

음향방출 에너지 기반 신호 맵핑 기법을 이용한 실물 풍력 블레이드 손상 검출

Source Location on Full-Scale Wind Turbine Blade Using Acoustic Emission Energy Based Signal Mapping Method

한병희***, 윤동진*†, 허용학***, 이영신**

Byeong-Hee Han***, Dong-Jin Yoon*†, Yong-Hak Huh*** and Young-Shin Lee**

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. 이 논문에서는 선행 연구를 통하여 개발된 신호 맵핑 기법을 사용하여 750 kW 블레이드에 외부 손상을 가정한 임의의 외부 충격을 가하여 위치 탐지 결과의 정확성을 확인하고, 100 kW 블레이드의 정하중 시험 시 발생하는 음향방출신호를 측정하여 손상이 발생된 것으로 의심되는 지역을 탐지하는 실험을 실시하였다. 실험 결과 발생된 모든 외부 충격신호에 대하여 낮은 오차범위를 가지는 결과를 보였으며, 정적하중실험 동안 측정된 음향방출신호와 실제 손상 발생 위치의 비교를 통하여 새로운 신호 맵핑 기법으로 블레이드에서 발생되는 내부 손상을 매우 높은 정확도로 위치 표정이 가능함을 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. In this study, the activities of AE signals generated from external artificial sources was evaluated and located by new developed signal mapping source location method and this test is conducted by 750 kW full-scale blade. And a new source location method was applied to assess the damage in the wind turbine blade during step-by-step static load test. In this static loading test, we have used a full scale blade of 100 kW in capacity. The results show that the acoustic emission activities give a good agreement with the stress distribution and damage location in the blade. Finally, the applicability of the new source location method was confirmed by comparison of the result of source location and experimental damage location.

Keywords: Acoustic Emission, Wind Turbine Blade, Damage Location, Non-Destructive Test, Static Loading Test

1. 서 론

풍력 블레이드는 높은 발전 용량을 가지기 위해서는 대형화가 필수로 요구된다. 750 kW의 경

우 블레이드 길이는 약 25 m이며 2~3 MW의 경우 약 45 m로 늘어나게 된다. 블레이드가 대형화됨에 따라 건전성 모니터링의 필요성이 함께 대두되고 있다[1,2]. 대형화에 따른 무게 증가를 효

[접수일: 2013. 9. 12, 수정일: 2013. 10. 24, 게재확정일: 2013. 10. 24] *한국표준과학연구원 안전측정센터, **충남대학교 기계설계공학과, ***한국표준과학연구원 에너지소재표준센터, †Corresponding Author: Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea (E-mail: djyoon@kriss.re.kr)

과적으로 감소하기 위해 풍력 블레이드에는 유리섬유강화플라스틱(glass fiber reinforced plastic, 이하 GFRP)/PVC/발사우드가 혼용되어 사용된다.

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]. 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.

음향방출을 이용한 손상 위치 표정은 주로 압력용기를 중심으로 실제 현장에 적용되고 있으며, 기존의 시간 도달차 측정법을 개선하여 복합소재에서 위치표정을 실시하는 연구도 진행되고 있다. 웨이블릿 변환 기법을 이용한 디노이징 신호처리 기법을 적용하여 위치표정 오차를 줄이는 연구가 수행되었다[5,6].

압전센서의 structural neural system 알고리즘을 사용하여 직렬로 연결된 센서의 배열 및 신호처리를 통한 복합재 구조물에서의 손상 위치 추적에 관한 연구[7,8] 및 음향 토모그래피를 응용한 기술로 복합재에 존재하는 손상의 위치를 추적하는 연구[9]는 센서 네트워크를 구축하여 기존의 기법을 개선하기 위한 연구다.

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 사용할 센서의 주파수 대역 및 센서 개수의 선정에도 주의가 기울여야 한다.

이러한 어려움을 극복하기 위하여 다수의 pinducer를 array로 만든 뒤 하나의 센서로 묶어 센서 내부의 pinducer에 도달하는 신호 순서를 이용하여 발생원 방향을 탐지하는 방법으로 이 다발형 탐촉자 센서를 다수 사용하여 일방성 GFPR 복합재료에서 손상 발생 위치를 평가하는 연구 [10] 및 측정 영역을 유한요소법과 같이 메쉬로 나누어 일방성 재료의 속도차를 고려한 위치표정 연구[11,12]가 있으나 비교적 작은 범위에서 위치 표정에 성공하였거나 이중복합재에 기법의 적용이 검토되지 않았다. 또한 음향방출 토모그래피를 이용한 사례[9]가 있으나 기법 검증용을 위한 실험에서 사용된 시편이 매우 작음에도 불구하고 수십개의 센서를 부착하여 손상 위치를 결정하는 한계가 있었다. 이에 본 연구의 선행 연구[13]에서는 새롭게 에너지 기반 신호 맵핑 기법(energy based signal mapping method)을 개발하고 검증을 위해 1500 × 800 mm의 크기를 가지는 실내 시편을 사용하여 기존의 음향방출 위치표정 기법인 도달 시간차 기법과 신호 맵핑 기법의 손상 신호 위치 표정 결과를 비교하여 새롭게 개발된 신호 맵핑 기법의 높은 측정 성능 및 낮은 오차율을 확인하였다.

