

하상토 부존량 조사를 위한 물리탐사 사례 연구

윤종열^{1*} · 김진만² · 최봉혁²

¹(주)삼보지오텍

²한국건설기술연구원 지반방재 · 환경연구실

Case Study of Geophysical Surveys for Investigating the Volume of Bed Sediments

Jong-Ryeol Yoon^{1*}, Jin-Man Kim², and Bong-Hyuck Choi²

¹SamboGeotek Co.

²Geotechnical Disaster and Environment Research Division., KICT

하상토의 부존량을 경제적으로 파악하는데 효과적인 것으로 예상되는 굴절법탄성파탐사를 상이한 토질의 2개소에 적용하였다. 대상지역은 용인시 월촌교 인근 제방 및 예천군 담암제이며 총 10축선의 굴절법탄성파탐사가 수행되었다. 아울러 역산된 탄성파단면상에서 지층을 구분하기 위해 2개의 시추조사가 병행되었다. 취득된 탐사자료를 역산하여 지층을 구분하고 고도 측량자료와 각 지점별 토사층 심도를 내삽한 결과 각각 24,000 m³ 및 56,000 m³로 하상토의 부존량 추정 가능성이 가능하였다.

주요어 : 하상토, 굴절법탄성파탐사, 시추, 내삽

Seismic refraction survey which is assumed to be effective for investigating of the amount of bed sediment was applied to two sites having different soil types. The ten lines of seismic surveys were carried out in the areas of the levee near the Wolchon Bridge, Yongin and the Damam levee, Yecheon. At the same time, two borehole data were obtained to be used in classifying geological formations on the inverted seismic sections. As the results of interpolating the depths of geological formations and the surface elevation values, it is possible to estimate the volume of the bed sediments at 24,000 m³ and 56,000 m³ in Yongin and Yecheon, respectively.

Key words : bed sediment, seismic refraction survey, boring, interpolation

서 론

하천제방의 안정성 향상을 위해서는 성토재료, 다짐 관리, 수리구조물 및 차수벽 설치 등의 여러 가지 요인이 고려되어야 하지만, 양질의 성토재료는 시공 현장에서 쉽게 구할 수 없으므로 하천제방 축조의 경제성 및 안정성에 있어서 가장 중요한 요소중의 하나이다.

최근 들어 장기간 토사가 퇴적된 하천의 홍수통통능력 회복을 위한 하도준설사업(1999~2012)의 일환으로 약 1억 9,800백만 m³의 하상토 준설이 추진되고 있으며(한국건설기술연구원, 2004), 긴급 보수공사 등에 활용되

는 토목섬유 컨테이너 공법에서도 하상준설토가 사용되는데 등 하상토를 이용한 하천제방 축조기술의 연구가 활발히 진행되고 있다(한국건설기술연구원, 2002; 한국해양연구원, 2002). 따라서 하상준설토를 활용하여 제방을 축조하는 기술의 개발이 매우 필요한 실정이며 이러한 기술의 개발은 준설폐기물 발생량 및 모래 등의 천연골재 사용량을 감소시키는 등 환경적인 면에서도 유용하다.

이처럼 하상토를 이용한 제방축조 기술을 개발함에 있어 하상토의 부존량을 빠른 시간에 경제적으로 추정할 수 있는 물리탐사법의 적용은 매우 중요하다고 할 수 있다. 현재 국내의 하천공사 시방서에서는 준설작업

*Corresponding author: jryoon@geotek.co.kr

시 음향측심기를 이용하여 수심을 확인한 후 기준 하상도 심도를 일괄적으로 적용하여 하상도의 부존량 즉 준설토량을 추정하는 것으로 규정되어 있으며 보다 정확한 준설도 부존량 산정에 대한 언급이 없다. 그러나 하저지형이 불규칙하거나 퇴적물의 두께변화가 심한 경우에는 위와 같은 방법으로 산출한 부존량은 매우 많은 오차를 야기할 수 밖에 없다.

