

## 모의 음향 방출 신호의 Peak Amplitude 측정을 통한 복합 재료 접합부의 비파괴평가

손영호\*, 이종오\*, 이승희\*\*

\* 한국기계연구원,

\*\* 계명대학교 물리학과

요 약 CFRP 복합 재료를 접착 접합한 single-lap 및 double-lap 접합 시험편의 disbond 크기를 초음파 C-scan 및 simulated stress wave를 이용하여 정량적으로 평가하고자 하였다. 초음파 C-scan 시험을 통해 인공 결함의 크기가 확인된 시험편을 사용하여, 접합부를 통과한 응력파의 주파수를 변화시키면서 peak amplitude를 측정하여 주파수 응답성을 구하였으며, 이를 분석한 결과 두 적층판의 두께 방향 기본 공진 및 3차 공진 주파수에서 peak amplitude가 극값을 보이며, 접합 면적에 비례함을 관측할 수 있었다. 이 결과로 표준시험편만 준비된다면 결함의 정량적 평가 및 현장 적용에도 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 1. 서론

높은 무게비 강도 및 우수한 내피로 특성을 가진 복합재료는 우주·항공·방위산업을 비롯하여 자동차 등의 1차 및 2차 구조용 재료로 그 사용이 급격히 증가하고 있다. 이러한 복합 재료를 구조용 재료로 사용할 때 접합부가 생기지 않도록 설계, 제작하는 것이 이상적이지만 실제 기계 구조물에는 접합 가공을 한 부위가 많이 있다. 특히 복합 재료의 구조적 접합 방법으로 많이 쓰이는 접착 접합(adhesively bonded joint)은 중저의 부하 영역에 주로 사용되며, 기계적 접합에 비해 무게비 강도, 응력 분산, 다양한 설계, 비용 절감 그리고 간편한 제작 등의 장점이 있다<sup>1)</sup>.

그러나 일반적으로 접합부는 제조상 결함의 발생 확률이 높고 응력 집중으로 인해 취약 부위가 되기 때문에 구조물의 기계적 특성의 변화 및 구조적 건전성을 저하시킬 가능성이 매우 크다. 따라서 복합

재료 구조물의 신뢰성을 개선하기 위해 복합 재료 접합부의 결함 평가 기법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

일반적으로 초음파, X-선 등의 비파괴검사 기법들이 복합 재료 접합부의 결함검출에 사용되고 있으나 현장 적용의 어려움으로 인하여 Vary<sup>2,3)</sup>는 음향 방출과 초음파기법의 장점을 조합하여 모의 음향 방출원(simulation source)에 의해 발생된 응력파의 전달 효율을 측정하는 acousto-ultrasonic(AU) 기법을 개발하였다. 그러나 AU기법의 적용시 결과로 도출되는 응력파 계수(stress wave factor)는 그 물리적 의미가 모호하고, 데이터의 분산이 매우 심하여 재현성이 좋지 않다는 문제점을 갖고 있으며, 실제 복합 재료 접합부의 결함 평가에는 적합하지 않다고 보고된 바가 있다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 Vary가 제안한 AU기법을 적용하되, 응력파 계수를 측정하지 않고 물리적 의미가 명확한 peak amplitude를 측정하여 peak amplitude와

결합 크기의 상관 관계로써 접합부의 결합을 정량적으로 평가해 보고자 한다.

로 결합의 크기 백분율은 SL 시험편의 1/2 값을 가진 것으로 보았다.

2. 실험

2.1. 시편 제작

본 연구에 사용된 시편의 소재는 한국화이바(주)의 CU250NS unidirectional carbon/epoxy prepreg를 적층 순서  $[0^\circ / 90^\circ]_{75}$ 로 적층하여, autoclave에서 성형한 CFRP 적층판이다.

