

표면파탐사에 의한 필댐 코어존의 전단파속도 연구

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

권혁기¹⁾, Hyek-Kee Kwon, 신은철²⁾, Eun-Chul Shin

¹⁾ 한국시설안전공단 차장, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, P/E

시립 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. Civil Engineering, Univ. of Incheon

²⁾ 시립 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Incheon

SYNOPSIS : In this study, properties of shear wave velocity of core zone in filldams are analyzed. Shear wave velocity is derived using analysis of surface wave method that can be used nondestructively on the surface of filldams. These values are acquired through the tests for the core zone of six filldams by SASW and HWAW methods. Existing 2 more results are added. Shear wave velocity according to the depth and confining pressure are estimated, respectively. These analytical results are compared with the frequently used empirical method by Sawada and Takahashi.

Key words : Shear Wave Velocity, Surface Wave, SASW(Spectral Analysis of Surface Waves), HAWA(Harmonic Wavelet Analysis of Waves), Confine-Pressure

1. 서론

최근 중국의 쓰촨성 지진('08년, 리히터규모 8)이나 인도네시아 수마트라 지진('04년, 리히터규모 9) 등 해외에서 발생하는 지진은 희생자가 수십만 명에 이르는 등 점차 규모가 증가하고 있다. 특히, 중국 쓰촨성 지진은 쓰촨성 일대 약 400여개의 중·대형 댐에 크고 작은 손상을 입힘으로써 지진대비 댐 안전 관리에 대한 대책 마련의 필요성을 부각시키고 있다. 우리나라의 경우도 울진해역 지진('04년, 리히터규모 5.2), 오대산 지진('07년, 리히터규모 4.9) 등과 같이 큰 규모의 지진은 아니지만 점차 발생빈도 및 규모가 증가하고 있어 기존댐에 대한 내진성능 평가는 정밀안전진단의 안전성 평가 항목 중 매우 중요한 검토사항이다.

현재 국내에서는 락필댐 코어존에 대한 전단파속도 자료가 부족하여 지진해석 시 코어존의 전단파속도는 일본의 Sawada(1975)가 제시한 연구결과에 의존하고 있다. 그러나 이 결과는 일본의 약 100m 높이의 3개 댐에 대한 현장시험 결과로서 국내 댐의 적용에 대해서는 검증이 필요한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 필댐의 내진성능 평가를 수행하는데 필요한 코어존의 전단파 속도에 대한 다양한 특성을 분석하고자 하였으며, 국내의 4개 락 필댐에서 표면파탐사 기법을 통한 코어존의 전단파 속도를 획득하여 일본의 Sawada(1975)가 제시한 결과와 국내의 기존 연구결과(하익수·오병현, 2008)와 비교 분석하였다.

2. 시험개요

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 동

적 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 기초 하부 지반의 침하 등 정적 문제 해결에서도 전단파 속도가 중요한 변수로 적용되고 있다. 또한, 현장 지반의 물성뿐만 아니라 구조적 상태를 전단파 속도가 잘 대변하기 때문에 다짐 및 연약지반 개량효과 평가, 지반의 층서 확인 및 연약대 파악에도 활용되고 있다.

현재, 필댐체에서의 전단파 속도를 도출하기 위하여 사용되고 있는 현장 표면파 탐사에는 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 기법, MASW(Multi-channel Analysis of Surface waves) 기법, HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 기법 등이 있으며, 공내탄성과 탐사에는 크로스홀 기법, 다운홀 기법, 업홀 기법, 인홀 기법, 수직 탄성파탐사와 SCPT(Seismic Piezo-cone Penetration Test), 음파검층(Sonic Logging) 등이 있다.

필댐 코어존에서의 전단파속도 탐사는 코어존의 차수기능성 확보를 위해 제체에 손상을 주지 않아야 하므로 시추공이 필요 없는 비파괴 시험이 필요하다. 그림 1과 같이 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 탐사기법은 다층구조로 이루어진 지반에서 표면을 따라 전파하는 표면파의 분산특성을 이용하여 대상 지반의 기하학적 구조 및 동적 물성치를 평가하며, 가진원과 감지기가 모두 지표면에 위치하는 비파괴 기법으로 신속하고 합리적인 시험이 가능하다.

