

# 지반 및 구조물의 이차원적 전단강성 평가를 위한 토모그래픽 SASW 기법의 개발

Development of Tomographic SASW Method to Evaluate  
Two-Dimensional Variability of Shear Stiffness

조 성 호\*  
Joh, Sung-Ho

---

## Abstract

The SASW (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) method, which evaluates the stiffness structure of the subsurface and structures nonintrusively and nondestructively, has been successfully used in the civil engineering applications. However, the SASW method assumes that the subsurface or structures consist of horizontal multi-layers, so that the method has some difficulty in continuously evaluating the integrity of a tunnel lining and a pavement system. This difficulty prevents the SASW method from being used to generate a tomographic image of stiffness for the subsurface or structures.

Recently, the GPR technique which has the advantage of continuously evaluating integrity of the subsurface and structures has been popular. This advantage of GPR technique initiated the efforts to make the SASW method, which is superior to GPR and other nondestructive testing methods due to its capability of evaluating stiffness and modulus, be able to do continuous evaluation of stiffness structure, and the efforts finally lead to the development of "Tomographic SASW Technique." Tomographic SASW technique is a variation of the SASW method, and can generate a tomographic image of stiffness structure along the measurement line.

The tomographic SASW technique was applied to the investigation of lateral variability of a sand box placed by the raining method for the purpose of verifying its effectiveness. Tomographic SASW measurements on the sand box revealed that the investigated sand box has different shear stiffness along the measurement line, which gave a clue of how to make a better raining device.

## 요 지

비파괴적, 비관입적으로 지반 및 구조물의 전단강성 구조를 파악할 수 있는 SASW 기법은 여러 토목분야에서 성공적으로 적용이 되어왔다. 그러나, SASW 기법은 그 기법상의 제약으로 인해 실험이

---

\* 정희원, 중앙대학교 건설대학 지구환경시스템 공학부 조교수

행해지는 축선의 하부구조가 수평으로 균질하다고 하는 가정을 하여야만 한다. 이러한 수평 다층 구조의 가정은 포장 구조체, 터널 라이닝 등의 토목 구조물의 건전도 검사의 경우에 있어서 반드시 합리적이라고 할 수는 없다. 즉, 지반조사 축선 방향으로의 변이성 평가를 높은 해상도로 수행하여야 할 경우에 기존의 SASW 실험으로 만족스러운 결과를 얻는 것은 용이하지 않다.

최근에는 지반 및 구조물의 건전도 상태를 연속적으로 평가하는 GPR과 같은 비파괴 검사의 중요성이 부각되고 있는 실정하기에, 본 연구에서는 기존의 SASW 실험을 보완하여 지반 조사 축선 방향으로의 전단강성의 연속적 평가가 가능한 토모그래픽 SASW 기법을 새로이 개발하였다. 이러한 토모그래픽 SASW 기법의 개발로 조사대상 매질의 전단강성의 변화에 관한 거리-깊이의 2차원적 컨투어(contour) 도표(토모그래피)의 표현이 가능하게 되어 SASW 기법의 적용성이 토건구조물의 건전도 평가 영역에서 확대되게 되었다.

본 연구에서는 새로이 제안된 토모그래픽 SASW 기법의 타당성을 평가하기 위하여 강사법으로 형성한 모래지반의 횡방향 및 깊이 방향으로의 균질성을 조사하였다. 토모그래픽 SASW 실험으로 모래지반의 전단강성의 변화정도를 용이하게 파악할 수 있었으며, 전단강성의 길이-깊이 방향에 대한 컨투어 도표는 강사법에 사용한 강사기의 문제점을 파악하는데 도움이 되었다. 이러한 모래 지반에서의 전단강성의 평가 실험으로 본 연구에서 제안한 토모그래픽 SASW 실험의 타당성 및 적용성을 확인할 수 있었다.

**Keywords:** SASW Method, Tomography, Dispersion Curve, Lateral Variability, Stiffness Profile

## 1. 서 론

SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves, 주파수 영역 표면파 해석) 기법은 여러 지반공학적인 환경에서 깊이별 전단 강성도(shear stiffness)의 변화를 비파괴적으로 평가하기 위하여 성공적으로 적용이 되어 왔다. SASW 기법은 아스팔트나 콘크리트 포장 구조체의 공학적 특성을 조사하기 위하여 1982년 Stokoe(Heisey et. al, 1982)등에 의해 개발되었으며, 그 이후 여러 분야에 응용 발전되었다. SASW 기법의 응용 사례로는 토목공사의 품질관리, 포장 구조체의 유지관리, 폐기물 매립지의 강성 주상도(stiffness profile) 조사, 지진 및 인위적인 진동의 영향을 받은 지반의 피해정도 조사, 구조물의 안전 진단 및 강성 평가 등이 있다.

비파괴적, 비관입적으로 지반 및 구조물의 전단강성 구조를 파악할 수 있는 SASW 기법은 그 기법상의 제약으로 인해 실험이 행해지는

축선의 하부구조는 수평으로 균질하다고 가정을 하고 있다. 이러한 가정은 상부 구조물의 설계를 위한 지반 조사, 특정 지역의 동역학적 특성평가를 위한 지반 조사 등과 같은 경우에 있어서는 합리적이지만, 포장 구조체, 터널의 라이닝 등 일반 토목 구조물의 건전도 검사와 같은 경우에 있어서도 이러한 수평 다층구조의 가정이 반드시 합리적이라고 할 수는 없다.

최근, 토목 구조물의 건전도 검사 영역에 가능성을 제시한 방법으로서 GPR (Ground Penetrating Radar)이 있다. GPR은 전자장파를 이용하여 비파괴적, 비관입적으로 지반 및 구조물의 내부 구조를 시각화할 수 있는 방법으로서 내부 물질의 전자장파에 대한 예민한 정도를 2차원적으로 도시한다. 따라서, 전자장파에 대한 예민도에 있어서 차이가 큰 물질로 구성이 된 지반이나 구조물의 경우 GPR은 매우 지반구조를 성공적으로 시각화할 수 있지만, 타 지반구성물질에 비해 유전율이 상대적으로 큰

물(즉, 지하수)이 있는 경우, GPR의 결과는 다소 왜곡될 수 있다. 또한, GPR이 성공적으로 사용이 될 수 있는 경우라 하더라도 GPR로서는 기초 및 구조물의 설계, 구조물의 침하 예측 등에 필요한 공학적인 물성을 구할 수 없다는 것은 GPR의 가장 큰 단점이라고 할 수 있다.

