

## 고해상 자기지전류 자료를 이용한 분지해석

### Basin analysis using high-resolution magnetotelluric data

양우현 (Woo Hun Ryang)

#### 요 약

새로운 고해상 자기지전류 자료가 인리형 분지해석 (백악기 음성분지)을 위해서 지표 퇴적학적 자료와 함께 획득되었다. 두개의 분지 횡단 자기지전류 단면 자료는 남동부의 부분지 형성과 비대칭적인 분지 단면을 보여준다. 이러한 분지 구조는 분지 충전층에 반영된 고수류 방향성과 퇴적상 변이 방향 자료와도 일치한다. 또한 충전층이 중간블록의 급격한 침강이 수반된 인리형 열개작용도 반영하고 있음을 제시한다. 층적-호소 퇴적계의 비대칭적인 암상분포, 퇴적상 변이와 고수류 방향에 대한 지표 자료와 함께, 종합·해석된 고해상 자기지전류 비저항 단면자료는 분지형성과 분지충진 과정을 이해하는데 큰 도움을 준다. 석유탄사와 분지해석을 위해, 고해상 자기지전류 탐사방법은 고비용의 부담이 큰 육상 탄성과 반사법 탐사의 유용한 대안이 될 수 있다.

**주요어 :** 자기지전류, 인리성분지, 분지해석

**Abstract :** A new high-resolution magnetotelluric (MT) survey was conducted for pull-apart basin analysis (Cretaceous Eumsung Basin), combined with surface sedimentological results. Two cross-basinal MT profiles represent an asymmetric form with a subbasin in the southeastern part. These basinal architectures are well compatible with paleoflow directions and facies transitions of surface sedimentology. The results also suggest that the basin fills reflect pull-apart opening with rapid subsidence of the central blocks. Combined with the surface sedimentological data on asymmetric lithofacies distribution, facies transitions, and paleoflow directions of the alluvio-lacustrine systems, the MT data help explain basin-fill processes during the basin formation. For petroleum exploration and basin analysis, the high-frequency MT technique can be a useful substitute for the costly burden of a seismic-reflection survey on land.

**Key words :** magnetotellurics, pull-apart basin, basin analysis

#### 서 언

자기지전류 (magnetotellurics or MT) 탐사방법은 태양의 흑점 활동과 관련된 전리층 교란과 천동·번개 등에 의해 발생하는 지구 둘레 이온층의 전·자기장을 송신원으로 이용하여 지하의 전기전도도 분포구조를 규명하는 전자탐사법의 일종이다 (Doblin and Savit, 1988; 손호웅 외, 1999a). 이 탐사법은 1950년대 이래로 존재해 왔지만, 실제로 야외에서 적용되기 시작한 것은 1970년대 이후이다. 1980년대 후반 이후, 전자·컴퓨터 기술의 발달에 따라 향상된 전·자기장 측정기술과 함께 기기가 이동 가능한 소형으로 제작되면서, 지각구조, 지하구조의 확인 등에 주로 사용되었다. 특히 석유·가스 조사시, 초기 탐사지역의 대략적인 탐사에 사용되거나, 높은 속도의 특성을 갖는 화산암류, 석회암, 암염 등의 피복 지역, 쓰러스트 우세 지역 등 탄성과 탐사가 어려운 지역에 널리 이용되었다 (Christopherson, 1998). 실제로 중국, 터키, 인도, 미국 등의 여러 석유회사들에 의해 다양한 석유 개발 유망지역에서 탐사가 수행되고 있다 (Christopherson, 1999). 최근에는 새롭게 개발된 해상 자기지전류 (marine magnetotellurics)

탐사기기를 이용하여, 미국 멕시코만 해양 유망구조에 적용된 바 있다 (Constable *et al.*, 1998; Hoversten *et al.*, 1998). 본 논문에서는, 야외에서 비교적 쉽게 측정 가능하고 이동이 용이한 IMAGEM (EMI, Inc.) 기기를 이용하여 획득한 국내 백악기 음성분지의 고해상 자기지전류 자료를, 지표 퇴적학 자료와 함께, 종합적으로 해석하였다.

주향이동 분지의 형성과 충진에 대한 Crowell (1974, 1982) 모형 이래, 대부분의 주향이동 분지의 해석은 지표 지질 자료에 근거하여 연구되었다 (Aydin and Nur, 1982; Mann *et al.*, 1983; Christie-Blick and Biddle, 1985; Nilsen and Sylvester, 1995). 그러나, 분지 형성과 충진에 대한 총체적인 이해는 자세한 지표 지층 자료와 함께 해석되는 분지 심부의 다양한 지구물리 자료와 그러한 자료들의 3차원적 해석을 필요로 한다. 비록 주향이동 단층 기원의 Dead Sea 분지 (Csato *et al.*, 1997)와 Ridge 분지 (May *et al.*, 1993)에 대한 최근의 반사법 탄성과 연구가 있었지만, 본 연구에서는, 육상 반사법 탄성과 심부 탐사의 고비용 부담 없이 수행될 수 있는 고해상 자기지전류 탐사를 분지구조 분석에 적용하였다.

