

## 음향방출신호 맵핑을 이용한 풍력 블레이드 손상 검출 기법

### Damage Detection Method of Wind Turbine Blade Using Acoustic Emission Signal Mapping

한병희\*, 윤동진\*†

Byeong-Hee Han\* and Dong-Jin Yoon\*†

초 록 음향방출기법은 구조물에 존재하는 손상 및 손상 메커니즘을 규명하는 가장 유효한 비파괴검사 수단으로 널리 이용되고 있다. 최근 이러한 재료 및 구조의 내부 손상의 실시간 모니터링이 가능한 기법을 활용하여 풍력 블레이드와 같은 대형 구조물의 건전성을 실시간으로 감시 가능하도록 하는 연구가 각광 받고 있다. 이러한 실시간 건전성 모니터링을 위해서는 손상 징후를 조기에 발견 가능하여 손상으로 인한 큰 피해가 발생하지 않도록 하는 능력이 필수적으로 요구된다. 이 논문에서는 신호 맵핑 기법을 이용한 새로운 손상 검출 기법의 제안 및 750 kW 블레이드 부분 시편을 이용한 검증 시험을 다루었다. 검증 시험 결과 신호 맵핑 기법은 시간 도달차 기법과 비교하여 낮은 위치 오차율과 높은 위치 표정 결과를 나타내었다. 신호 맵핑 기법은 기존 기법과 비교하여 센서 부착 위치 선정에서도 유연함을 가지는 것을 확인하였다.

주요용어: 음향방출, 풍력 블레이드, 손상위치표정, 비파괴검사, 복합소재

**Abstract** Acoustic emission(AE) has emerged as a powerful nondestructive tool to detect any further growth or expansion of preexisting defects or to characterize failure mechanisms. Recently, this kind of technique, that is an in-situ monitoring of inside damages of materials or structures, becomes increasingly popular for monitoring the integrity of large structures like a huge wind turbine blade. Therefore, it is required to find a symptom of damage propagation before catastrophic failure through a continuous monitoring. In this study, a new damage location method has been proposed by using signal mapping algorithm, and an experimental verification is conducted by using small wind turbine blade specimen; a part of 750 kW real blade. The results show that this new signal mapping method has high advantages such as a flexibility for sensor location, improved accuracy, high detectability. The newly proposed method was compared with traditional AE source location method based on arrival time difference.

**Keywords:** Acoustic Emission, Wind Turbine Blade, Damage Location, Nondestructive Testing, Fiber Reinforced Plastic

#### 1. 서 론

풍력 블레이드는 높은 발전 용량을 가지기 위해서는 대형화가 필수로 요구된다. 750 kW의 경우 블레이드 길이는 약 25 m이며 2~3 MW의 경우

우 약 45 m로 늘어나게 된다. 블레이드가 대형화됨에 따라 건전성 모니터링의 필요성이 함께 대두되고 있다[1,2]. 대형화에 따른 무게 증가를 효과적으로 감소하기 위해 풍력 블레이드에는 유리 섬유 강화 플라스틱(glass fiber reinforced plastic,

이하 GFRP/PVC/발사우드가 혼용되어 사용된다. 또한 하중을 많이 받는 루트 주변부와 하중이 실리지 않는 블레이드 팁 부위의 재료 두께 또한 차이가 많고, 발전 효율을 위하여 공기역학적으로 설계된 구조는 손상 위치 추적을 위한 음향방출기법의 적용에 큰 어려움을 준다. 풍력 블레이드의 손상 발생은 대표적으로 제작 과정 중 접착수지의 불완전한 침투, 부품의 접착 과정에서 접착제의 탈락 등 제조 과정에서 손상 및 설치 장소까지 운반하는 과정에서 외부의 충격으로 인한 손상 등이 있다[3]. 이러한 결함 외에 실제 운전 중 급격한 풍하중의 변화에 따른 복합소재의 박리, 외부 물체의 충돌에 의한 균열, 낙뢰 및 우박, 태풍 등 자연 재해에 의한 손상 또한 풍력 블레이드의 수명 변화에 큰 영향을 주는 손상 발생 요인이 된다[4].

음향방출을 이용한 손상 위치 추적에 관한 연구는 교량 및 항공기 구조물에서 많은 기법 연구가 수행되어 왔다. 복합재 실린더 구조물에서 탄성파의 전파 경로 변화에 따른 도달 시간차를 계산하여 손상 위치 표정을 실시한 연구[5]와 같이 기존 기법을 개선하는 연구 및 다수의 압전소자를 부착한 초박형 음향방출 센서를 항공기 복합재 내부에 매설하여 손상 위치 및 정도를 평가[6]하는 등 새로운 센서를 개발하여 측정 능력을 높이는 연구가 주로 진행되었다. 이러한 연구를 바탕으로 복합재 블레이드의 손상 탐지에 적합한 기법의 개발을 위한 다양한 연구가 유럽과 미국을 중심으로 진행되어 왔다. 연구 초창기 블레이드의 거동에 따른 손상 발생 유형 분석을 위한 연구로서 블레이드의 외부에 음향방출 센서를 부착, 정적 하중시험 및 피로시험 중 손상 발생 빈도 및 위치 측정을 통하여 실제 손상 부위와 음향방출 시험결과를 비교하여 블레이드 손상 특성을 파악 하거나[7] 블레이드 파괴 시 손상 신호 특성의 측정에 음향방출 시험이 적합함을 실험적으로 증명하는 연구[8]가 수행되었다. 기존의 시간 도달차 측정법을 개선하여 복합소재에서 위치 표정을 실시하는 연구도 진행되어져 왔다. 웨이블릿 변환 기법을 이용한 디노이징 신호처리 기법을 적용하여 위치표정 오차를 줄이는 연구가 수행되었다[9,10]. 압전센서의 structural neural system 알고리즘을 사용하여 직렬로 연결된 센서의 배열 및 신호처리를 통한 복합재 구조물에서

