

## 한반도의 조구조 진화

민경덕<sup>1</sup> · 이윤수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구시스템과학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원

## Phanerozoic Geodynamics of the Korean Peninsula

Kyung Duck Min<sup>1</sup> and Youn Soo Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. Earth System Science, <sup>2</sup>Korea Inst. Geoscience & Mineral Resources

The modern kinematic behaviors of the rigid block motions are well developed using synthetic analyses of paleomagnetic, petrologic, paleontologic and geophysical data which have been established in the last a quarter of a century. Phanerozoic geodynamic evolution and tectonic episodes of the Korean Peninsula and East Asia region are discussed and summarized here.

**Key words :** geodynamics, paleomagnetism, phanerozoic, Korean Peninsula

지난 25년간 이룩된 지질학의 제분야의 발전으로 그동안 지역적으로 이해되어 온 지질과정과 현상을 시공간으로 폭 넓게 대비할 수 있게 되었으며, 그 조구조를 일으킨 기작들에 대해서도 조금씩 규명되고 있다. 본 연구는 현생이언에 있어서 한반도 일원에 대한 조구조 정립에 기여할 목적으로 이루어졌으며, 한반도를 포함한 동아시아의 형성 과정과 그 기작에 초점을 맞추어, 최근에 발표된 관련 연구들을 중심으로 논하고자 한다.

**주요어 :** 지구동력학, 고지자기, 현생이언, 한반도

### 1. 서 언

한반도는 판구조상 유라시아판에 속하고, 다수의 고생대의 습곡대들을 포함하며, 그 습곡대들은 선크램브리아기의 지괴들 사이에서 대체로 동서 또는 북동-남서향으로 분포한다. Burrett(1974) 및 McElhenny *et al.*(1981) 등의 지질학자 및 지구물리학자들은 동아시아는 여러 조각의 지괴들로 구성되어 있다는 연구 결과들을 보고하면서, 이 지역에서 나타나는 화성활동과 조산운동 및 변성작용을 북중국 지괴(NCB, North China Block) 및 남중국 지괴(SCB, South China Block) 간의 충돌과 관련하여 해석하였다.

1980년대 후반 들어 지화학 및 변성암석학자들은 중국의 양쯔강을 가로 지르는 친링-다비산 습곡대에서 초고압 광물인 coesite를 포함하는 eclogite를 인지하고, 이를 북중국 지괴와 남중국 지괴간의 충돌에 기인한

산물로 해석하였다(Sengor, 1985; Wang *et al.*, 1989; Okay, 1989; Okay and Sengor, 1992). 이들 지괴의 경계부를 따라 나타나는 초고압 변성대는 탄루 단층을 따라 수백 km 떨어진 산동 반도에서 그 연장이 확인되었다(Xu *et al.*, 1987; Hirajima *et al.*, 1990; Okay and Sengor, 1992).

Lin *et al.*(1985)과 Zhao and Coe(1987) 및 Zhao *et al.*(1990)는 북중국 지괴 및 남중국 지괴로부터 각각 고지자기극의 이동 경로를 구하고, 이들이 고생대 이래로 곧드와나 대륙의 연변에 속하여 있다가 고생대 말에 북상하여, 페름기 후기에서 삼첩기 전기에 시베리아 지괴와 충돌하였으며, 이 때의 충돌형태는 산동 반도를 중심으로 북중국과 남중국 지괴가 가위가 접히는 형태로 일어났으며(Enkin *et al.*, 1992; Gilder and Courtillot, 1997), 쥬라기 초기-중기까지 계속되었다고 제안하였다. 다시 말하자면, 북중국 지괴 및 남중

\*Corresponding author: leeys@kigam.re.kr

국 지괴의 층들은 동쪽부터 시작하여 서쪽으로 진행하였으며, 이러한 결과로서, 좌수향의 탄루 단층대가 형성되었다고 해석하였다.

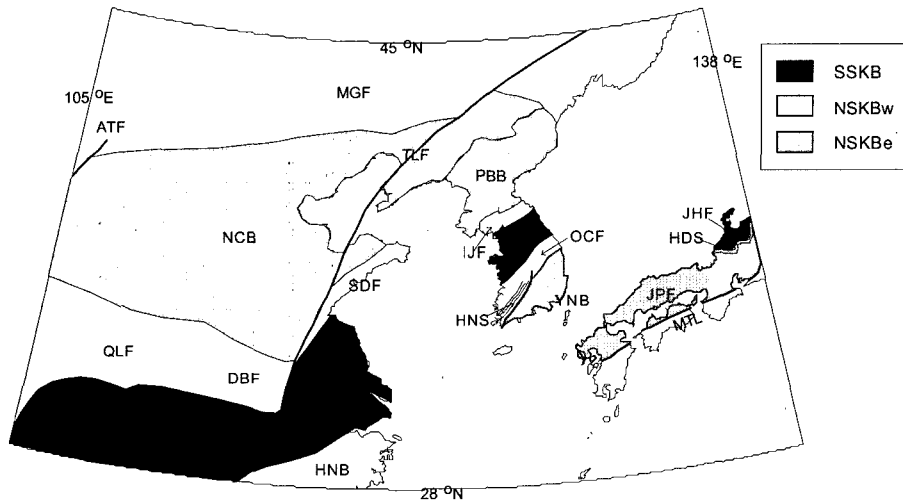
이러한 일련의 연구들로부터, 친링-다베산 습곡대를 지나 산둥 반도까지 확인되고 있는 초고압대의 동쪽 연장부가 한반도까지 갈 것인가, 만일 그렇다면 어디에 존재하는 것인지 또는 한반도는 중국의 어느 지괴에 속할 것인지(Shibuya *et al.*, 1988)에 관한 문제가 제기되기 시작하였다. 1980년대 중반에는 북한 지질학자들이 산둥 반도의 동쪽에 위치하는 퇴적기원의 변성암류(임진계)로부터 데본기를 지시하는 화석들을 보고하면서, 한반도 조구조 해석에 일대 전환기를 맞이하게 되었다.

**2. 고생대 동아시아의 복원 및 고환경**

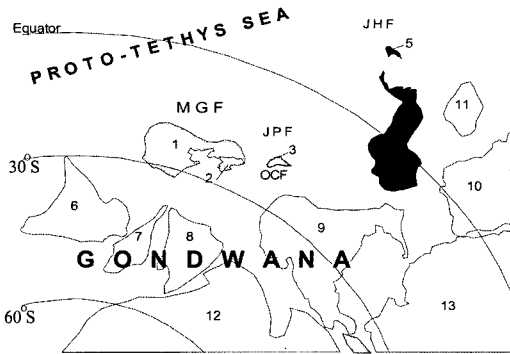
동아시아가 고생대의 전반에 걸쳐 곤드와나의 연변부에 속하여 있었다는 연구들은 주로 중국대륙으로부터 구한 고생물학 자료에 기인한 것으로서, 한반도를 중국대륙의 일부에 적당히 놓았을 뿐, 한반도의 자료를 가지고 독립적으로 복원된 것은 거의 없었다(Bergstrom, 1990; Metcalfe, 1999). 이는 국내외 학자들의 많은 노

력에도 불구하고, 한반도가 고생대의 지층들이 변형, 변성, 화강암 관입 및 심각한 재자화 작용을 받아서, 화석이나 고지자기 자료의 산출이 빈약하고, 동시대에 형성된 분지 간의 상변화, 지층 대비 및 구조 해석에 상당한 어려움이 따르기 때문이다.

한반도에는 평북 지괴, 경기 지괴 및 영남 지괴의 크게 3개의 섀캠브리아 지괴로 구성되어 있다. 중국의 지괴들과의 대비에 관한 실마리는 북동부 옥천대의 고생물 연구에서 먼저 제공되어 왔으며, 최근의 고지자기 연구에서 구체적 논의가 가능하게 되었다. Lee *et al.*(1992, 1997)은 남한의 현생이언의 지층들에 대하여 면밀한 고지자기 연구를 실시하고, 중국에서 실시된 기존의 연구들과 비교하였다. 우선 그들은 남중국 지괴에 대한 고생대의 고지자기 자료들이 북부지역(양쯔 지괴)에만 집중되어 있음을 지적하고, 남중국 지괴를 양쯔 지괴(YZB, Yangtze Block)와 화남 지괴(HNB, Huanan Block)로 분리할 것을 제안하였다(Fig. 1). 그들은 영남 지괴와 북중국 지괴 및 남중국 지괴로부터 구한 고지자기극들의 겹보기 이동 경로(APWPs, Apparent Polar Wander Paths)와 고위도 변화를 비교하고, 이로부터 동아시아의 지체 구조를 해석하였다. 즉, 동아시아는 양쯔 지괴-경기 지괴-Hida(일본)를 잇



**Fig. 1.** Tectonic map in East Asia before drifting (Miocene) of the Japanese Islands from the Eurasia (base maps after Lee *et al.*(1997, 1999)). Tectonic units of the NSKBw(=NCB+PBB, hatched), the NSKBc(=YZB+GGB+JHF, black), and the SSKB (YNB+JPH, checked) represent the western North Sino-Korean Block, the eastern North Sino-Korean Block, and South Sino-Korean Block respectively. ATF, Altyn Tagh Fault; DBF, Dabieshan Foldbelt; GGB, Gyeonggi Block; HNB, Hwanan Block; HDS, Hida Shear zone; HNS, Honam Shear zone; IJF, Imjin Foldbelt; JHF, Hida Foldbelt; JPF, Paleozoic foldbelts of SW Japan; MGF, Monggorian Foldbelt; MTL, Median Tectonic Line; NCB, North China Block; OCF, Okcheon Foldbelt; PBB, Pyeongbuk Block; QLF, Qinling Foldbelt; SDF, Shandong Foldbelt; TLF, Tan Lu Fault; YNB, Yeongnam Block; YZB, Yangtze Block.



**Fig. 2.** Early Ordovician (ca. 510 Ma) reconstruction map (Lee, 1999b). note that all blocks were united in Gondwana supercontinent. 1. North China Block, 2. Nangrim Block, 3. Yeongnam Block, 4. South China (Yangtsu) Block, 5. Gyeonggi Block, 6. Kazakhstan Block, 7. Tarim Block, 8. Iran-Afghanistan Block, 9. India, 10. Australia, 11. Indochina, 12. Africa, 13. East Antarctica: MGF, Mongol Foldbelt; OCF, Okcheon Foldbelt; JHF, Hida Foldbelt; JPF, Paleozoic foldbelt of SW Japan.

