

단층조사를 위한 array CSAMT 적용사례

이상규¹⁾ · 황세호¹⁾ · 이동영²⁾ · 이진수¹⁾ · 황학수¹⁾ · 박인화¹⁾

Investigations of Faults using array CSAMT Method

Lee, Sang Kyu, Hwang, Se Ho, Lee, Dong Young, Lee, Jin-Soo, Hwang Hak Soo and Park, In Hwa

요 약 : 측선 전체에 걸쳐 표토층이 두껍게 덮여 있어서 지질조사에 의한 단층의 확인이 용이하지 않은 두 지역에서 측선을 교차하는 단층의 위치와 그의 심부 발달 상태를 밝히고자 array CSAMT 탐사를 수행하였다. 측선 직하부의 전기비저항 단면도에서 전기비저항 분포의 급격한 횡적 불연속을 나타내거나 또는 높은 함수율로 인해 어느 정도의 폭을 갖으며 저비저항대로 표출되는 부분을 단층 또는 단층파쇄대로 해석한 후, 이에 대한 지질학적 증거를 확보하기 위하여 재차 지질조사를 수행하였다. 주변의 노출된 단층의 위치를 내·외삽 하거나 단층으로 해석한 동일 위치에서 최근의 토목공사로 인해 우연히 노출된 단층의 증거를 확보하고 array CSAMT 탐사의 단층 조사에 대한 적용성을 확인할 수 있었다. 일부 측선에 대하여는 동일 측선에서 수행된 쌍극자-쌍극자배열 전기비저항탐사 결과를 array CSAMT 탐사 결과와 대비하여 단층 조사에 대한 양자의 적용성을 비교하였다.

Abstract : Array CSAMT surveys were conducted in two areas where it was not easy to identify the presence of faults only with geological survey because of thick overburden. The purpose of these surveys were to locate the faults and to delineate the deep resistivity structures around the faults. The steep dip lineaments having high contrast in resistivity laterally and the low resistive zones having some width in the resistivity sections were interpreted as faults and fracture zones associated with faults, respectively. The good applicability of array CSAMT to the investigation of fault was recognized owing to the agreement between the interpretation results of array CSAMT and the conclusive evidences collected by the following geological survey. The evidences includes the recent exposure of fault and the trajectory of fault evidences of the survey line. A comparison of the applicabilities of array CSAMT method and the resistivity method using dipole-dipole array was presented with the results of both methods along a same traverse line.

Keywords : array CSAMT, 단층조사, 적용사례

서 론

우리 나라에서 CSAMT 시험탐사(정현기 외, 1989)가 수행된 이래로 CSAMT 탐사는 무연탄 탐사(정승환과 김정호, 1989), 지하수 탐사(박영수 외, 1993), 온천과 지열탐사(이상규 외, 1994; 이상규 외, 1995; 이상규 외, 1996a; 이상규 외, 1996b), 금속광상 탐사(이상규 외, 1997a; 이상규 외, 1997b) 등과 관련한 심부 물리탐사의 방편으로 활용되며 발전되어 왔다.

array CSAMT 법은 스칼라 CSAMT 법의 亞類로서, 측선 방향으로 연속되는 n개의 전장 측정용 접지쌍극자와 한 개의 자장 측정용 안테나를 하나의 그룹으로 하여 CSAMT 자료를 취득하는 방법을 일컫는다(Takakura *et al.*, 1996). 이 때, 자장 측정용 안테나는 연속하는 n개의 전장측정용 접지쌍극자 배열의 중앙점에 위치하며 측정된 자장신호는 후속의 자료처리에서 n개의 전장신호들과 공통적으로 쌍을 이루어 통상적

인 스칼라 CSAMT 탐사 자료처리의 절차를 따르게 된다. array CSAMT 방법은 측선 단위로 탐사가 수행될 때 채택될 수 있으며 특히 측선 하부의 횡적인 불연속 즉, 단층파쇄대를 탐지하고자 할 때 그 적용성이 뛰어나다고 알려져 있다. 탐사 작업의 측면에서 array CSAMT 방법을 채택하는 이유는 상반되는 두 경우를 들 수 있는데, 첫째는 측선 상에서 한번에 측정으로 전진(cover)할 수 있는 거리인 na(여기서, a는 전장 측정용 접지쌍극자의 길이) 내에서 전장자료밀도(n)를 조밀하게 할 수 있다는 것이고, 둘째는 단위길이 당 전장자료밀도가 통상의 스칼라 CSAMT와 같은 경우, 한번의 측정으로 n배의 길이를 전진할 수 있는 작업의 신속성을 취할 수 있다는 점이다. 측선 전체에 걸쳐 표토층이 두껍게 덮여 있어서 지질조사에 의한 단층의 확인이 용이하지 않은 두 지역에서 array CSAMT 탐사를 수행하였는데, 탐사의 일차 목표를 측선을 교차하는 단층의 위치와 그의 심부 발달 상태를 밝히는 것으로 하였다.

*1998년 7월 25일 접수

1) 한국자원연구소(Korea Institute of Geology, Mining & Material), 자원탐사연구부

2) 한국자원연구소(Korea Institute of Geology, Mining & Material), 환경지질연구부

탐사지역의 지질

경상북도 월성군과 충청북도 충주시 상모면 일대에서 측선을 교차하는 단층의 위치와 그의 심부 발달 상태를 확인할 목적으로 array CSAMT 탐사법에 의한 심부 물리탐사를 수행하였다. Fig. 1은 월성군에서의 송신원 위치와 측선들을, Fig. 2는 상모면에서의 송신원 위치와 측선들을 지형도 위에 보인 것이다. 수신 측선 주변의 지질을 요약하면 다음과 같다.