의 손상 위치 추적에 관한 연구[11,12] 및 음향도모그래피를 응용한 기술로 복합재에 존재하는 손상의 위치를 추적하는 연구[13]는 센서 네트워크를 구축하여 기존의 기법을 개선하기 위한 연구다. 또한 스마트 헬스 모니터링 기술에 음향방출기법을 이용하여 운영중인 풍력 블레이드의 손상 발생 상시 측정 기법에 관한 연구[14]가 진행되었다. 이러한 연구들은 하나의 재료로 구성된 복합재료로 평판 시험편에 새로운 기법을 적용하는 실험을 통하여 기법을 검증하였다. 하지만 풍력 블레이드는 이종의 복합재를 사용하였고 형상 또한 복잡하므로 이러한 기법들이 풍력 블레이드에 그대로 적용되기에는 큰 무리가 있다. 종래의 음향방출 위치 표정 기술은 다수의 센서를 사용하여 재료를 통하여 전파되는 탄성파를 측정, 센서의 위치와 탄성파 도달 시간차를 사용하여 위치를 찾는 기술이다. 그러므로 탄성파 전파 속도를 결정짓는 재료의 물성치에 영향을 받으며 복합소재나 본 실험에 사용된 2가지 이상의 복합재로 구성된 구조물에서는 손상 위치 추적에 큰 어려움을 겪게 된다. 또한 고주파 신호의 감쇠가 큰 복합재료의 특성으로 인하여 분산 특성이 상대적으로 좋은 150 kHz 이상 대역의 센서를 사용하기 위해서는 센서를 다수 부착하여야 하는 단점이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 다발형 탐촉자를 이용한 발생원 방향을 탐지하는 센서를 다수 사용하여 이방성 복합재료에서 손상 발생 위치를 평가하는 연구[15] 및 측정 영역을 유한 요소법과 같이 메쉬로 나누어 이방성 재료의 속도차를 고려한 위치표정 연구[16,17] 있으나 비교적 작은 범위에서 위치 표정에 성공하였거나 이종 복합재에 기법의 적용이 검토되지 않았다. 또한 음향방출 도모그래피를 이용한 사례[13]가 있으나 기법 검증을 위한 실험에서 사용된 시편이 매우 작음에도 불구하고 수십개의 센서를 부착하여 손상 위치를 결정하는 한계가 있었다.

본 연구에서는 복합재 블레이드의 상시 감시 및 손상 위치 추적에 음향방출기법을 적용하기 위한 새로운 측정 알고리즘을 개발의 기초 연구로서 복합재료의 감쇠 특성으로 인한 주파수 대역 설정과 센서 선택의 어려움 및 이종 복합재료에 적용 시 나타나는 음향방출 기법의 한계를 극복하기 위해 새로운 신호 맵핑 기법을 개발하고 소형화된 블레이드 시편을 통한 실내 시험을 통

하여 알고리즘의 적용 가능성을 평가하였다.

## 2. 신호 맵핑 기법을 이용한 손상 위치 표정

탄성파의 도달 시간에 의존하는 기존 음향방출 위치표정 기술은 방향에 따라 전파 속도가 다른 이종의 복합재료로 구성된 풍력 블레이드에서 손상 위치의 정확한 측정이 불가능하다. 또한 20 mm 이상의 두꺼운 모재를 사용하는 풍력 블레이드의 환경과 고주파 신호의 감쇠가 심한 복합재의 특성으로 인해 60 kHz 이상의 주파수 대역을 가지는 음향방출 센서를 사용 시 측정 가능한 범위가 매우 좁아지는 어려움이 있다.

이러한 특성을 고려하여 본 연구에서는 손상에 의해 발생된 음향방출 신호 이벤트의 에너지를 위치표정을 위한 특성 값으로 사용하였으며 신호 맵핑 기반의 알고리즘을 적용하여 손상 위치표정을 실시하였다. Fig. 1에 신호 맵의 구성을 나타내었다.

신호 맵을 구성하기 위해서 우선 손상 모니터링 관심 영역에 일정 간격의 시험위치와 센서 부착 위치를 선정한다. 시험 위치의 간격과 센서 부착 위치는 대상 물체의 재질 및 크기, 형상 등을 고려하여 결정되며, 시험 위치의 간격은 완성된 신호 맵을 통하여 손상 신호 검출 시 결과값이 허용 오차범위 이내의 값을 가질 수 있는 최대한의 간격을 유지하는 것이 효율적이다. 또한 재료가 변하는 위치 혹은 급격하게 형상이 변하는 곳 등은 좀 더 자세한 데이터를 얻기 위해 특별히 시험 간격을 좁혀 신호 맵 데이터를 얻는 것도 가능하다.

