

터널 콘크리트 라이닝의 새로운 비파괴 검사기법 A New NDT Technique on Tunnel Concrete Lining

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 전일수²⁾, Il-Soo Cheon, 조계춘³⁾, Gye-Chun Cho, 이주공⁴⁾, Joo-Gong Lee

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Env. Engrg., Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 석사, Master of Science, Dept. of Civil & Env. Engrg., Korea Univ.

³⁾ 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Env. Engrg., KAIST

⁴⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil & Env. Engrg., Korea Univ.

SYNOPSIS : To investigate the safety and stability of the concrete lining, numerous studies have been conducted over the years and several methods have been developed. Most signal processing method of NDT techniques has based on the Fourier analysis. However, the application of Fourier analysis to analyze recorded signal shows results only in frequency domain, it is not enough to analyze transient waves precisely. In this study, a new NDT technique using the wavelet theory was employed for the analysis of non-stationary wave propagation induced by mechanical impact in the 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 on the concrete lining model. 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 concluded that Wavelet transform was an effective tool for the experimental analysis of dispersive waves in concrete structures.

주요어(Key words) : Wavelet transform, Fourier transform, NDT, Concrete lining, Tunnel

1. 서론

기존의 비파괴 조사 기법들은 신호해석 단계에서 대부분 푸리에 해석(Fourier analysis)에 그 근간을 두고 있다. 그러나 진동신호에 대한 푸리에 해석적용 결과는 단지 주파수상에 대한 정보만을 제공할 뿐, 시간에 대한 정보는 제공하지 못한다. 이는 비파괴 조사 기법들의 적용 범위를 축소시키고 신호해석 과정을 복잡하게 한다. 더군다나, 근래에는 많은 수학자, 공학자들이 비정상 신호에 대한 푸리에 해석의 한계에 대하여 지적을 하고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 극복하기 위해 새로운 신호해석 기법(signal processing technique)에 대한 많은 연구들이 이루어졌으며, 최근에 웨이블릿 변환(Wavelet transform)과 같은 시간-주파수 평면상에서의 해석 기법이 많은 연구자들에 의하여 연구되고 있다. 이러한 시간-주파수 해석법은 신호를 분해하여 시간과 주파수의 2차원 평면상에 파형의 에너지 분포를 구하는 해석방법으로 음향, 진동신호의 해석 등에 널리 사용되고 있다. 시간-주파수 해석의 가장 큰 장점은 여러 주파수 성분이 시간에 따라 어떤 변화를 보이는지를 에너지의 분포를 이용하여 쉽게 보여준다는 것이다. 특히 분산성을 갖는 파의 각 주파수 성분들이 감지되는 시간을 파악하기 위해서는 시간-주파수 해석은 반드시 필요하다. 근래에 각광받고 있는 웨이블릿 이론은 음성 인식(speech recognition), 영상 해석(image processing), 양자 역학(quantum mechanics)등 광범위한 분야에서 적용되고 있다. 특히 신호

해석(signal processing)분야에서 널리 이용되고 있으며, 각기 다른 과속으로 전파하는 비정상 진동 신호의 특정 이벤트(event)들에 대한 정확한 추적을 가능케 한다. 최근 몇몇 연구자들에 의해 빔이나 판 구조물에 발생한 파의 분산 현상이 웨이블릿 변환에 의해 분석되긴 하였으나(Kishimoto,1995; Gaul,1998; Zhang,2001) 본격적으로 비파괴 검사 기법에 적용되지는 못하였다. 본 연구에서는 근래에 각광받고 있는 웨이블릿 이론을 비파괴 검사 기법에 적용하여, 그 적용성을 확인하고 신호 해석 단계에서 푸리에 해석과 웨이블릿 해석을 병행하여 웨이블릿 해석의 우수성을 확인하고자 한다.

