

# 셴드TBM터널 상부배면 전기비저항탐사사레

정현기<sup>1)</sup> · 이종석<sup>2)</sup> · 안희윤<sup>3)</sup>

## 1. 서론

광주광역시 동구 금남로 지하철 공사 TK-1 구간의 셴드 TBM 터널 내에서 상부의 배면 공동 존재 유무 및 일대 지반조사를 위해 물리탐사 기법을 시도하였다. 암반이 아닌 토사층 내 셴드형 전단면 터널 공사기법이 각 도심지에서 새로이 시도되고 있는데, 터널 상부의 현장 지반이 약한 곳을 조사할 필요가 대두되고 있으나 기존의 레이다탐사(GPR)법이 셴드 세그먼트 내부의 인장강도 강화용 철근 매쉬의 차폐효과 때문에 불가능한 실정이다. 이에 토목 지반조사 및 지하수탐사 현장에 널리 사용되고 있는 전기비저항 탐사법의 터널내 적용의 필요성이 적절한 기술 변형으로 절실하다. 본 현장에 적용된 방법은 터널 상부에 전극을 매설하는 특별한 전기탐사법 및 공내 내시경 촬영법이다. 즉 전기비저항탐사 및 시추공 내시경 탐사 등을 실시하고 컴퓨터 분석결과를 도면으로 작성하였다. 한편, 종합적 전기비저항 지하구조 칼라 영상화 단면을 해석하여 연약 지반 부위를 지적하였으며, 조사구간 일대의 물리탐사 결과단면은 계속 보존되어 추후에도 조사구간 일대의 기초자료로서 활용할 수 있게 제공하였다.

터널 천장 쌍극자배열 전기비저항탐사의 주목적은 조사 축선 7m이내의 우려할만한 규모의 공동 탐사이고 더불어 셴드 세그먼트 상부의 그라우팅 침투 깊이도 국부적 변화를 탐지할 수 있으며 조사구역 내 전반적 지반의 강약부분을 탐사하는 것이다. 한편 시추공 내시경 탐사는 시추공 내의 CCD모듈을 직접 투입하면서 촬영 녹화하는 것으로 터널 천장의 경우 토사층 및 지반안정 조사에서 매우 큰 변수인 지하수의 흐름을 관측하는 것이고 지표 시추공 탐사의 경우도 대동소이하다.

## 2. 현장 측정

본 탐사에서 투입된 전기비저항 탐사장비는 한국지질자원연구원에서 자체 개발된 최대 1kw 고출력 전기비저항탐사 시스템이다. 고출력 전기비저항탐사 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어는 최근 급속히 발전하는 PC 주변기술을 최대한 이용하여 개발된 것이다. 이는 시스템의 장래 확장성이나 이식성 모듈화에도 유리하다. 한편 현장 경험자의 의견을 수렴하여 최대한 야업 간편화 방향으로 개발되어 있고, 또한 간단한 그래픽 소프트웨어로 현장에서 즉시 자료 질을 판정할 수 있다. 그림 1은 현장 측정시 사용된 시스템 CARS-omega (Tx1000/Rx24)를 이용한 1kw 고출력 24채널 쌍극자 전기비저항 탐사 모식도를 보여주고 있다.

