



2014년 2월

석사학위 논문

C.G.S(Compaction Grouting System)형성 확인을 위한 탄성파토모그래피 탐사

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 민 재

C.G.S(Compaction Grouting System)형성 확인을 위한 탄성파토모그래피 탐사

Seismic Tomograrhy for Forming C.G.S(Compaction Grouting System) Bulb

2014년 2월 일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 민 재

C.G.S(Compaction Grouting System)형성 확인을 위한 탄성파토모그래피 탐사

지도교수 고 진 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 2월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 민 재

김민재의 석사학위 논문을 인준함

- 위원장 조선대학교 교 수 강 추 원 (인)
- 위 원 조선대학교 교 수 강 성 승 (인)

위 원 조선대학교 교 수 고 진 석 (인)

2014년 2월

조선대학교 대학원

목 :	차
-----	---

List of Tables	•• ii
List of Figures	·iii
Abstract	·iv

1.	서론	 1
- •		-

2.	탄성파	토모그래피		$\cdot 2$
----	-----	-------	--	-----------

5.	결론	 30	0
0.		U	0

찪	고	문	허	 3	1
	_	Ľ	<u> </u>	•	

List of Tables

Table 3-1.	The acquisition factors for seismic tomograpy
	(No.B73, No.B97, No.B100, No.B117)9
Table 3-2.	The acquisition factors for seismic tomograpy
	(No.A257, No.C352, No.C414)
Table 4-1.	The grauting diameter(No.B73, No.B97, No.A100, No.B117) ···· 24
Table 4-2.	The grauting diameter(No.A257, No.C352, No.C414)25
Table 4-3.	The results of seismic tomography for each C.G.S. bulb

List of Figures

Figure 2–1. Se	1. Seismic wave tomography measurement key map						
Figure 2-2. Ex	camples of seismic wave record						
Figure 2-3. Ra	y tomograpy used in typically Ray and of the cell model						
Figure 3-1. Su	rvey line arranagement						
Figure 3-2. Se	ismic velocity and trace from the depth No.B7312						
Figure 3-3. Se	ismic velocity and trace from the depth No.B9712						
Figure 3-4. Se	ismic velocity and trace from the depth No.A10013						
Figure 3-5. Se	ismic velocity and trace from the depth No.B11713						
Figure 3-6. Se	ismic velocity and trace from the depth No.A25714						
Figure 3-7. Se	ismic velocity and trace from the depth No.C35214						
Figure 3-8. Se	ismic velocity and trace from the depth No.C41415						
Figure 4-1. Th	ne results of seismic tomograpy data processing						
(N	Jo.B73, No.B97, No.A100, No.B117)						
Figure 4-2. Th	ne results of seismic tomograpy data processing						
(N	No.A257, No.C352, No.C414)						
Figure 4-3. Se	ismic velocity classification for each C.G.S. bulb						
Figure 4-4. Th	ne interpretation of grauting forming for each C.G.S. bulb						
(N	Jo.B73, No.B97, No.A100, No.B117)26						
Figure 4-5. Th	ne interpretation of grauting forming for each C.G.S. bulb						
(N	Vo.A257, No.C352, No.C414)27						

ABSTRACT

Seismic Tomograrhy for Forming C.G.S.(Compaction Grouting System) Bulb

By Kim, Min Jae Adv. Prof. : Ko, Chin Surk, Ph.D. Dept. of Energy & Resource Engineering, Graduate School of Chosun University

Recently, the number of case that applies the geophysics is increasing to evaluate the basement more accurately and systematically, departing from the fragmentary analysis patterns which depend on drilling, as a effort to the site characterization in the civil engineering and environmental fields. However, the error range is still relatively too wide to get quantitative information about geological features and structures of the basement by just geophysical survey in the engineering fields which requires high resolution for the shallow. It's borehole geophysics that overcomes the limitations.

In this study, we are adapted tomography of method of crosshole as widely used investigation methods. The purpose of this study is at first to develop various strategies of practical use to overcome forming C.G.S. bulb problems occurred in the tomographical applications. In the edition, approach to the tomography is employed to be well adapted for use various scanning geometry.

1. 서론

최근 부지 특성화 (site characterization)를 위한 한 부분으로 토목, 환경분 야 등에서 시추에만 의존하는 단편적인 조사의 틀에서 벗어나, 보다 지하를 정확하고 체계적으로 평가하기 위해 물리탐사를 적용하는 사례가 크게 늘어 나고 있다. 그러나 천부를 대상으로 높은 해상도를 요구하는 공학 분야에 있 어 지표 물리탐사만으로 지하의 지질 및 구조에 대한 정량적인 정보를 얻기에 는 아직까지 오차의 범위가 상대적으로 크다. 이러한 한계를 극복하기 위한 탐사법이 시추공 물리탐사 (borehole geophysics)이다. (Hardage, B.A., 1992, Hunt Roy E., 1984, Guust, N., 1987) 이는 시추공에 송신원과 수신기를 삽입 하여 측정하는 탐사법으로 송신원과 수신기의 상대적 위치에 따라 구분한다. (김중열 외, 1991). 시추공 물리탐사 방법으로 모든 지표 물리탐사 방법들의 적용이 가능하며, 넓은 의미로 물리검층도 단일시추공 방식의 한 부분으로 생 각할 수 있다.

