업공간의 제약이 있다.

이러한 한계점을 극복하기 위한 비접촉식 비파괴검사 연구가 진행되고 있다. 열화상기법은 구조물의 온도 변화를 통해 결함을 탐지하는 기법이다. 간단한 구성으로 검사가 가능하지만, 열에 의한 손상 발생 가능성이 있다.⁽⁶⁾ C-스캔은 깊이 방향으로 초음파를 송수신하여 결함을 검출하는 기법이다. 구조물의 두께 정보를 알 수 있어 복합재료 내부의 결함 탐지가 용이하다. 하지만 X/Y 스캐너의 길이만큼 검사가 가능하고, 검사 속도에 한계가 있다.⁽⁷⁾

† Corresponding Author, gpark@chonnam.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

이상의 문제를 극복하기 위해 최근 레이저를 이용한 비파괴검사 기법이 제안되었다. 레이저를 이용하여 구조물 표면을 가진하고 고정된 센서를 이용하여 측정하는 방법과,⁽⁸⁻¹⁰⁾ 고정된 센서를 이용하여 구조물 표면을 가진하고 레이저를 이용하여 측정하는 방법이 있다.⁽¹¹⁻¹³⁾

비접촉 초음파 가진 장치는 주로 Q-스위칭 된 Nd:YAG와 CO₂ 레이저가 이용된다. 구조물의 표면에 레이저빔이 조사될 때, 국부적인 열팽창과 수축이 발생하고 이로 인해 초음파가 발생한다. Lee 등⁽⁸⁾은 이 원리를 이용하여 초음파 전파 영상화 (UPI, Ultrasonic Propagation Imaging) 시스템을 개발하였다. UPI 시스템을 다양한 구조물에 확대 적용하여 파이프 용접부 결함,⁽⁹⁾ 항공기 복합재료 결함⁽¹⁰⁾ 등의 탐지를 수행하였다. 하지만 초음파 가진 신호의 형상을 조절하기 어렵고 조사 시간, 파장, 구조물의 두께, 물성치 등을 고려하여 세심한 세기 조절이 필요하다.

초음파를 측정하는 장치는 주로 LDV가 사용된다. 이 장치는 표면에서 반사되는 파의 속도와 주사되는 파의 속도 차이에 의한 도플러 효과를 이용하여 표면의 진동을 측정한다. Rogge 등⁽¹¹⁾은 복합재료에서 파수의 변화를 통해 층간 분리의 위치와 크기를 탐지하였다. Mesnil 등⁽¹²⁾은 유도 초음파(guided wave)를 측정하고 파수를 평가함으로써 복합재료의 손상 특징을 정량화 하였다. Kudela 등⁽¹³⁾은 파수 필터링을 통하여 평판 구조물에서 발생한 크랙(crack)을 탐지하였다. 하지만 LDV는 고정된 초점거리와 표면의 조도에 따라서 신호 대비 잡음비(SNR, signal to noise ratio)이 낮아 여러 번의 평균화가 요구되어 스캐닝 시간이 증가한다.

이와 같은 한계점을 극복하기 위해 최근 유도 초음파 대신 정상파를 사용한 연구들이 제안되었다.^(14,15) 이 방법은 구조물에 지속적인 단일 주파수 가진으로 정상파를 생성하는 방법이며 다음과 같은 장점이 있다.

- (1) 전파 에너지의 효과적인 증폭이 가능하여 높은 SNR로 측정이 가능하다.
- (2) 구조물은 정상상태가 되어 가진 신호와 측정 신호 사이에 동기화 과정이 필요하지 않다.
- (3) 각 스캐닝 포인트에서 소수의 데이터 측정으로도 파형의 움직임을 탐지할 수 있다.

본 연구에서는 LDV와 거울 방향조절 장치를

이용하여 레이저 스캐닝 시스템을 구축하였고, 가진 신호는 정상파를 사용하였다. 측정된 신호에서 푸리에 변환과 파수 필터링을 사용하여 SNR을 향상시켰다. 손상을 탐지 및 가시화하기 위해 파수 기반 신호처리 기법인 극소 파수 매핑을 개발하였고, 기존 기법인 음향 파수 분광법의 결과와 비교 및 분석하였다. 이 기법을 검증하기 위해 알루미늄의 부식결함, 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastics)의 층간 분리 결함을 모사하고 탐지 기법을 평가하였다.

