

TEM 감쇠곡선을 이용한 해수의 지하 유동현상 파악

황학수^{1*} · 문창규² · 이상규¹ · 이태섭¹

¹한국지질자원연구원, ²충남대학교 지질학과

Determination of an Underground Seawater Flow Using a TEM Decay Curve

Hak Soo Hwang^{1*}, Chang Kyu Moon², Sang Kyu Lee¹ and Tai Sup Lee¹

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea

²Department of Geology, Chungnam National University

The geophysical monitoring technique using the high resolution time-domain electromagnetic (TEM) method with a coincident loop array was applied for determination of an underground seawater flow in the coastal areas. In comparison of the TEM monitoring to direct current (DC) resistivity monitoring, the TEM response to the underground seawater flow is less sensitive than the DC resistivity response. However, the TEM monitoring is more effective in terms of measuring time, survey expense, and real-time data processing than the DC monitoring for evaluating the spatial distribution of the fresh water-seawater transition zone in a regional area.

Key words : geophysical monitoring, TEM, fresh water-saltwater transition zone

연안지역에서 해수의 지하 유동현상을 효과적이고 경제적으로 파악하기 위하여 동위치 송수신루프배열의 시간영역 전자탐사법(Time-domain Electromagnetic : TEM)을 이용한 지구물리모니터링을 적용하였다. TEM 모니터링은 전기 비저항 모니터링과 비교하여 해수유동에 대한 TEM반응의 민감도는 떨어진다. 그러나, 광범위한 조사지역에 대한 담수-해수 전이대의 공간적인 분포를 파악하는데 있어서는 측정시간을 포함한 탐사경비 그리고 현장에서 자료처리 측면에서 볼 때 매우 효율적이다.

주요어: 지구물리탐사, TEM, 담수-해수 전이대

1. 서 론

해안가의 자유면 대수층(unconfined aquifer) 또는 준피압 대수층(semi-confined aquifer)에서 담수와 해수의 흐름은 조석운동(tidal action)에 대하여 매우 민감하게 반응한다. 간조 시에는 담수의 수두가 해수의 수두에 비하여 크므로 해안으로 연결 개방된 대수층 내의 담수-해수 전이대가 해안 방향으로 밀려나가며, 만조 시에는 상대적으로 해수의 수두가 담수의 수두보다 크므로 전이대는 내륙으로 이동할 것이다. 이와 같은 전이대의 위치와 공간적 형태는 조석운동 그리고 담수의 배출(discharge) 및 함양(recharge)에 따른 수두의

변화에 의하여 주로 결정된다(Freeze and Cherry, 1979; Melloul and Goldenberg, 1997). 그러므로, 조석운동에 의한 전이대의 위치변화는 해수의 지하유동을 파악하는 하나의 직접적인 정보가 된다.

김양수(1999)와 황학수 등(2000)은 지구물리탐사 방법 중 전기비저항 탐사법을 사용하여 지표에서 해수의 지하유동을 성공적으로 파악하였다. 그러나 이들이 사용한 탐사방법은 측정센서인 전류전극과 전위전극이 대지와 접촉이 필요하고, 또한 전이대의 미세한 전위차를 감지하기 위해서는 대지와 접촉된 전극들의 전기적 환경을 시간에 따라 동일하게 유지시켜야 한다. 조석운동에 대한 해수의 지하유동을 파악하기 위해서는 최소한 1시간 간격으로 측정해야 하며, 모니터링이 수행되는 지점에서 대수층의 깊이에 대한 정보가 없을 경

*Corresponding author: hhsid@kigam.re.kr

우는 여러 전류간격에서 측정해야 하기 때문에 측정시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

그러므로, 이 연구에서는 전기비저항 모니터링 방법의 단점을 보완하고 조석운동에 의한 담수 그리고 해수의 지하유동을 파악하기 위하여 intercoil spacing 방법인 TEM 방법을 사용하였다. TEM 방법은 전도성 광

물탐사에 사용 발달되었고, 특히 우리나라에서는 석탄탐사에 주로 사용되었다. 또한 TEM방법은 지질구조조사(Keller *et al.*, 1984), 지하수탐사(Fitterman and Stewart, 1986; Mills *et al.*, 1988; McNeil, 1990), 탄화수소탐사(Wightman *et al.*, 1983), 골재자원탐사 그리고 지하수 및 지질오염조사(이상규 등, 1988; Hoekstra

