

웨이블릿 변환을 이용한 터널 콘크리트 라이닝의 두께 검사법

Thickness assessment of tunnel concrete lining using wavelet transform

이인모*¹, 전일수*², 홍은수*³, 이주공*⁴

Lee, In-Mo · Cheon, Il-Soo · Hong, Eun-Soo · Lee, Joo-Gong

Abstract

To investigate the safety and stability of a concrete lining, numerous studies have been conducted over the years and several methods have been developed. Most signal processing techniques of NDT have been based on Fourier analysis. However, the application of Fourier analysis to analyze recorded vibrational signal shows results in the frequency domain only, and it is not enough to analyze transient waves precisely. In this study, Wavelet theory was employed for the analysis of non-stationary wave induced by mechanical impact on tunnel concrete lining. The Wavelet transform of transient signals provides a method for mapping the frequency spectrum as a function of time. To verify the availability of Wavelet transform as a time-frequency analysis tool, model experiments have been conducted and the thickness of the concrete lining was estimated based on the proposed theory. From this study, it was found that the contour map by Wavelet transform provides more distinct results than the power spectrum by Fourier transform and it was also found that Wavelet transform was also an effective tool for the analysis of dispersive waves in tunnel concrete linings.

Keywords : Wavelet transform, fourier transform, dispersive wave, tunnel, lining

요 지

콘크리트 라이닝의 안정성을 검토하기 위해 지난 수년간 많은 연구가 이루어졌으며, 많은 비파괴 조사 기법들이 개발되고 발전하였다. 이러한 비파괴 조사 기법들은 그 신호 해석 과정에서 대부분 푸리에 이론을 근간으로 하고 있다. 그러나 진동신호에 대하여 푸리에 해석을 적용할 경우 결과는 단지 주파수 영역상에서 확인될 뿐이며, 이러한 결과로는 정확한 대상 신호의 분석을 기대할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 충격하중으로 인하여 발생한 비정상 파의 해석을 위하여 웨이블릿 이론을 적용하였으며, 웨이블릿 변환의 적용성을 확인하기 위하여 콘크리트 라이닝을 모사한 모형을 대상으로 실험을 수행하고, 제안된 이론을 바탕으로 콘크리트 라이닝의 두께를 추정하였

*1 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수
 *2 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정
 *3 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정
 *4 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정수료

다. 본 연구로부터 푸리에 변환에 비해 웨이블릿 변환이 뛰어난 분해능을 제공함을 확인할 수 있었으며, 분산성을 갖는 파를 해석함에 있어서도 웨이블릿 변환이 뛰어난 신호 해석법임을 확인할 수 있었다.

주요어 : 푸리에 변환, 리지해석, 비파괴조사, 콘크리트 라이닝, 웨이블릿 변환

1. 서론

콘크리트 구조물의 결함부 탐지는 터널을 포함한 구조물의 진보적인 유지관리와 수명연장을 위해 가장 주목을 받는 주제중 하나였다. 구조물이 외부의 작용으로 인하여 국부적으로 손상이 되면 강성이 감소하고 감쇠의 정도가 증가하는 등 동적특성치가 변화한다. 최근 이러한 동적특성치의 변화를 이용하여 구조물의 결함 정도를 파악하고자 하는 연구가 수행되어 왔으나 대부분의 경우 신호해석방법의 한계, 파동의 전파에 대한 이해 부족 등으로 인하여 많은 문제점을 내포하고 있는 실정이다.

최근 많이 사용되는 비파괴 시험 (nondestructive testing)은 시험 대상 구조물의 동적 반응으로부터 가치 있는 정보를 가지는 측정 요소들을 결정하고 이런 요소들의 측정결과를 사용하여 시험 대상물의 상태를 평가하는 것으로 요약할 수 있다. 이러한 연구는 구조물을 따라 전파하는 파의 특성은 시험 대상의 물성치와 기하학적 구조에 의하여 결정된다.

