

## 표면파 탐사에 의한 필댐 사력존의 전단파속도 산정 연구

### Study on Shear Wave Velocity of Fill Dam rock zone using Surface Wave Method

권혁기<sup>1)</sup> · 신은철<sup>2)</sup>

Kwon, Hyek-kee · Shin, Eun-chul

**국문 요약** >> 본 연구에서는, 필댐 사력존의 전단파속도 특성을 분석하고자 하였으며, 필댐 사력존의 특성상 주로 표면에서 비파괴적으로 수행되는 표면파 탐사 기법을 적용하여 전단파속도를 도출 하였다. 대표적 표면파 기법인 SASW기법과 새롭게 개발된 HWAW 기법을 이용하여 6개댐 사력존에서 시험을 통해 심도별 전단파속도와 구속압에 따른 전단파속도를 산정하고 그 결과를 기존에 많이 사용되었던 Sawada와 Takahashi의 결과와 비교 분석하였다.

**주요어** 필댐, 전단파속도, 표면파 탐사, SASW, HAWA, 구속압

**ABSTRACT** >> In this study, the properties of shear wave velocity of coarse gravel in filldams are analyzed. Shear wave velocity is derived using the surface wave analysis method, which can be used nondestructively on the surface of filldams. These values are acquired through the tests for the rock zone of six filldams by SASW and HWAW methods. These analytical results are compared with results obtained through the frequently-used empirical method of Sawada and Takahashi.

**Key words** Fill dam, Shear wave velocity, Surface wave, SASW(Spectral Analysis of Surface Waves), HAWA(Harmonic Wavelet Analysis of Waves), Confine-Pressure

## 1. 서론

필댐의 동하중에 대한 거동 특성은 코어재와 사력재 그리고 기초 지반의 동적 물성치에 따라 매우 다르므로 각 재료에 대한 신뢰성 있는 동적 물성치 산정은 매우 중요하다.

댐체의 내진설계에서 필요로 하는 대표적인 동적 물성치는 전단탄성계수, 포아송비, 감쇠비 등이다. 이중 전단탄성계수와 직접적으로 관련되어 있는 전단파 속도는 그 중요성이 증대되고 있으며 적용 범위 또한 확대 되고 있다. 과거에는 지반의 증폭현상 평가 등의 내진 해석 및 진동 문제 등의 동적 문제에 대해서만 그 적용이 국한되어 있었으나 굴착에 의한 지반 변형 및 기초하부 지반의 침하 등 정적 문제 해결에서도 전단파 속도가 중요한 변수로 적용되고 있다. 또한 현

장 지반의 물성 뿐만 아니라 구조적 상태를 전단파 속도가 잘 대변하기 때문에 지반의 다짐 및 연약지반 개량효과 평가, 지반의 층서 확인 및 연약대 파악에도 활용되고 있다.<sup>(1)</sup>

현재 필댐체에서의 전단파 속도를 도출하기 위하여 사용되고 있는 현장 표면파 탐사에는 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 기법<sup>(2)</sup>, MASW(Multi-channel Analysis of Surface waves) 기법<sup>(3)</sup>, HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 기법<sup>(4)</sup> 등이 있으며, 공내탄성과 탐사에는 크로스홀 기법(Crosshole Seismic Method), 다운홀 기법(Downhole Seismic Method), 업홀 기법(Uphole Seismic Method), 인홀 기법(Inhole Seismic Method), 수직 탄성파탐사(Vertical Seismic Profiling)와 SCPT(Seismic Piezo-cone Penetration Test), 음파검층(Sonic Logging) 등이 있다.<sup>(5)</sup>

공내 탄성과 탐사는 정확하나 비용이 많이 들고 필댐 구조물의 특성상 시추가 어려운 경우가 많아 탐사가 불가능한 경우도 많이 존재한다. 특히, 댐 전체 부피의 80%이상을 차지하며 강성유지에 주된 역할을 하는 사력재는 사석을 이용하여 축조되므로 시추공 확보에 어려움이 있다. 따라서, 기

<sup>1)</sup> 정회원·인천대학교 토목환경시스템공학과, 박사과정

<sup>2)</sup> 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수

(교신저자: ecshin@incheon.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 4. 30 / 수정일 : 2009. 8. 12 / 게재확정일 : 2009. 8. 13)

존 시추공을 이용한 현장 탄성과 시험 수행이 쉽지 않고, 동적물성조사 자료가 부족하여 사력존의 최대전단 탄성계수 산정을 위해 필요한 전단파 속도는 외국 문헌<sup>(6)</sup> 등으로부터 획득하고 있는 실정이다.

이에 따라, 본 논문에서는 사력존 특성상 주로 표면에서 비파괴적으로 수행되는 표면파 탐사 기법을 적용하여 전단파속도를 도출 하였다. 대표적 표면파 기법인 SASW기법과 새롭게 개발된 HWAW 기법을 이용하여 6개دم 사력존에서 전단파 속도를 획득하여 D/B 구축을 통해 사력재의 심도별 전단파속도와 구속압에 따른 전단파속도를 산정하고 그 결과를 Sawada와 Takahashi의 경험식과 비교 분석하였다.

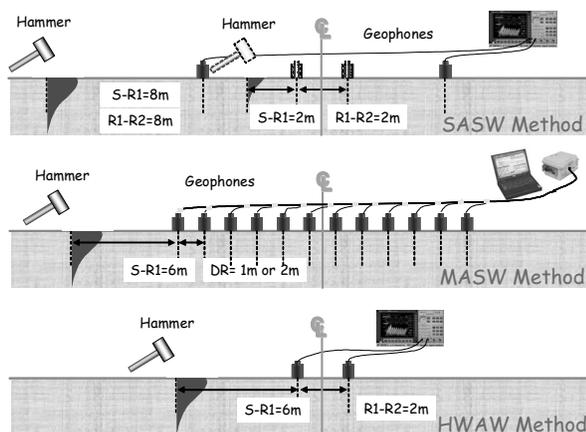
## 2. 시험개요

사력존의 경우 입자가 큰 사석재료를 이용하여 경사진 사면의 형태로 축조되므로 시추가 불가능하여 표면파 탐사를 통해 현장 전단파속도를 획득하여야 한다.

