

Q-switched 레이저와 다중센서/단일채널 신호수집을 이용한 복합재 구조 음향방출 트레이닝 및 위치탐지 기법 개발

최윤실* · 이정률*†

Development of Acoustic Emission Training Technique and Localization Method using Q-switched Laser and Multiple Sensors/Single Channel Acquisition

Yunshil Choi*, Jung-Ryul Lee*†

ABSTRACT: Various structural health monitoring (SHM) systems have been suggested for aerospace industry in order to increase its life-cycle and economic efficiency. In the case of aircraft structure madden with metal, a major concern was hot spots, such as notches, bolts holes, and where corrosion or stress concentration occurs due to moisture or salinity. However, with the increasing use of composites in the aerospace industry, further advanced SHM systems have been being required to be applied to composite structures, which have much complex damage mechanism. In this paper, a method of acoustic emission localization for composite structures using Q-switched laser and multiple Amplifier-integrated PZTs have been proposed. The presented technique aims at localization of the AE with an error in distance of less than 10 mm. Acoustic emission simulation and the localization attempt were conducted in the composite structure to validate the suggested method. Localization results, which are coordinates of detected regions, grid plots and color intensity map have been presented together to show reliability of the method.

초 록: 항공우주산업에서 구조물의 수명연장과 경제적 측면에서의 효율적인 운용을 위해 다양한 구조건전성모니터링(Structural Health Monitoring, SHM) 기법들이 제시되어왔다. 금속재 구조물의 경우, 수분이나 염분 등에 의한 부식이나 쉽게 응력집중이 발생하는 타공, 노치, 볼트 등과 같은 위치에서의 균열이 주된 관심사였으나, 항공우주산업에서의 복합재 사용비율이 증가함에 따라 손상 메커니즘이 더욱 복잡한 복합재 구조물에 적용이 가능한 고도화된 SHM 시스템의 필요성이 강조되고 있다. 본 논문에서는 Q-switched 레이저와 다수의 압전센서를 이용한 복합재에서의 AE(Acoustic emission) 위치탐지 기법을 제시한다. 제시되는 기법은 10 mm 이내의 거리오차로 방출 위치 탐지를 목표로 하며 복합재 구조에서 수행된 AE 모사실험 및 위치탐지 시도 결과를 제시하여 기법이 유효함을 증명한다.

Key Words: 구조건전성모니터링(Structural Health Monitoring), 음향방출(Acoustic Emission), Q-switched 레이저(Q-switched laser), 압전센서(Piezoelectric sensor), 위치탐지(Localization)

1. 서 론

AE(Acoustic Emission)는 복합재 구조물에서 일어나는 층

간분리, 접착분리, 섬유파단, 저속충격 등의 이벤트 검출에 폭넓게 활용된다[1,2]. AE를 활용하는 SHM(Structural Health Monitoring/Management) 시스템은 일반적으로 복수의 센

Received 21 May 2018, received in revised form 12 July 2018, accepted 18 July 2018

*Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

*†Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Corresponding author (E-mail: leejrr@kaist.ac.kr)

서를 동시에 운용하여 AE 이벤트를 탐지하며 위치탐지, 발생 횟수 누적 등의 정량화 과정을 통해 시스템 목적을 달성한다. 위치탐지 기법으로는 각 센서에서 수집된 신호의 도착시간의 차이를 통해 AE의 진원을 추적하는 기법[3,4]과 구조상 다수의 지점에서 AE를 모사하는 구조 AE 트레이닝을 수행한 후, 실제 AE 이벤트와 트레이닝 데이터 사이의 유사성을 기반으로 위치를 탐지하는 기법이 주를 이룬다[5-8]. 전통적인 트레이닝 데이터 기반 AE 위치탐지 기법은 크게 두 가지 주요 문제점을 지닌다. 광역 트레이닝 데이터의 획득은 인력이 직접 구조물에 격자를 설치하고 수십, 수백개의 격자점에 충격인가 등의 수단을 통해 AE를 모사하여 이루어진다. 이는 활용도가 높은 훈련데이터를 획득하기 위해 매우 오랜 시간과 노력이 소요되며 공간 분해능에서도 큰 제약이 따른다는 단점이 있다. 신뢰도 높은 트레이닝 데이터가 확보되었을지라도 트레이닝 데이터의 공간분해능(약 50 mm)이 매우 크기 때문에 검출된 AE의 방출위치와 실제 방출위치간의 오차 또한 매우 클 수도 있으며 이를 보상하기 위한 별도의 예측과정이 요구된다. 따라서 새로 제안되는 SHM 시스템은 인력의 의존도가 높은 기존 구조훈련 절차의 단점을 극복하고 AE의 정량화를 충분히 수행할 수 있는 자동화 시스템으로 구축되어야 한다.