월성군 지역

본 역은 1:50,000 한국지질도 기계도폭(오인섭과 정국성, 1975)과 포항도폭(엄상호 외, 1964)의 경계부로서 백악기 화산암류가 분포하고 있으며, 이를 관입한 화강암과 산성암맥이 분포하고 있고, 양상단층 동측에는 천북역암(단구리 역암)이 단층선을 경계로 분포한다(Fig. 3). 화산암류는 연구 지역의 중앙부에 북북동-남남서 방향으로 대상 분포하는 암회색의 치밀한 세립질 안산암류로서 연구 지역 남측의 용천 저수지 일대에서는 상부에 혼펠스화한 퇴적암층이 분포한다. 이 퇴적암층은 셰일과 사암의 호층이나 셰일층이 우세하며, 저수지 동측의 도로변에서는 화강암과 산성암맥에 의해 관입된 단면이 관찰된다. 이들 퇴적암류는 기존 지질도에서는 안산

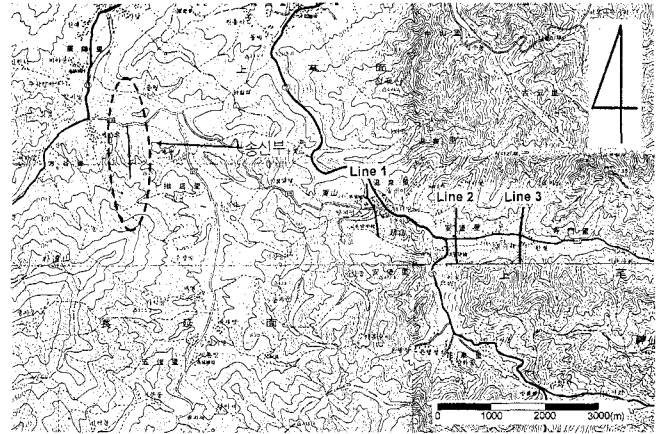


Fig. 2. Location map of array CSAMT survey in Sangmo-myeon area.

암류보다 전기에 퇴적된 대구층 내지 반야월층이고, 안산암이 후기에 관입된 것으로 기재하였으나, 유천층군의 화산암류와 동시에 퇴적된 셰일층으로 봄이 타당할 것이다. Hwang (1993)과 Hwang *et al.*(1995)은 이 일대의 모든 화산암 분출 시기를 예오세로 기재했으나, 이는 경상누층군에 분포하는 많은 화산암류들이 예오세에 고온의 영향을 받아 재평형된 변질 연령일 가능성이 매우 높다(Lee, 1989). 연구 지역 서측에 분포하는 중립질 흑운모 화강암류는 안산암류와 퇴적암류를 관입하고 있으며, 산성암맥과 중성암맥에 의해 관입당하고 있고, 이들 화강암의 관입시기도 예오세(Hwang, 1993)로 기재되어 있으나, 명확하지 않지만 백악기 말일 가능성이 매우 높다.

천북역암 분포지역의 서측에 남북으로 길게 대상으로 분포하는 반화강암 내지 규장암질 화성암이 암맥상으로 세립질 안산암류를 관입하였으며 천북역암과는 단층 접촉하고 있다. 이와 비슷한 성분의 산성암맥은 화강암들도 관입한 곳이 여러 곳에서 관찰되며, 그 이후에 중성 암맥에 의해 재관입 당하였다. 대단층에 의하여 동측으로 발달하고 있는 천북역암(엄상호 외 1964; Chough *et al.*, 1990)은 서암역암(Kim, 1965) 또는 단구리역암(Yoon, 1975)층 등으로 불리워지며,

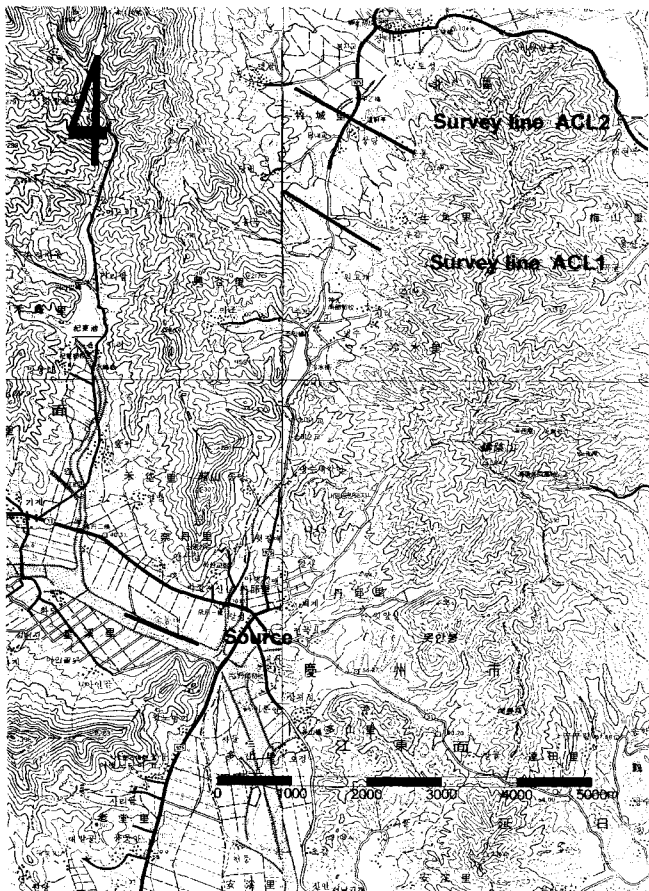


Fig. 1. Location map of array CSAMT survey in Wolseong-gun area.

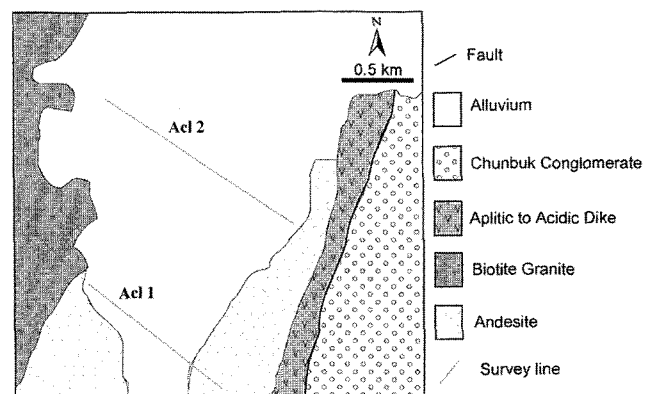


Fig. 3. Geological map of Wolseong-gun area.

백악기암석의 암편으로 구성되어 단층에 가까운 곳에서는 화산암의 각력이 우세하고, 대규모 교란에 의한 퇴적(Kim, 1998) 양상을 보이는 동시구조성(syn-tectonic) 퇴적층으로 해석된다. 연구 지역에서 관찰되는 단층구조들은 N 6-20°E의 단층들이 많고, 이들 단층들을 따라 관입한 암맥들이 많이 관찰된다. 운동 방향은 대부분 우수향이나, 연구 지역 서측의 화강암내에서는 좌수향운동도 관찰되고, 천북역암에 의한 단층면은 동측이 하강한 정단층 운동도 확인된다. 서측 화강암 내에는 N 34°W방향의 좌수향 단층들이 확인된다. 북북동-남남서 방향의 양산단층은 백악기화강암 관입 이후, 에오세 이래 약 35 km 우수향운동을 한 것으로 보고되었으나(Chang et al., 1990), Lee(1989)는 백악기전기에는 좌수향운동 등 여러번의 운동을 한 단층으로서 지금의 우수향운동은 에오세로 추정된 반면, Yoon and Chough(1995)는 마이오세로 추정하였으며, 아직까지 활단층일 것이라는 주장도 있다.

