

레이저 여기 램파를 이용한 항공기 판재 접합부의 비접촉식 초음파 검사

Non-Contact Ultrasonic Testing of Aircraft Joints using Laser Generated Lamb Wave

장경영*, 김홍준**, Donatella Ceringlia***, Boro Djordjevic****

Kyoung-Young Jhang*, Hong-Joon Kim**, Donatella Ceringlia*** and Boro Djordjevic****

초 록 접착제와 리벳으로 접합된 항공기 판재의 접합부는 접합 불량, 크랙, 피로 결함이나 부식 등에 의해 손상되고 열화될 수 있으며 이런 결함을 전 영역에 걸쳐서 신속하고도 신뢰성 있게 검사하는 것은 항공기 안전을 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해 항공기용 알루미늄 판재의 램 스플라이스 접합 연결부의 접합 품질을 비접촉 방식으로 수행할 수 있는 초음파 비파괴 평가법을 제안한다. 여기서는 레이저를 이용해 램파를 발생시키고 비접촉식 트랜스듀서 (공기정합 용량형 트랜스듀서)를 이용해 피치-캐치 방식으로 검사한다. 레이저 소스로는 Q-스위치된 Nd:YAG 레이저가 이용되며 배열 형태의 직선 슬릿을 갖는 마스크를 이용해 특정 모드의 램파를 발생시켜 이용하였다. 접합부의 한 쪽에서 발생된 레이저 여기 초음파는 판을 따라 전파하여 접합부를 지나 반대편에서 수신되고 수신된 신호의 특성과 접합부의 품질과의 관련성을 조사하였다.

주요 용어: 레이저 여기 초음파, 램파, 공기정합 용량형 트랜스듀서, 램 접합부, 비접촉 비파괴 검사 및 평가

Abstract Due to aging, adhesively bonded and riveted aircraft lap joints can contain disbonds, cracks around rivet holes, fatigue induced flaws, and corrosion. It is required for the safety of aircraft to inspect these defects through the whole region of joint in rapid speed. Bond quality of adhesively bonded and riveted aluminum lap splice joints is investigated using non-contact remote ultrasonic nondestructive evaluation (NDE). Non-contact ultrasonic tests are performed using laser generation and air-coupled transducer detection. A Q-switched Nd:YAG laser and a periodic transmission mask are used to generate a selected Lamb mode. The Lamb wave is generated on one side of the lap splice joint, propagates along the plate, interacts with the joint and is detected on the other side by a micromachined air-coupled capacitance transducer. Analysis of recorded signals allows to evaluate the condition of the bond.

Keywords: laser ultrasound, lamb wave, air-coupled capacitance transducer, lap joints, non-contact NDE/I

1. 서 론

접착제와 리벳으로 연결된 항공기 램 접합부는 항공기 사용 시간의 증가에 따라 리벳 결함, 보이드, 부식 등에 기인하는 크랙이나 들뜸 (disbond)을 발생시키게 된다. 따라서 항공기 운영 중에 정기 검사를 통해 이런 결함을

찾기 위한 신뢰성 있는 비파괴 검사 기술이 필요하다.

이런 목적으로 종래로부터 여러 가지 NDE/I 기법이 활용되어 왔으나 그 중에서도 초음파는 감도, 경제성 등에 있어 유리하기 때문에 접합 불량과 같은 기계적 결함이나 크랙의 평가에 효과적인 수단으로 이용되어 왔다[1]. 그러나 기존의 항공기 검사용 초음파 기술에서는 대부분

(접수: 2001. 2. 23) *한양대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791)
 한양대학교 대학원, * Department of Mechanics and Aeronautics, University of Palermo, 90128 Palermo, Italy, ****
 Center for Nondestructive Evaluation, The Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA

접촉식 트랜스듀서를 이용하였으며, 따라서 넓은 영역의 검사에는 시간 소요가 많고 자동화와 현장 적용에 어려움이 있었다. 결과적으로 신속하고 보다 효율적인 검사 기법의 개발이 필요하게 되었다.

이와 같은 요구에 따라 기계적인 접촉이나 커플링을 사용하지 않는 비접촉식 검사 기술이 주목을 받게 되었다. Fig. 1은 항공기 검사를 위해 제안된 비접촉식 초음파 검사 방식을 예시한다[2,3]. 즉, 전자유도형 트랜스듀서(EMAT: electromagnetic acoustic transducer), 레이저 방식, 공기 정합 트랜스듀서 (air-coupled capacitance transducer) 등이 단독으로 또는 조합으로 이용되는 기술에 대한 검토가 이루어졌다[4-7].

