

수리전도도맵 작성을 위한 자료병합 툴 개발과 적용

류동우¹⁾, 김형목^{1)*}, 박의섭¹⁾, 安藤賢一²⁾

Development of a Data Integration Tool for Hydraulic Conductivity Map and Its Application

Ryu, Dong-Woo, Kim, Hyung-Mok, Park, Eui-Seup and Ando, Kenichi

Abstract Measurements of hydraulic conductivity are point or interval values, and are highly limited in their number. Meanwhile, results of geophysical prospecting can provide the information of spatial variation of geology, and abundant in number. In this study, it was aimed to develop a data integration tool for constructing a hydraulic conductivity map by integrating geophysical data and hydraulic conductivity measurements. The developed code employed a geostatistical optimization method, simulated annealing (SA), and consists of 4 distinct computation modules by which from exploratory data analysis to postprocessing of the simulation were processed. All these modules are equipped with Graphical User Interface (GUI). Validation of the developed code was evaluated *in-situ* in characterizing hydraulic characteristics of highly permeable fractured zone.

Key words Hydraulic conductivity map, Geostatistics, Simulated annealing, Data integration

초 록 암반의 수리적 특성 및 지하수 유동 양상을 파악하는데 요구되는 수리전도도맵 작성시, 투수시험 자료의 자료수 한계를 극복하고 수리전도도맵의 신뢰도 향상을 목적으로 물리탐사 결과 자료와의 병합툴을 개발하고 현장 적용해 보았다. 개발된 병합툴은 지구통계학적 최적화 시뮬레이션 기법 중의 하나인 모의 담금질 기법 (Simulated Annealing)을 활용하였으며, 시뮬레이션에 필요한 전처리 과정과 후처리 과정을 포함한 4개의 모듈로 구성되었다. 파쇄대 수리특성의 파악 및 가시화를 위한 현장 적용 결과, 시추공 사이의 비조사 영역에서의 투수 특성의 변화를 파악하는데 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

핵심어 수리전도도맵, 지구통계학, 모의 담금질 기법, 자료병합

1. 서 론

지하 암반 내 구축되는 다양한 목적의 지하 구조물이 제기능을 발휘하고 안정성을 확보하기 위해 암반의 역학적 및 수리적 특성 평가는 매우 중요하며, 이를 위해 다양한 지구물리탐사 및 원위치 시험 등이 수행된다. 특히 암반의 수리적 특성은 지하 구조물의 안정성 및

기능에 영향을 미치며 환경적 측면에서도 신중히 고려되어야 할 항목이다.

지하 암반 내 지하수 유동은 암반의 수리적 특성과 밀접한 관계가 있으며, 지하수 유동 특성을 파악하기 위한 수리전도도맵의 작성은 매우 유익한 정보로서 활용가능하다. 수리전도도맵을 위한 조사 방법으로는 지구물리탐사 결과 영상과 현장 수리시험 자료를 고려할 수 있다. 지구물리탐사의 결과 영상은 전체 영역을 표현할 수 있는 반면 간접적인 정보만을 제공할 수 있는 한계를 가지며, 그 물리적 의미에서도 차이가 있다. 반면 현장 수리 시험을 통해 얻은 투수계수 혹은 수리전도도와 같은 수리 특성치는 제한된 지점 혹은 구간에 대한 대표치로서 자료의 양에 있어서 한계성을 지닌다. 따라서, 지구물리탐사 결과 영상의 정보를 충분히 활용함과 동시에 현장 수리 시험 결과치를 반영하기 위해 자료병합 툴을 개발하였다. 이러한 지구물리탐사 결과

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원(Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea)

²⁾ 오바야시건설회사 토목기술본부 그룹리더(Group Leader, Civil Engineering Technology Division, Obayashi Corporation, Tokyo, Japan)

* 교신저자 : kimh@kigam.re.kr

접수일 : 2007년 11월 12일

심사 완료일 : 2007년 12월 5일

영상을 보조자료로서 활용한 연구는 최근 다양한 분야에서 시도되고 있다(류동우 외, 2003; Ryu et al., 2006).

개발된 자료병합 툴은 지구통계학적 시뮬레이션 기법의 하나인 모의 담금질 기법(Simulated Annealing; SA)에 근간하고 있어 확률론적으로 증가한 복수의 수리전도도맵을 작성할 수 있을 뿐만 아니라 작성된 수리전도도맵의 정확실성의 정량적 평가가 가능하다. 또한, 사용자 편의를 고려하여 그래픽 사용자 인터페이스(graphic user interface; GUI)를 개발하여 손쉽게 사용가능하도록 하였으며 향후 지구물리탐사 및 현장수리시험 해석 툴과의 병합을 통해 통합시스템으로 발전시킴으로써 현장에서 비전문가도 손쉽게 수리전도도맵을 작성할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 수리전도도맵 작성을 위한 자료병합 툴의 기본이론과 알고리즘방법론 및 주요 특징을 기술하고, 자료병합 툴의 적용 사례를 소개한다.

2. 이론과 알고리즘

2.1. 모의 담금질 기법의 개요 및 알고리즘

1953년 Metropolis는 주어진 온도에서 원자들의 평형 상태를 모의 실험하기 위한 몬테카를로 방법(Monte Carlo method)을 제안하였다. 이 방법은 임의의 온도에서 원자 구성(atomic configuration)이 볼츠만 분포(Boltzmann's distribution)를 따른다는데 기초하고 있다. 원자들의 평형 상태를 결정하는 과정은 최적화문제에도 응용할 수 있다. 모의 담금질 기법은 GA(genetic algorithm), ANN

(artificial neural networks), 반복 탐색법(iterated search: random search와 gradient methods의 결합된 방법) 등과 같이 최적화 문제(optimization problem)의 해를 찾기 위해 고안된 물리적 담금질(annealing) 과정의 상사관계(analogy)에 기초한 방법이다(Kirkpatrick, 1983).