그림 1과 같이 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 기법은 다층구조로 이루어진 지반에서 표면을 따라 전파하는 표면파의 분산특성을 이용하여 대상지반의 기학적 구조 및 동적 물성치를 평가하며, 가진원과 감지기가 모두 지표면에 위치하는 비파괴 기법으로 신속하고 합리적인 시험이 가능하다.<sup>(8)</sup>

SASW 기법은 다양한 주파수 성분을 가진 가진원을 사용하여 발생된 표면파의 전파를 두 개의 감지기를 이용하여 측정하고, 감지기 신호를 주파수별로 분리한 후에 위상각 차이를 이용하여 각 주파수의 전파속도를 결정한다. 결정된 각 주파수의 전파속도를 이용하여 위상속도 분포인 실험분산곡선을 획득한다.

이와 같이 하나의 감지기 간격에 대한 실험이 끝나면 다



〈그림 1〉 표면파 기법의 현장 시험 개요도<sup>(7)</sup>

양한 파장성분을 얻기 위하여 감지기 간격을 늘려가며 시험을 반복하고, 모든 감지기 간격에 대해 실험분산곡선이 작성되면 작성된 모든 분산곡선을 합쳐 복합분산곡선(Composite Dispersion Curve)을 구한다. 실험분산곡선 획득 후 동강성 행렬법이나 전파행렬법 등의 표면파 모델링 기법을 이용하여 이론 분산곡선을 결정하고, 실험분산곡선과의 비교를 반복 수행함으로써 지반의 전단파속도를 합리적이고 신뢰성 있게 구할 수 있다.

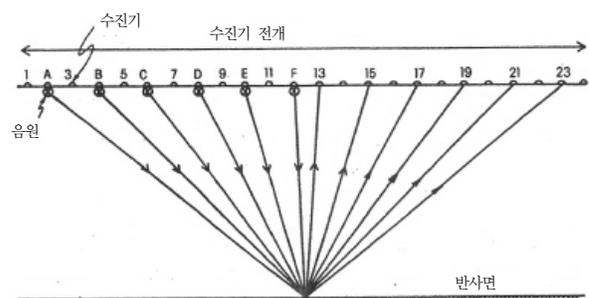
또한, 표면파 기법으로 현재 널리 사용되고 있는 MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves)<sup>(2)</sup>기법은 SASW 기법의 개념과 CMP(Common Midpoint) 모음기법을 종합하여 개발된 방법으로 CMP 모음기법을 통한 신호 품질을 개선하고, SASW 기법의 개념을 도입하여 분산곡선 결정과 역산해석을 수행하는 기법이다.

즉, 다수의 채널(보통 12채널 이상)을 이용한 동시측정으로 레일리와 위상속도 결정을 위하여 충분한 잉여 자료를 확보하고, 탄성과 시간 - 공간 영역 자료에서 표면파 성분의 추출을 용이하게 함으로써 신호대 잡음비를 향상시키는 기법이라고 할 수 있다.

여기서, CMP 모음기법은 음원과 수신기 사이의 같은 중간점을 갖는 기법이다. 그림 2와 같이 24채널 탄성과 탐사기를 이용할 시 중합수가 6인 CMP 탐사자료를 취득하는 방법이다. 즉, 반사경로 A-23, B-21, C-19, D-17, E-15, F-13은 같은 반사점을 지나므로 하나의 공통중간점 모음기록이 된다.

MASW 방법에서는 측정된 공통 송신점 자료를 주파수 - 위상속도 영역으로 변환하여 주파수에 따른 위상속도의 에너지를 나타내는 단면인 주파수-위상속도 분포단면을 작성하고, 주파수 - 위상속도 분포단면에서 각 주파수에서의 최대 에너지를 발췌하여 위상속도 분산곡선을 구한다.

HWAW방법은 2개 감지기 사이의 매질을 따라 전파하는 파의 주파수별 위상 · 그룹속도를 결정하기 위한 방법이다.<sup>(4)</sup> HWAW방법은 각 감지기에서 얻어진 시간 영역신호



〈그림 2〉 CMP 모음기법 개요도

를 Harmonic Wavelet 변환<sup>(9)</sup>을 통해 시간 - 주파수 영역으로 전환하여, 각 주파수 성분의 시간에 따른 위상·에너지 크기를 결정한 후, 각 주파수 성분이 최대 에너지를 가지는 시간영역, 즉 국부 신호/잡음비가 최대가 되는 최대 에너지선의 위상·에너지 정보만을 사용하여 파의 위상·그룹속도를 결정한다.

따라서 기존 방법에서 사용하기 어려운 낮은 평균 신호/잡음비를 가지는 계측 데이터로부터 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으며, 2채널 시험을 통해 다채널 시험에서 얻을 수 있는 표면파의 모드 분산곡선 또한 결정 할 수 있다.

그림 3과 같이 사력존의 표면 조건이 좋지 않은 부지에서 MASW와 같이 24개 이상의 감지기가 필요한 경우 각 감지기를 등간격으로 측선에 설치하기가 매우 어려운 반면, 2개의 감지기만 이용하는 기법의 경우 두 감지기를 지반의 국부적인 조건에 따라 설치하고 사이의 거리를 알면 시험 수행이 가능한 장점이 있다.

