

## 음향방출(AE)을 이용한 풍력 블레이드의 피로손상 평가

### Evaluation of Fatigue Damage for Wind Turbine Blades Using Acoustic Emission

지현섭\*†, 주노회\*, 소철호\*\*, 이종규\*\*\*

Hyun-Sup Jee\*†, No-Hoe Ju\*, Cheal Ho So\*\* and Jong-Kyu Lee\*\*\*

**초 록** 본 연구에서는 풍력 블레이드의 피로손상으로 발생하는 음향방출신호의 특성을 살펴보기 위하여 길이 48 m의 풍력 블레이드 flap fatigue test를 100만 회까지 실시하였다. 60만 회까지는 hit수와 total energy가 꾸준히 증가하는 것으로 보아 블레이드의 손상이 지속되는 것으로 보이며, 주 손상기구는 rise time의 분석 결과 기지균열의 생성과 성장으로 판단되었다. 또한 채널별 신호 분석을 통해 가장 손상을 많이 받은 부위가 체결부 20 m 지점의 skin과 spar의 접합 부위로 추정하였고 실제 손상 부위는 육안검사를 통해서도 확인되었다. Event source location 결과는 각 채널의 total energy 변화와 관련이 있었으며, 이러한 결과가 반영됨으로써 풍력 블레이드의 최적 설계에 유용할 것으로 판단된다.

**주요용어:** 음향방출, 풍력 블레이드, 피로시험, 손상평가

**Abstract** In this study, the flap fatigue test of a 48 m long wind turbine blade was performed for 1 million cycles to evaluate the characteristics of acoustic emission signals generated from fatigue damage of the wind blades. As the number of hits and total energy continued to increase during the first 0.6 million cycles, blade damage was constant. The rise-time result showed that the major aspects of damage were initiation and propagation of matrix cracks. In addition, the signal analysis of each channel showed that the most seriously damaged sections were the joint between the skin and spar, 20 m from the connection, and the spot of actual damage was observable by visual inspection. It turned out that the event source location was related to the change in each channel's total energy. It is expected that these findings will be useful for the optimal design of wind turbine blades.

**Keywords:** Acoustic Emission, Wind Turbine Blade, Fatigue Test, Damage Evaluation

#### 1. 서 론

화석연료의 감소와 친환경 에너지원에 대한 요구로 무한 에너지원인 풍력이 대체에너지로서 각광받고 있으며, 중국, 미국, 독일 등 많은 국가에서 증가 추세에 있다. 국내에서도 정부의 적극적 투자로 풍력발전은 향후 지속적인 성장이 예상된다. 풍력 블레이드는 풍력발전에서 중요한 구성 요소 중의 하나로서 바람의 저항을 적게 받는 이상적인 설계를 통하여 장시간 사용함으로써 발전효율을 높이고자 하는 것은 설계 및 제작자뿐

만 아니라 사용자의 요구사항이기도 하다. 일반적으로 풍력 블레이드는 복합재료로 제작되는데 그 손상기구는 일반적인 복합재료에서 발생하는 손상기구인 기지균열 및 성장, 유리섬유의 파손, 박리 등을 포함하며, 특히 skin과 spar의 결합부의 균열이 주 손상의 원인으로 알려져 있다[1].

비파괴적인 손상 검출 방법은 초음파탐상시험, tap test, 열화상 방법 및 음향방출시험이 개발되고 있으며 특히 사용중의 검사 방법으로 음향방출시험이 연구되고 있다[2,3]. 본 연구에서는 풍력 블레이드의 피로손상으로 발생하는 음향방출

[Received: March 17, 2015, Revised: May 13, 2015 / June 9, 2015, Accepted: June 9, 2015] \*재료연구소 원자력공인검사단, \*\*동신대학교, \*\*\*부경대학교 물리학과, †Corresponding Author: Korea Institute of Materials Science, Changwon 641-831, Korea (E-mail: jeehs@kims.re.kr)

신호를 분석하여 그 손상을 평가하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 시험 Blade

본 연구에 사용된 풍력 블레이드는 용량이 3 MW 급이며 길이가 48 m인 D중공업에서 제작한 것으로 그 형상은 Fig. 1에 보여주고 있다.

