

기존 댐 코어존의 전단파속도 산정기법 비교 연구

Study on Comparison of Methods for Estimation of Shear Wave Velocity in Core Zone of Existing Dam

하 익 수¹ Ha, Ik-Soo

오 병 현² Oh, Byung-Hyun

Abstract

In this study, for the purpose of evaluating the shear wave velocity in core zone, cross-hole test, down-hole test, MASW (Multi-channel Analysis of Surface Wave), and seismic reflection survey were carried out on the crest of the existing 'Y' dam. The results of field tests were compared one another. Furthermore, the field test results were compared with the result by the Sawada's empirical recommendation method. The purpose of this study is to compare the results of four kinds of field tests for evaluation of shear wave velocity in core zone of existing dam, to verify applicability of the empirical method which was recommended by Sawada and Takahashi, and to recommend a reasonable method for evaluation of shear wave velocity which is needed to evaluate the maximum shear modulus of core zone. From the results of four kinds of field tests such as cross-hole test, down-hole test, MASW, and seismic reflection survey, it was found that the shear wave velocity distributions were similar within 18 m in depth and the results obtained by MASW and seismic reflection survey were almost the same by 30 m in depth. For evaluation of shear wave velocity in core zone of the existing dam, in consideration that it is not easy to bore the hole in the core zone of existing dam, surface surveys such as MASW and seismic reflection method are recommended as realistic methods. On condition that it is impossible to conduct the field test and it is preliminary investigation, it is recommended that Sawada's low bound empirical equation be used.

요 지

본 연구에서는 현재 운영 중인 경상북도 영천시에 위치한 Y댐에 대하여 댐 축조재료 중 코어존의 최대전단탄성계수 산정을 위한 합리적인 전단파속도를 산정하기 위하여 시추공을 이용한 크로스홀시험과 다운홀시험을 수행하였고, 지표탐사인 MASW(Multi-channel Analysis of Surface Wave, 다중수의 수진기를 이용한 주파수영역 표면파해석)와 반사법 탄성파탐사를 수행하였다. 현장시험으로부터 코어존의 심도별 전단파속도를 산정하고 그 결과들을 비교·분석하였다. 또한, 현장시험 결과와 Sawada의 경험적 제안식을 비교·분석하였다. 본 연구의 목적은 댐 코어존의 심도별 전단파속도를 산정하기 위해 수행된 4종류의 현장시험 결과를 비교·분석하고, 시험결과와 경험적 제안식을 비교하여 경험식의 적정성을 판단하고, 기존댐 코어존의 심도별 전단파속도를 합리적으로 산정하는 방법을 제안하는 데 있다. 시험결과, 측정심도 내(18m 이내)에서 다운홀시험, MASW, 반사법탐사에 의한 코어존의 심도별 전단파속도 산출 결과는 유사한 결과를 보였으며, MASW와 반사법탐사의 경우에는 심도 30m까지 그 산출 결과가 거의 같은 것으로 나타났다. 기존 댐 코어존의 심도별 전단파속도를 산출하고자 할 때 운영 중인 댐 코어존에 시추공을 형성하는 것은

1 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Dam Engrg. Research Center, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, geodoc@kwater.or.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 방안전연구소장 (Member, Director, Dam Engrg. Research Center, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation)

* 본 논문에 대한 도의를 원하는 회원은 2009년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

현실적으로 매우 어려운 사안임을 감안한다면 MASW나 반사법탄성파탐사와 같은 지표탐사에 의한 전단파속도 산정이 가장 현실적인 방법일 것으로 판단된다. 현장조사가 여의치 않거나 예비조사의 경우에는 기존의 방법과 같이 Sawada의 경험식을 이용할 수 있는데, 경험식을 이용할 경우 Sawada의 제안식 중 하한값을 적용하는 것이 합리적인 방법일 것으로 판단되었다.

Keywords : Core zone, Cross-hole test, Down-hole test, MASW, Maximum shear modulus, Seismic reflection survey, Shear wave velocity,

1. 서 론

사력댐과 흙댐과 같은 필댐(fill dam)의 지진하중에 대한 안정성을 평가하는 일반적인 방법으로는 등가정적해석법과 동적해석법이 있다. 등가정적해석법은 지진하중을 예상 활동토체 중심에 등가의 정적하중으로 치환하여 부가하고, 한계평형해석 등에 기초한 사면안정 해석을 수행하여 산정된 안전율로부터 필댐의 지진 안정성을 평가하는 방법이다. 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 대상댐을 수치모형화하여 해석모형 저면에 지진하중을 직접 입력하여 댐 전체 응답을 파악하는 방법이다. 동적해석법은 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 전단파속도

를 측정하고, 측정된 전단파속도, v_s 와 재료의 밀도, ρ 를 이용하여 식 (1)과 같이 최대전단탄성계수, G_{max} 를 산정할 수 있다.

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

기존댐 코어존(core zone)의 전단파속도를 산정하는 현장시험 방법으로는 시추공을 이용하는 다운홀시험(downhole test), 크로스홀시험(crosshole 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.

Sawada와 Takahashi(1975)는 일본에 위치한 Kisenyama 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 분석하여 댐 코어존의 심도별 전단파속도(v_s)를 표 1과 같이 제안하였다(Sawada와 Takahashi, 1975). 현재 국내에서는 기존댐 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 계측기록 분석에 기

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

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

초하기 때문에 국내 댐 적용성에 대한 검증이 필요하며, 적용한다고 하더라도 그림 1에서 보는 것처럼 전단파속도의 상한값과 하한값 간의 차가 매우 커서 적용에 있어 상당한 자의적 해석이 이루어질 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 현재 운영 중인 경상북도 영천시에 위치한 Y댐에 대하여 댐 축조재료 중 코어존의 최대전단탄성계수 산정을 위한 합리적인 전단파속도를 산정하기 위하여 시추공을 이용한 크로스홀시험과 다운홀시험을 수행하였고, 지표탐사인 MASW와 반사법 탄성파

탐사를 수행하였다. 현장시험으로부터 코어존의 심도별 전단파속도를 산정하고 그 결과들을 비교·분석하였다. 또한, 현장시험 결과와 Sawada의 경험적 제안식을 비교·분석해 보았다.

본 연구의 목적은 댐 코어존의 심도별 전단파속도를 산정하기 위해 수행된 4종류의 현장시험 결과를 비교·분석하고, 시험결과와 경험적 제안식을 비교하여 경험식의 적정성을 판단하고, 기존댐 코어존의 심도별 전단파속도를 합리적으로 산정하는 방법을 제안하는 데 있다.