또한, 경사면의 경우 가속도계를 이용하여 시험을 수행해야 하나, 속도계에 비해 상대적으로 가격이 비싼 가속도계를 이용하여 MASW 기법을 수행하게 되면 비용이 크게 증

가하게 된다. 더욱이 HWAW 기법의 경우 타 기법에 비해 작은 가진 에너지로 시험 수행이 가능하여<sup>(10)</sup>, 타격이 어려운 사석재에서 우레탄 해머를 이용해 시험을 수행할 수 있는 장점을 가지게 된다.

따라서, 본 논문에서는 SASW 및 HWAW 기법을 이용하여 6개댐 사력존의 전단파속도를 도출하였고, 대상댐의 제원은 표 1과 같다. SASW기법은 측선의 중심을 기준으로 감지기 간격을 2, 4, 8, 16, 32m로 늘려가며 시험하였고, 가진이 잘 되는 필댐에서는 50m까지 늘려서 시험을 수행하여 결과를 도출하였다. HWAW기법은 감지기 간격과 가진원 거리에 크게 제한이 없어서 감지기 간격 2~4m, 가진원 간격 6~10m를 이용하여 시험을 수행하였다.

사력존의 전단파속도를 획득하기 위해서는 시험을 수행할 측선의 선정 또한 중요하다. 댐체에서 사력존의 물성을 구할 수 있는 측선은 사면의 소단, 댐마루의 가장자리, 사력존의 경사면 3곳 정도로 나눌 수 있다.

사면소단의 경우 수평으로 평탄한 구조를 가지고 있어 감지기의 설치 및 가진 등 시험수행이 용이하나, 소단이 없는 댐이 많이 존재하며 폭이 좁은 경우도 있다. 댐마루의 가장 자리는 탐사를 위한 접근성이 좋고 감지기의 설치 및 가진을 안정적으로 용이하게 할 수 있으나 대상댐의 단면 정보가 없는 경우 코어존 및 사력존의 경계를 파악할 수 없어 사력존의 물성을 신뢰성 있게 파악하기 힘들게 된다.

사력존의 경사면의 경우는 모든 댐에서 시험이 가능한 장점이 있으나 사면의 경사가 심하고 사력재의 구성이 고르지 못할 경우 감지기의 설치 및 가진에 어려운 점이 있고, 시험자의 안전성에 문제가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 시험의 신뢰성, 시험의 접근성, 안전성에 따라 대상댐의 소단이 있는 경우 시험을 우선적으로 수행하며, 그 다음으로 경사면에서 시험을 수행하여 사력존의 전단파속도를 도출하였다. 그림 4와 같이 소단에서는 중력방향, 사면에서는 법선방향으로 깊이별 전단파속도를 산정하는데 법선방향으로 깊이별 전단파속도를 산정 시 코어존과 겹치지 않게 사력존만의 전단파속도를 도출하도록 댐의 중



(a) 사력존의 구성

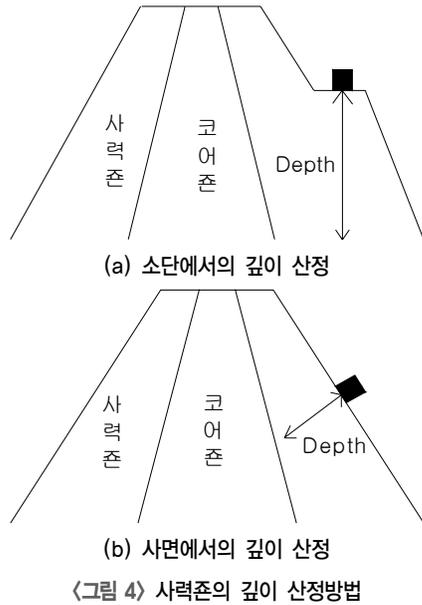


(b) 사력존의 경사사면

<그림 3> 락필댐 사력존의 구성 및 사면

<표 1> 대상댐의 제원

구분	형식	댐 높이 (m)	댐 길이 (m)	댐마루 표고 (EL. m)
M댐	중양 차수벽형 락필댐	60.7	287.0	863.5
Y댐		42.0	300.0	162.0
D댐		55.0	255.0	123.0
S댐		123.0	530.0	203.0
SA댐		67.0	437.0	69.2
SY댐		46.0	300.0	66.4



간 정도의 높이에서 표면과 탐사를 수행하여야 한다.

충분한 사면에서 표면과 탐사의 수행시 사면의 법선방향으로 감지기를 설치하고 가진을 할 경우 신뢰성있는 시험을 수행할 수 있다는 연구결과가 발표되어 있다.<sup>(11)</sup>