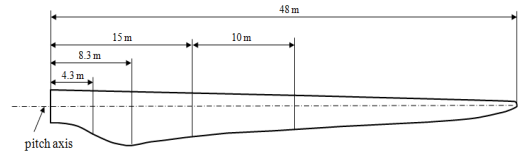


Fig. 1 The shape of wind turbine blade

### 2.2. 실험방법

피로시험은 블레이드를 수직방향 상하로 움직이는 flap fatigue test로 진행되었으며 피로 주파수는 0.5 Hz이고 100만 회까지 전복 부안에 위치하고 있는 재료연구소 풍력기술센터에서 실시하였다.

Fig. 2는 피로시험시 음향방출시험을 위한 시험장치 및 탐촉자의 부착 위치를 도식적으로 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 탐촉자는 블레이드의 상부 skin에 부착되었으며, 구조해석을 통해 결함 발생의 가능성이 높을 것으로 판단되어진 블레이드의 체결부 끝단으로부터 15 m에서 25 m 사이를 매 1 m 간격으로 블레이드 축방향으로 11개를 부착하였고, 블레이드 끝단(edge)에도 11개를 부착하였다.

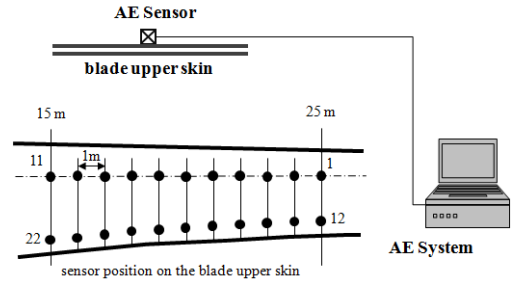


Fig. 2 The block diagram of experimental setup

탐촉자는 신호의 전달 효율을 높이기 위해 접촉매질로 진공 그리스(grease)를 사용하여 지그와 마그네틱 홀더로 부착하였다.

시험에 사용된 탐촉자는 기지(matrix) 파괴시에 발생하는 음향방출신호에 대한 민감도를 높이기 위하여 중심주파수 150 kHz의 공진형 R15I(PAC)를 사용하였고, 동축케이블은 20 m 길이의 RG58A/U를 사용하였다. 음향방출시험의 신호 문턱값은 주위 잡음을 고려하여 30 dB로 설정하였다.

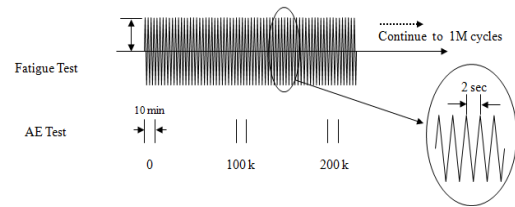


Fig. 3 Schematic diagram for fatigue test and data acquisition time of AE test

탐촉자의 감도는 의사음향 방출원으로 직경 0.5 mm의 2H 연필심을 파손하였을 때 탐촉자 1인치 이내에서 평균 98 dB 였다.

피로시험동안 음향방출시험은 피로시험 초기 및 매 10만 회 간격으로 각 10분 동안 총 11회 실시되었다.

Fig. 3은 피로시험과 음향방출시험의 데이터 수집 시기를 도식적으로 보여주고 있으며 Fig. 4는 시험을 위해 블레이드에 부착된 탐촉자를 보여 주고 있다.



Fig. 4 Mounted sensors on the upper skin of blade

## 3. 결과 및 토의

음향방출시험 데이터는 각 피로 주기에서 10분간 수집되었지만 실제 분석은 모든 주기에서 각각 1분간의 데이터를 분석하였다. 12번 채널에서 22번 채널까지는 10개 미만의 hit가 발생되어 분석에서 제외하고 1번에서 11번 채널의 데이터를 분석하였다.