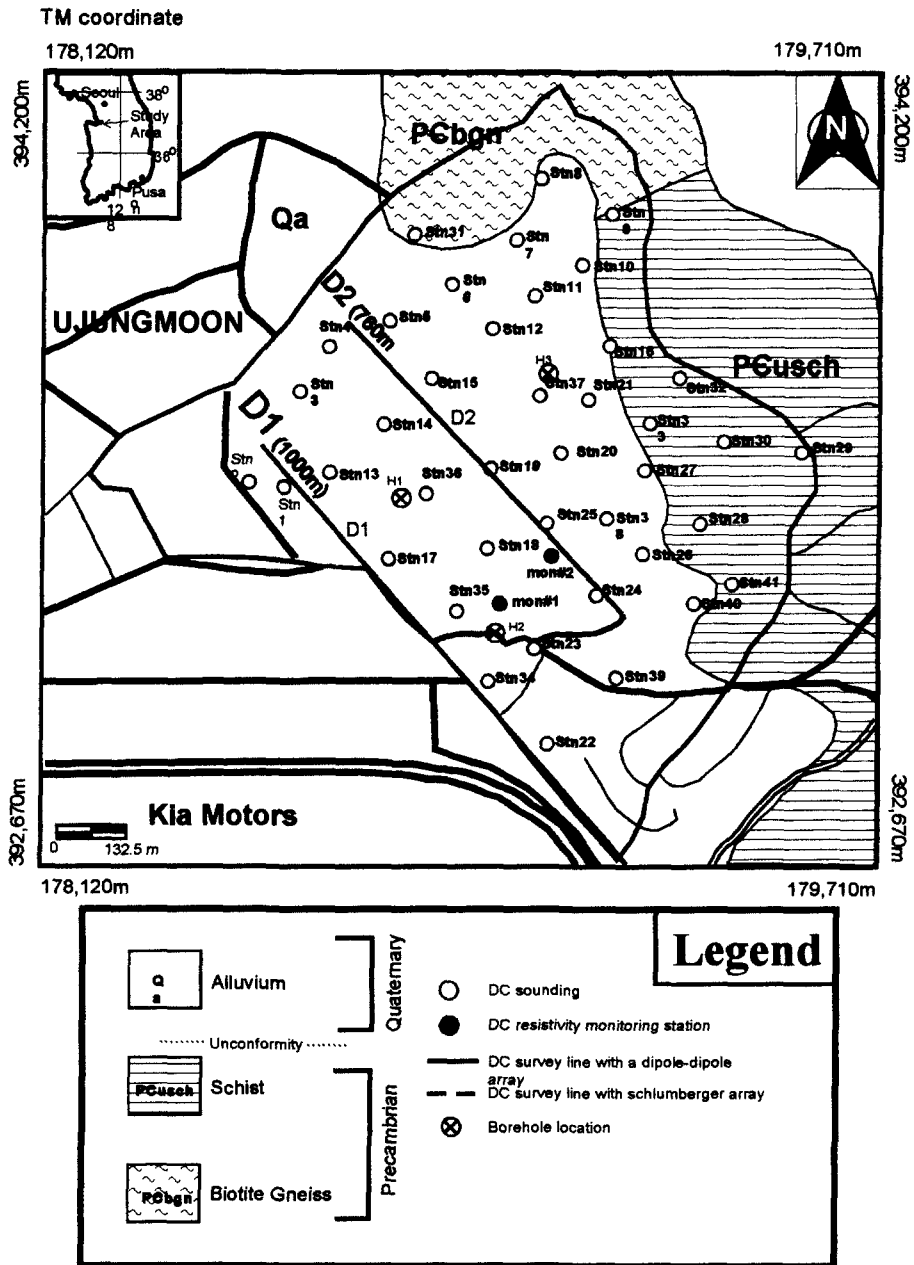


Fig. 1. Survey area located in Hwasung-Goon (after Hwang *et al.*, 2000).

and Blohm, 1990; Hwang, 1997; 조진동 등, 2000) 등에 그 활용 범위를 넓혀가고 있다. 이 연구에서 TEM방법을 이용한 모니터링이 수행된 지역은 이미 수리지질 및 지구화학 조사 그리고 물리탐사를 통하여 해수침투대에 대한 현황 평가가 이루어진 경기도 화성군 석천리와 현재 해수침투에 대한 연구가 진행 중에 있는 전라남도 영광군 백수읍이다.

