

時間-周波數分析을 利用한 衝擊反響法 資料의 解析

辛 誠 烈^{1)*}

Interpretation of Impact-Echo Signals via Time-Frequency Analysis

Sung Ryul Shin*

Abstract : Detection of the cavity behind the tunnel lining and estimation of structure thickness are of critical importance for the safety diagnosis in the tunnel maintenance and the quality control during the construction. In this study, we made use of Impact-Echo method in concrete slab model with single-axis accelerometer in order to estimate the thickness and find the cavity or flaw. Impact-Echo signals were processed by the conventional method, based on Fourier transform, and the time-frequency analysis which depends upon wavelet transform. We demonstrate that the wavelet transform separates Impact-Echo signals from noise. The time-frequency analysis using wavelet transform is able to clearly discriminate between response of the cavity or the delaminated slab and the perfect bond area. The proposed method provides us with a robust and powerful tool for interpretation of Impact-Echo signals.

Key words : detection of the cavity, Impact-Echo method, wavelet transform, time-frequency analysis

요 약 : 터널 콘크리트 라이닝의 시공 중 품질관리와 유지관리를 위한 안전진단에서 터널라이닝 배면의 공동 존재 여부는 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 터널과 같은 콘크리트 구조물의 두께 및 결함을 탐지할 목적으로 판형 콘크리트 모형에 대하여 일축 가속도계를 사용하여 충격반향법 실험자료를 얻었다. 충격반향법 신호에 대하여 후리에 변환을 이용한 기존의 해석 방법과 함께 wavelet 변환을 이용한 시간-주파수 해석법을 이용하였다. wavelet 변환을 이용한 방법은 기존의 방법에 비하여 두께 또는 배면공동에 기인한 신호를 시간-주파수 평면상에서 명확히 분리하였고 구분할 수 있었다. 시간-주파수 분석법은 충격반향 신호의 해석에 매우 효과적인 방법이다.

주요어 : 두께 및 공동탐지, 충격반향법, wavelet 변환, 시간-주파수 해석법

서 론

터널과 같은 지하구조물은 규모가 장대화, 대단면화 되고 있어 터널의 안정성 확보 및 공사 중 품질관리가 강조되고 있다. 특히 터널라이닝의 배면공동유무를 탐지하고 지보재 및 라이닝의 상태와 결함을 파악하는 것은 매우 중요하다. 여러 가지 비파괴 탐지방법^{1,2)} 가운데 탄성파 충격시의 공진 주파수를 이용한 Impact-Echo 법은 탄성파공진법 혹은

충격반향법²⁾으로 소개된 바 있으며, 철근에 대한 영향을 거의 받지 않으므로 철근 콘크리트에도 결함 탐지나 두께 측정에 적용 가능한 장점이 있다³⁾. 충격반향법은 신호처리 방법에 있어 고전적인 후리에 변환방식이 가장 일반적으로 널리 사용되고 있으며, 신호의 주파수 스펙트럼으로부터 구조물의 형상이 1-D라고 가정하여 이 때의 공진주파수를 파악하고 두께 및 결함을 파악한다.^{5,12)} 그러나 실제로 구조물 형상이 1-D 구조가 아니므로 공진주파수를 파악하고 해석하는 것이 매우 어려운 부분이다.

일반적인 신호의 주파수 성분들은 시간에 대하여 변화하는 함수이기 때문에 고전적인 후리에 변환에서는 시간영역과 주파수 영역의 신호를 동시에 해석할 수 없는 단점이 있지만 wavelet 변환은 신호가 가지는 시간영역과 주파수 영역의 정보를 시간-주파수의 2차원 평면상에 동시에 파악

1) 韓國海洋大學校 海洋開發工學部

*E-mail; srshin@hanara.kmaritime.ac.kr

Address; Division of Ocean Development Engineering,
Energy & Resources Engineering, Korea Maritime
Univ., # 1, Dongsam-dong, Youngdo-gu, Pusan
606-791, Korea

할 수 있는 장점이 있다. wavelet 변환을 이용한 시간-주파수 분석법은 비파괴검사,^{4,6)} 레이더 신호 및 수중음향 신호처리, 음성신호처리, 영상자료처리, 자료압축 등 여러 분야에서^{9,10)} 활발히 활용되고 있다. 지구물리분야에서는 탄성파 층서 해석, 탄성파 신호분리 및 지진자료 해석 등에 적용하였고,^{11,13)} 구조물진단과 관련하여 일본에서는 구조물에 타격을 가하고 이때 발생된 음향신호를 wavelet 변환을 통하여 구조물의 전진도를 파악하는 시스템을 고안한 바 있다. 국내에서는 충격 반향법 자료에 대하여 wavelet 변환을 이용하여 해석한 사례가 없으며, 특히 국내외적으로 구조물 진단분야에서 단시간 후리에 변환법(STFT)은 새로운 적용 사례이다.