본 연구에서는 새롭게 개발된 신호 맵핑 기법을 실물 블레이드 적용하여 성능을 평가하는 실험을 실시하였다. 개발된 신호 맵핑 기법을 사용하여 750 kW 실물 블레이드에 외부 손상을 가정한 임의의 외부 충격을 가하여 위치 탐지 결과의 정확성을 확인하였으며, 100 kW 실물 블레이드의 정하중 실험 시 발생하는 음향방출 신호를 측정하여 실제 손상이 발생된 지역을 탐지하는 실험을 실시하였다. 즉, 본 연구를 통하여 블레이드 내부 및 외부에 발생하는 손상 신호를 표정하는데 새롭게 개발된 기법이 적용 가능한 지 평가하였다.

2. 신호 맵핑 기법을 이용한 손상 위치 표정

탄성파의 도달 시간에 의존하는 기존 음향방출 위치표정 기술은 방향에 따라 전파 속도가 다른 이중의 복합재료로 구성된 풍력 블레이드에서 손상 위치의 정확한 측정이 불가능하다. 또한 20 mm 이상의 두꺼운 모재를 사용하는 풍력 블레이드의 환경과 고주파 신호의 감쇠가 심한 복

합재의 특성으로 인해 60 kHz 이상의 주파수 대역을 가지는 음향방출 센서를 사용 시 측정 가능한 범위가 매우 좁아지는 어려움이 있다.

이러한 특성을 고려하여 손상에 의해 발생된 음향방출 신호 이벤트의 에너지를 위치표정을 위한 특성 값으로 사용하였으며 신호 맵핑 기반의 알고리즘을 적용하여 손상 위치표정이 가능한 새로운 기법을 개발하였다[13].

새롭게 개발된 신호 맵핑 기반의 손상위치 표정 기법은 손상 모니터링 관심 영역에 Fig. 1과 같이 일정 간격의 실험위치를 선정하여 각 실험 위치에서 특정 소스를 사용하여 탄성과 신호를 발생시켜 음향방출 센서로 측정 후, 측정된 음향방출 신호 이벤트의 에너지 값을 위치 정보로 저장하는 하는 신호 맵을 구성하여 손상 위치를 표정하게 된다.

측정실험을 통하여 모든 실험 위치를 대표하는 에너지 값이 결정되면 각 실험 위치의 x, y 좌표가 행과 열의 값이 되는 행렬 형태로 저장한다. 실험 위치 (x, y) 는 행열의 (m, n) 값이 되어 (x, y) 의 에너지 값이 (m, n) 의 값이 된다. 완성된 행렬은 Fig. 2와 같이 생성되며 손상 위치 추적 알고리즘의 기본 신호 맵으로 활용된다. 신호 맵은 부착된 센서의 수만큼 생성된다. 신호 맵핑 과정을 통하여 제작된 맵핑 데이터는 센서의 개수 및 필요에 따라 입력 신호의 크기에 따라 복수의 맵을 생성하여 측정 장비에 저장되며, 손상 위치 표정 알고리즘을 수행하기 위해 사용된다.

외부 또는 내부에서 발생하는 unknown 신호에 의한 탄성파가 발생되었을 때 측정된 신호는 신호 맵의 에너지 값을 구하였을 때와 같은 신호처리 과정으로 에너지 값으로 변환된다. 신호 맵에서 손상 에너지 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 그룹별로 중첩하여 각각의 센서에서 선정된 후보지역에서 모두 중첩된 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 에너지 값에 오차 범위를 주어 손상 발생 가능 범위를 확장하며 손상을 찾는 알고리즘을

