

## 사력댐 동적물성 추정을 위한 현장조사기법 적용 및 분석

### Application and Analysis of Field Test and Geophysical Exploration for Dynamic Material Properties of Rockfill Dam

이종욱<sup>1)</sup>, Jong-Wook Lee, 김기영<sup>2)</sup>, Ki-Young Kim, 전제성<sup>3)</sup>, Je-sung, Jeon, 조성은<sup>4)</sup>, Sung-Eun, Cho

<sup>1)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, KIWE, KOWACO

<sup>2)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, KIWE, KOWACO

<sup>3)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, KIWE, KOWACO

<sup>4)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, KIWE, KOWACO

**SYNOPSIS** : In this study, seismic refraction survey and MASW at dam crest and down-hole test and cross hole test in the boring holes located in dam crest through the core are performed to find out dynamic material properties, are needed to evaluate dynamic safety of rockfill dam using dynamic analysis method. From the field test and geophysical exploration, applied such as above, p-wave and s-wave velocity profile of each layer of dam body. Dynamic material properties, such as elastic modulus, shear modulus, poission's ration, are obtained from p-wave and s-wave velocity profile and density profile from formation density logging test.

**Keywords** : dynamic properties, rockfill dam, field test, geophysical exploration, seismic refraction survey, MASW, down-hole test, cross-hole test, formation density logging Test

## 1. 서론

최근에 건설되고 있는 댐에 대해서는 내진설계를 반드시 하도록 의무화되어 있으나, 과거에 건설된 댐은 내진설계에 대한 의무조항이 없어 대부분 내진설계가 되어 있지 않다. 현실적으로 이미 준공된 댐에 대해서 내진설계를 한다는 것은 거의 불가능하나, 준공된 댐체의 물성 조사와 지진해석을 통해 지진 발생시 댐체의 거동을 미리 예측할 수 있다면 향후 지진 발생시 댐체의 붕괴 방지 및 피해를 최소화시키는 대책 수립에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

동적해석방법으로 기존 사력댐에 대한 지진거동을 예측하여 내진성능평가를 실시하기 위해 댐체의 동적물성을 정확히 파악하여 이를 해석에 반영하여야 하며 이러한 목적으로 비파괴 시험방법인 물리탐사 기법을 적용할 수 있다.

본 연구에서는 사력댐의 동적물성을 산정하기 위하여 대상댐의 댐마루와 하류사면에서 지표 물리탐사로 굴절법 탄성과 탐사와 표면과 탐사를 실시하였으며, 이를 통해 댐체 지반에서의 연속적인 종파 및 전단파 속도 단면을 획득하였다. 또한, 댐마루의 중앙과 좌안에 위치한 시추공에서 공내 탄성과 탐사를 실시하여 지층별 종파 및 전단파 속도를 산출하였으며, 댐마루 중앙에 위치한 시추공에서 시추공간 탄성과 탐사를 실시하여 심도별 종파 및 전단파 속도를 산출하였다. 한편, 동탄성계수 산출 시 밀도는 3개의 시추공에서 실시된 밀도검층 자료에서 심도 및 지층별 밀도를 산출하여 이용하였으며 이들의 비교·분석을 통해 대상 사력댐의 동적물성을 산정하고 현장조사기법의 신뢰성을 분석하였다.

## 2. 현장조사 개요

사력댐 동적물성 산정과 현장조사기법의 활용성 분석을 위하여 대상댐의 댐마루와 하류사면에서 물리탐사와 현장조사 및 시험을 수행하였으며, 표 1은 수행된 조사에 대한 전체 현황 및 수량을 정리한 것이며, 그림 1은 물리탐사 측선 좌표에 각 시추공에서 수행된 조사항목을 나타낸 그림이다.