는 남중한 지괴(SSKB, South Sino-Korean Block; 검은 색 영역)와 북중국 지괴-평북 지괴-영남 지괴-서남 일본으로 연결되는 북중한 지괴(NSKB, North Sino-Korean Block)로 구분되며, 북 중한지괴는 다시 북중국 지괴-평북 지괴로 구성되는 서북중한 지괴(NSKBw; 열은 점 무늬 영역)와 영남 지괴-서남 일본으로 구성되는 동-북중한 지괴(NSKBe; 짙은 점 무늬 영역)로 나뉘어 진다고 하였다. 고생대 초기인 약 5억년전, 동아시아의 지괴들은 곤드와나 대륙의 북쪽 연변부에 속하여 있었으며 북중한 지괴와 남중한 지괴는 각각 20°S-30°S 및 10°S-20°N에 위치하고 있었다(Fig. 2). 이때 북동부 옥천대의 조선누층군은 NSKBe에 속하여 있으면서 곤드와나 대륙 연변의 내륙해(intracontinental Sea)의 환경이었고(Lee *et al.*, 1999a), 당시 북중한 지괴의 북쪽에는 내몽고와 서남 일본 방향으로 거대한 Proto-Tethys 해가 열려 있었으며 해양지판에서의 심해저 퇴적 활동이 일어났다. 고지자기 자료에 의한 Fig. 2의 초기 고생대 북원도에서 특히 주목할 부분은, 현재 영남 지괴의 북부에 위치하는 북동부 옥천대가, 5억년전에는 영남 지괴의 남부에 위치하였으며 곤드와나 대륙에서 떨어져 나가는 후기 고생대까지 현재와는 거꾸로 되어 있었다는 점이며, 장차 전기 삼첩기의 충돌 과정을 통하여 현재와 가까운 방향으로 바뀌게 된다.

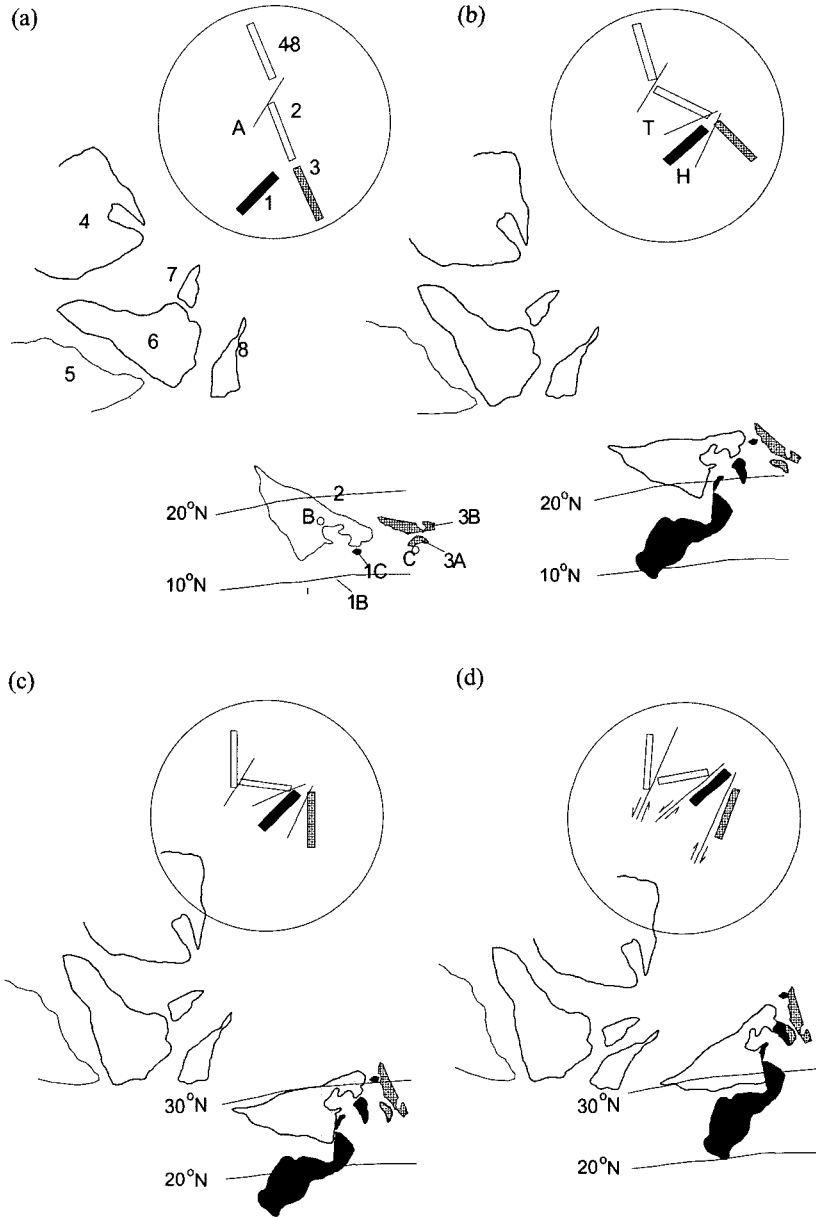
한편 전기 고생대의 두터운 탄산염암을 형성했던 북중한 지괴(NSKB)의 내륙해의 대부분에서는 사일루리

아기에서 전기 석탄기까지 육화되어 있었으나, 남중한 지괴(SSKB)에서는 이 시기에 대비되는 대규모의 결층이 존재하지 않는다. 곤드와나 대륙의 북부에 위치했던 북중한 지괴의 상대적인 대륙 용기에 대한 기작은 잘 알려져 있지 않다. 전기 고생대 이래 곤드와나 대륙은 시계 방향의 회전으로 말미암아 서측부 및 중앙부가 북상하고(곤드와나 대륙은 석탄기에 Laurentia 대륙과 합쳐져 하나의 초대륙을 이루게 됨), 동측부가 남하하였다. 이에 따라, 후기 석탄기에 북중한 지괴는 적도의 환경에 있었고, 곤드와나 대륙의 동측부에 속했던 남중한 지괴는 남위 20°-30°에 위치하였다(Lin *et al.*, 1985; Lee *et al.*, 1996).

후기 고생대의 서남 일본은 해양 지각 및 호상 열도에서 생성된 퇴적암류 및 화성암류 기원의 암석군을 나타낸다. 당시 영남 지괴의 북부에 위치했던 서남 일본은 후기 고생대 동안 곤드와나의 북부 연변에 속하여 있으면서 몽골습곡대의 연장부로서 Proto-Tethys해에 의해 섭입되는 환경에 처하여 있었다고 사료된다.

### 3. 중한 지괴의 형성과 조산 운동

후기 석탄기에서 전기 페름기에 이르러 카자흐 지괴와 타림 지괴에서 시작된 곤드와나 대륙의 분열은 후기 페름기에 북중한 지괴 및 남중한 지괴가 차례로 곤드와나 대륙의 북측 연변에서 떨어져 나와 Proto-Tethys해를 거슬러 북중한 지괴의 서쪽 끝 부분이 러시아(Laurasia) 대륙에 충돌하기 시작하였다. 이윽고 초기 삼첩기에는 뒤따라 북상하던 SSKB(남중한 지괴)가 NSKB(북중한 지괴)의 중앙 동쪽부와 충돌하였고, NSKB의 동쪽(서남 일본 부분)으로 해양 지각이 섭입하고 있었기 때문에 NSKB는 2조각, 즉 NSKBw(서-북중한 지괴)와 NSKBe(동-북중한 지괴)로 분리되기 시작하였다(Fig. 3). SSKB의 충돌은 NSKBw와 NSKBe를 각각 반시계 및 시계 방향으로 크게 회전시키면서, 두 지괴의 사이에 끼어 들게 되었고, 이들 지괴들의 충돌 경계부(Qinling-Dabieshan-Shandong-Imjin 및 옥천대-Hida 변성대)를 따라서 좌수향의 탄루 단층대(이와 평행한 추가령 단층대도 이 시기에 크게 좌수향으로 움직였을 것으로 사료된다. 이 경우에 충돌대는 추가령 단층대의 변위로 인하여 보다 더 북쪽에 위치할 가능성도 있다(Chwa, 1998; Otoh *et al.*, 1999).)와 우수향의 Hida-Honam 전단대가 발달되었다. 이 과정으로 이들 지역에는 압축력과 전단력을 받게 되고, 이로 인한 변형작용이 수반되면서 변성작용, 화성작용, 지



**Fig. 3.** The reconstruction maps with tectonic schemes (in circles) of a folding-ruler model for the Early Mesozoic amalgamation of East Asian blocks, illustrating clockwise and counterclockwise rotations of the blocks (Lee *et al.*, 1997, 1999b). 1, South Sino-Korean Block(1)=Yangtsu Block(1A)+Gyeonggi Block(1B)+Hida Folsbelt(1C); 2, West-North Sino-Korean Block(2)=North China Block+Nangrim Block; 3, East-North Sino-Korean Block(3)=Yeongnam Block(3A)+SW Japan Foldbelt(3B); 4, Siberia Block; 5, Russia Block; 6, Kazakhstan Block; 7, Djunggar Block; 8, Tarim Block; K, Kunming; B, Beijing; C, Chungju; A, Altyn-Tagh Fault System; T, Tan-Lu Fault System.

각의 축소 및 두께 증가, 지층의 용기, 단층 및 습곡을 수반한 조산운동 및 내륙 분지의 발달 등이 후기 쥬라기까지 계속되면서, 이 세 지괴들은 하나의 중한 지괴(SKB, Sino-Korean Block)를 이루게 되었다. 이

러한 중생대의 동아시아 형성 과정은 이동하는 지괴들 (mobile blocks) 간의 빗겨진 충돌과 회전식 병합으로 특징 지워지고, 지괴들이 병합되는 과정에서 상대적으로 고정된 작용점(NSKB의 서쪽 끝부분과 타림 지괴

가 접하는 지점)과 이동하는 작용점(SSKB의 동쪽 끝인 일본의 Hida 부근)이 주어지게 되며, 이는 FR (Folding-Ruler) 모델이라고 불리워 진다(Lee *et al.*, 1992, 1997, 1999a; Lee and Min, 1997). 이는 시베리아 지괴와 서-북중간 지괴 사이의 몽골 습곡대 및 서-북중간 지괴와 남중간 지괴 사이의 친링-다베산 습곡대에서 보고되는 화성활동, 변성작용, 해성 퇴적암의 소멸 등의 지질학적 증거들이 각 작용점(pivot point) 들로부터 멀어질수록 시기가 젊어지는 뚜렷한 경향을 보인다. 즉, 몽골 습곡대에서는 동쪽으로 갈수록, 친링-다베산 습곡대에서는 서쪽으로 갈수록 화성활동과 변성작용 및 해양 분지들의 소멸 시기가 젊어지는 경향이 있으며, 이는 동아시아에서의 FR 가설을 지지하여 주는 것이다.

