

한반도 동남부 신생대 지각변형의 주요 특징과 지구조적 의의

Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their tectonic implications

손문 (Moon Son)* · 김종선 (Jong-Sun Kim) · 정혜윤 (Hye-Yoon Chong) · 이윤희 (Yung Hee Lee) · 김인수 (In-Soo Kim)

요약 : 한반도 동남부는 신생대 동안 지구조 환경의 변화에 따라 다중 지각변형을 겪었다. 신생대 동안의 주요 지구조 사건과 이에 따른 한반도 동남부에서 발생한 지각변형의 주요 특징들을 정리하면 다음과 같다. (1) 인도-아시아의 충돌과 태평양판의 이동방향 변화기(약 50~43 Ma): 인도판의 충돌에 의해 동아시아 대륙이 동쪽의 태평양판 쪽으로 밀려가면서 해구의 퇴각이 발생하였으며, 태평양판의 이동방향이 북북서에서 서북서방향으로 회전되었다. 그 결과 한반도 동남부에는 동서 내지 서북서-동남동방향의 인장력이 발생하였고 이로 인해 남북-북북동방향의 염기성 암맥군이 관입하였다(48 Ma 전후). (2) 동해 확장기(약 25~16 Ma): 남북 내지 북북서-남남동방향으로 동해가 활발히 확장됨에 따라 한반도 동쪽 해안선을 따라 우수향 전단력이 발생하였다. 이로 인해 한반도 동남부에는 북북서-남남동방향의 우수향 주향이동단층운동이 발생하였으며 단층의 우향 굴곡부 혹은 오버스텝 부분에는 당겨열림형 퇴적분지가 형성되었다. 기하 및 운동학적 특징에 따라 퇴적분지들은 평행사변형과 쉐기형 확장 분지로 나누어진다. 또한 이 시기에는 지괴가 시계방향으로 수평 회전되고 북서향으로 경동되었으며 일부 퇴적분지들은 확장 축이 동에서 서쪽으로 이동되는 전과열개 과정을 겪었다. 또한 약 17 Ma경에는 이러한 지각변형을 가장 서쪽에서 규제하는 연일구조선이 우수향 주향이동단층으로 운동하기 시작하였다. (3) 일본 남서부 시계방향 회전기(약 15 Ma): 필리핀해판의 북상으로 이즈-보닌 아크와 일본 남서부가 충돌해 일본 남서부의 시계방향 회전운동이 발생하였다. 이로 인해 대한해협에는 북서향 압축력이 가해졌으며 한반도 동남부에서는 응력반전으로 인해 퇴적분지의 확장이 종결되고 지괴의 융기와 국지적인 지괴의 반시계방향 수평회전운동이 발생하였다. (4) 동서방향 압축응력기(약 5 Ma 이후): 태평양판의 섭입각도가 얕아지고 아무르판이 동진함으로써 한반도 동남부 특히, 울산단층 동부에 상반서향의 충상단층들이 형성되어 지괴가 융기되었으며, 최근 한반도 지진 발생의 주요 원인이 되고 있다.

주요어 : 신생대, 지각변형, 인도대륙의 충돌, 동해확장, 아무르판

Abstract : The southeastern Korean Peninsula has experienced crustal multi-deformations according to changes of global tectonic setting during the Cenozoic. Characteristic features of the crustal deformations in relation to major Cenozoic tectonic events are summarized as follows. (1) Collision of Indian and Eurasian continents and abrupt change of movement direction of the Pacific plate (50~43 Ma): The collision of Indian and Eurasian continents caused the eastward extrusion of East Asia block as a trench-rollback, and then the movement direction of the Pacific plate was abruptly changed from NNW to WNW. As a result, the strong suction-force along the plate boundary produced a tensional stress field trending EW or WNW-ESE in southeastern Korea, which resultantly induced the passive intrusion of NS or NNE trending mafic dike swarm. (2) Opening of the East Sea (25~16 Ma): The NS or NNW-SSE trending opening of the East Sea generated a dextral shear stress regime trending NNW-SSE along the eastern coast line of the Korean Peninsula. As a result, pull-apart basins were developed in right bending and overstepping parts along major dextral strike slip faults trending NNW-SSE in southeastern Korea. The basins can be divided into two types on the basis of geometry and kinematics: Parallelogram-shaped basin (rhombochasm) and wedged-shaped basin (sphenochasm), respectively. In those times, the basins and adjacent basement blocks experienced clockwise rotation and northwestward tilting contemporaneously, and the basins often experienced a kind of propagating rifting from NE toward SE. At about 17 Ma, the Yonil Tectonic Line, which is the westernmost border fault of the Miocene crustal deformation in southeastern Korea, began to move as a major dextral strike slip fault. (3) Clockwise rotation of southeastern Japan Island (about 15 Ma): The collision of the Izu-Bonin Arc and southeastern Japan Island, as a result of northward movement of the Philippine sea-plate, induced the clockwise rotation of southeastern Japan Island. The event caused the NW-SE compression in the Korea Strait as a tectonic inversion, which resultantly terminated the basin extension and caused local counterclockwise rotation of blocks in southeastern Korea. (4) E-W compression in the East Asia (after about 5 Ma): Decreasing

subduction angle of the Pacific plate and eastward movement of the Amurian plate have constructed the-top-to-west thrusts and become a major cause for earthquakes in southeastern Korea until the present time.

Keywords : Cenozoic, crustal deformation, collision of Indian continent, opening of East Sea, Amurian plate

서 론

중생대 초의 판게아의 분열이후 지속적인 지판운동으로 신생대에 이르러서는 아시아 일원에 일련의 주요 지구조적 사건들이 발생하였다. 한반도 지각변형과 관련한 당시의 대표적인 지구조적 사건으로는 고제3기 50 Ma경에 시작된 인도와 유라시아 대륙의 충돌 사건이 해당되며, 이로 인해 히말라야 조산대가 형성되고 인도 대륙의 만입(indentation) 과정에서 인도차이나와 남중국지괴가 동남쪽으로 돌출되는 사건이 발생하였다(Tapponnier and Molnar, 1976; Hall, 2002; Fournier *et al.*, 2004). 또한, 태평양의 하와이-엠펜더 군도의 굴곡을 근거로 약 43 Ma경에는 태평양판의 이동방향이 북북서에서 서북서방향으로 급작스럽게 변화되는 사건이 발생하였음이 널리 알려져 있다. 고제3기 말에 이르러서는 약 25 Ma에서부터 일본열도가 유라시아에서 급속히 분리되면서 동해가 확장되는 사건이 발생하였으며, 15 Ma경에는 남남동쪽으로 이동되어 가던 일본열도의 남서부가 북상하는 필리핀해판의 이즈-보닌 아크(Izu-Bonin arc)와 충돌하여 시계방향으로 회전되는 사건이 발생하였다(Otofuji *et al.*, 1985, 1994; Kimura and Tamaki, 1986; Lallemand and Jolivet, 1986; Celaya and MaCabe, 1987; Jolivet, *et al.*, 1990; Hayashida *et al.*, 1991; 김인수, 1992; Fabbri *et al.*, 1996). 또한, 신제3기 말에는 일본해구에서 섭입되던 태평양판의 각도가 얕아지고 유라시아 대륙에서 분리된 아무르판이 동진하면서 현재 동해 일원에 동-서 방향의 압축응력이 누적되고 있음이 알려져 있다(이봉주 외, 1999; 전명순 외, 1999; 문태현 외, 2000; 장태우, 2001; 손문 외, 2002; Iio *et al.*, 2002; Fournier *et al.*, 2004).

한편, 한반도 동남부에는 양산단층과 울산단층과 같은 주요 단층들이 존재하며 신생대 동안의 지각변형 과정에서 다양한 지질구조가 형성되었다. 대표적인 지각변형 산물로는 먼저, 고제3기에 관입된 남북~북북동방향의 염기성 암맥군이 있다. 이 암맥군은 한반도 동남부 전역에서 체계적인 방향성을 보이며 수동형 관입의 특징을 보인다(김진섭 외, 2002a, 2002b; 김종선 외, 2005). 신제3기 마이오세에는 지괴의 시계방향 수평 회전운동과 함께 동해안을 따라 곳곳에 지각이 침강하여 퇴적분지들이 밀집되어 만들어졌다(한중환 외, 1987; 김인수, 1992; Yoon and Chough, 1995; 손문, 1998). 또한, 약 15 Ma에 이르러서는 한반도 동남부에 작동하던 응력이 반전되면서 퇴적분지의 확장이 종결되고 지각의 융기가 발생한 것으로 알려져 있다(Chough and Barg, 1987; 김인수, 1992; 손문 외, 1996, 손문과 김인수, 1996; Hall, 2002). 최근 들어서는 울산단층대와 그 동쪽 제3기 분지지역에서 동서 내지 동북동-서남서 방향의 압축응력에 의해 형성된 활동

성이 의심되는 다수의 제4기 단층들이 보고되고 있어(Kyung and Okada, 1995; 류충렬 외, 1996; 경제복 외, 1999; 이봉주 외, 1999; 장태우, 2001), 한반도 동남부는 현재까지도 구조운동이 계속되고 있는 지역임이 밝혀지고 있다. 따라서 한반도 동남부 지역은 신생대동안의 아시아 일원의 주요 지구조사건과 관련하여 다양한 지각변형운동을 겪었음이 분명하다.

이번 연구는 신생대 동안 한반도 동남부에서 발생한 지각변형의 주요 산물들에 관한 지질학, 지구물리학, 암석연대학 등의 다양한 기존 자료들을 정리하고 분석하여 시대별 지각변형의 대표적인 특성들을 파악하는데 목적이 있다. 또한 시대별로 파악된 지각변형 특성들의 원인이 되었던 지구조적 사건을 파악하고 연결시킴으로써 판구조론의 관점에서 상호간의 관련성과 의미를 토의하고자 한다.

한반도 동남부 신생대 지각변형의 주요 특징

고제3기 염기성 암맥군

암맥의 관입은 인장 단열들을 따라 마그마가 유입되는 수동형 관입(passive injection)과 마그마압력에 의한 유압 단열작용의 결과인 강제 관입(forceful injection)으로 구분된다(Price and Cosgrove, 1990). 강제 관입은 1% 내외의 미약한 지각신장을 발생시키며 개개 암맥들이 고립되어 산출되는 반면, 수동형 관입은 대부분 수십 % 이상의 지각 측방 신장과 일정한 방향성을 가진 암맥군(dike swarm)을 형성시키는 것이 특징이다. 따라서 수동 관입의 결과인 암맥군의 우세한 방향과 공간적 분포 특성은 광역 혹은 지역적인 지각 변형사와 고응력장을 해석하는 하나의 수단으로써 유용하게 사용되고 있다(Speight and Mitchell, 1979; Nicholson and Pollard, 1985; Bussell, 1989; Glazner *et al.*, 1999; Borradaile, 2001).

한반도 동남부 울산단층 일원에는 수동형 관입의 특징인 체계적인 방향성을 보이는 염기성 암맥군들이 발달한다(김진섭 외, 2002a, 2002b) (Fig. 1). 이들 암맥들은 전체적으로 북북서~북동방향 범위의 관입방향을 보이나 암맥 관입면의 평균 주향은 동쪽 해안으로 갈수록 시계방향으로 보다 많이 회전된 양상을 보여준다(Fig. 2). 특히 한반도 동남부 마이오세의 지각변형 동안 발생한 분지 형성과 지괴의 시계방향 수평 회전운동을 가장 서쪽에서 규제한 지구조선으로 알려져 있는 연일구조선(김인수 외, 1998; 손문 외, 2002)을 중심으로 서편과 인접부(단층 파쇄대 주변) 그리고 동편으로 나누어 그 방향성을 살펴보면 흥미로운 사실을 발견할 수 있다. 먼저, 연일구조선 서편의 염기성 암맥의 경우(Fig. 2a)에는 관입면이 평균 N06°E의 주향과 89°SE의 경사를 보여주며 북북서~북북동방향에 밀집되어 산출된다. 연일구조선 단층 파

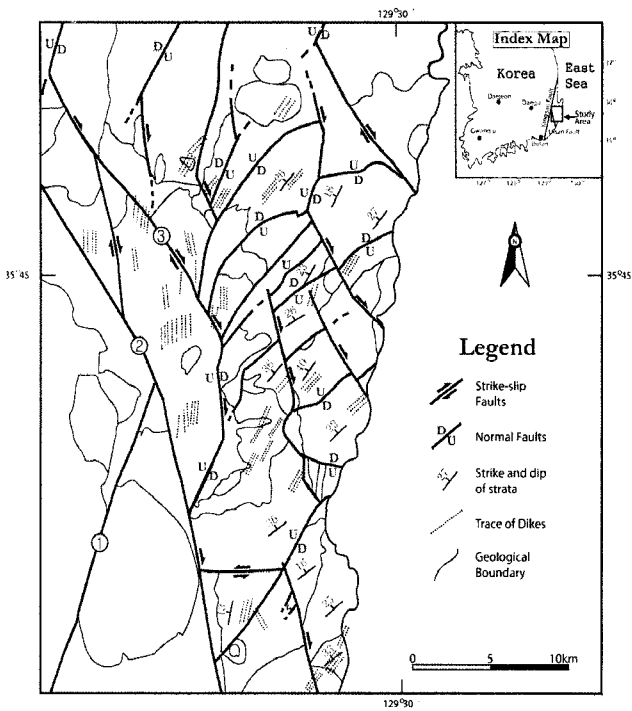


Fig. 1. Structural map in the area to the east of the Ulsan Fault showing the traces of major faults, bedding, and dikes. Shaded area indicates the area in which the Tertiary Miocene basins are developed and the clockwise deflections of remanent magnetization are observed. ① Dongrae Fault, ② Ulsan Fault, ③ Yonil Tectonic Line.

