

## 한반도 남동부 마이오세 지각변형, 분지발달 그리고 지구조적 의미

손 문<sup>1,‡</sup> · 송철우<sup>1</sup> · 김민철<sup>1</sup> · 천영범<sup>1</sup> · 정수환<sup>2</sup> · 조형성<sup>1</sup> · 김홍균<sup>3</sup> · 김종선<sup>1</sup> · 손영관<sup>4</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지질환경과학과  
<sup>2</sup>한국지질자원연구원 석유가스자원연구실  
<sup>3</sup>한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실  
<sup>4</sup>경상대학교 지구환경과학과

### 요 약

한반도 남동부의 제3기 화산암류와 퇴적암류는 하위로부터 효동리화산암류, 범곡리층군, 장기층군 그리고 연일층군으로 구분된다. 효동리화산암류는 동해확장으로 인해 한반도 남동부에 발생한 지각변형 초기에 국지적으로 분출한 올리고세 말의 데사이트~안산암질 화산복합체이다. 범곡리와 장기층군은 전기 마이오세 동안 동해안가를 따라 발생한 활발한 지각신장으로 만들어진 분지들을 충전하는 암석들로 각각 데사이트질과 현무암질 물질을 포함하는 지층들 그리고 각각에 수반된 육성 퇴적층으로 재정의되며, 전자는 후자에 의해 정합적으로 피복된다. 연일층군은 17 Ma 경에 갑작스런 퇴적중심의 이동으로 만들어진 포항분지와 그 이남의 연일구조선 동편 연변을 따라 퇴적된 비화산성 육성과 해성 퇴적암류를 총칭한다. 전기 마이오세 동안 한반도 남동부에는 북북서 방향의 주변위대를 가지는 평행사변형꼴 당겨열림분지의 생성과 함께 지구의 수평회전운동, 북서향 지괴 경동 그리고 분지의 확장축이 북동에서 남서쪽으로 파고드는 전파열개 과정을 겪었다. 약 17 Ma에 이르러 연일구조선이 운동하기 시작하여 한반도 남동부의 지각변형의 범위가 갑자기 서쪽과 북쪽으로 확대되어 퇴적중심과 환경의 급작스런 변화가 발생하였으며, 포항분지와 울산분지로 대표되는 썩기형 당겨열림분지가 만들어졌다. 연일구조선과 포항분지의 서편 경계단층은 경주시 보문지역에서 약 50° 각도로 사교하며, 이들 단층은 한반도 남동부의 마이오세 지각변형의 여러 특징들을 규제하는 최서단 경계선이다. 동해의 확장은 크게 부채꼴식 확장과 당겨열림 확장으로 구분되는데, 한반도 남동부의 지각변형 특징들은 동해의 당겨열림 확장을 지지한다. 전기와 중기 마이오세 초의 지각변형은 동해의 남북 내지 북북서-남남동 방향의 확장으로 인해 대륙 연변에 가해진 지속적인 우수향 단순전단력에 의해 발생하였으며, 양산단층 운동과는 무관하게 연일구조선을 포함하는 북북서 방향의 주변위대들의 우수향 주향이동단층운동에 의해 주도되었다. 동아시아 일원에는 약 16 Ma에 북상하던 필리핀해판과 일본열도 남서부의 충돌로 인하여 인장응력에서 압축응력으로 지구조 응력반전이 발생하였으며, 약 15 Ma에는 한반도 남동부도 그 영향 하에 놓이게 되어 현무암질 마그마가 비알칼리에서 알칼리 계열로 변화되고, 압축 응력장 하에서 분지들이 전반적으로 용기되기 시작하여 약 10 Ma에는 퇴적활동이 종결된 것으로 결론지어진다.

**주요어:** 동해 확장, 마이오세 층서, 우수향 단순전단, 당겨열림분지, 연일구조선, 응력반전

Moon Son, Cheol Woo Song, Min-Cheol Kim, Youngbeom Cheon, Soohwan Jung, Hyeongseong Cho, Hong-Gyun Kim, Jong Sun Kim and Young Kwan Sohn, 2013, Miocene Crustal Deformation, Basin Development, and Tectonic Implication in the Southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 49, no. 1, p. 93-118

**ABSTRACT:** Tertiary volcanic and sedimentary rocks in SE Korea are divided into the Hyodongri Volcanics, Beomgokri, Janggi, and Yeonil groups in ascending order. The Hyodongri Volcanics are a dacitic-andesitic volcanic complex which locally erupted in the earliest stage of crustal deformation due to East Sea opening in the Late Oligocene. The Beomgokri and Janggi groups are redefined as volcanogenic rocks composed of dacitic and basaltic

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-51-510-2248, E-mail: moonson@pusan.ac.kr

materials, respectively, and the intercalated terrestrial sediments that are filling the basins extended due to vigorous crustal deformation during the Early Miocene. The Beomgokri Group is conformably overlain by the Janggi Group. The Yeonil Group refers to non-volcanic terrestrial to marine sediments which accumulated in the Pohang Basin and the nearby areas east of the Yeonil Tectonic Line (YTL) because of rapid migration of depocenter at about 17 Ma. During the Early Miocene crustal deformation, parallelogram-shaped pull-apart basins formed between NNW-trending principal displacement zones (PDZs), accompanied with clockwise horizontal block rotation, northwestward block tilting, and southwestward propagating rifting. At about 17 Ma, the realm of crustal deformation in SE Korea expanded suddenly toward the west and the north because of the activation of YTL, resulting in dramatic change of depositional environment and the extension of the wedge-shaped pull-apart basins such as the Pohang and Ulsan basins. The YTL and the western border fault of the Pohang Basin, which intersect obliquely about 50° in Bomun area, are the westernmost limit of the Miocene crustal deformation in SE Korea. Kinematic models for the East Sea opening include bar-door and pull-apart models. All the features of the Miocene crustal deformation in SE Korea reasonably support the latter. They also indicate that the NNW-trending faults like the YTL acted as the PDZs rather than the NNE-trending Yangsan Fault under a consistent dextral simple shear. At about 16 Ma, the collision of Philippine Sea Plate and the southwesternmost part of Japanese Islands caused a tectonic inversion from tensional to compressional stress regime in East Asia. This inversion resulted in the compositional change of basaltic magma at about 15 Ma, from subalkali to alkali, and the crustal uplift in SE Korea, which subsequently caused the cessation of sedimentation in the basins at about 10 Ma.

