

한반도 동남부 제3기 마이오세 어일분지내 동지형 화산합몰구조

손 문 · 김인수 · 옥수석¹

부산대학교 지질학과, ¹경성대학교 물리학과

A Nested Cauldron Structure in the Tertiary Miocene Eoil Basin, Southeastern Korea

Moon Son, In-Soo Kim and Soo-Seok Ock¹

Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

¹Department of Physics, Kyungseong University, Pusan 608-736, Korea

요약: 한반도 동남부 마이오세 어일분지내 화산 분출 양식을 파악하기 위하여 지질, 지질구조 그리고 위성 사진을 종합적으로 분석하였다. 동해가 확장하는 동안 북북서 방향의 우수향 전단력에 의해 북서-남동방향으로 확장된 어일분지는 지질구조와 층전물의 암상 및 연령을 근거로 북동과 남서 소분지로 구분된다. 북동 소분지에는 주로 현무암질 용암류 및 화산쇄설물이 그리고 남서 소분지에는 화산물질을 포함하지 않은 해성 퇴적물이 분포한다. 북동 소분지에는 특징적으로 주요 정단층을 따라 퇴적동시성 향사구조와 배사구조가 반복되며 단층과 멀어지면 습곡구조는 동사구조로 바뀐다. 주요 향사구조의 축부를 중심으로 두꺼운 용암류가 분포하며 그 상위에 화산집괴암 그리고 호성 퇴적층이 원형으로 분포한다. 위성사진에는 네 곳에서 원형구조들이 관찰되는데 이 구조들은 정단층에 인접하여 평행하게 발달하며 주요 향사구조의 축부 그리고 화산집괴암과 호성 퇴적층의 분포지와 일치한다. 이러한 사실들은 북동 소분지에는 주요 정단층을 통로로 하는 열하분출형의 현무암질 화산활동이 있었으며 특히, 현재 향사구조가 형성된 지점에서 화산활동이 보다 활발하였음을 시사한다. 활발한 화산활동은 뒤이어 보다 깊은 침강의 원인이 되었으며 이 때문에 정단층 인접부에는 현저한 차별 침강과 함께 퇴적동시성 습곡구조가 형성되었다. 따라서 북동 소분지에는 정단층을 따라 분출시키는 갈으나 축방으로는 차별적이고 다발적인 화산활동이 발생하였으며 그 결과로 일종의 동지형 화산합몰구조가 형성되었다. 이러한 화산활동은 어일분지 북동 소분지를 용암 호수로 만들기도 했으며 용암 유출 후에는 합몰 호수를 만드는 등의 분지충진과 퇴적활동을 제어하였다.

핵심어: 어일분지, 현무암질 화산활동, 퇴적동시성 습곡, 원형구조, 동지형 화산합몰구조

Abstract: The combination of geological, structural and satellite image studies is used to make an examination of the Miocene eruptive type in the Eoil Basin, SE Korea. The basin subsided by the NW-SE extension due to NNW dextral shearing during the East Sea opening. Based on geological structures as well as lithofacies and ages of the basin-fills, it is divided into the NE subbasin and the SW subbasin which were abundantly filled with basaltic volcanics and marine sediments without volcanic materials, respectively. Syndepositional synclines and anticlines are characteristically developed in the NE subbasin, which amplitudes decrease away from the adjacent normal faults to make them into a homoclinal structure. The thicker lavas as well as the younger agglomerates and lacustrine sediments, which show circular distributions, are distributed around the axial zones of major synclines. The satellite image shows four remarkable circular structures within the NE subbasin. They are located adjacent to and along the normal faults, and they are laid almost exactly on the axial zones of the synclines as well as on the distribution area of the agglomerates and lacustrine sediments. These facts indicate that the basaltic lava effusion were conducted by the normal faults like a kind of fissure-eruption and its activity was more predominant at the sites in where the synclines are developed. More active effusion of lava became a reason for deeper subsidence to make differential subsidence and syndepositional folding adjacent to and along the normal faults. Hence, we suggest that a nested cauldron structure was formed in the NE subbasin of the Eoil

*Corresponding author: Tel. 82-51-510-3572, E-mail. moonson@pusan.ac.kr

Basin, and that the volcanism made the subbasin to be a lava pond and controlled the process of filling and sedimentation in the subbasin.

Key words: the Eoil Basin, basaltic volcanism, syndepositional folding, circular structure, nested cauldron structure

서 언

동해의 확장으로 인한 신생대 마이오세 지각변형 동안 한반도 동남부에는 지각이 확장되고 침강되면서 화산활동과 함께 퇴적분지들이 만들어졌다(Fig. 1). 이 분지들을 충전하고 있는 암석들은 지질시대에 따라 장기통과 연일통으로 구분된다(Tateiwa, 1924). 장기통은 전기 마이오세의 것으로 대부분 현무암과 데사이트질 화산쇄설물 및 용암류로 구성되어 있고 하성 및 호성 퇴적물을 포함하며 포항분지를 제외한 그 남쪽의 분지들을 주로 충전하고 있다(Tateiwa, 1924; Yoon, 1997; 손문, 1998). 한편, 이를 부정합으로 피복하는 연일통은 중기 마이오세의 것으로 화산물질을 전혀 포함하지 않은 해성 퇴적물로 구성되어 있으며 어일, 와읍, 정자, 울산분지의 일부를 제외하고는 대부분 포항분지를 충전하고 있다. 이는 포항분지가 확장되기 이전에 그 남쪽에서는 이미 지각이 활발히 신장되는 사건이 발생하였으며 이와 함께 화산활동이 빈번하였음을 시사한다. 그러나 이러한 화산활동과 관련한 화산물질에 관한 암석학적·암석화학적 특징들은 일부 밝혀져 있

나(윤성호 외, 1994; Song *et al.*, 1997; 위수민과 이선구, 1999) 현재까지 화산물질을 직접적으로 제공한 화산의 위치나 기하 그리고 분출양식 등에 관한 자료는 매우 미비한 상황이다.

이번 연구는 이러한 자료를 확보하기 위한 하나의 시도로써 최근에 작성된 어일분지의 정밀한 지질도와 지질 구조도(Son *et al.*, 2000)를 바탕으로 어일분지 충전물의 특징과 시·공간적인 암상의 변화 그리고 분지 내외에 형성되어 있는 지질구조를 재고찰하고 이와 함께 위성사진상에 나타나는 주요 선구조와 원형구조들의 특징들을 함께 종합 검토함으로써 분지내 화산 충전물의 기원이 되는 화산의 존재와 그 분출양식을 파악하고자 한다.