SASW 기법은 탄성과 중 물에 영향을 받지 않는 Rayleigh파를 주로 측정하기 때문에, GPR이 가지고 있는 지하수에 의한 문제점이 없다. 또한, SASW 실험의 결과는 S-파 속도로 정리되는데, 이는 허용가능한 오차 범위내에서 전단탄성계수(G)나 영 탄성계수(E) 등의 물성으로 전환 가능하기 때문에, 공학적인 면에서 SASW 기법의 유용성은 GPR보다 뛰어나다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 장점을 지니고 있지만 일차원적인 조사기법이라는 단점을 가지고 있는 SASW 기법을 발전시켜 GPR의 경우와 같이 2차원적으로 조사를 할 수 있도록 하는 토모그래픽 SASW 기법을 개발하였다. 기본적으로 토모그래픽 SASW 기법은 지반조사 축선에 대해 직각 방향으로 지반조사 축선을 따라서 SASW 실험을 일정간격을 두고 여러번 행하는 것인데, 이러한 일련의 SASW 실험으로부터 구한 S-파 속도 주상도를 이용하면 지반강성도에 대해 거리-깊이 방향의 2차원적인 도시가 가능하다.

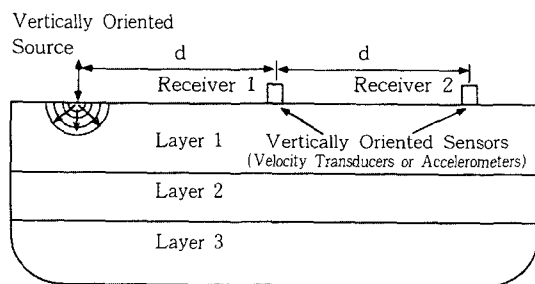
본 논문에서는 새로이 개발된 토모그래픽 SASW 기법의 실험구성, 자료분석 및 해석방법에 관하여 자세히 서술하고, 토모그래픽 SASW 기법의 적용 사례로서 강사법에 의해 지반을 형성한 모래 지반의 횡방향 및 깊이 방향으로의 균질성을 평가한 예를 소개하고자 한다.

## 2. SASW 기법

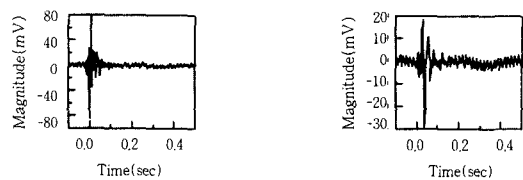
표면파는 지반이나 구조물에 대하여 전단강성의 깊이별 변화를 비파괴적으로 추정하는 원위치 실험이다. SASW 기법의 응용분야는 자연 지반, 다짐 지반, 해저 지반, 고품 폐기물 매

립지반 등 여러 가지 지반공학적 부지 (Stokoe et al, 1988; Kavazanjian et al. 1996; Luke, 1994)와 콘크리트 구조물, 고속도로 및 활주로의 포장 구조체 (Kalinski et al. 1995; Nazarian and Stokoe, 1989)등을 포함하는 상당히 광범위한 영역에 분포되어 있다.

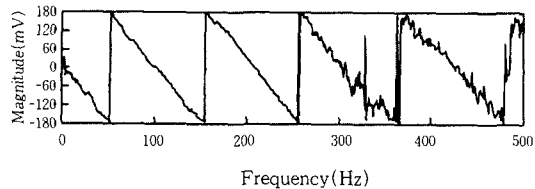
SASW 실험은 한 지점에서 충격 또는 진동을 가하고, 일정 거리만큼 떨어진 위치에서 충격이 난 진동으로 인한 지반 및 구조물의 진동을 측정함으로써 수행이 되는데, 충격이나 진동을 측정하는 감진기는 발진원과 동일선상에 위치하도록 설치하게 된다. 그림 1.a에 기본적인 SASW 실험 방법이 도시되어 있다.



a. Field Arrangement of Source and Receivers



b. Time Records of Vertical Motion at Two Receivers



C. Wrapped Phase Spectrum Determined from Stress Waves Propagating between Receivers

그림 1. 기본적인 SASW 실험장비 구성과 주파수 영역 해석에 대한 이해

SASW 실험은 기본적으로 두 개 이상의 위치에서 기록된 응력과 진동 간의 위상각 차이를 측정하는 것으로 현장에서 측정된 위상각 차이는 일련의 파장에 대해서 응력파의 위상속도를 결정하는데 사용된다. 일정 주파수에 대한 두 감지기 사이의 위상각 차이는 크로스파우어 스펙트럼(cross power spectrum)이나 전달함수(transfer function)에 의해서 계산할 수 있는데, 크로스파우어 스펙트럼과 전달함수는 각각 식 (1)과 (2)에 의해서 구할 수 있다.

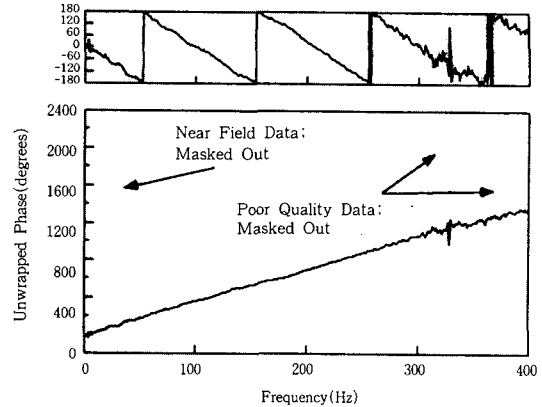
$$G_{21}(f) = S_2(f) \cdot S_1^*(f) \quad (1)$$

$$H_{21}(f) = \frac{S_2(f)}{S_1(f)} \quad (2)$$

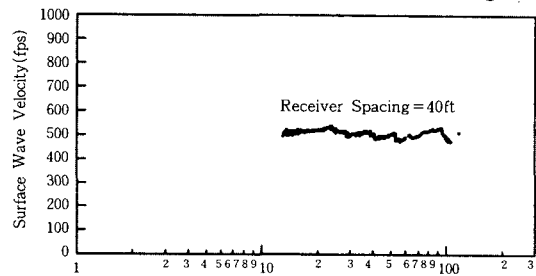
여기서,  $S_1(f)$  과  $S_2(f)$  는 각각 감지기 1과 2에서 측정된 시간이력곡선의 푸리에 변환이고,  $S_1^*(f)$  는  $S_1(f)$  의 공액복소수를 의미한다. 실제로 현장에서 측정된 시간이력곡선의 일례를 들어보면 그림 1.b과 같다. 그림 1.b에는 두 개의 감지기에서 측정된 한 쌍의 시간이력곡선이 도시되어 있는데, 이로부터 구한 크로스파우어 스펙트럼이나 전달함수의 위상각 스펙트럼은 그림 1.c에서 보인 바와 같다. 즉, 두 감지기 사이의 위상각 차이는 바로 그림 1.c의 위상각 스펙트럼이라고 할 수 있다. 그림 1.c의 위상각 스펙트럼은 특별히 비전개 위상각 스펙트럼(unwrapped phase spectrum)이라고 불리우는데 이는 스펙트럼 내에 존재하는 점프 때문이다. 이러한 점프는 파의  $360^\circ$  회전 또는 한 주기에 해당하는 회전을 의미하는데, 이러한 점프를 적절하게 계수함으로써 위상각 스펙트럼을 전개할 수 있다. 전개 위상각 스펙트럼의 대표적인 개형은 그림 2.a에 보인 바와 같다.