그러나 EMAT는 여전히 검사체 표면에 매우 가깝게 근접시켜야 하고, 레이저 수신 방식은 감도가 낮고 잡음에 민감하다. 공기 정합 트랜스듀서에 의한 송수신을 고려할 수 있으나 공기와 고체 사이의 음향 임피던스 관계를 고려하면 레이저를 이용한 초음파의 발생과 공기 정합 트랜스듀서에 의한 수신 방식을 결합하는 것이 보다 효과적이다[8,9]. 레이저를 이용하면 초음파를 검사체의 표면에 직접적으로 발생시킬 수 있으며 송신과정에서의 공기/알루미늄의 경계를 한 단계 생략할 수 있어 보다 큰 에너지의 초음파가 전파될 수 있고, 공기 정합 트랜스듀서에 의해 수신되는 초음파의 세기와 신호대 잡음비를

증대시킬 수 있다.

본 연구에서는 항공기 판재의 리벳 램 접합부의 접합 품질을 비접촉으로 신속하게 평가하기 위하여 레이저에 의한 램파 (Lamb wave)의 발생과 공기 정합 용량형 트랜스듀서에 의한 수신 시스템을 구축하고 이 방법의 특성과 실적용 가능성을 검증하고자 하였다.

램파는 판재 접합부의 전체 검사에 매우 효과적이다 [10,11]. 그러나 램파는 여러 가지 모드가 존재하고 분산적이기 때문에 수신 신호의 변화로부터 접합부의 품질을 용이하게 평가하기 위하여는 특정 모드의 한 성분만을 발생시키고 수신할 필요가 있다[12]. 이를 위하여 본 연구에서는 주기적인 슬릿 배열 형상의 마스크를 제작하여 레이저 조사 경로에 삽입하였으며 이것은 배열 형상의 라인 소스 (line source)와 동등한 효과를 갖는다. 이 때 마스크 슬릿의 공간 주파수는 발생하고자 하는 램파 모드의 파장과 같다.

2. 시스템의 구성 및 실험 방법

비접촉으로 초음파를 발생시키고 수신하기 위한 시스템을 Q-스위치된 Nd:YAG 레이저와 용량형 트랜스듀서를 이용하여 Fig. 2와 같이 구성하였다. 여기서 레이저 빔은 빔폭을 확장하고 검사체 표면에 가까이 설치된 주기적인 선형의 슬릿을 갖는 마스크에 조사된다. 슬릿은 램파의 특정 모드에 해당하는 파장과 동일한 간격으로 배열되어 있다. 이런 슬릿을 이용하는 것은 다음과 같은 배열 선형 광원 (array line source)과 동등한 효과를 얻기 위한 것이다. 즉, 라인 슬릿을 이용하므로 슬릿에 수직인 방향으로 최대의 에너지가 전파하는 지향성을 갖게 되고 이 지향성은 슬릿의 개수가 많을수록 강해지며, 이런 지향성은 검사 영역을 국소화하여 결함의 위치를 정확히 규명하는데 유리하다. 또 슬릿의 배열 간격은 발생되는 램파의 파장에 일치하여 특정한 램파 모드를 효과적으로 발생시킬 수 있으며, 슬릿의 개수가 증가할수록 협대역 신호를 발생시킬 수 있고 신호의 S/N비도 향상된다.

제안하는 검사 시스템은 피치-캐치 (pitch-catch) 방식, 즉 램파를 접합부의 한 쪽에서 발생시키고 판재를 따라 전파한 램파를 접합부의 반대측에서 용량형 트랜스듀서로 수신하는 방식으로 구성된다. 단, 이 때 트랜스듀서는 일정 각도 경사지게 배치되며 이 각도는 수신하고자 하는 램파의 모드가 가장 잘 수신될 수 있는 각도이어야 한다.