2. 시험개요

본 연구에서는 기존댐 코어존의 합리적인 전단파속도 산정을 위하여 현재 운영 중에 있는 경상북도 영천시에 위치한 Y댐에 대한 다운홀시험, 크로스홀시험, MASW, 반사법 탄성파 탐사를 수행하여 그 결과로 얻어진 코어존의 심도별 전단파속도를 비교·분석하였다. 대상댐의 제원과 표준단면은 각각 표 2, 그림 2와 같으며 시추공의 위치, 탐사측선, 수행된 현장시험 개요는 그림 3과 같다. 좌안 어버트먼트(abutment)로부터 약 130m 위치에 2개(BH-1과 BH-2)의 시추공을 형성하였으며, 공간 간격은 8m였다. BH-1과 BH-2의 시추심도는 각각 21.45m와 21.0m로 제한하였는데, 이는 이 심도 근처에서 댐수위에 의한 지하수위가 형성되어 있어(각각 심도 17.25m와 18.18m) 안정화된 코어가 시추에 의해 교란되는 것을 방지하기 위해서였다. 시추심도의 제한으로 인해 심도 18m 이내에서 시추공 2개 공 각각에 대하여 밀도검

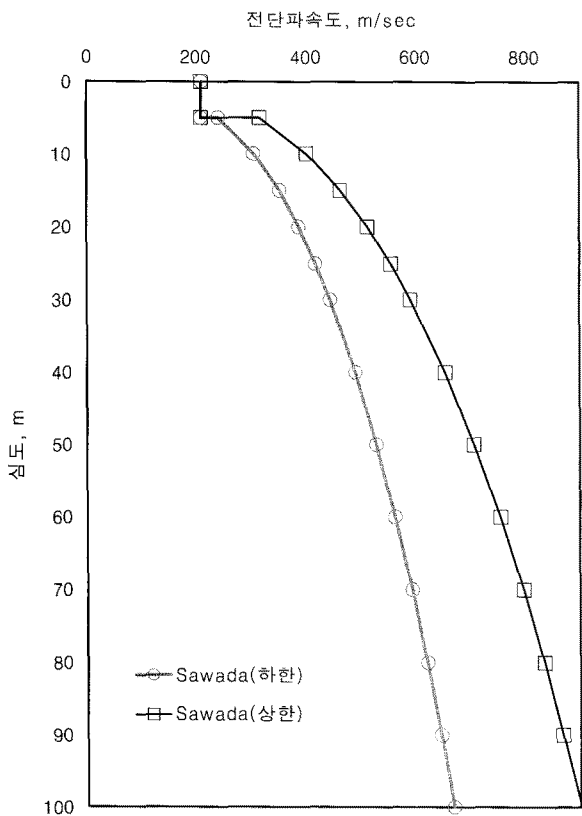


그림 1. 댐 코어존 심도에 따른 전단파속도 분포(Sawada와 Takahashi, 1975)

표 2. Y댐 제원

형식	중앙 차수벽형 사력댐	댐마루 표고	EL. 162.0m
댐 높이	42.0m	댐마루 길이	300m
체적	960,000m ³	댐마루 폭	10.0m

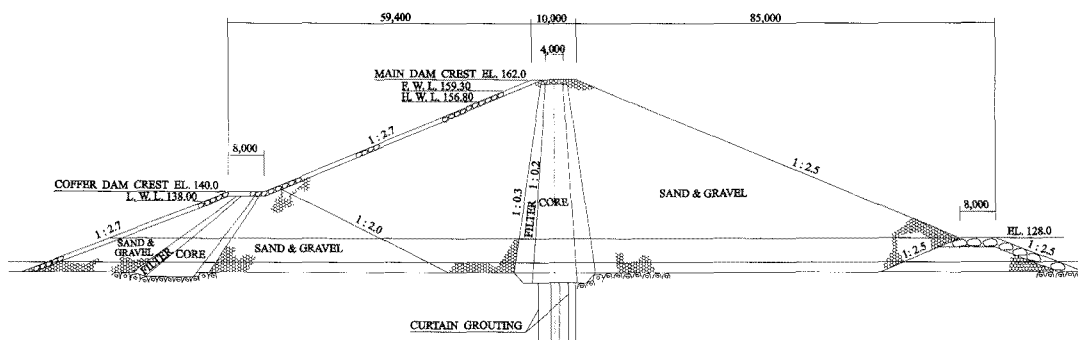


그림 2. Y댐 표준단면도

층시험과 다운홀시험을, BH-1과 BH-2 공을 이용해서 크로스홀시험을 수행하였다. MASW와 반사법 탄성파 탐사는 댐마루 길이방향으로 수행하였다(그림 3 참조).

Y댐 코어존 채취시료에 대한 기본물성시험 결과는 표 3과 같다. 시험 대상 범위는 시추공 BH-1, BH-2에서

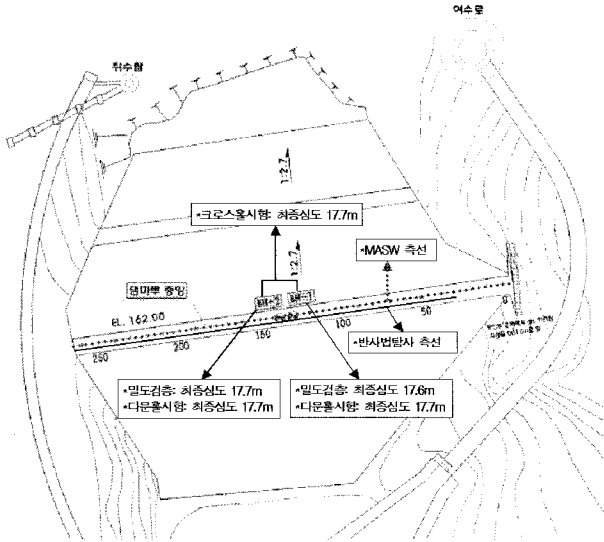


그림 3. Y댐 현장조사 위치도

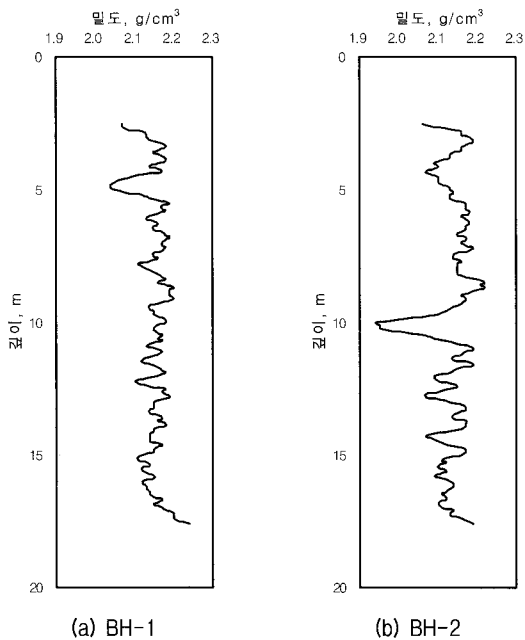


그림 4. Y댐 코어존 밀도(감마-감마)검층 결과

보링 채취한 3개 코어존 시료이다.

