

MASW를 이용한 사력댐 코어존 전단파속도 산정 사례 연구

Case Study on Estimation of Shear Wave Velocity in Core Zone of Rockfill Dam Using MASW

이종욱¹⁾ · 하익수[†]

Lee, Jongwook · Ha, Iksoo

ABSTRACT : The purpose of this study is to make case studies on estimation of shear wave velocity in core zone of some rockfill dams by MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) and to compare the results of case studies with those of the empirical method. Furthermore, the purpose is to recommend the range of shear wave velocity in core zone by MASW and to supply the preliminary data for estimation of shear wave velocity in core zone which is needed for dynamic analysis. From the results of case studies and the comparison between the results of case studies and those of empirical equation, it was found that the shear wave velocities obtained by MASW were smaller than those by the empirical recommendation (Sawada & Takahashi) in the depth of more than 10 m. Also, it is recommended that using the lower bound of empirical formulation by Sawada and Takahashi be available and reasonable in case that MASW is not available due to the field condition and the investigation is preliminary.

Keywords : MASW, Core Zone, Shear Wave Velocity, Rockfill Dam, Dynamic Analysis

요 지 : 본 연구의 목적은 MASW를 이용하여 산정한 사력댐 코어존의 전단파속도 산정결과를 사례 분석하고, 그 결과를 기존 경험적 제안식과 비교하여 차이점을 파악하는데 있다. 또한, MASW 결과로부터 산정될 수 있는 코어존의 깊이별 전단파속도 분포 범위를 제시하여 동적해석에 필요한 코어존의 최대전단탄성계수 산정을 위한 기초자료를 제공하는데 있다. 사례분석 및 기존제안식과의 비교 결과, 댐 동적해석을 위해 MASW를 이용하여 코어존의 전단파속도를 산정하는 경우, 심도 10m 이상에서는 거의 Sawada와 Takahashi의 제안식에 비해 작은 값을 산정하게 됨을 확인하였고, 현장여건에 의하거나 예비해석단계에서 MASW에 의한 탐사가 불가능한 경우에는 Sawada와 Takahashi의 제안식 중 하한값에 대한 제안식을 사용하는 것이 보다 합리적임을 제안한다.

주요어 : 다중채널표면파시험, 코어존, 전단파속도, 락필댐, 동적해석

1. 서 론

최근 중국에서 발생한 쓰촨성대지진(2008.5, M 8.0)과 일본에서 발생한 이와테/미야자키지진(2008.6, M 7.2)은 진앙

지 주변지역에 위치한 많은 댐들에 크고 작은 지진피해를 발생시켰다(그림 1, 그림 2 참조). 특히, 중국 쓰촨(四川)성 대지진(M 8.0)은 쓰촨성 일대 약 400개의 중대형댐에 크고 작은 손상을 입힘으로써 지진대비 댐 안전관리에 대한 대책



그림 1. 쓰촨성지진 시 댐 하루사면 피해현황(쯔핑푸댐)



그림 2. 이와테/미야자키지진 시 댐 정상부 피해현황(이시부찌댐)

1) 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원

† 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원(E-mail : geodoc@kwater.or.kr)

마련의 필요성을 부각시키고 있다. 국가 주요시설물인 다목적댐은 제 1종 시설물로 분류되어 “시설물의 안전관리에 관한 특별법”에 의해 최소 5년 주기로 한국시설안전공단에 의해 정밀안전진단을 받고 있으며 진단내용 중에 지진에 대한 안정성을 검토하는 내진성능평가가 실시되고 있다.

사력댐의 지진하중에 대한 안정성을 평가하는 일반적인 방법으로는 등가정적해석법과 동적해석법이 있다. 등가정적해석법은 설계단계나 강도개념에서 댐의 지진시 전반적인 안정성을 파악하고자 하는 경우에 간편하게 적용할 수 있는 방법이지만 하나 평가결과가 안전율로만 대표됨으로 인해 지진시 실질적인 댐의 거동양상을 파악하는 것은 불가능하다. 동적해석법이란 수치해석에 의한 방법으로 등가정적해석법과 달리 댐의 전반적인 거동을 파악할 수 있고, 존(zone) 간 응력전이나, 입력지진하중의 주파수특성 등이 고려될 수 있는 장점을 가지고 있다. 과거에는 경험적 방법인 등가정적해석법이 보수적 해석법으로 채택되어 왔으나 적정지진 규모와 기술적 조건이 충분히 고려되지 못했기 때문에 보다 과학적이고 이론적인 동적해석법의 적용이 최근 보편적인 추세이다(한국수자원학회, 2005).

동적해석으로부터 댐의 거동을 신뢰성 있게 파악하기 위하여 선행되어야 할 작업은 합리적인 축조재료의 입력물성을 산정하는 것이다. 동적변형해석을 위한 주요 물성은 축조재료의 전단탄성계수와 감쇠비이다. 이 중, 변형과 가장 밀접한 관련이 있는 물성은 전단탄성계수이며, 특히 동적해석의 경우에는 저변형율(보통 10⁻³% 이하)에서의 전단탄성계수 즉 최대전단탄성계수이다. 저변형율에서의 전단탄성계수를 효과적으로 산정할 수 있는 방법은 현장시험을 통해 대상 지반의 전단파속도를 측정하고, 측정된 전단파속도, v_s 와 재료의 밀도, ρ 를 이용하여 식 (1)과 같이 최대전단탄성계수, G_{max} 를 산정할 수 있다.

