

표면파 적용 댐체 물성 조사 타당성 연구

A Study on Feasibility of Surface Wave Application for the Assessment of Physical Properties of Dam

김형수¹⁾, Hyoung-Soo Kim, 민동주²⁾, Dong-Ju Min, 김중열³⁾, Jung-Yul Kim, 하익수⁴⁾, Ik-Soo Ha, 오석훈⁵⁾, Suk Hoon Oh

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 소장, Director, Groundwater and Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

²⁾ 한국해양연구원, .해저환경자원연구본부, 선임연구원, Senior Researcher, Marine Geoenvironments and Resources Research Division, KORDI

³⁾ (주)소암컨설팅 대표이사, C.E.O., Soam Consultant Co., Ltd.

⁴⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 선임연구원, Senior Researcher, Groundwater and Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

⁵⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher, Dam Safety Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

SYNOPSIS : Three dimensional finite difference elastic wave model was developed to estimate the feasibility of surface wave applications in geotechnical problems. The wave motions calculated by the developed program in this study shows good agreement with well known analytic solutions.

The surface wave motions calculated from layered dam type structure can be interpreted as a infinite layer structure using dispersion curve but it is need a special source of which high energy in frequency band lower than 10 Hz to get information of physical properties in few tens meter deep. The source which has high energy in the low frequency band, however, can give defect on dam and this will make some limitation in real field applications. The dispersion curves calculated from the surface wave motion of homogeneous and center core type dam models will give rise to fatal errors if the conventional infinite layer structure used in their interpretation because the surrounding materials and boundaries of dam make some distortion in dispersion curve of surface wave. So it is strongly recommended to use three dimensional inversion model for correct interpretation and estimation of physical properties of dam materials.

Key words : Seismic and Surface wave application, Elastic wave model, SASW(Spectral Analysis of Surface Waves), MASW(Multichannel Analysis of Surface Waves), Dispersion curve, Dam.

1. 서 론

심도에 따른 지층의 전단파(shear wave) 속도 변화는 지표면의 표면파에 대한 분산 특성을 보여주며, 이러한 분산 특성의 관측을 통해 지하의 정보를 획득하고자 하는 노력은 오래된 지구물리학의 한 분야이다(Bullen, 1963). 전통적인 지구물리학의 경우, 주로 지진으로 야기되는 표면파의 분석을 통해 지각 구조 등의 지질학적 현상 규명을 위해 표면파의 분산 특성을 활용한다. 반해, 1980년대 초반 Nazarian 등(1983)이 SASW(spectral analysis of surface waves)라는 이름으로 근접 지표의 전단파 속도를 추

정하는데 적용하였으며, 그 이후 많은 지반 공학 분야에 응용되어져 왔다. 한편, Park 등(1999)은 단일 수신기를 사용하는 기존의 SASW 방식을 다중 수신 방식으로 전환하여 보다 정밀한 표면파의 분산 곡선을 도출할 수 있는 MASW(multichannel analysis of surface waves)를 개발하여 현장에 적용하는 방식을 소개하였다. 이러한 지반 물성 정보 중 특히 전단파 속도에 직접적으로 관계하는, 미소 변위에 대한 전단 탄성계수(shear modulus)는 동하중을 받는 기초 설계, 액상화 가능성 평가 및 현장 시료 채취가 힘든 자갈 등의 평가에 활용될 수 있다고 알려져 왔다. 지반 조사를 위해 활용되는 이러한 표면파 활용 기법은 비파괴적인 방식으로 지반의 중요 물성을 추정할 수 있다는 장점 때문에 국내에서도 준설토의 다짐 효과 확인, 연약 지반의 개량 효과 판정, 터널 벽체의 건전도 평가, 콘크리트 두께 조사, 철도의 분니 현상 규명 등(송명준 등, 1999, 김동수 등, 2001, 조미라와 강태호, 2003) 매우 다양한 지반 공학 문제 해결을 위해 적용되어 왔다.

