MASW 조사를 통한 사력댐 코어존 동적물성의 평가
Estimation of Dynamic Characteristics of Core Zone of Rockfill Dam by Multi-channel Analysis of Surface Waves

이종욱[1], Jong-Wook Lee, 하익수[2], Ik-Soo Ha, 오병현[3], Byung-Hyun Oh

[1] 한국수자원공사 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher, Dam Safety Research Center, K-water
[2] 한국수자원공사 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher, Dam Safety Research Center, K-water
[3] 한국수자원공사 댐안전연구소 소 장, Director, Dam Safety Research Center, K-water

SYNOPSIS : Seismic safety analysis of rockfill dams are consist of the stability analysis as an simplifed method and the dynamic analysis as an detailed method. When high risk dams such as Multi-purpose dams were often applied detailed method by dynamic analysis, dynamic properties of dam materials such as shear modulus are considered as most important factor. Dynamic material properties such as shear modulus had to be investigated by cyclic triaxial test et al. during design and construction stage but these were not conducted because of the condition of domestic seismic design technique. MASW and SASW methods had been applied as a non destructive method to investigate dynamic material properties of existing rockfill dam, has no problems in dam safety at present. These methods were usually performed under the assumptions that the subsurface can be described horizontally homogeneous and isotropic layers. Recent studies(Marwin, 1993, Kim, 2001) showed that surface waves generated through inclined structures have different characteristics from those through a horizontally homogeneous layered model. further Kim et al(2005) and Min and Kim(2006) showed that central core type rockfill dam overestimated the shear wave velocities as increasing the depth through the 3D numerical modelling dut to the effect of outer rockfill and geometrical reasons
In this study the results of shear wave velocities of seven rockfill dams form comprehensive facility review, was carried out from 2003 to 2007, were collected and analysed to establish the shear wave velocity distribution characteristics in increasing confining stress in rockfill dams and surface wave velocity ranges in rockfill dam through MASW and the limitation in application are discussed to be utilized as an reference value for dynamic analysis.

Key words : Rockfill Dam, MASW, Shear Wave Velocity, Shear Modulus

1. 서 론

일본의 고베지진 이후 국내의 지진에 대한 관심과 연구가 지속되어 국가주요시설물에 대한 내진설계기준(건교부, 1997)이 제정되었으며 2001년에는 댐 설계기준(건교부)이 개정되었다. 국가주요시설물인 다목적댐은 제1종 시설물로 분류되어 5년 주기로 한국시설안전기술공단에 의해 정밀안전진단을 받으며 이때 지진에 대한 안정성 검토를 위해 내진성능평가를 실시하고 있다.

사력댐에 대한 내진성능평가는 사면안정해석에 의한 간편법과 동적해석에 의한 상세해석법으로 구분되며 다목적댐과 같은 내진특등급댐은 동적해석에 의한 상세해석법이 많이 사용되는데 이 경우 전단탄성계수와 같은 댐 축조재료의 동적물성이 가장 중요하게 된다. 전단탄성계수와 같은 동적물성은 건설

중에 진동삼축압축시험 등을 통해 조사되어야 하나 과거 국내의 내진설계기술 여건상 대부분의 경우 시행되지 못한 실정이었다. 현재 정적인 상태에서 안정성에 문제가 없는 기존 사력댐 제체의 동적물성을 비파괴적으로 획득할 수 있는 방법으로는 표면파 기법(MASW, SASW)이 많이 적용되어 왔으나 이 방법은 주로 수평지반에 대한 지반조사에 많이 활용되는 방법으로 최근의 연구(Marwin, 1993, 김동수, 2001)를 통해 경사지층에 기존의 층상구조 해석을 적용할 경우 왜곡된 결과를 도출할 가능성을 확인하였다. 또한, 김형수 등(2005b)과 Min과 Kim(2006)은 은 3차원 탄성파 수치모델링을 통해 중심 코어형 구조를 갖는 사력댐은 측정심도가 깊어질수록 댐 외곽부 사력존의 영향과 댐의 기하학적 형상에 의해 전단파 속도가 과대평가 될 가능성이 있음을 밝혔다.

이와 같은 배경으로 본 연구에서는 2003년부터 2007년까지 정밀안전진단시 사력댐 코어존에 실시한 7개댐의 전단파 속도 조사결과를 수집·분석하여 국내 사력댐 코어존의 구속압의 증가에 따른 전단파 속도분포 특성을 파악하였으며 향후의 내진설계 및 정밀안전진단시의 해석자료로서 이용할 수 있도록 MASW 탐사에 의한 사력댐 코어존의 전단파 속도의 범위와 그 적용의 제한점에 대하여 논의하였다.