본 논문에서는 복합재 구조물에서 발생한 AE의 방출 위치탐지를 목적으로 Q-switched 레이저를 이용한 AE 트레이닝을 시도한다. 기존 기법들이 갖는 긴 트레이닝 시간과 큰 공간분해능의 단점을 극복하고 신뢰도 높은 트레이닝 데이터를 광역에서 수집할 수 있는 시스템을 제안한다. 또한 Bae *et al.*이 금속재 구조물에서의 광역 NDE(Non-Destructive Evaluation)를 목적으로 제안한 직렬연결 센서 네트워크(Serially connected sensor network, SCSN)[9]를 적용하여 복합재 구조물에서의 광역 AE 트레이닝을 달성한다. AE 위치탐지를 위한 상호변조/비교 알고리즘이 함께 제시되며, 시스템 및 알고리즘의 타당성을 보이기 위해 트레이닝 데이터와 손상유도 AE간의 상호변조/비교를 통해 생성된 방출위치 가시화 결과 및 거리오차를 제시하여 기법의 타당성을 증명한다.

2. 레이저기반 구조 AE 트레이닝

2.1 레이저유도파를 이용한 AE의 모사

실제 구조의 파단을 유도하는 파괴적 접근방법은 AE 연구에 있어 가장 보편적이지만 실험이 반복됨에 따라 요구되는 비용이 급격히 증가하게 된다. 이러한 문제점을 해결하고자 구조를 파괴하지 않고 AE를 모사하여 그 특성을 연구하는 비파괴적 접근방식이 제시되었다. AE를 모사하는 기법으로는 초음파펄스, 전기 스파크, 연필심 또는 유리관 파단, 펄스레이저 등 다양한 기법들이 사용되고 있다. 상기 기법들 중에도 펄스레이저를 이용한 AE 모사기법은 펄스

레이저 기법이 갖는 고유의 장점을 바탕으로 1970년대부터 꾸준히 연구되어지고 있다. 특히 펄스레이저에 의해 유도된 열탄성파는 실제 균열발생시 전파되는 AE를 거의 완벽하게 모사할 수 있다는 장점이 있어 많은 분야에서 폭넓게 활용되고 있다[10].

레이저를 이용한 구조의 AE 트레이닝을 위해서는 설계된 위치로 레이저빔이 조사되도록 하는 레이저 조사기법과 설계된 경로를 따라 장치를 제어할 수 있는 자동제어기법이 함께 요구된다. 유도초음파전파영상화(Guided-wave Ultrasonic Propagation Imaging, G-UPI) 시스템은 Q-switched 레이저와 레이저거울스캐너 (Laser Mirror Scanner, LMS)의 동기화를 통해 다수의 지점에서 레이저유도파를 발생시키는 고속 레이저스캐닝 시스템을 포함하고 있다[11]. 또한 레이저스캐닝 시스템과 DAQ(Data Acquisition)시스템의 동기화가 이루어져 있기 때문에 시스템 운용에 요구되는 인력의 노동을 최소화한 자동화 시스템으로 기존의 트레이닝 기법들의 단점을 보완하기에 매우 적합한 시스템이다.