터널 구조물의 경우 지난 수 십년 동안 콘크리트 라이닝의 결함을 조사하기 위하여 많은 비파괴 검사 기법들이 연구되었다. 그러나 기존의 비파괴 검사 기법들은 그 신호 해석 단계가 매우 복잡하고 기술자의 많은 경험과 전문지식들을 필요로 하여 결과의 신뢰성, 효율성에 비해 많은 문제점이 제기되었다. 이러한 문제점은 충격하중으로 인하여 발생한 펄스 (pulse)는 넓은 주파수 범위 영역에서 그 형태와 성질들이 변화하고, 분산현상이 발생하거나 손상영역 혹은 경계면 (boundary)에서 굴절, 반사 및 입사파 성분들이 혼재할 경우 수신되는 정보는 더욱더 복잡해지기 때문이다. 그러나 대부분의 비파괴 검사법에서 적용하는 푸리에 해석법은 단지 주파수상에 대한 정보만을 제공할 뿐, 시간에 대한 정보는 제공하지 못하는 한계를 가지고 있다. 또한 멀티 스케일 성분을 포함한 여러 이벤트 (event)들이 급속도로 변화하는 비정상 신호 (non-stationary signal)에 대하여 푸리에

이론은 정확한 결과를 보여주지 못한다. 따라서 이러한 문제점들을 극복하기 위해 새로운 신호해석 기법에 대한 많은 연구들이 이루어졌으며, 최근에 웨이블릿 변환 (Wavelet transform)을 이용한 신호해석 방법에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 시간-주파수 해석법은 파형의 데이터를 분해하여 시간과 주파수의 2차원 평면상에 파형의 에너지분포를 구하는 해석방법으로 진동신호의 해석 등에 널리 사용되고 있다. 시간-주파수 해석의 가장 큰 장점은 여러 주파수 성분의 시간에 대한 변화를 나타내므로써 비정상신호에 대한 해석이 훨씬 용이하다는데 있다. 특히, 분산성을 갖는 파의 각 주파수 성분들이 감지되는 시간을 파악하기 위해서는 시간-주파수 해석은 반드시 필요하다.

2. 신호 해석 방법

2.1 푸리에 이론(Fourier Theory)

푸리에 변환의 기본 개념은 주기성을 갖는 신호를 여러 주파수 성분을 갖는 정현파의 무한한 합으로 분해하는 것으로서, 임의의 시간영역에서 표현된 함수를 주파수영역으로 변환시키는 과정을 푸리에 해석 (Fourier analysis)이라 하고 주파수 영역에서 시간의 영역으로의 변환을 푸리에 합성이라 한다. 주어진 함수에 대하여 푸리에 변환과 역푸리에 변환을 순차적으로 수행하면 변환과정 중에 아무런 정보의 유실 없이 본래의 함수를 재생할 수 있다.

$$\hat{f}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-iwt}dt \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(w)e^{iwt}dw \quad (2)$$

푸리에 변환의 수학적인 기능은 시간 영역의 시점을

주파수 영역의 시점으로 전환하는 것이다. 따라서 수신된 신호를 동적 신호 분석기 (dynamic signal analyzer)를 통하여 주파수 영역상에 표현할 경우 대상 신호의 주기성을 쉽게 분석할 수 있다. 신호의 주파수 성분을 표현하는 푸리에 해석은 아주 유용한 도구임엔 틀림없지만 변환 과정에서 발생하는 시간에 대한 정보의 손실은 푸리에 변환이 갖는 한계이자 치명적인 약점이다. 대상 신호가 정상신호일 경우 이러한 문제점은 중요하지 않으나, 매질에 충격하중을 가하여 발생하는 진동신호는 대부분 시간에 따라 신호의 물리적 특성이 변화하는 비정상신호 (non-stationary)이다. 따라서 특정 이벤트 (event)의 발생 시간과 소멸시간, 주파수의 변조 등이 주요 관심 대상일 경우 푸리에 해석은 유익한 정보를 제공하지 못한다. 그리고 푸리에 변환의 기저함수는 음의 무한영역에서부터 양의 무한영역까지 완만한 굴곡을 갖는 sin함수들로만 표현이 된다. 이러한 특성은 급격한 변화와 날카로운 첨두점을 나타내는 비정상적인 신호의 특성을 분석하기에는 적합하지 않으며 신호가 멀티스케일 특성을 지니고 있을 경우, 푸리에 변환은 신호의 주파수 특성을 정확하게 표현하지 못한다.

