

論文

음향초음파(AU)법에 의한 복합재료 접착접합부의 비파괴적 평가

이승환* · 권오양*

Acousto-Ultrasonic Evaluation of Adhesively Bonded CFRP-Aluminum Joints

Seung-Hwan Lee* and Oh-Yang Kwon*

ABSTRACT

Correlation between the amount of artificial defects in bonded region and the acousto-ultrasonic parameters(AUPs) including signal amplitude and then the static strength of adhesively bonded joints of carbon fiber reinforced plastic(CFRP) laminates and Al6061 plates has been investigated.

The effect of the frequency content and the bandwidth of input signals was studied by using 200kHz, 650kHz, 1MHz, 2MHz pulses and 1MHz tone-burst signals. With increasing fraction of defects, the signal amplitude and AUP1 were decreased whereas AUP2 was increased. This result has been attributed to the energy transfer characteristics of bonded joints with delamination-type defects and the change of spectral content due to the defects. Considering the highly attenuative nature of composite laminates, a pulse signal with major frequency content at the third harmonic of thickness mode resonance, 650kHz for the dimension of specimens used in this study, has been found optimal for acousto-ultrasonic testing of FRP-metal joints.

초 록

CFRP와 Al6061을 접착접합한 시편에서 접착부위에 존재하는 결함의 크기와 음향초음파 변수(AUPs) 사이의 상관관계를 평가하고자 하였다. 입력신호의 주파수 성분에 따른 영향을 알아보기 위해 200kHz, 650kHz, 1MHz, 2MHz의 펄스 신호와 1MHz의 tone-burst신호를 사용하였다. 결함의 양이 많아질수록 출력신호의 진폭(amplitude)과 AUP1은 감소한 반면 AUP2는 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 층간분리형 결함을 가진 접착부를 통과하는 신호의 에너지 전달특성과 결함에 의한 주파수 성분의 변화에 기인한다. 또한, 복합재료의 높은 감쇠율을 고려할 때 시편의 두께방향 공진주파수 부근의 신호가 FRP-금속 접합부의 평가에 있어 가장 효율적임을 알았으며, 본 연구에서는 3차 공진주파수인 약 650kHz가 이에 해당하였다.

1. 서 론

높은 비강도, 비강성을 및 우수한 내피로 특성을 가

진 복합재료는 우주, 항공, 자동차 산업 등의 구조용 재료로서 그 사용이 급격히 증가하고 있다. 이러한 복합재료의 이용에서 접합부가 없도록 설계, 제작하는 것이

*인하대학교 공과대학 기계공학과

이상적이지만 실제 기계 구조물에서는 불가피하게 접합부가 발생하게 된다. 일반적으로 이러한 접합부는 모재에 비해 역학적 특성이 상당부분 저하된다. 이는 접합된 부분품들 사이에 계면영역 혹은 천이구역이 존재하기 때문이며, 만일 접합된 부분들 사이에 조성이나 미세조직이 서로 매우 다르다면, 천이구역은 화학적으로나 미세구조 상으로 뚜렷한 구배를 나타낼 것이기 때문이다. 따라서 기계구조의 성능이 기본구조 보다는 불가피하게 포함된 접합부에 의해 좌우된다.

복합재료의 접합방법으로는 리벳, 볼트, 나사 등의 fastener를 이용하는 기계적 접합방법과 접착제를 이용하는 접착접합의 두 가지 방법이 있다. 접착접합의 경우, 피로수명을 증가시키고 구조의 무게를 줄일 수 있으며, 좀더 균일한 응력 전달능력을 제공하는 근본적인 경향 때문에, 접합 기술의 중요한 부분으로 급속히 발전되어 왔다[1]. 이러한 특성들은 비행기 구조물내의 알루미늄-알루미늄, 알루미늄-복합재료 접합같이 높은 성능을 요구하는 구조물에 대한 적용에서 중요한 역할을 차지하게 된다[2].

일반적으로 초음파, 음향방출(acoustic emission: AE), X-선 등의 비파괴검사 방법들이 복합재료 접착 접합부의 결함검출에 사용되고 있다. 이 중 Vary등에 의해 개발된 음향초음파(acousto-ultrasonic : AU)법은 초음파 신호를 주입하고 AE신호를 탐지하여 분석함으로써, 송신센서와 수신센서 사이의 재료나 구조에 대한 결함이나 손상등의 정보를 파악하는 방법으로, 접합부의 평가에 이를 적용하면 그 사이에 위치한 접합부의 상세한 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다[3].

