

탄성파의 매질 내 이동속도 산정방법 비교

Comparison in Elastic Wave Propagation Velocity Evaluation Methods

김 태 식[†]
Taesik Kim

Received: January 10th, 2014; Revised: January 21st, 2014; Accepted: February 7th, 2014

ABSTRACT : In situ investigations and laboratory tests using elastic wave have become popular in geotechnical and geoenvironmental engineering. Propagation velocity of elastic wave is the key index to evaluate the ground characteristics. To evaluate this, various methods were used in both time domain and frequency domain. In time domain, the travel time can be found from the two points that have the same phase such as peaks or first rises. Cross-correlation can also be used in time domain by evaluating the time shift amount that makes the product of signals of input and received waveforms maximum. In frequency domain, wave propagation velocity can be evaluated by computing the phase differences between the source and received waves. In this study, wave propagation velocity evaluated by the methods listed above were compared. Bender element tests were conducted on the specimens cut from the undisturbed hand-cut block samples obtained from Block 37 excavation site in Chicago, IL, US. The evaluation methods in time domain provides relatively wide range of wave propagation velocities due to the noise in signals and the sampling frequency of data logger. Frequency domain approach provides relatively accurate wave propagation velocities and is irrelevant to the sampling frequency of data logger.

Keywords : Elastic wave, Bender elements, Time domain approach, Cross correlation, Frequency domain approach

요 지 : 탄성파는 지반 및 지반환경 관련 과업에서 다양한 형태로 활용되어 왔다. 일반적으로는 현장에서 탄성파 탐사를 수행하여 시추조사와 더불어 지반의 물성값을 평가하는 목적으로 사용되고 있으며, 지하공동의 위치파악 등에도 사용되고 있다. 환경복원이 필요한 버려진 부지에 매립된 유류 저장시설의 위치 파악 등 지반환경공학과 관련하여서도 탄성파의 활용은 활발히 이루어지고 있다. 또한 지반의 미소변형을 구간에서의 지반 거동 분석에도 탄성파를 활용하고 있다. 탄성파의 매질 내 이동속도가 주요 인자로 활용되고 있는데, 이는 시간 영역과 주파수 영역에서 산정할 수 있다. 시간 영역에서의 탄성파의 이동속도 평가방법은 동일 위상을 갖는 특정한 점들의 시간차이를 분석하는 방법, 상호상관법을 활용한 방법으로 나눌 수 있다. 주파수 영역에서의 탄성파의 이동속도는 진원과 수신점에서의 입력 파형과 수신파형의 위상 차이를 분석하여 산정할 수 있다. 본 연구에서는 시카고 지역에서 채취한 불교란 빙하퇴적 점성토 시료에 벤더 엘리먼트를 이용한 탄성파 시험을 실시, 동일한 탄성파에 대해 여러 가지 산정 방법을 적용하여 탄성파의 이동속도를 분석하였다. 시간영역에서 탄성파의 이동속도를 분석한 결과 데이터로거의 표본화 주파수에 영향을 크게 받는 것으로 분석되었으며, 신호에 포함되어있는 노이즈 및 수신파형의 요철 특성으로 인하여 같은 위상을 갖는 점을 정확히 찾는 것은 불가능하였다. 상호상관법으로 분석한 경우도 입력 파형과 수신파형의 주기의 차이로 인해 탄성파의 정확한 이동속도를 산정하는 것은 불가능하였다. 주파수 영역에서의 이동속도 산정의 경우 영채우기를 통해 주파수 분해능을 개선시킬 수 있어 데이터로거의 표본화 주파수에 영향을 받지 않았다. 과도파 사용으로 인한 지배주파수가 유일 값이 아닌 범위로 나타나는 단점이 있었으나, 지배주파수 범위 내의 탄성파의 이동속도의 범위는 시간 영역에서 산정한 값보다 정밀한 것으로 나타났다.

주요어 : 탄성파, 벤더 엘리먼트, 시간 영역 분석, 상호상관법, 주파수 영역 분석

1. 서 론

탄성파는 지반 및 지반환경 관련 과업에서 다양한 형태로 활용되어 왔다. 일반적으로는 현장에서 탄성파 탐사를 수행하여 시추조사와 더불어 지반의 물성값을 평가하는 목적으로 사용되고 있다. 탄성파를 이용한 지반의 탐사는 지하공동의 위치 파악 및 환경복원이 필요한 버려진 부지에

매립된 유류 저장 시설의 위치 파악 등 다양한 분야에서도 활용되고 있다. 또한 1990년대 이후에 도심지의 굴착과 관련되어 지반의 미소변형을 구간에서의 응력-변형을 관계가 중요해지면서(Burland, 1989) 미소변형을 구간에서의 지반의 거동 분석에도 탄성파를 활용하고 있다(Cho & Finno, 2010; Kim & Finno, 2012).