본 연구에서는 후리에 변환을 이용한 기존의 충격반향법 자료 해석방법과 함께 신호처리 및 해석 분야에서 최근 각광받고 있는 시간-주파수 해석법 가운데에서 단시간 후리에 변환법(STFT), Gabor 함수를 이용한 wavelet 변환법, 위그너 분포법을 이용하여 콘크리트 슬라브 구조물에서 획득된 자료에 대하여 신호의 특성을 분석하였고 각종 시간-주파수 해석법의 적용 가능성에 대하여 고찰하였으며, 또한 현장자료에 적용하여 보았다.

Wavelet transform 이론

Gabor 함수를 이용한 wavelet 변환

시계열 $u(t)$ 의 wavelet 변환은^{6,9,10)} 다음과 같이 정의된다.

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

여기에서 s 는 scale factor로서 주파수 파라미터이며, τ 는 기본 wavelet 함수 $\psi(t)$ 의 평행이동 정도를 나타내는 시간 파라미터이다. $\psi^*(t)$ 는 함수 $\psi(t)$ 의 공액복소수이며, 또한 함수 $\psi(t)$ 는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

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

여기에서 $\Psi(\omega)$ 는 $\psi(t)$ 의 후리에변환을 나타낸다. SASW 법에서는 위상각 보정을 위해서 Gabor 함수를 사용하는데,⁷⁾ 본 연구에서는 기본 wavelet 함수를 다음과 같은 Gabor 함수를 사용하였다.⁶⁾

$$\psi_s(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\omega_0}}{\gamma} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2 t^2}{2}\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (3)$$

여기서 γ 는 $\gamma = \pi\sqrt{2/\ln 2} = 5.336$ 과 $\omega_0 = 2\pi$ 를 사용하였다. 시간과 주파수 파라미터 τ 와 s 는 $\tau = n\Delta t$, $s = 2^{m/4}$ 이며, 이 때 n 과 m 은 정수이다.

단시간 후리에 변환법

(Short Time Fourier Transform; STFT)

단시간 후리에 변환법(Short Time Fourier Transform)은 신호 전체에 대한 후리에 변환이 시간변화에 대응한 주파수변화를 나타내지 못하는 단점을 보완하여 짧은 시간창을 통하여 신호를 분리하여 후리에 변환을 하는 방법이다.⁴⁾ 즉, 시간과 주파수 영역에서 동시에 존재하는 창함수(window function)를 이용하여 각 시간에서의 주파수를 구하는 방법으로 다음의 식과 같다.

$$STFT(t, f) = \int u(\tau) \Gamma_{i, f}^*(\tau) d\tau = \int u(\tau) \Gamma_{i, f}^*(\tau - t) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (4)$$

$$W(t, f) = |STFT(t, f)|^2 \quad (5)$$

식 (4)는 일반적인 내적을 나타내며, 시계열 $u(t)$ 와 기본함수 $\Gamma(\tau - t)e^{2\pi i f \tau}$ 사이의 유사성을 나타낸다. 식 (5)는 STFT의 spectrogram으로 시간-주파수 평면상에 주파수 성분의 에너지 분포를 나타낸 것이다.

위그너분포법(Wigner distribution)

위그너분포는 양자역학 분야에서 비정상 신호에 대한 확장된 순간적인 파워스펙트럼을 나타내는 한가지 방법인데 시계열 $u(t)$ 의 부분적인 자기상관함수 $R[u, u](t, \tau)$ 를 기본으로 순간자기상관(Instantaneous Auto-correlation)은 다음의 식과 같이 쓸 수 있다.^{4,11)}

$$R[u, u](t, \tau) = u(t + \tau/2)u^*(t - \tau/2) \quad (6)$$

이때, τ 는 시간지연변수이며, 별표는 공액복소수를 나타낸다. 위그너분포 $W[u, u](t, f)$ 는 상기의 자기상관함수에 대한 후리에 변환으로서 auto-term이라고 하며 아래의 식 (7)과 같다.

$$W[u, u](t, f) = \int_{\tau \in R} \exp(-2\pi i f \tau) R[u, u](t, \tau) d\tau \quad (7)$$

시계열이 여러 가지의 주파수 성분을 포함하고 있다면 시간-주파수 평면상의 위그너분포는 한 곳에 집중되지 않고 아래의 식 (8)과 같이 cross-term이 나타난다. 만일 두가지 주파수 성분을 가진 임의의 신호를 $u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t)$ 라고 하면, 이때의 위그너분포는 다음과 같다.