SASW 기법은 다양한 주파수 성분을 가진 가진원을 사용하여 발생된 표면파의 전파를 두 개의 감지기를 이용하여 측정하고, 감지기 신호를 주파수별로 분리한 후에 각 주파수의 전파속도를 위상각 차이를 이용하여 결정한다. 결정된 각 주파수의 전파속도를 이용하여 위상속도의 분포인 실험분산곡선을 획득한다. 이와 같이 하나의 감지기 간격에 대한 실험이 끝나면 다양한 파장성분을 얻기 위하여 감지기 간격을 늘려가며 시험을 반복한다. 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.

HWAW방법은 2개 감지기 사이의 매질을 따라 전파하는 파의 주파수별 위상·그룹속도를 결정하기 위한 방법이다. HWAW방법은 각 감지기에서 얻어진 시간 영역신호를 Harmonic Wavelet 변환을 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 에너지 선의 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 결정할 수 있다. 한편, 표면파 탐사기법을 필댐에 적용하여 코어존의 전단파속도를 탐사하기 위해서는 댐마루 중앙부에 댐축 방향으로 축선을 설정하여 시험을 수행하는 것이 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. 그 이유는 일반적인 필댐의 경우, 댐 구조 특성상 좌우안으로 갈수록 코어존의 심도가 얕아지게 되므로 기반암의 영향을 줄이고 코어재료의 대표적인 전단파속도를 얻을 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 SASW 및 HWAW 기법을 이용하여 댐마루 중앙부에서 코어존의 전단파속도를 도출하였으며, SASW기법은 축선의 중심을 기준으로 감지기 간격을 늘려가며 시험을 수행하였고, HWAW기법은 감지기 간격과 가진원 거리에 크게 제한이 없으므로 감지기 간격과 가진원 간격은 현장조건에 맞게 시험을 수행하였다.

