

표면파탐사를 이용한 저수지 제체 그라우팅 보강효과 검증 연구

배형섭* · 원경식 · 이영동

지오테크컨설턴트(주)

A Validation Study on the Reinforcement Effect of Reservoir Grouting by Surface Wave Survey

Hyungseop Bae* · Yeong-Dong Lee · Kyoung-Sik Won

Geotech Consultant, Co., Ltd.

Abstract

In order to assess the safety diagnosis and grouting reinforcement effect of old reservoir facility, local governments and public offices mainly use electrical resistivity survey. However, electrical resistivity survey is a qualitative evaluation that varies the resistivity value by various exploration conditions. It is also difficult to grasp the stiffness change directly related to the stability of reservoir, thus an electrical resistivity survey is not applicable to continuous stability monitoring after grouting. The purpose of this study is to investigate and validate the quantitative evaluation of reinforcement effect of reservoir with cement grouting through shear velocity (V_s), which is closely related to the stiffness (μ) of the ground. This study was carried out on two reservoir facilities. The reinforcement effect was evaluated by comparing the permeability test, standard penetration test, down-hole test and MASW(Multi-channel Analysis of Surface wave) survey before and after cement grouting. Shear wave velocity changes before and after grouting were analyzed by phase velocity difference and inversion analysis, respectively, and the reliability of the analytical results was evaluated by comparing with field test results. Shear wave velocity increases to 5~10% in case of the D levee, and 10~20% in the levee of H reservoir. These results are showed similar pattern to the field test results.

Keywords: Grouting, MASW, Shear velocity, Reservoir facility

초 록

노후 제체의 안전진단 및 그라우팅 보강효과 판정을 위해 지자체와 관공서는 전기비저항탐사를 주로 활용하고 있으나, 전기비저항탐사는 다양한 탐사조건에 의해 비저항 값이 변하는 정성적 평가이다. 또한 제체의 안정성과 직결되는 강성변화(stiffness change)를 파악하기 어려워, 그라우팅 시공 후 지속적인 안정성 모니터링에는 그 적용성이 떨어진다. 이에 본 연구는 지반의 강성(μ)과 밀접한 관계가 있는 전단파속도(V_s , shear velocity)를 통해 시멘트 그라우팅 시공에 따른 제체의 정량적인 보강효과에 대한 검증 방안을 연구하였고, 검증방안에 대한 적용성을 검토하였다. 본 연구는 2개소의 제체를 대상으로 수행되었으며, 시멘트 그라우팅 시공 전·후의 투수시험, 표준관입시험, 다운홀시험(Down-hole Test) 및 MASW(Multi-channel Analysis of Surface wave) 탐사결과를 대비 분석하여 보강효과를 평가하였다. 그라우팅 시공 전·후 전단파속도 변화는 위상속도차(phase velocity difference) 및 역산해석(inversion analysis)을 통해 각각 분석하였으며, 현장시험 결과와의 비교를 통해 분석결과의 신뢰성을 평가하였다.

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Hyungseop Bae
E-mail: hasbae@geoinfo.co.kr

Received: 25 May, 2018

Revised: 14 June, 2018

Accepted: 19 June, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

D 제방의 경우 약 5~10%, H 제방은 약 10~20% 이상의 속도증가가 나타났으며, 현장시험결과와 유사한 양상의 결과를 나타냈다.

주요어: 그라우팅, MASW, 전단파 속도, 제체

서론

최근 지진 및 집중호우 등 저수지 제체(댐 과 제방)의 안정성을 위협하는 자연재해의 발생빈도가 높아짐에 따라 노후 제체에 대한 안전관리 및 보수보강이 요구되고 있다. 특히, 국내의 농업용 저수지는 총 17,477개 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2014)로, 이 중 준공 후 50년 이상 경과된 노후 저수지는 약 70%, 준공 후 30년 이상 경과된 저수지는 전체의 95%에 해당될 만큼 국내 저수지의 노후화가 심각하며, 계속 심화되고 있다. 이러한 노후 저수지 제체의 안정성을 확보하기 위해 주기적인 안전진단 및 시멘트 그라우팅을 통한 보수·보강이 이루어지고 있으며, 이에 따른 제체 보강효과를 규명하기 위해 시추조사, 투수시험, 물리탐사 등 다양한 조사가 수행되어지고 있다.

이중 물리탐사기법은 제체의 안정성을 파악하기 위한 기초 조사방법으로 특히 전기비저항 탐사가 주로 이용되고 있으며, 많은 적용성 연구가 수행되어졌다(Kim et al., 2000; Park et al., 2002; Cho et al., 2006; Song et al., 2006; Oh and Suh, 2008; Kim et al., 2015).

전기비저항 탐사는 다양한 연구를 통해 저수지 제체의 누수탐지 및 보강그라우팅 효과 판정에 그 유용성이 확인되었으나, 전기비저항 탐사 특성상 지하매질의 함수조건, 그라우트 재의 화학적 특성, 전극의 접촉조건 등 탐사여건에 의해 정성적 결과를 도출함으로써 주관적 판단이 개입 될 수 있다. 또한 현재 지자체 및 관공서에서 전기비저항탐사를 통한 그라우팅 보강효과 판정은 저수지 제체 내에 과도한 저비저항대의 유무를 통해 판정하는 사례가 대부분으로 안정성과 연관되는 지반 강성도를 평가하기 어려운 단점이 있다(Oh and Sun, 2004).

현재 국내에서 활용되는 물리탐사방법 중 전기비저항 탐사의 단점을 보완하고 지하매질의 강성(μ , ρV_s^2)과 연관되는 탐사방법은 표면파탐사가 유일하다. 표면파탐사는 탄성파 중 레일리파(rayleigh wave)의 분산특성(dispersion property)을 이용하여 전단파속도를 산출하는 탐사기법으로 SASW (Spectral Analysis of Surface wave), HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Waves, CSW (Continuous Surface wave), MASW (Multi-channel Analysis of Surface wave) 등으로 구분된다. 본 연구에서는 표면파탐사 기법 중 탐사방법의 간편성, 자료취득 및 해석의 편의성, 실무적 접근성 등의 고려를 통해 MASW 탐사를 이용하여 연구를 수행하였다.

MASW 탐사는 1990년대 후반에 미국 Kansas 주 지질연구소에 개발되어 2000년 후반 국내에 도입되었다. 이후 구조물, 교량, 저수지 제체, 연약지반 등의 내진설계정수(dynamic modulus)를 도출하는데 주로 활용되어 왔으며, 최근에는 지반함몰(지하공동탐지), 도로 다짐 및 개간, 지반치환, 구조물 기초 그라우팅의 시공평가 등 지반의 강성평가가 필요한 다양한 분야에서 그 영역이 확대되고 있다.

MASW 탐사는 전기비저항 탐사와 비교하여 누수대의 탐지 능력은 떨어지나, 코어 존(core zone)의 균열에 의한 강성저하, 그라우트 재의 침투 및 압밀에 의한 제체 전반의 강성변화를 파악하는 데 장점이 있다. 또한 그라우팅 시공 후의 기준 값을 확보함으로써 주기적 모니터링에 따른 정량적 비교를 통해 제체 안정성을 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 본 연구는 그라우팅 시공에 따른 전단파속도 변화를 통해 보강효과 평가의 유효성을 확인하고, 이를 토대로 기존 단일탐사의 의존성 및 문제점을 보완하는 실무적 적용성을 판단하는 데 그 목적이 있다.

연구지역 및 조사현황

본 연구는 대전시 대덕구의 D 제방 및 공주시 계룡면 하대리 일대에 위치한 H 저수지의 제방을 대상으로 수행되었다. 2개 제체 모두 중심 코어 존(Core zone)을 갖는 필댐(Earthfill dam) 형식으로 분류되며, D 제방은 연장 135 m, 높이 약 15 m, H 제방은 연장 68 m, 높이 약 10 m로서 소규모 제체에 해당한다. D 제방은 국토교통과학기술진흥원 연구과제의 일환으로 수자원공사에서 제공한 시험부지로서 일부 구간을 대상으로 그라우팅 시공 및 현장 검증조사를 수행하였으며, H 제방은 2017년도 지자체 유지관리 대상으로 선정되어 전 구간에 걸쳐 그라우팅 시공이 수행되었다. 제체별 현장조사, MASW 탐사 및 그라우팅 수행 구간은 Fig.1과 같이 도식화하였으며, 시험항목별 조사공 및 위치는 Table 1과 같다.