$$W(u, u)(t, f) = |c_1|^2 W\{u_1, u_2\}(t, f) + |c_2|^2 W\{u_2, u_2\}(t, f) + 2\text{Re}\{c_1 c_2^* W\{u_1, u_2\}(t, f)\} \quad (8)$$

이때, $W\{u_1, u_2\}(t, f)$ 는 신호 $u_1(t)$ 와 $u_2(t)$ 의 cross-term의 위그너분포로서 다음과 같다.

$$W\{u_1, u_2\}(t, f) = \int_{\tau \in \mathbb{R}} \exp(-2\pi i f \tau) u_1(t + \tau/2) u_2^*(t - \tau/2) d\tau \quad (9)$$

auto-term은 실제 신호에 의하여 나타나는 성분이며 cross-term은 간섭현상에 의해 나타나는 허위성분으로서 두 개의 auto-term 사이에서 발생한다.

충격반향법 자료의 해석

후리에 변환을 통한 자료해석

콘크리트구조물의 두께 및 결함탐지를 목적으로 한 충격반향법(Impact-Echo method) 자료의 기존 해석 과정은 Fig. 1과 같이 시간영역의 자료를 주파수영역으로 변환시켜 공진주파수(Resonance Frequency)로부터 결함이 위치하는 심도를 파악한다.^{5,12)}

$$v = f_R \lambda \quad (10)$$

이 때, f_R 는 공진주파수, λ 는 파장, v 는 매질의 속도이다.

주파수 영역에서 자료를 해석하는 것보다 자료를 실제 심도로 변환하여 해석하는 것이 타당하며, 표면에서 콘크리트 배면 또는 결함위치까지의 두께를 D 라고 할 때, $2D = \lambda$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$D = \frac{v}{2f_r} \quad (11)$$

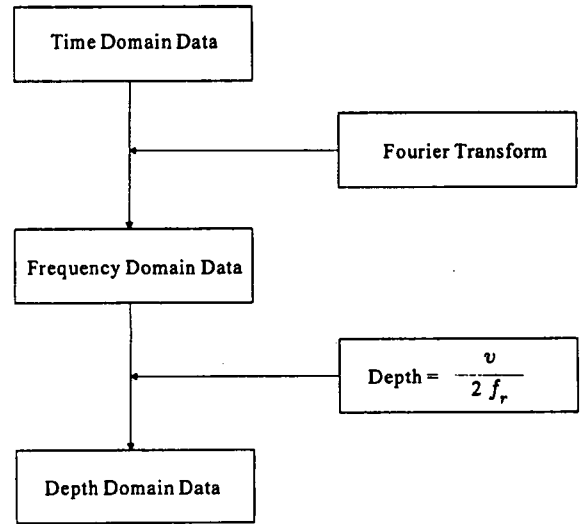


Fig. 1. Flow chart for the interpretation and data processing of Impact-Echo method.