$$G_{max} = \rho v_s^2 \quad (1)$$

Sawada와 Takahashi(1975)는 일본에 위치한 Kiseniyama 댐(높이 95m), Shimokotori 댐(높이 107m), Niikappu 댐(높이 102.8m)에 대해 시추공을 이용하여 측정된 탄성파속도와 댐 코어존 중심에 깊이에 따라 설치된 지진계 관측기록을

표 1. 사력댐에서 코어재료의 댐 심도에 따른 전단파속도 제안식(Sawada와 Takahashi, 1975)

구 분 Z, 심도(m)	전단파속도(V_s) 상한값	전단파속도(V_s) 하한값
	0~5	$V_s=210\text{m/sec}$
5~30	$V_s=180Z^{0.35}\text{m/sec}$	$V_s=140Z^{0.34}\text{m/sec}$
30~		

분석하여 댐 코어존의 심도별 전단파속도(v_s)를 표 1과 같이 제안하였다(Sawada와 Takahashi, 1975). 현재 국내에서는 기존 댐 코어존에 대한 동적물성조사 자료가 부족하여 동적해석시 코어존의 최대전단탄성계수 산정을 위해 필요한 전단파속도는 많은 경우에 Sawada의 경험식에 의한 방법을 따르고 있는 실정이다. 그러나 이 경험적 방법은 일본에 위치한 댐에 대해 현장시험이 수행되었고, 매우 높은 댐을 대상으로 하여 수행된(최소 높이 95m) 현장시험 결과와 지진계 계측 기록 분석에 기초하기 때문에 국내 댐 적용성에 대한 검증이 필요하며, 적용한다고 하더라도 표 1에서 알 수 있듯이 전단파속도의 상한값과 하한값 간의 차가 매우 커서 적용에 있어 상당한 자의적 해석이 이루어질 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 이러한 이유로 최근 국내에서는 직접탐사에 의한 코어존의 전단파속도 산출 필요성이 제기되고 있다.

기존 댐 코어존(core zone)의 전단파속도를 산정하는 현장탐사 기법으로는 시추공을 이용하는 다운홀시험(down-hole test), 크로스홀시험(cross-hole test), 서스펜션 PS 검층법 등이 있고 시추를 하지 않는 지표탐사 방법으로는 MASW (Multi-channel Analysis of Surface Wave, 다중수의 수진기를 이용한 주파수영역 표면파 해석), 굴절법 탄성파탐사, 반사법 탄성파탐사 등(한국지반공학회, 2006)이 있다. 이러한 기법들 중, 안정화된 기존 댐 코어존에 시추공을 형성하는 기술적으로나 정서적으로 매우 어렵다는 점이 고려되어, 비파괴 표면파탐사에 의한 접근방법이 적용되고 있다.

본 연구의 목적은 2003년부터 2007년까지 국내 7개 사력댐 코어존에 대해 수행된 표면파탐사 기법 중 하나인 MASW를 이용하여 산정한 사력댐 코어존의 전단파속도 산정결과를 사례 분석하고, 그 결과를 전술한 Sawada와 Takahashi(1975) 경험적 제안식과 비교하여 차이점을 파악하는데 있다. 또한, MASW 결과로부터 산정될 수 있는 코어존의 깊이별 전단파속도 분포 범위를 제시하여 동적해석에 필요한 코어존의 최대전단탄성계수 산정을 위한 기초자료를 제공하는데 있다.

2. MASW 탐사에 의한 코어존 전단파속도 사례 조사

2.1 MASW 탐사기법 개요

지구물리탐사 분야에서는 심도에 따른 지층의 전단파속도 추정에 표면파의 분산특성을 이용하여 왔다. 일반적으로 주로 지진에 의한 표면파의 분석을 통해 지각구조 등의 지질학적 현상규명을 위해 표면파의 분산특성을 활용하는데 반해, 1980년대 초반 Nazarian과 Stokoe(1983)는 근접 지

표의 전단파속도 추정예 SASW(spectral analysis of surface waves) 기법을 제시하여 적용하였으며 그 후 많은 지반공학 분야에 응용되어왔다. 한편, Park 등(1999)은 단일 수신기를 사용하는 기존의 SASW 방식을 다중 수신방식으로 전환하여 보다 정밀한 표면파의 분산곡선을 도출할 수 있는 MASW(multichannel analysis of surface waves)를 개발하고 현장에 적용할 수 있는 기법을 제시하였다.

SASW는 지반이 수평방향으로 균질등방성인 층상 구조로 구성되어 있으며 레일리(Rayleigh)파의 고유모드가 주요하다는 가정조건을 가지고 수행된다. 그러나 SASW는 한쌍의 수신기만을 사용하기 때문에 노이즈에 민감하다는 단점이 있어 Park 등(1998, 1999)은 SASW 보다 더욱 신뢰성 있는 S파속도(전단파속도)를 얻을 수 있는 MASW(Multi-channel analysis of surface waves)를 개발하였다. MASW 기법의 최근 목표는 고차 모드의 레일리(Rayleigh)파가 대심도의 지질학적인 정보를 반영하기 때문에 레일리(Rayleigh)파의 고유모드보다 고차모드를 포함하는 것이다.