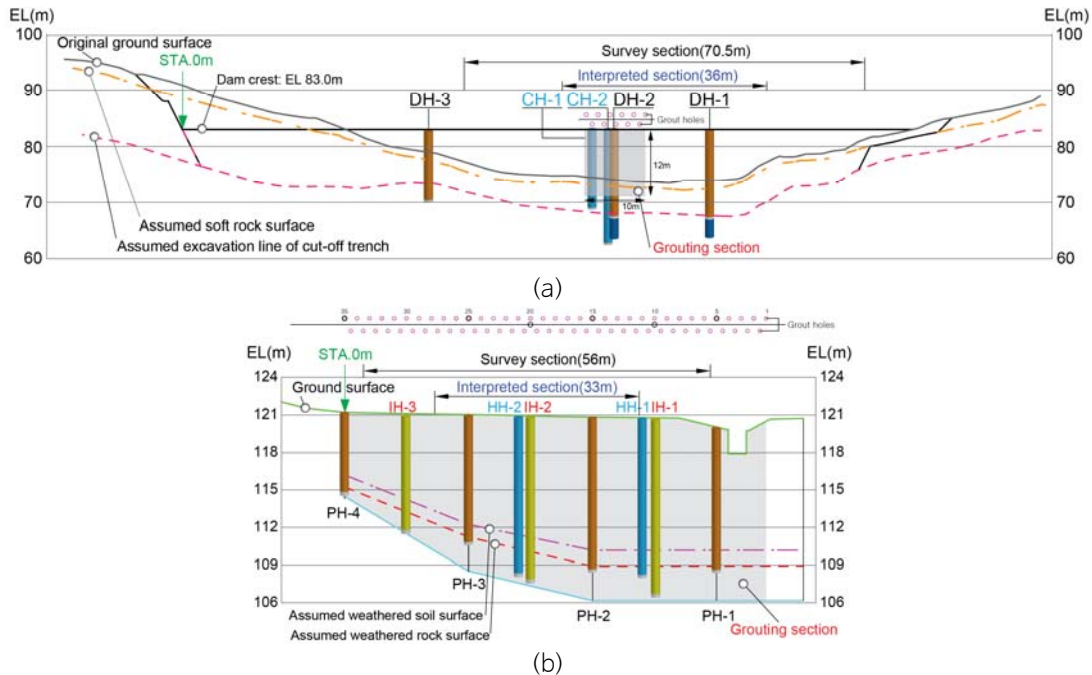


Fig. 1. The investigation scheme and location of field works for the levees (a: D Levee, b: H Levee).

Table 1. Borehole ID Numbers and locations for the field work.

Item	D Levee			H Levee		
	Grouting before	Grouting After	Remark	Grouting before	Grouting After	Remark
Drilling work	DH-1 ~ 3	CH-1, 2	Core zone: GL.-1.0 ~ 15.0 m	PH-1 ~ 4 HH-1, 2	IH-1 ~ 3	Core zone: GL.-1.5 ~ 11.0 m
Permeability test	DH-1, 2	CH-1, 2	every 3 m	PH-1 ~ 4	IH-1 ~ 3	3 ~ 6 m interval
SPT	DH-1 ~ 3	CH-1, 2	every 1 m	HH-1, 2	IH-1, 2	every 1m
Down-hole test	DH-1, 2	CH-1, 2	every 1 m	not performed		
MASW	Survey line: STA. 50.8 ~ 121.3 m Interpreted section: STA. 68 ~ 104 m			Survey line: STA. 3.0 ~ 59.0 m Interpreted section: STA. 14.5 ~ 47.5 m		
Grouting	Grouted section: STA. 71.5 ~ 81.5 m			for the entire levee body		

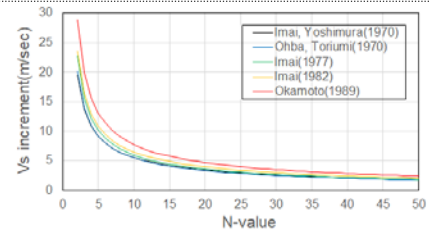
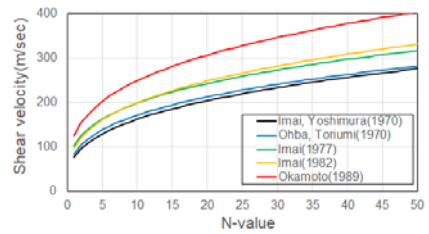
연구방법

2개 제체에 대해 그라우팅 시공에 따른 보강효과를 판정하기 위해 시공 전·후 현장조사(투수시험, 표준관입시험, 다운홀시험) 및 MASW 탐사를 수행하였다. 시공 후 조사는 그라우트 재의 충분한 양생기간을 고려하여 시공완료 약 2개월 후 수행하였으며, 시공 전 조사 자료를 기준 값으로 설정하여 보강에 따른 각 시험 값의 증대효과를 파악하고, MASW 탐사 결과와 대비분석을 통해 보강효과를 판정하였다. 항목별 시험 및 분석방법은 아래와 같다.

- 1) 투수시험(falling head test)은 보강효과 검증을 위해 가장 일반적으로 활용되는 방법으로서 구간별 수리전도도 (Hydraulic conductivity)를 산정하고 시공 전·후 투수성 변화를 통해 MASW 탐사자료와의 정성적 비교를 하는데 활용하였다. D 제방의 경우 상부 성토층을 고려하여 지표하 1 m부터 3 m 간격으로 투수시험을 수행하였으며, H 제방은 지표하 0.8~2.0 m 하부에 3~6 m 간격으로 지자체 지정 업체에 의해 수행된 자료를 이용하였다.
- 2) 표준관입시험은 지반공학 분야에서 흙의 성질을 나타내는 지표로서 지반의 특성을 평가하는데 광범위하게 활용되고 있다. 본 시험으로부터 획득되는 N값은 지반의 상대밀도를 나타내는 값으로 기존 연구에서 전단파속도와의 상관관계(Table 2) 분석이 많이 이루어져있어, 이를 통해 MASW 탐사자료와의 비교·분석을 수행하였다. 표준관입시험은 2개 제체 모두 KS F 2307 기준에 따라, 1 m 간격으로 수행되었다.

Table 2. Empirical formulas for N-value and shear velocity(V_s) correlation.

Proposer	Type		N- V_s correlation for cohesive soil
	cohesive soil	sandy soil	
Imai, Yoshimura (1970)	$V_s=76 \cdot N^{0.33}$		N- V_s correlation for cohesive soil
Imai (1982)	$V_s=97 \cdot N^{0.314}$		
Okamoto (1989)	$V_s=125 \cdot N^{0.3}$	-	
Ohba, Toriumi (1970)	$V_s=84 \cdot N^{0.31}$	-	Shear velocity increment with N-value increase
Imai (1977)	$V_s=a \cdot N^b$ a=102, b=0.29 (alluvial clay)	$V_s=a \cdot N^b$ a=81, b=0.33 (alluvial sand)	
	a=114, b=0.29 (diluvial clay)	a=97, b=0.32 (diluvial sand)	



- 3) 다운홀시험(Down-hole Test)은 지표에서 햄머(hammer)를 통해 탄성파를 발진하고 시추공 내 설치된 수신기를 통해 직접적으로 P파 및 S파 속도를 측정하는 탐사방법으로서 간접적으로 S파 속도를 산정하는 MASW 탐사와 대비된다. 본 탐사결과는 표준관입시험 값으로부터 전단파속도 산출을 위한 적정 경험식을 찾는 데 이용하였으며, 또한 표면파탐사자료로부터 획득된 전단파속도 결과와 비교·분석하는 데 활용되었다. 본 탐사는 D 제방에서만 수행되었으며, H 제방에는 시험공 미확보로 수행하지 못하였다.
- 4) 표면파(MASW 탐사)는 크게 러브파(love wave)와 레일리파(rayleigh wave)로 구분된다. 이중 러브파는 특별한 지층구조에서만 존재하며 레일리파는 모든 자유지표면이 있을 경우 항상 존재하는 탄성파로 통상 탐사분야에서 표면파는 레일리파를 의미한다. 표면파는 주파수에 따라 전파속도 및 파장이 변화하며 또한 그 에너지는 지표면 부근에 집중되어 지표면 하부 심도로 갈수록 지수함수적인 감쇠를 나타내어 대략 한 파장(wave length) 정도의 심도 이상

에서는 거의 소멸되는 양상을 갖고 있다. 이는 표면파의 전파속도가 한 파장 이내 심도에 분포하는 지층 매질에 따라 영향 받음을 나타내며, 이를 레일리파의 분산특성(dispersion property)이라 한다. 이러한 레일리파의 분산특성을 이용한 탐사기법을 표면파탐사라고 하며, 이중 MASW탐사(Xia et al., 1999)는 다중 채널을 통해 데이터를 획득하고 CMP(Common Midpoint) 기법을 적용하여 신호 품질을 개선한 탐사방법이라 말할 수 있다. MASW 탐사는 크게 자료취득(data acquisition), 분산이미지(dispersion image) 작성, 분산곡선 결정(dispersion curve fitting), 역산 해석(inversion analysis)의 순서로 분석을 수행하게 된다. 여기서 분산이미지는 측정된 자료를 주파수(frequency)-위상속도(phase velocity) 영역으로 변환하여 작성되며, 각 주파수에서의 최대 에너지 영역을 추출하여 위상속도 분산곡선을 구한다. 최종적으로 결정된 분산곡선상의 주파수와 위상속도 값을 토대로 포와송비(Poisson's ratio), 밀도 값을 가정 입력하여 반복과정에 의한 역산해석을 수행하며 최종 심도별 전단파속도 값을 도출한다.