2. 신호 해석 방법(Signal Processing Method)

모든 비파괴 검사 기법은 획득된 신호를 분석할 명확한 신호 해석 기법들을 필요로 한다. 충격하중으로 발생한 펄스(pulse)는 넓은 주파수 범위영역에서 그 형태와 성질들이 변화하기 때문이다. 더군다나 분산현상이 발생하거나, 손상영역 혹은 경계면(boundary)에서 굴절, 반사, 입사파 성분들이 혼재할 경우 수신되는 정보는 더욱더 복잡해진다. 대표적인 주파수영역 해석 방법인 푸리에 변환과 가장 뛰어난 시간-주파수영역 해석 방법인 웨이블릿 변환에 대하여 정리하면 다음과 같다

2.1 푸리에 변환(Fourier Transform)

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 변환(식(1))과 역푸리에 변환(식(2))을 순차적으로 행하면 변환과정 중에 아무런 정보의 유실 없이 본래의 함수를 재생할 수 있다. 푸리에 변환의 개념은 주기성을 갖는 신호를 여러 주파수 성분을 갖는 정현파의 무한한 합으로 분해하는 것이다.

$$\tilde{X}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-iwt} dt \quad [\text{역핵: } \theta(w, t) = e^{-iwt}] \quad (1)$$

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{X}(w)e^{iwt} dw \quad [\text{핵: } \chi(t, w) = \frac{1}{2\pi} e^{iwt}] \quad (2)$$

푸리에 변환의 수학적 기능은 시간 영역의 시점을 주파수 영역의 시점으로 전환하는 것이다. 따라서 획득된 신호를 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer)를 통하여 주파수 영역상에 표현할 경우 실험자는 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 중요한 관심대상일 경우 푸리에 해석은 유익한 정보를 제공하지 못한다. 그리고 푸리에 변환의 기저함수는 음의 무한 영역에서부터 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. 웨이블릿 해석도 신호를 기저 함수들의 선형결합으로 나타내는 분석이다. 그러나 웨이블릿 변환은 푸리에 변환의 기저함수보다도 훨씬 복잡한, 소위 모웨이블릿을(mother wavelet) 기저함수로 사용한다.

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 확대 및 축소 그리고 시간축에서의 평행 이동을 통하여 얻어진다. 따라서 웨이블릿 변환에서는 주파수 대역이라는 용어대신 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.

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

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

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

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)이 높은 상관성 혹은 큰 유사성(resemblance)을 보일수록 큰 웨이블릿 상수값을 나타낸다. 스케일 파라미터 s 는 결국 웨이블릿의 주파수를 조절한다. s 가 클수록 웨이블릿의 주파수는 감소하고 s 가 감소할수록 웨이블릿의 주파수는 증가한다. 모웨이블릿 $\psi(t)$ 는 다음과 같은 소위, admissibility 조건을 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

본 논문에 사용되어진 가버 웨이블릿(Gabor wavelet)은 여러 웨이블릿들중 가장 뛰어난 해상도를 제공하는 것으로 알려져 있다. 가버 웨이블릿은 가우시안 함수(Gaussian function)로 창문화(windowed)되었으며, 다음과 같이 정의된다.

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

여기에서, $e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$: 가우시안 함수(Gaussian window function), η : $\widehat{\psi}(\omega)$ 의 중심 주파수, σ : $\psi(t)$ 의 폭이다.

2.3 리지 해석(Ridge Analysis)

해석적 웨이블릿 변환은 앞에서 언급되어진 웨이블릿 변환 식(3)에 의해 국부적인 시간-주파수 창에서 에너지 분포, $P_w f$, 로 정의된다. 이는 다음의 식(7)과 같이 ($u, \xi = \eta/s$)에 위치한 웨이블릿($\psi_{u,s}(t)$)의 Heisenberg box에 의해 결정되어지는 신호 함수 f 의 에너지를 측정함을 뜻한다.

$$P_w f(u, \xi) = |Wf(u, s)|^2 = \left| Wf\left(u, \frac{\eta}{\xi}\right) \right|^2 \quad (7)$$

이러한 에너지의 밀도를 스케일로그래ם(scalogram)이라 부른다. 이때 웨이블릿 변환 상의 특정 주파수군은 리지(ridge, 에너지 그룹의 최대값을 연결한 선)에 의해 측정된다. 이를 위한 정규화된 스케일로그래ם(normalized scalogram)은 다음과 같이 정의된다(Mallat, 1998):

$$\frac{\xi}{\eta} P_w f(u, \xi) = \frac{|W_f(u, s)|^2}{s} \quad \text{for } \xi = \eta/s \quad (8)$$

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 주파수별 도착시간을 의미한다. 이러한 연속 웨이블릿 변환을 이용한 리지 해석은 급속도로 물리적 특성이 변하는 비정상신호의 각 주파수별 에너지 도착시간을 파악하는데 매우 유용한 신호 해석법이다. Kishimoto et al.(1995)는 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. 또한 김윤영과 김응훈(2001)은 빠르게 변하는 주파수 성분을 포함하고 있는 분산파의 해석에 웨이블릿 변환이 가장 뛰어난 해석방법임을 이론적으로 입증하였다.