접합면을 사포로 가공한 다음 현대에폭시화학(주)의 산업용 에폭시 접착제 HE#20 에폭시 수지와 경화제를 사용하여 Fig. 1과 같은 형상의 single lap(SL) joint 및 double lap(DL) joint 시편을 제작하였다. Fig. 2는 적층판을 접합하기 이전 접합면을 찍은 사진으로, 접합 결합을 정량적으로 평가하기 위해 결합이 없는 표준시편과 테프론 테이트로 접합 면적의 25% 및 50%의 인공 결합을 준 SL 시험편 3종류 그리고 결합이 없는 시험편과 12.5% 및 25%의 인공 결합을 준 DL 시험편 6종류를 각 형태당 3개씩 총 27개의 시험편을 제작하였다. DL 시험편의 경우 결합의 위치에 따라 응력과의 경로 길이가 달라지므로 이에 따른 감쇠 효과를 관찰하기 위해 결합의 크기는 같으나 위치가 다른 시험편을 제작하였다. 한편 DL 시험편에서 인공 결합의 크기는 DL 시험편 자체가 양면 접합으로 이루어져 있으며

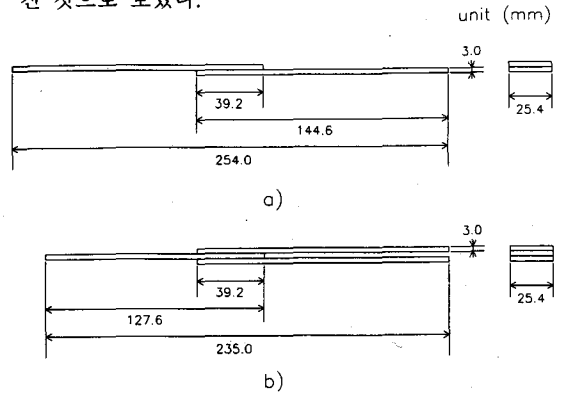


Fig. 1. Dimension and shape of specimens.

2.2. 실험 방법

준비된 시험편은 초음파 C-scan방법으로 접합 상태를 관찰하여 원하는 크기의 인공 결합을 가진 시험편으로 제작된 것인지를 확인하였으며, 이때 사용된 초음파시험 장비는 Matec사(USA)의 MBS 8000 system이었다.

접합 부위를 통과한 응력과의 peak amplitude 측정 시험에는 정량적인 결합의 크기가 확인된 시험편만을 사용하였으며, 시험 장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 두개의 광대역 탐촉자(AETC FC500)를 송·수신 탐촉자로 하여 SL 시험편의 경우에는 Fig. 3의 a)에서 처럼 접

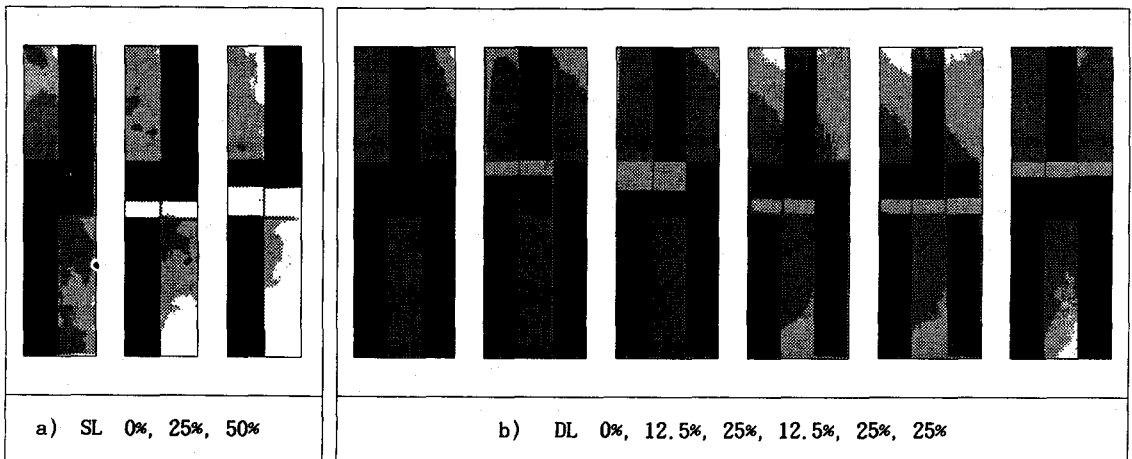


Fig. 2. Photograph of the adhesive surface of partially bonded specimens.