본 연구에서는 대표적인 연약지반 개량공법인 C.G.S.공법을 이용한 지역을 대상으로 탄성파 토모그래피의 적용 가능성을 실험하였다. 그리고 현장자료 취득, 자료처리, 해석을 통해 C.G.S.공법의 정확한 위치, 두께 및 형상을 구하 였다. (김학수, 1994, 송영수, 1990, 윤왕중, 1991, 이호영, 1990, 임해룡, 1992, 하희상, 1993)

2. 탄성파 토모그래피

탄성파 토모그래피 탐사는 시추공 사이 매질의 탄성파 속도 구조를 영상화시 킴으로서 매질의 형상에 대한 정밀한 정보를 획득할 수 있다. 탄성파 토모그래 피 탐사는 시추공과 시추공 사이 매질의 탄성파 속도의 공간적 분포를 정확하 게 파악함으로써,

· 증서 및 연약대 파악

주요 불연속면의 위치 및 특성 파악

○ 심도별 탄성파 속도(P파) 분포

등의 정보를 얻을 수 있다.

본 탄성파 토모그래피 탐사는 기 시공된 방조제의 단면에 대한 정밀 규모와 형상 파악을 위한 지반조사의 일환으로 시행되었으며, 조사지역의 시추조사와 병행하여 호안 방조제 단면의 규모와 형상을 정확하게 파악하는 정밀탐사법이 다. 토모그래피는 목적대상체를 영상 재구성(image reconstruction) 하는 기술로 서 필연적으로 컴퓨터의 도움을 받는 까닭에 CT(Computerized Tomography) 또는 CAT(Computer Aided Tomography) 라고도 불린다. 지오토모그래피 (geotomography)는 이러한 의학의 CT기법을 지하에 적용한 것이다.

Figure 2-1와 같이 시추공에서 신호를 발생시키고 다른 시추공에서 이 신호 를 수신하여 의학에서와 유사한 컴퓨터를 이용한 수학적 자료처리를 통하여 지 하구조를 영상화하는 방법이다(탐사단면의 크기에 따라 다소 다르지만 보통 한 단면에 이용되는 송신은 24~48개이며 수신도 비슷하게 사용된다. 따라서, 한 단면의 영상 재구성에 이용되는 자료는 500~2000개 내외이다). 이외에 지하터 널을 이용하는 방법과 지표와 시추공을 이용하는 방법이 있으나 상기한 지반이 라는 한계성을 분명하게 가지고 있다. 따라서 의학의 CT에 비해 매우 불리한 환경을 가지고 있으며 재구성된 영상의 해상력도 떨어지고 결과적으로 매우 전문적인 해석과정이 필요하다. 본 탐사에 적용된 교차시추공(cross-borehole)을 이용한 탄성파 탐사의 결과로부터 목적대상체의 영상 재구성을 위해 적용된 파 선 토모그래피는 수많은 수신파들의 초기 도달시간(first arrival time ; 수신파 의 시간기록에서 제일 처음 기록된 파의 주시시간, 예를 들어 탄성파의 경우는 Figure 2-2와 같이 P파- 종파 -의 도달시간을 의미함)을 측정하여 이들로부터 지하다면의 속도구조를 영상으로 재구성하는 것으로, 만약 획득된 시간자료가 M개이고 얻고자 하는 단면을 N개의 속도구조를 가지는 cell로 나누었을 경우 파선 토모그래피는 다음과 같은 연립 방정식의 해를 구하는 문제로 귀착된다 (Fig 2-3).



Figure 2-1. Seismic wave tomography measurement key map.



Figure 2-2. Examples of seismic wave record.

$$b_i = \sum_{j=1}^{N} A_{ij} x_j$$
 (*i*=1, 2, ..., *M*) (2-1)

여기서, b_i : i 번째 파선의 도달시간(travel time)

 x_i : j 번째 요소의 역속도(slowness)

A_{ii}: i 번째 파선이 j 번째 요소를 통과하는 길이

이를 행렬로 표시하면 다음과 같다.

B = AX

(2-2)

한 파선이 통과되는 cell의 개수는 유한함으로 행렬 A는 sparse 행렬이 되고, 또한 이론적으로 행렬 A는 속도구조 X에 의해 결정된다. 따라서, 식 (2-2)는 비선형의 문제로 해를 직접 구하는 것은 불가능하나, 만약 파가 직진한 다고 가정하면 행렬 A는 속도구조 X에 무관하게 결정되어지므로 식 (2-2)는 선형방정식이 되어 해를 구할 수 있게 되며 이를 선형 토모그래피(linear tomography)라 한다.

선형 토모그래피에 의한 영상재구성은 식 (2-1)과 같은 연립방정식의 해를 구 하는 것으로 적용방법에 따라 반복적으로 해를 구하는 ART법(Algebraic Reconstruction Technique), SIRT법(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)이나 CG법(Conjugate Gradient)등이 있고, 직접 역행렬을 구하는 방 법으로서 특이치 분해(SVD, Singular Value Decomposition)에 의한 일반화된 역행렬을 이용하는 방법이나 감쇠최소자승법(DLSQ, Damped Least Square Method) 등이 있다.