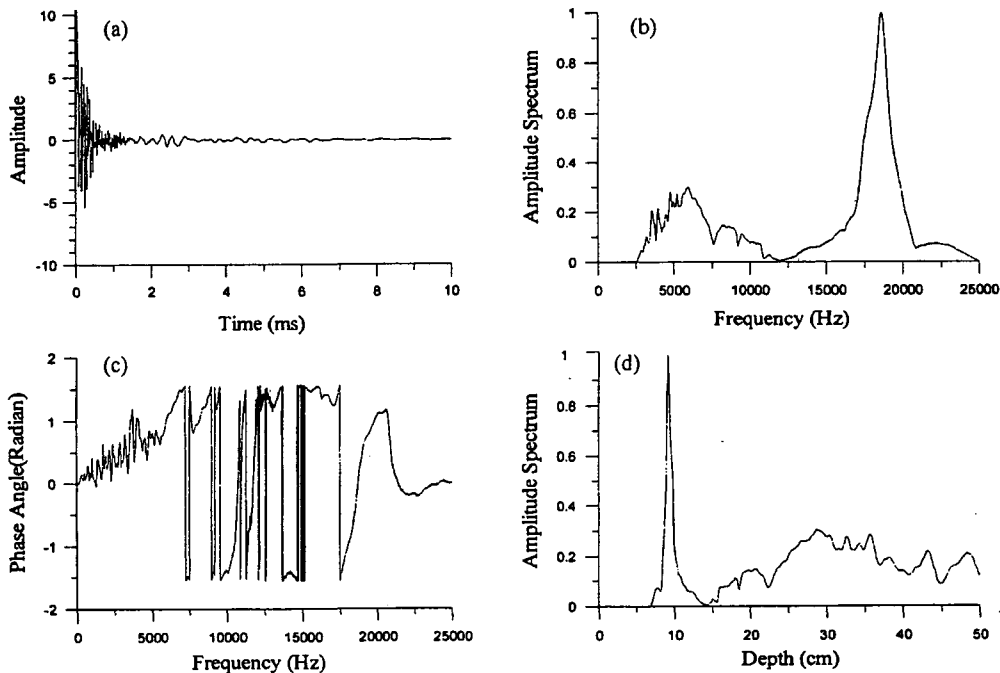


Fig. 2. (a) The results observed with single-axis accelerometer. It shows free oscillation of concrete plate model. (b) power spectrum and (c) phase angle in frequency domain. The frequency of maximum amplitude spectrum is 18500 Hz. (d) depth conversion.

본 연구에서는 토사층 위에 가로×세로가 9.2 m×4.2 m 두께가 약 10 cm 내외로 콘크리트를 타설하여 슬라브 모형을 제작하였다. 모형의 가운데 지점에 수진기를 설치하였고 타격지점과 수진기의 이격거리를 5 cm로 하여 자료를 획득하고 Fig. 1의 과정에 따라 자료처리 및 해석을 실시하였다. Fig. 2(a)는 일축 가속도계를 사용하여 측정된 시간영역의 자료이며, Fig. 2(b)는 주파수 영역에서의 파워스펙트럼, Fig. 2(c)는 주파수 영역에서의 위상, Fig. 2(d)는 심도전환 결과를 나타낸 것이다. 일축 가속도계를 이용하여 측정된 Fig. 2(a)는 약 2ms에 걸친 지속시간(duration time) 동안 자유진동에 의한 감쇠현상을 관찰할 수 있다. 주파수 영역으로 변환한 Fig. 2(b)에서는 약 18500 Hz에서 최대 진폭을 보이는데 이것은 판형 콘크리트의 두께에 대응하는 주파수이며, 0~5000 Hz 구간은 대역통과 필터에 의하여 진폭이 크게 감소되었으나 5000 Hz 부근에서 큰 진폭이 나타난다. 이것은 저주파수 대역은 본래 감쇠가 적고 또한 모형하부의 전석이나 모형의 수평방향 불균질 매질의 존재 등 복합적인 요인에 의한 것이라 사료되며, 충격반향법으로 두께나 배면공동을 탐지할 때 오류를 발생시킬 수 있는 요인이다. Fig. 2(c)에 나타난 위상각은 진폭이 최대를 보이는 18500 Hz 부근에서는 위상각이 매우

안정되게 $-\pi/2$ 로부터 $\pi/2$ 로 증가되는 경향을 볼 수 있으며, 진폭스펙트럼이 작은 7500~15000 Hz 대역의 위상각은 변화가 매우 심하게 나타난다. 콘크리트의 P 파 속도를 약 3400 m/s로 하여 Fig. 2(d)와 같이 심도전환을 하였고, Fig. 2(d)에서는 9.1 cm에서 최대값을 가지는데 모형의 두께 10 cm 내외와 비교할 때 비교적 일치한다.

wavelet 변환을 이용한 자료해석

기본 wavelet 함수를 Gabor 함수로 채택하였을 때 scale factor의 변화 즉, 주파수 파라미터에 따른 기본 wavelet함수의 형태의 변화를 나타낸 그림이 Fig. 3이며 Fig. 3(a), (b), (c)는 창 크기가 128개 sample이며 scale factor $\log_2 s$ 의 값이 각각 -12, -13, -14일 때를 나타낸 것이다. Gabor 함수의 창 크기를 32, 64, 128개의 sample을 취하였을 때, Fig. 2(a)의 자료에 대하여 wavelet 변환한 결과의 스펙트럼을 Fig. 4(a), (b), (c)에 나타내었다. 창함수의 크기에 따라 시간 또는 주파수분해능이 달라지는데, 시간영역의 분해능을 높이기 위해서는 주파수분해능이 떨어지게 되고, 주파수분해능을 높이기 위해서는 시간영역의 분해능이 떨어지는 창효과(window effect)