지질과 암상분포

어일분지는 경주시 감포읍 양북면의 동부 일원에 위치하고 있는데 길이 약 12 km, 최대 폭이 약 5 km인 북동방향으로 길쭉한 함몰지로서 단층으로 구획된 여러 개의 지구(graben) 내지 반지구(half graben)로 구성되어 있다. 그 기하학적 형태와 지질구조 그리고 충전물의 암상과 상대연령을 근거하면 분지는 북동 소분지와 남서 소분지로 나뉘어지며 북동 소분지는 다시 북동방향의 정단층에 의해 북부 지괴와 남부 지괴로 구분된다(Fig. 2와 5; Son *et al.*, 2000). 분지 형성 이전의 암석으로는 백악기의 퇴적암류, 고제3기의 화강암류와 산성 화산암류 그리고 전기 마이오세초의 안산암류로 구성되며(진명식 외, 1988, 1989; 김근수 외, 1995) 이들 기반암은 분지 충전물과 단층으로 경계된다.

분지 충전물은 퇴적환경과 암상을 근거로 하위로부터 전기 마이오세의 감포층과 어일층 그리고 중기 마이오세초의 송전층으로 구분되는데, 대체로 감포층과 어일층은 북동 소분지에 그리고 송전층은 남서 소분지에 각각 규제되어 분포하는 특징을 보여주며 감포층과 어일층은 북동 소분지의 북부 지괴와 남부 지괴에서 반복 출현한다(Fig. 2).

분지 충전물의 가장 기저 지층인 감포층은 하천성 역지지성(clast-supported) 역암과 역질 사암으로 주로 구성된다. 역은 대부분 기반암인 백악기 퇴적층과 고제3기 산성 화산암류로 구성되며 상부로 갈수록 세립

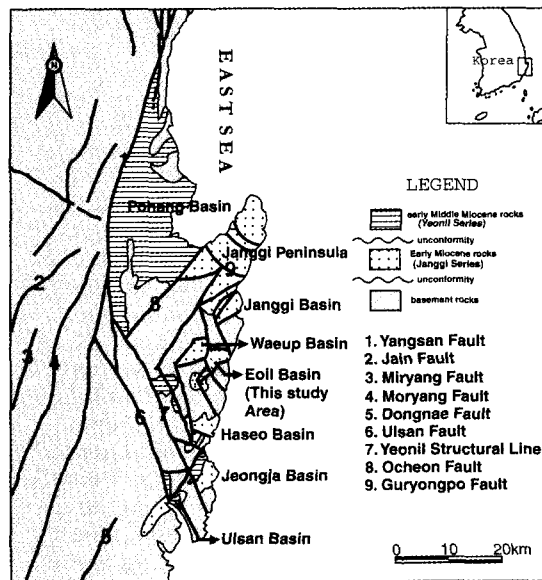


Fig. 1. Regional geological and structural map of the Tertiary Miocene basin province, southeastern Korea.

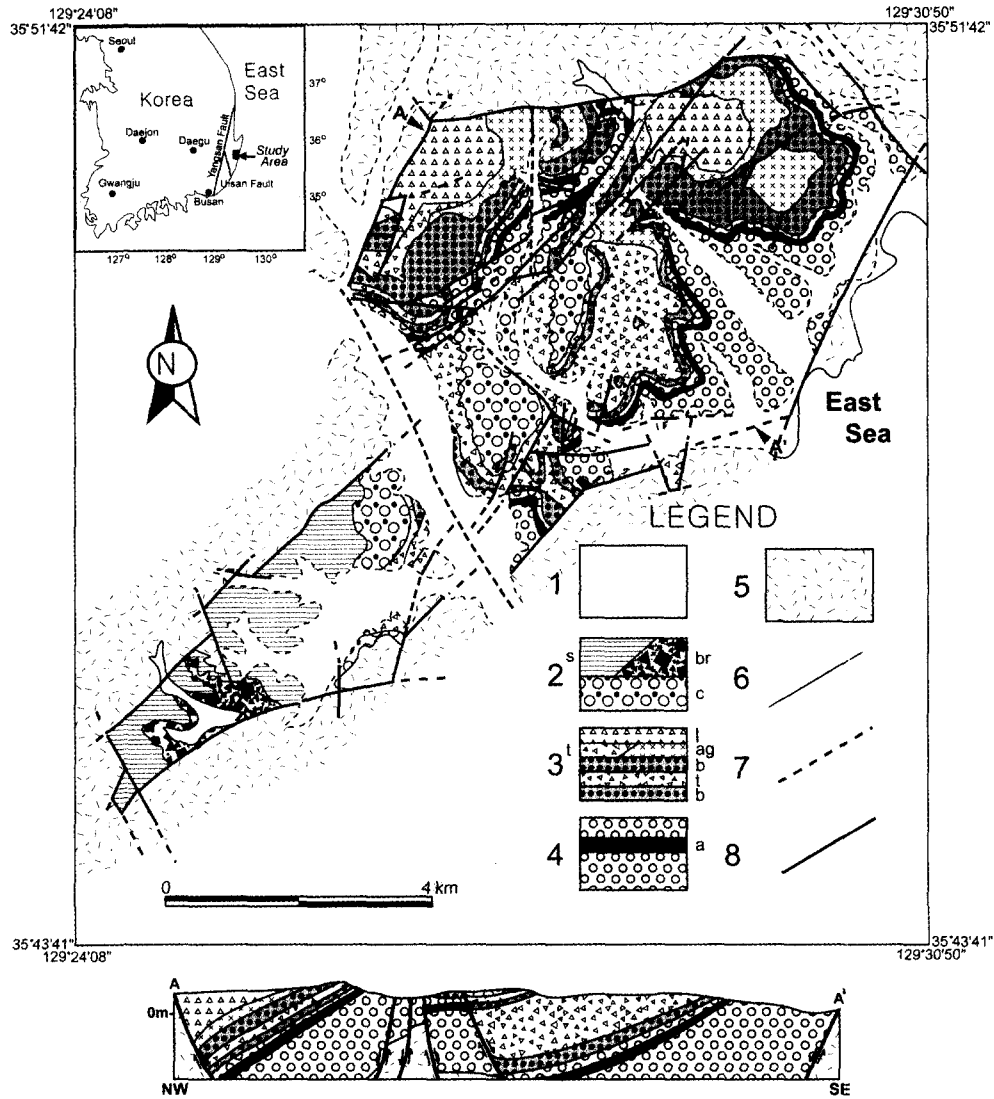


Fig. 2. Geological map of the Eoil Basin with a major cross section. 1: Alluvium, 2: Songjeon Formation (s: sandstones, br: breccias, c: conglomerates), 3: Eoil Formation (l: lacustrine sedimentary rocks with tuffs, ag: agglomerates, t: tuffites, b: basaltic lavas), 4: Gampo Formation (a: acidic fallout tuffs), 5: Basement rocks, 6: Geological boundary 7. Inferred Faults, 8: Faults. Note three chronostratigraphic key beds [two basaltic lavas (lower b and upper b) and an acidic fallout tuffs (a)].

