

# 가속도계를 활용한 지하 및 지반구조물 상시 계측 방안에 관한 연구

## Study of Continuous Monitoring for Underground and Geotechnical Structures using Accelerometers

김건웅<sup>1\*</sup>

Gunwoong Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Postdoctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, KICT, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

### ABSTRACT

Geotechnical structures such as dams, tunnels, and slopes require regular inspection and monitoring to ensure stability. Domestically, drones and accelerometers have become common tools for inspecting and monitoring various structures. However, drones have difficulty identifying internal changes in structures and the subsurface, and accelerometers generally serve for seismic design or strain measurement purposes. Therefore, this paper proposes to utilize accelerometers to monitor the internal information of the ground on a real-time or periodic basis. The proposed method utilizes a part of the analysis technique from the SASW test to monitor the stability and state changes of geotechnical structures. Cases where SASW was used to evaluate the safety of geotechnical structures, such as slopes, dams, and tunnels, were reviewed to verify the suitability of the technology. To make the proposed method more practical, the study considered using only the first-step analysis to derive the dispersion curve rather than the second-step analysis to determine the shear wave velocity profile, which requires complex analysis. The proposed technique is expected to enable the continuous monitoring and inspection of geotechnical structures by utilizing accelerometers.

### 요 지

댐과 터널 그리고 사면 같은 지반구조물의 정기적인 계측 및 모니터링은 안전성 유지를 위해 필요하다. 국내에서는 드론과 가속도계와 같은 장비를 활용하여 지반구조물에 대한 점검 및 모니터링을 수행한다. 하지만, 드론은 구조물 및 지반 내부의 변화를 파악에 어려움이 있고, 가속도계는 일반적으로 내진 설계나 변형량 측정에만 활용되고 있다. 이에 본 논문은 가속도계를 활용하여 지반 내부 정보를 실시간 또는 정기적으로 계측하기 위해 SASW 시험 활용을 제안하였다. 제안된 방법은 SASW 시험의 해석 기법의 일부분만 활용하여 지반구조물의 강도 및 상태 변화를 추적한다. 이를 위해, SASW를 활용하여 사면, 댐 및 터널과 같은 지반구조물의 안전성을 평가한 사례들을 분석하여 기술의 적합성을 확인하였다. 또한, 현장 적용성을 높이기 위해, 복잡한 해석을 요구하는 전단 속도 프로파일을 도출하는 2차 해석보다는 분산곡선을 도출하는 1차 해석만을 활용하는 방안을 모색하였다. 본 연구에서 제안된 기술을 통해 가속도계를 활용하여 지반구조물의 지속적인 모니터링 및 유지보수가 가능할 것으로 기대된다.

**Keywords** : Dam monitoring, Tunnel monitoring, SASW, Shear wave velocity, Phase difference, Dispersion curve

## 1. 서 론

댐, 터널, 그리고 사면과 같은 지반구조물의 안정성 확보를 위한 유지관리 계측은 매우 중요하다. 이러한 구조물은 자연력에 의해 지속적인 영향을 받으며, 지반의 변화나 기후 조건의 변화에 따라 안정성이 위협될 수 있다. 정기

Received 5 Apr. 2024, Revised 30 Apr. 2024, Accepted 3 May. 2024

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0553; Fax: +82-31-910-0561

E-mail address: gwkim86@kict.re.kr (G. Kim)

적인 계측은 이러한 구조물의 건전성을 평가하고 보수 시공에 대한 필요성을 확인시켜 준다. 이러한 유지관리 계측은 구조물의 안전성을 보장하고 잠재적인 위험을 예방하는 데 중요하며, 환경 보호와 재해 예방에도 이바지한다. 따라서 지반구조물의 안정성을 유지하기 위한 정기적이고 정확한 계측은 지속 가능한 발전과 안전한 사회를 위해 필요하다.

국내에서도 2021년 이후, 지진이나 홍수 등 자연재해로부터 선제 대응을 갖추며, 실시간으로 안정성을 확보하기 위해 디지털 뉴딜사업인 ‘스마트 댐 안전관리’를 본격적으로 추진하였다(Yoon et al., 2021). 이러한 기술은 드론을 활용하여 접근에 제약이 있는 위치에 대한 균열 감지나, 실시간으로 균열을 모니터링할 수 있는 기술들을 포함한다(Park et al., 2023). 내진 안전성에 대한 중요성이 커짐에 따라 가속도계를 활용하여 내진 안정성을 평가하기 위한 연구 또한 진행되었다(Hwang, 2011). 또한, 사면에도 가속도계나 드론을 활용하여 안전성을 파악하는 기술들이 많이 연구되었다(Lee et al., 2018; Lee et al., 2021). 드론은 접근에 제약이 있는 현장을 광역적으로 계측할 수 있다는 장점을 갖고 있지만, 구조물이나 지반 내부에 발생한 문제 파악에는 한계가 있다. 또한 현존하는 가속도계를 활용하는 방식은 내진 설계나 변형량 측정을 위해 적용되는 것이 일반적이다. 따라서, 본 논문에는 가속도계를 활용하여 지반 내부의 정보를 실시간 또는 정기적으로 모니터링할 방안으로 지반이나 구조물의 동적 물성값을 산정하기 위해 오래전부터 활용된 SASW 시험을 제안한다. SASW 시험 해석의 일부만을 적용함으로 모니터링 활용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Wave) 시험은 표면을 따라 이동하는 레이리형 표면파의 특성을 활용한 비파괴시험이다. 표면에서 수행된다는 장점에 기인해 Cross-hole, Downhole, 그리고 PS-logging 등 직접 관입을 요구하는 지반조사 방식보다 경제적이다. 시험방법은 1980년대에 처음 소개되었으며(Nazarian and Stokoe, 1984; Stokoe and Nazarian, 1985), 주파수 또는 파장에 따른 레일리파의 위상 속도를 분산곡선(dispersion curve)으로 도출하고, 현장에서 도출된 분산곡선을 이론적 분산곡선과 일치시켜 현장을 대표하는 전단 속도( $V_s$ )를 산정하기 위해 수행한다. SASW 시험은 전단파 속도와 전단 계수의 산정을 위해 오랫동안 수많은 현장(Rix et al., 1998; Haegeman and Van, 1999)과 목적을 위해 사용되었다

(Stokoe et al., 1994; Kim et al., 2022). 특히 내진 설계 정수 취득을 위해 많은 현장에서 수행되었으며, 다짐에 대한 검증 가능성도 기존 연구자들에 의해 논의된 바 있다(Kim et al., 2001; Kim, 2023).