직접 역행렬을 구하는 방법은 이론적으로 가장 정확한 해를 구할 수 있으나

컴퓨터의 기억용량과 계산시간이 거대하여 경제적이지 못한 단점이 있다. 반면 에 반복적인 방법은 기억용량과 계산 시간면에서 경제적이며 개인용 컴퓨터로 도 수행 가능하다. 이중 CG법은 잡음이 많이 섞인 자료의 경우 그 결과가 좋지 않은 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 SIRT법이나, 감쇠 최소자승법에서 역행 렬을 반복적으로 구하는 방법이 많이 이용되고 있다.

본 조사에서 이용된 방법은 사영법(projection method)에 기초를 둔 ART법을 변형시킨 SIRT법의 일종으로 다음과 같은 식(2-3)을 이용하였다.

q번째 반복에서의 j번째 요소의 역속도를 $x_j^{(q)}$ 라 하면 도달시간 오차 $r_i^{(q)}$ 로부터 속도 값 $x_j^{(q)}$ 는 다음과 같다.

$$x_j^{(q)} = x_{j-1}^{(q)} + \frac{\omega}{C_j} \sum_i \frac{A_{ii}}{L_i} r_i^{(q)}$$
(2-3)

여기서, C_j : j 번째 요소를 통과하는 파선의 총 길이

 L_i : i 번째 파선의 길이

 $0 < \omega < 2$



Figure 2-3. Ray tomography used in typically Ray and of the cell model.

3. 탄성파 토모그래피 현장자료 취득

탄성파 토모그래피는 투과되는 탄성파신호의 초동을 발췌하여 파선이론에 근거하여 영상을 재구성하는 방법이다. 본 조사에서도 이 방법이 응용되었다. 탄성파 토모그 래피 탐사에 적용된 측정장비는 크게 송·수신부로 나누어진다. 수신부에 해당하는 하이드로폰(hydrophone)은 1m 간격의 수신 센서가 24개 달려 있다. 케이블의 길이는 약 150m로서 기록장치와 수신점 사이의 거리가 120m 이상이 되어도 측정이 가능하 다. Saprker는 전기충전식 송신장비로 5K Voltage의 에너지를 송신하는 방법이다. 탄 성파 토모그래피에서는 지반의 속도차이를 이용하여 지하를 영상화한다. 지반탐사 시 토모그래피의 대상이 되는 공간범위는 10~20m 가 되는 경우가 대부분이다. 15m를 통과하는데 경과되는 시간은 2000m/sec시 7.5ms가 소요되며 4000m/sec 의 경우는 3.75ms 이다. 이상의 극단적인 경우에도 초동의 차이는 불과 4ms 이내 이다.

수신용 센서로 사용된 하이드로폰은 수중에서 진동을 감지하는 특성으로 인하여 수 면 상부에서는 자료를 취득할 수 없으며, 송신용 스파커도 폭압으로 인하여 해수면 상부에서 발파를 할 수 없다. 송·수신간격은 보통 1m로 설정하는 것이 일반적이나 본 과업에서는 수평파선만을 해석에 사용하였으므로 1.0m 탐사후 0.5m 이격하여 전 체 데이터를 0.5m 간격으로 송,수신이 이루어지도록 하였다. Table 3-1, Table 3-2에 는 자료 취득시 설정된 변수들을 정리하였다. Figure 3-1는 각 토모그래피탐사 단면 의 상황을 표시하였다.

Table 3-1. The acquisition factors for seismic tomography (No.B73, No.B97, No.A100, No.B117)

	No.B73		No.B97		No.A100		No.B117		
section	grouting	base	oroutino	base	grouting	base	grouting	base	
	00	ground	00	ground		ground	00	ground	
borehole	2 00m	1.20m	2 70m	1 95m	2 00m	1.00m	2 29m	1 58m	
interval	2.00111	1.20111	2.70111	1.95111	2.00111	1.00111	2.29111	1.3011	
source/rece	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	
iver inter.	0.0111	0.011	0.0111	0.5111	0.0111	0.511	0.0111	0.5111	
sampling	20.833	20.833	20.833	20.833	20.833	20.833	20.833	20.833	
time inter.	μs	μs	μs	μs	μs	μs	μs	μs	
timing	50ma	50mg	50mg	50mg	2 0mg	2 0ma	50mg	50mg	
inter.	50115	Joins	Joins	Joins	201115	201115	Joins	Joins	
pretiggering	0ms	0ms	0ms	0ms	-10ms	-10ms	0ms	0ms	

Table 3-2. The acquisition factors for seismic tomography (No.A257,No.C352, No.C414)

	No.A257		No.C	352	No.C414		
section		base		base		base	
	grouting	ground	grouting	ground	grouting	ground	
borehole	2.00	1.00	2.04	1 57	2.00	1 (Erro	
interval	2.00m	1.00m	2.04IM	1.37m	2.00IN	1.00111	
source/recei	0 Erre	0 Erro					
ver inter.	0.311	0.511	0.5111	0.311	0.311	0.5111	
sampling	20,022	2 0 822	20 022	20,022	20 022	20 022	
interval	20.855 μ _S	20.855 μ _S	20.833 µ _S	20.855 μ _S	20.855 μ _S	20.855 μ _S	
timing inter.	20ms	20ms	50ms	50ms	50ms	50ms	
pretiggering	-10ms	-10ms	0ms	0ms	0ms	0ms	



No.C414

Figure 3-1. survey line arranagement.