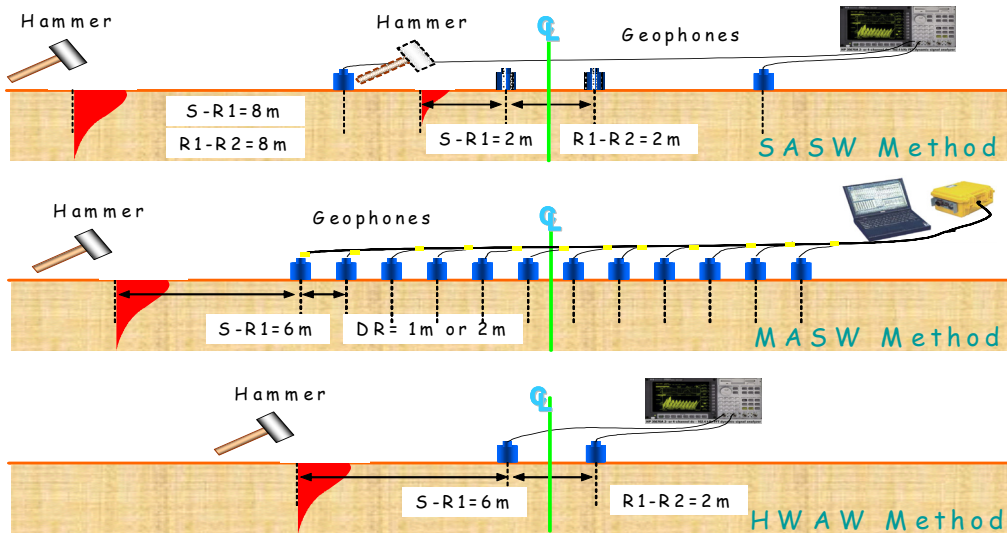


그림 1. 표면파 탐사기법의 개요도

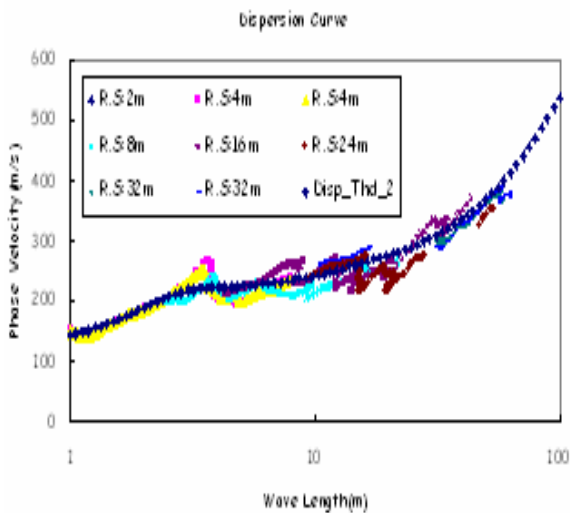
3. 현장 시험결과

3.1 M댐 시험결과

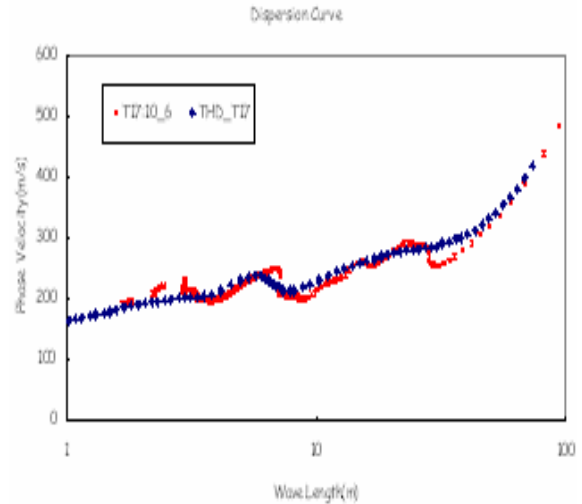
코어존의 전단파속도를 측정하기 위하여 댐마루 중앙부에 측선을 설치하고 SASW 및 HVAW 기법을 수행하였다. SASW 기법은 감지기 간격을 2~48m까지 변화시키며 수행하였고, HVAW 기법은 원래 단일 감지기 구성으로 시험을 수행하나 본 현장에서는 영향요소 평가를 위하여 감지기 간격 및 가진 거리를 변화시키며 시험을 수행하였다. 그림 2 (a), (b)는 SASW 및 HVAW 기법을 통해 획득한 실험 분산곡선 및 역산 수행을 위한 이론분산곡선을 같이 도시하였으며, 획득한 전단파속도 주상도는 그림 2 (c)에 도시하였다.

코어존의 전단파속도는 상부에서 200 ~ 300m/s의 속도를 나타내고 서서히 증가하다 심도 30m 이상에서 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 600m/s 이상의 결과는 일반적인 코어재료의 구성성분이 점토임을 고려할 때 상당히 과대평가 되었다고 판단된다.

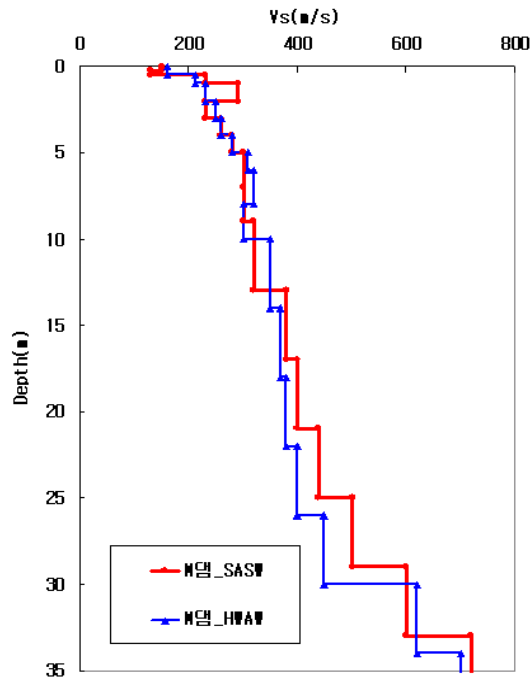
또한, 신뢰성 있는 심도가 파장의 1/3영역인 것을 고려할 때 분산곡선 상에서 획득한 최대 파장 길이가 100m이므로 향후 본 댐의 시험 결과는 심도 35m까지의 전단파속도를 사용하였다.