3.1. 모든 채널에 대한 활성화도 변화

Fig. 5는 피로 주기 동안 hit 수의 변화를 보여주는 것으로 점차적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 60만 회 이상에서는 증가 추세가 둔화되어 거의 일정한 hit 수를 보이고 있다. 이는 60만 회까지는 손상이 꾸준히 지속되다가 60만 회 이후는 급격한 손상의 발생은 없는 것처럼 보인다.

Fig. 6은 피로 주기 동안 평균 count 수의 변화를 보여주는 것으로 20만 회에서 크게 증가하였다가 이후 감소하고 60만 회에서 다시 약간 증가하여 거의 일정한 값을 갖는다. 이 결과를 Fig. 7의 duration과 Fig. 8의 rise time을 고려하여 볼 때 20만 회에서 블레이드 내에 기지균열의 생성이 시작되는 것으로 보인다.

Fig. 7은 피로 주기 동안 평균 duration의 변화를 보여주는 것으로 20만 회까지 증가하였다가

이후 약간 감소하여 거의 일정한 값을 갖는다.

Fig. 8은 피로 주기 동안 평균 rise time의 변화를 보여주는 것으로 10만 회에서 크게 증가하였다가 이후 30만 회까지 점차 작아지고 이후 60만 회에서 다시 약간 증가하고 이후 감소하여 거의 일정하게 유지 된다. 이는 기지손상에서 보고된 균열의 생성 및 성장과 rise time의 상관관계를 잘 나타내는 결과라고 할 수 있다[4,5].

특히 풍력 블레이드의 경우는 주 손상기구가 기지균열이라고 볼 수 있으며, 초기에 긴 rise time을 갖는 신호가 발생하는 것으로 보아 기지균열의 생성으로 볼 수 있고, 이후 rise time이 짧아지는 것은 생성 균열의 성장 신호로 볼 수 있다. 또한 60만 회에서 rise time의 증가는 이 피로 주기 전후로 하여 새로운 영역에서 기지균열 생성이 증가하였다고 볼 수 있다.