이 시기에 한반도에서 일어난 송림변동과 대보운동을 FR 가설의 견지에서 보면, 전자는 세 지괴들간의 충돌 및 변형과 연관된 사건이고 후자는 이에 수반된 마그마 형성 및 용기 작용으로 볼 수 있으며 이 두 사건은 각기 별개의 지질사건이 아니라 상호 밀접히 연관되어 있다. 특히 동-북중간 지괴(NSKBe)는 Hida 대를 작용점으로 하여 남중간 지괴를 향하여 시계 방향으로 회전하면서 근접하게 되며, 이 때 강력한 우수향의 전단력이 수반된다. 이로 인하여 삼척기에서 유라기 사이에는 경기지괴(남중간 지괴의 일부)와 영남지괴(동-북중간 지괴의 일부)의 경계부에서는, NSKBe의 상대적인 시계 방향의 회전 성분에 기인하여, 경계부인 북동부 옥천대에서는 응력의 방향이 점진적으로 시계 방향으로 바뀌게 되고(김성욱 등, 1997), 전단작용, 습곡, thrust, 단층운동, 지각물질의 부분 용융 및 관입 작용 등이 지역에 따라 시기가 중첩되어 나타나게 된다(Cluzel *et al.*, 1991; 김정환 등, 1989). FR 가설에 의하면, SSKB의 탄루 단층대(서부), 임진강대(북부) 및 호남 전단대(동남부에서 나타나는 충돌 및 봉합 시기와 과정이 동일하지 않을 수 있다. 즉 이 시기에 우수향의 호남 전단대에서 야기되는 지각 변위나 단층대의 폭, 전단작용으로 야기되는 foreland 퇴적작용의 규모 등이 좌수향의 탄루 단층대의 그것들에 비하여 비대칭으로 작게 나타날 수 있다. 또한, 임진강대에서의 변성 및 변형 작용은 충돌 이후 압축 응력 성분만 작용되어 삼척기에 집중되는 반면에, 호남 전단대에서의 그 시기는 NSKBe 지괴의 회전 성분과 SSKB와 NSKBe가 봉합되는 과정에서 야기되는 압축 응력 성분이 중첩되고, 지괴들의 북상운동에 기인하여 전단력이 작용하게 되어 삼척기에서 유라기까지 오랜 기간 계속되었다. 이

때의 한반도의 고위도는 북위 20° 내외로써 비교적 저위도에 위치하며, 지괴들의 전체적인 움직임은 꾸준히 북상한다. 이러한 지괴들의 북상운동과 회전운동 및 전단작용으로, 중생대 초에는 지괴들의 일부 충돌부 및 봉합부에서 고산 지대가 형성되었을 가능성도 있다.

그 후 세 지괴는 후기 유라기에 이르러 완전히 봉합되어 단일 지괴인 중한 지괴(SKB, Sino-Korean Block)를 이루게 되었으며, 이후에도 중한지괴의 북상운동은 백악기까지 계속된다. 이처럼 고생대 말에 곧드와나로부터 떨어져 나와 중생대에 걸쳐 이루어진 충돌-회전-전단-봉합 과정은, 고지자기 연구 결과로 시뮬레이션된 FR 가설의 모델에 의해, NSKBe의 상대적인 위치가 현재처럼 거꾸로 바뀌게 된 시기와 조구조 기작을 명백히 설명하고 있다.

최근 한반도에서 이와 같은 충돌의 증거를 찾기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 조문섭 등(1995)은 임진강대에서 산출되는 각섬암에 대한 자세한 암석 기재 및 광물화학 연구를 통해 공존하는 광물조합(석류석-각섬석-사장석-단사회석±금홍석)으로부터 다양한 지온-지압계를 이용하여 상부 각섬암상에 해당하는 8-13 kbar와 630-790°C의 변성조건을 보고하였다. 또한, 금홍석이 티타나이트에 의해 치환되는 조직을 보고하고, 이러한 조직은 상부 각섬암상의 변성작용을 받기 전에 보다 높은 압력하(에클로자이트상)에서의 변성작용이 있었음을 지시한다고 제안하였다. Ree *et al.*(1996)은 임진강대에서 산출되는 각섬암으로부터 후기 원생대의 Sm-Nd 전암 연대와 더불어 페름기 말-삼척기 초를 지시하는 Sm-Nd 석류석, Rb-Sr 광물 연대를 보고한 바 있다. 그들은 상부 각섬암상에 해당하는 변성조건과 더불어 페름기 말-삼척기 초의 변성 시기가 중국 대륙 충돌대에서 보고되는 시기와 유사함을 주목하고 임진강대가 삼척기의 대륙 충돌대의 연장부일 가능성을 제안하였다.

동아시아 형성에 대한 또 하나의 모델이 Yin and Nie(1993)에 의해 제안되었는데, 상대적으로 고정된 유라시아 대륙을 움직이는 인디아 대륙이 움푹 파고 들어가는 형의 Indentation 모델로서(Fig. 4), 전자를 북중간 지괴로 후자를 남중간 지괴로 대비하였으며, 이는 두 개의 움직이는 지괴 사이의 충돌로 설명되는 FR 가설과는 뚜렷이 구별된다. 즉, 북동측이 돌출된 형태를 가지고 있었던 남중간(원기에는 남중국) 지괴가 북상하여, 후기 페름기 초에 북중간(원기에는 북중국) 지괴의 남동부와 충돌하면서 남중간 지괴의 서쪽 및 동쪽 경계를 따라 각각 좌수향의 탄루 단층대와 우수

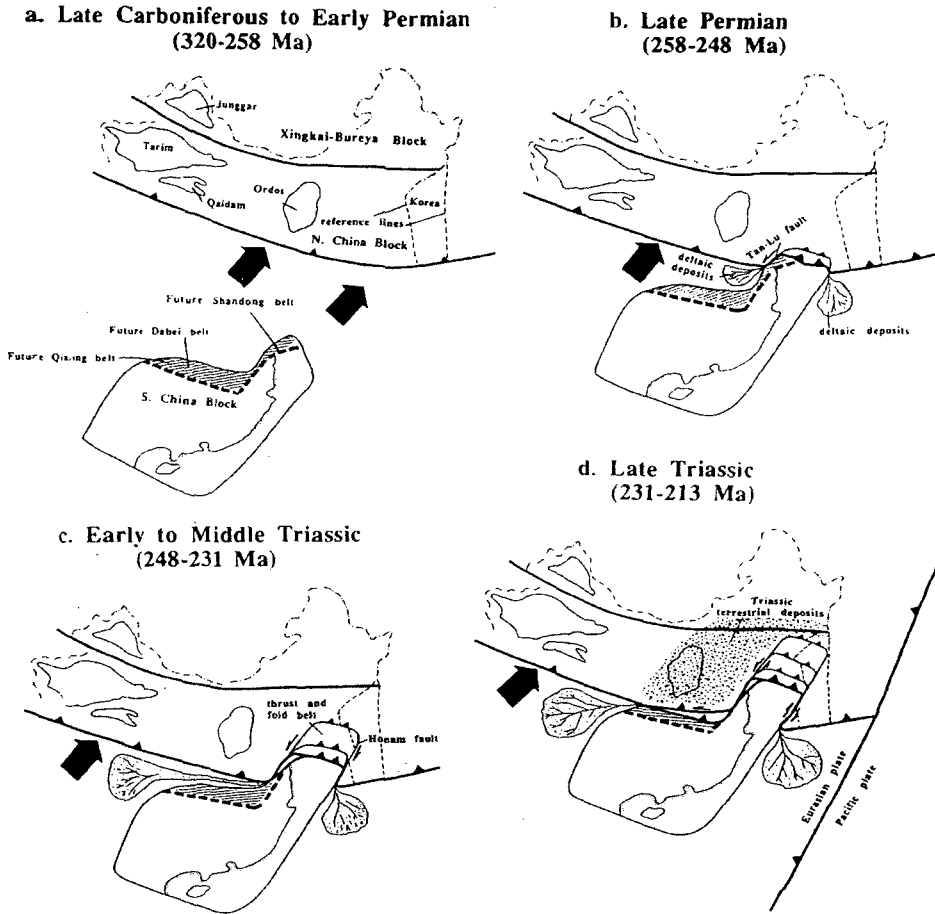


Fig. 4. Indented Model showing collisions between North China Block and South China Block (Yin and Nie, 1993).

향의 호남 전단대가 발달되었으며, 전기 쥐라기까지 계속되었다고 하였다. Indentation 가설은 (1) 탄루 단층대와 호남 전단대의 변이가 동등하지 않다는가(실제로 전자의 변이가 후자보다 월등히 크다), (2) 좌수향의 탄루 단층대를 따라 야기되었던 Songpan-Ganzi flysch 에 견줄 만한 대규모의 foreland 분지가 우수향의 호남 전단대 주변에서는 소규모거나 아직 보고되어 있지 않고(예를 들면, Indentation 가설의 기존의 전형적인 모델 지역인 인디아 대륙과 유라시아 대륙의 충돌부에 있어서, 인디아 대륙의 좌수향 및 우수향 경계 단층대에서는 각각 동등한 규모의 Indus와 Bengal 선상 퇴적분지들이 대칭적으로 발달된다), (3) 동아시아로부터 산출된 중생대 초의 고지자기 자료들에서 나타난 지괴들의 회전 성분(Lin *et al.*, 1985; Zhao and Coe, 1987; Lee *et al.*, 1997, 1999a)을 설명하지 못하며, (4) Qinling-Dabieshan 습곡대에서의 화성활동과 해양분

지의 소멸이 서쪽으로 갈수록 젊어지는 지질학 증거를 설명하지 못하는 등의 문제점을 가지고 있으나, 두 지괴 사이의 충돌과 관련된 초기 변성작용을 연구 대상으로 할 때는 접근하기 쉽고 단순하다는 장점이 있다.

동아시아의 충돌대 부근에서의 지구조 운동의 보다 구체적인 규명에 있어서, 쥐라기 이전의 암석들의 특성잔류자화가 매우 심각한 재자화 작용을 받았기 때문에(Kent *et al.*, 1987; Shibuya *et al.*, 1988; Otofujii *et al.*, 1989; Doh and Piper, 1994), 충돌 이전에 기록된 1차 잔류자화를 명확히 가려내기란 좀처럼 쉬운 일이 아니다(Lee *et al.*, 1996). 이와 더불어 조산운동에 수반하는 orogenic fluid의 이동 기작이나 화강암의 관입 등에 의한 광물의 재결정 작용과 덧성장의 과정의 규명, 전암 및 광물연대 연구 등의 보다 구체적인 추후의 연구가 절실히 요구된다.

4. 유라시아 대륙의 형성과 동아시아의 변동

후기 쥐라기 이래로 한반도에서의 광역적인 격심한 지구조 운동은 일어나지 않았으며, 이러한 경향은, 마이오세에 일어난 동해의 생성을 제외하면, 중한 지괴 전반에 걸쳐 크게 다르지 않다.