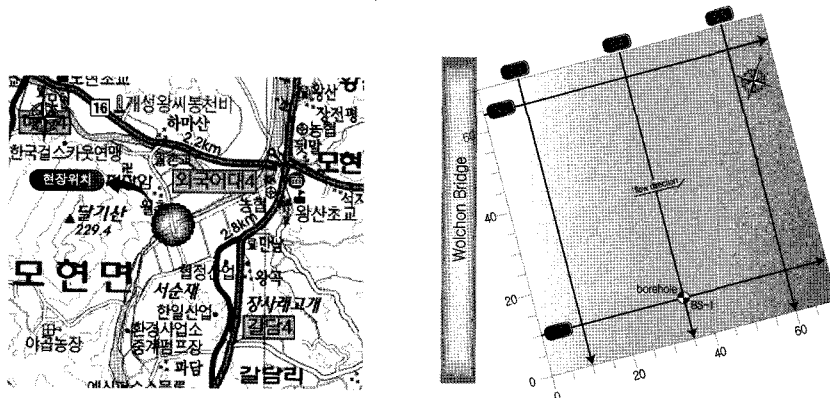
그러므로 본 연구에서는 보다 신속하고 경제적이며 객관적인 하상도 부존량을 추정할 수 있는 물리탐사법을 적용하고자 하였다. 현재 하상퇴적물 조사를 위한 물리탐사법은 수십 khz의 주파수 대역 음원을 사용하는 음파탐사가 주로 적용되고 있으며 GPR탐사나 굴절법탄성파탐사 혹은 부분적으로 비저항탐사가 적용된 사례도 있다(김정호 외, 2002: 장현삼과 정성태, 2002: 정호준 외, 2002: 차성수 외, 2002).

본 연구에서는 대부분의 대상 하천심도가 1-2m 정도

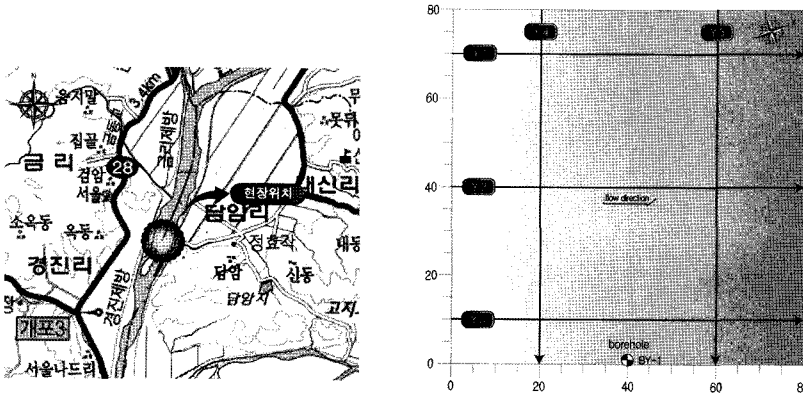
로 낮거나 건천인 경우가 많은 것을 고려하여 수륙에서 적용 가능한 GPR탐사나 굴절법탄성파탐사를 적용하였다. 그러나, GPR탐사의 경우 수심이 깊고 퇴적층이 두꺼운 곳에서는 전자파의 감쇠로 인해 원하는 결과를 얻을 수 없었으므로 본 논문에서는 굴절법탄성파탐사 자료만을 제시하였다.

조사 개요

2006년 4~5월에 걸쳐 용인시 처인구 모현면 월촌교 및 예천군 호명면 담암리 담암제 일대에서 각각 5측선의 굴절법탄성파탐사가 실시되었다(Fig. 1). 퇴적층 심도 및 분해능을 고려하여 수진기 간격은 5m로 설정하고 측선 길이에 따라 14~16 채널의 수진기를 사용하였다. 토모그래피 역산법을 이용하여 탄성과 단면을 작성하였으며, 역산된 탄성파속도로부터 하상도의 심도를 결정하



(a) Wolchon bridge, Mohyun-myun, Yongin



(b) Damam levee, Damam-ri, Yecheon

Fig. 1. The location maps of seismic refraction survey lines and boreholes.

