

## 음향방출시험에 의한 복합 재료 접합부의 비파괴평가

이종오\*, 이주석\*, 윤운하\*, 이승희\*\*

\* 한국기계연구원, \*\* 계명대학교

요 약 복합 재료의 single-lap 및 double-strap adhesive bonding joint 시험편에서 피로 및 인장시험시 방출되는 AE 신호의 분석에 의한 피로 수명 예측 및 파괴 과정의 감시에 대한 연구를 수행하였다. Bonding 시험편의 피로시험시 AE event의 발생양상은 피로에 의해 축적된 elastic strain energy의 방출과 관계되며, peak amplitude가 높고 event duration이 긴 event의 발생 영역과 peak amplitude가 낮고 event duration이 짧으나 많은 event가 발생하는 영역으로 나눌 수 있었다. 그리고 두 영역 사이의 경계 cycle은 피로 수명의 70-80% 근방에 존재하였으며, 이를 이용한다면 피로 수명의 예측이 가능하리라 판단된다.

### 1. 서론

복합 재료란 일반적으로 가공성이 좋은 경량 기지 재료에 섬유상 또는 입상의 강화 소재를 보강하여 구조용 재료로서 요구되는 우수한 기계적 특성을 보유한 재료를 말하며, 이러한 복합 재료는 이종 소재의 조합에 의한 복합 구조로 되어 있어 제작이나 사용 중에 원하지 않는 결함의 발생 가능성이 높다. 한편 복합 재료 구조물의 경우 jointing부가 없는 설계를 하는 것이 가장 이상적이지만, 대형의 실 구조물에서는 제조 과정에서 크기의 제한이나 시험검사, 보수, 이동/조립의 요구 등 실제적 제약에 의해 joint부를 피할 수 없는 것이 현실이며, 이러한 joint부는 제조상 결함이나 응력 집중 등으로 인한 취약 부위로 사용중 결함의 발생 가능성이 높다. 이러한 결함은 비등방성 비균질성 미세구조를 가진 복합 재료 특성상 재료의 기계적 특성에 큰 변화를

야기시키므로 표본 추출식 검사보다는 비파괴적 방법에 의한 전수 검사를 통해 재료를 평가하는 것이 바람직하다.

비파괴적인 재료 자체의 평가에 대한 연구는 1970년대 이후 X-선, 초음파 등의 방법이 이용되어 왔으며,<sup>1-4)</sup> 특히 동적 결함의 검출에 좋은 도구가 되는 AE를 이용한 복합 재료의 결함 검출에 많은 연구가 진행 중에 있다.<sup>5-8)</sup>

본 연구에서는 실제 구조물에서 발생하는 joint중 기계적인 접합을 배제하고 adhesive bonding에 관한 품질 평가 분야에 한정하여, 복합 재료 구조물의 제작시 많이 사용되는 single-lap joint(SL) 및 double-strap joint(DS)를 선택하여, 접합부위에 대한 피로 및 인장시험시 방출되는 AE를 분석하여 파괴 과정의 감시 및 피로 수명에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험

2. 1. 시편 제작

본 연구에 사용된 시편은 unidirectional carbon/epoxy prepreg(한국화이버 CU250NS)를 적층 순서 [0° /90° ]7s 및 [0° /90° ]4s 로 적층하여 autoclave 에서 성형하였다. 성형 조건은 3기압의 압력하에서 3℃/min의 승온 속도로 140℃까지 승온한 후 4기압의 압력하에서 95분간 유지하였으며, 성형이 완료된 후 시편의 휨을 방지하기 위하여 압력을 유지한 상태에서 2℃/min의 냉각 속도로 서서히 상온까지 냉각하였다. 성형된 CFRP 적층판을 가공하여 Fig. 1 과 같은 형상으로 시편을 접합하였으며, bonding부에 사용된 접착제는 AW106과 경화제로 HV953U가 사용되었다.