2. 이 론

2.1 레이저 스캐닝 구성

레이저 스캐닝 시스템은 LDV(Polytec ofv-303)와 거울 방향조절 장치(Thorlab GVS-212), 데이터 측정을 담당하는 DAQ(NI USB-6363)로 구성된다. 거울 방향조절 장치는 수평방향과 수직방향을 조향하는 두개의 거울로 이루어져 있다. 하나의 DAQ를 사용하여 가진과 측정을 동시에 수행하였으며 가진 구동기는 PZT(APC 850, disk type)를 사용하고 표본화 율(sampling ratio)은 1MHz로 설정하였다.

2.2 레이저 스캐닝 측정 원리

Fig. 1은 레이저 스캐닝 과정을 나타낸다. N_x 와 N_y 는 각각 x와 y축 방향 측정 개수이고, T는 각 스캐닝 포인트에서 측정시간이며, Δ 는 측정간격(spatial resolution)이다. 측정된 신호 $v[x,y,t]$ 는 식 (1) 푸리에 변환을 통해 가진 주파수의 응답

$$r(x,y) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T v[x,y,t] \exp(-j2\pi ft) \quad (1)$$

$r(x,y)$ 로 변환할 수 있다. $r(x,y)$ 는 복소수이며 결

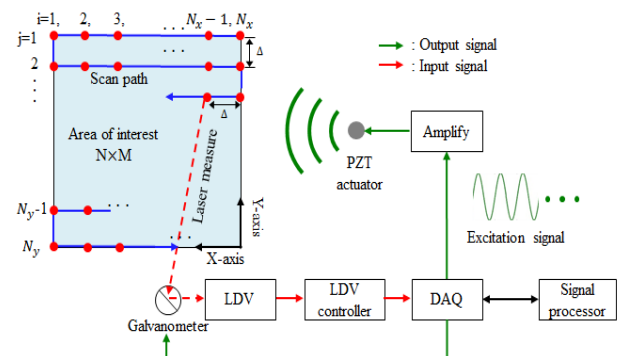


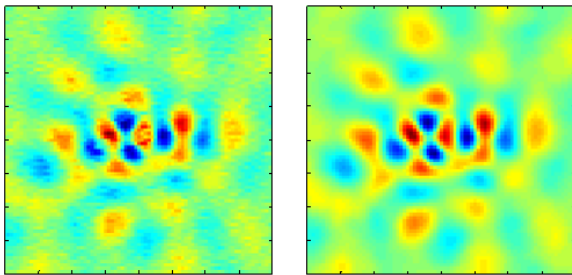
Fig. 1 Laser scanning process

함 탐지를 위한 신호처리는 실수부를 사용하였다. 정상상태 응답 $r(x,y)$ 는 다른 주파수 성분을 제거하기 때문에 높은 SNR로 신호를 획득할 수 있다(Fig. 2 참조).

본 방법은 기존 유도 초음파 기반 결함 탐지와 달리 압전소자에 지속적인 단일 주파수 가진으로 구조물에 정상파를 생성하여 결함을 탐지한다. 정상파의 신호는 증폭이 되어 높은 SNR로 측정이 가능하며 소수의 데이터 측정으로 기존 방법보다 더 빠른 속도로 스캔이 가능하다. 또한 정상상태 응답을 측정하기 때문에 DAQ의 가진 신호와 측정 신호사이의 동기화 과정 없이 구조물의 정상파 응답을 측정할 수 있다.