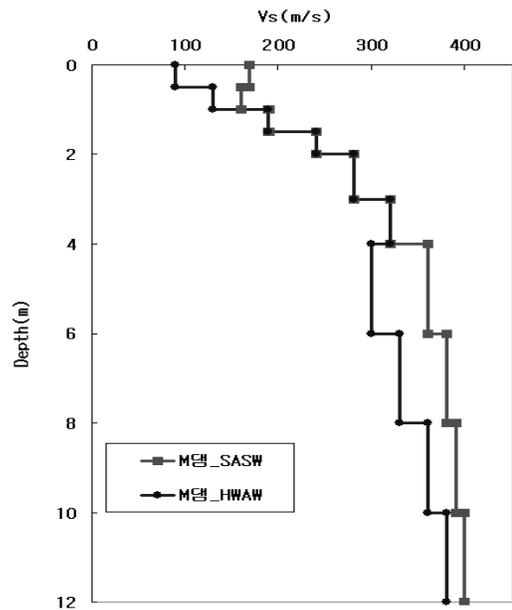
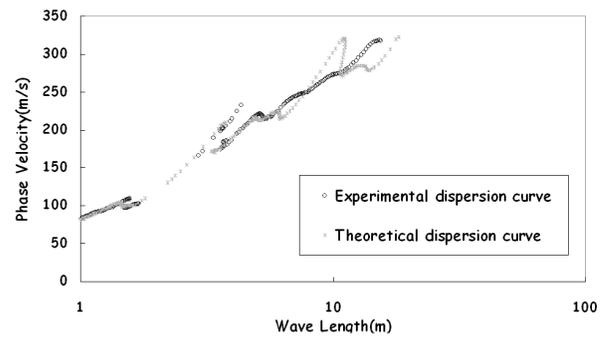
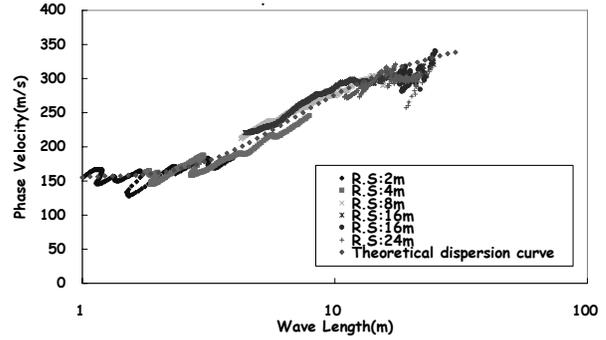
### 3. 현장시험 및 시험 결과

#### 3.1 M댐 시험 및 시험 결과

M댐은 소단이 존재하지 않아 경사사면에 측선을 설치한 후 감지기를 경사면의 법선방향으로 설치하여 SASW 및 HWAW 시험을 수행하였다. SASW 기법은 감지기 간격을 2, 4, 8, 16m 로 늘려가며 시험을 수행하였고, HWAW 시험의 경우 최적의 시험구성을 위해 감지기 간격 2, 4, 6m, 첫 감지기-가진원 거리 6, 8, 10, 20m 등으로 변화시키며 시험을 수행하여 최종적으로 감지기 간격 2m, 가진거리 10m 구성에서 결과를 획득하였다.

그림 5 (a), (b)는 SASW 및 HWAW 시험결과를 나타낸 것으로 현장에서 약 20 ~ 30m 영역까지 분산곡선을 도출하였으며, 역산과정을 통하여 사력재의 전단파속도 주상도를 도출하였다(그림 5, (c)).

사력부는 매우 큰 사석부터 조그만 자갈까지 입도분포가 다양하며 상부의 경우 공극이 큰 상태로 존재하여 여러 방법으로 가진을 하여도 실제 타격에너지가 크게 발휘되지 않아 장파장 영역의 분산곡선을 획득하지 못하였다. 또한 사력재의 불균질한 구성으로 인하여 표면 단파장 영역의 결과는 신뢰성이 떨어진다고 판단된다. 이러한 분산곡선으로부터 구한 전단파속도의 주상도는 약 12m 심도까지 도출하였

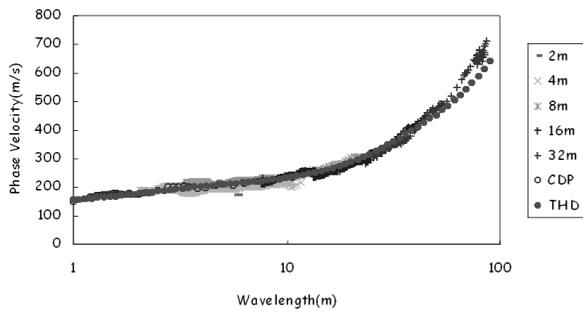


〈그림 5〉 M댐 시험결과

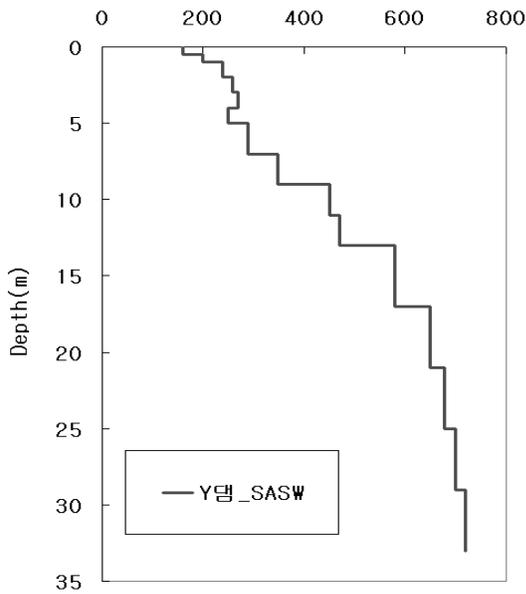
으며 전단파속도는 상부 약 200m/s에서 하부 약 400m/s 범위에서 존재하였다.

#### 3.2 Y댐 시험 및 시험 결과

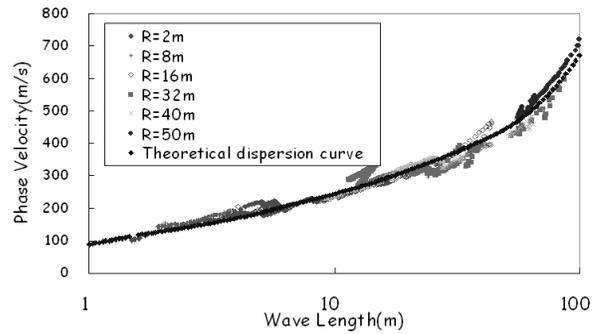
소단이 존재하는 Y댐에서는 소단에서 표면과 기법을 수행하였다. SASW 기법은 감지기 간격을 2m부터 32m까지 늘려가며 시험을 수행하였으며, 가진은 슬레지 해머와 추를 이용하였다. 그림 6 (a)와 같이 100m파장 영역 근처까지 분