탐사방법

D 제방은 일부구간에 대해서만 그라우팅 시공이 계획되어 시공구간을 포함하도록 측선을 설치하였으며, H 제방은 전 구간에 대해 탐사를 수행하였다(Fig. 1 참조). 측선 연장, 발진원(source) 및 수신기(geophone) 간격은 각 제방의 코어 존(core zone) 분포심도 대비 20% 이상 자료해석이 가능토록 계획하였으며, 발진원과 수신기가 동시 이동하여 측정하는 방식(roll-along survey method)으로 수행하였다. 제체별 탐사인자 설정 및 CMP 기법에 의한 해석구간은 Table 3과 같다. 탐사장비는 미국 Geometrics사의 StrataVeiw R48과 Geophone ($f_0=4.5\text{Hz}$)을 사용하였으며, 발진원으로는 sledge hammer를 이용하였다.

Table 3. MASW survey parameters for each levee.

Category	Survey length (m)	Source and receiver interval (m)	Source offset (m)	Interpreted section(m)	No. of channel	No. of data	Core zone depth(m)	Target depth for analysis(m)
D Levee	70.5	1.5	9.0	36	24	25	15	18 <
H Levee	56.0	1.0	6.0	33	24	34	10~11	12 <

분석방법

MASW 탐사자료의 분석은 분산해석(dispersion analysis)과 역산해석(inversion analysis)으로 구분된다. 분산해석은 획득된 탄성파 자료를 통해 주파수-위상속도 영역으로 변환시키고 분산이미지를 작성하여 주파수대역별(1~150Hz) 최대 에너지 영역을 나타내는 위상속도 구간에 Picking을 통해 분산곡선을 추출하는 것이며, 역산해석은 추출된 분산곡선과 이론적 분산곡선의 RMSE (Root Mean Square Error)가 최소화 될 때까지 반복적으로 계산을 수행하여 결과를 도출하는 것으로 간단히 설명될 수 있다. 여기서, 분산해석을 통한 분산곡선은 분포하는 실제 지하매질의 영향에 따른 주파수대역별 최대 에너지 영역의 위상속도를 평균적인 대표적 값으로 나타내는 반면, 역산해석의 경우에는 초기 이론적 모델(initial theoretical model)을 통해 계산하는 과정에서 심도에 따라 속도가 증가하는 초기 모델과 가정된 포와송비 및 밀도 값으로 인해 분석결과가 다소 왜곡되거나 과해석(overestimation) 되는 경향을 보일 수 있다. 특히, 대부분의 그라우팅 시공에서 주입된 그라우트 재가 제체 내부에서 고르게 분포하는 것이 아닌 불규칙한 균열을 따라 충전되거나 국부적으로 spot 상의 불균질한 분포상태를 보임에 따라 이러한 경향은 더 커질 수 있다.

본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 그라우팅 전·후에 따른 전단파속도 변화를 분산해석과 역산해석의 개별적 분석을

통해 그 차이를 검토하였으며, 현장조사 자료들과 대비·분석을 통해 보강효과를 검증하였다.

D 제방 현장조사 및 분석결과

시추조사결과

그라우팅 시공 전 제체의 지층분포 특성, 코어 존(core zone)의 상태 파악 및 참고자료(reference data) 획득 그리고, 시공구간 선정을 목적으로 시추조사를 수행하였다(Fig. 1).

시추조사결과 지층은 성토층, 중심 코어 존, 콘크리트 캡(cap), 풍화암 순으로 지층이 분포하며(Table 4), 연구 대상 지층인 중심 코어 존은 자갈 섞인 실트질 점토로 구성되어 있다.

Table 4. Distribution of Stratigraphic units for each borehole in the D Levee (unit: m).

Hole ID	Fill	Core zone	Cap concrete	Weathered rock
DH-1	0.0~1.0	1.0~15.0	15.0~15.7	15.7~18.0
DH-2	0.0~1.0	1.0~15.0	15.0~15.8	15.7~18.0
DH-3	0.0~1.0	1.0~11.7	11.7~12.4	-

그라우팅 시공현황

그라우팅 시공은 현장 조건을 고려한 MASW 탐사 축선설계 및 제방 양안부에서 경사가 급해지는 지형적 영향(Fig. 1a)을 고려하여 제방 중앙부에 위치하는 DH-2 조사공을 중심으로 수행되었다. 그라우팅 시공 구간은 약 10 m이며, 시공간격은 2 m로 전열 5공, 후열 6공 총 11개 공에서 주입이 이루어졌다. 시공현황은 Table 5와 같다.

Table 5. Grout injection status in the D Levee.

Injection (m)	Time (min)	Quantity of Grouting		Remark (F: Front row, R: Back row)
		Grout (L)	Cement (kg)	
3.0~6.0	30	366	278.4	• Leakage occurred for all grout holes
6.0~9.0	105	1,937	1,470.7	
9.0~12.0	261	3,702	2,540.7	• pressure: F-1, 4, R-1, 2 • leakage: F-2, 3, 5, R-3~6

시공결과 전열 주입량이 1,915(L), 후열 주입량이 4,090(L)로, 전열보다 후열에서 더 많은 주입이 이루어졌다. 전반적으로 전 심도에서 주입 중 인접공으로 그라우트 재의 누수가 발생하였으며, 지표하 9 ~ 12 m 주입구간의 일부 공에서만 압력증가가 기록되었다. 주입 중 압력에 의한 할렬 방지를 위해 압력증가가 확인되면 주입을 종료하였다.

그라우팅 시공 전·후 현장시험결과 비교

현장시험 결과 4~10 m 구간에서 그라우팅에 따른 현장시험 값의 변화가 확인되었다. 투수계수는 약 1.2 ~ 3배의 감소가 확인되었으며(Fig. 2a), N값은 0~8, 전단파속도는 4~26 m/sec의 속도증가가 나타났다(Fig. 2b, 2c). 투수시험의 경우 투수계수의 변화량이 분석방법에 따른 오차범위에 해당할 정도의 낮은 값으로 이를 통해 보강효과를 평가하기에는 어려

운 부분이 있으며, N값 및 전단파속도는 7 m 하부에서 뚜렷한 증가양상을 나타내어 그라우팅에 의한 보강효과가 발생한 것으로 판단된다.

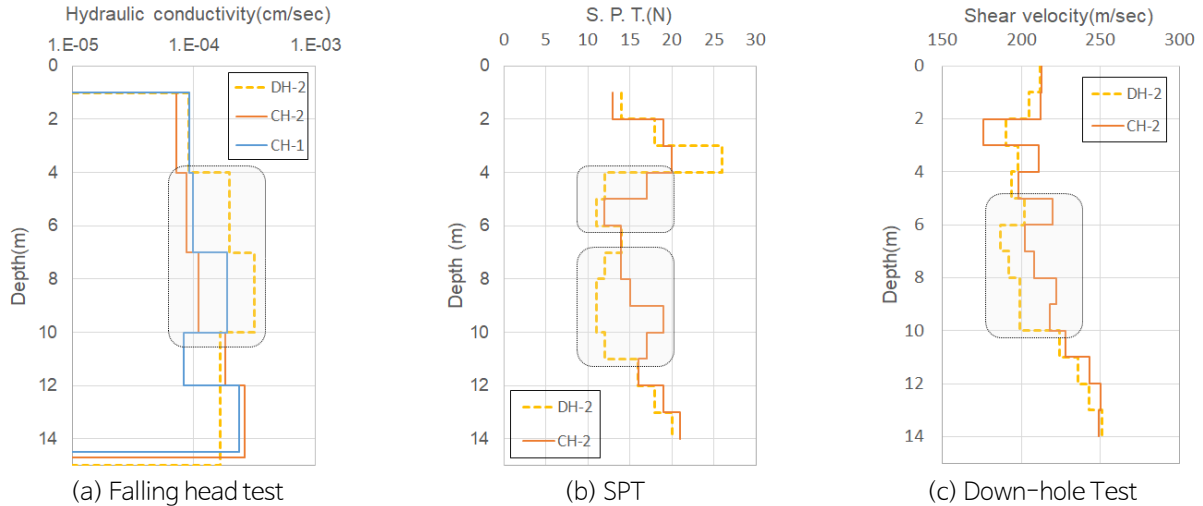


Fig. 2. Results of the field test in the D Levee.