위와 같은 배경으로부터, 본 연구에서는 인공결함을 내재시킨 CFRP-A16061의 접착접합 시편을 대상으로 AU법을 이용하여 획득된 신호를 주파수 영역에서 처리, 신호에너지 투과계수에 근거한 AUP를 구하고, 시편의 결함 비율과 AUPs 및 진폭(amplitude) 사이의 상관관계를 평가하며, 최종적으로 각각의 시편을 인장 시험을 통해 접착강도를 확인하여, 평판 복합재료 접착 조인트의 접합강도, AUPs 사이의 상관관계를 확립하는 것을 연구의 목적으로 하였다.

2. 이 론

2.1 n차 모멘트와 AUP의 정의

AUP를 정의하기 위해서는 우선 다음과 같은 식으

로 정의되는 파워스펙트럼의 모멘트를 계산한다[4].

$$M_n = \int_0^k W(f) f^n df \dots \dots \dots (1)$$

여기서 f_N 은 Nyquist 주파수, $W(f)$ 는 파워스펙트럼 밀도함수, n 은 정수이다. 실제로는 디지털 영역에서 M_n 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_n = \sum_{i=0}^{n/2} \frac{(W_{i+1} + W_i)}{2} (i\Delta f + f \frac{\Delta f}{2})^n \Delta f \dots \dots \dots (2)$$

여기서, Δf 는 $\Delta f = (1/j\Delta t)$ 로 정의되는 주파수 분해능 이고, Δt 는 샘플링 간격이다. 예를들어, 0차 모멘트 (M_0)는 다음과 같이 정의된다.

$$M_0 = \int_0^k W(f) df, \text{ 또는 디지털 데이터에 대해서는 } M_0 = \sum_{i=0}^{n/2} \frac{(W_i + W_{i+1})}{2} \Delta f \dots \dots \dots (3)$$

M_0 는 스펙트럼 밀도곡선의 아랫부분 면적을 의미하고, 이는 해석적으로 전달되는 에너지의 총량을 의미하며[4, 5], 1차 모멘트 M_1 은 각 주파수에 대한 스펙트럼 밀도의 총합을 의미한다. 그리고, 2차 모멘트(M_2)는 스펙트럼 밀도함수(spectral density function : SDF) 프로파일의 분산을 나타내고, 3차와 4차 모멘트는 각각 SDF의 왜도(skewness)와 편평도(kurtosis)에 관계된다. 즉, 각 차수의 모멘트 중 홀수차의 모멘트는 SDF의 대칭성과 관계하고, 짝수차의 모멘트는 SDF의 프로파일 곡률과 관계있는 것으로 알려져 있다.

이러한 이론을 AU실험에 적용함에 있어서, M_0 를 AUP1으로 정의하면, 이는 받은 신호에너지의 총량을 의미하고, AUP2는 M_1/M_0 로 정의하여 주파수에 대한 SDF의 산술평균을 의미하게 된다. 또한 AUP3는 SDF의 분산계수로써, $(M_2/M_0)^2$ 으로 정의하였으며, AUP4는 스펙트럼 밀도의 분포에 대한 프로파일 곡률을 나타내는 지수로 $(M_4/M_2)^2$ 으로 정의하였다. 여기서, AUP3와 AUP4는 주파수 스펙트럼의 왜율(distortion factor)로 불리우기도 한다[5-7].

3. 실 험

3.1 시편의 제작

본 연구에서 사용한 시편은 일방향으로 16층을 적층한 CFRP 복합재료와 두께 3.2mm의 Al6061을 이용하여 제작하였으며, 접착제로는 Ipc National사의 9923A/B를 이용하고, 접착부위중 알루미늄 부분은 샌드페이퍼를 이용, 복합재료 부분은 아세톤 세척을 통해 표면처리를 하여, Fig. 1과 같이 1"×1"의 접착부위를 갖는 단층 겹치기 접합(single-lap joint: SL)과 복층 겹치기 접합(double-lap joint : DL)을 만들었다. 인공결합의 구성은 Fig. 2와 같이 테플론 테이프의 크기와 위치 및 형상을 조절하여 전체 접착부위에 대한 결합의 비율이 12.5%와 25%가 되도록 시편을 구성하였다.