한반도 중부에 위치한 백악기 음성분지 (~7×33 km<sup>2</sup>)는 두개의 북동-남서 방향의 주향이동 단층이 활동하던 공주 단층대에 의해 형성된 주향이동 분지의 한 종류인 인리형 분지 (pull-apart basin)이다 (그림 1; Chun and Chough, 1992; 최영섭, 1996). 지표 퇴적학적 연구에 따르면, 음성분지는 충적환경과 호소환경 기원의 퇴적층으로 충전되어 있으며, 퇴적계 발달 당시 분지는 좌수향 주향이동 단층에 의해 열개되었다 (Ryang and Chough, 1997a). 본 연구에서는 분지의 북부와 중부를 가로지르는 고해상 자기지전류 자료의 두 개의 단면도를 제시하며, 이를 분지모양, 발달사와 퇴적과정의 관점에서 해석할 것이다.

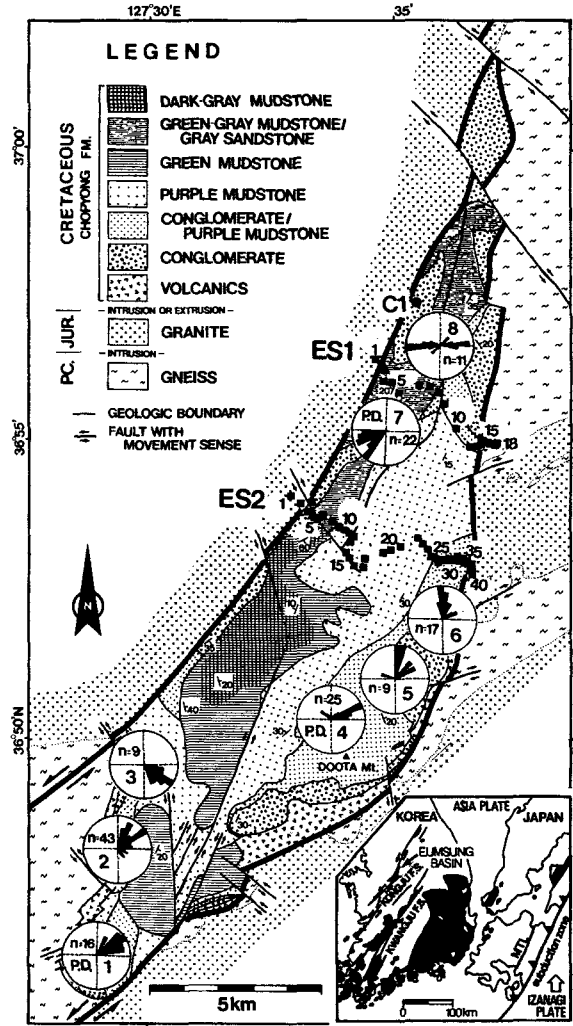
**지질학적 배경**

쥬라기 후기와 백악기 동안 활동했던 좌수향 공주 단층계는 비교적 작은 크기의 마름모 모양의 분지들을 형성시켰다 (Chun and Chough, 1992). 신장된 마름모꼴 백악기 음성분지 (그림 1)는 두개의 왼쪽이 열리는 (left-stepping) 좌수향 주향이동 단층대에 의해 형성된 인리형 분지이다. 기반암은 서쪽으로 쥬라기 화강암, 동쪽으로 선캠브리아기 편마암과 화강편마암이 주로 구성된다. 분지형성 단층 경계에는 슈도타킬라이트 (pseudotachylite)를 포함하는 폭 50-100 미터의 파쇄암 (cataclasite)과 미세파쇄각력암 (microbreccia) 등이 존재하며, 분지 북동부 일부 경계에는 마일로나이트대 (mylonite zone)가 존재한다 (최영섭, 1996). 마일로나이트 열리 방향과 단층면 방향 자료는 분지형성 주 단층이 분지의 동쪽 경계에서는 N13E/82W이고, 서쪽 경계에서는 N38E/75E 방향이었음을 보여주는데, 이는 주향이동 단층 또는 고각도의 정단층 운동을 제시한다 (정상원, 1987).

분지 내 퇴적체 (>8 km 층서두께)는 화산암 (안산암, 현무암과 화산쇄설암을 포함하는), 역암, 역암/적색이암, 적색이암, 녹색이암, 녹색-회색이암/회색사암과 진회색이암 등의 7개 퇴적단위로 나뉜다 (그림 1). 이러한 육성기원 퇴적물은 충적선상지, 충적평원과 호소 환경 등에서 퇴적된 것이다. 분지 경계부에 우세한 역암 퇴적상은, 분지 중앙부로 갈수록 측면/수직의 퇴적상 변화를 보이며, 역질사암, 역질실트암과 이암 등의 세립질 퇴적상으로 변이한다 (그림 1). 연흔 흔적과 석회질 단괴가 진회색이암 내에 있고, 건열 흔적과 석회질 단괴가 적색이암 내에 존재한다. 다양한 화석자료인, 식물 (conifers와 ginkgoales), 무척추동물 (estherids)과 윤조류 미화석 (charophyta) 등은 온난한 기후 환경과 담수호소 환경을 지시한다 (송무영 외, 1990). 특히, 분지 남부 녹색이암층에 보존된 윤조류 화석은 Hauterivian-Aptian (약 110-120 Ma) 시기로 동정된다 (최성자 외, 1995).