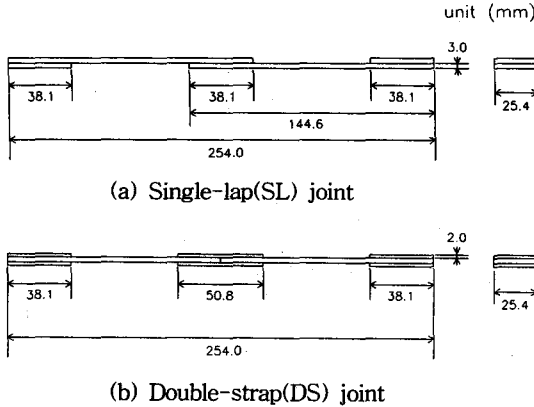


Fig. 1. The shape and dimension of specimens.

2. 2. 실험 방법

Single-lap joint 및 double-strap joint 시험편에 대해 피로시험 및 인장시험을 수행하였으며, 시험중 발생한 음향방출(AE)신호를 분석하여 피로 특성 및 파괴 특성을 조사하였다. 피로시험은 유압식 만능시험기로 수행되었으며, SL 및 DS 시험편에서 인장 시험시 정적 파괴 하중은 각각 약 820kg.f 및 3000kg.f이었으며 피로시험은 각각 60-660kg.f 및 180-1800kg.f 사이에서 1Hz의 tension-tension 피로 하중으로 실시되었다. AE 시험은 AET 5500 system 및 175kHz 공진형 탐촉자를 사용하였다. 검출된 AE 신호는 125-250kHz의 band pass filter를 가진

pre-amplifier에서 40dB 증폭한 후 main amplifier에서 6dB 증폭하여 threshold voltage 0.2V 이상의 신호에 대해 신호 처리하였다. 신호 처리는 event, peak amplitude 분포 등의 변수를 분석하여 파괴 과정을 monitoring 하였으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다.

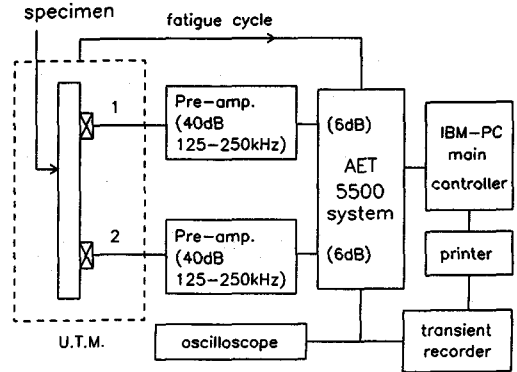


Fig. 2. Block diagram of acoustic emission measurements.

3. 연구 결과 및 고찰

3. 1. AE에 의한 피로 파괴 과정의 감시

Fig. 3은 single-lap joint인 SL 시험편에서 cycle 회수가 증가함에 따른 전형적인 AE event 발생률을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 AE event의 발생률이 거의 일정한 초기의 steady state 영역과 파괴 근방에서 AE event의 발생률이 급격히 증가한 두 영역으로 나누어 볼 수 있다.

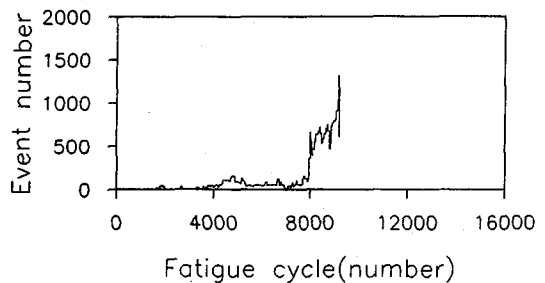
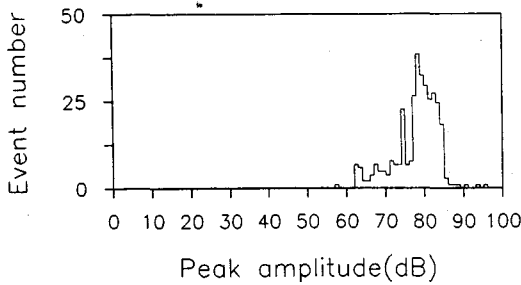


Fig. 3. Typical AE event rate during fatigue test for SL specimen.