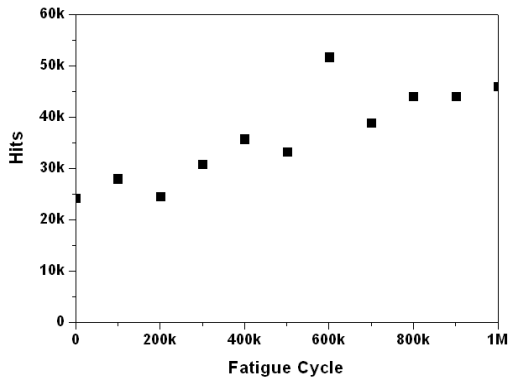


Fig. 5 Hits for all channel with cycle

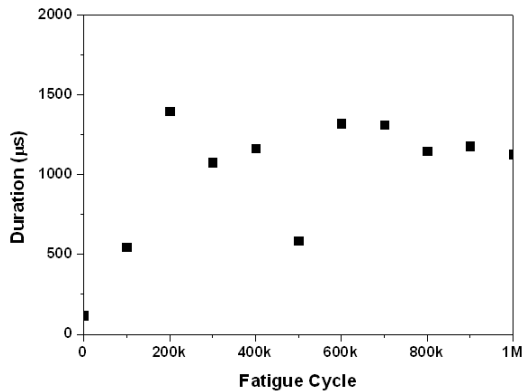


Fig. 7 Average duration for all channel with cycle

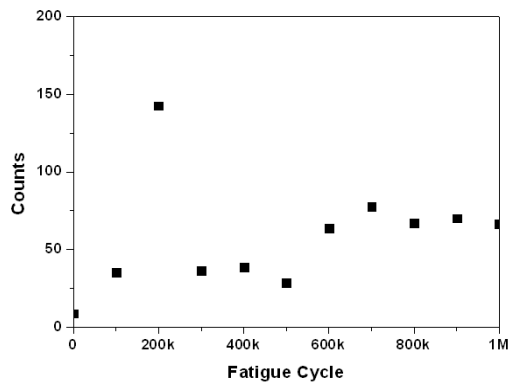


Fig. 6 Average counts for all channel with cycle

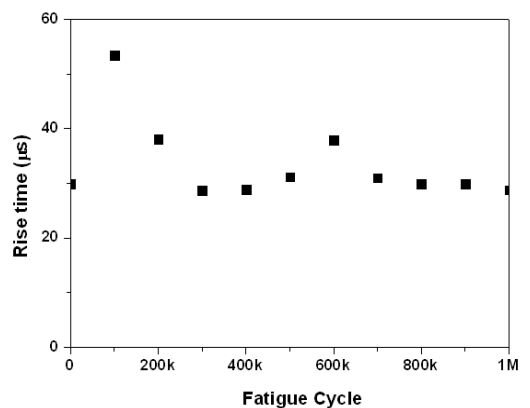


Fig. 8 Average rise time for all channel with cycle

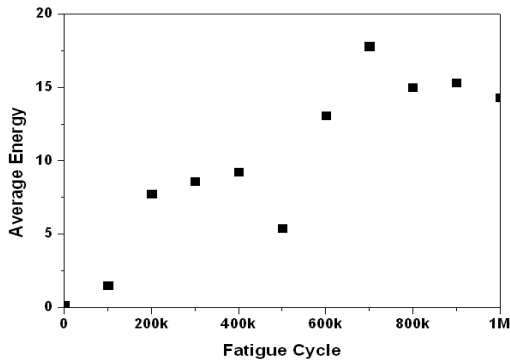


Fig. 9 Average energy for all channel with cycle

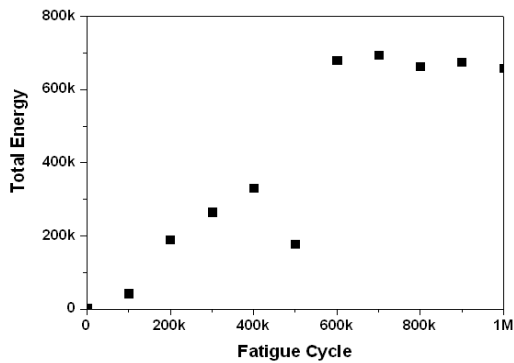


Fig. 10 Total energy for all channel with cycle

Fig. 9는 피로 주기 동안 평균 energy의 변화를 보여주는 것으로 hit 수의 변화와 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 10은 피로 주기 동안 각 주기의 total energy의 변화를 보여주는 것으로 50만 회에서 약간 적은 값을 가지나 60만 회까지 증가 후 이후에는 거의 일정한 값을 가진다. 블레이드 전체로 보면 50만 회에서 손상의 증가가 둔화되지만 60만 회까지는 손상의 증가가 지속적으로 일어나고 이후에는 손상에 큰 변화를 보이지 않는 것처럼 보인다.

3.2. 채널별 활성화도 변화

Fig. 11은 피로 주기의 증가에 따른 각 채널의 hit 수의 변화를 보여 주고 있다. 5, 6, 7번 채널을 제외한 모든 채널에서는 피로 횟수의 증가에 따라 hit 수가 증가하고 있다. 그러나 6번 채널의 경우 초기에 22000 이상의 hit가 발생하다가 20만 회 이후부터 점차 감소하여 60만 회 이후에는 약