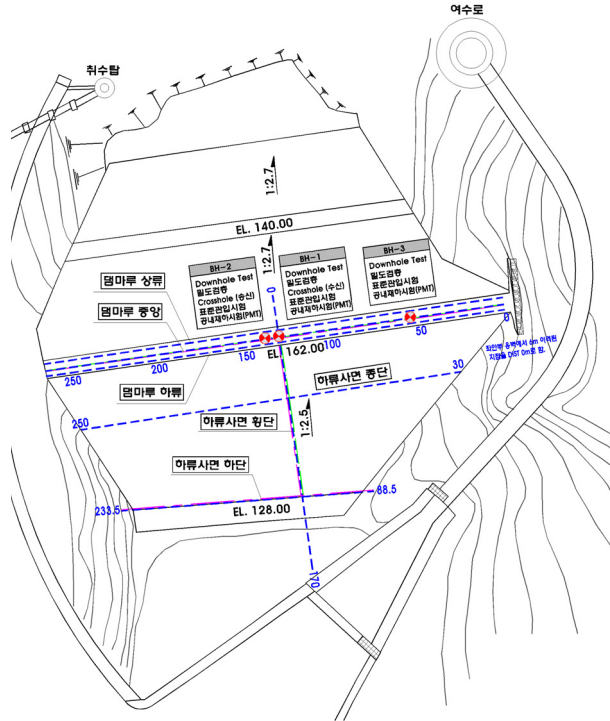


그림 1. 물리탐사 및 현장조사 전체 측선 위치도

표 1. 물리탐사 및 현장조사 전체 현황 및 수량

조사 항목		측선 위치	측선 좌표 및 심도			수량
			BH-1	BH-2	BH-3	
물리탐사	전기비저항 탐사 (3,045 m)	댐마루 상류	0 ~ 265			780 m
		댐마루 중앙	0 ~ 265			780 m
		댐마루 하류	0 ~ 265			780 m
		하류사면 중단	30 ~ 250			220 m
		하류사면 횡단	0 ~ 170			340 m
		하류사면 하단	88.5 ~ 233.5			145 m
	굴절법 탄성과 탐사 (655 m)	댐마루 중앙	-5 ~ 264			269 m
		하류사면 횡단	32 ~ 122			90 m
		하류사면 하단	88.5 ~ 236.5			296 m
표면과 탐사 (359 m)	댐마루 중앙	-5 ~ 264			269 m	
	하류사면 횡단	32 ~ 122			90 m	
현장조사 및 시험	시추 조사	댐마루 중앙	21.45	21.0	26.0	3 공 (68.45 m)
	표준관입 시험	댐마루 중앙	7 회	6 회	6 회	21 회
	공내제하 시험	댐마루 중앙	1 회	1 회	3 회	5 회
	밀도 검층	댐마루 중앙	17.7	17.6	21.5	3 공
	공내 탄성과 탐사	댐마루 중앙	17.7	17.7	16.7	3 공
	시추공간 탄성과 탐사	댐마루 중앙	1 ~ 17 m			1 단면

전기비저항 탐사 결과 댐체에 수평적인 물성변화가 거의 없는 것으로 나타나 댐체의 최대단면인 댐체의 중앙부와 기반암과의 심도가 가까운 좌안부에서 시추조사를 실시하였다. 시추조사를 통해 획득된 코아재로부터 지층 구성상태 등을 확인하였으며, 코아재에서 시료를 채취하여 액상화 특성과 다양한 변형을 크기에 대한 변형계수와 감쇠비 특성을 얻을 수 있는 진동반복삼축압축 시험과 공진주 시험과 같은 실내 시험을 실시하였다. 또한, 시추조사시 지하수위 측정, 표준관입 시험과 공내재하 시험 등을 병행하여 각 지층의 역학적 특성을 파악하였다.

동적해석에서 가장 중요한 입력 자료인 지층별 종파 및 전단파 속도와 동탄성계수를 산출하기 위해 지표탐사로 굴절법 탄성과 탐사와 표면파 탐사를 댐마루와 하류사면에서 수행하였다. 한편, 시추조사시 시추공 유지를 위해 시추공내에 스틸 케이싱을 설치하여 음파 검층과 부유식 음파검층의 적용이 어려워 시추공 조사로는 밀도검층, 공내 탄성과 탐사와 시추공간 탄성과 탐사를 실시하였다.