쇄대 내 혹은 인접부에서 관찰된 암맥의 경우(Fig. 2b)에 관입면의 자세는 평균 주향이 N15°E, 경사가 74°SE로서 서편의 것들에 비해 약 10° 시계방향으로 수평 회전되어 있으며 약 15° 북서로 경동된 양상이다. 한편, 연일구조선보다 동편의 암맥의 경우(Fig. 2c)에는 보다 시계방향으로 회전되어 평균 N37°E의 주향을 가리키고 있으며 83°SE로 경사져 있다. 즉, 연일구조선을 경계로 서쪽지역과 인근지역 그리고 동쪽 지역의 화강암체에서 관찰된 염기성 암맥의 평균 관입면 주향 방향은 동쪽으로 갈수록 시계방향으로 회전되는 양상이다(N06°E-N15°E-N37°E). 이는 이들 암맥들이 정치 이후 연일구조선 동쪽의 것들만 시계방향 수평 회전운동을 겪었으며, 동해안에 가까이 위치한 것일수록 보다 많은 양의 회전운동을 겪었음을 의미한다. 따라서 실제 염기성 암맥군이 관입될 시기에는 한반도 동남부에 동서방향에 가까운 최소 수평응력(σ_{1min})이 작동되었으며, 연일구조선의 동편의 경우에는 이후의 마이오세 지각변형 동안 지괴의 시계방향 수평회전운동으로 북서-남동방향으로 편향된 것으로 판단된다.

암맥군의 관입 시기를 결정하기 위해서 연일구조선을 중심으로 양편 염기성 암맥을 대상으로 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정이 시도되었다(김종선 외, 2005). 그 결과, 연일구조선 서편에서 채취된 남북방향 암맥과 동편에서 채취된 북동방향 암맥의 경우에 각각 47.34 ± 0.83 Ma와 47.99 ± 1.27 Ma로써 약 48 Ma로 동일한 결과가 도출되었다. 한편, 특이하게 서북서방향의 관

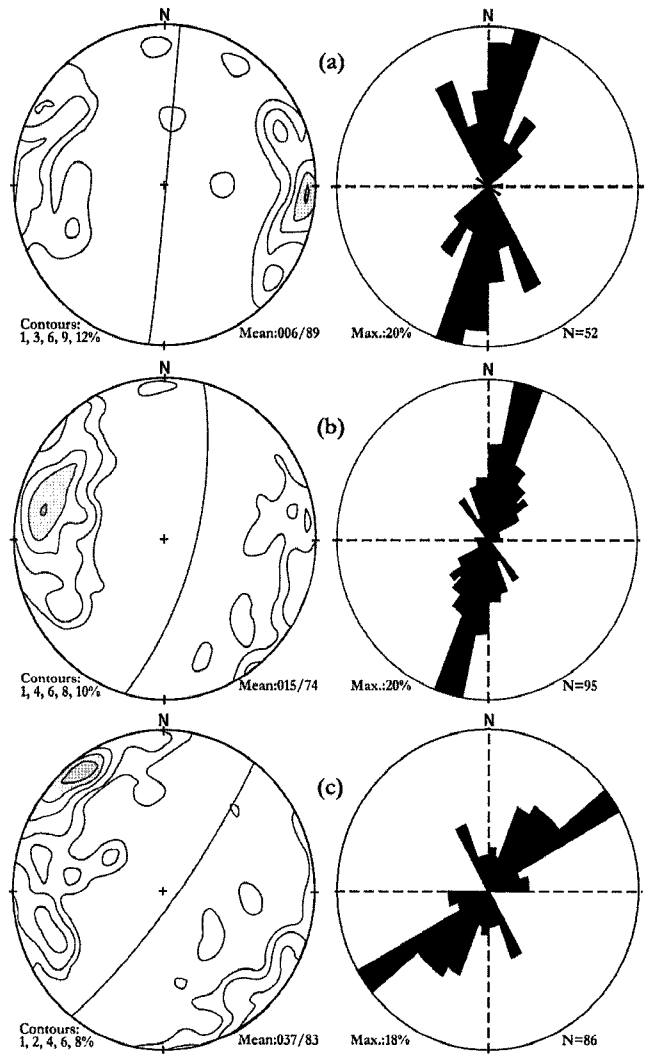


Fig. 2. Contoured π - (lower hemisphere, equal-area projection) and rose diagrams of the attitudes of intrusion of basic dikes in the Bulgksa Granites (a) in the west of YTL, (b) adjacent to it, and (c) in the east of it. Great circles indicate the mean attitudes. Mean: Strike/dip are measured according to the right-hand rule.

입면을 가지는 암맥의 경우에는 남북 내지 북북동의 것들과는 달리 보다 오래된 52.38 ± 0.91 Ma의 관입연령을 보여주었다. 이는 연일구조선 양편의 남북과 북동방향의 염기성 암맥군이 48 Ma경에 동시에 관입하였음을 지시하며, 일부 나타나는 서북서방향의 것과는 다른 시기의 것임을 지시한다.

한편 거제도 동부에도 서북서방향의 염기성 암맥군과 이를 절단하는 북북동방향의 염기성 암맥군이 산출되는 것으로 알려져 있다(손문 외, 2007). 이들에 대한 K-Ar와 Ar-Ar 절대연령 결과를 종합하면, 북북동방향의 것은 51~44 Ma 그리고 서북서의 것은 64~52 Ma 사이로 나타나고 있어 울산단층 일원 암맥군의 절대연령 측정 결과와 유사하다. 이는 48 Ma 전후의 동서방향 인장응력이 한반도 동남부 지역에 보다 광범위하게 작동되었음을 지시한다.

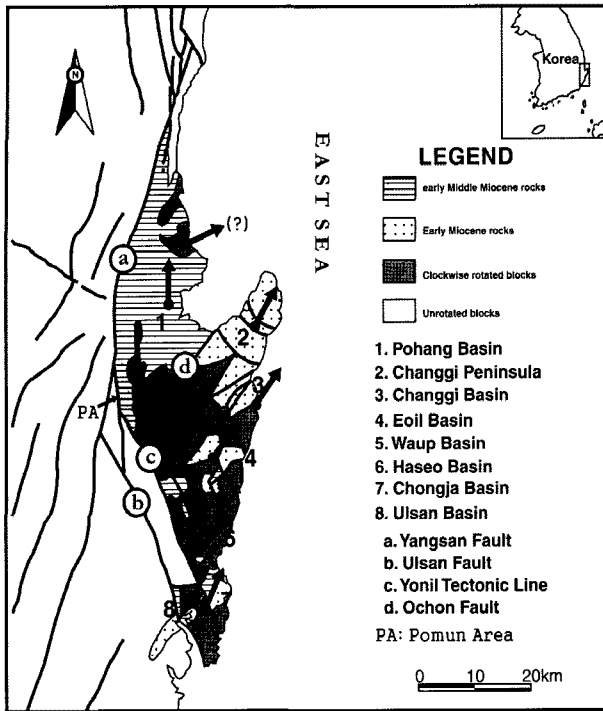


Fig. 3. Structural map showing the rotation magnitudes of structural domains based on the mean directions of ChRMs (black arrows). Note that the shape and geographical position of each basin, and rotational angle of each domain.

신제3기 마이오세 분지확장

동해가 활발히 확장되던 마이오세 동안 한반도 동해안을 따라서 발생한 지각변형의 대표적인 산물 중의 하나는 지각 확장으로 인한 퇴적분지의 형성이다. 마이오세 퇴적암류와 화

산암류로 충전되어 있는 이들 퇴적분지들은 강원도 삼척군 북평읍 일원의 북평분지(김봉균, 1970)를 제외하고는 양산단층과 울산단층을 기준으로 동편에서만 분포한다(Fig. 3). 이곳 분지들은 대부분 단층으로 구획되고 기반암에 의해 서로 격리되어 있으며 충전물의 암상과 연령에서 차이를 보여주고 있어 북으로부터 영해분지, 포항분지, 장기분지, 와읍분지, 어일분지, 하서분지, 정자분지, 울산분지로 구분된다(이현구 외, 1992; 손문과 김인수, 1994; 손문, 1998; 손문 외, 2000, 2002; Son et al., 2000). 그러나 연구자에 따라서는 와읍, 어일, 하서 그리고 정자분지를 합쳐 어일분지로(김봉균, 1970), 혹은 포항분지 이남의 모두를 묶어 하나의 분지, 즉 양남분지라(윤선, 1988) 부르기도 한다.

포항분지 이남의 와읍, 어일, 정자분지에 대한 연구결과들을 종합하면(손문과 김인수, 1994; 손문 외, 2000; Son et al., 2000), 이들 분지들은 공통적으로 북북서방향의 우수향 주향 이동단층들 사이의 우향 굴곡부 혹은 오버스텝부에서 형성된 당겨열립형(pull-apart) 분지들이다. 또한 분지들은 모두가 북동-남서방향으로 신장된 모양을 보여주며 북동방향의 축을 가진 일련의 지구(graben) 혹은 반지구(half-graben)를 이루고 있다(Figs. 4, 5).

분지의 경계단층들은 크게 두개의 단층군으로 구분할 수 있다: (1) 북동방향의 정단층군, (2) 북북서방향의 우수향 주향 이동단층군. 먼저, 북동방향의 정단층군은 분지의 북서부와 남동부의 경계단층을 형성하고 있다. 북서부 경계단층은 남동쪽으로 경사져 있으며 점완/서가형의 단층기하를 보여준다. 한편, 남동부 경계단층은 북서부 경계단층의 반향단층(antithetic fault)으로 활동하였으며 북서부 경계단층에 비해

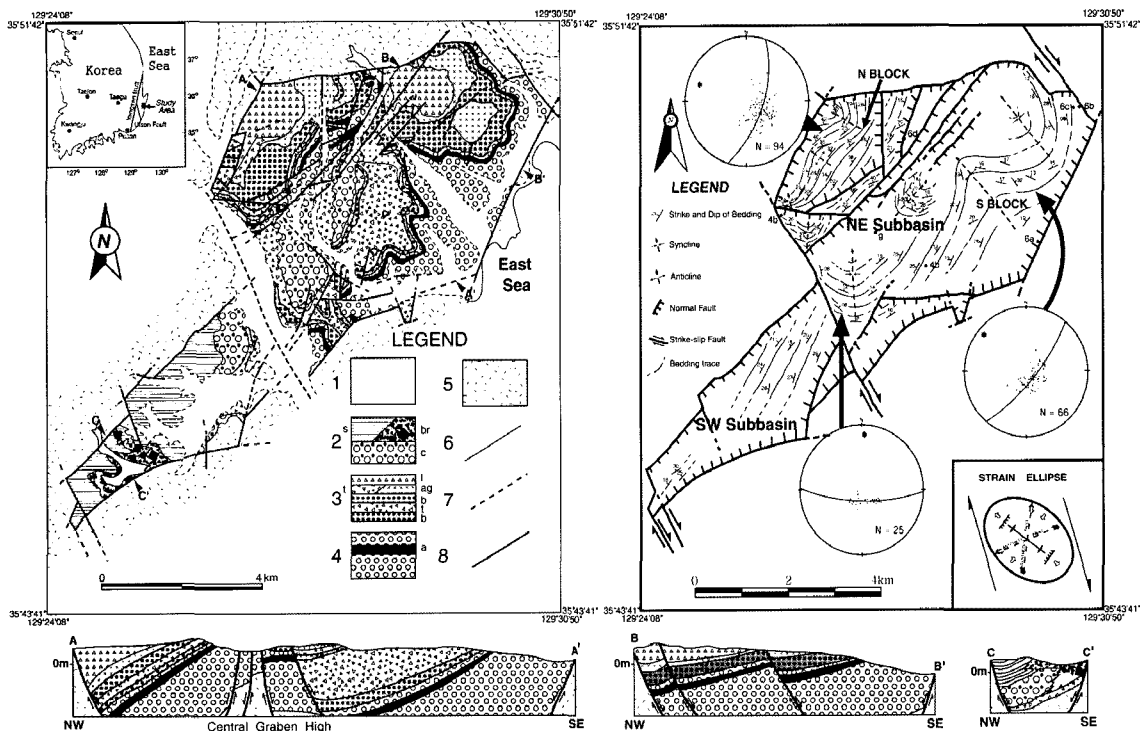


Fig. 4. Geological and structural maps with cross sections of the Eoil Basin.