그러면, 오늘날의 모습과 근접한 유라시아 대륙은 언제 형성되었을까? Lee and Min(1997)과 Lee *et al.*(1999a)은, 후기 중생대의 동아시아의 고지자기극들의 분석을 통하여 FR 모델에서 나타난 봉합 과정을 후기 백악기까지 연장하여, 중한 지괴가 유라시아 대륙과 전기 백악기 말에서 후기 백악기 초 사이에 하나로 봉합된다는 설을 제안하였다(Fig. 5). 이들의 면밀한 고지자기 연구 결과는 중한 지괴와 유라시아(Besse and Courtillot, 1991)의 고지자기극의 이동 경로가 약

1억년 전부터서야 계통적으로 일치한다는 것에 주목하고, 페름기 말에서 삼첩기 초부터 중한 지괴(엄밀히는 서-북중한 지괴)의 동쪽에서 시작된 반시계 방향의 회전 봉합이 약 1억년 전에 완전히 이루어졌다고 보고했다(Fig. 5). 이는 시베리아 지괴 남부와 SKB의 북부 대홍안령 일원에 고생대 말에서 전기 백악기에 해당하는 해양지판의 섭입과 관련된 화산작용의 소멸에 관한 중요한 판구조론적 기작을 제공하여 준다. 그 즈음에 시베리아의 동쪽에서 이동해 온 Kolima, Omolon 지괴들 및 습곡대들이 차례차례 충돌 및 부가되어 현재와 비슷한 위치와 규모의 유라시아 대륙을 이루었던 것으로 사료된다.

그러면, 중한 지괴(SKB)와 시베리아 지괴와의 봉합은 한반도에 어떠한 영향을 미친 것일까? 시베리아 지괴가 속한 로라시아 대륙은 약 1억 2천만년 전부터 북

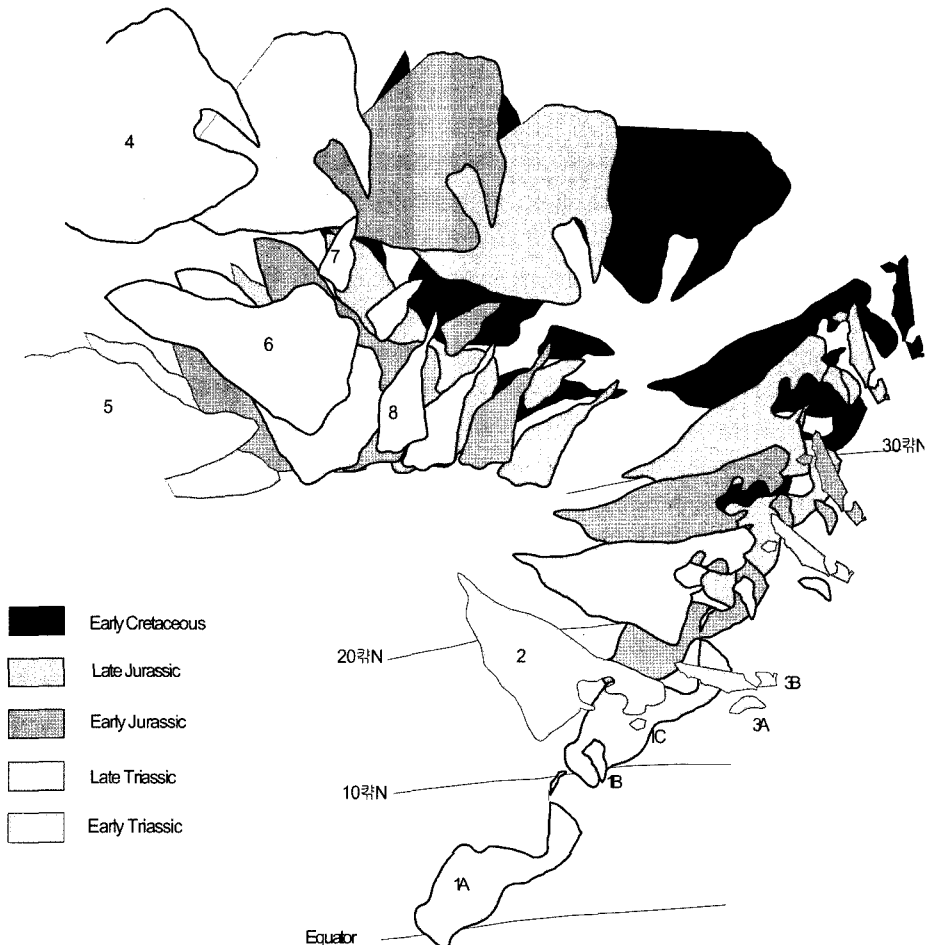


Fig. 5. Mesozoic formation of the East Asia (Lee *et al.*, 1997, 1999b; Lee and Min, 1997). See text further explanation.

아메리카 대륙과 분리되기 시작하였으며(Andrews, 1985), 중앙 해령이 그린랜드 동쪽을 지나 북극해로 이어지면서 대륙 전체가 시계 방향으로 크게 회전하게 되며, 이로 인하여 유러시아(초대륙 로라시아에서 북아메리카 대륙을 제외한 부분) 대륙의 동쪽(시베리아) 부분이 남하하고 있었다. 북상하던 중한 지괴와 남하하던 유러시아 대륙의 봉합은 지각의 수축과 함께 양쪽 지괴에 그 지질학적인 흔적을 남기고 있다.

Lee *et al.*(1997)과 Lee and Min(1997)은 경상분지에서 구한 특성잔류자화의 복각이 현재보다 체계적으로 높다고 지적하고, 이는 한반도가 백악기 초에는 지금보다도 약 200 km 북쪽에 위치하였을 것으로 보았으며, 중한 지괴가 약 1억년 전에 유러시아 대륙과 완전히 봉합을 이룬 직후, 유러시아 대륙에 밀려 중한 지괴가 남하하였을 것으로 해석하였다. 백악기 내내 지속된 그들의 봉합 과정은 특히 한반도 및 만주 일원에서 남북방향의 압축 응력을 발생시키게 되며, 이로 인하여 중한 지괴가 남쪽으로 밀려나면서 주로 기존의 북동에서 북북동방향의 구조선들을 따라 좌수향의 전단 운동이 야기되었고 이들 단층대를 연하여 많은 백악기 소분지들이 생성되었다고 보았다. 최근의 백악기 소분지들에 관한 퇴적학 연구들은 이러한 견해를 지지해 주고 있다(Chun and Chough, 1995; Ryang and Chough, 1997). 이러한 남북방향의 압축 응력은 구조 연구에서도 보고되고 있다. 황재하(1994)는 경상분지의 고응력장 해석을 통하여 후기 백악기 동안 작용한 남북방향의 압축 응력장을 보고하고, 이 때 안동 및 일월 thrust의 생성과 관련이 있을 것으로 보았다.

한편, 한반도의 삼첩기와 쥬라기의 화강암류에 대한 고지자기 연구에서 흥미로운 결과가 보고되었다(Kim and Van der Voo, 1990; Doh *et al.*, 1999). 그들은 옥천대에 분포하는 송림 및 대보 화강암류의 잔류자화 방향이, 주변의 동 시기의 화강암류의 방향과 비교할 때, 반시계 방향으로 약 60° 정도 편향을 보인다고 보고하고, 대보조산운동에 의한 좌수향의 전단운동에 의해 옥천대 내의 작은 지각들이 반시계 방향으로 회전되었다고 제안하였다. 비록 화강암에 대한 지층 경사 보정이 이루어 지지않아 결과 해석에 난점을 가지고 있지만(예를 들면, 만약 옥천대가 북북동-남남서 주향에 약 45° 남남동의 경사로 누어져 있다면 화강암체의 회전은 단지 경사 보정을 실시하지 않았기 때문이라고 해석될 수 있다), 그들의 연구 결과는 한반도의 조구조사 연구에 중요한 발견으로 사료되며, 필자는 오히려 이러한 대규모의 반시계 방향의 회전 운동이, 쥬라기

의 대보조산 운동의 영향보다는, 백악기에 있었던(극동아) 변동의 영향일 가능성에 주목하고 있다.

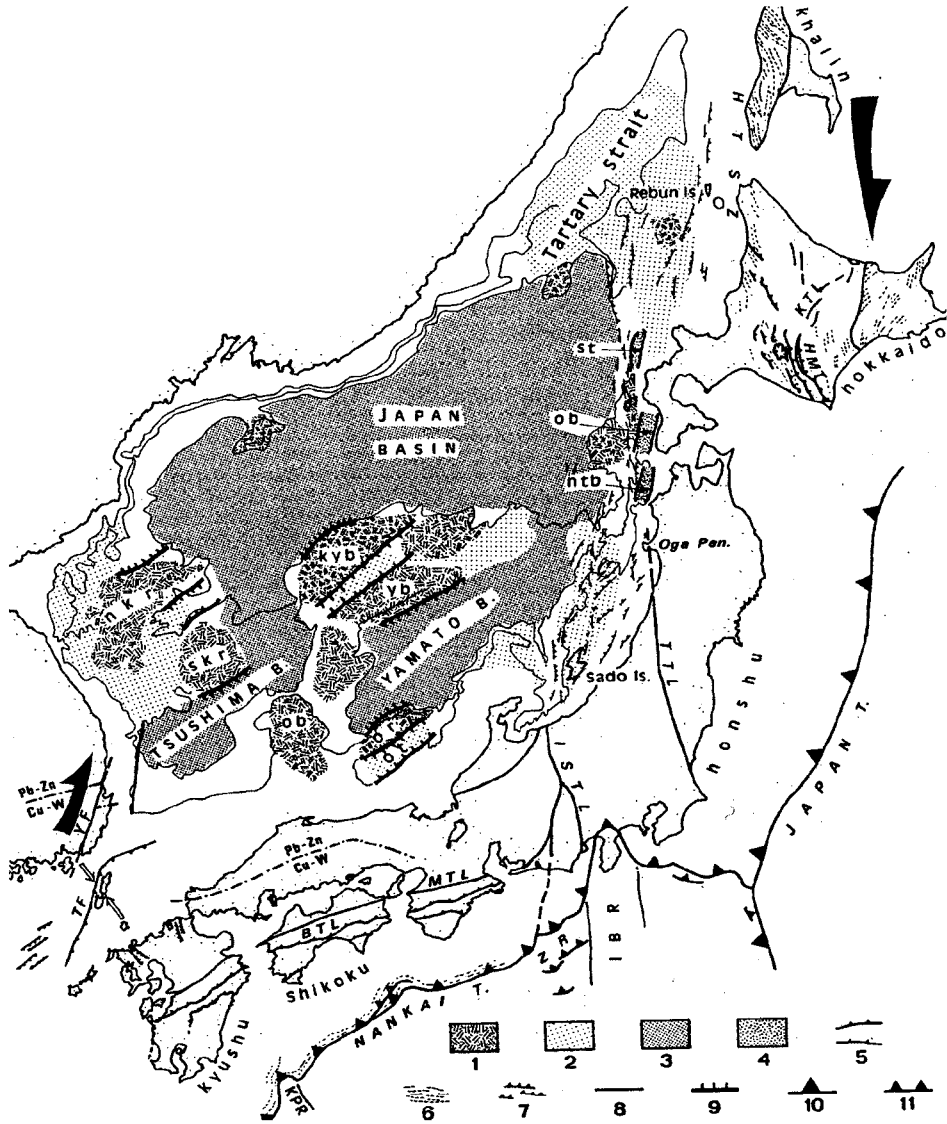
또한 백악기 말에 유러시아편에 밀려 남하하던 한반도는 해양지각의 섭입대의 상대적인 위치 및 방향에 변화가 초래 되었으며, 당시 왕성했던 해양지각들(이자나기판, 태평양판, 쿨라판)의 이동 및 성쇠에 따른 해저 확장방향의 변동이나 섭입대의 이동 등과 맞물려, 백악기 말 화성활동의 변환기를 맞게 되었다. Lee and Min (1997)은 중한 지괴와 유러시아 대륙과의 충돌로 기인한 이러한 일련의 변동을 극동아 변동(Far-East Asia Disturbance, 그들은 초기에 고구려 변동이라 불렀으나 개명 함)이라 명명하였다. 필자는 한반도에 있어서의 불국사 변동도 위와 같은 극동아 변동의 기작의 결과로 야기 되었을 것으로 보며, 한반도의 남하 이전에 있었던 전기 백악기의 화성 활동과 구별지을 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 제3기 초의 동아시아의 조구조