매개변수 p_1, p_2, \dots, p_i 에 대해 최소화시키고자 하는 목적함수 O 를 고려하자. 모의 담금질 기법에서는 목적함수 O 의 매개변수들을 무작위로 변동시킨다. 각 시간 단계, $t \rightarrow t+1$,에서 하나의 매개변수를 한번 변화시킬 수 있으며, 이는 목적함수 $O_t \rightarrow O_{t+1}$ 의 변화를 일으킨다. $O_{t+1} \leq O_t$ 이면 이 변화를 채택하게 된다. 반면 $O_{t+1} > O_t$ 이면 이 변화에 대한 채택 및 기각 결정은 확률 P_a 에 따라 무작위로 이루어진다. 이에 대한 확률은 다음과 같다.

$$P_a = e^{-\frac{O_t - O_{t+1}}{c}} \tag{1}$$

상기 식은 Metropolis criterion으로서, 모의 담금질 기법의 중심이 된다. 채택될 확률 P_a 는 매개변수 c 에 의해 결정된다. 담금질과 상사하여 고려할 때, c 는 시스템의 온도에 해당한다. c 를 증가시킬수록 특정 변화를 채택할 가능성을 높일 수 있다.

일반적으로 최적화 알고리즘은 탐색과 활용기법으로 구성되며, 전자는 미지의 영역을 탐색하는 것을 말하며, 후자는 보다 나은 값을 찾기 위해 이미 탐색했던 지점들에서의 기저 값들을 활용하는 것을 의미한다. 기본적인 모의 담금질 기법의 알고리즘은 Fig. 1과 같다.

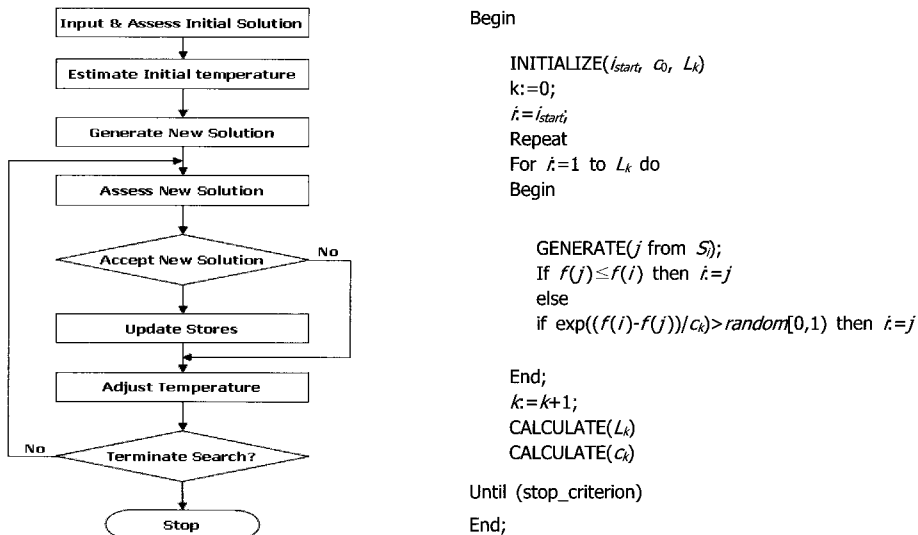


Fig. 1. The structure of basic SA algorithm.

2.2. 목적함수의 정의

채택한 모의 담금질 기법의 목적함수들은 히스토그램, 변동도(variogram), 지시 변동도(indicator variogram), 상관계수, 조건부 분포 등의 통계적 정보를 활용한다. 최종 목적함수 O 는 C 개 구성 요소들의 가중치 합으로 구성할 수 있으며, 각 요소들은 각 통계적 정보를 이용한 구성 목적함수들이다.

$$O = \sum_{c=1}^C \omega_c O_c \tag{2}$$

여기서, ω_c 와 O_c 는 각각 가중치와 구성 목적함수이며, C 는 구성 목적함수의 개수이다.

각 가중치는 전체 목적함수에 대한 각 구성 목적함수의 기여도를 균일하게 할 수 있다. 변동을 받아드릴 것인지 기각할 것인지를 판단하는 모든 기준은 다음 식의 목적함수 변화량에 기초한다.

$$\Delta O = O_{t+1} - O_t \tag{3}$$

이를 각 구성 목적함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta O = \sum_{c=1}^C \omega_c [O_{c,t+1} - O_{c,t}] = \sum_{c=1}^C \omega_c \Delta O_c \tag{4}$$

가중치 $\omega_c, c=1, \dots, C$ 는 목적함수의 변화량 ΔO 에 각 구성 목적함수가 동일하게 기여하도록 결정된다. 즉, 각 가중치 ω_c 는 구성 목적함수 평균변화량의 절대치에 반비례한다:

$$\omega_c = \frac{1}{|\Delta O_c|}, c=1, \dots, C \tag{5}$$

실제의 경우, 각 구성 목적함수 변화량의 평균치, $|\Delta O_c|$ 는 분석적으로 계산할 수 없지만, 독립적인 변동으로 인한 평균변화량을 산정함으로써, 수치적으로 근사시킬 수 있다.

$$|\Delta O_c| = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |O_c^{(m)} - O_c|, c=1, \dots, C \tag{6}$$

3. 프로그램 개요

3.1. 모듈 구성

모의 담금질 기법을 수리전도도법 작성을 위한 최적화 기법으로 선택하여 이를 위한 사용자 인터페이스

(user interface: UI)를 개발하였다. 수리전도도법 작성물의 특징은 사용자 중심 그래픽 인터페이스, GSLIB (Deutsch and Journel, 1998)와의 완벽한 호환성, 직관적인 복합 변동도 모델링(intuitive nested variogram modeling), 2차원 및 3차원 문제의 선택적 적용 등이다.

