

자동차 현가 장치용 스프링의 신뢰성 평가를 위한 Lamb wave 크랙검사

Lamb Wave Inspection for Crack Detection in Coil Spring of Automobile Suspension System

문 병 준*, 김 노 유**

Abstract

Suspension system is one of the most important components indispensable for stability and reliability of automobiles. The demands to more safe and durable suspension system have been increased as the automobiles get popular and improve in quality. The crack in the coil spring of the suspension system produced during manufacturing may grow under a fatigue load and cause a severe safety problems which lead to a catastrophic damage to the passengers. Many conventional NDT techniques including ET, RT, and UT are less sensitive or hard to apply to detect the surface breaking crack in the suspension coils partly because the techniques are point-to-point measurement methods, thus take too long time to inspect the coil spring longer than 1m. Contrary to this, Lamb wave technique is full-field measurement method that make it possible to examine the whole coil spring in real time. In this paper, the Lamb wave is applied to the coil spring to investigate the possibility to detect the cracks on the surface of the coil spring

1. 서론

현대 사회의 자동차는 쾌적하고 편리한 기능성에 대한 요구뿐만 아니라 안전성 및 신뢰성에 대한 요구도 꾸준히 증가되어 왔다. 자동차의 안전에 중요한 부품인 자동차용 스프링 역시 그 성능 면에서는 물론 내구성 및 신뢰성의 확보는 이제 필수적인 사항이 되었다. 자동차용 스프링의 신뢰성에 있어서 재료 내에 생성된 크랙은 매우 큰 영향을 미치는데 특히 표면 크랙은 그 패턴이 불규칙하고 또 매우 미세하여서 그 검출이 용

이하지 않으며 작업자의 주관적 판단이나 육체적 상태에 따라 그 결과가 달라지게 되어 실제 생산라인에서 합격판정을 받는 경우라고 하여도 실제 제품 내에 조립되어 운전될 때 문제를 일으킬 수 있는 가능성이 높을 수 있다. 현재 이러한 제품의 크랙검사나 재료물성 측정 등과 같은 품질을 평가하기 위한 방법으로 와전류 검사방법이나 초음파 수직/사각 탐상기술, 자분탐상을 사용하고 있다. 이들 방법의 경우를 살펴보면 공통적으로 와전류 코일(센서), 초음파 센서, 또는 자분을 부재의 길이방향으로 진행시키면서 센서가 위치한 단면에서 발생한 크랙을 탐지하고 있다. 그러나 자동차용 코일 스프링이나 판스프링은 그 구조에 있어 길이 방향의 치수가 단면치수에 비해 월등하게 크기 때문에 표면 크랙이 길이 방향으로 광범위하게

* 한국기술교육대학교 대학원

** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

발생되는 경우에는 전통적인 비파괴 기술을 이용하여 검사하기가 용이하지 않다. 검사가 가능하다 하더라도 봉재의 길이방향 전체에 대해 센서나 부재를 기계적으로 이송해야 하기 때문에 검사속도가 느려서 전수검사가 불가능하며 이로 인해 생산성과 신뢰성이 떨어진다. 그리고 길이 방향으로 센서 또는 부재를 이송시키면서 발생하는 센서와 검사부재간의 상대적 위치변화와 이에 따른 센서 감도의 변동에 의해 크랙 검출 확률(POD-Probability of Detection)이 매우 감소하여 크랙이 미세한 경우 결함을 발견하기 어렵다. Lamb wave(판파)는 재료의 한 끝점에서 Lamb wave를 발생시키면 이 파가 재료의 전체나 부재의 길이방향으로 스스로 전파되어 센서나 부재를 기계적으로 이송할 필요가 없이 재료 전체의 크랙을 검사할 수 있어 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법으로 각광받고 있다[1-4]. 그러나 보통의 비파괴 검사 방법과는 달리 Lamb wave는 복잡한 신호 형태(모우드)를 가지고 전달되기 때문에 신호발생, 처리 및 해석 기법에 대한 경험과 이론이 요구되는 것이 일반적이다[5.6]. 따라서 본 연구에서는 이러한 Lamb wave 기술을 자동차용 스프링 봉재에 적용하여 표면 크랙의 검사가능성을 검증하였다.