SASW는 한 지점에서 충격 또는 진동을 가하고 일정 거리만큼 떨어진 두 위치에서 충격이나 진동으로 인한 지반 및 구조물의 진동을 측정하여 두 위치에서 수신된 표면파의 위상각 차로부터 분산곡선을 결정한다. 만일 깊은 심도까지 측정을 하려면 수신기의 간격을 변화시켜가면서 많은 횡수를 반복 측정해야 하는데 이는 표면파의 짧은 파장(고주파수 성분)은 얇은 심도 지반의 물성을 대표하며 긴 파장(저주파수 성분)은 깊은 심도 지반의 물성을 대표하기 때문이다. 이러한 번거로운 현장작업은 SASW 탐사의 효율성과 효과에도 불구하고 현장 적용을 제약하는 요인으로 작용하는데 MASW는 이러한 약점을 극복하기 위해 시도된 조사기법으로써, 한 쌍의 수신기를 사용하는 SASW 기법에 비해 보통 12~48개의

수진기를 사용하여 한 번의 음원발생으로부터 얇은 심도의 정보를 가지고 있는 짧은 파장의 표면파와 깊은 심도의 정보를 가지고 있는 긴 파장의 표면파를 동시에 획득, 분산곡선의 계산 및 역산을 통해 지반의 전단파 속도구조를 결정한다.

MASW 기법은 주파수-파수(F-K) 또는 슬로우니스-주파수($p-\omega$) 스펙트럼(McMechan과 Yedlin, 1981)을 이용한 분산곡선을 만든다.

Park 등(1998)은 고차모드의 레일리(Rayleigh)파 분산곡선을 구분하는데 유용한 파장 변환법을 개발하였다. Zhang 등(2003)은 Park 등(1999)이 제안한 파장변환법이 F-K 법보다 더욱 신뢰성 있는 고유모드의 레일리(Rayleigh)파 분산속도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

MASW가 하부지반의 물리적 특성을 추정할 수 있는 비파괴 조사법으로 지반공학, 수리학 및 여타 응용분야에서 광범위하게 이용되고 있음에도 불구하고 SASW 기법과 마찬가지로 지반은 수평방향으로 균질등방성인 층상구조로 구성되고 하는 기본 가정조건을 포함하고 있어, 댐 조사 등과 관련된 실무 적용에는 다소 제한적이라 할 수 있다. 김동수 등(2001)은 경사진 지층을 통해 발생된 표면파는 수평지층 모델에 의한 것과 비교하여 다른 특성을 가질 수 있음을 보였는데, 바로 이러한 표면파기법의 적용상의 제한사항을 보여준 것이라 할 수 있다. 이러한 제한사항에도 불구하고, 기존댐에 시추공을 형성하는 것은 많은 기술적, 정서적 제약이 따르기 때문에 공학적 견지에서 최근 대부분의 댐 정밀안전진단시 코어존의 전단파속도는 MASW 기법에 의해 산정되고 있다.

2.2 탐사 사례조사 대상댐

MASW에 의한 코어존 전단파속도 탐사는 본 연구에서 는 표 2와 같이 임하댐, 주암댐, 주암조절지댐, 대청댐의 4

표 2. 대상댐 및 MASW탐사 개요

댐 명	분 류	형식	준공 년도	높이 (m)	길이 (m)	탐사구간 및 축선길이	탐사개요
임하댐	다목적	RF	1993	73.0	515	18+10~23+10 (100m)	- 수신기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 - 2m간격으로 51번의 자료획득
주암댐	다목적	RF	1992	58.0	330	11+04~15+04 (80m)	- 수신기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 - 2m간격으로 41번의 자료획득
주암 조절지댐	다목적	RF	1992	99.9	562	21+00~25+00 (80m)	- 수신기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 - 2m간격으로 41번의 자료획득
대청댐	다목적	CG+RF	1981	72.0	495	6+11~12+09 (118 m)	- 수신기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 - 2m간격으로 60번의 자료획득
사연댐	용수전용	RF	1965	46.0	300	5+08~10+08 (100m)	- 수신기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 - 2m간격으로 51번의 자료획득
영천댐	용수전용	RF	1980	42.0	300	2+05~14+15 (250m)	- 수신기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 - 2m간격으로 51번의 자료획득
수어댐	용수전용	RF	1978	67.0	430	16+07~21+07 (100m)	- 수신기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 - 2m간격으로 51번의 자료획득

개 다목적댐과 사연댐, 영천댐, 수어댐의 3개 용수전용댐, 총 7개의 높이 45m 이상인 중심코어형 사력댐과 복합형댐(콘크리트부+사력댐부)의 사력댐부를 대상으로 코어존에서 수행한 MASW탐사결과를 사례연구 대상으로 하였다.

코어존의 전단파속도 분포양상을 파악하기 위하여 대상댐 모두는 댐마루 중앙부의 일부구간에서 MASW탐사가 실시되었다. 충격음원으로 8~10 lb의 Sledge Hammer를 사용하였으며 충격음원으로부터 수신기까지의 거리(Offset)는 15~20m이다. 수신기는 24채널의 2.5Hz 지오폰을 1m 간격으로 설치한 후, 충격음원과 수신기 전체 배열을 2m 씩 전진시키면서 80~250m의 탐사측선에 대하여 41~60 회의 탐사를 실시하였다.

2.3 탐사결과 요약

댐체에서 코어존의 전단파속도는 지층의 다짐 정도와 심도 증가에 따른 구속압의 증가 등에 의해 결정되며 구성재료의 차이도 다소 영향을 줄 수 있다. 지층의 다짐도가 높고 구속압이 높으면 매질 간의 파의 전달이 원활하여 파의 속도가 높아지므로 일반적으로 심도가 깊어질수록 전단파속도는 증가하게 된다.