비전개 위상각 스펙트럼의 전개는 점프의 계수이외에 마스킹(masking)이라는 위상각 스펙트럼의 분석과정을 필요로 하는데, 마스킹 과정에서 주로 처리하는 것은 그림 2.a에 표시된 것처럼 근거리장 효과(near-field effect)의 고려와

불량 데이터에 대한 제거 등이다. 그림 2.a에서 얇은 회색으로 표시된 부분이 바로 마스킹 처리된 부분이다.



a. Unwrapped Phase Spectrum Derived from Fig. 1c



b. Phase Velocity Dispersion Curve Derived from Fig. 2a

그림 2. 전개 위상각 스펙트럼과 실험 분산곡선

위상속도( $V_{ph}$ )는 전개 위상각( $\phi$ ), 주파수( $f$ ), 감지기간 거리( $d$ ) 등을 이용하여 식 (3)에 의해서 계산할 수 있으며, 그림 2.a에 대한 파장-위상속도의 관계 곡선은 그림 2.b에 제시된 바와 같다.

$$v_{ph} = f \cdot \left( \frac{d}{360^\circ / \phi} \right) \quad (3)$$

일반적으로 그림 1의 SASW 실험은 넓은 범위의 파장에 대해서 위상속도를 결정하기 위해서 감지기간 거리를 여러번 변화시켜 가면서 반복 수행된다. 위상속도는 짧은 파장에서부터 긴 파장에 이르기까지 결정되어야 하는데, 이는 짧은 파장은 심도가 얇은 지반의 물성을 긴

파장은 심도가 깊은 지반의 물성을 도출하는데 필요하기 때문이다.

이렇게 여러 가지의 감지기간 거리를 이용하여 SASW 실험을 수행하여 결정된 실험분산곡선의 집합을 복합실험분산곡선(composite experimental dispersion curve)이라고 하며, 그림 3에 도시되어 있는 바와 같다. 그림 3의 복합실험분산곡선은 영종도의 신공항 활주로 부지에서 다짐 공사전에 결정된 것인데, 0.5, 2, 4, 8, 16, 30, 50, 70 m의 감지기간 거리를 이용한 것이다.

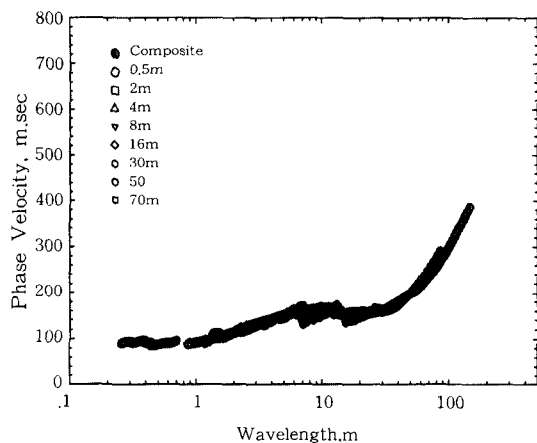


그림 3. 영종도 신공항 활주로 부지에서 SASW 실험에 의해 결정된 복합 실험분산곡선

이러한 일련의 SASW 실험에 의해서 실험분산곡선이 결정되어지면, SASW 실험의 최종 목적인 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있다. 실험분산곡선으로부터 전단파 속도 주상도의 결정은 역산해석이나 반복적 정모델링 해석에 의해서 가능하다. 이는 근본적으로 전단파 속도 주상도를 가정하고 그에 대한 분산곡선을 이론적으로 계산하여 (이론분산곡선이라고 함) 실험분산곡선과 이론분산곡선이 일치될 때 까지 반복적으로 가정한 전단파 속도 주상도를 변화시켜 나가는 것이다. 이러한 전단파 속도 주상도의 가정에 대한 수정이 최적화 이론에 의해서 수행이 되면 이를 역산해석(inversion

analysis)이라고 하고, 인위적으로 인간의 판단에 의해서 수정이 되면 반복적 정모델링해석(iterative forward modeling analysis)이라고 한다. 참고로, 그림 3에 제시된 실험분산곡선에 대한 역산해석의 결과인 전단파 속도 주상도는 그림 4에 보인 바와 같다.

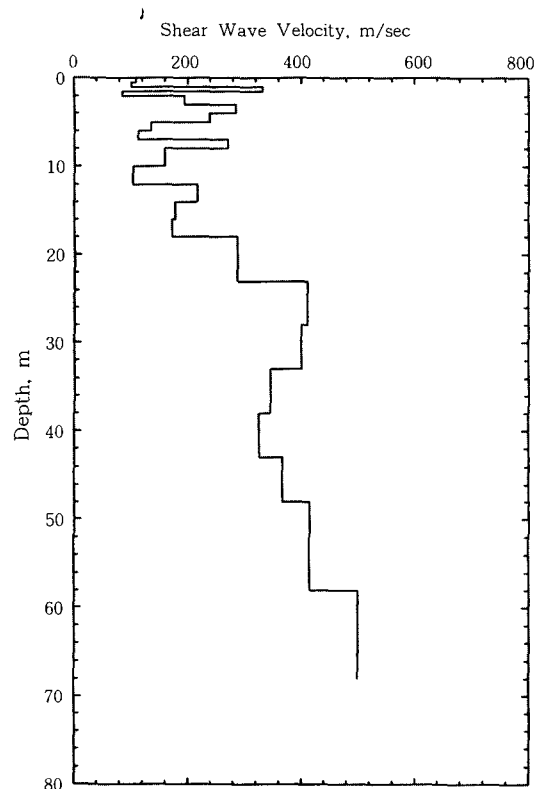


그림 4. 그림 3에 제시된 실험분산곡선에 대한 역산해석의 결과인 전단파 속도 주상도

### 3. 토모그래픽 SASW 기법

지반 및 구조물의 전단강성에 대한 거리-깊이방향으로의 2차원적인 조사가 가능한 토모그래픽 SASW 기법은 기본적으로 SASW 실험을 지반조사 축선을 따라 일정간격으로 여러번 수행하여 각각의 개별 SASW 실험으로부터 구한 전단 강성 주상도를 규합하는 것이라고 할 수 있다. 본 연구에서 제안한 토모그래픽 SASW

실험을 위한 감진기-발진원의 구성에 대한 개념도는 그림 5에 도시된 바와 같다.