각 구성 모듈은 SOM, VAR, SAS, POP으로 구성되며, 기존 다양한 개발 프로그램에 끼워 넣어 활용할 수 있도록 동적 라이브러리(dynamic link library: DLL)로 컴파일되었다. 본 논문에서는 토모그램 역산 프로그램 중 하나인 'EZTomo for Tomography'(신동훈 외, 1993)을 플랫폼으로 하여 적용하였다. 각 기능별 모듈 구성은 Fig. 2와 같다. UI는 4가지 구성 모듈을 포털 대화상자의 호출을 통해 각 단계별 작업이 가능하도록 작성되었으며(Fig. 3), 각 모듈별 입력 매개변수들의 설정을 위해 대화상자를 호출하여 작동하도록 설계되었다.

3.2. 모듈별 개요

모듈별 입력 매개변수들은 GSLIB 내의 매개변수 파일 형식과 완벽하게 호환 가능하도록 구성하였다. 이는 각 모듈에서 요구되는 입력 매개변수들의 변경과 수정을 용이하게 한다. 생성된 매개변수 파일의 구분을 위해 각 모듈별 차별화된 확장명을 *.som, *.var, *.sas, *.pop와 같이 사전에 설정하도록 설계하였다. 자료 분석, 모델링, 최적화 그리고 가시화를 위한 후처리 등 사용자의 단계별 작업이 용이하도록 모든 모듈은 포털 대

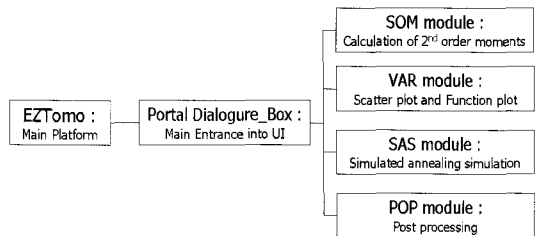


Fig. 2. Overall structure of UI's in EZTomo.

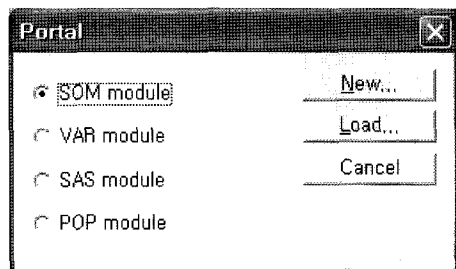


Fig. 3. Portal dialogue box for entrance into component modules.

화상자를 통해 접근하도록 구성하였다.

각 모듈명과 기능 그리고 입력 매개변수별 확장자명은 Table 1과 같다.

- SOM 모듈

SOM 모듈은 공간 변화성 및 연속성을 평가하기 위해 상호 및 자기 변동도, 공분산, 상관도표, 지시 변동도 등 10여 종류의 실험적 측도를 계산할 수 있다. 이들 측도를 계산하기 위한 입력 자료의 형식은 Geo_EAS 형식(Englund and Sparks, 1988)과 같이 작성되어야 한다(Table 2).

SOM 모듈의 UI는 입출력 파일 경로, 입력자료 파일의 변수열 설정, 거리 혹은 시간 간격 그리고 이방성 및 공간변화성 측도 등의 환경 설정이 가능하도록 구성하였다(Fig. 4). 또한, 기타 ‘View Data’, ‘View Options’ 그리고 ‘Statistics’ 등의 부가적인 명령을 통해서 필요한 정보를 확인하여 사용자 편의성을 극대화시켰다.

- VAR 모듈

VAR 모듈에는 SOM 모듈에서 계산된 공간 변화성에 대한 다양한 실험적 측도들을 도시할 수 있고, 이론적 변동도 모델링을 수행할 수 있도록 함수 그리기 등

이 가능하다. 복합 변동도 모델은 기본적인 이론적 변동도 모델들의 선형 결합으로 정의할 수 있으며, 사용자는 UI 내에서 사용할 기본 모델의 개수 및 종류, 각 종류별 영향 범위 및 너겟(nugget) 효과, 각 모델별 가중치 등을 부여하면서 최종 이론적 변동도 모델을 설정할 수 있다(Fig. 5).

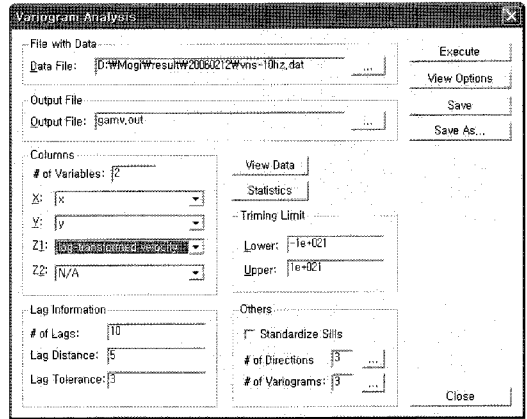


Fig. 4. Main dialogue box for SOM module.