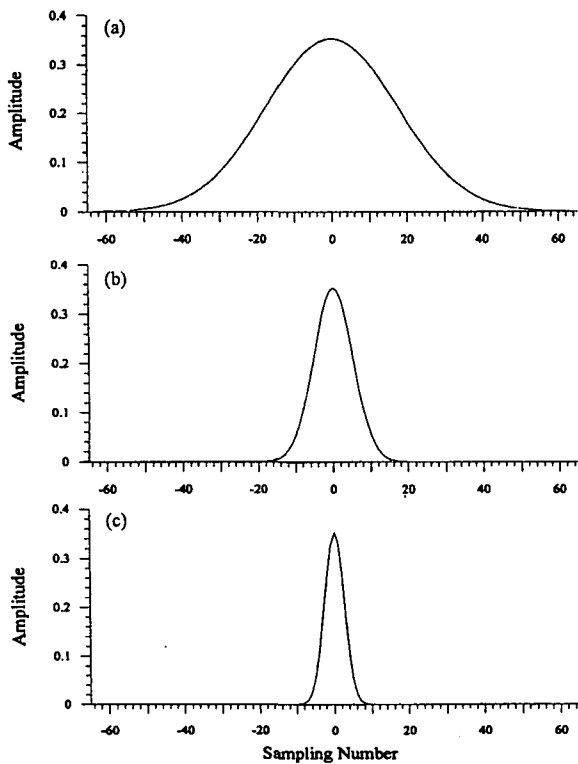


Fig. 3. Gabor function windows of 128 samples. (a) scale factor $\log_2 s = -12$, (b) -13 , and (c) -14 , respectively.

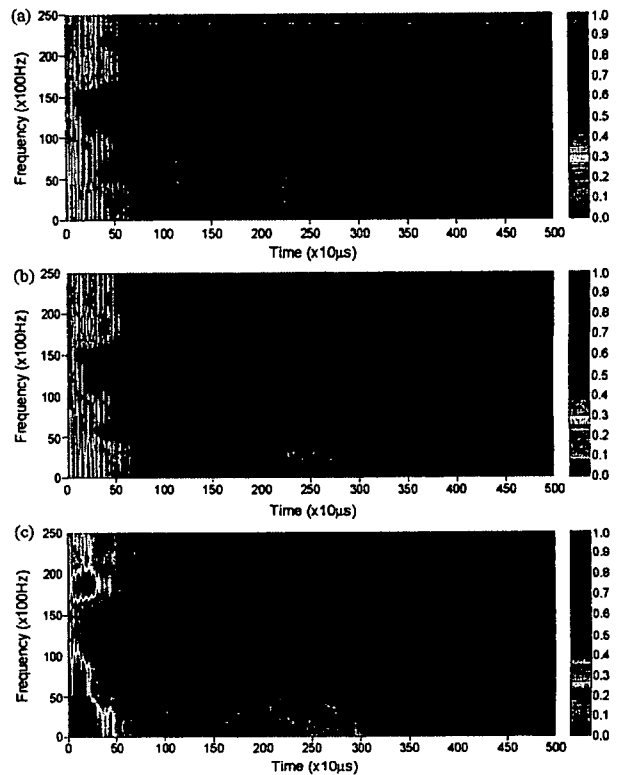


Fig. 4. Spectrogram of wavelet transform by Gabor function using (a) window size of 32 samples, (b) 64, and (c) 128, respectively.

가 발생하는 단점이 있다. Fig. 4의 Gabor 함수를 이용한 wavelet 변환에서 창 크기가 작으면 스펙트럼 에너지의 분포가 매우 불안정하게 나타남을 볼 수 있으므로 신호의 특성에 따라 적절한 크기의 창을 설정해야 한다고 사료된다. 18500 Hz 부근에 나타나는 큰 스펙트럼의 시간길이는 약 1.2 ms가 지속되며 창 크기가 클수록 전체적으로 평활화되는 것을 볼 수 있다. 1.5~2.5 ms 부근의 시간과