(a) SASW 시험결과



(b) HVAW 시험결과

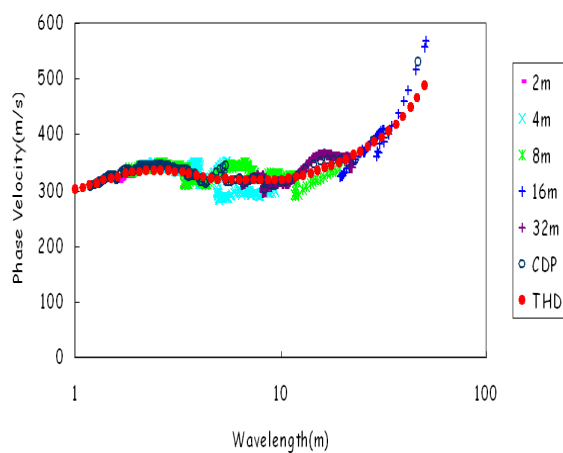


(c) 전단파속도 주상도
그림 2. M댐 시험결과

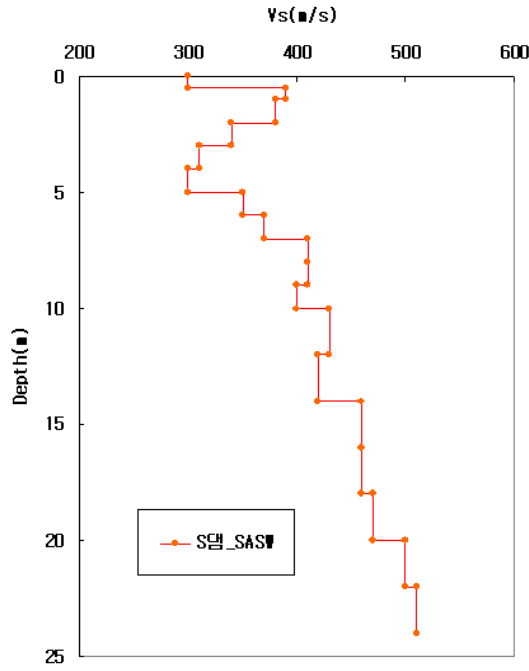
3.2 S댐 시험결과

S댐의 댐마루는 아스팔트포장이 되어 있어 시험 수행 시 다양한 가진을 통하여 넓은 영역의 주파수 성분으로 획득하였다. 감지기 간격을 2m부터 32m까지 늘려가며 시험을 수행하여, 그림 3 (a)와 같은 분산곡선을 도출하여 역산과정을 통해 이론분산곡선을 도출하였다. S댐 코어존의 대표적인 전단파속도는 그림 3 (b)와 같으며, 심도 25m까지 300m/s에서 510m/s까지 도출하였다. 상부 포장층으로 인하여 상부 전단파속도가 다소 크게 산정되어 추후 자료 분석 시 고려하였다.