상모면 지역

본 역은 1:50,000 한국지질도 충주도폭(김기완과 이홍규, 1965), 황강리도폭(이민성과 박봉순, 1965), 문경도폭(김남장 외, 1967)과 괴산도폭(이종혁과 김정환, 1972) 등 4개 도폭의 경계부에 위치한다(Fig. 4). 주변의 지질은 기반암으로 변성 퇴적암이 분포되어 있고, 이를 관입한 화강암류와 산성암맥류가 여러 곳에서 관찰된다. 변성퇴적암류는 옥천층군으로서 하부로부터 고운리층(홍월리층), 서창리층(구룡산층), 황강리층으로 세분되며, 물리탐사측선에서는 고운리층과 서창리층이 분포하고 있다. Cluzel et al.(1990)은 변성퇴적암류의 퇴적 시기가 조선누층군의 시기와 비슷한 고생대 초기로 가정하였으나, 민경원 등(1995)은 수안보 북측에 분포하는 문주리층 내의 변성광물인 각섬석의 K-Ar연령이 원생대말(675Ma)로서 퇴적시기는 그 이전으로 추정하였다.

충주 및 황강리도폭의 고운리층은 괴산 및 문경도폭에서는 화천리층으로 분류되었고 이종혁(1995)은 홍월리층에 대비시켰다. 이층은 주로 탄산염질 기원의 퇴적암으로 구성되어 있으며, 이질부가 함유된 불순 석회암은 백악기의 월악산 화강암류의 관입에 의해 열변성작용으로 석회규산염광물인 투

회석과 투각섬석을 수반하고, 석회암들은 재결정되어 중립 내지 조립의 대리암조직을 가진다. 서창리층은 이질원의 변성퇴적암으로서 구룡산층(이종혁, 1995)으로 불리우기도 하며, 대부분 암회색의 점판암과 천매암으로 구성되어 있으나, 측선 주변에는 점판암이 우세하고, 화강암의 관입에 의해 생성된 변성광물인 청회색의 근청석 반정을 가지며, 많은 부분이 혼펠스화 하였다(노진환, 1995).

연구 지역 동측에 변성퇴적암류를 관입한 월악산 화강암류는 그 시기가 백악기(진명식 외, 1992a)에 해당되며, 등립상 중립 내지 조립질 흑운모 화강암이나, 모암과의 접촉부에서는 세립암상으로 변하는 급냉 연변상이 관찰된다(진명식 외, 1992b). 연구 지역에 분포하는 맥암류는 산성암맥이 대부분이며 이들 암맥류는 단층면을 따라 관입하였다.

연구지역내에서 대규모 지질구조선은 문경군 동로면의 생달리에서 충주를 잇는 서북서-동남동 방향의 단층이 발달되어 있으며, 이는 야외조사 결과 좌수향이동 단층으로 확인되었으며, 연구지역내에는 en échelon의 coupling으로 약 500m 간격으로 두 개조가 평행하게 발달되어 있으며, 이 두 단층을 연결하는 R-shear의 좌수향 단층이 EW방향으로 탐사측선 11번 지점을 통과하고, 이 단층선을 따라 폭 20m 내외의 산성암맥이 관입 발달한다. 측선 동측에는 N 10°W, 85NE 방향의 단층이 좌수향 단층을 절단하고 있는 것이 관찰된다.

array CSAMT 탐사

탐사자료 취득

array CSAMT 탐사 자료의 취득은 미국 Zonge Engineering and Research Organization社(1994)의 탐사 기기로 이루어 졌는 바, 탐사 기기의 구성은 Table 1과 같고 Field set-up은 Fig. 5와 같다.

월성군 지역에서 송신원의 방향은 북서서-남동동이며 길이는 1 km이다. 탐사 구역의 측선 ACL1 및 ACL2는 송신원의 중앙점에서 직선거리로 5.9~7.5 km 범위에 있으며 접지전선 송신원의 垂線과 이루는 각도는 5.2°~12.1° 범위에 있다. 상모면 지역에서 송신원은 남-북 방향이며 길이는 1 km 이다. 탐사측선들은 송신원의 중앙점에서 직선거리로 4.3~7.1 km 범위에 있으며 접지전선 송신원의 垂線과 이루는 각도는 15.5°~26.2°이다.

Table 1. Instruments for array CSAMT survey

Part	Component	Model
Transmitter	Motor/Generator set	ZMG-30
	Voltage Regulator	VR-1
	High-power Transmitter	GGT-30
	Transmitter Controller	XMT-16
Receiver	Multi-function Receiver	GDP-16
	Signal Conditioner	SC-8
	Magnetic Antenna	BF-10

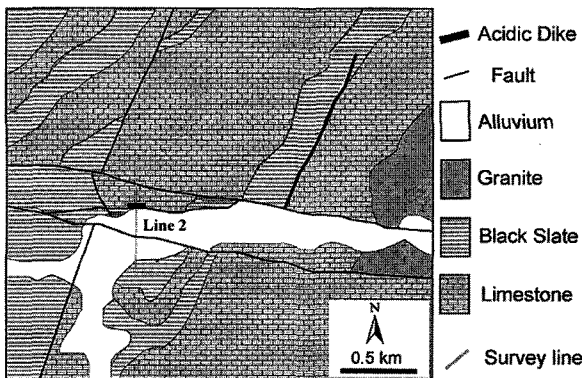


Fig. 4. Geological map of Sangmo-myun area.