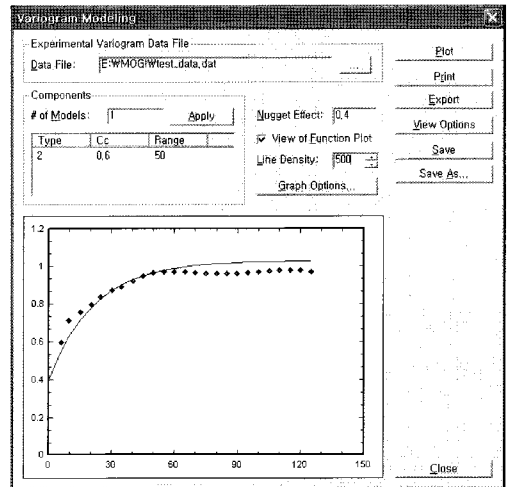


Fig. 5. An example of variogram modeling of VAR module.

Table 1. Summary of component modules.

Module Name	Functions	File Extension
SOM (Second Order Moment)	calculation of various measures of spatial variability/continuity	*.som
VAR (theoretical VARIogram model)	fitting of theoretical variogram model	*.var
SAS (Simulated Annealing Simulation)	2D simulated annealing simulation	*.sas
POP (POst-Process)	calculation of E-type, probability etc. from SAS output file	*.pop

Table 2. Summary of Geo_Eas formatted file.

Number of Row	Description	Types
1	Job Title or Data Description or Date	Characters or number
2	Number of variables or columns	Integer > 0
3-(3+number of variables)	Name of variables or columns	Characters of number
(4+number of variables) ...	Values of data each columns	Real number, integer

또한, ‘View of Function Plot’ 등은 산점도 및 함수 그리기 등의 그래픽 옵션의 설정을 지원하며, 사용자의 직관적 판단에 도움을 줄 수 있다.

- SAS 모듈

SAS 모듈은 최적화를 위한 모의 담금질 기법 상 다양한 제약 조건들의 목적함수 설정을 보다 용이하도록 구성되어 있다. SAS 모듈은 각 목적함수별로 요구되는 다양한 선택 사항 및 담금질 일정 등을 설정하기 위한 부모모듈들을 포함한다(Fig. 6).

또한, ‘View of Function Plot’ 등은 산점도 및 함수 그리기 등의 그래픽 옵션의 설정을 지원하며, 사용자의 직관적 판단에 도움을 줄 수 있다.

주어진 정보의 형태와 양에 따라 체크박스를 이용하여 목적 함수를 선택하고, 각 구성 목적 함수에 가중치를 부여함으로써 전체 목적 함수를 결정할 수 있다. 구성 목적함수 중에서 변동도, 지시변동도, 상관도표 등은 추가적인 선택 대화상자를 통해 이방성 및 복합 모델 등을 정의할 수 있다(Fig. 7과 Fig. 8). 지시 변동도 선택 대화상자의 경우도 변동도와 유사한 형태와 기능을

지원하며, 지시 임계값의 설정과 각 지시 임계값별 모델 설정이 가능하도록 탭 방식으로 구성하였다.

- POP 모듈

POP 모듈은 SAS모듈로부터 얻어진 실현 집합들로부터 각 격자점에서의 E-type 추정치, 조건부 분포의 분산, 특정 임계값을 초과할 확률, 조건부 p-quantile 등 다양한 형태의 결과물을 얻기 위한 후처리 모듈이다 (Fig. 9). 출력 선택에서는 각 결과물의 형태에 따라 매개변수 입력치의 의미가 다르다. 예를 들면, E-type 추정치를 선택하였을 경우, 매개변수는 특별한 의미를 가지지 않는 반면, 특정 임계값을 초과할 확률의 경우, 특정 임계값을 의미한다.

4. 현장 적용

스위스 그림젤(Grimsel)의 지하연구소실 현장에서 파쇄대의 수리특성을 파악하기 위해 주파수 대역별 탄성파 속도 토모그램과 시추공 투수시험으로부터 얻은 자료를 토대로 현장 수리전도도맵을 작성하였다. 적용 지점의 모양은 화암질이며, 대상 파쇄대는 71° 정도의 고경사를 가지는 것으로 파악되었다.

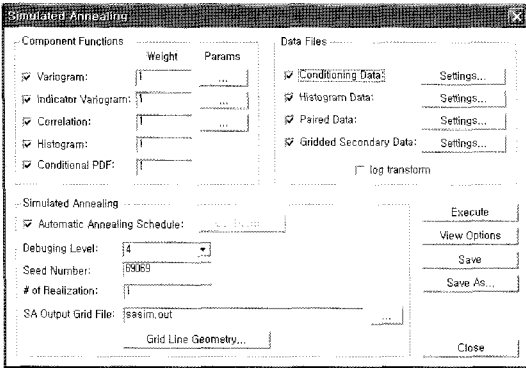


Fig. 6. Main dialogue box for SAS module.

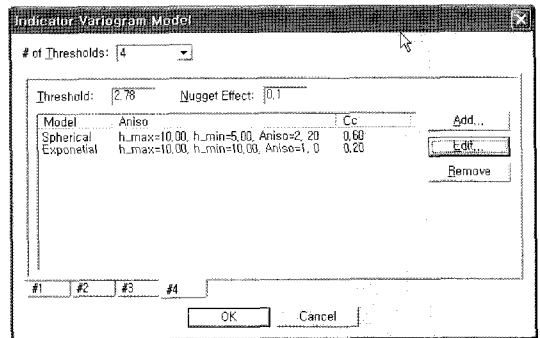


Fig. 8. Dialogue Box for indicator variogram model.