Experimental Dispersion curve



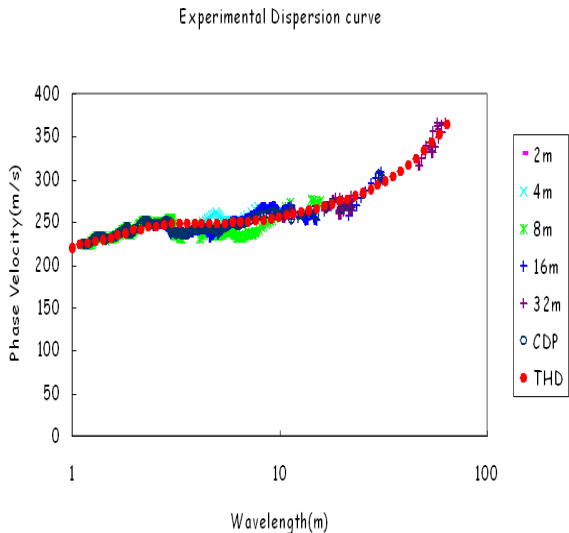
(a) SASW 시험결과



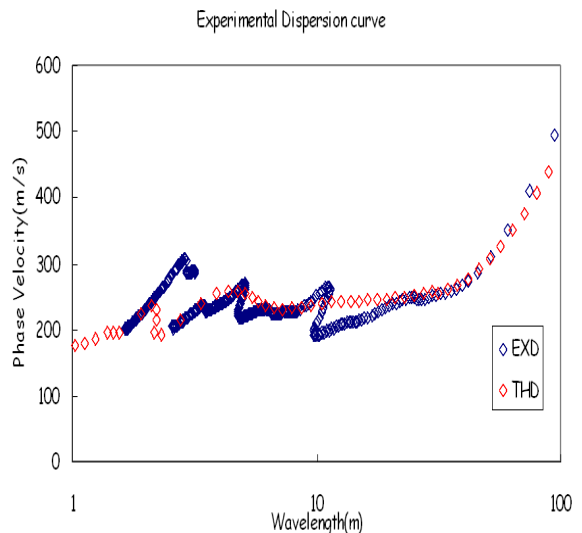
(b) 전단파속도 주상도
그림 3. S댐 시험결과

3.3 SY댐 시험결과

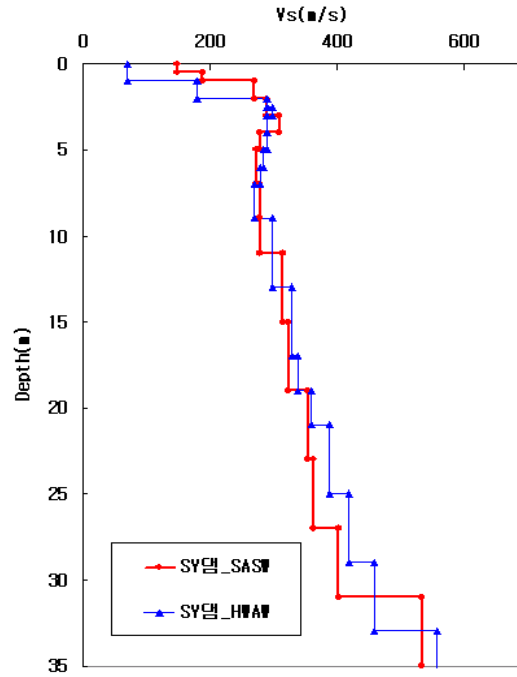
SY댐 코어존의 전단파속도를 측정하기 위해 댐마루에 측선을 선정 한 후 표면파시험을 수행하였다. SASW 기법은 감지기 간격을 2m부터 32m까지 늘려가며 시험을 수행하였으며, HWAW 기법은 가진원 - 감지기 간격 10m, 감지기 간격 2m를 이용하여 수행하였다. 각각의 결과 및 역산을 위한 이론 분산곡선은 그림 4 (a)와 (b)에 나타내었으며, 최종 전단파속도 주상도는 그림 4 (c)와 같다. 심도에 따른 전단파속도는 200 ~ 500m/s까지의 범위로 나타났고 두 시험기법의 결과가 유사하게 나타났다.