2. Lamb wave 이론 및 기술

2.1 Lamb wave의 발생원리

Lamb wave란 초음파의 특수한 형태로서 봉재(rod), 튜브(tube), 판(plate)과 같이 2차원 대칭 혹은 축대칭 구조를 가진 부재에 초음파 센서에 의해 발생된 초음파가 wedge를 통과하여 경사지게 입사되었을 때 이 파가 그림1과 같이 재료내부에서 연속적인 굴절과 반사파를 만들게 된다. 이러한 과정이 연속적으로 일어나면서 이 파들이 중첩되어 부재의 기하학적 조건에 의해 공진을 일으키게 되면 대칭 축방향으로 진행하는 정상파가 생기게 되는데 이를 Lamb wave 라고 한다.

2.2 봉재에서의 Lamb wave 전파특성

평면 초음파가 무한한 공간의 균질한 재료

를 매질내부로 전달될 때에는 음파의 속도가 밀도 ρ , 탄성계수 E , 포아송의 비 σ 에 의해 결정되고 이에 따라 종파와 횡파, 표면파(Rayleigh wave)가 발생한다.

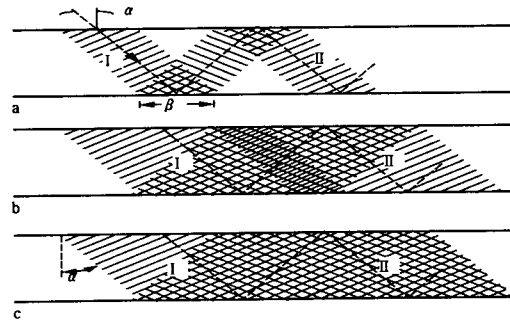


그림 1. Lamb wave의 발생원리와 진행과정

봉재와 같이 단면이 길이에 비해 매우 작은 탄성체 내에 같은 방향으로 진행하는 초음파는 단면형상에 의해 음파가 매우 많은 중첩이 발생하기 때문에 이에 의한 간섭효과로 초음파의 진행이 증가나 감소 될 수 있고 속도의 변화도 발생하며 이로 인해 축방향의 particle motion과 반경방향의 운동이 발생되고 이 운동의 조합에 의해서 longitudinal, torsional, flexural wave를 형성하며 각 운동 패턴은 속도와 함께 실린더 직경 d 와 전달계수 G , 탄성파의 진폭 λ 에 관계하여 결정된다.

Longitudinal wave는 속도 C_0 에 관하여[7]

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Torsional wave의 속도 C_t 에 대하여

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

Flexural wave의 속도 C_f 는 축 중심을 기준으로 축 중심에 대한 축 단면의 관성질량 반경 K 에 의해 결정되는데 그것은 다음식과 같이 표현된다.

$$C_f = \frac{2\pi K}{\lambda} \times \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

$$W = \frac{\omega}{k}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = 2\pi f \text{는 진동수}$$

위 식의 C_f 는 단일파장을 가지는 파동의 속도이며, Lamb wave는 각각의 파장이 발생되어 진행할 때는 각 파장의 진행속도의 차이에 의해 파동의 모양이 진행거리에 따라 변화하는데 고주파 성분은 저주파 성분의 파동보다 빠르게 진행하고 각 파동은 파장에 따라 각기 다른 속도를 가지고 움직이기 때문에 일정 시간이 흐른 뒤의 파동의 파형은 변화한다. 많은 파장성분을 가지는 파동이 진행하는 경우에는 한 그룹의 파동들의 전체 속도를 group velocity U 라 하고 진행 중인 group velocity U 는 다음 식으로 표현된다[7-9].

$$U = W - \lambda \times \frac{dW}{d\lambda} \\ = C_f - \lambda \times \frac{dC_f}{d\lambda} \quad (4)$$