### 3. 현장조사기법 비교 분석

#### 3.1 결과의 신뢰성 검토

댐마루에서는 지표탐사, 공내 탄성과 탐사와 시추공간 탄성과 탐사를 통해 획득된 3가지의 심도 및 지층별 탄성과 속도가 산출되었으며, 각 조사방법에서 산출된 탄성과 속도 값은 다소 차이가 있다. 이에 각 조사방법에서 산출된 탄성과 속도를 비교하여 동적해석에 적용될 최종적인 지층별 탄성과 속도와 동탄성계수를 산출하여야 한다.

먼저, 지표탐사에서 획득된 탄성과 속도의 신뢰성을 검증하기 위하여 탄성과 속도단면에서 시추공 위치의 탄성과 속도를 추출하여 공내 탄성과 탐사 결과와 비교하였다. 지표 탐사에서 획득된 3개의 시추공에서의 심도별 탄성과 속도는 시추공 BH-1, BH-2와 BH-3의 좌표가 각각 130m, 138m와 54 m이므로 탄성과 속도는 128 ~ 132 m, 136 ~ 140 m와 52 ~ 56 m 구간에서 평균을 취하여 추출하여 30 m 심도까지 나타내었다. 그림 2는 3개의 시추공 위치에서 획득된 지표탐사에 의한 탄성과 속도와 공내 탄성과 탐사 결과를 함께 도시한 것으로 그림에서 빨간색 원과 파란색 마름모는 지표탐사에서 획득된 종파와 전단파 속도이며, 파란색과 빨간색 실선은 공내 탄성과 탐사에서 획득된 종파와 전단파 속도이다.

그림 2를 보면 종파와 전단파 속도 모두 매우 유사한 값을 보여주고 있다. 따라서 본 조사에 굴절법 탄성과 탐사와 표면파 탐사를 통해 획득된 종파와 전단파 속도가 상당히 신뢰할 수 있는 결과를 도출하였다고 판단된다.