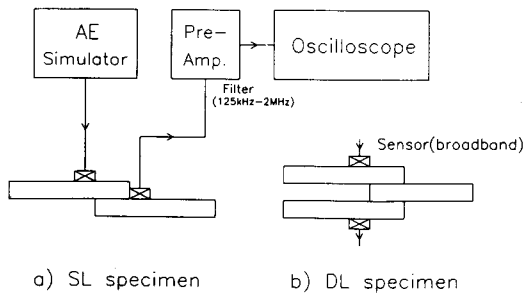


Fig. 3. Schematic diagram of experimental set-up for peak amplitude measurements.

합부를 사이에 두고 40mm의 간격을 갖도록 탐촉자를 위치시켰으며, DL 시편의 경우에는 Fig. 3의 b)와 같이 위치시켰다. AE simulator에서 발생된 전기적 신호는 송신 탐촉자를 여기시켜 시편 내부로 응력파를 발생시키고 발생된 응력파는 접합부를 통과하여 수신 탐촉자에 검출되며, 이렇게 검출된 신호를 125 kHz - 2 MHz 대역역파기(bandpass filter)가 내장된 전치증폭기(pre-amp)에서 40dB(100배) 증폭시켜 오실로스코프로 관측하였다.

주파수 변화에 따른 peak amplitude의 변화를 관찰하기 위해 AE simulator에서 발생된 전기적 신호의 주파수를 150 kHz부터 1 MHz까지 10 kHz씩 증가시켜 가며 peak amplitude를 측정하였다. 송수신 탐촉자에 가해진 압력과 탐촉자들 사이의 거리를 일정하게 유지하기 위해 고무 밴드를 사용하였으며, 이때 접촉 매질(couplant)로는 Krautkrämer사(Germany)의 ZG5가 사용되었다. 한번의 측정이 끝난 시험편은 재현성의 확인을 위하여 탐촉자와 분리시켜 깨끗이 닦은 다음 다시 동일한 과정의 시험을 반복하였다.

3. 결과 및 검토

Fig. 4는 제작된 SL 및 DL 시험편의 접합 결함 상태를 확인하기 위한 초음파 C-scan시험 결과의 예를 보여주는 것으로 대부분의 시험편에서 원하는 크기의 인공 결함이 내재되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 각각 SL 및 DL 시험편에서 검출한 응력파의 파형으로 a)에서 볼 수 있는 바와 같이 SL 시험

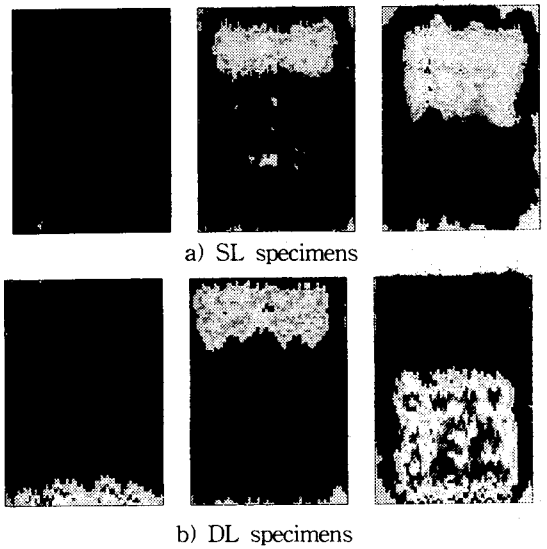


Fig. 4. a, b) The results of ultrasonic C-scan for SL and DL specimens.