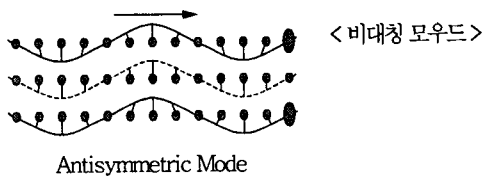
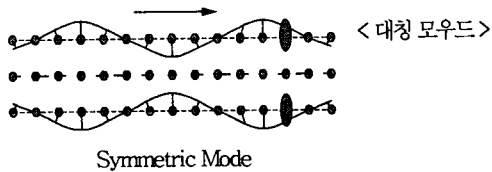


그림 2. 봉재에서의 Lamb wave mode

Lamb wave의 고유한 형태는 입사된 초음파의 각도와 봉재의 지름 및 물성, 사용 초음파의 주파수에 따라 결정되는데 이렇게 무한히 많은 파동들이 봉재에서 특별하게 생성하는 특정한 형태의 입자운동을 모드(mode)라고 하며, 봉재에서의 Lamb wave의 모

드는 크게 2중류로 나타나는데 그림2와 같이 대칭 및 비대칭 모드이며, 재료의 길이(축) 방향으로 전파된다[9-11].

3. Lamb wave 실험장치 및 발생실험

3.1 Lamb wave 실험장치

그림3은 봉재의 표면에 인공결함을 가공하여 표면에서 초음파를 입사시켜 Lamb wave를 발생시키고 측정하기 위한 장치이며, 신호의 출력을 높여주기 위해 RAM-10000을 사용하였다. 고출력의 신호를 봉재의 표면에 입사시킨 후 Lamb wave가 발생되면 반사신호를 Digital Storage Oscilloscope로부터 데이터를 컴퓨터에 저장하였다.

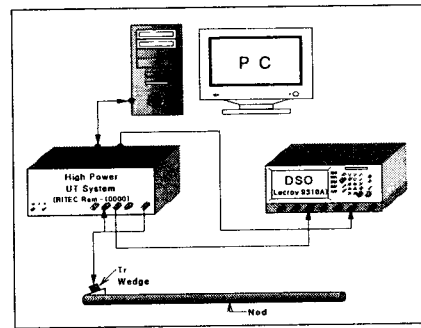
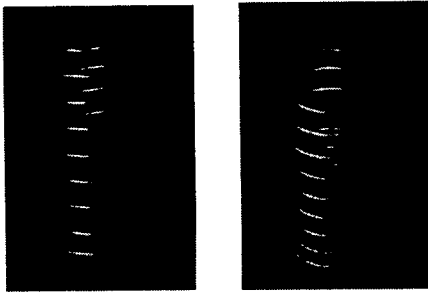


그림 3. Lamb wave 발생 및 측정 System

3.2 Lamb wave 발생실험

자동차용 스프링은 긴 봉재를 coil처럼 가공한 것인데 그림 4는 실제 자동차용 스프링을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 봉재시편은 스프링으로 가공되기 이전 단계에 있는 열처리 된 봉재이다. 실험에 사용된 지름 12mm 봉재를 그림 10에서 보여주고 있는데 Peeling된 소재로서 표면에 바이트 가공에 의한 spiral형태의 가공면이 약 300-500 μm 정도의 거칠기를 가지고 있다. 실제 현장에서 발생하는 축 방향의 크랙에 대해서 Lamb wave를 이용하여 발생위치와 크랙의 위치를 측정하고자 그림 6과 같이 폭500 μm , 깊이 1000 μm , 길이 3cm인 인공 크랙을 방

가공하여 크랙의 위치에 대한 센서의 각도를 각 위치별(0도, 90도, 180도)로 변화시키면서 측정하였는데 크랙의 위치에 상관없이 Lamb wave 신호가 검출되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) (b)
그림 4. 자동차용 스프링