측선배치는 No.B73, No.B97, No.A100, No.B117, No.A257, No.C352, No.C414 CGS말뚝을 기준으로 좌우로 약 1.0m씩 이격하여 두개의 시추공을 설치하고 CGS말뚝의 영향을 받지 않는 지점에 하나의 시추공을 추가로 설치하였다. No.B73은 시추공-1과 시추공-2가 CGS말뚝을 통과하고 시추공-2와 시추공-3이 원지반을 통과한다. No.B97은 시추공-1과 시추공-2가 CGS말뚝을 통과하고 시 추공-2와 시추공-3이 원지반을 통과한다. No.A100은 시추공-1과 시추공-2가 CGS말뚝을 통과하고 시추공-1과 시추공-3이 원지반을 통과하다. No.B117은 시 추공-2와 시추공-3이 CGS말뚝을 통과하고 시추공-1과 시추공-2가 원지반을 통 과하다. No.A257은 시추공-1과 시추공-2가 CCS말뚝을 통과하고 시추공-1과 시 추공-3이 원지반을 통과한다. No.C352는 시추공-1과 시추공-2가 CGS말뚝을 통 과하고 시추공-2와 시추공-3이 원지반을 통과한다. No.C414는 시추공-2와 시추 공- 3이 CGS말뚝을 통과하고 시추공-1과 시추공-2가 원지반을 통과한다. CGS 말뚝을 통과하는 시추공 설치시 두개의 시추공 사이에 CGS말뚝이 위치하도록 하여 발진공에서 발진된 탄성파가 CGS말뚝을 통과하여 수진공으로 진행하도록 나라히 설치하여 탐사시 발생된 탄성파가 원지반과 CGS말뚝을 모두 통과하도 록 하였다. 원지반 탄성파속도는 CGS말뚝의 영향을 받지 않는 지점에서 원지반 만의 탄성파속도를 측정하기 위한 시추공으로 CGS말뚝의 영향을 받지 않는 원 지반의 탄성파속도를 측정하였다.



Figure 3-2. seismic velocity and trace from the depth No.B73.



Figure 3-3. seismic velocity and trace from the depth No.B97.



Figure 3-4. seismic velocity and trace from the depth No.A100.



Figure 3-5. seismic velocity and trace from the depth No.B117.



Figure 3-6. seismic velocity and trace from the depth No.A257.



Figure 3-7. seismic velocity and trace from the depth No.C352.



Figure 3-8. seismic velocity and trace from the depth No.C414.

4. 탄성파 토모그래피 현장자료 처리 및 해석

이 연구에서 적용한 파선 토모그래피의 자료처리는 크게 초동 (first arrival)을 발췌 (picking)하는 과정, 발췌한 초동을 보정하는 과정, 그리고 탐 사가 수행된 2차원 단면에 대한 구조를 영상으로 재구성하는 과정으로 나눌 수 있다.

먼저, 초동 발췌는 초기 도달시간 또는 진폭을 이용하는 방법이 있다. 초동 의 발췌는 수신된 기록으로부터 송신 기간을 0으로 할 때 수신된 시간과 진 폭의 정보를 추출하는 것으로 탄성파의 경우에는 P파의 도달시간 및 진폭을 의미한다.

현장자료에서 초동을 정확하게 발췌하는 것은 각종 잡음, 파의 분산, 선두 파 등에 의해 주의를 요하며 보다 정확한 근사해를 구하기 위해서 매우 중요 한 자료처리 과정이다. 이런 이유로 초동 발췌는 보정 과정이 필수적이며, 특 히 진폭 감쇠 토모그래피의 경우는 발생원의 방사특성 (radiation pattern)까 지 보정하여야 한다. 파선 토모그래피에 대한 자료의 양은 매우 방대하므로 초동발췌는 자동으로 수행하는 경우가 많고 그 방법으로는 상관법, 스펙트럼 분석법 등 여러 가지 알고리듬들이 있으나, 그 자체로는 아직까지 완전하지 못하며 수동 발췌나 수동 발췌에 의한 보정이 함께 적용된다. 초기 도달시간 의 보정은 fig 2-3과 같이 각 송신에 대한 수신기록으로부터 읽혀진 초기도 달시간을 표시한 주시곡선 상에서 속도 역전 등 비정상적인 자료를 확인하고 보정을 실시한다.