센서 부착 위치는 특별히 제한을 두지 않지만 손상 모니터링 관심 영역의 경계선에 가깝게 위치하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있다. 또한 센

서 부착 위치에 따른 기존의 음향방출기법과 신호 맵핑을 이용한 기법의 손상 검출 결과 차이는 새로운 기법의 중요한 장점 중 하나로 결론에 다시 한 번 언급되게 될 것이다.

시험 위치가 결정되면 각 시험 위치에서 특정 소스를 사용하여 탄성파 신호를 발생시켜 음향방출 센서로 측정한다. 측정된 음향방출 신호 이벤트의 파워 스펙트럼 밀도 (PSD : power spectral density) 값이 시험 위치를 대표하는 에너지 값 E로 결정된다.

$$E(t) = \sum S(\omega) = \sum \frac{1}{2\omega} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

$E(t)$  = Energy

$S(\omega)$  = Power spectrum density

$R_{xx}(\tau)$  = Auto correlation function

신호처리 과정에서는 사용된 센서 및 주변 환경 소음을 고려하여 밴드 패스 필터 및 윈도우를 사용하였다. 측정시험을 통하여 모든 시험 위치를 대표하는 에너지 값이 결정되면 각 시험 위치의 x, y좌표가 행과 열의 값이 되는 행렬 형태로 저장한다. Fig. 1 과 같이 시험 위치 (x, y)는 행 열의 (m, n) 값이 되어 (x, y)의 에너지 값이 (m, n)의 값이 된다. 완성된 행렬은 손상 위치 추적 알고리즘의 기본 신호 맵으로 활용된다. 신호 맵은 부착된 센서의 수만큼 생성된다.

손상 위치표정 알고리즘에서는 신호 맵 행렬의 데이터 간격이 위치 표정 결과에서 정확도와 오차의 최소값에 직접적으로 영향을 주게 되므로 보간을 통해 데이터 량을 확장하여 오차를 줄이는 과정이 필요하다. 이와 같은 데이터 보간은 신호 맵을 생성하는데 필요한 시간과 노력을 매우 크게 줄여줄 수 있는 장점도 가지고 있다.

블레이드에서 발생할 수 있는 손상의 종류는 매우 다양하며 그 에너지 범위는 매우 넓다. 그러므로 탄성파 에너지 크기에 따른 다수의 신호 맵을 생성하는 것으로 넓은 에너지 범위, 즉 다양한 손상의 발생에 신호 맵이 적용될 수 있게 된다.

신호 맵핑 과정을 통하여 제작된 맵은 측정 장비에 저장되어 손상 위치 표정 알고리즘을 수행하기 위해 사용된다. 손상 신호에 의한 탄성파가 발생되었을 때 측정된 신호는 신호 맵의 에너지 값을 구하였을 때와 같은 신호처리 과정으로 에너지 값으로 변환된다. 신호 맵에서 손상 에너지

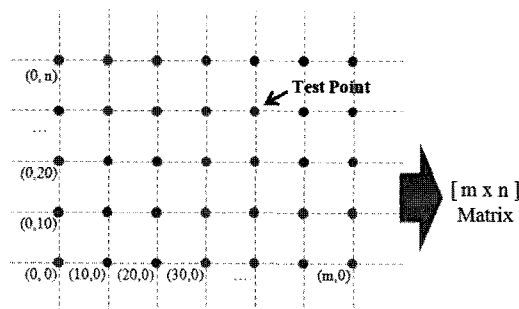


Fig. 1 Test points for AE signal mapping

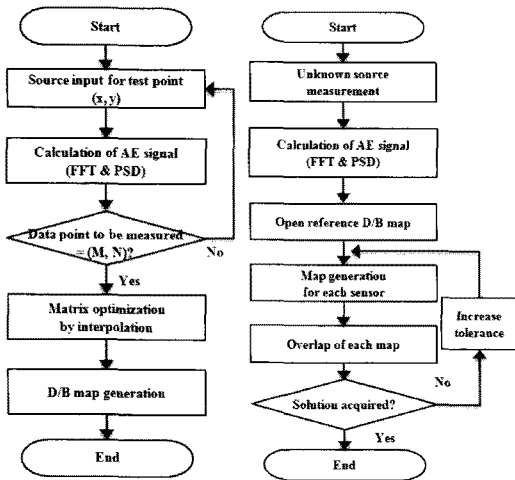


Fig. 2 Flowchart of signal map generation(left) and damage location algorithm(right)

값과 같은 크기의 값의 (m, n) 좌표를 추출, (x, y) 값으로 환원하게 되면 손상 신호에 대한 손상 후보지역이 결정된다. 각각의 센서에 대한 손상 후보지역이 모두 결정되면 그룹 별로 중첩하여 4개의 후보지역에서 모두 선정된 좌표가 손상 발생 지역이 된다.

이러한 기법은 재료의 전파속도가 아닌 에너지 값으로 구축된 신호 맵을 기반으로 하기 때문에 이종의 재료가 사용되어도 손상 위치 추적이 가능하다. 또한 Fig. 2의 손상 위치 표정 알고리즘에 나타나 있듯이 에너지 값에 오차 범위를 주어 손상 발생 가능 범위를 확장(Increase tolerance) 하며 손상을 찾는 알고리즘을 사용하기 때문에 위치 표정에 실패하지 않게 되는 장점을 가진다.

