

백악기 음성분지의 퇴적학적 연구

양 우현¹⁾, 조 성권¹⁾, 김 지수²⁾, 손 호웅³⁾

- ¹⁾ 서울대학교 해양학과, 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1
²⁾ 충북대학교 지구환경과학과, 충청북도 청주시 흥덕구 개신동 산 48
³⁾ 배재대학교 자원환경공학과, 대전광역시 서구 도마동 439-6

서론

주향이동분지 해석의 문제점

퇴적분지해석 (basin analysis)의 대상에는 분지형성, 퇴적물에 의한 분지충진과 퇴적층의 전개 과정 등이 포함된다 (Allen and Allen, 1990). 퇴적분지 내에 보존된 퇴적층은 분지형성과 퇴적 과정을 가장 잘 반영하므로, 이러한 퇴적층의 전개에 대한 이해와 예측은 성공적인 분지해석의 열쇠이다. 또한 석유·가스개발의 측면에서, 퇴적층에 대한 모든 정보는 결국 석유·가스 등이 퇴적층 내에서 생성되고, 이동하고, 저류되므로 가장 중요하게 다루어진다.

특히 전지구상에 가장 흔히 분포하며, 모든 지구조적 환경에서 쉽게 생성되고, 방대한 석유자원을 저장한 것으로 알려진 주향이동분지 (strike-slip basin)의 퇴적층은 주요한 연구대상이다 (Biddle, 1991). 지금까지 알려진 주향이동분지를 특징짓는 퇴적학적 연구결과는 기반암과 퇴적암 내 역들의 기원지 불일치, 급격한 퇴적상 변화, 한쪽으로 치우친 퇴적계 발달 등이 있었다 (Reading, 1980; Christie-Blick and Biddle, 1985). 그러나 많은 연구와 많은 논란에 비해, 퇴적층에 근거한 주향이동분지 해석에 대한 성과가 크지 않다. 이는 주향이동분지 자체가 매우 복잡한 형성과정을 거치며 매우 다양한 형태로 보존된다는 점에 기인한다 (Nilsen and Sylvester, 1995).

이러한 연구 상황에서, 본 연구는 퇴적학적 분지해석의 새로운 접근법을 제시하고자 한다. 그것은 퇴적분지를 규정짓는 분지 분류의 틀로 퇴적체의 전개를 이해하는 것이 아니라, 퇴적층 자체의 특징과 분지경계의 특성에 근거하여 퇴적체의 전개를 이해하고 예측하자는 것이다 (Fig. 1). 이는 최근 퇴적분지내 퇴적층에 대한 실질적 이해를 담보하는 새로운 퇴적분지 분류의 요구 (e.g., Dickinson, 1993)에 부응하는 것일 뿐만 아니라, 석유개발의 과정에서 필연적으로 거치게 되는 퇴적학적 분지해석의 과정을 효율적으로 수행할 수 있는 좋은 도구가 될 것이다.

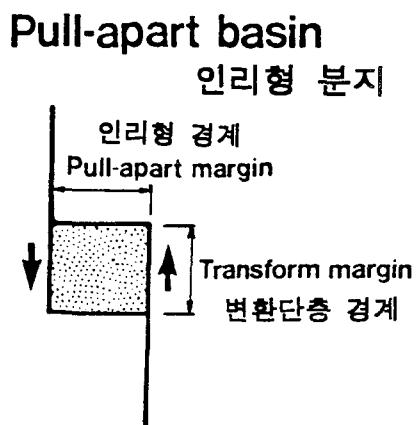


Fig. 1. Schematic geometry of pull-apart basin comprising two marginal settings of transform and pull-apart.

음성분지연구의 장점

이러한 연구 목적을 위해서는 퇴적분지의 형성과정과 퇴적층의 충진과정에 대한 종합적이며 자세한 지질학적, 퇴적학적 연구와 지구물리학적 심부조사가 선행되어야 한다. 한반도 중부지방에 존재하는 백악기 음성분지는 새로운 퇴적학적 분지해석을 수행하기에 유리한 조건을 가지고 있다. 분지의 원래모양과 분지충진층이 심각한 퇴적후 교란이 없이 상대적으로 양호하게 보존되어 있어서, 지표지질, 항공사진, 인공위성 (Landsat), 심부지구물리 조사결과 자료 등을 해석하는데 용이하다. 퇴적학적 조사를 위해서는 퇴적상, 고수류방향, 역성분, 역크기 변화 분석 등을 포함하는 자세한 퇴적층 분석을 수행하였고, 심부분지해석을 위해서는 육상 분지해석을 위해 최근에 개선되고 있는 자기지전류 조사 (Magnetotelluric survey)를 실시하고 해석하였다. 이러한 자료에 근거한 음성분지 형성과 퇴적층 발달의 퇴적모델은 석유·가스 개발을 위한 전략 수립에 도움이 될 것이다.