임하댐은 전기비저항탐사 결과 특별한 이상구간이 나타나지 않아 최대 단면부를 탐사구간으로 설정하였다. 탐사 결과는 심도가 깊어질수록 전단파속도는 증가하는 일반적인 경향을 나타내고 있으며 동일 심도는 전반적으로 균질한 속도분포를 나타내어 표층에서 200m/sec 정도를 나타내고 심부로 갈수록 꾸준히 증가하여 심도 10m 부근에서 300m/sec, 심도 20m 부근에서 500m/sec 그리고 심도 30m에 이르렀을 때 약 600m/sec 정도인 것으로 조사되었다. 그림 3은 탐사결과 나타난 심도별 평균 전단파속도 분포인데 전단파속도가 심부로 갈수록 증가하는 것을 잘 보여주고 있다.

주암댐의 탐사구간은 전기비저항탐사의 결과에서 상대

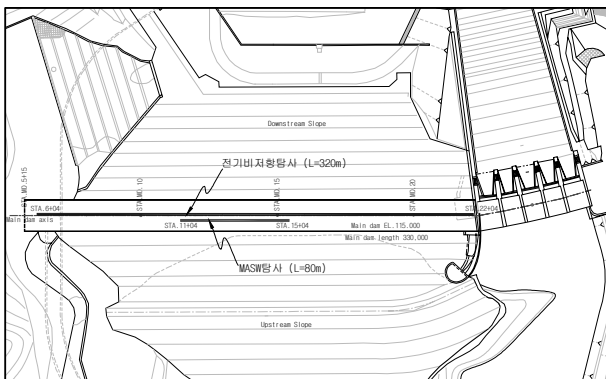


그림 3. MASW 탐사위치도(주암댐 사례)

적 저비저항치 분포를 나타내는 구간으로 설정하였다. 탐사결과 전단파속도의 분포는 그림 5와 같이 대체적으로 수평적 층서 구조로 200~600m/sec의 분포를 나타내고 있으며 심도에 따라 전단파속도가 증가하는 일반적인 경향을 나타내었으며 특별히 이상속도대는 나타나지 않았다. 심도에 비례하여 전단파속도가 증가하는 것은 상부하중에 의한 토압의 증가와 이에 따른 구속압력 증가를 의미하며 체체의 전체적인 배경속도치가 약 300m/sec 전후로 분포하는 것으로 미루어 지반은 안정적인 상태를 유지하고 있는 것으로 사료된다.

주암조절지댐의 탐사구간은 전기비저항탐사의 결과에서 상대적 저비저항치 분포를 나타내는 구간으로 설정하였다. MASW탐사 결과의 전체적인 배경치는 그림 6과 같이 약 300m/sec 전후이며, 심도 10m 부근의 부분적인 저속도 구

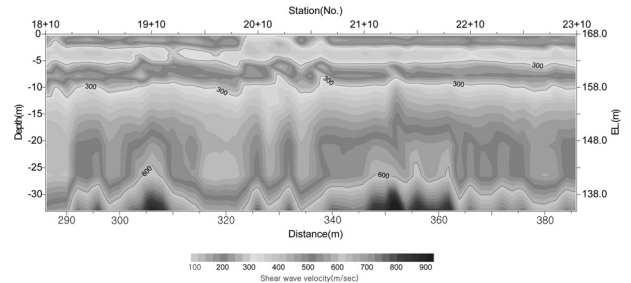


그림 4. MASW탐사에 의한 코어존 전단파(V_s) 속도분포(임하댐, 한국수자원공사, 2007)

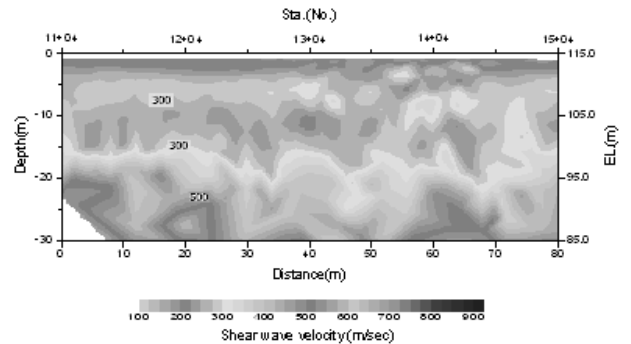


그림 5. MASW탐사에 의한 코어존 전단파(V_s) 속도분포(주암댐, 한국수자원공사, 2006)

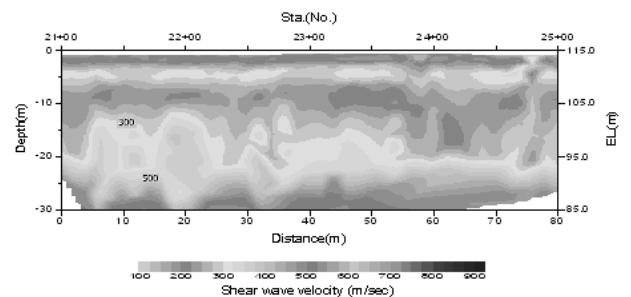


그림 6. MASW탐사에 의한 코어존 전단파(V_s) 속도분포(주암조절지댐, 한국수자원공사, 2006)

간을 제외하면 대체적으로 수평 균질한 속도 분포를 갖는다. 속도는 고주파 영역인 천부지반(심도 15m 이상)에서 200m/sec 내외이며, 저주파 영역의 심부지반에서는 350~550m/sec의 값을 나타내고 있다. 심부로 갈수록 전단파속도가 증가하는 양상을 나타내며, 특별한 이상대는 관찰되지 않았다. 시추등의 추가조사가 실시되지 않았고 문헌자료에서도 중심코어층에 대한 정보를 획득할 수 없었기 때문에 댐체의 내부상태에 대해 확정적인 결론을 내릴 수는 없지만, 비저항분포가 수평적인 층상구조를 이루고 있으며 전단파속도 분포의 결과에서 특별한 이상이 보여지지 않고 하류측 지반에 대한 육안조사와 누수량 측정에도 특별한 이상이 나타나지 않았으므로 제체의 안정성에는 큰 문제가 없이 차수기능을 유지하고 있는 것으로 판단된다.