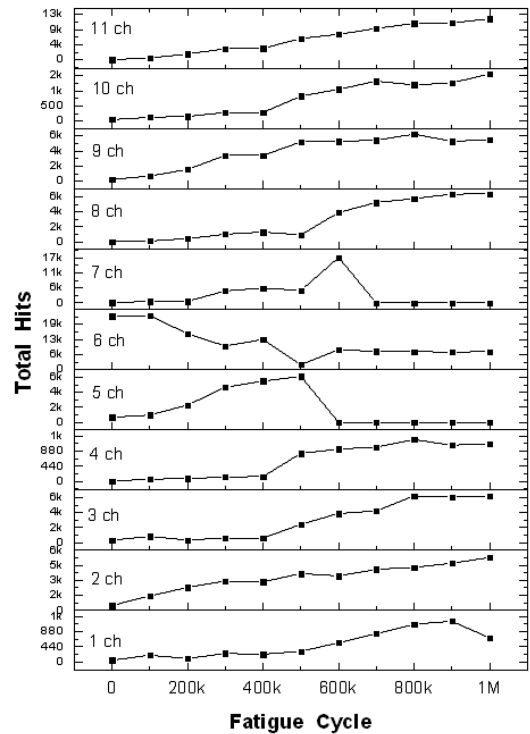


Fig. 11 Total hits for each channel with cycle

7500 hit 정도로 거의 일정하게 유지하고 있다.

5번 채널의 경우 50만 회까지 6117 hit까지 점차적으로 증가하였다가 이후 60만 회에서 급격히 감소하여 hit 수가 0으로 줄어든다. 7번 채널의 경우 60만 회까지 점차로 hit 수가 증가하여 16985 hit를 기록하였다가 70만 회 이상에서 hit 수가 거의 검출되지 않았다. 이 결과는 복합재료의 손상 기구를 생각할 때 초기에 6번 채널 근방에 skin과 spar의 접촉면에서 응력 집중으로 인하여 기지균열의 생성으로 많은 hit 수가 발생되고 이후 기지균열이 성장과 균열의 결합으로 duration은 증가하나 hit 수는 감소하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12는 6번 채널에서 피로 횟수 증가에 따른 duration을 나타낸 것으로 50만 ~ 60만 회 이후는 duration이 크게 길어지며 hit 수는 적어진다. 5, 7번 채널의 경우 6번 채널의 hit 중 amplitude가 큰 hit의 신호가 5, 7번 채널까지 전달되어 나타난 결과로 추정되는데 6번 채널에서는 긴 duration의 한 개의 hit가 전달에 의한 진폭의 감소로 duration이 작은 여러 개의 hit로 측정되어진 것으로 7번 채널의 경우 16985 hit까지

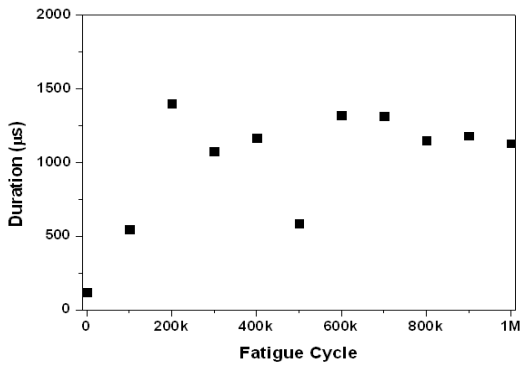


Fig. 12 Duration for 6 channel with cycle

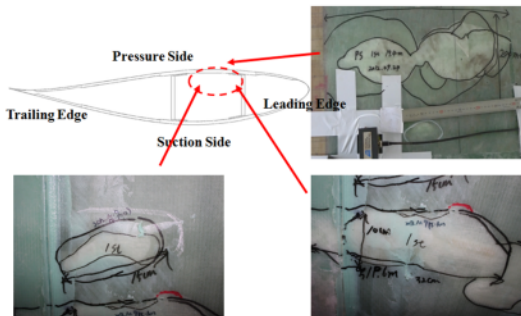


Fig. 13 Failure shape of the fracture

증가한 것이다. 60만 회 이상이 되면 6번 채널은 손상이 거의 최대로 일어난 상태로 이후 duration은 거의 포화된 상태가 되는데 이때는 균열된 skin과 spar면의 마찰에 의한 신호로 많이 발생하는 것으로 보이며, Fig. 13과 같이 70만 회 이후 20 m 지점인 6번 채널 부위의 육안검사를 통해 확인할 수가 있었다.