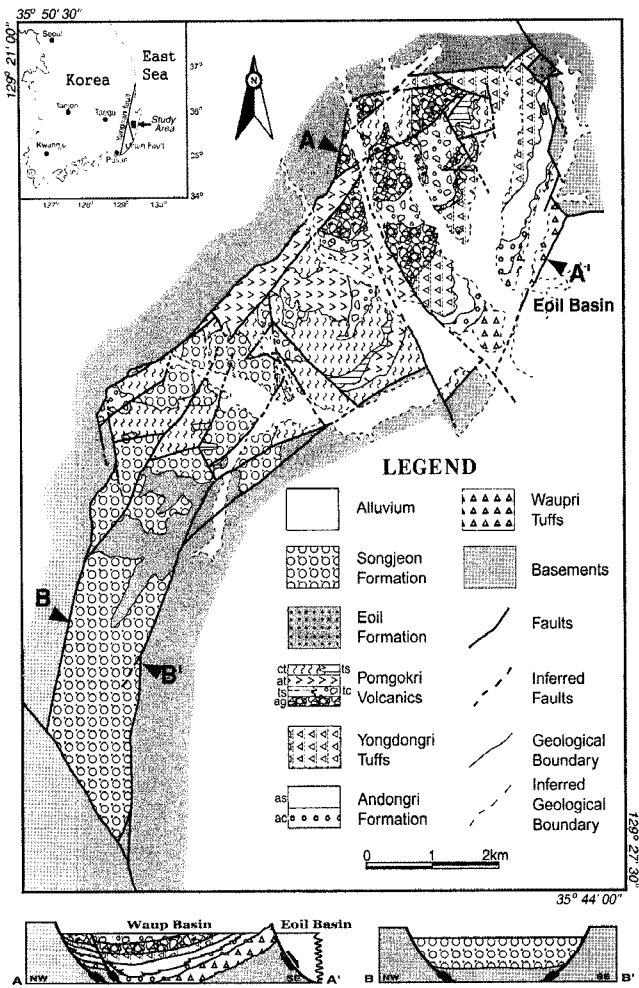


Fig. 5. Geological map and two schematic cross sections of the Waup Basin. ac (as): conglomerates (sandstones) zone in the Andongri Formation. Symbols: ag, ts, tc, at, and ct: agglomerates, tuffaceous sandstones, tuffaceous conglomerates, andesitic tuffs, and crystal tuffs in the Pomgokri Volcanics, respectively.

상대적으로 변위량이 작다. 때문에 이곳 기반암과 분지 충전물의 지층은 단층 인접부 일부를 제외하고는(손문과 김인수, 1994; 손문 외, 2000) 대부분 북서향으로 경사져 있어 지괴들이 북서방향으로 경동된 특징을 보인다. 또한, 고기의 지층일수록 지층의 경사각이 커지는 경향을 보여주고 있어 지괴 경동은 퇴적동시성으로 발생한 것으로 판단된다. 반면, 북북서방향의 우수향 주향이동단층계는 분지의 북동부와 남서부의 경계단층을 이루고 있으며 서로 짝을 이루고 주변위대로서 활동한 것으로 판단된다. 이들 두 단층군은 대체로 40°-60°의 각도로 사교하고 있다.

분지 내부 충전물에 발달하는 구조들을 살펴보면, 신장구조로서 성장단층을 포함하는 정단층과 염기성 암맥들이 널리 관찰되고 있으며 이들은 모두 분지의 경계단층 중 정단층군과 거의 평행한 북동방향의 주향을 가지고 있다. 한편, 분지 내외에서 실시된 취성변형요소들을 이용한 고응력장 복원에서는 σ_1 또는 σ_2 가 수직 혹은 이수직이며 수평최대응력

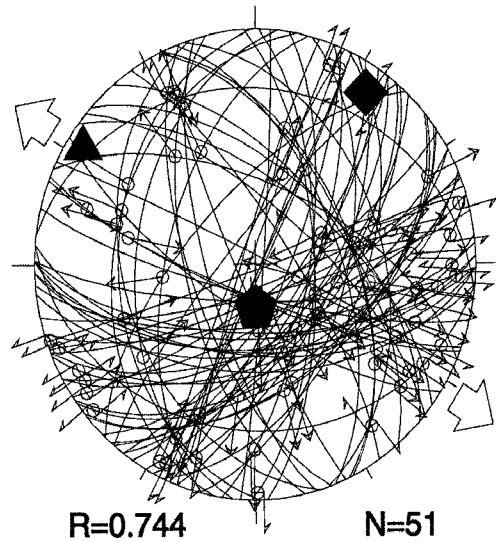


Fig. 6. Fault-slip data of all striated fault planes observed in the outcrops adjacent to the border faults of the Eoil Basin (lower hemisphere, equal-area projections). Divergent arrow head represents horizontal stretching direction ($\sigma_{Hmin} = N56^\circ W$). The principal stress axes σ_1 (filled pentagons), σ_2 (filled squares), σ_3 (filled triangles) are also projected. R: $\sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$.

(σ_{Hmax})이 북동방향이며 최소수평응력(σ_{Hmin})이 북서방향으로 북서-남동방향의 횡인장성 응력장을 지시하고 있다(Fig. 6).

한편, 마이오세 분지들의 충전물은 북동에서 남서쪽으로 갈수록 퇴적연령이 전반적으로 젊어지는 특징을 보이는데 와읍분지와 어일분지가 가장 대표적인 경우이다(Son *et al.*, 2000). 와읍분지의 경우에 지질구조와 지층의 분포에 따라 세 개의 구조적 구역 즉, 북동지괴, 중앙지괴, 그리고 남서지괴로 구분된다. 이들 지괴들은 모두 퇴적 동시성 단층들에 의해 구획되며, 북동지괴 - 중앙지괴 - 남서지괴의 순서로 충전물의 퇴적연령이 젊어지고 젊은 지층일수록 지층의 경사가 얕아지는 특징이 뚜렷하다(Fig. 5). 따라서 와읍분지와 어일분지의 경우는 북동부에서 확장을 시작하여 시간이 지남에 따라 남서쪽으로 확장축이 확산되는 일종의 전파 열개(propagating rifting; Tamaki, 1995; Auzende *et al.*, 1995)의 과정을 겪었던 것으로 해석된다.

1980년대 후반기에 들어 남한 제3기분지 지역 일원에 대한 고자기학적 연구(Kim *et al.*, 1986; 김인수와 강희철, 1989; Han, 1989)가 본격적으로 수행된 이래로, 여러 연구들(김광호 외, 1993; 민경덕 외, 1994; 김광호와 도성재, 1994, 김인수와 강희철, 1996; 손문 외, 1996; 등)에서 제3기 암석들의 잔류자기 편각들이 시계방향으로 편향되어 있음이 관찰되었다. 이러한 잔류자기의 편향현상은 이 지역에서 특징적으로 시계방향의 수평 지괴회전운동이 있었음을 의미하며, 인근 주요 단층들이 우수향 주향이동단층으로 활동하였음을 지시한다(Kissel and Laj, 1989). 한반도 동남부에 대한 고자기학적 연구결과들을 지역별로 살펴보면(Fig. 3), 포항분지 북

동부에 위치하는 기반암인 고제3기 데사이트질암에서의 잔류 자기 방향은 시계방향으로 약 65° 편향(민경덕 외, 1994)되었으나 분지충전물인 연일층군에서는 편향되지 않은 값(민경덕 외, 1994; 김광호 외, 1993)을 보인다. 따라서 연일층군 퇴적 시작인 약 17 Ma 이후에는 지괴의 수평회전이 종결된 것으로 판단된다. 포항분지 이남에서는 전기 마이오세 지층들인 범곡리층군과 장기층군의 잔류자기 편향각은 약 25°-50°의 범위를 보인다(Fig. 3). 장기반도, 장기분지, 어일분지, 하서분지, 정자분지의 전기 마이오세 범곡리층군과 장기층군의 잔류자기 방향을 살펴보면, 각각 평균 약 30°, 35°, 40°, 50° 25°로써 지역 간 다소 차이를 보여주고 있으나 전반적으로 시계방향으로 편향된 양상이다. 한편, 포항분지의 서쪽 경계단층과 연일구조선의 서편 지역에서는 잔류자기의 편향현상이 관찰되지 않고 있어(Fig. 3) 마이오세 지각변형 동안 이 지역에서는 지괴의 회전운동이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

한반도 동남부 마이오세 분지들은 주변 지괴의 운동학적 특징에 따라 평행사변형꼴 분지(parallelogram-shaped basin; rhombochasm)와 쐐기형 분지(wedge-shaped basin; sphenochasm)로 나눌 수 있다(Fig. 7; 손문, 1998). 전자는 시계방향으로

회전하는 기반암 지괴들 내에서 북서-남동방향의 지각확장에 의해 생성되었으며, 후자는 시계방향으로 수평 회전하는 지괴와 회전하지 않는 지괴 사이에서 지각의 부채꼴식 확장에 의해 만들어졌다. 평행사변형꼴 분지는 정자, 어일, 와읍 그리고 장기분지가 해당되며 분지 충전물의 연령을 근거로 할 때 전기 마이오세에 주로 확장되었으며, 쐐기형 분지는 울산 그리고 포항분지가 해당되며 중기 마이오세초에 이르러 주로 확장되었다. 이는 공간상 차별적인 지괴의 회전운동이 분지의 기하와 확장 방식을 결정하는 주요한 요인이 될 수 있음을 보여준다.

한편, 포항분지는 전형적인 ‘쐐기형 분지’로써 서쪽으로 양산단층에 의해 그리고 동남쪽으로는 오천단층에 의해 구획되어 있다. 양산단층의 서쪽은 경상분지 경상누층군으로 구성된 기반암 지괴로써, 이 지괴에서는 암석의 잔류자기가 편향되었다는 보고가 없다(강희철, 1995). 반면, 오천단층 동남쪽의 장기반도에서는 많은 연구들에서 암석의 잔류자기가 시계방향으로 회전되었음이 보고되었다(Kim *et al.*, 1986; 김인수와 강희철, 1989; 민경덕 외, 1994; 등). 장기반도에서의 지괴의 회전운동이 전적으로 포항분지의 생성과 동시에 발생하였다고는 말하기는 곤란하나 양산단층과 오천단층의 사이각이 약 30°로써(Fig. 3) 장기반도에서의 범곡리층군과 장기층군의 평균 잔류자기 편향값(약 30°)과 수치상으로 거의 일치하고 있어 흥미롭다. 한편, 포항분지는 분지의 폭이 넓어지는 영일만 쪽으로 갈수록 보다 젊은 지층이 퇴적되고 퇴적물의 입자도 세립화 된다(Yoon, 1975; Yun, 1986). 또한 분지 내 지층은 남쪽의 분지들에서의 것들과는 달리 대체로 동남동방향으로 10° 내외로 완만하게 경사져 있다(Yun, 1986). 이러한 특징들은 분지의 확장이 서북서에서 동남동방향으로 진행되었고 퇴적 중심지 또한 서북서에서 동남동쪽으로 이동하였음을 지시하며 그 원인은 오천단층 동남쪽 장기반도의 시계방향 회전에 있음을 시사하는 것이다.