본 연구에서는 기존의 SASW 시험을 활용하여 사면, 댐과 같은 지반구조물과 터널과 같은 지하구조물의 안전성을 평가한 사례들을 검토하였다. 검토를 통해 시험에 대한 유효성을 확인한 후 이를 바탕으로 유지방안 관리기법을 제안하였다. 기존의 복잡한 해석을 요구하는 전단 속도 프로파일( $V_s$  profile)을 도출하는 SASW의 2차 해석방법이 아닌 분산곡선을 도출하는 1차 해석만을 활용하여 현장 적용성을 개선하였다.

다음과 같은 순서로 본 논문을 기술하였다. 우선 본 연구의 바탕이 되는 SASW 시험의 이론적 원리와 시험방법을 서술하였다. 그리고, SASW를 활용한 댐과 같은 지반구조물 안정성을 평가한 사례와 터널과 같은 지하구조물의 안전성을 평가한 사례를 검토하였다. 마지막으로, SASW 시험의 1차 해석인 위상차 그래프를 통한 안전성 계측 방안을 제안하였다.

## 2. SASW 시험방법

### 2.1 SASW 현장 시험

SASW 방법은 지반의 표면을 따라 전파되는 레일리파의 분산 특성을 사용하여 각 층에 있는 재료의 전단 속도( $V_s$ ) 값을 산정하는 시험이다(Joh, 1996). Fig. 1은 층으로 구성된 매질에서 레일리파의 분산 특성을 나타낸다(Kim, 2023). 그림은 고주파를 활용하는 단파장 표면파와 저주파를 활용하는 장파장 표면파의 전파를 통해 깊이에 따른 데이터 샘플링 방법을 보여준다. 짧은 파장(단파장)은 표면 근처의 데이터를 샘플링하고, 긴 파장(장파장)은 깊은 수심에서 얇은 수심까지의 데이터 취득한다. SASW 시험에서는 다양한 파장에서 취득된 정보를 결합하여 현장을 대표하는 dispersion curve(분산곡선)을 생성한다. SASW 시험에서는 Fig. 1에 도식된 방법을 통해 데이터를 취득한다. 그림에서와 같이 SASW 시험에는 일반적으로 시험에는 1개의 에너지원과 2~3개의 리시버(가속도계 또는 지오폰)가 활용된다. 에너지 생성 방식은 크게 3가지로 나뉜다: (1) 망치를 활용한 impact 방식, (2) vibroseis와 같은 진동

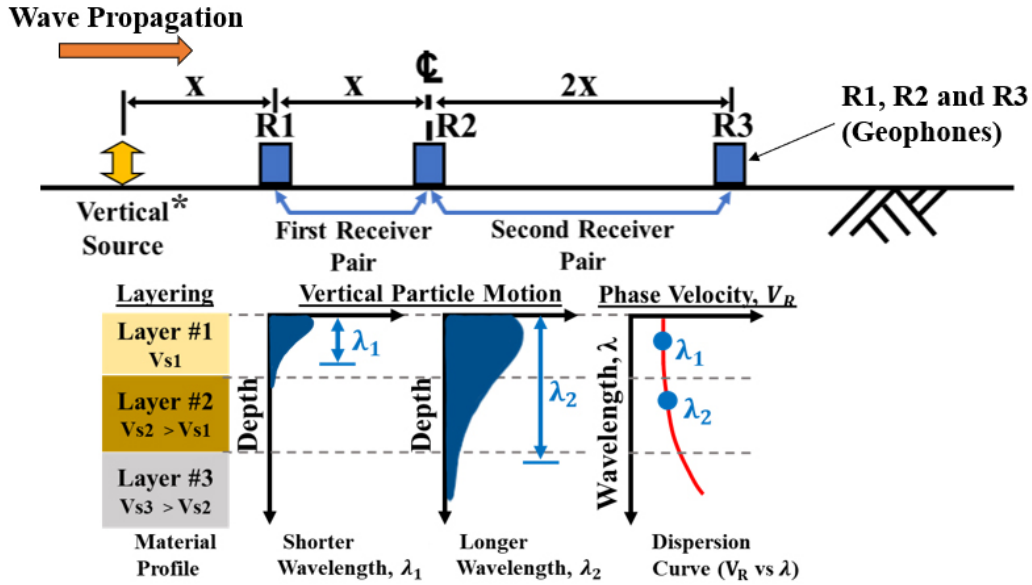


Fig. 1. Generalized SASW testing set-up and schematic of data sampling in a layered system (Kim, 2023)

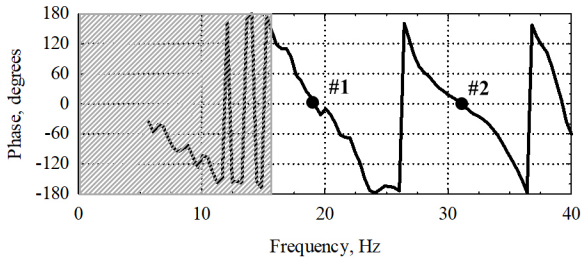


Fig. 2. Phase plot (12m receiver spacing)