시편은 Fig. 2와 같이 SL에서 각각의 접착면의 인

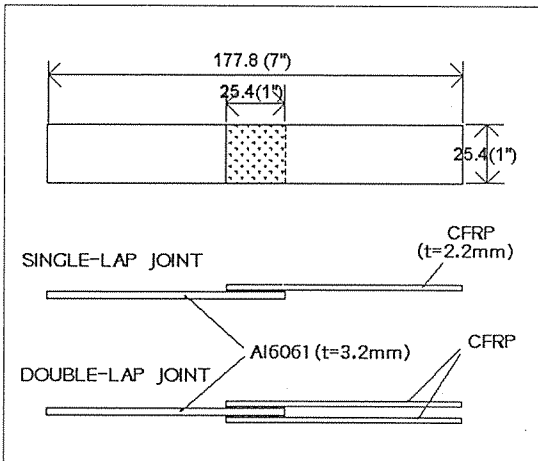


Fig. 1. Dimension and shape of specimens

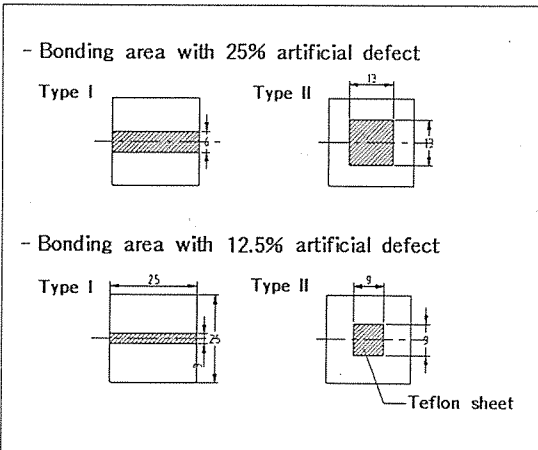


Fig. 2. Shape of bonding area with artificial defects

공결합의 형상에 따라 type I과 II로 나뉘고, 다시 각각의 type별로 12.5%와 25%의 결합을 가진다. 두 개의 접착면을 갖는 DL시편의 구성에 있어서는 한 면은 앞서 SL과 동일한 결합구성에 다른 한 면은 완전접착면을 조합하여 6.25%, 12.5%의 인공결합을 갖는 시편을 제작하였다. 또한, 인공결합이 내재된 각각의 시편에 대해 기준이 될 완전접착 시편을 SL, DL에 대하여 각각 제작하였다.

3.2 실험장치 및 방법

준비된 시편은 초음파 C-scan 방법으로 접합상태를 관찰하여, 시편이 본래의 의도된 목적에 맞게 인공결합의 크기 및 위치를 가지고 제작되었는지를 확인하였으며, 이때 사용된 초음파 C-scan 장비는 Physical Acoustics사의 UltraPac II를 이용하였다. C-scan을 통해 정량적인 인공결합의 크기가 확인된 시편이 실험에 사용되었으며, 본 실험에서는 Fig. 3의 장치구성도에서 볼 수 있는 바와 같이, 초음파 신호를 주입하기 위해 Gage Applied Science사의 임의파형발생기인 CompuGen 840에서 생성된 신호를 ENI사의 ENI-240L 광대역 증폭기를 이용하여 증폭(50dB)한 후, 각각의 입력신호에 대해서 200kHz의 펄스신호와 650kHz 펄스신호는 Krautkrämer사의 K0.5S 초음파 센서를, 1MHz 펄스신호와 1MHz의 tone-burst 신호는 동사의 B1S 초음파 센서를 통해 시편에 주입하였고, 2MHz의 펄스 신호 주입시 또한 Krautkrämer사의 KB-A(2.25)센서를 이용하였다. 그리고 신호의 획득과정에서는, PAC사의 AE센서를 이용하여 전달된 신호를 획득하였으며, 획득된 신호는 대역통과 필터(100kHz-1.2MHz)가 내장된 1220A 전치증폭기를

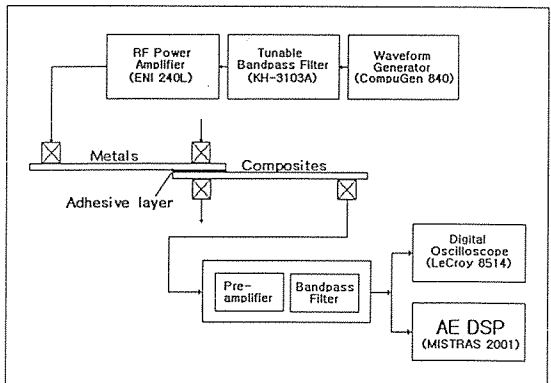


Fig. 3. Schematic diagram of experimental setup

통해 증폭되고, AE DSP처리장치인 MISTRAS-2001로 이를 관측하였다. AE DSP를 통해 디지털이징한 신호를 FFT 처리하여 주파수 스펙트럼으로 변환하고, 그로부터 AUPs를 계산하였다. 또한 측정의 정확성 및 재현성을 위해 동일한 실험을 반복하였다.