2. 동적물성의 현장조사기법

2.1 물리탐사

일반적으로 매질의 변형은 탄성파(P파) 및 전단파(S파) 속도비에 의해 산출되는 포아송비에 의해 결정된다. 따라서, 매질의 물성을 결정짓는 가장 중요한 요소는 매질의 탄성파와 전단파 속도라 할 수 있다. 특히, 매질의 변형을 조장하는 전단탄성계수(G) 또는 강성계수(K)는 밀도와 전단파 속도(Vs)에 의해 결정되는 만큼 전단파 속도(V_s)에 대한 정보는 무엇보다 필수적이라 하겠다.

매질의 전단파 속도를 얻기 위해 현재까지 수행되고 있는 지반조사방법으로는 다운홀 시험, 크로스홀 시험, 표면파 탐사(SASW 또는 MASW), S파 반사법 탐사 김형수 등(2005a)을 들 수 있다.

조사된 전단파 속도(V_s)와 탄성파 속도(V_p)를 이용하여 다음식과 같이 미소변형율(10^{-6}) 수준에서의 전단탄성계수(G), 탄성계수(E) 밀도(ρ) 및 포와송비(υ)와의 관계를 구할 수 있다.

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \tag{1}$$

$$V_p = \sqrt{E(1-\nu)/\rho(1+\nu)(1-2\nu)} = \sqrt{2G(1-\nu)/\rho(1-2\nu}} \tag{2}$$

여기서, V_s는 S파 속도, V_p는 P파 속도, G는 전단탄성계수, E는 탄성계수, ρ는 밀도, υ는 포와송비이다.

Sawada와 Takahashi(1975)은 Kisenyama댐(H=95m), Shimokotori댐(H=107m), Tataragi댐(H=64.5m), Niikappu댐(H=102.8m)과 같이 일본의 4개 기존 사력댐의 기초부 검사랑과 층별침하계가 설치된 시추공에서 S파 속도와 P파 속도의 분포를 직접탐사 방식으로 조사하였다. 댐의 심도에 따른 전단파 속도의 분포를 사력존과 코어존으로 구분하고 사력존은 다시 불포화와 포화, 코어존의 강성의 차이로 구별하여 표 1과 같이 제시하였다. 포화송비는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

2.2 MASW(Multi-channel Analysis of Surface Waves) 탐사기법

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 활용한데 반해, 1980년대 초반 Nazarian 등(1983)은 근접 지표의 전단파 속도 추정에 SASW(spectral analysis of surface waves) 기법을 제시하여 적용하였으며 그 후 많은 지반공학 분

표 1. 일본 사력댐의 전단파속도 분포 경험식(Sawada와 Takahashi, 1975)

Zone / depth(m)	Rock		Core	
	Unsaturated	Saturated	High	Low
0~5	V_s=245		V_s=210	
5~30	$V_s = 250Z^{0.2}$	$V_s = 250Z^{0.2}$	$V_s = 180Z^{0.35}$	$V_s = 140Z^{0.34}$
30~	$V_s = 200Z^{0.315}$			
υ	$\nu = 0.375 - 0.006Z^{0.58}$	$\nu = 0.49 - 0.001Z^{0.95}$	$\nu = 0.45 - 0.006Z^{0.6}$	

야에 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 개발하여 현장적용 기법을 제시하였다.

SASW는 지반이 수평으로 균질하고 등방인 층이며 레일리(Rayleigh)파의 고유모드가 주요하다는 가정으로 수행된다. 하지만 SASW는 한쌍의 수진기만을 사용하기 때문에 노이즈에 민감한 단점이 있어 Park 등(1996, 1998, 1999)은 SASW 보다 더욱 신뢰성 있는 S파속도를 얻을 수 있는 MASW(Multi-channel analysis of surface waves)를 개발하였다. MASW 기법의 최근 목표는 고차 모드의 레일리(Rayleigh)파가 대심도에서의 지질하적인 정보를 반영하기 때문에 레일리(Rayleigh)파의 고유모드 보다 고차모드를 포함한다. MASW 기법에서 주파수-파수(F-K) 또는 슬로우니스-주파수(p-ω) 스펙트럼(McMechan과 Yedlin, 1981) 을 이용한 분산곡선을 만든다.

