

Efficient Use of Lamb Waves and Their Wavelet Coefficients for Damage Detection of Steel Plates

*박 승 희¹ 윤 정 방² 노 용 래³

Abstract

For the *in-situ* health monitoring of critical members in civil infra-structures, ultrasonic guided Lamb waves-based non-destructive evaluation (NDE) is very suitable. However, a chief drawback of the Lamb wave techniques is that multiple modes exist at all frequencies and the modes are generally dispersive, which means that the received signals may be very complicated. To overcome these complications, selective transmitting and receiving of a single A_0 mode within a frequency range can be adopted. Furthermore, a wavelet technique can be utilized to decompose the Lamb wave response into wavelet coefficients as a tool for signal processing. The changes in the Lamb waves interacting with damages in the steel plates are successfully characterized by this wavelet technique, through the amplitude change of the wavelet coefficients. In this paper, the feasibility of detecting a line crack on the surface of a steel plate and loosened bolts in a joint steel specimen using the Lamb waves and the wavelet technique is investigated.

I. 서 론

기존의 초음파를 바탕으로 한 비파괴 검사 기법들은 센서에 근접한 구조물의 영역만을 점검하는데 그쳤었다. 그러나, 대형 토목 구조물의 비파괴 검사가 필요하다면, 구조물 표면 전체에 대한 검사가 이루어져야 하므로, 전 영역을 세밀히 살필 수 있는 방법이 적용되어야 한다. 이 과정은 시간과 비용적인 면에서 매우 비효율적 이므로 적절한 대안으로, 초음파로 유도된 램 웨이브(Lamb waves)를 이용하는 방법이 대두되었다[1,2]. Lamb waves란 판형 구조물(plate-like or layer structure)의 양면 자유단 지지조건에 부합된 탄성변형 운동을 따라가는 파동을 가리킨다.(Viktorov(1967)) 이 때, 파동 입자의 변위는 판자면을 따라가는 전파방향과 이에 수직인 면을 따라 전파하는 방향의 두 방향으로 동시에 일어난다. 판형 구조물의 재료 물성치와 기하학적 특성에 따라 나타나는 여러 가지 모드를 가지고 판 내부로 전파하는 Lamb waves는 수 미터 이상의 거리까지 도달할 수 있다. 따라서 먼 곳에 위치한 감지기(Receiver)에서 받은 파동의 신호는 가진기(Transmitter)와 감지기 사이의 파동 경로의 건전성에 관한 정보를 가지고 있어, 이를 이용해 파동 경로 상의 구조물의 상태를 점검할 수 있다[3]. 이러한 방법을 Through Transmission 방법이라 일컫는다. 또 다른 방법으로, 가진기에서 Lamb waves를 발생시키고 다시 되돌아오는 반향파를 모니터링 함으로써, 구조물의 상태를 점검하는 Pulse/Echo 방법이 있다. 이처럼, Lamb waves 기반의 비파괴 검사 기법들은 여러 가지 방법으로 응용될 수 있으며, 대형 토목 구조물의 건전성 감시 시스템에 효율적으로 적용될 수 있다. 그러나, Lamb waves는 가진 주파수와 판 두께의 곱한 값에 따라 파동 속도가 달라지는 분산(dispersive) 특성을 가지므로 광역 주파수 대역에 기반을 둔 이 방법은 다중모드가 중첩되어 각각의 모드가 대상재료 특성에 따라 자신에 해당하는 전파 속도로 전파되면서, 파동의 감쇄, 반사 및 산란 등에 의해 매우 복잡한 신호로 전달되어 그 대상 재료의 특성을 정확하게 규명하는데 많은 어려움이 뒤따른다. 따라서, 이러한 복잡성을 경감시키기 위해 특정 중심 주파수를 갖는 PZT transducer를 주어진 대상 구조물에 알맞도록 잘 선정하여 발생하는 Lamb waves에서 단일모드가 선택적으로 감지될 수 있도록 해주는 선행 작업이 반드시 필요하다[4,5]. 그림 1은 강판 구조물에서의 Lamb waves의 분산 곡선을 보여주고 있는데, Lamb waves의 군속도(group velocity)가 가진 주파수와 두께의 곱의 함수에 따라 여러 가지 모드로 분산되어 나타내어짐을 알 수 있다. 이번 연구에서는 특정 중심 주파수를 갖는 PZT transducer를 이용함으로써 2mm 두께의 강판에서 첫 번째 비대칭 Lamb 모드인 A_0 를 채택하여, 실험을 수행하였다. 구조물에 올려진 가진기에서 발생된 Lamb waves는 구조물의 어떠한 손상이나 경계등을 접하게 되면, 반사 및 부분적인 투과 등을 일으키며, 이 때 손상 검