---

**주요어:** 셴드터널, 전기비저항탐사, TBM터널 상부배면물리탐사

- 1) 한국지질자원연구원 (hkjung@kigam.re.kr)
- 2) 성원건설주식회사
- 3) (주)희송

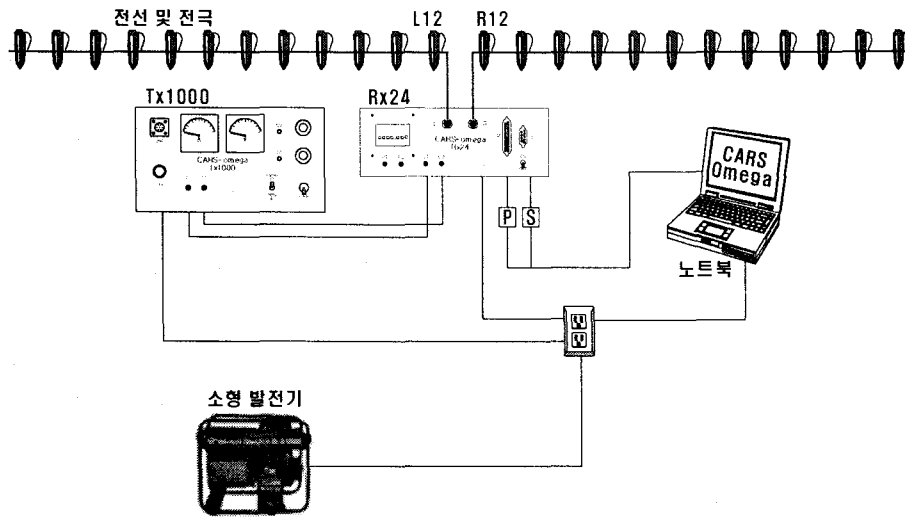


그림 1. 현장측정시 사용된 시스템 CARS-omega(Tx1000/Rx24)를 이용한 1kw 고출력 24채널 쌍극자 전기비저항 탐사 모식도.

전기비저항 탐사 및 시추공 내시경 탐사에 대한 본 현장의 주요내용을 정리하면 다음과 같다.

#### 1) 전기비저항 탐사

- ▷ 쉴드 터널 상부 일정간격(2.4m) 그라우팅공에 스텐 링형 특수전극 매설
- ▷ 측정중 접촉불량 효과를 제거하기 위해 자체개발 고출력(1000V/1A) 고속 정전류 전기탐사시스템 투입하여 매우 양호한 측정자료 획득.
- ▷ 쌍극자 배열 전극간격 : 2.4m
- ▷ 전극 전개수 : 10
- ▷ 조사 축선
  - 1차 탐사 (막장을 향하여)
    - 1시방향 터널내 현장 표시번호 32번에서 60번까지
    - 11시방향 터널내 현장 표시번호 45번에서 59번까지
  - 2차 탐사 (막장을 향하여)
    - 11시방향 터널내 현장 표시번호 45번에서 181번까지

#### 2) 시추공 내시경 탐사

- ▷ 각 그라우팅공을 특수 고휘도 LED 발광조명(초슬림형) 내시경으로 촬영
- ▷ 배면 지반 특성 분석 및 전기탐사 결과와 비교하고 데이트 및 주요 단면 캡처 보존
- ▷ 터널 천장공
  - 현장 조사구간내 공마개를 열어주지 못한 일부공을 제외한 100여개공
- ▷ 지표 시추공
  - 지상 금남로 인도 함물 지점 부근 1개공

### 3. 수치모형실험

전기비저항탐사 결과의 고찰을 확실히 하기 위해 현장탐사 자료의 분석 이전에 전산 시뮬레이션 모델링을 실험하였다. 그림 2는 쌍극자 배열 전기비저항 탐사에서 축선 하부에 공동이 존재할 경우의 반응효과를 알기 위해 전산 시뮬레이션한 결과단면이다.  $1\text{m} \times 1\text{m}$ 의 공동이 축선 중앙부 하부에 존재할 경우 측정치 겉보기 비저항 단면도에서는 소위 pants-leg effect로 불리우는 “八”자형 이상대가 좌우로 넓게 나타난다. 따라서 공동이 존재하면 전산 분석단면(하) 결과 이전에 겉보기 측정 단면도에서 이러한 이상대가 파악되어야 한다. 그림 3은 그림 2의 경우와 마찬가지로 경우의 전산 시뮬레이션 결과이나 여기서는  $2\text{m} \times 2\text{m}$ 의 공동이 좀더 깊게 존재할 경우의 사례임. 공동이 깊어질수록 이상부위는 보다 넓게 퍼져서 나타나는데 이는 쌍극자배열 탐사측정의 고유한 기하학적 효과이다. 본 시뮬레이션에서는 주변모양의 전기비저항을 한국의 일반적인 경우로 볼 수 있는  $100\Omega\text{-m}$ 로 상정하여 전산처리하였다.