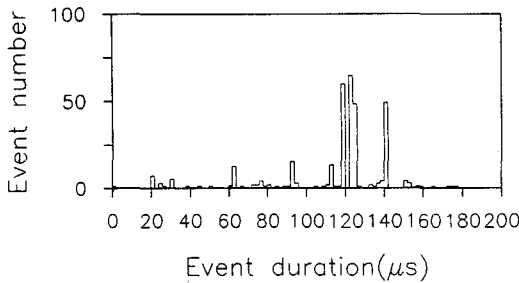
초기 steady state 영역에서 발생한 AE event의 amplitude 특성을 살펴보면 Fig. 4 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 78dB 정도 이상의 큰 peak amplitude를 가진 event가 발생하였다. 이것은 이 영역에서 시험편이 균열되기 위해서는 상대적으로 큰 탄성에너지를 축적해야 하며, AE event는 큰 탄성에너지의 방출에 의한 것으로 단속적이며 발생된 event의 개수는 많지 않으나 peak amplitude는 큰 것으로 생각되며, 접합부의 파괴기구를 접합매질의 균열에 의한 것으로 본다면 같은 특성 파형의 AE event가 발생될 것으로 보이며, peak amplitude 및 에너지가 크기 때문에 Fig. 4 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 event duration도 110 $\mu$ sec 이상의 긴 event가 주를 이루고 있다. 한편 파괴 근방의 AE가 급격히 증가하는 영역에서 발생하는 AE event의 peak amplitude의 특성은 Fig. 5 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 63dB 정

도의 peak amplitude를 가진 event가 발생하였으며, 이 영역에서 발생하는 AE는 파괴가 가까워짐에 따라 충분한 탄성에너지가 축적되지 못하고, 연속적으로 진전하는 균열에 의해 낮은 peak amplitude의 많은 event를 발생하는 것으로 생각되며, peak amplitude가 낮으므로 상대적으로 110 $\mu$ sec 이하의 짧은 event duration을 가진 event가 발생한 것을 Fig. 5 (b)에서 보여 주고 있다.

복합 재료는 이종 소재의 조합에 의한 복합 구조로 되어 있어 제작이나 사용 중 원하지 않는 결함의 발생 가능성이 높으며, 이러한 결함은 비등방성 비균질성 미세 구조를 가진 복합 재료의 특성상 재료의 기계적 특성에 큰 변화를 야기시키므로 표본 추출식 검사보다는 비파괴적 방법에 의한 전수 검사를 통해 재료를 평가하고 있다는 것은 이미 서론에서 언급한 바 있다. 실제 복합재료의 bonding 또한 이와



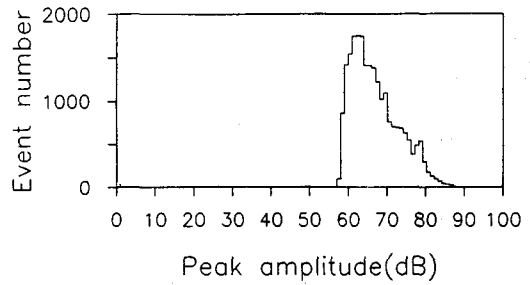
(a)



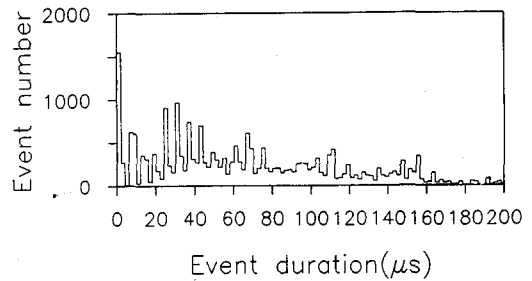
(b)

Fig. 4. (a) peak amplitude distribution of AE event at steady state stage for SL specimen.

(b) event duration distribution of AE event at steady state stage for SL specimen.



(a)



(b)

Fig. 5. (a) peak amplitude distribution of AE event at AE rapidly increasing state stage for SL specimen.

(b) event duration distribution of AE event at AE rapidly increasing state stage for SL specimen.