화되는 경향을 보인다. 한편, 감포층의 최하부에는 육안으로도 식별이 가능한 사장석과 흑운모 결정편을 다량 포함하는 데사이트질 응회암과 응회질 사암층이 협재되며(Fig. 3a), 또한 상부에는 측방 연속성이 양호하고 첨가 화산력(accretionary lapilli)과 규화목을 포함하는 함부석(pumice-bearing) 데사이트질 낙회암층(Fig. 3b와 3c)이 약 8m의 두께로 추적된다(Fig. 2). 따라서 감

포층이 퇴적되는 동안에는 어일분지의 인근에서 폭발성의 데사이트질 화산활동이 간헐적으로 발생하였던 것으로 판단된다.

분지 충전물 중 가장 두껍게 나타나는 어일층은 현무암질 화산활동에 의한 용암류와 화산쇄설암류로 주로 구성되는데 최상부에는 규조암(diatomite)을 포함하는 호성 퇴적암(Lee, 1976)이 퇴적되어 있다. 어일층은

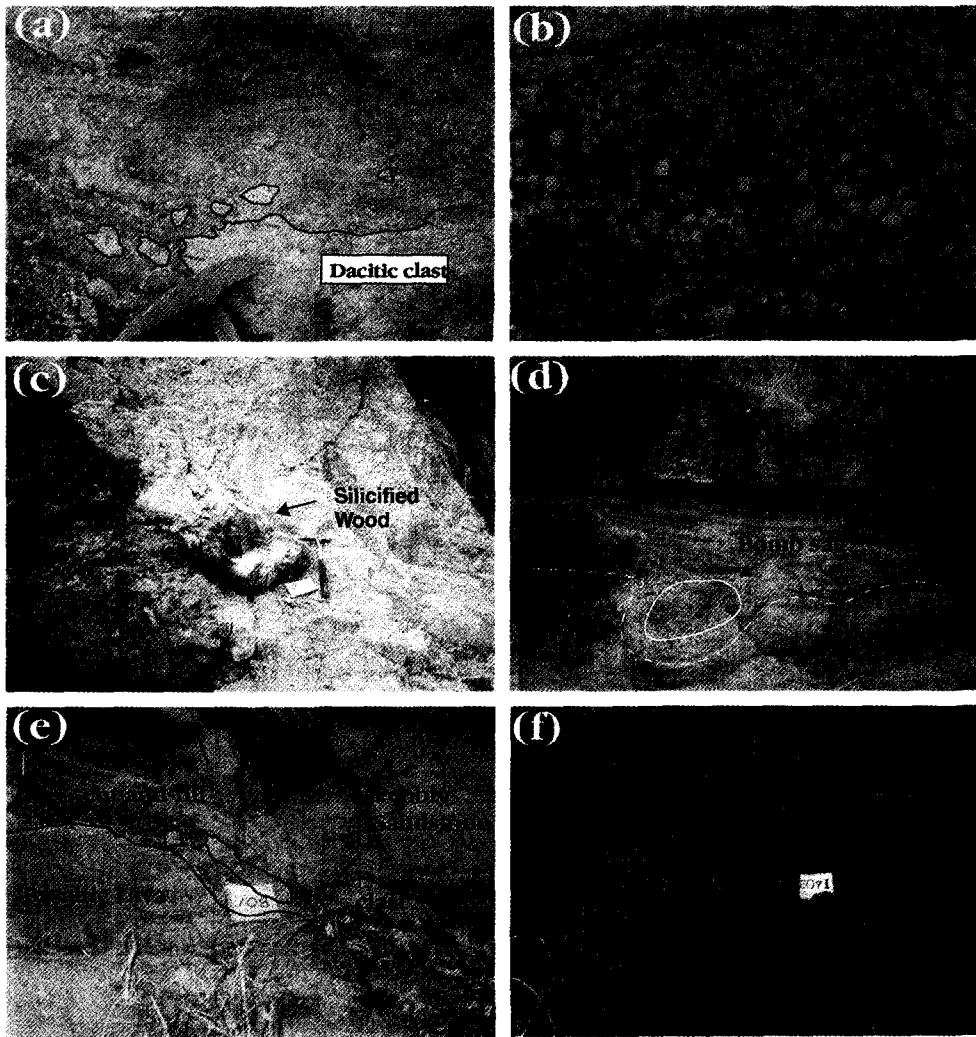


Fig. 3. (a) Dacitic tuffs observed in the lowermost part of the Gampo Formation. (b) and (c) Accretionary lapilli and silicified wood, respectively, within the acidic fallout tuff in the upper part of the Gampo Formation. The tuff is crudely stratified, pumice-rich and gradually changes into pebbly sandstones upwards. (d) Bomb sags within the basaltic tuffs in the Eoil Formation. (e) The upper basaltic lava in the Eoil Formation showing cut-and-fill structures and basaltic rip-up clasts. (f) Agglomerates in the upper part of the Eoil Formation.

암상과 지층의 층서적 위치에 따라 다섯 가지의 단위 지층, 즉 현무암질 용암류 2매(하부 용암류와 상부 용암류), 응회질 역암 및 사암으로 구성된 층회암, 화산 집괴암, 그리고 응회암을 협재하는 호성 퇴적암으로 구성된다(Fig. 2; Schmid, 1981의 화산쇄설암 분류를 따름). 용암류는 퇴적 이후의 관입 암상으로 일부 보고된 바가 있으나(윤선, 1988), 야외에서 용암류의 상·하위에 현무암질 분석층과 사암층이 나타나고 화산탄과 화산낭(bomb sag)이 관찰되며(Fig. 3d) 용암류와 상

부 퇴적층과의 접촉부에서 침식의 증거인 자르고 채우는(cut-and-fill)구조와 위로 뜯긴 암편(rip-up-clast)들이 관찰되고 있어(Fig. 3e) 그 정지 기구는 분출인 것으로 판단된다. 한편, 용암류는 북동 소분지 북부 지괴의 중앙부와 남부 지괴의 북동부에서 예외적으로 두꺼운 수십 m의 두께로 나타나나 그 외에는 약 10 m 내외의 일정한 두께로 측방으로 대체로 양호한 연속성을 보인다(Fig. 2). 이는 현무암질 화산활동 동안 함몰지인 북동 소분지의 전체가 일종의 용암 호수(lava pond)를 이