¹ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

² 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

³ 경북대학교 기계공학과 교수

색은 해당 모드의 감쇄 및 변형에 의해 결정될 것이다[6-9]. 한편, 신호처리 기법으로 웨이블렛 변환(Wavelet Transform) 기법이 강판에서의 국부적인 손상(내부의 잔균열이나 조인트에서의 볼트의 풀림)을 규명하기 위해 적용되었다[10]. 손상 이후에 일어나는 웨이블렛 계수의 크기 감소와 Lamb waves 신호의 도달 시간 지체로부터 구조물의 손상이 성공적으로 감지되었다. 이 논문의 목적은 토목구조물에서 널리 이용되는 강구조 부재들에서의 국부적인 손상을 찾아내는데 있어, 초음파 기반의 비파괴 기법을 이용한 효율적인 방법론을 찾아내는데 있다. 두 종류의 강구조 부재들에 대한 실험적 연구와 Lamb waves 신호를 분석하기 위한 대안으로 웨이블렛 변환 기법을 이용한 신호 처리 결과, 토목 구조물에 대한 위의 방법론의 적용 가능성이 명확하게 입증되었다.

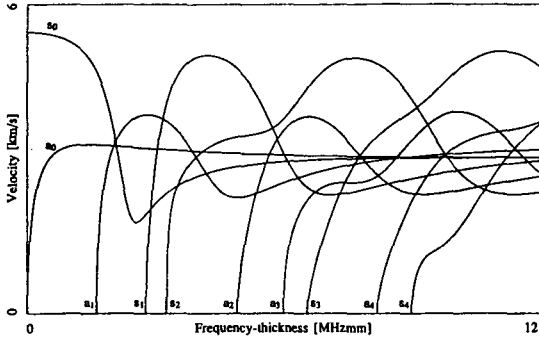


그림1. 강재의 Lamb waves 군속도 분산곡선

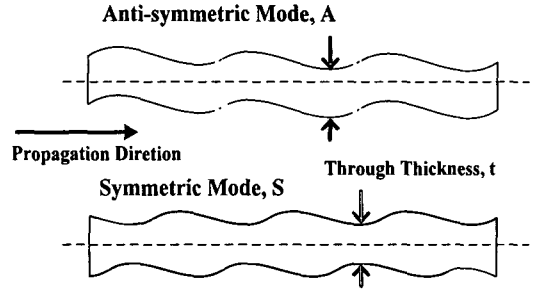


그림2. Lamb waves의 대칭 모드와 비대칭 모드

II. Lamb Waves의 기본이론

Lamb waves는 파동의 도달거리가 매우 길기 때문에 대형 판 구조물의 비파괴 검사시 매우 유리하다. 이와 같은 Lamb waves 발생을 위해 초음파 펄스를 이용하게 되는데, 이 때 주로 이용되는 방법이 압전재료(Piezo-electric material)인 진동자를 사용하는 방법이다. 이번 연구에서는 압전재료의 일종으로 지향성이 있는 PZT transducer를 사용하여 강판의 내부 균열 및 볼트의 풀림 등의 손상 탐색을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 실제로, 그림 2에서 보여지듯이, Lamb waves는 대칭 모드와 비대칭 모드의 두 가지 모드에 의해 지배적으로 전파되는데, 제일 기본적인 1차 모드가 대칭모드의 So와 비대칭 모드의 Ao이다. 우선, 이 Ao 모드의 대략적인 이해를 위해 그림 1의 분산곡선을 이론적으로 검증해 보도록 하겠다. 이 곡선들은 다음의 식 (1)의 비대칭 Lamb waves를 위한 파동방정식의 해로부터 유도된다. (Viktorov(1967))

$$\frac{\tan(\bar{d}\sqrt{1-\zeta^2})}{\tan(\bar{d}\sqrt{\xi^2-\zeta^2})} + \frac{(2\zeta^2-1)^2}{4\zeta^2\sqrt{1-\zeta^2}\sqrt{\xi^2-\zeta^2}} = 0 \quad (1)$$

여기서 무차원 변수들을 다음과 같이 정의하면,

$$\xi^2 = \frac{c_t^2}{c_l^2}, \quad \zeta^2 = \frac{c_l^2}{c_{phase}^2}, \quad \bar{d} = \frac{k_t t}{2} \quad (2)$$

c_l : 강재에서의 횡방향 파동속도, c_t : 강재에서의 종방향 파동속도, c_{phase} : 강재에서의 Lamb waves 위상속도, k_t : 파수이며 t : 강판의 두께이다.