한반도 동남부의 마이오세 분지의 발달과 지괴의 회전운동은 많은 국내외 학자들에 의해 양산단층과 울산단층이 우수향 주향이동단층으로써 활동한 결과로 해석되어 왔다(한중환 외, 1987; 김인수, 1992; Yoon and Chough, 1995; Fabbri *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000). 그러나 양산단층과 울산단층 일원에서 실시된 최근 일련의 연구들은 이러한 견해에 강한 의문을 제기하며 새로운 구조선인 연일구조선의 존재를 제안하고 있다(Son *et al.*, 1997; 김인수 외, 1998; 문태현 외, 2000; 손문 외, 2000, 2002; Sohn and Son, 2004). 먼저 양산단층 일원에서 실시된 고자기 연구결과(강희철 외, 1996)에서, 단층 양편 암석들에서 잔류자기의 편향이 인지되지 않았다. 이후 수행된 울산단층 일원의 고자기 연구에서도(Son *et al.*, 1997; 김인수 외, 1998) 울산단층선으로 알려진 울산-경주간 계곡선 양편 암석들에서 잔류자기의 편향이 나타나지 않았다. 반면, 흥미롭게도 동해안 마이오세 분지 지역에서 널리 나타나는 잔류자기의 시계방향 편향현상은 울산단층선으로부터 약 5 km 이상 동편의 지역에서만 관찰되었다

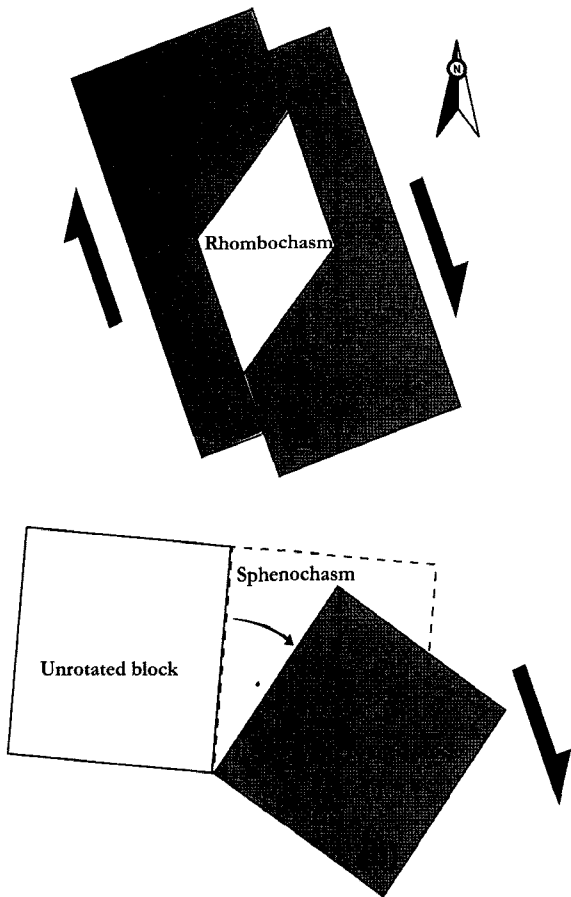


Fig. 7. Two types of kinematic models explaining the opening of the Miocene basins in southeast Korea. (a) Parallelogram-shaped basin model (rhombochasm). (b) Wedged-shaped basin model (sphenochasm). All of them are originated by NNW dextral simple shear.

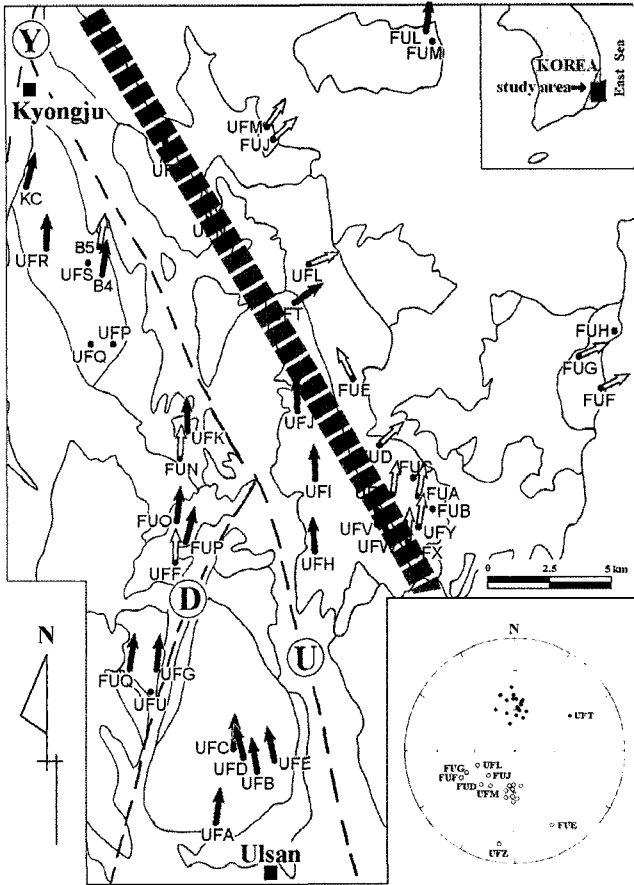


Fig. 8. Result map showing declination of site-mean ChRMs in the vicinities of the Ulsan Fault. Solid (white) arrows represent the sample sites with normal (reversed) ChRM polarity, whereas solid dots without arrow represent the sample sites from which no stable ChRM direction could be obtained. Note a dotted shadow band which represents a suspected tectonic line (=Yonil Tectonic Line).

(Fig. 8). 따라서 울산단층선 동편 5 km 지점에 마이오세의 지괴 수평회전을 규제한 구조선이 있을 것으로 추정하고, 이 구조선으로 “연일구조선”으로 명명하였다(Son *et al.*, 1997; 김인수 외, 1998). 이에 후속적인 야외조사에서는 추정된 연일구조선이 폭 수십 m의 연속적인 단층 파쇄대임이 추적·확인되었다. 또한 이 파쇄대는 시계방향 지괴회전 외에도 동해연변 지역에서 마이오세에 활발하였던 화산과 퇴적활동 그리고 분지를 확장시킨 정단층들의 서쪽 연장과 마이오세 염기성 암맥군의 방향성도 규제하고 있음이 밝혀졌다(Fig. 9). 따라서 연일구조선이 한반도 동남부에서 발생한 마이오세 지각변형을 주도적으로 규제한 서쪽 한계선이 분명한 것으로 판단된다. 한편, 이 구조선을 따라 동편 인접지에는 연일층군과 대비되는 역암층이 돌서령 선상지 퇴적층으로 산출된다(손문 외, 2002). 이는 전기 마이오세에 동해가 확장되는 동안 동해안가에 가해진 북북서방향의 우수향 전단력이 서쪽의 내륙으로 전파되었으며, 이 응력은 연일층군이 퇴적되기 시작하던 약 17 Ma경에 이르러 연일구조선의 단층운동에 의해 최종적으로 해소되었음을 지시하고 있다(손문 외, 2002).

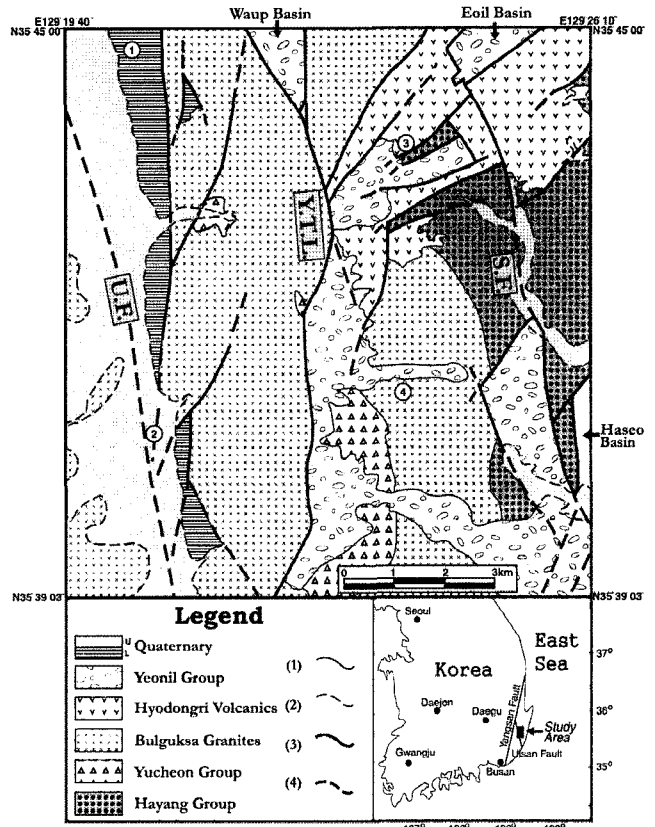


Fig. 9. Detailed geological map of the vicinity of the southern part of the Yonil Tectonic Line. U.F.: Ulsan Fault, Y.T.L.: Yonil Tectonic Line, S.F.: Seokup Fault. (1) geological boundary, (2) inferred geological boundary, (3) fault, (4) inferred fault. L: Lower part of Quaternary, U: Upper part of Quaternary. Towns: ① Malbang-ri, ② Moha-ri, ③ Hyodong-ri, ④ Sindae-ri.

연일구조선은 북에서 남으로 우향 굴곡되는 형태를 가지는데 그 기하학적 형태에 따라 4개의 단층 분절로 나뉘어진다(손문 외, 2002). 북북서방향의 것은 하나의 주변위대로서 순수한 우수향 주향이동을, 두 개의 북북방향의 것들은 해방 굴곡부로서 정이동을 그리고 남북방향의 것은 지괴의 상하운동을 동반한 우수향 횡인장성 운동을 하였다. 이러한 운동 특성은 마이오세 동안에 한반도 동남부에 만들어진 주요 지질구조의 기하와 운동학적 특징 그리고 고응력장 자료와 부합된다. 또한 연일구조선은 북쪽으로 포항분지의 서쪽 경계 단층과 연결되고 있어 북북동방향의 포항분지 서쪽 경계 단층이 주향이동단층이 아니라 정단층으로 활동하였음을 암시해 준다(Sohn and Son, 2004). 이는 앞서 언급한 포항분지의 쉐기형 확장모델과도 부합된다.

마이오세의 응력반전

한반도 동남부에서 분지의 확장이 종결된 시점은 현재로서는 명확하지 않으나 약 15 Ma 이후의 암석들에서 잔류자기의 편향현상이 관찰되지 않은 것으로 보아 이때일 가능성이 높다(김인수와 강희철, 1989; 김인수, 1992). 이 응력반전은 퇴적분지를 경계하고 있던 정단층 중 일부는 역단층으로 재활

시켰으며, 이 때문에 포항시 달전리에 위치하는 포항분지 서부 경계단층의 경우에는 현재 역단층의 기하와 운동학적 특징을 보이고 있으며 인접 마이오세 지층은 역이동에 의한 대규모 끌림 습곡작용으로 수직의 경사를 보여주기도 한다(Fig. 10). 또한, 취성변형요소들을 이용한 고응력장 복원에서는 한반도 동남부의 도처에서 σ_2 가 수직 혹은 이수직인 북서-남동 방향의 횡압축성 응력장이 관찰된다(Fig. 11). 이 응력장은

응력비 $\Phi((\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3))$ 가 대부분 0.1-0.2 내외의 낮은 수치를 보여주고 있어 북서-남동방향으로 σ_1 이 강력하게 작용되었으며, 북동-남서방향으로 작동된 σ_3 는 σ_2 에 비해 세기가 큰 차이를 가지지 않은 것으로 판단된다(문태현 외, 2000).

한편, 한반도 동남부의 마이오세 분지지역에서 암석들의 잔류자기 편각방향은 대부분 시계방향으로 편향된 양상을 보여주고 있으나(Fig. 3), 포항분지의 달전현무암(손문과 김인수, 1996)과 정자분지의 일원의 일부 지괴의 경우(손문 외, 1996; Fig. 12)에는 특이하게 시계반대방향으로 잔류자기가 편향된 특징이 관찰된다. 이는 응력반전기의 북서-남동방향 횡압축 응력장하에서 기존의 북북서 혹은 남북방향의 단층들이 좌수향 주향이동단층으로 재활동되어 이에 따른 좌향 전단력에 의해 국지적으로 지괴가 시계반대방향으로 회전된 결과일 가능성이 높다(Beck, 1976, 1980; Jones *et al.*, 1982).

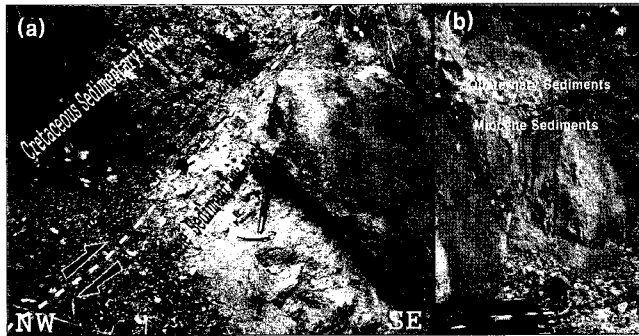


Fig. 10. (a) Outcrop photograph showing a reactivated northwestern border fault of the Pohang Basin which has a top-to-the-east reverse-slip geometry and sense. (b) Outcrop photograph showing vertically dipping Miocene sediments adjacent to the reactivated border fault.