한편, 이러한 표면파 기법의 활용시의 현장 조사 및 해석상의 문제점에 대한 연구는 상대적으로 매우 제한적으로 수행되어 왔으며, Marwin(1993) 및 김동수 등(2001) 연구는 경사 지층을 갖는 구조에 대한 수치 해석 결과, 경사진 지반의 파의 전파 현상은 수평 지층내의 파의 전파 현상과는 전혀 다른 특성을 보이고 있음을 밝혔으며, 이러한 경사 지층에 대해 기존의 층상 구조 해석을 적용할 경우, 왜곡된 물성을 도출할 가능성을 시사하고 있다. 따라서, 본 연구는 현재 표면파 기법을 활용하여 댐의 지반 물성을 조사하기 위한 노력이 일반적인 층상 구조 방식의 해석으로 가능한지 여부를 수치적으로 접근하여 보았으며, 또한 현장에서 활용되는 파원(source)의 주파수 대역의 한계 상황 등을 고찰하였다.

2. 탄성과 수치 해석 프로그램 개발 및 검증

2.1 탄성과 전달 유한 차분 프로그램 개발

매질 내에서의 탄성과의 전달은 기본적으로 파동 방정식을 따른다. 탄성과 파동 방정식은 매질 변위에 대한 미분방정식의 형태를 가지며, 이 미분방정식은 매질의 밀도(density, ρ), 라미 상수(Lame constant, λ), 전단 탄성계수(shear modulus, μ)를 계수로 갖는 형태를 갖는다. 식 (1)은 벡터 형태로 표현된 비균질 등방성 매질내의 탄성과 파동 방정식을 보여준다.

$$\rho \vec{u} = \vec{f} + (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{u}) \quad \text{---(1)}$$

여기에서 \vec{f} 는 체적힘, \vec{u} 는 변위를 표시한다.

식 (1)을 성분별로 나눈 형태 중 수직 성분에 대한 3차원 탄성과동 방정식은 다음 (2)와 같으며, 다른 수평 성분도 동일한 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = & \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial z} + \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial z} + \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right] + f_z \quad \text{--- (2)} \end{aligned}$$

이러한 성분별 식을 기존 2차원에 대한 탄성과 유한 차분식에서 활용된 방식(민동주와 유해수, 2003; Min et al., 2004)으로 3차원 탄성과동 방정식에 적용함으로써 시간영역에서 유한차분법을 이용한 3차원 탄성과 모델링 알고리즘을 개발하였다. 이 식의 개발을 위해 사용된 좌표계와 격자점을 둘러싼 육면체에 대한 물성 번호는 그림 1과 같이 정의하였다. 본 연구에서 개발된 3차원 탄성과 모델링 알고리즘은 기존의 방법에서처럼 변위성분은 격자점내에 정의하지만 매질의 물성의 경우 기존의 방법과는 다르

계 육면체 내에 정의하는 방식을 활용하였다.

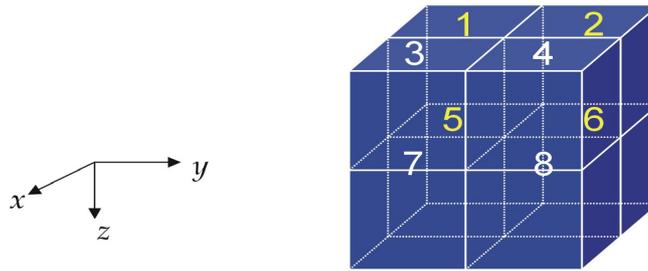


그림 1. 활용좌표계 및 유한차분격자군

이러한 좌표계와 물성 정의를 활용할 때, 예를 들어 x 에 대한 2차 미분의 차분식은 다음 식(3)과 같이 정의될 수 있으며, 혼합 미분항의 유한차분식은 Min et al.(2004)와 동일한 방식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{k_3 + k_4 + k_7 + k_8}{4} (u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}) - \frac{k_1 + k_2 + k_5 + k_6}{4} (u_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}) \right] \right\} \quad \text{---(3)}$$

x 와 y 에 대한 혼합 미분항과 같은 서로 다른 두 성분의 유한차분식은 다음과 같은 방법으로 전개된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial}{\partial y} \right) = \frac{1}{8\Delta x \Delta y} \left\{ \begin{aligned} & (k_4 + k_8) u_{i+1,j+1,k} + (k_4 + k_8 - k_2 - k_6) u_{i,j+1,k} - (k_2 + k_6) u_{i-1,j+1,k} \\ & + (-k_4 - k_8) u_{i+1,j,k} + (-k_4 - k_8 + k_2 + k_6) u_{i,j,k} + (k_2 + k_6) u_{i-1,j,k} \\ & - (k_3 + k_7) u_{i+1,j-1,k} + (-k_3 - k_7) u_{i,j-1,k} + (k_1 + k_5 - k_3 - k_7) u_{i,j-1,k} + (k_1 + k_5) u_{i-1,j-1,k} \end{aligned} \right\} \quad \text{---(4)}$$