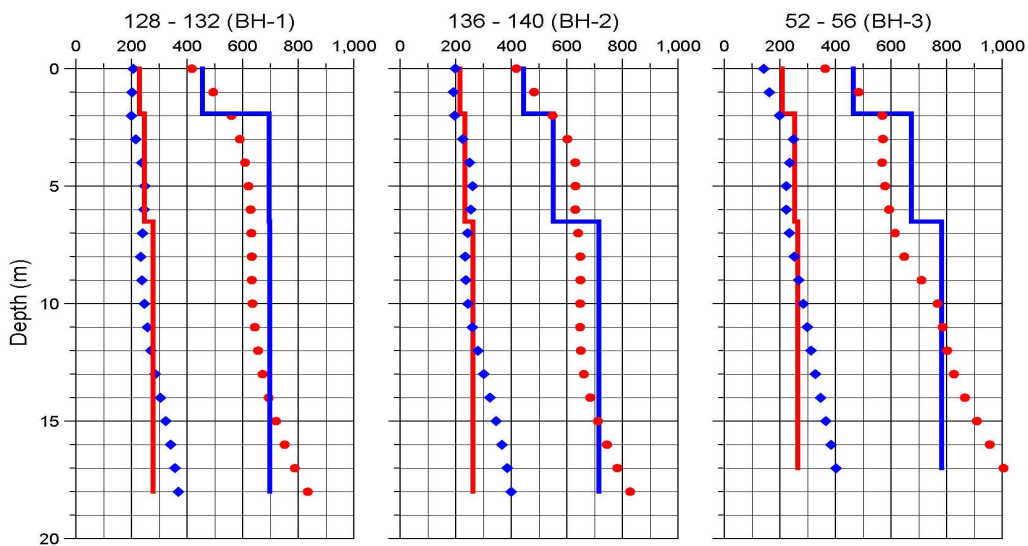


그림 2. 지표탐사와 공내 탄성과 탐사에 의해 산출된 심도별 탄성과 속도

그림 2에서 심도별 탄성과 속도를 보면, 공내 탄성과 탐사에서는 6.5 m 심도를 경계로 탄성과 속도가 증가하는 반면에 지표탐사에서는 6.5 m 심도를 경계로 탄성과 속도가 크게 증가하지는 않으며, 약 12 m 심도까지 일정한 값을 보이다가 그 이상의 심도에서 점진적으로 탄성과 속도가 증가되는 양상을 보여주고 있다. 다만, 시추공 BH-3 위치에서의 지표탐사 결과에서는 7 m 이상의 심도에서 탄성과 속도가 증가되는 양상을 보여주고 있다. 본 조사에서는 송수신공이 시추공에 위치하여 획득된 탄성과 속도의 신뢰도가 높은 것으로 알려진 시추공간 탄성과 탐사 결과를 토대로 6.5 m 심도를 지층 경계로 구분하였으며, 이를 토대로 공내 탄성과 탐사와 시추공간 탄성과 탐사의 지층별 탄성과 속도를 산출하였다. 하지만, 굴절법 탄성과 탐사와 표면과 탐사에서는 6.5 m 심도를 경계로 별다른 탄성과 속도의 증가가 크게 나타나지 않으며, 또한 공내 탄성과 탐사에서도 시추공 BH-1에서는 별다른 속도 변화가 나타나지 않고 있다.

### 3.2 댐체 내 점토층의 층구분

일반적으로 지층은 시추조사를 통해 획득된 시추 코아에 대한 지질학적 검토와 표준관입시험을 비롯한 시추공에서 수행된 조사에 의해 구분되며, 코아를 회수하기 힘든 석유탐사에서는 자연전위와 자연감마 검층 결과를 토대로 지층을 구분한다. 심도별 검층 결과를 보면 자연감마에서는 약간의 요동을 제외하고는 심도별 변화가 거의 나타나지 않으며, 밀도 검층에서도 일부 구간에서 밀도가 낮게 나타나는 것을 제외하면 큰 변화는 나타나지 않는다. 다만, 심도별 밀도를 보면 4 ~ 5 m 심도에서 밀도 값이 감소한 이후에 6 m 이상의 심도에서 다시 증가되는 특이한 양상을 보여주고 있다. 그림 3은 시추공 BH-1, BH-2와 BH-3에서의 심도별 밀도를 1 m 단위로 도시한 것으로, 4 ~ 5 m 이전 구간과 6 m 이후 구간의 밀도 값은 큰 차이를 보이고 있지 않다.