2.2 연속 웨이블릿 변환 (Continuous Wavelet Transform)

웨이블릿 변환은 입력 신호를 특정 기저 함수의 집합으로 분리하는 과정으로 이해될 수 있다. 웨이블릿 변환에 사용되는 기저 함수의 집합은 하나의 기본 웨이블릿 기저함수 (mother wavelet)에 대한 시간축 방향으로의 확대 및 축소 그리고 평행 이동을 통하여 얻어진다. 따라서 웨이블릿 변환에서는 주파수 대역이라는 용어 대신 스케일 (scale)이라는 용어를 사용하기도 하며, 입력 신호에 대한 웨이블릿 변환을 다른 말로 원 신호의 시간-스케일 공간표현 이라고도 일컫는다. 이때 스케일은 주파수와 1:1대응을 이루게 된다. 웨이블릿 변환의 기본식은 다음과 같이 표현된다.

$$W(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{u,s}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (3)$$

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (4)$$

여기서,

- $\psi(t)$: 모웨이블릿 (mother wavelet)
- u : 이동 파라미터 (translation parameter)
- s : 스케일 파라미터 (scaling parameter)
- $*$: 복소 공액 (complex conjugate)
- $f(t)$: 대상 원신호 (original signal)

식 (3)은 신호 $f(t)$ 와 모웨이블릿의 상호상관 (cross-correlation)의 과정으로도 이해될 수도 있다. 따라서 연속 웨이블릿 변환은 원신호 (signal)와 모웨이블릿 (mother wavelet)의 상관성이 클수록 큰 웨이블릿 계수값을 나타낸다. 모웨이블릿 $\psi(t)$ 는 다음과 같은 허용조건 (admissibility condition) 만족해야 한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\widehat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (5)$$

$\widehat{\psi}(\omega)$: 모웨이블릿 $\psi(t)$ 의 푸리에 변환

모웨이블릿에는 여러가지 함수식이 다양하게 제시되어 있다 (Mallat, 1998). 이중 본 연구에 사용되어진 가버 웨이블릿 (Gabor wavelet)은 여러 웨이블릿들중 가장 뛰어난 해상도를 제공하는 것으로 알려져 있다 (Kim & Kim, 2001). 가버 웨이블릿은 가우시안 함수 (Gaussian function)로 창문화 (windowed)되었으며 다음과 같이 정의된다.

$$\psi(t) = e^{i\pi n t} \frac{1}{(\sigma^2 \pi)^{1/4}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

- $e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$: 가우시안 함수 (Gaussian window function)
- n : $\widehat{\psi}(\omega)$ 의 중심 주파수
- σ : $\psi(t)$ 의 폭

2.3 리지 해석 (Ridge Analysis)

해석적 웨이블릿 변환은 앞에서 언급되어진 웨이블릿

변환 식(3)에 의해 국부적인 시간-주파수 창에서 에너지 분포 (P_{wf}) 로 정의된다. 이는 다음의 식과 같이 웨이블릿이 ($u, \xi = n/s$)에 위치할 경우 수신된 신호의 에너지 밀도를 나타내는 것이다.

$$P_{wf}(u, \xi) = |Wf(u, s)|^2 = \left| Wf\left(u, \frac{n}{\xi}\right) \right|^2 \quad (7)$$

이러한 에너지의 밀도를 스케일로그램 (scalogram) 이라 부른다.

이때 리지는 웨이블릿 변환의 결과인 시간-주파수 영역에서 각 주파수 성분에 대하여 가장 큰 에너지가 집중되는 위치를 연결한 선으로 정의된다. 시간-주파수 평면에서 다음의 식 (8)에 의하여 정의된 정규화된 스케일로그램 (normalized scalogram)을 이용하면 쉽게 리지를 찾을 수 있다(Mallat, 1998).

$$\frac{\xi}{n} P_{wf}(u, \xi) = \frac{|Wf(u, s)|^2}{s} \quad \text{for } \xi = n/s \quad (8)$$

리지는 웨이블릿 계수를 이용하여 앞의 식 (8)에 따라 정규화하고, 각 주파수 (혹은 스케일)마다 최대의 웨이블릿 계수값을 갖는 점들을 이은 선이다. 따라서 시간 주파수 평면에서 리지의 위치는 비정상신호의 각 주파수 성분에 대한 도착시간을 의미한다. 이러한 연속 웨이블릿 변환을 이용한 리지 해석은 급속도로 물리적 특성이 변하는 비정상신호의 각 주파수별 에너지 도착시간을 파악하는데 매우 유용한 신호 해석법이다. Kishimoto 등 (1995)은 수학적으로 웨이블릿 변환을 파동 전파에 적용하기 위해서 단위 크기와 주파수를 가지고 전파하는 두 개의 조화진행파를 고려하여 웨이블릿 계수의 절대값이 시간-주파수 평면에서 극대 (peak)가 됨을 보였고, 웨이블릿 계수의 절대값이 극대가 되는 시간을 구하면 전파되는 파의 군속도 (group velocity)를 구할 수 있음을 증명하였다. Zhang (2001)은 웨이블릿 변환을 이용하여 특정 주파수군의 도달 시간을 확인하였으며, 구조물의 결함부 위치 추적시 고주파 성분일수록 보다 양호한 결과를 제공한다는 것을 보였다. Jeong (2001)은 웨이블릿 변환을 이용하여 판구조물에서 가진원의 위치를 추정하였다. 또한 Kim & Kim (2001)은 빠르게 변하는 주파수 성분을 포함하고 있는 분산파의 해석에 웨이블릿