2.3 파수 변화를 이용한 구조물 진단

구조물 표면에 초음파 신호가 전파되면 Fig. 3과 같이 부식, 층간분리가 발생한 영역에서 파장



(a) (b)

Fig. 2 Steady state response; (a) $v[x, y, t]$, (b) $r(x, y)$

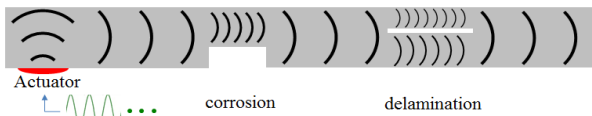


Fig. 3 Changes in the wavelength of the defect

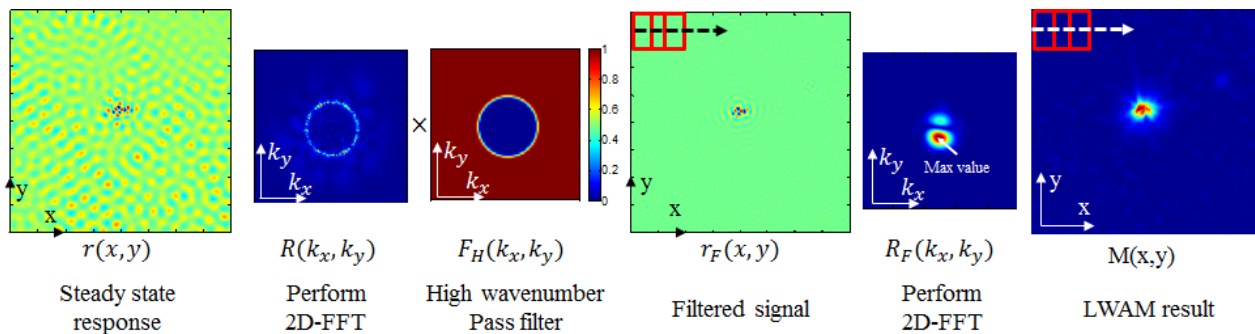


Fig. 4 Flow diagram of local wavenumber amplitude mapping

이 변하게 된다. 구조물의 두께가 얇으면 초음파의 속도는 느리고, 파장은 짧아지게 되며 진폭은 커지는 특성이 있다. 파수는 파장의 역수로 파수와 진폭을 동시에 고려하여 손상의 위치와 크기를 파악할 수 있다. 이 연구에서는 레이저 스캐닝 시스템을 구축하고 측정된 신호에서 파수 변화와 진폭의 변화를 이용하여 손상을 탐지하는 기법을 개발하고 기존 기법과 비교하였다.

2.3.1 국소 파수 매핑(Local Wavenumber Amplitude Mapping)

손상이 발생한 영역은 파수와 진폭이 큰 값으로 나타난다. 이 기법은 고 파수 필터링 후의 신호에서 진폭을 기반으로 탐지하는 기법이며, Fig. 4의 과정을 통해 결함을 탐지한다.

(1) $r(x, y)$ 데이터에서 2-Dimensional Fast Fourier Transform(2D-FFT)를 하여 공간 도메인에서 파수 도메인 $R(k_x, k_y)$ 으로 변환한다. 이 때 원의 반지름의 길이가 $r(x, y)$ 의 대표 파수가 된다.

(2) 대표 파수를 제거하는 고 파수 필터 $F_H(k_x, k_y)$ 를 생성 및 필터링 한다.

(3) 필터링 된 데이터는 2-Dimensional Inverse Fast Fourier Transform(2D-IFFT)을 적용하여 다시 파수 도메인에서 공간도메인 $r_F(x, y)$ 으로 복원한다.

(4) $r_F(x, y)$ 에서 국소 공간의 크기로 데이터를 추출한다. 이 영역의 크기는 파장 길이의 2배로 설정한다.

(5) 추출된 데이터를 2D-FFT를 적용 후 가장 큰 값을 해당 국소 영역의 값으로 선정한다.

(6) 모든 국소 영역에 4~5의 과정을 반복하여 $M(x, y)$ 를 얻는다. 마지막으로 $M(x, y)$ 의 최대 크기만큼 정규화 한다.