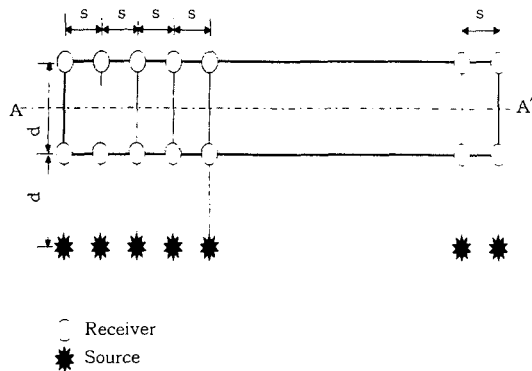


그림 5. 토모그래픽 SASW 실험을 위한 발진원-감진기의 기본 구성 개념도

그림 5의 경우에 있어서 토모그래픽 SASW 실험으로 조사하고자 하는 영역은 회색으로 표시되어 있는 사각형 부분이라고 할 수 있다. 즉, 하나의 SASW 실험에 의해서 두감지기 사이의 지역에 대해 일차원적 전단강성의 주상도를 구하고, 동일한 SASW 실험을 그림 5에 보인 바와 같은 여러 측선에서 수행하게 되면 SASW 실험을 행한 수만큼 전단강성 주상도를 구할 수 있게 된다. 이렇게 구한 일련의 전단강성 주상도를 규합하면 그림 5의 지반조사 측선 A-A'에 대한 전단강성에 대한 2차원적 도식인 컨투어 도표를 구할 수 있다. 따라서, 토모그래픽 SASW 실험에 의해서 구하는 전단강성의 컨투어 도표는 그림 5의 지반조사 측선 하부 지반의 전단강성에 대한 컨투어 도표가 되는 것이다.

본 절에서는 토모그래픽 SASW 기법의 실험 구성, 자료분석 및 해석방법에 관해 언급하고, 다음 절에서는 강사법에 의해 지반을 형성한 모래 지반의 횡방향 및 깊이 방향으로의 균질성을 평가하기 위하여 적용한 토모그래픽 SASW 기법의 적용사례를 소개하였다.

### 3.1 실험 구성

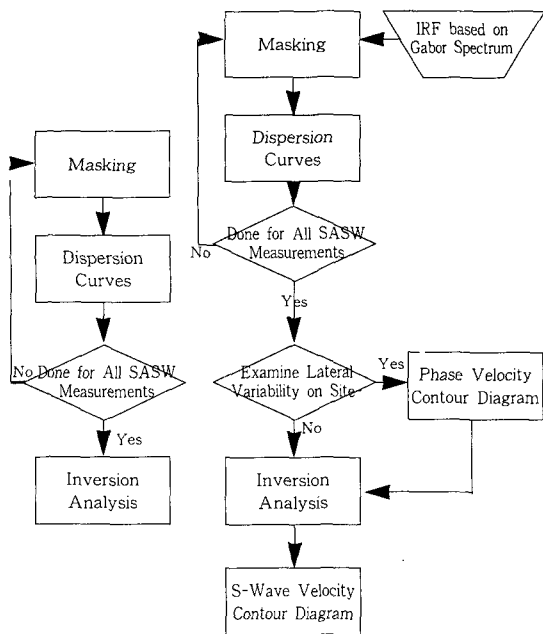
토모그래픽 SASW 실험의 감진기 및 발진원에 대한 기본적인 구성은 그림 5에 보인 바와 같다. 그림 5의 구성은 SASW 실험을 지반조사 측선 A-A'을 따라 n번 반복하여 수행하는 토모그래픽 SASW 실험에 대한 것으로서, 단위 SASW 실험을 위하여 사용한 발진원-감진기 그리고 감진기-감진기의 거리는 d이고, 단위 SASW 실험측선 사이의 간격은 s이다.

단위 SASW 실험에서 사용하는 감진기간 거리는 토모그래픽 SASW 실험에 의해서 조사하고자 하는 지반의 깊이와 SASW 실험에 의해서 구할 수 있는 최소 파장의 길이를 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다. 즉, SASW 실험에서 사용하는 두 감진기간 거리는 필요한 깊이까지 조사할 수 있도록 충분히 넓어야 하고, 또한 SASW 실험에 의해 발생하는 응력파의 최소 파장이 지반의 표층까지 포함할 수 있도록 두 감진기간 거리는 충분히 작아야 한다. 만약, 이러한 조건을 충족하는 감진기간 거리를 정할 수 없을 경우는 해당 측선에서 두 개의 다른 감진기간 거리를 사용하여 단위 SASW 실험을 두 번 수행하도록 하여야 한다.

그리고, 단위 SASW 실험 측선사이의 간격 s는 지반 및 구조물의 횡방향 변이성을 충분히 파악할 수 있도록 결정되어야 하나, 지나치게 작은 간격을 사용하면 처리하여야 할 자료가 방대하게 되므로 실험의 실효성이 없게 되기 때문에 두 가지 조건을 적절하게 만족하도록 결정되어야 할 것이다.

### 3.2 자료 분석 및 해석 방법

토모그래픽 SASW 실험에 대한 자료분석 및 해석은 그림 6에 도시된 바와 같이 수행한다. 자료분석 및 해석과정은 기본적으로 마스킹, 분산곡선의 결정, 위상속도 컨투어 도표, 역산해석, 전단파 속도 컨투어 도표 등의 다섯 단계로 구성되는데, 이 중 위상속도 컨투어 도표는 현장에서 횡방향 변이성을 판단할 필요가 있을 경우에 수행하는 단계이다.



(a) SASW Measurement (b) Tomographic SASW Measurement

그림 6. 토모그래픽 SASW 실험에 대한 자료분석 및 해석 과정의 흐름도

토모그래픽 SASW 실험의 자료분석 및 해석 과정은 기존의 SASW 실험을 위한 자료분석 및 해석과정과 거의 동일하나, 단지 토모그래픽 SASW 실험에서는 단위 SASW 실험을 여러번 수행하기 때문에 전단파 속도 주상도의 결정과정을 여러번 반복하여야하고 그로부터 구한 일련의 전단파 속도 주상도를 규합하여 컨투어 도표를 최종 결과로 제시한다는 점에서 차이가 있다. 따라서, 방대한 자료를 처리하여야 하는 토모그래픽 SASW 실험이 실용적이기 위해서는 SASW 실험 자료분석과정에서 상당히 많은 시간을 요하는 마스킹 작업 과정의 효율성을 향상시킬 필요가 있다.

마스킹 작업의 효율성 증진을 위한 한 방법 으로서는 Joh(1997)가 제안한 거보 스펙트럼을 사용하는 IRF(Impulse Response Filtration) 기법을 사용하는 것이다. IRF 기법은 위상각 스펙트럼의 분석에 있어서 경험이 많은 전문가의

판단을 배제하였고, 마스킹 작업의 자동화를 위한 가능성을 제시한 방법이라고 할 수 있다. 참고로, IRF 기법에 의한 위상각 스펙트럼의 분석은 그림 7에 제시된 SEISM이라는 프로그램에 의해서 가능한데, SEISM은 Joh(1998)가 개발한 마이크로소프트 윈도우즈용 소프트웨어로서 현장에서 측정된 전달함수으로부터 거보 스펙트럼을 생성하고, 거보 스펙트럼에 근거해서 IRF 기법을 수행할 수 있는 기능을 가지고 있다.