손상 위치 표정 알고리즘의 경우 손상 모니터링 과정 중에 실시간으로 모든 과정을 수행해야 하기 때문에 계측기기에 부담이 적은 바이너리 데이터를 사용하여 모든 과정을 진행 하는 것이 좋을 것이다.

### 3. 알고리즘 적용 시험

#### 3.1. 시험용 블레이드 시편

신호 맵 손상위치 표정 기법의 검증 및 성능 확인을 위한 시험을 위해 Fig. 3과 같은 750 kW 급의 풍력 블레이드 시편을 제작하였다. 25 m 길이의 실물 블레이드의 루트부에서 20 m 거리의

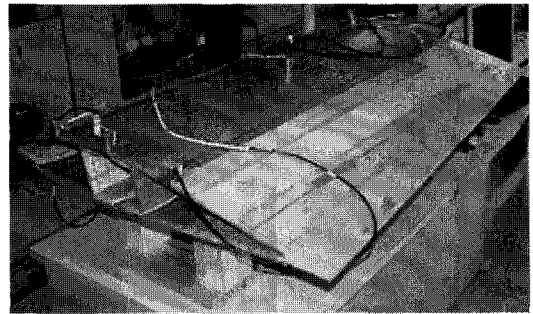


Fig. 3 Test specimen: a part of 750 kW full-scale blade

부분단면을 실물과 같은 형상으로 제작하였다. GFRP와 PVC로 구성된 시편은 2개의 웹을 가지는 구조로 기본 모델이 된 750 kW급 블레이드를 제작하는 생산업체의 공장에서 실물과 같은 인퓨전 공정으로 제작되었다. 시편의 크기는 길이와 폭, 웹의 높이가 각각 1500 mm×1000 mm×160 mm로 실험실에서 사용하기 적합한 크기가 되도록 하였다. 시편의 스킨 두께는 두께가 감소하는 리딩엣지와 트레일링 엣지의 접합부를 제외하면 대부분 측정 영역에서는 13 mm이다.

#### 3.2. 측정 방법

2차원 평면 손상 위치 표정을 위해서는 최소한 3개 이상의 센서가 필요하다. 이 논문에서는 기존의 음향방출기법을 사용한 도달 시간차(arrival time difference) 기법과 새로운 신호 맵핑 기법에서 모두 높은 정확도를 보여주는 4개의 센서를 사용한 방법으로 시편의 전영역을 측정하도록 하였다. 알고리즘의 검증을 위해 도달 시간차 기법과 신호 맵핑 기법에 기반한 측정을 모두 실시하였다. 도달 시간차 기법을 위해서 PAC의 8ch 측정 시스템  $\mu$ -SAMOS와 전용 프로그램인 AE-win을 사용하였다. 센서 선택을 위하여 R3I, R6I, R15I를 사용하여 블레이드 시험편에서 연필심 파괴의 AE 전파 범위를 확인한 결과 R15I의 경우 센서 반경 200 mm를 벗어난 지역에서 발생된 신호의 측정이 불가능하여 대상에서 제외 되었으며(100 kHz 이상의 대역에서 신호 감쇠가 크게 나타났다.), R6I와 R3I는 블레이드 시험편의 모든 영역에서 측정이 가능하였다. 이 중 시험편에서 신호 감쇠 영향이 가장 적은 R3I를 선택하여 사용하였다. 이는 본 실험이 알고리즘 검증을

목표로 하였으며 또한 외부 노이즈가 없는 실험실 환경에서 실험이 진행됨을 고려한 센서의 선택으로 외부 노이즈의 영향이 많은 실제 풍력 블레이드에 사용할 센서는 가칭 주파수 대역을 포함하는 R3I 보다는 R6I가 더 적합할 것이다.

측정의 정확도를 높이기 위해서 도달 시간차 기법에서는 3개의 다른 탄성파 전파 속도에서 실험을 실시하였다. 전파 속도는 Fig. 4와 같이 탄성파가 GFRP만을 전파할 때, PVC만을 전파할 때 그리고 GFRP와 PVC를 절반씩 전파할 때의 탄성파 도달 시간차와 2개의 센서의 위치 차를 이용하여 실험을 통하여 구하였으며 각각 1,165 m/s, 763 m/s, 894 m/s이다. 위치 표정 실험은 손상 위치와 크기가 다른 10개의 실험에서 각 전파속도 별로 수차례의 반복 실험을 통하여 결과의 정확도 및 신뢰성을 확보하도록 진행되었다. 신호 맵 기반의 위치표정 기법에서는 GAGE사의 고속 디지털타이저를 사용하였으며 측정 장비의 제어와 음향방출 신호수집 및 저장, 신호처리 등 알고리즘은 랩뷰 프로그램과 매트랩 프로그램이 사용되었다.