식 (1)을 이용하여 코어존의 최대전단탄성계수를 산정하는데 필요한 댐 코어존의 심도별 밀도 자료를 획득하기 위하여 댐마루에 위치한 2개의 시추공에서 밀도검층을 수행하였으며, 밀도검층의 신뢰도 제고를 위해 공경검층과 자연감마선검층을 병행 수행하였다. 시추공 BH-1과 BH-2에서의 밀도검층 심도는 각각 17.6m, 17.7m이며, 모래 및 자갈층이 분포하는 2.5m 이내의 심도는 검층기의 길이로 인해 측정을 하지 못하였다.

시추공 BH-1과 BH-2에서 측정된 코어존의 밀도범위는 각각 2.04~2.29g/cm³와 1.94~2.23g/cm³이며, 평균 밀도는 2.15와 2.13g/cm³이며, 2개 시추공에 대한 평균 밀도는 약 2.14g/cm³이다.

3. 현장시험 및 시험 결과

3.1 다운홀(Downhole) 시험 및 결과

코어존의 최대전단탄성계수 산정을 위한 심도별 전단파속도를 획득하기 위해 다운홀시험을 수행하였다. 산출된 전단파속도와 밀도검층 자료는 최대전단탄성계수를 산정하는데 이용된다.

다운홀시험은 그림 3과 같이 댐마루에 위치한 2개의 시추공에서 1.0m 간격으로 수신기를 하향으로 이동시켜가면서 수행되었다. 실제 시추심도가 현장 여건상 시추공 BH-1과 BH-2에서 각각 21.45, 21.0m로 제한되었기 때문에 18.0m 이내 구간에서만 자료를 취득하였다. 한편, 구간속도 계산시 지층은 시추주상도와 다운홀시험 결과 획득된 주시곡선을 토대로 4개의 지층으로 구별하여 각각에 대한 구간 전단파속도를 산출하였다.

다운홀시험에서는 상하방향의 수직 성분과 탄성파의 진행방향인 종방향 수평성분과 탄성파의 진행방향과 수직인 횡방향 수평성분을 측정하는 3성분 지오폰을 이용하여 자료를 획득한다. 이때, 전단파 가격용 평판의 방향은 시추공에 수직인 방향으로 남북 또는 동서방향으로 향하게 하고, 전단파 가격 방향에서 자료를 획득할

표 3. 코어재료 기본물성

시추공	채취심도 (m)	투수계수 (m/s)	함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	비중 (Gs)
BH-1	10.5~11.2	6×10^{-7}	24.33	32.00	17.60	14.30	2.64
BH-2	10.5~11.2	NG	56.15	30.22	16.60	13.62	2.62
BH-2	19.5~20.2	2.01×10^{-6}	15.46	29.38	18.32	11.06	2.59

수 있도록 지오폰의 방향도 남북 또는 동서방향이 되도록 조정한다. 그러나 본 조사에서는 수진기내에 설치된 나침반이 제대로 작동을 하지 않아, 측정된 자료에 회전이동을 적용하여 전단파 가격방향 성분을 추출하였다. 파 도달시간은 초동인식(first arrival)과 전단파 성분의 첫 극대점 이용방식(peak to peak method)을 이용하여 각각 산정하였으나, 초동에 비해 극대점이 안정적인 결과를 나타내어 극대점을 이용하였다.

그림 5는 시추공 BH-1과 BH-2에서 획득된 수평성분을 회전이동시켜 산출한 전단파 단면을 보여주는 것이다. BH-1의 경우 지층을 1.9m, 6.5m, 15.5m를 경계로 4개로 나누어 선형적합을 적용하여 4개의 직선식을 구하고, 직선의 기울기로부터 전단파속도를 산출하였다. BH-2의 경우 지층을 1.9m, 6.5m, 14.5m를 경계로 4개로 나누어 마찬가지로 방법으로 전단파속도를 산출하였다. 각각의 경우에 획득된 직선과 발췌된 도달시간의 상관도(R^2)는 천부의 모래 및 자갈층에서 약간의 오차를 보

일 뿐 점토층에서는 99% 이상의 높은 상관도를 보여준을 확인하였다.

표 4에서 보는 바와 같이 산출된 전단파속도는 시추공 BH-1과 BH-2에서 20m/sec 내외의 차이만 보일 뿐 거의 동일한 결과를 나타내었다.

3.2 크로스홀(cross-hole) 시험 및 결과

크로스홀시험은 2공 이상의 시추공을 이용하기 때문에 단일 시추공을 이용하는 다른 시추공 탐사기법에 비해 다소 비경제적인 시험방법으로 간주되고 있으나 다양한 시추공 탄성파기법 중에서도 결과의 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다(Mok, 1987).

본 연구에서 크로스홀시험은 시추공 BH-1과 BH-2를 이용하여 수행되었다(그림 3 참조). 두 공의 시추심도는 각각 21.45m 및 21.0m이며, 각 시추공들의 공내 지하수위는 17.25m와 18.18m로 확인되었다. 본 시험에서와 같