탄성파를 이용하여 미소변형 구간에서의 지반의 거동을

[†] Department of Civil Engineering, Hongik University (Corresponding Author : taesik.kim@hongik.ac.kr)

분석하는 경우 전단탄성계수 값을 인자로 활용하며 Eq. (1)을 이용하여 산정한다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

여기서 G 는 전단탄성계수, ρ 는 매질의 밀도, V_s 는 전단탄성파의 이동속도를 의미한다. 전단탄성계수의 산정 시 전단탄성파의 속도는 제곱의 항으로 계산되기 때문에 속도값의 오차는 전단탄성계수 값에 큰 영향을 미치게 되어 정밀하게 산정할 필요가 있다.

탄성파의 이동속도는 시간 영역(Time domain) 또는 주파수 영역(Frequency domain)에서 평가가 가능하다. 시간 영역에서의 평가는 입력 파형과 같은 위상을 갖는 점을 수신 파형으로부터 찾아 두 점의 시간차이를 산정하거나 상호상관법을 이용한다. 주파수 영역에서의 탄성파의 이동속도는 진원과 수신점에서의 위상 차이를 이용하여 분석한다. 과거 연구를 살펴보면, Brignoli(1996)등은 다양한 주파수의 입력 파형을 사용하여 전달속도를 시간영역에서 분석하였다. 시간영역에서 첫 번째와 두 번째의 수신 파형에 상호상관법을 적용, 도달 시간을 분석하기도 하였으며(Lee & Santamarina, 2004), Kaarsberg(1975)는 입력 및 수신 파형의 위상 차이 분석을 통한 전단탄성파의 전달속도를 평가방법을 제안하기도 하였다.

본 연구에서는 동일한 시험 결과에 대해 다양한 방법으로 탄성파의 이동속도를 분석하여 각 방법의 장단점을 비교하였다. 시카고 지역에서 채취한 불교란 블록 빙하 퇴적토(Glacial tills)를 시료로 사용하였으며, CKC 삼축압축 시험기에 벤더 엘리먼트(Shirley & Hampton, 1978)를 설치하여 실내시험을 수행하였다. 이동속도의 산정방법은 시간영역에서 동일 위상의 시간차 분석과 상호상관법을 이용하였고, 주파수 영역에서는 특정주파수의 위상 차이를 이용하여 분석하였다.

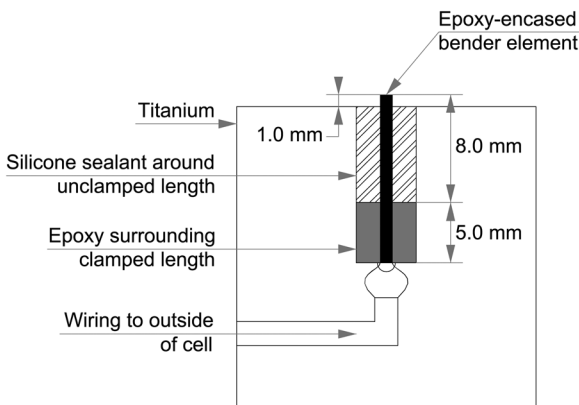


Fig. 1. Schematic diagram of GDS bender element insert

2. 시 험

본 시험을 위해 CKC 삼축압축 시험기(Chan, 1981)를 개량하여 벤더 엘리먼트(Bender elements)를 설치하였다. 벤더 엘리먼트는 피에조세라믹 소자를 사용 전기에너지를 기계적 움직임으로 변환하여 전단탄성파를 생성할 수 있으며, 기계적인 움직임을 전기에너지로의 역변환도 가능하다. 본 시험에서는 GDS Instruments(Hook, Hampshire, U.K.)에서 제작한 벤더 엘리먼트를 사용하였다.