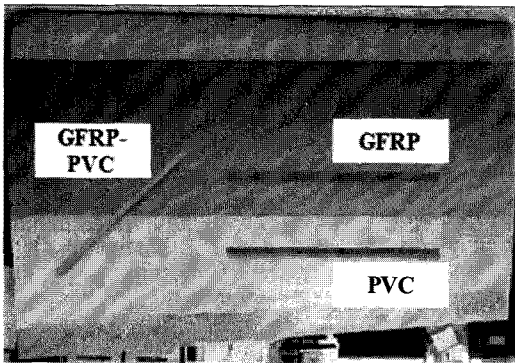


Fig. 4 Velocity measurement for each different material

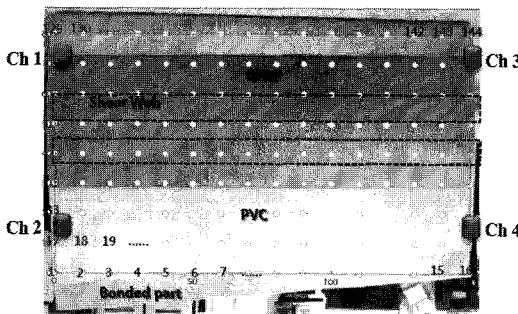


Fig. 5 Blade specimen with pre-determined test point

#### 4. 실험 결과

신호 맵은 측정을 위해 사용된 센서마다 3가지 다른 탄성파에 의해 구성되었으며 총 12개의 신호 맵이 손상 위치표정을 위해 준비되었다. Fig. 4 시편의 맵을 제작하기 위하여 Fig. 5와 같이 가로, 세로 100 mm의 간격으로 144개의 시험 위치를 선택하였으며 각각의 시험 위치에서 탄성파를 발생시켜 신호 맵을 구성하였다.

각각의 탄성파는 연필심 파괴(발생원 A), 용수철 충격(발생원 B), D형 equo-tip 충격(발생원 C)으로 발생되었다. Equo-tip 시험은 콘크리트 강도 평가를 위한 표준화된 비파괴검사법으로 콘크리트에 가해지는 충격량의 크기에 따라 D, C, DC, G형 등으로 시험장비가 세분화 되어 있다. 신호 맵 측정을 위해서 equo-tip 시험 장비의 충격 장치를 사용하였다. 연필심 파괴는 0.5 mm 샤프 펜슬의 심을 파괴하여 탄성파를 발생시키는 휴닐슨 발생원(Hsu-Nielson source)을 사용하였으며, 용수철 충격 시험 및 equo-tip 충격 시험은 휴닐슨 발생원과 같은 특성을 가지면서 더 큰 에너지를 발생시킬 수 있는 발생원으로서 선택되었다.

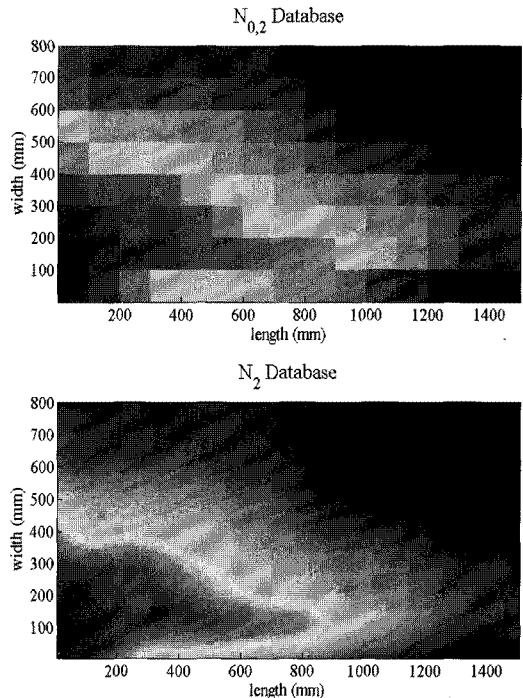


Fig. 6 Signal map before (top) and after (bottom) interpolation

3가지 발생원은 모두 반복되는 시험에서 정량적인 탄성과 발생이 가능할 것을 기대하고 선정하였다.

신호 맵의 정밀도를 높이기 위한 과정인 보간 작업에 의한 맵의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 이 과정은 손상 위치 표정의 정밀도 향상에 직접