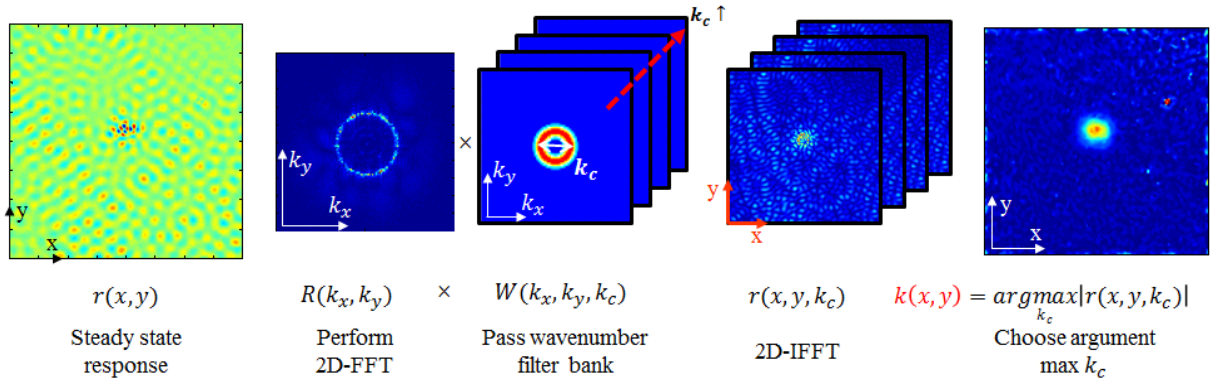


Fig. 5 Flow diagram of acoustic wavenumber spectroscopy

2.3.2 음향 파수 분광법(Acoustic Wavenumber Spectroscopy)

이 기법은 정상상태 응답에서 파수를 추출하여 손상의 위치와 크기를 탐지하는 기법으로 Flynn⁽¹⁵⁾에 의해 개발되었다. Fig. 5의 과정을 통해 결함을 탐지한다.

(1) 식 (1)을 통해 획득한 $r(x, y)$ 데이터에서 2D-FFT를 적용하여 공간도메인에서 파수 도메인 $R(k_x, k_y)$ 으로 변환한다. 이 때 원의 반지름 길이가 $r(x, y)$ 의 파수가 된다.

(2) 반지름이 k_c 이며 점차적으로 증가하는 도넛 모양의 파수 필터뱅크 $W(k_x, k_y, k_c)$ 을 생성한다. 결함의 종류에 따라 파수의 대역폭(bandwidth) 및 k_c 의 최솟값과 최댓값을 조정한다. 일반적으로 파수의 대역폭은 작은 결함을 탐지할수록 조밀하며, k_c 는 $R(k_x, k_y)$ 의 반지름 길이의 절반부터 2배까지 설정한다.

(3) $R(k_x, k_y)$ 을 필터뱅크 $W(k_x, k_y, k_c)$ 에 필터링한다. 필터링 된 데이터는 2D-IFFT를 적용하여 파수 도메인에서 공간도메인 $z(x, y, k_c)$ 으로 복원한다.

(4) 모든 공간좌표에서 $z(x, y, k_c)$ 의 진폭이 최대가 되는 k_c 를 맵핑하여 공간도메인에서 파수 크기를 갖는 $k(x, y)$ 을 획득한다.

3. 실험 결과

3.1 CFRP 층간분리 결함 가시화

본 실험에 사용된 CFRP(CP 250NS, 12장 적층, [(0/90)_s])의 크기는 1000 × 505 × 3 mm²이다. 망치(head, Φ30 mm)를 통해 강한 충격을 주어 층간