Fig. 1과 같이 총 길이 13 mm, 고정단 5 mm, 진동 가능한 길이 8 mm로 구성되어있으며, 1 mm의 벤더 엘리먼트가 시료에 근입되어 전단탄성파를 전달하게끔 하였다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 시료의 상단과 하단부에 벤더 엘리먼트를 설치하여, 횡방향으로 진동하는 전단탄성파가 수직 방향으로 전달되게끔 구성하였다. GDS Instruments에서 제작한 파형 생성기(Function generator) 및 데이터 로거를 사용하여 전단탄성파의 전달 특성을 분석하였다.

본 시험에서는 시카고 도심에 위치하고 있는 블록37 재개발 굴착 현장으로부터 채취한 불교란 블록 시료를 사용하였다. 시료는 시카고 빙하퇴적점성토(Glacial till)로 통일분류법에 의해 CL로 분류되었으며, 시료에 대한 기본적인 물성값은 Table 1과 같다.

불교란 블록 시료로부터 지름 72 mm, 길이 152 mm의 크기로 시편을 제작한 후 현장의 지중 응력상태로 K_0 압밀하였다. 현장의 응력상태에서 벤더 엘리먼트 시험을 실시하여 전단탄성파의 이동 시간을 시간영역(Time domain) 및 주파수 영역(Frequency domain)에서 분석하였다. 압밀 중 시편의 길이 변화는 3 μ m까지 정밀하게 측정할 수 있는 변위센서(LVDT)를 사용하여 측정하였으며, 전단탄성파의 이

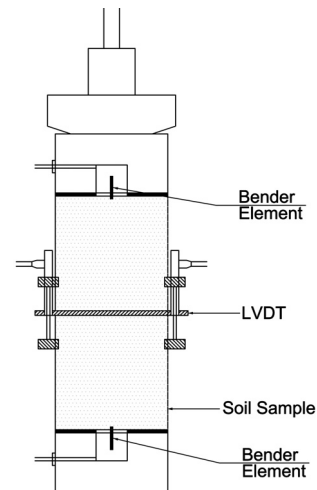


Fig. 2. Schematic diagram of specimen with bender elements

Table 1. Summary of index properties

Properties	Range (ave., std. deviation)
Natural water content, %	23.1~25.0 (24.4, 0.4)
Liquid limit, %	33.2~35.1 (34.9, 0.9)
Plasticity index	16.2~17.0 (16.7, 0.4)
Specific gravity	2.71~2.72 (2.72, 0.01)
σ'_v (kPa)	204
OCR	1.1~1.2 (1.1, 0.06)
C_c	0.17~0.19 (0.18, 0.01)
C_r	0.032~0.033 (0.033, 0.001)

동속도 산정 시 반영하였다.

전단 탄성파는 주기 2 kHz, 진폭 14 V의 사인파(Sine wave)를 사용하였으며, 표본화 주파수(Sampling frequency)는 10^5 sample/sec를 사용하였다. 신호는 5.0 ms까지 기록하였을 때 수신된 파형을 충분히 기록할 수 있는 것으로 나타났다. 노이즈의 감소를 위해 20회의 반복 시험을 통해 누적시킨 수신 파형을 분석하였다.

시험방법 및 시료에 관한 더 자세한 사항은 Kim(2011)에 설명되어 있으며, 시카고지역 빙하퇴적 점토에 관한 지질학적인 내용은 Chung & Finno(1992)에 설명되어 있다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 시간 영역 분석

3.1.1 동일 위상의 시간차 분석

시간 영역에서 전단 탄성파의 매질 내 이동속도는 입력 파형과 수신 파형에서 같은 위상을 갖는 특정 두 점을 지정하고, 그 두 점 사이의 시간 간격을 측정하여 평가한다. 사인파에 있어서 쉽게 인지가 가능한 위상은 파형이 첫 시작하는 점(First rise)과 마루(Peak)이므로, 본 연구에서는 입력파와 수신파 각각의 First rise와 Peak 점들 사이의 시간 간격을 평가하여 전단 탄성파의 이동시간을 산정하였다. Fig. 3(a)는 입력파와 수신파의 파형을 나타낸다.