(a) SASW 시험결과



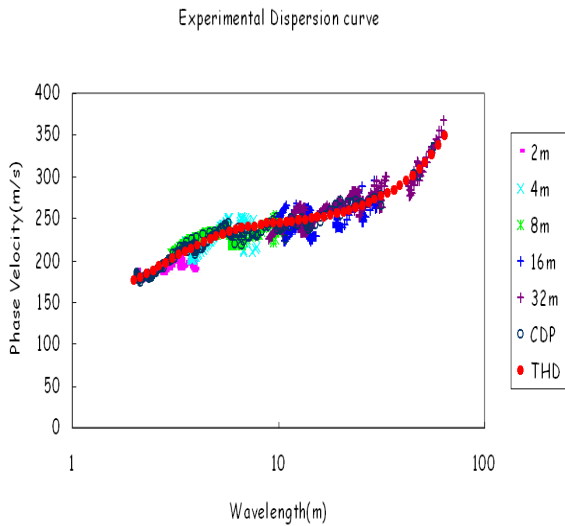
(b) HWAW 시험결과



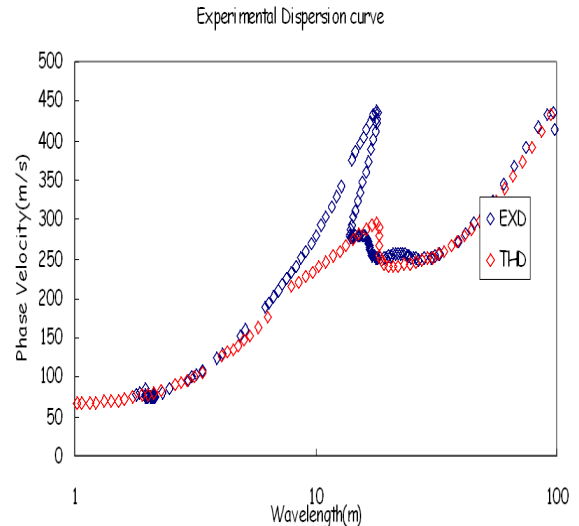
(c) 전단파속도 주상도
 그림 4. SY댐 시험결과

3.4 SA댐 시험결과

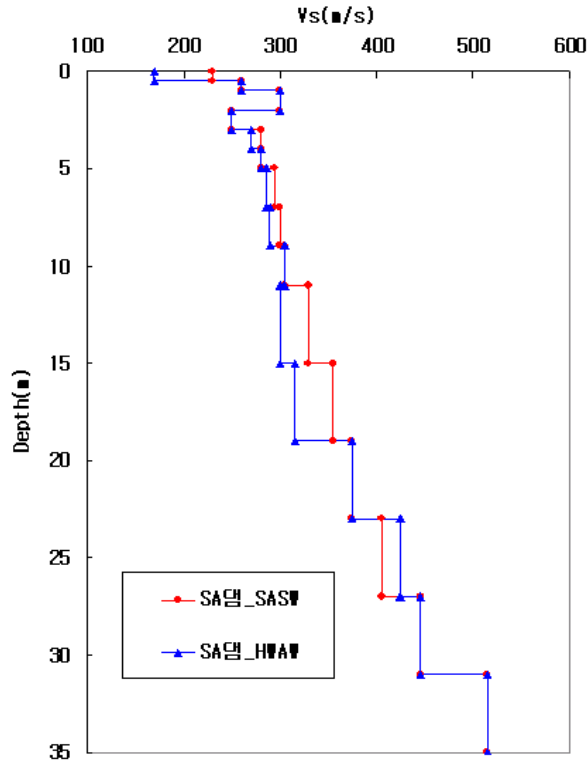
SA댐은 감지기 간격을 2m부터 32m까지 늘려가며 시험을 수행하였으며, HWAW 기법은 가진원-감지기 간격 6m, 감지기 간격 2m를 이용하여 수행하였다. 각각의 결과 및 역산을 위한 이론 분산곡선은 그림 5 (a)와 (b)에 나타내었으며, 최종 전단파속도 주상도는 그림 5 (c)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 심도에 따라 100 ~ 500m/s의 속도분포를 가지며 두 시험기법의 결과가 유사하게 나옴을 확인할 수 있었다.



(a) SASW 시험결과



(b) HWAW 시험결과



(c) 전단파속도 주상도
그림 5. SA댐 시험결과

4. 시험결과 분석

4.1 현장시험결과 분석

그림 6은 현장조사를 통하여 획득한 4개 댐의 전단파속도를 도시한 것으로, 심도 약 2m까지는 전단파속도의 분산정도가 크지만 깊은 심도로 갈수록 분산정도가 줄어드는 것을 확인할 수 있었고, S댐의 경우 타 댐에 비하여 전단파속도가 큰 것을 확인할 수 있었다. 댐 내진해석을 위해서는 코어존의 심도별 전단파속도를 제시하여야 하는데 이를 위해 본 연구에서는 현장조사를 통해 얻은 전단파속도를 5m 간격으로 구분하여 평균 및 표준편차를 그림 7과 같이 도시하였다.

또한, 역산과정을 통해 얻을 수 있는 전단파속도의 분포심도는 통상 분산곡선의 1/2 ~ 1/3이며, 본 시험에서 획득한 분산곡선의 최대 파장이 100m 이하이기 때문에 전단파속도 주상도를 심도 35m까지 도출하였다. 전단파속도는 심도가 깊어짐에 따라 점차 증가하는 경향을 나타내었으며, 평균 속도는 256 ~ 544m/s이고 표준편차는 33에서 64까지 비교적 작게 산정되어 평균속도의 신뢰성이 양호한 것으로 판단된다.