한편, 이 속도를 나타내는 변수들은 다음과 같은 두 개의 Lamé's constants

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (3)$$

에 의해, 다음과 같이 정의되므로,

$$c_t^2 = \frac{\mu}{\rho}, \quad c_l^2 = \frac{(\lambda+2\mu)}{\rho}, \quad k_t = \frac{\omega}{c_t}, \quad \omega: \text{가진 주파수} \quad (4)$$

이 표현들을 모두 무차원 변수들로 대체하면, 식 (5)로 표현된다.

$$\xi^2 = \frac{\mu}{(\lambda+2\mu)} = \frac{1-2\nu}{2-2\nu}, \quad \zeta^2 = \frac{\mu}{\rho c_{phase}^2} = \frac{E}{2\rho(1+\nu)c_{phase}^2} \quad (5)$$

$$\bar{d} = \frac{\omega t}{2c_t} = \frac{\omega t}{2} \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} = \frac{\omega t}{2} \sqrt{\frac{2\rho(1+\nu)}{E}}$$

이리하여, 식 (5)가 수치적으로 풀어져서 식 (1)로 대체될 수 있게 된다. 주어진 대상 구조물의 탄성계수 (Young's modulus) E , 프아송 비(Poisson ratio) ν 그리고 단위밀도 ρ 가 주어지면 Lamb waves의 위상 속도, c_{phase} 가 얻어지게 된다. 이 때 가진 주파수인 ω 와 대상 구조물의 두께 t 의 곱에 대해 반복적으로 계산되어질 수 있다. 또 다른 유용한 분산곡선으로 군속도, c_{group} 를 이용한 군속도 분산곡선이 있다. 이는 다음의 식 (6)과 같이 c_{phase} 로부터 쉽게 유도된다.

$$c_{group} = c_{phase} + \frac{\partial c_{phase}}{\partial k} k = \frac{c_{phase}}{1 - (f/c_{phase}) \partial c_{phase} / \partial f} \quad (6)$$

여기서 $k = \frac{2\pi}{\lambda_\omega}$ (파수), $\lambda_\omega = \frac{c_{phase}}{f}$ (파장).

위의 그림 1의 분산곡선으로부터 특정 중심 주파수(1MHz)를 가진 PZT transducer로부터 발생된 Lamb waves의 군속도는 두께가 2mm인 강판에서 약 3000(m/sec)가 됨을 알 수 있는데, 이는 두 개의 transducer를 각각 가진기와 감지기로 사용한 Through-Transmission 방식의 실험 결과로부터 파동전달시간(TOF: time of flight)을 측정함으로써 쉽게 확인할 수 있다. 여기서, 이 TOF 정보는 대상 구조물의 재료적 특성을 규명하는데 이용될 수 있다. Lamb waves가 건전한 상태와 비교되어 강성이 작아진 손상 부위를 지나갈 때, 전파 속도 또한 강성이 작아진 만큼 늦어질 것이다. 따라서, 우리는 구조물에 전파하는 Lamb waves의 파동 특성이 구조물의 손상 위치와 정도에 따라 매우 좋은 상관성을 갖고 변화할 것이라고 판단할 수 있으며, 이 원리를 이용한 몇 가지 실험에서, Lamb waves의 TOF 정보 및 전달된 Voltage의 크기를 감시함으로써, 대상 구조물의 재료적 특성을 규명하고, 국부적인 손상 위치와 손상 정도를 효율적으로 탐색해 낼 수 있다.

III. 실험연구 결과

III-1. 강판 내부의 균열 탐색

그림 3에서 보는 바와 같이 400x400x2(mm)의 강판 구조물의 한복판에 3mm 길이의 60° 기울어진 잔균열을 내어, 실험 시편을 준비하였다. 1 MHz의 특정 중심 주파수를 갖는 PZT transducer를 이용하였는데, 이들의 효율적인 배열을 위해 모두 8군데의 위치를 결정하였다. 위에서 언급하였듯이, Lamb waves의 TOF 정보를 분석함으로써, 잔균열의 위치를 결정하는 방법을 실험을 통하여 규명하였는데, 그 기본 원리는 다음과 같이 설명될 수 있다. 우선 잔균열에 임의의 각으로 경사진 방향으로 위치한 PZT transducer(T, 가진기)에서 발생된 Lamb waves가 강판을 따라 전파되어 잔균열에 도달되고, 이 때, 잔균열로부터 적당한 각으로 반사된 파동이 다시 판형을 따라 전파되어 임의의 위치에 놓여진 PZT transducer(R, 감지기)에 전달된다. 이렇게 두 개의 PZT transducer를 이용한 Through Transmission 방법을 이용함에 있어, R에서 얻어지는 신호의 TOF는 T에서 R까지의 파동 전달 시간을 가리키며, 다음의 식을 만족하게 된다.

$$TOF = (\overline{TO} + \overline{OR}) / C_g \quad (7)$$

여기서, \overline{TO} : T (가진기)에서 O (Crack 위치)까지의 거리, \overline{OR} : O (Crack 위치)에서 R (감지기)까지의 거리, C_g : Lamb waves의 A_0 모드 군속도이다.