위의 방법을 통해 AUPs 계산이 완료된 시편은 인장 시험기를 이용하여 접착강도를 구하였다. 접착강도와 인공결합을, 그리고 AUPs 및 진폭(amplitude)과의 상관관계를 알아보았다.

4. 결과 및 고찰

4.1 초음파 C-scan

Fig. 4는 준비된 인공결합이 포함된 시험편을 초음

파 C-scan 실험을 통한 결과이다. Fig. 4(a)는 type I 시편중 결합비율 25%의 SL시편의 결과이고, Fig. 4(b)는 12.5%의 결과이다. 또한, Fig. 4(c)는 type II 시편중 결합비율 25%의 SL시편의 결과이고, Fig. 4(d)는 12.5%의 결과이다.

시편 구성 및 제작시 이용된 테플론 테이프의 두께는 약 100 μ m 정도로 상당히 얇은 상태이므로, C-scan시 테플론 테이프 부분에서 반사되는 초음파 에코 신호의 추출이 곤란하였으며, 또한 제작된 각각의 시편들의 접착층 두께가 다소 차이를 보임으로써 Fig. 4에서 보이는 C-scan 결과의 질이 다소 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 전체적인 형태를 비교하여 볼 때, Fig. 4에서 나타나는 결과의 인공결합의 크기, 위치 및 형태는 Fig. 2와 같은 형태로, 최초 시편 구성시 의도한 목적에 맞게 위치하고 있음을 알 수 있다.