신기 지각변형의 특징

최근 한반도 남동부에서 활성이 의심되는 제4기 단층들의 존재가 속속 보고되고 있으며, 특히 울산단층과 연일구조선 사이 지역에서 이러한 단층들의 출현 빈도가 높고 동해안을 따라 다수의 지진이 발생하고 있음이 역사기록과 지진관측을

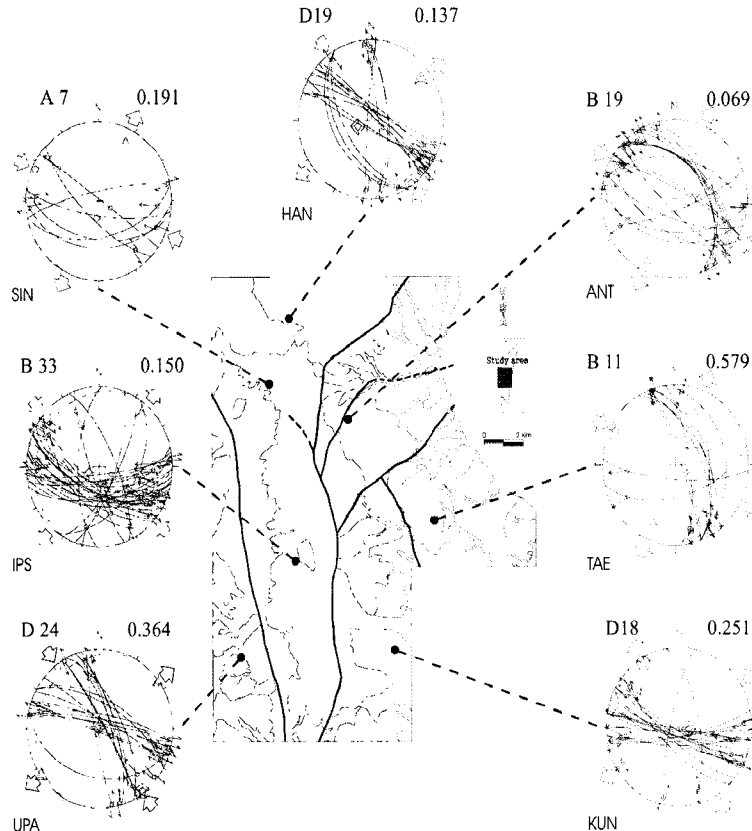


Fig. 11. Stereographic projections of minor fault data and paleostress axes for NW-SE transtensional stress field. Alphabets in upper left of stereograms mean the methods of stress inversion by Choi (1995). D: DAGUR, B: BURIAT, A: ASI. Numbers of upper left of them mean the number of used data for the calculations. Numbers of upper right of the them show Φ ratio $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$, and Alphabets of the lower left mean the site locations. All polygons indicate the principal stress axes (pentagons: σ_1 , squares: σ_2 , triangles: σ_3). Double polygons are those determined by DAGUR, branched polygons by BURIAT, and simple polygons by ASI.

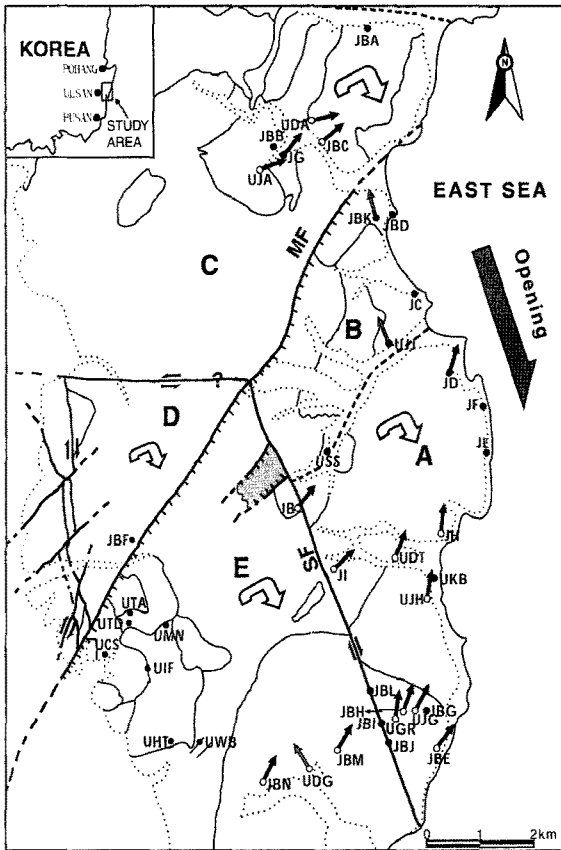


Fig. 12. Result map showing the declination values of site-mean ChRMs and subdivision of the Jeongja-Ulsan basins area. The area is divided into five structural domains according to detailed structural mapping (Son and Kim, 1994). Solid (open) dots with arrow represent the sample sites with normal (reversed) ChRM polarity, whereas solid dots without arrow represent the sites from where no site-mean ChRM direction could be obtained. Note the reddish arrows indicating abnormally counterclockwise rotation.

통하여 드러나고 있다(Kyung and Okada, 1995; 류충렬 외, 1996, 2004; Kyung, 1997; 전명순 외, 1999; 이봉주 외, 1999; 장태우, 2001). 울산단층과 연일구조선 사이에는 제4기 퇴적층을 절단하고 있는 단층들이 현재까지 총 23개 지점에서 발견되었으며 23개 지점 중에는 여러 조의 단층들이 동시에 나타나고 있어 최소 33조의 제4기 단층의 존재가 확인된 상태이다(Fig. 13). 이곳 제4기 단층의 출현 지점들을 연결하면 약 20 km 연장되는 선상배열을 보이고 있으며 북서와 남북방향으로 분절되는 양상이다. 개개의 단층들은 대부분 남북방향의 주향과 동쪽으로 경사진 역단층의 형태를 보이고 있으며, 수직에 가까운 최소응력과 동서 내지 동북동-서남서 방향 최대응력 응력장하에서 형성된 것으로 해석된다(Fig. 14). 또한 이들 단층들은 대부분 지표에서 30° 내외의 저각이나 지하로 갈수록 경사각이 커지며 지하로 갈수록 단층비지대의 두께가 증가하는 것으로 보아 제4기 응력장하에서 적절히 배향된 기존 단층들이 재활된 양상이다.

한반도 동남부의 제4기 단층의 운동 시기는 단층에 따라

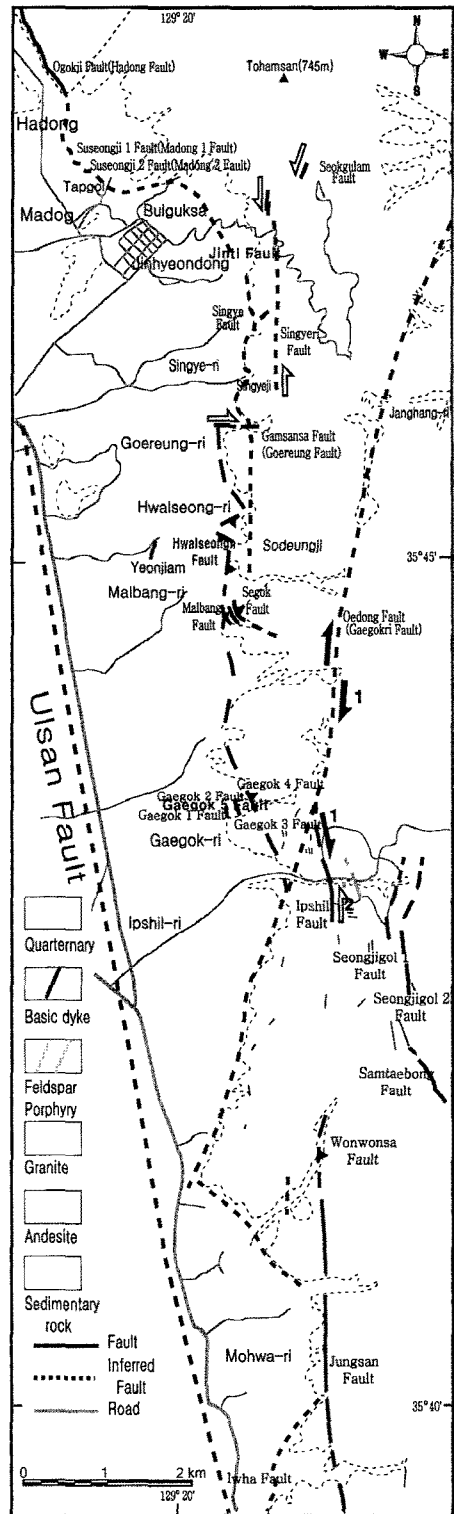


Fig. 13. Geological and structural map of the area in east of the Ulsan Fault, showing the localities of Quaternary faults and their traces.

다양하다. 대표적으로 울산단층 주변의 경우, 최위찬 외 (1998)는 단층암에 대한 ESR 연대 측정을 근거로 말방단층이 약 50만 년 전 이후에 2회 이상 운동한 것으로 보고한 바 있으며 차일단층의 경우 절단된 퇴적층 내 탄화물의 탄소 동위원소 연령이 약 48,000년인 것으로 보고된 바 있다(손문

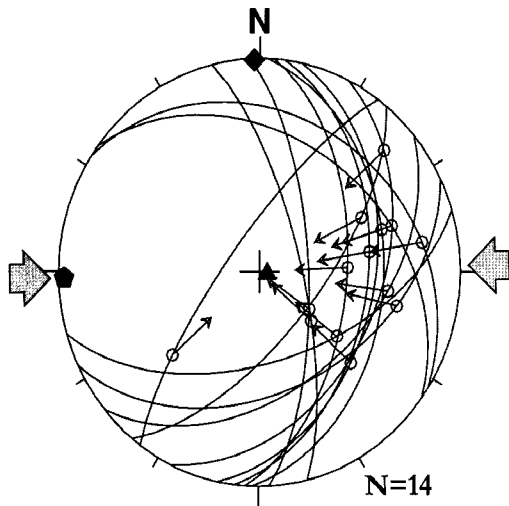


Fig. 14. Fault-slip data of striated fault planes observed from the Quaternary faults in east of the Ulsan Fault (lower hemisphere, equal-area projections). Convergent arrow heads represent horizontal compression direction. The principal stress axes σ_1 (filled pentagons), σ_2 (filled squares), σ_3 (filled triangles) are also projected.

외, 2001). 경재복과 장태우(1991)은 양산단층대의 북부인 경북 포항시 청하면 유계리에서 퇴적층을 탄소동위원소분석법으로 측정한 결과 불과 2,400년~2,000년 전에 단층운동이 있었던 것으로 보고하고 있어 이들 단층들은 매우 최근까지도 활동하고 있을 가능성이 높다.

한편, 동해안을 따라서도 제4기 해빈자갈층을 절단하는 역단층들이 관찰되는데 대표적인 단층으로서는 경주시 양남면에 위치하는 읍천단층과 수렴단층이 해당된다. 읍천단층의 경우는 제3기 화산암류와 백악기 퇴적암류의 경계단층(정단층)이 재활된 단층으로써, 1998년에 항공사진 판독 및 야외조사를 통해 최초로 발견되었으며(최위찬 외, 1998; 이봉주 외, 1999; 과학기술부, 2003) 세 번의 트렌치 조사(T-1998와 T-2002, T-2003)가 이루어진 바 있다.

경주시 양남면 읍천리의 T-2003(Fig. 15: 장축방향: 약 50 m, 단축방향: 약 20 m, 최대 심도: 약 10 m)에서 읍천단층은 제3기 화산암류, 부정합면, 제4기 해안단구층, 그리고 그 상부의 육성 역암 및 니질층의 일부를 절단하는 우수향 횡압축성 역단층의 특징을 보인다. 제3기 화산암류를 절단하는 단층면의 자세는 N14°E/40°SE이며, 상부로 갈수록 점진적으로 경사각이 알려져 N36°E/23°SE로 변화된다. 또한, 단층면은 최상부 육성 퇴적층에서는 최소 2개 이상으로 분기되어 침멸되는 양상이다(Fig. 16). 해안단구층 내의 단층면은 부분적으로 굴곡되어 비탈과 평탄(ramp and flat)의 기하를 보여주기 도 하며 주 단층면에서 분기되어 침멸되는 가지 단층들도 관찰된다. 단층면과 인접한 해안단구층 지층들은 역단층 운동에 의해 끌림굽곡되어 있으며, 역층 내 디스크 형태의 역들은 단층운동에 의해 회전되면서 역들의 장축방향이 단층면에 평행하게 배열되는 양상도 보여준다. 단층 점토의 두께는 제3



Fig. 15. T-2003 trench site showing the geometry of the Eupcheon Fault.