이는 다시 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\overline{TO} + \overline{OR} = TOF \cdot C_g \quad (8)$$

여기서 우변항의 값이 일정하게 결정됨으로써, 잔균열의 위치가 T와 R 위치를 초점으로 하는 타원의 궤도상에 있다고 예측할 수 있다.

우선 그림 4(b)에서와 같이 T와 R을 배치하여 실험을 수행하여 적절한 위치에서의 잔균열로부터 반사된 Lamb waves를 검출할 수 있었다. 이때의 TOF=151 (μs)임을 그림 4(a)의 그래프로부터 확인하였고, 여기에 그림 1로부터 얻어낸 Lamb waves A_0 모드의 군속도를 곱한 값을 식 (2)에서 우변의 상수값으로 하고 T와 R의 위치를 초점으로 하는 타원을 형성하였다. 똑같은 과정을 T는 고정시키고, R의 위치를 2와 3으로 바꿔가면서 측정하였는데, 각각에 대하여 그림 5에서와 같이 TOF=168(μs), TOF=150(μs)으로 얻어졌다. 이로써, 각 경우에 대한 잔균열의 위치가 예상되어지는 궤도가 새로운 타원으로부터 형성되었고, 그림 6과 같이 세 가지 경우의 잔균열 예상궤도를 하나로 중첩시켰을 경우, 한 개의 교점이 나오는데, 바로 이 지점이 사전에 가해진 잔균열의 위치와 정확히 일치함을 확인할 수 있었다.

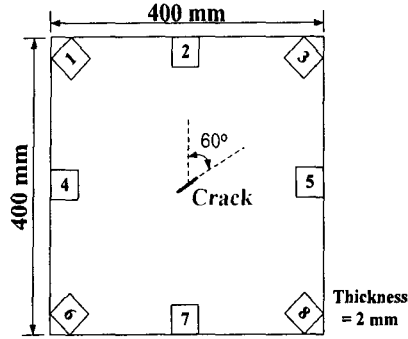
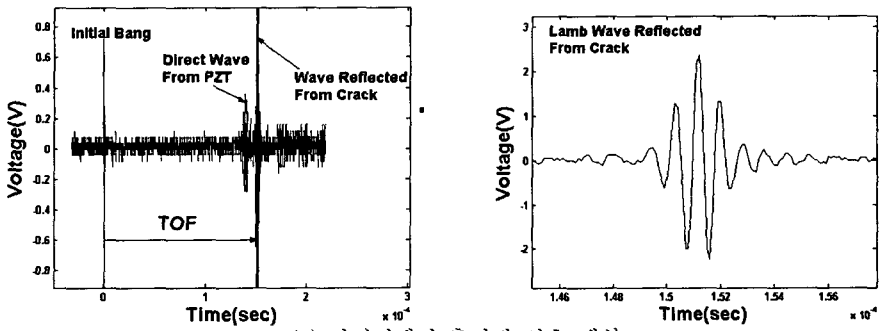
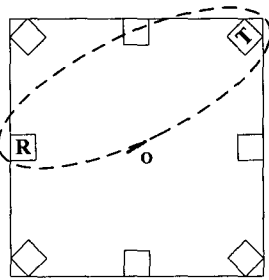


그림 3. 실험시편1: 3mm의 60° 경사 잔균열을 가진 강판



(a) 감지기에서 측정된 신호 해석



T, R : 1 MHz PZT Transducers

(b) 타원 경로로 예측되는 손상 위치

그림 4. 센서위치 T:3, R:4인 경우의 실험 결과 (TOF=151 (μs))

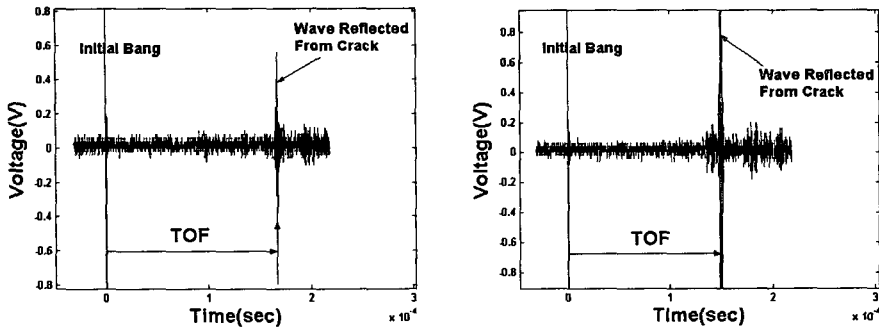


그림 5. 센서위치 T:3, R:1 와 T:2, R:1인 경우의 실험 결과 (TOF=168(μs), TOF=150(μs))