본질의 전산 모델링 실험 결과는 보다 많은 여러 가지 경우 중에서 상기 두가지의 경우만 간략히 기술한 것이고 나머지의 경우도 그 결과의 큰 경향은 대동소이하였다. 단, 복잡한 층서 구조 사이의 공동존재는 탐지하기가 모호할 수도 있는데 특히 비저항값의 대비가 클수록 그러하다. 좀더 복잡한 구조 속의 공동 탐지 모델은 향후 지속적인 연구를 추가할 필요가 있다. 그러므로 이러한 현장의 경우는 자료 해석시 보다 세심한 주의를 기울여야 한다.

### 4. 물리탐사 결과 고찰

광주광역시 동구 금남로 지하철 공사 TK-1 구간의 쉴드 TBM 터널 내에서 상부의 배면 공동 존재 유무 및 일대 지반조사를 위해 물리탐사 기법을 시도하였다. 암반이 아닌 토사층 내 쉘드형 전단면 터널 공사기법이 각 도심지에서 새로이 시도되고 있는데, 터널 상부의 현장 지반이 약한 곳을 조사할 필요가 대두되고 있으나 기존의 레이다탐사(GPR)법이 쉘드 세그먼트 내부의 철근 매쉬의 차폐효과 때문에 불가능한 실정이다.

레이다 탐사결과에서 공동(cavity)으로 표시되는 부위는 자동 전산처리된 것이 아니고 레이다 자료단면에서 경험적으로 인위 해석한 것으로 흔히 부정확할 수도 있다. 레이다 단면에서 철근지지대(steel support) 부위는 매우 큰 반사 반응을 보이는데 이는 그 이후 부분은 정보를 거의 얻을 수 없음을 뜻하는바 철근 매쉬가 연속적으로 차폐하여 가릴 경우에는 레이다 탐사가 불가능함을 시사한다. 한편 국부적 정밀 조사가 필요시에는 탄성파, 레이다, 전기비저항 등의 시추공간 토모그래피 방법을 적절히 현장상황에 맞추어 동원해야 하겠다.

본 절에서는 터널 상부 전기비저항 탐사 시도자체가 국내뿐만 아니라 국외에서도 보고된 바가 없으므로 현장 탐사 장면 및 자료 획득 과정에 대해 중요 사항을 기술한 후 결과를 고찰하고자 한다.

그림 4는 현장탐사 관련 사진로써 (상/좌)는 쉘드터널 탐사현장 입구부의 조립된 쉘드 세그먼트의 가까운 모습으로 내부에 인장 강화용 철근 매쉬가 내장되어 있으나 결면은 전기적으로 완전 절연되어 있음을 측정기로 확인하였다. (상/우)는 굴진 막장에서 입구 난장 쪽을 바라보는 터널내 탐사 현장 모습 가운데 운반 갱차와 교차하며 이동할 수 있는 조립 천장 작업대이다.