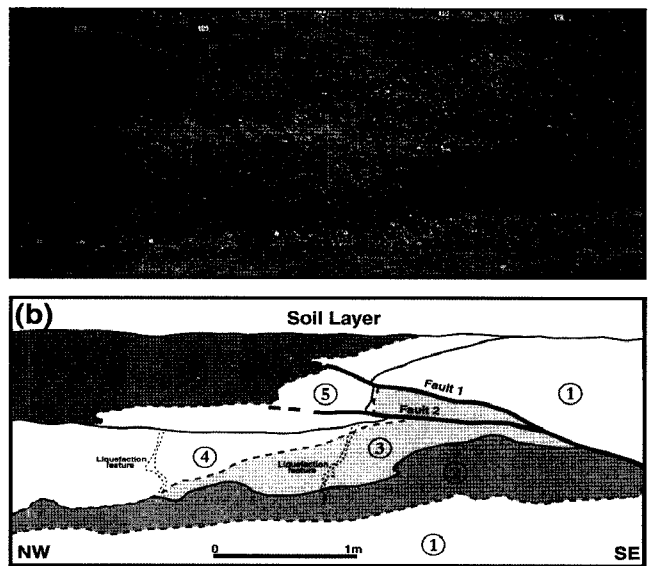


Fig. 16. (a) Outcrop photograph and (b) its sketch showing the upward termination of the Eupcheon Fault. See the text for detailed explanation.

기 화산암류에서 약 2 cm이나 상부로 갈수록 1~2 mm로 얇아져 사라지고 있어 기존 단층이 재활되었음을 지시하고 있다.

단층면에서 관찰된 단층조선들은 N76°~93°E 사이의 선주향을 가지며 역이동성의 운동감각을 보여주고 있어 동서방향에 가까운 횡압축력을 지시하고 있다. 이러한 동서방향 횡압축력은 울산단층대 일원에서 관찰된 제4기 단층들의 운동학적 자료에서 얻어진 응력장과 일치한다(Fig. 14). 최대수직 변위량은 단층 상반의 부정합면으로부터 약 3 m 아래 지점의 하반에서 부정합면이 관찰되지 않는 점으로 보아 최소한 그 이상일 것으로 판단되며 지표 근처로 갈수록 감소하는 경향을 보여준다.

단층의 운동 횡수는 단층 상부의 기하와 상·하반의 지층들의 특징을 대비하여 종합적으로 해석될 수 있다. 읍천단층의 단층면은 제4기 해안단구층과 육성 퇴적층의 경계부에 이

르러 2개의 단층면(Fig. 16의 Fault 1과 2)으로 분기되다가 변위가 줄어들며 사라진다. 단층 상·하반의 지층들의 특징들을 살펴보면(Fig. 16), 먼저 지층 ①은 전형적인 해안단구층으로 층리가 발달하며 원마도가 탁월하고 디스크 형태를 가지는 역들로 구성된 역층과 조립 사질층의 교호층을 형성하고 있다. 이 지층은 단층에 의해 절단되어 상·하반에서 모두 출현하며 최소 수직 변위는 약 1m이며 단층면의 경사를 따라 최소 약 2.5m의 변위를 보여준다. 지층 ②는 암청색을 띠는 니질층으로 층리의 발달이 빈약하며 기저에 하부 단구층에서 유래된 것으로 판단되는 역들이 포함되어 있다. 하위의 지층 ①과는 접이적인 경계를 형성한다. 이 지층은 단층에 의해 절단되어 하반에서만 나타나며 단층면에 근접할수록 다소 두께가 두꺼워진다. 지층 ③은 담황색을 띠며 전체적으로 괴상이나 기저부에 역들이 집중되어 분포하는 상향 세립의 특징을 보여주는 역층으로, 하부는 역지시성이나 상부로 갈수록 기질지시성으로 변화된다. 그 상위의 니질층인 ④와는 접이적인 경계를 보여주는 반면, 하위의 지층 ②와는 단층 인접부에서 뚜렷한 침식 경계면이 확인되나 북서쪽으로 갈수록 그 경계가 접이적으로 변화되는 특징을 보인다. 또한, 단층 인접부에서 두께가 가장 두꺼우며 단층면에서 북서쪽으로 멀어질수록 두께는 감소하여 얇아지는 특징을 보여주고 있다. 이러한 특징들은 이 지층이 단층운동에 의해 지표에 만들어진 단층선의 기저에 퇴적되는 소규모 썩기형 봉적층(colluvial wedge)임을 시사하고 있다(Keller and Pinter, 1996). 이 지층은 단층 1의 하반에서만 노출되며 단층 1과 2에 의해 절단된 양상이다. 단층 1에 의한 경사 변위량(dip-slip)은 최소 2m 이상이나 단층 2에 의한 변위는 10 cm 내외인 것으로 관찰된다. 지층 ④는 담회색을 띠는 괴상의 니질층으로 단층인접부에서 지층 ③을 접이적인 관계로 피복한다. 두께는 북서쪽으로 약 5m 지점까지는 두꺼워지다가 약 1m의 일정한 두께로 측방으로 연장된다. 이 지층 또한 단층 1의 하반에서만 관찰되며 단층 1과 2에 의해 절단된 형태를 보인다. 한편, 지층 ③과 ④의 내부에는 액상화 현상을 지시하는 쇠설성 파이프(clastic pipe)들이 관찰된다. 액상화 특징이 단층과 함께 관찰될 경우에는 과거 지진활동의 하나의 증거로 받아들여질 수 있다(Keller and Pinter, 1996). 지층 ⑤는 담갈색의 기질지시성 특징을 보이는 역층으로 하위의 지층 ④와는 뚜렷한 경계면이 확인되나 상위의 지층 ⑥과는 접이적인 경계를 형성하고 있다. 이 지층은 단층의 상·하반에서 모두 관찰되며 단층에 의해 일부가 절단되나 전체적으로 단층 1과 2를 피복하고 있다. 또한, 단층면과 인접한 단층 하반에서 30 cm 내외의 두께를 가지나 단층면에서 북서쪽으로 멀어지면서 얇아져 사라지고 있어 단층활동으로 만들어진 썩기형 봉적층의 특징을 보인다. 즉, 후기 단층활동에 의해 만들어진 단층선에(지표의 기복)에 의해 상반의 기존 역층과 니질층이 삭박되어 하반의 상대적 저지로 재동된 양상이다. 지층 ⑥은 적갈색을 띠는 니질층으로 층리와 역이 전혀 관찰되지 않는 점토질 지층이다. 이 지층은 북서쪽으로 연속성이

매우 좋은데, 단층의 상반과 하반을 피복하고 있으며 단층에 의해 절단된 흔적이 없다.

이상의 관찰된 사실들을 근거로 하면, 읍천단층을 따라 최소 2회의 단층운동이 있었던 것으로 판단된다. 즉, 지층 ②의 퇴적 직후에 최소 수직 변위 1m의 역단층운동이 발생하였으며, 이로 인해 만들어진 지표의 경사면(단층선에)의 기저부에 지층 ③이 썩기형 봉적층으로 퇴적된 것으로 판단된다. 이후 지층 ④의 퇴적 직후에 또 다른 단층운동이 발생하였으며 이로 인해, 지층 ③과 ④ 내부에는 액상화 특징이 관찰되며 단층선의 생성으로 단층 상반에서 역 및 점토질 퇴적물이 섞여 재동되어 단층을 피복하면서 또다시 지층 ⑤의 썩기형 봉적층을 만들었을 가능성이 높다. 한편, 읍천단층 일원의 제3단구 지층의 OSL 연령이 포화수분 기준으로 7~9만년, 현재수분 기준으로 6~7만년임(과학기술부, 2003)을 고려하면, 앞서 언급한 2회의 단층운동은 이보다는 후기일 것으로 판단된다.

토 의

이번 연구에서는 한반도 동남부에서 발생한 신생대 지각변형의 주요 특징들을 시대별로 정리하였다. 판구조론 관점에서 이러한 지각변형의 주요 특징들의 의미와 지구조적 의의에 관하여 토의하고자 한다.

동서방향의 인장력을 지시하는 남북방향의 염기성 암맥군의 관입이 있었던 48 Ma 전후의 아시아 일원 주요 지구조적 사건을 살펴보면, 이 시기는 고제3기 인도-아시아 대륙의 충돌과 태평양판의 이동방향이 북북서에서 서북서방향으로 갑작스럽게 전환된 약 43 Ma의 지구조적 사건의 사이에 놓인다. 따라서 당시의 한반도 동남부의 응력장과 지각변형은 이들 지구조적 사건들과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 인도판은 곤드와나 대륙에서 중기 백악기 경에 분리되어 약 4,000 km의 거리를 15~20 cm/yr의 속도로 북상하여 고제3기에 이르러 아시아 대륙과 충돌한 것으로 알려져 있다. 이동속도는 해저 자기이상대 자료를 통하여 밝혀져 있는데 약 55~50 Ma에는 그 이동속도가 5 cm/yr 이하로 급격히 감소하고 있어 이때가 대륙의 충돌이 시작된 시기로 해석될 수 있다(Patriat and Achache, 1984; Besse and Courtillot, 1988). 암석학자들은 히말라야 북서부에 존재하는 약 49 Ma 연령의 고압형-에코러자이트상 변성암을 근거로 인도-아시아 대륙의 충돌 시작은 이 변성암의 연령보다는 먼저였을 것으로 보고한 바 있으며(Spencer, 1993), 고자기학자들은 겔보기지자극 이동경로(APWP) 해석을 통하여 인도-아시아 대륙의 충돌은 이미 65~60 Ma경에 시작되었으며 55~50 Ma경에는 봉합이 완료되었음을 주장하기도 하였다(Klootwijk *et al.*, 1992; Patzelt *et al.*, 1996). 한편, Hall(2002)은 다양한 지질 및 지구물리학적 자료들을 이용한 전산 시뮬레이션을 이용하여 인도-아시아대륙 충돌은 앞선 연구자들의 결과보다는 늦은 약 50 Ma에 시작되었으며 본격적인 대륙간 충돌은 45 Ma경

일 것으로 해석한 바 있다. 현재로서는 두 대륙의 정확한 충돌 시기를 결정하기에는 논란의 여지가 있음이 분명하나 앞선 여러 자료들을 근거할 때 늦어도 약 50 Ma에는 이미 충돌이 시작되었을 것으로 판단된다. 이 충돌 사건은 인도차이나반도와 남중국지괴를 동남쪽으로 돌출시켰으며 한반도를 포함하는 동아시아 대륙에까지 영향을 미쳐 동아시아를 동쪽으로 밀어내었을 가능성이 높다(Tapponnier and Molnar, 1976; 김인수, 1992; Fournier *et al.*, 2004).

하와이-앰페러 군도 배열 방향의 급변이 43 Ma경에 있었다는 것은 잘 알려진 사실이다(Koppers *et al.*, 2001). 이러한 태평양판의 이동방향 변화의 원인에 관해서는 현재로서는 명확하지 않으나 Richards and Lithgow(1996)는 몇 가지 가능한 원인 중에 하나로 인도-아시아대륙의 충돌사건을 거론한 바 있다. 즉, 인도-아시아대륙의 충돌로 인해 동아시아 대륙이 동쪽의 태평양쪽으로 밀려감으로써 태평양판 섭입 경사를 서쪽으로 급하게 만들었으며, 이로 인해 빠른 해구의 퇴각과 함께 태평양판을 서쪽방향으로 미는 슬랩부력이 발생하였을 가능성을 생각할 수 있다(Moores and Twiss, 1995). 만약 이러한 가설이 옳다면, 유라시아판의 동쪽 연변에 위치한 한반도는 해구의 태평양쪽 퇴각에 의해 동서방향의 인장응력장하에 놓이게 되며 이로 인해 남북방향으로 배열되는 염기성 암맥군의 관입사건이 발생한 것으로 판단할 수 있다. 한편, Sahabi *et al.*(1996)에 의하면 남반구에 위치한 태평양판과 남극판의 해령의 형태에서도 48 Ma를 경계로 중요한 변화가 인지된다는 보고가 있다. 이러한 점은 48 Ma를 전후하여 전 세계적인 판구조환경의 변화가 발생하였음을 의미하며, 동일한 시기에 관입한 한반도 동남부 염기성 암맥군은 이러한 전 세계적인 지구구조환경 변화를 알려주는 하나의 중요한 결과물일 가능성이 높다.