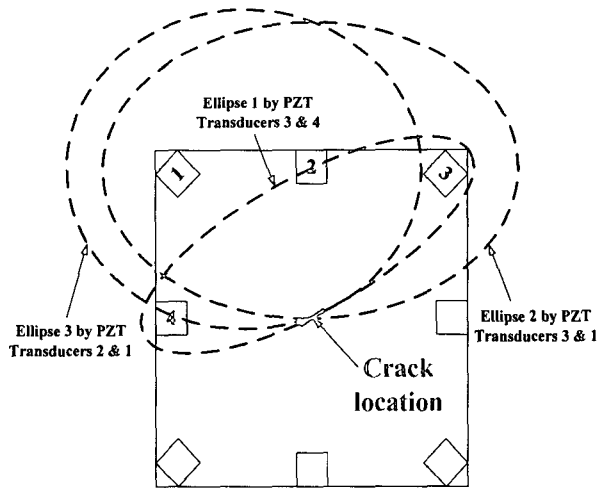
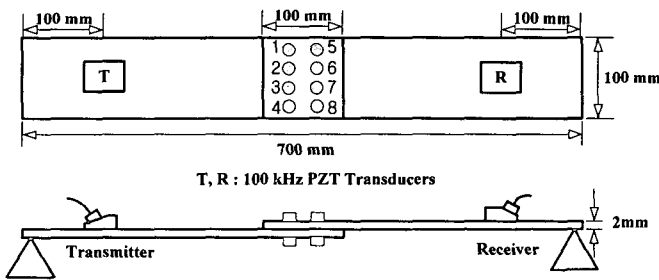


그림 6. Geometry Characterization을 이용한 잔균열 위치의 정확한 검출

III-2. 강판의 볼트 풀림 손상 검색

그림 7에서 보는 바와 같이 400x100x2 mm 강판 2개가 100mm 너비로 겹쳐 볼트/너트로 채운 조인트 시편을 제작하였고, 이번 실험에서는 특정 중심 주파수가 100 kHz인 PZT transducer를 이용하였다. 손상 시나리오는 표 1에 보여지는 바와 같이 #1~#8까지의 지정된 곳에 위치한 볼트/너트가 해체되는 것으로 가정하였다.



Damage Cases	Locations of Loosened Bolts
Case 1	#1
Case 2	#2
Case 3	#1 & 4
Case 4	#2 & 3
Case 5	#1,2,3 & 4
Case 6	#1,2,3,4,5 & 8
Case 7	#1,2,3,4,6 & 7
Case 8	#1,2,3,4,5,6 & 8

그림7. 실험시편2: 강판 구조물의 볼트 풀림 검색 실험

표 1. 손상 시나리오

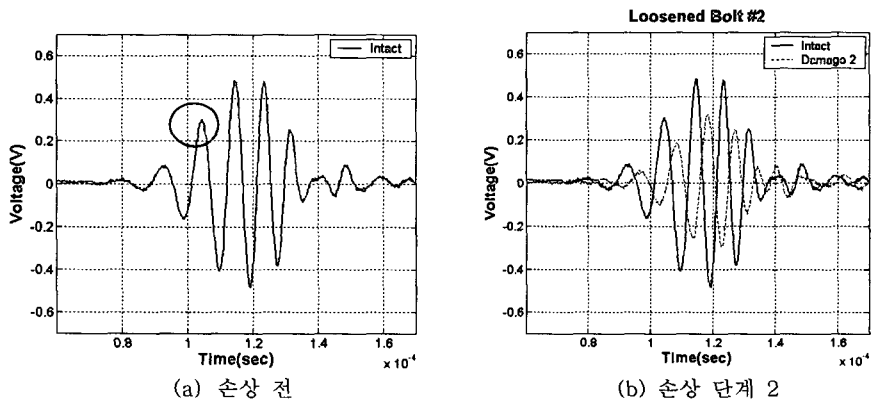


그림 8. 손상 전과 손상 단계 2에서 측정된 Lamb waves의 변화

손상추정 실험은 해체되는 볼트/너트 위치에 따라서 또, 그 개수에 따라 Through Transmission 방법을 이용하여 R에서 받아들여진 Lamb waves 신호를 분석하는 방법으로 수행되었다. 우선 볼트/너트가 완전히 해

결되어 있는 상태에서 측정된 Lamb waves 신호는 그림 8(a)와 같다. 그리고 손상 단계 2번째에서 변화된 Lamb waves의 신호는 그림 8(b)와 같이 얻어졌다. 이처럼 각각의 손상 단계에 따라 측정된 Lamb waves의 결과로부터 일관성 있는 비교를 위해 두 번째 peak value를 비교대상으로 고려하였다. 두 번째 peak point의 time 과 amplitude (voltage)를 측정하여 각 단계별로 표 2에 정리하였다.