**퇴적학적 분석**

음성분지에서 분지 경계 단층을 따라 채워진 조립질 퇴적물의 순차적인 전개 양상은 인리형 분지 내에서의 역동적인 퇴적작용을 반영한다 (Ryang and Chough, 1997b). 각각의 분지 경계 퇴적층은 측면/수직 퇴적상 조합, 층서 발달, 고수류 방향과 역성분 변화 등의 특징에서도 순차적으로 뚜렷이 구분된다.



**Fig. 1.** Geologic map of Eumsung Basin with magnetotelluric recording sites (solid squares), paleoflow direction data (P.D., rose diagrams), and the coring site (solid circle C1, ~250 m deep). Magnetotelluric profiles ES1 and ES2 comprise 18 and 40 sites, respectively. Inset represents distribution of Cretaceous nonmarine basins (solid fill) and fault patterns (solid lines) in the northeast Asia (modified after Chun and Chough, 1992; Kim *et al.*, 1994; Ryang, 1998; MTL: Median Tectonic Line). The Izanagi Plate subducted under the Asia Plate, translating to the northeast at a relative velocity of ~21 cm/yr (Maruyama *et al.*, 1997).

분지 남동부에서는 분지 경계부에서 충적선상지가 발달하고, 분지 경계를 따라 평행하게 발달하는 하도계가 충적평원 퇴적환경을 구성한다 (P.D. 4, 5, 6, 그림 1). 지표의 퇴적층 (~2.2 km 층서두께)은 두 개의 층서단위로 나뉘고, 이는 좌수향 분지경계 단층운동에 따라 퇴적중심부가 북쪽으로 이동하면서 전개되는 충적 퇴적계의 순차적인 발달로 해석된다 (Ryang and Chough, 1997a).

분지 남서부의 지표 퇴적층 (~1.5 km 층서두께)은 역성분과 층서구성에 따라 크게 세 개의 퇴적단위로 나뉘질 수 있다. 이러한 퇴적단위들은 각각 분지경계에서 분지 안쪽으로 직각방향으로 발달하는 하도계를 보여주면서 충적-호소 퇴적계를 구성한다 (P.D. 1, 2, 3, 그림 1). 이러한 퇴적양상은 인리형 분지의 인리형 경계

에서 상대적으로 동시에 발달하는 층적계의 전개 결과로 해석된다 (Ryang and Chough, 1997b, 1999).

분지 분부는 역암 단위 (북서와 북동 부분)와 교호하는 역질사암과 진회색이암 (북부 중심)에 의해 특징 지워진다. 심부시추자료 (~250 m, site C1, 그림 1)) 역시 층리를 보이지 않는 역암과 역질사암이 혼합된 특징을 보여준다 (최영섭, 1996). 분지 북서부, 대규모 3차원 노두에서 관찰·측정된 분지종축 방향의 하천 하도계는 분지경계 단층을 따라 발달한 남서 방향의 고수류 방향을 보여준다 (P.D. 7, 그림 1). 전반적인 퇴적상 변화도 분지종축 퇴적계가 남쪽으로 전개되어 호수면 변동이 잦은 호소 환경으로 변이하는 양상과 일치한다. 분지 양쪽의 조립질 총적산상지로부터 발원한 하도계가 우세한 북부 중심부에서는 고수류방향 (P.D. 8, 그림 1)이 주로 동서 방향을 이룬다.

### 자기지전류 자료

자기지전류 탐사방법은 시간에 따라 변화하는 지구의 자연 전자기장을 신호원으로 이용하여 지구내부의 일정 깊이에 존재하는 전기비저항 구조를 탐침한다 (Vozoff, 1991). 전기장과 자기장의 동시 측정은 탐사심도 지점까지 투과하는 주파수대를 통해 가능하다. 본 연구에서는 고해상 자기지전류 자료가 두 개의 평행한 분지 횡단 축선에서 얻어졌는데 (4.9 km for ES1 and 7.6 km for ES2), 50-200 m 간격으로 각각의 축선은 18 측정점과 40 측

정점으로 구성된다 (그림 1). 2차원 단면을 위해,  $E_x$  (전기장의 x-방향 구성요소)와  $H_x$  (자기장의 x-방향 구성요소)를 단면 진행 방향에 평행하게 배열하는 반면,  $E_y$ 와  $H_y$ 는 단면 방향에 수직되게 배열한다 (그림 2).