한반도 동남부의 마이오세 분지 내 충전물의 연령자료들을 살펴보면, 장기층군 효동리화산암류의 저어콘과 인회석의 휘트트랙 연령이 각각 20.99, 24.38 Ma이고(진명식 외, 1989), 범곡리층군 와읍리응회암의 절대연령은 21-22 Ma(Yoon, 1992), 저어콘과 인회석에서의 휘트트랙 연령은 각각 18.52, 22.07 Ma(진명식 외, 1989)인 것으로 보고되고 있으며, 연일층군의 사암층 내 연체동물군의 화석연령은 중기마이오세초(Yoon, 1976)이다. 따라서 한반도 동남부의 분지 확장과 화산활동 그리고 퇴적활동은 주로 25 Ma에서 15 Ma까지 활발하였음을 알 수 있으며 이 시기는 동해가 활발하게 확장되던 시기와의 일치한다(Tamaki, 1986; Kaneoka *et al.*, 1990; Chough and Lee, 1992; Jolivet and Tamaki, 1992). 따라서 한반도 동남부의 마이오세 퇴적분지의 생성은 동해의 확장과 밀접한 관련을 가짐이 분명하다.

동해 확장에 관한 이론은 크게 동해의 동쪽과 서쪽 경계부에서 발생한 대규모 우수향 주향이동단층활동에 의한 당겨열림형 확장모델(Kimura and Tamaki, 1986; Lallemand and Jolivet, 1986; Jolivet, *et al.*, 1990; 김인수, 1992; Fabbri *et al.*, 1996)과 일본열도의 해구쪽 퇴각에 의한 부채꼴식 확

장모델(Otofujii *et al.*, 1985, 1994; Celaya and McCabe, 1987; Hayashida *et al.*, 1991)로 양분된다. 한반도 동남부의 마이오세 지각변형의 특징을 살펴보면, 퇴적분지들은 그 지하와 운동학적 특성에 따라 평행사변형꼴 확장과 썩기형 확장 분지로 구분되나 역학적으로는 모두가 북북서방향의 우수향 주향이동단층들의 운동에 기원이 된 이차적인 신장균열이 확장된 결과로 전형적인 당겨열림분지의 특징을 보여준다. 분지의 확장을 주도한 북동방향의 정단층들은 점완/서가형의 단층들로 지괴들을 북서향으로 경동시켰다. 또한 고자기학적 연구결과를 보면, 분지 일원에서는 잔류자기의 편각방향이 평균 약 35° 시계방향으로 편향된 것으로 나타나 분지의 확장기에 지괴의 시계방향 회전을 발생시키는 우수향 전단력이 지배하는 응력장하에 한반도 동남부가 놓여 있었음을 지시한다. 또한, 분지의 발달과 지괴의 회전운동을 가장 서쪽에서 규제하는 새로운 지구조선인 연일구조선의 경우에는 몇 개의 분절구조로 나뉘어지는 하나 전체적으로 북북서방향의 우수향 주향이동단층대의 특성을 보여주고 있다. 이러한 한반도 동남부의 마이오세 지각변형의 주요 특징들은 동해가 부채꼴식 확장 보다는 당겨열림형 확장을 하였음을 지지한다.

약 15 Ma경에 이르러서 일본 남서부가 북상하는 필리핀해판의 이즈-보닌 아크(Izu-Bonin arc)와 충돌하여 한반도 일원의 응력장이 북서-남동방향의 압축응력장으로 반전되었다. 이로 인해 한반도 동남부 분지들의 확장이 중단되었으며 지각이 융기하면서 현재에는 최고 570 m 고지에서도 당시의 천해성 퇴적물이 관찰된다(손문 외, 2000). 이와 관련하여 한반도 동남부와 인접한 대한해협 탄성과 단면도에서 중기 마이오세 이전의 퇴적층에서 북동-남서 방향의 습곡 및 역단층 구조가 관찰되며(최동립 외, 1994), 취성변형요소들을 이용한 고응력장 복원연구에서는 22-16 Ma동안 북동-남서방향으로 작용하던 압축력이 15-10 Ma 사이에는 북서-남동방향의 압축력으로 반전되어 쓰시마단층계가 우수향 주향이동운동에서 좌수향 주향이동운동으로 전환된 것으로 보고되고 있다(Fabbri *et al.*, 1996).

한반도 동해안에 인접한 후포분지에서 실시된 탄성과 자료 해석에서 전기 플라이오세경에 남북방향의 역단층 및 습곡구조가 형성되었음이 보고되었다(Yoon and Chough, 1995). 또한, 일본열도 이토이가와-시즈오카 구조선(ISTL, Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line)에서 약 5 Ma 이전까지는 인장응력 상태였으나 그 이후부터는 동서압축과 관련한 역단층구조가 나타남이 보고되었다(Ikeda *et al.*, 1996). 또한 3.5 Ma경에는 대한해협에 난류가 유입되기 시작하였음이 해저시추의 미고생물 연구에서 밝혀진 바 있다(Tada, 1994). 그리고 한반도 동남부에서도 동서 내지 동북동방향의 압축력을 지시하는 제4기 충상단층 및 지진해석자료가 제시되고 있다(이봉주 외, 1999; 진명순 외, 1999; 장태우, 2001). 이러한 점들은 동서 내지 동북동-서남서방향의 압축응력장은 약 5 Ma에 시작되었으며 현재까지 지속되어오는 응력임을 지시한다.

최근 국내외 지질학자들은 이러한 동서 압축응력의 원인을

설명함에 있어 인도판의 충돌과 태평양판의 섭입각도 및 이동방향에 근거하고 있다. 계속되는 인도판의 만입으로 인해 한반도를 포함한 동북아시아가 새로운 판, 즉 아무르판이 유라시아판에서 분리되어 매년 약 2 cm 동쪽으로 이동하고 있음을 주장하고 있다(전명순 외, 1999; 문태현 외, 2000; Iio et al., 2002; Fournier et al., 2004). 또한 일본 동쪽의 태평양판은 저각의 섭입 경사를 유지하며 매년 7~8 cm 일본 열도를 서쪽으로 밀어붙이고 있어(Moore and Twiss, 1995) 한반도와 일본열도 사이의 동해는 동서방향의 압축응력이 누적되고 있는 상황이다. 응력이 누적되면 지각에 균열이 발생하여 새로운 단층대가 만들어지며 단층대를 따라서는 저장된 탄성에너지가 주기적으로 방출되어 지진이 발생한다. 이러한 사실들은 현재 동해 내부에 탄성에너지가 누적되고 있으며 대규모 지진을 발생시킬 수 있는 새로운 단층대가 만들어지고 있을 가능성을 시사하고 있다.

결 론

한반도 동남부는 신생대 동안 지구조 환경의 변화에 따라 다중 지각변형을 겪었다. 이를 시대별로 살펴보면, 먼저 인도-아시아의 충돌이 발생하고 태평양판의 이동방향이 급변하던 시기인 50~43 Ma에는 한반도 동남부에는 동서방향 내지 서북서-동남동의 인장력이 발생하였으며 이로 인해 남북-북북동 방향의 염기성 암맥군이 관입하였다.

동해가 남북 내지 북북서-남남동방향으로 활발히 확장하던 25~16 Ma에는 한반도 동쪽 해안선을 따라 우수향 전단력이 발생하였다. 이로 인해 한반도 동남부 도처에 북북서-남남동 방향의 우수향 주향이동단층운동이 발생하였으며 단층의 우향 굴곡부 혹은 오버스텝 부분에는 당겨열림형 퇴적분지가 형성되었다. 또한 우수향 전단력의 영향으로 한반도 동남부의 지괴들은 시계방향의 수평 회전운동을 겪었으며 지괴의 차별 회전운동에 의해 퇴적분지는 평행사변형과 쉐기형 확장 분지로 기하 및 운동학적 특징이 구분된다. 한편, 한반도 동남부에는 북동방향의 주향과 남동방향의 경사를 가지는 서가/점완형의 정단층들이 다수 만들어져 대부분의 지괴가 북서향으로 경동되는 사건을 겪었다. 또한 지각변형과정에서 우수향 전단력은 시간이 지남에 따라 동쪽 해안가에서 서쪽 내륙 쪽으로 전파되었으며 이로 인해 퇴적분지들은 확장 축이 동에서 서쪽으로 이동되는 전파열개 과정을 겪었다. 또한 약 17 Ma경에는 이러한 지각변형을 가장 서쪽에서 규제하는 연일구조선이 운동하기 시작하였으며 이로 인해 전파되어 오던 우수향 전단력이 최종적으로 해소되었다.

필리핀해판의 북상으로 이즈-보닌 아크와 일본 남서부가 충돌해 일본 남서부가 시계방향으로 회전되었던 시기인 약 15 Ma경 이후에는 대한해협에는 북서향 압축력이 가해졌으며 한반도 동남부에서는 응력반전으로 인해 퇴적분지의 확장이 종결되고 지괴의 융기와 국지적인 지괴의 반시계방향 수평회전운동이 발생하였다.

태평양판의 섭입각도가 얕아지고 아무르판이 동진함으로써 동서방향 압축응력이 작동되기 시작하였던 약 5 Ma 이후부터 현재에 이르기까지는 한반도 동남부 일원 특히, 울산단층과 연일구조선 사이에 상반서향의 충상단층들이 밀집되어 만들어져 지괴가 융기되었다. 이러한 동서 압축응력은 최근 한반도 일원 지진 발생의 주요 원인이 되고 있다.

사 사

본 연구는 2005년 5월 19일 대한지질학회 주관 제21차 공동학술강연회에서 발표된 바 있으며, 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- 강희철, 1995, 경상분지에 분포하는 경상누층군 및 화성암류에 대한 고자기학적 연구. 이학박사 학위논문, 부산대학교, 190p.
- 강희철, 김인수, 손문, 정현정, 1996, 양산단층지역에 분포하는 퇴적암 및 화성암류에 대한 고자기 연구. 자원환경지질, 29, 753-765.
- 경제복, 이기화, 岡田篤正, 渡満久, 鈴木康弘, 竹村專二, 1999, 양산단층대 남부 상천리 일대의 트랜치조사에 의한 단층특성 규명. 한국지구과학회지, 20, 101-110.
- 경제복, 장태우, 2001, 양산단층대 북부 유계리일대의 신기 단층 운동. 지질학회지, 37, 563-577.
- 과학기술부, 2003, 지진안전성 평가기반 기술개발 최종보고서. KINS/GR-255, 1433p.
- 김광호, 도성재, 1994, 양남분지에 분포하는 제3기 지층의 고지자기 연구. 지구과학회지, 15, 36-45.
- 김광호, 도성재, 황창수, 임동성, 1993, 포항분지에 분포하는 연일층군의 고지자기 연구. 자원지질, 26 507-518.
- 김봉균, 1970, 한국의 신 제3기 퇴적층에 관한 연구. 지질학회지, 6, 77-96.
- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동 운동. 지질학회지, 28, 84-109.
- 김인수, 강희철, 1989, 어일분지 일대에 분포하는 제3기층에 대한 고자기학적 연구. 지질학회지, 25, 273-293.
- 김인수, 손문, 정현정, 이준동, 김정진, 백인성, 1998, 경주-울산 일원에 대한 지역지질 특성 연구: 울산단층주변 화강암류의 잔류자기와 대자율. 자원환경지질, 31, 31-43.
- 김진섭, 김종선, 손문, 2002b, 한반도 남동부일원의 암맥군에 관한 지화학적 연구. 암석학회지, 11, 182-199.
- 김종선, 손문, 김진섭, 김정민, 2005, 한반도 남동부 제3기 암맥군과 화산암류에 관한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정. 암석학회지, 14, 93-107.
- 김진섭, 손문, 김종선, 김인수, 2002a, 한반도 남동부 제3기 암맥군과 지구조적 중요성. 암석학회지, 11, 169-181.
- 류충렬, 손문, 이용희, 최성자, 최위찬, 2004, 경주 불국사 일대의 제4기단층. KIGAM Bulletin, 8, 3-17.
- 류충렬, 양경희, 이상원, 김인수, 1996, 울산단층 주변의 제4기 단층. 부산대학교 사대논문집, 33, 311-327.