3. 모형 실험(Model Test)

수 차례에 걸쳐 여러 결함부를 갖는 콘크리트 라이닝 모형에 대해 실험이 수행되었다. 각 실험들의 목적은 콘

크리트 라이닝 모형의 표면에 인위적인 충격하중을 가하여 응력파를 발생시키고, 발생된 응력과 성분중 분산성을 갖는 비정상 표면파가 콘크리트 모형을 전파할 때 각 결합부위에 의해 변조되는 상태를 웨이블릿 변환에 의한 시간-주파수 평면상에서 관찰하는데 있다.

3.1 건전부

그림 1와 같이 두 개의 감지기와 가진원이 동일 선상에 배치되었으며, 근접장 효과를 고려하여 감지기간의 간격 및 가진원과 첫 번째 감지기와의 간격은 각각 60 cm로 설정하였다.

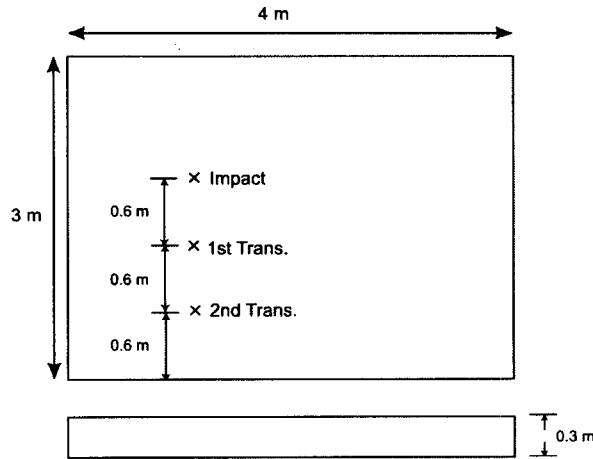
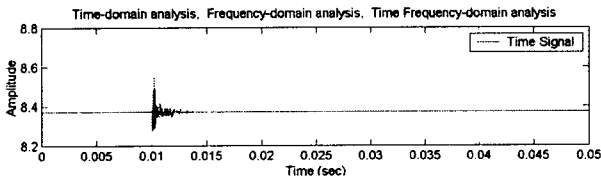
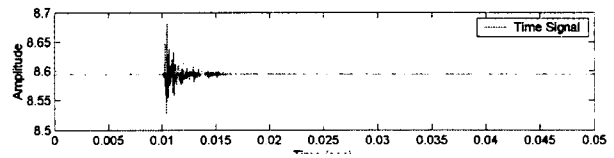


그림 1. 건전 콘크리트 라이닝 모형

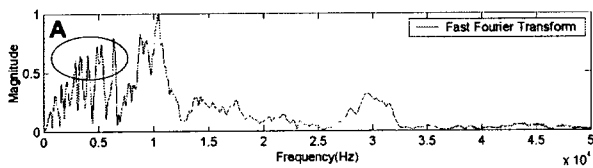
각 감지기에 수신된 신호 및 해석 결과는 아래 그림과 같다.



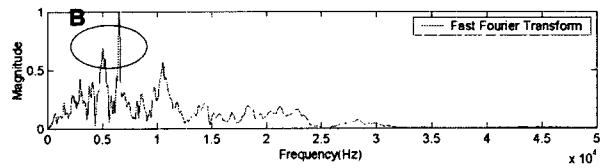
(a) 시간 영역 해석(시간 이력 곡선)



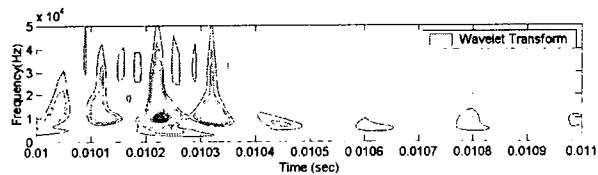
(a) 시간 영역 해석(시간 이력 곡선)