다운홀시험 결과를 이용한 경험식 선정

MASW 결과로부터 획득된 전단파속도의 신뢰성 검증을 목적으로 현장시험 결과와 비교를 수행하였으며, 이를 위해 기존 경험식을 활용하였다. 기존 경험식은 다양한 N-Vs 관계식 중 다운홀시험 결과와 유사 범위에 해당하는 적정 관계식을 선정하였으며, N 및 Vs 값으로 변환하여 분석하는데 활용하였다.

다운홀시험과 각 경험식을 통한 전단파속도 비교 결과, Imai and Yoshimura (1970)와 Okamoto (1989)의 경험식은 평균 15~30% 내외의 차이를 나타냈으며, Imai (1977), Imai (1982), Ohba and Toriumi (1970) 경험식은 평균 10% 이내의 차이를 나타내어 다운홀시험 결과와 상대적으로 유사한 관계를 보이는 것으로 나타났다. Imai (1977)와 Imai (1982)는 매우 유사한 값을 나타내어 본 연구에서는 Imai (1982)와 Ohba and Toriumi (1970)의 N-Vs 관계식을 이용하여 각 자료의 비교·분석을 수행하였다(Table 2, Fig. 3).

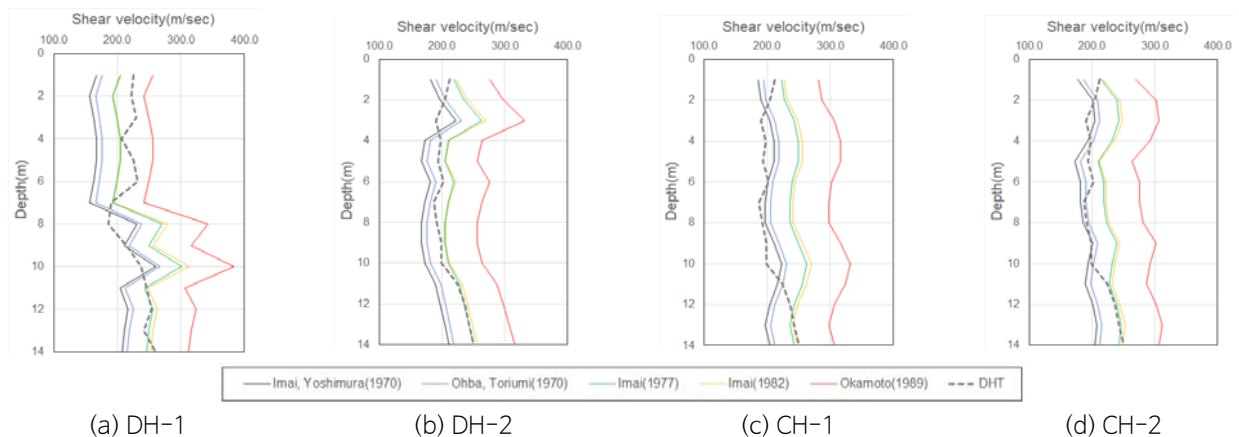


Fig. 3. Comparison of the result of down-hole test and the shear velocity estimated by N-value.

MASW 탐사결과

총 25개 자료에 대하여 분산곡선을 도출하였으며, 이를 통해 그라우팅 전·후의 위상속도차이 및 역산해석을 수행하였다.

분산해석을 통한 위상속도차이(phase velocity difference) 분석

그라우팅 시공 전·후의 각 25개 취득 자료에 대하여 분산곡선을 추출하였다(Fig. 4c, 4d). 추출된 분산곡선은 주파수 대역별 위상속도로서 이를 심도별 위상속도로 변환 후 이중선형보간법(bilinear interpolation method)을 통한 격자망 형태(griding)의 자료로 구현하였으며, 위상속도는 통상 전단파속도의 92~93%의 비율을 가지므로 이를 통해 전단파속도차이 단면도를 작성하였다(Fig. 4e).

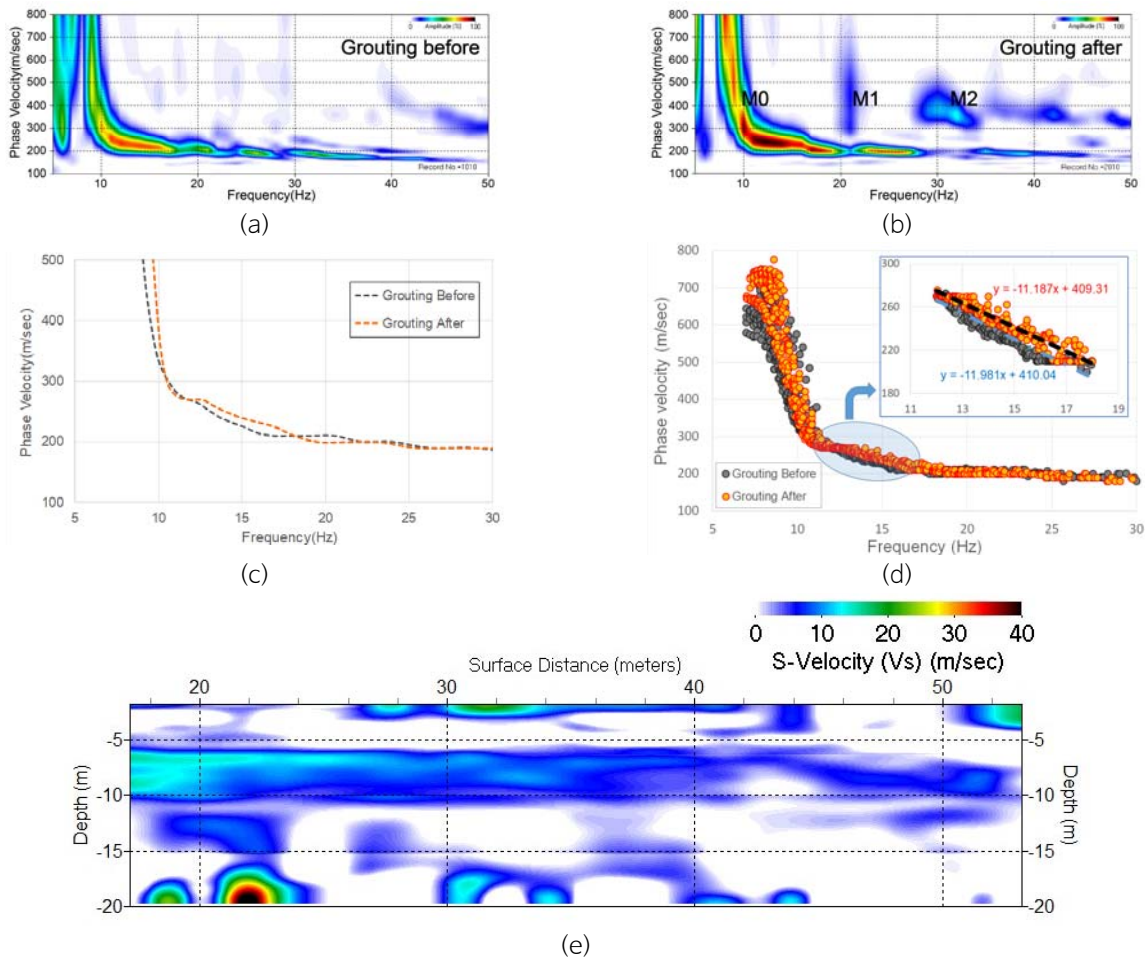


Fig. 4. The analysis results: (a) and (b) Dispersion images at DH-2, (c) Dispersion curves at DH-2, (d) Phase velocity distributions using the dispersion curves (e) The differences of shear velocity between after and before grouting by phase velocity analysis.