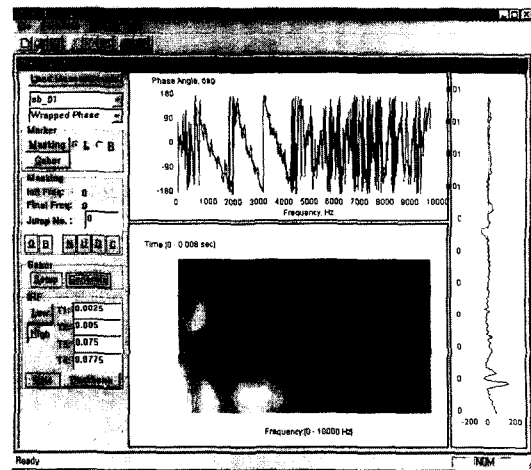


그림 7. 거보 스펙트럼과 IRF(Impulse Response Filtration) 기법을 구현한 SEISM에 의한 위상각 스펙트럼의 분석

그리고, 토모그래픽 SASW 실험시 실험 대상 매질의 횡방향 변이성의 파악이 신속하게 이루어져야 하는 경우에 있어서는, 현장에서 용이하게 결정가능한 실험분산곡선으로서도 파장-거리의 영역에서 위상속도의 2차원적 변화를 확인할 수 있는 컨투어 도표를 작성하는 것도 유용하리라고 생각된다.

#### 4. 토모그래픽 SASW 기법에 의한 모래 지반의 횡방향 변이성의 평가

본 연구에서 개발한 토모그래픽 SASW기법의

적용성을 평가하기 위하여 강사법에 의해 상대 밀도를 조절한 모래 지반에서 토모그래픽 SASW 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 토모그래픽 SASW 실험은 그 적용성의 평가 뿐만 아니라, 본 연구를 위해 새로이 제작된 강사기(raining device)의 성능을 평가하기 위한 실험이기도 하였다.

일반적으로 토류 구조물이나 기초 등의 소규모 모형 실험을 위해 실내에 모래를 이용하여 모형 지반을 형성하는 경우에 지반의 균질성을 확보하기 위해 강사법(raining method)을 사용한다. 강사법이란 일정한 높이에서 일정한 간격의 슬릿 사이로 모래를 낙하시킴으로써 모래 지반의 상대밀도가 일정범위 내에 형성되도록 하는 방법이다.

본 연구에서는 토모그래픽 SASW 실험을 통하여 강사법에 의해 형성된 모래 지반의 횡방향, 깊이방향으로의 균질성을 비파괴적, 비관입적 방법으로 평가하고자 한다.

#### 4.1 모래지반의 형성

토류 구조물이나 기초 등의 소규모 모형 실험을 위하여 주로 사용되는 모래 지반의 균질성 평가를 위하여 중앙대학교 건설대학에서 직접 토조를 제작하였다. 제작된 모래 지반은 길이 1.7m, 폭 1.1m, 높이 0.5m의 크기로 목재로 만들었으며, 모래의 형성로 인한 토조의 변형을 최소화하기 위해서 철재 부재로 측면을 보강하였다. 토조내 모래의 형성은 강사기를 이용하는 강사법에 의해 수행되었다.

모래 지반은 토모그래픽 SASW 실험에 적합하도록 응력파의 전파를 고려하여 설계되었는데, 구체적으로 토조의 재질과 크기의 선정에 신중을 기하였다. 소규모 토조에서의 응력파 실험에서 가장 유의해야할 부분은 직접 전달파와 토조 경계면에서 반사되어 돌아오는 반사파의 교란문제이다. 따라서, 응력파 실험에 적합한 토조는 이러한 반사파를 최소화시키고, 직접 전달파가 반사파보다 우선적으로 도착하게끔 토조의 크기가 커야 한다. 일반적으로 두 매질이

인접하는 경우 한 매질에서 발생한 응력파는 다른 매질로 전파될 때 두 매질 경계면에서 응력파의 반사되는 정도는 두 매질의 임피던스 차이에 영향을 받는다. 즉, 두 매질의 임피던스 차이가 큰 경우에 있어서 응력파의 반사되는 정도는 더 크다고 할 수 있다. 따라서, 응력파의 반사를 최소화하기 위해서 토조 벽체의 재질로 합판을 선택하였는데, 이는 합판이 강철판이나 콘크리트 벽체보다 토조내에 형성되는 모래의 임피던스와 더 근사한 임피던스를 가지기 때문이다.

토모그래픽 SASW 실험을 위한 토조의 크기 즉, 길이, 폭, 깊이를 결정하기 위해서는 각각 별도의 기준을 고려하여 결정하여야 하는데, 우선적으로 토조의 깊이는 실험에서 발생하게 되는 응력파 중 표면파의 파장을 고려하여야 한다. 즉, 토조의 깊이가 표면파의 최대 파장보다 작게 되면 그 표면파는 토조의 바닥에서 반사되어 토조 표면으로 전파되어 직접 전파되는 파와 간섭을 일으키게 된다. 따라서, 토모그래픽 SASW 실험을 위한 토조의 깊이는 실험시 발생하게 되는 표면파의 최대 파장보다 크도록 결정되어야 한다. 본 연구에서 계획한 표면파의 최대 파장은 약 0.2m이었으므로 토모그래픽 SASW 실험을 위한 토조의 깊이는 최소한 0.2m이어야 한다. 본 연구에서는 토조의 깊이로 0.5m를 택하였는데, 이는 최대 파장의 크기에 비교해 볼 때 충분한 것으로 사료된다. 토조의 깊이 이외에 토조 폭의 결정을 위해서 고려하여야 할 기본적인 사항은 직접 전달되는 응력파가 반사되어 돌아오는 반사파보다 분명하게 구별되도록 먼저 도착하여야 한다는 것이다. 본 실험에서 채택한 발진기와 감진기 사이의 거리는 0.1m이고 발진기와 후면 토조 벽사이의 거리는 0.4m이어서 반사파는 직접 전파되는 파에 비해 약 9배의 거리를 전파해야 하므로 실험에 사용된 토조의 폭은 충분하리라고 사료된다. 끝으로 토조 길이의 결정은 직접파와 반사파의 간섭에 대한 고려보다는 토모그래픽 SASW 실험의 범위와 연관되어 있는데, 본 실



험에서는 토모그래픽 SASW 실험을 횡방향으로 1.35 m정도 수행할 계획이기에 토조의 길이를 1.7m로 결정하였다.