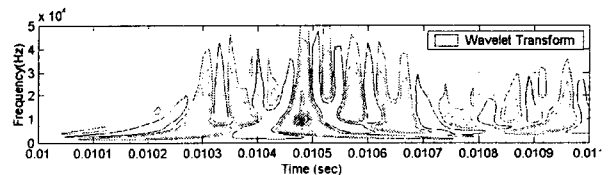
(b) 주파수 영역 해석(푸리에 변환)



(b) 주파수 영역 해석(푸리에 변환)



(c) 시간-주파수 영역해석(웨이블릿 변환)
그림 2. 감지기1의 신호 분석 결과



(c) 시간-주파수 영역해석(웨이블릿 변환)
그림 3. 감지기2의 신호 분석 결과

웨이블릿 변환에 의한 등고선도(그림 2(c))를 살펴보면 약 11 kHz의 지배 주파수를 갖는 신호가 약 0.01023 sec에 첫 번째 감지기에 수신되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 강철구에 의해 발생한 표면파 입사 성분의 지배 주파수가 11 kHz임을 의미한다. 그림 3(c)는 두 번째 감지기에 의하여 수신된 신호의 웨이블릿 변환 결과를 보여주고 있다. 그림 2(c)와 비교해보면 11 kHz의 지배 주파수를 갖는 표면파 성분이 약간의 시간 차이를 두고 그대로 수신되고 있음을 명확히 알 수가 있다. 즉, 매질을 전파하는 표면파가 어떠한 변조도 발생하지 않은 채 그대로 두 번째 감지기로 수신되었으며, 이는 대상 매질인 콘크리트 라이닝 모형의 내부에 결함부가 존재하지 않았기 때문이다. 그러나 그림 2(a), 3(a)과 같이 시간영역에서의 관찰로는 이러한 정보들을 얻기가 불가능하다. 또한 그림 2(b), 3(b)의 푸리에 변환 결과를 살펴보면 원으로 표시된 영역 A,B의 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. 두 감지기 사이의 각 주파수 성분의 도달 시간차를 확인하기 위하여 획득된 데이터를 이용하여 리지 해석(ridge analysis)을 수행하였다.

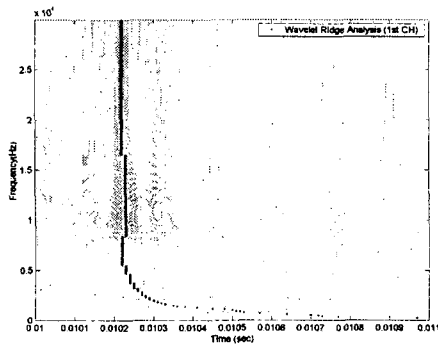


그림 4. 첫 번째 감지기

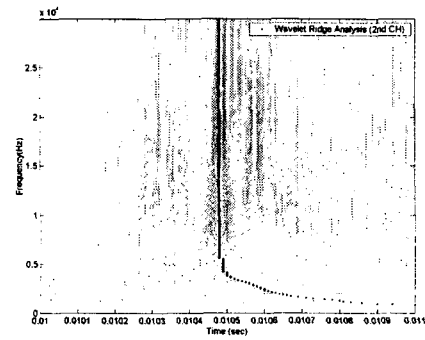


그림 5. 두 번째 감지기

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 군속도의 분산현상이 발생함을 뚜렷이 확인할 수가 있다. 그림 6은 두 개의 리지를 한평면상에 표현한 것이며, 그림 7은 두 리지의 도달 시간차를 나타낸 것이다.