변환이 가장 뛰어난 해석방법임을 이론적으로 입증하였다. 이러한 연구 결과들은 모두 웨이블릿 변환이 시간-주파수 해석에서 가장 유용한 방법임을 증명하고 있다.

3. 모형 실험 (Model Test)

본 연구에서 제안한 웨이블릿 변환 방법의 효율성을 입증하기 위하여 콘크리트 라이닝 모형에 대해 실험이 수행되었다. 각 실험들의 목적은 콘크리트 라이닝 모형의 표면에 인위적인 충격하중을 가하여 응력파를 발생시키고, 발생된 응력과 성분중 분산성을 갖는 비정상 표면파가 콘크리트 모형을 전파할 때 각 결함부위에 의해 변조되는 상태를 웨이블릿 변환에 의한 시간-주파수 평면 상에서 관찰하는데 있다. 감지기 (transducer)는 그림 1에 나타난 바와 같이 공진 주파수가 73.5 kHz 인 두 개의 가속도계를 사용하였으며, 콘크리트 표면에 글루건 (glue gun)을 이용하여 부착하였다. 그림 2에 나타난 바와 같이 사용된 신호 수집장치 (data acquisition

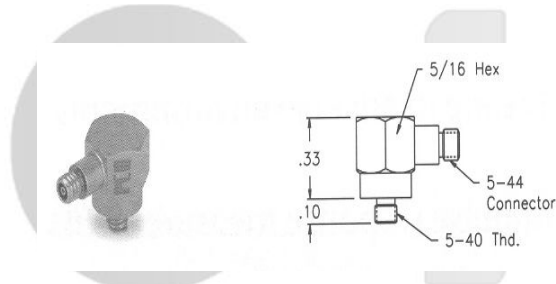


그림 1. 가속도계(PCB353B15, PCB)



그림 2. 신호 수집장치 (NI4472, National Instrument)

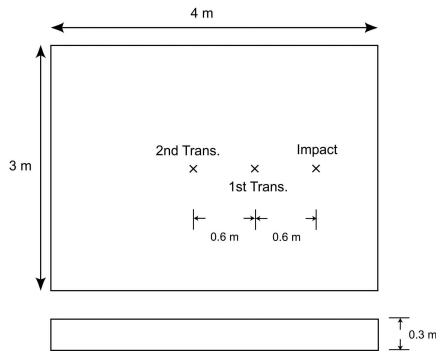


그림 3. 콘크리트 라이닝 모형

표 1. 콘크리트 모형의 특성치

단위중량 (γ)	2200 kg/ m ³
정탄성계수 (E_{sta})	2.7 × 10 ⁹ kg/ m ²
동탄성계수 (E_{dyn})	3.5 × 10 ⁹ kg/ m ²
포아송 비 (ν)	0.25

system)는 24bit의 해상도를 제공하며, 최대 동시 샘플링 속도 (simultaneous sampling rate)는 102,000 S/sec 이다.

연속 웨이블릿 변환 (CWT) 해석시에는 앞에서 언급한 바와 같이 가버 웨이블릿 (Gabor wavelet)을 사용하였으며, 결과치는 시간과 주파수축상의 웨이블릿 계수의 등고선 (contour)으로 표현하였다. 아날로그 트리거링 시점이 0.01초 (1001번째 데이터)이므로 등고선의 표현은 0.01초를 기준으로 대부분의 주요 이벤트가 소멸되는 시점까지 확대하여 표현하였다. 또한 다음의 그림 3에 나타난 바와 같이 근접장 효과를 제거하기 위하여, 가진 원의 위치와 첫 번째 감지기 사이의 거리는 최소 30cm이상이 되도록 설치하였다.

모형 제작에 사용된 콘크리트의 특성치는 위의 표 1에 요약하였다.