광역적이고 강렬한 조구조 활동이 있었던 중생대 이후, 한반도는 동쪽으로 움직이는 유라시아 대륙에 속해 있으면서 비교적 안정되었던 것으로 알려져 왔다. 그러나 지난 15년 동안 동아시아 대륙 연변부에 화산 활동을 수반하는 제3기 지층에 대한 연구들이 보고되면서, 커다란 지질학적 사건이 있었다는 것이 인지되었으며, 그 중 대표적인 것이 동해의 형성이다(Fig. 6). 국내외의 학자들의 많은 노력에도 불구하고, 동해가 언제 어떤 이유로 확장되었는지, 더 나아가 만주 일원의 지구대 생성과 신생대의 화산활동, 한반도 남해안 일대의 고온 heat flow의 기원 등과 같이 아직 풀리지 않은 문제들이 많다. 이는 한반도의 지체구조 해석이라는 면에서도 대단히 중요한 부분이며, 앞으로 해결해야 할 숙제이다.

동해의 형성을 논하기 앞서, 제3기의 동아시아에 커다란 영향을 미치게 되는 두 사건을 주목할 필요가 있다. 고생대 말 이래로 시작된 곤드와나 대륙의 붕괴는 중생대에 절정에 달하였으며, 약 7천만년전에는 인디아 대륙이 마다가스카르판과 분리 되면서 북진을 계속하다가, 약 5천만년전에 이르러 인디아 대륙은 호주 대륙과 연계하여 유라시아 대륙과 충돌을 일으키게 된다. 이 영향으로 중국과 인도의 경계부에는 히말라야 산맥이 형성되기 시작하고 변형이 일어났으며, 이 지역의 지각이 급격히 두꺼워지면서 그 압축력과 인장력은 유라시아 대륙 내부까지 미치게 되었다(Tapponier and





**Fig. 6.** Tectonic map of the East Sea (Jolivet et al., 1991). 1, continental crust in the East Sea; 2, thinned continental crust; 3, oceanic crust; 4, sediments in an echelon graben; 5, onland thrust; 7, strike of fold axis; 8, strike-slip fault; 9, normal fault; 10 & 11, subduction zone Pacific and Philippine Sea Plates; BTL, Butsuzo Tectonic Line; HMT, Hidaka Main Thrust; HTSZ, Hidaka Tataru Shearzone; IBR, Izu-Bonin Ridge; ISTL, Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line; KPR, Kyushu-Palau Ridge; KTL, Kamishubetsu Tectonic Line; kyb, Kita Yamato Bank; MTL, Median Tectonic Line; nkr, North Korean Ridge; ntb, Nishi-Tsugaru Basin ob(west), Oki Basin; ob(east), Okushiri Basin; or, Oki Ridge; ot, Oki Trough; TF, Tsushima Fault; TTL, Tanakura Tectonic Line; skr, South Korea Ridge; st, Shiribeshi Trough; yb, Yamato Bank; YF, Yangsan Fault; ZR, Zenisu Ridge.

Molnar, 1976; Tapponier *et al.*, 1982). Yamaji (1990) 와 김인수(1992)는 인디아 대륙의 충돌이 중기-후기 에 오세에 한반도 인근의 균열과 화산 활동을 야기하였을 것으로 보고, 이로부터 동해의 형성의 시작되었다고 하였다.

한편 북태평양 가운데 굽힌 팔 모양의 기다란 해저 산맥이 분포하고 있는데, 그것은 하와이 섬에서 서북서 방향(하와이 해저 산맥)으로 이어지다가 32°N, 172°E되는 곳에서는 북북서 방향(임페러 해저 산맥)으로 바뀌어 알류산 열도 밑으로 섭입한다. 해양 지각의

연대는 현재 활동하는 하와이로부터 알루산 쪽(후기 백악기)으로 멀어질수록 오래된 시기의 암석 연대를 나타내며, 두 해저 산맥이 겹치는 팔꿈치 부근의 연대에 대해서는 43 Ma의 값이 보고되고 있다. 이는 태평양판 하부의 상하부 맨틀 전이대에 열점이 위치하고 있어서 (Maruyama, 1994), 상대적으로 그 위를 이동하는 태평양판에 화산 활동의 흔적을 남겨왔다는 설(Morgan, 1981; Molnar and Stock, 1987; Mayes *et al.*, 1990)이 받아들여져 왔다. 이것은 태평양판의 확장 방향이 돌연 반시계 방향으로 45° 틀어지게 됨으로써, 대륙쪽의 입장에서 바꾸어 말하면, 남남동쪽으로부터 태평양판으로부터 응력을 받고 있던 동아시아의 대륙 연변부가, 약 43 m.y. 전에 갑작스럽게 동남동방향으로 응력 방향이 바뀌어지는 변화를 초래하였던 것으로 사료된다(Jolivet *et al.*, 1991). 이 사건으로 유라시아 대륙 연변을 포함한 태평양판 주변부에는 일부 화산 활동을 수반하는 동북동 방향의 우수향 인장 단층대가 발달되고(이로부터 약 2천만년후인 마이오세에는 동아시아 일대를 중심으로 새로운 바다 즉 동해가 생성된다) 한반도의 길주-명천 지구대도 이때 형성된 것으로 보인다(Lee *et al.*, 1999b).

이들 두 사건 중 어떤 것이 에오세에 있어서 한반도 주변의 지구조 발달을 야기하였는지에 대해서는 커다란 논쟁으로 남아있다. Lee *et al.*(1999b)는 이 지역에 본격적인 화산 활동이 나타나는 전기 마이오세까지 약 2천만년동안이나 휴지기가 있었던 점에 주목하고, 동아시아에서의 에오세의 화산활동은 인도대륙의 충돌이 직접적으로 영향을 주었다기 보다는 태평양판의 확장변화가 주 역할을 하였을 것으로 보았다.

## 6. 동해의 형성에 관한 논쟁

동해는 태평양판의 주변부에 형성되어 있는 몇몇의 확장 분지들 중 하나이다. 일찌기 Kawai *et al.* (1961, 1971), Yaskawa(1975)와 Sasajima(1980)는 서남 및 동북 일본의 중생대 암석으로부터 구한 특성잔류자화가 각각 시계 및 반시계 방향으로 약 40-50°의 편각편이를 나타내는 것을 인지하고 일본 열도가 제3기 초에 휘어졌다는 주목할 만한 연구 결과를 발표하였다. Isezaki and Uyeda(1973)와 Isezaki(1973, 1986)는 동해의 자력탐사를 실시하고 약한 자력이상대(진폭 200-300 nT)의 모양이 ENE-WSW방향으로 반복(Kono, 1986)되어 있다고 보고하였으며, 고지자기 층서 분석을 통하여 19-15 Ma 사이에 동해가 확장되었다고 해석하

였다. 또한 Shimazu *et al.*(1990)은 일본의 Sado-Noto-Oki 지역과 포항지역의 마이오세 암석들이 공히 calc-alkali 및 high-Mg의 지화학 특성을 갖는다고 보고하고, Sado-Noto-Oki-포항 지역이 하나의 화산대였다가 동해의 확장에 기인하여 분리되었다고 하였다. 남한에서의 동해 형성과 관련된 지구조 연구는 양남 분지, 연일 분지 및 울릉 분지에 대한 기존의 고생물, 암석, 층서, 고지자기, 지구물리 탐사 등의 활발한 연구 결과를 바탕으로 이루어 졌다. Chough and Barg (1987)과 Chough *et al.*(1997)은 울릉분지의 탄성과 층서자료에 대한 상변화 모형 연구로부터 3단계(Successions I, 16-12 Ma; II, 12-6.5 Ma; III, 6.5 Ma-present)로 구분하고, 울릉 분지의 후배호 확장이 16 Ma에 시작되었다가 12 Ma에 닫혀졌다고 하였다.

### 6.1. 부채꼴 확장설

동해 생성에 관한 보다 명확한 시기, 과정 및 기구를 규명하고자, Otofujii and Matsuda (1983)와 Otofujii *et al.*(1985, 1991)은 제3기의 암석들에 대한 연대측정과 고지자기 연구로부터 흥미로운 해석을 시도하였다. 그 결과, 서남 일본은 약 15 Ma경에(34°N, 129°E) 지점을 축으로 하여 급격히 시계 방향으로 54° 회전하였으나, 동북 일본은 21-11 Ma 사이에(44°N, 146°E) 지점을 축으로 하여 반시계 방향으로 50° 회전하였다고 하였으며, 부채꼴(fan-shape) 확장(혹은 bar-door 확장이라고도 함; 술을 몹시 즐기는 Otofujii 교수가 어느 날 술집 문을 밀고 들어가다가 힌트를 얻었다고 한다)으로 설명하였다. 이 설은 비록 서남 일본에서 관측되는 고지자기 편각 편향을 나타내는 기간이 동해 주변과 동북 일본에 분포하는 화산암들의 연대 분포와 비교하여 상대적으로 짧은 점과 이 모델에 의해 복원할 때 동해에 가라 앉아 있는 대륙지각들이 중첩된다는 점 등의 문제점을 포함하고 있지만, 동해 형성사를 규명하는데 중요한 단서를 제공하였다.