다음은 이러한 입력자료부터 지하단면의 속도구조를 영상으로 재구성하는 단계로서 한 예로, 획득된 초기 도달시간 자료가 M개이고 얻고자 하는 단면 을 N개의 속도구조를 가지는 셀로 나누었을 경우 파선토모그래피는 2장의 식 2-1, 2-2, 2-3을 이용하여 연립 방정식의 해를 구한다.

한 개의 파선이 통과되는 셀의 개수는 유한하므로 앞의 행렬[A]는 속도 구조 [X]에 의해 결정되는 산재행렬 (sparse matrix)이 된다. 따라서, 식 2-2 식은 비선형 (nonlinear) 문제가 되어 해를 직접 구할 수 없게 된다. 그런데 여기서 만약 파가 직진한다고 가정하면 행렬 [A]는 속도구조 X에 무관하게 결정되는 선형방정식으로 만들 수 있어 해를 구할수 있는 바 이를 선형 파선 토모그래피 (linear ray tomography)라 한다. 선형 토모그래피에 의한 영상 재구성은 식 2-1식과 같은 연립방정식의 해를 구하는 것으로 적용 방법에 따라 반복적으로 해를 구하는 ART (Algebraic Reconstruction Technique)법, SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)법, CG (Conjugate Gradient)법 등이 있고, 직접 역행렬을 구하는 방법으로서 특이치 분해 (SVD, Singular Value Decomposition)에 의한 일반화된 역행렬을 이용하는 방법 등이 있다 (윤왕중, 1991).

직접 역행렬을 구하는 방법은 이론적으로 가장 정확한 해를 구할 수 있으나 컴퓨터의 기억용량과 계산시간이 거대함에 비해 해상도의 증가는 크지 못하 여 경제적이지 못한 단점이 있고, CG법은 잡음이 많이 섞인 자료의 경우 그 결과가 좋지 않은 것으로 알려져 있어 일반적으로 SIRT법이나, 감쇠최소자승 법에서 역행렬을 반복적으로 구하는 방법이 많이 이용되고 있다.

선형 파선 토모그래피에서 가장 일반적으로 사용되는 SIRT법은 식 2-3식으 로 표현된다(Guust, N, 1987).

그러나, 선형 파선토모그래피는 목적 대상체와 매질간의 속도 차가 일정 이 상 발생 될 경우 영상 재구성 결과에서 해상도의 한계를 보이게 되므로, 비 선형 문제를 직접 해결하기 위해 전기비저항 토모그래피에서의 역산과 같이 반복적 선형 역산 (iterative linear inversion)을 통하여 곡선파 (curved ray) 를 사용하는 방법도 많이 사용되고 있다.

4.1 실험 계측 결과 및 분석

발진기와 수진기 배치는 0.5m간격으로 배치하였으며 No.B73은 DL.-0.46m부터 DL.-14.46m까지, No.B97는 DL.-0.23m부터 DL.-15.73m까지, No.A100은 DL.-1.9m부 터 DL.-20.9m까지, No.B117은 DL.-0.217m부터 DL.-13.217m까지, No.A257은 DL.-2.5m부터 DL.-21.5m까지, No.C352는 DL.-1.00m부터 DL.-11.00m까지, No.C414 는 DL.-0.86m부터 DL.-11.86m까지 0.5m간격으로 각각 29회, 32회, 39회, 27회, 39회, 21회, 23회에 걸쳐 데이터를 취득하였다. 분석은 일반적인 토모그래피인 경우 1회의 발진에서 모든 수진기 개수(27개)에 해당되는 트레이스를 얻어 27회의 발진인 경우 27×27=729개의 초동을 위치 및 거리에 따라 해석하게 되나 이번 조사에서는 발진기 와 수진기가 동일한 심도에 위치한 수평파선 트레이스만을 하나로 취합하여 수평적인 속도분석을 실시하였다. 데이터 분석심도는 그라우팅 상단부터 실시하였다.



Figure 4–1. The results of seismic tomography data processing (No.B73, No.B97, No.A100, No.B117).



Figure 4–2. The results of seismic tomography data processing (No.A257, No.C352, No.C414).

4.2 수평파선에 대한 탄성파속도 분할

자료처리는 필터링된 최종데이타의 초동을 통해 심도별 탄성파속도를 산정하고 실내 탄성파속도시험을 통해 측정된 그라우팅의 탄성파속도와 시추공-1(발진공), 시추공-3 (수진공)를 통해 측정된 원지반의 탄성파속도 차이를 통해 그라우팅의 직경을 계산하 게 된다. 속도분석은 수평파선에 대한 탄성파속도 분할법을 사용한다. 수평파선에 대 한 탄성파속도 분할법은 두개의 시추공 사이(거리 D)에서 탄성파가 수평으로 전달되 는 경우 일부 구간(거리 d)에는 그라우팅의 속도(V1)로서 나머지구간(거리 D-d)에는 원지반의 속도(V2)로서 탄성파가 전달되었다고 한다면 도달주시 t는 다음과 같이 계 산된다.

$$\frac{d}{V_1} + \frac{D-d}{V_2} = t$$



Figure 4-3. seismic velocity classification for each C.G.S. bulb.