4. 실험 결과 및 분석

다음의 그림 4는 표면을 따라 전파하는 표면파와 콘크리트 라이닝 바닥으로부터 반사된 압축파의 전파경로에

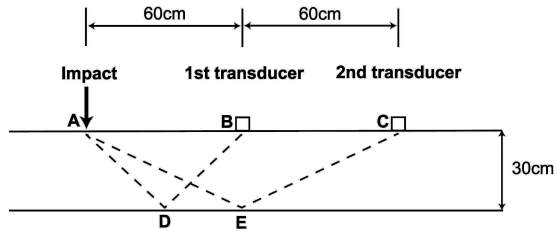


그림 4. 압축파와 표면파의 전파 경로

표 2. 압축파와 표면파의 예상 도달 시간

전파 경로	전파 거리 (m)	소요 시간 (μ sec)	응력파 성분
A→B	0.60	261	표면파
A→C	1.20	522	
A→D→B	0.85	196	압축파
A→E→C	1.34	310	

대하여 개략적으로 나타낸 것이다.

표 1을 이용하여 압축파와 표면파의 이론적인 파속을 다음과 같이 추정할 수 있다.

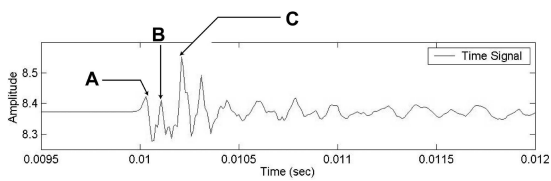
$$V_{P \text{ theory}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = 4328 \text{ m/sec} \tag{9}$$

$$V_{R \text{ theory}} = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} V_s = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} = 2299 \text{ m/sec} \tag{10}$$

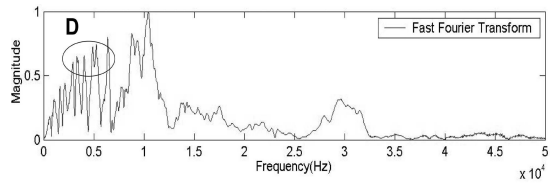
따라서, 그림 4의 응력파의 전파 경로를 고려하면 표 2와 같이 각 응력파 성분의 도달 예상 시간을 추정할 수 있다.

표 2를 살펴보면 두 감지기 (B, C) 모두 표면파 보다 압축파가 먼저 수신될 것임을 알 수 있다. 수신된 파형 및 분석결과는 그림 5 및 6과 같다.

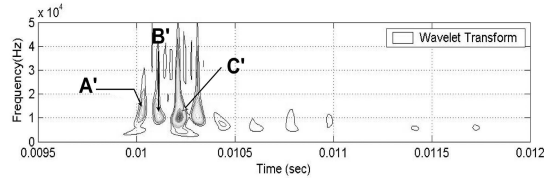
그림 5 (a)의 시간 이력 곡선을 살펴보면 라이닝 모형 바닥으로부터 반사된 압축파 (B)가 표면파 (C)보다 먼저 수신되고 있음을 확인할 수 있다. 트리거링 (triggering) 후 곧바로 수신되는 미약한 성분 (A)는 표면을 따라 전파하는 체적파인 것으로 추정된다. 그림 5 (c)에 나타난 바와 같이 웨이블릿 변환 결과를 살펴보면 약 11 kHz



(a) 시간 영역 해석(시간 이력 곡선)

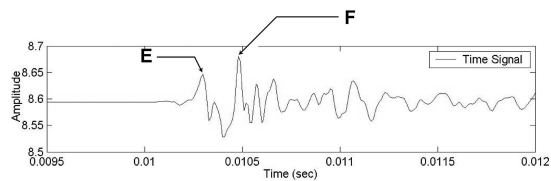


(b) 주파수 영역 해석(푸리에 변환)

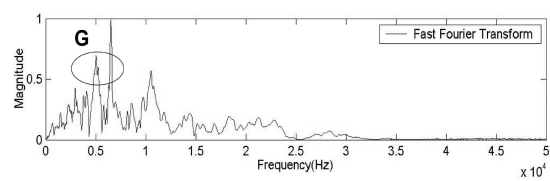


(c) 시간-주파수 영역해석(웨이블릿 변환)

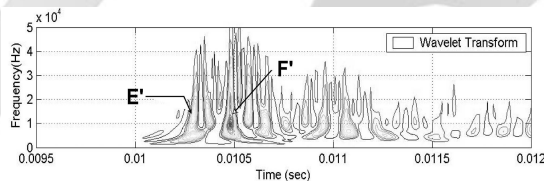
그림 5. 첫 번째 감지기로 획득된 신호 분석 결과



(a) 시간 영역 해석(시간 이력 곡선)