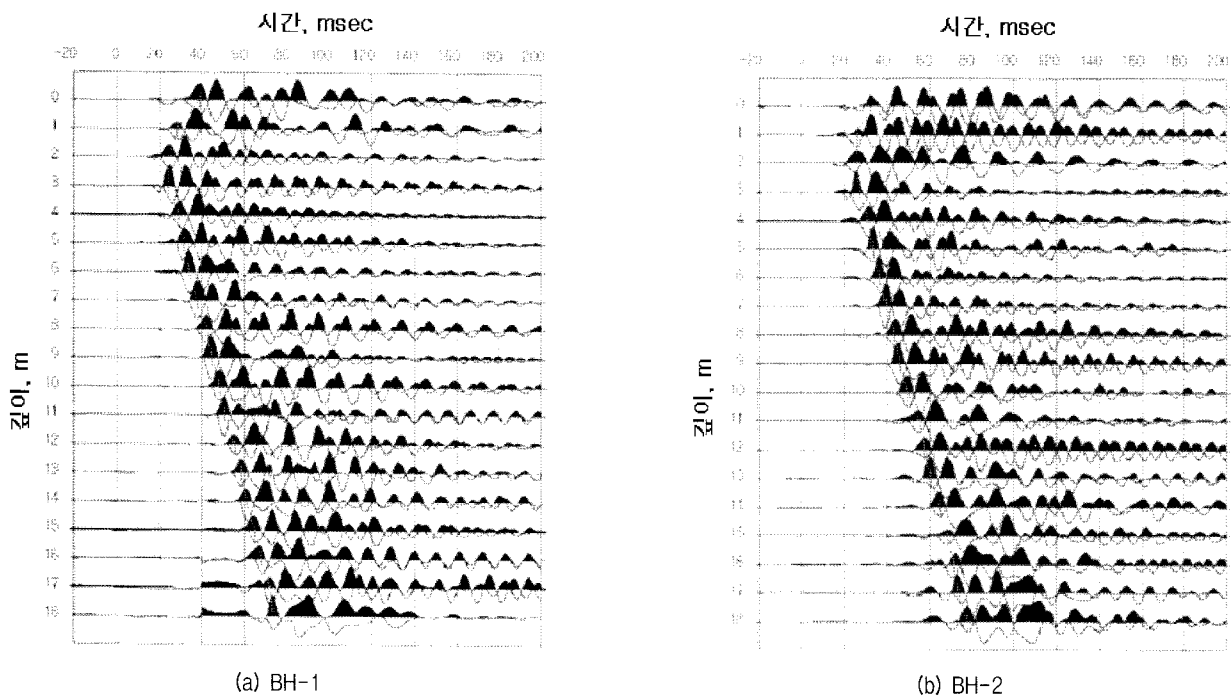


그림 5. 자료정리와 회전이동으로 산출된 전단파 단면

표 4. 다운홀시험에 의한 코어존 전단파속도 분포

	BH-1		BH-2		
	지층	심도(m)	전단파속도(m/sec)	지층	심도(m)
자갈	1.9	229	자갈	1.9	214
점토	6.5	246	점토	6.5	233
점토	15.5	274	점토	14.5	253
점토	18.0	280	점토	18.0	286

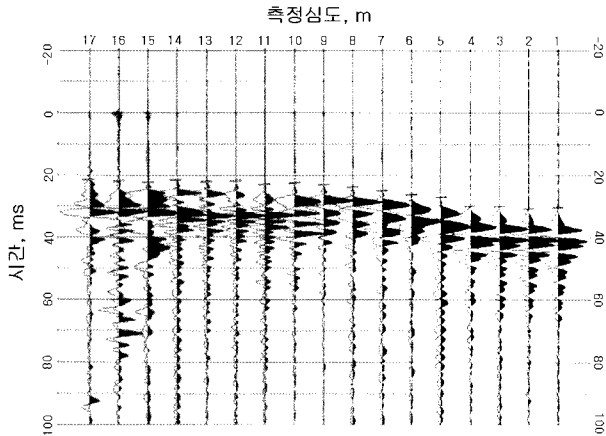


그림 6. 수직방향 성분에 대한 심도별 탄성파 기록과 전단파 초동발체 결과

이 시추공 해머를 이용하는 경우에는 그 발생 기작 상 공내수가 존재하는 구간에서는 적용이 어렵다. 따라서 조사 가능 구간에 대해 조사심도를 최대한 늘리기 위해 시추공 BH-1을 수신공으로, 공내 수위가 상대적으로 낮은 시추공 BH-2를 송신공으로 이용하였다.

조사시 지오폰의 자력센서 방향을 사전 조정하여 3성분 지오폰의 방향이 매 측정 심도에서 일정한 방향을 유지하도록 하였다. 3성분 지오폰에는 상하방향의 수직 성분과 두개의 수평성분이 있는데, 두개의 수평성분 중 탄성파의 진행방향 성분을 송수신공 방향으로 유지하도록 하였다.

본 시험에서 송신원은 시추공 해머를 사용하였는데, 이는 그 기작 상 발생하는 에너지의 크기가 다소 미약하여 매 심도별 측정 시 최소 3회에서 8회까지 신호를 중첩하여 신호 대 잡음비를 높이고자 하였다.

그림 6은 전체 심도에 대한 수직방향 탄성파 성분 기록과 전단파 초동발체 결과를 중첩 도시한 것이다. 그림에서 탄성파 기록은 좌측의 17m 심도 자료로부터 우측의 1m 자료 순으로 정리되어 있으며 시간에 대해서는 100ms 까지만 도시하였다.

그림 7은 시험결과 나타난 심도별 P파 및 전단파속도 분포를 나타낸 것이다. 전체 심도에 있어 P파와 전단파 속도는 각각 500~900m/sec와 250~370m/sec 정도로 확인되었다. 그림 7의 심도에 따른 탄성파 속도의 분포를 보면 심도 1~2m 구간과 6~7m 구간에서 탄성파 속도가 급격히 증가하며, 심도 11~12m 구간에서 약간의 증가를 보이고 있다.

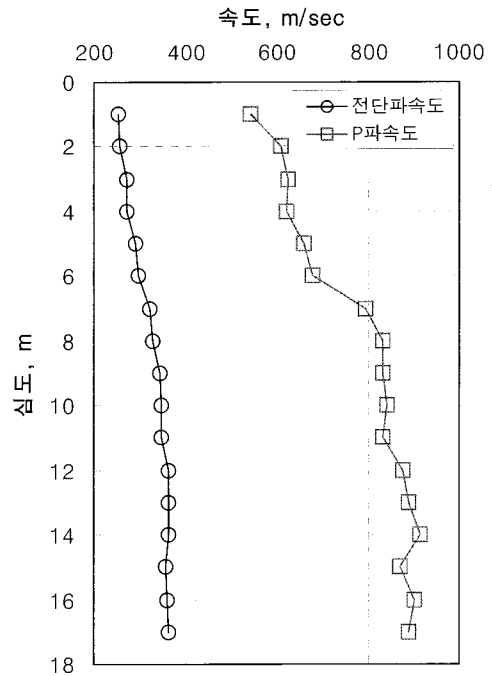


그림 7. 댐마루 중앙에서의 심도별 탄성파 속도(크로스홀시험 결과)

3.3 MASW(Multi-channel Analysis of Surface Wave) 및 결과

MASW는 그림 3과 같이 댐마루 중앙측선 -5~264m 구간에 대해 수행되었으며, 송신원이 수신기와 인접하여 2차원 평면과 가정에 위배되는 근거리장 효과를 제거하기 위해 송신원은 수신기와 9m 이상 이격시켰다. 송신원은 -5~231m 구간에 대해 2m 간격으로 119개의 자료를 획득하였으며, 수신기는 각 측선의 첫 번째 송신원으로부터 9~55m 이격된 지점에 2m 간격으로 24개를 설치하였다. 댐의 제원으로 알려진 댐마루의 길이는 300m인 반면 실제 탐사수행가능 구간은 약 270m로 확인되었다. 댐 좌안부에 위치하는 옹벽의 영향을 최소화하고자 옹벽으로부터 8m 이격된 지점부터 수신기를 설치하였으며, 탐사결과와 측선좌표에서는 6m 이격된 지점을 0m로 표시하였다.

그림 8은 MASW 송신원과 수신기 배열을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼, 본 조사에서는 현장작업의 편의를 위해 24개의 수신기를 설치한 이후에 첫 번째 수신기로부터 9m 이격된 지점에서부터 12번째 수신기로부터 9m 이격된 지점까지의 송신자료를 획득한 이후에 12개의 수신기를 측선 뒤로 이동시킨 후 다시 동일한 방법으로 송신자료를 획득하였다. 따라서 송신원이 수신기 중간에 위치하는 경우도 있으며, 각 송신원별로 송신원 우측에 위치하는 수신기의 개수도 달라진다.