또한, 토조에 형성되는 모래 지반의 균질성을 확보하기 위해서 강사법으로 모래를 형성하였는데, 이 강사기는 길이 1.2m, 높이 0.5m의 크기이며 크레인(overhead crane)에 의해 운반 및 운용이 가능하도록 제작되었다. 강사기의 슬릿의 크기는 4mm로 고정하였으며 모래를 강하하는 높이는 1.2m로 하였다. 모래의 강하높이는 실험에 사용한 모래를 사용하여 예비실험에 의해 결정하였는데, 모래의 강하높이가 1m~1.2m범위 내에서는 모래의 건조단위중량이 거의 일정한 분포를 보였다. 모래의 강하높이를 결정하기 위한 예비실험시 강사기 내의 잔류 모래량에 대한 고려는 하지 않았었는데, 토모그래픽 SASW 실험 결과 확인된 바에 의하면 모래의 강하높이에 대한 영향보다는 강사기 내의 잔류 모래량에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 모래가 적재된 강사기는 높이 5m의 크레인에 의해 매달린 상태로 인력에 의해 일정한 속도로 왕복 운동을 하면서 모래를 강하하였다. 강사기가 토조의 중심에 위치한 때와 토조 끝에 위치한 때의 모래 강하 높이 차이는 약 7cm이므로 크레인에 의한 강사기의 운용은 문제가 없다고 사료된다. 토모그래픽 SASW 실험을 위한 토조에 형성된 모래는 금강에서 채취된 것으로 3mm체를 통과시킴으로써 입경이 3mm 보다 작은 것만 택하였다. 처음에는 5mm 체를 이용하여 입경이 5mm 보다 작은 것들을 이용하였으나, 모래 형성을 위하여 제작된 강사기의 슬릿 간격이 4mm로 고정된 것이어서 강사법에 의해서도 상대밀도를 균일하게 유지할 수 없었다. 따라서, 3mm체를 이용하여 강사기에 사용할 모래의 최대 입경을 작게 하였다. 실험에 사용한 모래는 비중이 2.61이었으며, 입도 분포는 그림 8에 제시된 바와 같다. 실험에 사용한 금강 모래의 균등계수와 곡률계수는 각각 2.33, 0.96이었다.

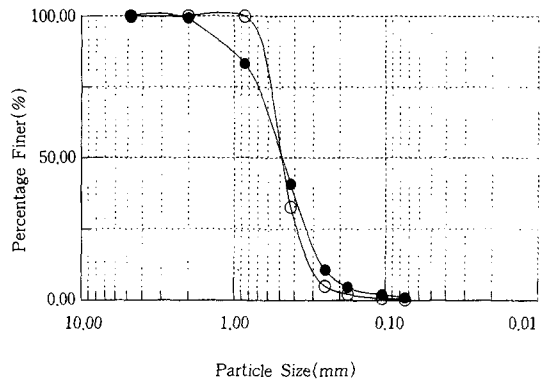


그림 8. 토모그래픽 SASW 실험에 사용한 3mm체를 통과한 금강 모래의 입도분포

#### 4.2 토모그래픽 SASW 실험

본 연구에서 제안한 토모그래픽 SASW 기법의 타당성 평가를 위한 실험 구성은 그림 9에 제시된 바와 같다. 토모그래픽 SASW 기법은 기본 실험방법이나 실험자료 분석 및 해석에 있어서는 기존의 SASW 기법과 동일하지만, 발진기와 감진기의 배치, 실험 절차, 실험분석 및 해석 결과의 정리 등과 같은 면에서 차이가 있다.

그림 9에 보인 바와 같이 토모그래픽 SASW 기법의 경우 발진기-감진기 축선은 실험 대상의 조사 축선과 수직으로 위치한다. 기존의 SASW 기법은 조사 축선에서 하나의 대표되는 일차원적인 강성 주상도를 구하는 반면, 토모그래픽 SASW 기법은 조사축선상 일련의 여러 위치에서 조사 축선과 수직되는 방향으로 각각 일차원적인 강성 주상도를 구한 후 이들을 조합하여 이차원적인 강성 주상도를 구한다. 결국, 토모그래픽 SASW 기법이 제시하는 이차원적인 전단강성 주상도는 두 감진기 열이 이루는 좁은 띠에 대한 조사 축선 방향의 전단 강성에 대한 변화를 제시한다고 할 수 있다.

본 연구에서 수행한 토모그래픽 SASW 실험은 모래 지반의 중심선을 따라 모래지반의 전단강성에 대한 횡방향 변이성을 평가하고자 계획되었다. 모래 지반의 깊이 방향으로의 전단

강성에 대한 추정은 약 0.1m정도로 국한하였는데 이는 토조의 크기로 인한 제약 때문이었다. 발진원과 감진기는 발진기-첫 번째 감진기, 첫 번째 감진기-두 번째 감진기 사이의 간격을 각각 0.1m 되도록 위치하였으며, SASW 실험은 조사 축선 상 10여곳에서 수행하였다. 각각의 실험 축선상 간격은 0.15m로 정하였는데, 전단 강성에 대한 토모그래피의 정확도에 대한 요구에 따라 SASW 실험 축선상 간격은 변화가능하다.

SASW 실험을 위한 발진기로서는 직경 약 0.02m, 길이 약 0.15m 정도의 볼트를 사용하여 약 0.1m 높이에서 낙하시킴으로 충격을 가하는 방식을 택하였다. 사질토의 경우 충격에 의한 응력파의 에너지가 모래 입자를 통해 전파되는데 다소 어려움이 있어 양호한 실험결과를 얻으려면 여러번 실험을 반복하여 그 결과의 평균을 취하는 앙상블 평균(ensemble averaging) 기법을 활용해야 한다. 본 실험에서도 각 측정점에서의 SASW 실험 수행시 약 40회 가량의 앙상블 평균을 수행하여 최종 위상각 스펙트럼을 구하였다. 앙상블 평균은 주파수 영역에서 행하는 동일한 조건에서 여러번 측정된 신호를 평균함으로써 잡음 성분을 제거하여 신호 대 잡음비를 향상시키는 기법으로, 주로 신호분석기(dynamic signal analyzer)에 의해서 실시간으로 행해진다.

발진기에 의해서 발생한 응력파의 전파를 감지하기 위한 감진기로는 PCB 308C02 가속도계를 사용하였다. 모래 지반에서 수행된 실험에 의해 발생하는 응력파는 여러 가지 주파수 성분을 포함하고 있지만, 약 0.1m까지 지반 강성을 추정하는 SASW 실험을 위해서는 응력파의 주파수를 약 10kHz까지 측정하여야 한다. 본 실험에서 모래 지반임에도 불구하고 지반 진동의 측정을 위해 가속도계를 사용한 이유는 약 10kHz까지의 주파수 대역에서 지반 진동을 효과적으로 측정하기 위해서는 속도계로서는 부족하고 가속도계를 사용하여야 하기 때문이었다.

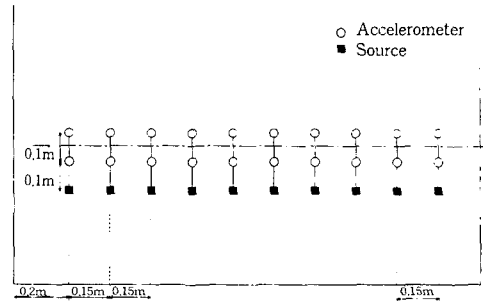


그림 9. 모래지반의 횡방향 변이성 평가를 위한 SASW 실험의 구성방법

### 4.3 분산곡선의 등고선 도표

모래 지반의 길이 방향으로 그림 9에 보인 것처럼 10여 곳에서 지반조사 축선 방향의 수직 방향으로 SASW 실험을 수행하였다. 토모그래픽 SASW 기법으로 구하게 되는 지반의 전단강성의 이차원적 주상도, 즉, 토모그래피를 도출하기 위해서는 3절에서 설명되어 있는 것처럼 일단 각각의 측정점에서 행한 SASW 실험에 대해 기존의 SASW 실험에 대한 실험자료 분석 및 해석 절차를 동일하게 적용하여야 한다. 이러한 방법에 의해 각 측정점에서 각각의 일차원적인 전단강성 주상도를 추정한 후에 전단강성의 토모그래피를 구축할 수 있다.