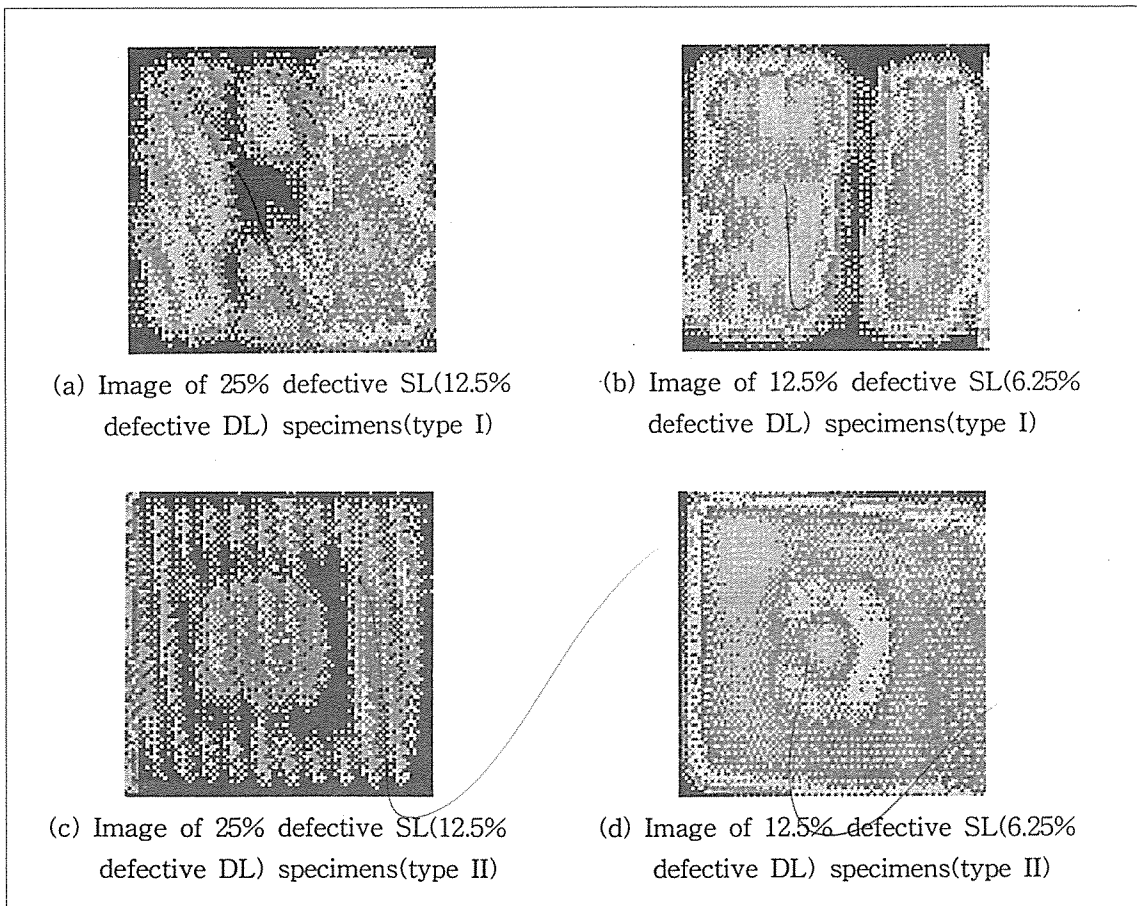


Fig. 4. C-scan images of specimens with artificial defects

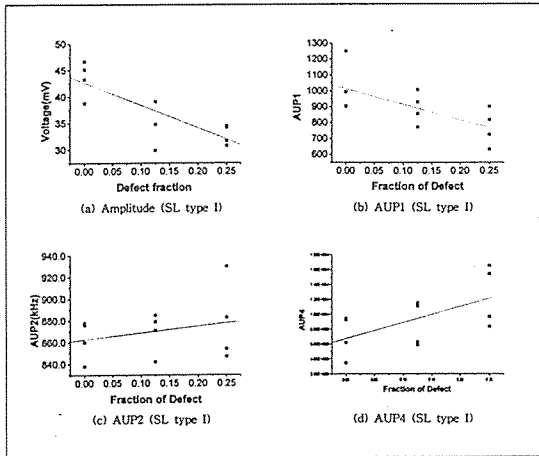


Fig. 5. Results of AU measurement for type I specimens of single-lap joints using an 1MHz pulse input

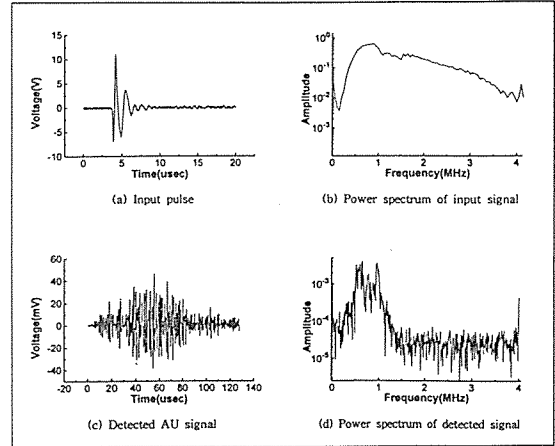


Fig. 6. Waveforms and power spectra of the input and the detected signals

4.2 인공결합을 증가에 따른 AUPs의 변화

Fig. 5는 1MHz 펄스 신호를 주입하였을때 얻은 신호로부터 계산된 진폭(amplitude), AUP1(M0), AUP2와 AUP4가 인공결합의 양에 따라 변화하는 경향을 보여주는 결과이다. 여기서 결합의 양의 증가에 따라 진폭(amplitude)과 AUP1은 선형적으로 감소하고 동시에, AUP2와 AUP4는 증가함을 볼 수 있다. Amplitude와 AUP1의 감소하는 경향은 센서를 통한 입력신호가 테플론 테이프를 사용한 인공결합을 통과하며 감소되므로, 결합의 양이 증가할수록 신호의 진폭과 에너지가 감소하는 것으로 이해할 수 있으며, 이러한 경향은 접합부의 형상이나 결합의 종류가 다른 경우에도 비슷하게 나타나는 점에서 볼 때, 결합의 양에 일차적으로 의존하는 것임을 알 수 있다.

Fig. 6에는 이때 사용한 1MHz pulse 입력신호와 이 신호가 시편을 통해 출력된 신호, 그리고 각각의 신호의 주파수 스펙트럼을 나타내었다. Fig. 6(b)에서와 같이 실제 입력신호는 중심주파수 1MHz에 다소 광범위한 주파수 대역을 갖는 전형적인 펄스신호이지만, Fig. 6(d)의 출력신호 스펙트럼에서는 입력성분인 1MHz 성분 외에 650kHz에도 주요 성분이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이에따라, 처음 입력신호로 선택한 200kHz, 1MHz, 2MHz 펄스 신호에 650kHz 펄스 신호를 입력으로 추가하여 실험을 하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 5에서 1MHz 펄스 신호를 통해 얻은 결과와 마찬가지로 전체적인 경향은 상당부분 유사한 것을 볼 수 있다. 그러나, 650kHz에서의 결과가

1MHz에서의 결과에 비하여 그 경향이 더욱 뚜렷하며 데이터의 산포 또한 현저히 줄어든 것을 알 수 있다.