Table 1. Detail informations of seismic surveys and borehole.

| Method | Survey Line/Borehole | Length | Receiver Interval/Depth | Area |
|---------------------------|----------------------|--------|-------------------------|----------------|
| Seismic Refraction Survey | S1~S5 | 80 m | 5 m | Wolchon Bridge |
| | Y1~Y5 | 70 m | 5 m | Damam Levee |
| Boring | BS-1 | - | 6.0 m | Wolchon Bridge |
| | BY-1 | - | 12.0 m | Damam Levee |

기 위하여 각 지역별로 시추조사를 병행하였다(Table 1). 또한 지형보정 및 하상토 부존량 계산을 위해 수진간격과 동일한 간격으로 탐사지역내 격자점을 형성하여 레벨측량을 실시하였다.

기본 원리

굴절법탄성파탐사

굴절법탄성파탐사는 굴절파의 초동주시를 발췌한 후 비선형주시 토모그래피 역산법을 이용하여 해석하였다. 토모그래피 역산법은 해석 대상을 유한요소로 세분하여 계산하게 된다. 발생원에서 생성된 탄성파는 각 셀(cell)의 탄성과 전달속도에 따라 각기 다른 초동 주시를 가지며 수신기에 기록된다. 이렇게 여러 셀을 통과한 탄성파의 전체 주시는 현장에서 측정된 탄성파 트레이스의 초동 주시와 같게 될 것이며 이로부터 각 셀의 탄성과 속도를 미지수로 하는 하나의 방정식이 성립된다. 이러한 연립방정식의 해를 구함으로써 각 셀의 탄성과 속도 분포를 구할 수 있게 된다.

연속적인 탄성과 속도분포를 가지는 매질에서 탄성과 도달시간과 탄성파 속도는 식(1)과 같은 관계를 가질 것이다.

$$t_i = \int_{x_0}^{x_i} \frac{dx}{v(x)} = \int_{x_0}^{x_i} s(x) dx \quad (1)$$

여기서 s 는 매질의 탄성파속도 v 의 역수인 **slowness**이다.

Fig. 2와 같이 지하매질을 여러 개의 셀로 나누어 생각하면 식(1)을 식(2)와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$t_i = \sum_{j=1}^n s_j l_{ij} \quad (2)$$

식(2)는 일반적인 행렬식으로 표현될 수 있으며, 발진점으로부터 수신점까지 탄성파가 통과하는 최소 경로를 반복 연산에 의해 추적하면서 행렬식을 풀 수 있으므로 최종적으로 각 셀의 탄성과 속도를 결정할 수 있다.

함수의 적분(Integration of Functions)

본 연구에서는 역산된 탄성파속도와 시추자료를 이용

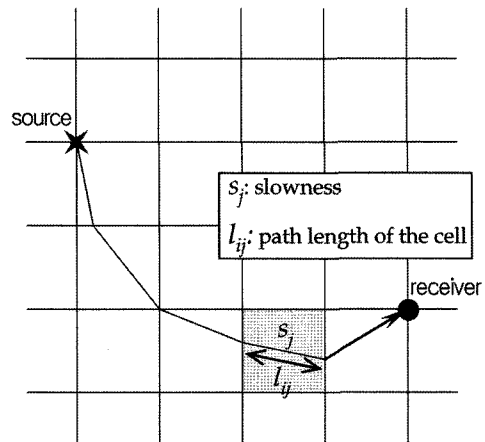


Fig. 2. Ray path in the elastic medium.

하여 하상토의 심도를 결정한 후 고도측량값과 함께 일정 간격으로 내삽한 후 **trapezoidal rule**, **Simpson's rule** 및 **Simson's 3/8 rule**을 이용하여 부피를 계산하였다.