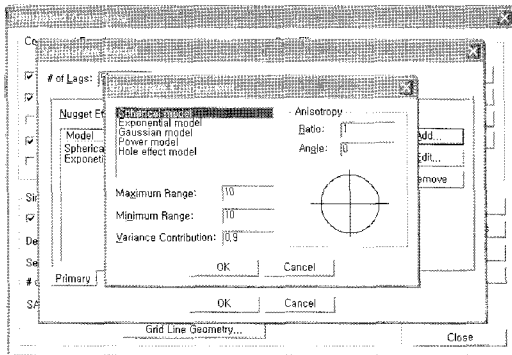


Fig. 7. Dialogue Box for parameters of variogram component.

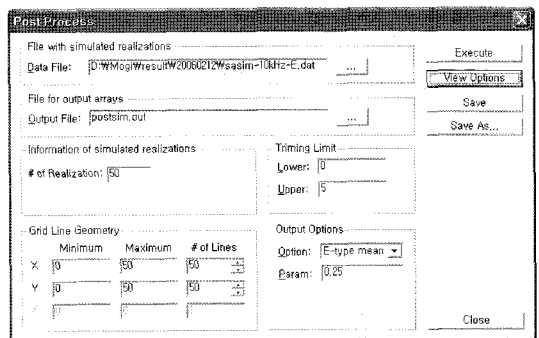


Fig. 9. Dialogue box for configurations of post process.

현장에서는 연구갱도로부터 파쇄대를 관통하는 2개의 시추공을 굴착하고 이들 시추공을 각각 발신공(GAM공) 및 수신공(TPF공)으로 하여 탄성파 토모그래피 탐사를 실시하였다(Fig. 10). 공간격은 약 1.5 m이며 송/수신기 설치구간은 약 5.0 m이다.

사용 주파수 대역으로는 10 kHz, 20 kHz, 40 kHz 그리고 56 kHz을 이용하였고, 토모그램의 작성에는 본 연구에서 개발된 자료병합툴의 플랫폼이 되는 EZTomo for Tomography(신동훈 외, 2003)를 사용하였다.

시추공 투수시험은 총10개의 시험구간(Fig. 10의 GAM 1~5, TPF1~5 구간)에서 실시하였으며 신선암부에서는 순간주입시험(pulse injection test)을 파쇄대에서는 정압주입시험(constant pressure injection test)을 실시하였다. 시추공 투수시험 자료 해석결과를 Table 3에 요약하였다.

개발된 자료병합툴을 이용하여 탄성파 토모그램 및 투수시험 결과에 대한 탐색적 자료 처리를 통해 실험적 변동도(Fig. 11) 및 상관도 분석(Fig. 12) 등을 실시하고, 각 10 kHz, 20 kHz, 40 kHz 그리고 56 kHz 주파수 대역에 대한 탄성파 속도 토모그램을 참조영상으로 하여 시추공 투수시험 자료와 병합하여 수리전도도맵을 작성한 결과는 Fig. 13과 같다.

주파수 대역에 따라 토모그램 결과에는 큰 차이를 보이지 않으나 수리전도도맵에서의 파쇄대의 기하학적 구조 및 크기, 투수계수 값에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서, 신뢰성 높은 수리전도도맵을 얻기 위해서는 주파수 대역과 투수계수 사이의 상관성에 관한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각되며 이러

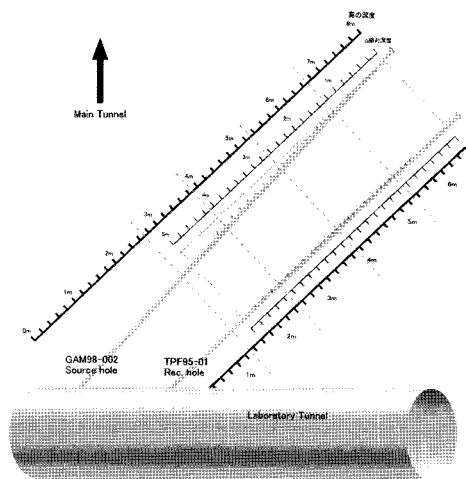
한 노력의 일환으로 탄성파 속도의 분산현상을 이용한 연구가 보고된 바 있다(Ando et al., 2006).

시추공 투수시험 시험구간에서는 동일한 지점에서 탄성파 속도 토모그램 및 투수시험 자료가 쌍으로 존재함으로 이를 시물레이션의 제한조건으로 사용했을 경우의 결과를 비교해 보았다(Fig. 14). 시추공 투수시험 결과는 시추공을 따라 선형으로 분포하고 시험구간 내 모든 격자점에서 동일한 값을 가지기 때문에 이들 자료의 영향으로 수리전도도맵에도 선구조의 결과를 볼 수 있으며, 결과적으로 수리전도도맵의 투수계수 분포의 절대치도 다른 양상을 보인다. 선구조의 이상현상은 시추

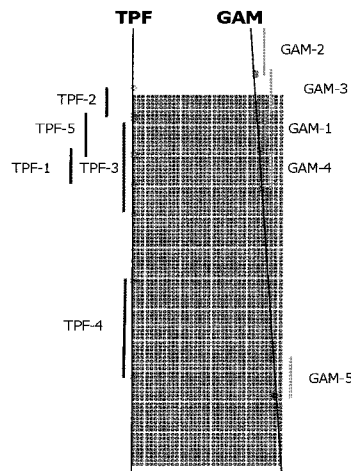
Table 3. Results of borehole hydraulic test