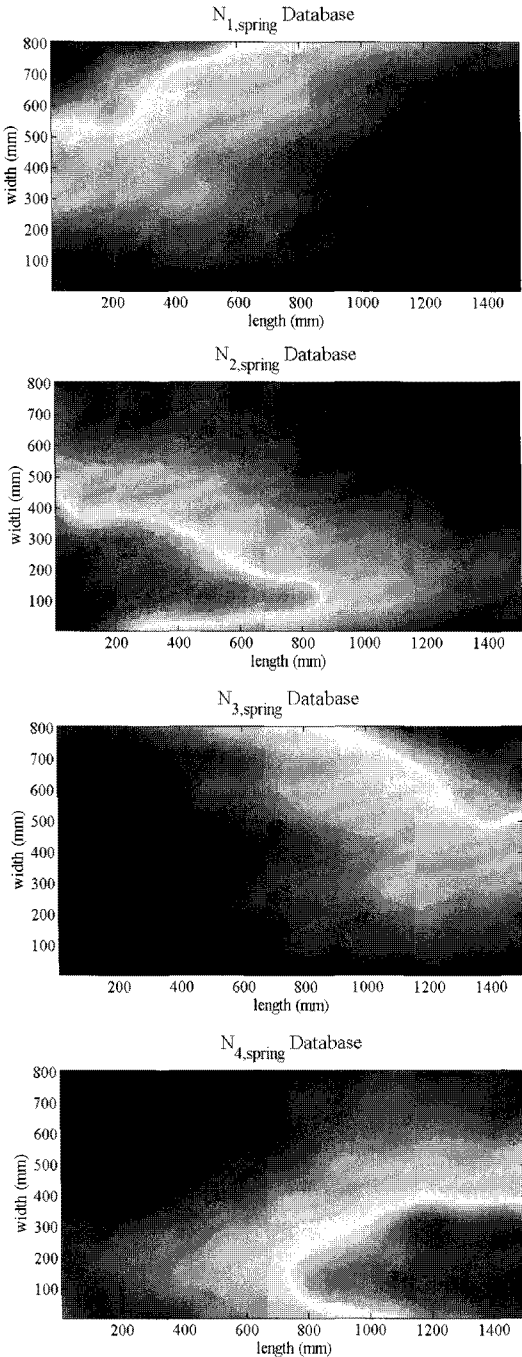


Fig. 7  $N_{spring}$  Signal map measured on blade specimen of Fig. 5(Ch 1, 2, 3, 4, from top)

적인 영향을 준다. 이 논문에서는 각 축의 값을 10배 증가시켜 신호 맵의 데이터 량은 100배 증가되었으며, 그로 인해 손상 위치 표정 시 최소 오차 범위가 1/100로 줄어들게 된다.

Fig. 7은 발생원 B에 의해 제작된 맵이다. 탄성 파는 블레이드 시편에서 전파될 때 이종의 재료를 거쳐 전파될 때보다 단일 재료에서 전파될 때 감쇠가 적게 나타났음을 신호 맵을 통하여 알 수 있다. 이는 블레이드가 실제 운행 중일 때 손상이 많이 발생하는 엣지 부분과 웨이 위치하는 GFRP에 센서를 배치하는 것이 효율적인 손상 위

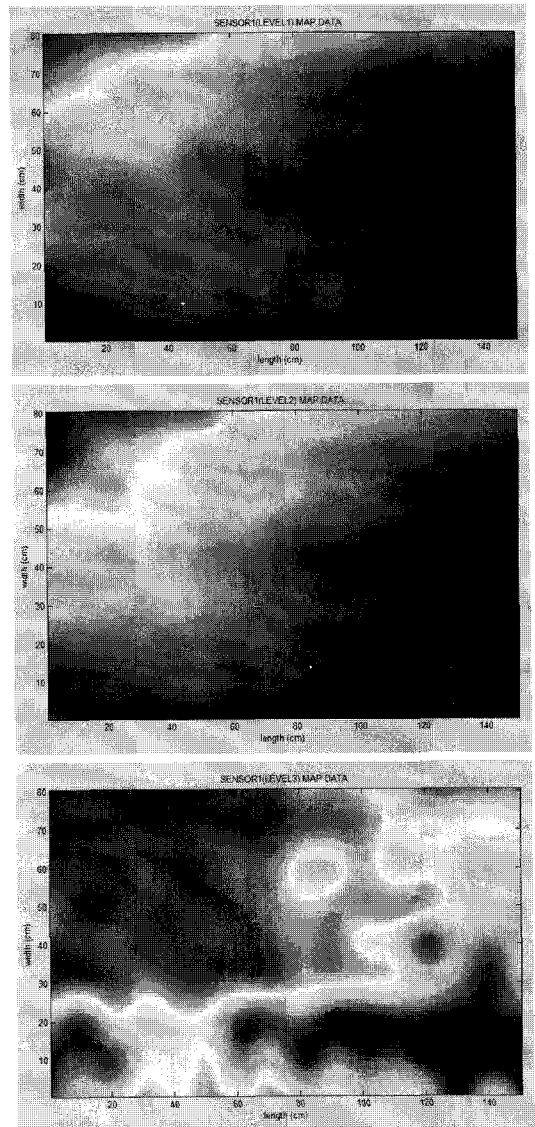


Fig. 8  $N_i$ Signal map difference by source object (spring impact, pencil break and equa-tip test, from top)

치 표정을 위해 적합한 선택임을 알 수 있다. 또한 재료 변화가 없는 블레이드 길이 방향보다는 이와 수직이 되는 방향에 센서를 조밀하게 배치하는 것이 손상 위치 표정의 정밀도를 높일 수 있을 것이다.

블레이드에 가해지는 다양한 손상 신호에 대처하기 위해 작성된 신호 맵을 비교하면 발생원의 에너지 크기에 따른 블레이드의 탄성과 감쇠효과 변화를 확인할 수 있다. Fig. 4를 참고하여 Fig. 8을 확인해 보면 x축에 비하여 y축의 감쇠가 더욱 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 재료가 변화하는 경계면을 기준으로 탄성과 감쇠가 많이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

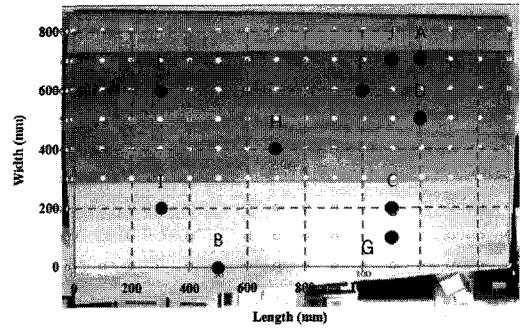
이러한 탄성과 감쇠의 불규칙성이 시간 도달차 기법을 통한 위치 표정에서 큰 오차를 발생시키는 요인이 된다.