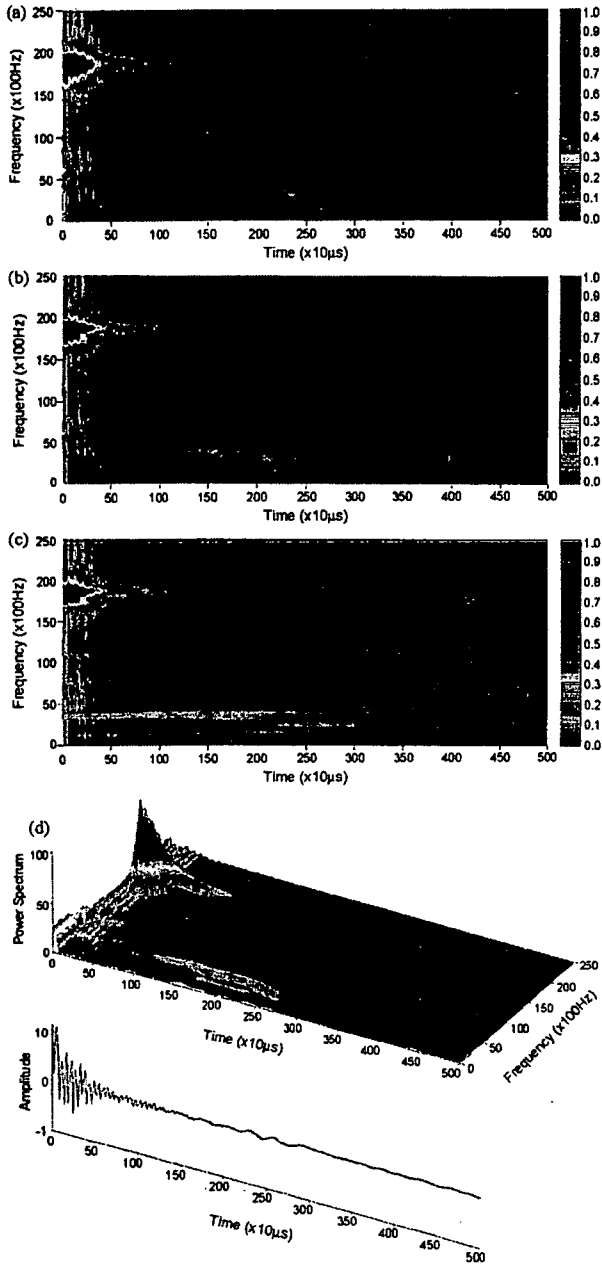


Fig. 5. Spectrogram in the time-frequency analysis by STFT using (a) window size of 32 samples, (b) 64, and (c) 128, respectively. (d) Perspective spectrogram of Fig. 5(b) and Impact-Echo signals in the time domain.

약 3000 Hz 부근의 저주파수에 나타나는 큰 스펙트럼은 본래 저주파수대역은 감쇠가 적고 또한 모형하부의 전석이나 모형의 수평방향 불균질 매질의 존재 등 복합적인 요인에 의한 것으로 사료된다. wavelet 변환은 시간-주파수의 2차원 평면상에서 시간에 따라 변화하는 파동의 주파수 특성을 파악할 수 있으므로 충격반향법 자료의 해석에 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 5(a), (b), (c)는 Fig. 2(a)의 자료에 대하여 창 크기를 32, 64, 128개의 sample을 취하였을 때 STFT 법을 이용하여 시간-주파수평면에 나타낸 스펙트럼이며, Fig. 5(d)는 Fig. 5(b)의 스펙트럼 분포를 입체도로 나타내고 이와 함께 시간 변화에 따른 파형의 진폭변화를 나타낸 그림이다. STFT 법은 Gabor 함수를 이용한 wavelet 변환법 보다 주파수 및 시간영역의 분해능이 우수하며, 주파수 18500 Hz 부근 시간 약 1.25 ms 동안 콘크리트 슬라브의 공진에 의한 스펙트럼이 명확히 분리되어 나타나므로 충격반향법 자료해석에 매우 효과적임을 알 수 있다. 창 크기에 의한 창효과는 Gabor 함수를 이용한 wavelet 변환법을 적용할 때와 유사하다.

Fig. 6(a), (b), (c)는 Fig. 2(a)의 자료를 창 크기 32,

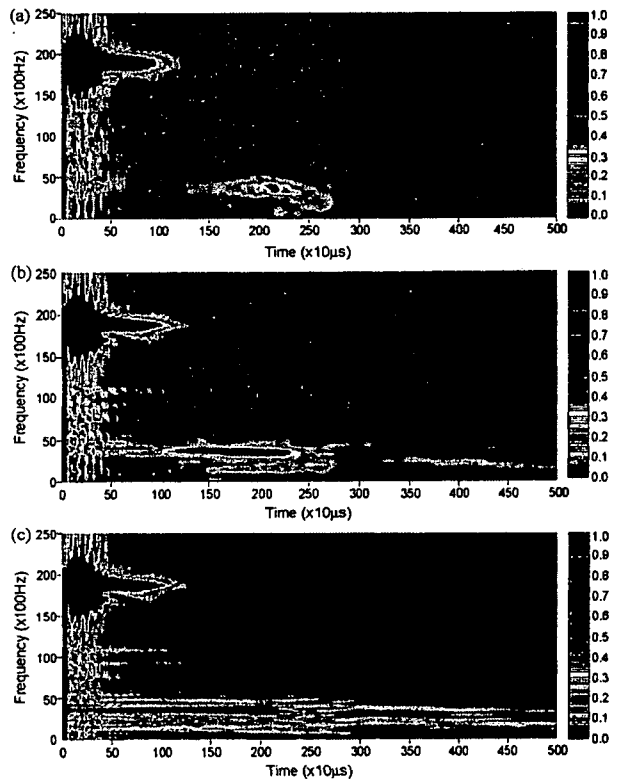


Fig. 6. Spectrogram in the time-frequency analysis by Wigner distribution using (a) window size of 32 samples, (b) 64, and (c) 128, respectively.