**Key words:** East Sea opening, Miocene stratigraphy, dextral simple shear, pull-apart basin, Yeonil Tectonic Line, tectonic inversion

(Moon Son, Cheol Woo Song, Min-Cheol Kim, Youngbeom Cheon, Hyeongseong Cho and Jong Sun Kim, Department of Geological Sciences in PNU, Busan 609-735, Korea; Soohwan Jung, Petroleum & Marine Resources Division in KIGAM, Daejeon 305-350, Korea; Hong-Gyun Kim, Geotechnical Engineering Research Division in KICT, Goyang 411-712, Korea; Young Kwan Sohn, Department of Earth and Environmental Sciences in GNU, Jinju 660-701, Korea)

## 1. 서 언

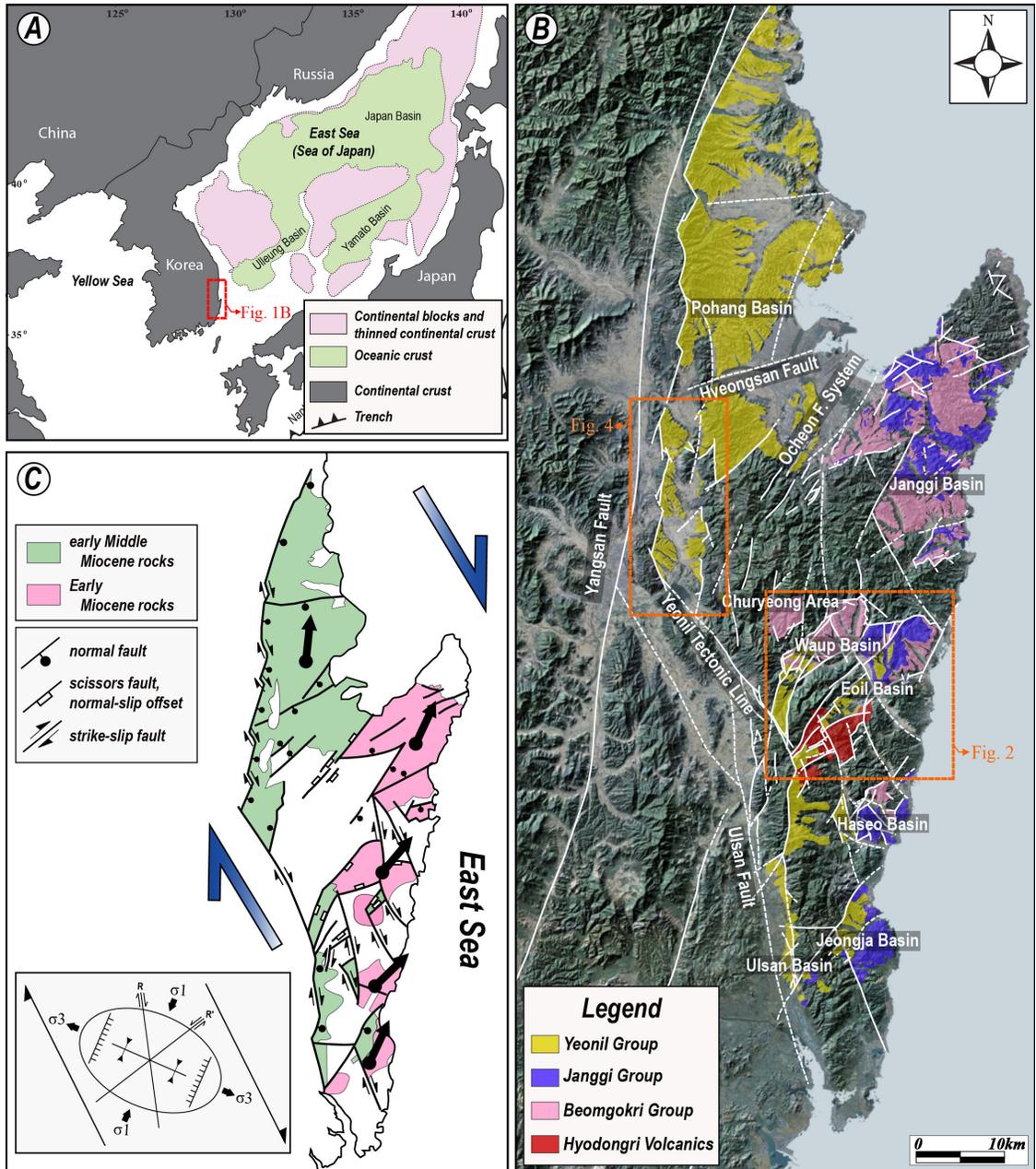
한반도의 남한에 분포하는 제3기 마이오세 퇴적 암류와 화산암류는 강원도 동해시 북평동과 경상북도 영덕군 영해면 일대의 북평분지와 영해분지(Kim, 1970)를 제외하면 양산단층과 울산단층선의 동편인 한반도 남동부 해안을 따라 분포하고 있다(그림 1). 이들의 분포는 지리적 위치와 퇴적물의 특징에 따라 북으로부터 포항, 장기, 와읍, 어일, 하서, 정자, 울산분지 등으로 구분될 수 있다(Kim, 1970; Lee *et al.*, 1992; Son and Kim, 1994; Son, 1998; Son *et al.*, 2000a, 2000b, 2005, 2007; Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012). 그러나 연구자에 따라서는 와읍, 어일, 하서 그리고 정자분지를 합쳐 어일분지(Kim, 1970) 또는 포항분지 이남의 모든 지역들을 하나로 묶어 양남분지(Yoon, 1986)로 부르기도 한다. 이 분지들은 동해가 활발히 확장되던 마이오세 동안 한반도 동해안을 따라서 발생한 지각변형의 대표적인 결과물로서(Yoon, 1986, 1997; Han *et al.*, 1987; Kim, 1992; Yoon and Chough, 1995; Fabbri

*et al.*, 1996; Son, 1998; Son *et al.*, 2007), 이곳의 지각변형과 분지발달에 대한 이해는 동해의 진화와 함께 거시적으로 동아시아 신생대 지각변형사의 복원에 필수적이다.