위에서 보여진 실험을 통하여 제작된 신호 맵을 기반으로 손상 위치 표정 실험을 하였다. Fig. 9는 손상 위치 표정을 위한 임의의 탄성과 입력 위치와 탄성과 발생원의 종류를 나타낸다. 도달 시간차 기법과 동일한 방법으로 손상위치와 크기가 다른 10개(A, B, C, ..., I, J / Fig. 9 참조)의 실험을 수차례 반복 실시하였다

손상 위치 표정을 위한 시험에 사용된 발생원은 신호 맵 작성에 사용된 발생원과 신호 특성이 다른 발생원을 주로 선택하였는데, 이는 실제 블레이드의 운영 중 발생 가능한 손상의 신호 특성이 블레이드 신호 맵의 발생원 특성과 같을 확률이 매우 적기 때문이다. 그러므로 알고리즘의 기본이 되는 신호 맵이 신호 특성이 다른 손상 신호에 대해 어느 정도 정확한 위치표정이 가능한지 검증하는 것은 새로운 알고리즘의 실제 적용에 있어 매우 중요한 요건이 된다.

Table 1과 2에 위와 같은 과정을 통하여 구해진 손상 위치 표정 결과를 정리하였다. 각각의 손상신호 시물레이션의 시험위치 및 위치표정 결과는 Fig. 5에서 첫 번째 시험위치(test point)를 기준(0, 0)으로 x축과 y축의 거리를 mm 단위로 나타내었다. 또한 실험 오차(error)는 실제 손상신호 발생 위치와 측정된 위치의 거리 차를 mm 단위로 구하여 표시하였다.

도달 시간차 위치표정 기법을 이용한 시험 결과 중 fail이 발생한 경우는 PAC의 측정 소프트웨어의 위치표정기법에서 주어진 전파 속도를 입



- A / B - Spring impact
- C - D\_type equo tip impact
- D / I - Pencil break
- E - G\_type equo tip impact
- F / H - Steel bar impact
- G - Steel ball drop (200 mm)
- J - Rubber ball drop (200 mm)

Fig. 9 Input damage type and location

Table 1 Test result of time arrival difference method

Impact Source	Time arrival difference method(x, y)						Error (mm)
	v=1165 m/s		v=894 m/s		v=763 m/s		
A	Fail		Fail		900	800	316
B	Fail		Fail		Fail		Fail
C	850	150	850	250	800	250	271
D	1300	450	1100	450	1050	450	127
E	600	550	Fail	Fail	650	500	334
F	850	650	800	550	800	500	196
G	850	200	850	250	825	275	296
H	750	375	750	375	750	375	56
I	Fail		550	50	600	100	304
J	900	625	850	625	850	600	248
Total avg. > 239							

Table 2 Test result of signal mapping method

Impact Source	Test Point(x, y)		Signal mapping method (x, y)		Error (mm)
A	1200	700	1000	600	224
B	500	0	550	50	71
C	1100	200	1350	100	269
D	1200	500	1300	550	112
E	300	600	300	300	300
F	1000	600	1100	500	141
G	1100	100	900	100	200
H	700	400	700	400	0
I	300	200	300	100	100
J	1100	700	1200	700	100
Total avg. = 152					

력할 경우 결과값을 얻지 못한 경우로서, 손상 신호 이벤트는 측정하였으나 이를 기반으로 하는 위치 표정에는 실패한 경우이며 이 결과값은 실험오차의 평균값에 포함되지 않았다.

Table 1에서와 같이 시간 도달차 기법을 이용할 경우 Fig. 8에서와 같이 방향에 따라 전파 속도가 균일하지 못한 복합소재의 경우 위치 표정에 실패할 확률 및 오차율이 높아지는 것을 확인 가능하다.

실험 결과 신호 맵핑 기법을 사용한 새로운 위치표정기법의 결과가 도달 시간차 기법을 사용한 기존의 기법에 비하여 더 높은 정확도를 보여주고 있으며 10가지의 실험에서 모두 위치표정에 성공하고 있음을 알 수 있다.

10가지 탄성파의 위치 표정 시험 중에서 특별히 도달 시간차 기법을 통하여 2가지 다른 탄성파 속도에서 위치표정에 실패한 A, B 실험에 주목할 필요가 있다. Fig. 9에서 보듯이 A, B 실험의 경우 손상 발생 위치가 센서가 만드는 가상의 영역 안쪽이 아닌 바깥쪽에 발생한 손상 신호이다. 시편에 부착된 4개의 센서 위치는 Fig. 5에서 보듯이 각각 (0, 100), (0, 700), (1500, 100), (1500, 100)이며, 시편에서 실험에 사용된 총 면적은 (1500, 800)으로 y축을 기준으로 센서가 부착된 영역보다 200 mm의 측정영역이 위, 아래로 더 넓다. 이는 시편의 형상에 의해 센서를 부착하기 적합한 곳을 선택하였기 때문이다. 도달 시간차를 이용하는 기존의 기법에서는 센서가 이루는 영역 바깥 부분에서는 큰 오차를 내거나 측정이 불가능 하였으나, 신호 맵핑 기법에서는 이러한 경우에도 손상 위치의 측정이 가능하였다. 2장에서도 언급하였듯이 이러한 결과를 통하여 신호 맵핑 기법의 새로운 장점을 발견할 수 있었다. 신호 맵핑 기법에서는 센서의 부착위치를 기존의 기법과 달리 측정 영역에 제한되지 않고 매우 유연하게 결정할 수 있다. 이는 공기 역학적인 설계를 위하여 복잡한 곡선으로 설계된 풍력 블레이드에 센서를 설치할 때 큰 장점으로 작용하며 또한 풍력 블레이드 주요 손상발생 영역임에도 다수의 센서로 영역을 구성하기 힘든 리딩 엣지와 트레일링 엣지에서 발생하는 손상 또한 신호 맵핑 기법을 적용을 통하여 효율적인 위치 표정이 가능하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 이종의 복합소재로 이루어진 풍력 발전용 블레이드에서 손상 위치 표정을 위하여 음향방출 이벤트 에너지 값을 기준으로 하는 새로운 신호 맵핑 기법 알고리즘을 개발하였으며, 새로운 기법을 적용한 실내 실험을 통해 결과의 우수성을 검증하였다.