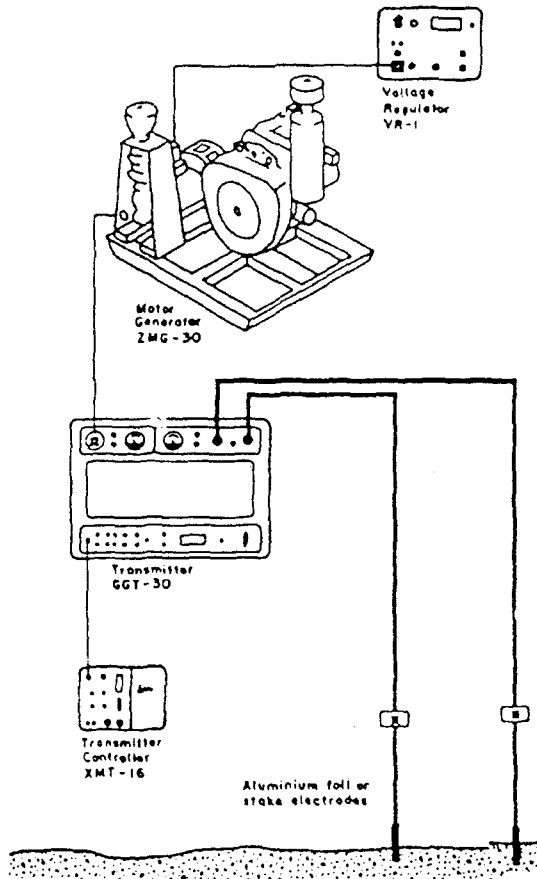
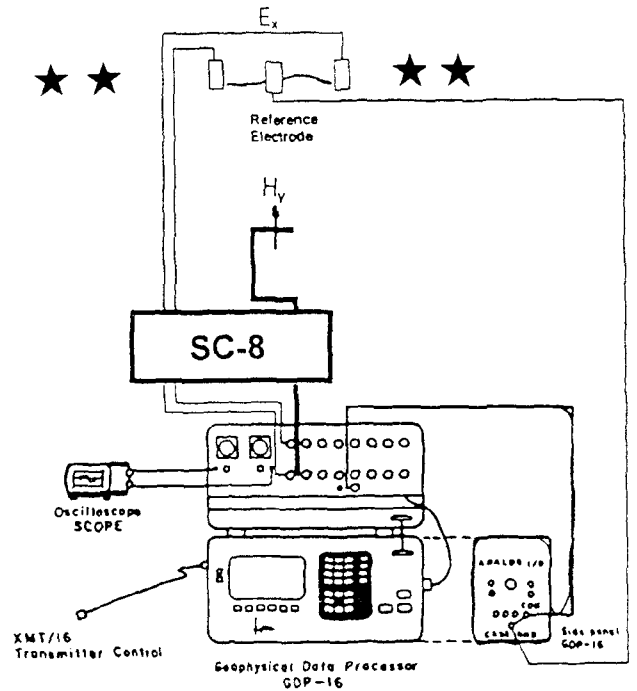


Fig. 5. array CSAMT field setup.



★ : Electric dipole

자료 취득은 해당 송신원에 평행한 전기장(E_x) 5개와 이에 직교하는 자기장(H_y) 1개를 1조로 하여 그 세기(magnitude)와 위상(phase)을 동시에 측정하였으며, 측정 주파수는 2^n ($n=0$ 부터 12 또는 13까지)으로 하였다. 전기장 측정용 쌍극자의 길이는 50m를 기준으로 하였고 중앙과 양단에 비분극 전극을 사용하였다. 중앙에 비분극 전극을 채택한 이유는 common-mode 잡음 제거를 위하여 접지참조점(ground reference)을 제공하기 위함이었다(Zonge, 1992). 접지전선에 흘린 전류는 10~5 Ampere로서 국내에서 수행된 고출력 CSAMT 탐사에서 사용한 전류의 세기와 유사한 수준이었다. 자료 취득 때에 60 및 180 Hertz의 노치필터를 사용하였으며, 이밖에 telluric-tracking 필터와 antialias filtering도 가동하였다. 질 좋은 위상 자료를 얻기 위하여 매일 아침 송신기와 수신기간에 고정도(high-precision) 크리스탈 시계를 이용한 synchronization은 필수적이었으며 주파수별 안테나 calibration도 수행하였다. 송신부와 수신부간의 의사 소통은 휴대폰을 이용하였으므로 교신상의 문제점은 없었다.

취득자료의 질

Fig. 6은 측선 ACL2의 측정점 #26에서의 sounding plot이며 Fig. 7은 측선 Line 2의 측정점 #11.5에서의 sounding plot를 보

인 것으로, 좌측 위로부터 주파수 변화에 따른 전기장(E_x)의 세기와 위상, 가운데에는 자기장(H_y)의 세기와 위상을 2회 이상 측정된 자료들을 전부 보인 것이며, 우측에는 주파수 변화에 따른 겉보기비저항(apparent resistivity)과 전·자기장 사이의 위상차(phase difference) 자료 중에서 편차가 작은 자료들만을 평균하여 나타낸 것이다. 여기서, 겉보기비저항과 위상차는 식 (1) 및 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$\rho_a = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \tag{1}$$

$$\phi = \phi_x - \phi_y \tag{2}$$

여기서, ρ_a : 겉보기비저항(ohm-m)

μ : 진공에서의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$)

ω : 각주파수

E_x : 송신전류방향의 전기장의 세기(mV/km)

H_y : 송신전류와 수직한 방향의 자기장의 세기(A/m)