Fig. 1은 G-UPI의 스캐닝 시스템의 스캐닝 패턴과 레이저 유도파의 가시화 알고리즘을 도식화하여 나타내고 있다. G-UPI의 스캐닝 시스템은 Fig. 1(a)와 같이 임의의 직사각형 영역에 대해 각 격자점에 레이저를 조사하는 래스터 스캔(Raster scan)을 수행한다. 래스터 스캔은 가장 일반적인 스캔 패턴으로 스캔 영역의 폭 L_H 와 높이 L_V , 조사 간격 Δ , 검사대상과 레이저 스캐닝 시스템사이의 거리(Stand-off-distance, SoD) D_{SoD} 를 패턴 생성의 변수로써 사용한다. G-

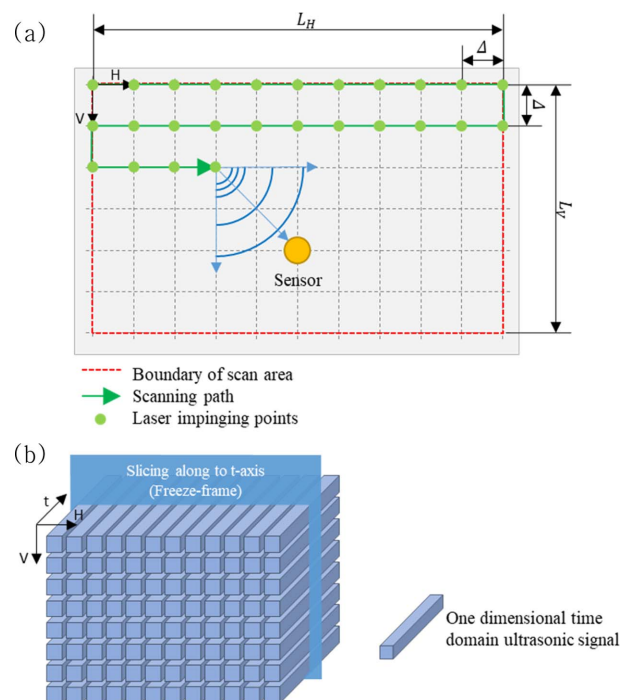


Fig. 1. (a) Scanning pattern of G-UPI system (b) Arrangement of training data

UPI 시스템은 레이저가 특정 지점을 가진 후, 횡축 또는 종축에 따라 인접한 격자점에 다음 가진을 시도한다. 스캐닝 속도는 미리 지정된 펄스반복율(Pulse repetition rate, PRR) F_{PRR} 에 의해 결정되며, 특정지점 가진 시점에서 $1/F_{PRR}$ 초 이후에 인접한 다음 격자점의 가진이 시도된다. 따라서 펄스레이저의 가진으로 유도된 레이저유도파의 샘플링 시간은 $1/F_{PRR}$ 초 미만으로 한정된다.

G-UPI 시스템은 스캐닝시스템과 DAQ시스템이 동일한 트리거 신호를 공유하여 레이저스캐닝-DAQ 동기화를 성립하기 때문에 가진지점과 압전센서 사이의 거리차이에 의한 도착시간의 차이가 발생한다. Fig. 1(b)와 같이 각 지점에서 수집한 1차원 신호를 3차원 배열에 정렬하고, 공간도 메인상에서 신호의 진폭 변화를 시간의 흐름에 따라 연속적으로 표시하여 센서를 중심으로 레이저유도파가 전파되는 현상을 나타내는 영상결과를 출력한다. 각각의 레이저유도파를 포함한 3차원 배열은 스캔 영역 내에서 발생한 손상유도 AE를 모사한 트레이닝 데이터로써 실제 손상유도 AE와 유사도 비교를 통해 위치탐지를 수행하는데 사용된다.