2. 자료측정 및 해석

2.1. 경기도 화성군 석천리

경기도 화성군 석천리 일대에서 해수침투대의 범위, 즉 낮은 전기비저항 분포를 파악하기 위하여 총 41개

측점(Fig. 1)에서 전기비저항 수직탐사와, 해수침투의 상세한 통로를 파악하기 위하여 2개의 측선(Fig. 1)에서 쌍극자배열 2차원 전기비저항탐사를 실시하였다. 전기비저항탐사 결과로부터 해수침투대의 공간적 범위와 구해안선 부근의 Stn35로부터 북동방향으로 내륙 그리고 심부 80 m 이상까지 발달한 낮은 비저항대(파쇄대)의 존재를 확인할 수 있었다(김양수, 1999; 황학수 등, 2000). 확인된 파쇄대를 따라 해수의 유동을 관찰하기 위하여 파쇄대의 직상부 근처에 2개의 측점(Fig. 1)에서 mon#1, mon#2)을 설정하고 mon#1과 mon#2에서는 전기비저항 모니터링, mon#2에서는 TEM 모니터링을 실시하였다.

전기비저항법을 이용한 자료취득 및 결과에 대한 자

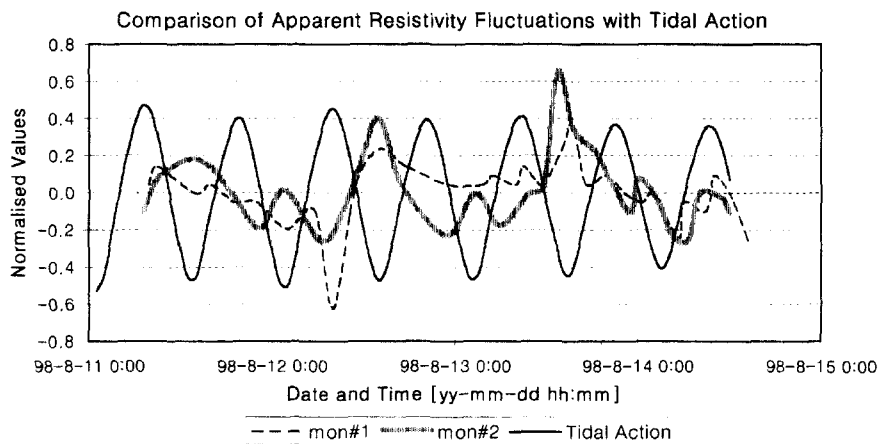


Fig. 2. Comparison of tidal action with apparent resistivity fluctuations at mon#1 and mon#2 in Fig. 1 (after Hwang *et al.*, 2000)

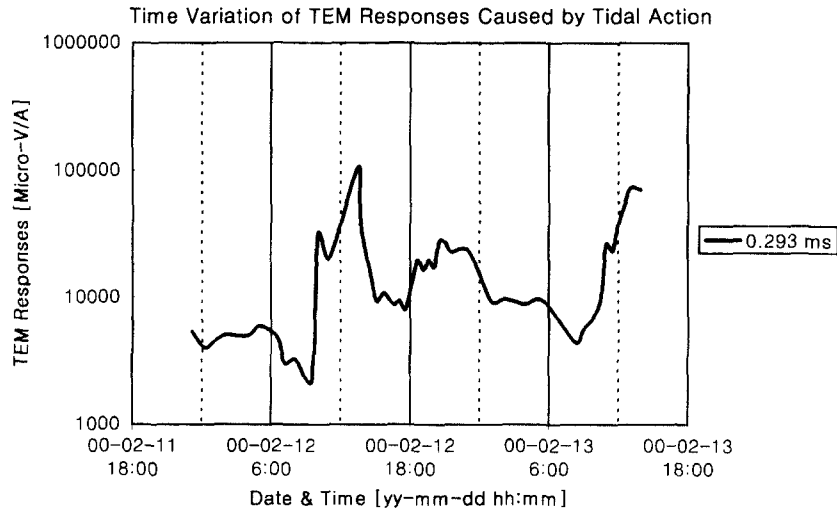


Fig. 3. Fluctuation of TEM responses caused by tidal action at mon#2 in Fig. 1.