표 2. 각 손상 단계에서의 실험 결과

Damage Cases	Second Peak TOF (μS)	Second Peak Voltage (V)	Time Delay (μS)	Reduction in Voltage (V)	Number of damages in Wave Beam Width
Intact	104.5	0.3035	0	0	0
Case 1	105.1	0.3035	0.6	0	0
Case 2	108.2	0.18475	3.7	-0.11875	1
Case 3	106.1	0.2172	1.6	-0.0863	0
Case 4	109.2	0.1285	4.7	-0.175	2
Case 5	108.3	0.1348	3.8	-0.1687	2
Case 6	108.2	0.0848	3.7	-0.2187	2
Case 7	109.7	0.0223	5.2	-0.2812	4
Case 8	108	0.0347	3.5	-0.2688	3

정리된 결과들로부터, waves의 beam 쪽에서 벗어나는 곳에 위치한 볼트(#1,4,5,8)에서는 그 변화 정도가 상대적으로 작음을 확인할 수 있었다. 즉, waves의 beam 쪽 영역 내부에 속하는 곳에 위치한 볼트(#2,3,6,7)에서 일어나는 손상이 증가할수록 전파되는 Lamb waves의 도달 시간이 늦어지고, 그 때 얻어지는 Voltage의 크기 또한 점점 더 감소하는 경향을 확인하였다. 따라서, 1 kHz PZT transducer를 이용하여 강판에서의 볼트 풀림 손상 정도를 측정신호의 TOF와 Voltage의 크기 변화로부터 정확하게 추정할 수 있음을 결론지을 수 있다.

IV. 연속형 웨이블릿 변환

측정된 Lamb waves 신호의 정확한 TOF와 주파수 성분 분석의 효율적인 신호 처리를 위해 시간-주파수 영역에서의 신호변화를 동시에 볼 수 있는 연속형 웨이블릿 변환(Continuous Wavelet Transform)이 적용될 수 있다. 시간-주파수 해석은 시간 축과 주파수 축으로 이루어진 평면의 임의의 위치에서 좋은 해상도를 줄 수 있는 방법을 고안하는데 목표를 두고 있다. 즉, 시간 축에 대한 반경이 증가할 때, 주파수 축에 대한 반경이 감소함으로써, 저주파수 성분을 얻어낼 수 있고, 반대로 시간 축에 대한 반경이 감소할 때, 주파수 축에 대한 반경이 증가함으로써, 고주파수 성분을 얻어낼 수 있는 윈도우 함수가 필요할 것이다. 이에 푸리에 해석에서의 삼각 조화 함수 대신에 웨이블릿 신호 분해의 기저함수로 Mother 웨이블릿 $\psi(t)$ 가 정의될 수 있고, 이 때, 임의의 함수 $f(t)$ 의 $\psi(t)$ 에 대한 웨이블릿 변환은 다음과 같다.

$$W_{\psi}f(b, a) := \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{b,a}(t)dt \quad (9)$$

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0. \quad (10)$$

변수, b 와 a 는 각각, 이동변수와 팽창변수들이고, $a^{-1/2}$ 는 normalization factor이다. 이 때, a 를 감소시키면, $\psi_{b,a}$ 은 시간축에 대해 축소되지만, 더 넓은 주파수 영역의 신호까지 분석할 수 있다. 그러므로, $1/a$ 는 주파수의 해상도로 나타내질 수 있다. 한편, b 는 시간축을 이동해가는 웨이블릿 윈도우 함수의 위치를 가리킨다. 이와 같이, (b, a) 를 바꿔가면서, $W_{\psi}f(b, a)$ 는 전체 시간-주파수 평면에 대하여 신호를 분석한다. 엄격히 말해서, 연속형 웨이블릿 변환은 시간-주파수 해석이 아니라, 시간-Scale 해석이다. 하지만, 식 (11)에서 보여지는 Scale과 주파수 사이의 적합한 변환에 의해 이 해석은 시간-주파수 해석으로 쉽게 전환된다.

$$f = \frac{f_c}{n \cdot \Delta} \quad (11)$$

여기서 f : 주파수, f_c : Mother 웨이블릿의 중심 주파수, n : Scale, Δ : 샘플링 속도를 나타낸다.

본 연구에서는 Lamb waves 신호 분석을 위해 가진 펄스 신호와 그 형태가 가장 비슷한 Morlet 웨이블릿을 mother 웨이블릿으로 사용했는데, 앞 3.2절의 강판에서의 볼트 풀림 검색 실험 결과에 적용시켜 주파수 의 존적인 Lamb waves 신호의 손상 전후에 나타나는 TOF의 변화와 그 때 도달된 에너지를 나타내는 웨이블