본 연구를 위해 수행한 일련의 SASW 실험에

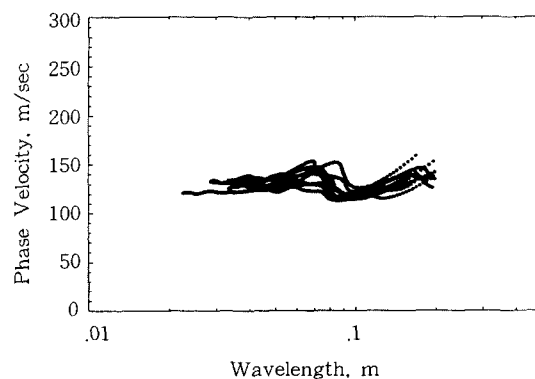


그림 10. 모래지반 중심선위의 10개의 측정점에서 결정된 실험분산곡선의 집합

대해 SEISM으로 실험분산곡선을 계산하면 그림 10에 보인 바와 같다.

그림 10에 도시된 10개의 측정점에 대한 각각의 실험분산곡선 상호 간의 편이는 각 실험분산곡선에 상응하는 측정점간의 지반물성의 차이를 의미하고 있다. 분산곡선은 임의의 지반에 대하여 유일하게 결정되어지는 일련의 서명(書名)과도 같은 것이기에 분산곡선의 비교는 상응하는 지반의 강성 주상의 변화를 비교하는 것과 동일하다. 임의의 파장과 그에 의해 표현되는 지반의 깊이와는 단순한 관계식으로 표현할 수 없기 때문에, 분산곡선을 분석할 때는 파장의 증가를 동일한 비율로의 깊이 증가로 이해해서는 안된다. 그러나, 인근 측정점의 분산곡선과의 비교는 지반의 균질성을 판단하는데 중요한 단서가 될 수 있다. 이러한 차원에서 분산곡선을 단순히 중복해서 비교해 보기보다는 각각의 측정점에 해당하는 분산곡선에 그에 상응하는 위치 정보를 포함시켜 등고선 도표 형태로 비교하면, 분산곡선을 역산하여 전단파 속도의 주상도를 구하기 전에 일차적으로 지반의 균질성을 판단할 수 있는 도구가 될 수 있다. 그림 10의 위상속도에 대한 등고선 도표가 그림 11에 도시되어 있다.

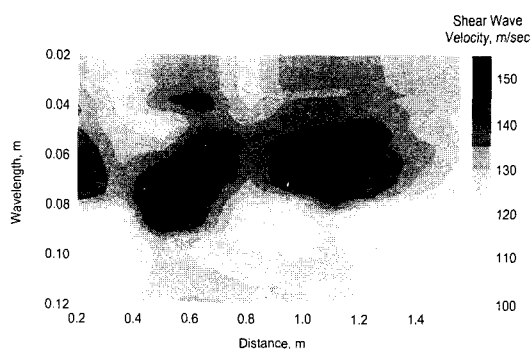


그림 11. 모래 지반 중심선상에서 행한 토모그래픽 SASW 실험으로부터 구한 위상속도에 대한 토모그래피

이러한 위상속도의 등고선 도표는 상당히 의미있다고 할 수 있다. 실험분산곡선은 SASW 실험을 하는 현장에서 간단한 작업으로 수월하게 구할 수 있어서 위상속도의 등고선 도표는 SASW 실험을 하는 현장에서 단시간 내에 결정할 수 있기에 SASW 실험의 부가가치를 향상시킬 수 있다. 일반적으로 분산곡선의 역산작업은 성능이 뛰어난 중형급 컴퓨터를 이용하여 상당시간의 작업을 거쳐야 한다. 따라서, 토모그래픽 SASW 실험의 최종 결과인 전단파 속도의 토모그래피를 구하기 위해 상당한 시간을 보내기 전에, 실험 위상속도의 이차원적 등고선 도표로서도 수월하게 개략적이거나 지반의 횡방향 변이성을 판단할 수 있다.

#### 4.4 전단강성의 토모그래피

토모그래픽 SASW 기법은 최종적으로 전단강성의 토모그래피를 구하는 것이 목적이기 때문에, 이를 위해서는 지반조사 측선위의 SASW 측정점에 대한 일차원적 전단파 속도 주상도를 구하는 것이 선행되어야 한다. 각 측정점에서의 일차원적인 전단파 속도 주상도는 개별적인 SASW 실험으로부터 구한 실험분산곡선으로부터 추정되어지는데, 일반적으로 역산해석에 의해서 가능하다. 본 연구에서는 SASW 실험 역산해석용 프로그램인 FIT7(1996, Joh)에 의해서 각 10개의 SASW 실험 측정점에 대한 일차원적 전단파 속도 주상도를 구하였는데, 예를 들어 그림 9의 측정 6에 대한 실험 분산곡선으로부터 구한 전단파 속도 주상도가 그림 12에 제시되어 있다.

그림 10의 10개의 실험분산곡선에 대해 각각 역산해석을 수행하여 10개의 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있는데, 이 10개의 주상도를 별도로 비교하기 보다는 각각의 주상도에 위치 정보를 포함시켜 등고선 도표 형태로 작성하면 토조의 횡방향 변이성을 2차원적으로 용이하게 시각화 할 수 있다. 이렇게 작성된 토조의 횡방향 변이성에 대한 등고선 도표는 지반의 전단강성에 대한 토모그래피가 되며, 그림 13에

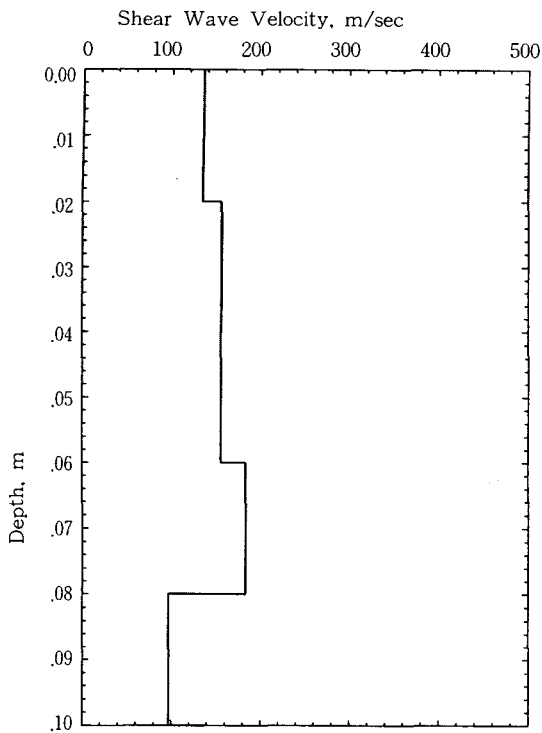


그림 12. 그림 10의 SASW 측정점 6에 대한 실험분산곡선으로부터 구한 전단파 속도 주상도

제시되어 있다.