2.2 직렬연결센서네트워크

Bae *et al.*[9]은 금속재 항공기 구조물에서 발생할 수 있는 MSCs (Multisite Cracks)를 보다 효율적으로 평가하기 위해 SCSN을 이용한 NDE 기법을 제안한 바가 있다. 각 지점에서 발생된 레이저유도파의 도착시간은 가진지점과 센서사이의 거리에 비례하여 길어진다. G-UPI 시스템은 스캐닝시스템과 DAQ 시스템이 동일한 트리거 신호를 공유하기 때문에 다루고자 하는 영역의 크기가 넓어지면 지정된 샘플링 시간 이내에 레이저유도파가 센서에 도달하지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Bae *et al.*은 복수의 센서를 일정 간격으로 배치하여 광역에서 발생된 레이저유도파가 지정된 샘플링 시간 이내에 수집될 수 있도록 하였다. 복수의 센서를 직렬로 연결하여 단일 채널로 넓은 영역을 다루도록 SCSN을 구성하고 넓은 영역에 분산되어 있는 MSCs를 성공적으로 가시화하였다.

본 논문에서 레이저기반 AE 트레이닝의 유효영역의 넓이 증가를 목적으로 SCSN을 적용하였다. 복합재에서 발생된 레이저유도파는 이동거리에 따른 감쇠가 매우 빠르고 전파속도 또한 느리기 때문에 각 압전센서가 다룰 수 있는 유효영역의 넓이에 큰 제한이 따른다. 복합재 구조물에서 SCSN은 단일 스캐닝으로 다룰 수 있는 유효영역의 크기를 극적으로 증가시킬 수 있다는 장점을 지닌다.

Fig. 2(a)와 같이 유효영역의 넓이가 제한적인 경우, Fig. 2(b)와 같이 복수의 압전센서를 동시에 병렬로 운용함으로써 유효영역의 크기를 증가시킬 수 있다. 하지만 이 경우에는 영역의 크기가 커질수록 센서운용에 요구되는 채널 개수 또한 증가하기 때문에 운용 비용이 급격히 증가하게 된다. 반면 Fig. 2(c)와 복수의 압전센서를 직렬로 운용할 시,

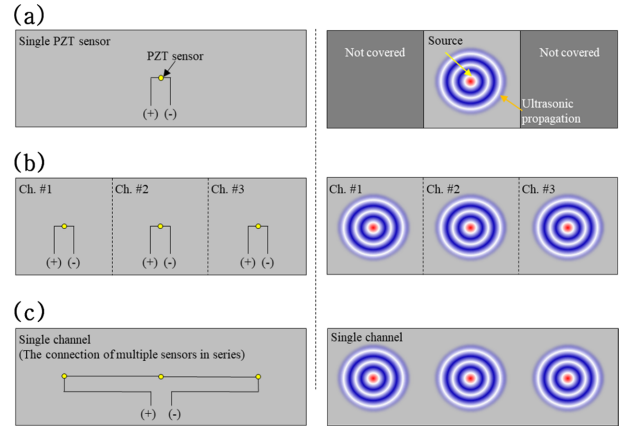


Fig. 2. Capable area of (a) single channel-single sensor, (b) multiple channels-multiple sensors and (c) single channel-multiple sensors [9]

단일 채널이 다룰 수 있는 유효영역의 크기가 극적으로 넓어지며 채널운용에 필요한 비용 또한 절감이 가능하다. Bae *et al.*이 SCSN의 개발을 위해 수행한 연구에서는 단일 압전센서의 유효영역을 센서중심 반경 150 mm로 정의하고 있으며, 이에 따라 네트워크를 구성하는 압전센서의 center-to-center 거리 또한 300 mm로 고정하고 있다[9]. 따라서 본 논문에서는 Bae *et al.*이 제시한 결과에 따라 $300 \times 300 \text{ mm}^2$ 마다 하나의 압전센서를 배치하도록 한다.