이상과 같은 결과 중 AUP2와 AUP4가 결합의 양에 따라 증가하는 경향을 설명하기 위하여 각 조건에 대한 주파수 스펙트럼을 비교하였다. Fig. 8은 각각의 결합비율에 대하여 시편을 통과한 후 획득된 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 시편의 결합비율이 증가할수록 300-400kHz의 주파수 성분은 급격히 감소하는 반면, 500-600kHz의 주파수 성분들은 거의 변함이 없음을 볼 수 있다. 즉, 결합의 비율이 증가할수록 높은 주파수성분의 신호가 낮은 주파수성분의 신호보

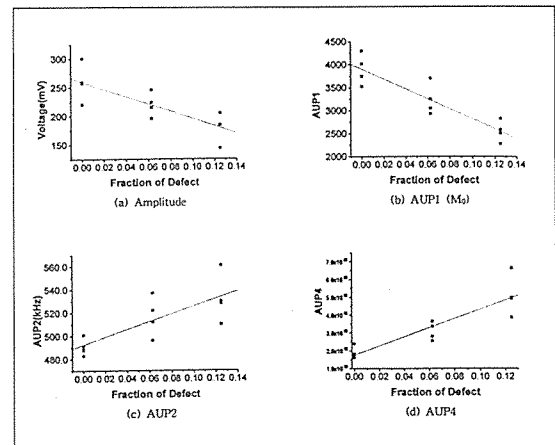


Fig. 7 Results of AU measurement for type II specimens of double-lap joints using a 650kHz pulse input

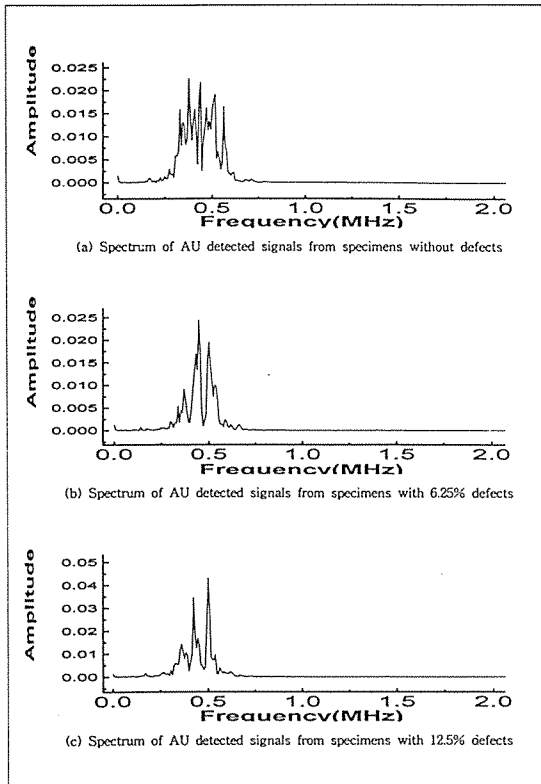


Fig. 8. Power spectra of AU detected signals from the measurements for type I specimens of double-lap joints using a 650kHz pulse input

다 상대적으로 큰 영향력을 가지므로, 획득된 신호의 주파수에 대한 산술평균을 의미하는 AUP2와 AUP4는 증가함을 알 수 있다. 또한, 편평도에 반비례하는 AUP4의 증가하는 경향도 같은 논리로써 설명이 가능하다. 즉, 300-600kHz에 걸쳐있던 스펙트럼의 형태가 500-600kHz성분으로 집중됨으로써 편평도가 감소하기 때문이다. 이는 전체적인 스펙트럼의 형태의 비교를 통해 이루어지는데, 먼저 Fig. 8(a)의 완전접착시편을 통한 신호의 스펙트럼의 경우 상대적으로 많은 성분을 갖는 분포로 스펙트럼이 이루어져 있으나, Fig. 8(b)와 (c)에서 시편의 결함비율이 증가할수록 주요 성분의 수가 감소하면서, 에너지가 특정한 주파수대에 집중되는 스펙트럼의 형태를 보여주고 있다.

4.3 입력신호 주파수에 따른 AUPs의 변화

AUP에 미치는 입력신호의 주파수 성분의 영향을 알아보기 위하여 200kHz, 650kHz, 1MHz, 2MHz

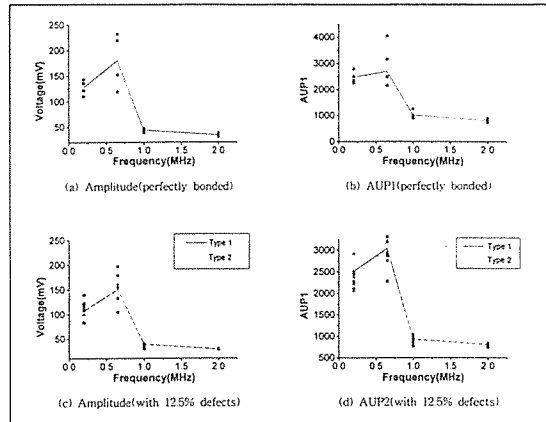


Fig. 9. The effect of frequency content of input signals on AU parameters from the measurements for specimens with single-lap joints

펄스 신호를 입력신호로 하였을때 얻은 결과는 Fig. 9와 같다. 이 결과로부터 결함의 양에 불문하고 전체적인 그래프의 양상은 200kHz에서 650kHz로 입력신호의 주파수성분이 증가함에 따라 진폭(amplitude)과 AUP1은 증가하여 650kHz에서 최대값을 갖고, 이후 1MHz와 2MHz로 입력신호 주파수가 증가하면 그 값은 급격히 감소함을 볼 수 있다.