실내 실험 결과 기존의 도달 시간차 위치 표정 기법과 비교하여 훨씬 적은 위치 오차를 보일뿐만 아니라 위치 표정에 모두 성공하는 결과를 보여주어 개선된 성능을 입증하였다. 또한 신호 맵핑 기법의 새로운 장점으로 센서 부착 위치의 선정에 있어서도 기존의 기법보다 높은 유연성이 있음을 실험 결과를 통하여 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다. (2008-N-WD08-P-01-0000)

## 참고문헌

- [1] K. K. Borum, M. McGugan and P. Brøndsted, "Condition monitoring of wind turbine blades," *Proceeding of the 27th Risø International Symposium on Materials Science*, pp. 139-145 (2006)
- [2] Chia Chen Ciang, Jung-Ryul Lee and Hyung-Joon Bang, "Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods", *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, 122001 (2008)
- [3] B. F. Sørensen, E. Jørgensen, C. P. Debel, F. M. Jensen, H. M. Jensen, T. K. Jacobsen and K. M. Halling, "Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects (Phase 1) Summary Report (Risø-R Report)," *Risø National Laboratory, Denmark* (2004)
- [4] M. J. Sundaresan, M. J. Schulz and A.



- Ghoshal, "Structural health monitoring static test of a wind turbine blade," *Subcontract Report NREL/SR-500-28719, National Renewable Energy Laboratory, CO, USA* (2002)
- [5] 윤동진, 김영환, 권오양, "실린더형 용기에서의 신호전파경로 비교를 이용한 음향방출 위치표정" *비파괴검사학회지* Vol. 10, No.1, pp. 84-90 (1990)
- [6] 이영섭, 이상일, 권재화, 윤동진, "스마트 능동 레이어 센서 개발(I): 이론 및 개념 연구", *비파괴검사학회지* Vol. 24, No. 5, pp. 465-475 (2004)
- [7] A. G. Beattie, "Acoustic emission monitoring of a wind turbine blade during a fatigue test," ASME Wind Energy Symposium/AIAA Aerospace Sciences Meeting (Reno, NV, USA) p. 239 (1997)
- [8] E. R. Jørgensen, K. Borum, M. Mcgugan, C. L. Thomsen, F. M. Jensen, C. P. Debel and B. F. Sørensen, "Full scale testing of wind turbine blade to failure-flapwise loading," *Risø-R-1392(EN) Report, Risø National Laboratory, Denmark* (2004)
- [9] 이경주, 권오양, 주영찬, "웨이블릿 변환 노이즈 제거에 의한 AE 위치표정", *비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 6, pp. 490-500 (2000)
- [10] 이경주, 권오양, "비선형방정식을 이용한 이방성판의 음향방출 위치표정", *비파괴검사학회지*, Vol. 21, No. 3, pp. 281-287 (2001)
- [11] G. R. Kirikera, V. Shinde, M. J. Schulz, A. Ghoshal, M. J. Sundaresan, R. J. Allemang and J. W. Lee, "A structural neural system for real-time health monitoring of composite materials," *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, pp. 65-83 (2008)
- [12] G. R. Kirikera, V. Shinde, M. J. Schulz, A. Ghoshal, M. Sundaresan and R. Allemang, "Damage localization in composite and metallic structures using a structural neural system and simulated acoustic emissions," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, Issue 1, pp. 280-297 (2007)
- [13] F. Schubert, "Basic principles of acoustic emission tomography," *EWGAE* (2004)
- [14] M. J. Blanch and A. G. Dutton, "Acoustic emission monitoring of field tests of an operating wind turbine," *Key Engineering Materials*, Vol. 245-246, pp. 475-482 (2003)
- [15] 이종오, 원순호, 윤운하, 이종규, 소철호, "일방성 GFRP 복합재료에서 음향방출 신호의 위치표정", *비파괴검사학회지* Vol. 21, No. 3, pp. 277-280 (2001)
- [16] 김정곤, 권오양, 강용규, "이방성 적층복합재 구조에서 AE 발생원 위치표정을 위한 실용적인 방법", *비파괴검사학회지* Vol. 23, No. 3, pp. 237-245 (2003)
- [17] 김정곤, 원용구, 권오양, "펠라멘트 와인딩으로 제작된 복합재 압력용기에서 탄성과 발생원의 위치표정", *비파괴검사학회지* Vol. 23, No. 5, pp. 439-444 (2003)