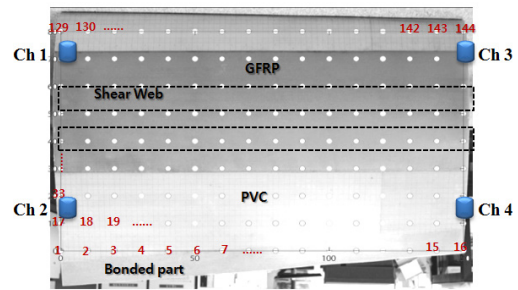


Fig. 1 Blade specimen with pre-determined test point

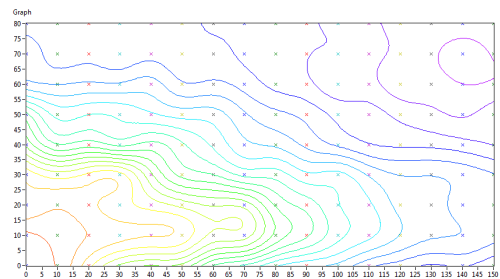


Fig. 2 Signal map of Fig. 1, Sensor 2

사용하기 때문에 위치 표정에 실패하지 않게 되는 장점을 가진다.

3. Full-Scale 블레이드 적용 실험

본 연구의 신호 맵핑 기법을 위한 맵 데이터는 발생 에너지 크기가 다른 C/D/G 형의 equo-tip 시험기를 사용하여 측정 하였다.

Equo-tip 시험기는 구조물의 표면에 접촉시켜 시험기 내부의 Indentor로 충격 에너지(E_{Impact})를 발생시키는 시험기로서 신호 맵 작성을 위하여 다수의 입력 지점에 같은 에너지를 반복적으로 발생시켜야 하는 본 기법에 사용하기 알맞다.

시험기 제조사(Proceq SA)에서 제공하는 시험기 성능지표에 의하면 C형 3 mJ, D형 11 mJ 및 G형이 90 mJ의 충격 에너지를 발생시킨다.

3.1. 750 kW 블레이드 외부 충격 실험

정적 상태에서 외부충격에 의한 손상 위치를 탐지하는 750 kW 블레이드 실험은 대형 블레이드에서 신호 맵핑 기법의 적용 가능성을 확인하기 위한 실험으로 실내 실험보다 넓은 영역에서 오차 범위를 확인하기 위해 실시되었다.

Fig. 3에 실험에 사용된 실물 블레이드가 나타나 있다. 이 블레이드는 25 m 길이의 750 kW 블레이드로서 GFRP로 제작되었다.

신호 맵핑 기법의 적용을 위하여 실물 블레이드의 외부에 30 kHz 대역(R_1) 및 60 kHz 대역(R_2)의 공진형 음향방출 센서를 설치하여 신호 맵 및 외부 충격 신호를 측정하였다.

맵 데이터를 측정할 영역은 Fig. 4와 같이 블레이드의 루트에서 약 5,000 mm 떨어진 영역으로 블레이드의 형상이 원형에서 공기역학적인 타원형으로 급격히 변하는 부위이다. 측정영역의 크기는 가로 2,000 mm, 세로 1,700 mm 이다. 신호 맵핑 기법의 특성에 의해 센서의 위치는 특별히 제약받지 않지만 실내 실험에서 가장 측정 효율이 좋았던 센서 배열인 정방형 배열을 선택하여 측정 영역 외곽에 4개의 센서를 배치하였다.

임의 충격 신호는 맵을 측정하기 위해 사용했던 equo-tip 실험기를 사용하였으며 10군데의 임의 손상 위치별로 5회의 반복 실험을 통하여 평

균 오차를 구하였다.

3.2. 100 kW 블레이드 정하중 실험

본 실험은 11 m 길이의 100 kW 실물 블레이드에 Fig. 6와 같이 whiffletree 구조물을 부착하여 수직 방향으로 하중을 입력하는 정하중 시험으로, 새롭게 개발된 기법을 적용하여 실제 하중이 가해진 상태에서 손상 발생 시 위치평가 기법에 의해 측정된 손상 발생 위치와 실제 블레이드에서 발생한 손상 위치를 비교 평가하여 개발된 기법이 실제 블레이드에서 발생하는 손상 위치 표정에 적합한지 알아보았다.

본 연구를 진행하기 위하여 실내 및 실외 실험에서 높은 신호 측정률을 보여준 60 kHz 대역 공진형 음향방출 센서를 제작과정에서 블레이드 내부에 부착하여 시스템을 구성하였다.