렛 계수를 얻어내어, 각 손상 단계별로 비교하여 보았다. 계측 신호를 분석함에 있어, Morlet 웨이블릿(중심 주파수는 $1/\sqrt{2}$)은 0Hz~200kHz (PZT transducer의 가진 주파수 100 kHz의 2배)에 해당하는 Scale로 전 시간 영역에 걸쳐 적용되었다. 앞 3.2 절의 그림 8(a)에서 보여진 손상 전의 Lamb waves 신호를 연속형 Morlet 웨이블릿으로 변환시킨 결과가 그림 9의 (a)와 (b)에서 각각 3차원과 2차원으로 나타내어졌다. 모든 손상 단계별로 웨이블릿 변환을 적용시킨 결과, 손상이 증가할수록 시간-주파수 평면에서 그려지는 Scalogram의 형상이 많은 변화를 보여주었다. 그림 10은 모든 경우를 대표하여 손상 단계 4와 손상 단계 7에서의 웨이블릿 변환 결과를 2차원 그래프로 보여주고 있는데, Lamb waves beam 폭 영역 내에서 풀린 볼트의 수가 증가 (손상 단계 4: 2개, 손상단계 7: 4개)할수록 그래프의 변화 정도가 커짐을 알 수 있다.

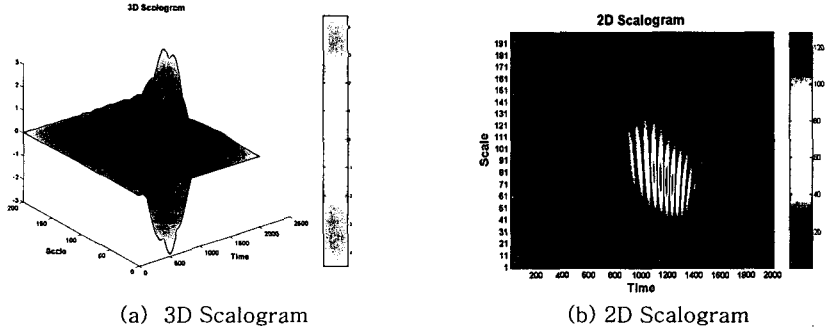


그림 9. 손상 전 Lamb waves 신호의 웨이블릿 해석 결과 (연속형 Morlet 웨이블릿)

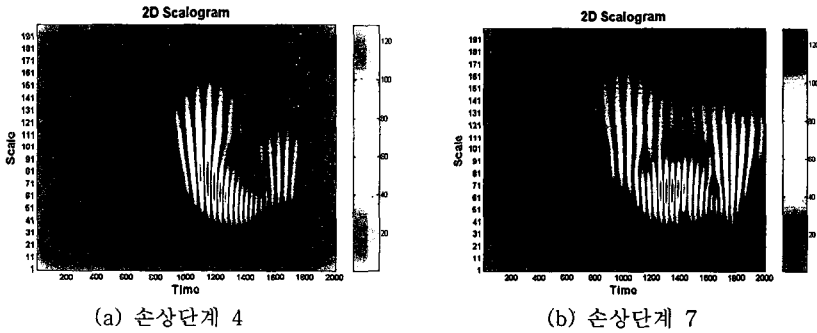


그림 10. 손상 단계 4 와 7 에서의 웨이블릿 해석 결과 (연속형 Morlet 웨이블릿)

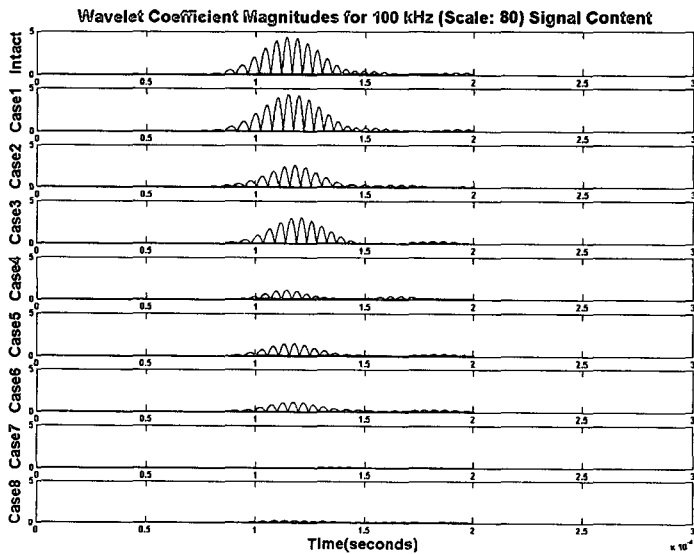


그림 11. 각 손상 단계에서의 웨이블릿 계수 (100 kHz성분)