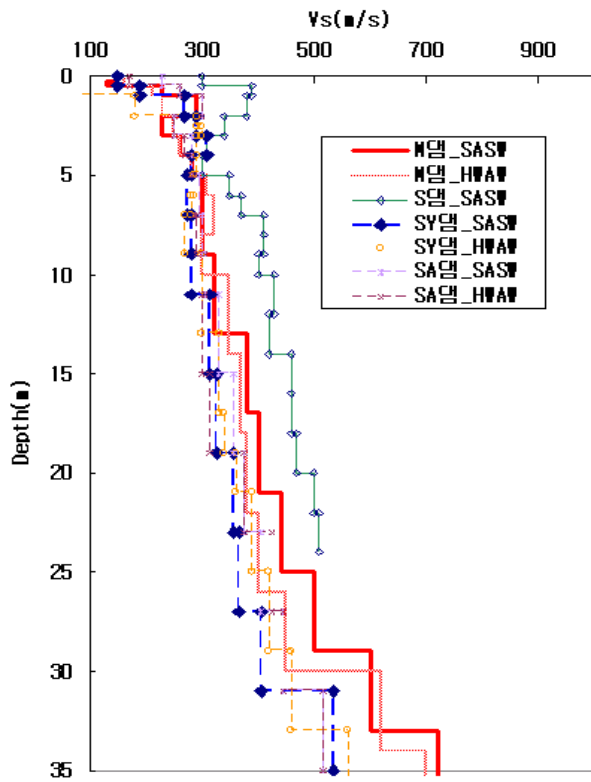


그림 6. 전단파속도 주상도

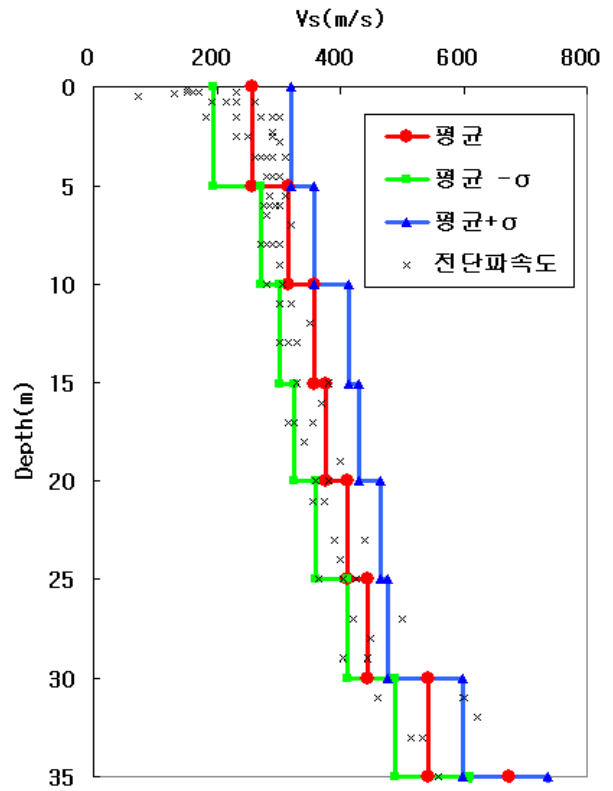


그림 7. 평균 및 표준편차

표 1. 코어존의 전단파속도 분포

Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)	Lower Limit (m/s)	Upper Limit (m/s)
0~5	256	193	320
5~10	315	270	359
10~15	358	302	414
15~20	378	325	430
20~25	413	361	465
25~30	444	412	477
30~35	544	489	598

4.2 현장시험 결과와 기존결과 비교

본 연구에서 도출한 심도별 전단파속도의 비교분석을 위해 기존에 많이 사용되었던 Sawada의 결과(1975), 그리고 하익수·오병현(2008)의 결과와 비교하였다. 심도 0 ~ 5m까지는 본 연구에서 제안한 결과가 Sawada 결과보다 더 크고, 심도 5m 이상 부터는 하익수·오병현(2008) 결과와 Sawada 결과의 하한값, 그리고 본 연구 결과가 유사함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구결과는 국내 필댐의 코어존에 대한 전단파속도의 대표성을 확보하였다고 볼 수 있어, 향후 필댐의 내진해석에 활용할 수 있다고 판단된다.