ϕ : 위상차

ϕ_x : 전기장의 위상

ϕ_y : 자기장의 위상

취득한 자료의 질이 대체로 양호함을 볼 수 있으며, E_x , H_y

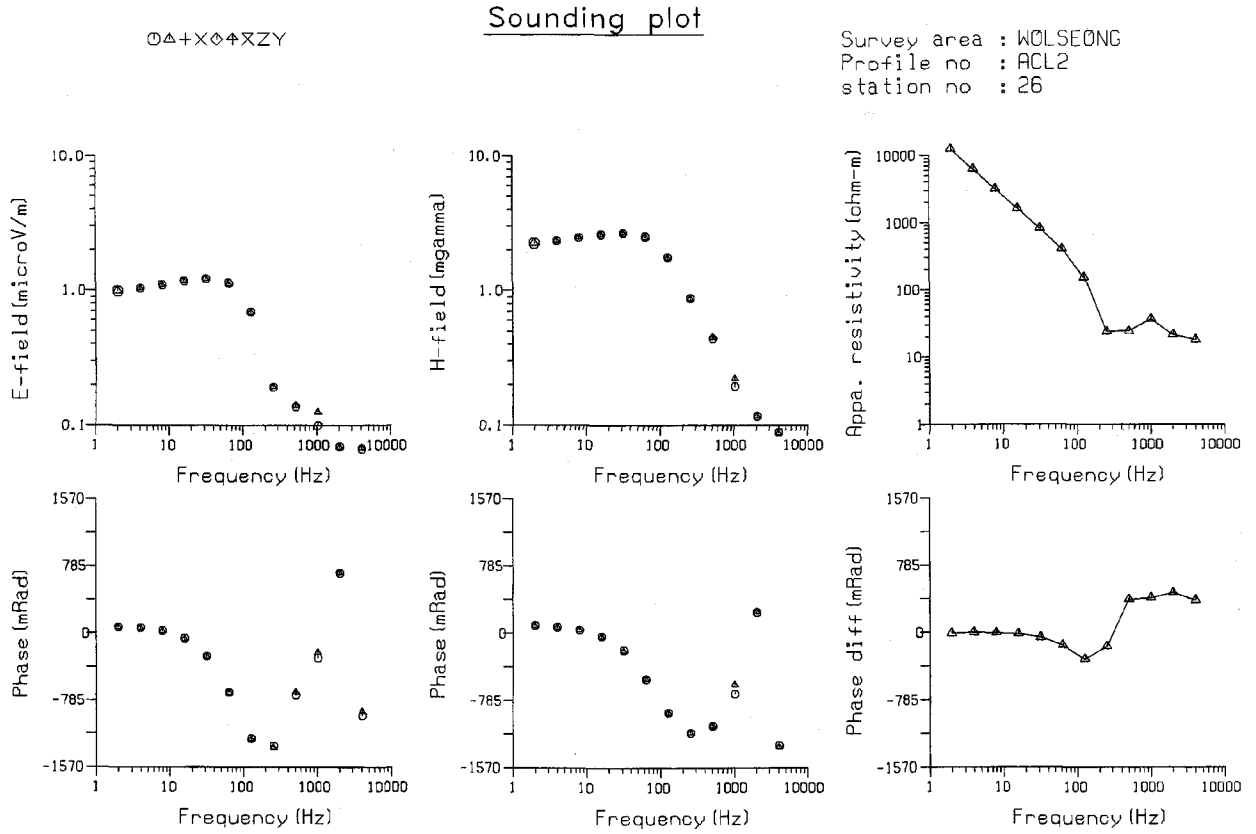


Fig. 6. CSAMT sounding plot of station #26 in profile ACL2 of Fig. 1.

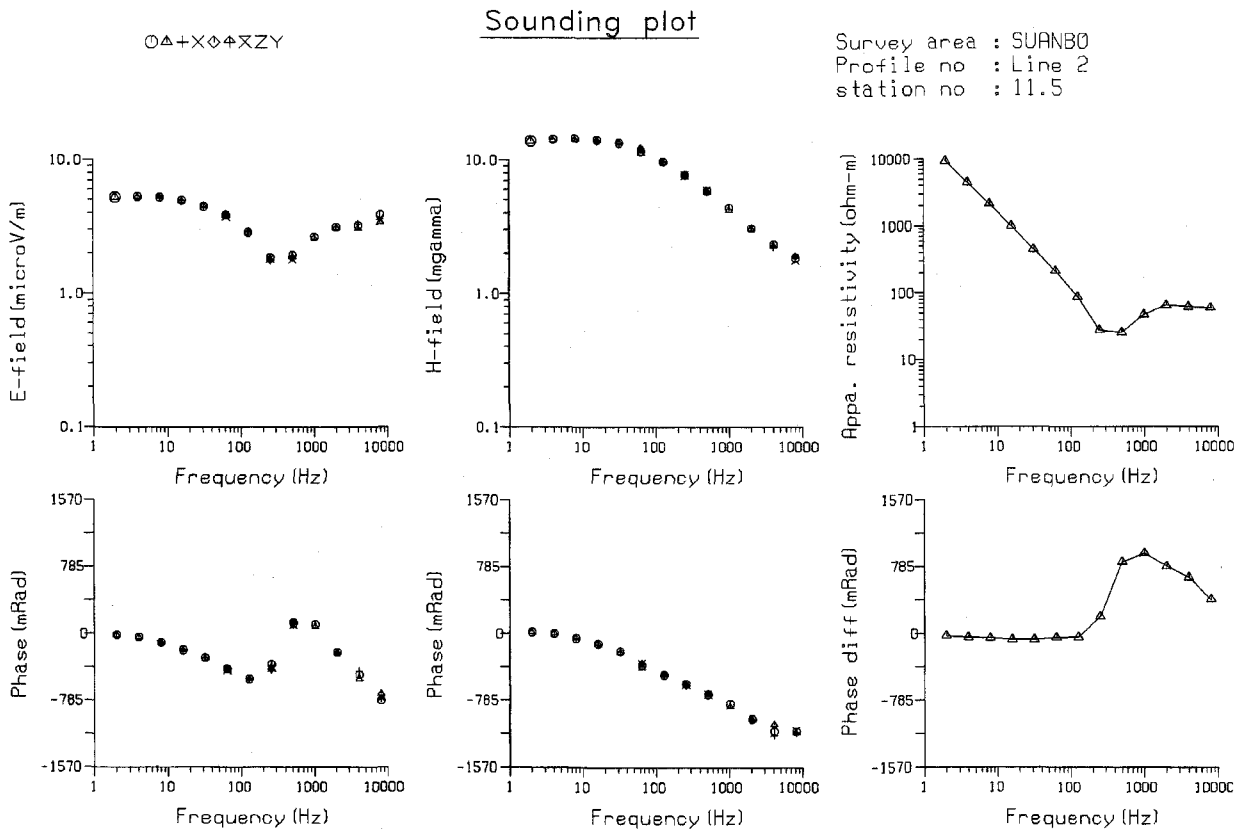


Fig. 7. CSAMT sounding plot of station #11.5 in profile Line 2 of Fig. 2.

