

프랙탈 모델을 적용한 우리나라 균열 암반 대수층의 수리상수

함 세영^{*1}

*1 : 한국자원연구소, 선임연구원

1. 서 론

대수층의 수리상수를 산출하기 위한 양수시험 분석에 이용되는 가장 기본적인 이론은 Theis 이론이다. Theis 이론에서는 지하수의 흐름은 2차원의 방사상 흐름이다. 그러나, 1차 공극으로 이루어진 충적층 대수층이나 사암과 같은 다공질 대수층과는 달리 기반암내에 발달되어 있는 균열 대수층은 균열(fractures), 열극(fissures) 또는 단층과 같은 2차 공극으로 이루어져 있다. 따라서, 균열 대수층내 지하수 흐름은 이러한 2차 공극의 발달상태에 지배되고, 2차원 흐름뿐만 아니라 1차원 흐름, 3차원 흐름 또는 임의의 실수차원의 흐름(예를 들면, 1.5차원, 1.8차원 또는 2.2차원 등)이 존재할 수 있다. 이러한 실수차원의 흐름은 곧 프랙탈 차원의 흐름인 것이다.

지난 수십년간 많은 학자들이 균열암반내 지하수 유동에 관한 모델들을 제안하였다. 이들은 크게 이중공극 모델, 단일균열 모델, 프랙탈 모델 그리고 추계론적 분리균열(stochastic discrete fracture) 모델이 있다.

그러나, 이중공극 모델, 단일균열 모델들은 균열암반내 지하수 유동을 모식화하기에는 불충분한 면이 있으며, 추계론적 분리균열 모델은 균열내 지하수흐름을 보다 자세하게 모식화할 수 있으나 실제로 야외에서 우리가 구할 수 있는 자료가 충분치 못하며 또한 복잡한 계산을 요한다는 단점이 있다.

따라서 저자는 추계론적 모델보다 간단하면서도 균열암반의 지하수 유동을 비교적 정확히 모식화할 수 있는 몇가지 프랙탈 모델(일반화 방사상 유동 모델, 누수를 포함하는 프랙탈 모델, 정상류 이중공극 프랙탈 모델, 비정상류 이중공극 프

락탈 모델 그리고 정상류 이중투수율 프락탈 모델)을 적용하여 우리나라 균열암반 대수층의 수리특성을 고찰하고자 한다.

2. 본 문

프락탈 모델의 개념적 배경

균열 대수층 내의 하나의 양수공으로 향하는 지하수 유동을 생각할 때, 그 유동의 표면적 A 는 양수공으로부터의 거리 r 의 실수승에 비례한다는 것이 지하수 유동의 프락탈 이론이다. 이를 식으로 나타내면(Barker, 1988)

$$A = b^{3-n} r^{n-1} (2\pi^{n/2} / \Gamma(n/2))$$

과 같다. 여기서 n 은 프락탈 차원으로서 일반적으로 $0 < n \leq 3$ 사이의 임의의 실수가 된다. b 는 유로에 연직방향의 대수층의 범위이고 $\Gamma(n/2)$ 는 $n/2$ 의 감마함수이다. 예를 들면, 1차원 흐름의 A 는 r^0 에 비례하고 2차원 흐름(또는 원주상 흐름)은 r^1 에 비례하고 3차원 흐름(또는 구상흐름)은 r^2 에 비례한다. 1차원보다 작은 차원의 흐름인 경우에는 거리 r 에 따라 유동의 표면적 A 가 감소하게 된다. 즉, 양수공에서 멀어질수록 균열의 발달상태가 미약해 지거나, 투수계수가 낮아진다는 의미가 된다. 프락탈 모델의 일반적인 가정은 Barker(1988)에 의해서 제시되었다: 즉, 지하수 흐름은 방사상(radial)이고 n 차원이다. 그리고 균질하고 등방성인 대수층은 방사상으로 무한히 뻗어 있다. 마지막으로, 지하수계는 Darcy의 법칙에 지배된다.

균열암반 대수층의 수리적 매개변수(hydraulic parameters)

균열암반 대수층의 수리적 매개변수들을 각 모델별로 기재하면 다음과 같다.

- 1) 일반화 방사상 유동 모델(Barker, 1988) : $K_f b^{3-n}$ (일반화 투수량 계수), K_f/S_{sf} (수리분산계수), W_s (양수공의 저장계수), s_f (양수공의 우물손실계수), n .

- 2) 누수를 포함하는 프락탈 모델(Hamm and Bidaux, 1994a) : $K_f b^{3-n}$, K_f/S_{sf} , W_s , s_f , n , B(누수계수), n .
- 3) 정상류의 이중공극 프락탈 모델(Hamm and Bidaux, 1994b) : $K_f b^{3-n}$ (균열의 일반화 투수량계수), K_f/S_{sf} (균열의 수리분산계수), K'/S_s' (블록의 수리분산계수), W_s , s_f , λ (블록과 균열간의 흐름계수), n .
- 4) 비정상류의 이중공극 프락탈 모델(Hamm and Bidaux, 1994c) : $K_f b^{3-n}$, K_f/S_{sf} , $K' b'^{3-n}$ (블록의 일반화 투수량계수), K'/S_s' , W_s , s_f , λ , n .
- 5) 이중투수율 프락탈 모델(Hamm, 1994) : $K_f b^{3-n}$ (1대수층의 일반화 투수량계수), K_f/S_{sf} (1대수층의 수리분산계수), $K' b'^{3-n}$ (2대수층의 일반화 투수량계수), K'/S_s' (2대수층의 수리분산계수), W_s , s_f , λ , κ ($=K_f b^{3-n}/(K_f b^{3-n}+K' b'^{3-n})$), ω ($S_{sf} b^{3-n}/(S_{sf} b^{3-n}+S_s' b'^{3-n})$), n .