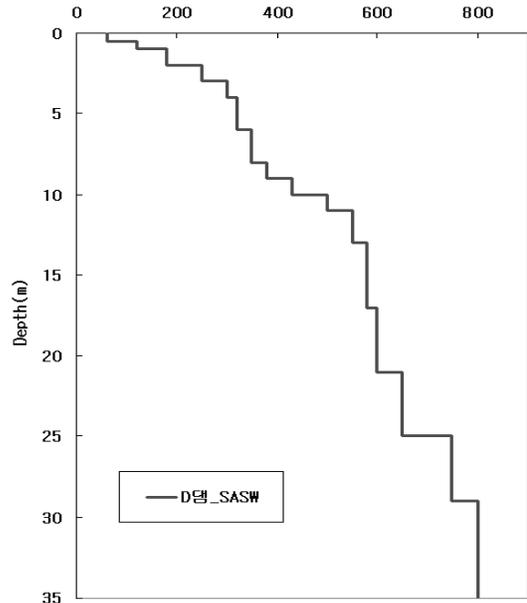
(a) SASW시험 결과  
Vs (m/s)



(b) 전단파속도 주상도  
〈그림 6〉 Y댐 시험결과



(a) SASW시험 결과  
Vs (m/s)



(b) 전단파속도 주상도  
〈그림 7〉 D댐 시험결과

산곡선을 도출하여 역산과정을 통해 이론분산곡선을 도출 하였으며, 최종적으로 획득한 전단파속도 주상도는 그림 6 (b)에 나타내었다. 심도 33m까지 전단파속도를 도출하였으며 심도에 따라 160 ~ 720m/s까지 존재하였다. M댐과는 다르게 Y댐 표면의 사력재 입도분포가 비교적 균등하고 잘 다져져 있어 추 가진 시 타격에너지가 잘 발현되었기 때문 이라 판단된다.

### 3.3 D댐 시험 및 시험 결과

소단이 존재하는 D댐의 경우, SASW기법은 감지기 간격을 2m부터 50m까지 늘려가며 시험을 수행하였다. 일반적인 지반의 경우 슬래지 해머나 추로 가진할 경우 32m 이상의 감지기 간격에서 양질의 결과를 얻기 힘들다, 본 현장에서는 추의 가진을 이용하여 파장 100m까지의 분산곡선을 그림 7 (a)와 같이 도출하였다. 획득한 분산곡선을 이용하여 산정된 전단파속도는 그림 7 (b)와 같으며, 심도에 따라 200

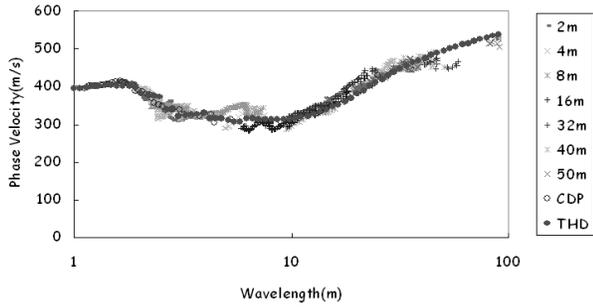
~ 700m/s까지의 범위로 나타났다.

### 3.4 S댐 시험 및 시험 결과

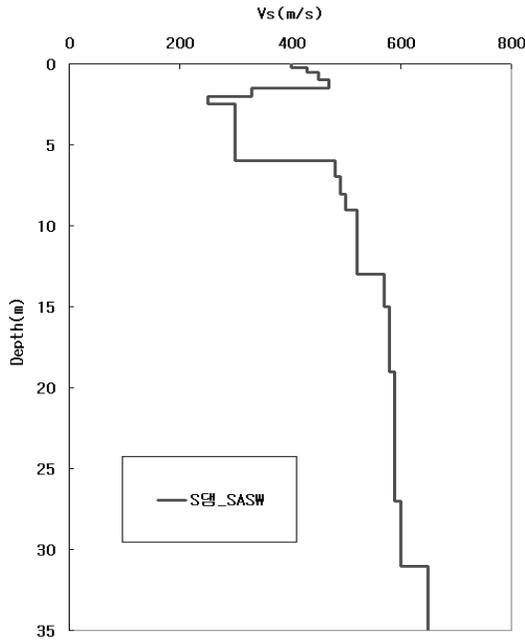
S댐은 소단이 존재하여 소단을 따라 측선을 설정한 후 표면파 기법을 수행하였다. SASW기법으로 감지기 간격을 2m부터 50m까지 늘려가며 시험을 수행하여 그림 8(a)와 같이 100m까지의 분산곡선을 도출하였다. 역산과정을 통하여 전단파속도 주상도를 그림 8(b)와 같이 획득하였으며, 상부에서 400m/s이상의 큰 속도를 가졌다가 3m 이후로 심도에 따라 300 ~ 650m/s의 속도 분포를 나타내었다. 이는, S댐의 소단으로 차량 등이 통행하여 잘 다져진 효과로 인해 비교적 큰 전단파 속도가 나타난 것으로 판단된다.

### 3.5 SY댐 시험 및 시험 결과

SY댐은 소단에서 표면파 시험을 수행하였다. SASW 기



(a) SASW시험 결과



(b) 전단파속도 주상도  
 <그림 8> S댐 시험결과

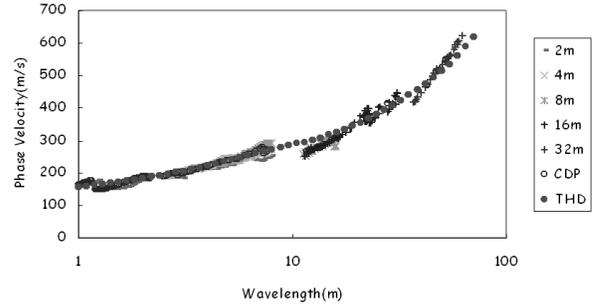
법은 감지기 간격을 2m부터 32m까지 늘려가며 시험을 수행하였으며, HWAW 기법은 가진원-감지기 간격 6m, 감지기 간격 2m를 이용하여 수행하였다.