Analysis of Inversion Results

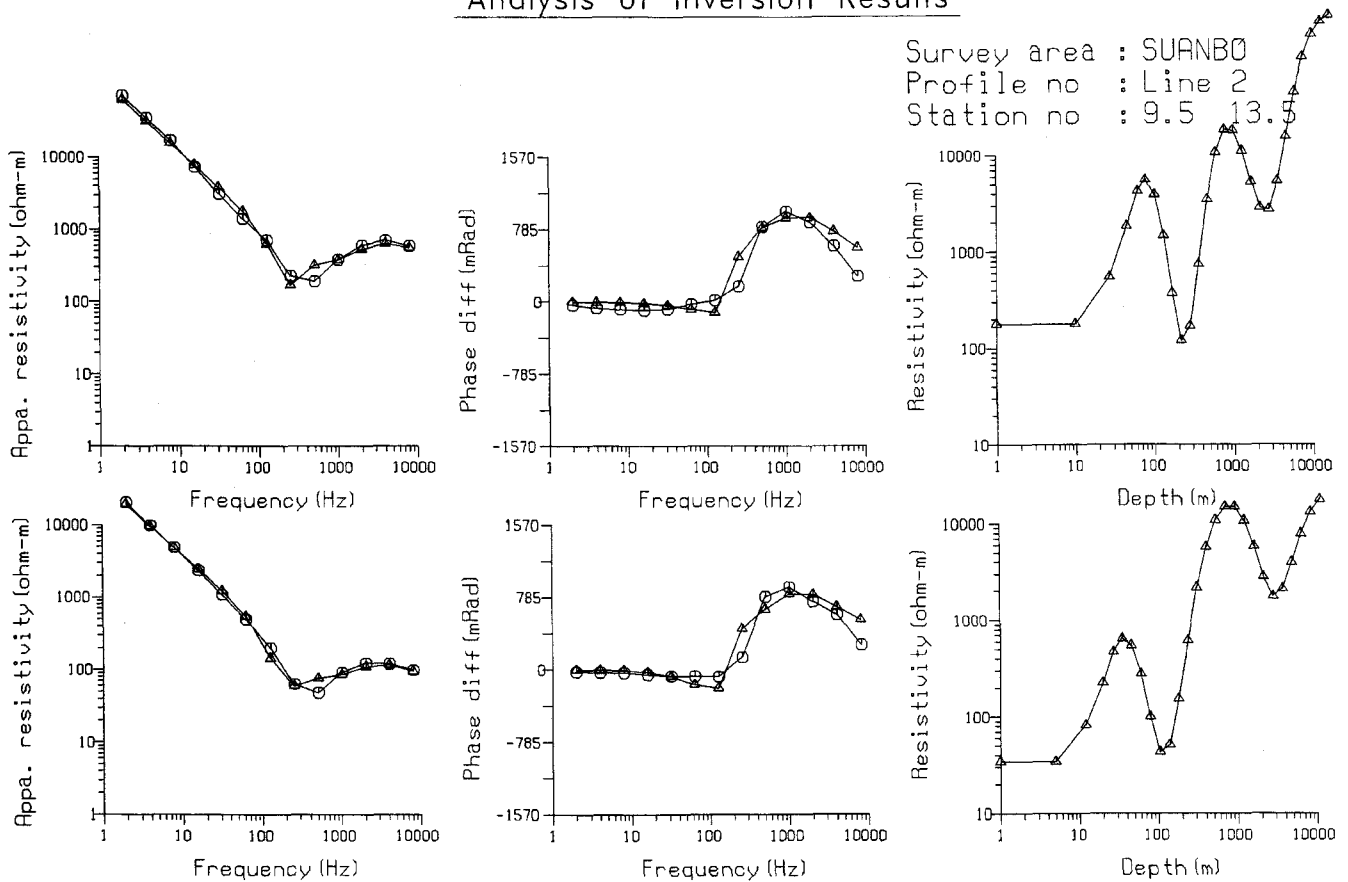


Fig. 8. Analysis of the smooth-model inversion results of station #9.5 and #13.5 in profile Line 2 of Fig. 2.

두 성분의 세기 및 위상이 모두 동일 측정에서 2회 이상의 측정이 필요없을 만큼 반복성이 양호한 것을 볼 수 있다. 위의 두 측정에서 transition notch가 비교적 고주파수대역(256 Hz)에서 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 탐사 지역의 기반암이 매우 높은 전기비저항 특성을 갖고 있음을 의미하는 것이다. 송수신 거리를 보다 멀리하면 transition notch를 저주파수대역으로 다소 이동시킬 수는 있지만 본 탐사 지역과 같이 극도의 고비저항 환경에서는 그 효과가 지극히 미미하고, 또한 송신 위치 선정의 제약이나 송신 출력의 제약 등 현실적인 문제점이 있어서 송신원의 위치를 송수신 거리가 더 멀어지도록 변경하지는 않았다. 상기 자료를 취득한 때의 송수신 거리 4.3~7.5 km는 그 동안 국내에서 수행되었던 CSAMT 탐사에서 평균 송수신 거리와 유사하였던 점도 송신원의 위치를 변경하지 않은 이유 중의 하나이다.

array CSAMT 탐사 자료 처리 및 해석

각 측선에서 취득한 array CSAMT 탐사 자료들에 대하여 평활화 제한을 가한 반복적 1차원 smooth-model 자동역산(MacInnes, 1990)을 수행하였다. 본 역산은 단순 층서모델 역산법과 더불어 CSAMT 측정자료를 심도 변화에 따른 전기비저항의 프로파일로 변환하는 강건한 역산 방법으로 널리 알

려져 있다. 단순 층서모델 대신 smooth-model을 사용한 가장 큰 이유는 층서의 심도나 두께의 규명보다도 측선 직하부 수직 단면상에서 비저항구조의 횡적인 불연속 파악을 탐사의 주된 목적으로 하였기 때문이었다. smooth-model 층서구조의 매개변수를 결정하기 위하여 각 측정에서 측정, 계산된 겉보기비저항과 위상차를 역산과정에서 이용한다. 매 주파수마다의 송신장 투과심도(penetration depth)를 계산하여 각 층의 두께를 고정한 후, 평활화 제한을 만족시키는 범위에서 모델의 CSAMT 반응이 측정자료와 가장 근접되도록 각 층의 비저항을 반복적으로 조정해 간다. 여기서, 평활화 제한은 층간의 비저항 변화량을 제한한다. 층서구조 모델에 대한 CSAMT 반응을 계산하는 알고리즘은 3차원적 송신장과 유사한 송수신 거리에 의한 효과를 포함하고 있다. 다시 말하면, 근거리장(near-field), 변이장(transition-field) 및 원거리장(far-field)에서의 임피던스 크기와 위상(impedance magnitude and phase)을 모두 계산에 포함시키므로 별도의 근접장 보정은 하지 않는다.

Fig. 8은 측선 Line 2의 측정 #9.5, #13.5에서의 역산 결과를 예로 보인 것으로서, 왼쪽에서부터 겉보기비저항 곡선, 위상차 곡선, 역산 결과를 차례로 나타낸 것인데, ○는 측정값을, △는 역산 결과에 의하여 계산된 이론값을 의미한다. 512

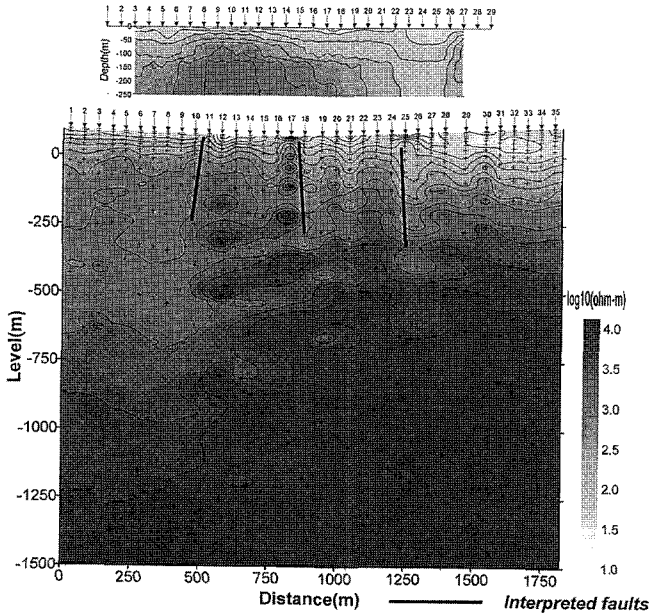


Fig. 9. Comparison the result of dipole-dipole resistivity survey (upper) and that of array CSAMT (lower) in profile ACL2.