따라서 각 송신원별로 가탐심도를 일정하게 유지시키기 위하여 측정된 수신기 자료 중 송신원으로부터 9~33m 거리에 위치한 13개의 자료만을 추출하여 탄성파 단면을 작성하였다.

댐마루 중앙측선에서 측정된 탄성파 단면을 주파수-위상속도 영역으로 변환하여 위상속도를 발췌하여 분

산곡선을 작성하였다. 그림 9와 그림 10은 각각 대표적으로 주파수-위상속도 영역에서 130m 지점에서의 주파수에 따른 위상속도의 에너지, 댐마루 중앙 측선 110~132m 구간의 분산곡선을 도시한 것이다.

그림 11은 주파수-위상속도 영역에서 발췌된 분산곡선에 역산을 적용하여 산출된 전단파속도 단면을 도시

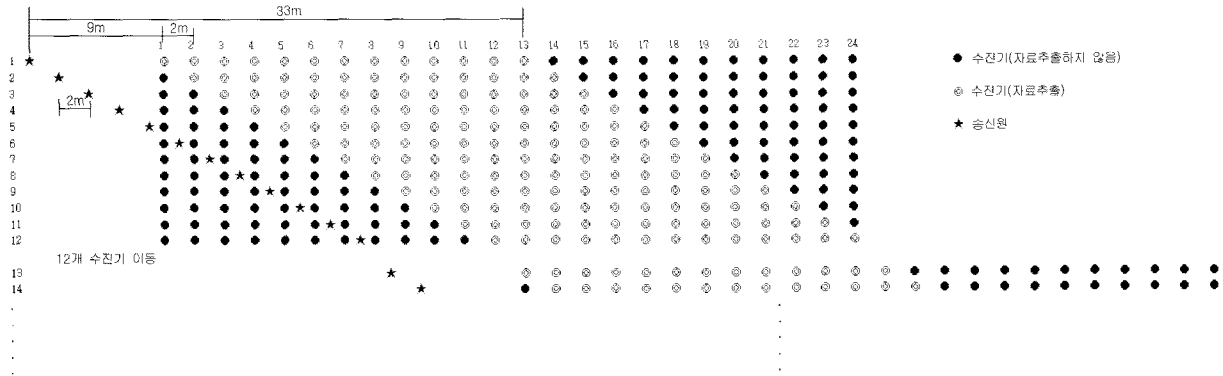


그림 8. MASW 송신원-수진기 배열

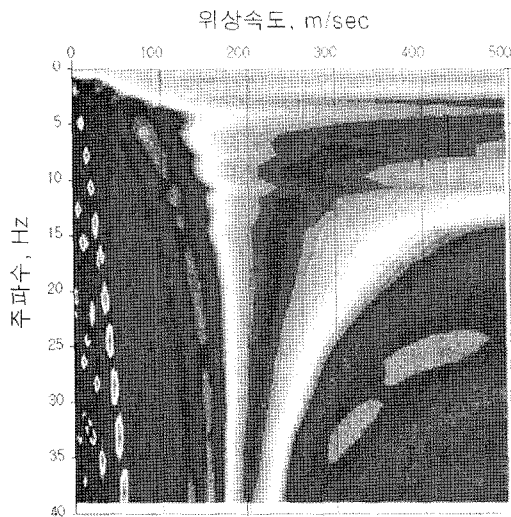


그림 9. 주파수-위상속도 영역에서의 위상속도 에너지(130m 지점)

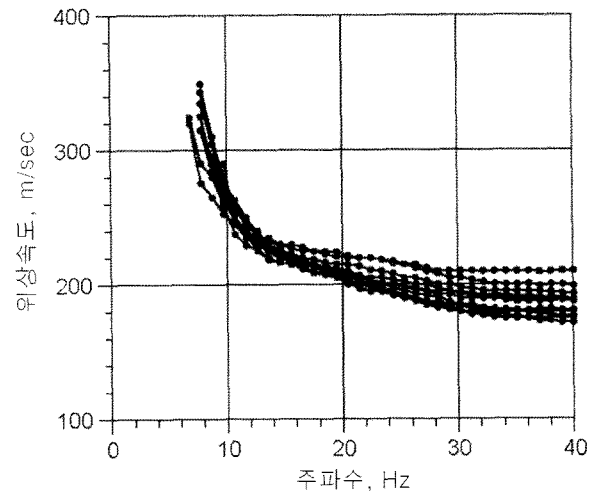


그림 10. 댐마루 측선 110m에서 132m 구간 분산곡선

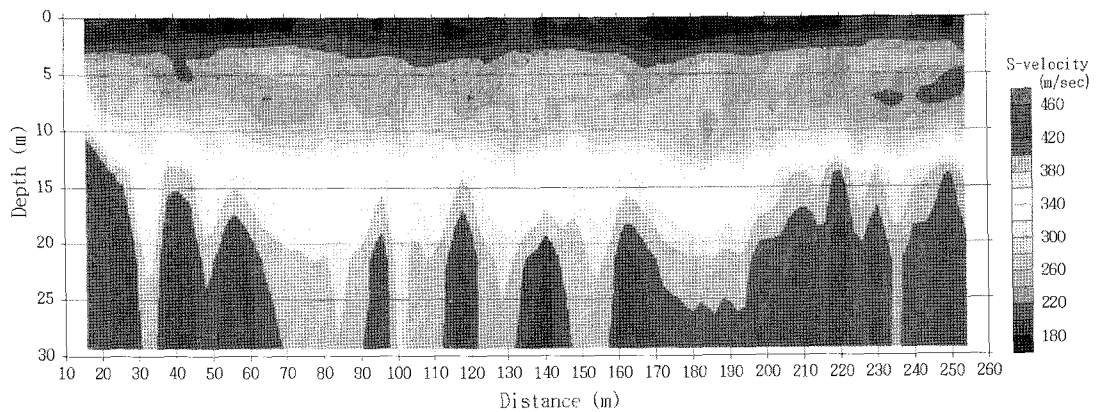


그림 11. 코어존 전단파속도 단면(MASW 결과)

한 것이다. 그림에서 천부 2~3m 심도에 200m/sec 이하의 저속도층이 나타나는데, 이는 댐마루 표면의 모래 및 자갈층에 의한 반응이다. 12~13m 이내의 심도에서는 200~350m/sec의 값을 보이다가 그 이상의 심도에서는 전단파속도가 다소 증가하고 있다. 좌안의 탄성파 속도가 다소 높게 나타나는데, 이는 기반암이 다른 구간에서는 40m 내외의 심도에 분포하는 반면에 좌안에서는 20m 이내의 천부에 분포하기 때문으로 판단된다. 댐마루 축선에서의 전단파속도 단면으로 판단컨대, 본댐의 코어존은 댐마루 좌안을 제외하고 전반적으로 수평적인 물성변화가 작고 심도에 따라 약간의 속도만

증가하는 대체로 균질한 양상을 보이는 것으로 판단되었다.