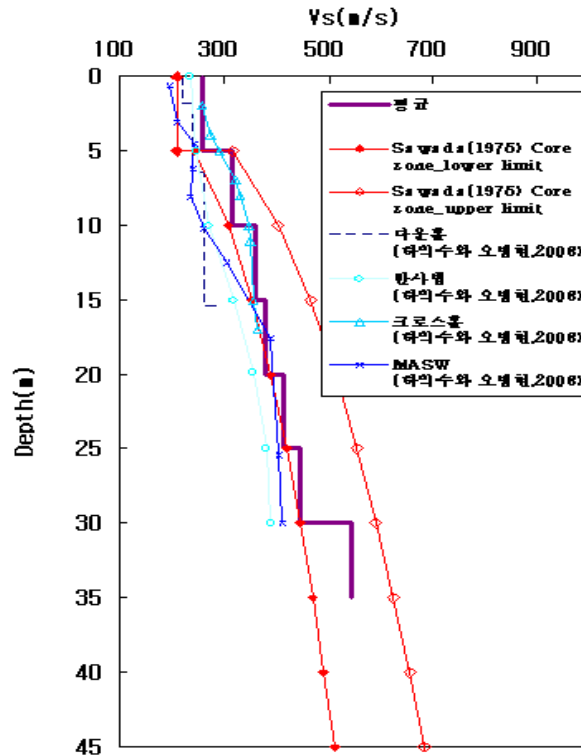


그림 8. 본 연구결과와 기존결과 비교

5. 결론

본 연구에서는 필댐의 내진성능 평가를 수행하는데 필요한 코어존의 다양한 전단파속도를 표면파 탐사기법으로 획득하였다. 현장시험결과를 분석하여 기존에 사용된 결과와의 비교·분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 전단파속도는 심도가 깊어짐에 따라 점차 증가하는 경향을 나타내었으며, 평균 속도는 256 ~ 544m/s이고 표준편차는 33에서 64까지 비교적 작게 산정되어 평균속도의 신뢰성이 양호한 것으로 판단된다
2. 기존 결과와 비교해 볼 때, 심도 5m까지는 더 크게 나오는 것으로 나타났고, 심도 5m 이상에서는 Sawada 결과(1975)의 하한값과 하익수·오병현(2008) 결과와 유사하게 나타났다.
3. Sawada 결과는 일본의 3개 필댐 코어존에 대한 결과이므로 국내 필댐의 심도별 전단파속도를 산정할 시 본 연구결과를 참고하여 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.
4. 본 연구를 통해 얻은 전단파속도의 최고 심도는 35m로서 그 이상의 심도에 대해서는 조사된 결과가 미흡한 상태이므로 다양한 현장조사기법을 활용하여 추가적인 보완이 필요하다.
5. 본 연구결과는 국내 필댐 중에 제한적으로 4개소에서 얻은 전단파속도 특성을 분석한 것으로서 향후 더 많은 현장시험을 통해 분석결과의 신뢰성을 향상하여야 한다.

참고문헌

1. 건설교통부 (1997), “내진설계기준연구(Ⅱ) - 내진설계성능기준과 경제성 평가”, 한국지진공학회.
2. 건설교통부 (2004), “기존댐의 내진성능평가 및 향상요령”, 한국시설기술안전공단.
3. 건설교통부 (2005), “댐 설계기준”, 한국수자원학회.
4. 박형춘, 김동수, 김종태, 박헌준, 방은석, (2008), “HWAW기법을 이용한 지반의 전단파속도 2-D 영상화” 한국지반공학회 2008 봄 학술 발표회, 서울.
5. 방은석, (2006), “신뢰성있는 지반의 전단파속도 주상도 결정을 위한 현장 탄성과 탐사기법 연구”, 박사학위 논문, 한국과학기술원, pp. 201-218.
6. 하익수, 오병현 (2008), “기존댐 코어존의 전단파속도 산정기법 비교 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제24권 10호, pp. 33~43.
7. Stokoe, K.H. and Rosenblad, B.L., “Offshore geotechnical investigation with shear waves” in Roesset, J.M., Ed., Offshore Technology Conference, 1999, pp. 1-9.
8. 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.
9. Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J., “Multi-channel analysis of surface waves”, Geophysics, Vol. 64, No. 3, 1999, pp. 800-808.
10. Park, H.C., Kim, D.S., “Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform”, NDT&E International, Vol. 34, No. 7, 2001, pp. 457-467.
11. 김기석, 권형석, 오세영, “Turn-Key 설계에서의 지반조사·물리탐사와 조사사례”, 2000년 공동 특별강연 논문집, 한국지구물리탐사학회, 한국지반공학회 지반조사위원회, 2000, pp. 155-191.
12. Newland, D.E. (1998), “An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis”, 3rd edition, Addison Wesley Longman Limited.
13. Park, H.C., Kim, D.S. (2001), “Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform”, NDT&E International, Vol. 34, No. 7, pp. 457-467.
14. Sawada, Y. and Takahashi, T. (1975), “Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams”, Proceeding of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.695-702.