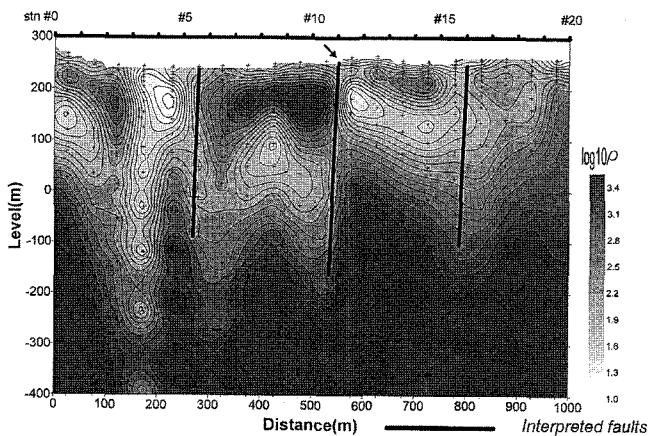


Fig. 10. array CSAMT result of profile Line 2. The arrow indicate the fault identified by following geological survey (see Photo 1).

Hz 이상의 고주파수에서 위상차는 실측자료와 이론적 자료 간에 약간의 차이가 있으나 대체로 만족할 만한 유사성을 보이고 있어서 역산의 결과를 신뢰할 만 하다.

Fig. 9와 Fig. 10은 array CSAMT 탐사 자료의 측정별 역산 결과를 이용하여 측선 ACL2 및 Line 2 하부의 2차원적 비저항 수직단면도를 작성한 것이다. 모든 비저항 단면도에서 비저항값은 상용대수를 취한 것이며, Fig. 9의 경우는 1.0(즉, 10 ohm·m)에서부터 4.0(10,000 ohm·m)까지를 24등분의 명암을, Fig. 10은 최소값(1.0)과 최대값(3.4)을 16등분의 명암을 이용하여 나타낸 것으로 짙은 색일수록 높은 비저항을 의미한다. Fig. 9의 상단에는 동일 측선에서 수행된 쌍극자-쌍극자 배열 전기비저항탐사의 진비저항단면도(이태섭, 1997)를 함께 도시하였다. 전기비저항탐사는 전극간 간격 a는 50m,



Photo. 1. The photograph of the neighborhood of station #11, profile Line 2. The arrow indicates the fault predicted by array CSAMT survey.

전극전개수 n은 10인 측정자료를 2차원 역산(김정호, 1997)하여 나타낸 것이다.

월성군 지역은 '천부 저비저항/심부 고비저항'으로 특징지을 수 있으나 상모면 지역은 심도에 따라서 저비저항과 고비저항이 반복하는 특징을 보이고 있다. 측선 ACL2 하부 단면의 비저항 분포(Fig. 9)를 보면 심부에는 고비저항 분포가 우세하며 이 고비저항은 비교적 천부까지 발달해 있고 천부의 저비저항층은 측선의 우측 즉, 남동동 방향으로 갈수록 깊어진다. 비저항분포의 횡적인 불연속을 여러 곳에서 관찰할 수 있으나 그 대비(contrast)가 강력하지는 않으며 따라서 이들이 단층이라면 그 낙차가 크지 않을 것으로 생각된다. 단층일 가능성이 있는 비저항 분포의 횡적 불연속들로는 측점 #10.5, #17.5 및 #25를 들 수 있으며 이들 중에서 측점 #10.5와 #17.5에 보이는 불연속은 천부까지 발달해 있는 단층일 가능성이 매우 높다. 쌍극자-쌍극자배열에 의한 비저항단면도와 좋은 유사성을 보였으나 단층의 위치를 적시하기는 용이하지 않음을 볼 수 있다. 측선 Line2 하부 단면의 비저항 분포(Fig. 10)를 보면 심부에는 고비저항 분포가 우세하고 천부에는 저비저항과 고비저항이 반복하는 특징을 보이고 있다. 수직적으로 교호하는 저·고비저항 분포는 단층이 존재할 경우에 횡적인 불연속을 심화시켜서 단층의 해석이 보다 용이해진다. 측점 #11 부근에서 전형적인 단층의 양상을 볼 수 있으며, 측점 #3.5~#4.5 부근에서는 단층과쇄대로 해석되는 비교적 폭이 넓은 저비저항 구조대가 지나고 있다. 측점 #3.5에는 개천 둑의 유실을 방지하기 위하여 설치한 철망이 있는 지점으로, 이의 영향을 받은 측점이기도 하다. 측점 #16 부근에도 단층이 있을 수 있다.

array CSAMT 탐사에 의하여 해석한 단층의 실존에 대한 지질학적 증거를 확보하기 위하여 재차 지질조사를 수행하였다. 주변의 노출된 단층의 위치를 내·외삽 하거나 단층으로 해석한 Fig. 10의 측점 #11 부근에서 최근의 토목공사로 인해

우연히 노출된 증거(Photo. 1의 \)를 확보하고 array CSAMT 탐사의 단층 조사에 대한 적용성을 확인할 수 있었다.

결 론

측선을 교차하는 단층의 위치와 그의 심부 발달 상태를 밝히고자 array CSAMT 탐사를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. array CSAMT 탐사에 의하여 해석한 단층 또는 단층과쇄대의 실존을 확인하기 위하여, 후속적으로 지질조사를 수행하였는데 주변의 노출된 단층의 위치를 내, 외삽하거나 단층으로 해석한 위치에서 최근의 토목공사로 인해 노출된 단층의 증거를 확보함으로써 단층 조사에 대한 array CSAMT 탐사의 적용성을 확인할 수 있었다.

2. 일부 측선에 대하여는 동일 측선에서 수행된 쌍극자-쌍극자배열 전기비저항탐사 결과를 array CSAMT 탐사 결과와 비교함으로써 array CSAMT 탐사가 쌍극자-쌍극자배열 전기비저항탐사에 비하여 단층의 위치를 적시하는데 보다 유리함을 확인하였다.