3.4 반사법 탄성파탐사 및 결과

반사법 탄성파탐사의 근본원리는 지표면에서 기본 발생원-수진기 배열이 탐사축선을 따라 일정간격 이동하면서 측정이 반복됨에 따라 지하 각 경계면의 수평적인 변화를 재현하는 데 있다.

그림 12는 Y댐 댐마루 반사법 탐사 축선을 댐 평면도에 나타낸 것이다. 본 시험에서는 전단파속도를 직접적으로 획득할 수 있는 S파 반사법 탄성파탐사(김중열과 김유성, 2004; 김형수 등, 2005; 하익수 등, 2006)가 수행되었다. S파 탐사 시 수신기의 방향은 S파 발생 시 입자 움직임과 동일한 방향, 즉 탐사 축선과 수직인 수평방향으로 하였고 수신기는 모래주머니로 고정하였다. 기본 발생원-수진기 배열은 그림 13과 같다. 송신원과 최초 수신기간의 간격은 2m이며, 수신기간의 간격은 1m이다. 탐사 시 발생원으로 P빔 발생원(김중열과 김유성, 2004)을 사용하여, guided 파의 생성을 근원적으로 억제하여 측정과정에서 약화된 상태로 수신되게 함으로써, 댐 정상부 표면에 일정 두께로 존재하는 자갈층에 의해 생성되는 guided 파의 영향을 최소화하였다.

그림 14는 발생원 기록으로부터 S파 속도를 발췌하는 과정을 나타낸 것이며, 그림 15는 이와 같은 절차에

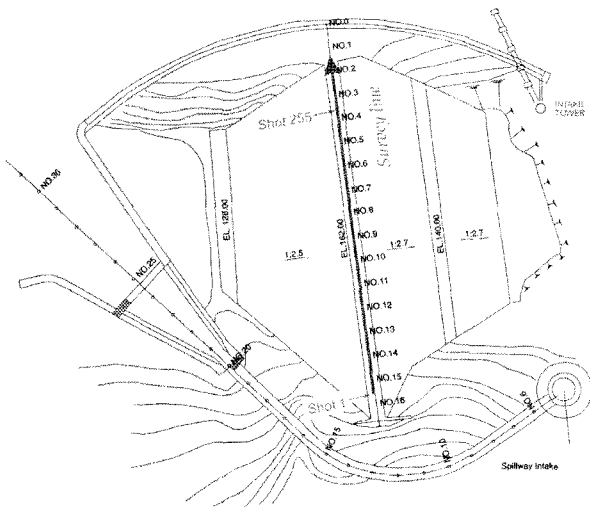
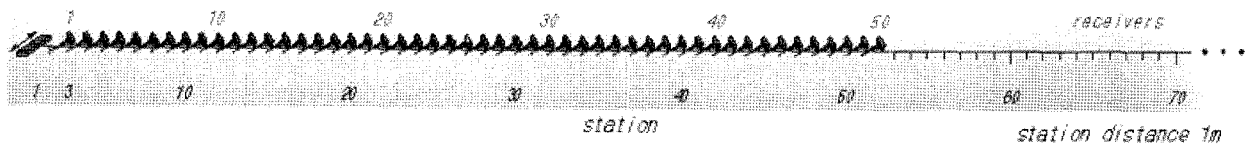


그림 12. Y댐 반사법 탄성파탐사 축선



발생원 : S-발생원 발생원 이동 간격 : 1m Sampling interval : 0.25ms

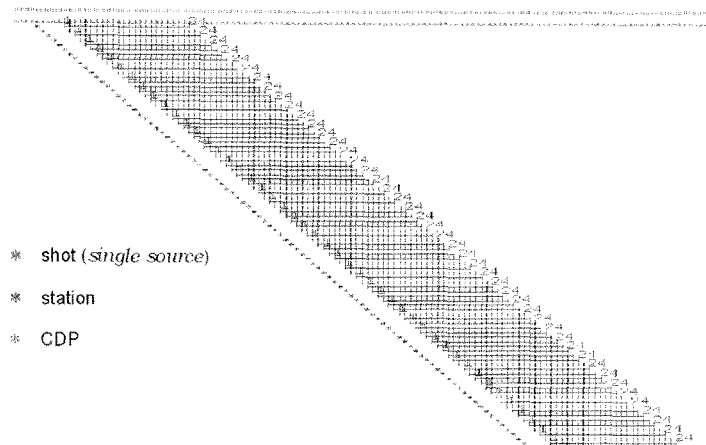


그림 13. 반사법탐사 발생원-수진기 배열

의해 산정된 코어존의 심도별 전단파속도 분포를 나타낸 것이다.

4. 시험결과 분석

4.1 현장시험 결과 분석

그림 16은 코어존의 심도별 전단파속도 분포를 현장 시험 방법별로 비교한 것이다. 다운홀시험의 경우에는 BH-1과 BH-2 시추공에서 측정된 결과의 평균값이다. MASW와 반사법탐사 결과 분석은 특정 지점에 대한 단일 측선 시험결과 분석이 아닌 전체 단면에 대한 전단파속도 분포 도출을 목적으로 결과를 분석하였기 때문에 전체 단면도를 우선 도출하였다. 따라서 이들 결과를 시추공을 이용한 다운홀시험과 크로스홀시험 결과와 비교하기 위하여, 획득된 전단파속도 단면에서 BH-1과 BH-2 시추공 중간위치에서의 지점별 전단파속도를 30m 심도까지 추출하였다.

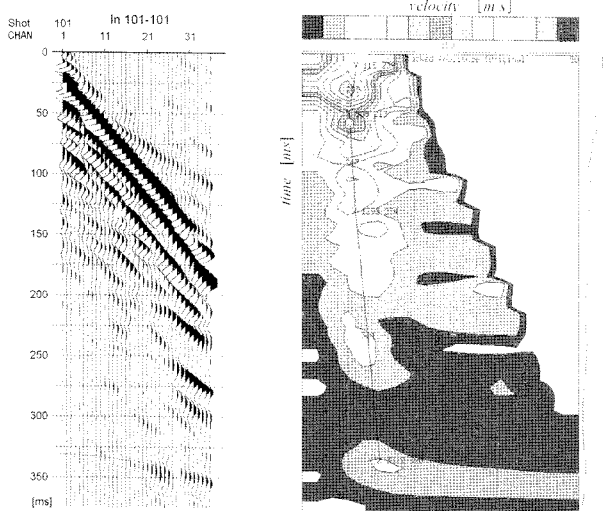


그림 14. 발생원 기록으로부터 S파 속도 발취과정

근본적으로 본 연구에서 언급하는 시험방법을 포함한 현장시험 기법들은 각기 다른 방식으로 시험이 수행되고, 동일한 시험기법이라도 시험조건등에 의해 그 결과가 달라질 수도 있으므로 본 연구에서 수행된 현장시험 결과들이 반드시 동일한 결과를 도출할 것이라고는 기대할 수 없다.