본 연구의 고해상 자기지전류는 미국 EMI사의 IMAGEM 기기 (Nichols *et al.*, 1994)를 사용하였는데, 이 기기는 전통적인 자기 지전류 탐사법의 주파수 대역보다 높은 10-10,000 Hz의 주파수 대역을 이용한다. 이 대역의 주파수는 수 킬로미터 깊이의 지각 단위까지 탐사할 수 있는데, 가탐심도는 다음과 같은 수식에 의해 계산된다:  $d \approx 500(\rho/f)^{1/2}$  ( $d$ , skin depth;  $\rho$ , electrical resistivity;  $f$ , frequency). 서로 수직한 전기장과 자기장 성분의 비인 임피던스 텐서 (impedance tensor:  $Z=E/H$ )는 자기지전류 시계열에서 네 가지 측정요소 ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ )의 상호상관과 자기상관으로부터 계산된다 (Swift, 1986; Vozoff, 1991). 각각의 관측 점은 1차원 역산과 모델링에 의해 계산된다 (Inman, 1975). 2차원 단면 (그림 3; 축선 ES1과 ES2, 그림 1)는 EMAP (electromagnetic array profiling) 필터링 (Bostick, 1986; Torres-Verdin and Bostick, 1992)과 1차원 Bostick 역산에 의해 검산·구성되었다. EMAP 탐사기술은 또한 정적효과 (static shift)로 알려진, 천부의 이상체 또는 지형효과 등에 의해 야기되는 심부 겉보기 비저항값 변형의 보정에도 사용된다 (Jones, 1988). 2차원 자료처리를 위해, TE 모드 (transverse electric mode)는 탐사대상 단층 또는 지질 구조선에 전기장이 평행한 방향으로 배열한 반면, TM 모드 (transverse magnetic mode)는 전기장이 구조선 주향에 수직한 방향으로 배열한다. 2차원 단면 (그림 3)은 TM 모드로 자료처리하여 구성하였다. 연구지역의 기만암은 저항값이 매우 높으며 (>5000 ohm-m), 10 Hz 이상의 주파수가 사용되었다. 고주파수 대역을 이용하는 IMAGEM 탐사는, 인위적인 잡음을 제거하기 위해 원거리 기준점 (remote reference)을 운영하지 않는 대신, 지역 자체 기준점 (local self reference)의 기능을 작동한다. 음성분지의 북부와 중부를 가로지르는 두 개의 2차원 비저항 단면 (ES1과 ES2, 그림 3, 4)은 분지형성의 3차원적 해석을 가능하게 한다 (Ryang, 1998; Ryang *et al.*, 1999).

### 분지 진화 해석

음성분지에서, 높은 전기비저항값 (>5000 ohm-m, 그림 4)은 화강암 (쥬라기)과 편마암 (선캠브리아기)의 풍화 받지 않은 기반암체를 나타내는 반면, 낮은 비저항값 (<5000 ohm-m, 그림 4)은 역암, 사암과 이암과 같은 퇴적암을 대표한다 (예, Palacky, 1987; 그림 1). 이러한 해석은 분지 경계부에서 얻어진 전기쌍극자 비저항 단면 (가탐심도, ~250 m), 수직 전기비저항 자료, 극주파 자기 자료와 자기장 측정값 등에 의해서도 지지된다 (Kim *et al.*, 1998).

단면 ES1 (그림 4)에서, 최대 분지 깊이는 약 700 미터이다. 분지의 서쪽 기만암은 상대적으로 완만한 경사를 보이는 반면, 동쪽은 상대적으로 급한 경사를 보인다. 지표의 퇴적학적 자료 (그림 1)는 분지종축 방향의 하도계가 분지의 서쪽에서 형성되었던 반면, 조립질 퇴적물은 동쪽에서 주로 발원해 충전되었음을 보여

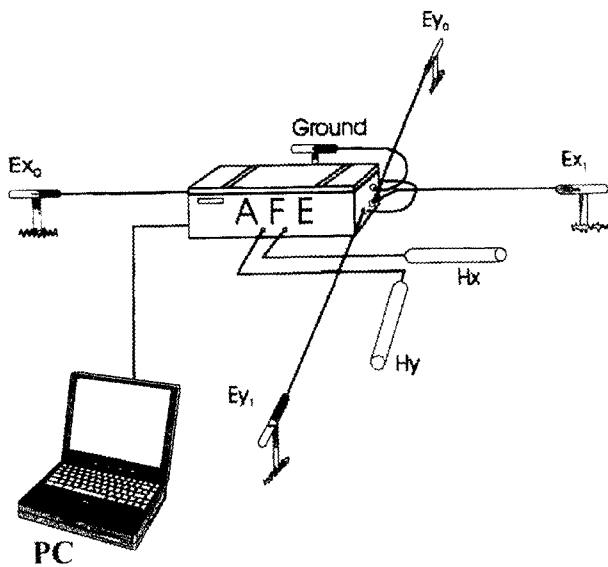


Fig. 2. Diagram of high-frequency magnetotelluric field set-up (modified after Shon *et al.*, 1999b). AFE (analog front end) is for amplifying, filtering, and A/D converting. Electric fields are detected by measuring the differential voltage between two electrodes:  $E_{x_0}$  and  $E_{x_1}$  for the x-direction electric field. Magnetic fields are measured by two perpendicular magnetic sensors.  $H_x$  is a magnetic sensor in the direction of x. PC is a notebook personal computer for data acquisition and digital signal processing.