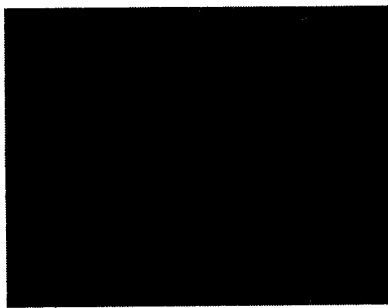


그림 5. 인공 크랙을 가공한
실험용 봉재 사진

그림 7 -10은 센서의 위치에 따른 크랙의 신호를 나타낸다. Pitch-catch법과 Pulse-echo법으로 실험을 수행했는데 Pulse-echo법으로 수행한 결과가 효과적으로 나타났으며, 실제 현장에서 사용하는데 있어서도 Pulse-echo법이 적합하므로 이후의 실험은 Pulse-echo법으로 수행되었다.

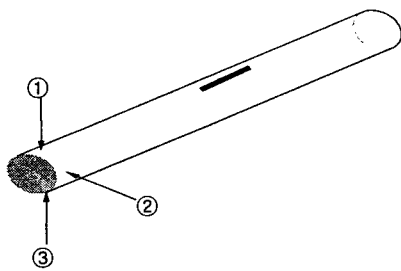


그림 6. 크랙의 위치에 따른 탐상위치

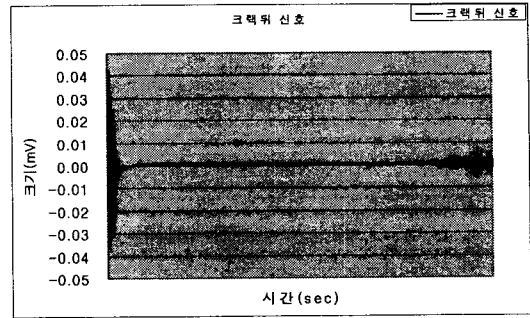


그림 7. 크랙이 없을 때의 반사신호

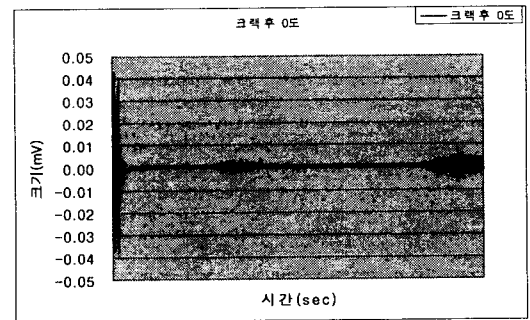


그림 8. 위치①에서의 신호

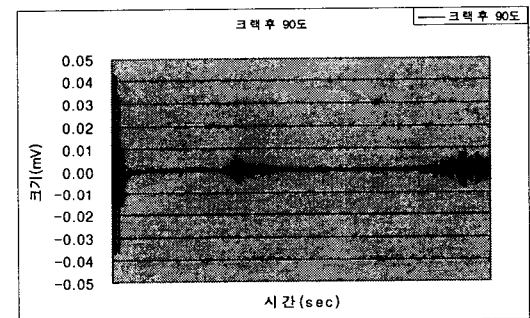


그림 9. 위치②에서의 크랙신호

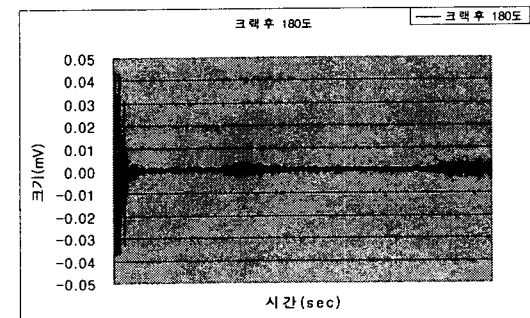


그림 10. 위치③에서의 신호

4. 크랙 검사 실험

4.1 크랙 시편 제작

실험에 사용된 봉재는 지름 3.5mm, 12mm, 28mm, 50mm에 길이가 약 80cm-140cm인 스프링용 강재이다. 각 강재에는 표1과 축길이 방향으로 다양한 종류의 크랙을 그림11과 같이 방전가공을 통하여 제작하였다. 직경 12mm와 28mm의 봉재의 경우에는 필링가공이 된 시편과 표면을 연삭 가공하여 표면이 매끄러운 두 종류의 시편에 대해 크랙이 만들어졌으며 그 외 3.5mm와 50mm 봉재의 경우에는 현장에서 수집된 시편 그대로를 사용하여 표면에 크랙을 가공하였다.