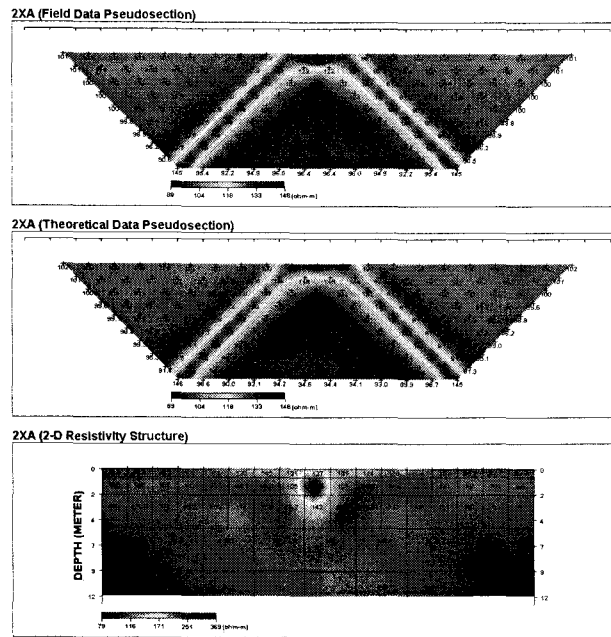


그림 2. 쌍극자 배열 전기비저항 탐사에서 축선 하부에 공동이 존재할 경우의 반응효과를 알기 위해 전산 시뮬레이션한 결과단면. 1m×1m의 공동이 축선 중앙부 하부에 존재할 경우 측정치 겉보기 비저항 단면도에서는 소위 pants-leg effect로 불리우는 “八”자형 이상대가 좌우로 넓게 나타난다. 따라서 공동이 존재하면 전산분석단면(하) 결과 이전에 겉보기 측정 단면도에서 이러한 이상대가 파악되어야 한다.

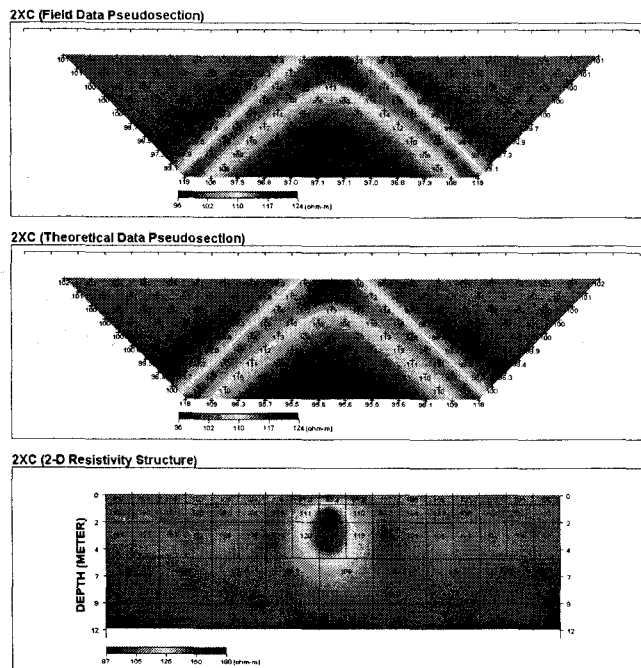


그림 3. 앞의 그림 4.2의 경우와 마찬가지로 2m×2m의 공동이 좀더 깊게 존재할 경우의 사례임. 공동이 깊어질수록 이상부위는 보다 넓게 퍼져서 나타나는데 이는 쌍극자배열 탐사특징의 고유한 기하학적 효과임. 본 시뮬레이션에서는 주변 모암의 전기비저항을 한국의 일반적인 경우로 볼 수 있는 100Ω-m로 상정하여 전산처리 하였음.