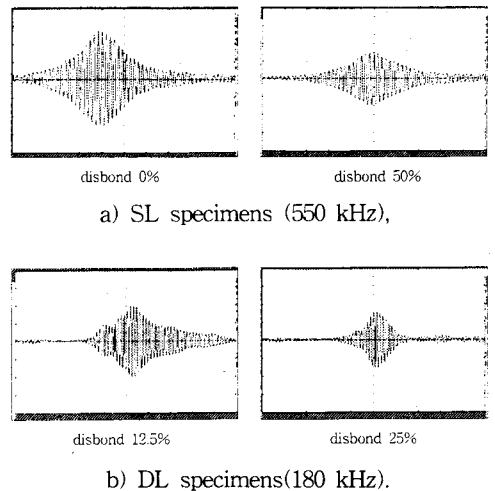


Fig. 5. Typical received waveforms

에서 검출한 응력파의 파형은 시편이 비교적 단순한 형상을 하고 있어 입사파의 파형과 거의 유사하게 나타난 것으로 생각되며, b)는 DL 시험편에서 검출한 파형으로 SL 시험편에서 검출된 파형보다 다소 복잡한 형태를 보이는데 이것은 적층판의 수가 많아져 시험편의 형상이 복잡해짐에 따라 응력파의 전파 과정에서 분산, 감쇠 및 mode 변환 등 복합적인 요소에 의해 변조된 것으로 생각된다. 또한 결함의 크기가 증가함에 따라 peak amplitude가 감소하

였음을 볼 수 있었다.

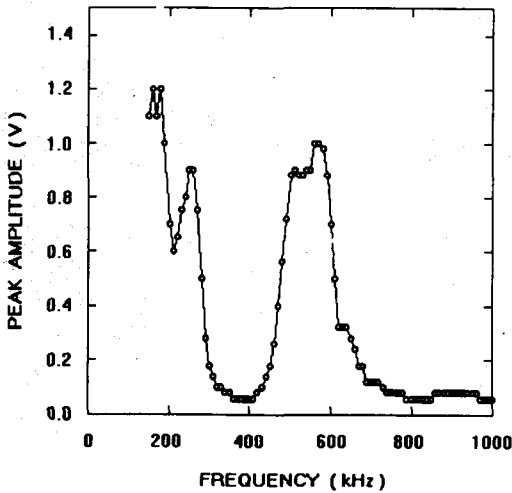


Fig. 6. Frequency spectrum for SL specimen (disbonding 0%).

Fig. 6은 결합이 없는 SL 시편에서 주파수 변화에 따라 관측된 peak amplitude의 변화를 나타낸 것으로 180 kHz와 550 kHz 근방의 주파수에서는 peak amplitude가 높고 좋은 전달 특성을 보여주고 있으나, 320 kHz에서 430 kHz사이 및 680 kHz이상의 주파수 영역에서는 전달된 신호의 진폭이 잡음의 크기와 비슷하여 관측하기 어려울 정도로 낮

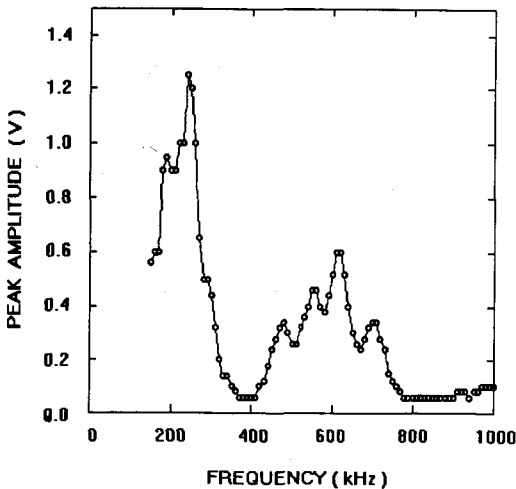


Fig. 7. Frequency spectrum for DL specimen (disbonding 0 %).

으며 전달 특성이 좋지 않았다.

한편 Fig. 7은 결합이 없는 DL 시험편에서 주파수 변화에 따라 관측된 peak amplitude의 변화를 나타낸 것으로, SL 시험편에서 보다 상대적 전달 특성은 떨어지지만 넓은 주파수 영역에서 좋은 전달 특성을 보이며, 보다 많은 주파수, 180 kHz, 240 kHz, 480 kHz, 550 kHz, 610 kHz, 및 710 kHz 근방에서 peak를 볼 수 있는데, 이것은 DL 시편이 3장의 적층판으로 구성되어 복잡한 형상을 갖고 있기 때문이라고 판단된다. 또한 DL 시편에서도 SL 시편에서와 같이 340 kHz에서 430 kHz사이, 그리고 780 kHz이상의 주파수대에서는 최대 진폭이 잡음의 크기와 거의 비슷하게 나타났다.