그림 13의 전단강성에 대한 토모그래피를 살펴보면, 실험분산곡선의 등고선도표인 그림 9에서 확인한 사실과 유사한 사실을 관찰할 수 있

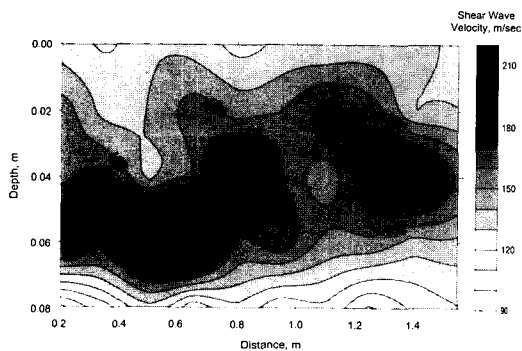


그림 13. 모래 지반 중심선상에서 행산 토모그래픽 SASW 실험으로부터 구한 전단강성에 대한 토모그래피

다. 즉, 깊이 0.04~0.07m에 강성이 높은 모래층이 위치하고, 그 아래에 강성이 낮은 층이 이어지고 있음을 알 수 있다. 이 사실은 본 실험에서 모래 지반의 상대밀도를 균일하게 하기 위하여 사용한 강사기가 깊이 방향으로의 상대밀도를 균일하게 조성하지 못하였다는 것을 나타내 주고 있다.

## 5. 결 론

SASW 실험은 1982년 처음으로 콘크리트 포장 구조체의 평가를 위해 개발이 된 이후로 다짐공사의 품질관리, 폐기물 매립지의 강성 주상도 조사, 지진 영향 평가를 위한 지반 조사, 해저 지반의 강성 평가 등에 다방면에 활용되어 왔다. 그러나, 지반 및 구조물이 수평 다층구조로 되어있다는 가정을 전제로 하는 SASW 기법의 제약으로 인해 측선방향으로 연속적으로 수행하여야 하는 구조물의 비파괴 전전도 평가에의 적용에는 다소 어려움이 있었다.

본 연구에서는 이러한 기존의 SASW 기법의 단점을 보완하는 토모그래픽 SASW 기법을 개발하였는데, 토모그래픽 SASW 기법으로는 조사측선 방향으로 전단강성의 토모그래피 영상을 구할 수 있다. 따라서, 최근 지하공간, 산업기반시설의 확충으로 인하여 구조물의 전전도 평가를 위한 기술이 요구되고 있는 즈음에, 토모그래픽 SASW 기법은 GPR, 전기 비저항 시험 등과 같은 비파괴 시험을 보완하는 또는 대체하는 기법으로 활용될 수 있으리라고 사료된다.

토모그래픽 SASW 기법의 개발과 관련하여 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서 새로이 개발된 토모그래픽 SASW 기법에 의해서 지반 및 구조물의 전단강성에 관한 토모그래피 영상을 얻는 것이 가능하다. 이러한 토모그래픽 SASW 기법의 타당성은 강사법으로 형성된 모래지반의 전단강성에 관한 균질성 평가 실험을 통하여 확인되었다.

2) 일반적으로 위상속도 분산곡선으로부터 전단파 속도를 구하는 역산과정은 시간을 요하는 작업이므로, 조사 대상의 횡방향 변이성 평가만을 위해서는 역산해석 이전에 현장에서 거의 실시간으로 구할 수 있는 위상속도의 토모그래피를 우선적으로 구하여 활용하는 것도 바람직하다.

3) 지반진동과 같은 동역학적 거동을 연구하기 위한 모형 실험에 있어서는 형성된 지반의 균질성을 확인하는 방법으로 일반적으로 사용하는 상대밀도를 이용하는 평가 방법보다는 전단강성의 토모그래피를 구하는 토모그래픽 SASW 기법을 사용하는 것이 보다 더 바람직하다고 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구과제(과제번호: 981-1203-008-2)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부로서 한국과학재단에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Foinquinos M. R. (1991). "Analytical study and inversion for the spectral analysis of surface waves method." Thesis, the University of Texas at Austin.
2. Gucunski, N. and Woods, R. D. (1991). "Numerical simulation of the SASW test." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 11, pp. 213-227.
3. Heisey, J. S., Stokoe, K.H., II, Hudson, W. R. and Meyer, A. H. (1982). "Determination of in situ shear wave velocities from Spectral-Analysis-of-Surface-Waves." Research Report No. 256-2 Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin
4. Joh, S.-H. (1996). "Advances in data interpretation technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) measurements." Ph.D.

- Dissertation, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
5. Joh, S.-H. (1996). FIT7: Program for Forward Modeling Analysis, Inversion Analysis and Time Trace Generation, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
6. Joh, S.-H. (1998). SEISM: A program for Stable Determination of Experimental Dispersion Curve Using IRF(Impulse Response Filtration) Technique from SASW Measurements, Chung-Ang University at AnSung.
7. Joh, S.-H. and Stokoe, K. H., II (1997). "Impulse response filtration technique for the determination of phase velocities from SASW measurements." 한국지반공학회지, 제 13권 1호.
8. Kausel, E. and Roesset, J. M. (1981). "Stiffness matrices for layered soils." Bull. Seismol. Soc. Am., vol. 71, pp. 1743-1761. I. Nazarian, S. and Stokoe, K. H., II (1984). "Use of surface waves in pavement evaluation." Transportation Research Record, 1070, pp. 132-144.
9. Kausel, E. and Peek, R. (1982). "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution." Bull. Seismol. Soc. Am., vol. 72, pp. 1259-1508.
10. Kavazanjian, E. and N. Matasovic, K.H. Stokoe II, and J.D. Bray, (1996). "In Situ Shear Wave Velocity of Solid Waste from Surface Wave Measurements," 2nd International Conference on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, November 5-8.
11. Kalinski, M.E., K.H. Stokoe II, J.O. Jirsa, and J.M. Roesset, (1995). "Nondestructive Identification of Internally Damaged Areas of Concrete Beam Using the SASW Method," Transportation Research Record 1458, pp. 14-19.
12. Luke, B.A., (1994). *In Situ Measurement of Stiffness Profiles in the Seafloor Using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Method*, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin.
13. Nazarian, S., and K.H. Stokoe II, (1989). "Nondestructive Evaluation of Pavements by

- Surface Wave Method, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli," ASTM STP 1026, A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 119-137.
14. Stokoe, K.H. II, S. Nazarian, G.J. Rix, I. Sanchez-Salineró, J.C. Sheu, and Y.J. Mok, (1988). "In Situ Seismic Testing of Hard-to-Sample Soils by Surface Wave Method," Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II ASCE Specialty Conference, Park City, Utah, pp. 305-320, June.
15. Tarantola, A. (1987). *Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*. 600 pp., New York, Elsevier.
- (접수일자 1998. 6. 9)