그림 16으로부터 측정심도 내(18m 이내)에서 다운홀 시험의 경우 지하수위와 인접한 18m 심도에서 다소 낮은 값을 나타내었으나 전반적으로 다운홀시험, MASW, 반사법탐사의 결과는 유사한 결과를 보였다. MASW와 반사법탐사의 경우에는 심도 30m까지 그 산출 결과가 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

일반적으로 크로스홀시험은 시추공간의 거리와 획득

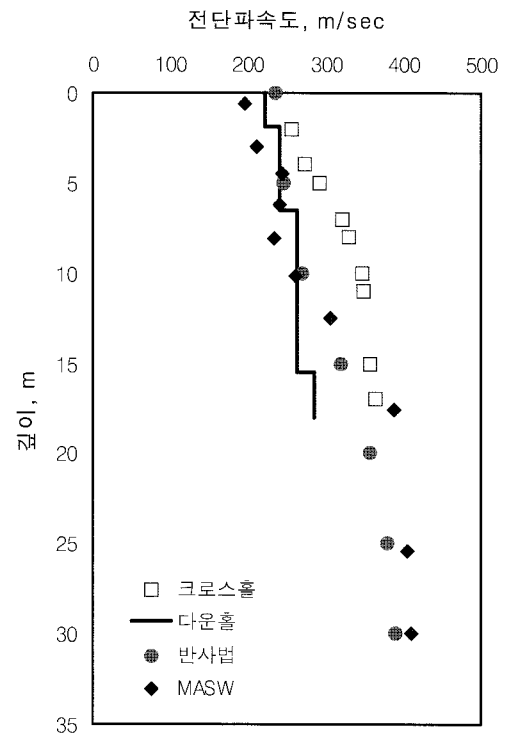


그림 16. 시험기법별 댐 코어존 심도별 전단파속도 측정 결과

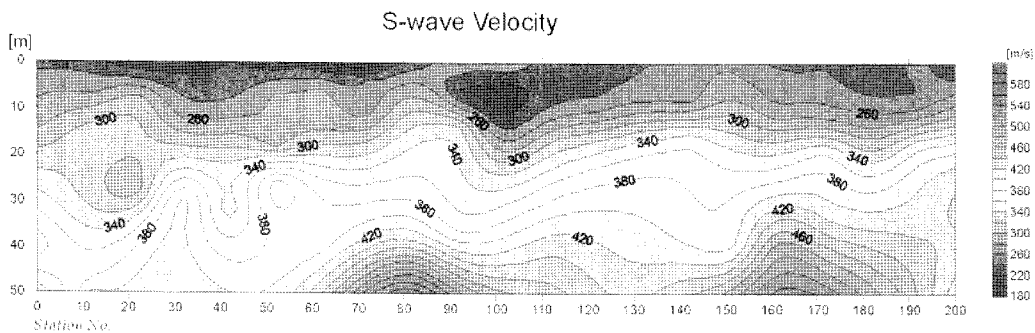


그림 15. Y댐 코어존 전단파속도 분포(반사법 탄성파탐사 결과)

한 직접 도달시간을 이용하여 시험공간의 지반속도를 간단히 도출할 수 있어, 시추공을 이용하는 탄성파탐사 중 가장 신뢰성이 높다고 알려져 있다(김동수 등, 2005). 그림 16을 보면 지표탐사와 다운홀시험 결과는 유사한 전단파속도 결과를 보이는 반면에 크로스홀시험에 의한 전단파속도는 5~15m 심도에서 다른 시험방법에 의한 결과에 비해 그 값이 다소 크게 나타나고 있다. 이러한 이유는 앞서 서술한 근본적인 원인에 의한 것도 있지만, 크로스홀시험에서는 시추공의 경사도나 공내 형상이 실제 시험시 공간거리와 예상되어 계산에 이용된 공간거리를 상이하게 할 수 있기 때문에, 탄성과 속도의 신뢰성을 높이기 위해 시추공의 형상이 심도에 따라 변하는 양상을 계측하는 공곡검층을 수행하여 결과를 보정하여야 한다. 그러나 대상지반인 코어존은 점토가 주를 이루는 층으로 심도에 따른 시추공 내의 형상이 크게 변하지 않을 것으로 여겨 본 시험에서 공곡에 대한 영향을 고려하지 않은 것이 또 다른 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 그러나 15m 이상의 심도에서는 크로스홀시험에 의해 산정된 전단파속도는 지표탐사에 의한 전단파속도에 점차 근접하고 있음을 알 수 있다.

본 시험결과에 한해 코어존의 심도 15m 이상에서는 다운홀시험, 크로스홀시험, MASW, 반사법탐사는 거의 유사한 전단파속도를 산출할 것으로 예측된다. 이러한 결과는 각 시험방법별 시험기법의 차이, 시험장비의 차이, 시험 수행자에 의한 오차 등은 고려되지 않은 결과를 염두에 두어야 한다.

4.2 현장시험 결과와 경험식 비교

댐 코어존의 심도별 전단파속도 산출을 위해 본 연구에서 수행한 현장시험 결과와 Sawada의 경험적 제안식을 비교하였다.

그림 17은 현장시험 결과와 Sawada의 경험식에 의해 산출된 Y댐 코어존의 심도별 전단파속도를 산출한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 현장시험 결과들은 Sawada의 경험식 중 하한값과 유사한 결과를 보이거나 다소 작은 값을 산출하였다. 이러한 결과는 Sawada의 제안식을 이용하여 기존 댐 코어존의 최대전단탄성계수 산정을 위한 전단파속도를 산정할 때 코어존의 최대전단탄성계수를 과대 평가할 가능성이 있음을 보여준다.