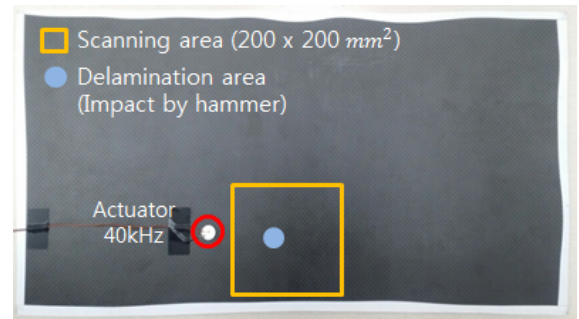


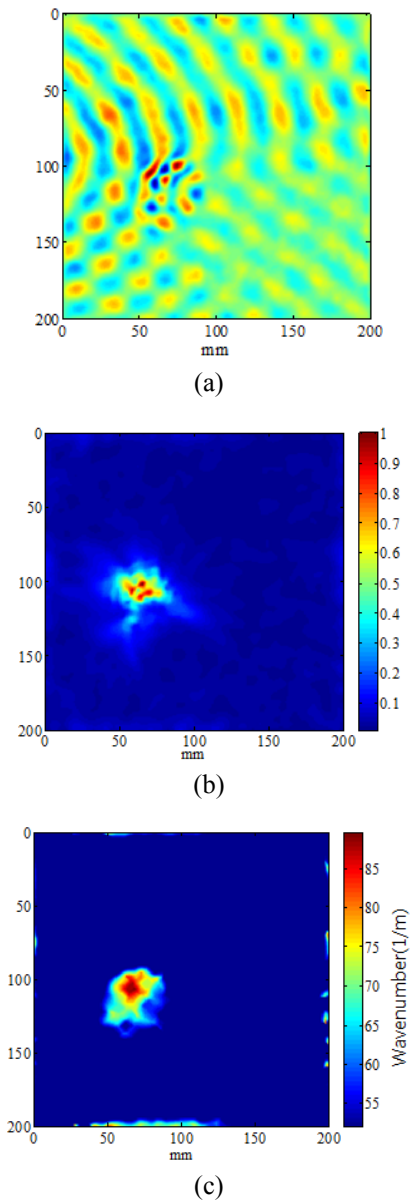
Fig. 6 CFRP plate with delamination damage

분리 결함을 조사하였다. 스캔 파라미터는 Table 1과 같다. Fig. 6과 같이 결함 영역 부근에 압전 소자를 부착하였고, 가진 주파수는 40 kHz를 사용하였다. 200 × 200 mm²의 영역을 1 mm의 간격으로 스캔을 수행했으며, 스캔 시간은 약 6초가 소요되었다.

CFRP 평판 스캔 결과 Fig. 7(a)와 같이 정상상태 응답을 획득하였다. 결함 하단 부 벽면의 반사파와 중첩되어 정상파 형태가 나타났다. 파수 변화로 인해 결함이 존재하는 것으로 판단할 수 있으나, 보다 정량적으로 결함을 탐지하기 위해 파수를 이용한 신호처리를 적용하였다. Fig. 7(b), (c)는 각각 LWAM과 AWS를 통해 CFRP 평판의 손상을 가시화하였다. LWAM의 결과 결함이 없는 영역은 거의 0으로 나타났으며, 결함 영역은 0.3 이상의 크기로 나타났다. AWS의 결과 결함 영역은 파수가 65 m⁻¹ 이상으로 나타났다. 하지만 파수 필터링에 의해 검사면 외각에서 높은 파수가 나타났다. 두 기법 모두 결함의 크기와 위치는 유사하게 나타났으며 복합재료에서 파수를 이용한 결함탐지가 가능함을 확인하였다.

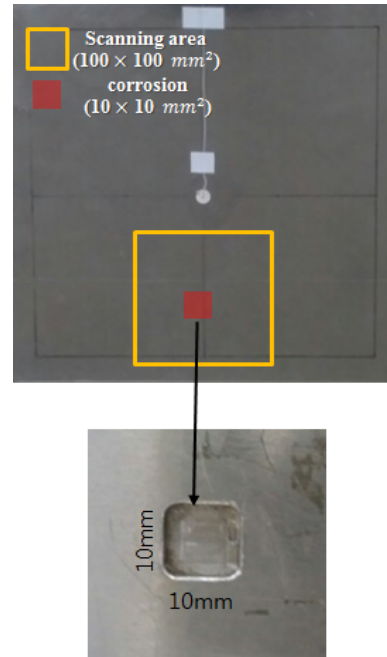
Table 1 Laser test scan parameters

Specimen	CFRP	Aluminum
Scan area (mm × mm)	200 × 200	100 × 100
Spatial resolution (mm)	1	1
Frequency (kHz)	40	150
Defect size (mm)	Φ 30	10 × 10
Total scan time (s)	6	4

**Fig. 7** (a) Steady state response at CFRP plate, (b) LWAM result, (c) AWS result

3.2 알루미늄 부식 결함 가시화

알루미늄(AL-5052) 시편의 결함 탐지를 위해 Fig. 8처럼 $300 \times 300 \times 4 \text{ mm}^3$ 크기의 알루미늄 평

**Fig. 8** Aluminum plate with corrosion damage

판 후면에 $10 \times 10 \text{ mm}^2$, 깊이 2 mm 크기의 부식 결함을 모사하였다. $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 의 영역을 1 mm의 간격으로 스캔을 수행했으며, 스캔 시간은 약 4초가 소요되었다. 시편의 중앙에 압전소자를 부착하였고 이 때 가진 주파수는 결함의 크기를 고려하여 150 kHz를 사용하였다.