Fig. 14에서 보는 것처럼 높은 진폭의 hit가 적기 때문에 이후는 5, 7번 채널에서는 거의 hit 수를 관찰할 수 없는 것이다. 5, 6, 7번 채널을 제외한 채널에서는 hit 수가 점점 증가하는 것은 각 채널 근방에서 기저균열이 점차 증가해 간다고 추정되나 총 energy의 크기가 6번 채널에 비해서 1/100 정도로 상당히 적어서 그 손상의 정도는 크지 않은 것으로 보인다.

이와 같은 결과로 볼 때 피로시험 초기부터 블레이드 체결부에서 거리 20 m 지점인 6번 채널 주변 영역에 응력이 집중되어 skin과 spar의 접합부에 손상을 가져오며, 이를 설계에 반영한다면 최적 설계에 도움이 될 것으로 본다. 이외 다른

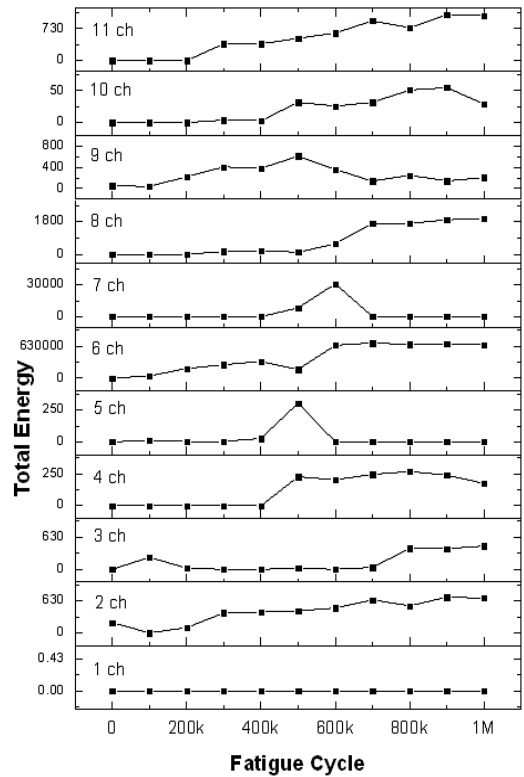


Fig. 14 Total energy for each channel with cycle

영역은 hit 수나 energy 증가를 볼 때 피로가 진행됨에 따라 손상이 진행된다고 볼 수 있으나 설계에 고려될 사항은 아닌 것으로 보인다.

### 3.3. 음향방출원 위치표정

Fig. 15는 피로시험 주기 동안 linear source location 결과를 보여 준다. 처음에는 6번 채널 부근에서만 event가 많이 발생하다가 8번 채널 부근에서는 40만 회에서 60만 회까지 지속적으로 event가 발생하고, 2번 채널 부근에서는 40만 회에서 100만 회까지 event가 계속해서 발생하고, 60만 회 이상에서는 9, 10, 11번 채널 부근에도 event가 계속해서 발생된다. 초기에는 6번 채널을 중심으로 event가 집중되는 현상이 나타나다가 60만 회 이후에는 6번 채널(체결부 20 m 지점) 양쪽으로 나뉘어 나타나는 현상을 보였다.

이는 Fig. 11 총 hit 그래프와 Fig. 14 total energy 그래프에서 hit와 energy 분포를 고려하여 응력 집중 영역을 추정할 수 있다. 이들 결과를 이용하여