지구조와 지질학적 배경

백악기 음성분지 ($\sim 7 \times 33 \text{ km}^2$)는 북동-남서 방향의 주향이동단층이 활동하던 지구조 배경에서 형성된 인리형분지 (pull-apart basin)이다 (Fig. 2). 분지 기반암은 서쪽으로 쥬라기 화강암, 동쪽으로 선캄브리아기 편마암과 화강편마암으로 주로 구성되어있다. 분지의 모든 경계부에는 슈도타킬라이트 (pseudotachylite)를 포함하는 폭 50-100 미터의 카타클라사이트 (cataclasite)와 마이크로브래취(microbreccia) 등이 존재하며, 분지 북동부 일부 경계에는 마일로나이트대 (mylonite zone)가 포함된다 (최영섭, 1996).

신장된 마름모꼴을 보이는 음성분지는 분지 경계부에서 충적선상지와 하천계의 조립질 퇴적물을 보이는 반면, 분지 중앙부는 주로 범람원과 호소계의 세립질 퇴적물로 구성되어있다 (Fig. 2). 분지내 퇴적체 (> 8 km 층서두께)는 화산암, 역암, 역암/적색이암, 적색이암, 녹색-회색이암/회색사암, 녹색이암과 진회색이암 등의 7개 퇴적단위로 나뉜다 (Fig. 2). 분지 내의 화산활동은 분지형성 초기부터 분지형성 이후까지 분지 발달과정에서 단속적으로 계속된 것으로 추정된다. 또한 다양한 화석자료인, 식물 (Conifers와 Ginkgoales), 무척추동물 (estherids)과 윤조류 미화석 (charophyta microfossils) 등은 온난한 기후환경과 담수호소환경을 지시한다 (송무영 외, 1990). 특히, 분지 남부 녹색이암층에 보존된 윤조류 화석은 Hauterivian-Aptian (약 110-120 Ma) 시기로 동정된다 (최성자 외, 1995).

남동 퇴적계

분지 남동부의 퇴적작용은 분지경계를 따라 연속적으로 쌓인 두개의 퇴적층군인 두타산 퇴적층과 베르재 퇴적층에 의해 특징지워진다. 이들은 시간연장 연속면/불연속면과 하도와 범람원 퇴적체의 구성퇴적상 조합에 근거하여 나뉜다. 하부층인 약 1.2 km 두께의 두타산 퇴적층은 분지중앙부로 가면서 리본모양의 하도충진 구성퇴적상에서 적색이암 내에 포함된 판상의 구성퇴적상으로 변화하는 반면, 상부층인 약 1 km 두께의 베르재 퇴적층은 중첩하여 퇴적된 하도충진 구성상과 드물게 협재하는 적색이암층에 의해 특징지워진다. 이러한 퇴적층의 변화는 남동부 분지