한반도 남동부의 마이오세 퇴적분지들은 지리적으로 인접하게 위치하고 있으나, 대부분 단층들에 의해 서로 격리·고립되어 있고 분지확장에 수반된 활발한 화산활동으로 암상의 변화가 심해 여러 층서·고생물학적 연구들(Tateiwa, 1924; Kim, 1970; Yoon, 1982, 1989; Yun, 1986; Yun *et al.*, 1990; Paik *et al.*, 1992, 2011)이 수행되었음에도 불구하고 분지층전물의 층서와 대비에서 오랫동안 논란이 이어져 오고 있다(Tateiwa, 1924; Lee *et al.*, 1992; Yoon, 1992; Yun *et al.*, 1997; Son, 1998; Noh and Hong, 2010; Kim *et al.*, 2011). 이러한 논란의 가장 근본적인 원인은 전기 마이오세 분지층전물을 대표하는 범곡리층군과 장기층군의 정의와 이들의 암상 특징들이 객관적으로 확립되지 않은데 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 맥락에서 최근의 연구들은 지층 내에 특징적으로 포함된 화산물질을 근거로 두 층군을

새로이 정의할 것을 주장하고 있다(Son, 1998; Son *et al.*, 2000a, 2000b, 2005, 2009, 2012; Kim *et al.*, 2005, 2011; Jung *et al.*, 2012).

1980년대 후반기에 들어 마이오세 분지지역에 대한 고자기학적 연구(Kim *et al.*, 1986; Han, 1989; Kim and Kang, 1989)가 본격적으로 수행된 이래로,



**Fig. 1.** (A) Simplified tectonic map of the East Sea modified after Jolivet *et al.* (1991). (B) Landsat TM satellite image of the southeastern Korean peninsula, showing the distribution of the Miocene sedimentary basins and major faults (modified from Kim *et al.*, 1991; Yun *et al.*, 1991; Son, 1998; Son *et al.*, 2000a, 2000b, 2002, 2005, 2009; Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012) and (C) the regional structural map in SE Korea with the Miocene stress regime. The thick black arrows indicate the mean declination directions of ChRMs.

여러 연구들(Kim *et al.*, 1993, 1996; Kim and Doh, 1994; Min *et al.*, 1994; Son *et al.*, 1996)에서 분지 내외 암석들의 잔류자기 편각의 다수가 시계방향으로 편향되어 있음이 관찰되었다(그림 1C). 이러한 잔류자기 편향현상은 동해의 확장으로 인해 한반도 남동부에 우수향 단순전단(simple shear)이 작동되어 지괴의 수평회전운동이 발생하였음을 시사하며(Kissel and Laj, 1989), 이곳 주요 단층들이 우수향 주향이 동단층으로 활동함으로써 퇴적분지들이 당겨열림(pull-apart)에 의해 확장되었음을 암시한다. 따라서 많은 기존 연구들은 한반도 남동부의 마이오세 지각변형과 분지확장이 이곳 주요 단층인 양산단층의 우수향 주향이동단층운동에 의해 주도된 것으로 해석하여 왔다(Han *et al.*, 1987; Kim, 1992; Yoon and Chough, 1995; Fabbri *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000). 그러나 최근 일련의 연구들은 이러한 견해에 강한 의문을 제기하며 마이오세 지각변형을 규제한 새로운 구조선으로 연일구조선의 존재를 제안하고 있다(Kang *et al.*, 1996; Son *et al.*, 1997, 2000b, 2002, 2007; Kim *et al.*, 1998; Moon *et al.*, 2000; Sohn and Son, 2004; Cheon *et al.*, 2012). 또한 기존의 연구들은 양산단층을 비롯한 북북동 방향의 단층들이 퇴적분지들을 확장시킨 주변위대(PDZ: Principal displacement zone)인 것으로 대부분 해석하여 왔으나, 최근의 연구들은 분지들의 기하와 경계부의 특성 그리고 다양한 지질구조요소들의 기하와 운동학적 특성들을 분석하여 이곳 퇴적분지들의 확장이 북북동 방향의 단층들이 아니라 북북서 단층들의 주향이동단층운동에 의해 주도되었음을 보고하고 있다(Son and Kim, 1994; Son, 1998; Son *et al.*, 2000a, 2000b, 2002, 2005, 2007; Sohn and Son, 2004; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012).

이상과 같이, 한반도 남동부 마이오세 퇴적분지들의 형성과 진화과정 그리고 이들 분지충전물의 충서에 관하여 아직까지 상당한 논란이 계속되고 있으며, 최근 들어서는 이러한 논란을 해결하고자하는 보다 실제적인 연구들이 시도되어 기존 연구들과는 다른 연구결과와 함께 새로운 해석들이 제안되고 있음이 주목된다. 따라서 이번 연구는 한반도 남동부의 마이오세 지각변형과 분지발달에 관한 논란들과 함께 새로이 얻어진 최근의 다양한 연구결과들을 정리하고 소개하는데 첫 번째 목적이 있다. 이를 토대

로 (1) 마이오세 분지충전물의 층서적 논란을 해결하는데 실마리가 될 수 있는 새로운 층군 구분에 관한 기준을 제안하고, (2) 한반도 남동부의 마이오세 지각변형의 주요 특징들을 정리함으로써 (3) 분지의 기하와 확장을 설명하는 새로운 운동학적 모델을 제시하고자 한다. 또한 최근 연구결과들을 기존의 연구결과들과 함께 종합적으로 해석함으로써, (4) 한반도 남동부의 마이오세 지각변형이 동해의 확장을 비롯한 동아시아 신생대 지구조적 사건과 어떠한 상호 관련성과 의미를 가지고 있는지를 토의하기로 하겠다.

## 2. 기존 층서와 새로운 제안

### 2.1 기존 층서와 논란

한반도 남동부 마이오세 분지의 기반암은 하위로부터 백악기 경상분지의 충전물인 경상누층군과 불국사화강암류 그리고 고제3기의 데사이트질 화산암류로 구성된다. 경상누층군은 일부 유천층군 화산암류를 제외하면 대부분 하양층군의 퇴적암류이다. 불국사화강암류는 대부분 울산단층선을 따라 대상으로 넓게 분포하고 있으며, 일부는 동편 해안가에 인접하여 소규모 암주 형태로 노출된다. 데사이트질 화산암류는 왕산층(Yoon, 1992)으로 명명된바 있으며, 한반도 남동부의 제3기 화산암 중 최고기인 후기 팔레오세 내지 에오세로 알려져 있다(46~57 Ma; Jin *et al.*, 1988, 1989).