그라우팅의 직경 d는 다시

$$d = \frac{V_1(t \, V_2 - D)}{V_2 - V_1} \tag{4-1}$$

으로 계산된다. 그라우팅 구군의 직경 d를 구하기 위해서는 V1, V2가 주어져 야 하며 또한 t는 수평파선 기록으로부터 발췌되어야 한다. 그라우팅의 속도 (V1)은 실내 탄성과속도 측정을 사용하였으며 No.A100의 그라우팅 속도는 2429.8m/sec, No.A257의 그라우팅 속도는 3075.9m/sec로 No.B73, No.B97, No.B117, No.C352, No.C414의 그라우팅 속도는 이들의 평균치인 2752.85m/sec 를 사용하였다. 원지반과 그라우팅을 통과한 속도는 CGS말뚝과 나란히 설치된 시추공의 탑사결과에서 얻었으며 원지반의 속도는 CGS말뚝과 이격된 시추공의 탐사결과를 활용하였다.

4.3 고 찰

앞서 분석된 원지반의 탄성파속도, 원지반과 그라우팅을 통과한 탄성파속도, 그라우팅의 탄성파속도를 통해 그라우팅의 직경을 산출하였다. 원지반의 탄성파 속도는 하부로 갈수록 증가하며 탄성파속도가 증가하다는 것은 더 견고한 지층 이 분포한다는 것으로 의미한다. 원지반이 견고할수록 그라우팅효과는 떨어지므 로 하부로 갈수록 그라우팅 직경이 작아지는 것은 하부 원지반의 견고성 때문 으로 보인다. No.B73은 DL.-12.96~-14.46m구간에 상대적으로 원지반의 탄성파 속도가 높아 그라우팅효과가 떨어져 DL.-12.96~-14.46m구간의 그라우팅직경이 작아지는 원인으로 보인다. No.B97는 하부로 갈수록 원지반의 탄성파속도가 대체로 유사하게 분포하나 DL.-10.73m부근에 약간의 기복을 보여 지층내의 자 갈의 영향으로 판단되며 DL.-12.23~-15.73m구간에 상대적으로 그라우팅구간의 탄성파속도가 낮게 분포하여 원지반의 견고성 때문에 그라우팅효과가 떨어져 DL-12.23~-15.73m구간의 그라우팅직경이 작아지는 원인으로 보인다. No.A100 은 하부로 갈수록 그라우팅의 직경이 작아지는 경향을 보이며, No.B117은 DL.-9.0~-10.0m구간에 상대적으로 원지반의 탄성파속도가 높아 그라우팅효과가 떨어져 DL.-9.0~-10.0m구간의 그라우팅직경이 작아지는 원인으로 보인다. No.A257은 하부로 갈수록 그라우팅의 직경이 작아지는 경향을 보이며, No.C352 는 DL.-10.50~-11.00m구가에 상대적으로 원지반의 탄성파속도가 높아 그라우팅 효과가 떨어져 DL.-10.50~-11.00m구간의 그라우팅직경이 작아지는 원인으로 보 인다. No.C414는 하부로 갈수록 원지반의 탄성파속도가 증가하는 경향을 보이 며 시추조사결과 원지반은 모래자갈 및 점토자갈로 이루어져 심도에 따라 그라 우팅직경에 기복을 보인다. 최하부에서 No.B73는 0.881m, No.B97는 0.669m. No.A100, No.A257는 0.4m이상, No.B117는 0.948m, No.C352는 0.823m, No.C414는 0.839m의 직경을 보인다. No.B73에서 1.073m, No.B97에서 1.062m, No.A100에서 1.14m, No.B117에서 1.076m, No.A257에서 1.08m, No.C352에서 1.036m, No.C414에서 1.055m의 평균직경을 보여 전체적인 그라우팅은 양호한 것으로 판단되고 산출된 그라우팅직경은 다음과 같다.

No.B73		No.B97		No.A100		No.B117		
DI (m)	Grauting	DI (m)	Grauting	DL.(m)	Grauting	DI (m)	Grauting	
	diameter(m)	Ъс.(ш)	diameter(m)		diameter(m)	Ъг.(щ)	diameter(m)	
-6.96	0.95	-6.73	1.12	-7.4	1.255	-6.717	1.19	
-7.46	0.89	-7.23	1.23	-7.9	1.197	-7.217	1.14	
-7.96	0.96	-7.73	1.25	-8.4	1.117	-7.717	1.18	
-8.46	1.06	-8.23	1.17	-8.9	1.114	-8.217	1.15	
-8.96	1.14	-8.73	1.11	-9.4	1.114	-8.717	0.94	
-9.46	1.37	-9.23	1.13	-9.9	1.134	-9.217	0.99	
-9.96	1.30	-9.73	1.14	-10.4	1.159	-9.717	0.98	
-10.46	1.24	-10.23	1.29	-10.9	1.148	-10.217	1.10	
-10.96	1.07	-10.73	1.13	-11.4	1.163	-10.717	1.10	
-11.46	1.15	-11.23	1.31	-11.9	1.184	-11.217	1.03	
-11.96	1.13	-11.73	1.37	-12.4	1.175	-11.717	1.07	
-12.46	1.13	-12.23	1.34	-12.9	1.185	-12.217	1.11	
-12.96	0.99	-12.73	1.20	-13.4	1.179	-12.717	1.13	
-13.46	0.97	-13.23	1.06	-13.9	1.160	-13.217	0.95	
-13.96	0.92	-13.73	0.89	-14.4	1.138			
-14.46	0.88	-14.23	0.80	-14.9	1.124			
		-14.73	0.74	-15.4	1.117			
		-15.23	0.67	-15.9	1.150			
		-15.73	0.67	-16.4	1.163			
				-16.9	1.172			
				-17.4	1.184			
				-17.9	1.193			
				-18.4	1.201			
				-18.9	1.185			
				-19.4	1.116			
				-19.9	1.027			
				-20.4	0.936			
				-20.9	0.855			