Otofujii *et al.* (1997)은 오늘날과 같은 일본 섬의 형태가 만들어진 것은 적어도 16-12Ma 부터이며, 이 즈음 필리핀 해판의 Izu-Bonin 해령이 일본섬과 충돌하여 Kanto 산지에 변형을 초래하였다고 해석하였다.

### 6.2. 두 단계 확장설

Hayashida and Torii(1986)와 Hayashida *et al.* (1991)은 동해내 해수면 아래의 대륙지각들과 일본 섬들을 대륙 해안에 복원시킨 연구 결과를 발표하고, 일본 섬들이 부채꼴 확장 이전에 남남동 방향으로의 평

행 확장이 있었어야 한다고 제안하였다.

지난 10여년간의 포항 일원에서의 고지자기 연구 결과(Kim *et al.*, 1986, 김광호 등, 1993; 김인수와 강희철, 1989; 이현구 등, 1992; Kikawa *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 1999b)는 동해의 형성 과정을 규명하는 데에 중요한 단서를 제공하여 주었다. 연일 분지의 해양성 퇴적암에서 구한 1차 잔류자화의 편각이 오늘날과 비슷한 거의 0o인데 반하여 양남 분지의 화산암 및 화

산성 퇴적암에서 구한 편각은 약 40o로 편향되어 있으며, 이는 양산 단층의 우수향 주향이동 운동(황재하, 1994)에 기인하여 양남 분지가 수평으로 회전한 것으로 해석되었다(김인수, 1992; Lee *et al.*, 1999b). Lee *et al.*(1999b)은 양산 단층의 우수향 주향이동 시기를 연일 층군의 퇴적 직전인 약 17.3 Ma라고 보고, 울릉 분지의 확장(Chung *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 1994)에 의해 인정되면서 양산 단층계가 움직인 것으로 해석하였

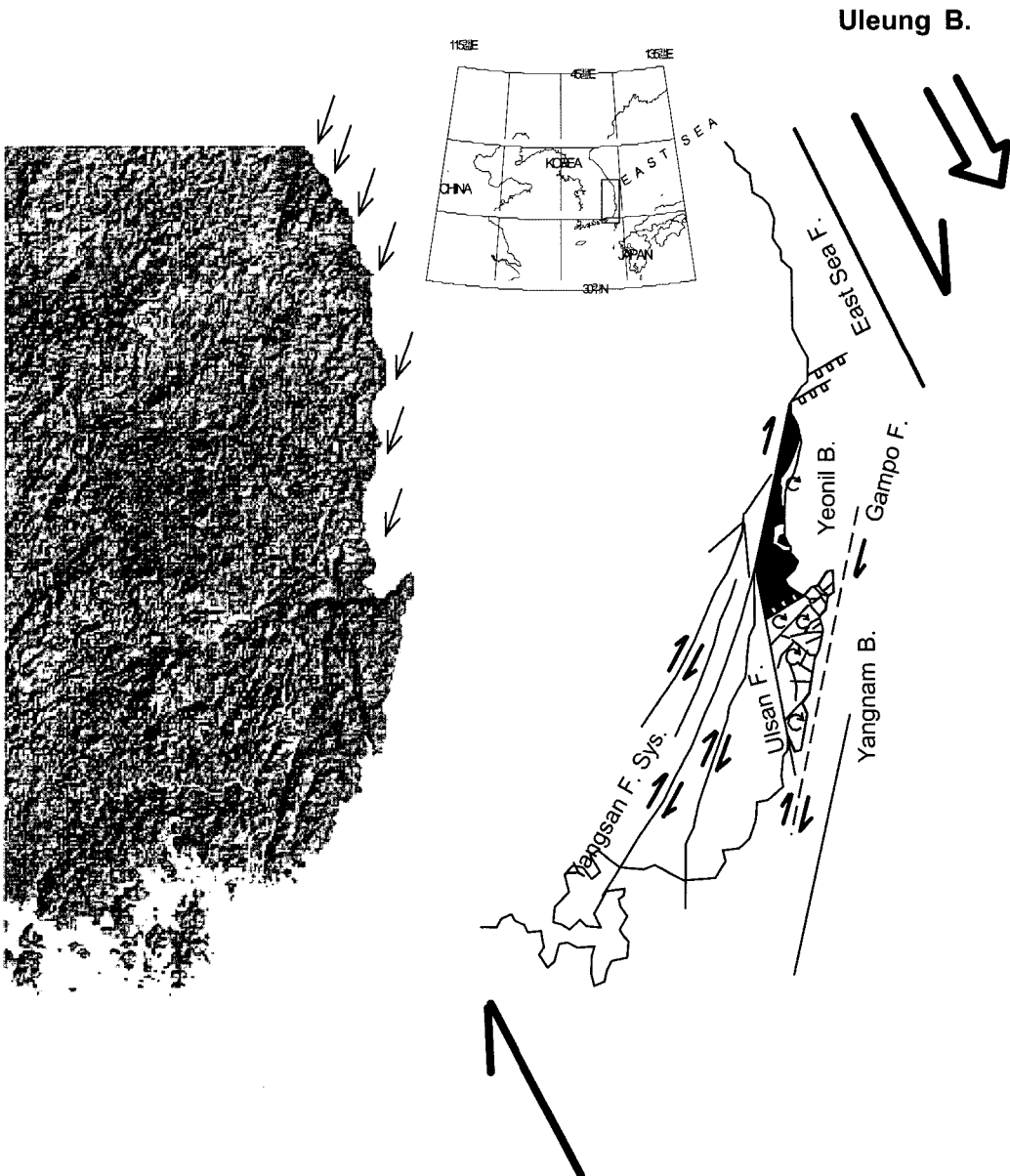


Fig. 7. Tectonics relating with the opening of the Ulleung Basin (Lee *et al.*, 1999a).

으며, 이 때 연일 분지가 pull-apart되면서 생성되어 침강하게 되었다고 하였다(Fig. 7).

Lee *et al.*(1999b)은 동해의 형성 시기를 해양 지각 확장의 직접적인 증거가 나타나는 초기 마이오세로 국

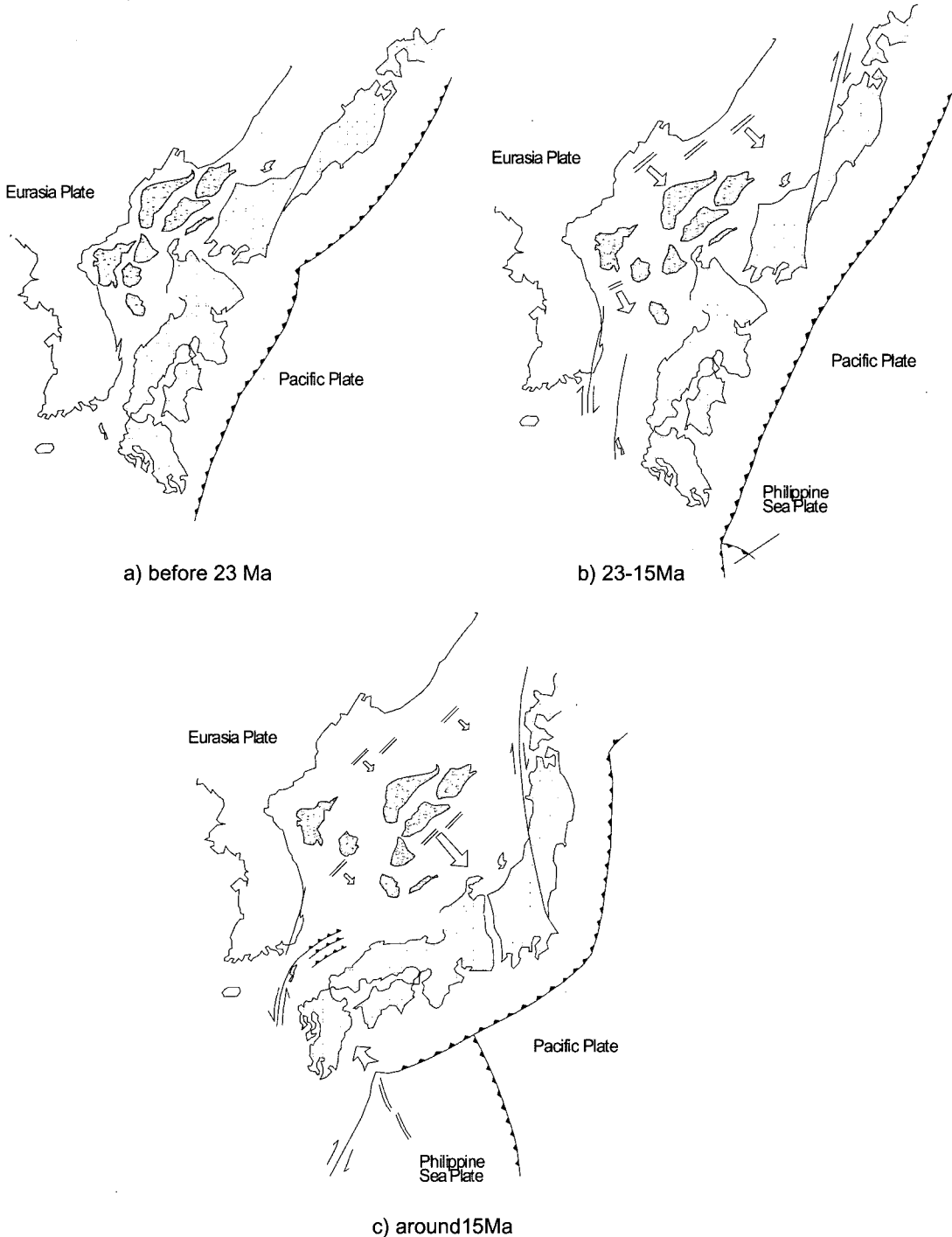


Fig. 8. Two stage opening model of the East Sea (Lee *et al.*, 1999a). left, pre-opening stage (23 Ma); middle, parallel spreading stage (23-15 Ma); right, rotation stage (<15 Ma).

한하자고 제안하고, (1) 23-15 Ma 사이에 남남동-북북서 방향의 평행 확장단계와 (2) 약 15 Ma 경, 북상하던 필리핀해판(Haston and Fuller, 1991; Hall, 1996; Hall *et al.*, 1995)의 ridge가 큐슈 부근에서 썬기 축의 역할을 하면서 서남일본이 시계 방향으로 회전하는 단계로 구분하였다(Fig. 8). 이 때 쓰시마-고도 구조선을 따라 좌수향 주향이동 운동(Ishikawa *et al.*, 1989; Ishikawa and Tagami, 1991)이 수반되어 울릉 분지의 서남쪽에 thrust 및 습곡을 야기하게 된다. 또한 그들은 동북 일본의 경우 일본 분지와 야마토 분지의 확장으로 20 Ma 경부터 남북계의 우수향 전단대가 작용하면서 Euler 곡면을 따라 서서히 반시계 방향으로 회전하다가 15 Ma 경에야 멈춘 것으로 해석하였다(Fig. 8b, c).