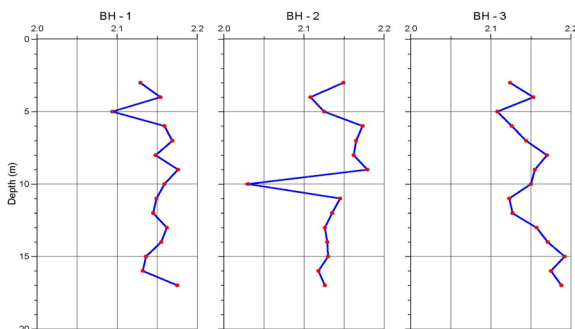


그림 3. 댐마루에서의 심도별 밀도 분포

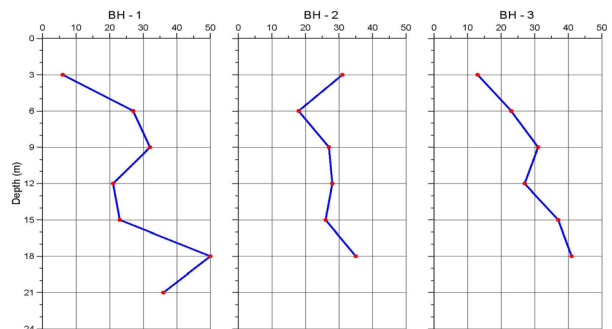


그림 4. 댐마루에서의 심도별 표준관입시험 결과

이상의 결과로 판단컨대 공내 탄성과 탐사와 시추공간 탄성과 탐사에서 6.5 m 심도를 경계로 탄성과 속도가 변하는 것은 4 ~ 5 m 심도의 밀도가 낮아지는 구간과 표준관입 시험에서 N 값이 낮게 나타나는 시추공 BH-2의 6 m 심도에 의한 영향으로 사료된다. 따라서 댐체 내 점토층의 물성은 전반적으로 15 m 심도까지 비슷한 양상을 보이거나 6 m 이전 구간에 국부적으로 물성이 낮아지는 구간이 존재하는 것으로 판단된다. 따라서 댐체 내 점토층의 지층을 6.5 m 심도를 경계로 구분하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한, 밀도검층 결과를 보면 17 m 심도에서 밀도가 다소 증가되는 양상을 보이며, 표준관입 시험 결과에서도 18 m 심도에서 N 값이 30 이상으로 증가하고 있다. 이는 굴절법 탄성과 탐사와 표면과 탐사에서도 동일한 양상을 보여주고 있으며, 공내 탄성과 탐사에서도 자료가 부족하여 지층을 구분하기는 힘들지만 댐체 내 점토층의 지층은 1.9 m 경계로 모래 및 자갈층과 점토층으로 구분되며, 점토층 내에서 15.5 m를 경계로 지층의 물성이 다소 증가되는 것으로 보는 것이 타당하다고 사료된다. 이에 이상의 논의에서는 점토층의 지층을 1.9 m, 6.5 m와 15.5 m를 경계로 지층을 구분하여 지층별 탄성과 속도와 동적물성을 산정하였다.

### 3.3 댐체 내 점토층의 탄성과속도 및 동탄성계수

댐마루에서 수행된 굴절법 탄성과 탐사, 표면과 탐사, 공내 탄성과 탐사와 시추공간 탄성과 탐사 결과에서 댐마루 중앙에서의 심도별 탄성과 속도를 산출하였으며, 그 결과는 그림 5와 같다. 굴절법 탄성과 탐사와 표면과 탐사 결과는 시추공 BH-1과 BH-2의 위치가 각각 130 m와 138 m 이므로 이 구간을 중심으로 좌우 20 m 구간인 124 ~ 144 m 구간에서의 탄성과 속도에 평균을 취해 1 m 심도별로 정리한 것이며, 공내 탄성과 탐사 결과는 시추공 BH-1과 BH-2에서의 지층별 탄성과 속도에 평균을 취한 것이다.