Fig. 3(b)는 First rise를 명확히 나타내기 위해 Fig. 3(a)를 확대하였다. 그림에 나타난 바와 같이 입력 파형의 First rise는 비교적 쉽게 인지가 가능하였으나 수신 파형의 First rise는 인지하기가 어려웠다. 수신 파형의 경우 일반적으로 근거리장 효과 등으로 인해 본파가 도착하기 전에 요철(Bump)이 나타나는데, 이로 인해 First rise의 파악이 어려웠다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이, First rise의 가능성이 있는 점은 요철의 시작점, 요철의 최저점, 요철 이후 최초로 0의 값을 갖는 점으로 세 곳이었다. 요철 시작점의 경우 0.50 ms 이후

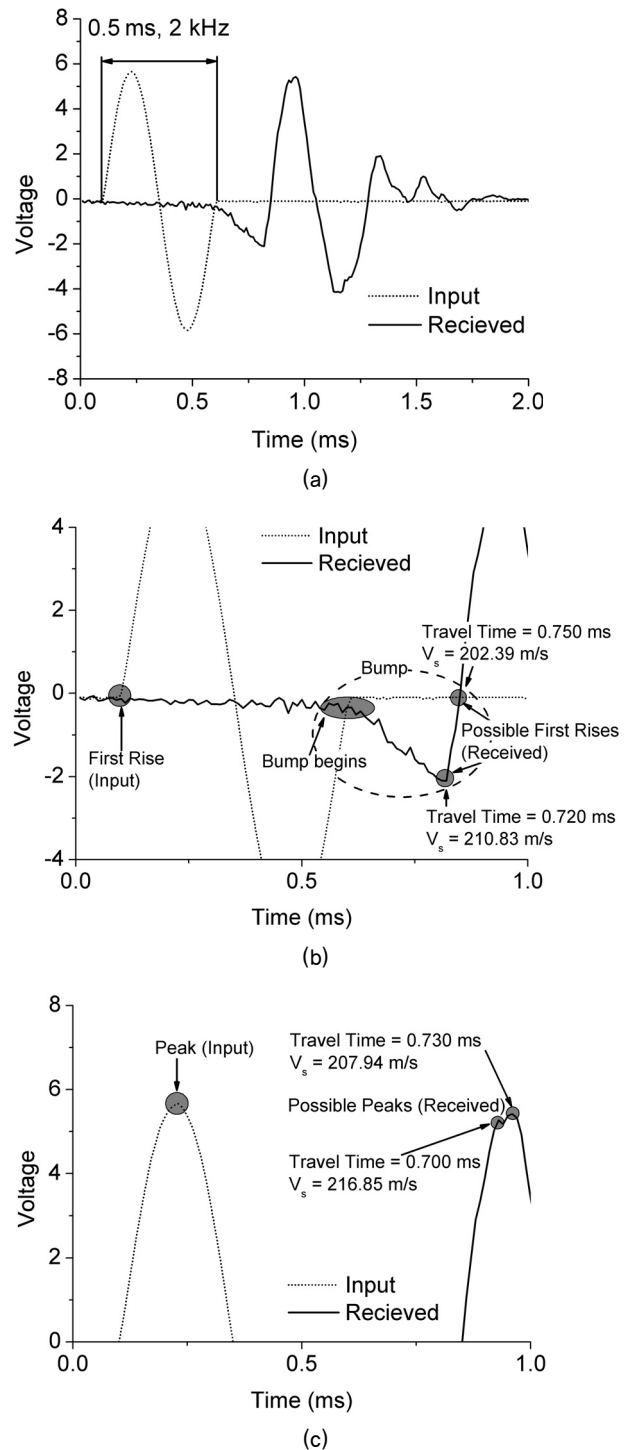


Fig. 3. Input and received waveforms in time domain

에 나타나는 것을 개략적으로 알 수 있었으나, 신호 노이즈로 인해 정확히 어디에 위치하는지 평가가 어려웠다. 요철의 최저점과 요철 이후 최초로 0의 값을 갖는 지점은 쉽게 찾을 수 있었으나, 두 점 중 First rise는 어디인지 알 수 없었다.

Fig. 3(c)는 입력 파형과 수신 파형의 Peak를 명확하게 보기 위해 Fig. 3(a)를 확대하였다. 입력 파형의 경우 Peak 값이 명확하게 나타났으나, 수신 파형의 경우 노이즈로 인해

Peak가 어디인지 명확하게 알 수 없었다. 또한 그림에 나타난 바와 같이 전단 탄성파의 이동시간은 Peak 값에 따라 0.70 ms, 0.73 ms로 측정되었는데 이 두 값은 First rise 점을 활용하여 측정한 0.72 ms, 0.75 ms와도 다른 값이었다. 동일한 시편에 수행한 동일한 시험결과에 대해 최소 이동시간은 0.70 ms 최대 이동시간 0.75 ms로 0.05 ms의 시간차가 발생하였다.