내부에 센서가 부착된 블레이드는 실제 풍하중 상태에서의 블레이드 움직임을 구현 가능한 하중 실험기에 부착하여 실험을 진행하였다. 본 연구를 위하여 제작된 풍력 블레이드는 100 kW급 풍력 발전 블레이드로 길이가 약 11,000 mm, 루트부의 직경이 560 mm이다. 블레이드 전단 웹은 단일 빔으로 되어있고 블레이드 재질은 GFRP 및 발사우드를 혼용한 복합재로 제작하였다. 신호 맵핑 기법 적용을 위한 음향방출 센서는 Fig. 5와 같이 정방형을 유지하면서 최대한 블레이드 edge 접합부에 가깝게 부착하였다. 센서의 위치는 블레이드 루트 끝부분에서 500 mm 떨어진 곳에서 시작하여 leading Edge 및 trailing edge에 각 1개씩 2,000 mm 간격으로 배치하였다.

센서의 부착은 블레이드 내부 스킨의 표면에 블레이드 제작 시 사용되는 에폭시를 사용하여 부착하였으며 감도 향상을 위하여 에폭시가 고착되기 까지 24시간동안 압축 고정 상태를 유지하였다.

음향방출 센서를 부착한 블레이드는 풍하중 거동을 재현하기 위해 제작된 하중 실험기에 부착되어 정하중 실험을 실시하였다. 블레이드 전체에 일정하게 하중을 입력하기 위해 whiffletree를 블레이드에 부착하였으며 와이어 윈치와 유압 피스톤을 사용하여 블레이드에 하중을 입력하였다.

Fig. 6은 하중 실험기에 부착되어 하중에 의해 팁 처짐이 발생된 상태의 100 kW 실물 블레이드 모습이다.

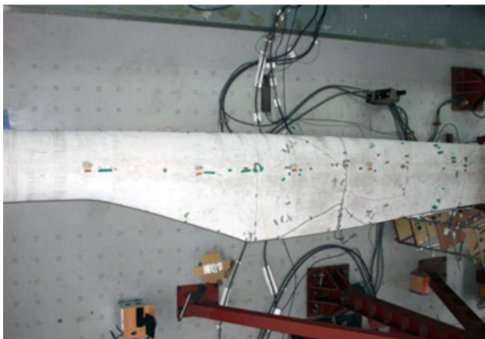
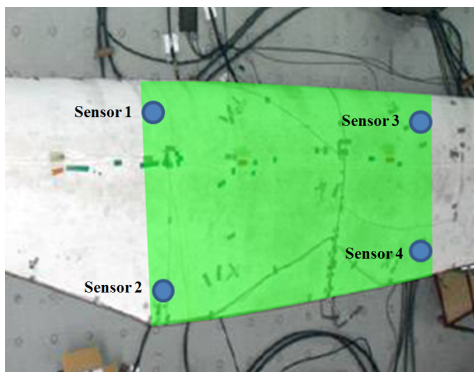