분지충전물은 Tateiwa (1924)에 의해 처음으로 올리고세의 장기통과 플라이오세 하부 혹은 마이오세의 연일통으로 구분되었다. 장기통은 육성기원 퇴적물과 함께 산성/염기성 화산물질로 대부분 구성되는 반면, 연일통은 비화산성 해성기원 퇴적물로 주로 구성되어 있어 확연한 암상의 차이를 보인다. 장기통은 오천단층보다 남쪽의 분지들에서만 관찰되는 반면, 연일통은 어일, 정자 그리고 울산분지의 일부를 제외하면 대부분 포항분지를 충전하고 있다(그림 1B). 장기통의 경우 이후의 절대연령 연구들(Jin *et al.*, 1988; Kim *et al.*, 1986, 2005; Shimazu, 1990; Lee *et al.*, 1992)에 의해 전기 마이오세로, 연일통의 경우는 Kim and Yoon (1978)의 연체동물 화석, Yi and Yun (1995)의 석회질 초미화석 그리고 Byun (1995)의 와편모조류 화석연구 등에 의해 지

**Table 1.** Comparison of the Tertiary stratigraphies in SE Korea.

Age	Group	Gampo area	Yeoniil area	Guryongpo area	
L. Pleist. - E. Quat.	Yeoniil Group		Yoniil Basalt and two-pyroxene andesite		
			Yoniil Shale		
M. Mio. - E. Plioc.	Beomgokri Group	Chonbuk Conglomerate			
		Pongokri Andesite and its tuff	Pongokri Andesite and its tuff	Changam Andesite and its tuff	
			Chinjonhdong Andesite and its tuff		
			Manghaesan Andesite and its tuff		
			Pangsari Perlite	Changam Perlite	
			Kalpyongdong Breccia		
			Yongdongri Tuff		
			Andongri Conglomerate		
			Waupri Andesitic Tuff		
Eocene - Oligocene (Late Miocene)	Janggi Group		Upper Basaltic Tuff		
			Kumori Andesitic Tuff		
			Upper coal-bearing Formation		
			Lower Basaltic Tuff		
			Lower coal-bearing Formation		
			Kumgwangdong Shale		
			Hyodongri Volcanic Rocks	Shinjongdong Andesite	Kuryongpo Andesite
				Nuldaeri Trachyte	Nuldaeri Volcanic Rocks
				Nuldaeri Trachyte Tuff	
			Kampo Conglomerate	Changgi Conglomerate	
L. Cret.	Pulguksa Group	Hasori Andesitic Tuff			
		Nuldaeri Andesite		Pulguksa Group Igneous Rocks	

(A) Tateiwa (1924)

Age	Group	Yangnam Basin	Pohang Basin
Middle Miocene	Yeoniil Group		Dolente
			Duho F. Idong F. Heunghae F. Hageon F. Cheonggasa F. Danguni Cgl.
Early Miocene	Janggi Group	Sinhyeon Formation	
		Gangdong Formation	
		Eoil Basalts Ibamdong F.	Manghaesan F. Ocheon F. Geungwangdong M.
		Grimsa Dacite	
Eocene	Beomgokri Group	Jeondong Formation	Jeongcheoll Cgl.
		Changhang F. Churyeong Br.	Yongdongri M. Andongri Cgl.
		Hudongri F. Sangjeongdong F.	
Cretaceous		Wangsan Formation	
		Gyeongsang Supergroup	Bulgusa Granite

(B) Yoon (1992)

Age	Pohang Basin	Janggi Basin	Eoil Basin	Ulsan Basin	
				Jcungja area	Hwabong area
Middle Miocene	Yeoniil Group				
		Duho F. Hakjun F.			
Early Miocene	Janggi Group	Chunbuk Cgl.			
		Danguni Cgl.		Songjun F.	Sinhyun F.
			Ochun F.	Eoil F.	Kangdong F.
			Kumgwangdong shale	Eoil Basalt	
Eocene		Volcanics			
		Changgi Cgl.	Beomgokri Group	Beomgokri Group	Kampo Cgl.
			Hason Andesite & Tuff		
Cretaceous		Volcanics			

(C) Yun (1997)

질시대가 전기 마이오세 말에서 중기 마이오세로 밝혀졌다.

Tateiwa (1924)는 장기통을 하부의 장기층군과 상부의 범곡리층군으로 최초로 구분하였는데, 이 두 층군의 상대적 퇴적시기는 연구자에 따라 범곡리층군이 장기층군을 부정합으로 피복한다는 주장(Tateiwa, 1924; Lee *et al.*, 1992; Noh and Hong, 2010)과 이와 반대로 장기층군이 범곡리층군을 부정합으로 피복한다는 주장(Yoon, 1992; Kim and Doh, 1994; Son, 1998; Kim *et al.*, 2005, 2011; Son *et al.*, 2009)으로 양분되어 있을 뿐만 아니라, 두 층군이 시간적인 선후관계가 없이 서로 지교한다는 주장도 제기된 바 있다(Yun *et al.*, 1997; 표 1). 따라서 이들 두 층군의 상대 시기는 연구지역의 층서적 논란의 핵심이라 할 수 있다. 이러한 논란의 주요 원인은 다음과 같이 정리될 수 있다. 첫째, 범곡리와 장기층군에 관한 객관적이고 명확한 정의가 세워져 있지 않은 것으로 판단된다. 암상을 근거로 하는 암층서에서 층을 구분지을 때는 암석학적 특징이 명확하여야하나 기존