발생기를 활용한 방식, (3) 지속된 노이즈를 활용한 자유 수집 방식이다. 3개의 에너지 생성 방식 중 망치의 경우 고주파수를 생성할 수 있으며, 상대적으로 시험의 절차가 간편하다. 두 번째 SASW 에너지원인 진동 발생기는 주파수의 제어가 가능하며 이를 통해 정밀한 지반조사가 가능하다. 또한 망치보다 낮은 주파수의 에너지 생성을 할 수 있어 깊은 심도 지반조사가 가능하다. 마지막 에너지원인 외부 노이즈를 활용한 방식은 일반적으로 차량이나 불도저와 같은 운전 장비의 운영을 통해 생성되는 지속적인 노이즈를 활용한다. 이 방식 또한 망치보다는 상대적으로 저주파수 에너지를 생성하므로, 약 20m 깊이의 지반조사가 가능하게 한다.

설치된 리시버들은 그림과 같이 2개의 그룹을 구성하여 에너지원으로부터 생성된 신호의 위상차 데이터를 취득한다. 일반적으로 리시버 간격과 같은 깊이만큼 지반조사가 가능하다. 가운데 있는 리시버는 고정된 상태로 리시버와 에너지원 사이의 거리를 늘려가며 시험을 시행하고, 이를 반복함으로써, 원하는 깊이의 데이터를 취득할 수 있다.

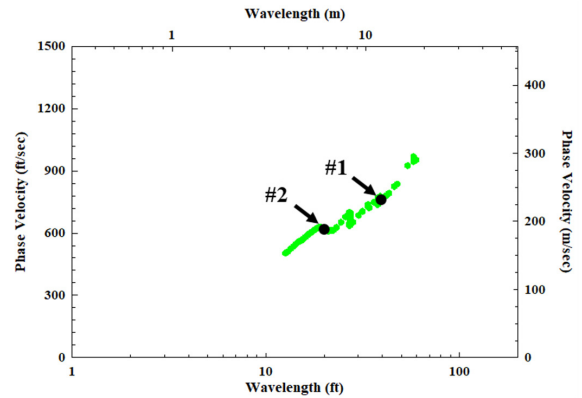


Fig. 3. Individual dispersion curve developed from phase plot shown in Fig. 2.

## 2.2 SASW 데이터 분석

현장에서 수집된 결과를 토대로 SASW 데이터를 분석한다. 분석은 데이터 필터링을 통한 현장 분산곡선의 생성, 분산곡선을 통한 전단 속도 프로파일의 결정이라는 2 단계로 나뉜다. 현장 분산곡선은 개별 분산곡선을 통합하여 생성한다. 개별 분산곡선의 생성을 위해서는 위상차 데이터에서 활용 불가능한 데이터에 필터 적용이 필요하다(Fig. 2). 그림은 12m 리시버 그룹에서 취득한 데이터를 보여준다(Fig. 2). 해당 예시에서는, 15Hz 이하의 데이터에 필터가 적용되었다. 15Hz 이하는 니어필드 구간(0~180도 사이의 위상)에 속하며, 큰 신뢰성을 요구하는 현장에서는 일반적으로 활용하지 않는다. 위상차 데이터에 니어필드 구간에 대한 필터를 적용한 후, 식 (1)을 활용하여 개별 분산곡선을 생성하게 된다(Fig. 3).

$$V_R = f \times \lambda = f \times (360^\circ / \phi) \times d \quad (1)$$

여기서,  $f$  : 주파수(Hz),

$\lambda$  : 파장(m),

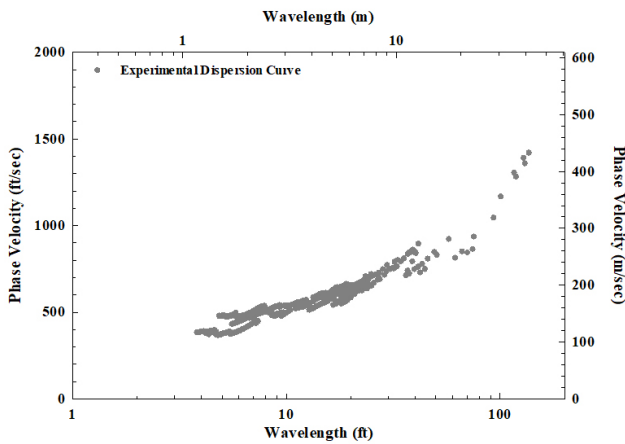
$\phi$  : 위상차(degree), 그리고

$d$  : 리시버 간격(m)

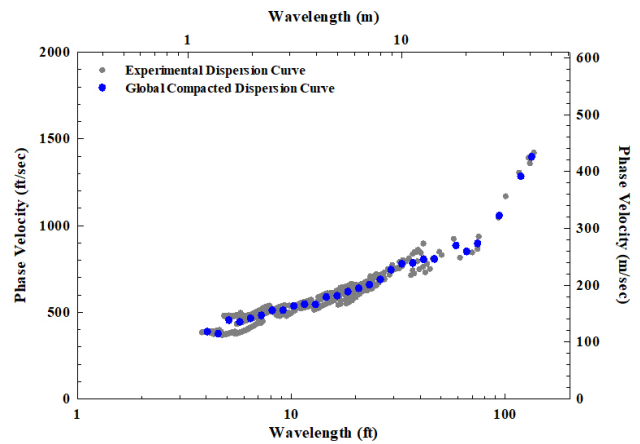
이때, 생성된 개별 분산곡선(Fig. 3)의 #1과 #2는 위상 차 데이터의 (Fig. 2) #1과 #2를 통해 생성된 값이다. 그림과 식 (1)에서 확인할 수 있듯이, 저주파수인 #1이 긴 파장의 데이터를 생성하고, 고주파수의 #2가 짧은 파장의 데이터를 생성한다. 리시버 거리별로 수집된 개별 분산 곡선들을 결합하여 Fig. 4(a)와 같이 현장을 대표하는 현장 분산 곡선(experimental dispersion curve)을 생성한다.