대청댐의 전단파속도 분포는 그림 7과 같으며 전단파속도는 심도가 깊어짐에 따라 증가하고 전반적으로 250~600m/sec의 범위를 보이며 수평적으로 균질한 것으로 조사되었다.

사연댐은 전기비저항탐사 결과 댐 제체에서 특별한 이상구간이 탐지되지 않아 댐체의 최대단면부를 포함하는 구간을 탐사구간으로 설정하였다. MASW 탐사결과 댐체의 전단파속도는 그림 8과 같이 250~550m/sec의 범위를 보이고 있으며 심부로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있

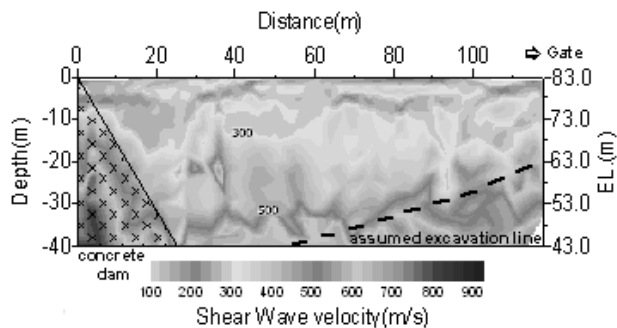


그림 7. MASW탐사에 의한 코어존 전단파(Vs) 속도분포(대청댐, 한국수자원공사, 2005)

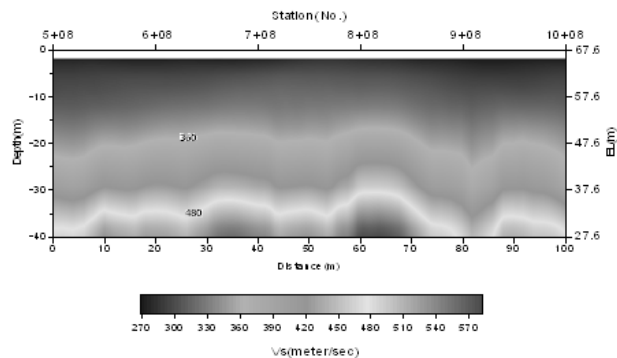


그림 8. MASW탐사에 의한 코어존 전단파(Vs) 속도분포(사연댐, 한국수자원공사, 2004)

다. 그 이유는 심부로 갈수록 압밀에 의해 간극률이 감소하여 입자사이의 접촉면적이 넓어지게 되고 이 때 체적밀도의 증가율보다 탄성계수의 증가율이 훨씬 커지게 되어 결과적으로 탄성파속도가 증가하게 된다.

영천댐 MASW 탐사결과 댐체의 전단파 속도는 그림 9와 같이 150~500m/sec의 범위를 보이고 있으며 심부로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 좌·우안의 600m/sec 이상 전단파속도값을 가지는 기반암과 그 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

수어댐은 전기비저항 탐사결과 댐체에서 특별한 이상구간이 탐지되지 않아 저비저항대로 판단되는 구간과 양호한 것으로 판단되는 구간을 모두 포함하는 구간을 탐사구간으로 설정하였다. 전단파속도 산정결과는 그림 10과 같이 대략 200~500m/sec의 범위에 있음을 알 수 있으며 심도 25m~38m 하부에 나타나는 500m/sec 이상의 고속도대는 기반암인 것으로 판단되었다. 마찬가지로 전단파의 속도분포는 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 탐사결과 탐지된 속도 이상대는 두 개소이다. 먼저 Sta. 16+10~17+17 부근의 심도 20~30m 구간은 같은 심도내의 다른 구간에 비해서 약 100m/s 정도 낮은 속도를 보이고 있으며 Sta. 20+17의 하부지반은 같은 심도내의 다른 구간에 비해 심도별로 전단파 속도가 150~500m/s 정도 낮은 값을 보이고 있어 두 부위는 다른 부위에 비해 댐체가 느슨한 상태인 것으로 판단된다. 특히 Sta. 20+17 위치는 전기비저항 탐사에서 탐

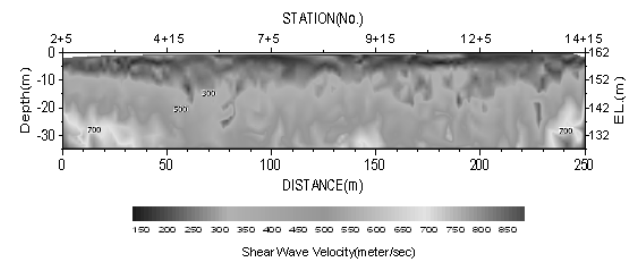


그림 9. MASW탐사에 의한 코어존 전단파(Vs) 속도분포(영천댐, 한국수자원공사, 2004)

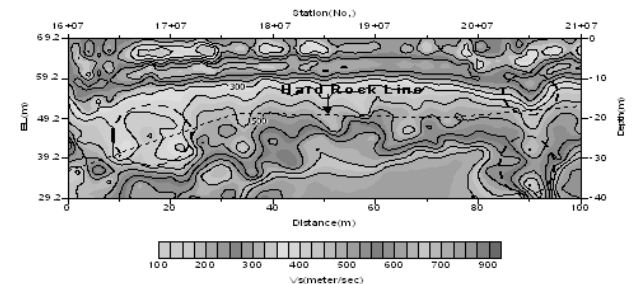


그림 10. MASW탐사에 의한 코어존 전단파(Vs) 속도분포(수어댐, 한국수자원공사, 2004)

지된, 저비저항 이상대와 위치 및 심도가 일치하고 있다.