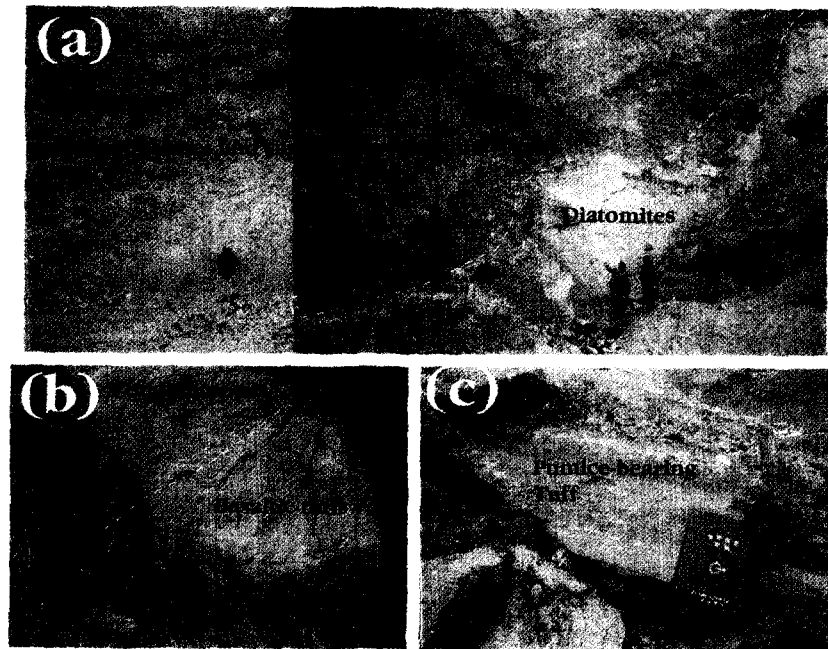


Fig. 4. Lacustrine sedimentary rocks intercalated with tuffs and diatomites in the uppermost part of the Eoil Formation. (a) Open pit of the diatomite mine. (b) Intercalation of conglomerates and basaltic tuffs. (c) Pumice-bearing tuffs.

루었으며 예외적인 두 지역 즉, 북부 지괴의 중앙부와 남부 지괴의 북동부에서 상대적으로 보다 많은 양의 용암 유출 혹은 지각 침강이 발생하였을 가능성을 지시한다. 이들 용암류의 K-Ar 전암분석 연령은 18-20 Ma이다(이현구 외, 1992).

어일층을 구성하는 각 단위 지층들은 그 암상과 층의 두께가 공간적으로 변화한다. 특히, 하부 용암류와 상부 용암류의 사이 층준에 퇴적된 층회암은 지괴에 따라서는 물론이며 하나의 지괴내에서도 측방으로 암상과 층의 두께가 확연한 차이를 보인다(Fig. 2). 즉, 남부 지괴에서는 최대 두께가 약 100 m 이상이며 주로 응회질 역암으로 구성된다. 또한 층의 두께는 지괴의 중심부에서 남서쪽으로 갈수록 얇아지며, 지괴의 북동부에 이르러서는 이 지층은 사라지고 하부 용암류와 상부 용암류가 직접적으로 접촉하고 있다. 그러나 북부 지괴에서는 이 층회암은 층의 두께가 남부 지괴의 것에 비해 훨씬 얇아져서 최대 약 10 m 정도이며, 암상 또한 주로 응회질 사암으로 차이를 보인다. 또한 북동쪽으로 화산집괴암과 지교(interfingering) 관계를 보임으로써 남부 지괴에서의 경우와는 다른 양상이다. 이러한 사실로부터 북동 소분지의 남부 지괴와 북부 지괴는 하부 현무암질 용암류가 분출된 이후 침강속도, 퇴적작용 그리고 화산활동을 서로 달리하는 독립적인

지괴운동을 겪었음을 알 수 있다.

어일층의 상부 용암류를 피복하고 있는 응회질 사암과 화산집괴암은 북동 소분지의 남서부와 북동부에 각각 분포하고 이들 두 암체는 서로 지교 관계로 접한다(Fig. 2). 화산집괴암의 화산암피는 대부분 각질이며 유리질 혹은 다공질의 현무암질 암석으로 구성되어 있어 용암류의 본질(essential) 혹은 유질(accessory)인 것으로 판단된다(Fig. 3f). 이 집괴암은 용암류가 비교적 두껍게 분포하는 북동 소분지 북부 지괴의 중앙부 그리고 남부 지괴의 북동부에서 대체로 원형의 분포를 보이며 용암류에 의해 둘러싸여 있는 형상이다. 이러한 점들은 용암류의 유출 이후 북부 지괴의 중앙부와 남부 지괴의 북동부에 각각 직경 약 2 km의 분석구(cinder cone)가 형성되었을 가능성을 지시하며 또한 이곳에 주요한 화산분출구가 존재하였음을 암시하고 있다.

한편, 어일층의 최상부 호성 퇴적암은 응회암과 함께 역암과 사암이 호층을 이루고 있으며 특징적으로 호성환경을 지시하는 규조암(Lee, 1976)을 협재한다(Fig. 4). 또한, 이 암석은 화산집괴암에 의해 둘러싸여져 있으며 역시 직경 약 1 km의 원형의 분포를 보이고 있어 화산분출과 관련한 후기 함몰지에서 형성된 호수 환경에서 퇴적되었을 것으로 판단된다.

어일분지를 최후기에 충전하고 있는 중기 마이오세

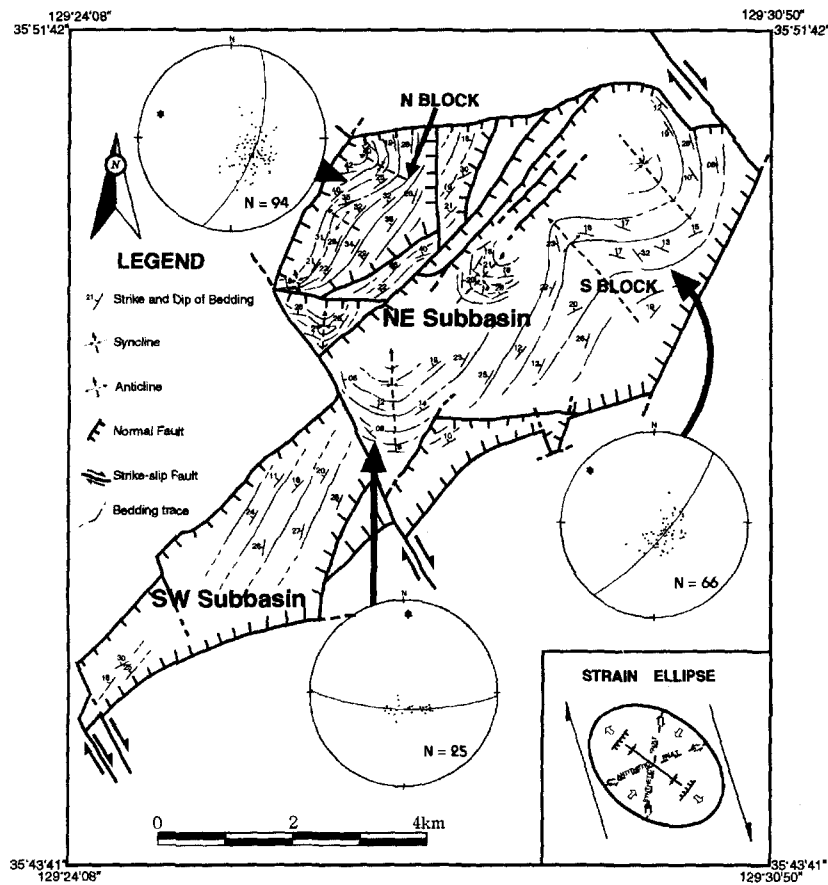


Fig. 5. Structural map of the Eoil Basin showing the traces of major faults, bedding, and fold axial-planes. Stereograms of poles to bedding with π -axis (star) of girdles. Lower-hemisphere, equal-area projection. See the text for detailed interpretation.