이는 시편의 길이를 고려하여 전단 탄성파의 이동속도를 계산하였을 때 약 14.5 m/s의 차이에 해당되었다. 또한 전단 탄성파의 이동속도를 이용하여 시편의 동적 전단 탄성계수를 평가하였을 때 최대 94 MPa, 최소 82 MPa로 약 12 MPa의 차이가 나타났다. 즉 시간 영역에서 동일 위상을 갖는 점들의 시간차이에 의한 전단 탄성파의 이동시간 평가 방법은 큰 오차를 포함할 가능성이 매우 컸다.

시간 분해능(Time resolution)은 표본화 주파수의 역수로 본 연구의 경우 0.01 ms였다. 0.01 ms보다 더 작은 시간 분해능을 갖는 데이터 로거를 사용하였다면 위에서 설명한 오차보다 작은 오차가 발생하였을 것이다. 시간 영역에서 전단 탄성파의 이동시간에 대한 분석은 데이터 로거의 표본화 주파수에도 큰 영향을 받는다 할 수 있다.

3.1.2 상호상관법

시간 영역에서 상호상관법(Cross correlation)을 사용하여 전단 탄성파의 시편 내 이동시간을 계산하여 이동속도를 산정하였다. 상호상관법은 각기 다른 두 파형의 시간차이를 Eq. (2)를 사용하여 계산한다.

$$(S_1 \otimes S_2)(\tau) = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_T S_1(t) S_2(t + \tau) dt \quad (2)$$

S_1 , S_2 는 입력과 수신 파형의 신호를 의미하며 T 는 총 신호 기록 시간, τ 는 시간 축에 대한 수평 이동 값을 의미한다. 즉 하나의 파형을 시간 축에 대해 수평 이동시켜 두 파

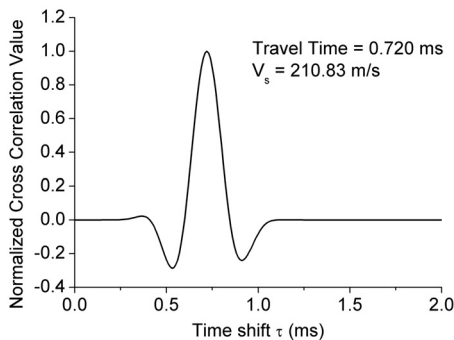


Fig. 4. Cross-correlation method

형이 겹친 면적이 최대가 될 때의 수평 이동 값이 전단 탄성파의 이동시간이 된다.

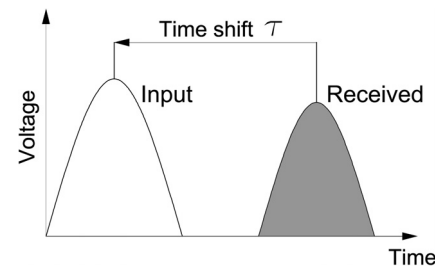
Fig. 3에 나타난 입력 파형과 수신 파형에 대해 상호상관법으로 전단탄성파의 이동시간을 분석하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 두 파형의 최대 겹친 면적은 0.72 ms만큼 수평 이동하였을 때 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 전단탄성파의 이동시간은 0.72 ms로 산정되었다. 이 방법은 전단탄성파의 이동시간 산정 시 특정한 점을 지정할 필요가 없어 그로 인한 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다.

상호상관법도 동일 위상의 시간차 분석 방법과 마찬가지로 한계를 내포하고 있다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 입력 파형의 주기와 수신 파형의 주기가 동일하지 않을 경우 두 파형의 겹친 면적을 최대로 하는 수평 이동 값은 하나의 값이 아닌 일정 범위의 형태로 존재하게 된다. 따라서 전단탄성파의 이동속도는 하나의 값으로 산정되기 힘든 단점이 있다. 또한 상호상관법 역시 시간 영역에서 분석을 수행하기 때문에 데이터 로거의 시간 분해능의 영향을 받는다는 점은 극복할 수 없다.