이번에는 특정 주파수의 시간 영역에서 나타나는 Lamb waves의 파동 에너지의 변화를 분석하기 위해 가진 주파수인 100 kHz(Scale: 80) 성분에 대한 웨이블렛 계수를 얻어내어 손상단계별 변화를 비교해 보았다. 그 결과, 그림 11에서 보여지듯, 각각의 손상 단계에 따라 Lamb waves의 파동 에너지를 나타내는 웨이블렛 계수들의 크기가 감소하고, TOF도 점차 지체됨을 알 수 있었다. 여기서, 그래프의 아래 면적들은 100 kHz의 중심 주파수를 갖는 PZT transducer로부터 전달되는 Lamb waves의 에너지 강도를 나타내는데, 손상이 증가함에 따라, 에너지 강도가 다른 주파수 대역으로 빠져나가는 에너지 누수 현상도 일어남을 알 수 있었다. 따라서, 위의 결과들로부터 손상 전후의 Lamb waves 신호로부터 연속형 Morlet 웨이블렛 변환을 통한 웨이블렛 계수를 구함으로써, 전달되는 Lamb waves의 TOF와 파동 에너지의 변화를 매우 효율적으로 분석할 수 있음을 확인할 수 있었다.

V. 결론

이 논문은 토목 구조물에서 널리 이용되는 강 구조부재에서의 국부적인 손상 (내부 잔균열 또는 조인트에서의 볼트 풀림)을 감지하는데 있어, 초음파로 유도된 Lamb waves를 효율적으로 사용하는 방법론을 찾아내고 그 적용 가능성을 실험적으로 입증하였다. Lamb waves의 강재에서의 탄성파 전달 메커니즘과 군속도 분산 곡선을 확인하였다. 3 mm 크기의 60° 경사진 잔균열을 가진 400x400x2 mm 의 강재를 이용한 실험에서 지향성을 갖춘 두 개의 PZT transducer 만을 이용하여 Through Transmission 방법으로 TOF(time of flight)를 측정함으로써, 잔균열의 위치를 정확하게 찾아내었다. 8개의 볼트/너트로 채워진 조인트 강판을 이용한 실험에서는 풀려진 볼트의 위치와 개수에 따라 전달되는 Lamb waves의 TOF와 Voltage의 크기가 달라지는 경향성을 분석하여 보았다. 특히, Lamb waves beam 폭 영역 내부에 위치한 볼트 풀림의 수와 측정된 신호와의 상관관계로부터, Lamb waves의 두 번째 peak의 TOF는 손상 정도가 증가할수록 더 지체되었으며, 측정된 Voltage의 크기는 손상 정도가 증가할수록 감소하는 경향을 보임을 확인하였다. 한편, Lamb waves 신호의 효율적인 해석을 위한 대안으로 시간-주파수 영역 해석 기법의 하나인 연속형 웨이블렛 변환을 적용시킨 결과, Lamb waves의 TOF가 손상에 의해 점차 지체되고 이 때 전달되는 에너지의 강도도 손상이 증가함에 따라 점차 감소함을 알 수 있었다. 이로써, 강 구조부재에서의 국부적인 손상을 감지하기 위해 초음파로 유도된 Lamb waves와 이들의 웨이블렛 계수의 사용이 매우 효율적으로 적용될 수 있음이 입증되었다.

감사의 글

This study is supported by Smart Infra-Structure Technology Center(SISTeC) sponsored by Ministry of Science and Technology(MOST) and the Korea Science and Engineering Foundation(KOSEF). Their financial supports are greatly acknowledged.

참고문헌

1. Peter Cawley and David Alleyne, "The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures", *Ultrasonics* 34, 1996, 287-290
2. T. Ghosh, T. Kundu and P. Karpur, "Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plagues", *Ultrasonics* 36, 1998, 791-801
3. Won-Bae Na, Tribikram Kundu and Mohammad R. Ehsani, "Lamb Waves for Detecting Delamination between Steel Bars and Concrete", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, 2003, 58-63
4. Riichi Murayama and Koichi Mizutani, "Conventional electromagnetic acoustic transducer development for optimum Lamb wave modes", *Ultrasonics* 40, 2002, 491-495
5. Kritsakorn Luangvilai, Wonsiri Punurai and Laurence J. Jacobs, "Guided Lamb Wave Propagation in Composite Plate/Concrete Component", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 12, Dec. 1, 2002, 1337-1341
6. Zensheu Chang and Ajit Mal, "Scattering of Lamb waves from a rivet hole with edge cracks", *Mechanics of Materials* 31, 1999, 197-204
7. B C Lee and W J Staszewski, "Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part I. Wave propagation", *Smart Mater. Struct.* 12, 2003, 804-814
8. B C Lee and W J Staszewski, "Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part II. Wave interaction with damage", *Smart Mater. Struct.* 12, 2003, 815-824
9. Roberto Osegueda and Vladik Kreinovich, "Detecting and Locating Curved Cracks in Thin Plates by Lamb Wave Reflection: Validated Geometric Approach"
10. Seth S Kessler, S Mark Spearing and Constantinos Soutis, "Damage Detection in composite materials using Lamb wave methods", *Smart Mater. Struct.* 11, 2002, 269-278