Park 등(1998)은 고차모드의 레일리(Rayleigh)파 분산곡선 구분에 유용한 파장 변환 법을 개발하였다. Zhang 등(2003)은 Park 등 15)에 의해 제안된 파장변환법이 F-K 법보다 더욱 신뢰성 있는 고유모드의 레일리(Rayleigh)파의 분산속도를 얻을 수 있음을 보였다.

MASW는 지반하부의 물리적 특성을 추정할 수 있는 비파괴 조사법이므로 지반공학, 수리학 및 다른 응용분야에서 광범위하게 이용되어왔다. 터널 및 댐 구조물의 안전성 평가에 관련된 실무 적용은 지반이 수평방향으로 균질하고 등방인 층상구조로 구성된다는 기본가정을 충족하지 못한다. Marwan(1993)과 김동수 등(2001)은 경사지층을 통해 발생된 표면파가 수평지층 모델에 의한 것과 다른 특성을 갖는 것을 보였다.

김형수 등(2005)과 Min과 Kim(2006)은 3차원 지반구조에 대한 탄성파 전파를 모사할 수 있는 유한차분 프로그램을 개발하여 사력댐에 대한 표면파를 활용한 동적물성 조사의 적용 타당성을 검증하였다. 3차원 모델링 결과 저주파 대역에서 댐의 중심코어부 물성과는 상관없는 높은 표면파 속도를 나타내어 이를 층상구조로 해석할 경우 균질 코어임에도 불구하고 하부로 갈수록 높은 전단탄성계수를 갖는 것으로 평가할 수밖에 없으며, 그 오차는 평가된 S파 속도의 제곱에 비례함으로 물성평가에 큰 오류를 야기할 수 있음을 밝혔다. 또한, 이와 같은 저주파 대역의 높은 표면파 속도는 댐을 구성하는 존들의 강성차이와 댐의 기하학적 형상에 의한 것으로 추정하였다.

3. MASW 탐사에 의한 코어존 전단파 속도 조사

3.1 조사 대상댐

MASW탐사에 의한 코어존 전단파속도 조사는 다음의 표 2와 같이 임하댐, 주암댐, 주암조절지댐, 대청댐의 4개 다목적댐과 사연댐, 영천댐, 수어댐의 3개 용수전용댐의 총 7개의 높이가 45m 이상이고 300m 이상인 중심코아형 사력댐과 복합형댐의 사력댐부를 대상으로 수행하였다.

코어존의 전단파속도 분포양상을 파악하여 내진해석의 기초자료로 활용하기 위하여 댐마루 중앙부의 일부구간에서 MASW탐사를 실시하였다. 충격음원으로 8~10 lb의 Sledge Hammer, 충격음원으로부터 수진기까지의 거리(Offset)는 15~20m, 수진기 간격은 1m, 수진기는 24채널의 2.5Hz 지오폰을 사용하

였다. 탐사구간은 주로 댐의 최대 단면부에 해당하는 구간을 탐사간격을 2m로 하여 총 41~51회 탐사하였다.

표 2. 조사대상댐 및 MASW탐사방법의 개요

댐 명	분 류	형식	준공년도	높이(m)	길이(m)	탐사구간		탐사방법
임하댐	다목적	RF	1993	73.0	515.0	댐마루 중앙부	18+10~23+10 (100m)	-수진기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 -2m간격으로 51번의 자료획득
주암댐	다목적	RF	1992	58.0	330.0	댐마루 중앙부	11+04~15+04 (80m)	-수진기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 -2m간격으로 41번의 자료획득
주암 조절지댐	다목적	RF	1992	99.9	562.6	댐마루 중앙부	21+00~25+00 (80m)	-수진기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 -2m간격으로 41번의 자료획득
대청댐	다목적	CG+RF	1981	72.0	495.0	댐마루 중앙부	6+11~12+09 (118 m)	-수진기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 -2m간격으로 60번의 자료획득
사연댐	용수전용	RF	1965	46.0	300.0	댐마루 중앙부	5+08~10+08 (100m)	-수진기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 -2m간격으로 51번의 자료획득
영천댐	용수전용	RF	1980	42.0	300.0	댐마루 중앙부	2+05~14+15 (250m)	-수진기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 -2m간격으로 51번의 자료획득
수어댐	용수전용	RF	1978	67.0	437.0	댐마루 중앙부	16+07~21+07 (100m)	-수진기 : 2.5Hz, 1m간격 배열 -2m간격으로 51번의 자료획득

3.2 조사결과

댐체에서 전단파 속도는 지층의 다짐정도와 심도증가에 따른 구속압의 증가 등에 의해 결정되며 구성재료의 차이도 일부 있을 수 있다. 지층의 다짐도가 높고 구속압이 높으면 매질 간의 파의 전달이 원활하여 파의 속도가 높아지므로 일반적으로 심도가 깊어질수록 전단파 속도는 증가하게 된다.