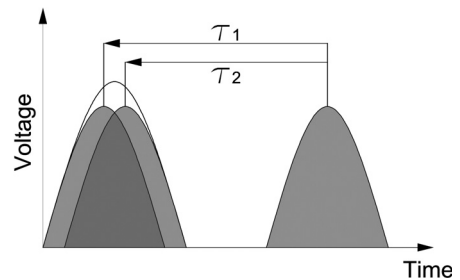
3.2 주파수 영역 분석

전단탄성파의 시편 내 이동속도는 입력 파형과 수신 파형의 위상 차이를 평가하여 산정할 수 있으며(Kaarsberg, 1975), 이를 위한 식은 Eq. (3)과 같다.

$$V = L \frac{2\pi f}{\phi} \quad (3)$$



(a)



(b)

Fig. 5. Possible errors in cross-correlation method

ϕ 는 위상, f 는 주파수, L 은 진원과 수신점과의 거리, 즉 시편의 길이를 의미한다. Fig. 6은 입력 파형과 수신 파형의 위상 차이를 이용한 전단탄성파의 속도 산정의 예시이다.

Fig. 6에서 보인 바와 같이 입력 파형의 주기는 2π 이고, L 만큼 떨어진 곳에서의 수신 파형의 위상차이가 2π 일 때 전단탄성파의 전달속도는 $2\pi/L$ 이 된다.

하나의 주파수를 갖는 파형을 입력파로 사용하더라도 다양한 주파수를 갖는 여러 파형이 수신될 수 있다. 따라서 위상 차이를 평가하여 전단탄성파의 이동속도를 산정하기 위해 주파수 영역에서 분석을 수행하였다. 시간 영역에서 Peak를 중심으로 윈도우(Windowing)를 수행하여 Peak 이후의

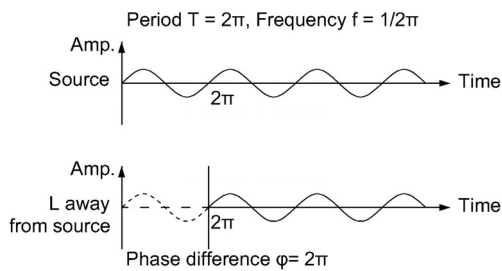


Fig. 6. Phase difference between source wave and received wave

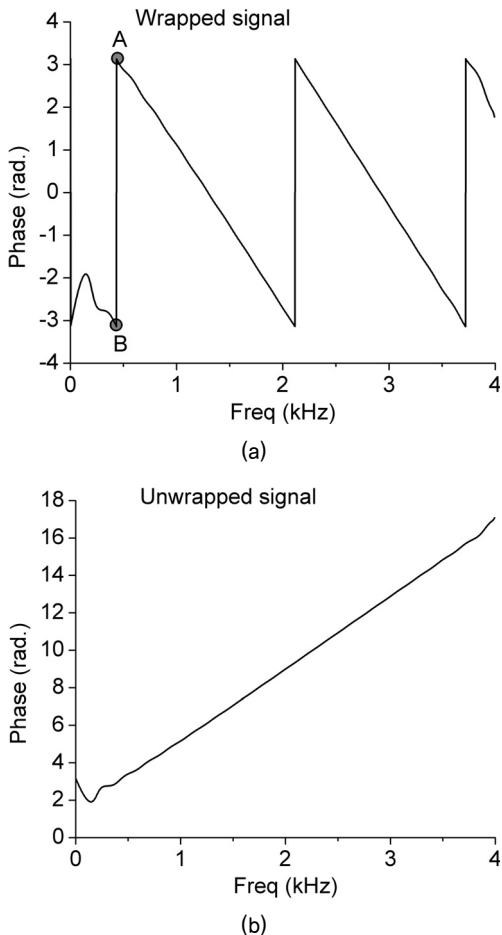


Fig. 7. Wrapped and unwrapped signals in frequency domain

전단탄성파의 이동속도 산정과 관계없는 파형들을 제거한 후, 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transformation, FFT)을 통해 주파수 영역으로의 변환하였다.

주파수 분해능(Frequency resolution)은 시간 분해능과 달리 시험 이후에도 개선이 가능하다. 앞서 언급한 바와 같이 시간 분해능은 측정기기의 성능에 의존적이지만 주파수 분해능은 수신 파형의 뒷부분에 영채우기(Zero padding)를 통해 측정점의 수를 임의로 증가시킴으로써 개선이 가능하며 스펙트럼 밀도(Autospectral density)에 영향을 미치지 않는다(Santamarina & Fratta, 1998). 주파수 분해능은 Eq. (4)와 같이 계산된다.