각각의 결과 및 역산을 위한 이론 분산곡선은 그림 9 (a), (b)에 나타내었으며, 최종적인 전단파속도 주상도는 그림 9 (c)에 나타내었다. 그림 9 (c)와 같이 깊이에 따라 100 ~ 750m/s의 속도분포를 가지며 두 시험기법의 결과가 유사하게 나옴을 확인할 수 있었다.

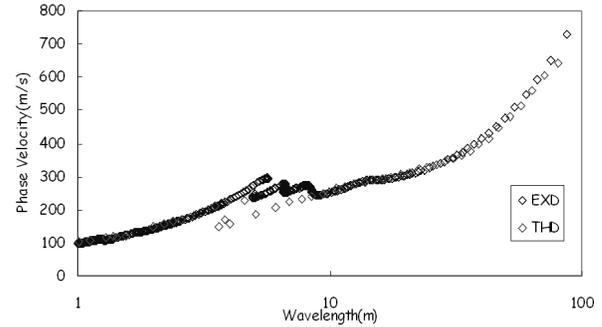
### 3.6 SA댐 시험 및 시험 결과

SA댐의 경우는 소단이 존재하지 않기 때문에 사면에서 측선을 선정할 후 HWAW 표면파 시험을 수행하였다.

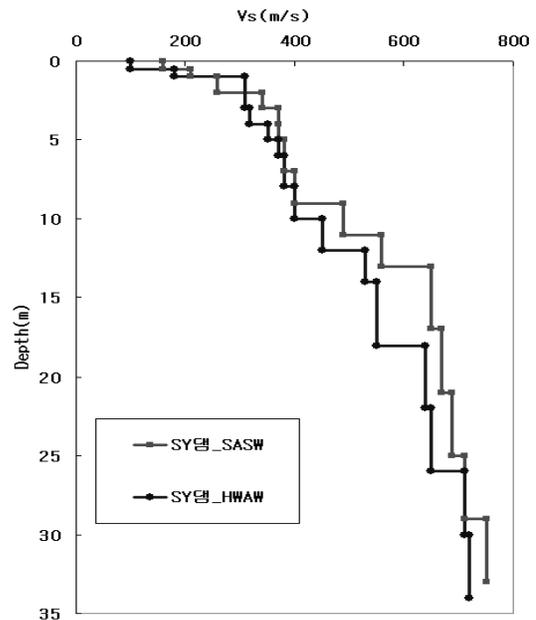
HWAW 기법은 다양한 감지기 간격을 이용하여 수행하였으며, 최종적으로 가진원-감지기 간격 10m, 감지기 간격 2m를 이용하였다. 시험 결과 및 역산을 위한 이론 분산곡선은 그림 10 (a)에 나타내었으며, 최종 전단파속도 주상도는



(a) SASW시험 결과



(b) HWAW 해석 결과



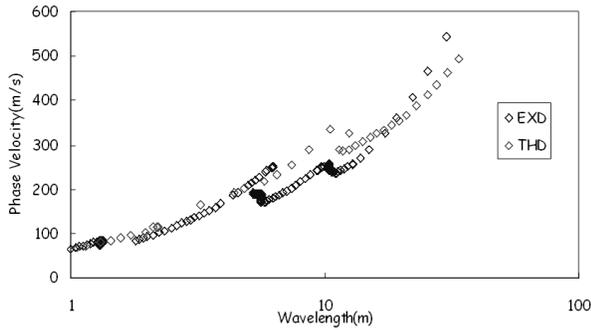
(c) 전단파속도 주상도  
 <그림 9> SY댐 시험결과

그림 10 (b)에 나타내었다. 그림 10 (b)에서 보는 바와 같이 깊이에 따라 100 ~ 600m/s의 속도분포를 가지는 것을 확인할 수 있다.