또 다른 중요한 매개변수는 산출량계수(productivity index, PI) 이다. $PI = Q/s_w$ 로 표시된다. 여기서 s_w 는 양수량 Q 로 1일, 1개월 또는 1년간 양수시에 예상 수위강하로서, 우물손실분을 뺀 순수한 대수층 손실만의 값이다.

우리나라 균열암반 대수층의 수리특성

양수시험자료는 한국동력자원연구소(1991년부터는 한국자원연구소로 바뀜)에서 1983년부터 1990년까지 온천공조사와 온천종합조사로부터 얻어진 것으로 54개 조사지역의 총 126개 자료이다. 양수시험자료가 얻어진 지역 및 온천공 또는 온천종합조사보고서의 번호는 Fig.1에 표시되어 있다. 양수시험은 여러 종류의 균열암반(화강암, 안산암, 현무암, 응회암, 편암 및 편마암) 지역에서 행해졌으며, 양수공과 관측공의 심도는 수백 미터이다.

상기 자료로부터 우리나라 균열암반 대수층의 수리적인 매개변수 ($K_f b^{3-n}$, K_f/S_{sf}), PI , n 등을 분석하였다. 본 연구에서 이중 대수층의 경우나 이중 공극 대수층의 경우에는 $K_f b^{3-n}$ 는 $K_f b^{3-n}$ 와 $K' b'^{3-n}$ 의 합을 의미하며, K_f/S_{sf} 는 K_f/S_{sf} 와 K'/S_s' 의 평균에 해당한다.

K_f/S_{sf} 와 1일, 1개월, 1년 양수시의 PI 간의 관계를 분석하였다. 그 결과 상관계

수는 각각 0.55, 0.53, 0.50 으로 나타났다. 따라서 양수시간이 길어질수록 K_f/S_{sf} 와 PI의 상관계수는 점점 더 낮아진다. K_f/S_{sf} 와 1일 양수시 PI간의 상관도에서 상한선과 하한선은 2 표준편차(σ_s)범위를 나타낸다. 이 때 이 범위의 신뢰도는 95.4 % 가 된다.

K_{fb}^{3-n} 과 1일, 1개월, 1년 양수시의 PI의 상관계수는 각각 0.75, 0.67, 0.60 이다. 그러므로 K_{fb}^{3-n} 과 PI의 상관성은 상당히 높다. K_{fb}^{3-n} 에 대한 1일 양수시의 PI(PI1)의 상관식은

$$PI1 = 1.7 \times 10^{-2} (K_{fb}^{3-n})^{0.673}$$

이다. K_{fb}^{3-n} 과 1일 양수시 PI의 상관도에서 $+2\sigma_s$ 와 $-2\sigma_s$ 의 간격은 비교적 좁으며 10^2 단위이다.

양수공의 심도(Pf)와 1일 양수시 PI(PI1)의 상관계수(Pf는 일반좌표, PI1은 대수좌표에 표시함)는 -0.63이고, 그 상관식은 $PI1 = 0.0019 \times 10^{-0.0028Pf}$ 이다. 따라서 PI1은 양수공의 심도에 따라 감소한다.

PI1과 K_{fb}^{3-n} 그리고 PI1과 K_f/S_{sf} 간의 상관관계도 역시 음(negative)의 관계이다. 그러나 상관계수는 Pf와 PI1간의 상관계수보다 낮다.

양수공의 자료에 의한 K_{fb}^{3-n} 과 K_f/S_{sf} 간의 상관계수는 0.59 이고, 양수공과 관측공의 자료를 모두 이용한 K_{fb}^{3-n} 과 K_f/S_{sf} 간의 상관계수는 0.43 이다. 따라서 양수공만의 자료에 의한 K_{fb}^{3-n} 과 K_f/S_{sf} 의 상관성이 더 높다.

모든 자료의 K_f/S_{sf} 분포를 보면(Table 1) $0.1-1m^2 s^{-1}$ 사이가 가장 높아서 49%를 차지한다. 또한 $0.1-10m^2 s^{-1}$ 은 74%를 차지한다. $0.01m^2 s^{-1}$ 미만은 1%이하로서 거의 존재하지 않는다.

Table 1. Distribution of K_f/S_{sf}

K_f/S_{sf} ($m^2 s^{-1}$)	data frequency	percents (%)
0.001 - 0.01	1	1
0.01 - 0.1	22	18
0.1 - 1	62	49
1 - 10	32	25
10 - 100	9	7

프락탈 차원의 분포를 보면 1-2 차원 사이가 가장 많아서 76%를 차지한다

(Table 2). 반면에 $n=2$ 즉 Theis 이론에 맞아 들어가는 경우는 11% 에 불과하다. 따라서 대부분의 우리나라 균열 암반 지하수유동은 프락탈 차원의 유동을 보여주는 것이 확인된다.