연구들에서는 두 층군을 쉽게 구분할 만한 암석학적 특징들이 정리되지 못하였다. 둘째, 암층서에서 구분된 지층은 퇴적환경과 관련을 가지며 대체로 시간과 사교(diachronous)할 가능성이 높다(Miall, 1990). 따라서 지층들의 선후관계를 논의하기에 앞서 짧은 시간에 넓게 퇴적된 시간층서적인 열쇠층을 설정하고 이를 지역 간에 대비해 보는 노력이 우선되어야 하나 이러한 노력이 미흡하였던 것으로 생각된다. 셋째로, 제3기 지역은 분지형성과 진화과정 동안 분지 내외에서 발생한 많은 단층활동으로 지층이 복잡하게 교란되어 있고, 빈번한 화산활동의 결과로 암상의 측방변화가 심하다. 이로 인해 열쇠층의 추적과 같은 세밀한 야외조사에 현실적인 어려움이 있는 것도 사실이다. 그러므로 제3기 지층들에 대한 일치된 층서 확립을 위해서는 분지 내외의 주요 구조들의 운동학적 특성이 밝혀져야 하며 각 지층의 암석학적 그리고 퇴적학적 특성과 그 기원을 밝혀내는 노력이 우선되어야 한다. 또한, 사건층서학 혹은 시간층서학적 관점에서 열쇠층을 설정하고 추적해

가는 꾸준한 조사가 필요하다 하겠다.

2.2 새로운 제안

층서적인 논란의 주 대상인 전기 마이오세의 범곡리층군과 장기층군은 일부 순수 육성 퇴적물을 포함하나 대부분 화산기원의 물질을 다량 포함한다. 세계적으로 화산물질을 포함하는 지층들의 경우에 특정 화산물질을 포함하는 지층을 층의 대비나 분대의 유용한 수단으로 사용하고 있다(예를 들어 화산회 층서학, Miall, 1990). 이들 두 층군이 모두 출현하고 있어 층서적 논란을 해결하는데 있어 핵심적인 지역이라 할 수 있는 어일과 와읍분지에서 수행된 최근 야외조사 결과들을 살펴보면, 두 층군에 포함된 화산물질의 성분은 서로 확연한 차이를 가지고 있는 것으로 판단된다(그림 2; Son, 1998; Son *et al.*, 2000a, 2000b; Kwon *et al.*, 2011). 즉, 범곡리층군은 부분적으로 안산암질 물질과 함께 데사이트질 화산물질을 다량 포함하는 반면, 장기층군은 대부분 현

무암질 물질로 구성된다. 또한 이들 연구와 이후 보다 북쪽의 장기분지에서 수행된 최근 연구들(Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012; Son *et al.*, 2012)은 모두 현무암질 물질을 포함한 지층이 데사이트질 지층을 피복하고 있어 분지확장 과정에서 데사이트질 화산활동이 현무암질 화산활동보다 먼저 발생하였음을 보고하고 있다. 어일과 와읍분지 일원에서 실시된 기존의 K-Ar과 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 연대측정 결과(표 2)를 종합하면, 현무암질 암석 연령은 17~20 Ma 사이에 집중되는 반면, 보다 산성질 암석들인 와읍분지의 용동리용회암 내 데사이트질 용암, 추령지역의 데사이트질 암맥과 용암류 그리고 효동리화산암류 내 안산암질 용암류는 21~24 Ma 사이로 보다 오래된 연령을 보여준다(Jin *et al.*, 1988; Lee *et al.*, 1992; Kim *et al.*, 2005). 이러한 결과들은 세계적으로 대륙지각의 수동형 열개 분지에서 흔히 관찰되는 데사이트질 화산활동에 이은 현무암질 화산활동으로 대표되는 이원성(bimodal) 화산활동이 한반도

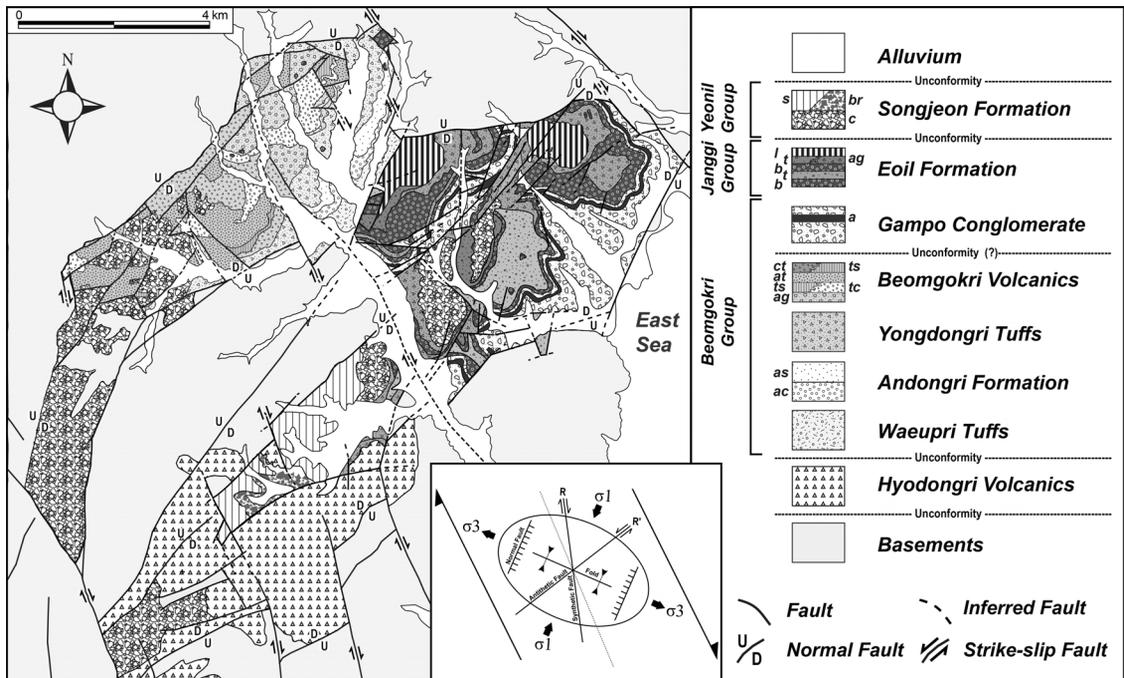


Fig. 2. Geological map of the Waup and Eoil basins with the stress regime and slip motions of the major faults (modified from Son *et al.*, 2000a, 2005). Symbols in the legend: conglomerates (ac) and sandstones (as) in the Andongri Formation; agglomerates (ag), tuffaceous sandstones (ts), tuffaceous conglomerates (tc), andesitic tuffs (at), and crystal tuffs (ct) in the Beomgokri Volcanics; acidic tuffs (a) in the Gampo Conglomerate; basaltic lavas (b), basaltic tuffites (t), agglomerates (ag), and lacustrine sediments (l) in the Eoil Formation; conglomerates (c), breccias (br), and sandstones (s) in the Songjeon Formation.