Boreholes	Intervals	Hydraulic conductivity(m/sec)	Remarks
TPF	TPF-1	1.3E-12	PI
	TPF-2	2.7E-11	PI
	TPF-3	3.6E-9	HI/HIS
	TPF-4	5.0E-9	HI/HIS
	TPF-5	1.9E-12	PI
GAM	GAM-1	2.5E-11	PI
	GAM-2	7.9E-11	PI
	GAM-3	1.3E-11	PI
	GAM-4	9.0E-10	HI/HIS
	GAM-5	1.7E-7	HI/HIS

(PI: pulse injection test, HI/HIS: constant pressure injection/recovery test)

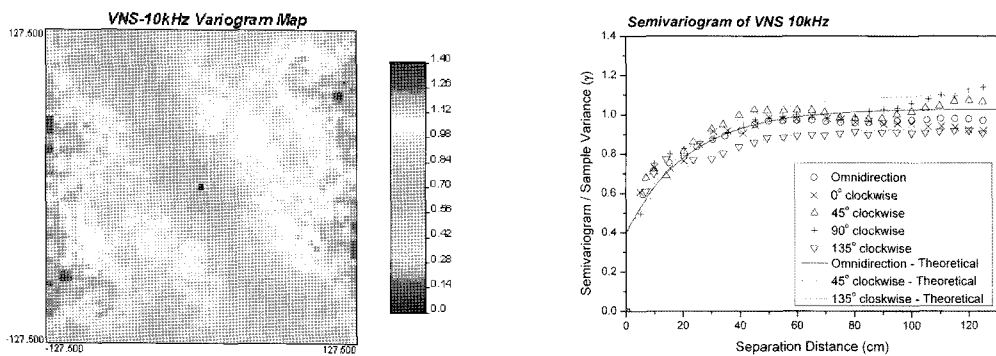


(a) geometry of tomography test

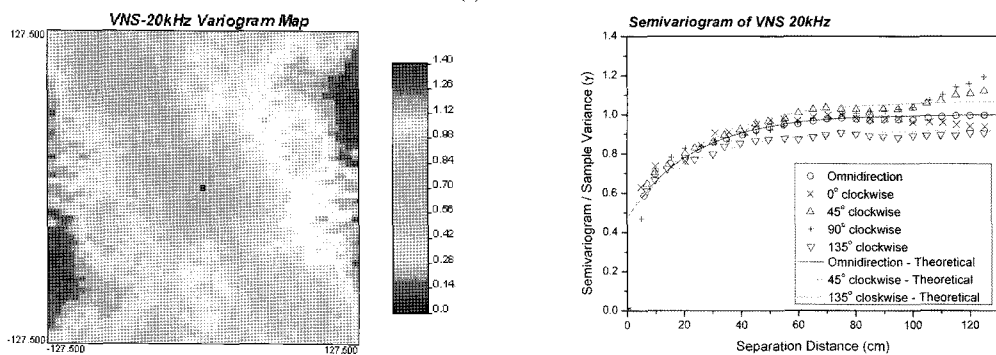


(b) test interval of borehole hydraulic test

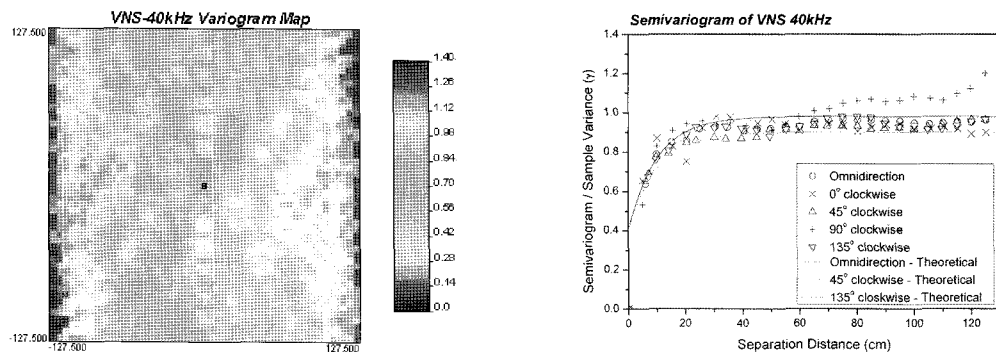
Fig. 10. Geometry of test site for hydraulic conductivity map construction