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (4)$$

여기서 Δf 는 주파수 분해능, N 은 측정점의 수, Δt 는 표본화 주기이다. 본 실험에서는 0.01 ms 간격으로 5 ms까지 측정하였으므로 N 은 500이고 주파수 분해능은 200 Hz였다. 영채우기를 통해 측정점의 수 N 을 500,000으로 증가시켜 주파수 분해능을 0.2 Hz까지 개선시켰다.

Fig. 7은 본 실험에서 사용된 입력파와 수신파의 위상 차이를 주파수 영역에 나타낸 것이다. Fig. 7(a)와 같이 계산 알고리즘에서 위상은 $-\pi$ 에서 π 범위 값만을 계산한다.

예를 들어 $\sin(2\pi + \pi/3)$ 의 값은 $\sin(\pi/3)$ 으로 계산되는데, 이는 $2\pi + \pi/3$ 의 실제 위상이 $\pi/3$ 과 동일하기 때문이다. Fig. 7(a)의 점 A와 B는 각각 π 와 $-\pi$ 의 위상을 나타내는 서로 다른 두 점으로 표현되어 있으나, 사실은 같은 위상을 나타낸다. 이는 전단탄성파의 이동속도를 산정하기에는 부적절하여 Fig. 7(b)와 같이 언래핑(Unwrapping) 과정을 통해 단순 위상차이가 아닌 몇 번의 주기가 지났는지까지 평가하였다.

Fig. 8(a)는 주파수 영역으로 변환 후의 입력 파형과 수신 파형의 지배주파수(Dominant frequency)를 나타내며 Y축의 값은 푸리에 함수값의 절대값을 나타낸다. 본 연구에서는 Fig. 3(a)에서 나타난 바와 같이 시간 영역에서 2 kHz의 주파수를 갖는 입력 파형을 사용하였다. 그러나 Fig. 8(a)와 같이 주파수 영역에서의 지배주파수는 정확히 2 kHz가 아닌 1.7 kHz로 나타났으며 수신 파형의 지배주파수도 2.15 kHz로 나타났다. 이는 입력파를 연속파(Continuous wave)가 아닌 과도파(Transient wave)를 사용하였기 때문에 FFT로 변환 시 나타나는 현상으로, 과도파를 주파수 영역에서 분석할 때의 한계라고 할 수 있다. 즉 하나의 주파수를 갖는 파형을 입력파로 사용하였다 하더라도 여러 지배주파수 값이 나타날 수 있기 때문에 주파수 영역에서는 전단탄성파의 이

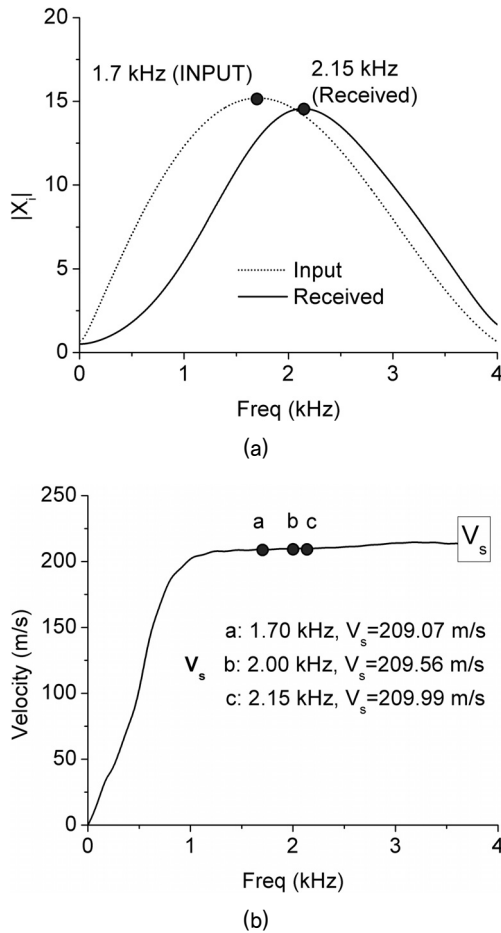


Fig. 8. (a) Dominant frequency of input and received signal after applying FFT; (b) Dispersion curve

동속도 값을 하나로 단정 짓기 힘들다.