3. 상호변조 알고리즘

Q-switched 레이저를 이용한 AE 트레이닝 및 위치탐지 기법은 동일한 위치에서 발생된 손상유도 AE와 레이저유도파는 구조의 표면을 따라 전파되는 표면파의 일종으로 유사한 전파특성을 가지며, 특정 주파수 성분만을 추출하여 상호비교하였을 때 유사한 형태의 파형을 갖는다고 가정한다. Fig. 3은 수집된 손상유도 AE의 주파수성분 분석과 수치필터의 적용을 통해 트레이닝 데이터와 손상유도 AE의 유사도를 판단하는 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

AE 이벤트의 검출 이후, 알고리즘은 시간 도메인에 놓인 손상유도 AE에 FFT(Fast Fourier Transform)를 적용하고 주파수 도메인에서의 성분분석을 수행한다. 각 주파수성분의 상대적인 매그니튜드를 비교하기 위해 아래의 식을 적용하여 주파수 스펙트럼 $|F_{AE}|$ 을 계산한다.

$$|F_{AE}| = (F_{AE} \times F_{AE}^*)^{1/2} \quad (1)$$

F 는 FFT를 나타내며 F^* 는 F 의 켤레복소수이다. 주파수 도메인에서의 응답에서 일정간격으로의 국부 최댓값을 탐색하고 이를 이용하여 $|F_{AE}|$ 에 대한 엔벨롭을 예측한다. 이때 각 국부 최댓값 사이는 스플라인 보간법을 이용하여 보

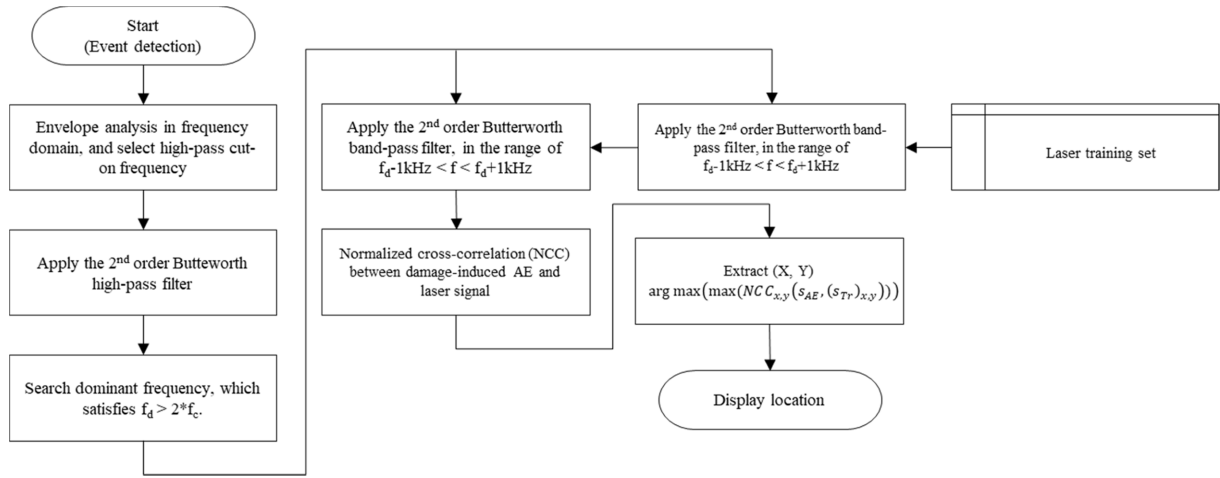


Fig. 3. Flow chart of the AE localization algorithm with laser training data

간한다. 예측된 엔벨롭에서 최댓값 M 을 추출하고, $M/2$ 를 3 dB 문턱값으로 정의한다. 예측된 엔벨롭과 문턱값의 교차점을 탐색하고 탐색된 교차점들에 해당하는 주파수 중 최저주파수를 f_1 , 최고주파수를 f_2 로 한다. 구해진 f_1 과 f_2 의 평균을 중심주파수 f_c 로 결정한 뒤, 저주파성분의 분포가 중심주파수를 중심으로 하는 정규분포를 따른다는 가정하에 $2f_c$ 를 컷온 주파수로 갖는 2차 버터워스 하이패스 필터를 AE에 적용한다. 하이패스 필터를 통해 저주파성분이 제거된 손상유도 AE는 f_c 를 탐색하였던 과정과 동일한 과정을 거쳐 밴드패스 필터의 설계를 위한 지배주파수 f_d 의 탐색에 사용된다. 이때 탐색되는 최댓값이 하이패스 필터의 컷온 주파수보다 낮은 경우 재탐색을 수행하여 $f_d > 2f_c$ 를 만족하는 주파수가 선택될 때까지 과정을 반복하여 지배주파수를 결정한다. 지배주파수의 결정 후, f_d 를 중심으로 2 kHz의 대역폭을 갖는 2차 버터워스 밴드패스 필터를 정의하여 하이패스 필터가 적용된 손상유도 AE에 추가적으로 적용한다. 주파수 도메인에서 변조를 마친 손상유도 AE는 트레이닝 데이터와의 유사도 계산을 위한 입력값으로 전달되며, 위 과정을 통해 정의된 밴드패스 필터 또한 함께 전달된다.