임하댐에서의 탐사결과는 이러한 일반적인 경향을 나타내고 있으며 동일 심도는 전반적으로 균질한 속도분포를 나타내어 표층에서 200m/s 정도를 나타내고 심부로 갈수록 꾸준히 증가하여 심도 10m 부근에서 300m/s, 심도 20m 부근에서 500m/s 그리고 심도 30m에 이르렀을 때 약 600m/s 정도인 것으로 조사되었다. 이와 같은 전단파 속도분포로부터 댐체는 안정한 상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다. 그림 1은 51회의 탐사결과 나타난 심도별 평균 전단파속도 분포로써 전단파속도가 심부로 갈수록 증가하는 것을 잘 보여주고 있다.

주암댐에서의 전단파속도의 분포는 그림 2와 같이 대체적으로 수평적 층서 구조로 200~600m/s의 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 구속압력의 증가를 의미하며, 제체의 전체적인 배경속도치가 약 300m/sec 전후로 분포하는 것으로 미루어 지반은 안정적인 상태를 유지하고 있는 것으로 사료된다(그림 2 참조).

주암조절지댐에서 실시한 MASW탐사의 결과의 전체적인 배경치는 그림 3과 같이 약 300m/sec 전후이며, 심도 10m 부근의 부분적인 저속도 구간을 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. 본 댐의 속도 분포와 마찬가지로 심부로 갈수록 전단파속도가 증가하는 양상을 나타내며, 특별한 이상대는 보이지 않는다(그림 3 참조).

대청댐의 전단파속도 분포가 그림 4와 같이 심도가 깊어짐에 따라 증가하고 전반적으로 250~600 m/s의 범위를 보이며 수평적으로 균질한 것으로 조사되어 제체는 안정한 상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다(그림 4 참조).

사연댐 MASW탐사결과 댐체의 전단파 속도는 그림 5와 같이 250~550m/s의 범위를 보이고 있으며 심부로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 이유는 심부로 갈수록 압밀에 의해 공극율이 감소하여 입자사이의 접촉면적이 넓어지게 되고 이 때 체적밀도의 증가율보다 탄성계수의 증가율이 훨씬 커지게 되어 결과적으로 탄성파 속도가 증가하게 된다(그림 5 참조).

영천댐 MASW탐사결과 댐체의 전단파 속도는 그림 6과 같이 150~500m/s의 범위를 보이고 있으며 심부로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 이유는 심부로 갈수록 압밀에 의해 체적밀도의 증가율보다 탄성계수의 증가율이 훨씬 커지게 되어 결과적으로 탄성파 속도가 증가하게 되기 때문이다. 좌·우안의 600m/sec 이상 전단파속도값을 가지는 기반암과 일치하고 있음을 알 수 있다(그림 6 참조).

수어댐 댐체의 전단파 속도는 그림 7과 같이 대략 200~500m/s 의 범위에 있음을 알 수 있으며 심도 25m~38m 하부에 나타나는 500m/s 이상의 고속도대는 기반암인 것으로 판단된다. 탐사결과 탐지된 속도 이상대는 두 개소인데, 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 부위은 다른 부위에 비해 댐체가 느슨한 상태인 것으로 판단된다. 특히 Sta. 20+17 위치는 전기비저항 탐사에서 탐지된, 저비저항 이상대와 위치 및 심도가 일치하고 있다. 상기 구간을 제외하고 전단파의 속도분포는 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다(그림 7 참조).