본 연구에서 이용된 측정기기의 조건에서 1MHz의 입력신호를 통한 결과는 거의 탐지할 수 있는 최소값이었다. 그러므로, 보통 100-1200kHz로 탐지조건이 정해진 AE 신호처리 장치를 이용하여 이러한 연구를 수행함에 있어서 1MHz보다 높은 주파수를 갖는 입력신호를 이용한다는 것은 결과의 신뢰성 및 효용성을 거의 기대할 수 없다고 판단된다.

입력신호의 주파수 성분이 AU실험의 결과에 미치는 영향을 물리적으로 설명하기 위하여 접착부에 결함을 갖는 시편의 두께방향 공진주파수의 개념을 도입하였다. 공진주파수, f_r 은 다음의 식으로 계산된다.

$$f_r = \frac{n}{2} \frac{v}{d} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots(4)$$

여기서, n 은 공진주파수의 차수를, v 는 재료내의 초음파의 전달속도를 그리고 d 는 시편의 두께를 나타낸다[8].

본 연구에서 사용한 시편은 알루미늄(Al6061)과 복합재료(CFRP)로 각각 서로 다른 재료를 접착하여 제

Table 1. Calculated resonant frequencies and their harmonics at each thickness (kHz)

두께	재료	f_1^*	f_2	f_3
5.4mm (SL)	알루미늄	289.8	579.6	869.4
	CFRP	203.7	407.4	611.1
9.6mm (DL)	알루미늄	163.0	326.0	489.0
	CFRP	114.6	229.1	343.7

작하였으므로, 각각의 재료 내에서 초음파의 전달속도는 서로 다르다. 그러므로 이러한 시편에 대하여 (4)식을 이용한 정확한 공진주파수를 계산한다는 것은 매우 어렵하다. 이러한 이유 때문에 본 연구에서는 시편의 공진주파수 값을 Al-Al 접합, CFRP-CFRP 접합의 동일재료 접착시 각각의 공진주파수의 중간값으로 가정하였다. Table 1 은 동일재료 접합시 SL경우 두께 5.4mm 그리고 DL경우 두께 9.6mm에 대하여 각각의 공진주파수를 계산한 결과를 보여준다.

위와 같은 가정을 통해 본 연구에서는 200kHz와 650kHz를 각각 기본 및 3차 공진주파수로 하였다. 또한 결함의 양에 따른 AUPs의 경향은 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 650kHz의 신호를 이용하였을 때 가장 효과적임을 알 수 있었다.

본 연구에서 시편은 접착부에 층간분리(delamination) 형태의 인공결함을 갖도록 설계되었기 때문에 결함의 양이 증가할수록 접착부의 유효두께는 실질적으로 감소하게 된다. 이는 식(4)에서 시편의 두께, d의 감소를 유발하게 되고, 최종적으로 공진주파수의 증가를 가져오게 된다. 이러한 이유로 결함의 양이 증가할수록 획득신호의 파워스펙트럼에서는 주요성분이 고주파 영역에 치우친 형태로 스펙트럼이 나타나게 된다. 이러한 결과로써 결함의 양이 증가할수록 AUP2가 증가한다는 것이 다시 한번 설명되고 입증될 수 있다.

4.4 인장시험 결과

Fig. 10은 인장시험을 통해 얻은 type I SL 시편의 접착강도를 보여준다. 이 결과로부터 12.5%에서 25%로 결함비율이 증가함에 따라, 접착강도는 선형적으로 감소함을 볼 수 있다. 그러나, 무결함 시편에서 12.5%로 결함이 증가할 때는 오히려 접착강도가 증가함을 볼 수 있다. 이는 인장시험 중 어느 한 부분에서 접착부 분리가 일어났고 동시에 접착부 전체에 층간분리가 일어나는 무결함 시편과는 달리, 이미 존재하는 접착불량(disbond)인 인공결함부위를 중심으로 양쪽으로 두