Fig. 3 750 kW wind turbine blade



● : Sensor ■ : Mapping Area

Fig. 4 Sensor location and mapping area on 750 kW Blade

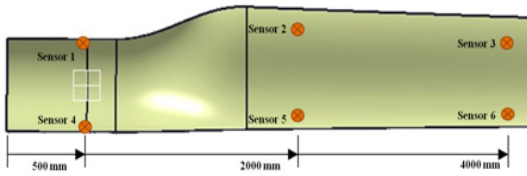


Fig. 5 Sensor attached location on 100 kW wind turbine blade inside

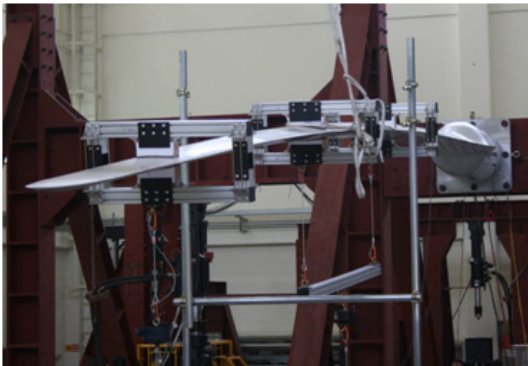


Fig. 6 Static loading test of 100 kW wind turbine blade

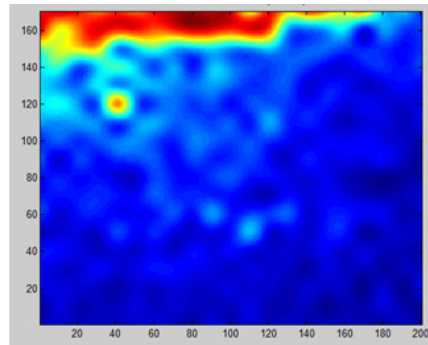
4. 결과 및 고찰

4.1. 750 kW 블레이드 임의 신호 위치 표정

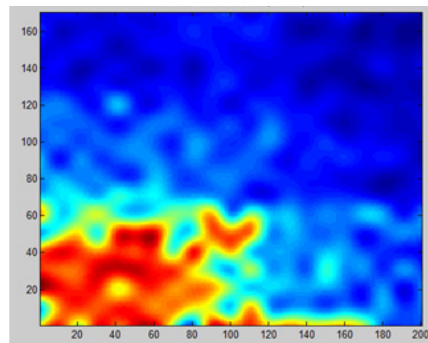
본 실험은 선행 연구에 의해 개발된 신호 맵핑 기법의 실물 블레이드에서의 적용 가능성 및 실제 손상 발생시 위치표정 성능을 평가하기 위한 추가 연구로서, 2개의 실물 풍력 블레이드의 신호 맵을 구성한 뒤 신호 맵핑 기법을 적용하여 각각 정적 상태에서 외부 충격이 발생 시 충격 위치의 표정 및 정하중 상태에서 블레이드 내부에서 발생하는 균열 및 디본딩 등의 내부 손상의 측정 및 위치표정을 실시하였다.

Fig. 7에 R₁에서 측정된 각 센서에 대한 신호 맵을 나타내었다. 실험에 사용된 블레이드는 다수의 정하중 및 동하중 실험에 의해 내부 및 외부에 다수의 손상이 발생된 상태로써, 이러한 손상의 영향으로 신호 맵이 매우 불규칙하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

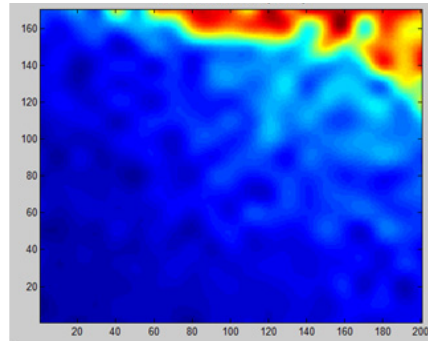
Table 1에 외부 충격에 의한 임의 손상 위치 표정 결과를 나타 내었다. 위치 표정 결과는 실제 손상위치와 신호 맵핑 기법에 의해 측정된 위



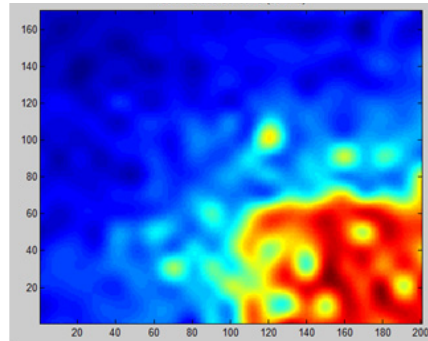
(a) Sensor 1



(b) Sensor 2



(c) Sensor 3



(d) sensor 4

Fig. 7 Signal map measured on blade of Fig. 1

치와의 거리(mm)를 오차로 나타내었으며, 사용된 센서 및 신호 맵을 제작한 입력 소스의 에너지 크기에 따른 측정 오차의 변화를 알기 위하여 R_1 , R_2 센서와 각기 다른 3개의 충격에너지 (E_{Impact})를 가지는 시험기에 의해 측정된 에너지 맵 데이터별로 오차를 모두 표시하였다.

측정 결과 R_1 센서에서는 신호 맵의 에너지 값이 클수록 오차가 작아지는 결과가 나타났으며, R_2 센서를 사용한 위치표정 결과에서는 D형 신호 맵에서 가장 좋은 결과를 보여주었다. 두 실험에 의해 구해진 위치표정 오차에 약간의 차이는 발생하였지만 전체적으로 신호 맵을 제작한 입력소스의 E_{Impact} 가 클수록 오차 범위가 낮아지는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 3 mJ 에너지 맵에서 가장 나쁜 결과를 나타낸 것은, 본 실험에서 사용된 750 kW 실물 블레이드의 측정 영역의 블레이드 스킨 두께가 약 50 mm 이상의 두꺼운 복합소재로 구성되어 있기에, 탄성파의 감쇠가 매우 심하게 발생하고 있어 측정 영역의 신호 맵의 변별력을 가지기에는 입력 소스의 에너지 크기가 너무 작기 때문으로 판단된다.

본 실험에 사용된 신호 맵핑 기법은 측정된 에너지 값에 허용 오차 범위를 확대하면서 손상 위치를 표정하는 알고리즘을 사용한다. 이러한 기법은 발생 가능한 손상 신호에 대한 모든 맵 데이터를 확보하지 못하는 맵핑 기법의 단점을 보완하는 역할을 한다.