초(Yoon, 1976)의 송전층은 화산쇄설물을 포함하지 않는 순수한 각력암, 역암 그리고 사암으로 구성되어 있어(Fig. 2) 이 퇴적층이 퇴적될 시점에는 화산활동은 종결되었으며 단순한 지각의 침강만 발생하였다.

지질구조

어일분지는 북북서방향의 우수향 주향이동단층 운동과 이들 단층의 활동으로 이차적으로 형성된 북동방향의 정단층 운동에 의해 확장되고 침강된 전형적인 당겨열립분지(pull-apart basin)로 조사된 바 있다(Son *et al.*, 2000; Fig. 5). 분지 충전물은 대체로 15° ~ 30° 가량 북서방향으로 경사진 동사구조를 보여주고 있으나 상부 지층일수록 그 경사각이 알아지는 경향을 보여준다(최위찬 외, 1988; Son *et al.*, 2000). 분지는 북북서방

향의 우수향 주향이동단층에 의해 북동 소분지와 남서 소분지로 나뉘어지며 북동 소분지는 다시 정단층에 의해 북부 지괴와 남부 지괴로 구분되는데 앞서 지적한 바와 같이 남부 지괴에 노출되는 지층은 북부 지괴에서 반복되어 출현하나 대비되는 지층의 두께와 암상이 현저한 차이를 보여주고 있어 이 정단층은 대규모 성장단층인 것으로 해석된다. 분지의 확장방향을 지시하는 지층의 평균 경사방향(Wericke, 1981; Wise, 1992; Lucchitta and Suneson, 1993), 분지 충전물 내의 소규모 정단층들의 자세, 암맥의 자세 그리고 소단층들의 운동학적 자료들을 이용한 고응력장(최범영, 1991)의 복원 등은 모두 북서-남동방향의 분지 확장을 지시하고 있다(Fig. 6). 따라서 어일분지는 북서-남동방향으로 확장되었으며 퇴적동시성의 북서향 지괴 경동운동을 겪었다.

화산물질을 전혀 포함하지 않는 송전층이 주로 노출되는 어일분지의 남서 소분지는 동사구조가 현저한 반면 화산물질을 다량 포함한 감포층과 어일층으로 대부분 충전된 북동 소분지에는 특징적으로 습곡구조들이 관찰된다(Fig. 5). 이 습곡들은 북쪽 내지는 북서쪽으로 10°~20° 침강한 습곡축을 가지며, 습곡의 진폭은 대체로 북동 소분지의 북부 지괴와 남부 지괴의 북서부를 경계하는 정단층들로부터 남동쪽으로 멀어질수록 감소하여 동사구조로 바뀐다. 따라서, 이 습곡들의 형성은 이들 정단층의 기하 혹은 운동과 밀접한 관련을 가질 가능성이 있으며, 단층 인접지에서 현저한 차별 침강이 발생한 반면 단층에서 멀어지면서 지층은 단순히 경동운동만 겪은 것으로 보인다.

한편, 어일분지를 경계하고 있는 경계단층이나 내부 단층들이 습곡된 흔적이 전혀 없으며 또한 분지를 둘러싸고 있는 기반암에서도 현재까지 습곡이 발견된 예가 없다. 단지, 분지 내부에서만 습곡구조가 만들어져 있는 상황이다. 이러한 점은 이 습곡들이 충전물의 퇴적 이후의 후기 압축력에 의한 것이 아니라 퇴적동시적인 분지 내부의 변형운동의 결과임을 시사한다. 북부 지괴와 남부 지괴 각각에서 2번의 주요 향사구조가 반복되는데 특히, 북부 지괴에서는 북동 소분지를 북서면에서 경계하는 정단층이 북동방향에서 동북동방향으로 분절되는 곳과 남부 지괴에서는 북동방향의 분지 내부단층과 동서방향의 분지경계단층이 교차하는 곳에서 가장 큰 규모의 향사구조가 형성되어 있다(Fig. 5). 이곳은 어일층의 용암류가 비교적 두껍게 나타나는 지역이며 용암류 이후의 화산진괴암과 호성 퇴적층이 원형으로 분포하는 지역과 잘 일치한다(Fig. 2). 따라서 어일분지 북동 소분지의 북서면 경계단층과 소분지를 두 지괴로 나누는 분지 내부의 정단층선을 따라 현무암질 용암류가 분출되었을 가능성이 크다. 그리고 주요 정단층이 분절되거나 교차하는 지점에 주요 분출화도가 존재하였으며 이로 인해 이 곳에서 많은 양의 용암과 화산쇄설물들이 유출되고 상대적으로 깊게 함몰되면서 규모가 큰 향사구조가 형성된 것으로 해석된다. 어일분지의 습곡구조가 화산활동과 밀접히 관련한다는 주장은 주로 화산물질로 충전되어 있는 북동 소분지에서만 습곡구조가 관찰되는 반면 화산활동과 무관한 송전층의 분포지인 남서 소분지에는 습곡구조가 관찰되지 않는다는 점에서도 지지된다.

위성사진 해석

1970년대에 최초의 자원탐사위성인 Landsat-1이 발

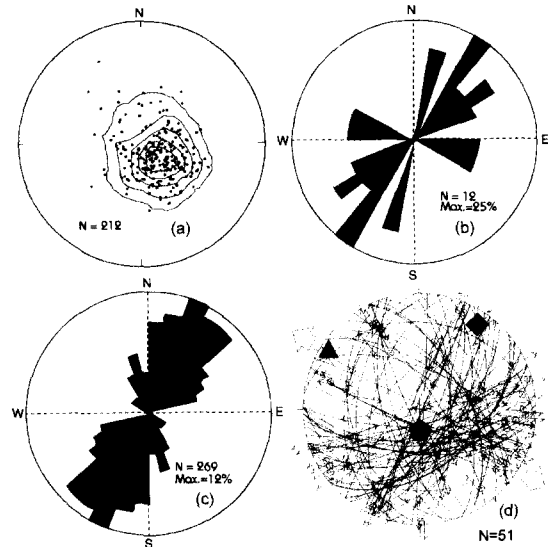


Fig. 6. (a) Contoured π -diagram of the stratal attitudes from whole the basin-fills of the Eoil Basin. It crudely defines a homoclinal structure dipping toward northwest. (b) Rose diagram of strikes of mafic dikes which have intruded the basement rocks surrounding the Eoil Basin, (c) Rose diagram of strikes of minor faults, being mostly normal faults, within the basin. Note that their main trends are NNE-NE, which suggest NW-SE extension of the Eoil Basin. (d) Fault-slip data of all striated fault planes observed in the outcrops adjacent to the border faults (lower hemisphere, equal-area projections). Divergent arrow head represents horizontal stretching direction ($\sigma_{Hmin}=N56^{\circ}W$). The principal stress axes σ_1 (filled pentagons), σ_2 (filled squares), σ_3 (filled triangles) are also projected.