**Table 2.** Previous age data of the Tertiary rocks in SE Korea.

Locality	Stratigraphic Unit	Lithology	Dating Method	Age (Ma)	Reference
Pohang Basin	Daljeon Basalt	Basalt	K/Ar	14.82 ± 0.40	Lee <i>et al.</i> (1992)
				15.16 ± 0.42	
	Daljeon Basalt	Basalt	K/Ar	12.83 ± 0.30	Yun <i>et al.</i> (1995)
				13.62 ± 0.33	
13.89 ± 0.35					
14.56 ± 0.46					
Eoil Basin	Eoil Basalt	Basalt	K/Ar	17.2 ± 6.0	Jin <i>et al.</i> (1988)
				19.6 ± 0.3	
	Eoil Basalt	Basalt	K/Ar	18.0 ± 1.1	Lee <i>et al.</i> (1992)
				18.4 ± 0.6	
				18.7 ± 0.6	
19.2 ± 0.6					
20.4 ± 0.5					
Churyeong Area	Dyke intruding into the Churyeong Breccia	Dacite	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	21.8 ± 1.0	Kim <i>et al.</i> (2005)
	Andesitic Rocks	Dacite	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	22.0 ± 0.5	
Waup Basin	Yongdongri Tuff	Dacite	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	21.6 ± 0.4	
	Hyodongri Volcanics	Andesite	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	24.0 ± 0.5	

남동부에서 발생하였음을 지시한다. 따라서 본 연구는 범곡리와 장기층군을 정의함에 있어 포함된 화산 물질 즉, 전자는 데사이트질 물질 그리고 후자는 현무암질 물질을 포함하는 지층들 그리고 각각에 수반된 육성 퇴적층으로 재정의하고 한반도 남동부의 전기 마이오세 지층들을 새로이 분류하기를 제안한다. 또한 범곡리와 장기층군의 경계는 현무암질 물질을 포함한 지층들 중 최하위 지층의 기저로 정의하고자 한다. 그림 1B는 이러한 새로운 정의를 바탕으로 현재까지의 연구결과들을 종합하여 전기 마이오세 지층을 재분류하고 그 분포지를 나타내었다. 각 층군 내의 자세한 지층 분류는 지역에 따라 다양하다(Son and Kim, 1994; Son, 1998; Son *et al.*, 2000a, 2000b, 2002, 2005, 2009; Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012).

한편, Tateiwa (1924)와 Yoon (1992)에 의해 장기층군으로 분류된 바 있는 효동리화산암류는 데사이트에서 안산암 조성의 화산활동 결과물로 수매의 용암류와 다양한 기원의 화산쇄설물로 구성된 화산암 복합체이다(그림 1B, 2). 이 화산암복합체는 암상에 따라 크게 세 부분으로 구분된다. 즉, 하부대는 데사

이트질 응회암, 응회질 역암 그리고 응회질 사암, 중부대는 안산암질 용암류, 집괴암, 화산력 응회암 그리고 상부대는 다시 데사이트질 집괴암, 화산력 응회암, 응회암 등으로 구성된다(Son *et al.*, 2002). 상세한 야외조사에 의하면, 이 화산암류는 어일분지를 경계하는 (정)단층들의 외곽 즉, 하반의 높은 산악지에서 기반암인 경상누층군을 부정합으로 직접 피복하고 있으며 분지 내에서는 관찰되지 않고 있어(Son *et al.*, 2000a, 2002), 분지충전물이 아니라 본격적인 분지확장 이전에 발생한 대륙지각 열개 초기의 화산활동의 결과로 해석된다. 따라서 본 연구는 이 화산암류를 하부 분지충전물인 범곡리층군 퇴적 이전에 분출된 것으로 판단하며, 이에 따라 범곡리층군 하위의 독립적인 화산암체로 따로 구분하기를 제안한다(그림 1B, 2). 최근 효동리화산암류의 중부대에서 산출되는 안산암질 용암류의 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 연대측정 결과는 24.0±0.5 Ma로 분지충전물에 비해 고기인 올리고세 말의 연령을 보여준다(표 2; Kim *et al.*, 2005).

한반도 남동부 분지 지역에 분포하는 현무암질 용암과 관입암류는 Tateiwa (1924)에 의해 제4기 연일현무암(또는 연일현무암및양휘석안산암) 그리고