분석의 다음 단계는 현장 분산곡선을 통한 전단 속도

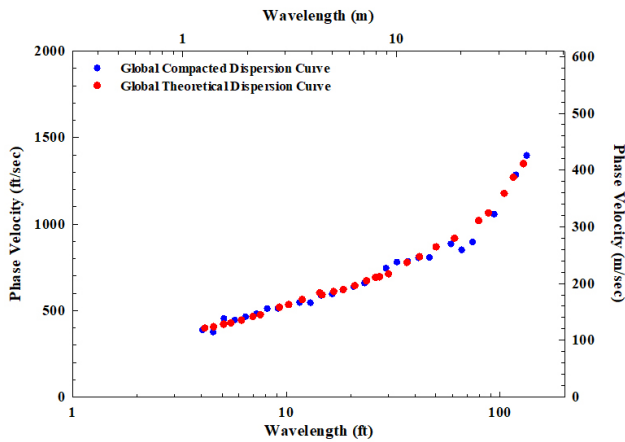
프로파일 결정 단계이다. 각각의 전단 속도 프로파일은 고유한 이론 분산곡선(global theoretical dispersion curve)을 갖는다. 따라서, 현장을 대표하는 이론 분산곡선을 찾으므로써, 현장을 대표하는 전단 속도 프로파일을 도출한다. 현장과 가장 잘 맞는 이론 분산곡선을 찾기 위해 우선 평균 분산 곡선(global compacted dispersion curve)이 생성되어야 한다(Fig. 4(b)). 평균 분산곡선은 현장에서 취득한 분산곡선을 moving average 계산을 통해 도출한다. 도출된 평균 분산곡선과 가장 유사한 분산곡선인 이론 분산곡선을 반복 수행을 통해 찾게 되고, 이 이론 분산곡선의 전단 속도 프로파일이 현장을 대표하는 최종 전단 속도 프로파일 모델로 선정된다(Fig. 4(c) and Fig. 4(d)). 이때 전단 속도 프로파일을 도출하기 위해 사용되는 forward 모델링 기법은 강성 매트릭스(Kausel and Roesset, 1981) 접근 방식을 활용한다.



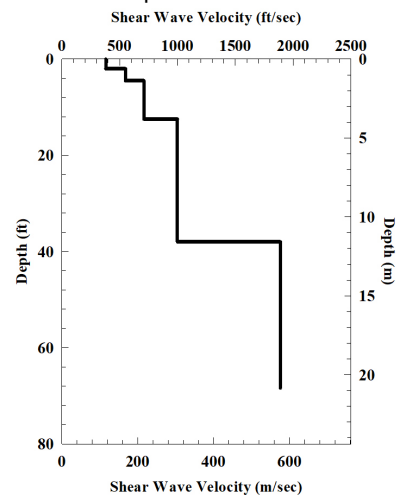
(a) Experimental dispersion curve created from phase measurements



(b) Experimental dispersion and global compacted dispersion curves



(c) Comparison of the global compacted experimental dispersion curve and the global theoretical dispersion curves



(d) Determined shear wave velocity profile from forward modeling process

Fig. 4. Example of the SASW analysis to determine  $V_s$  profile

### 3. SASW 현장 적용 사례

#### 3.1 댐 적용 사례

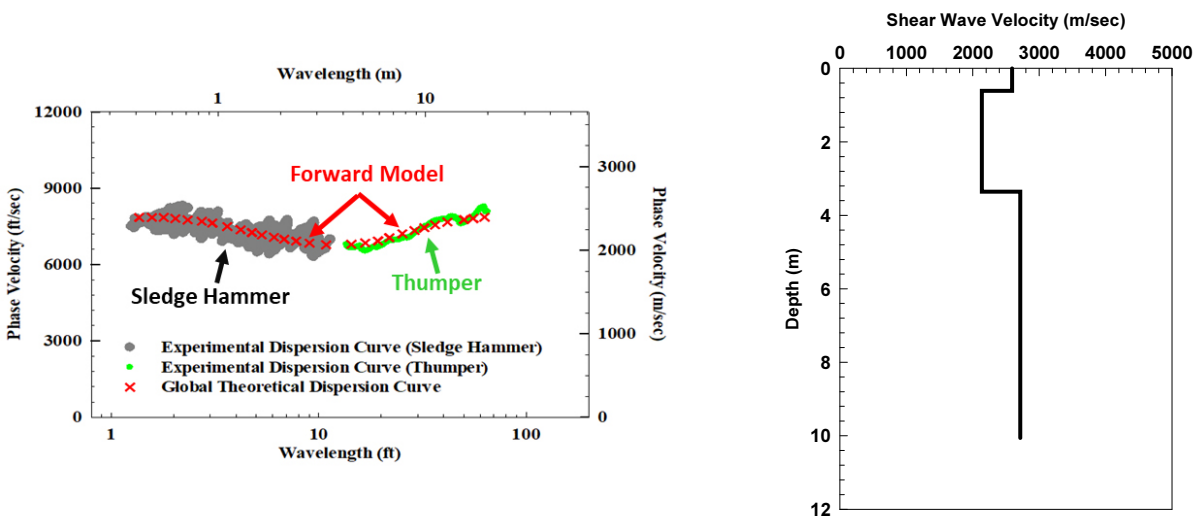
SASW시험은 다양한 현장에서 안정성을 판단하기 위해 활용된다. 첫 번째 사례는 댐에서 SASW 시험을 시행한 사례이다(Stokoe et al., 2019). 해당 시험은 댐 방류 사면의 약 10m 이내에 강도 저하가 발생한 구간이 있는지에 대한 여부를 비파괴방식으로 진단하기 위한 목적으로 수행되었다. 해당 댐의 경우 상부층은 콘크리트로 구성되어 있고 하부층은 암반층으로 이루어져 있다. 시험을 위해 망치와 진동 제어 트럭인 Thumper가 활용되었다. Thumper는 현존하는 다른 진동 제어 트럭에 비해 이동에 제약이 없어 접근하기 어려운 현장 시험에 많이 활용된다(Stokoe et al., 2017a). 망치는 고주파수를 활용하여 짧은 파장의 데이터 취득에 활용되고, Thumper는 저주파수를 활용하여 긴 파장의 데이터 취득에 활용된다(Fig. 5(a)). Fig. 5(b)는 결정된 이론 분산곡선을 통해 결정된 전단 속도 프로파일을 보여준다. 시험 결과를 통해 약 1~3m 구간에서 다른 깊이에 비해 상대적으로 암반의 강도가 떨어지는 구간이 발견되었고, 실제로 해당 구간에 크고 작은 간극이 형성된 것으로 드러났다. 해당 깊이의 평균적인 암반층의 강도가 높아 전단 속도 값에서 나타나듯이 강도에는 문제가 되지 않았으나 발견된 간극에 대하여 보수를 진행하였다. 본 사례를 통해 SASW 시험을 통해 강도가 저하된 구간을 확인할 역량이 있음이 증명되었다. 또한, 분산곡선에서도 간극을 유추할 수 있는 근거를 확인할 수 있었다. 해당 분