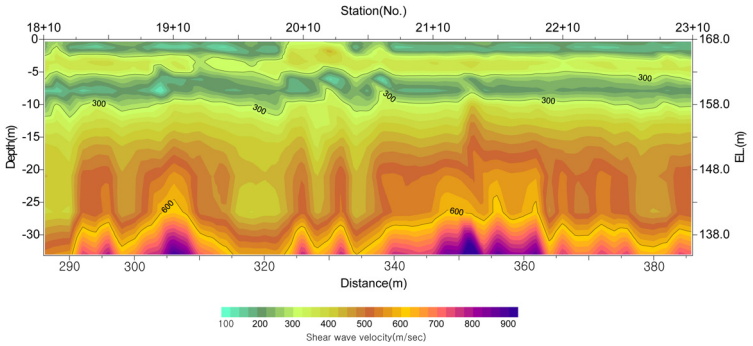

그림 1. MASW탐사에 의한 임하댐 전단파 속도분포

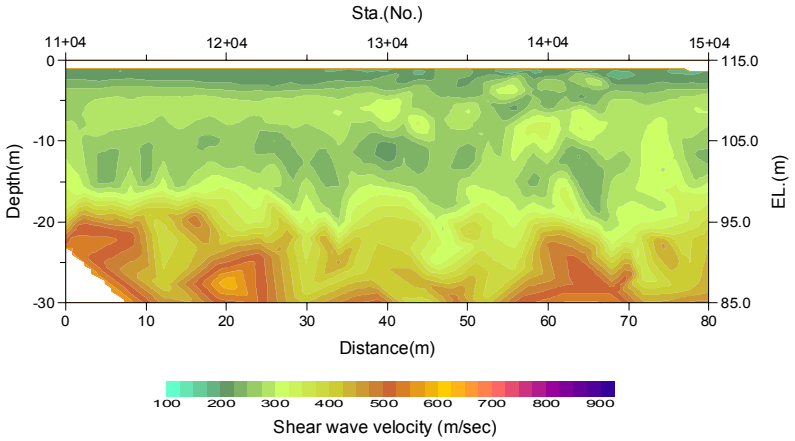

그림 2. MASW탐사에 의한 주암댐 전단파 속도분포

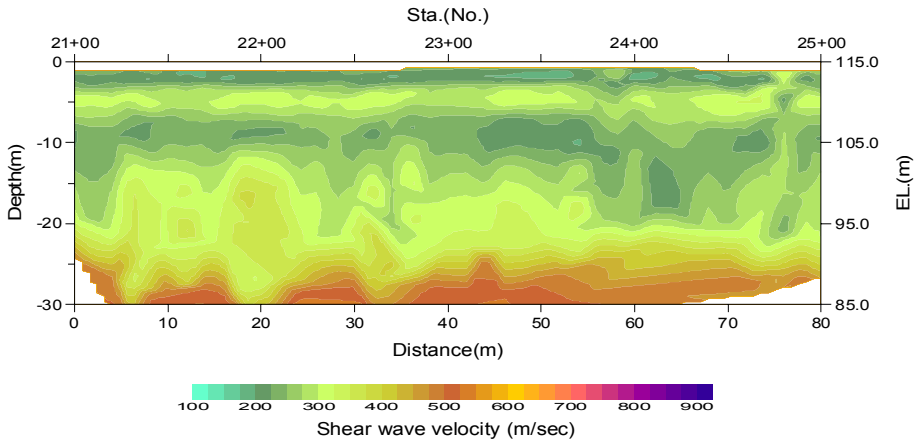

그림 3. MASW탐사에 의한 주암조절지댐 전단파 속도분포

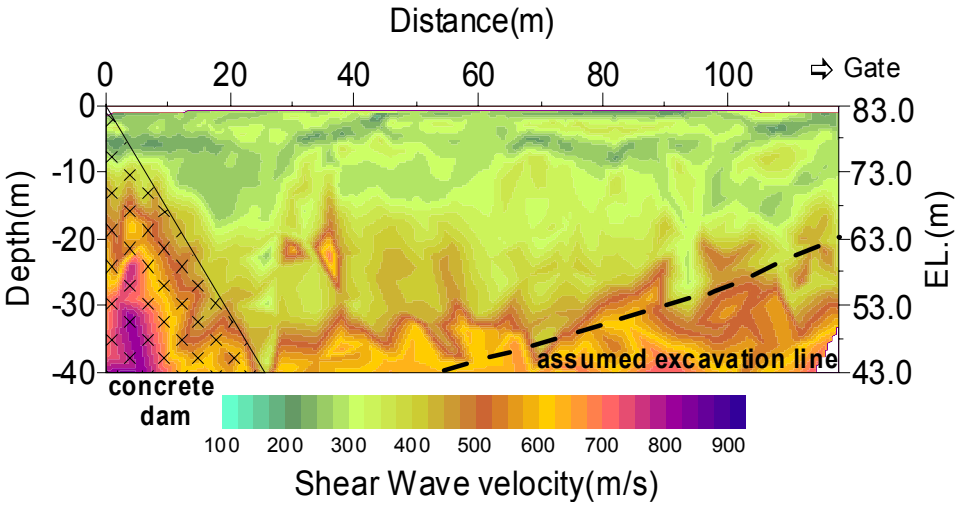

그림 4. MASW탐사에 의한 주암조절지댐 전단파 속도분포

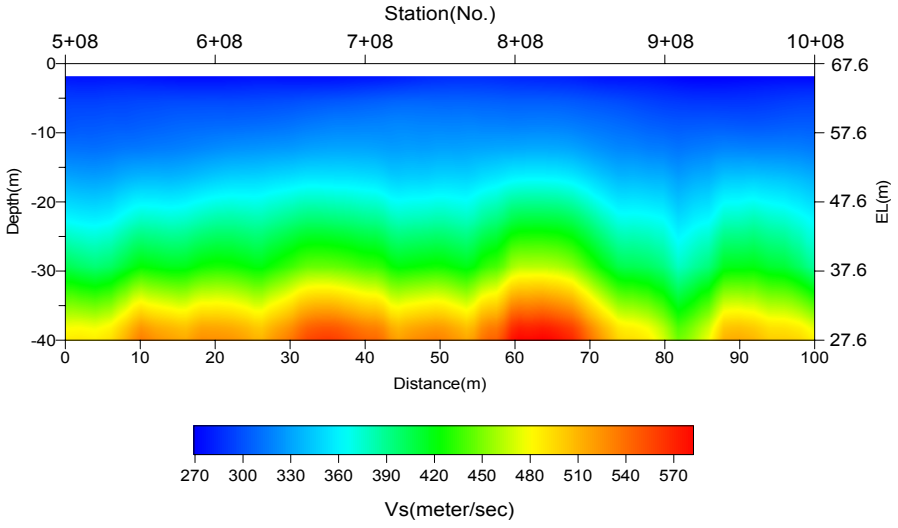

그림 5. MASW탐사에 의한 사연댐 전단파 속도분포

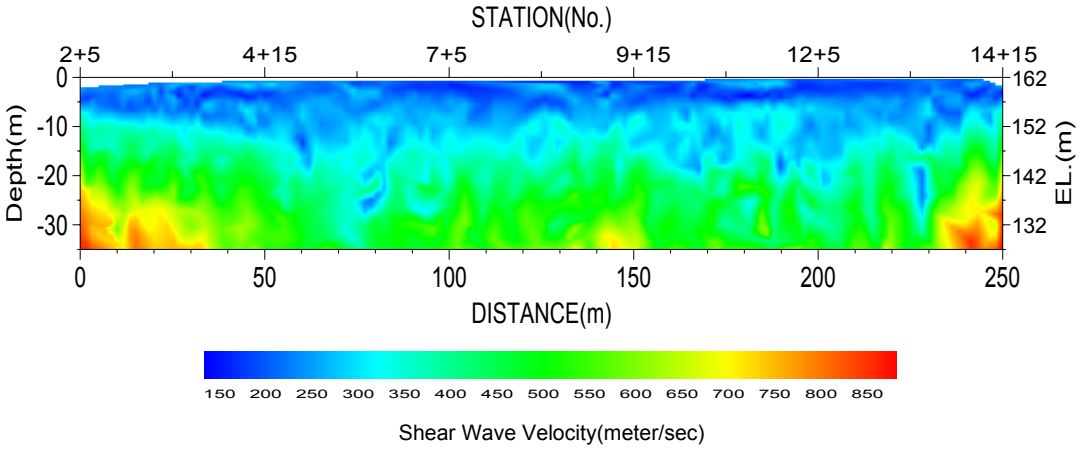

그림 6. MASW탐사에 의한 영천댐 전단파 속도분포

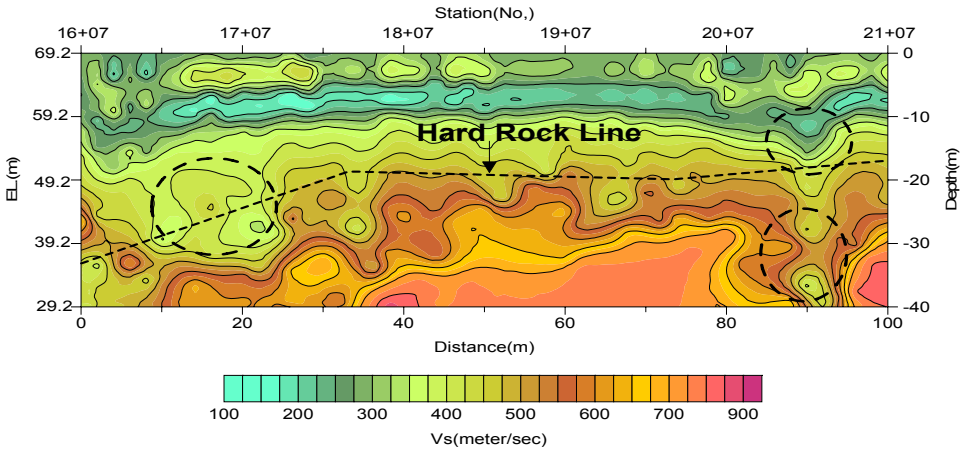