사연댐을 제외한 나머지 댐에서의 천부 저속도층과 주암조절지댐(그림 6)의 좌측 하부에서의 저속도층은 상대적으로 느슨한 영역의 영향으로 예상되나 MASW탐사와 병행하여 수행된 전기비저항탐사 결과에서는 다소 불균질성을 내포하지만 전반적으로는 균질한 상태로서 특별한 이상대(공동 등) 및 연약대는 존재한다고 판단할 만한 징후는 보이지 않았다.

3. 코어존 전단파속도 산정 결과 분석

Sawada와 Takahashi(1975)는 높이 64.5m~107m의 일본의 4개 대형 사력댐(코어존에 대한 조사는 높이 95m 이상 3개댐에 대해서만 수행)에 대해 시추공을 이용하여 측정된 탄성파속도와 댐 깊이에 따라 설치된 지진계 관측기록을 분석한 결과 속도분포는 댐의 심도와 관련이 있으며 특히 전단파속도의 경우 심도와 식 (1)과 같은 관계가 있음을 제시하였다.

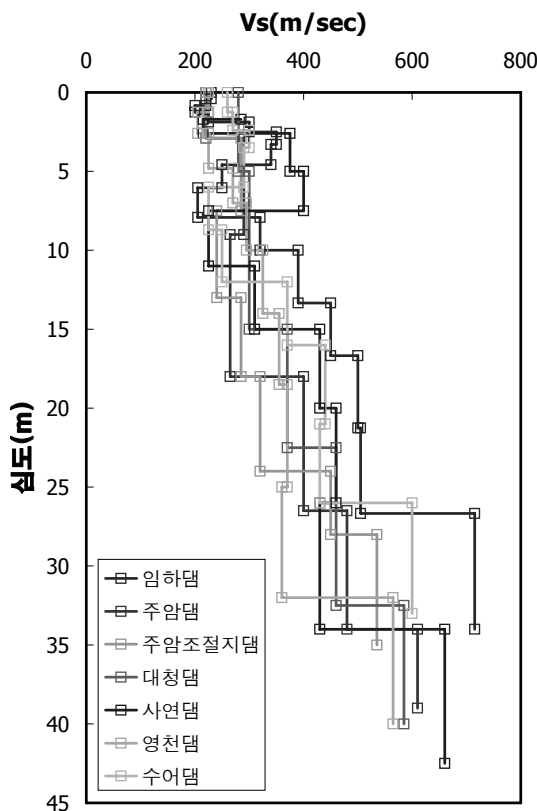
$$V_s = aZ^b \quad (1)$$

여기서 V_s 는 전단파속도, Z 는 댐의 표면으로부터의 심

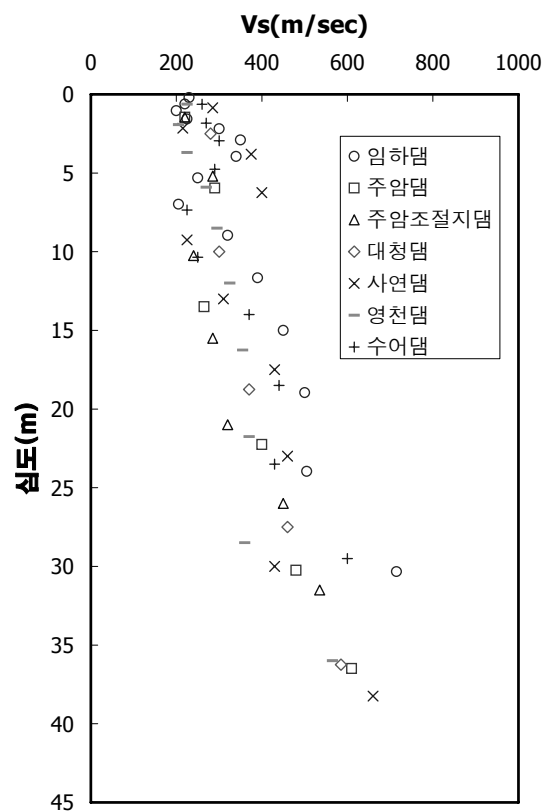
도, a 와 b 는 상수(코어존의 경우 a 는 140~180, b 는 0.29~0.37)이다.

4개 다목적댐과 3개 용수전용댐 총 7개의 중심코아형 사력댐과 복합댐의 사력댐부 코어존에 대한 MASW 탐사 결과, 코어존에서의 전단파속도 분포는 그림 11 (a)와 같이 수평적 층서구조로 깊이에 따라 200~700m/sec의 분포를 나타내고 있으며 Sawada와 Takahashi(1975)의 연구결과와 유사하게 심도에 따라 전단파속도가 증가하는 경향을 나타내었다. MASW에 의한 전단파속도 분포는 41~60번의 탐사결과 중 표면파의 분산이 가장 잘 일어나고 신호대 잡음(S/N)비가 높은 위치에서 획득한 결과를 이용하였으며 이 결과는 내진성능 검토의 입력자료로도 활용되었다.