- 문태현, 손문, 장태우, 김인수, 2000, 한반도 동남부 제3기분지 지역에서의 신생대 고응력장 복원. 지구과학회지, 21, 230-249.
- 민경덕, 김원균, 이대하, 이운수, 김인수, 이영훈, 1994, 포항일원에 분포하는 제3기 압류에 대한 고지자기 연구. 자원환경지질, 27, 49-63.
- 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달: 구조지질학 및 고지자기학적 고찰. 부산대학교 이학박사 학위논문, 233p.
- 손문, 강희철, 김인수, 1996, 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구: 3. 정자-울산분지와 그 일원. 자원환경지질, 29, 509-52.
- 손문, 김인수, 1994, 울산군 강동면 제3기 정자분지의 지질구조와 분지발달. 자원환경지질, 27, 65-80.
- 손문, 김인수, 1996, 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구: 2. 포항분지 중부의 현무암절암. 자원환경지질, 29, 369-380.
- 손문, 김인수, 이동호, 이준동, 김진섭, 백인성, 2000, 울산단층일원에 대한 지역지질 특성연구: 제3기 마이오세 와음분지의 지질구조와 대자율비동방성(AMS). 지질학회지, 36, 195-216.
- 손문, 김종선, 황병훈, 이인현, 김정민, 송철우, 김인수, 2007, 거제도 동부에 분포하는 고제3기 암맥군: 절대연대와 지구조적 의미. 암석학회지, 16, 82-99
- 손문, 이용희, 김인수, 장태우, 2001, 울산시 북구 농소1동 차일마을 제4기 역단층(차일단층). 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 65p.
- 손문, 정혜윤, 김인수, 2002, 한반도 동남부 연일구조선 남부 일원의 지질과 지질구조. 지질학회지, 38, 175-197.
- 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 25p.
- 이봉주, 류충렬, 최위찬, 1999, 경주시 양남면 일대의 제4기 단층. 지질학회지, 35, 1-14.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷徹丸, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구; 화산암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 25, 337-349.
- 장태우, 2001, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 지구조 운동. 지질학회지, 37, 431-444.
- 전명순, 전정수, 제일영, 1999, 한반도 및 주변지역에서 발생한 지진의 지진발생 메카니즘 분석. 제54차 대한지질학회 학술발표회 초록집, 28 p.
- 진명식, 김성재, 신성천, 이주연, 1989, K/Ar 및 횡선트랙법에 의한 한국동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석 광물연령 측정 연구. 연구보고서 KR-88-6D, 한국동력자원연구소, 53-84.
- 최동림, 오재경, Satoh, M., 1994, 동해 울릉분지 남부해역의 신생대 지질구조 및 지구조 진화. 한국석유지질학회지, 2, 59-70.
- 최위찬, 류충렬, 기원서, 이봉주, 이병주, 황재하, 박기화, 최영섭, 최성자, 최병영, 조동룡, 김복철, 송교영, 채병곤, 김원영, 김중렬, 이상규, 조성준, 황세호, 황학수, 김유성, 현혜자, 박인화, 이희일, 이동영, 이창범, 김주용, 양동윤, 박덕원, 신성천, 김유숙, 김인준, 류장한, 진명식, 전명순, 지현철, 전정수, 신인철, 강익범, 신현모, 권무창, 오수정, 김상곤, 임무수, 김순길, 정항영, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서. 한국자원연구소, 한국전력공사, 1694p.
- 한중환, 광영훈, 손진담, 손병국, 1987, 한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체구조발달 및 퇴적환경 연구 (II). 연구보고서 KR-86-2-(B)-4, 한국동력자원연구소, 109p.
- Auzende, J.-M., Pelletier, B. and Eissen, T.-P., 1995, The North Fiji Basin: Geology, Structure and Geodynamic Evolution. In: Talyor, B., (ed.), Backarc Basins: Tectonics and Magmatism, 139-175.
- Beck, M. E., Jr., 1976, Discordant Paleomagnetic pole positions as evidence of regional shear in the western Cordillera of North America. *American Journal of Science*, 276, 694-712.
- Beck, M. E., Jr., 1980, Paleomagnetic record of platemargin tectonic process along the western edge of North America. *Journal of Geophysical Research*, 85, 7115-7131.
- Besse, J. and Courtillot, V., 1988, Paleogeographic maps of the continents bordering the Indian Ocean since the Upper Jurassic. *J. Geophys. Res.*, 96(B10): 11,791-11,808.
- Borradaile, G. J., 2001, Paleomagnetic vectors and tilted dikes. *Tectonophysics*, 333, 417-426.
- Bussell, M. A., 1989, A simple method for the determination of the dilation direction of intrusive sheets. *Journal of Structural Geology*, 11, 679-687.
- Celaya, M. and McCabe, R., 1987, Kinematic model for the opening of the Sea of Japan and the bending of the Japanese islands. *Geology*, 15, 53-57.
- Choi, P. Y., 1995, Aspects of stress inversion methods in fault tectonic analysis. *Annales Tectonic*, 9, 22-38.
- Chough, S. K. and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, 15, 45-48.
- Chough, S. K. and Lee, K. E., 1992, Multi-stage volcanism in the Ulleung back-arc basin, East Sea (Sea of Japan). *The Island Arc*, 1, 32-39.
- Chough, S. K., Kwon, S.-T., Ree J.-H. and Choi, D. K., 2000, Tectonic and sedimentation evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth Science Reviews*, 52, 175-235.
- Fabbri, O., Charvet, J. and Fournier, M., 1996, Alternate senses of displacement along the Tsushima fault system during the Neogene based on fracture analyses near the western margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 257, 275-295.
- Fournier, M., Jolivet, L., Davy, P. and Thoma, J.-C., 2004, Backarc extension and collision: an experimental approach to the tectonics of Asia. *Geophys. J. Int.*, 157, 871-889.
- Glazner, A. F., Bartley, J. M. and Carl, B. S., 1999, Oblique opening and noncoaxial emplacement of the Jurassic independence dike swarm, California. *Journal of Structural Geology*, 21, 1275-1283.
- Hall, R., 2002, Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20, 353-431.
- Han, J., 1989, Miocene paleomagnetic data from southern Korea: Implication on model for opening of the Japan Sea. M.S. thesis, Texas A & M Univ., 132p.
- Hayashida, A., Fukui, T. and Torii, M., 1991, Paleomagnetism of the Early Miocene Kani group in southwest Japan and its implication for the opening of the Japan Sea. *Geophysical*

- Research Letter*, 18, 1095-1098.
- Ikeda, Y., Shimazaki, K., and Yamazaki, H., 1996, A Primer on Active Faults in Japan. University of Tokyo Press, p.133-137.
- Iio, Y., Sagiya, T., Kobayashi, Y. and Shiozaki, I., 2002, Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands. *Earth Planetary Science Letter*, 203, 245-253.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the northeast Japan Arc. In: Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M., et al. (eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 127/128, Part 2, p.1311-1331.
- Jolivet, L., Davy, P. and Cobbold, P., 1990, Right-lateral shear along the northwest Pacific margin and the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 9, 1409-1419.
- Jones, D. L., Cox, A., Coney, P. and Beck, M., 1982, The growth of western North America. *Sci. Amer.*, 247, 70-84.
- Kaneoka, I., Notsu, K., Takigami, Y., Fujioka, K. and Sakai, H., 1990, Constraints on the evolution of the Japan Sea based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and Sr isotopic ratios for volcanic rocks of the Yamato Seamount Chain in the Japan Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 97, 195-204.
- Keller, E. A. and Pinter, N., 1996, Active Tectonics: earthquakes, uplift, and landscape. Prentice Hall, 331p.
- Kim, K. H., Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M. W., 1986, Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks from Guryongpo area, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 19, 231-237.
- Kimura, G. and Tamaki, K., 1986, Collision, rotation and back-arc spreading: the case of the Okhotsk and Japan seas. *Tectonics*, 5, 389-401.
- Kissel, C., and Laj, C. (Eds.), 1989, Paleomagnetic rotations and continental deformation: Kluwer, 516p.
- Klootwijk, C.T., Gee, J. S., Peirce, J. W., Smith, G. M. and McFaden, P. L., 1992, An early India-Asia contact: Paleomagnetic constraints from Ninetyeast Ridge. ODP Leg 121. *Geology*, 20, 395-398.
- Koppers, A.A.P., Morgan, J.P., Morgan, J.W. and Staudigel, H., 2001, Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails. *Earth and Planetary Science Letters*, 185, 237-252.
- Kyung, J. B. and Okada, A., 1995, Liquefaction phenomena due to the occurrences of great earthquake: Some cases in central Japan and Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 237-250.
- Kyung, J. B., 1997, Paleoseismological study on the mid-northern part of Ulsan Fault by trench method. *The Journal of Engineering Geology*, 7, 81-90.
- Lallemand, S. and Jolivet, L., 1986, The Japan Sea, a pull-apart basin? *Earth and Planetary Science Letter*, 76, 375-389.
- Moores, E. M. and Twiss, R. J., 1995, Tectonics. W. H. Freeman and Company, 415p.
- Nicholson, R. and Pollard, D. D., 1985, Dilation and linkage of echelon cracks. *Journal of Structural Geology*, 7, 583-590.
- Otofujii, Y., Kambara, A., Matsuda, T. and Nohda, S., 1994, Counterclockwise rotation of Northeast Japan: Paleomagnetic evidence for regional extend and timing of rotation. *Earth and Planetary Science Letter*, 121, 503-508.
- Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S., 1985, Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan Arc. *Nature*, 317, 603-604.
- Patriat, P. and Achache, J., 1984, India-Asia collision chronology has implication for crustal shortening and driving mechanism of plates. *Nature*, 311, 615-621.
- Patzelt, A., Li, H., Wang J. and Appel, E., 1996, Palaeomagnetism of Cretaceous to Tertiary sediments from southern Tibet: evidence for the extent of the northern margin of India prior to the collision with Eurasia. *Tectonophysics*, 259, 259-284.
- Price, N. J. and Cosgrove, J. W., 1990, Analysis of Geological Structures. Cambridge Univ. Press, 502p.
- Richards, M. and Lithgow-Bertelloni, C., 1996, Plate motion changes, the Hawaiian-Emperor bend, and the apparent success and failure of geodynamic models. *Earth and Planetary Science Letters*, 137, 19-27.
- Sahabi, M., Geli L., Olivet, J., Gilg-Capar, L., Roult, G., Ondreas, H., Beuzart, P. and Aslanian, D., 1996, Morphological reorganization within the Pacific-Antarctic Discordance. *Earth and Planetary Science Letters*, 137, 157-173.
- Sohn, Y. K. and Son, M., 2004, Synrift stratigraphic geometry in a transfer zone coarse-grained delta complex, Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Sedimentology*, 51, 1387-1408.
- Son, M., Seo, H.-J. and Kim, I.-S., 2000, Geological Structures and Evolution of the Miocene Eoil Basin, Southeastern Korea. *Geosciences Journal*, 4, 73-88.
- Son, M., Seo, H.-J., Jung, H.-J. and Kim, I.-S., 1997, Extension direction and tectonic boundaries of the Miocene basins, Southeast Korea. Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent: Short papers for the international symposium on the occasion of the 50th Anniversary of the Geological Society of Korea, p.104-109.
- Speight, J. M. and Mitchell, J. G., 1979, The Permo-Carboniferous dyke-swarm of northern Argyll and its bearing on dextral displacements on the Great Glen Fault. *J. Geol. Soc. London*, 136, 3-11.
- Spencer, D. A., 1993, Tectonics of the Higher and Tethyan Himalaya, Upper Kaghan Valley, NW Himalaya Pakistan: Implications of an early collisional, high pressure (eclogite facies) metamorphism to the Himalaya belt. Ph.D. Diss., ETH Zurich.
- Tada, R., 1994, Paleooceanographic evolution of the Japan Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 108, 397-405.
- Tamaki, K., 1986, Age estimation of the Japan Sea on the basis of stratigraphy, basement depth, and heat flow data. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 35, 427-446.
- Tamaki, K., 1995, Opening tectonics of the Japan Sea. in Talyor B.,

- (ed.), Backarc basins: Tectonics and Magmatism, p.407-420.
- Tapponnier, P. and Molnar, P., 1976, Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264, 319-324.
- Yoon, S. H. and Chough, S. K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.
- Yoon, S., 1975, Geology and Paleontology of the Tertiary Pohang Basin, Pohang district, Korea. Part 1. Geology. *J. Geol. Soc. Korea*, 11, 187-214.
- 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., 1992, Geology of the Tertiary Yangnam and Pohang basins, Korea. *Bulletin of Mizunami Fossil Museum*, 19, 13-31.
- Yun, H., 1986, Emended stratigraphy of the Miocene formations in the Pohang basin. part I, *J. Paleont. Soc. Korea*, 2, 54-69.
-
- (2007. 2. 26 원고접수)
(2007. 7. 18. 수정본 채택)