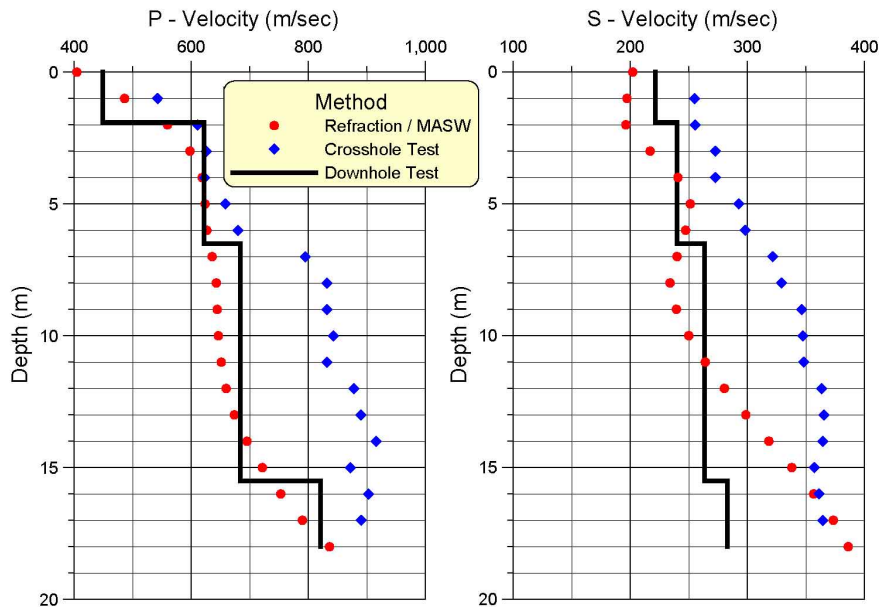


그림 5 댐마루 중앙에서 조사방법에 따라 산출된 심도별 탄성과 속도

일반적으로 시추공간 탄성과 탐사, 음파검층과 부유식 음파 검층은 시추공내에서 직접 탄성과 속도를 측정하므로 지표 탐사나 공내 탄성과 탐사에 비해 신뢰도가 높다고 알려져 있다. 또한, 지표 탐사와 공내 탄성과 탐사는 전파에 따른 감쇠와 분산으로 인해 시추공간 탄성과 탐사, 음파검층 또는 부유식 음파 검층에 비해 그 속도가 다소 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다. 이는 탄성파가 주파수에 따라 탄성과 속도가 다소 달라지는 분산 특성을 보이기 때문으로 지표 탐사나 공내 탄성과 탐사에 비해 시추공에서 측정되는 탄성파의 주파수가 다소 높기 때문이다.

그림 5를 보면 지표 탐사와 공내 탄성과 탐사 결과는 다소 유사한 탄성과 속도를 보이는 반면에 시추공간 탄성과 속도는 그 값이 다소 크게 나타나고 있다. 특히, 5 ~ 15 m 심도에서는 그 차이가 상당하며, 15 m 이상의 심도에서는 지표 탐사에 의한 탄성과 속도가 시추공간 탄성과 탐사에 의한 탄성과 속도에 점차 근접하고 있다. 시추공간 탄성과 탐사에서는 탄성과 속도의 신뢰성을 높이기 위해 시추공의 위치가 심도에 따라 변하는 양상을 계측하는 공극 검층을 병행하나, 본 조사에서는 시추공벽이 스틸 케이싱으로 이루어져 있어 이를 수행하지 못했다. 하지만, 본 조사 대상체는 점토층으로 이루어져 있는바 심도에 따라 시추공의 위치가 크게 변하지는 않을 것으로 판단되나, 시추공간 탄성과 탐사에 의해 산출되는 탄성과 속도가 지표 탐사와 공내 탄성과 탐사에 비해 상당히 높게 나타나는바 자료의 신뢰성은 다소 떨어진다고 볼 수 있다. 따라서 본 조사에서는 지표 탐사, 공내 탄성과 탐사와 시추공간 탄성과 탐사에 의한 산출된 탄성과 속도에 평균을 취해 최종적인 댐체 내 코아재에서의 탄성과 속도와 동탄성계수를 산출하였으며, 표 2는 각 조사 방법에 의한 지층별 탄성과 속도와 동탄성계수이며, 표 3은 각 조사방법 결과에 평균을 취해 구한 탄성과 속도와 동탄성계수이다.

표 2. 뱀마루 중앙에서 조사방법에 따라 산출된 탄성과속도 및 동탄성계수

공번	지층	심도 (m)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	종파 속도 (m/sec)	전단파 속도 (m/sec)	포아송비	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	전단계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )
지 표 탐 사	자갈	1.9	1.800	482	199	0.397	2,034	728
	점토	6.5	2.136	612	232	0.416	3,324	1,174
	점토	15.5	2.145	679	289	0.389	5,075	1,827
	점토	30.0	2.146	1,139	386	0.435	9,346	3,256
공내 탄성과 탐사	자갈	1.9	1.800	449	221	0.339	2,413	901
	점토	6.5	2.136	622	240	0.413	3,540	1,253
	점토	15.5	2.145	684	263	0.413	4,291	1,518
	점토	18.0	2.146	820	283	0.433	5,019	1,752
시추공간 탄성과 탐사	자갈	1.9	1.800	577	255	0.378	3,295	1,195
	점토	6.5	2.136	647	284	0.381	4,850	1,756
	점토	15.5	2.145	854	349	0.400	7,470	2,668
	점토	17.0	2.146	897	363	0.402	8,078	2,881