알루미늄 평판 스캔 결과 Fig. 9(a)와 같이 정상 상태 응답을 획득하였다. 직관적으로 결함을 탐지하기 위해 손상 탐지 기법을 적용하였다. Fig. 9(b), (c)는 각각 LWAM과 AWS를 통해 알루미늄 평판의 손상을 가시화한 결과를 나타낸 것이다. LWAM의 결과 0.3 이상의 크기로 결함이 나타났으며 AWS의 결과 손상이 없는 영역에서는 파수가 70 m^{-1} 대로 나타났으며 손상이 발생시 90 m^{-1} 까지 증가하였다. 하지만 작은 결함을 탐지하기 위해 파수의 대역폭을 조밀하게 조정했다. 그 결과 파수 필터링에 의한 왜곡이 더 넓게 발생하였고 검사면 외각의 파수는 결함의 파수보다 더 높게 나타났다. 두 기법 모두 결함의 크기와 위치는 동일하게 나타났으며 알루미늄 평판에서 파수를 이용한 결함탐지가 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 정상파 기반 레이저 스캐닝 시스템을 구축하였고 파수 기반 손상탐지 기법인

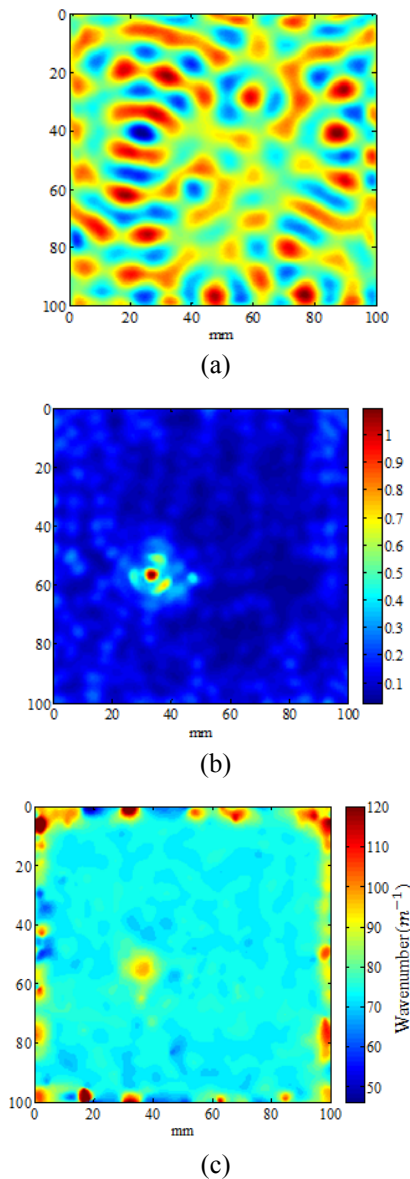


Fig. 9 (a) Steady state response at aluminum plate, (b) LWAM result, (c) AWS result

LWAM을 개발하였다.

개발한 기법을 검증하기 위해 복합재료의 층간 분리 결함과 알루미늄의 부식결함 탐지를 수행하였고 그 결과를 기존 기법인 AWS와 비교하였다. 두 기법 모두 높은 정확도로 손상을 탐지할 수 있었다. 기존 LDV 기반 레이저 스캔의 단점인 낮은 SNR과 느린 스캔속도를 정상과 가진을 통해 극복하였다. 기존에 개발된 AWS는 필터링에 의한 검사면 외각에서 파수 측정에 오차가 발생하였다. 본 기법은 이를 극복하기 위해 국소 창을 이용하여 검사면 외각에서의 검사결과를 향상시켰다.