**Table 3.** Summary of paleomagnetic data from the basements and basin-fills of the Miocene basins, SE Korea.

Locality and stratigraphy	ChRM				VGP		P	R
	D (°)	I (°)	$\alpha_{95}$ (°)	k	Lat (°)	Long (°)		
<b>Basement rocks</b>								
Pohang Basin	56.4	47.0	3.7	206.9	42.3	212.0	N	⑥
Pohang Basin	87.5	70.5	4.0	418.5	30.1	171.2	N	⑥
Janggi Basin	46.2	42.4	--	--	48.9	222.5	N	⑤
Janggi Basin	226.8	-73.6	12.5	97.9	52.0	166.4	R	⑤
Janggi Basin	269.3	-73.2	14.0	44.3	30.5	166.4	R	⑤
Janggi Basin	4.0	53.0	16.2	--	85.9	254.9	N	⑦
Eoil Basin	58.9	66.8	7.4	--	45.8	182.5	N	②
Eoil Basin	203.0	-54.0	11.0	69.0	71.2	216.5	R	④
Ulsan-Jeongja Basin	251.5	-51.9	--	--	32.0	200.1	R	⑧
<b>Mean (N=9)</b>	<b>49.8</b>	<b>61.6</b>	<b>11.6</b>	<b>20.6</b>	<b>50.7</b>	<b>190.3</b>		
					<b><math>A_{95}=16.0</math></b>	<b>K=11.3</b>		
<b>Basin-fills (Janggi Basin)</b>								
Yeonil Basalt	49.3	53.9	5.4	123.9	50.1	206.8	N	①
Yeonil Basalt	67.7	44.7	7.6	--	32.4	208.7	N	②
Yeonil Basalt	246.5	-69.2	8.4	--	41.5	177.3	R	②
Yeonil Basalt	148.2	-63.2	10.2	--	64.4	69.3	R	②
Yeonil Basalt	214.5	-43.1	3.9	184.2	58.5	230.1	R	⑥
Yeonil Basalt	356.0	68.2	2.0	1009.2	74.4	120.2	N	⑥
Yeonil Basalt	191.9	-48.0	6.6	--	77.8	250.9	R	⑦
Janggi Group	7.5	40.1	6.8	--	75.3	281.2	N	②
Janggi Group	30.9	40.0	23.5	--	60.2	237.3	N	②
Janggi Group	0.6	47.1	6.4	--	82.3	305.6	N	②
Janggi Group	326.8	38.7	27.8	--	57.9	22.5	N	②
Janggi Group	25.2	58.6	19.8	--	69.8	202.4	N	②
Janggi Group	212.7	-55.0	19.8	--	63.6	210.8	R	②
Janggi Group	191.0	-59.0	7.0	349.0	80.5	192.7	R	④
Janggi Group	193.0	-39.0	25.0	12.0	72.0	267.0	R	④
Janggi Group	49.0	38.0	19.0	18.0	45.1	224.8	N	④
Janggi Group	16.0	53.0	7.0	66.0	76.7	225.3	N	④
Janggi Group	199.0	-55.0	7.0	99.0	74.6	215.6	R	④
Janggi Group	198.8	-55.5	6.7	99.5	74.8	213.8	R	⑤
Janggi Group	210.7	-55.6	10.0	59.3	65.3	210.0	R	⑤
Janggi Group	25.3	61.1	5.5	193.6	69.5	194.3	N	⑤
Janggi Group	14.3	54.4	6.5	66.6	78.3	220.6	N	⑤
Janggi Group	209.4	-47.3	13.4	21.3	64.1	228.0	R	⑤
Janggi Group	30.4	56.7	7.5	86.2	65.7	207.4	N	⑥
Coal-bearing Formation	35.6	36.4	7.4	--	55.1	236.7	N	②
Beomgokri Group	22.2	59.6	4.9	--	72.1	198.5	N	②
Beomgokri Group	18.3	38.2	19.1	--	68.4	256.9	N	②
Beomgokri Group	229.0	-40.0	20.0	40.0	45.8	223.0	R	④
Beomgokri Group	203.0	-66.0	12.0	65.0	69.1	176.3	R	④
Beomgokri Group	192.0	-65.0	--	--	75.8	164.9	R	④
Beomgokri Group	45.0	48.0	6.0	483.0	51.8	216.8	N	④
Beomgokri Group	47.0	60.0	--	34.0	53.3	197.2	N	④
<b>Mean (N=32)</b>	<b>24.6</b>	<b>53.8</b>	<b>5.3</b>	<b>23.9</b>	<b>70.2</b>	<b>213.9</b>		
					<b><math>A_{95}=6.6</math></b>	<b>K=15.8</b>		

**ChRM:** site mean directions after tilt correction; **D:** declination; **I:** inclination; **k:** Fisherian precision parameter;  $\alpha_{95}$ : 95% confidence interval; **VGP:** virtual geomagnetic pole; **Lat:** latitude; **Long:** longitude; **K:** best-estimate of the precision parameter k of the observed distribution of site mean VGPs;  $A_{95}$ : 95% confidence interval for calculated mean pole; **P:** polarity; **R:** reference, ① Han (1989), ② Kim and Kang (1989), ③ Kim *et al.* (1993), ④ Kim and Doh (1994), ⑤ Kim *et al.* (1994), ⑥ Min *et al.* (1994), ⑦ Kim and Kang (1996), ⑧ Son *et al.* (1996).

Table 3. continued.