손상유도 AE와 트레이닝 데이터 사이의 유사도는 정규 상호상관(Normalized Cross-Correlation, NCC)으로 판단된다. 상기 과정으로 정의된 밴드패스 필터를 적용한 트레이닝 데이터 s_{Tr} 와 손상유도 AE s_{AE} 의 NCC는 아래와 같이 계산된다.

$$NCC(s_{AE}, s_{Tr}) = \frac{s_{AE}[n] \otimes s_{Tr}[n]}{\|s_{AE}\|_2 \|s_{Tr}\|_2} \quad (2)$$

$NCC(s_{AE}, s_{Tr})$ 은 s_{AE} 와 s_{Tr} 의 NCC, 연산자 \otimes 는 상호상관의 계산을 수행하며 $\|s\|_2$ 는 각 신호의 2차 노름(Norm)이다. 모든 격자점에 대해 NCC를 계산하고 식 (3)의 조건을 만족하는 트레이닝 데이터에 상응하는 지점 (X, Y)를 방출 위치로 결정한다. 여기서 x, y 는 스캔영역 상 H-V 공간좌

표 내의 좌표값이며 X, Y는 손상유도 AE의 방출위치의 좌표값이다.

$$\arg \max(\max(NCC_{x,y}(s_{AE}, (s_{Tr})_{x,y}))) = \{X, Y\} \quad (3)$$

4. 실험 구성 및 위치탐지 결과

4.1 복합재 AE 트레이닝 및 손상유도 AE 모사 실험

실험구성에 사용된 복합재료는 두께 1.25 mm의 CFRP wing skin이다(Fig. 4). Wing skin 시편상에 904 mm × 200 mm 크기의 영역을 지정하고 영역 내에 3개의 A-PZT(Amplifier-integrated Piezoelectric) 센서를 300 mm의 간격으로 설치하였다.

래스터 스캐닝에 사용된 간격은 2 mm이며 각 위치에서 유도된 신호는 5 kHz-50 kHz 대역의 아날로그 필터를 거쳐 단일 채널을 통해 수집된다. 샘플링 주파수는 200 kHz, 각 신호의 샘플링 시간은 2.560 ms이며, F_{PRR} 은 200 kHz를 사용

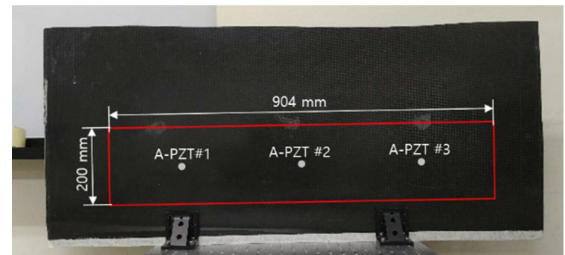


Fig. 4. CFRP wing skin specimen and training area with sensor locations of SCSEN

Table 1. Coordinates of event regions in the training area

	x [mm]	y [mm]	Note
R#1	300	100	Between A-PZT 1 & A-PZT 2
R#2	550	150	Between A-PZT 2 & A-PZT 3

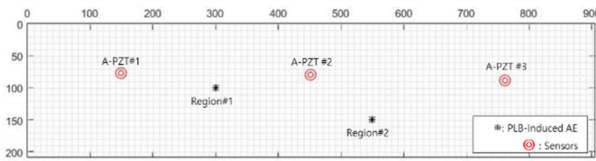


Fig. 5. Grid plot of event regions in the training area

하여 해당 영역의 트레이닝에 소요된 시간은 약 3분 46초이다.