분석결과는 지표하 6~10 m 구간에서 약 5~18 m/sec의 전단파속도 증대가 확인되었다. 기존 현장조사결과 약 6~8 m 심도에서 상대적 고투수성 및 저속도층이 분포하는 것으로 나타남에 따라 기 구간에 그라우팅 시공에 따른 보강효과가 있는 것으로 파악된다. 그러나 그라우팅 작업 중 인접공으로의 누수, 연구목적으로 수행되어 추가 할렬 발생 우려에 따른 불충

분한 주입압, 충분한 시공공간 미확보 등의 영향으로 인해 보강효과는 크지 않은 것으로 파악된다. 결과단면에서 시공이 이루어진 구간은 22~32 m 구간이나 미시공 구간까지 수평적으로 연장되어 속도증대가 나타났다. 이는 일부 그라우트 재의 침투효과와 함께 MASW 탐사 특성인 공통수신점 방식으로 인해 수평적 스미어링 현상(lateral smearing effect)이 발생하여 나타난 결과로 판단된다.

지표부근 및 지표하 15 m 하부에서 속도 이상대가 나타났다. 이는 실제 그라우팅이 지표하 3~12 m 구간에서 이루어졌음을 고려할 때, 현장탐사시 데이터에 영향을 미치는 현장조건(발진원, 지표조건(시공영향), 기후, 주변 noise 등)에 따른 고·저주파 noise 영향 및 해상도가 상대적으로 낮은 저주파대역의 분산곡선 fitting 차이에 기인한 결과로 판단된다.

역산해석(inversion analysis)

그라우팅 시공 전·후 도출된 각 25개의 분산곡선을 이용하여 1-D 역산해석을 각각 수행하였으며, 해석 결과는 Fig. 5와 같이 이중선형보간을 통해 2-D 단면으로 산출하였다.

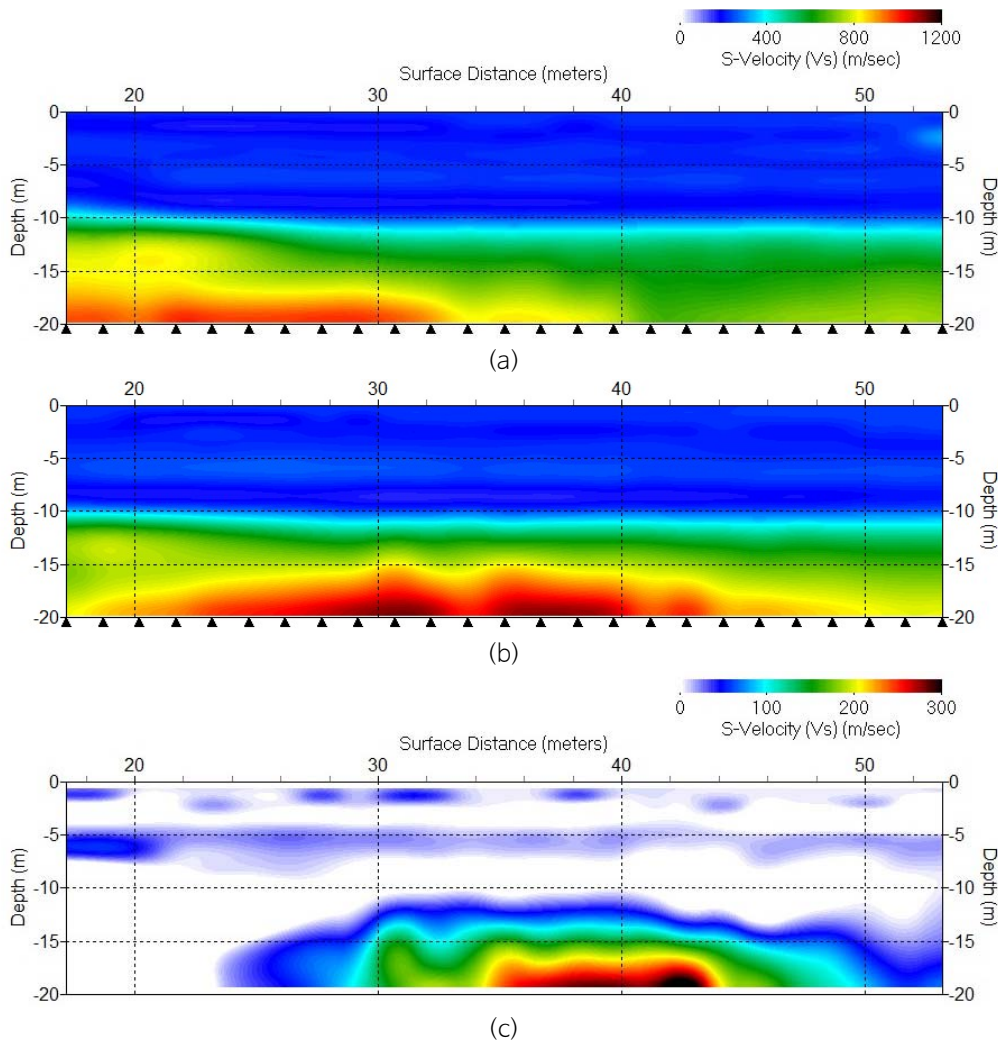


Fig. 5. The 2-D shear velocity section by inversion analysis for the D Levee: (a) and (b) The results of the inversion analysis (c) The differences of shear velocity between after and before grouting by inversion.

분석결과 지표하 5~8 m 구간에서 약 1~59 m/sec (avg. 15.9 m/sec)의 속도증대가 나타났다. 위상속도차이 분석결과와 비교 할 때 속도증가 구간은 유사하나 상대적으로 높은 값을 보이며, 특히 해상도가 떨어지는 저주파심도(고심도)에서 매우 큰 차이를 보인다. 위상속도 분석결과와 마찬가지로 3 m 이하의 천부 및 하부 심도에서 나타나는 고속도 이상대는 현장 조건에 따른 분산곡선 fitting 오차에 의한 것으로 고려되며, 특히 역산과정에서 저주파 구간이 과해석(overestimation) 된 것으로 파악된다.

위상속도차이 및 역산해석 결과 비교

시공구간 중 DH-2 (CH-2) 위치를 기준으로 획득된 분산 및 역산해석 결과를 비교하였으며, 경험식을 통하여 각 해석방법에 따른 N값을 산출(Table 2, Ohba and Toriumi (1970) N:Vs=1:3.7 m/sec, Imai (1982) N:Vs=1:4.3 m/sec)하고, 현장 시험결과와 비교·검토하였다(Table 6). 분석결과 역산해석 결과가 분산해석 결과 대비 전단파속도 및 N값이 다소 높은 값을 보이는 것으로 나타나며, 보강구간은 분산해석 결과가 현장시험 결과와 유사한 것으로 나타났다. 그러나 시공현황 및 전반적인 속도증가 범위를 고려할 때 그 차이는 미미한 것으로 파악된다.

Table 6. Comparison of shear velocity and N-value changes estimated by each evaluation method at DH-2 (CH-2) location.

Category	Meaningful depth (m)	Vs diff.(m/sec) (after-before)	N-value	
			Imai (1982)	Ohba, Toriumi (1970)
Dispersion analysis	6~10	9.5~14.1 (avg.11.6)	2~3 (avg.3)	3~4 (avg.3)
Inversion analysis	5~8	12.2~22.6 (avg.16.4)	3~5 (avg.4)	3~6 (avg.4)
Field test (DHT and SPT)	5~10	4.0~26.0 (avg.16.3)	0~8 (avg. 3)	

* N-values by dispersion and inversion analyses were estimated from the empirical formulas (refer to Table 2).

H 제방 현장조사 및 분석결과

시추조사결과

그라우팅 시공 전 제체의 지층분포 특성, 코어 존(core zone)의 상태 파악을 목적으로 총 6개의 시추조사가 수행되었다. 지자체 지정업체에서 총 4개의 시추조사(PH-1~4)를 수행하였으며, 2개공(HH-1, 2)은 본 연구 및 관련 연구기관의 자료 획득을 목적으로 수행되었다(Fig. 1, Table 1).

시추조사결과 지층은 성토층, 중심 코어 존, 풍화토, 풍화암 순으로 지층이 분포하며, 연구 대상 지층인 중심 코어 존은 모래질 및 실트질 점토로 구성되어 있다(Table 7).