4.2 Lamb wave 크랙 검사 결과

그림 11은 표면이 연마 가공된 지름 12mm 봉재의 Lamb wave신호로 왼편의 큰 신호는 봉재의 끝단에서 발생한 반사신호이며 화이트 가공에 의한 표면 노이즈 신호가 발생되지 않았다.

그림 12은 지름 3.5mm의 신호로 봉재의 끝단에 위치한 크랙에 대한 검사결과로 Lamb wave의 길이방향진행성과 크랙 검사의 민감성을 보여준다. 왼쪽 큰 신호는 봉재의 끝단에서 반사된 신호이며 화살표가 표시된 곳이 봉재표면에 가공한 깊이200 μ m, 폭60 μ m, 길이5cm인 인공크랙에서 발생한 반사 신호이다.

그림 13은 지름12mm 봉재의 신호로 봉재 표면에 Peeling가공에 의한 표면무늬가 있어 이에 의한 노이즈가 작은 크기로 신호 전체에 분포하고 있다. 화살표가 깊이200 μ m, 폭60 μ m, 길이 5cm인 크랙에 의한 반사신호로 노이즈신호와 식별이 쉽지 않다.

그림 14는 그림13과 같은 지름12mm 봉재의 신호로 Peeling가공에 의한 노이즈신호가 전체에 분포하고 있다. 화살표는 깊이1000 μ m, 폭200 μ m, 길이 5cm인 크랙에 의한 반사신호로 노이즈신호에 비해 신호의 세기가 크기 때문에 식별이 가능하다.

표 1. 봉재의 종류와 크랙의 종류

지름 (mm)	표면가공상태	깊이 (um)	폭 (um)	길이 (mm)
3.5	연마 가공	200	60	50
12	연마 가공	100	60	
		200	60	
	Peeling 가공	100	60	
		200	60	
28	연마 가공	1000	200	
		500	60	
	Peeling 가공	500	60	
		1000	200	
		1000	60	
		1000	500	
50	Peeling 가공	2000	1000	