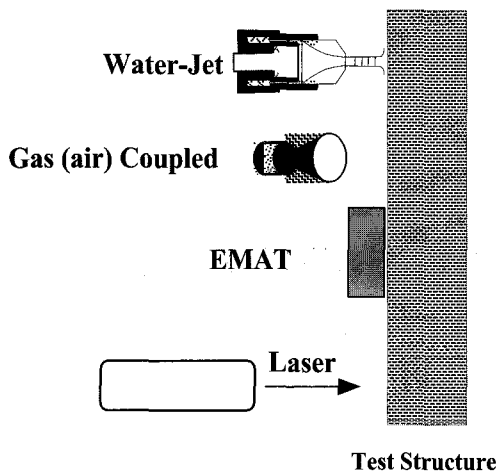


Fig. 1 Remote ultrasonics sensors suitable for scanning of aircraft structures. All other ultrasonic transducers require contact and must be located in close proximity to the surface. Surface proximity is also an issue for electromagnetic acoustic transducers (EMAT's)

검사에 적절한 램파 모드는 일단 마스크를 이용하기 전에 한 개의 라인 소스를 이용하여 일반적인 램파를 발생시키고 판재의 재질과 두께 및 전파속도의 분산곡선을 고려하여 모드를 규명한 뒤 가장 전파가 잘 되는 모드를 선택함으로써 결정할 수 있다.

수신된 신호는 Cooknell 전하증폭기로 증폭되고 0.3MHz의 하이패스 필터를 통해 주변 소음 등과 같은 저주파수의 잡음을 제거하였다. 마지막 단계로 신호는 레이저 트리거에 동기하여 동작하는 디지털 오실로스코프에 표시되고 저장된다.

구성된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 실제 항공기 패널과 유사한 리벳 접합을 갖는 램 스플라이스 조인트 (lap splice joint)를 제작하였다. 즉, 두 개의 판재를 30mm 폭에 걸쳐 겹치도록 하여

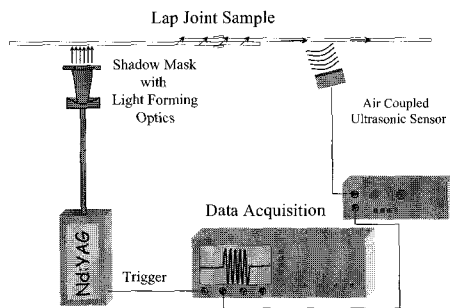


Fig. 2 System configuration for laser generation of single mode Lamb wave and air-coupled detection

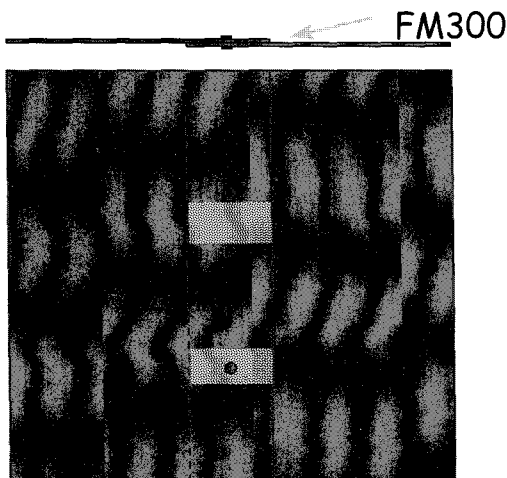


Fig. 3 Illustration of the lap joint sample

FM300 접합 필름을 이용하여 177 °C (350 °F)에서 1시간 동안 열처리(curing) 함으로써 접합하였다. 또한 접합하기 전에는 세척과 예칭 과정 등이 선행되는데 이는 접합 품질이 접합재와 판재 표면사이의 화학적 반응에 크게 의존하기 때문으로 이러한 과정은 실제 항공기 판재 접합과 동일한 과정이다. 판재의 재질은 알루미늄 합금 7075-T6 이며 두께는 1.6mm이다. 접합부는 다시 4mm 직경의 일련의 알루미늄 리벳 접합으로 강화되었다. 제작된 샘플은 인위적으로 2개소에 들뜸 결함을 가지며 Fig. 3에 그 위치를 나타내었다.