이러한 방법중 **Trapezoidal rule**은 가장 기본적인 근사법으로 Fig 3.과 같이 연속함수를 일정 등간격으로 나눈 뒤, 식(3)과 같이 한 개 구간 단위로 함수의 평균값 개념을 이용하여 근사값을 구한다. 또한 **Simpson** 및 **Simpson's 3/8 rule**은 연속함수를 등간격으로 나눈후 2~3 개 구간 단위로 식(4)-식(5)를 이용하여 근사값을 구한다. 이러한 근사법은 일차원 함수의 적분값을 계산할 때 이용되나, 부피 산정과 같이 2차원 평면을 구성하는 함수의 적분값을 구할 때도 그대로 적용될 수 있다.

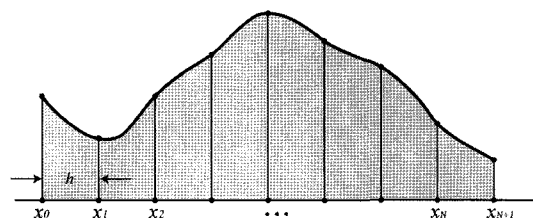


Fig. 3. Computing the integral of function between x_0 and x_{N+1} with equally spaced abscissas.

$$\int_{x_1}^2 f(x)dx = h \left[\frac{1}{2}f_1 + \frac{1}{2}f_2 \right] + O(h^3 f''^2) \tag{3}$$

$$\int_{x_1}^3 f(x)dx = h \left[\frac{1}{3}f_1 + \frac{4}{3}f_2 + \frac{1}{3}f_3 \right] + O(h^5 f''^4) \tag{4}$$

$$\int_{x_1}^4 f(x)dx = h \left[\frac{3}{8}f_1 + \frac{9}{8}f_2 + \frac{9}{8}f_3 + \frac{3}{8}f_4 \right] + O(h^5 f''^4) \tag{5}$$

자료 해석

레벨측량

각 조사지역에서 5 m 간격으로 격자를 이뤄 레벨측량을 실시하였다. 기준점은 각 지역 탐사측선 1번의 시점으로서 레벨값은 0으로 설정하였으며, 하상도의 부존량 계산 및 탐사자료의 역산시 지형보정에 이용하였다. 전반적으로 고도차가 1m 이내로 비교적 작은 편이다(Fig. 4).

시추조사

각 조사 지역당 한 공의 시추조사를 실시하였다. 원칙적으로 시추공 위치를 탐사측선과 중첩되도록 하였으나 예천 담압제의 경우 장비의 진입이 어려워 탐사측선 인근에 시추공 위치를 선정하였다. 시추조사 결과는 각 지역의 하상도 토질을 확인하고 탐사자료 역산단면의 퇴적층 및 암선 구분의 기준자료로 활용되었다.

시추조사 결과 모래 및 자갈로 구성된 퇴적층이 풍부

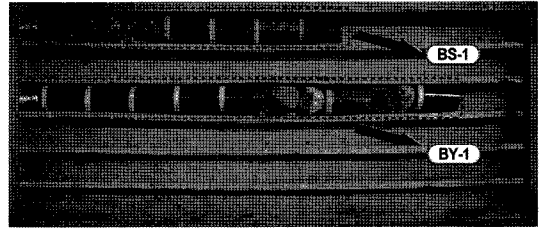


Fig. 5. The core samples of the boreholes.

토 상부에 나타나며 모래의 경우 용인지역이 예천지역에 비해 실트 성분이 높은 것으로 나타났다. 시추에서 확인된 용인지역의 퇴적층 심도는 4.5m로 예천지역의 10.2m보다 매우 낮은 분포를 보였다(Fig. 5).

굴절법탄성파탐사

측정된 굴절파의 초동주시시간을 역산하여 지하매질의 2차원 탄성파속도 단면을 얻었다(Fig. 6~Fig. 7). 지층의 탄성과 속도는 동일 암종이나 토질이라 하더라도 지역에 따라 편차가 있으므로, 본 연구에서는 시추자료와 탄성과 단면을 비교하여 각 지역별 지층분류 속도를 결정하여 구분하였다(Table 2). 상부 퇴적층의 경우 용인지역이 예천에 비해 약간 높으며 하부 퇴적층은 반대 양상을 보인다.