산곡선의 경우 파장 3~4m 길이에 데이터의 누락이 발생하였다. 이는 해당 깊이(1.5~2m)에서 파의 통과가 어려워 발생했을 가능성이 크다. 따라서, 분산곡선과 전단 속도 프로파일을 복합적으로 해석한다면 댐의 보수 지역을 충분히 검출할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.2 터널 적용 사례

다음 사례는 암반에 콘크리트 라이닝을 한 터널에 관한 검토 사례를 보여준다(Stokoe et al., 2017b). 터널의 직경은 약 3.5m이며, 30cm 두께의 콘크리트를 활용하여 라이닝 되었다. 100개 이상의 위치에서 SASW 시험을 시행하였다. 시험에는 깊은 심도에 대한 평가가 필요하지 않아 작은 해머와 가속도계만 활용하였다. 해당 사례의 목적은 다음과 같다: (1) 콘크리트 라이너 두께와 품질, (2) 크라운 영역의 그라우트 두께와 품질, (3) 터널 벽면의 간극 식별, (4) 라이너 뒤 암석의 강성 및 다양성 판단. 다음 그림은 해당 터널에서 도출된 결과 예시를 보여준다(Fig. 6).

결과물의 예시로 1.2m 간격으로 배치된 한 쌍의 가속도계를 통해 측정된 위상차 그래프를 보여준다(Fig. 6(a)). 연속적인 톱니형 모양의 위상차 그래프에서 볼 수 있듯이 전반적으로 일정한 패턴을 보여 깊이에 무관하게 균질한 암반으로 구성되었다. 이러한 데이터는 테스트 중에 실시간으로 확인되므로 테스트가 잘 수행되고 있는지에 대한 여부와 테스트 절차에 대한 조정 필요 정보를 제공한다. 또한 해당 그래프를 통해 깊이에 따른 개략적인 전단 속도를 유추할 수 있어서 실용적이다. Fig. 6(b)와 (c)는 수집된



(a) Experimental dispersion curve with a theoretical dispersion curve (b) Determined Vs profile using a forward modeling process