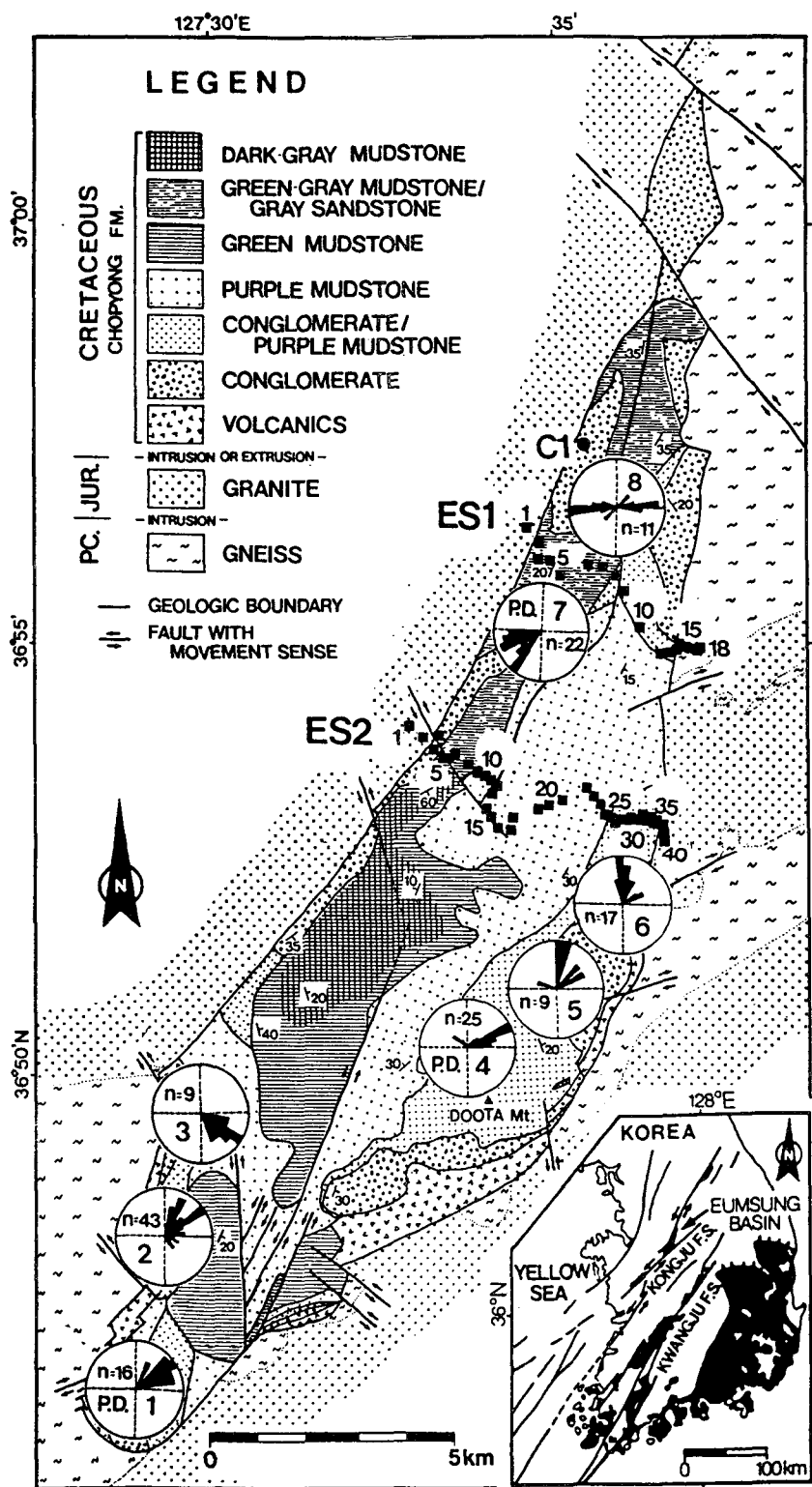


Fig. 2. Geologic map of the Eumsung Basin with magnetotelluric recording sites (solid squares), paleoflow direction data (rose diagrams), and coring site (solid circle C1, ~ 250 m deep). Magnetotelluric profiles ES1 and ES2 comprise 18 and 40 sites, respectively. Inset represents distribution of Cretaceous basins and fault patterns in the Korean Peninsula.

형성과정을 반영하는데, 좌수향으로 활동한 주향이동단층 변환경계 (transform margin)에서의 퇴적작용을 잘 반영한다 (Ryang and Chough, 1997a).

남서 퇴적계

분지 남서부의 퇴적작용은 분지경계에서 중앙부로 발달하는 세 개의 퇴적층인 오창 (~ 1.5 km 두께), 배티 (~ 1 km 두께)와 구곡리 (~ 0.5 km 두께) 퇴적층에 의해 특징지워진다. 이들은 분지경계에 따른 상세한 지질도 작성과 전반적인 퇴적상 변화에 근거하여 나뉘지는데, 분지경계에서 화산암역이 우세한 충적선상지 환경이 분지 중앙부로 이동하면서 충적평원과 하천계, 호소 환경으로 변화하는 퇴적상을 보여준다. 이러한 일련의 충적-호소 퇴적환경의 변화는 남서부 분지경계와 수직방향으로 진행되었으며, 이는 분지 남동부의 퇴적작용과 다른 양상이다. 이렇게 대비되는 퇴적양상은 인리형분지 형성과정에서 인리형 경계 (pull-apart margin)에서의 퇴적작용을 반영하는 결과로 해석된다 (Ryang and Chough, 1997b).