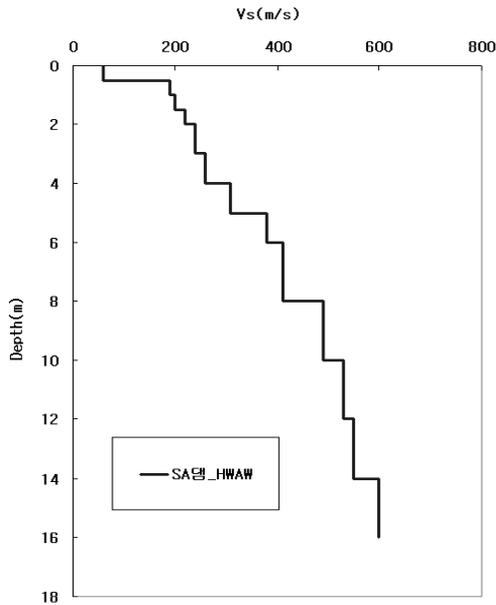
## 4. 시험결과 분석

### 4.1 현장시험 결과 분석

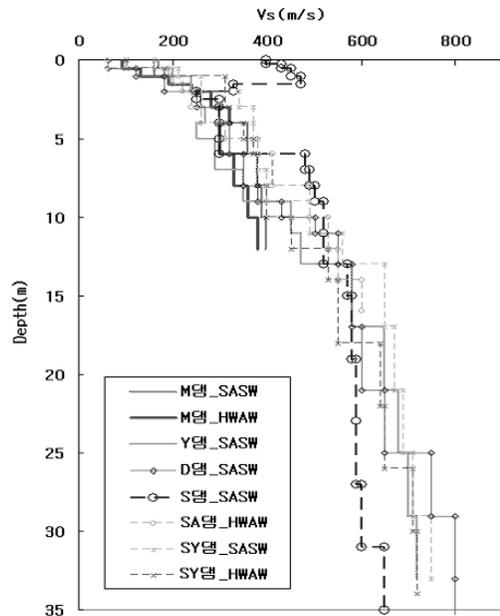
사력존의 경우 코어존에 비하여 시험 수행조건이 어렵고



(a) HAWW시험 결과



(b) 전단파속도 주상도  
〈그림 10〉 SA댐 시험결과



〈그림 11〉 6개댐의 사력존 전단파속도 주상도

〈표 2〉 사력존의 깊이별 전단파속도 분포

깊이 (m)	전단파속도 (m/s)	하한 (m/s)	상한 (m/s)
0~5	241	160	322
5~10	404	340	468
10~15	526	454	598
15~20	615	569	661
20~25	642	599	685
25~30	694	638	750
30~35	740	683	797

깊은 심도까지 탐사가 되지 않는 경우가 있다. 따라서 향후 해석을 위하여 신뢰성 있는 D/B의 구축이 필요하다.

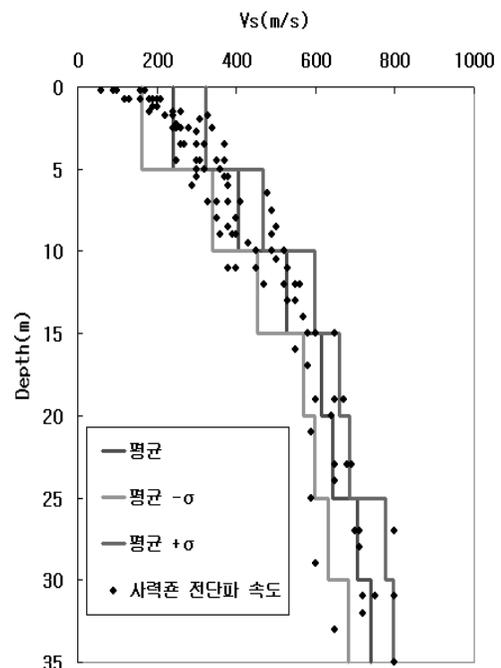
그림 11에 나타난 바와 같이 S댐을 제외하고 사력재의 종류에 큰 영향을 받지 않고 깊이에 따라 일정하게 증가하는 경향을 알 수 있다. S댐의 소단은 도로로 이용된 관계로 차량 등에 의해 상부층이 다짐되어 타 댐에 비해 강성이 크게 나타난 것으로 판단되어 D/B구축 자료에서 제외하였다.

#### 4.2 현장시험 결과와 경험식 비교

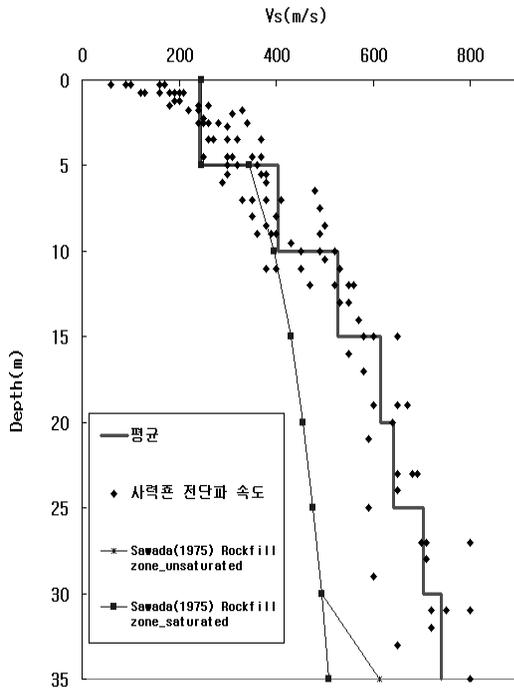
내진성능평가를 수행하기 위해서는 사력존의 깊이별 전단파 속도를 알아야 하는데 이를 위해 5m 간격으로 깊이별 평균 및 표준편차를 표 2, 그림 12와 같이 구하였다.

평균 속도는 241~740m/s로 깊이별로 증가하였고, 표준편차는 43에서 80까지 나타났으며 깊이별 평균속도를 이용하여 D/B 구축하였다.

본 논문에서 도출한 깊이별 전단파속도 분포를 검증하기



〈그림 12〉 깊이별 사력존의 전단파속도 평균 및 표준편차



〈그림 13〉 본 연구결과와 Sawada&Takahashi결과 비교

위해 기존에 많이 이용되었던 Sawada와 Takahashi결과<sup>(6)</sup>와 비교하여 그림 13에 나타내었다.

그 결과, 상부 10m까지는 유사한 결과를 보이으나 10m 이하에서는 본 연구에서 구한 결과가 더 크게 나옴을 확인할 수 있었다.

한편, 코어재와 달리 사력재는 사면으로 구성되어 깊이별 물성치를 이용하는 것보다 구속압에 따른 전단파속도 분포가 해석에 유리할 수도 있다. 따라서 구속압에 따른 속도의 변화를 확인해 보기 위하여 밀도를 2.2ton/m<sup>3</sup>, 토압계수 K<sub>0</sub> = 0.5로 가정하여 식 (1)을 이용하여 나타냈다.