용인 월촌교 조사지역의 경우 자갈층으로 이루어진 상부 퇴적층과 하부 퇴적층의 두께는 각각 0.9~3.4 m와

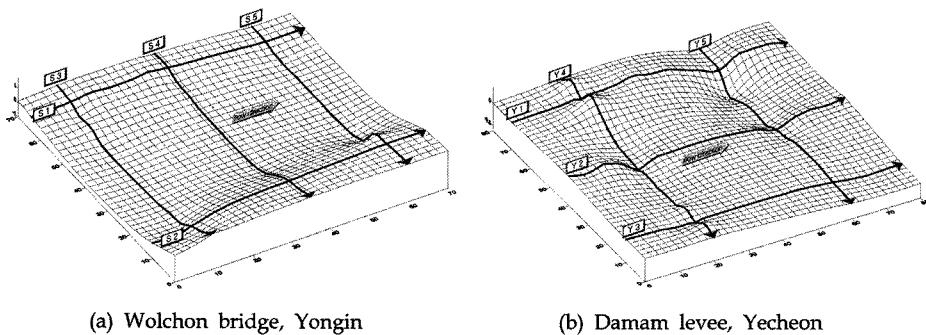


Fig. 4. The surface maps of the survey areas.

Table 2. Seismic velocities of the geological formations.

| Area | Characteristics | Upper Sediment | Lower Sediment | Weathered Soil |
|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| Wolchon Bridge | Vp(km/s) | < 1.2 | 1.2~1.4 | 1.4~2.1 |
| | Sediment Type | Gravel | Sand+Gravel | - |
| Damam Levee | Vp(km/s) | < 1.1 | 1.1~1.5 | 1.5~2.0 |
| | Sediment Type | Sand | Sand+Gravel | - |

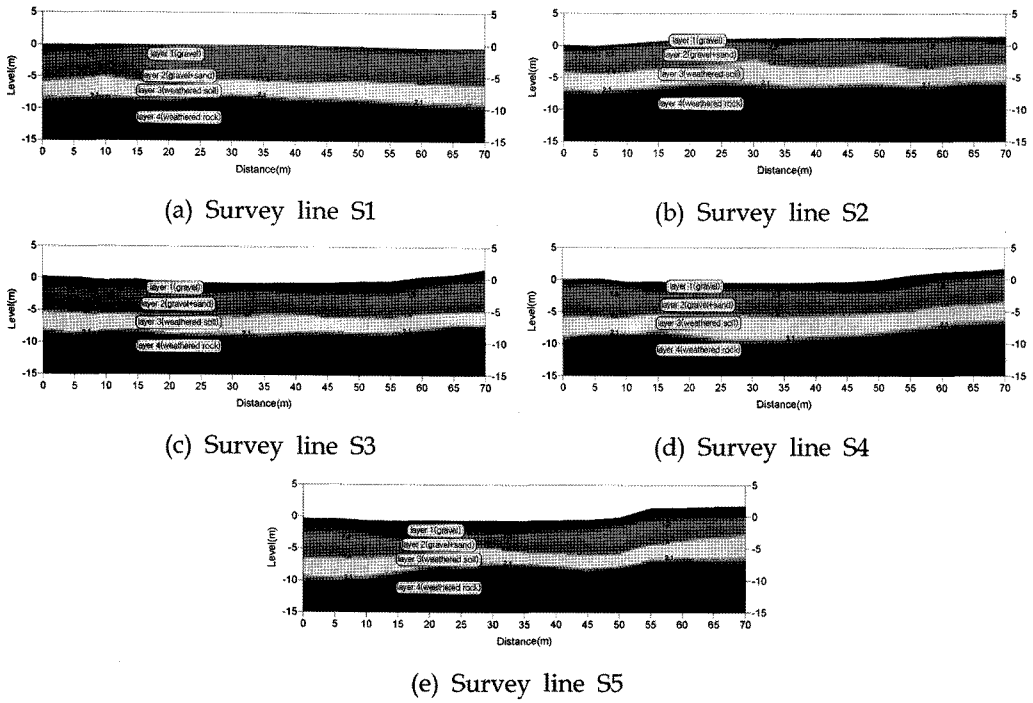


Fig. 6. The inverted seismic sections (Wolchon bridge, Yongin).