표 3. 뱀마루 중앙에서의 최종 지층별 탄성과속도 및 동탄성계수 분포

지층	심도 (m)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	종파 속도 (m/sec)	전단파 속도 (m/sec)	포아송비	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	전단계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )
자갈	1.9	1.800	503	225	0.374	932	3,396
점토	6.5	2.136	627	252	0.404	1,383	6,724
점토	15.5	2.145	739	300	0.401	1,976	9,314
점토	30.0	2.146	952	344	0.425	2,587	16,400

### 3.4 하류사면의 탄성과 속도 및 동탄성계수

하류사면에서는 시추 조사가 어려워 지표탐사인 굴절법 탄성과 탐사와 표면과 탐사를 수행하여 심도별 탄성과 속도를 산출하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 심도별 탄성과 속도는 하류사면 하단부에서 기반암으로 인해 탄성과 속도가 증가되므로 하류사면 중앙부인 70 ~ 90 m 구간에서의 탄성과 속도에 평균을 취해 구하였다.

그림 6을 보면 굴절법 탄성과 탐사에 의해 획득된 종파 속도는 심도에 따라 탄성과 속도가 증가되는 양상을 보이는 반면에, 표면과 탐사에 의해 획득된 전단파 속도는 5 m 심도까지 증가하다가 5 ~ 10 m 심도에서 탄성과 속도가 감소한 이후에 다시 증가되는 양상을 보여주고 있다. 이는 굴절법 탄성과 탐사는 가장 먼저 도달되는 탄성과의 주시 정보를 이용하므로 지층 내에 저속도층이 있어서 이를 분해하기 힘든 반면에, 표면과 탐사에서는 주파수에 따라 해석 심도가 달라지는 바 지층내의 저속도층을 효과적으로 탐지하기 때문이다. 따라서 하류사면의 지층은 4.5 m와 15.5 m를 경계로 하는 3개의 지층으로 구분하는 것이 타당한 것으로 사료된다.

표 4는 하류사면에서 획득된 종파와 횡파 속도를 4.5 m와 15.5 m 심도를 경계로 하는 3개의 지층으로 구분하여 산출한 각 지층별 탄성과 속도와 동탄성계수로 각 지층별 탄성과 속도는 심도별 속도에 평균을 취해 구하였다. 표 4를 보면 각 지층이 종파 속도는 각각 494, 863, 1,530 m/sec이며, 전단파 속도는 각각 242, 390, 518 m/sec이다. 여기서 밀도는 별도의 밀도 자료가 없어서 탄성과 속도를 고려하여 1.9, 2.0, 2.1 g/cm<sup>3</sup>으로 하였다.