같은 특성을 가지고 있으며, 특히 미세 결함의 경우 제 수명에도 큰 차이를 보일 것이 예상된다. 피로시험시 수명 예측을 위한 방법으로 SL 시험편에서 AE event를 monitoring한 Fig. 3에서 보인 steady state 영역과 AE event가 급격히 증가한 영역의 경계가 되는 cycle을 균열의 성장이 급격히 일어나기 시작하는 cycle로 보고 피로 수명 cycle과 이 AE event가 급격히 증가하는 cycle과의 관계를 알아보았다. Fig. 6은 SL 시험편에서 피로 수명 cycle과 AE event가 급격히 증가하는 cycle과의 관계를 나타내는 것으로 위에서 언급한 것처럼 시험편에 따라 피로 수명에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 피로 수명의 큰 차이에도 불구하고 피로 수명과

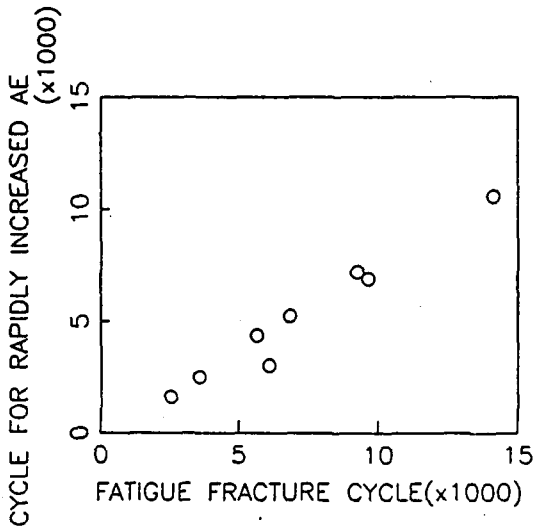


Fig. 6. The AE rapidly increasing start cycles with fatigue life for each SL specimen.

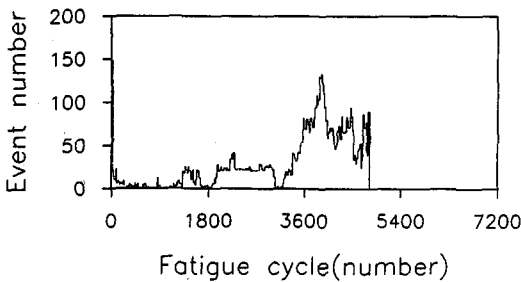


Fig. 7. Typical AE event rate during fatigue test for DS specimen.

AE event가 급격히 증가하는 cycle과는 선형적인 관계를 보이고 있으며, 이들의 비는  $73.0 \pm 4.7\%$  이내에 있는 것으로 나타났다. 이 의미는 SL 시험편과 같은 bonding구조의 피로시험시 AE event의 monitoring에 의해 AE event가 급격히 증가하기 시작하면 약 73%의 수명에 다다른 것으로 볼 수 있다는 것이다.

Fig. 7은 double-strap joint인 DS 시험편에서 cycle 회수가 증가함에 따른 전형적인 AE event 발생률을 나타낸 것이다. SL 시험편에서 본 것처럼 AE event의 발생은 초기의 steady state 영역과 파괴 근방의 급격히 증가한 두 가지 영역으로 나누어 볼 수 있다.

초기 steady state 영역과 AE event가 급격히 증가한 영역에서 발생한 AE event의 amplitude와 event duration의 특성은 각각 SL 시험편과 유사한 78dB의 peak amplitude, 110  $\mu$ sec 이상의 긴 event duration 및 63dB의 peak amplitude, 110  $\mu$ sec 이하의 짧은 event duration을 가진 event가 발생하였다.

한편 피로시험시 수명 예측을 위한 방법으로 SL 시험편에서처럼 Fig. 7에서 피로 수명 cycle과 AE event가 급격히 증가하는 cycle과의 관계를 알아보았다. Fig. 8은 DS 시험편에서 피로 수명 cycle과 AE event가 급격히 증가하는 cycle과의 관계를 나타내는 것으로 SL 시험편에서처럼 시험편에 따라

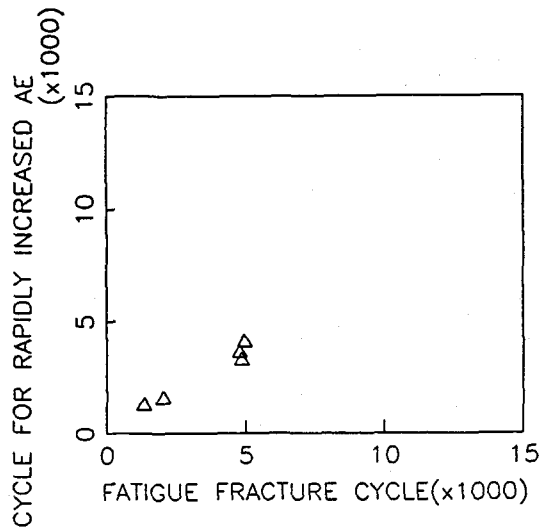


Fig. 8. The AE rapidly increasing start cycles with fatigue life for each DS specimen.