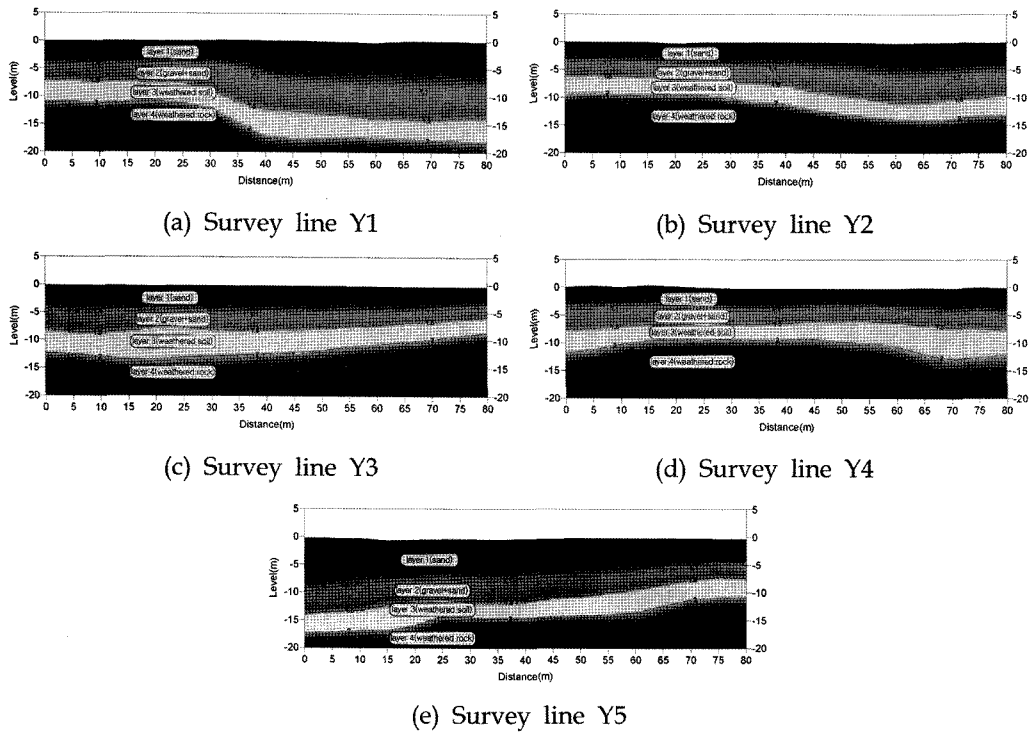


Fig. 7. The inverted seismic sections (Damam levee, Yecheon).

1.9~4.4 m의 분포를 보인다. 또한 자갈로 이루어진 상부 퇴적층의 두께는 대상지역 우측에 위치한 측선 S5에서 크게 나타나나, 하부 퇴적층의 두께는 반대로 대상지역 좌측에 위치한 측선 S3에서 두껍게 나타난다(Fig. 6).

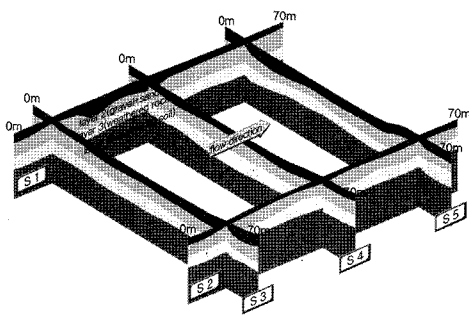
예천 담압제의 경우 모래층으로 이루어진 상부 퇴적층과 자갈과 모래가 혼재하는 하부 퇴적층의 두께는 각각 3.6~9.8 m와 1.8~5.8 m로 상부퇴적층이 더욱 두꺼운 분포를 보인다(Fig. 7).