Table 4-1. The grauting diameter (No.B73, No.B97, No.A100, No.B117)

No.A257		No.	C352	No.C414		
DI (m)	Grauting	DI (m)	Grauting	DI (m)	Grauting	
DL.(III)	diameter(m)		diameterm)		diameter(m)	
-7.0	1.148	-6.5	1.213	-6.86	1.06	
-7.5	1.283	-7.0	1.117	-7.36	1.02	
-8.0	1.300	-7.5	1.042	-7.86	1.01	
-8.5	1.234	-8.0	1.012	-8.36	1.11	
-9.0	1.209	-8.5	1.112	-8.86	1.20	
-9.5	1.211	-9.0	1.046	-9.36	1.02	
-10.0	1.165	-9.5	1.039	-9.86	1.12	
-10.5	1.162	-10.0	1.069	-10.36	1.16	
-11.0	1.160	-10.5	0.890	-10.86	1.05	
-11.5	1.242	-11.0	0.823	-11.36	1.02	
-12.0	1.278			-11.86	0.84	
-12.5	1.315					
-13.0	1.329					
-13.5	1.263					
-14.0	1.221					
-14.5	1.152					
-15.0	1.054					
-15.5	1.070					
-16.0	1.059					
-16.5	1.135					
-17.0	1.107					
-17.5	1.088					
-18.0	1.044					
-18.5	1.081					
-19.0	1.061					
-19.5	0.888					
-20.0	0.696					
-20.5	0.536					
-21.0	0.465					
-21.5	0.409					

Table 4-2. The grauting diameter (No.A257, No.C352, No.C414)



Figure 4-4. The interpretation of grauting forming for each C.G.S. bulb (No.B73, No.B97, No.A100, No.B117).



Figure 4–5. The interpretation of grauting forming for each C.G.S. bulb (No.A257, No.C352, No.C414).

C.G.S.	coordinates	sort	grauting top	grauting lower	grauting depth	difference (m)
grauting bulb No.			tomogra. top (DL)	tomogra. lower (DL)	tomogra. depth	
NO.B73	X:149,008.6 79 Y:147,865.5 14	grauting hole	-7.00	-13.60	6.60	
		tomogra.	-6.96	-14.46	7.50	0.90
NO.B97	X:148,962.0 38 Y:147,854.1 77	grauting hole	-7.00	-16.20	9.20	
		tomogra.	-6.73	-15.73	9.00	0.20
NO.A100	X:148931.4 47 Y:147848.8 00	grauting hole	-7.00	-20.9	13.9	
		tomogra.	-7.40	-20.9	13.5	0.40
NO.B117	X:148,989.7 45 Y:147,862.9 70	grauting hole	-7.00	-13.40	6.40	
		tomogra.	-6.717	-13.217	6.50	0.10
NO.A257	X:148,906.7 36 Y:147,853.0 85	grauting hole	-7.00	-21.50	14.50	
		tomogra.	-7.00	-21.50	14.50	0.00
NO.C352	X:149,085.5 20Y:147,69 2.774	grauting hole	-6.50	-11.20	4.70	
		tomogra.	-6.50	-11.00	4.50	0.20
NO.C414	X:149,033.8 09 Y:147,805.7 48	grauting hole	-7.00	-11.83	4.83	
		tomogra.	-6.86	-11.86	5.00	0.17

Table 4-3. The results of seismic tomography for each C.G.S. bulb

기시공된 C.G.S. 그라우팅 파일인 NO.B73, NO.B97, NO.A100, NO.B117, NO.A257, NO.C352, NO.C414를 각각 탄성파 토모그래피탐사를 실시한 결과 시공심도가 7.50m, 9.00m, 13.50m, 6.50m, 14.5m, 4.5m, 5.0m로 확인되었으며, 구근의 평균직경 이 1.073m, 1.062m, 1.137m, 1.076m, 1.076m, 1.036m, 1.055m로 설계기준 1.0m 이상 의 시공 상태를 확인하였다.

5. 결 론

이 연구는 해안 연약지반 개량공법으로 알려진 대표적인 C.G.S. 그라우팅 지역을 대상으로 탄성파 토모그래피탐사의 적용 가능성을 살펴보고자 하였 다. 이에 따라 7개의 C.G.S. 그라우팅 구근에 대해 자료취득, 자료처리 및 자 료해석 과정을 수행하였다.