Fig. 5. Vs profile determined from dam spillway

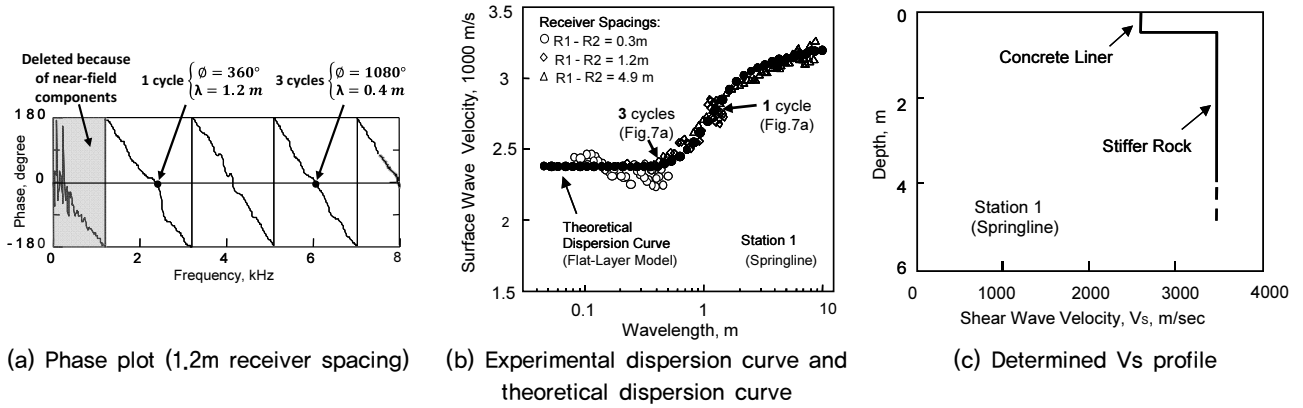


Fig. 6. Vs profile determined from tunnel site

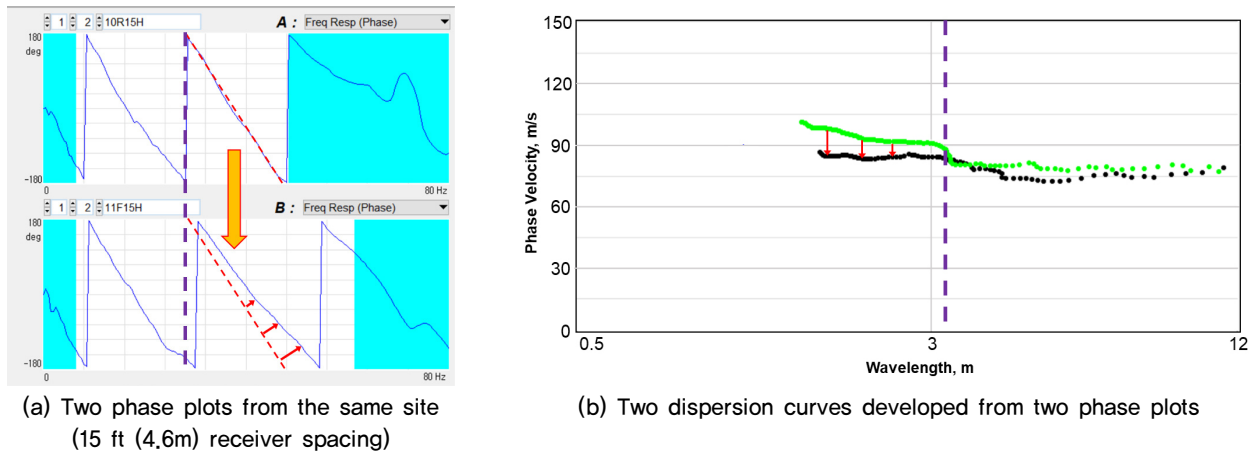


Fig. 7. Differences in dispersion curve based on phase plot slope differences

데이터들은 생성된 분산곡선과 전단 속도 프로파일 예시를 보여준다. 시험에서는 0.3m, 1.2m, 그리고 4.9m 세 개의 리시버 그룹이 활용되었고, 결과에서 확인할 수 있듯이 약 30cm 수준의 라이너와 균질한 암석층이 잘 자리잡혀 있었다. 해당 시험에서 활용된 가장 긴 리시버 간의 거리가 4.9m이므로, 해당 길이와 유사한 깊이인 5m까지 강성도 조사가 수행되었다. 콘크리트 라이너의 경우 약 2,500m/s의 전단파 속도를 보였고, 내부 암반층은 약 3,500m/s의 전단파 속도를 나타내어 두 층 모두 매우 높은 강성을 보였다.

#### 4. 가속도계 활용 방안

##### 4.1 위상차 계측을 통한 안정성 확인

댐이나 터널과 같은 지반구조물에서 SASW 방식을 활용한 강도 및 안정성 검증을 한 사례를 소개하였다. 소개된 사례와 같이, SASW 시험 구성을 통해 효율적인 검사

가 가능하다. 하지만, 이 방식은 2단계에 걸친 해석을 요구하기 때문에 실시간 계측에 활용되기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 SASW 해석 방식의 1단계인 위상차 그래프를 활용한 방식을 제안한다. 위상차 그래프를 통해 분산곡선의 도출이 어렵지 않고, 분산곡선은 깊이에 따른 속도 정보를 제공하기 때문에, 이 정보만 활용해도 충분히 강도 저하에 대한 평가가 가능하다. 본격적인 제안에 앞서 활용 원리를 설명하고자 두 개의 예시를 준비하였다.

첫 번째 예시는 같은 점토층으로 구성된 시험 현장에서 시행한 같은 가속도계 그룹에서 취득된 위상차 그래프와 분산곡선의 비교를 보여준다(Fig. 7). Fig. 7(a)는 가속도계 사이의 거리 4.6m에서 취득된 두 개의 위상차 데이터 결과이다. 파란색으로 색칠된 영역은 필터를 적용한 영역을 의미하며, 필터가 적용된 부분을 제외한 후 식 (1)을 통해 Fig. 7(b)의 분산곡선을 생성한다. Fig. 7(a) 상단부의 위상차 데이터를 통해 Fig. 7(b)의 녹색 분산곡선이 생성되었고, Fig. 7(a) 하단부 위상차 데이터를 통해 Fig. 7(b)의 검은색 분산곡선이 생성되었다. 분산곡선을 살펴본 결과 약

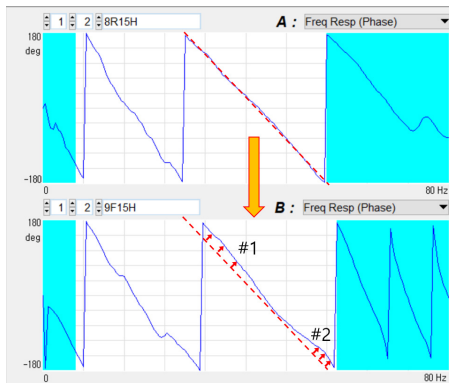
1.2~12m 파장 구간 사이에 약 75~100m/s의 전반적으로 일정한 위상차 속도를 갖는 연약한 지반으로 구성된 현장으로 판별되었다. 분산곡선에서 파장은 깊이의 2배이기 때문에, 해당 분산곡선을 통해 약 0.6~6m 깊이까지의 정보를 얻을 수 있다. 또한, 위상 속도에 약 1.1배를 적용하면 전단 속도와 유사한 값을 도출하므로, 약 83~110m/s 전단 속도를 갖는다.