또한 격자점에서의 물성은 주변의 8개의 육면체의 물성 평균을 이용하는 방식으로 활용되었으며, 예를 들어 (i,j,k) 격자점의 밀도는 다음 식 (5)과 같이 이용되었다.

$$\rho_{i,j,k} = \frac{1}{8} (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5 + \rho_6 + \rho_7 + \rho_8) \quad \text{---(5)}$$

2.2 개발 프로그램 검증

개발된 유한차분 방식 탄성과 모사 프로그램의 검증은 무한균질매질과 반무한 균질매질에 대한 해석 해를 개발된 프로그램의 결과인 수치 해와 비교하는 방식으로 수행되었다. 무한 매질 및 반무한 매질 모두, P파의 속도, S파의 속도, 밀도가 각각 2000m/s, 1000m/s, 2.0g/cm³인 매질을 가정하고 수치적인 해와 해석적인 해를 구하였으며, 탄성과 파원(source)는 최대주파수가 20Hz(주 주파수가 5Hz)인 가우스 함수의 1차 미분 형태를 우선 활용하여 수행되었다.

반무한 매질에 대한 탄성과 문제는 Lamb의 문제로 알려진 매우 오래된 전통적인 지구물리학의 문제 (Lamb, 1904; Aki and Richards, 1980)로, 그 해석해가 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 Ewing et al.(1957)에 소개된 해석해를 활용하였다.

반무한매질에 대한 수치적인 해의 계산을 위하여 파장 당 격자수를 매우 적은 수인 5개를 이용하였으므로 $1000\text{m} \times 1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 크기의 모형을 모사하기 위하여 $101 \times 101 \times 101$ 개의 격자를 이용하였다. 좌우 경계면으로부터 생성되는 반사파의 제거를 위하여 흡수 경계조건(일명, 스폰지 경계조건)을 이용하였다. 그림 2는 송신원으로부터 100m 및 300m 떨어진 지표에서 구한 수직 방향(z축) 변위를 보여준다.

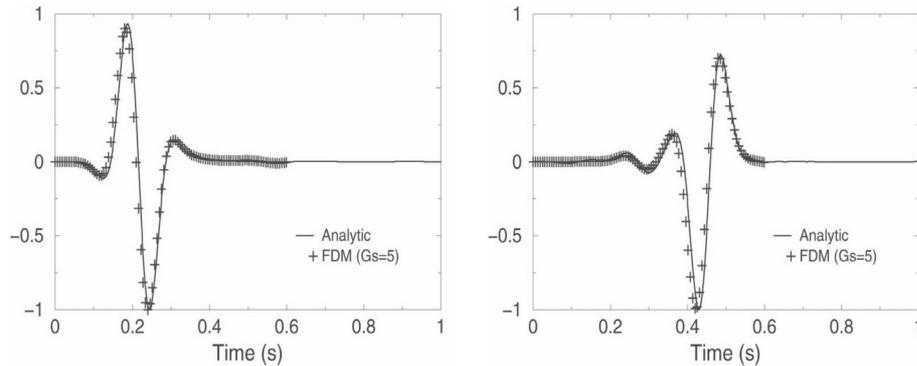


그림 2. 반무한매질 전달파동의 해석해와 수치해 비교

무한매질과 반무한 매질 모두 이론적인 해석해와 본 연구에서 개발된 유한차분 프로그램에서 모사된 해석해가 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

층상 구조에 대해서는 표면파의 분산 곡선에 대한 해석해가 존재하므로, 개발된 프로그램과 실제 해석해를 비교하여 봄으로써 개발 프로그램의 유용성을 검증하였다. 사용된 층상 구조에 대한 기본 물성과 기하학적 형상은 다음 그림 3과 표 1과 같다.

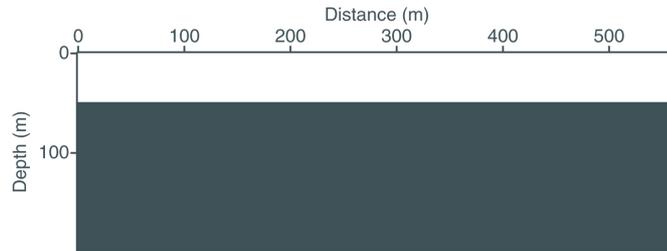


그림 3. 균질매질의 수평2층구조.