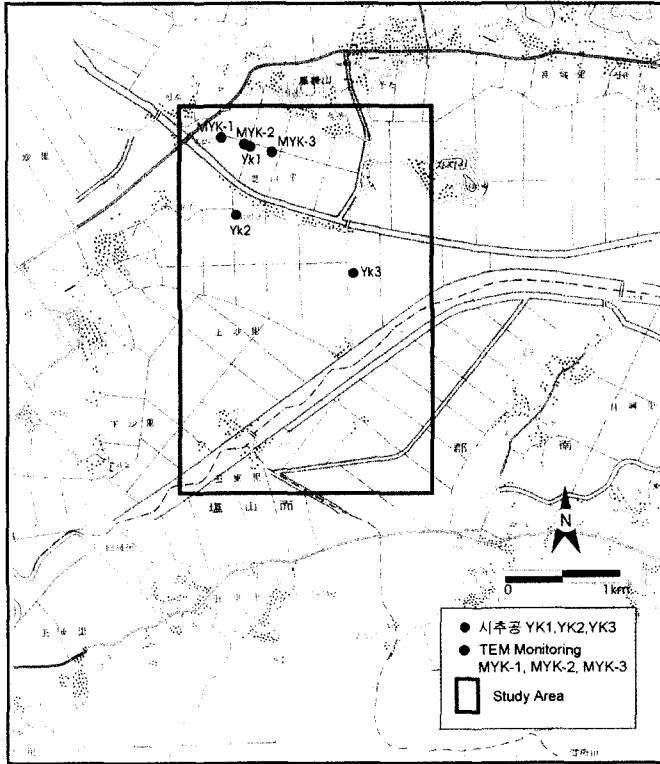


Fig. 4. Survey area located in Yongkwang-Goon.

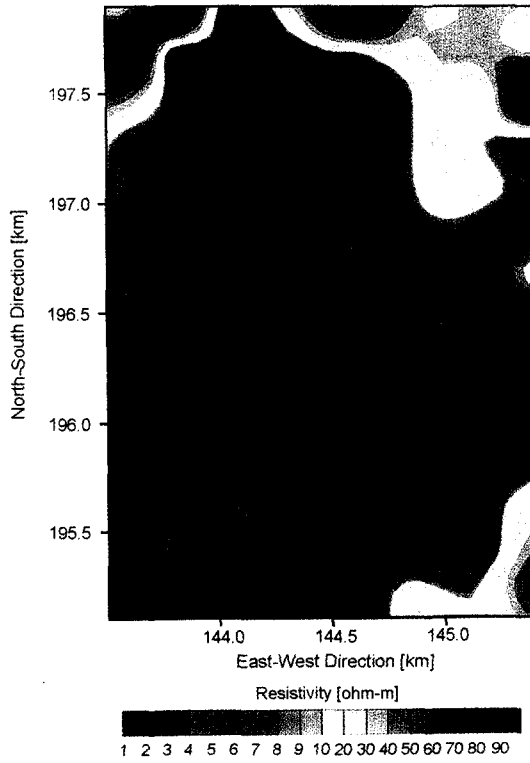


Fig. 5. True resistivity distribution over the survey area shown in Fig. 4.

세한 내용은 황학수 등(2000)를 참조하고, 여기서는 조석운동에 따른 전류전극간 거리의 반이 30 m일 때에 측정된 전기비저항 시계열이 12시간의 주기성을 갖고 변화하는 결과만을 제시한다(Fig. 2).

Fig. 3은 전기비저항 모니터링이 수행된 측정점 mon#2에서 측정된 시간별 TEM 반응이다. TEM 측정에 사용한 배열은 10m×10m 정방형 동위치 송수신배열(coincident loop)이며, 측정 지연시간대는 SIROTEM MK3의 high resolution series 윈도우 1~32(0.008~4.877 msec)이다. 측정시 송신루프의 전류세기는 약 5 A이고 사용한 중첩(stack) 수는 1024이다. Fig. 3은 TEM 모니터링 자료 중에서 지연시간이 0.293 msec에서 측정된 TEM 반응에 대한 시계열로서, 시간에 따른 변화가 조석운동의 주기와 같은 약 12 시간 및 24 시간의 주기를 보이고 있다. 대체적으로 정확히 12시간의 주기를 보이는 전기비저항 시계열(Fig. 2)과 비교하여 TEM반응의 주기성이 떨어지는 하나의 이유는 Fig. 2에서 1998년 8월 13일 12시~1998년 8월 14일 12시의 측정시간대에서 보이는 전기비저항 시계열의 주기와 같이 조석의 차가 상대적으로 작은 시간대에서 측정했기 때문으로 판단된다.

2.2. 전라남도 영광군 백수읍

Fig. 4는 해수침투대의 공간적 분포를 파악하기 위한 조사지역을 포함한 전라남도 영광군 백수읍 일대에 대한 지형도이다. 조사지역(1.6 km×2.8 km) 내에 전체적으로 격자망이 형성되도록 설정한 총 131개의 측정

에서 슬럼버저배열을 사용한 전기비저항 수직탐사를 수행하였다. 또한 조사지역 내의 세 곳(지형도 상 YK1, YK2, YK3)에서 시추조사와 각각의 시추공에서 수위 및 지하수의 전기전도도(Electric Conductivity : EC) 모니터링을 실시하였다. 수위 및 EC모니터링의 결과를 바탕으로 시추공 YK1 부근(모니터링 측정 : MYK-2)과 이를 중심으로 서쪽과 동쪽으로 각각 200 m 떨어진 지점에 모니터링 측정 MYK-1 그리고 MYK-3를 설정하고 1시간 간격으로 TEM 모니터링을 실시하였다.