중·북부 퇴적계

자기지전류 자료 (Magnetotelluric data)

원리: 천둥·번개에 의해 교란된 지구 둘레 이온층의 전자파가 지각을 투과한 후 반사되어 온 전기장 및 자기장을 측정하여 지하매질의 전기 비저항치를 측정한다 (Vozoff, 1991). 초기에는 낮은 주파수 대역을 이용하여 심부지각 단위 (> 40 km 두께)의 연구에 응용하였고, 최근에는 높은 주파수 대역을 이용하여 천부지각 단위 (< 4 km 두께)의 연구에 응용하고 있다 (IMAGEM; Electromagnetic Instruments, Inc.) (Nichols et al., 1994). 본 연구의 이용주파수 대역은 10 ~ 100,000 Hz이며 투과 깊이는 아래와 같은 수식으로 표현된다.

$$d \approx 500\sqrt{\rho/f} \quad (d, \text{skin depth}; \rho, \text{electrical resistivity}; f, \text{frequency})$$

분지의 전체적인 단면을 파악하기 위해 2개 축선의 자기지전류 (Magnetotelluric: MT) 탐사를 수행하였다 (Fig. 2). 가탐심도 약 4 km의 고해상도 자기지전류 탐사결과는 분지 북부의 깊이가 약 1 km, 중부는 약 4 km임을 보여주는데 (Fig. 3), 이는 인리형분지의 특징으로 분지가 양쪽방향으로 열개하면서 분지 중앙부가 깊어지는 분지형성과정을 반영한다. 분지경계 단층의 특성은 분지의 서쪽경계에서는 80-90° 각도를 보이는 급한 경사의 분지단층을, 동쪽경계에서는 35-45°의 상대적으로 완만한 경사의 분지기저부를 보여준다. 또한 남동부에 폭 ~ 2 km의 부분지 (sub-basin)의 존재를 확인할 수 있다 (Fig. 3).

퇴적계 분석

분지 북부의 퇴적작용은 서쪽과 동쪽 경계에서 각각 발원한 퇴적체들이 상호교호하는 양상을 특징으로 한다. 특히, 분지 중앙부의 진회색이암층 내에는 두께 1-2 미터의 판상 또는 리본 모양의 역질사암층이 우세하게 교호한다. 분지 북서부에서는 분지종축 방향으로 발달하는 퇴적계의 존재를 확인할 수 있다. 북서쪽 역암체에서 시추한 225 미터 코어 자료는 상당한 깊이까지 존재