Table 2. Distribution of flow dimension(n)

n	data frequency	percents (%)
0 - 0.5	2	2
0.5 - 1	9	7
1 - 1.5	31	24
1.5 - 1.99	65	52
2	14	11
2 - 2.5	5	4

3. 결 론

일반화 방사상 유동 모델, 누수를 포함하는 프락탈 모델, 정상류의 이중공극 프락탈 모델, 비정상류의 이중공극 프락탈 모델, 이중투수율 프락탈 모델을 적용하여 우리나라 균열암반 대수층의 수리적 특성을 연구해 본 결과, 우리나라 균열 암반의 126개 양수시험 자료 중 76%에 해당하는 자료가 1-2차원의 프락탈 유동 차원을 보여준다. 이에 대하여 11%만이 Theis이론에 맞는 2차원의 방사상 흐름을 보인다.

Krb^{3-n} (일반화 투수량계수)와 PI(산출량계수)간의 상관계수는 0.75이며, 그 상관식은

$$PI = 1.7 \times 10^{-2} (Krb^{3-n})^{0.673}$$

으로 계산된다.

K_f/S_{sf} (수리분산계수)의 분포범위를 보면, $0.1-10m^2s^{-1}$ 이 전체의 74%를 차지한다.

양수공의 심도(Pf)와 1일 양수시 PI(PI1)의 상관계수는 -0.63이고, 그 상관식은 $PI1 = 0.0019 \times 10^{-0.0028Pf}$ 이다. 따라서 PI1은 양수공 심도에 따라 감소하며, 이러한 현상은 일반적으로 심도가 증가하면 암석의 투수율이 감소하는 것과 일치한다.

참 고 문 헌

- Barker, J. A. 1988, A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resour. Res.*, 24(10), pp.1796-1804.
- Boulton, N.S, and Streltsova, T.D., 1977, Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation. *Jour. Hydr.*, v.35, pp.257-269.
- Hamm, S. Y., 1994, Nouveaux models fractals d'écoulement dans les milieux fissurés : application aux données de pompages en Corée du Sud, Thèse Doctorat és Sciences. Université de Montpellier II.
- Hamm, S. Y. and Bidaux, P., 1994a, Ecoulements transitoires en géométrie fractale avec drainance : théorie et application. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 318, série II, n.2, pp.227-233.
- Hamm, S. Y. and Bidaux, P., 1994b, Stationary dual-porosity fractal model of groundwater flow in fractured aquifers. *Jour. Eng. Geol.* v.4, n.2, pp.127-138.
- Hamm, S. Y. and Bidaux, P., 1994c, Nonstationary dual-porosity fractal model of groundwater flow in fractured aquifers with or without fracture skin. *The Jour. Eng. Geol.*, v.4, n.3, pp.283-295.
- Hantush, M. S., 1956, Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. *Trans. AGU*, 37, n.6, pp.702-714.
- Moench, A. F., 1984, Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resour. Res.*, v.20, n.7, pp.831-846.
- Warren, J. E. and Root, P. J., 1963, The behavior of naturally fractured reservoirs. *SPEJ*, v.3, n.2, pp.245-255.