본 연구는 평판 구조물에서 금속 및 복합재료 구조물의 결함을 탐지하였다. 적용성 확대를 위해 곡률이 있는 복잡한 구조물에 대한 결함 탐지를 수행할 계획이다. 곡률에 의한 측정간격의 왜곡이 발생하기 때문에 이를 보완하는 추가 연구가 필요하다. 그리고 결함의 깊이에 따라 파수가 크게 좌우되므로 손상의 깊이 추정에 대한 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 지원(2011-0030065), 한국연구재단의 지원(NRF-2015 R1D1A1A01059092), 2016년도 정부(미래창조과학부)의 지원을 받아 수행된 연구 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌 (References)

- (1) Lee, J. H. and Lee, S. J., 2009, "Application of Laser-Generated Guided Wave for Evaluation of Corrosion in Carbon Steel Pipe," *NDT & E International*, Vol. 42, No. 3, pp. 222~227.
- (2) Abramowicz, W., 2003, "Thin-Walled Structures as Impact Energy Absorbers," *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 2, pp. 91~107.
- (3) Mandache, C., Levesque, D., Dubourg, L. and Gougeon, P., 2012, "Non-Destructive Detection of Lack of Penetration Defects in Friction Stir Welds," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17, No. 4, pp. 295~303.
- (4) Philip, J., Rao, C. B., Jayakumar, T. and Raj, B., 2000, "A New Optical Technique for Detection of Defects in Ferromagnetic Materials and Components," *NDT & E International*, Vol 33, No. 5, pp. 289~295.
- (5) LEE, J. H., Lee, B. S. and Lee, M. R., 2005, "Finite Element Analysis for Eddy Current Signal of Aluminum Plate with Surface Breaking Crack," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 29, No. 10, pp. 1336~1343.
- (6) Kim, J. W. and Yun, K. W., 2013, "Evaluation of Improvement of Detection Capability of Infrared Thermography Tests for Wall-Thinning Defects in Piping Components by Applying Lock-in Mode," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 9, pp. 1175~1182.
- (7) Hasiotis, T., Badogiannis, E. and Tsouvalis, N. T., 2011, "Application of Ultrasonic C-Scan

- Techniques for Tracing Defects in Laminated Composite Materials," *Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 57, No. 3, pp. 192~203.
- (8) Lee, J. R., Jeong, H. M., Ciang, C. C., Yoon, D. J. and Lee, S. S., 2010, "Application of Ultrasonic Wave Propagation Imaging Method to Automatic Damage Visualization of Nuclear Power Plant Pipeline," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 10, pp. 3513~3520.
- (9) Jeong, H. M., Lee, J. R. and Park, C. Y., 2012, "Advances in Hardware of Ultrasonic Propagation Imaging System," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 2, pp. 214~219.
- (10) Lee, J. R., Chong, S. Y., Jeong, H. and Kong, C. W., 2011, "A Time-of-Flight Mapping Method for Laser Ultrasound Guided in a Pipe and its Application to Wall Thinning Visualization," *NDT & E International*, Vol. 44, No. 8, pp. 680~691.
- (11) Rogge, M. D., and Leckey, C. A. C., 2013, "Characterization of Impact Damage in Composite Laminates Using Guided Wavefield Imaging and Local Wavenumber Domain Analysis," *Ultrasonics*, Vol. 53, No. 7, pp. 1217~1226.
- (12) Mesnil, O., Leckey, C. A. C. and Ruzzene, M., 2014, "Instantaneous and Local Wavenumber Estimations for Damage Quantification in Composites," *Structural Health Monitoring*, Vol. 14, No. 3, pp. 193~204.
- (13) Kudela, P., Radzienski, M., Ostachowicz, W., 2015, "Identification of Cracks in Thin-Walled Structures by Means of Wavenumber Filtering," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 50, pp. 456~466.
- (14) Flynn, E. B., 2014, "Embedded Multi-Tone Ultrasonic Excitation and Continuous-Scanning Laser Doppler Vibrometry for Rapid and Remote Imaging of Structural Defects," *In: EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Nantes, France, pp. 1561~1567.
- (15) Flynn, E. B. and Jarmer, G. J., 2013, "High-Speed, Non-Contact, Baseline-Free Imaging of Hidden Defects Using Scanning Laser Measurements of Steady-State Ultrasonic Vibration," *In: 9th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, California, USA, Vol 1, pp. 1186~1193.