Table 1 Result of damage location

Artificial Source Points (mm)		Location Error (mm)					
		Sensor R_1			Sensor R_2		
x	y	3 mJ	11 mJ	90 mJ	3 mJ	11 mJ	90 mJ
400	1250	187	53	9	92	63	76
600	500	113	192	148	345	99	115
700	300	193	196	116	153	57	78
1000	550	93	155	69	159	105	21
1200	200	188	110	68	473	144	342
1200	950	73	67	33	232	49	80
1700	650	211	192	272	47	158	164
1800	1350	127	104	84	155	67	159
1200	1450	102	116	68	50	55	64
950	1650	197	188	129	145	143	71
Avg.		148	137	99	185	94	117

또한, 측정 효율성을 위해 측정 포인트 이외의 영역은 보간법을 사용하여 데이터를 확보하는 본 기법의 특성을 보완하여 결과적으로 모든 손상 신호에 대하여 위치 표정이 가능하도록 해주며, 위치 표정 완료시에 허용오차 값을 이용하여 측정된 손상 위치에 대한 신뢰도를 평가 할 수 있는 장점이 있다.

이러한 기법의 특성에 의해 얻어지는 장점으로 인하여 실제 구조물에서 손상위치 탐지에는 알고리즘에 의해 얻어지는 허용오차 값을 사용하여 각 맵에서 가장 높은 신뢰도를 보여주는 위치표정 결과를 최종 결과 값으로 선택하기 때문에 실제 평균 오차율은 Table 1에 나타난 평균 오차 범위 보다 더욱 낮아질 것이다.

4.2. 100 kW 블레이드 정하중 실험

새롭게 개발된 신호 맵핑 기법의 성능을 실내 실험을 통하여 확인한 결과 기존 기법과 비교하여 손상 신호 측정 시 신호 손실이 없고, 낮은 오차 범위를 보여줌을 선행 연구에서 확인 하였으며 본 연구의 750 kW 실험을 통하여 실물 블레이드와 같은 넓은 범위에서도 적용 가능함을 확인하였다. 하지만 기법의 검증에 위하여 실시한 실내외 실험의 경우 실제 손상을 모사하기 위하여 외부에서 임의신호를 가진 하였기 때문에 실제 블레이드에서 발생하는 손상과는 차이가 있을 가능성이 있다. 이를 검증하기 위하여 100 kW 실물 블레이드를 제작하여 정하중 실험을 실시하고, 하중 실험 상태에서 블레이드 손상을 모니터링 하는 실험을 실시하였다.

데이터베이스 기반 손상 위치 표정을 위하여 블레이드를 하중 실험기에 설치하기 직전 데이터베이스를 작성하였다. 데이터베이스는 750 kW 실외 실험에서 탄성파 발생원으로 사용하였던 equo-tip 실험기를 사용하였다. Fig. 8에 11 mJ의 에너지 발생시 얻어진 신호 맵 데이터베이스를 나타내었다.

Fig. 9에 정하중 실험 중의 블레이드 팁의 변위 그리고 측정된 음향방출 hits의 누적수를 표시하였다. 실험 하중은 설계 한계 하중을 기준으로 최대 90%의 하중을 유압 피스톤 및 와이어 린치를 사용하여 블레이드에 설치된 whiffletree를 통하여 블레이드에 하중을 입력하였다.