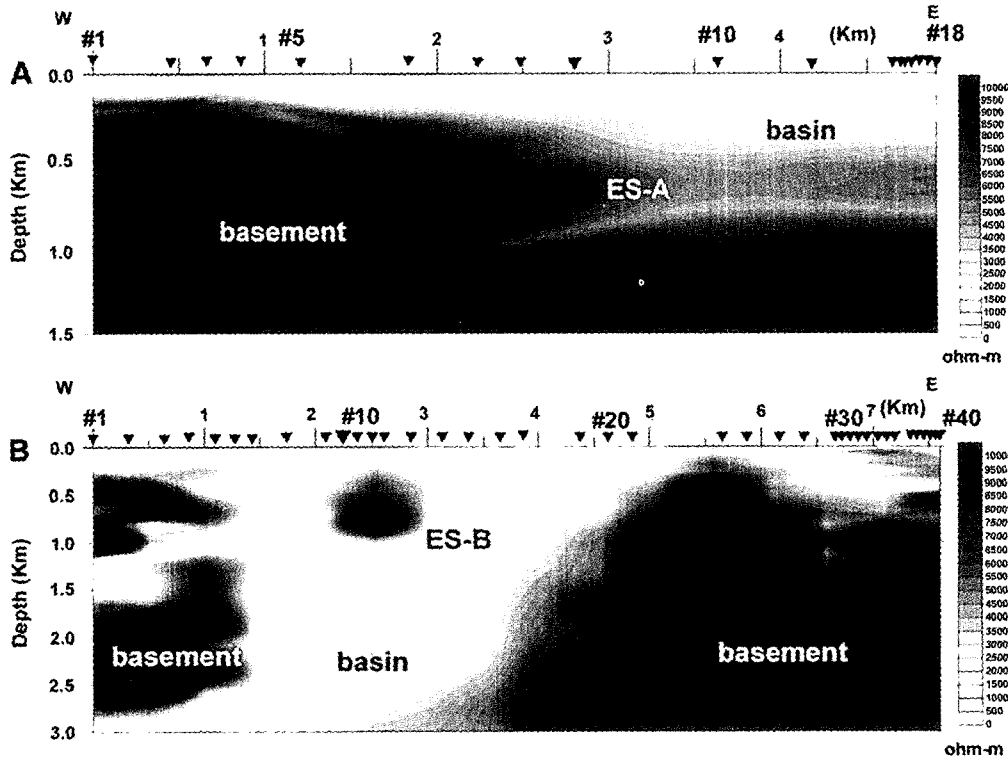


Fig. 3. Two-dimensional resistivity cross-sections, constructed from TM mode (cross-basin lines ES1 and ES2 in Fig. 1). Dark-gray tones (high electrical resistivity: >5,000 ohm-m) indicate basement rocks of granite (Jurassic) and gneiss (Precambrian); pale-gray tones (low resistivity: <5,000 ohm-m) represent sedimentary rocks of conglomerate, sandstone, and mudstone; bright-tone areas, concentrated in the upper part of the profiles, exhibit a groundwater reservoir in the basin fill. Maximum depth of the basin is ~ 700 m deep in ES1 (A), whereas it is ~4 km deep in ES2 (B). There is a significant change in basin thickness (~3 km) between the two lines which are only ~ 4 km apart (Fig. 1).

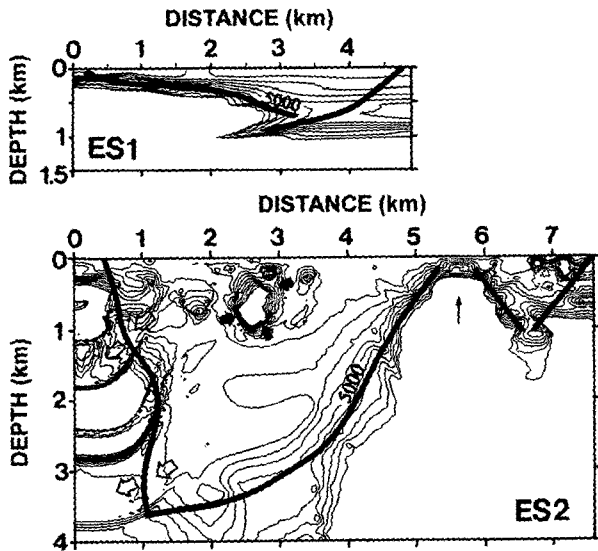


Fig. 4. Calculated TM mode pseudosections of the recording cells in sections ES1 and ES2. Note two basins in section ES2 (a main basin and a subbasin). In the main basin, the basement shows a high slope gradient in the western part and a relatively low gradient in the eastern part. A subbasin in the east occurs as a graben-type depression to a depth of 1 km. Thin arrow indicates a basement high in the central-eastern part. Open arrows indicate low-resistivity areas in the western part, and solid arrows indicate circled blocks of high resistivity in the upper part. 5000 indicates a contour line of 5,000 ohm-m resistivity.