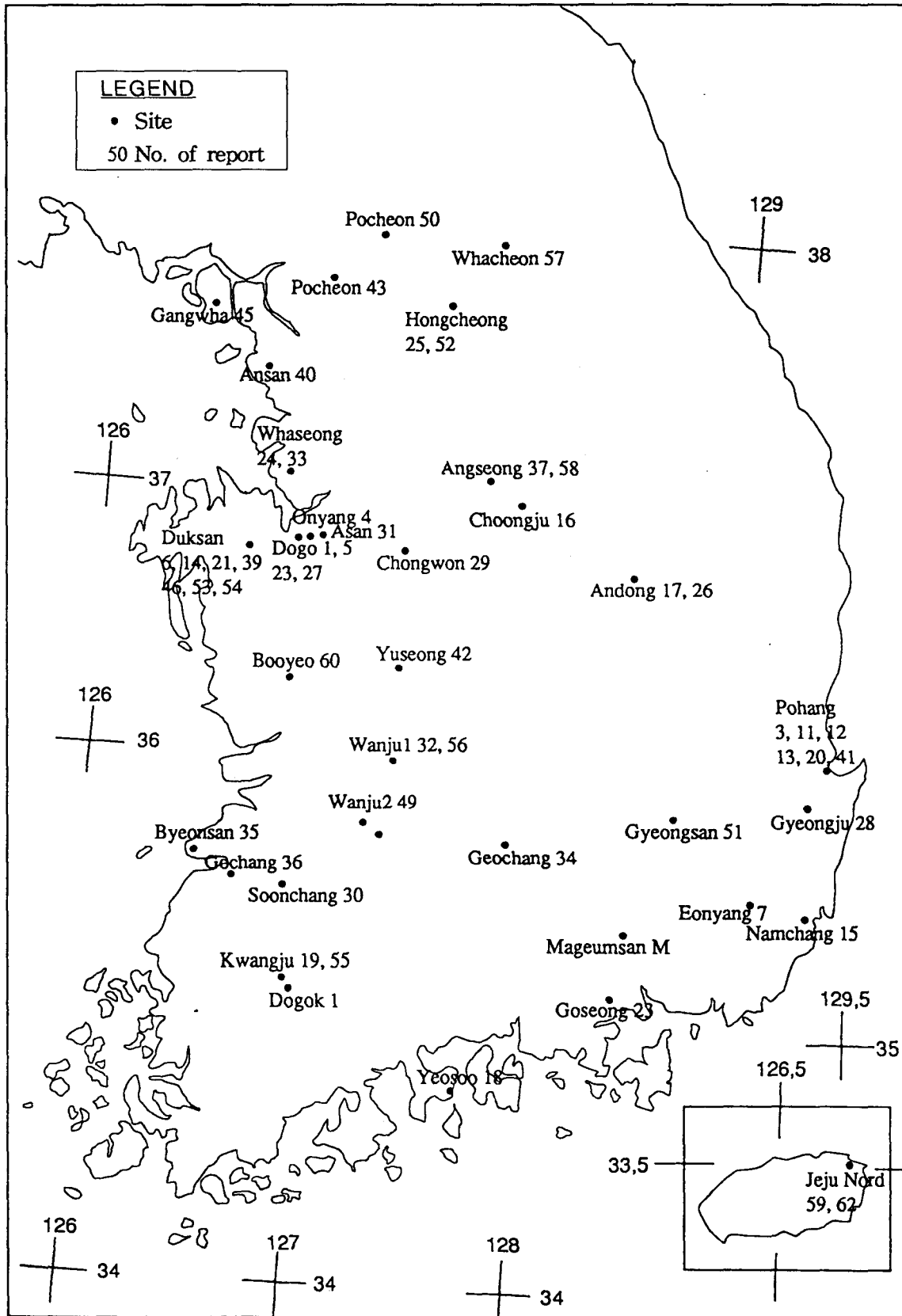


Fig.1 Location of sites

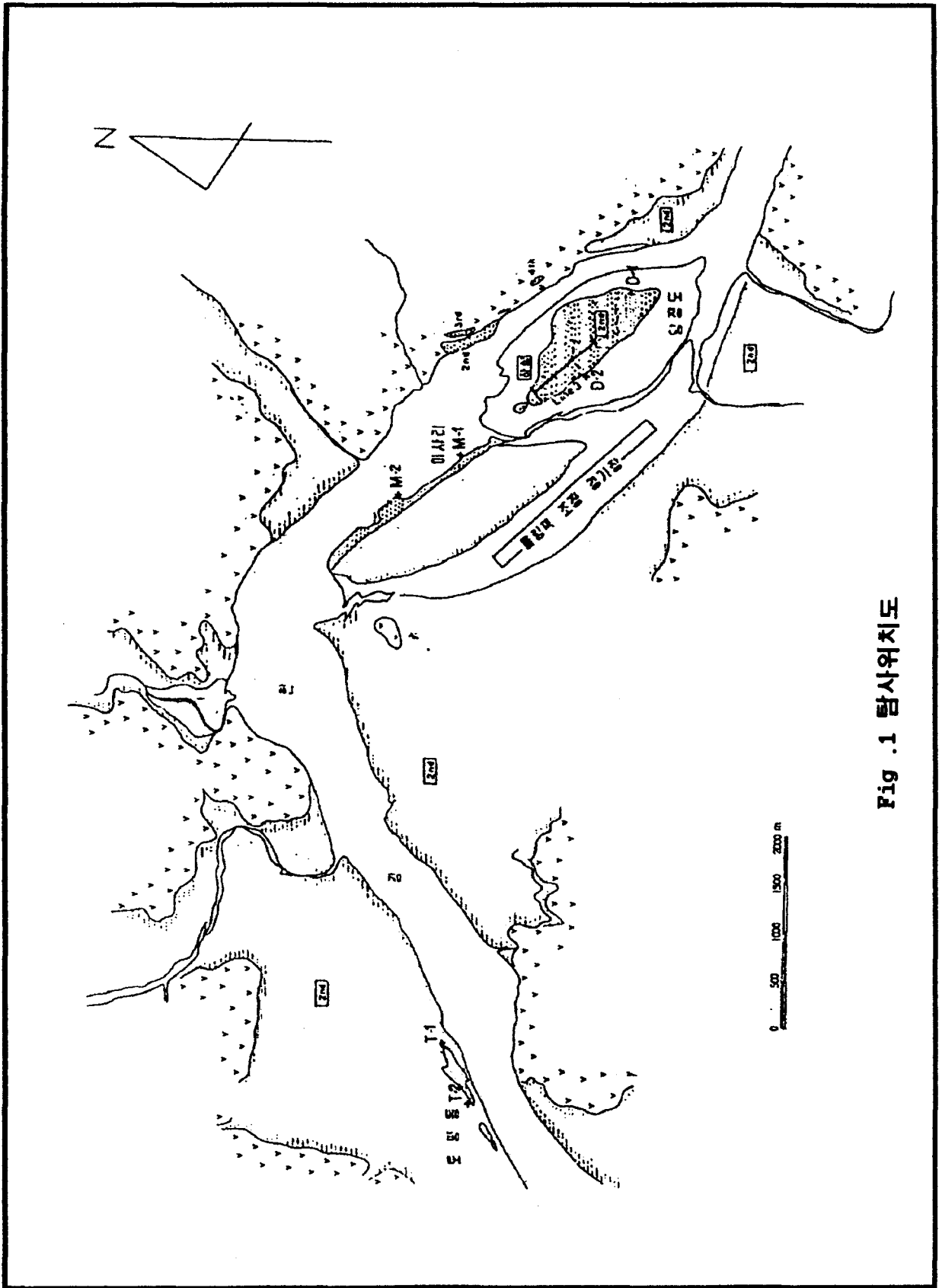


Fig .1 람사위지도

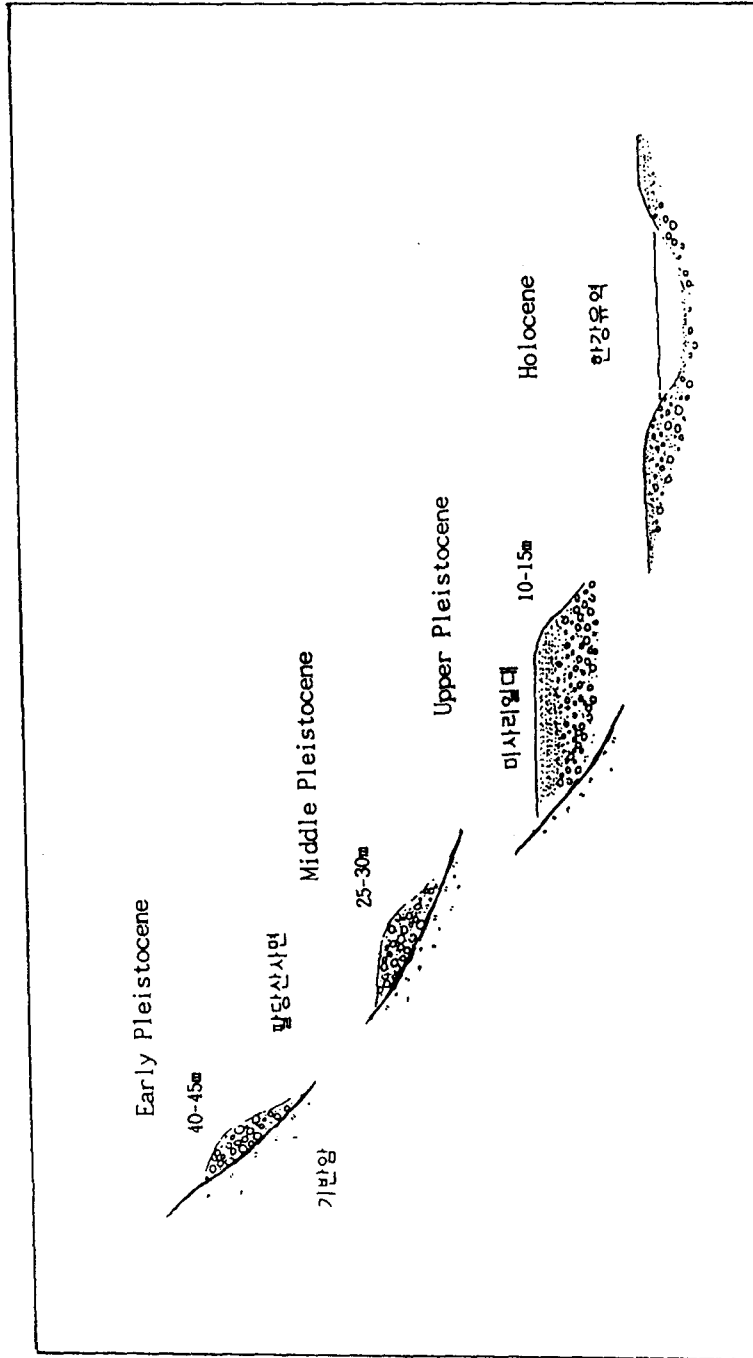