SCSN 내 임의의 두 지점에서 PLB 테스트를 통해 AE를 모사하였다. PLB 테스트에 사용된 심은 두께 0.5 mm, 길이 3 mm, 시편의 표면과 심 사이의 각도는 약 30°로 고정하였다. Table 1 및 Fig. 5는 PLB 테스트를 수행한 위치의 좌표값과 영역 내 위치를 grid plot에 나타내고있다. 각 위치에서 3회씩 총 6회의 AE 모사실험이 수행되었으며 6회의 AE Localization이 수행되었다.

4.2 AE Localization 결과

Table 2은 6회의 모사실험에 대한 위치탐지 결과와 탐지된 결과의 거리오차를 나타내며, Fig. 6은 동일한 위치탐지 결과에 대해, 실제 PLB 방출위치 (*)와 검출된 방출위치(○)를 grid plot에 나타내고 있다.

트레이닝 데이터와의 상호비교를 통해 탐지된 방출위치와 실제 방출위치사이의 거리오차는 최소 2.83 mm에서 최대 4 mm로, 알고리즘 개발 목표인 10 mm이내 거리오차를 갖는 위치탐지결과 출력에 가능함을 확인하였다.

Fig. 7은 R#1와 R#2에서 시도된 위치탐지에서 각 지점에서 상응하는 NCC의 최댓값을 인텐시티 맵으로 표현한 결과를 나타내고 있다. 인텐시티 맵에서 최대 NCC의 가시성을 증대시키기 위해 3×3 크기의 커널을 사용한 공간 메디

Table 2. Result of PLB induced AE localization (coordinates and errors in distance)

		Attempted region [mm]	Detected region [mm]	Errors in distance [mm]
R#1	Trial #1	[300, 100]	[300, 104]	4.00
	Trial #2	[300, 100]	[302, 98]	2.83
	Trial #3	[300, 100]	[302, 98]	2.83
R#2	Trial #1	[550, 150]	[548, 148]	2.83
	Trial #2	[550, 150]	[550, 146]	4.00
	Trial #3	[550, 150]	[548, 148]	2.83

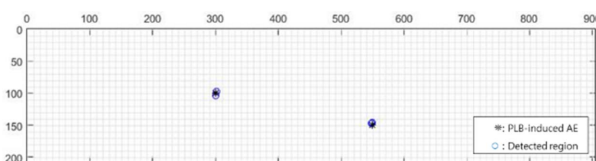


Fig. 6. Result of PLB induced AE localization (grid plot)

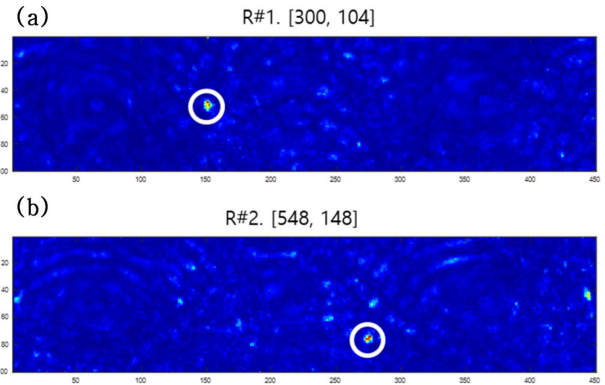


Fig. 7. Cross-correlation coefficient map for (a) R#1/Trial#1, detected region of [300, 104] and (b) R#2/Trial#1, detected region of [548, 148]

안 필터를 2회 적용하여 표시한다. 인텐시티 맵에서는 방출위치에서 관찰되는 컬러분포를 통해 탐지된 위치를 직관적으로 표시할 수 있음을 보인다.