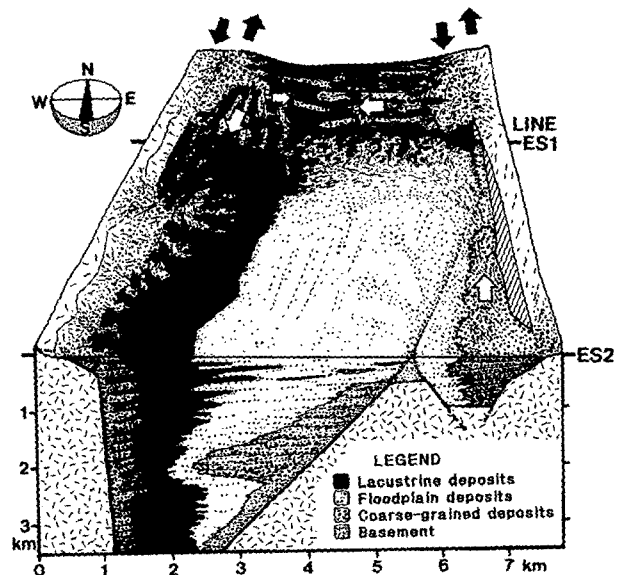


Fig. 5. Reconstructed basinal form and filling model for Eumsung Basin. Coarse-grained alluvial systems in the northeast converge into an axial channel system in the northwestern part of the basin. The axial channel system on the west progressed southward, interlayered with dark-gray mudstone beds of lacustrine origin. Solid arrows indicate transtensional faulting with left-slip motion; open arrows show dominant directions of sediment transport.

준다. 이러한 하도계는 호수면이 상대적으로 안정적이었던 남쪽 호소환경의 퇴적 중심부 방향으로 발달하였다 (그림 5).

단면 ES2 (그림 4)에서는, 두 개의 분지가 존재하는데, 서쪽 경계부에서 중앙부까지 보여지는 주분지 (main basin)와 동쪽 경계부의 부분지 (subbasin)이다. 주분지에서, 기반암의 최대 깊이는 약 4 km이며, 서쪽에서는 급한 경사를 보이고 동쪽에서는 상대적으로 완만한 경사를 보인다. 서쪽 경계부의 낮은 비저항 지역 (open arrows, 그림 4)은 퇴적후 단계에서 주향이동 압축 (transpression)의 결과로 해석된다. 단면 상부 (solid arrows, 그림 4)에서 높은 비저항값을 보이는 원형 모양의 고립된 지역은 퇴적후 또는 퇴적동시 화산성 관입암으로 해석된다. 동쪽 경계부의 부분지는 남동 분지경계 단층의 연장으로서 약 1 km 깊이의 지구형태 (graben-type)의 함몰구조로 형성되어 있다. 높은 기반암 지역 (thin arrow, 그림 4)은 아마도 남동쪽 퇴적계의 조립질 퇴적물이 서쪽으로 운반되는 것을 막는 장애물 역할을 했을 것이다. 이러한 남동 퇴적계는 분지 경계 단층을 따라 북쪽으로 발달하는데, 이러한 해석은 북쪽 방향으로 전개되는 고수류 자료와 퇴적상 전이 자료에 근거한다 (Ryang and Chough, 1997a) (그림 1, 5). 남북 약 4 km 거리에서 (단면 ES1과 ES2 사이), 분지기반암 깊이의 급격한 변화 (약 3 km 차이)는 전형적인 인리형 분지에서 급격히 침강하는 중간블록의 특징으로 해석된다. 또한 동서 방향으로 비대칭적인 모양을 보여주는 분지형태는, 북부 분지축축 하도계가 분지 서쪽 편으로 치우쳐 남쪽 방향으로 전개되는 과정에 영향을 미쳤을 것이다 (그림 1, 5).

## 토 론

1990년대 초반 이후, 전통적인 자기지전류 탐사는 저주파 대역을 이용하여 주로 암석권 (lithosphere) 규모 (~40 km 깊이)의 연구에 사용되었다 (예, 조산대의 전기비저항값의 영상화, Jones *et al.*, 1993). 최근에는 상대적으로 높은 주파수 대역 (0.003-40 Hz)를 이용한 자기지전류 탐사가 수 킬로미터 깊이의 단층구조를 파악하는데 응용된 바 있다 (Unsworth *et al.*, 1997). 또한 새롭게 개발된 고주파수 자기지전류 탐사방법은 육상 분지구조의 뚜렷한 형태를 파악하는데, 심부 반사법 탄성과 탐사와 비교하여 상대적으로 적은 탐사비용과 쉬운 현장 탐사진행이 가능하다. 이러한 탐사법은 두꺼운 현무암으로 피복된 서 그린란드 (west Greenland) 인리형 분지 (백악기-제 3기 초기)의 석유탐사에서도 적은 비용으로 성공적으로 적용된 바 있다 (T. Tankard, pers. commun., 1999). 또한, 중국, 인도의 육상 분지들의 석유탐사에 고주파수 자기지전류 탐사법이 널리 적용되고 있다 (S. Lee, pers. commun., 1999). 본 연구에서는 지표 퇴적학적 연구결과와 함께 종합적으로 해석된 고주파수 자기지전류 탐사 (10-10<sup>5</sup> Hz) 결과를 인리형 분지의 분지충진 과정을 해석하는데 응용하였다.