사된 이후 지금까지 많은 위성들이 발사되어 지질, 환경, 농업, 국토개발 등 많은 분야에서 효율적으로 이용되고 있다. 국내의 지질학 분야에서도 원격탐사 기법을 통한 위성사진의 선구조 분석이 실시되어 광역지질조사, 광물탐사, 구조해석, 지하수 탐사 등의 다양한 분야에서 연구가 수행되고 있다(강필중 외, 1988; 지광훈 외, 1994; 이봉주 외, 1997) 이번 연구에서는 1985년 4월 30일 촬영된 미국의 Landsat-5호의 TM(Thematic Mapping) 영상(Fig. 7)을 이용하였으며 시각적 판독법을 통해 어일분지 북동 소분지 일원의 주요 선구조와 원형구조를 분석하였다. 분석된 결과는 야외조사를 통해 작성된 지질도 및 지질 구조도와 대비하였다. 최근의 화산활동에 의해 만들어진 지질구조는 위성사진상에서 대부분 뚜렷한 원형 혹은 방사상 구조로 인지될 수 있다(Keller and Pinter, 1996; Giannetti, 2001).

이번 연구에서 추출된 주요 선구조는 대부분 분지의

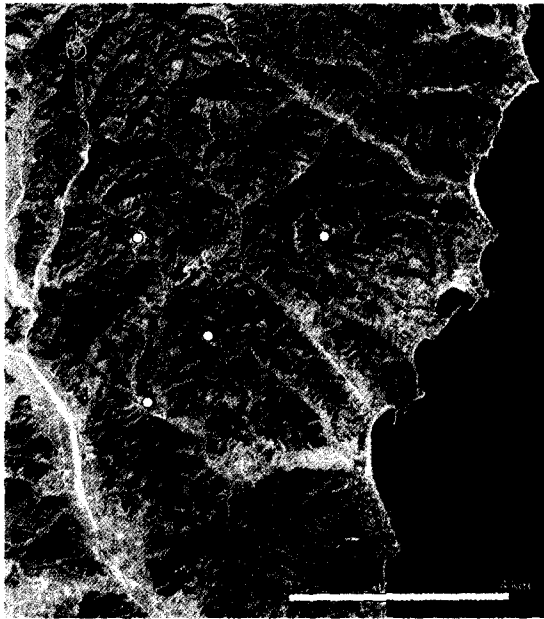


Fig. 7. Satellite image of the study area. Note that open circles represent the centra of circular structures in Fig. 8.

경계 단층과 분지내 주요 단층선들과 잘 일치하였다 (Fig. 8). 북북서방향의 주향이동단층들은 직선에 가까운 뚜렷한 계곡선과 일치하는 경향을 보이고 있으며 북동방향의 정단층은 대부분 음영(shadow) 혹은 색조(tone)의 대비선으로 인지되었다. 한편, 북동 소분지의 남부 지괴에 발달한 배사의 축은 분지내에서 침식 골짜기인 직선의 계곡선으로 인지되었다. 따라서, 연구지역 위성 영상에서 인지되는 주요 선구조들은 암상 분포보다는 분지의 주요 지질구조와 밀접한 관련을 가지는 것으로 판단된다.

북동 소분지의 위성사진에서 특이할만한 점은 북부 지괴의 한 곳과 남부 지괴의 세 곳에서 뚜렷이 나타나는 원형구조들의 존재이다(Fig. 7과 8). 이 구조들은 모두 정단층을 따라 인접하게 발달함이 특징인데 먼저, 북부 지괴의 원형구조는 북동 소분지를 북서변에서 경계하는 정단층이 북동방향에서 동북동방향으로 분절되는 곳에 인접하여 위치해 있다. 이 곳은 지질도 상에서 화산집괴암과 호성 퇴적암이 원형으로 분포하는 곳과 정확히 일치하며 지질 구조도에서 주요 향사구조가 발달한 곳과도 잘 일치한다. 이 원형구조는 직경이 약 500m에서 1.5km에 이르는 원들로 동심구조를 만들고 있으며 그리고 이 구조의 중심으로 수렴하는 방사상의 선구조들이 인상적이다. 또한 지질 구조도상에서 이 원

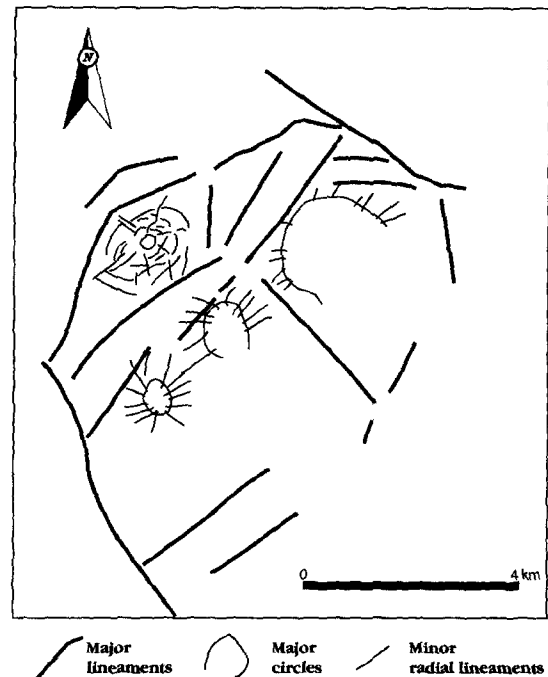


Fig. 8. Brief sketch of lineaments in the satellite image of Fig. 7.