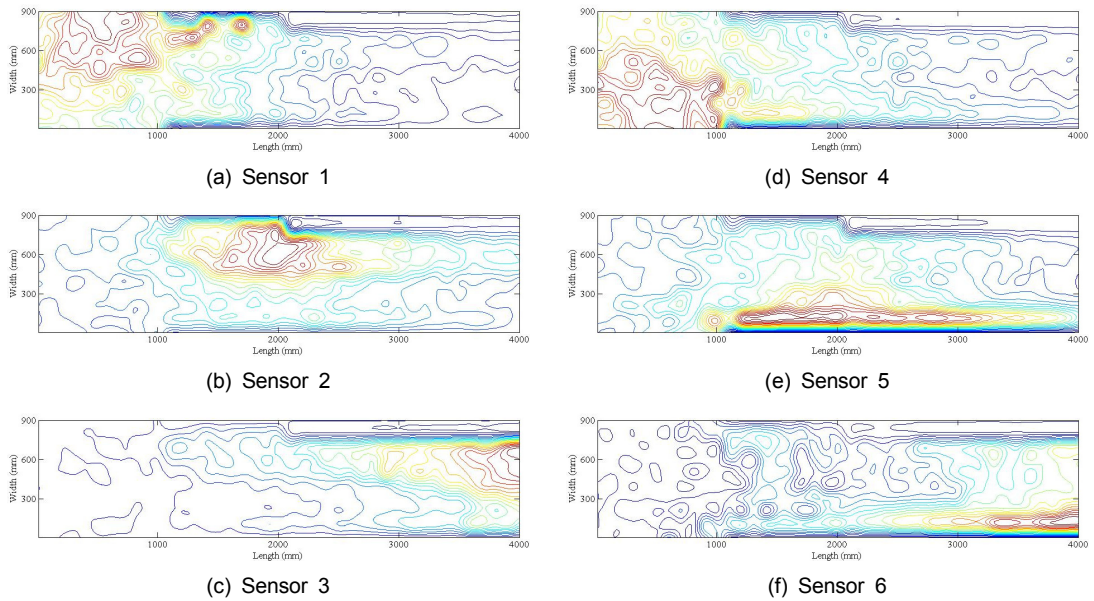


Fig. 8 Signal mapping D/B of 100 kW wind turbine blade

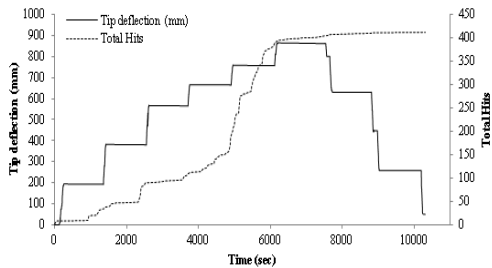


Fig. 9 blade tip deflection and accumulated AE event graph of static test

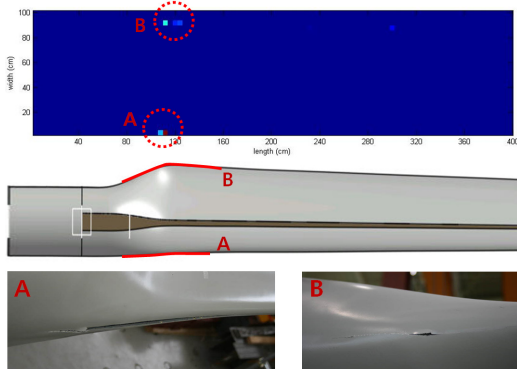


Fig. 10 Results of source location by signal mapping method and features of damaged area

무하중에서 최대 90%로 변화하는 단계 하중으로 하중을 부하하고 각 단계에서는 최장 20분 동안 하중입력을 정지하여 각 단계별 하중에서 블레이드에서 발생하는 음향방출 거동을 살펴보았다.

Fig. 9의 음향방출 신호 발생 경향을 통하여 하중이 60 % 가해진 이후부터 손상이 발생되었으며 누적 hits 수가 70 % 이후 급격하게 증가하는 것을 통하여 60 %에서 발생한 손상이 크게 진전되고 있음을 알 수 있다.

신호 맵핑 기법을 사용하여 측정된 손상 위치 표정 결과가 Fig. 10에 표시되었다.

Fig. 10을 통하여 루트로부터 1,000 mm 떨어진 leading/trailing edge 접합부 A와 B에 손상이 집중적으로 발생된 것으로 측정된 것을 알 수 있다. Fig. 10은 신호 맵핑 기법을 운영하기 위해 자체 개발된 프로그램에 의해 생성된 결과로서 손상 위치를 한눈에 파악할 순 있지만 이 그림만으로는 손상신호의 발생 빈도를 정확히 알 수 없다. 그러므로 Fig. 10에 나타난 손상측정 위치를 Fig. 11과 같이 손상 위치는 물론 손상 신호의 발생 빈도수 또한 알기 쉽도록 다시 나타내었다. Fig. 11의 손상 위치 표정 결과에 있어 루트 부위에 블레이드 형상 외각에 발생한 손상 위치는 3차원 구조물을 2차원 평면에 표시하여 나타난 현상으로 실제 손상 발생 위치는 상하부 스킨의 접합부

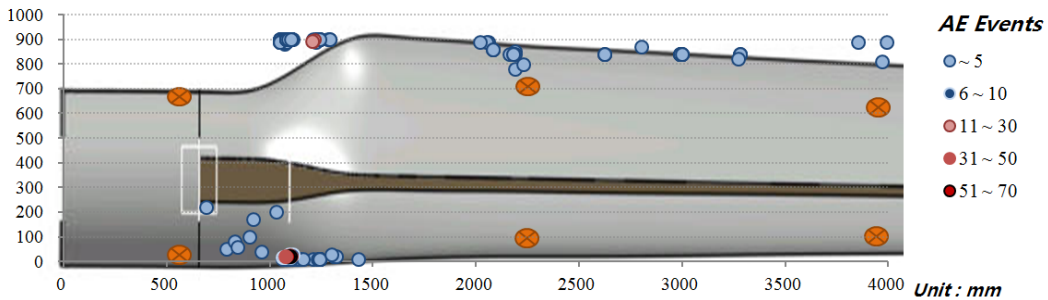


Fig. 11 Results of source location

인 루트 옆 부위이며, 이는 2차원 평면에서는 보이지 않는 블레이드의 옆 부분이다.