그림 7. MASW탐사에 의한 수어댐 전단파 속도분포

3.3 사력댐 전단파 속도의 비교분석

4개 다목적댐과 3개 용수전용댐의 총 7개의 높이가 45m~99.9m인 중심코아형 사력댐과 복합댐의 사력댐부에 대한 MASW 탐사결과 최대횡단면에서의 전단파 속도분포는 그림 8과 같이 수평적 층서구조로 200~600m/s의 분포를 나타내고 있으며 그 평균값은 Sawada와 Takahashi(1975)가 제시한 속도분포 수식과 잘 일치하며 심도에 따라 전단파속도가 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다.

MASW 조사결과에 의한 속도분포 범위는 Sawada와 Takahashi(1975)가 제시한 속도분포 수식에 의한 범위를 다소 초과하는 것으로 나타났으며 이것은 원인으로는 국부적인 재료물성의 차이와 MASW 조사 및 역산시의 오차를 생각할 수 있으므로 실무상 측정결과의 적용에 주의가 필요하다.

또한, 김형수 등, Min과 Kim이 지적한 바와 같이 충격음원으로 8~10 lb의 Sledge Hammer를 적용한 MASW 기법은 낮은 주파수 영역에서 충분한 에너지를 갖지 못하여 최대심도 40m까지만 조사가 가능하여 높이 40m 이상의 대형댐 전단파 속도를 완전히 파악하기에는 적합하지 못한 것으로 생각되므로 최대 높이 40m의 댐에만 적용할 것을 제안한다.

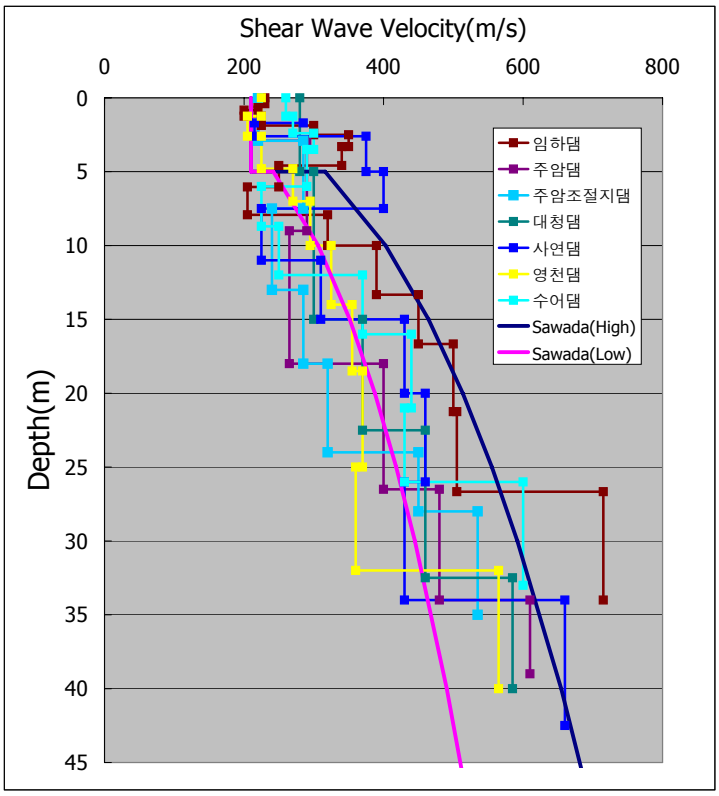

그림 8. 최대횡단면에서의 사력댐 코어존 전단파 속도(Vs) 분포

5. 결론

댐 정밀안전진단시(2003~2007년) 사력댐 코어존에 실시한 7개댐의 전단파 속도조사결과를 수집·분석하여 국내 사력댐 코어존의 구속압의 증가에 따른 전단파 속도분포 특성을 파악하였으며 향후의 내진설계 및 정밀안전진단시의 해석자료로의 적용시의 제한점에 대하여 논의한 결과는 다음과 같다.