Fig. 5는 총 131개의 측정에서 측정된 전기비저항 수직탐사 자료에 대한 역산을 통하여 얻어진 조사지역의 전기비저항 분포도이다. 전기비저항 분포도 작성에 사용한 값은 각 측정에서 해석된 지전기적(geoelectric) 층서구조에서 가장 낮은 전기비저항을 갖는 층의 전기비저항 값이며, 그 범위는 1~90 ohm-m이다. 세 곳(YK1, YK2, YK3)에서 실시한 시추결과에 의하면 조사지역의 지질구조는 3층 구조로서, 지표로부터 심도가 약 15 m 내외까지는 점토층이 존재하고 점토층 하부로부터 기반암(풍화가 심한 화강암)이 존재하는 심도 약 25 m 까지는 주로 모래로 구성된 사질층이 분포한다. 전기비저항 수직탐사 결과 일반적으로 각 측정에서 가장 낮은 전기비저항값을 갖는 층은 시추조사 결과 확인된 제 1층인 점토층이다. 그러므로 Fig. 5의 전기비저항 분포도는 조사지역 내의 점토층의 분포를 나타내며, 특히 약 30 ohm-m 이내의 전기비저항값을 갖는 점토층은 시추위치 YK1, YK2, YK3에서 채취한 점토층의 샘플에 대한 batch실험 결과 다량의 염분을

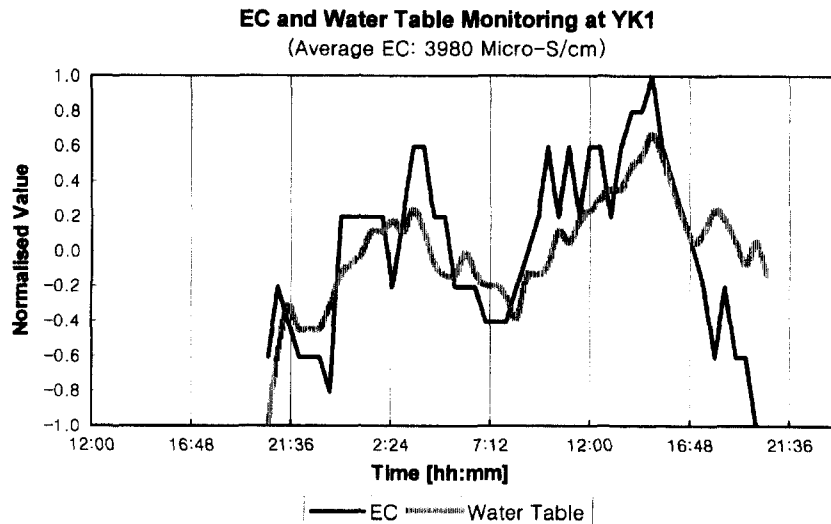


Fig. 6. Fluctuations of EC and water table at YK1 shown in Fig. 4.

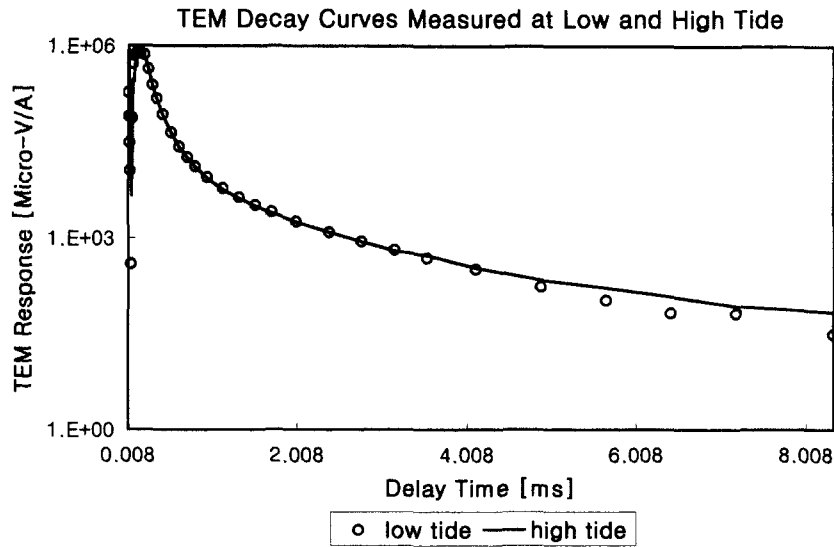


Fig. 7. TEM decay curves measured at MYK-2 shown in Fig. 4 when low and high tides occur.