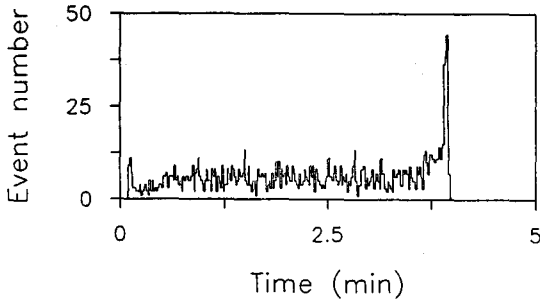


Fig. 9. Typical AE event rate during tensile test for DS specimen without defect.

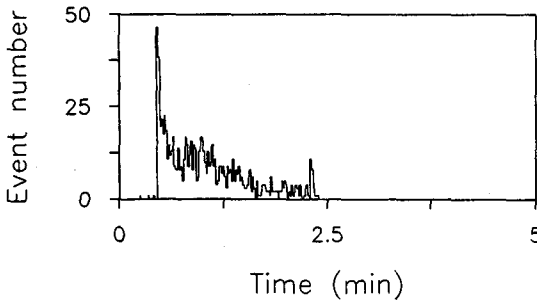
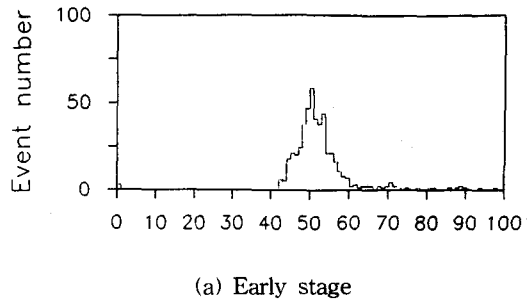


Fig. 10. Typical AE event rate during tensile test for DS specimen containing defect.

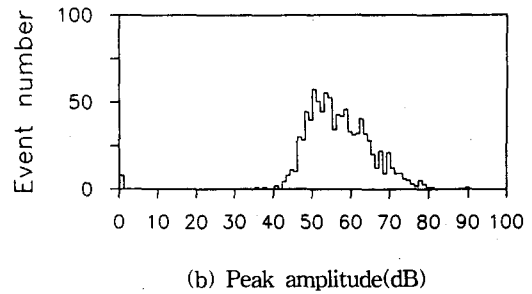
피로 수명에 큰 차이가 있음을 알 수 있고, 피로 수명과 AE event가 급격히 증가하는 cycle과는 선형적인 관계를 보이고 있으며, 이들의 비는  $78.2 \pm 8.5\%$  이내에 있는 것으로 나타났다. DS 시험편에서는 SL 시험편과 비교하여 수명 예측의 오차 한계가 크지만 이것은 접합구조의 복잡성 때문으로 판단되며, 시험편간의 피로수명 차이를 감안할 때 이 정도의 수명예측 능력은 현저한 결과로 판단된다.

3. 2. AE에 의한 인장 파괴 과정의 감시

Fig. 9는 초음파 C-scan 분석 결과 결함이 없는 것으로 판단되고 파괴 후 파단면 관찰로 결함이 없었던 것이 확인된 double-strap joint 시험편의 인장 시험시 AE event의 발생 양상을 보여주는 것으로 피로시험과 같이 초기의 steady state 영역과 파괴에 가까워지면서 AE event가 갑작스럽게 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 초기 결함이 없는 상태에



(a) Early stage



(b) Peak amplitude(dB)

Fig. 11. peak amplitude distribution of AE event at early and final stage during tensile test for DS specimen containing defects.