실험에서는 샘플 패널을 상하로 일정 간격 이동시키며 램파의 송수신을 실시하였다. 레이저의 파장은 1.06 μ m, 펄스폭은 10ns이다. 레이저 에너지는 약 0.3J로 하였으며 빔폭을 확장하여 조사하는 관계로 이 정도의 에너지라도 열탄성 영역의 초음파가 발생한다. 마스크의 슬릿의 길이가 14mm이며 공간주파수 2.1mm로 6개 배열되었고 슬릿 폭은 1mm로 하였다. 트랜스듀서의 경사각은 동일한 레이저 입사 조건에서 최대의 램파 에너지가 검출되는 각도로 결정하였으며 본 연구의 경우 샘플 표면에 수직인 방향으로부터 8°의 각도이었다. 마스크의 중심으로부터 트랜스듀서 중심까지의 거리는 100mm로 하였으며, 트랜스듀서의 샘플표면으로부터의 이격거리는 18mm이었다. 단, 여기서 이격거리를 0mm부터 50mm까지 변화시켰을 때 수신 신호의 진폭 변화는 크지 않았으며 50mm 이후부터는 다소 진폭의 감소가 두드러지는 경향을 보였으나 사용된 트랜스듀서의 경우 이격거리를 100mm 까지 하여도 측정이 가능하였다.

3. 레이저 여기 램파의 특성 분석 결과

발생시킨 램파의 특성을 확인하기 위하여 레이저를 조사한 쪽의 판재에서 신호를 수신하였다. Fig. 4는 대표적인 신호를 보여주며 Fig. 5는 스펙트럼을 보여준다. 슬릿의 개수가 6개이므로 6 파장분의 신호가 발생되었음과 주파수가 1.2MHz임을 알 수 있다. 한편 Fig. 5에서는 슬릿을 한 개만 이용했을 때의 신호의 스펙트럼을 비교하여 보여주고 있는데 슬릿을 한 개만 사용한 경우 발생되는 신호는 펄스 형태가 되고 따라서 상대적으로 스펙트럼의 폭이 넓어지게 된다. 이에 대해 제안하는 경우의 신호는 협대역 신호임을 보여주고 있다.

한편 측정된 주파수 및 위상속도와 판재의 두께를 고려한 알루미늄의 분산 곡선, 즉 위상속도와 주파수×두께 (C_{ph} vs. $f \times d$)의 관계로부터 발생시킨 램파의 모드는 A_0

모드에 해당함을 알 수 있었다. 이 모드의 파장은 2.1mm 이다.

다음은 발생시킨 램파의 지향성을 확인하기 위하여 수신 위치를 슬릿 라인과 동일한 방향으로 이동시켜 가며 신호의 진폭을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

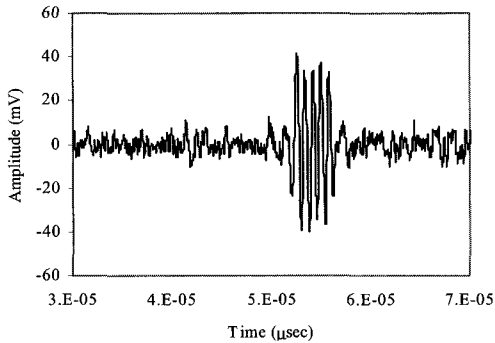


Fig. 4 Signal waveform from an aluminum plate without joint

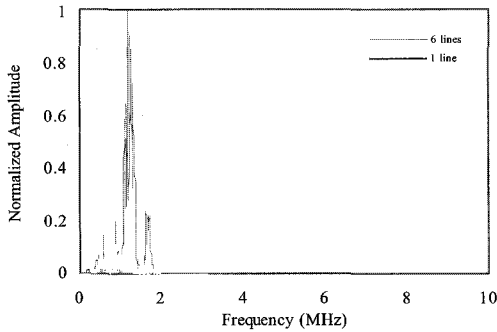


Fig. 5 Comparison of spectrum of waveform detected for 6 line slits and single line slit

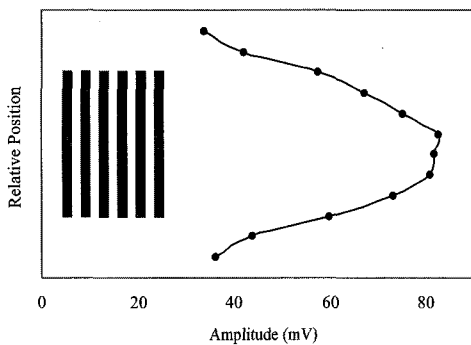


Fig. 6 Directivity test result: Distribution of signal amplitude measured at several locations with 2mm step along the direction of slit line

신호의 진폭이 3dB 감소하는 폭은 거의 슬릿의 길이와 같았으며 매우 양호한 지향성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