Table 7. Distribution of Stratigraphic units for each borehole in the H Levee (unit: m).

Hole ID	Fill	Core zone	Weathered soil	Weathered rock
HH-1(m)	0.0~1.7	1.7~11.0	11.0~12.0	12.0~13.0
HH-2(m)	0.0~1.5	1.5~10.0	10.0~11.0	11.0~13.0

그라우팅 시공현황

그라우팅 시공은 H 제방 전 구간에 걸쳐 시행되었으며, 기초 지반인 풍화암 접촉부 하부 2.7 m를 주입하한선으로 설정하여 시공되었다. 그라우팅 시공간격은 2 m로 전열 35공, 후열 34공 총 69개 공에서 주입이 이루어졌다. 시공 중 그라우트 재의 누수는 없는 것으로 확인되나, 주입량, 주입압 등의 추가 자료는 확보하지 못하였다.

그라우팅 시공 전·후 현장시험결과 비교

투수시험 결과 기존 시험결과와 비교하여 약 10배 이상의 투수성 감소가 확인되었다(Fig. 6a). PH-4의 약 6.5~8.5 m 구간은 지층경계 및 풍화토 지반으로 시공 전·후 약 10^{-5} cm/sec의 값을 나타내며 시공 후 중심 코어 존의 투수계수와 유사한 값을 나타냈다. SPT 결과 N값은 0~8(평균 5)의 증가가 확인 되었다. 지표하 6~8 m 구간의 경우 N값의 증가는 나타나지 않았다. 현장시험결과 그라우팅 시공에 따른 뚜렷한 보강효과가 확인되며, 전 구간에 걸쳐 유사한 범위의 투수계수(10^{-5} cm/sec) 및 N값(10~15)에 수렴되는 경향을 나타냈다.

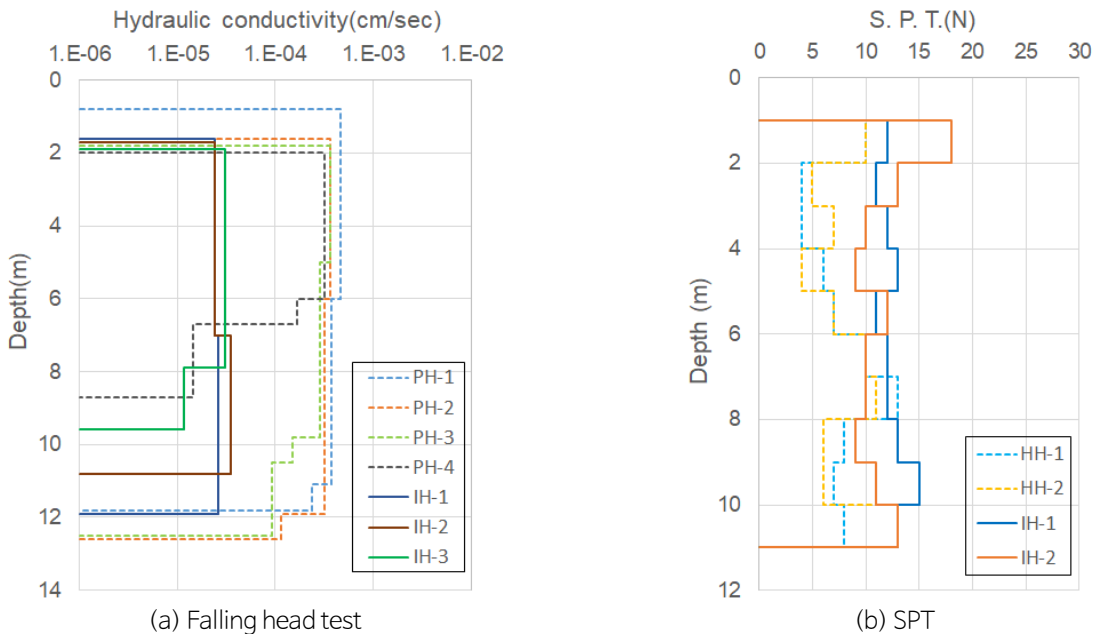


Fig. 6. Results of the field tests in the H Levee.

MASW 탐사결과

그라우팅 전·후 각 34개 자료에 대하여 분산곡선을 도출하였으며, 이를 통해 위상속도차이 및 역산해석을 수행하였다.

분산해석을 통한 위상속도차이(phase velocity difference) 분석

분석결과 지표하 6 m 심도까지 약 40~70 m/sec의 속도증가가 확인되며, 그 하부로 15 m/sec 이상의 속도증가가 전 구간에 걸쳐 나타났다(Fig. 7e). 시점부 구간의 하부 속도 이상대는 지형적 특성과 일치하는 결과를 보여주는 것으로 해석된다. Fig. 7a, b로부터 분산이미지는 그라우팅 전·후에 따른 변화를 뚜렷하게 보여주고 있으며, 시공전의 분산이미지는 상부 지층(18 Hz 이상)에서 균질한 상태를 보이다 하부 지층에서 변곡이 발생하여 속도가 증가하는 양상을 보이는 반면, 시

공후의 분산이미지는 그라우트 주입 영향에 따른 고차 모드(higher mode)가 다중으로 발생하는 양상을 보인다. 그라우팅 시공은 균열 및 매질을 따라 그라우트 재가 침투하고, 국부적인 Spot상의 그라우트 체(grout body)를 형성함으로써 지층 불균질성을 가져오며, 이는 심도에 따라 속도 이상(velocity abnormality)을 야기하고 이러한 양상은 고주파 대역에서 다중 고차모드(multi-higher mode)의 원인이 된다. 즉, 그라우팅 후의 다중 고차모드 발생은 지층 내 그라우트 재의 침투가 원활하게 이루어졌음을 반증하는 것이며, 불균질한 매질의 분산특성을 보여주는 것으로 해석된다. 이러한 양상은 D 제방 결과와 비교해 볼 때 보다 뚜렷한 차이를 나타내는데, D 제방의 경우 시공 중 그라우트 재 누수발생, 충분한 시공구간 확보 및 주입이 어려웠던 반면, H 제방은 대체로 원활한 시공이 이루어짐에 따라 이러한 다중 고차 모드가 강하게 나타나는 것으로 해석 될 수 있다.