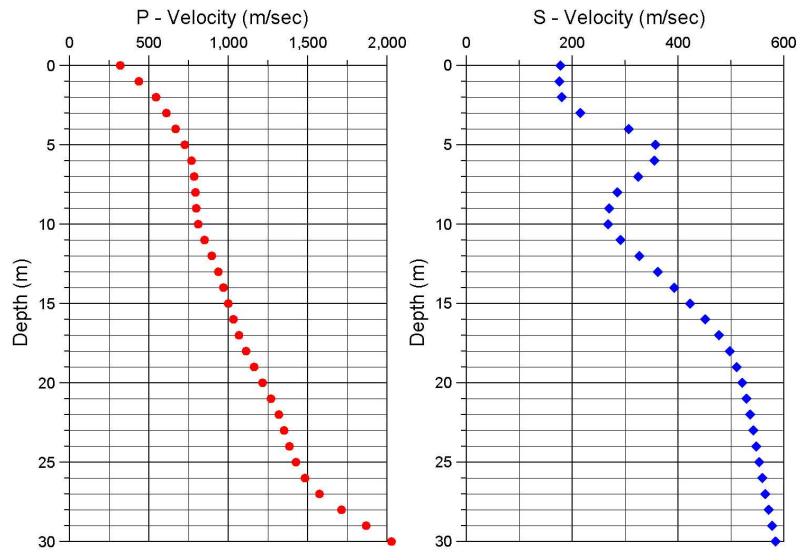


그림 6 하류사면에서 산출된 심도별 탄성과 속도

표 4 하류사면에서의 지층별 탄성과속도 및 동탄성계수 분포

지층	심도 (m)	밀도 ( $\text{g/cm}^3$ )	종파 속도 (m/sec)	전단파 속도 (m/sec)	포아송비	영률 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	전단계수 ( $\text{kgf/cm}^2$ )
사력층	4.5	1.9	494	242	0.342	3,051	1,137
사력층	15.5	2.0	863	390	0.372	8,513	3,103
사력층	30.0	2.1	1,530	518	0.435	16,486	5,743

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 기존 사력댐의 동적물성 파악과 조사기법의 신뢰성 분석을 위하여 물리탐사기법과 현장조사를 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 지표탐사에서 획득된 탄성과 속도의 신뢰성 검증을 위해 탄성과 속도단면에서 시추공 위치의 탄성과 속도 추출하여 공내 탄성과 탐사와 비교한 결과 종파와 전단파속도 모두 근사한 값을 나타내어 상당히 신뢰할 수 있는 결과를 나타낸 것으로 판단된다.
- 2) 지표탐사와 공내 탄성과탐사의 탄성과 속도의 변화의 원인은 심도별 밀도검층 결과와 표준관입시험에 의한 N 값을 검토한 결과 지층의 밀도와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며 탄성과 속도와 밀도의 분포를 검토하여 동적물성 산정을 위한 지층을 구분하였다.
- 3) 지표탐사와 공내 탄성과 탐사, 시추공간 탄성과 탐사에 의한 탄성과 속도를 비교한 결과 지표탐사와 공내 탄성과 탐사는 유사한 경향을 나타내나 시추공간 탄성과와는 그 값이 다소 크게 나타나 자료의 신뢰성이 다소 떨어지는 것으로 생각된다.
- 4) 이상의 결과로 기존 사력댐의 동적물성 파악을 위한 신뢰성 높은 탄성과 속도단면을 얻기 위해서는 지표탐사, 공내 탄성과와 시추 공간 탄성과 탐사를 이용하여 비교, 분석하여야 하며 밀도검층 또는 표준관입시험으로 지층구분 및 탄성과 속도에 의한 동탄성계수 산출을 위한 밀도를 구하여 한다.

## 참고문헌

1. 오병현, 임정열, 이종욱(2003), “댐 시설물의 내진성능 및 안전도 평가 연구”, 한국수자원공사, pp.441~455.
2. 손호웅 외(1999), “지반환경물리탐사”, 시그마프레스.
3. 장현삼, 임해룡, 홍재호(1999), “시추공 탄성파탐사 및 이의 토목공학적 응용”, 한국지구물리탐사학회 특별심포지움.
4. 한국지반공학회(1994), “지반조사결과의 해석 및 이용”.
5. Kimball, C.V., and Marzetta, T. L.(1984), “Semblance processing of borehole acoustic array data”, *Geophysics*, Vol. 49, pp. 274-281.
6. Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., and Ivanov, J.(1999), “Multichannel analysis of surface waves to map bedrock”, *The Leading Edge*, Vol. 18, No. 12, pp. 1392-1296.
7. Paillet, F.L.(1980), “Acoustic propagation in the vicinity of fractures which intersect a fluid-filled borehole”, *SPWLA*, DD1-33.
8. Paillet, F.L., Cheng, C.H., and Pennington W.D.(1992), “Acoustic-waveform logging - advances in theory and application”, *The Log analyst*, 33, pp. 239-258.
9. Park, C.B., Miller, R.D., and Miura, H.(2002), “Optimum field parameters of an MASW survey”, *SEG-J*, Tokyo, May 22-23.
10. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J.(1999), “Multichannel analysis of surface waves (MASW)”, *Geophysics*, Vol. 64, pp. 800-808.