표 1. 무한 수평 2층 구조 모델에 대한 물성

Layer	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm^3)
1	892	477	2.0
2	2000	1000	2.2

그림 4는 수치적으로 구해진 무한 층상구조에 대한 수평 및 수직 성분 탄성과 신호를 보여주며, 그림 5는 이 신호의 스펙트럼 분석을 통해 획득된 표면파의 분산 곡선을 보여준다. 그림 5에서 볼 수 있듯이

저주파 대역에서는 약 900m/sec의 표면파 속도를 고주파 대역에서는 약 430m/sec의 표면파 속도를 보여주고 있어 실제 모델에서 제시한 전단파 속도의 약 0.9배에 해당되는 표면파 속도가 잘 모사되었음을 알 수 있다.

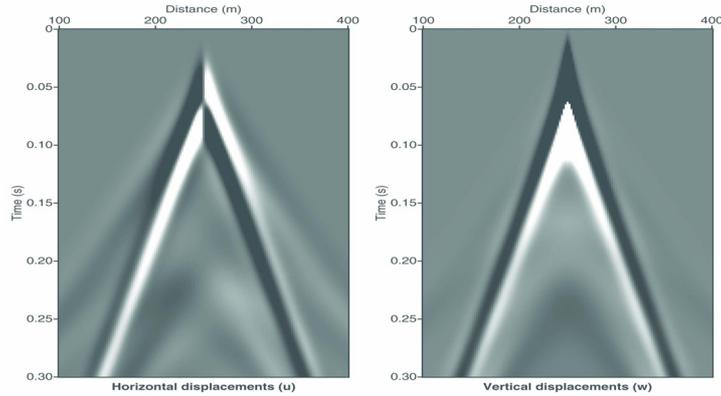


그림 4. 수평2층 구조 대한 수평, 수직탄성과 신호

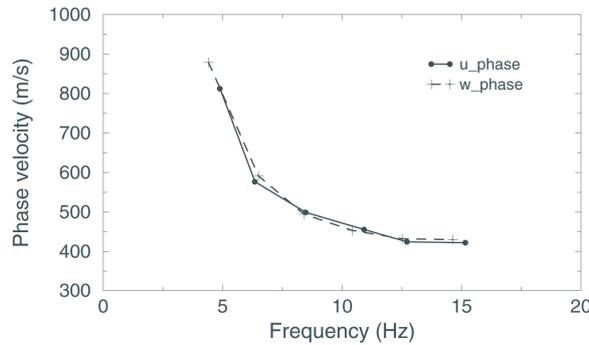


그림 5. 수평2층 구조 표면파 분산 곡선

무한균질모델, 반무한균질모델 및 무한 층상 구조 모델에 대하여 본 연구를 통해 개발된 프로그램의 검증은 수행한 결과, 본 프로그램의 수치결과가 기존의 해석해와 잘 일치하고 있음을 보여주어, 본 연구의 탄성과 모사 프로그램이 지반모형에 대한 탄성과 모사 시 매우 유용한 것으로 판명되었다.