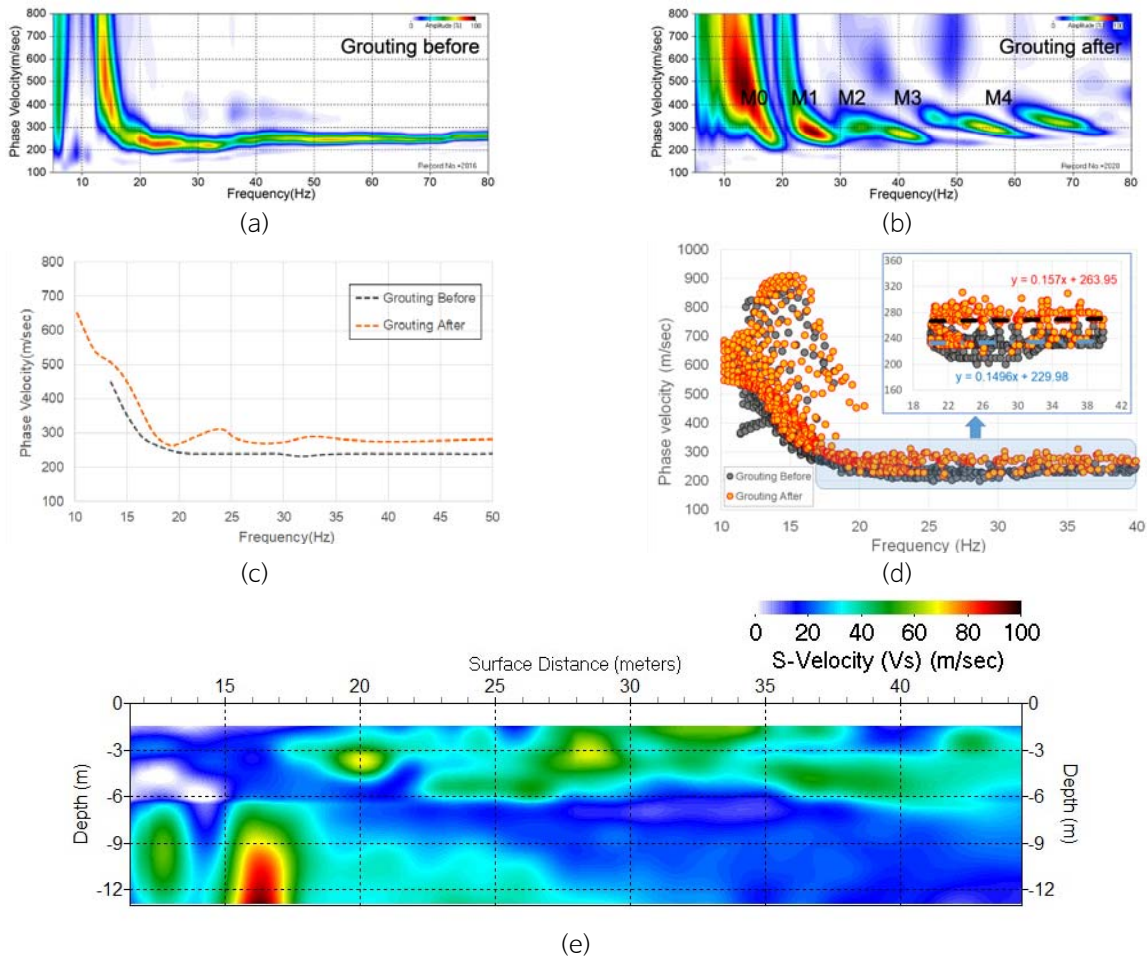


Fig. 7. The analysis results: (a) and (b) Dispersion images at HH-2, (c) Dispersion curves at HH-2, (d) Phase velocity distributions using the dispersion curves (e) The differences of shear velocity between after and before grouting by phase velocity analysis.

역산해석(inversion analysis)

그라우팅 시공 전·후 도출된 각 34개의 분산곡선을 이용하여 1-D 역산해석을 각각 수행하였으며, 해석 결과는 Fig. 8과 같이 이중선형보간을 통해 2-D 단면으로 산출하였다.

분석결과 지표하 6 m 심도까지 1~101.1(평균: 35.9) m/sec의 속도 증가가 발생하였으며, 그 하부로는 20~35 m 구간에서 고속도 이상대가 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 8c). 여기서 나타나는 고속도 이상대는 분산해석 결과와 비교해 볼 때 주입된 그라우트 재의 영향과 그라우팅 전·후 분산곡선 fitting 차이에 따른 과해석 결과가 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 판단된다.

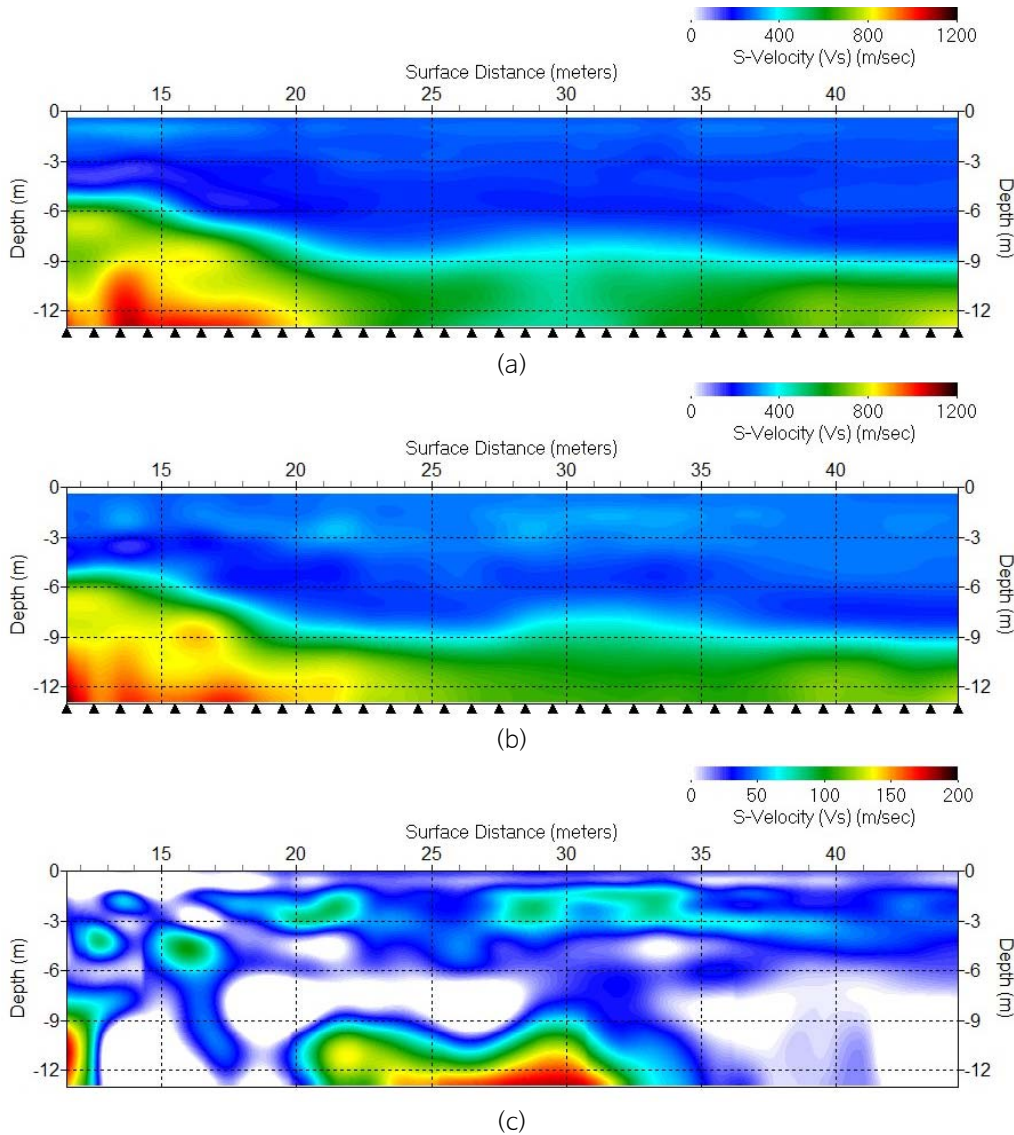


Fig. 8. 2-D shear velocity section by inversion analysis for H Levee: (a) and (b) The results of the inversion analysis (c) The differences of shear velocity between after and before grouting by inversion.

위상속도차이 및 역산해석 결과 비교

시공구간 중 HH-1, 2 (IH-1, 2) 위치를 기준으로 획득된 분산 및 역산해석 결과와 현장시험결과를 함께 비교·검토하였다(Table 8). 분석결과 0~6 m 구간은 대체로 유사한 전단파속도 값을 나타내는 것으로 확인되었으며, 6~10 m 구간의 경우 해석방법에 따라 6~12 m/sec의 속도차이를 나타냈다. N값의 경우 탐사를 통한 해석결과가 대체로 현장시험 값과 비교

하여 0~4의 높은 값을 나타냈다. 이는 지수함수의 형태를 갖는 N-Vs 상관관계식을 통해 평균적 속도증분을 변환함에 있어 그 차이가 있는 것으로 고려되며, 또한 현장시험이 해당 조사공의 특정심도 결과에 해당하는 것과 대비하여 CMP기법에 의해 지층의 평균적 속도 값을 표현하는 MASW 탐사 특성의 상이성에 의한 결과로서 사료된다.

Table 8. Comparison of shear velocity and N-value changes estimated by each evaluation method at HH-1(IH-1) and HH-2(IH-2) boreholes.

Category	Meaningful depth(m)	Vs diff.(m/sec) (after-before)	N-value difference	
			Imai ⁽¹⁾ (1982)	Ohba, Toriumi ⁽²⁾ (1970)
Dispersion analysis	0~6	15.2~46.2 (avg.33.3)	4~11 (avg.8)	4~12 (avg.9)
	6~10	16.6~42.8 (avg.24.4)	4~10 (avg.6)	4~12 (avg.7)
Inversion analysis	0~6	2.7~56.0 (avg.29.9)	1~13 (avg.7)	1~15 (avg.8)
	6~10	0.0~70.0 (avg.11.8)	0~16 (avg.3)	0~19 (avg.3)
Field test (SPT)	0~6	⁽¹⁾ 0.0~61.8 (avg.34.1)	0~8 (avg. 5)	
		⁽²⁾ 0.0~52.4 (avg.28.9)		
	6~10	⁽¹⁾ 0.0~48.3 (avg.21.1)	0~8 (avg. 3)	
		⁽²⁾ 0.0~40.9 (avg.17.8)		

* N-values of dispersion and inversion analyses and shear velocities of field test were estimated from the empirical formulas (refer to Table 2)

종합분석 및 결론

노후화 제체의 안정성 평가 및 유지관리 방법의 일환으로 지반의 강성과 밀접한 관계에 있는 전단파속도 측정을 통해 제체의 보강효과 검증 및 정량적 평가 적용성 연구를 수행하였다. 2개 제체에 대하여 그라우팅 시공 전·후 시추조사, 현장 시험(투수시험, 표준관입시험, 다운홀시험)을 수행하였으며, MASW 탐사결과와 비교·검토를 통해 보강효과를 판정하고 신뢰성을 파악하였다. MASW 탐사결과는 분산해석(위상속도차이)과 역산해석으로 구분하여 분석을 수행함으로써 역산해석이 갖는 과해석(overestimation) 문제를 인지하고 자료 해석 및 해상도의 신뢰성을 평가하고자 하였다. 현장시험 및 MASW 탐사 수행 결과 2개 제체 모두 그라우팅 시공에 따른 영향을 잘 보여주는 것으로 확인되었다.