(b) 주파수 영역 해석(푸리에 변환)



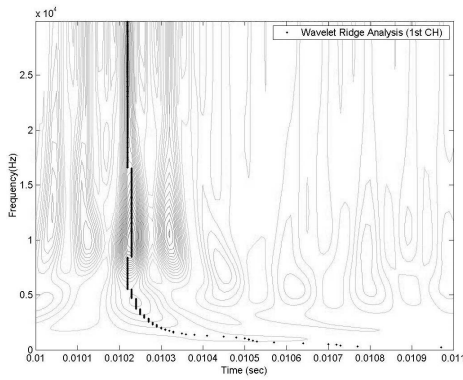
(c) 시간-주파수 영역해석(웨이블릿 변환)

그림 6. 두 번째 감지기로 획득된 신호 분석 결과

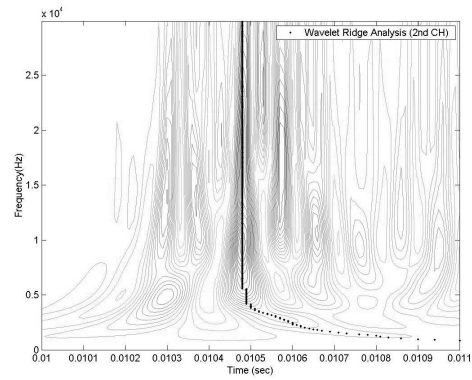
의 지배 주파수를 갖는 표면파 에너지 (C')가 약 0.01021 sec에 수신되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 강철구에 의해 발생된 표면파 성분의 지배주파수가 11 kHz임을 의미한다. 또한 시간 영역 해석 결과와 동일하게 바닥에서 반사된 압축파 에너지 (B')와 표면을 따라 입사하는 체적파 에너지 (A')가 시간-주파수 영역상에 뚜렷이 표현되고 있다.

그림 6의 결과를 살펴보면 역시 바닥에서 반사된 압축파 (E, E')가 먼저 수신되고 있으며, 지배적인 에너지를 갖는 표면파 (F, F')가 약간의 시간 차이를 보이며 수신

되고 있음을 확인할 수 있다. 위의 결과들을 종합해보면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 강철구에 의해 가진된 응력과 성분은 표면을 따라 전파하는 표면파 성분이 지배적이었으며, 표면파 성분에 비해 콘크리트 바닥으로부터 반사된 압축파 성분은 미약하였다. 웨이블릿 변환결과는 각 응력과 성분의 도달 시간 및 지배 주파수의 크기를 명확히 표현해 주었다. 그리고 그림 5 (c)과 6 (c)를 비교해보면 11 kHz의 지배 주파수를 갖는 표면파 성분이 약간의 시간 차이를 두고 그대로 수신되고 있음을 명확히 알 수가 있다. 즉, 매질을 전파하는 표면파가 어떠