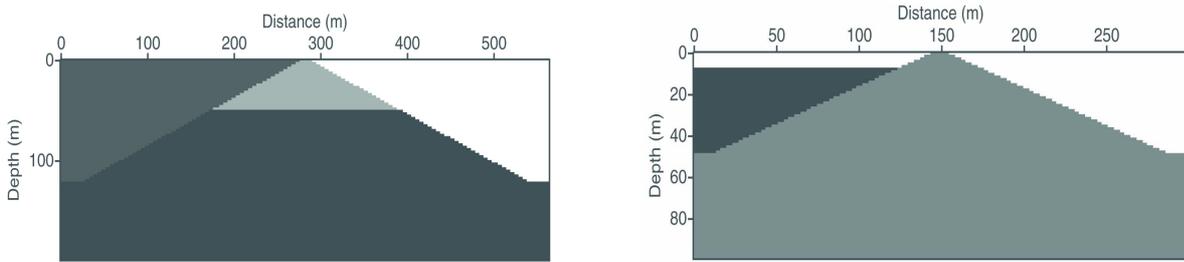
3. 댐체 형태에 대한 표면파 조사 적용성 검토

3.1 층상 구조를 갖는 댐체에 대한 표면파 분석

본 연구의 목적인 표면파 탐사의 댐체 적용성을 검증하기 위하여, 우선 층상 구조를 갖는 댐체(그림 6(a) 참조)에 대한 탄성과 모사를 수행한 후, 이들 탄성과 중 표면파 성분에 대한 스펙트럼 분석을 수행하였다. 한편, 모형으로 사용된 그림 6(a)와 같은 층상 구조를 갖는 댐체의 형상은 일반적인 실제 댐체의 구조와는 상이한 형태이다. 그러나, 실제 무한 층상 구조와의 비교 검증을 위해 가상의 2층 구조를 갖는 댐체의 모형을 가정하였다. 표 2는 가정된 댐체와 주변 물 및 공기의 물성을 보여준다. 또한 주어진 댐상하류 방향의 단면은 댐의 축방향으로는 변화하지 않는 구조를 갖는 것으로 가정하였으며, 탄성과의 신호 발생원(source)과 탄성과 수신기(geophone)은 댐의 정상부에 댐축 방향으로 배열된 것으로 간주하였다.

그림 7(a)는 2층 구조 댐체 형태에 대한 표면파 분석 곡선과 무한 2층 구조에 대한 수치적인 분산 곡

선 및 해석적인 분산 곡선을 보여준다. 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 무한 2층 구조에 대한 해석해와 수치해는 대체로 일치하는 형태를 댐내의 층상 구조가 있는 경우 저주파 대역에서는 다소의 과대평가 현상이, 고주파 대역에서는 다소 과소평가되는 현상이 관찰된다. 이러한 이유는 댐체의 기하학적 형상에서 기인하는 현상으로 파악된다. 이러한 분산 곡선을 통한 분석시, 대체로 댐의 축 방향으로 표면파 조사가 수행되는 경우, 충분한 저주파 신호의 생성이 가능하다면 하부 지층의 물성을 표면파 방식으로 추정하는 것이 이론적으로는 가능할 것으로 평가된다. 그러나, 실제 댐체에서 10Hz 이하의 저주파 신호를 만드는 행위는 댐의 고유 진동수와 유사한 신호 발생으로 인해 댐의 파괴 혹은 손상 등이 야기되는 문제를 가질 수 있어, 실제적인 적용이 가능한지의 여부는 매우 회의적이다.



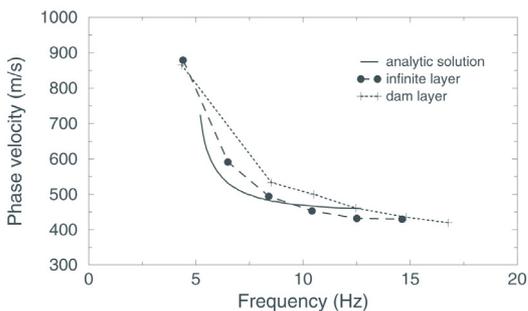
(a) 2층 구조를 갖는 댐체 형상 모델

(b) 균질형 댐체 형상 모델

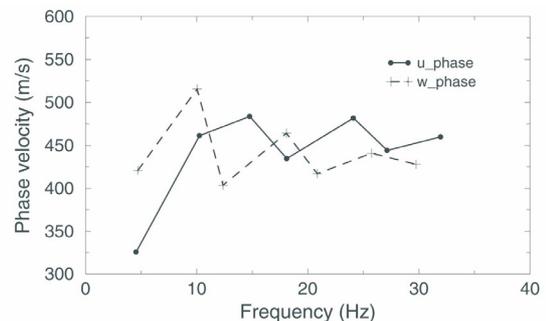
그림 6. 수치 모사용 댐체 형상

표 2. 2층 구조 댐 모형 매질 물성

Layer	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm ³)
1	1500.	0.	1.0 (water)
2	892.	477.	2.0
3	340.	0.	0.0013 (air)
4	2000.	1000.	2.2



(a) 2층 구조 댐체 및 무한 2층 분산 곡선



(b) 균질형 댐체 형상에 대한 분산 곡선

그림 7. 댐체 형상에 대한 표면파 조사 적용성 검토를 위한 분산 곡선

3.2 균질 구조를 갖는 댐체에 대한 표면파 분석

댐체가 기초 지반과 완전히 동일한 균질형인 경우에 대한 표면파 조사 효과를 분석하였다. 그림 6(b)는 균질형 댐체의 형상을 보여주며, 이 때 매질의 P파, S파 속도 및 밀도는 각각 892m/sec, 477m/sec 및 2.0g/cm³이다. 또한 댐 상류의 물과 하류의 공기는 표 2와 동일하게 설정하였다.