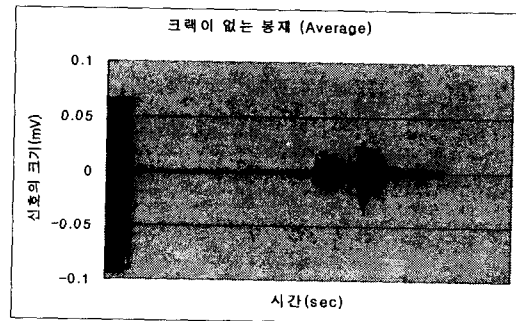


그림 11. 지름 12mm 봉재 검사신호

그림 15은 지름 28mm봉재의 크랙신호로 재료 표면의 가공 흔적에 의한 노이즈가 분포하고 있다. 오른쪽 큰 신호는 봉재의 끝단에

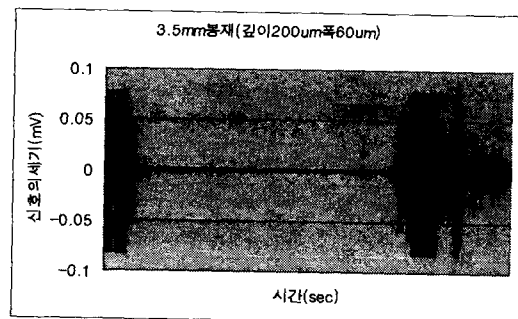


그림 12. 지름3.5mm봉재의 크랙신호

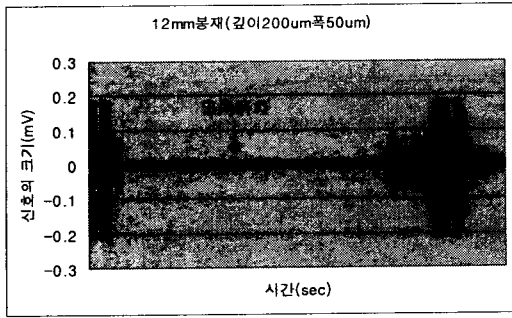


그림 13. 지름 12mm 봉재의 크랙신호

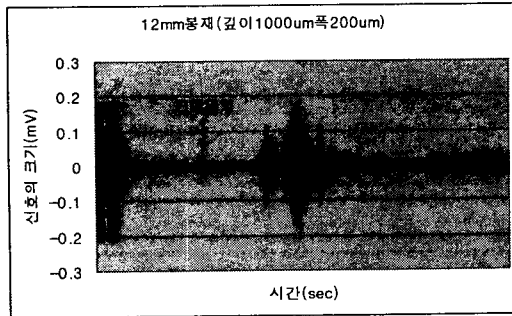


그림 14. 지름 12mm 봉재의 크랙신호

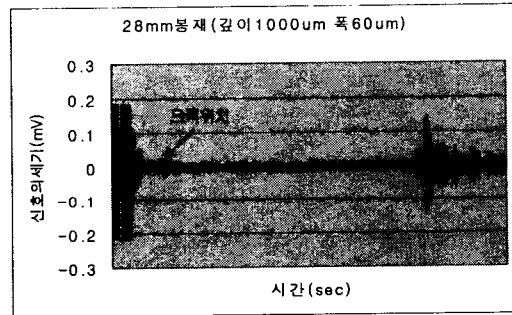


그림 15. 지름 28mm 봉재의 크랙신호

서 반사된 신호이며 화살표는 깊이1000 μ m, 폭60 μ m, 길이 5cm인 인공크랙에서 발생한 반사신호로 노이즈신호에 비해 신호의 크기가 매우 크다.

그림 16은 지름 50mm인 봉재의 크랙신호로 크기가 같은 2개의 인공크랙을 만들어 Lamb wave로 실험한 결과이다. 전체적으로 peeling에 의한 노이즈가 분포하고 있으며 화살표는 인공크랙에 의한 반사신호로 가운데 크랙은 크랙의 방향이 봉재의 길이방향과 대칭이고 끝단신호 왼쪽의 큰 신호는 봉재의

길이방향과 수직인 방향의 크랙신호이다. 봉재의 끝단신호의 넓은 분포는 봉재의 끝부분에 가스 절단으로 발생한 계단형 단면에서 발생한 산란신호로 지름이 두꺼운 봉재에서도 Lamb wave가 충분히 전달될 수 있음을 보여 주고 있다.