1) 4개 다목적댐과 3개 용수전용댐의 총 7개의 높이가 45m~99.9m인 중심코아형 사력댐과 복합댐의 사력댐부에 대한 MASW 탐사결과 최대횡단면에서의 전단파 속도분포는 그림 8과 같이 수평적 층서구조로 200~600m/s의 분포를 나타내고 있으며 그 평균값은 Sawada와 Takahashi(1975)가 제시한 속도분포 수식과 잘 일치하며 심도에 따라 전단파속도가 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다.

2) MASW 조사결과에 의한 속도분포 범위는 Sawada와 Takahashi(1975)가 제시한 속도분포 수식에 의한 범위를 다소 초과하는 것으로 나타났으며 이것은 원인으로는 국부적인 재료물성의 차이와 MASW 조사 및 역산시의 오차를 생각할 수 있으므로 실무상 측정결과의 적용에 주의가 필요하다.

3) 김형수 등, Min과 Kim이 지적한 바와 같이 충격음원으로 8~10 lb의 Sledge Hammer를 적용한 MASW 기법은 낮은 주파수 영역에서 충분한 에너지를 갖지 못하여 최대심도 40m까지만 조사가 가능하여 높이 40m 이상의 대형댐 전단파 속도를 완전히 파악하기에는 적합하지 못한 것으로 생각되므로 최대 높이 40m의 댐에만 적용할 것을 제안한다.

참고문헌

1. 김동수, 윤종구, 이병식, 박형춘(2001), “경사지반에서 SASW기법 적용시 수치해석을 이용한 영향요소 연구”, **한국지반공학회논문집**, 제17권, 제1호, pp.77-84, 2001
2. 김형수, 김중열, 하익수, 김유성(2005a), 댐체 물성평가를 위한 S파 반사법에 관한 연구, **한국지반공학회 봄학술발표회 논문집**, pp.392-399
3. 김형수, 민동주, 김중열, 하익수, 오석훈(2005b), 표면파 적용 댐체 물성조사 타당성 연구, **한국지반공학회 봄학술발표회 논문집**, pp.384-391
4. 한국수자원공사, “대청댐 제2차 정밀안전진단 보고서”, 2005
5. 한국수자원공사, “사연댐 제2차 정밀안전진단 보고서”, 2004
6. 한국수자원공사, “수어댐 제2차 정밀안전진단 보고서”, 2004
7. 한국수자원공사, “임하댐 제1차 정밀안전진단 보고서”, 2007
8. 한국수자원공사, “영천댐 제2차 정밀안전진단 보고서”, 2004
9. 한국수자원공사, “주암댐 제1차 정밀안전진단 보고서”, 2006
10. Marwan, F.A.(1993), "Evaluation of flexible pavements and subgrades using the spectral analysis of surface waves(SASW) method", *Dissertation, Doctor of Philosophy*, The Univ. Texas at Austin, 1993
11. McMechan, G.A., Yedlin, M.J.(1981), "Analysis of dispersive waves by wave field transformation", *Geophysics*, 46, 869-874
12. Min, D.J,, and Kim, H.S.(2006), "Feasibility of the surface-wave method for the assessment of physical properties of a dam using numerical analysis", *Journal of Applied Geophysics*, 59, pp.236-243
13. Nazarian, S., Stokoe, K.H(1983), 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
14. Park., C.B., Miller, R.D., Xia, J.(1998), "Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record", *66th Ann Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophysics*., Expanded Abstracts, pp.1377-1380
15. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J.(1999), "Multi-channel analysis of surface waves", *Geophysics*, 64(32), 1999, pp.800-808
16. Park. C.B., Miller, R.D., Xia, J.(1996), "Multichannel analysis of surface waves using vibroseis (MASWV)", *66th Ann Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophysics*., Expanded Abstracts, pp.68-71
17. Sawada, Y. and Takahashi, T.(1972), "Study on the material properties and the earthquake behavior of rockfill dams", Proc. 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 695-702
18. Zhang, S.X., Chan, L.S., Chen, C.Y., Dai, F.C., Shen, X.K., Zhong, H.(2003), "Apparent phase velocities and fundamental-mode phase velocities of Rayleigh waves", *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 23, pp.563-569