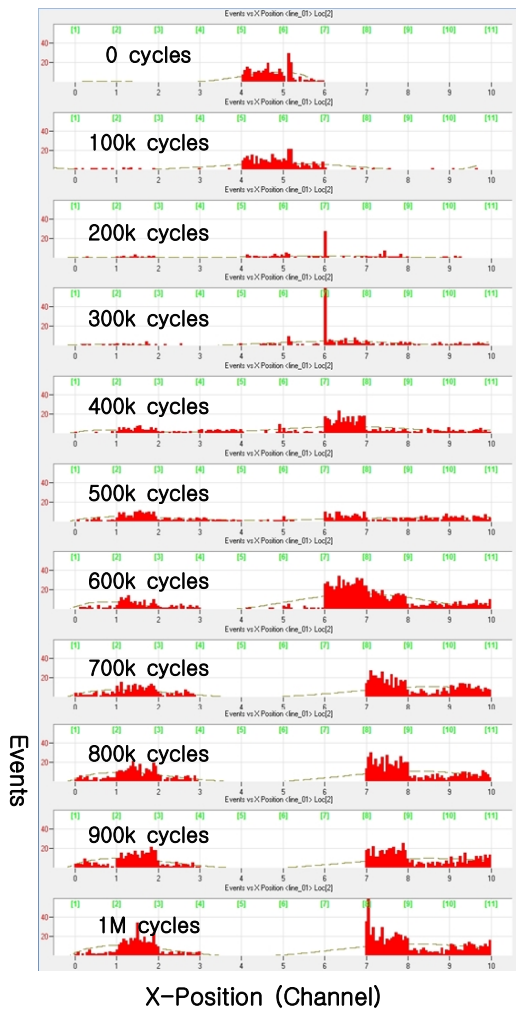


Fig. 15 Source location for fatigue cycles (event vs. X-position)

설계 반영한다면 최적의 설계를 통하여 응력 집중을 줄이고 사고를 예방할 수 있을 것이다.

4. 결 론

길이 48 m, 용량 3 MW인 풍력 블레이드의 flap 피로시험 시 발생하는 음향방출신호의 변수 분석 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 발생한 음향방출신호 변수의 분석 결과 블레이드의 주 손상기구는 전형적인 기지균열의 생성과 성장임을 알 수 있었다.
- 2) 발생한 음향방출신호로 보아 피로시험 초기에는 블레이드 체결부에서 약 20 m 거리인 6

번 채널 부근인 skin과 spar의 접합부에서 기지균열의 생성과 성장이 일어나며, 60만 회 이후에는 균열면의 마찰에 의한 음향방출신호가 발생하는 것을 알 수 있다.

- 3) 음향방출신호의 발생 분포는 60만 회를 전후하여 크게 변화됨을 알 수 있었으며, 신호의 변수 분석 결과 주된 손상부로 판단되는 부위(체결부에서 20 m지점)는 육안검사를 통하여 확인할 수 있었다.
- 4) Source location 결과 응력 집중에 따른 주 손상부위를 추정할 수 있으며, 이 결과는 설계에 반영하여 최적 설계에 도움을 줄 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 부경대학교 자율창의 학술연구비(2014년)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] H. Sutherland, A. Beattie, B. Hansche, W. Musial, J. Allread, J. Johnson and M. Summers, "The application of non-destructive techniques to the testing of a wind turbine blade," *Sandia National Laboratories Report, SAND93-1380* (1994)
- [2] P. Migllore, J. Van Dam and A. Huskey, "Acoustic tests of small wind turbines," *Presented at the 2004 Energy Symposium*, Preprint (2003)
- [3] A. A. Anastassopoulos and G. Fernando, "Structural integrity evaluation of wind turbine blades using pattern recognition analysis on acoustic emission data," *Presented at the 2002 EWGAE*, Preprint (2002)
- [4] H. S. Jee, J. O. Lee, N. H. Ju and J. K. Lee, "Study of acoustic emission parameter involved in burst test for CNG vehicle fuel tank," *Journal of KSME A*, Vol. 35, No. 9, pp. 1131-1136 (2011)
- [5] H. S. Jee, J. O. Lee, N. H. Ju, J. K. Lee and C. H. So "Damage evaluation for high pressure fuel tank by analysis of AE parameter," *Journal of KSCM*, Vol. 24, No. 4, pp. 36-40 (2011)