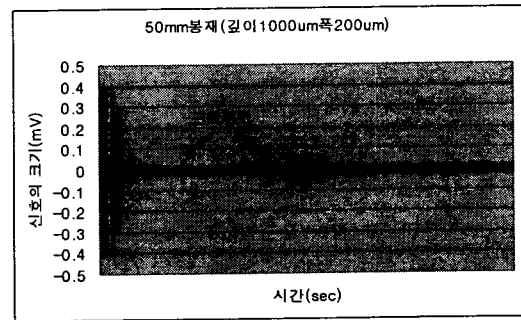


그림 16. 지름 50mm 봉재의 크랙신호

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 스프링 강재에서 발생한 표면크랙을 검출하기 위하여 Lamb wave 발생장치와 분석기술을 적용하였으며 이 기술을 이용하여 직경이 3.5mm, 12mm, 28mm, 50mm인 다양한 봉재에 대해 Lamb wave의 크랙에 대한 기본적인 민감도를 실험적으로 조사하였다. 이제까지 주로 개발된 Lamb wave는 재료의 단면대표치수가 파장에 비해 매우 작을 때 주로 사용되어왔기 때문에 본 연구에서 대상으로 하는 봉재와 같이 직경이 파장에 비해 클 경우에는 일반적으로 적용되지 못하였으나 본 연구의 결과로부터 Lamb wave가 자동차용 스프링재와 같은 단면치수가 파장에 비해 큰 경우에도 사용될 수 있음을 확인하였다. 스프링 봉재 내에 발생한 크랙은 자동차용 스프링 재료의 일반적인 크랙패턴이 축 방향으로 발생한다는 점을 고려할 때 그 형상과 위치에 따라 Lamb wave에 대한 민감도의 차이가 나지만 봉재 끝단에서 Lamb wave를 발생시켜서 봉재의 표면에서의 크랙의 유무와 위치를 정확히 측정할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 봉재에서 Lamb wave의 최소 검출가능 크랙의 크기는 크랙 면적을 기준으로 할 때

봉재 단면 면적의 0.1%까지의 크랙만이 검출 가능한 것으로 확인되었다. 따라서 지름 3mm 봉재의 경우 깊이가 약 200 μm 인 크랙이 검사가능하며 12mm나 28mm 봉재의 경우 약 400 μm 의 크랙까지 특별한 신호처리 기법이나 장치를 사용하지 않은 경우에도 가능한 것으로 조사되었다. 그러므로 향후 과제로서 민감도가 우수한 Comb type Lamb wave 발생장치나 array type의 초음파 센서를 사용하여 최적의 lamb wave 모드 개발 및 크랙반사신호의 특징분석과 추출기법을 개발함으로써 검출가능 크랙사이즈를 줄일 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

- (1) C.Desimone, P. Katchad, M. Tacchia, R. Giacchetta "Ultrasonic Inspection of Parallel Wires Type Rope for Suspension Bridge", Review of Progress in QNDE, Vol 17A, pp 153-160,1998
- (2) David N. Alleyne , Peter Cawley "The Interaction of Lamb Wave with Defects", IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELRCTRIC AND FREQUENCY CONTROL, VOL. 39, NO.3, MAY 1992
- (3) Wenhao Zhu, Joseph L. Rose "Lamb Wave Generation and Reception with Time-Delay Periodic Linear Arrays: A BEM Simulation and Experimental Study", IEEE TRANSACTIONS ON Ultrasonics, FERROELRCTRICT, AND FREQUENCY CONTROL, VOL. 46, NO. 3, MAY 1999
- (4) A. Safaeinili, O.I. Lobkis, D,E Chimenti,"Quantitative materials characterization using air-coupled leaky Lamb waves", ULTRASONICS 34(1996)393-396
- (5) P. Wilcox, M. Lowe, P. Cawley, "The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves", NDT&E International 34(2001)pp. 1-9
- (6) Yves Berthelot, Jianmin Qu, Laurence Jacobs, "Crack Detection By Ultrasonic Guided Waves", International Jornal of Engineering Science, Vol 37, pp 1369-1387, 1999
- (7) Hee Don Jeong, Hyeon Jea Shin, Joseph L. Rose, "Detection of Defects in a Thin Steel Plate Using Ultrasonic Guided wave", 15th World Congress of NDT, 2000
- (8) A. Chahbaz, V. Mustafa, D. R. Hay, "Inspection of Cylindrical Structures Using Ultrasonic Guided Waves", J. of Nondestructive Evaluation, Vol 17, No.1, 1998
- (9) Peter Cawley, David Alleyne, " The use of Lamb Wave for the long range inspection of large structures", Ultrasonics, Vol 34, pp 287-290
- (10) Marc Niethammer, Laurence J. Jacobo, Christine Valle, "Automated methodology to locate notches with Lamb waves", J. of Acoustic Society of America, Vol 105, pp. 2669-2676, 1999
- (11) Zongbao Li, Y.H. Berthelot, "Propagation of transient ultrasound in thick annular waveguides: modeling, experiments, and application", NDT&E International 33(2000) pp.225-232