그림 5는 광주 실드 TBM 지하철 공사 현장 탐사구간 45L측점-181L측점 사이의 터널 천장 쌍극자 전기비저항탐사 결과 단면도이다. (상)은 현장 측정치 결과 전기비저항 단면도이고 (중)은 전산 분석 단면에 의한 이론적 시뮬레이션 결과 단면도이며 (하)는 측정치로부터의 역산 전산 분석 단면이다. (상)과 (중)이 양호하게 일치하므로 (하)의 분석 결과 단면의 신뢰도가 아주 좋은데 이는 1kw 고출력 고속광역반응 정전류 안정송신장비에 기인함. 실제 정전류 송신 측정중 출력전압은 접지부하의 변동으로 약 200V에서 800V까지 불규칙 변화하는 측정도 일부 있었으나, 수신 측정 파형은 깨끗한 구형파를 얻었을 정도로 현장 측정자료가 전반적으로 매우 양호하였다. 실드 세그먼트내 인장강도 강화용 철근 매쉬로 인해 통상의 레이더탐사(GPR)가 곤란하나 전기적으로는 절연이므로 전기탐사가 가능한 현장이었다. 측정 단면의 결측부분은 현장 천장공의 마개를 열 수 없어 탐사 측선 중 총 4개의 전극 매설 불가능 때문인데 전반적 측정 경향이 연속적이고 양호하여 최종 결과 해석에는 전혀 무리가 없다고 할 수 있다. 결과 단면에서 고립형 비정상 이상구간은 53번 측정 상부 약 4m까지에서 유일하게 포착되었으며, 이는 현재 공동이 아니고 원래 연약지층이라서 그라우팅 물질 주입부위이거나 모래층이 아닌 연약 점토층부위로 추정된다. 현장에서는 이 구간 굴진시 그라우팅 보강을 특별히 많이 하였다고 하는 지점이다. 53번 측정외에는 상부(천정 전극 매설 탐사이므로 결과 단면에서는 반대로 하부임.) 7m이내에 특이한 곳이 나타나지 않는 것으로 분석되며, 아주 천부에 저비저항층의 국부적 변화는 부분적 그라우팅 침투정도가 조금씩 다른 것으로 원지층의 국부적 특성에 기인한다고 볼 수 있다. 한편 탐사심도 7m이후 12m까지의 지반정보도 결과 단면에서 확연히 나타나고 있는데 측정 81에서 103까지는 단단한 모래층이 주된 구간으로 분석되고 측정 127에서 139사이와 161이후 부분 구간은 상대적으로 약한 지층으로 분석된다.