2,000 mm 이후의 trailing edge 부위에 산발적으로 나타난 손상신호를 제외하면 Fig. 10과 같이 1,000 mm 부위에 집중적으로 손상이 발생했음을 확인 가능하다. Trailing Edge의 2,000 ~ 4,000 mm 부분에서 산발적으로 발생되고 있는 손상 신호들은 신호의 크기 및 빈도수가 낮아 Fig. 10에서 확인이 불가능한 신호들이었다. 이 신호들은 또한 실물 블레이드에서도 육안으로는 확인이 불가능했으며, 그러므로 접합부등에서의 미세한 변형 발생원등으로 추정된다. 통상 위치 표정 결과에서 이런 산발적이며 집중성이 낮은 결과는 무시해도 무방하다.

신호 맵핑 기법에 의한 위치 표정 결과인 Fig. 10과 11에서 확인 가능한 집중적인 손상 발생 위치 A와 B는 Fig. 10의 실물 블레이드 사진에서와 같이 하중 실험이 마무리 된 후 육안으로 살펴본 실제 손상 부위와 정확하게 일치하는 결과를 나타내었다.

5. 결론

본 연구는 25 m 길이의 750 kW 및 내부에 센서가 내장된 11 m 길이의 100 kW 실물 블레이드에 선행 연구를 통하여 개발된 음향방출 위치 표정 기법인 에너지 기반 신호 맵핑 기법을 적용하여 외부 및 내부에서 발생한 손상 신호의 위치 표정을 실시하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 750 kW 블레이드에서 실시한 임의의 손상을 가정한 외부 충격신호 탐지 실험을 통하여 실물 블레이드의 넓은 범위에서 블레이드에

가해진 외부 충격 신호를 낮은 오차범위로 모두 탐지 가능함을 확인하였다.

- 2) AE 센서가 내부에 부착된 100 kW 실물 블레이드의 정적 하중 실험을 통하여 외부 하중으로 인하여 발생된 블레이드의 파손 위치를 신호 맵핑 기반 손상위치 추적 알고리즘으로 추적 가능함을 확인하였다. 또한 하중 실험 중의 하중 변화와 음향방출 신호 발생 경향을 통하여 블레이드 내부에 손상이 발생하기 시작하는 초기 단계의 손상 위치도 새롭게 개발된 신호 맵핑 기법 알고리즘을 통하여 찾아낼 수 있음을 확인하였다.

선행연구를 통하여 실내 시편 환경에서의 신호 맵핑 기법에 의한 위치 표정 결과가 높은 신뢰성을 가지는 것을 확인하였으며, 본 연구를 통하여 실물 풍력 블레이드에서도 외부 충격 신호뿐만 아니라 내부에서 발생하는 손상까지 높은 정확도로 위치 표정이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다. (2010-N-WD09-P01, 2008-N-WD08-P-01)

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] C. C. Ciang, J.-R. Lee and H.-J. 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] K.-J. Lee, O.-Y. Kwon, Y.-C. Joo, "An Improved AE Source Location by Wavelet Transform De-noising Technique", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 20, No. 6, pp. 490-500 (2000)
- [6] K.-J. Lee, O.-Y. Kwon, "AE Source Location in Anisotropic Plates by Using Nonlinear Analysis," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 21, No. 3, pp. 281-287 (2001)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] F. Schubert, "Basic principles of acoustic emission tomography," *EWGAE* (2004)
- [10] J.-O. Lee, S.-H. Won, W.-H. Yoon, J.-K. Lee and C.-H. So, "AE Source Location of Unidirectional GFRP," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 21, No. 3, pp. 277-280 (2001)
- [11] J.-K. Kim, O.-Y. Kwon and Y.-K. Kang, "A Practical Method of Acoustic Emission Source Location in Anisotropic Composite Laminates," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 3, pp. 237-245 (2003)
- [12] J.-K. Kim, O.-Y. Kwon and Y. G. Won, "Acoustic Emission Source Location in Filament Wound CFRP Pressure Vessel," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 5, pp. 439-444 (2003)
- [13] B.-H. Han and D.-J. Yoon, "Damage Detection Method of Wind Turbine Blade Using Acoustic Emission Signal Mapping," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 1, pp. 68-76 (2011)