음성분지에서, 두 개의 자기지전류 탐사축선은 분지 북부 (ES1)와 중부 (ES2) 깊이에 뚜렷한 차이 (~3 km)를 보인다. 우세한 지표 퇴적상이 북부의 조립질에서 남쪽의 이암과 같은 세립질 암상으로 변이하는 양상과 남쪽 방향을 가리키는 고수류 방향 등은 분지 북부 퇴적계의 남쪽 전개로 해석된다. 게다가 두 개의 단면

은 인리형 분지 열개 과정에서 침강하는 중간블록 (단면 ES2)과 부수되는 단층 운동에 따른 퇴적계 전개를 보여준다. 서쪽-중앙 부분 (단면 ES2, 그림 4)에서 분지축축 방향의 단층은 분지형성 초기의 주 단층의 이동을 감당하였을 것으로 해석된다. 최근의 인리형 분지 진화에 대한 모래상자 축소 모형에서 제시된 바와 같이 (McClay and Dooley, 1995), 분지축축을 가로지르는 주 단층 (longitudinal cross-basin faults)이 음성분지에서도 분지형성과 침강 과정에서 주요한 역할을 했을 것으로 해석된다. 다른 한편의 남동부 소규모 부분지는, 분지형성 후기에 주분지 확장의 결과, 형성된 것으로 해석된다 (그림 5).

새로운 고해상 자기지전류 탐사는 분지충진층의 2차원 구조를 효과적으로 파악하고, 주향이동분지의 역동적인 퇴적과정의 모형을 종합하는데 매우 유용한 것으로 판단된다. 다만, 자기지전류 탐사방법의 단점은 지하 구조와 퇴적충진층의 영상을 흐리는 인위적인 고전압 전기잡음에 취약하다는 점이다.

## 결 론

고해상 자기지전류 영상화는 백악기 음성분지의 지하 구조를 3차원적으로 해석하는데 이용되었다. 단면자료는 중간블록의 급격한 침강이 수반되는 인리형 열개작용과 비대칭적인 분지 확장, 남동부의 부분지 형성 등의 과정이 분지 형성에 작용하였다는 것을 제시한다. 비대칭적인 암상분포, 층적-호소계의 퇴적상 변이와 고수류 방향에 대한 지표 자료와 함께, 종합적으로 해석된 고해상 자기지전류 비저항 단면자료는 분지형성과 분지충진 과정을 이해하는데 큰 도움을 주었다. 석유탐사와 분지해석을 위해, 고해상 자기지전류 탐사방법은 고비용의 부담이 큰 육상 탄성과 반사법 탐사의 유용한 대안이 될 수 있다.

## 감 사

논문작성 과정에서, 자기지전류 자료 제공과 함께 많은 토론을 해 주신 조성권, 손호웅, 김지수, 이승희 박사님들께 깊이 감사드립니다. 본 논문은 한국과학재단 국내 박사후 과정 지원 기간 (1998-1999) 중에 작성되었다.

## 참고문헌

- 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 1999a. 지반환경물리탐사. 시그마프레스, 716p.
- 손호웅, 윤혜수, 오진용, 1999b. 전기, 전자탐사에 의한 경주남부 (일실지역)의 울산단층 심부 구조. 자원환경지질 32, 161-167.
- 송무영, 이창진, 이계용, 1990. 음성-중평 및 공주 부근의 중생대 퇴적분지에 대한 지구조 종합연구 (I. 음성-중평 부근). 한국지구과학회지 11, 1-12.
- 정상원, 1987. 중평-음성지역의 백악기 퇴적분지 북부지역의 지질구조 연구. 서울대학교 석사학위논문, 68p.
- 최성자, 김복철, 전희영, 김유봉, 1995. 음성분지 초평층 (백악기)의 유조화석. 지질학회지, 31, 523-528.
- 최영섭, 1996. 음성분지의 지구조운동 연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문, 159p.