포함한 것으로 보아 해수에 의해 어느 정도 염분화가 일어난 것으로 해석된다.

Fig. 6은 시추공 YK1에서 실시한 지하수에 대한 수위 및 EC모니터링 자료의 시계열이다. 시추공 내에서 EC 측정시 센서는 사질층이 존재하는 심도 23 m에 고정시켜 설치하고 약 30분 간격으로 24시간을 측정하였다. 지하수의 EC와 수위의 평균값은 각각 $3,980 \mu\text{S/cm}$ 와 1.83 m이다. 그림에서는 두 자료를 동시에 나타내기 위하여 각 자료의 최대값(EC: $4,300 \mu\text{S/cm}$, 수위: 1.843 m), 최소값(EC: $3,600 \mu\text{S/cm}$, 수위: 1.816 m) 그리고 각각의 평균값으로 정규화 하였다. 주로 모래로 구성된 사질층에서 측정된 두 시계열에서 조석운동의 주기와 동일한 12시간의 주기성을 뚜렷이 관찰할 수 있다. 시추공 YK2의 경우에는 조석운동에 의한 EC값의 변화를 명확히 관찰할 수 없었지만, 지하수의 EC값은 약 $9,000 \mu\text{S/cm}$ 이상이다. 시추공 YK3에서 EC와 수위의 시계열은 YK1과 같이 12시간의 주기성을 갖고 EC의 평균값은 $2,947 \mu\text{S/cm}$ 이며, EC의 최대, 최소값은 각각 $3,100 \mu\text{S/cm}$ 와 $2,800 \mu\text{S/cm}$ 이다. 그러므로, 조석운동에 따른 EC값의 변화(즉, 최대, 최소값의 차이)가 가장 큰 시추공 YK1지점(모니터링 측정: MYK-2)에서 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 정방형 루프를 설치하고 동위차 송수신배열을 이용한 TEM 모니터링을 수행하였다. 또한, MYK-2 측점을 중심으로 전이대의 공간적 분포를 파악하기 위하여 MYK-2측점을 포함한 약 동서방향의 직선상에 측점 MYK-1과 MYK-3을 설정하였

다. 여기서, MYK-1과 MYK-3은 MYK-2에 대하여 상대적으로 해안가와 내륙에 위치한다. 각 측정에서 TEM 반응은 1시간 간격으로 24시간 이상(MYK-1과 MYK-3: 24시간, MYK-2: 48시간) 동안 측정하였다. 사용한 지연시간대는 SIROTEM MK3의 high resolution series 윈도우 $1 \sim 36(0.008 \sim 8.333 \text{ msec})$ 이며, 측정시 송신루프의 전류세기와 TEM반응에 대한 증합수는 각각 약 7 A와 1024이다.

Fig. 7은 측정 MYK-2에서 측정된 TEM 모니터링 자료 중 해수가 만조(2001년 5월 17일 09시 19분)와 간조시(2001년 5월 17일 17시 24분)에 측정된 TEM 반응의 감쇠곡선(decay curve)이다. 여기서, 만조 때의 감쇠곡선은 실선 그리고 간조일 때의 감쇠곡선은 원으로 표시하였다. 감쇠곡선의 형태는 인덕티브 스파이크(inductive spike)를 보이는 초기 지연시간대와 전자잡음이 상대적으로 많이 포함된 후기 지연시간대(3.149 msec 이후)를 제외한 지연시간대에서 매우 동일하게 나타난다. 그러므로, 해수의 지하유동을 파악하기 위하여 TEM 감쇠곡선의 시정수(time constant)를 사용하는 방법은 계산자의 윈도우 선정에 따라 시정수 값이 각각 달라지는 단점을 갖고 있다. 광범위한 조사지역에서 전이대 분포에 대한 실시간(24시간 이내) 파악을 위한 시계열로 도시하는 방법(Fig. 3)은 도시할 지연시간 선정에 의하여 모니터링 측정 하부의 지하구조가 사전에 파악되어야 하며, 또한 자료처리에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다.