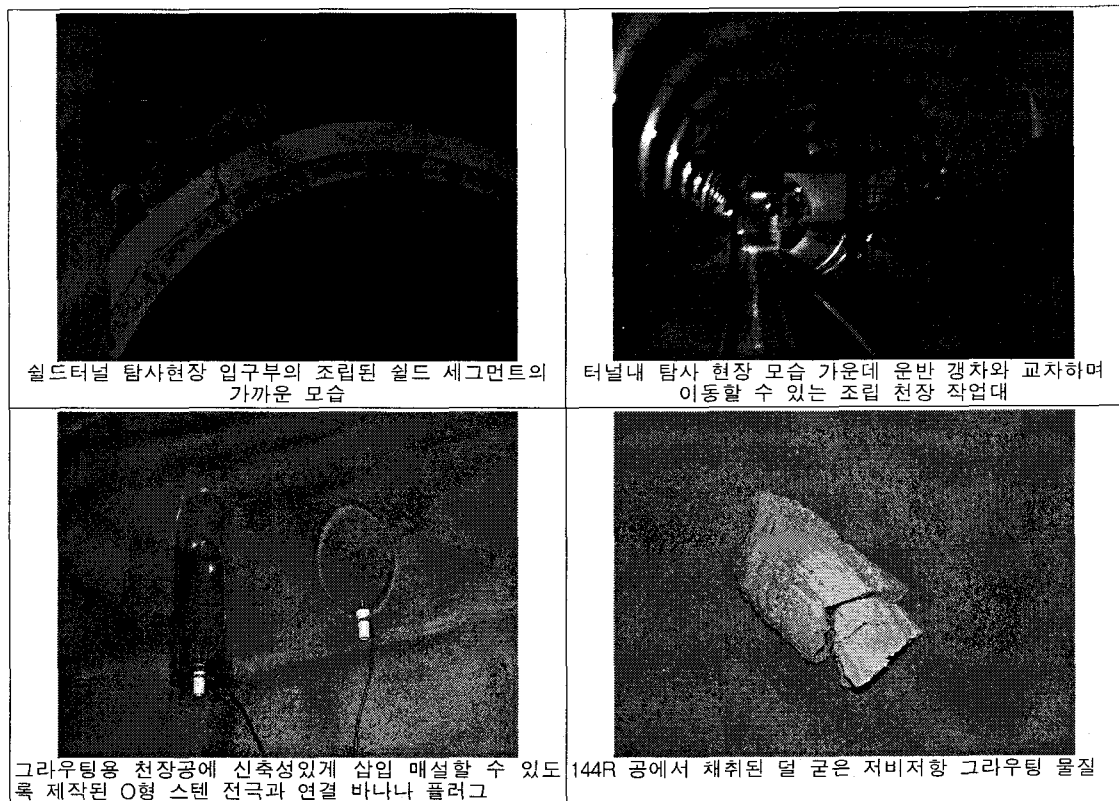


그림 4. 현장 탐사 관련 사진들

## 5. 결 론

광주광역시 동구 금남로 지하철 공사 TK-1 구간의 쉘드 TBM 터널 공사현장에서 연약 지반조사를 위해 물리탐사를 수행하였다. 통상의 레이더탐사(GPR)법이 쉘드 세그먼트 내부의 인장강도 강화용 철근 매쉬의 차폐효과 때문에 불가능한 실정이므로 지하수탐사 및 지반조사에 국내외적으로 널리 쓰이는 쌍극자배열 전기비저항 탐사를 터널 천장 조사 측선에 적용시켰다. 신축성 O형 제작 전극 센서와 자체 개발 1kw 고출력 초정밀 탐사시스템을 투입하여 매우 양호한 현장 측정자료를 획득하고 역산 전산 분석한 결과 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

- 1) 현장 굴진시 다소 문제였던 구간을 포함한 주요구간 326m 탐사측선에서 상부 7m 이내 토사층 중 공동으로 해석될 수 있는 연약대가 현장 표식 번호 53번 측정점에서 약 4m이내에 유일하게 포착되었다. 이는 현재 공동이 아니고 원래 연약지층이라서 그라우팅 물질 주입부 위이거나 모래층이 아닌 연약 점토층 부위로 추정될 수 있다. 현장에서는 이 구간 굴진시 그라우팅 보강을 특별히 많이 하였다고 하는 지점이다.
- 2) 전산처리 칼라영상단면에서 53번 측정 외에는 특이한 곳이 나타나지 않는 것으로 분석되며 아주 천부에 저비저항층의 국부적 변화는 부분적 그라우팅 침투정도가 조금씩 다른 것으로 원지층의 부분적 특성에 기인한다고 추정된다.
- 3) 강지반/약지반 부위 경계 지반정보가 결과단면상에서 확연히 제시되는데, 탐사심도 7m - 12m 내의 측정 81에서 103까지는 내시경 촬영 결과와 종합해볼 때 건조 단단한 모래층이 주된 구간으로 분석되고 측정 127에서 139사이와 161이후 부분 구간은 상대적으로 약한 지층으로 분석된다.
- 4) 동일 측선상 100개이상의 터널 상부 공 내시경 촬영 분석 결과는 이 지역 일대가 지반안정조사에서 매우 중요한 지하수의 유동이 거의 없는 건조 단단한 토사층을 보여준다.
- 5) 금남로 인도상의 지반 함몰구간 1개 공에 대한 지표 시추공 내시경 촬영 분석 결과는 약 3미터 깊이에서부터 상부로부터의 누수가 관측되었으며 이는 2m이내 상하수도의 이음새 불량 혹은 관의 노후에서 기인한 유출의 가능성을 배제할 수 없다. 왜냐하면 조사기간 중 강우가 전혀 없었고 주변 수계가 없기 때문이다.

한편 직접 시추조사의 단점을 전기비저항 측선 배열 탐사기법은 측정구간의 심도 단면에 대한 연속적인 칼라 영상 결과를 제공함으로써 극복한다. 시추조사는 일 지점 자료로써 아주 가까이 공동이 존재해도 관통하지 못하면 공동 발견이 불가능하며 또한 수평 렌즈형 큰 공동의 가장자리 좁은 부분을 관통시 작은 공동으로 오판할 가능성이 있다. 처리된 칼라 영상 결과단면과 시추공 촬영 녹화 테잎은 보존되어 추후 주어진 구간에 대해 또다시 문제 발생 시 언제든지 기초 자료로 활용될 수 있다.