본 연구에서 사례 조사한 MASW 탐사에 의한 7개 사력댐 코어존의 전단파 속도(V_s)의 심도에 따른 영향을 분석하기 위해 수평적 층서 구조형 전단파 속도 분포(그림 11, (a))를 그림 11의 (b)와 같이 각 층에서의 중앙값으로 도시하고 그 결과로부터 식 (1)의 관계식을 도출해 보았다. 그림 12와 같이 좌표축을 대수(logarithmic)좌표로 변환하고 X축과 Y축을 반전시켜 심도에 따른 전단파 속도(V_s)의 변화를 식 (2)와 같은 직선의 수식으로 나타내어 식 (1)의 상수 a 와 b 를 산정하였다.



(a) 층서 구조형 속도분포



(b) 층의 중앙값으로 변환한 속도분포

그림 11. MASW에 의한 사력댐 코어존 전단파속도(V_s) 산출 결과

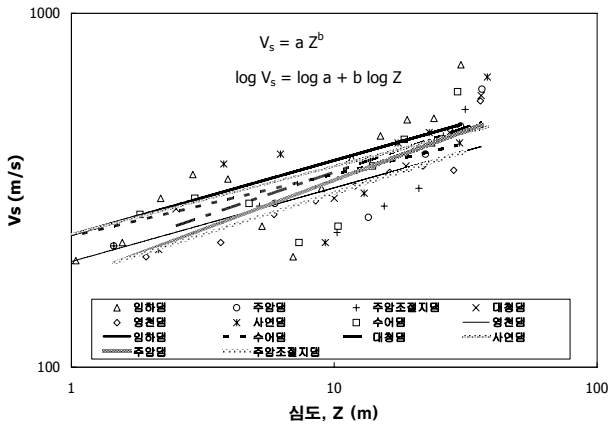


그림 12. 국내 주요댐 코어존의 심도에 따른 전단파속도 관계

표 3. 7개 사력댐 코어존의 깊이별 전단파속도 분포 관계식

구 분	a	b	상관계수(R ²)
임하댐	236.47	0.2103	0.6213
주암댐	177.74	0.2785	0.7661
주암조절지댐	180.6	0.2354	0.6206
대청댐	199.07	0.2518	0.7709
사연댐	237.49	0.1918	0.4650
영천댐	198.76	0.2084	0.7715
수어댐	234.42	0.175	0.4807

$$\log V_s = \log a + b \log z \quad (2)$$

여기서 Vs는 전단파속도, Z는 댐의 정상부로부터의 심도, a와 b는 상수이다.

산정된 7개 댐 코어존의 전단파속도 분포 관계식의 상수(a와 b)와 상관계수(R²)를 표 3에 나타내었다. a는 178~237, b는 0.18~0.28의 범위를 나타내어 최소 높이 95m 이상의 대댐을 대상으로 한 Sawada와 Takahashi(1975)의 결과(a=140~180, b=0.29~0.37)와는 다소 차이를 보였다. 이것은 조사방법간의 오차와 축조재료 및 시공방법의 차이 등에 기인하는 것으로 판단된다.

국내 주요 사력댐에 대하여 분석된 코어존의 전단파속도 분포와 표 1의 Sawada와 Takahashi의 제안식에 의한 분포를 비교하기 위하여 그림 13과 같이 심도별 전단파속도로 함께 도시해 보았다. 심도 10m 이하의 저심도에서는 사례 분석된 결과의 상·하한값은 Sawada와 Takahashi에 의해 제안된 상·하한 범위와 일치하는 것으로 나타났으나, 심도 10m 이상에서는 심도가 깊어질수록 사례 분석된 결과는 상·하한값에 의한 범위가 Sawada와 Takahashi의 제안식과는 달리 그 폭이 깊이에 따라 상대적으로 커지지 않고, 값의 범위는 제안식에 비해 작은 값을 나타냄을 확인할 수 있다.

본 사례 분석결과에 한해 MASW에 의해 산정된 코어존

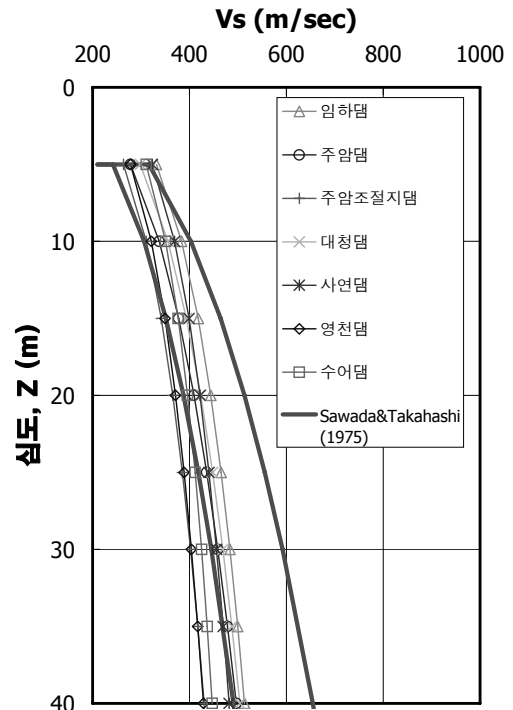


그림 13. 사력댐 코어존의 깊이별 전단파 속도(Vs) 분포 비교

의 전단파속도는 Sawada와 Takahashi(1975)의 제안식에 의해 산정된 결과에 비해 심도 10m 이상에서는 전단파속도를 작게 산정하고 있고, 상·하한 값의 차는 상대적으로 더 작음을 확인할 수 있었다.