(a) 첫 번째 감지기



(b) 두 번째 감지기

그림 7. 리지 해석 결과

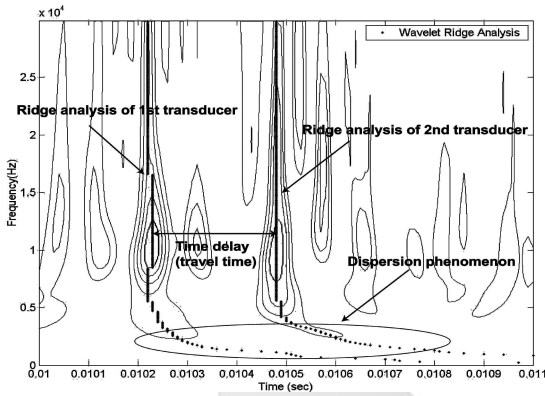


그림 8. 리지 해석 결과 종합

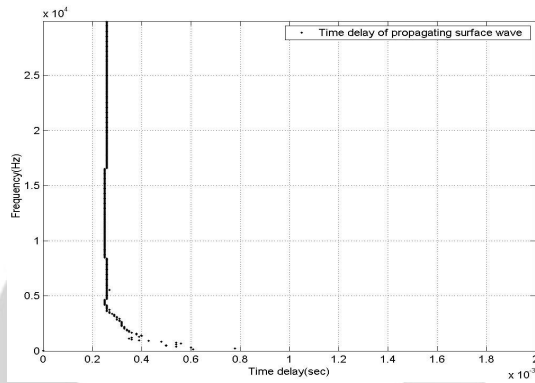


그림 9. 주파수별 표면파 에너지 도달 시간차

한 변조도 발생하지 않은 채 그대로 두 번째 감지기로부터 수신되었으며, 이는 대상 매질인 콘크리트 라이닝 모형의 내부에 결함부가 존재하지 않았기 때문이다. 반면에 그림 5 (b), 6 (b)의 푸리에 변환 결과를 살펴보면 원으로 표시된 영역 D, G의 저주파 성분(약 6 kHz)이 각각 과대 평가되어 있음을 알 수가 있다. 이러한 결과는 비정상 신호의 해석에 있어서 푸리에 변환이 잘못된 결과를 보여줄 수 있음을 보여준다. 또한 대상 신호가 분산성을 나타낼 경우 시간 영역상의 관찰로는 분산 영역과 비분산 영역의 구분이 불가능하며 각 주파수별 표면파 파속 결정을 위한 정보는 제공하지 못한다.

두 감지기 사이의 각 주파수 성분의 도달 시간차를 확인하기 위하여 획득된 데이터를 이용하여 리지 해석

(ridge analysis)을 수행하였다. 그림 7은 두 개의 감지기로부터 수신된 신호의 정규화된 스케일로그램(normalized scalogram)이다. 그림에서 실선으로 나타낸 리지(ridge)는 각 주파수 성분별(스케일별) 웨이블릿 계수 $Wf(u, s)$ 의 최대점을 연결한 선이다. 실험 결과를 살펴보면, 비분산 영역에서 각 주파수 성분의 에너지가 거의 동일한 시간차이를 두고 대상 매질인 콘크리트 라이닝 모형을 전파하고 있으며, 분산영역에서는 도달시간 차이가 주파수에 따라 변화함을 알 수가 있다. 즉, 표면파의 주파수에 따라 균속도의 분산현상이 발생함을 뚜렷이 확인할 수가 있다.

그림 8은 두 개의 리지를 동일한 시간-주파수 평면상에 표현한 것이다. 그림과 같이 리지 해석을 통해 매질을

전파하는 표면파의 분산 영역과 비분산 영역의 구분이 가능하며, 비분산 영역 주파수 범위 내에 존재하는 두 개의 리지의 주파수별 도달 시간차를 그림 9와 같이 계산하면, 두 감지기 사이의 거리 60cm를 진행하는 표면파의 파속을 쉽게 계산할 수 있다. 분산현상이 나타나지 않는 주파수 대역 4~30 kHz 사이의 도달 시간차이를 RMS (root-mean-square) 평균을 통하여 산출하였으며, 두 리지의 도달 시간차는 0.00026 sec 이었다. 따라서, 비분산 영역의 표면파 파속은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{R1} = \frac{0.6 \text{ m}}{0.00026 \text{ sec}} = 2308 \text{ m/sec}$$

그림 5 (a)와 그림 6 (a)에 나타난 시간 이력 곡선으로부터 표면파의 도달 시간 (arrival time)을 측정하면 표면파 파속을 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$V_{R2} = \frac{0.6 \text{ m}}{0.01048 - 0.01021 \text{ sec}} = 2222 \text{ m/sec}$$

식 10을 이용하여 구한 이론적인 표면파 파속 $V_{R \text{ theory}}$,와 V_{R1} , V_{R2} 를 비교해보면, 리지 해석을 통해 얻어진 V_{R1} 이 이론적으로 구한 파속과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 평균적인 비분산 영역의 에너지 도달 시간차를 이용하여 파속을 결정하는 것이 특정 파군의 도달 시간차를 이용하여 파속을 결정하는 것 보다 합리적임을 의미한다.

그림 9에서 확인된 분산영역의 최대 주파수 4 kHz와 계산된 비분산 영역의 표면파의 파속을 이용하여 다음과 같이 비분산 영역의 최대 파장범위를 계산할 수 있다.

$$\lambda = \frac{2308 \text{ m/sec}}{4 \text{ kHz}} \approx 57.7 \text{ cm}$$

매질의 평균 물성치는 파장의 1/2의 깊이의 물성치를 근사적으로 대표한다고 가정할 경우 콘크리트 라이닝 모형의 두께를 추정할 수 있다 (Joh, 1996).