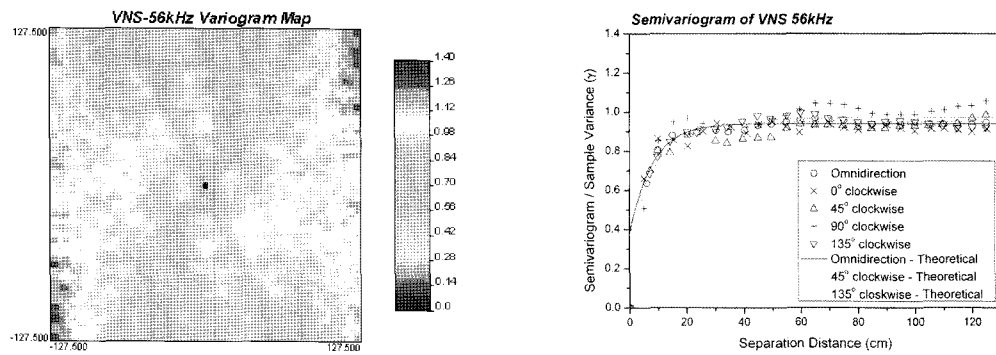
(a) 10 kHz



(b) 20 kHz

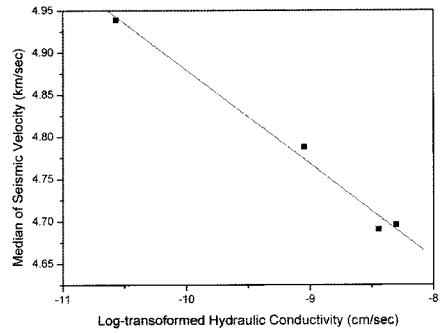
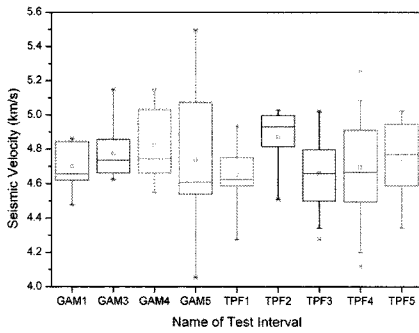


(c) 40 kHz

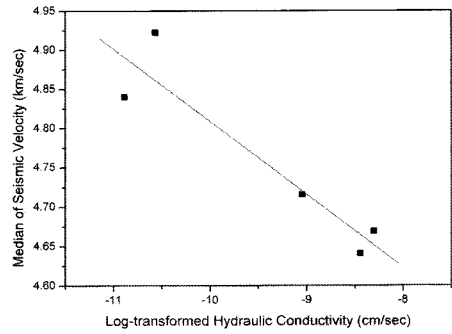
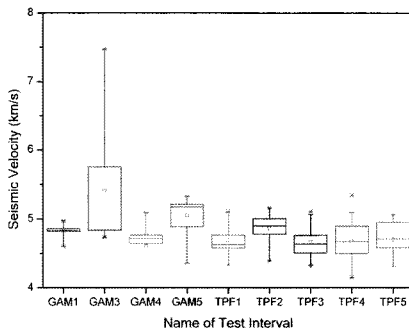


(d) 56 kHz

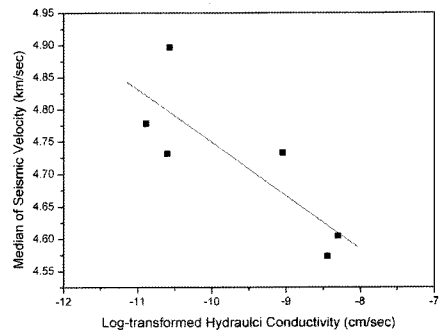
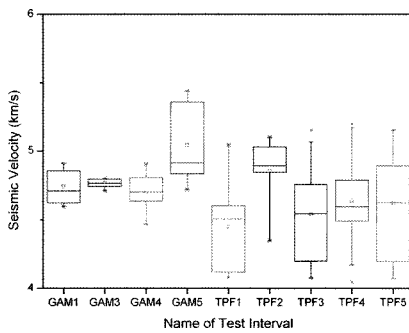
Fig. 11. Results of variogram analysis for wave velocity at each wave frequency (left: variogram map, right: semi-variogram)



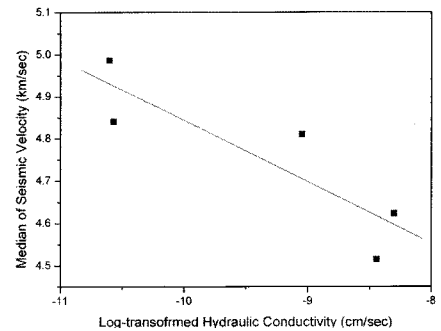
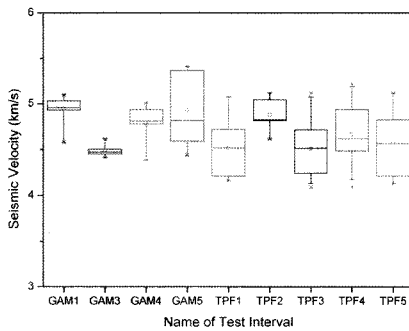
(a) 10 kHz



(b) 20 kHz



(c) 40 kHz



(d) 56 kHz

Fig. 12. Box plot(left) and scatter plot(right) between wave velocity and hydraulic conductivity at each wave frequency