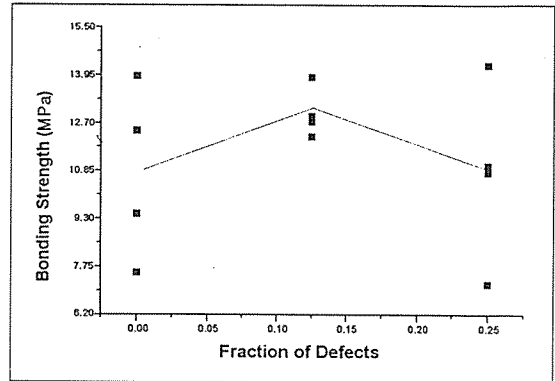


Fig. 10. Results of tensile test for type I specimens of single lap joints

개의 접착부를 갖는 결함시편에서는 접착부 파괴가 두 부분에 나뉘어서 진행이 되므로, 무결함 시편의 접착강도보다 오히려 더 높은 값을 갖는 것으로 판명되었다. 그러나 결함이 증가함에 따라 접착강도는 감소하는 경향을 보이는 것으로부터 소량이라도 결함을 가진 시편끼리 비교한다면 결함의 양이 증가함에 따라 접착강도는 감소한다는 사실을 알 수 있다.

4. 결 론

인공결함이 내재된 CFRP와 알루미늄의 접착점합부를 평가하기 위하여, 음향초음파(AU)법을 적용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 금속-복합재료 접착점합부에 대한 음향초음파법을 이용한 평가에 있어서 사용하는 입력신호로는 좁은 주파수 대역의 tone-burst 신호보다는 광범위한 주파수 대역을 갖는 펄스 신호가 효과적이다.

2. 신호의 에너지 전달특성은 입력신호의 주파수 성분에 의해 상당부분 영향을 받으며, 최적의 결과를 얻기 위해서는 입력신호의 주파수를 시편 두께방향의 기본 공진주파수와 3차 공진주파수를 이용하는 것이 좋다.

3. 접착부위의 인공결함 크기와 AUPs의 변화에 대한 관계는 획득된 AU신호의 주파수 성분의 변화에 기인하며, 이러한 주파수 성분의 변화는 내재된 인공결함의 크기가 증가함에 따라 접착부의 유효두께가 감소하기 때문에 나타나는 것으로 볼 수 있다.

4. 접착부위의 인공결함의 크기와 접합강도 사이의 관계는 결함의 크기뿐만 아니라, 결함의 형태 및 접착

상태에도 상당부분 영향을 받으며, 이로 인한 접합강도의 변화는 인장시험 시 접착부의 층간분리 양상에 의존한다.

후 기

본 논문은 1996년도 교육부 기계공학분야 연구비 지원에 의하여 수행된 연구과제(ME-96-C-18)의 결과이며, 이에 감사드립니다.

5. 참고 문헌

1. 이대길, 김기수, 전의진, "토오크를 받는 접합원형 single lap 조인트의 피로특성에 관한 연구", 한국 복합재료학회지, 제3권 제1호, 1990, pp.1-9.
2. Chapman, Jr., G. B., "A Nondestructive Method of Evaluating Adhesive Bond Strength in 7Fiberglass Reinforced Plastic Assemblies", Joining of Composite Materials, ASTM STP 749, K. T. Kedward, Ed., American Society for Testing and Materials, 1981, pp.32-60.
3. Vary, A., and Bowles, K. J., "An Ultrasonic-

Acoustic Techniques for Nondestructive Evaluation of Fiber Composite Quality", Polymer Engineering Science, Vol. 19, No. 5, 1979, pp.373-376.

4. Tiwari, A., and Henecke, Jr., E. G., "Real Time AU-NDE Technique to Monitor Damage in SiC/CAS Ceramic Composites under Dynamic Loads", ASTM STP 1184, M.R. Mitchell and O. Buck, Eds., ASTM, Philadelphia, PA, 1994, pp.363-375.

5. Dickstein, P.A., et al., "Ultrasonic Feature-Based Classification of the Interfacial Condition in Composite Adhesive Joints", Res. in Nondestructive Evaluation. Vol. 2, No. 4, 1990, pp.207-224.

6. Kiernan, Michael T., and Duke, Jr., John C., "A Physical Model for the Acousto-Ultrasonic Method", NASA CR185294, October, 1990.

7. Hearn, Grant E., and Metcalfe, Andrew v, "Spectral Analysis in Engineering: Concepts and Cases", ARNOLD, 1995.

8. 손영호, 이종오, 이승희, "모의 음향 방출 신호의 Peak Amplitude 측정을 통한 복합재료 접합부의 비파괴평가", 비파괴검사학회지, 제15권 제2호, 1995, pp.367-363.