Fig. 2 팔당하류지역에 발달하여 있는 제4기퇴적지층들의 분포위치

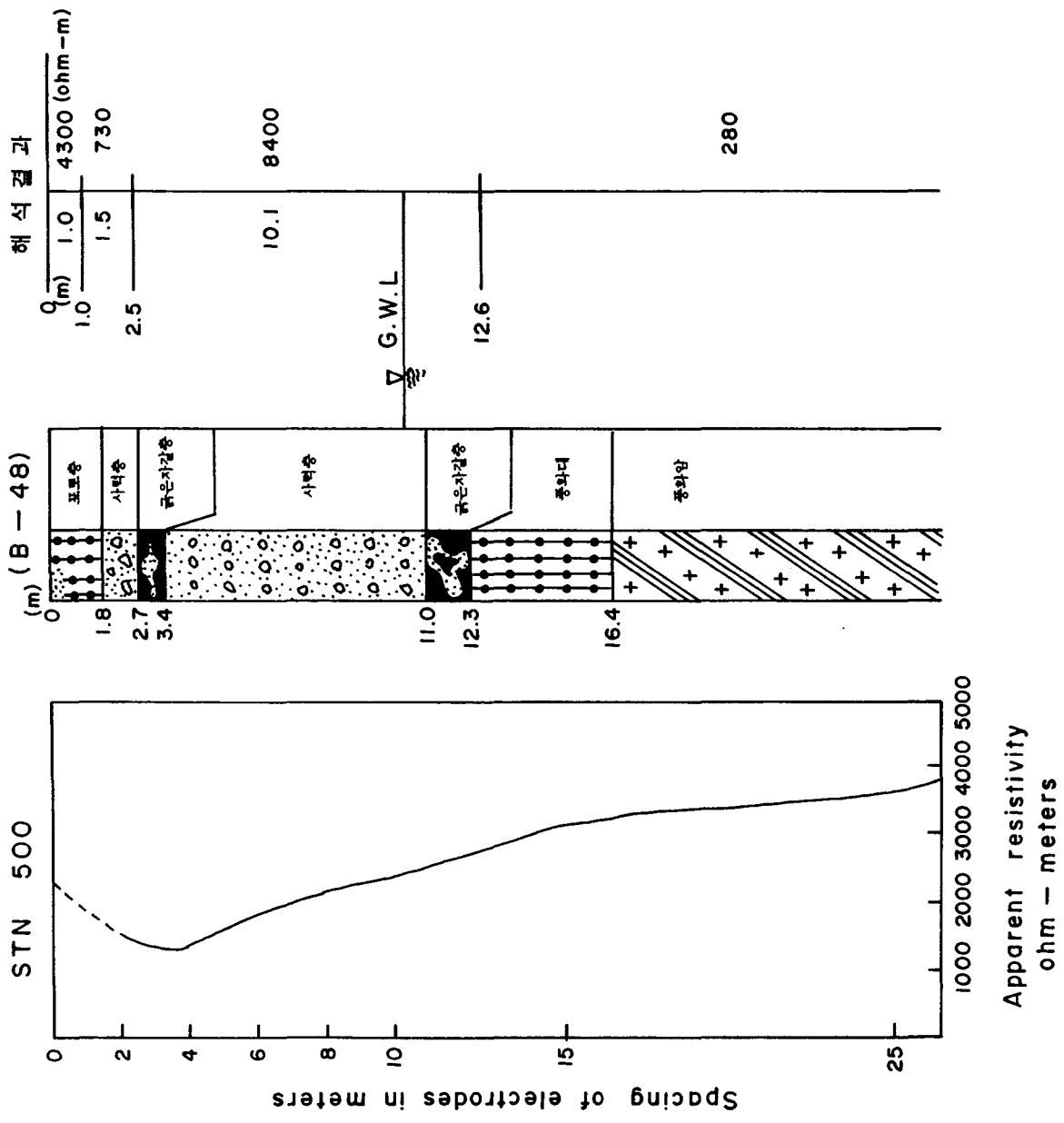


Fig . 3 측정500에 대한 수직비저항자료 해석결과와 시추자료대비

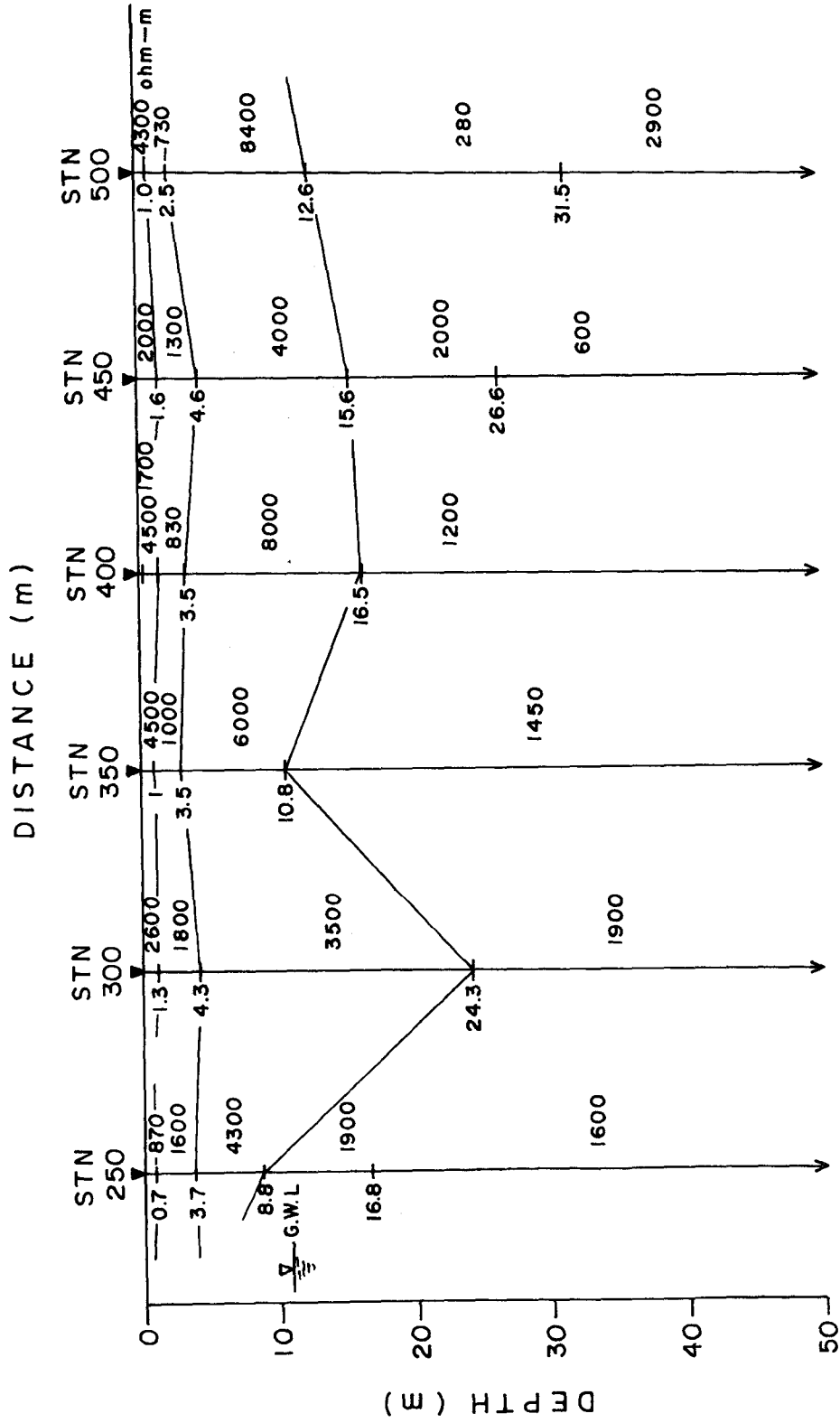
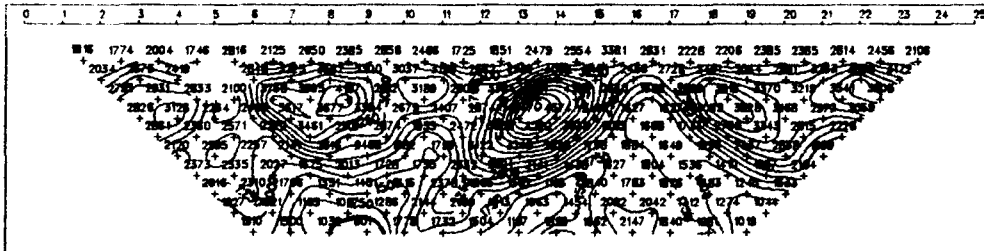