5. 결 론

본 논문에서는 펄스 레이저를 이용하여 AE를 모사하던 기존 연구와 트레이닝 데이터기반의 AE 위치탐지 기법의 단점을 극복하는 Q-switched 레이저 기반의 AE 트레이닝 기법과 위치탐지 알고리즘을 제시하였다. 넓은 영역에서 생성되는 레이저유도파의 효율적인 수집을 위해 SCSN을 적용하여 레이저유도파의 감쇠가 빠르게 이루어지는 복합재 구조물에서 성공적으로 레이저를 이용한 AE 트레이닝 데이터를 수집하였다. 동일한 영역에서 PLB 테스트를 통해 6회의 손상유도 AE를 모사하고 제시한 알고리즘을 이용하여 최소 2.83 mm, 최대 4 mm의 거리오차를 갖는 위치탐지 결과를 제시하였다. 상기 결과를 바탕으로, 제시된 트레이닝 기법과 알고리즘의 타당성을 증명하였으며, 나아가 제시된 기법이 복합재 구조물에서의 AE 정량화를 수행할 수 있는 강건한 SHM 시스템으로 발전될 가능성이 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 2017년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단과 (NRF-2017R1A5A1015311) 산업통상 자원부와 한국산업기술진흥원의 “수소연료전지차 부품 실용화 및 산업기반육성사업” (과제번호 R0006462)으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

1. Jee, H.S., Lee, J.O., Ju, N.H., Lee J.K., and So, C.H., “Damage

- Evaluation for High Pressure Fuel Tank by Analysis of AE Paramenters," *Composite Research*, Vol. 24, No. 4, 2011, pp. 36-40.
2. Farrar, C.R., and Worden, K., *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*, Chichester, UK: Jonh Wiley and Sons Ltd., 2012.
3. Park, C.Y., Jang, B.W., Kim, J.H., Kim, C.G., and Jun, S.M., "Bird Strike Monitoring in a Composite UAV Wing Using High Speed Optical Fiber Sensing System," *Composites Science and Technology*, Vol. 72, 2012, pp. 489-505.
4. Qiu, L., Yuan, S., Mei, H., and Qian, W., "Digital Sequences and a Time Reversal-Based Impact Region Imaging and Localization Method," *Sensors*, Vol. 13, 2013, pp. 13356-13381.
5. Frieden, J., Cugnoni, J., Botsis, J., and Gmür, T., "Low Energy Impact Damage Monitoring of Composite Using Dynamic Strain Signals from FBG Sensors-Part I: Impact Detection and Localization," *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, 2012, pp. 438-445.
6. Kim, Y.Y., Kim, J.H., Park, Y., Shrestha, P., Kwon, H.J., and Kim, C.G., "Low-speed Impact Localization on Stiffened Composite Structure Using Reference Data Method," *Composite Research*, Vol. 29, No. 1, 2016, pp. 1-6.
7. Shrestha, P., Kim, J.H., Park, Y., and Kim, C.G., "Impact Localization on Composite Wing Using 1D Array FBG Sensor and RMS/correlation Based Reference Database Algorithm," *Composite Structures*, Vol. 125, 2015, pp. 159-169.
8. Jang, B.W., Park, S.O., Lee, Y.G., Kim, C.G., and C.Y. Park, "Detection of Impact Damage in Composite Structures Using High Speed FBG Interrogator," *Advanced Composite Materials*, vol. 21, No. 1, 2012, pp. 29-44.
9. Bae, D.Y., and Lee, J.R., "Development of Single Channeled Serial-connected Piezoelectric Sensor Array and Damage Visualization Based on Multi-source Wave Propagation Imaging," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27, No. 13, 2016, pp. 1861-1870.
10. Scruby, C., Wadley, H., Dewhurst, R., Hutchins, D., and Palmer, S., "A Laser-Generated Standard Acoustic Emission Source," *Material Evaluation*, Vol. Vol. 39, 1981, pp. 1250-1254.
11. Lee, J.R., Jeong, H., Chung, T.T., Shin, H., and Park, J., "Damage Visualization of Filament Wound Composite Hydrogen Fuel Tank Using Ultrasonic Propagation Imager," *Composite Research*, Vol. Vol. 28, No. 4, 2015, pp. 143-147.