따라서, 이 연구에서는 Fig. 7에서 inductive spike와 전자잡음으로부터 자유로운 TEM 반응에 대한 평균값을 이용하여 조석운동에 의한 해수의 지하 유동현상 파악을 시도하였다. 현장에서 TEM반응에 대한 평균값을 이용할 경우, 계산이 간단하고, 또한 산술적으로 신호대잡음비가 평균값 계산에 사용한 자료 수의 제곱근만큼 증가하는 장점이 있다. Fig. 8은 윈도우 15~23(0.341~1.325 msec)에서 측정된 TEM반응의 평균값과 조석운동에 대한 시계열을 도기한 것이다. 상대적으로 dynamic range가 다른 두 자료를 비교하기

위하여 각 시계열의 평균, 최대, 최소값으로 각각 정규화하였다. TEM 시계열에서 12 시간의 주기성은 명확하지 않지만, 해수의 지하 유동과 관련된 24 시간의 주기성은 명확히 관찰된다. 그리고 두 시계열의 위상차는 지하 매질의 수리적 특성에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 3개의 모니터링 측정점(MYK-1, MYK-2, MYK-3)에서 측정된 TEM반응에 대한 시계열이다. TEM반응의 진폭은 해안가의 측정에서 가장 낮고 점차 내륙으로 갈수록 높아지며, 진폭을 제외한 3개의 시계열 형태는 전체적으로 유사하다. 특히, MYK-1과

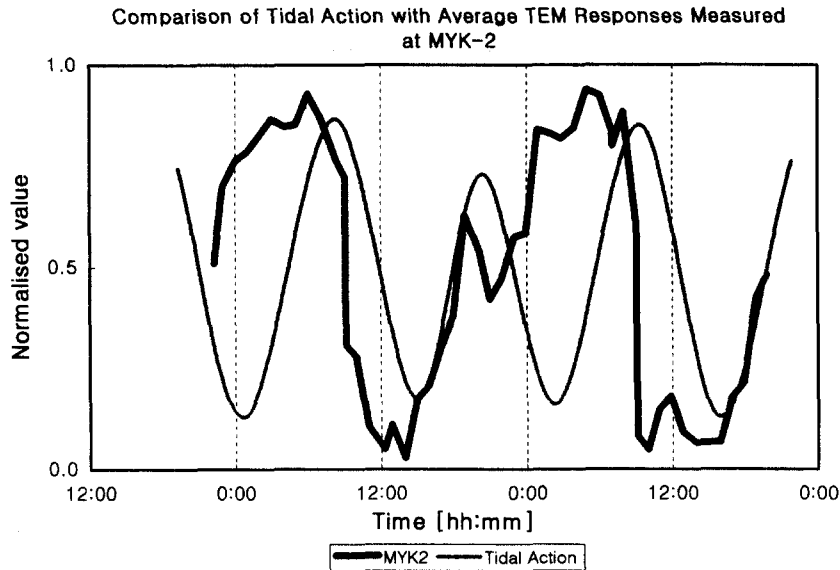


Fig. 8. Comparison of normalized TEM response series at MYK-2 in Fig. 4 with tidal action.

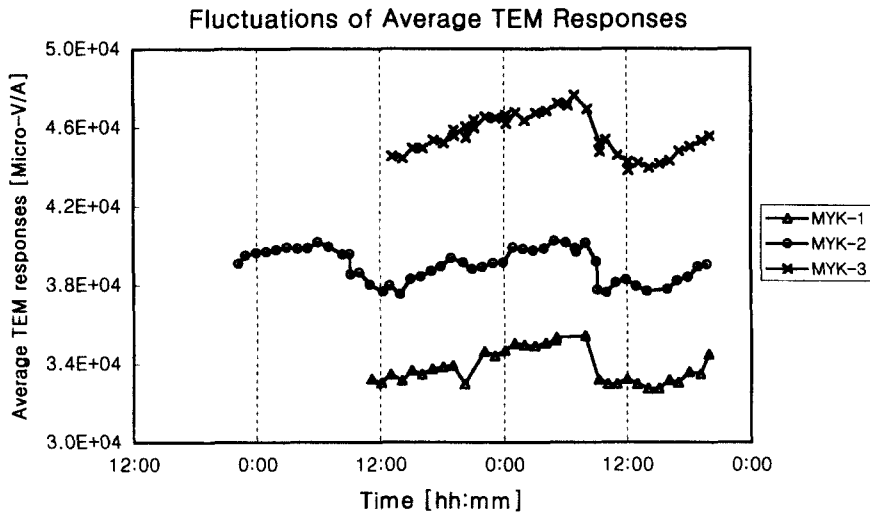


Fig. 9. Fluctuations of average TEM responses at the three monitoring stations, MYK-1, MYK-2, and MYK-3 in Fig. 4.