이상과 같은 결과로 볼 때 댐 동적해석을 위해 MASW를 이용하여 코어존의 전단파속도를 산정하는 경우, 심도 10m 이상에서는 거의 Sawada와 Takahashi(1975)의 제안식에 비해 작은 값을 산정하게 됨을 인식해야 함을 확인하였고, 현장여건에 의하거나 예비해석단계에서 MASW에 의한 탐사가 불가한 경우에는 Sawada와 Takahashi(1975)의 제안식중 하한값에 대한 제안식을 사용할 것을 제안한다.

4. 결 론

2003년부터 2007년까지 국내 7개 사력댐에서 MASW를 이용하여 산정한 사력댐 코어존의 전단파속도 산정결과를 사례분석하고, 그 결과를 기존 경험적 제안식과 비교·분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 4개 다목적댐과 3개 용수전용댐, 총 7개의 중심코아형 사력댐과 복합댐의 사력댐부 코어존에 대한 MASW 탐사결과 코어존에서의 전단파속도 분포는 수평적 층서구조로 깊이에 따라서 200~700m/sec의 분포를 나타내었으며, Sawada와 Takahashi(1975)의 기존 연구결

과와 마찬가지로 심도에 따라 전단파속도가 증가하는 경향을 나타내었다.

- (2) 심도 10m 이하의 저심도에서는 MASW에 의해 산정된 사력댐 코어존의 전단파속도의 상·하한값은 Sawada와 Takahashi(1975)에 의해 제안된 상·하한 범위와 일치하는 것으로 나타났다.
- (3) MASW에 의해 산정된 사력댐 코어존의 전단파속도는 Sawada와 Takahashi(1975)의 제안식에 의해 산정된 결과에 비해 심도 10m 이상에서는 전단파속도를 작게 산정하나, 상·하한값의 차는 상대적으로 더 작음을 확인하였다.
- (4) 댐 동적해석을 위해 MASW를 이용하여 코어존의 전단파속도를 산정하는 경우, 심도 10m 이상에서는 거의 Sawada와 Takahashi(1975)의 제안식에 비해 작은 값을 산정하게 됨을 확인하였고, 현장여건에 의하거나 예비 해석단계에서 MASW에 의한 탐사가 불가능한 경우에는 Sawada와 Takahashi(1975)의 제안식 중 하한값에 대한 제안식을 사용하는 것이 보다 합리적임을 제안한다.

본 연구에서의 사례분석 결과는 각 댐에서 수행된 MASW 탐사장비 및 조사자별 차이는 고려되지 않은 결과임에 유념해야 하며, MASW 탐사기법 자체에 대한 정확도 판정보다는 현장에서 탐사 시에 그 결과에 대한 직관적 검증을 위한 기초자료로 이용될 수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. 김동수, 윤종구, 이병식, 박형춘 (2001), 경사지반에서 SASW 기법 적용시 수치해석을 이용한 영향요소 연구, *한국지반공학회논문집*, 제17권, 제1호, pp. 77~84.
2. 한국수자원공사 (2005), *대청댐 제2차 정밀안전진단 보고서*,

한국시설안전기술공단, pp. 91~93.

3. 한국수자원공사 (2004), *사연댐 제2차 정밀안전진단 보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 65~76.
4. 한국수자원공사 (2004), *수어댐 제2차 정밀안전진단 보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 58~75.
5. 한국수자원공사 (2007), *임하댐 제1차 정밀안전진단 보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 40~54.
6. 한국수자원공사 (2004), *영천댐 제2차 정밀안전진단 보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 61~74.
7. 한국수자원공사 (2006), *주암댐 제1차 정밀안전진단 보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 93~107.
8. 한국수자원학회 (2005), *댐설계기준*, 건설정보사, pp. 453~471.
9. 한국지반공학회 (2006), *지반구조물의 내진설계*, 지반공학 시리즈 8, 구미서관, pp. 51~197.
10. McMechan, G.A. and Yedlin, M.J. (1981), Analysis of dispersive waves by wave field transformation, *Geophysics*, Vol. 46, No. 6, pp. 869~874.
11. Nazarian, S. and 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, *Transport. Res. Record*, 930, pp. 38~45.
12. Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1996), Multichannel analysis of surface waves using vibroseis (MASWV), *Society of Exploration Geophysics*, Expanded Abstracts, Vol. 15, No. 1, pp. 68~71.
13. Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1998), Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record, *Society of Exploration Geophysics*, Expanded Abstracts, Vol. 17, No. 1, pp. 1377~1380.
14. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999), Multi-channel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol. 64, No. 32, pp. 800~808.
15. Sawada, Y. and Takahashi, T. (1975), Study on the material properties and the earthquake behavior of rockfill dams, *Proc. 4th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, pp. 695~702.
16. Zhang, S.X., Chan, L.S., Chen, C.Y., Dai, F.C., Shen, X.K. and Zhong, H. (2003), Apparent phase velocities and fundamental-mode phase velocities of Rayleigh waves, *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, Vol. 23, No. 7, pp. 563~569.

(접수일: 2008. 9. 8 심사일: 2008. 10. 8 심사완료일: 2008. 10. 31)