CGS말뚝을 통과하는 시추공 설치시 두개의 시추공 사이에 CGS말뚝이 위 치하도록 하여 발진공에서 발진된 탄성파가 CGS말뚝을 통과하여 수진공으로 진행하도록 나란히 설치하여 탐사시 발생된 탄성파가 원지반과 CGS말뚝을 모두 통과하도록 하였다. 여기서, 각 송신에 대한 수신기록으로부터 읽혀진 초기도달시간을 표시한 주시곡선 상에서 속도 역전 등 비정상적인 자료를 확 인하고 보정을 수행하였다.

자료처리는 이러한 입력자료부터 지하단면의 속도구조를 영상으로 재구성 을 위해 획득된 초기 도달시간 자료와 얻고자 하는 단면을 속도구조를 가지 는 셀로 나누는 선형 파선토모그래피방법을 이용하였다.

필터링된 최종데이타의 초동을 통해 심도별 탄성파속도를 산정하고 실내 탄성파속도시험을 통해 측정된 그라우팅의 탄성파속도와 시추공-1(발진공), 시추공-3(수진공)를 통해 측정된 원지반의 탄성파속도 차이를 통해 그라우팅 의 직경을 계산하였다. 속도분석은 수평파선에 대한 탄성파속도 분할법을 사 용하였다.

CGS말뚝인 NO.B73, NO.B97, NO.A100, NO.B117, NO.A257, NO.C352, NO.C414를 각각 탄성과 토모그래피탐사를 실시한 결과 시공심도가 7.50m, 9.00m, 13.50m, 6.50m, 14.5m, 4.5m, 5.0m로 확인되었으며, 구근의 평균직경이 1.073m, 1.062m, 1.137m, 1.076m, 1.076m, 1.036m, 1.055m로 설계기준 1.0m 이상의 시공 상태를 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김 중렬, 현 혜자, 김 기석, 김 유성, 성 낙훈, 1991, Geotomography에 의 한 암반 구조 연구(I): 과학기술처.

 김 학수, 1994, 변형된 Born근사를 이용한 회질 지오토모그래피에 관한 연구: 공학박사 학위 논문, 서울 대학교.

 송 영수, 1990, 회절 지오토모그래피를 이용한 영상 재구성에 관한 연구: 공학박사 학위 논문, 서울 대학교.

4. 윤 왕중, 1991, 대수적 영상 재구성법에 의한 탄성파 지오토모그래피의 연구: 공학박사 학위 논문, 서울 대학교.

5. 이 호영, 1990, CG, SIRT와 DLSQ방법을 이용한 지오토모그래피의 역산: 자원공학회지, 27, 222-233.

6. 임 해룡, 1992, Fermat 원리 및 수정된 파선 경로를 이용한 비선형 파선토 모그래피의 연구: 공학 박사 학위 논문, 서울 대학교.

7. 하 회상, 1993, 탄성파토모그래피에 있어서 DLSQ법과 평활화 제한법의 비 교 연구: 공학 석사 학위 논문, 서울대학교.

8. Hardage, B.A., 1992, Crosswell seismology and reverse VSP : Geophysical Press LTD., London Horace K. C., 1981, Excavation Handbook : McGraw-Hill, New York 9. Hunt Roy E., 1984, Geotechnical engineering investigation mauual : McGraw-Hill, New York.

10. Guust, N., 1987, Seismic tomography with applications in the grobal seismology and exploration geophysics : D. Reidel Pulishing Co., Boston.

감사의 글

이 논문이 있기까지 애정과 격려를 아끼지 않고 늘 학문을 할 수 있도록 지도해주신 고진석 지도교수님께 감사드립니다. 그리고 학업과 논문을 위해 세세한 부분까지 확인해주시고 심사해주신 강추원교수님과 강성승교수님에게 고마운 마음을 드립니다. 학부와 대학원시절 꾸준한 관심과 지도를 해주신 박영석교수님, 한오형 교수님, 박천영교수님께도 감사한 마음을 전합니다.

대학원 입학부터 논문이 마감할 때까지 항상 배려해 주시고 물심양면으로 돌봐주신 김정한 효원이앤씨 대표이사님에게도 심심한 감사를 드립니다. 그리고 이 논문을 위해 실험과 자료정리 등 힘든 작업들을 자기일처럼 도와주었던 물리탐사실험실 유지완 대학원생, 명진우, 임대학 학부학생에게도 고마움을 전합니다.

내 인생의 가장 중요한 부분을 차지하고 있으면서도 감사하고 사랑한다는 표현을 잘 하지 못했던 사랑하는 우리 가족들....

사위와 가족의 평안함을 항상 기원해 주시는 장인, 장모님, 처가 식구들...

아침 저녁으로 전화를 하시며 걱정만 하시는 존경하는 아버님, 어머님....

부족한 나의 영원한 조력자인 사랑스런 아내 재영이, 예쁜 딸 채연, 든든한 아들 준성이....

모두 모두 사랑하고 또 사랑하고 그리고 감사 감사합니다!!