균질 구조 댐체에 대한 표면파 분산 곡선은 그림 7(b)에 주어져 있으며, 실제 전주파수에 대해 동일한 형태를 보여야 하는 무한 층상구조와는 달리 주파수 변화에 따라 표면파의 속도가 변동되는 현상이 관측된다. 이러한 변동 현상은 우선 표면파에 대한 스펙트럼 분석의 최대점 선별 오류, 댐의 형상 영향 등에서 기인하는 것으로 추정된다. 특히 이러한 현상은 표면파 수평 성분이 수직 성분에 비해 두드러지는 경향이 관찰된다.

균질한 댐체에 대해서도 표면파의 분산 현상이 나타나는 이러한 문제는 실제로 표면파 탐사 결과를 단순한 층상 구조로 해석할 때, 물성 추정에 오류가 있을 수 있음을 뚜렷이 시사한다.

3.3 중심 코어형 구조를 갖는 댐체에 대한 표면파 분석

보다 실제적으로 댐 조사에 활용되는 표면파 조사의 적용성을 검토하기 위하여, 가장 대표적인 실제 댐 형상인 중심 코어형 구조를 갖는 댐체에 대한 표면파 분석을 수행하였다. 그림 8의 수치 계산에 활용된 중심 코어형 댐체 형상을 보여주며, 이 때 중심코어의 P파, S파 속도 및 밀도는 각각 600m/sec, 300m/sec 및 2.0g/cm³으로, 댐 외곽부(shell)의 P파, S파 속도 및 밀도는 각각 800m/sec, 500m/sec 및 2.0g/cm³으로 설정하였다.

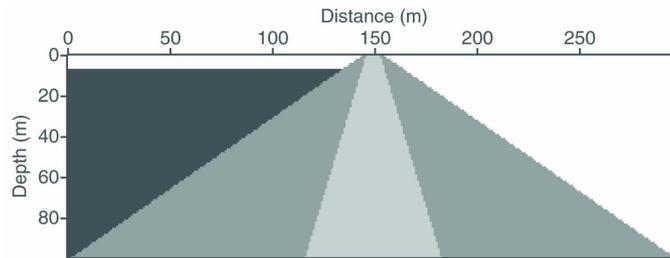


그림 8. 중심 코어형 댐체 형상
(댐사면기울기 1:1.43, 중심코어 1:0.3)

그림 9는 중심 코어형 댐체에 대해 모사된 표면파에 대한 분산 곡선을 보여준다.

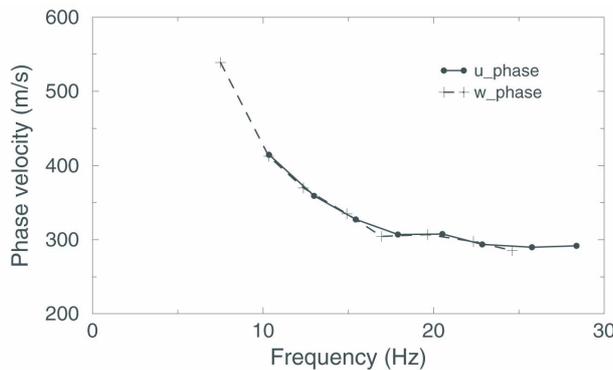


그림 9. 중심 코어형 댐체 표면파 분산 곡선

그림 9에서 볼 수 있듯이 저주파 대역에서 댐의 중심 코어부의 물성과는 상관없는 높은 표면파의 속도를 보여주는 현상이 관찰된다. 만약 이러한 분산 곡선은 층상 구조로 해석할 경우, 중심부에 균질한 코어가 형성되어 있음에도 불구하고 하부로 갈수록 높은 진단 강도를 갖는 것으로 평가할 수밖에 없으며, 특히 그 오차는 평가된 S파 속도의 제곱에 비례하므로 물성 평가에 큰 오류를 야기할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 저주파 대역의 높은 표면파 속도는 우선 댐 외곽부 물성 효과와 댐의 기하학적 형상에 의한 것으로 추정된다.