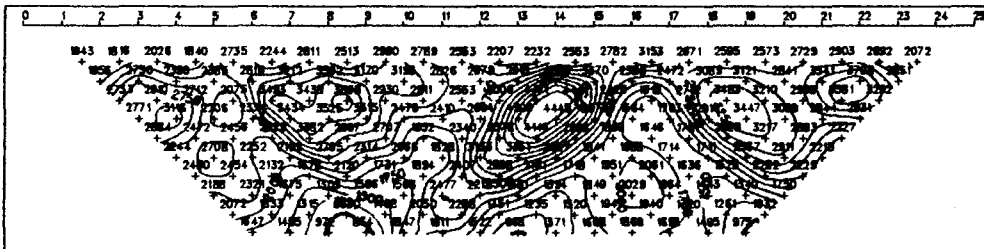


Fig . 4 수직비저항 탐사자료 해석결과 종합도

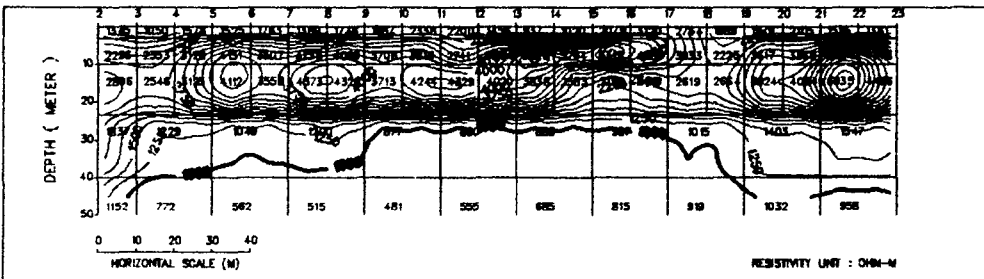
Field Data Pseudosection



Theoretical Data Pseudosection