Fig. 8(b)는 주파수별 전단탄성파의 이동속도를 나타내고 있다. 비록 하나의 주파수 값에 대한 속도 값은 산정할 수 없더라도 일정 주파수 범위에 대한 속도 값의 범위는 산정이 가능하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 약 1 kHz 부터 대략 하나의 속도 값에 수렴하는 양상을 보였다. 속도 값을 살펴보면, 입력파의 지배주파수인 1.7 kHz에서 209.07 m/s, 시간영역에서 입력주파수인 2 kHz에서 209.56 m/s, 수신파의 지배주파수인 2.15 kHz에서 209.99 m/s로 나타났다. 주파수 영역에서 전단탄성파의 이동속도를 산정한 경우 최대값과 최소값의 차이가 0.1 m/s로 미미하였다.

그러나 시간 영역에서 산정한 경우, 앞서 설명한 바와 같이 동일 위상점 파악이 난해하고 측정기기의 시간 분해능의 한계로 인해 최대값과 최소값의 차이가 14.5 m/s에 달하였다. 즉 주파수 영역에서 전단탄성파의 이동속도를 산정하는 것이 시간 영역에서 산정하는 방법에 비해 우수한 것으로 평가되었다.

4. 결 론

전단탄성파의 매질 내에서의 이동속도를 동일한 탄성파에 대해 시간 영역과 주파수 영역에서 각기 다른 방법을 적용하여 평가해보았다. 본 연구에서 수행한 시험결과를 바탕으로 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 시간 영역에서 같은 위상을 갖는 특정한 두 점을 지정하고, 그 점들 사이의 시간 간격 산정 통해 전단탄성파의 이동속도를 측정할 수 있었다. 그러나 이 방법은 신호의 노이즈 및 입력 파형과 상이한 수신 파형으로 인해 동일한 위상을 갖는 두 점을 지정하는 것은 불가능하여 전단탄성파의 이동속도를 정확히 산정하는 것은 불가능하였다.
- (2) 상호상관법을 이용한 전단탄성파의 이동속도 산정 방법은 특정한 두 점을 지정하지 않아도 되는 장점이 있어 측정자의 주관이 배제되었다. 그러나 입력된 파형과 수신된 파형의 주기가 일치하지 않을 경우 전단탄성파의 이동속도를 정확히 산정하는 것은 불가능하였다.
- (3) 시간 영역에서 전단탄성파의 이동시간 산정 시, 측정기기의 표본화 주파수에 절대적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 주파수 영역에서 전단탄성파의 이동시간을 평가할 경우, 영채우기를 통해 주파수 분해능을 높일 수 있어 측정기기의 표본화 주파수에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- (4) 주파수 영역에서 전단탄성파의 이동속도를 산정하는 방법이 시간 영역에서 산정하는 방법들에 비해 정밀한 산정이 가능하였다.

References

1. Brignoli, E. G. M., Gotti, M. and Stokoe, K. H. (1996), Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 19, No. 4, pp. 384~397.
2. Burland, J. B. (1989), Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture 'Small is beautiful.' The stiffness of soils at small strains, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 4, pp.499~516.
3. Chan, C. K. (1981), An electropneumatic cyclic loading system, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 183~187.
4. Cho, W. and Finno, R. J. (2010), Stress-strain responses of block samples of compressible Chicago glacial clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 1, pp. 178~188.
5. Chung, C. K. and Finno, R. J. (1992), Influence of depositional processes on the geotechnical parameters of Chicago glacial

- clays, *Engineering Geology*, Vol. 32, No. 4, pp. 225~242.
6. Kaarsberg, E. A. (1975), Elastic-wave velocity measurements in rocks and other materials by phase-delay methods, *Geophysics*, Vol. 40, No. 6, pp. 955~960.
 7. Kim, T. (2011), Incrementally nonlinear responses of soft Chicago glacial clays, Ph.D. dissertation, Northwestern Univ., Evanston, IL. pp. 58~84.
 8. Kim, T. and Finno, R. J. (2012), Anisotropy evolution and irrecoverable deformation in triaxial stress probes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, No. 2, pp. 155~165.
 9. Lee, J. and Santamarina J. C. (2004), Bender elements: performance and signal interpretation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 1063~1070.
 10. Santamarina, J. C. and Fratta, D. (1998), Introduction of discrete signals and inverse problems in civil engineering, ASCE, Reston, VA., pp. 102~105.
 11. Shirely, D. J. and Hampton, L. D. (1978), Shear-wave measurements in laboratory sediments, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 63, No. 2, pp. 607~613.