4. 접합부 검사 실험 결과 및 고찰

다음은 제작된 샘플의 접합부에 대한 실험 결과이다. Fig. 7은 양호한 접합부와 들뜸 결합부 및 그 중간 위치에서 측정된 대표적인 신호를 보여준다. (a)가 양호한 접합 영역에서 측정된 것이며, (b)는 중간 영역, (c)는 들뜸

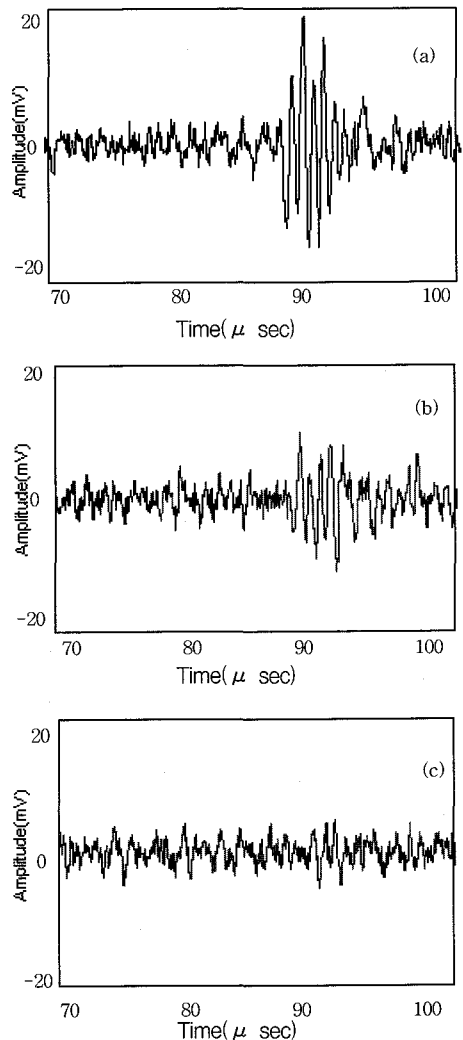


Fig. 7 Signal waveforms from (a) a good-bonded region, (b) a transition region to the disbond, and (c) a disbonded area

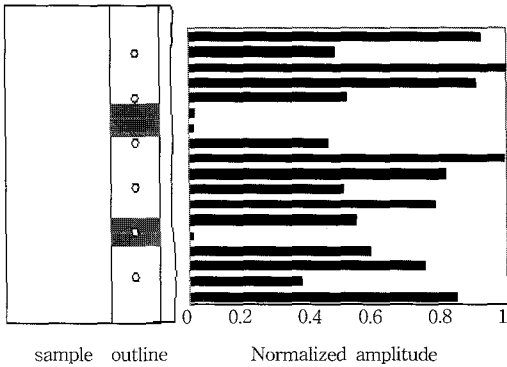


Fig. 8 Normalized ultrasonic signal amplitudes positioned relatively to the tested regions in the sample

영역에서 각각 측정된 것이다. 램파가 접합부를 통과하면서 파형에 약간의 변화가 수반되어 Fig. 4의 파형과는 다소 다르게 나타났으나 주파수 성분은 여전히 1.2MHz이다. 미루어 짐작할 수 있듯이 신호는 들뜸이 있는 곳에서 수신 진폭의 큰 감소를 나타내어 거의 배경 잡음과 구분하기가 어려운데 반해 양호한 접합부를 통과한 램파는 상대적으로 진폭이 매우 크게 수신되었다.

Fig. 8은 샘플의 접합부를 따라 5mm 간격으로 레이저 조사와 수신 위치를 동시에 이동시키며 신호의 진폭을 측정할 결과를 보여준다. 막대그래프의 크기는 최대 진폭으로 정규화한 진폭의 크기를 나타낸다. 결과는 리벳이 있는 부분에서 약 7dB 정도로 신호가 감쇠하여 나타나는 것을 보여주고 있으며 들뜸 결합이 있는 곳에서는 배경 잡음과 거의 분간할 수 없는 정도로 현저한 신호의 감쇠를 보여주고 있다. 이런 경향은 반복된 실험에서도 재현성이 매우 높게 나타났다.