형구조를 에워싸는 듯한 정단층들이 북동방향으로 길쭉한 오각형의 함몰지를 형성하고 있음(Fig. 5)은 주목할 만하다. 한편, 남부 지괴에서 인지되는 세 곳의 원형구조는 대규모 성장단층인 분지 내부의 정단층과 나란하게 인접하여 출현한다(Fig. 7과 8). 이들 구조는 남서쪽에서 북동쪽으로 갈수록 약 700m에서 2km로 그 직경이 증가하는 경향을 보인다. 이 중 규모가 가장 큰 원형구조가 존재하는 곳은 북부 지괴에서와 마찬가지로 지질도상에서 화산집괴암과 호성 퇴적암이 분포하는 곳 그리고 지질 구조도에서 가장 규모가 큰 향사구조가 발달한 곳과 정확히 일치한다. 또한 이들 구조들 역시 대체로 원형구조를 중심으로 수렴하는 방사상의 능선들이 함께 발달하는 특징을 보여준다. 이상의 사실들은 위성 영상에서 드러난 원형구조들은 지질도상의 현무암질 화산암류들의 분포와 지질 구조도상의 향사구조 형성과 성인적으로 밀접한 관련이 있음을 보여주는 것이다. 즉, 이들 원형구조는 어일층이 퇴적되는 동안 정단층대를 통로로 하는 현무암질 화산물질의 분출에 의해 만들어진 일종의 화산함몰구조의 표현일 것으로 판단된다. 특히, 현재 원형구조가 발달하고 향사구조가 형성된 지점에서 화산활동이 보다 활발하였으며 뒤이어 이곳에서 보다 깊은 침강이 발생하였고 이

때문에 정단층 인접부에는 현저한 차별 침강이 발생하게 되어 퇴적동시성의 습곡구조와 위성사진상의 원형구조가 만들어졌을 것이다. 한편, 남부 지괴의 원형구조들은 완전한 원을 형성하지 못하고 남동쪽에서 폐쇄되지 않고 벌어진 양상이다. 이는 앞서 언급된 지괴의 북서향 경동에 의해 원형 합몰구조의 남동부가 상대적으로 융기함으로써 이 부분이 후기에 침식·삭박된 결과로 해석된다.

토 의

어일분지 북동 소분지에는 지각 확장과는 어울리지 않는 습곡구조들이 발달한다(Fig. 5). 최근 들어 분지 내부에 발달하는 이러한 습곡구조는 후기 지구조적 압축력의 결과가 아니라 분지가 확장하고 침강되는 동안 퇴적동시적으로 만들어질 수 있음이 알려져 있다(Schlische, 1992, 1993; Scott *et al.*, 1994). Scott *et al.*(1994)은 롤버배사(rollover anticline)를 동반하는 점완단층 모델(Wericke and Burchfiel, 1982; White *et al.*, 1986; Grosong, 1989; Dula, 1991)을 기초로 일정한 곡률을 가진 두개의 점완단층이 서로 다른 자세로 사교하며 분지의 경계단층을 형성하고 있다면, 단층의 상반 측 분지내에 그들이 새로이 정의한 소위 'track' 선을 따라 퇴적동시성 배사구조의 축이 만들어짐을 수식적으로 계산하였다. 여기서 'track'이라 함은 사교하는 있는 두 점완단층의 단층면이 교차하는 선을 지표면에 투영한 선으로 정의된다. 때문에 지질도상에서는 서로 다른 방향으로 분절된 두 정단층의 교차지점에서 배사구조가 인지될 것이다. 한편, Schlische(1992, 1993)은 북미대륙 동부에 발달하고 있는 트라이아스기-쥬라기 대륙 열개분지들에서 실제로 분지내에 퇴적동시적인 습곡구조(향사와 배사구조)가 다수 발달하고 있음을 야외조사를 통하여 입증하였다. 그는 이러한 습곡구조가 만들어지는 원인으로 분지 경계단층의 각 분절구의 단층면에서 끝선 고리이론(tip-line loop theory; Barnett *et al.*, 1987)과 유사하게 주향선을 따라 축방으로 차별적인 수직 변위가 발생하였기 때문인 것으로 해석하였다. 따라서 Scott *et al.*(1994)의 주장과 마찬가지로 정단층이 분절되는 지점에서 배사구조가 형성된다는 결론을 얻을 수 있었다.

그러나 이번 연구에서는 소위 'track'의 출발점인 단층 분절구들의 교차점에서 배사구조가 아닌 가장 규모가 큰 향사구조가 관찰되고 있다(Fig. 5). 이는 분지의 확장과 함께 동시적으로 형성되는 습곡구조의 형성 메커니즘을 이해함에 있어서 점완단층 모델이나 차별 변

위와 같은 단층활동과 관련한 단순한 기하학적 설명만으로는 완전할 수 없음을 알려주는 것이다. 이번 연구에서 얻어진 결과들을 종합하면, 어일분지 북동 소분지에서 소위 'track' 선을 따라 향사구조가 만들어지는 것은 사교하는 경계단층의 교차점 부근에 가장 규모가 크고 용암류의 유출량이 많은 분출 화도가 위치하는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 물론 북동 소분지의 남부 지괴에서 정단층과 평행하게 세 곳의 합몰지가 나타나고 있음을 감안한다면 이곳의 화산활동은 거시적으로 정단층을 통로로 하는 열하분출(fissure eruption)형의 화산활동이라 하겠다. 그러나 단층선을 따라 화산활동의 정도는 균일하지 않았으며 다소 단속적인 듯한 지점들에서, 어일분지의 경우에는 모두 네 곳에서 보다 활발한 화산분출이 진행되었던 것으로 보인다. 이 때문에 어일분지 북동 소분지라는 침강지 내에 여러 개의 소규모 화산 합몰지가 존재하는 일종의 등지형 화산합몰구조(nested cauldron structure; Bates and Jackson, 1980)가 형성되었던 것으로 판단된다. 따라서, 퇴적분지 내에서 퇴적 동시적으로 생성된 습곡구조의 기원을 해석함에 있어서 단층운동과 관련한 단순한 기하학적 모델의 적용(Schlische, 1992, 1993; Scott *et al.*, 1994)보다는 화산활동과 같은 보다 다양한 지질환경적 변수들을 고려하여야 할 것이다.