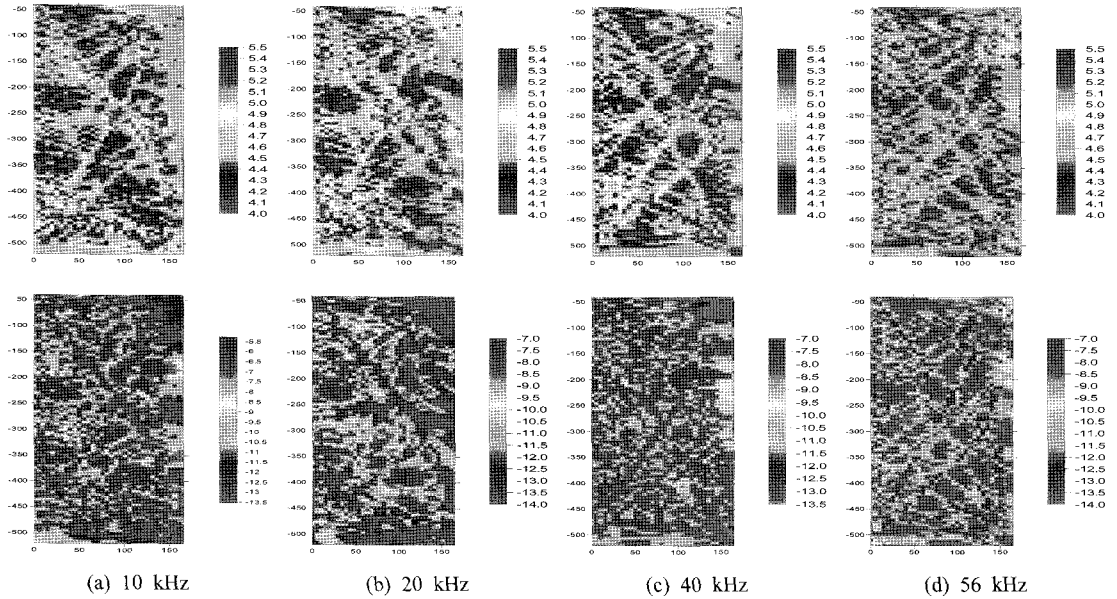


Fig. 13. Image of tomogram(top) and hydraulic conductivity map(bottom) at each wave frequency

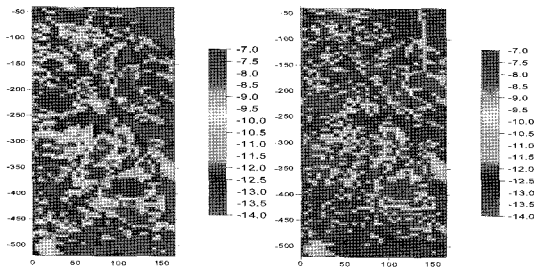


Fig. 14. Hydraulic conductivity maps (a) unconditional (left) and (b) conditional (right) to field data at the 20 kHz frequency

공 투수시험 구간과 토모그램 해석격자 사이의 스케일 차를 줄임으로써 극복할 수 있으며 이를 위해서는 투수 시험 구간을 짧게 하여 투수시험 결과값과 탄성파 속도의 자료 쌍을 보다 많이 확보하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

5. 결론

암반의 수리적 특성 및 지하수 유동 양상을 파악하는데 요구되는 수리전도도맵 작성시, 투수시험 자료의 자료수 한계를 극복하고 수리전도도맵의 신뢰도 향상을 목적으로 물리탐사 결과 자료와의 병합틀을 개발하고

현장 적용해 보았다.

개발된 병합틀은 지구통계학적 최적화 시뮬레이션 기법 중의 하나인 모의 담금질 기법을 활용하였으며, 시뮬레이션에 필요한 탐색적 자료 분석 등의 전처리 과정과 시뮬레이션 결과의 후처리 과정을 위한 4개의 독립적인 모듈로 구성되었다.

파쇄대 수리특성의 파악 및 가시화를 위한 현장 적용 결과, 시추공 사이의 비조사 영역에서의 투수특성의 공간적 변화를 파악하는데 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 탄성파 속도 토모그램 및 투수시험 결과 해석 자료를 병합하여 수리전도도맵을 작성하는 과정을 대상으로 하였다. 향후, 탄성파 탐사 결과의 역산해석 및 투수시험 자료의 해석틀을 통합한 시스템을 구축함으로써 현장에서 비전문가도 손쉽게 수리전도도맵을 작성할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 작성된 수리전도도맵의 신뢰도 향상을 위해서는 역산기법 및 투수시험 해석법의 고도화 및 적절한 기법의 선택이 필수적이며 물리탐사 결과와 투수계수의 보다 정도 높은 상관성 도출을 위한 노력이 지속되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술

평가원에서 위탁시행 한 2007년도 첨단도시개발사업 (과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐 기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

1. 류동우, 김택곤, 허종석, 2003, RMR의 불확실성 모델링을 위한 지구통계학적 시뮬레이션 기법에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol. 13, No. 2, pp. 87-99.
2. 신동훈, 지준, 이두성, 2003, 지반조사를 위한 PC기반의 3차원 탄성과 자료처리시스템 개발: 한국지구시스템공학회지, Vol. 40, No. 1, pp. 48-57.
3. Ando, K., H. M. Kim, S. Sakashita, K. Yoshimura, P. Bruines, S. Nishiyama and Y. Ohnishi, 2006, Stochastic approach for hydraulic conductivity field based on elastic wave velocity dispersion, Western Pacific Geophysics Meeting, H21C, Beijing, H21C-02
4. Englund, E. and Sparks, A., 1988, Geo-EAS 1.2.1 User's Guide, EPA Report #60018-91/008 EPA-EMSL, Las Vegas, NV
5. Deutsch, C.V. and Journel, A.G., 1998, GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, New York, 2nd Edition, p. 369.
6. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., and Vecchi, M.P., 1983, Optimization by simulated annealing, Science 220, pp.671-680.
7. Ryu, D.W., Son, B.K., Song, W.K. and Lee, C.I., 2006, A probabilistic assessment of the effect of tunnelling on groundwater system considering the uncertainty of hydraulic conductivity, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 3, pp. 445.

류 동 우



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사
Tel: 042-868-3099
E-mail: dwryu@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

박 의 섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

김 형 목



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과 공학박사
Tel: 042-868-3265
E-mail: kimh@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

安藤賢一

현재 오바야시건설회사 토목기술본부 그룹 리더