서 균열이 생겨 어느 정도 진전할 때까지는 steady한 AE 발생을 보인 후 파단에 가까워지면서 균열 성장 속도가 급격히 증가하며 AE event가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 한편 Fig. 10은 결함을 가진 double4-strap joint 시험편의 인장 시험시 발생하는 AE의 양상을 보여주고 있는 것으로 결함을 포함하지 않은 시험편에 대한 Fig. 9의 결과와는 현저히 다른 양상을 나타내었으며, 초기에 AE event의 급격한 발생을 보이다가 감소하여 파괴 직전에 약간 증가하는 형태를 보인다. 이러한 현상은 초기에 결함을 가진 취약 부위가 급격히 손상되면서 AE의 양은 급격히 증가하였고, 이후 AE의 양은 감소하다가 최종 파손시 약간 증가하는 양상을 보인 것으로 생각된다. 그리고 축적된 탄성에너지 방출률의 관점에서 본다면 피로시험에서 언급한 것처럼 peak amplitude의 분포도 초기에는 낮은 값에서 최종 파손시 약간 큰 값으로 이동할 것으로 예상되며, 그 결과는 Fig. 11 (a), (b)에서 보여주고 있다.

#### 4. 결론

CFRP 복합 재료의 single-lap 및 double-strap adhesive bonding joint 시험편에서 피로 및 인장 시험시 방출되는 AE 신호의 분석에 의한 피로 수명 및 파괴 과정의 감시에 대한 시험 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) Bonding 시험편의 피로시험시 AE event의 발생 양상은 피로에 의해 축적된 energy의 방출과 관계되며 크게 steady state 영역과 event가 갑자기 증가한 두 가지 영역으로 분리된다. 전자의 영역에서 발생하는 AE event는 peak amplitude가 높고 event duration이 길며, 후자의 영역에서 발생하는 AE event는 peak amplitude가 낮고 event duration이 짧다. 그리고 이 두 영역 사이의 경계 cycle은 피로 수명의 70-80% 근방에 존재하므로 피로 수명의 예측에 이용 가능하리라 판단된다.
- 2) 결함이 없는 시험편의 인장시험시 AE event의 발생 양상은 피로시험시의 발생 양상과 유사하다.
- 3) 결함이 많은 시험편의 경우 인장시험시 AE event

의 발생 양상은 결함의 취약부 파손에 의해 초기에 낮은 에너지의 많은 event가 발생하며, 그 후 파손 직전까지 적은 event가 발생 되고 파손시 약간 증가한다.

#### 참고 문헌

- 1) D. J. Hagermaier, H. J. McFaul and J. T. Parks, Mater. Eval., 194(1970).
- 2) A. Mahoon, Brit. J. of NDT, 24, 316(1982).
- 3) J. H. Williams and N. R. Lampert, Materials Evaluation, Vol. 38, No. 12, 68(1980).
- 4) I. G. Scott and C. M. Scala, NDT International, Vol. 15, No. 2, 75(1982).
- 5) Kanji Ono, Proceeding of Int'l Symp. on AE from Reinforced Composites, Montreal, Canada, July 22(1986).
- 6) I. Kimpara, I. Ohsawa, Progressin AE IV, 732(1988).
- 7) J. S. Lee, J. O Lee and S. K. Oh, Progress in AE VI, 53(1992).
- 8) J. S. Lee et al., UCN355-1476-C, NDT Lab. KIMM (1991).

## **Evaluation of Adhesive Bonding Quality by Acoustic Emission**

J. O. Lee\*, J. S. Lee\*, U. H. Yoon\* and S. H. Lee\*\*

\* Korea Institute of Machinery and Metals

\*\* Dept. of Physics, Keimyung University

**Abstract** Prediction of fatigue life and monitoring of fracture process for adhesively bonded CFRP composites joint have been investigated by analysis of acoustic emission signals during the fatigue and tension tests. During fatigue test, generated acoustic emission is related to stored elastic strain energy. By results of monitoring of AE event rate, fatigue process could be divided into two regions, and boundaries of two regions, fatigue cycles of the initiation of fast crack growth, were 70-80% of fatigue life even though the fatigue life were highly scattered from specimen to specimen. The result shows the possibility of predicting catastrophic failure by acoustic emission monitoring.

---

*(Received: November 9, 1994)*