식(1)은 시험편의 공진 주파수를 계산하는 식으로

$$f = \frac{n}{2} \frac{v}{D} \quad (n=1,2,3,\dots) \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 파장이며,  $D$ 는 공진 주파수를 알기 위한 방향의 시험편 두께이고,  $v$ 는 시험편내에서 초음파의 속도이며,  $f$ 는 주파수이다. 그리고  $n$ 은 고차 공진 주파수(higher order harmonics)를 표현하는 차수이다.

한편 본 실험에서 접합부의 결합 양상이 두께 방향에 수직하므로 두께 방향의 공진이 시험 결과에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되었으며, 시험편에 사용된 적층판의 두께가 3mm이었고 SL 시편의 두께는 약 6mm, DL 시편의 두께는 약 9mm 이며, CFRP 적층 방향(두께 방향)의 음향 전파 속도가 약 2,200 m/s로 알려져 있으므로<sup>5)</sup> 이를 식(1)에 대입하여 시편의 두께 방향 공진 주파수 및 고차 공진 주파수를 계산하여 그 결과를 Table 1에 나타내었다. Fig. 6, 7에서 peak를 보인 주파수들은 계산된 공진 주파수 및 고차 공진 주파수에 포함이 되는 것을 알 수 있었다.

전달 특성이 좋은 주파수 즉, Fig. 6, 7에서 주 peak를 보인 주파수에서 SL 및 DL 시험편의 접합면적과 수신된 신호의 peak amplitude와의 상관 관계를 각각 Fig. 8 - 12에 나타내었다. 그림에서 오차의 한계는 같은 크기의 결합을 가진 여러개의 시험편에 대해 동일한 방법으로 두번 시험한 결과의 평균값에서  $\pm$ 표준편차를 나타낸다.

Fig. 8과 9에서 볼 수 있는 것처럼 SL 시험편에서

전달 특성이 좋은 180 kHz 및 550 kHz의 주파수에서 검출된 신호의 peak amplitude가 접합 면적과 선형적 비례 관계가 있음을 알 수 있다. 이들 주파수는 Table 1에서 볼 수 있는 것처럼 2개의 적층판을 접합하였을 경우 기본 공진 및 3차 공진 주파수이다. 한편 Fig. 10은 DL 시험편의 경우 240 kHz의 주파수에서 검출된 신호의 peak amplitude를 나타낸 것으로 같은 결합의 크기에서 오차가 크며, 결합의

Table 1. Calculated natural frequencies and their higher harmonics (kHz).

# of plate	$f_1^*$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
1(3mm)	366.6	733.3	1,100.0	-	-
2(6mm)	183.3	366.6	550.0	733.3	916.6
3(9mm)	122.2	244.4	366.6	488.8	611.1

\* : Fundamental frequency

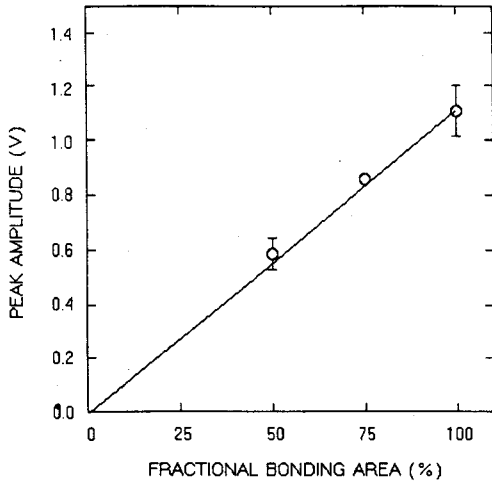


Fig. 8. The results of peak amplitude measurements for SL specimens (180 kHz).