전체적인 퇴적층 심도는 용인의 경우 5.3~9.0 m이며, 예천의 경우 6.0~13.9 m로 용인 지역에 비해 퇴적층이 두꺼운 분포를 보인다(Fig. 8, Fig. 9).

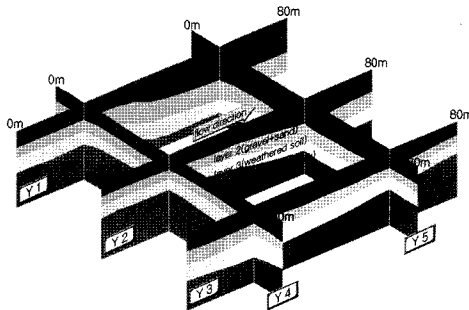
하상토 부피 산정

탄성파탐사 역산단면에서 결정된 퇴적층의 고도값 및 측량 레벨값을 2차원 내삽한 자료를 바탕으로 위에서 언급한 세가지 방법으로 각 지역별 퇴적층의 부피를 계산하였다.

상부 퇴적층 및 하부 퇴적층의 부피는 용인의 경우 각각 10,400 m³와 13,600 m³ 내외로 나타났다(Table 3). 각각의 퇴적층 부피를 더한 퇴적층의 총 부피는 24,000 m³ 내외이다.



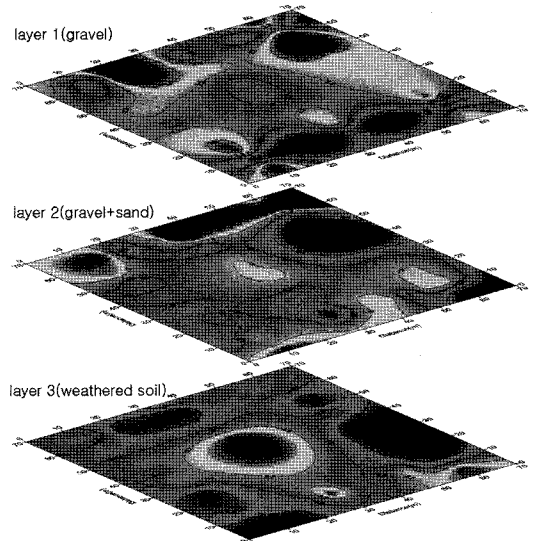
(a) Wolchon bridge, Yongin



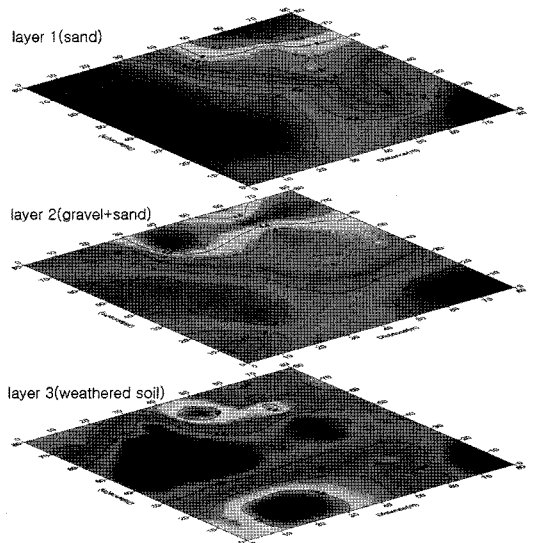
(b) Damam levee, Yecheon

Fig. 8. The fence diagrams of inverted seismic sections.

예천 담압제의 경우에는 상부 및 하부 퇴적층의 부피가 각각 35,000 m³와 21,000 m³ 내외로 나타났다. 각각의 퇴적층 부피를 더한 퇴적층의 총 부피는 56,000 m³ 내외로 용인지역에 비해 2배 이상 높은 값을 보이며 각 계산법별로 큰 차이를 보이지는 않는다(Table 4).