$$d = \frac{57.7 \text{ cm}}{2} = 28.9 \text{ cm}$$

위의 결과는 실제 콘크리트 라이닝의 두께 30cm와 일치하는 값으로써 웨이블릿 해석을 통하여 콘크리트 라이닝의 두께를 추정하는 것이 매우 합리적임을 나타낸다. 또한 식 (10)에 나타난 바와 같이 실험을 통해 구한 표면파의 파속을 이용하여 동탄성 계수를 추정할 수 있다. 측정된 동탄성계수는 $3.53 \times 10^9 \text{ kg/m}^3$ 로써 표 1에 나타난 바와 같이 모형 제작에 사용된 콘크리트의 동탄성 계수와 유사한 값을 나타내고 있다. 또한 정탄계수는 $2.70 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$ 로써 표 1에 나타난 값보다 약간 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 동탄성 계수가 정탄성 계수보다 항상 크다는 사실에 부합한다.

5. 결론

기존의 비파괴 검사 기법은 신호 해석 과정에서 푸리에 해석을 기반으로 하였다. 그러나, 이러한 푸리에 해석을 이용한 신호 해석법은 실험 과정을 복잡하게 하고, 올바르게 해석된 결과를 보여주는 경우가 많다. 따라서 본 논문은 시간-주파수 해석법 가운데 신호에 대한 분해능이 가장 탁월하고, 주파수 대역에 따라 탄력적으로 적용이 가능한 웨이블릿 이론을 적용하여 콘크리트 라이닝의 두께를 추정하였으며, 기존의 푸리에 해석과 웨이블릿 해석의 비교분석을 통하여 웨이블릿 해석의 우수성을 확인하였다. 본 연구에서 수행한 실험결과 및 푸리에 해석과의 비교 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 충격하중을 통해 발생된 비정상 신호에 대하여 푸리에 변환은 개략적인 지배 주파수에 관한 정보만을 제공하였으므로 비정상상태의 파동과 같이 시간에 대한 정보가 중요한 경우에는 잘못된 결과를 보여주기도 하였다.
2. 웨이블릿 변환은 분산성을 갖는 표면파의 에너지 분포를 시간-주파수 평면상에 명확히 표현해 주었다
3. 리지 해석을 통하여 매질을 전파하는 표면파의 분산 영역과 비 분산 영역을 구별할 수 있었으며, 비 분산 영역의 파속을 쉽게 얻을 수 있다.

4. 결정된 표면파 파속을 이용하여 매우 적은 오차 범위 내에서 대상 매질의 두께를 추정할 수 있었다. 시간 이력 곡선과 파워 스펙트럼은 각각 비정상 신호의 에너지 분포를 단지 시간 영역과 주파수 영역의 관점에서만 관찰한 결과이다. 따라서 한 쪽 면으로만 대상 신호를 관찰하여 얻은 정보는 비정상 신호의 전체적인 특성을 정확히 파악 할 수 없으며, 각각 다른 관점에서 획득한 두 정보의 상관 관계 또한 파악할 수 없다. 그러나 웨이블릿 변환을 이용하여 시간-주파수 영역상에서 대상 신호를 입체적으로 바라 볼 경우 이러한 문제점은 쉽게 해결되었다. 따라서, 비파괴 조사시 수신되는 비정상 신호의 해석에 있어서 기존의 푸리에 해석보다는 웨이블릿 해석이 훨씬 유용한 방법이라 결론지을 수 있다.

참고문헌

1. Jeong H. J. (2001), "Analysis of plate wave propagation in anisotropic laminates using a wavelet transform", *NDT&E International* 34 (2001), pp.185-190
2. Kishimoto K., Inoue H., Hamada M. and Shibuya T. (1995), "Time-frequency analysis of dispersive waves by means of wavelet transform", *Journal of Applied Mech.*, Vol. 62, pp.841-846
3. Kim Y. Y. and Kim E. H. (2001), "Effectiveness of the continuous wavelet transform in the analysis of some dispersive elastic waves", *Journal Acous. Soc. Am.* 110 (1), pp.86-94
4. Mallat S. (1998) "A wavelet tour of signal processing" Academic press, 2nd edition.
5. Zhang B. (1998), "Study of energy distribution of guided waves in multilayered media", *Journal Acous. Soc. Am.*, Vol. 103, No. 1, pp. 125~135.



이인모

고려대학교 공과대학 토목환경공학과
교수
inmolee@korea.ac.kr



전일수

고려대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정
ischeon@lgenc.co.kr



홍은수

고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정
es_hong@yahoo.co.kr



이주공

고려대학교 토목환경공학과 박사과정 수료
jowhb@korea.ac.kr