기존 댐 코어존의 심도별 전단파속도를 산출하고자

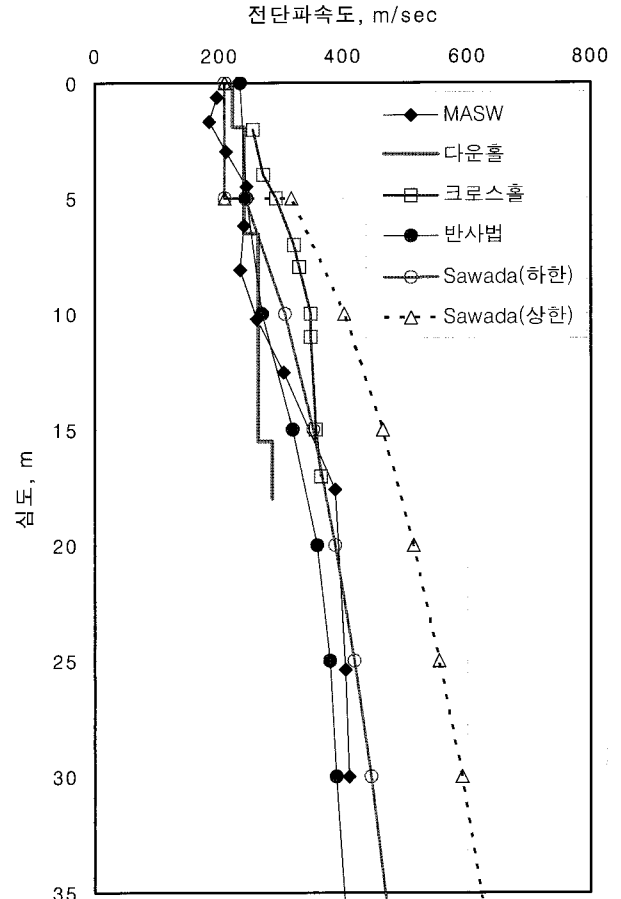


그림 17. 현장시험 및 경험식에 의한 코어존 심도별 전단파속도

할 때 운영중인 댐에 시추공을 형성하는 것은 본 연구에서 시추공의 심도를 제한한 것과 같이 현실적으로 기술적인 문제나 정서적인 문제 등 때문에 매우 어려운 사안임을 감안한다면 MASW나 반사법 탄성파탐사와 같은 지표탐사에 의한 전단파속도 산정이 가장 현실적인 방법일 것으로 판단된다. 다만, 현장조사가 여의치 않거나 예비조사 차원에서는 기존의 방법과 같이 Sawada의 경험식을 이용할 수 있으나, 경험식을 이용할 경우 보수적 견지와 본 연구에서의 결과를 참고하여 Sawada의 제안식 중 하한값을 적용하는 것이 합리적인 방법일 것으로 판단된다.

5. 결론

효율적이고 합리적인 기존댐 코어존의 최대전단탄성계수 산정을 위해 필요한 심도별 전단파속도 산출 기법을 알아보기 위하여 본 연구에서는 현재 운영 중인 Y댐을 대상으로 댐 정상부에서 밀도검층, 다운홀시험, 크로스홀시험, MASW, 반사법 탄성파탐사를 수행하였다.

현장시험결과에 대한 비교와 경험적 제안식과의 비교·분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 지하수위 위 측정심도 내(18m 이내)에서 다운홀시험, MASW, 반사법탐사에 의한 코어존의 심도별 전단파속도 산출 결과는 약간의 편차를 보이거나 거의 유사한 결과를 보였으며, MASW와 반사법탐사의 경우에는 심도 30m까지 그 산출 결과가 거의 같은 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구결과에 한해 지표탐사(MASW와 반사법탄성파탐사)와 다운홀시험 결과는 유사한 전단파속도 산정 결과를 보이는 반면에 크로스홀시험에 의한 전단파속도는 심도 15m 이하에서는 그 값이 다소 크게 나타났으나, 심도 15m 이상에서는 다운홀시험, 크로스홀시험, MASW, 반사법탐사는 거의 유사한 전단파속도를 산출할 것으로 예측된다.
- (3) 기존 댐 코어존의 심도별 전단파속도를 산출하고자 할 때 운영 중인 댐에 시추공을 형성하는 것은 현실적으로 기술적인 문제나 정서적인 문제 등 때문에 매우 어려운 사안임을 감안한다면 MASW나 반사법탄성파탐사와 같은 지표탐사에 의한 전단파속도 산정이 가장 현실적인 방법일 것으로 판단된다. 다만, 현장조사가 여의치 않거나 예비조사 차원에서는 기존의 방법과 같이 Sawada의 경험식을 이용할 수 있는데, 경험식을 이용할 경우 보수적 견지와 본 연구에서의 결과를 참고하여 Sawada의 제안식 중 하한 값을 적용하는 것이 합리적인 방법일 것으로 판단된다.

Sawada의 경험적 제안식은 일본에 위치한 3개 댐의 코어존에 대한 관측 및 탐사 결과를 분석한 결과인데 반해 본 연구결과는 특정 Y댐 코어존에 대해서만 수행된 시험에 의한 결과이다. 또한, Sawada의 경험식이 대

부분 높은 댐(95m 이상)을 대상으로 도출된 결과임에 반해 본 연구수행 대상댐인 Y댐의 높이는 42m에 불과하다. Sawada의 경험식이 제안된 대상댐의 코어존의 물리적 특성을 현재로서는 확인이 어렵지만, 기본적인 코어재로서의 공학적 특성은 Y댐과 같아하더라도 물리적인 특성에서는 차이가 있을 것으로 여겨진다. 따라서 보다 일반화된 결론을 이끌기 위해서는 향후 더 많은 대상댐에 대한 시험수행과 기 수행된 시험자료들에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 여겨진다. 또한, 이상의 결론 내용은 각 시험방법별 시험기법의 차이, 시험장비의 차이, 시험 수행자에 의한 오차 등은 고려되지 않은 결과임을 염두에 두어야 한다.

참 고 문 헌

1. 김중열, 김유성 (2004), 지면 탄성과 반사법의 효율성 향상을 위한 탄성과 발생원 에너지 방사형 변조기법, 2004 한국지반공학회 불학술발표회 논문집, pp.807-814.
2. 김형수, 김중열, 하익수, 김유성 (2005), 댐체 물성 평가를 위한 S파 반사법에 관한 연구, 2005 한국지반공학회 불학술발표회 논문집, pp.392-399.
3. 김동수, 고희범, 김영수, 방은석, 신형욱, 윤진성, 이양로, 장현삼 (2005), Round Robin Test를 통한 공내 탄성과 탐사 기법 비교 연구, 2005 한국지반공학회 불학술발표회 특별세션 논문집, pp.73-88.
4. 하익수, 서민우, 김유성, 김중열 (2006), 댐 사력재료 물성 산정을 위한 반사법 탄성과 탐사에 관한 연구, 2006 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.889-896.
5. 한국대담회 (2003), 사력댐 동적물성 조사 및 안전도 평가 연구, 한국수자원공사 연구보고서.
6. 한국대담회 (2004), 댐체 물성 평가를 위한 비파괴 조사 학술 용역, 한국수자원공사 연구보고서.
7. 한국수자원학회 (2005), 댐설계기준, pp.453-471.
8. 한국지반공학회 (2006), 지반구조물의 내진설계, 지반공학 시리즈 8, pp.51-197.
9. Mok, Y.J. (1987), "Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods", Ph.D. Dissertation, The department of civil engineering, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
10. Y. Sawada and T. Takahashi (1975), "Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams", Proc. of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.695-702.

(접수일자 2008. 3. 26, 심사완료일 2008. 9. 29)