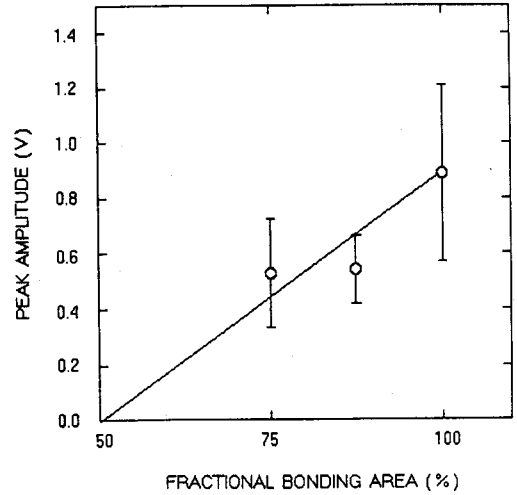


Fig. 10. The results of peak amplitude measurements for SL specimens (240 kHz).

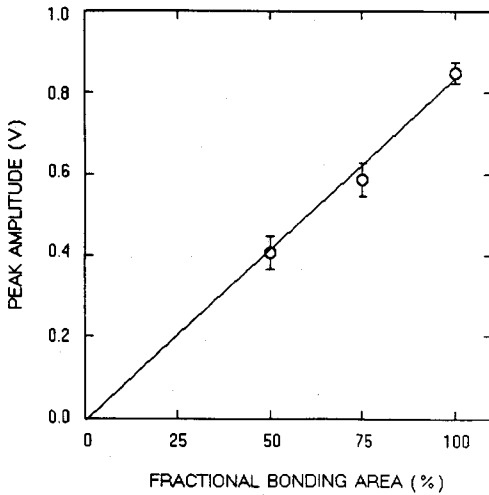


Fig. 9. The results of peak amplitude measurements for SL specimens (550 kHz).

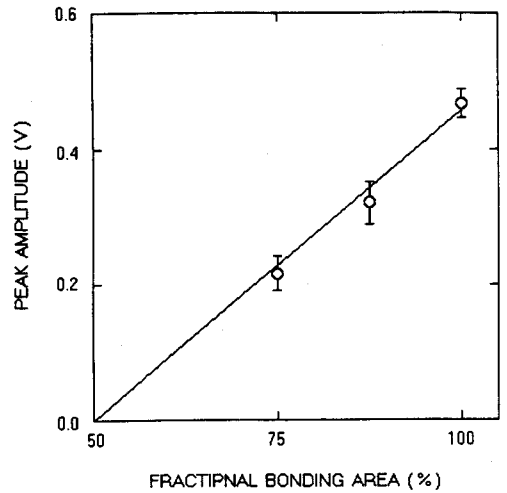


Fig. 11. The results of peak amplitude measurements for SL specimens (550 kHz).

크기가 다른 시험편들 사이의 직접적인 상관 관계를 보이지 않는 것으로 나타났다. Fig. 11은 DL 시험편의 경우 550 kHz에서 검출한 신호의 peak amplitude를 나타낸 것으로 접합 면적과의 선형적 비례 관계를 볼 수 있었는데, 240 kHz의 경우 3장의 적층판을 접합하였을 경우의 공진 주파수와는 무관하며 SL 시험편처럼 2장의 적층판을 접합하였을 때의 3차 공진 주파수이다. DL 시험편에서 또 다른 peak를 보인 180 kHz의 경우, Fig. 12에서 볼 수 있는 것처럼 접합 면적과 peak amplitude가 선형적인 비례 관계가 있었다. 이것은 실제 DL 시험편의 경우 3장의 적층판으로 구성되어 있어 신호의 전달 특성에 영향은 미치지만, 접합 결합 평가에 있어서 주요 관심 부위는 2장의 적층판 사이의 접합면들이므로 2장의 적층판으로 이루어졌을 때의 공진 주파수에서 peak amplitude가 접합 면적과의 좋은 상관 관계를 보이는 것으로 생각된다.