## 참고문헌

- 정현기외, 2000, 휴대용 동기화 복합전기탐사 시스템 개발, 한국자원연구소.
- Satoru Ohya, 2001, Application of geophysical exploration for environmental earth sciences and engineering, 한국지구물리탐사학회 2001 정기총회 및 제3회 특별 심포지움: 환경오염지역 평가를 위한 물리탐사기술, 한국지구물리탐사학회, p. 1-13.

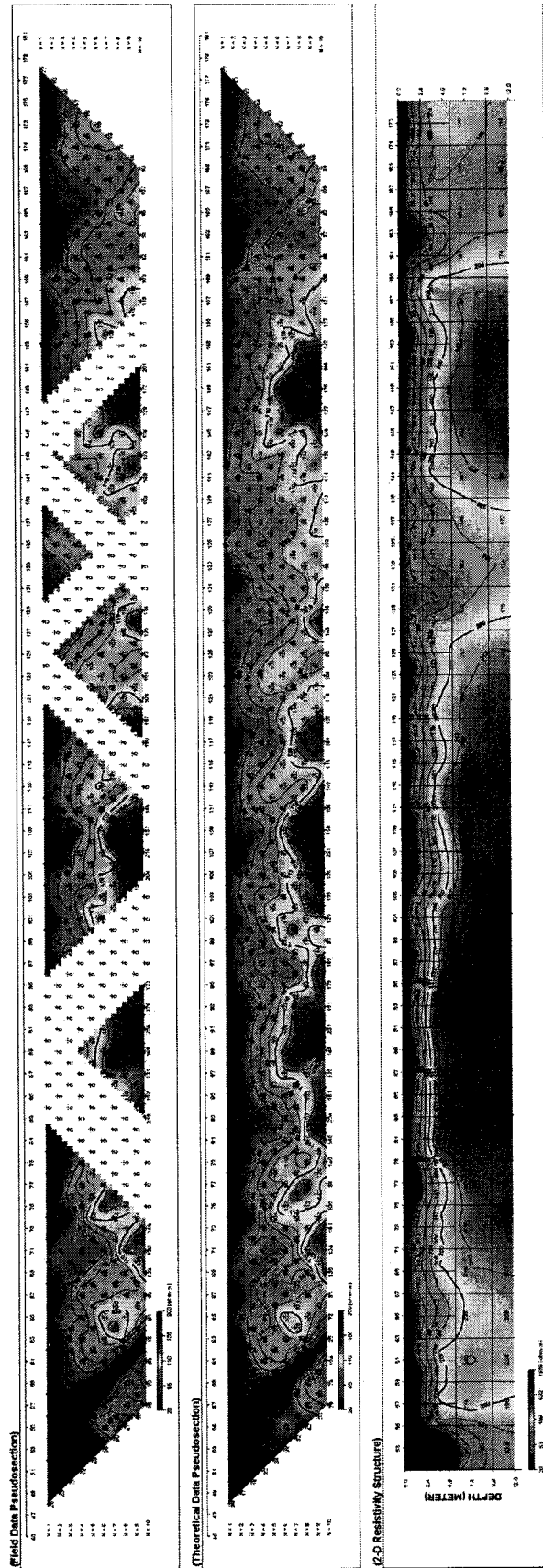


그림 6. 월드컵 지하철 공사 현장 탐사구간 45L 측정점-181L 측정점 사이의 터널 천장 쌍극자 전기비저항암사 결과 단면도.  
 (상) 현장 측정치 겹보기비저항 단면도. (중) 전산 분석 단면예 의한 이론적 시뮬레이션 결과 단면도. (하) 측정치로부터의 역산 전산 분석 단면도.