4. 결론

3차원 지반 구조에 대한 탄성과 전파를 모사할 수 있는 유한차분방식 프로그램을 개발하여, 표면파를 활용한 지반 조사의 적용성을 평가하였다. 개발된 프로그램은 기존의 알려진 해석해와 매우 잘 일치하는 탄성과 신호 결과를 보여주어 앞으로 다양한 분야에서 활용성이 높은 표면파 활용 지반 물성 조사의 적용 타당성을 우선적으로 검증하는데 매우 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

개발된 프로그램을 통해 댐체 형태에 대한 표면파 조사의 적용성을 평가한 결과, 댐이 층상 구조를 갖는 경우, 수치적으로는 표면파 분산 곡선을 층상 구조 해석을 통해 댐체 물성을 추정할 수 있는 것으로 평가되지만, 깊이 수십 m 이하의 정보를 획득하기 위해서는 수 Hz의 낮은 주파수 대역에 충분한 에너지를 갖는 탄성과 발생원이 필요한 것으로 평가되어 실제 이러한 탄성과 발생원을 댐체에 안전하게 적용하는 데는 어려움이 있을 수 있는 것으로 나타났다. 또한 균질 형태의 댐체에 대한 수치 모사된 표면파 분산 곡선은 주파수에 따라 변화하는 표면파 위상속도를 보여주어 이 분산 곡선을 층상 구조 방식으로 해석할 경우, 왜곡된 물성을 평가하게 되는 문제가 있음이 나타났다. 또한 보편적인 댐체의 형태인 균질형 중심 코어형 댐체에 대한 표면파 신호 분석 결과, 저주파 대역에서 높은 표면파 위상 속도를 보여 이러한 분산 곡선을 층상 구조 방식으로 해석할 경우, 잘못된 물성 평가를 피할 수 없음이 증명되었다. 따라서 댐체와 같은 형상의 지반 구조물에 대한 표면파 조사 결과의 해석은 현재 보편적으로 활용되는 층상 구조 방식 분산 곡선 해석이 아닌 3차원 역산 등의 별도의 해석 방법이 필요한 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

1. 김동수, 윤종구, 이병식, 박형춘(2001), “경사지반에서 SASW기법 적용시 수치해석을 이용한 영향요소 연구”, 한국지반공학회논문집, 제17권 제1호, pp77~84.
2. 민동주, 유해수(2003) 시간영역 변위근사 유한차분법의 자유면 경계조건 : 물리탐사 제6권, pp77-86
3. 송명준, 정연문, 이영남(1999), “토목 공학에서의 SASW 기법의 활용”, 물리탐사, 제2권 제4호 pp.174~179
4. 조미라, 강태호(2003), “터널 원지반의 그라우팅 보강 평가를 위한 SASW 기법의 적용”, 한국지반공학회논문집, 제19권 제6호, pp273~283.
5. Aki, K. and Richards, P. G.(1980), Quantitative Seismology (Theor and Methods), Vol 1, W. H. Freeman & Co., San Francisco.
6. Bullen, K. E.(1963), An Introduction to the theory of seismology, 3rd Ed.; Cambridge Univ. Press, London, 381p.
7. Ewing, W.M., Jardetzkey, W.S., and Press, F.(1957) Elastic waves in layered media, McGraw-Hill Book Co.
8. Lamb, H.(1904), On the propagation tremors over the surface of an elastic solid, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A203, pp1~42.
9. Marwan F.A.(1993), “Evaluation of Flexible Pavements and Subgrades using the Spectral Analysis of Surface Waves(SASW) method”, Dissertation, Doctor of Philosophy, The Univ. of Texa at Austin
10. Min, D.J., Shin, C., and Yoo, H.S.(2004), “Free surface boundary condition in finite-difference elastic wave modeling”, Bulletin of the Seismological Socieity of America, V. 94, pp237~250.
11. Nazarian, S., Stokoe, K. H, II, and Hudson, W. R.(1983), “Use of Spectral analysis of Surface Waves method for determination of moduli and thickness of pavement systems”: Trasport. Res. Record, 930, pp38~45.
12. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J.(1999), “Multi-channel analysis of surface waves”, Geophysics, 64(32), pp800~808