결 론

어일분지는 북북서방향의 우수향 전단력에 의해 북서-남동방향으로 확장되었다. 따라서 분지가 확장되는 동안 북동방향의 정단층은 인장대의 역할을 하였을 것이며 마그마의 분출 통로가 될 수 있었다. 북동 소분지내에는 향사구조가 관찰되는데 정단층과 멀어지면 동사구조로 바뀐다. 주요 향사구조가 형성된 지점은 비교적 두꺼운 용암류가 집적되어 있으며 그 후 이곳에는 원형의 분포를 보이는 화산집괴암 그리고 호성 퇴적층이 집중되어 퇴적되었다. 위성사진에는 원형구조들이 관찰되는데 이 구조들은 정단층에 인접하여 평행하게 발달하며 주요 향사구조의 축부와 화산집괴암 그리고 호성 퇴적층이 원형으로 분포하는 지점에 놓여있다. 이러한 사실들은 어일분지 북동 소분지에는 주요 정단층을 통로로 하는 열하 분출형의 현무암질 화산활동이 있었으며 특히, 현재 향사구조가 형성된 지점에서 화산활동이 보다 활발하였음을 지시한다. 활발한 화산활동은 뒤이어 보다 깊은 침강의 원인이 되었으며 이 때문에 정단층 인접부에는 현저한 차별 침강이 발생하여 퇴적동시성의 습곡구조가 만들어졌다. 따라서

북동 소분지에서 정단층들을 따라 분출시기는 같으나 측방으로는 차별적이고 다발적인 화산활동이 발생하였으며 그 결과로 일종의 동지형 화산합물구조가 형성되었다. 이러한 화산활동은 어일분지 북동 소분지를 용암호로 만들기도 하고 화산분출 후에는 함몰 호수를 만드는 등 분지충전과 퇴적활동을 주요하게 제어하였을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2000년 한국과학재단 목적기초 지역대학 우수과학자 지원연구비(연구과제명: 연일구조선과 그 주변의 지질구조와 분지 발달, 과제번호: 2000-1-13100-004-2)에 의하여 지원되었음을 밝히며 이에 대하여 감사한다. 초고를 읽고 유익한 조언을 해주신 안동대학교 강지훈 교수님과 자원지질연구원 기원서 박사님 그리고 부경대학교 박계현 교수님께 감사드린다.

참고문헌

- 강필중, 조민조, 최필상, 1988, 원격탐사자료 응용 기술연구. 한국동력자원연구소, 연구보고서, 76-82.
- 김근수, 김종열, 정규귀, 황진연, 이준동, 1995, 경상북도 경주-감포 일원에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr연대. 지구과학회지, 16, 272-280.
- 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달: 구조지질학 및 고자기학적 고찰. 부산대학교 이학박사 학위논문, 233p.
- 위수민, 이선구, 1999, 양남분지 내에 분포하는 제3기 화산암류에 대한 지화학 연구. 지구과학회지, 20, 423-436.
- 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 25p.
- 윤성효, 김진섭, 옥수석, 홍현근, 김형식, 1994, 영일반도 일원의 화산암류에 대한 암석학적 연구. 지구과학회지, 15, 126-138.
- 이봉주, 최위찬, 강필중, 1997, 한국동남부지역의 선구조선. 지질학회지, 33, 18-26.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷撤丸, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구: 화산암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 25, p. 337-349.
- 지광훈, 이봉주, 박성원, 1994, GIS기법을 이용한 광물자원의 통계적 평가연구. 한국자원연구소, 연구보고서, KR-94-(B)-1, 29-46.
- 진명식, 김성재, 신성천, 1988, K/Ar 및 헷선티트랩법에 의한 한국 동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석 광물연령 측정연구. 한국동력자원연구소, 연구보고서, KR-88-6D, 53-84.
- 진명식, 김성재, 신성천, 1989, K/Ar 및 헷선티트랩법에 의한 한국동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석 광물연령 측정연구. 연구보고서 KR-89-1C, 한국동력자원연구소, 65-105.
- 최법영, 1991, 단층자료를 이용한 응력 텐서 계산방법에 대하여. 지질학회지, 27, 383-393.
- 최위찬, 황재하, 윤옥, 김동학, 1988, 대한민국 지질도 어일(1:25,000)도폭 및 도폭설명서. NI 52-2-07-4, 한국동력자원연구소, 42p.
- Barnett, J.A.M., Mortimer, J., Rippon, J.H., Walsh, J.L. and Watterson, J., 1987, Displacement geometry in the volume containing a single normal fault. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 71, 925-938.
- Bates, R.L. and Jackson, J.A., 1980, *Glossary of Geology*. Am. Geol. Inst. Falls Church, Virginia, 751p.
- Dula, W.F.Jr., 1991, Geometric models of listric normal faults and rollover anticline. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 75, 1609-1625.
- Giannetti, B., 2001, Origin of the calderas and evolution of Roccamonfina volcano (Roman Region, Italy). *J. Vol. Geothermal Res.*, 106, 301-319.
- Grosong, R.H.Jr., 1989, Half-graben structures: balanced models of extensional fault-bend folds. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101, 96-105.
- Keller, E.A. and Pinter, N., 1996, *Active Tectonics: earthquakes, uplift, and landscape*. Prentice Hall, 331p.
- Lee, Y.G., 1976, Fossil diatoms in the upper part of the Eoil Formation, Eoil area, Gyeongsangbuk-do, Korea. *J. the Korean Inst. Mining Geology*, 9, 77-84.
- Lucchitta, I. and Suneson, N.H., 1993, Dips and extension. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 105, 1346-1356.
- Schlische, R.W., 1992, Structural and stratigraphic development of the Newark extensional basin, eastern North America: Evidence for the growth of the basin and its bounding structures. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 104, 1246-1263.
- Schlische, R.W., 1993, Anatomy and evolution of the Triassic-Jurassic continental rift system, eastern North America. *Tectonics*, 12, 1026-1042.
- Schmid, R., 1981, Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geology*, 9, 41-43.
- Scott, D.L., Braun, J. and Etheridge, M.A., 1994, Dip analysis as a tool for estimating regional kinematics in extensional terranes. *J. Struc. Geol.*, 16, 393-401.
- Son, M., Seo, H.-J. and Kim, I.-S., 2000, Geological Structures and Evolution of the Miocene Eoil Basin, South-eastern Korea. *Geosciences J.*, 4, 73-88.
- Song, S., Lee, H.K. and Yun, H., 1997, Petrogenesis of Tertiary volcanic rocks from the southeastern part of Korea. *Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent: Short papers for the international symposium on the occasion of the 50th Anniversary of the Geol. Soc. Korea*, 219-224.
- Tateiwa, I., 1924, *Geological Atlas of Chosen*, No. 2, Enni-

- chi, Kuryuho and Choyo sheets. Geol. Survey of Chosen (in Japanese).
- Wernicke, B. and Burchfiel, B.C., 1982, Modes of extensional tectonics. *J. Struc. Geol.*, 4, 105-115.
- Wernicke, B., 1981, Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 291, 645-648.
- White, N.J., Jackson, J.A. and McKenzie, D.P., 1986, The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hangingwall. *J. Struc. Geol.*, 8, 897-909.
- Wise, D.U., 1992, Dip domain method applied to the Mesozoic Connecticut Valley Rift Basins. *Tectonics*, 11, 1357-1368.
- Yoon, S., 1976, The geological and paleontological study of the Tertiary deposits of the Janggi-Eoil District of Korea. No. 1. Stratigraphy and geologic age of the Songjeon Formation. *J. Coll. Lib. Arts and Sci., Pusan Nat. Univ.*, 15, 67-71.
- Yoon, S., 1997, Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 281, 53-70.

(2001년 6월 19일 접수, 2001년 8월 16일 게재승인)