그림 6,7과 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 계산하면, 두 감지기 사이의 거리 60cm를 진행하는 표면파의 파속을 쉽게 계산 할 수 있다. 따라서 분산현상이 나타나지 않는 주파수 대역 4~30 kHz 사이의 도달 시간차이를 RMS(root-mean-square) 평균을 통하여 산출하였으며, 도달 시간차는 0.00026 sec 이었다. 비분산 영역의 표면파 파속은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

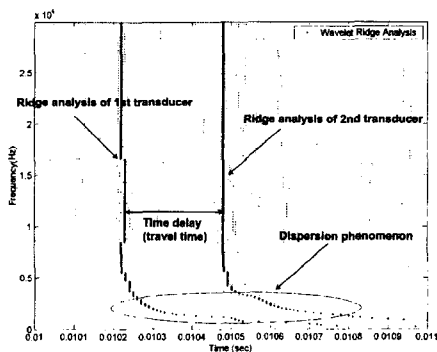


그림 6. 군속도의 분산

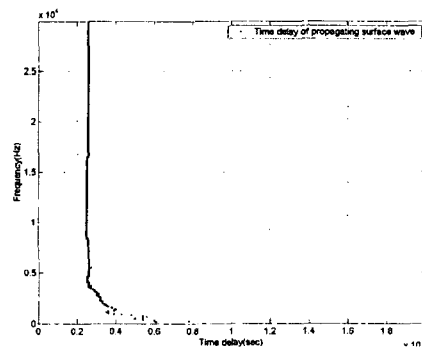


그림 7. 주파수별 파에너지의 도달 시간차

3.2 균열부

실험조건은 건전 콘크리트 모형과 동일하다. 그림 8과 같이 균열(artificial surface-opening crack)을 기준으로 좌우측 30cm지점에 각각 감지기를 설치하고, 균열부로 부터 90cm 지점에 강철구를 이용하여 인위적인 충격하중을 가하였다.

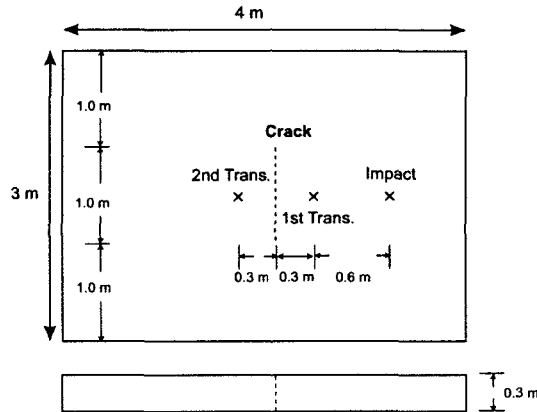


그림 8. 균열부를 포함한 콘크리트 라이닝 모형

그림 10에 나타난 바와 같이 균열부 반대편에 배치된 두 번째 감지기에서 수신된 신호에 대한 웨이블릿 변환 결과를 살펴보면 매우 미약한 성분 외에는 어떠한 신호도 나타나지 않았다. 이것은 발생한 표면파의 에너지가 두 감지기사이에서 흡수 또는 반사되었기 때문인 것으로 판단되며, 이는 두 감지기 사이에 결함부위가 존재한다는 것을 의미한다. 그리고 첫 번째 수신기에서 획득된 신호의 웨이블릿 변환 결과(그림 9)에서 나타난 반사파 성분의 관찰을 통하여 그것이 균열임을 명확히 확인할 수 있다.

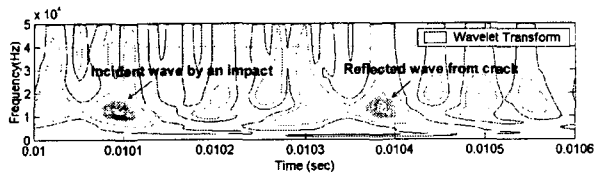


그림 9. 첫 번째 감지기의 웨이블릿 변환 결과

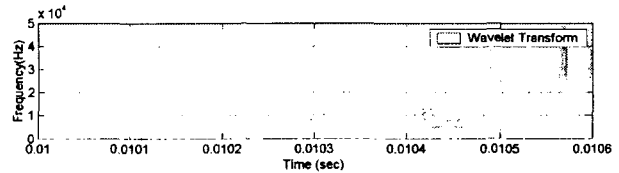


그림 10. 두 번째 감지기의 웨이블릿 변환 결과

이러한 표면파의 반사 특성은 대상매질인 콘크리트와 균열부의 음향학적 임피던스 차이 때문이다. 비분산 영역상에서 입사파와 반사파가 도달하는 시간차를 확인하기 위하여 리지 해석을 수행하였다.