데이터의 차이가 발생하는 부분을 쉽게 분류하기 위해 보라색 점선으로 영역을 구분하였다. Fig. 7(a)의 보라색 선을 기준으로 좌측 데이터(저주파수 영역)를 통해 Fig. 7(b)의 우측 데이터(긴 파장)가 생성된다. 이와 반대로 Fig. 7(a)의 보라색 선을 기준으로 우측 데이터(고주파수 영역)를 통해 Fig. 7(b)의 좌측 데이터(짧은 파장)가 생성된다. 데이터에서 확인할 수 있듯이 저주파수 영역에서는 두 그래프가 매우 유사한 형태를 보이지만, 고주파수 영역에서는 차이가 발생한다. 이러한 위상차 데이터의 차이로 인해 분산곡선에도 차이가 발생한다. 설명을 돕기 위해 위상차 상단부 데이터의 기울기(빨간색 점선)를 하단부에 그려 위상차 기울기와 비교하였다. 기울기가 급할수록 앞에서 언급된 식 (1)으로 인해 분산곡선에서 높은 위상 속도 값을 도출하는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로, 기울기의 차이가 점점 더 벌어짐에 따라 위상 속도 차이 또한 커졌다.

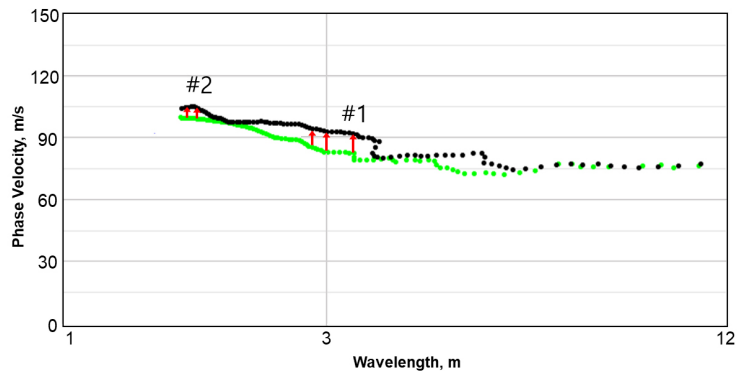
두 번째 예시 또한 같은 현장에서 수행한 가속도계 그룹에서 취득된 위상차 그래프와 분산곡선의 비교를 보여준다(Fig. 8). Fig. 8(a)는 4.6m 거리를 갖는 가속도계를 활용해 취득된 두 개의 위상차 데이터 결과이다. 마찬가지로 파란색으로 색칠된 영역은 필터가 적용된 영역을 의미하며, 필터가 적용된 부분을 제외하여 Fig. 8(b)의 분산곡선

을 생성한다. Fig. 8(a) 상단부의 위상차 데이터를 통해 Fig. 8(b)의 녹색 분산곡선을 생성하였고, Fig. 8(a) 하단부 위상차 데이터를 통해 Fig. 8(b)의 검은색 분산곡선을 생성하였다. 해당 분산곡선을 살펴본 결과 약 1.2~12m 파장 구간 사이에 약 75~115m/s 값을 나타냈다. 지표면을 제외하고 전반적으로 일정한 위상차 속도를 갖는 전반적으로 연약한 지반으로 구성된 현장으로 확인되었다. 해당 분산곡선을 통해 약 0.6~6m 깊이까지 정보를 취득하였고, 약 83~127m/s 전단 속도를 갖는다. 자세한 설명을 위해 앞선 예시와 마찬가지로 위상차 상단부 데이터의 기울기를 하단부 위상차 기울기와 비교하였다. 비교를 통해, 기울기에 굴곡이 생기면 식 (1)으로 인해, 분산곡선에도 상대적인 속도 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 예를 들어 Fig 8(a)의 하단부에 #1, #2 부분에 상단 방향으로 굴곡이 발생함으로써, 분산곡선 #1, #2 부분의 위상 속도 또한 굴곡을 생성하면서 증가하는 경향을 보였다.

두 가지 예시에서 확인된 위상차 그래프의 형태를 통해 위상차 데이터를 통해 위상차 속도에 어떠한 변화가 발생하는지 시각적으로 확인하였다. 결론적으로 강도의 저하가 발생하면, 위상차 데이터에서 하단부로 굴곡이 형성되거나, 기울기가 작아져 위상차 그래프의 톱날 패턴이 넓어지는 현상을 보일 것으로 예상된다. 따라서, 가속도계와 에너지를 생성할 작은 망치와 같은 에너지원을 댐이나 터널에 설치하고 정기적으로 실험하여 문제가 되는 변화가 예측된다면 해당 영역에 정밀검사를 통해 보수 필요 여부를 충분히 판단할 수 있다. 이때, 정밀검사 또한, 수집된 위상차 데이터를 활용해 SASW 2단계 분석을 수행하면 되므로, 현장에 투입되어 추가적인 시험을 시행하지 않아도 정밀 분석이 가능하다.



(a) Two phase plots from the same site (15 ft (4.6m) receiver spacing)



(b) Two dispersion curves developed from two phase plots

Fig. 8. Differences in dispersion curve based on phase plot shape differences

본 예시에서는 유사한 위치에서 문제가 발생하지 않는 현장의 데이터를 활용한 결과이므로 큰 차이를 보이지 않았지만, 간극이 발생하거나 균열이 생긴다면 앞서 적용 사례들과 같이 위상차 데이터에 큰 변화가 발생하여 효율적으로 판단할 수 있을 것이다.