64, 128개의 sample을 취하였을 때 위그너 분포법을 이용하여 시간-주파수 평면상에 나타낸 그림으로서 STFT 법의 결과와 유사하게 주파수 18500 Hz 부근 시간 약 1.25 ms 동안 콘크리트 슬라브의 공진에 의한 스펙트럼이 명확히 분리되어 나타난다. 또한 1.0~2.5 ms의 시간과 3500 Hz 부근의 저주파수에 나타나는 스펙트럼은 콘크리트 슬라브의 수직방향의 공진과 무관한 다른 요인에 의한 것이며 명확히 분리되어 나타난다. STFT 법 또는 위그너 분포법을 이용하면 건전부위 신호와 밀착상태가 취약하거나 배면 공동이 있는 부위의 신호특성이 서로 매우 상이하며 시간-주파수 평면상에서 명확히 분리되어 나타나지 않으므로 충격반향법 자료해석이 보다 용이하다고 사료된다.

현장자료해석

○○터널의 라이닝 두께를 조사하기 위하여 기록간격

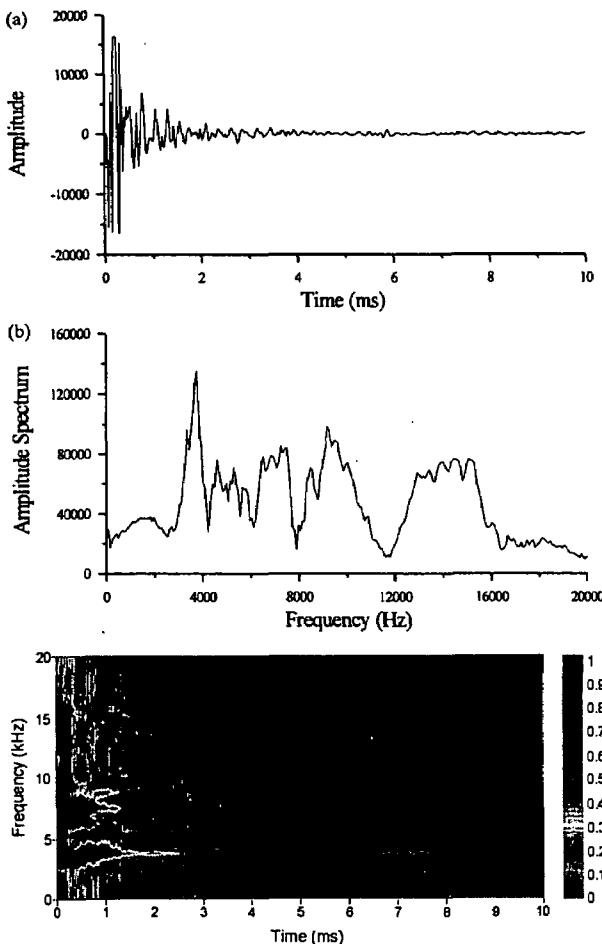


Fig. 7. (a) Impact-Echo field data in the time domain. (b) Power spectrum in the frequency domain. (c) Spectrogram in the time-frequency analysis by STFT using window size of 64 samples.

25 μ s, 기록시간 12.8 ms로 동일 지점에서 4회 이상 측정하여 Fig. 7(a)와 같이 현장자료를 획득하였다. 시간영역의 자료를 후리에 변환을 통하여 Fig. 7(b)와 같이 주파수영역에서의 파워스펙트럼으로 전환하였으며, 비교적 큰 스펙트럼을 나타내는 부분은 3700 Hz와 6000~7000 Hz, 9000~10000 Hz, 13000~15000 Hz 부근 등 네 부분에서 매우 복잡하게 나타나고 있다. 단순한 스펙트럼의 크기에 대한 정보로부터 기본 공진모드를 파악하기란 매우 어려우므로 wavelet 변환을 이용하여 자료를 해석하는 것이 보다 효과적이다. Fig. 7(c)는 현장자료를 창 크기 64개의 sample로 STFT 법을 이용하여 시간-주파수 평면상에 스펙트럼의 크기를 나타낸 것이다. 3700 Hz의 신호는 매우 큰 스펙트럼 값을 보이며 또한 측정시간 모든 영역에서 지속되고 있어 기본 공진 모드로 판단되어진다. 15000 Hz 부근의 신호는 0~2 ms 정도까지 매우 짧게 나타나므로 철근피복 두께에 대응되는 신호로 판단되어진다. 6000~10000 Hz 부근의 신호는 약 6 ms 까지 지속되며 이것은 라이닝 내부에 매우 조밀하게 배근된 철근에 의한 신호로 사료된다.