3. 심도가 깊어짐에 따라서 저, 고비저항층이 반복 출현하는 지역에 단층이 존재할 경우에는 이 단층이 비저항 분포의 횡적인 불연속을 심화시킴으로 array CSAMT 탐사에 의한 단층의 해석을 보다 용이하게 하였다.

참고문헌

1. 김기완, 이흥규, 1965, 한국지질도 충주도폭: 국립지질조사소.
2. 김남장, 이동우, 박봉순, 1967, 한국지질도 문경도폭: 국립지질조사소.
3. 김정호, 1997, Personal communication.
4. 노진환, 1995, 수안보 지역 옥천누층군 변성 이질암류의 접촉변성 분대와 반점상 근청석의 생성: 지질학회지, **31**, 328-342.
5. 민경원, 조문섭, 권성택, 김인준, Nagao, K. and Nakamura, E., 1995, 충주 지역에 분포하는 변성암류의 K-Ar의 연대: 원생대 말기(675 Ma)의 옥천대 변성작용. 지질학회지, **31**, 315-327.
6. 박영수, 송윤호, 이희일, 임무택, 정현기, 박인화, 이상규, 이태섭, 1993, 조령지역 암반수 개발을 위한 물리탐사: 한국자원연구소.
7. 임상호, 이동우, 박봉순, 1964, 한국지질도 포항도폭: 국립지질조사소.
8. 오인섭, 정국성, 1975, 한국지질도 기계도폭: 국립지질광물연구소.
9. 이민성, 박봉순, 1965, 한국지질도 황강리도폭: 국립지질조사소.
10. 이상규 외, 1994, 제주도 지열자원탐사 및 최적 활용방안 연구(I): 상공자원부.
11. 이상규 외, 1995, 제주도 지열자원탐사 및 최적 활용방안

연구(II): 통상산업부.

12. 이상규, 이태섭, 황세호, 박인화, 이진수, 이명중, 1996a, 홍천온천 심부 물리탐사: 한국자원연구소.
11. 이상규 외, 1996b, 제주도 지열자원탐사 및 최적 활용방안 연구(III): 통상산업부.
12. 이상규, 황세호, 최중호, 박인화, 1997a, 태백산 원동지역 정밀물리탐사: 한국자원연구소 연구보고서 KR-96(C)-9, 금속광물자원탐사연구, 9-46.
13. 이상규, 황세호, 오민수, 박인화, 1997b, LOTEM 및 CSAMT 탐사에 의한 강원도 원동지역 심부 다중금속광상 탐사 성공사례: 제69회 학술발표회 논문집, 한국자원공학회, 195-201.
14. 이종혁, 1995, 서남 옥천대의 지질, 이종혁 교수 정년퇴임 논문집: 강원대학교 지질학과 동문회.
15. 이종혁, 김정환, 1972, 한국지질도 괴산도폭: 국립지질조사소.
16. 이태섭, 1997, Personal communication.
17. 정승환, 김정호, 1989, CSAMT 탐사 자료의 근접장 보정과 해석에 관한 연구: 탐사기술개발연구, KR-88-2D-2, 한국동력자원연구소, 72-123.
18. 정현기, 이태섭, 이상규, 박인화, 1989, CSAMT 시험탐사 연구: 탄전물리탐사연구, KR-88-5A-2, 한국동력자원연구소, 55-84.
19. 진명식, 주승환, 지세정, 김성재, 신성천, 1992a, 방사성동위원소연령에 의한 옥천 습곡대 북서부 중생대 화강암체의 관입시기와 지열사 연구: 한국자원연구소, 동위원소지질연구.
20. 진명식, 이진수, 지세정, 서효준, 김상엽, 김성재, 신성천, 1992b, 고온암체의 지열 에너지에 관한 암석학적, 지화학적 연구(III): 과학기술처, KR-92(T)-23.
21. Chang, K. H., Woo, B. G., Lee, J. H., Park, S. O. and Yao, A., 1990, Cretaceous and Early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin: S. Korea, J. Geol. Soc. Korea, **26**, 471-487.
22. Chough, S. K., Hwang, I. G. and Choe, M. Y., 1990, The Miocene Doumsan fan delta, southeast Korea: a composite fan-delta system in back-arc margin. JSP, **60**, 445-455.
23. Cluzel, D., Cadet, J. P. and Lapiere, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea): Tectonophysics, **183**, 41-56.
24. Hwang, I. G., 1993, Fan-delta systems in the Pohang Basin (Miocene), SE Korea: Ph. D. Thesis, Seoul National University.
25. Hwang, I. G., Chough, S. K., Hong, S. W. and Choe, M. Y., 1995, Controls and evolution of fan-delta systems in the Miocene Pohang Basin, SE Korea: Sed. Geol., **98**, 147-179.
26. Kim, B. K., 1965, The stratigraphic and paleontologic studies on the Tertiary(Miocene) of the Pohang area: Korea. J. of Seoul National Univ. Sci. and Technol. Seires, **15**, 32-121.
27. Kim, J. W., 1998, Depositional processes of gravel lobe deposits in the prodelta, Doumsan fan-delta system (Miocene), SE Korea: M. S. Thesis Seoul National University.
28. Lee, J. S., 1989, Pétrologie et Relations Structurales des Volcanites Crétac es Cénozoïques de la Corée du Sud:

- Implications Géodynamiques sur la marge Est-Eurasiatique. Ph. D. Thesis Univ. d'Orléans.
29. MacInnes, S. 1990, SCSINV Documentation-Smooth model inversion: Zonge Engineering and Research Organization.
 30. Takakura, S., Konishi, N., Nakamura, N., Takahashi, N., and Kikuchi, A., 1996, Helicopter electromagnetic and array CSAMT investigations of active faults in the northern region of the Awaji island, Japan: Geophysical Exploration, **49**, 474-486.
 31. Yoon, S., 1975, Geology and paleontology of the Tertiary Pohang Basin, Pohang district, Korea, Part 1: Geology. J. Geol. Soc. Korea. **12**. 63-72.
 32. Yoon, S. H. and Chough, S. K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications from the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan): GSA Bull., **107**, 83-97.
 33. Zonge, K. L., 1992, Electromagnetics-Broad band electricmagnetic systems: compiled by Blaricom, R. V., Practical Geophysics II for the exploration geophysicist, Northwest Mining Association.
 34. Zonge Engineering and Research Organization, Inc., 1994, Instruction Manual for GDP-16 Geophysical Data Processor Multi-Function Receiver.