(a) Wolchon bridge, Yongin



(b) Damam levee, Yecheon

Fig. 9. The thickness contour maps of the geological formations.

Table 3. The volume of bed sediments (Wolchon bridge, Yongin).

| Formations | Method | Trapezoidal Rule(m ³) | Simpson's Rule(m ³) | Simpson's 3/8 Rule(m ³) |
|-----------------------|--------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| layer 1 (gravel) | | 10,386 | 10,392 | 10,361 |
| layer 2 (sand+gravel) | | 13,606 | 13,645 | 13,620 |
| Total | | 23,992 | 24,037 | 23,981 |

Table 4. The volume of bed sediments (Damam levee, Yecheon).

| Formations | Method | Trapezoidal Rule(m ³) | Simpson's Rule(m ³) | Simpson's 3/8 Rule(m ³) |
|-----------------------|--------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| layer 1 (sand) | | 34,987 | 34,987 | 34,977 |
| layer 2 (sand+gravel) | | 21,038 | 21,035 | 21,049 |
| Total | | 56,025 | 56,022 | 56,026 |

결 론

보다 경제적이고 객관적인 하상토 부존량 추정을 위해 용인과 예천의 제방에서 물리탐사를 실시하였다. 여러 물리탐사법중 수심이 낮거나 건천인 소규모 하천 여건을 고려하여 수륙에서 탐사가 가능한 GPR탐사 및 굴절법 탄성파탐사를 적용하였다. GPR탐사에 비해 굴절법 탄성파탐사는 가탐심도 면에서 유리하므로 퇴적층이 비교적 두꺼운 곳에서도 부존량 추정이 가능하였다. 이러한 하상토 부존량 추정을 위한 물리탐사법의 적용은 하상도를 이용한 제방축조 기술을 개발하는데 있어 필수적이며 현재 하상도 관련 하천설계기준 및 시방서 개정작업에 보다 객관적인 물리탐사법의 적용을 명시하도록 하는 작업이 진행중이다.

사 사

본 연구는 건설기술기반구축사업의 연구비 지원으로 수행된 것을 밝히며 현장 작업에 참여하신 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김정호, 이명종, 송윤호, 조성준, 이성근, 손정술, 정승환, 2002, 하저 지반특성 규명을 위한 수상 전기비저항탐사에 관한 연구, 물리탐사, v.5, 223-235.
 장현삼, 정성태, 2002, GPR탐사에 의한 하상 퇴적물 조사, 한국지구물리탐사학회 제 4회 특별심포지움, 163-178.
 정호준, 김정호, 권형석, 안희운, 김기석, 2002, 장대교량 기초설계를 위한 수륙혼합 물리탐사 사례, 한국지구물리탐사학회 제 4회 특별심포지움, 126-138.
 차성수, 박근필, 이호영, 이희일, 김호영, 2002, LPG 지하저장기지 건설을 위한 수륙혼합 물리탐사 사례, 한

국지구물리탐사학회 제 4회 특별심포지움, 101-125.
 한국건설기술연구원, 2004, 하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서.
 한국건설기술연구원, 2002, 강우로 인해 유실된 선로복구를 위한 토목섬유 콘테이너의 실용화 기술개발.
 한국해양연구원, 2002, 준설토 재활용 방안 연구(II).

2007년 10월 18일 원고접수, 2007년 12월 13일 게재승인

윤종열

(주)삼보지오텍

411-803 경기도 고양시 일산서구 대화동 2042

Tel: 031-913-4071

Fax: 031-913-4074

E-mail: jryoon@geotek.co.kr

김진만

한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실

411-712 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190

Tel: 031-910-0211

Fax: 031-910-0561

E-mail: jmkim@kict.re.kr

최봉혁

한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실

411-712 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190

Tel: 031-910-0290

Fax: 031-910-0561

E-mail: bhchoi@kict.re.kr