- Aydin, A. and Nur, A., 1982. Evolution of pull-apart basins and their scale independence. *Tectonics* 1, 91-105.
- Bostick, F. X., Jr., 1986. Electromagnetic array profiling. Expanded abstracts of the 56th Ann. International Mtg., Soc. Explor. Geophys., Houston, Texas, 60-61.
- Christie-Blick, N. and Biddle, K.T., 1985. Deformation and basin formation along strike-slip faults. In: Biddle, K.T. and Christie-Blick, N. (Editors), Strike-Slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ.* 37, 1-34.
- Christopherson, K.R., 1998. MT gauges Earth's electric fields. *AAPG Explorer* 19, 22-25.
- Christopherson, K.R., 1999. MT data throws curves to viewers. *AAPG Explorer* 20, 28-31.
- Chun, S.S. and Chough, S.K., 1992. Tectonic history of Cretaceous sedimentary basins in the southwestern Korean Peninsula and Yellow Sea. In: Chough, S.K. (Editor), Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Seas. *Korean Sedimentology Res. Group Spec. Publ.* 1, 60-76.
- Constable, S.C., Orange, A.S., Hoversten, G.M. and Morrison, H.F., 1998. Marine magnetotellurics for petroleum exploration, part I: a sea-floor equipment system. *Geophysics* 63, 816-825.
- Crowell, J.C., 1974. Origin of late Cenozoic basins in southern California. In: Dickinson, S.K. (Editor), Tectonics and Sedimentation. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ.* 22, 190-204.
- Crowell, J.C., 1982. The tectonics of Ridge Basin, southern California. In: Crowell, J.C. and Link, M.H. (Eds.), Geologic History of Ridge Basin, Southern California. Pacific Section, Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Los Angeles, 25-41.
- Csato, I., Kendall, C.G.St.C., Nairn, A.E.M. and Baum, G.R., 1997. Sequence stratigraphic interpretations in the southern Dead Sea basin, Israel. *Geol. Soc. Am. Bull.* 108, 1485-1501.
- Doblin, M.B. and Savit, C.H., 1988. Introduction to Geophysical Prospecting. McGraw-Hill Book Company, New York, 867p.
- Hoversten, G.M., Morrison, H.F. and Constable, S.C., 1998. Marine magnetotellurics for petroleum exploration, part II: numerical analysis of subsalt resolution. *Geophysics* 63, 826-840.
- Inman, J.R., 1975. Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics* 40, 798-817.
- Jones, A.G., 1988. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. *Geophysics* 53, 967-978.
- Jones, A.G., Craven, J.A., McNeice, G.W., Ferguson, I.J., Boyce, T., Farquarson, C. and Ellis, R.G., 1993. North American Central Plains conductivity anomaly within the Trans-Hudson orogen in northern Saskatchewan, Canada. *Geology* 21, 1027-1030.
- Kim, J.H., Lee, J.Y. and Kee, W.S., 1994. Structural evolution of the Cretaceous Puyo Basin, Korea. *J. Geol. Soc. Korea* 30, 182-192.
- Kim, J.S., Shon, H., Ryang, W.H. and Chough, S.K., 1998. Electrical resistivity and MT imaging in the northern-middle part of Eumsung Basin (Cretaceous), Korea. *Geoscience J.* 2, 206-219.
- Mann, P., Hempton, M.R., Bradley, D.C. and Burke, K., 1983. Development of pull-apart basins. *J. Geol.* 91, 529-554.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *The Island Arc* 6, 121-142.
- May, S.R., Ehman, K.D., Gray, G.G. and Crowell, J.C., 1993. A new angle on the tectonic evolution of the Ridge basin, a strike-slip basin in southern California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 105, 1357-1372.
- McClay, K. and Dooley, T., 1995. Analogue models of pull-apart basins. *Geology* 23, 711-714.
- Nichols, E.A., Morrison, H.F. and Lee, S., 1994. Controlled source magnetotellurics for groundwater. Abstracts of the 64th Annual Meeting, Soc. Explor. Geophys., Los Angeles, California, 553-554.
- Nilsen, T.H. and Sylvester, A.G., 1995. Strike-slip basins. In: Busby, C.J. and Ingersoll, R.V. (Editors), Tectonics of Sedimentary Basins. Blackwell Scientific Publications, Cambridge, 425-457.
- Palacky, G.J., 1987. Resistivity characteristics of geologic targets. In: Nabighian, M.N. (Editor), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa, Oklahoma, *Soc. Explor. Geophys.* 1, 53-129.
- Ryang, W.H., 1998. Sedimentology of the Eumsung Basin (Cretaceous), Korea. PhD. thesis, Seoul National University, 125p.
- Ryang, W.H. and Chough, S.K., 1997a. Sequential development of alluvial/lacustrine system: southeastern Eumsung Basin (Cretaceous), Korea. *J. Sediment. Res.* 67, 274-285.
- Ryang, W.H. and Chough, S.K., 1997b. Sedimentation patterns of alluvial-to-lacustrine systems in stepover basin: southern Eumsung basin (Cretaceous), Korea. In: Lee, Y.I. and Kim, J.H. (Editors), Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent. Geol. Soc. Korea, Seoul, Korea, 258-263.
- Ryang, W.H. and Chough, S.K., 1999. Alluvial-to-lacustrine systems in a pull-apart margin: southwestern Eumsung Basin (Cretaceous), Korea. *Sediment. Geol.* 127, p. 31-46.
- Ryang, W.H., Chough, S.K., Kim, J.S., and Shon, H., 1999. Three-dimensional configuration of a pull-apart basin from high-resolution magnetotelluric profiling: Eumsung Basin (Cretaceous), Korea. *Sediment. Geol.* 129, p. 101-109.
- Swift, C. M., 1986. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. In: Vozoff, K. (Editor), Magnetotelluric Methods. Tulsa, Oklahoma, *Soc. Explor. Geophys. Reprint Ser.* 5, 156-171.
- Torres-Verdin, C. and Bostick, F.X., Jr., 1992. Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotellurics: electromagnetic array profiling (EMAP). *Geophysics* 57, 603-622.
- Unsworth, M.J., Malin, P.E., Egbert, G.D. and Booker, J.R., 1997. Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California. *Geology* 25, 359-362.
- Vozoff, K., 1991. The magnetotelluric method. In: Nabighian, M.N. (Editor), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa, Oklahoma, *Soc. Explor. Geophys.* 2B, 641-711.