MYK-3의 시계열에서도 MYK-2의 시계열과 동일한 24 시간의 주기성을 확인할 수 있다. 그러므로, TEM 모니터링이 수행된 조사지역은 해안으로 갈수록 해수에 의한 염분화가 심하게 일어났으며, 모니터링 축선의 총 길이는 400 m이고 축선 상에 설정된 세 곳의 모니터링 자료가 24시간 주기성을 갖고 있는 것으로 보아 전이대의 공간적 폭은 400 m 이상으로 해석된다.

3. 결 론

조석운동에 의한 해수의 지하 유동현상을 파악하기 위하여 시간영역 전자탐사 모니터링을 수행하고 자료 처리를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다:

1. 측정센서가 대지와 접촉이 필요한 전기비저항법을 이용한 모니터링 방법은 전이대의 미세한 전위차를 감지하기 위해서 대지와 접촉된 전극들의 전기적 환경을 시간에 따라 동일하게 유지시켜야 한다. 또한, 전기비저항 모니터링 방법은 모니터링 측정 하부에 대한 지질정보가 없을 경우는 여러 전류전극 간격에서 측정해야 하므로 많은 측정시간이 소요되는 단점이 있다. 이에 반하여, 측정센서가 대지와 접촉하지 않는 intercoil spacing 방법인 시간영역 전자탐사법을 이용한 모니터링 기법은 측정시간을 현저하게 줄일 수 있으므로 조사가 안된 광범위한 지역에서 해수와 담수간 전이대 파악뿐만 아니라 전이대의 공간적 규모 파악에 매우 효과적이다.

2. 광범위한 조사지역에서 24시간 이내에 전이대의 위치 확인 및 수리지질학적 조사를 위한 시추 위치 등을 결정하기 위한 TEM 모니터링은 inductive spike와 전자잡음으로부터 자유로운 지연시간대의 TEM 반응에 대한 산술 평균값을 이용할 경우, 소요시간 그리고 자료처리 면에서 매우 효율적이다. 또한, TEM 반응들에 대한 평균값을 이용하는 방법은 산술적으로 신호대잡음비를 평균값 계산에 사용된 측정 수의 제곱근만큼 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것을 밝힌다.

참고문헌

- 김양수 (1999) 해수침투 지역에서 지구물리탐사에 의한 오염분포 및 침투경로 파악 연구. 충남대학교 이학석사 학위논문, 51p.
- 이상규, 조진동, 구성본 (1988) 해수오염조사를 위한 TEM sounding의 시험적용. 지질학회지, 24권, p. 71-81.
- 조진동, 황학수, 이철우, 박인화 (2000) 해수침입으로 오염된 지역에 대한 고분해능 TEM 탐사. 지질학회지, 36권, p. 39-46.
- 황학수, 이상규, 고동찬, 김양수, 박인화 (2000) 전기비저항 모니터링을 이용한 해수침투 파악. 물리탐사, 3권, p. 1-6.
- Fitterman, D.V., and Stewart, M.T. (1986) Transient electromagnetic sounding for groundwater. Geophysics, v. 51, p. 995-1005.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979) Ground water. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 601p.
- Hwang, H.S. (1997) Application of geophysical methods to detection of a preferred groundwater flow channel at a Pyrite tailings dam. Economic and Environmental of Geology, v. 30, p. 137-142
- Hoekstra, P., and Blohm, M.W. (1990) Case histories of time-domain electromagnetic sounding in environmental geophysics. In Ward, S.H. (Ed.), Geo-technical and Environmental Geophysics, v. 2, Soc. of Expl. Geophys., Tulsa, p. 1-15.
- Keller, G.V., Pritchard, J.I., Jacobson, I.J., and Harthill, N. (1984) Megasource time-domain electromagnetic sounding methods. Geophysics, v. 49, p. 993-1009.
- McNeil, J.D. (1990) Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In Ward, S.H. (Ed.), Geotechnical and Environmental Geophysics, v. 1, Soc. of Expl. Geophys., Tulsa, p. 191-218.
- Melloul, A.J., and Goldenberg, L.C. (1997) Monitoring of seawater intrusion in coastal aquifers. Journal of Environmental Management, v. 51, p. 73-86.
- Mills, T., Hoekstra, P., Blohm, M., and Evans, L. (1988) Time domain electromagnetic soundings for mapping sea water intrusion in Monterey Country, Central America. Ground Water, v. 26, p. 771-782.
- Wightman, W.E., Kaufman, A., and Hoekstra, P. (1983) Mapping gas-water contacts in shallow producing formations with transient EM. Presented at the 53rd, Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. p. 293.

2001년 8월 17일 원고접수, 2001년 10월 24일 게재승인.