D 제방의 경우 현장시험결과 지표하 4~11 m 구간에서 그라우팅 시공에 따른 투수계수 감소가 약 1.2~3배 발생하였으며, N값 및 전단파속도는 각 0~8(평균: 3), 4~26(평균: 16.3) m/sec의 증대가 나타났다. MASW 탐사는 해석방법 및 심도에 따라 차이가 있으나 약 5~10%의 속도증가를 보였으며, 경험식으로부터 산정된 N값은 2~6(평균: 3)의 증가를 나타냈다. 전반적으로 그라우팅 시공에 따른 보강효과는 일부 구간에서 나타나며 전 구간에 대해서는 그 영향이 크지 않은 것으로 파악된다. 이는 그라우팅 시공 중 누수발생, 충분한 그라우팅 주입 및 구간이 확보되지 않아 나타난 결과로 고려된다.

H 제방 분석결과 현장시험으로부터 그라우팅 시공 전·후 투수계수는 약 10배 감소하였으며, N값은 0~8(평균: 5)이 증가하여 전 구간에 대해 보강효과가 나타났다. MASW 탐사결과 전단파속도는 전 구간에 걸쳐 10~20% 이상의 속도증가가 나타났으며, 경험식에 의한 N값은 4~12(평균: 6)를 나타냈다.

그라우팅 보강효과 판정을 위한 MASW 탐사 적용결과 시공 상태에 따른 영향을 잘 보여주는 것으로 평가되었다. 특히 H 제방의 분산이미지로부터 강하게 나타나는 다중 고차모드(multi-higher mode)의 발생은 D 제방과 비교하여 보강 상태에 따른 분산특성을 명확하게 보여주는 것으로 해석된다. 이러한 2개 제체의 분산특성 차이는 분산해석(위상속도차이)과

역산해석의 결과에서 분명한 속도차이를 보여주는 것으로 확인된다. 본 연구로부터 MASW 탐사를 이용한 제체 적용성은 다음과 같은 한계를 갖는 것으로 고려된다.

첫 번째, 신호개선을 위한 CMP(Common Midpoint) 방식을 적용함으로써 수평적 스미어링 현상(lateral smearing effect)이 발생하여 미시공 구간까지 보강영역이 확대되는 오류를 가질 수 있다.

두 번째, 본 연구 중 2개 제체 모두 역산해석결과에서 과해석(overestimation) 되는 부분이 나타나며, 대체로 해석영역의 하부구간에서 발생하였다. 분산 및 역산해석 결과 해석단면의 중앙부에서는 유사한 값을 보이는 반면, 하부심도에서 고속도 이상대를 보이는 것은 저주파수 대역의 낮은 해상도로 인해 분산곡선 결정시 오차가 발생하고 계산과정에서 발산(divergence)에 의한 영향으로 판단된다.

이러한 문제점을 최소화하기 위해서는 각 제체의 특성 및 시공구간을 고려한 탐사설계(여러 채널간격 적용, 측선연장(채널 수), 주변 noise를 고려한 발진원 등)가 이루어져야하며, 특히 충분한 가탐심도의 확보가 중요할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서처럼 탐사에서 도출된 자료(raw data)를 통한 분산해석(위상속도차이)을 수행할 경우 과해석 구간을 판단하는데 도움이 될 수 있을 것으로 사료되며, 밀도검층, 실내시험 등의 현장시험 값 적용을 통해 초기 모델을 구성하는 방법도 분석결과와 신뢰성을 제고하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구결과 MASW 탐사는 제체 그라우팅 보강효과를 평가하는 데 그 적용성이 높을 것으로 고려되며, 현장시험결과와 높은 유사성을 보임에 따라 보강상태에 따른 강성변화를 정량적으로 평가할 수 있는 기법으로 판단된다. 제체 유지관리에 있어서도 보강 후 전단파속도 변화 모니터링을 통해 정량적 지표를 확보함으로써 지속적인 관리를 수행하는데 크게 도움이 될 것으로 고려된다. 이러한 MASW 탐사를 실무에 활용하기 위해서는 향후 다양한 제체에 대한 적용성 연구가 필요할 것으로 판단되며, 다른 탐사기법과의 복합적 연구를 통해 신뢰성 및 정확도를 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리 연구사업에 의한 ‘극한 수재해 대응 필드 스마트 그라우팅 보강 및 검증 시스템 기술개발’ 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호: 1615008167). 아울러 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 심사자님들께 깊은 감사를 드립니다.

References

- Cho, I.K., Kang, H.J., Kim, K.J., 2006, Distortion of resistivity data due to the 3D geometry of embankment dams, geophysics and geophysical exploration, 9(4), 291-298 (in Korean with English abstract).
- Imai, T., Yoshimura, Y., 1970, Elastic wave velocity and soil properties in soft soil, Tsuchito-Kiso, 18 (1) (in Japanese).
- Imai, T., 1977, P and S wave velocities of the ground in Japan, in: Preceeding of IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 127-132 (in Japanese).
- Imai, T., Tonouchi, K., 1982, Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus, Proceedings of the 2nd European symposium on penetration testing, 57-72.
- Kim, J.H., Song, Y.H., Jung, S.H., 2000, Imaging techniques of substructures using electric and electromagnetic exploration, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists and Korean Geotechnical Society Geological investigation committee, 121-154 (in Korean).
- Kim, K.B., Park, S.Y., Jang, J.H., Kim, J.H., 2015, Analysis of Dam Leak Environment and Grout Reinforcement Effect

- of Reservoir using the Electrical Resistivity Method, 2015 Korean Geo-Environmental Society Conference(15th Anniversary), 215-218 (in Korean with English abstract).
- Korean Geotechnical Society, 1998, Manual for zonation on seismic geotechnical hazards, 28 (in Korean).
- Korean Geotechnical Society, 1998, N-Value and C, ϕ method of application, 102 (in Korean).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA), 2014, Agriculture, Food And Rural Affairs Major Statistics Data (in Korean).
- Oh, S.H., Suh, B.S., 2008, Safety assessment of embankment by analysis of electrical properties, The Journal of Engineering Geology, 18(3), 245-255 (in Korean with English abstract).
- Oh, S.H., Sun, C.G., 2004, Analysis of geophysical and geotechnical SPT data for the safety evaluation of fill dam, Journal of the Korean Geophysical Society, 7(3), 171-183 (in Korean with English abstract).
- Ohba, S., Toriumi, I., 1970, Dynamic response characteristics of Osaka plain, in: Proceeding of the Annual Meeting AIJ, Tokyo, Japan (in Japanese).
- Okamoto, T., Kokusho, T., Yoshida, Y., Kusunoki, K., 1989, Comparison of surface versus subsurface wave source for P-S logging in sand layer, Proceeding 44th Annual Conference JSCE, 3:996-997 (in Japanese).
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., Ivanov, J., 2007, Multichannel analysis of surface waves (MASW)-active and passive methods, The Leading Edge, 26(1), 60-65.
- Park, S.G., Song, S.H., Choi, J.H., Choi, B.G., Lee, B.H., 2002, Applicability of geophysical prospecting for water leakage detection in water utilization facilities, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists Special symposium(4th), 179-195 (in Korean with English abstract).
- Song, S.H., Yong, H.H., Lee, G.S., Woo, M.H., 2006, Verification of Reinforcement with Grouting Materials in Reservoir Dike using Electrical Resistivity Tomography, Annual Conference of the Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 73-78 (in Korean with English abstract).
- Xia, J., Park, C.B., Miller, R.D., 1999, Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, 64(3), 800-808.