### 6.3. pull-apart 설

Lallemand and Jolivet(1985), Jolivet and Huchon (1989)과 Jolivet *et al.*(1990, 1991)은 인도 대륙과 유라시아 대륙의 충돌이 올리고세에서 마이오세에 걸쳐 유라시아 대륙 연변에 응력장의 변화를 초래하였으며, 태평양 주변을 따라 형성된 남북계의 경계 전단대가 동해의 열림을 주도하였다는 설이다. 이에 따라 동해의 동쪽(북해도 Hidaka 전단대) 및 서쪽(양산단층대) 경계부를 따라 우향 pull-apart 열개가 일어났다고 하였다. 그들은 남북계의 우수향 단층대와 북동-남서계의 좌수향 단층계를 conjugate로 보고, 서남 일본과 같은 횡인장(transtension) 구역에서는 시계 방향의 회전이, 동북 일본과 같은 횡압축(transpression) 구역에서는 반시계 방향의 회전 운동이 일어날 수 있다고 해석하였다. 하지만 이 가설은 ODP Leg 126과 Leg 127에서 연구 결과에서 (1) 시추된 음파기반암의 Ar-Ar연대가 23 Ma를 넘지 않았다는 점, (2) 회수된 퇴적물의 미화석 연대도 20 Ma 보다는 젊었으며, (3) Hidaka 전단대와 양산단층대의 활동시기와 특성이 일치하지 않는다는 점 (4) 주변 조구조 환경과의 불일치 등 이 가설의 본질적인 문제점들이 밝혀지면서 지지 기반을 잃고 있다.

## 7. 조구조 운동이 초래한 고환경 변화

인도와 중국의 경계부에는 50 Ma 이래 대륙 충돌의 영향으로 히말라야 산맥이 형성되기 시작했으며, 약 30 Ma부터 급격한 융기가 일어나면서 습한 해양성 기단의 이동을 차단함에 따라 동아시아에는 몬순 기후가 시작된다.

이와 때를 같이하여 인도차이나 지괴는 인디아 대륙에 밀려 동남쪽으로 이동하게 되고, 이들의 경계부에서 발생한 단층 작용으로 인하여 Andaman해와 남지나해가 생성된 것으로 보인다. 특히 32 Ma 부터 있었던 남지나해의 확장운동으로 17 Ma에는 보르네오섬이 반시계 방향으로 회전하면서 남하하였으며, 이 즈음 호주 대륙의 북상으로 자바섬을 포함한 많은 군도들이 동남아시아의 적도 근방에 모이게 되었다(Sasajima *et al.*, 1980; Nishimura and Suparka, 1997). 이로 말미암아 동태평양에서 아프리카까지 흐르던 적도 해류(지구가 서에서 동으로 자전하기 때문에, 상대적으로 적도 근방의 바닷물은 동에서 서로 이동하는 적도 해류가 형성된다)의 일부 해로가 이 부근에서 막히게 되어 필리핀, 대만을 따라 한반도와 일본으로 북상하면서 동북 아시아와 북태평양에는 갑자기 아열대성의 기후로 바뀌게 된다(Nishimura, 1992; Nishimura and Suparka, 1997). 이 따뜻한 난류의 영향으로 동북 아시아에서는 온난한 기후에서 서식하였던 화석대인 Climate Optimum I(Tsuchi, 1986; Chinzei, 1986; Byun, 1995)이 나타난다.

약 20 Ma이래 우수향의 단층대(예를 들면, Tanakura 단층)의 곡면을 따라 동북 일본은 반시계 방향으로 회전하면서 남하하여 15 Ma에 서남 일본과 붕합되어 오늘날과 어느 정도 유사한 형태를 나타내게 되었으며, 동해의 북쪽 출구가 북태평양으로 연결되면서 한류가 유입되게 되었다(Fig. 8b, c). 이에 따라 동해 일대를 잠시 지배했던 아열대성 기후는 약 15 Ma이래 한류와 난류가 빈번히 교차하는 환경으로 되었다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 기본사업인 '한반도/동북아 중생대 지각진화연구'의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 김광호, 도성재, 황창수, 임동성 (1993) 포항분지에 분포하는 연일층군의 고지자기 연구. 광산지질, 26권, p. 507-518.
- 김성욱, 최은경, 정연규, 김인수 (1997) 옥천대에 대한 고자기 연구: 태백지역에서의 대자율 비등방성과 지구조적 응력장. 자원환경지질학회지, 30권, p. 613-624.
- 김인수 (1992) 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 28권, p. 84-109.

- 김인수, 강희철 (1989) 어일분지 일대에 분포하는 제3기층에 대한 고지자기학 연구. 지질학회지, 25권, p. 273-293.
- 김정환, 기원서, 김일석 (1989) 문경탄전 북부지역의 지질 구조. 지질학회지, 25권, p. 72-81.
- 이운수, 민경덕 (1995) 옥천대의 중생대 이래의 지구조적 운동에 관한 고지자기 연구. 자원환경지질학회지, 28권, p. 493-501.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, Itaya, T. (1992) 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조 연구; 화산암류의 K-Ar 연대. 자원환경지질학회지, 25권, p. 337-349.
- 조문섭, 권성택, 이진한, Nakamura, E. (1995) 연천-전곡 지역에 분포하는 임진강대의 고암 각섬암. 암석학회지, 4권, p. 1-19.
- 황재하 (1994) 백악기 초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력 복원. 지질학회지, 30권, p. 27-34.
- Andrews, J.A. (1985) True polar wander: An analysis of Cenozoic and Mesozoic paleomagnetic poles. *J. Geophys. Res.*, v. 90, p. 7737-7750.
- Bergstrom, S.M. (1990) Relations between conodont provincialism and the changing paleogeography during the Early Paleozoic. *Geol. Soc. Mem.*, v. 12, p. 105-121.
- Besse, J. and Courtillot, V. (1991) Revisited and synthetic apparent polar wander paths of the African, Eurasian, North American and Indian Plates, and true polar wander since 200 Ma. *J. Geophys. Res.*, v. 96, p. 4029-4050.
- Burrett, C.F. (1974) Plate tectonics and the fusion of Asia. *Earth planet. Sci. Lett.*, v. 21, p. 181-189.
- Byun, H. (1995) Cenozoic Dinoflagellate Cysts from the Pohang Basin and the southern margin of the Ulleung Basin, Korea. Ph.D. thesis, Chungnam Nat'l. Univ., 283p.
- Chinzei, K. (1986) Faunal succession and geographic distribution of Neogene molluscan faunas in Japan. *Pal. Soc. Japan, spec. pap.*, v. 29, p. 17-32.
- Chough, S.K. and Barg, E. (1987) Tectonic history of Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, v. 15, p. 45-48.
- Chough, S.K., Yoon, S.H., and Park, S.J. (1997) Stratal patterns in the southwestern margin of the Ulleung Basin off southeast Korea: sequence architecture controlled by back-arc tectonism. *Geomarine Letters*, v. 17, p. 207-212.
- Chun, S.S. and Chough, S.K. (1995) The Cretaceous Uhangri Formation, SW Korea: lacustrine margin facies. *Sedimentology*, v. 42, p. 293-322.
- Chung, T.W., Hirata, N., and Sato, R. (1990) Two dimensional P and S wave velocity structure of the Yamato basin, the southeastern Japan Sea, from refraction data collected by an ocean bottom seismographic array. *J. Phys. Earth*, v. 38, p. 99-146.
- Chwae, U. (1998) Does the Imjingang Fold Belt cross the mid-Korean Peninsula along the demilitarized zone (DMZ) as an extension of the Sulu Belt, China? *J. Earth & Planet. Sci. Nagoya Univ.*, v. 45, p. 41-73.
- Cluzel, D.J., Lee, B.-J., and Cadet, J.-P. (1991) Indosinian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (south Korea). *Tectonophysics*, v. 194, p. 131-151.
- Doh, S.-J. and Piper, J.D.A. (1994) Paleomagnetism of the (Upper Paleozoic-Lower Mesozoic) Pyongan Super Group, Korea: a Phanerozoic link with the North China Block. *Geophys. J. Int.*, v. 117, p. 850-863.
- Doh, S.-J., Suk, D.-W., and Kim, B.Y. (1999) Paleomagnetic and rock magnetic studies of Cretaceous rocks in the Eumsung basin, Korea. *Earth Planets Space*, v. 51, p. 337-349.
- Enkin, R.J., Yang, Z., Chen, Y., and Courtillot, V. (1992) Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the present. *J. Geophys. Res.*, v. 97, p. 13,953-13,989.
- Gilder, S. and Courtillot, V. (1997) Timing of the North-South China collision from new middle to late Mesozoic paleomagnetic data from the North China Block. *J. Geophys. Res.*, v. 102, p. 17713-17727.
- Hall, R. (1996) Reconstruction Cenozoic SE Asia. In: Hall, R., Blundell, D.R. (Eds), *Tectonic evolution of South East Asia. Geol. Soc. Spec. Publ.* v. 106, p. 153-184.
- Hall, R., Ali, J.R., Anderson, C.D., and Baker, S.J. (1995) Origin and motion history of the Philippine Sea Plate. *Tectonophysics*, v. 251, p. 229-250.
- Haston, R.B. and Fuller, M. (1991) Paleomagnetic data from the Philippine Sea Plate and their tectonic significance. *J. Geophys. Res.*, v. 96, p. 6073-6098.
- Hayashida, A. and Torii, M. (1986) Opening process of the southwestern part of the Japan Sea. *Mar. Sci. Mon. (in Japanese)*, v. 120, p. 685-689.
- 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. *Geophys. Res. Lett.* v. 18, p. 1095-1098.
- Hirajima, T.A., Ishiwatari, A., Cong, B., Zhang R., Banno, S., and Nozaka, T. (1990) Coecite from Mengzhong eclogite at Donghai county, northern Jiangsu province, China. *Mineral. Magazine*, v. 54, p. 579-583.
- Isezaki, N. (1973) Geomagnetic anomalies and tectonics around Japanese islands. *Oceanography Mag.*, v. 24, p. 107-158.
- Isezaki, N. (1986) A magnetic anomaly map of the Japan Sea. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 38, p. 403-410.
- Isezaki, N. and Uyeda, S. (1973) Geomagnetic anomaly pattern of the Japan Sea. *Marine Geophys. Res.*, v. 2, p. 51-59.
- Ishikawa, N. and Tagami, T. (1991) Paleomagnetism and Fission Track Geochronology on the Goto and Tsushima Islands in the Tsushima Strait area: implications for the opening mode of the Japan Sea. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 43, p. 229-253.
- Ishikawa, N., Torii, T., and Koga, K. (1989) Paleomagnetic study of the Tsushima Islands, southern margin of the Japan Sea. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 41, p. 797-811.
- Jolivet, L. and Huchon, P. (1989) Crustal scale strike-slip shear zone in Hokkaido, Northeast Japan. *J. Struct. Geol.*, v. 11, p. 509-522.
- Jolivet, L., Davy, P., and Cobbold, P.R. (1990) Right-lateral shear along the northwest Pacific margin and the India-Eurasia collision. *Tectonics*, v. 9, p. 1409-1419.
- Jolivet, L., Huchon, P., and Brun, J.-P. (1991) Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a