## 5. 결론

댐, 사면, 그리고 터널과 같은 지반구조물의 유지관리를 위해 점검 및 계측은 매우 중요하다. 정기적인 계측은 이러한 구조물의 안전성을 평가하고 보수 및 시공을 위한 정보를 제공한다. 현재 실시간 계측을 위해 드론이나 가속도계를 활용한 전반적인 평가가 이루어지고 있으나, 구조물이나 지반 내부에서 생긴 문제를 파악하기는 어렵다. 따라서, 본 논문에는 가속도계를 활용하여 지반 내부의 정보를 실시간 또는 정기적으로 계측하기 위해 SASW 시험을 활용할 것을 제안하였다. 본 연구에서 다룬 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 가속도계를 활용한 계측을 위해 기존에 널리 활용되는 지반조사 방식인 SASW 시험의 해석방법 일부분을 활용할 것을 제안하였다. 제안에 앞서 SASW를 통해 터널이나 댐 같은 지반구조물에 적용 가능성을 알기 위해 선행 사례를 검토하였다. 검토 결과 효율적인 평가가 가능한 것으로 드러났다. 특히, 댐 현장의 경우 실제로 간극을 발견해 그 정확도를 입증하였고, 터널의 경우 라이너와 암반층의 경계와 강도를 높은 정확도로 구분하였다.
- (2) SASW 시험의 해석은 두 단계로 나뉜다. 첫 번째 단계는 2개의 가속도계의 위상차 데이터를 통해 분산곡선을 도출하는 과정이고, 두 번째 단계는 도출된 분산곡선을 활용해 현장을 대표하는 전단 속도 프로파일을 결정하는 과정이다. 두 번째 단계에 비해 첫 번째 단계는 해석이 간단하고 그래프의 변화를 추적하는 것만으로도 지반 및 구조물의 변동을 파악할 수 있으므로 활용성이 높다.
- (3) 위상차 그래프에서 두 가지에 대한 변화를 추적함으로써 강도 저하 또는 간극 발생 여부를 판단할 수 있다. 첫 번째 변화는 위상차 그래프의 기울기가 낮아져 톱니 모양의 패턴이 넓어지는 경우이다. 이 경우 넓어지는 정도와 가속도계 사이의 간격에 따라 값의 변화

를 계산할 수 있고 이에 따른 보수 여부를 판단할 수 있다. 두 번째 변화는 위상차 그래프 기울기에서 아래로 향하는 큰 굴곡이 발생하는 경우이다. 이 경우, 분산곡선으로 변환하거나 정밀 조사를 전단 속도 프로파일 도출을 통해 간극 발생 여부를 판단할 수 있다.

본 연구를 통해 기존 SASW 시험을 해석 1차 방법을 활용한 지반 지하구조물 안전성 모니터링 방안을 제안하였다. 추가 연구를 통해 현장이나 리시버 간격에 따른 위상차 변화 기준이 확립된다면 현장 적용성이 늘어날 것으로 판단된다.

## References

1. Haegeman, W. and Van Impe, W. F. (1999), "Characterization of Disposal Sites from Surface Wave Measurements", *Journal of Environmental Engineering and Geophysics*, Vol.4, No.27.
2. Hwang, S. C. (2011), "Evaluation of the Application and Analysis Method at Seismic Design of Dam", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*.
3. Joh, S. H. (1996), *Advances in the data interpretation technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) measurements*, Doctoral dissertation, The University of Texas at Austin.
4. Kausel, E. and Roesset, J. M. (1981), "Stiffness matrices for layered soils", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.71, pp.1743-1761.
5. Kim, D. S., Shin, M. K. and Park, H. C. (2001), "Evaluation of density in layer compaction using SASW method", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.21, pp.39-46.
6. Kim, G. (2023), "Evaluation of Ground Compaction Using SASW Testing", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.22, No.4, pp.9-15.
7. Kim, G., Hwang, S. and Stokoe, II K. H. (2022), "Evaluation of the Lateral Variability in the Vs Profiles at Geotechnical Sites using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Method", *12th National Conference on Earthquake Engineering*, No.10181.
8. Lee, H. C., Kwon, K., Moon, C. and Jo, Y. (2018), "Survey Equipment Development of Stability Evaluation for Rock Slope using Drone", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.22, No.4, pp.91-99.
9. Lee, Y., Kim, H. S., Ju, Y. T., Kim, D., Park, H. J. and Park, D. (2021), "Dynamic Factor of Safety Calculation of Slope by Nonlinear Response History Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.9, pp.5-12.
10. Nazarian, S. and Stokoe, K. H. (1984), "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves", *8th World*



*Conference on Earthquake Engineering*, Vol.3, pp.31-38.

11. Park, D., Yu, J. I. and You, H. (2023), "A Research on Applicability of Drone Photogrammetry for Dam Safety Inspection", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.27, No.5, pp.30-39.
12. Rix, G. J., Lai, C. G., Foti, S. and Zywicki, D. (1998), "Surface Wave Tests in Landfills and Embankments", *ASCE Geotechnical Special Publication*, Vol.75.
13. Stokoe, K. H. and Nazarian, S. (1985), *Measurement and use of shear wave velocity for evaluating dynamic soil properties*, In R. D. Woods (Ed.), *Use of Rayleigh waves in liquefaction Studies* (pp. 187-196). ASCE.
14. Stokoe, K. H., Cox, B., Clayton, P. and Menq, F. (2017a), "NHERI@UTEXAS Experimental Facility: Large-scale Mobile Shakers for Natural-hazards Field Studies", *16th World Conference on Earthquake Engineering*, No.2387.
15. Stokoe, K. H., Hwang, S. and Joh, S. H. (2017b), "Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) testing to evaluate Vs profiles at geotechnical and geological sites", *16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago*, No.4948.
16. Stokoe, K. H., Hwang, S., Cox, B. R., Menq, F. Y., Roberts, J. N. and Park, K. (2019), "Field studies of the natural and built environments using large mobile shakers", *Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.1-10.
17. Stokoe, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A. and Roesset, J. M. (1994), *Characterization of Geotechnical Sites by the SASW Method*, In R. D. Woods (Ed.), *Geophysical Characterization of Sites*. Oxford Publishers.
18. Yoon, G. H., Kim, S. K., Kang, Y. H. and Kang, M. J. (2021), "A study on the establishment of a smart dam safety management system", *Korean Society of Civil Engineers Annual Conference, KSCE 2021 CONVENTION*.