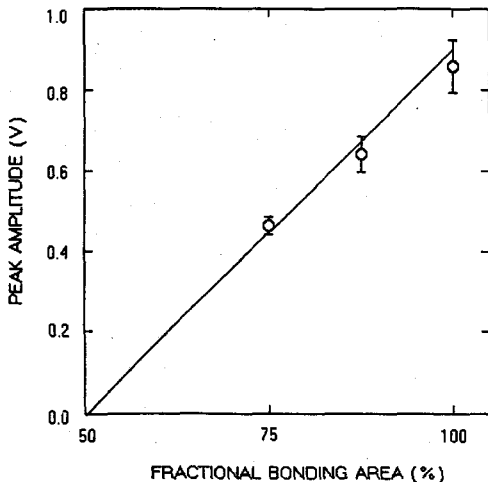


Fig. 12. The results of peak amplitude measurements for SL specimens (180 kHz).

Vary와 Bowles<sup>3)</sup>는 acousto-ultrasonic 기법의 적용시 최적 시험 조건은 파장이 시험편의 두께에 정수배가 되어 공명이 일어날 수 있을 때라고 보고하였으나, 본 실험 결과 접합부가 있을 경우 공진 주파수에서 전달 특성이 좋은 것만은 아니었고, 하나의 접합부를 포함하는 두 적층판의 기본 공진 주파

수 및 3차 공진 주파수가 전달 특성이 좋을 뿐만 아니라 접합면의 평가에도 좋은 결과를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 peak amplitude 측정을 통한 접합 면적의 정량적인 평가를 위해서는 시험편과 동일한 조건의 표준시험편을 제작하여 시험편과 비교함으로써 접합 결합의 크기를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

인공 결합이 내재된 CFRP 복합 재료의 single lap 및 double lap joint 시편의 disbond의 크기를 정량적으로 평가하기 위해, acousto-ultrasonic 기법을 적용하여 접합부를 통과한 여기 응력파의 peak amplitude를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Peak amplitude 측정법의 적용에 의한 최적의 시험 결과를 얻기 위해서는 주파수 변화에 따른 시험편의 초음파 전달 특성을 고려하여 접합부를 가진 두 적층판의 두께 방향 기본 공진 및 3차 공진 주파수의 초음파를 사용하는 것이 좋다.

(2) Peak amplitude는 복합 재료 single lap 및 double lap 접착 접합부의 disbond를 정량적으로 평가할 수 있는 좋은 변수로, 표준시험편만 준비된다면 그 시험 장치 및 실험 방법이 간단하기 때문에 현장 적용이 아주 용이하다고 판단된다.

#### 참고문헌

- 1) S. R. Hall, M. D. Raizenne and D. L. Sompson, Composites, Vol. 20, No. 5, Sep. (1989), pp 479 ~483
- 2) A. Vary, Mat. Eval., Vol. 40, No.6, May (1982), pp 650-662
- 3) A. Vary, and K. J. Bowles, Polymer Engineering and Science, Vol.19, No. 5, Apr. (1979)
- 4) J. S. Lee et al., UCN498-1864.C, NDT Lab. KIMM(1993)
- 5) S. H. Lee and K. T. Kim, J. Institute of Natural Science, Keimyung Univ., Vol.6, (1987) pp 37-40

## **Nondestructive Evaluation of Adhesive Bonding Quality by Measurements of Peak Amplitude of Simulated Stress Wave**

Y. H. Son\*, J. O. Lee\* and S. H. Lee\*\*

\* Korea Institute of Machinery and Metals

\*\* Dept. of Physics, Keimyung Univ.

**Abstract** Disbond size of adhesively bonded single lap and double lap joints CFRP composite specimens has been evaluated using acousto-ultrasonic(AU) technique. Frequency spectra for all specimens were obtained by measuring peak amplitude of the stress wave propagated through the bond-lines. By analyzing these frequency spectra, peak amplitude was found to be proportional to fractional bonding area and to be maxima at the fundamental and the third order higher harmonic frequencies of specimen thickness mode. The disbond size can be evaluated quantitatively and this technique can be applied to real structures if the reference specimens are prepared in advance.

---

*(Received: November 9, 1994.)*