이상의 실험결과로부터 램파를 레이저로 발생시키고 이를 비접촉 용량형 트랜스듀서로 검출하여 수신 신호의 진폭을 관찰하는 방법이 판재 접합부의 들뜸 결합 검사를 비접촉으로 수행하는데 매우 효과적임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

접착제로 접합되고 리벳 접합으로 보강된 항공기용 판재의 접합 품질을 비접촉으로 검사하기 위한 검사 시스템을 레이저와 용량형 트랜스듀서를 이용하여 피치-캐치 방식으로 구성하였으며 그 성능을 실증적으로 검증하기 위하여 실제 항공기 판재 접합 과정과 동일한 과정으로

제작한 샘플을 대상으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Q-스위치된 Nd:YAG 레이저와 선형의 슬릿 배열을 갖는 마스크를 이용하여 특정 모드의 램파를 효과적으로 발생시킬 수 있었다. 발생된 램파는 미세 가공된 공기정합 용량형 트랜스듀서를 이용하여 비접촉으로 검출할 수 있었으며 단, 이용하는 램파의 모드에 따라 최대 수신감도를 나타내는 경사각이 존재하므로 이를 먼저 찾아내어 이용할 필요가 있었다.

샘플에 대한 실험 결과 램파의 수신 진폭이 판재의 접합 품질과 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었으며 이로부터 제안하는 램파를 이용한 비접촉 검사 방식이 항공기 판재용 램 스플라이스 조인트에 대한 신속하고 신뢰성 높은 방법임을 검증할 수 있었다.

이와 같은 연구결과는 향후 레이저 여기 초음파의 활용분야를 확대하고, 공기 정합 용량형 트랜스듀서와 조합된 새로운 형태의 레이저 초음파 시스템으로서 발전하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2000년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 장비 지원과 샘플 제작에 협력해 주신 Johns Hopkins University, Center for NDE의 관계자 여러분께도 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. L. Rose, K. M. Rajana, and M. K. T. Hansch, "Ultrasonic guided waves for NDE of adhesively bonded structures," *J. Adhesion*, Vol. 50, pp. 71-82 (1995)
- [2] B.B. Djordjevic, "Advanced Ultrasonic Probes for Scanning of Large Structures," *Proc. Ultrasonic International '93 Vienna, Austria*, July, (1993)
- [3] B.B. Djordjevic, Henrique Reis, editors, G. Birnbaum, B. A. Auld, Technical editors, "Sensors for Materials Characterization, Processing, and Manufacturing," *ASNT Topics on NDE*, Vol. 1, ASNT, Columbus OH, (1998)
- [4] D. A. Oursler, and J. W. Wagner, "Narrow-band hybrid pulsed laser/EMAT system for noncontact ultrasonic inspection using angled shear waves,"

Materials Evaluation, Vol. 53, pp. 593-597, (1995)

- [5] S. G. Pierce, B. Culshaw, W. R. Philp, F. Lecuyer, and R. Farlow, "Broadband lamb wave measurements in aluminum and carbon/glass fibre reinforced composite materials using non-contacting laser generation and detection," *Ultrasonics*, Vol. 35, pp. 105-114, (1997)
- [6] D. A. Hutchins, W. M. D. Wright, G. Hayward, and A. Gachagan, "Air-coupled piezoelectric detection of laser-generated ultrasound," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control*, Vol. 41, pp. 796-805, (1994)
- [7] W. M. D. Wright, D. W. Schindel, and D. A. Hutchins, "Studies of laser-generated ultrasound using a micromachined silicon electrostatic transducer in air," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 95, pp. 2567-2575, (1994)
- [8] F. Lanza di Scalea, T. Berndt, J. Spicer, and B. B. Djordjevic, "Remote Laser Generation of Narrow Band Surface Waves Through Optical Fibers," *IEEE Tran. UFFC*, Vol. 46, No. 6, pp. 1551-1557, (1999)
- [9] B. B. Djordjevic, and R. E. Green, Jr., "Non-Contact Ultrasonic Techniques for Process Control of Composite Fabrication" *Proc. NDE Applied to Composite Processing*, St. Louis, MO, (1994)
- [10] M. J. S. Lowe, and P. Cawley, "The applicability of plate wave techniques for the inspection of adhesive and diffusion bonded joints," *J. Nondestr. Eval.*, Vol. 13, pp. 185-200 (1994)
- [11] Y. Bar-Cohen, A. K. Mal, and C.-C. Yin, "Ultrasonic evaluation of adhesive bonding," *J. Adhesion*, Vol. 29, pp. 257-274, (1989)
- [12] D. N. Alleyne, and P. Cawley, "Optimization of lamb wave inspection techniques," *NDT & E Int.*, Vol. 25, pp. 11-22, (1992)