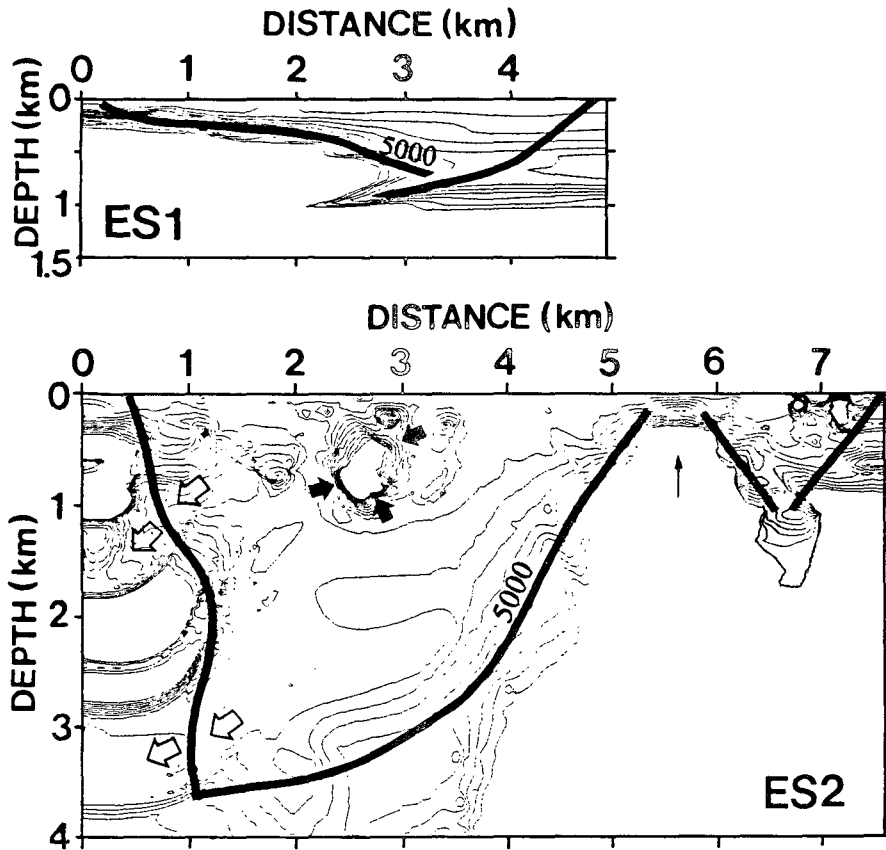


Fig. 3. Calculated pseudosections of the recording cells in sections ES1 and ES2. Note two basins in section ES2: main basin in the west to center and subbasin in the east. In the main basin, the basement shows a high slope gradient in the western part, whereas a relatively low gradient in the eastern part. Thin arrow indicates basement high in the central-eastern part. Subbasin in the east occurs as a graben-type depression at the depth of 1 km. Open arrows indicate low-resistivity areas in the western part, and solid arrows indicate circled blocks of high resistivity in the upper part.

하는 역암을 보여준다 (시추위치는 Fig. 2에 C1 지점). 고수류 방향과 퇴적상 변화에 근거한 퇴적계 발달은, 주로 북동 경계에서는 서쪽 방향으로 층적선상지, 하천계, 호소 환경으로의 퇴적상 변이가 추정되는 반면, 북서 경계에서는 선상지-삼각주에서 호소 퇴적환경으로 급변하는 퇴적양상을 보여준다. 특히, 한테재 주변의 3차원 노두에서는 퇴적계가 남서쪽으로 변이해 가는 양상을 잘 보여준다. 이러한 북서부와 북동부의 퇴적작용이 다르게 발달하는 특징은 지구물리자료에서 확인된 분지 서쪽의 급격한 경사면과 동쪽의 상대적으로 완만한 경사면을 잘 반영하는 퇴적양상으로 해석된다.

음성분지 퇴적층의 형성과정

전반적인 음성분지의 퇴적작용은 구조적 요인인 인리형분지 형성과정을 반영하는 퇴적체의 분포와 발달양상을 잘 보여준다. 분지 남부에서는 분지 남동부의 변환단층 경계와 남서부의 인리형 경계에 따른 특징적인 퇴적양상을 각각 보여주며, 분지 북부에서는 양쪽 분지 경계에서 비대칭적인 분지기저부의 발달에 따른 퇴적체의 교호와 변이 양상을 보여준다 (Fig. 4). 또한 자기지전류 자료는 인리 작용에 의해 급격히 침강된 분지의 중앙부를 보여주는데, 이는 각 분지경계를 따라 남북 방향으로 발달된 퇴적체 양상을 잘 설명해 준다 (Fig. 4). 퇴적체의 전반적인 발달 방향은 좌수향 주향이동단층의 활동 결과로 해석된다.

연구결과

퇴적분지 해석과 퇴적층 전개의 예측 가능성

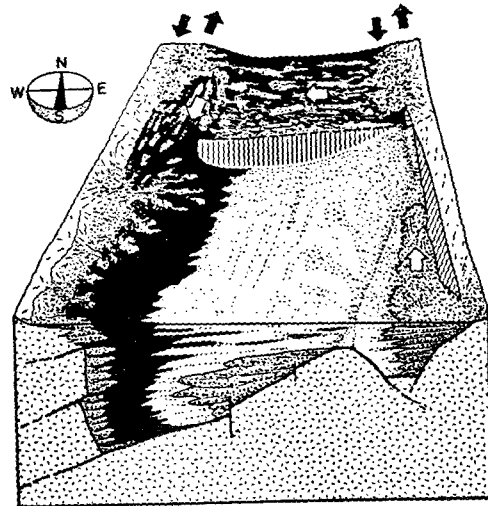
1. 퇴적층의 특징에 근거해서 퇴적분지 전체를 규정하는 것이 아니라, 일단 퇴적분지의 경계가 어떤 특성인가를 규명한다.
2. 이러한 각 분지경계의 퇴적층에 대한 퇴적학적 연구를 거친후, 다른 여러 자료들과 함께 종합해서 분지를 해석한다.
3. 퇴적층 전개의 예측을 위해서는 퇴적분지경계의 특성에 대한 이해와 퇴적상 변이, 역성분 차이에 근거한 불연속면 추적이 필요하다.
4. 육성 퇴적층의 순차층서적 해석은 분지발달 모델의 이해가 전제되어야 한다.