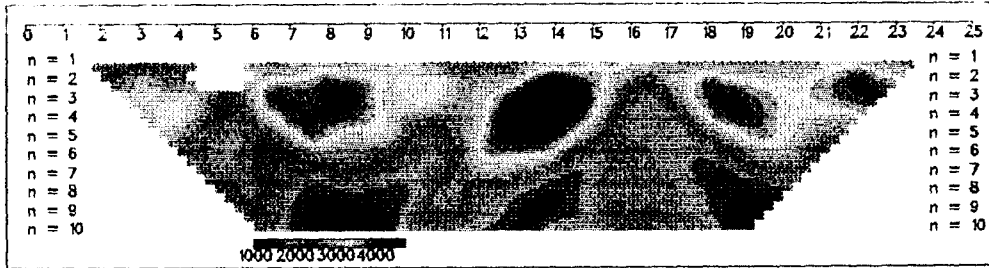
2-D Resistivity Structure



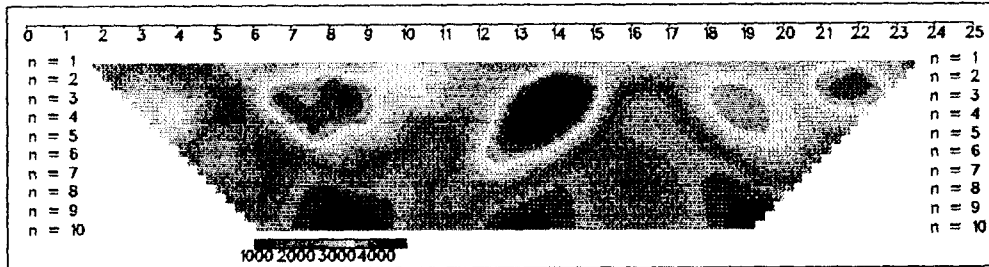
Line No. = CLINE - 1 Area = MISARI - DPDP ER
 Dipole Spacing = 10 meter