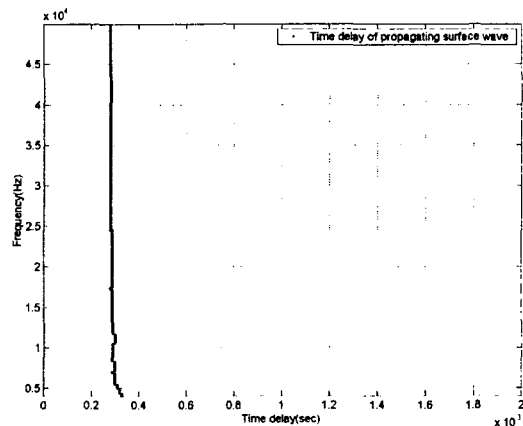
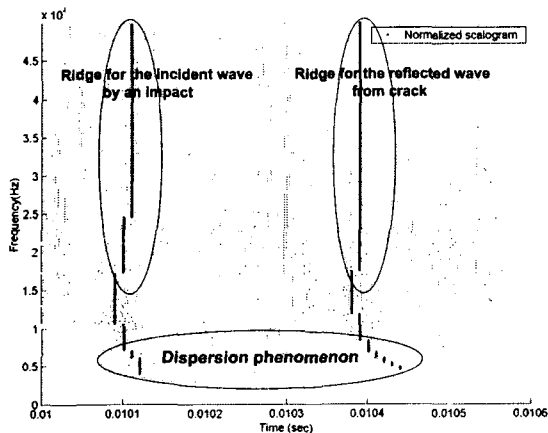


그림 11. 입사파와 반사파의 리지(ridge)

그림 12. 두 리지의 도달 시간차(비분산 영역)

실선으로 표현된 리지는 주파수별 입사파와 반사파의 도달 시간을 각각 나타낸다. 그림 12로부터 두 ridge의 도달 시간차는 약 0.00026sec임을 알 수 있다. 앞에서 구한 평균 표면파 파속 2308 m/sec을 이용하면, 첫 번째 감지기로부터 균열부까지의 거리를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L = \frac{2308m/sec \times 0.000285sec}{2} = 0.328m$$

위의 결과는 실제 균열부와 첫 번째 감지기와의 거리 30cm와 매우 유사한 값을 보이고 있다.

3.2 공동부

그림 13에 나타낸 바와 같이 표면으로부터 10 cm 깊이에 존재하는 공동에 대하여 전후 10 cm지점에 각각 감지기를 설치한 후, 첫 번째 감지기로부터 30 cm(공동부에서 40 cm) 떨어진 지점에 강철구를 이용하여 충격하중을 가하였다.

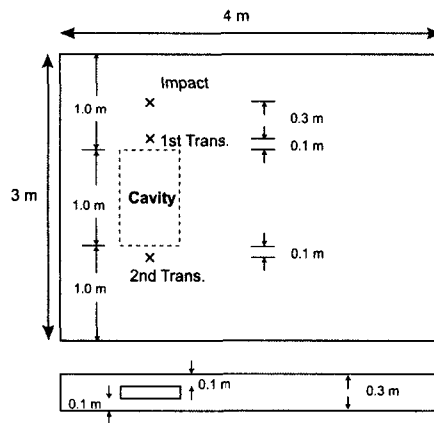


그림 13 공동부를 포함한 콘크리트 라이닝 모형

그림 14,15에 나타낸 웨이블릿 변환 결과를 살펴보면 공동 앞에 설치된 첫 번째 감지기에 30.5 kHz의 지배 주파수를 갖는 신호가 수신되고 있음을 알 수가 있으나, 공동 뒤쪽에 설치된 두 번째 감지기에는 10 kHz의 지배 주파수를 갖는 신호로 변조되어 수신되고 있음을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 콘크리트 라이닝 내부 공동의 존재가 원인인 것으로 판단된다.