백악기 음성분지의 석유·가스 부존 가능성

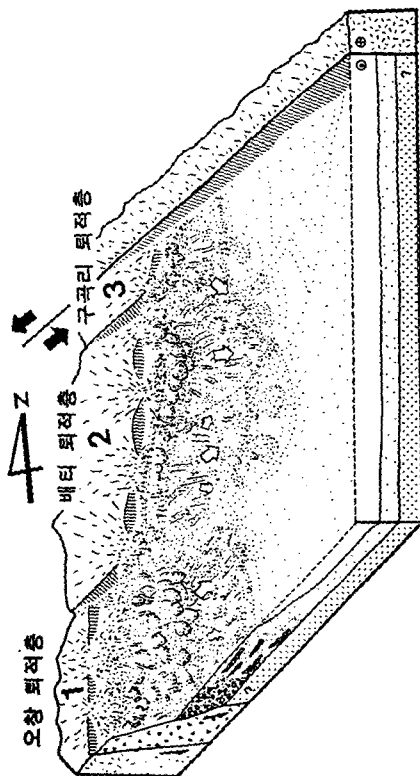
1. 최대 분지 깊이: ~ 4 km.
2. 근원암: 호소기원의 흑색이암 - 주로 분지 서쪽에 분포.
3. 저류암: 역질사암 또는 역암 - 하도층진층 또는 선상지.
4. 저류구조: 탄성과 탐사를 포함하는 정밀탐사 필요.



음성분지의 퇴적모델 (중북부 퇴적계)



남서 퇴적계의 발달모델



남동 퇴적계의 발달모델

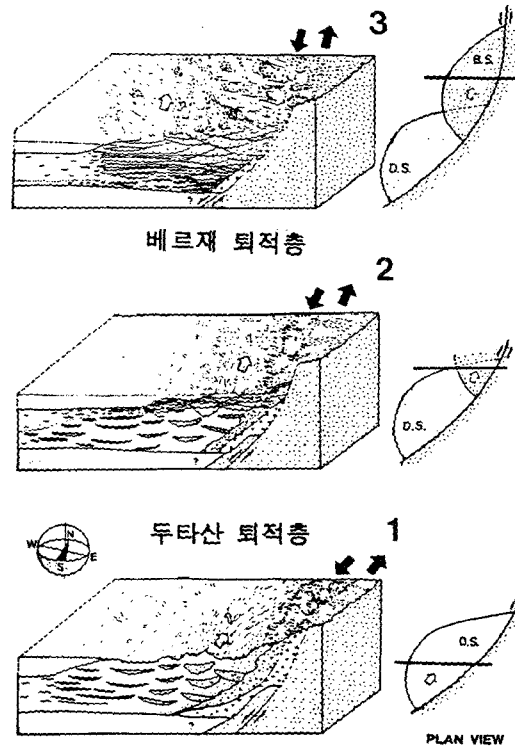


Fig. 4. Basin formation and filling models of the Eumsung Basin.

참고문헌

- 송무영, 이창진, 이제용, 1990, 음성-중평 및 공주 부근의 중생대 퇴적분지에 대한 지구조 종합연구 (I. 음성-중평 부근). 한국지구과학회지 11, 1-12.
- 최성자, 김복철, 전희영, 김유봉, 1995, 음성분지 초평층 (백악기)의 운조화석. 지질학회지, 31, 523-528.
- 최영섭, 1996, 음성분지의 지구조운동 연구. 서울대학교 대학원 이학박사 학위논문, 159p.
- Allen, P.A. and Allen, J.R., 1990, Basin Analysis. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 451p.
- Biddle, K.T., 1991, Active Margin Basin. American Association of Petroleum Geologists Memoir 52, Tulsa, 324p.
- 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. *SEPM Special Publication 37*, 1-34.
- Dickinson, W.R., 1993, Basin geodynamics. *Basin Research*, 5, 195-196.
- Nichols, E.A., Morrison, H.F., and Lee, S., 1994, Controlled-source magnetotellurics for groundwater. Abstracts of the 64th Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 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 Science, Cambridge, 425-457.
- Palacky, G.J., 1987, Resistivity characteristics of geologic targets. In: Nabighian, M.N., (Editors), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 1, 53-129.
- Reading, H. G., 1980, Characteristics and recognition of strike-slip fault systems. In: Ballance, P.F. and Reading, H.G., (Editors), Sedimentation in Oblique-slip Mobile Zones. *International Association of Sedimentologists Special Publication 4*, 7-26.

Ryang, W.H. and Chough, S.K., 1997a, Sequential development of alluvial/lacustrine system: southeastern Eumsung Basin (Cretaceous), Korea. *Journal of Sedimentary Research*, 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. The Geological Society of Korea, 258-263 (Abstract).

Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, In: Nabighian, M.N., (Editors), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 2, 641-711.