Fig .5 쌍극자탐사자료 역산해석결과도 (1)

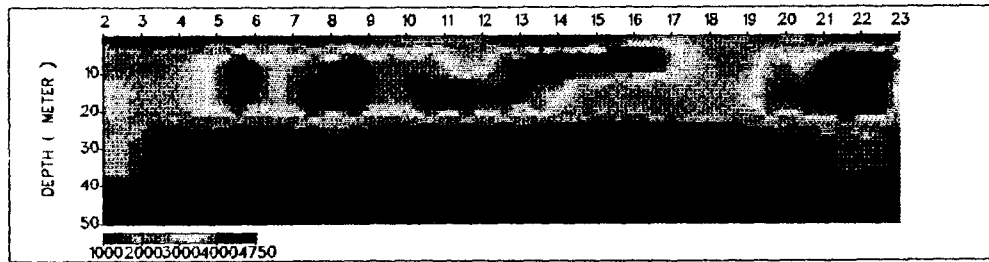
Field Data Pseudosection



Theoretical Data Pseudosection

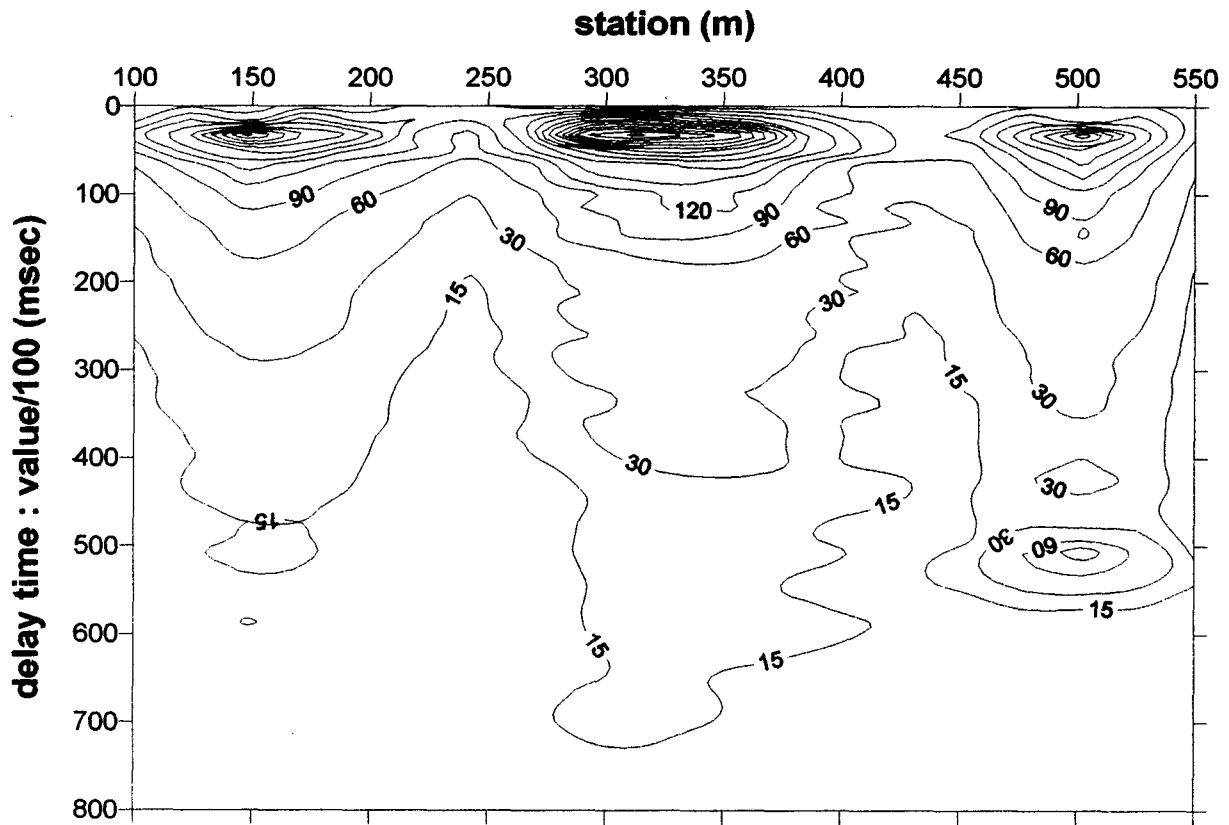


2-D Resistivity Structure



Line No. = CLINE - 1 Area = MISARI - DPDP ER
 Dipole Spacing = 10 meter

Fig .5 쌍극자탐사자료 역산해석결과도 (2)



Apparent - resistivity pseudosection

Fig .6 TDEM탐사법에 의한 외견비저항 단면도