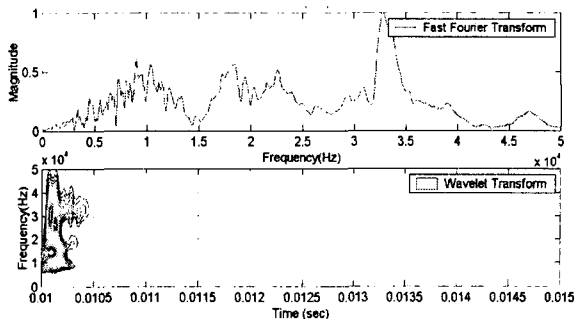


그림 14. 첫 번째 감지기로부터 획득된 신호

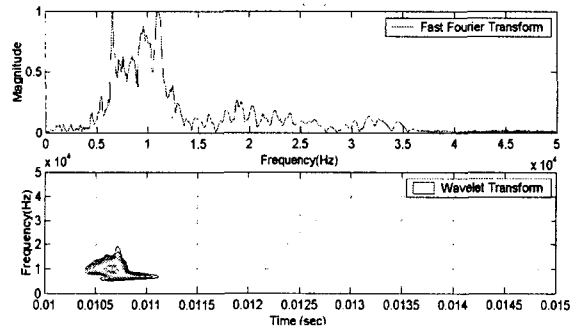


그림 15. 두 번째 감지기로부터 획득된 신호

공동부에 실시된 실험결과를 살펴보면 전술한 균열부에서 나타난 경향과는 다른 해석결과를 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 균열부에서 나타나는 신호의 반사 보다 훨씬 복잡한 과정으로 신호의 변조가 발생하였음을 의미

한다. 따라서, 이와 같이 지배주파수가 변화하는 경우는 라이닝 내부에 공동이 존재하는 경우로 판단 할 수 있다. 즉, 위와 같은 주파수에 따른 변조(modulate)는 매질을 전파하는 파형(waveform)의 급격한 변화 때문이며, 이는 표면파가 전파하는 매질이 균질(homogeneous)하지 못함을 의미한다. 일반적으로 응력파를 이용한 비파괴 실험에서 매질의 입자가 한 파장 보다 클 경우 이 때의 매질은 균질하지 못하다고 정의한다. 따라서 공동부의 실험결과로부터 매질은 최소한 한 파장 크기 이상의 비 균질 부위가 존재함을 알 수 있으며, 이는 매질 내부에 존재하는 공동으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

기존의 비파괴 검사 기법은 신호 해석 과정에서 푸리에 해석을 기반으로 하였다. 그러나, 이러한 푸리에 해석을 응용한 신호 해석법은 실험 과정을 복잡하게 하고, 올바르지 못한 결과를 보여주는 경우가 많았다. 따라서 본 논문은 가장 뛰어난 시간-주파수 해석법으로 평가받는 웨이블릿 이론을 비파괴 검사 기법에 응용하였다. 웨이블릿 변환은 비정상 신호에 대하여 뛰어난 분해능을 보였으며, 비교적 간단한 실험 방법으로도 터널의 콘크리트 라이닝의 결함부 추정에 뛰어난 결과를 보여주었다. 본 연구의 실험 결과 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 충격하중을 통해 발생된 비정상 신호에 대하여 푸리에 변환은 개략적인 지배 주파수에 관한 정보만을 제공하였고, 경우에 따라서 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 구별 할 수 있었으며, 비 분산 영역의 파속을 쉽게 얻을 수 있다.
- 4) 웨이블릿 변환의 등고선도 및 리지 해석 결과는 균열로부터 반사된 에너지를 명확히 보여주었으며, 균열의 위치를 아주 적은 오차 범위 내에서 추정하였다.
- 5) 공동에 의한 비정상 신호의 주파수 변조를 웨이블릿 변환의 등고선도상에서 뚜렷이 확인하였다.
- 6) 웨이블릿 계수의 분석을 통하여 시간에 따른 특정 주파수별 에너지 변화를 뚜렷이 확인하였으며, 이를 이용하여 공동에 의한 영향 때문인 것으로 판단된다.

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. B. Zhang(1998), "Study of energy distribution of guided waves in multilayered media", Journal Acous. Soc. Am., Vol. 103, No. 1, pp. 125~135
2. H. Kolsky(1963), "Stress Waves In Solids", NEW YORK dover publications Inc.
3. K. Kishimoto, etc(1995), "Time-frequency analysis of dispersive waves by means of wavelet transform", Journal of Applied Mech., Vol. 62, pp. 841~846
4. L. Zhang, S. T. Quek, Q. Wang(2001), "A note on wavelet-based method for damage detection", Journal of applied mechanics, Vol. 68, pp. 812~814