- case study. *J. Geophys. Res.*, v. 96, p. 4367-4384.
- Kawai, N., Ito, H., and Kume, S. (1961) Deformation of the Japanese Islands as inferred from rock magnetism. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, v. 6, p. 124-129.
- Kawai, N., Nakajima, T., and Hirooka, K. (1971) The evolution of the island arc of Japan and the formation of granites in the circum-Pacific belt, *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 23, p. 269-293.
- Kent, D.V., Zeng, X., Zhang, W.Y., and Opdyke, N.D. (1987) Widespread Late Mesozoic to Recent remagnetization of Paleozoic and Lower Triassic sedimentary rocks from South China. *Tectonophysics*, v. 139, p. 133-143.
- Kikawa, E., McCabe, R., Han, J., Min, K.D., Lee, D.H., Han, H., and Hwang, J.H. (1994) Miocene paleomagnetic results from southeastern Korea, *Tectonophysics*, v. 233, p. 115-123.
- Kim, H.J., Park, C.H., Hong J.K., Jou, H.T., Chung, T.W., Zhigulef, V., and Anosov, G.I. (1994) A seismic experiment in the Uleung basin(Tsushima basin), southwestern Japan Sea(East Sea of Korea). *Geophys. Res. Lett.*, v. 21, p. 1975-1978.
- Kim, K.H. and Van der Voo, R. (1990) Jurassic and Triassic paleomagnetism of South Korea. *Tectonics*, v. 9, p. 699-717.
- 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. *J. Korean Inst. Mining. Geol.*, v. 19, p. 231-237.
- Kono, M. (1986) Magnetic anomalies in the Sea of Japan: a speculation on the tectonic history. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 38, p. 411-426.
- Lallemand, S. and Jollivet, L. (1985) Japan Sea, a pull apart basin, *Earth planet. Sci. Lett.*, v. 76, p. 375-389.
- Lee, Y.S. and Min, K.D. (1997) Paleomagnetic constraint of the amalgamation of the Sino-Korean Block to Laurasia. In: *Proceedings for the 4th Korea-China Joint Geology symposium on Crustal Evolution in northeast Asia*, eds by Jang B.-A. and Cheong D., p. 157-166.
- Lee, Y.S., Ishikawa, N., and Kim, W.K. (1999b) Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean Peninsula: tectonic implications for the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, v. 304, p. 131-149.
- Lee, Y.S., Nishimura, S., and Min, K.D. (1992) Apparent polar wander path for southern part of the Korean Peninsula. 29th International Geological Congress Meeting, abstr. I-3-23, p. 109.
- Lee, Y.S., Nishimura, S., and Min, K.D. (1996) High unblocking temperature haematite magnetizations of Late Paleozoic red beds from the Okcheon zone, southern part of Korean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, v. 125, p. 266-284.
- Lee, Y.S., Nishimura, S., and Min, K.D. (1997) Paleomagnetotectonics of East Asia in the Proto-Tethys Ocean. *Tectonophysics*, v. 270, p. 157-166.
- Lee, Y.S., Nishimura, S., and Min, K.D. (1999a) The Phanerozoic apparent polar wander path for the Korean Peninsula and its tectonic implication. In: *Gondwana dispersion and Asian Accretion*. edited by Matcalfe, I., A.A. Balkema Pub., p. 197-209.
- Lin, J., Fuller, M., and Zhang, W.Y. (1985) Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. *Nature*, 313, 444-449.
- Maruyama, S. (1994) Plume tectonics. *J. Geol. Soc. Japan*, v. 100, p. 24-49.
- Mayes, C.L. and Lawver, L.A. and Sandwell, D.T. (1990) Tectonic history and new isochron chart of the south Pacific. *J. Geophys. Res.*, v. 95, p. 8543-8567.
- McElhenny, M.W., Embleton, B.J., Ma, X.H., and Zhang, Z.K. (1981) Fragmentation of Asia in the Permian, *Nature*. v. 293, p. 212-215.
- Metcalfe, I. (1999) Gondwana dispersion and Asian Accretion: An over view. In: *Gondwana dispersion and Asian Accretion*. edited by Matcalfe, I., A.A. Balkema Pub., p. 9-28.
- Molnar, P. and Stock, J. (1987) Relative motions of hotspots in the Pacific, Atlantic and Indian Oceans since late Cretaceous time, *Nature*, v. 335, p. 131-137.
- Morgan, W.J. (1981) Hot spot tracks and opening of the Atlantic and Indian Oceans, in *Oceanic Lithosphere*, (The Sea, vol. 7), edited by Emiliani, C., Wiley-interscience Pub. Co., p. 443-487.
- Nishimura, S. (1992) Tectonic approach to changes in surface water circulation between the tropical Pacific and Indian Ocean. In: *Pacific Neogene-Environment, Evolution and Events*. edited by Tsuchi, R., Univ. Tokyo press, p. 157-167.
- Nishimura, S. and Suparka, S. (1997) Tectonic approach to the Neogene evolution of Pacific-Indian Ocean seaways. *Tectonophysics*, v. 281, p. 1-16.
- Okay, A.I. (1989) An exzotic eclogite/blue schist since in a Barrovian-style metamorphic terrain, Alanya Nappes, southern Turkey, *J. Petr.*, v. 30, p. 107-132.
- Okay, A.I. and Sengor, A.M.C. (1992) Evidence for intra-continental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology*, v. 20, p. 411-414.
- Otofujii, Y. and Marsuda, T. (1983) Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of Southwest Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 62, p. 349-359.
- Otofujii, Y., Itaya, T., and Matsuda, T. (1991) Rapid rotation of southwest Japan - paleomagnetism and K-Ar ages of Miocene volcanic rocks of southwest Japan. *Geophys. J. Int.*, v. 105, p. 397-405.
- Otofujii, Y., Katsuragi, K., Inoguchi, H., Yaskawa, K., Kim, K.H., Lee, D.S., and Lee, H.Y. (1989) Remagnetization of Cambrian to Triassic sedimentary rocks of the Paegunsan Syncline of the Okch'on Zone, South Korea. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 41, p. 119-135.
- Otofujii, Y., Matsuda, T., and Nohda, S. (1985) Paleomagnetic evidence for the Miocene counter-clockwise rotation of Northeast Japan - rifting process of the Japan arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 75, p. 265-277.
- Otofujii, Y., Nishizaka, Y., Tamai, M., and Matsuda, T. (1997) Paleomagnetic and chronological study of Miocene welded tuffs in the northern part of Central Japan: tectonic implications for the latest stage of arc formation of Japan. *Tectonophysics*, v. 283, p. 263-278.
- Otoh, S., Tsukada, K., Sano, K., Nomura, R., Zwa, Y.-J., and Yanai, S. (1999) Triassic to Jurassic dextral ductile shearing along the eastern margin of Asia: a synthesis. In: *Gondwana dispersion and Asian Accretion*.

- edited by Matcalfe, I., A.A. Balkema Pub., p. 89-103.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T., and Nakamura, E. (1996) Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea. *Geology*, v. 24, p. 1071-1074.
- Ryang, W.H. and Chough, S.K. (1997) Sequential development of Alluvial/Lacustrine System: Southeastern Eumsung Basin(Cretaceous), Korea. *J. Sed. Res.*, v. 67, p. 274-285.
- Sasajima, S., Nishimura, S., Hirooka, K., Otofujii, Y.-I., Van Leeuwen, T., and Hehuwat, F. (1980) Paleomagnetic studies combined with fission-track dating of the arm of Sulawesi, East Indonesia. *Tectonophysics*, v. 64, p. 163-172.
- Sengor, A.M.C. (1985) East Asian tectonic collage. *Nature*, v.318, p.16-17.
- Shibuya, H., Min, K.D., Lee, Y.S., Sasajima, S., and Nishimura, S. (1988) Paleomagnetism of Cambrian to Jurassic sedimentary rocks from the Ogcheon Zone, southern part of Korean Peninsula. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 40, p. 1469-1480.
- Shimazu, M., Yoon, S., and Tateishi, M. (1990) Tectonics and volcanism in the Sado-Pohang belt from 20 to 14 Ma and opening of the Yamato basin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, v. 181, p. 321-330.
- Tapponnier, P. and Molnar, P. (1976) Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, v. 264, p. 319-324.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le dain, A.Y., Amijo, R., and Cobbold, P. (1982) Propagating extrusion tectonics in Asia, new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, v. 10, p. 611-616.
- Tsuchi, R. (1986) Late Cenozoic molluscan faunas and their development in southwestern Japan. *Pal. Soc. Japan*, spec. pap., v. 29, p. 33-45.
- Wang, X., Liou, J.G., and Mao, H.K. (1989) Coecite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, v. 17, p. 1085-1088.
- Xu, J.W., Zhu, G., Tong, W.X., Cui, K.R., and Liu, Q. (1987) Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system.: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, v. 134, p. 273-310.
- Yamaji, A. (1990) Rapid intra-arc rifting in Miocene northeast Japan. *Tectonics*, v. 9, p. 365-378.
- Yanai, S., Park, B.S., and Otoh, S. (1985) The Honam Shear Zone (South Korea): Deformation and Tectonic implication in the Far East. *Scient. Pap. College Arts Sci. Univ. Tokyo*, v. 35, p. 181-210.
- Yaskawa, K. (1975) Paleolatitude and relative position of Southwest Japan and Korea in the Cretaceous. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, v. 43, p. 835-846.
- Yin, A. and Nie, S. (1993) An indentation model for the North and South China collision and the development and tectonic implication in the Tan-Lu and Honam Fault System, eastern Asia. *Tectonics*, v. 12, p. 801-813.
- Zhao, X. and Coe, R.S. (1987) Paleomagnetism constraints on the collision and rotation of North and South China. *Nature*, v. 327, p. 141-144.
- Zhao, X., Coe, R.S., Zhou, Y., Wu, H., and Wang, J. (1990) New paleomagnetic results from northern China: collision and suturing with Siberia and Kazakhstan. *Tectonophysics*, v. 181, p. 43-81.