결론

콘크리트 슬라브에서 측정된 충격반향법 자료에 대하여 후리에 변환을 이용한 기존의 해석방법과 함께 단시간 후리에 변환법(STFT), Gabor 함수를 이용한 wavelet 변환법, 위그너 분포법을 이용한 시간-주파수 해석법의 적용 가능성에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 후리에 변환을 이용한 기존의 해석방법은 파형과 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 동시에 파악할 수 없으나 wavelet 변환을 이용한 방법들은 효과적으로 파악할 수 있다.
 2. wavelet 변환법 가운데에서 단시간 후리에 변환법(STFT)과 위그너 분포법은 분해능이 높고 안정된 스펙트럼에너지 분포를 얻을 수 있다.
 3. wavelet 변환 적용시에 창효과가 발생되므로 공진 신호의 특성에 따라 적절한 크기의 창크기를 설정하여야 한다.
 4. wavelet 변환을 이용한 시간-주파수 분석법은 구조물의 두께나 공동을 탐지하기 위한 목적으로 충격공진법을 사용하면 필연적으로 나타나는 제 잡음 요소들과 공진 신호를 구분하고 해석하는데 매우 효과적인 방법이다.
- 향후에는 보다 효과적인 현장조사가 수행될 수 있는 비

접촉식 충격음향신호를 이용한 탐사시스템의 개발과 함께 공동의 유무 뿐만 아니라 밀착상태를 정량적으로 판단할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하며 또한 음향과 진동을 동시에 측정하여 해석할 수 있는 통합된 탐사 시스템의 개발이 요구된다.

참고문헌

1. 김영근, 장정범, 정한중, 조철현, 1996, "터널라이닝 진전도 평가를 위한 비파괴 조사법의 적용연구," *대한토목학회 학술발표회 논문집(II)*, pp. 383-386.
2. 신성렬, 이성민, 장원일, 2000, "터널 콘크리트 구조물의 안전진단을 위한 충격반향법 실험," *한국자원공학회지*, Vol. 37, No. 4, p.1.
3. 신성렬, 조철현, 신창수, 양승진, 장원일, 1998, "GPR 및 단일채널 탄성파탐사에 의한 터널라이닝 배면공동 조사," *한국구조물진단학회지*, Vol. 2, No. 4, pp. 148-158.
4. 이진찬, 오정환, 남기우, 이주석, 1999, "열화된 SUS 316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가," *비파괴검사학회지*, Vol. 19, No. 4, pp. 270-276.
5. 이세경, 김영환, 구자용, 김병주, 김영길, 1988, "콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발(III)," 과학기술처 특정연구개발사업 연구보고서, KSRI-88-88-IR, 과학기술처.
6. 장영수, 김진호, 정현조, 남영현, 1999, "시간 및 주파수 영역에서의 신호처리 기술에 의한 초음파 속도와 감쇠의 측정," *비파괴검사학회지*, Vol. 19, No. 2, pp. 118-128.
7. 조성호, 1998, "SASW 기법에 의한 터널 라이닝의 방수막 확인과 위치 추정에 관한 연구," *대한토목학회 논문집*, Vol. 18, No. III-3, pp. 435-443.
8. Haack, A., Schreyer, J. and Jackel, G., 1995, "State-of-the-art of Non-destructive testing methods for determining the state of a tunnel lining," *Tunnelling and underground space technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 413-431.
9. Parker, J.R., 1996, "Algorithms for image processing and computer vision," John Wiley & Sons, Inc. pp. 250-274.
10. Prasad, L. and Iyengar, S.S., 1997, "Wavelet analysis with applications to image processing," CRC Press, pp. 101-139.
11. Steeghs, P. and Drijkoningen, G.G, 1995, "Time-frequency analysis of seismic sequences," *Proceedings of the 65th SEG Meeting*, Houston, Texas, USA.
12. Sansalone, M.J., Streett, W.B. and Jaeger, B.J., 1995, "Seminar on the principles of impact-echo and use of the DOCTER impact-echo field instrument," Cornell univ.
13. Tobback, T., Steeghs, P., Drijkoningen, G.G. and Fokkema, T.J., 1996, "Decomposition of seismic signals via time-frequency representations," *Proceedings of the 66th SEG Meeting*, Denver, Colorado, USA.