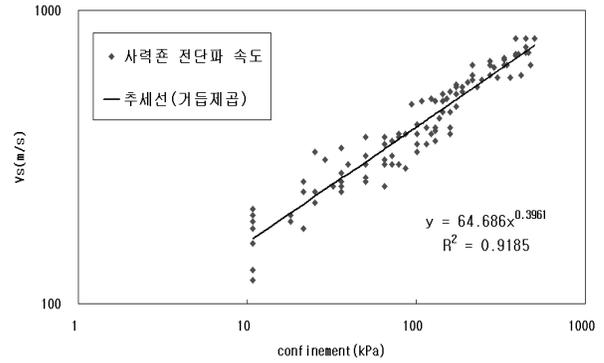
$$\sigma'_m = \frac{1}{3} \sigma'_v (1 + 2K_0) = \frac{1}{3} \rho gh (1 + 2K_0) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma'_m$ 는 유효평균주응력(kPa),  $\sigma'_v$ 는 유효수직응력(kPa), K<sub>0</sub>는 정지토압계수(=0.5로 가정),  $\rho$ 는 단위중량(t/m<sup>3</sup>), h는 깊이(m)이다.

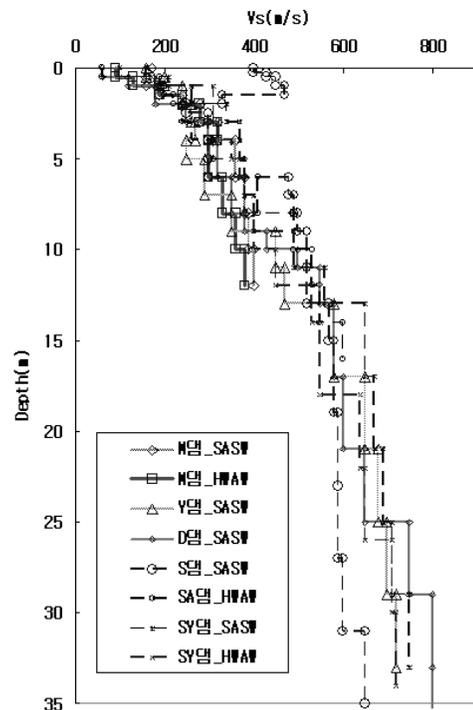
또한, 전체결과를 구속압 - 전단파속도의 관계로 그림 14와 같이 도시하였고, 표면과 결과의 신뢰성이 떨어지는 지표면 근처의 결과(구속압단계 10kPa) 이하값은 제외하였으며, 매우 좋은 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 식 (2)와 같은 관계식을 제시할 수 있었다.

$$V_s(m/s) = 64.686 \times (\sigma(kPa))^{0.3961} \quad (2)$$

구속압에 따른 관계식을 앞에서 구한 구간별 평균속도 및



〈그림 14〉 구속압에 따른 전단파속도 추상도



〈그림 15〉 본 연구 및 기존 연구결과 비교

기존의 Sawada와 Takahashi식과 비교하여 그림 15에 도시하였다. 깊이별 평균속도에 비하여 구속압을 이용해 도출한 결과가 조금 작게 산출되었으며, 이를 이용하여 향후 해석 시 구속압에 따른 입력물성치를 보다 엄밀하게 산정할 수 있다고 판단된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 필댐에 대한 내진성능 평가를 수행하는데 필요한 최대전단탄성계수를 산정하는데 있어 사력재의 다양한 전단파속도 특성을 분석하였다. 현장시험결과에 대한 분석과 기존 사용된 경험적 제안식과의 비교·분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 사력재 전단파속도의 깊이별 평균 속도는 241~740m/s

로 깊이별로 증가하였고, 표준편차는 43에서 80까지 산정되었다.

2. 기존 Sawada와 Takahashi 결과와 비교해 볼 때, 상부 10m까지 유사한 결과를 도출하나 10m 이하에서는 더 크게 나오는 것으로 나타났다.
3. 구속압에 따른 전단파 속도의 변화를 확인하기 위해 구속압 - 전단파 속도 제안식을 제시할 수 있었으며, 매우 좋은 상관성을 가지는 것으로 나타났다.
4. 깊이별 평균속도에 비하여 구속압을 이용해 도출한 결과가 조금 작게 산출되었으며, 이를 이용하여 향후 해석 시 구속압에 따른 입력물성치를 보다 엄밀하게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 연구비 지원(기존댐의 내진성능평가 및 향상요령)에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Stokoe, K.H., and Rosenblad, B.L., "Offshore geotechnical investigation with shear waves," in Roesset, J.M., Ed., *Offshore Technology Conference*, 1-9, 1999.
2. Stokoe, K.H. II, Wright, G. W., James, A. B., and Roesset, J. M., "Characterization of geotechnical sites by SASW method in geophysical characterization of sites," ISSMFE, Technical Committee #10, Edited by R. D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi, 1994.
3. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., "Multi-channel analysis of surface waves," *Geophysics*, Vol. 64, No. 3, 800-808, 1999.
4. Park, H.C., and Kim, D.S., "Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform," *NDT&E International*, Vol. 34, No. 7, 457-467, 2001.
5. 김기석, 권형석, 오세영, "Turn-Key 설계에서의 지반조사물리탐사와 조사사례," 2000년 공동 특별강연 논문집, 한국지구물리탐사학회, 한국지반공학회 지반조사위원회, 155-191, 2000.
6. Sawada, Y., and Takahashi, T., "Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams," *Proceeding of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 695-702, 1975.
7. 방은석, "신뢰성있는 지반의 전단파속도 주상도 결정을 위한 현장 탄성파 탐사기법 연구" 박사학위 논문, 한국과학기술원, 2006.
8. Nazarian, S. and Stokoe, K.H., "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave," *Proceeding of 8th Conference on Earthquake Engineering, San Francisco*, 31-38, 1984.
9. Newland, D.E., *An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis*, 3rd edition, Addison Wesley Longman Limited. 1998.
10. 박형춘, 김동수, 김종태, 박헌준, 방은석, "HWAW기법을 이용한 지반의 전단파속도 2-D 영상화," 한국지반공학회 2008 봄 학술 발표회, 2008.
11. 김성우, "지표경사면에서 표면파 기법의 적용성," 석사학위논문, 한국과학기술원, 2008.