Locality and stratigraphy	ChRM				VGP		P	R
	D (°)	I (°)	$a_{95}$ (°)	k	Lat (°)	Long (°)		
<b>Basin-fills (Eoil-Waup Basins)</b>								
Eoil Formation	44.5	44.3	3.9	--	50.9	221.2	N	②
Eoil Formation	237.8	-34.7	8.2	--	36.9	221.5	R	②
Eoil Formation	12.4	70.5	--	--	69.3	149.9	N	②
Eoil Formation	71.4	64.1	5.7	--	36.9	185.0	N	②
Eoil Formation	354.9	51.1	13.3	--	84.2	357.4	N	②
Eoil Formation	48.8	53.5	2.5	625.0	50.4	207.2	N	⑥
Gampo Conglomerate	0.0	42.6	7.3	--	78.9	309.4	N	②
Janggi Group	212.0	-49.0	8.0	88.0	62.6	222.6	R	④
Janggi Group	235.0	-61.0	--	28.0	47.5	193.6	R	④
Janggi Group	213.0	-48.0	--	37.0	61.5	223.6	R	④
Janggi Group	217.0	-60.0	6.0	210.0	60.8	198.1	R	④
Waeupri Tuffs	204.2	-37.8	6.6	--	64.3	247.5	R	②
Waeupri Tuffs	117.2	54.0	6.8	--	1.5	176.5	N	②
Beomgokri Group	218.0	-53.0	--	140.0	58.9	212.3	R	④
Beomgokri Group	218.0	-36.0	6.0	152.0	53.2	234.5	R	④
Beomgokri Group	230.0	-48.0	9.0	29.0	47.7	213.9	R	④
<b>Mean (N=16)</b>	<b>39.4</b>	<b>53.5</b>	<b>9.2</b>	<b>17.2</b>	<b>57.8</b>	<b>208.5</b>		
					$A_{95}=11.8$	$K=10.7$		
<b>Basin-fills (Haseo Basin)</b>								
Yeonil Basalt	252.2	-44.7	19.6	--	28.7	206.2	R	②
Yeonil Basalt	65.0	43.7	8.4	--	34.1	210.6	N	②
Haseori Andesites	181.0	-40.9	5.7	--	77.8	305.2	R	②
Haseori Andesites	193.9	-65.8	7.4	--	73.9	164.8	R	②
Hyodongri Andesites	262.5	-70.4	11.7	--	32.4	172.4	R	②
<b>Mean (N=5)</b>	<b>45.9</b>	<b>57.6</b>	<b>24.7</b>	<b>10.5</b>	<b>53.4</b>	<b>197.8</b>		
					$A_{95}=32.7$	$K=6.4$		
<b>Basin-fills (Jeongja Basin)</b>								
Dangsa Andesites	220.5	-65.5	5.4	92.8	57.8	184.7	R	⑧
Dangsa Andesites	18.0	47.4	8.6	26.5	73.3	239.0	N	⑧
Dangsa Andesites	228.7	-50.4	5.3	83.6	49.5	211.3	R	⑧
Dangsa Andesites	185.7	-43.2	11.6	34.2	78.5	282.6	R	⑧
Dangsa Andesites	201.2	-42.7	8.8	31.3	68.8	244.1	R	⑧
<b>Mean (N=5)</b>	<b>24.9</b>	<b>50.9</b>	<b>13.8</b>	<b>31.5</b>	<b>68.4</b>	<b>220.4</b>		
					$A_{95}=16.9$	$K=21.5$		
<b>Mean (N=58)</b> <b>(Janggi and Beomgokri G.)</b>	<b>30.3</b>	<b>54.1</b>	<b>4.3</b>	<b>19.8</b>	<b>65.4</b>	<b>210.7</b>		
					$A_{95}=5.5$	$K=12.5$		
<b>Basin-fills (Pohang Basin)</b>								
Duho Formation	11.0	54.0	--	--	80.9	226.0	N	③
Duho Formation	19.0	45.0	--	--	71.2	244.5	N	③
Duho Formation	17.0	48.0	--	--	74.1	240.7	N	③
Duho Formation	180.0	-49.0	--	--	83.8	309.3	R	③
Duho Formation	215.0	-68.0	--	--	61.0	177.3	R	③
Duho Formation	3.0	50.0	--	--	84.1	283.2	N	③
Duho Formation	357.0	55.0	--	--	87.5	27.0	N	③
Duho Formation	5.0	45.0	--	--	79.6	283.8	N	③
Duho Formation	3.0	50.0	--	--	84.1	283.2	N	③
Duho Formation	7.0	46.0	--	--	79.4	273.1	N	③
Duho Formation	11.0	42.0	--	--	74.8	267.7	N	③
Duho Formation	3.0	46.0	--	--	80.9	292.2	N	③
Duho Formation	8.6	55.3	5.9	114.5	83.0	218.9	N	⑥
Duho Formation	344.3	37.0	14.6	18.4	69.3	355.1	N	⑥
Hakjeon Formation	189.3	-63.7	14.4	56.3	78.4	163.7	R	③
Hakjeon Formation	2.9	54.8	7.3	73.0	87.5	236.6	N	⑥
<b>Mean (N=16)</b> <b>(Yeonil Group)</b>	<b>6.3</b>	<b>51.0</b>	<b>4.7</b>	<b>63.2</b>	<b>83.3</b>	<b>251.8</b>		
					$A_{95}=5.4$	$K=47.7$		

Yoon (1992)에 의해 전기 마이오세의 어일현무암으로 명명된 바 있다(표 1). 그러나 절대연령과 지화학 자료들을 종합하면, 이들 현무암류는 크게 두 종류로 구분된다. 즉, 포항분지 이남의 분지들에서 광범위하게 관찰되는 17~20 Ma의 비알칼리(subalkali) 계열 현무암류와 포항분지 남부에서 확인된 13~15 Ma의 알칼리 계열 현무암류로 구분된다(Lee *et al.*, 1992; Yun *et al.*, 1995; Shim *et al.*, 2011; Choi *et al.*, 2013). 이 두 종류의 암석은 특성잔류자기의 평균 편각에서도 전자는 시계방향인 반면, 후자는 반시계방향으로 수평 회전된 양상을 보여주고 있어 서로 차이가 있다(Kim and Kang, 1989; Son *et al.*, 1996). 이러한 점들은 15~17 Ma 사이에 한반도를 포함한 동아시아 일원의 지구조환경이 급격히 변화되었음을 암시하는데, 이 시기는 북상하는 필리핀해판이 일본열도 남서부 말단과 충돌하면서 응력반전이 발생하여 일본열도 남서부가 시계방향으로 회전되면서 대한해협 일원이 압축되고 산년습곡대로 알려져 있는 동북동-서남서 방향의 대규모 해저 습곡들이 만들어지기 시작한 시기와 일치한다(Kim, 1992; Fabbri *et al.*, 1996; Son *et al.*, 1996, 2007; Son, 1998; Kim *et al.*, 2008). 따라서 한반도 남동부의 현무암질 암석들은 장기층군에 속하는 전기 마이오세의 비알칼리 암석과 이후 지구조적 응력반전으로 생성된 중기 마이오세 초의 알칼리 암석으로 향후 구분되기를 희망한다. 후자의 알칼리 현무암류는 현재로서는 포항분지 남부(소위 달전현무암)에만 소규모로 존재가 확인되었으나, 상세한 암석학적 연구가 진행되면 오천단층 이남의 분지들 내의 현무암질 암석들의 일부도 이에 포함될 가능성이 높다.

### 3. 마이오세 지각변형과 분지발달의 주요 특징

#### 3.1 지괴의 수평회전운동

기존의 여러 고자기학 연구들은 한반도 남동부의 전기 마이오세 암석들의 잔류자기 편각이 일관되게 시계방향으로 편향되어 있음을 보고하였다(Kim *et al.*, 1986; Han, 1989; Kim and Kang, 1989, 1996; Kim *et al.*, 1993, 1998; Kim and Doh, 1994; Min *et al.*, 1994; Son *et al.*, 1996). 이는 이곳에 우수향의 전단응력이 강력히 작동하였으며, 이로 인해 지괴가 시계방향으로 수평 회전하는 지각변형이 발생하였

음을 지시한다(Kissel and Laj, 1989). 전기 마이오세 지층들(포항분지 이남에만 분포함)에서 세척과 경사 보정이 실시된 특성잔류자기(ChRM: Characteristic Remanence Magnetization)의 편각들을 살펴보면, 25°~50° 범위로 시계방향으로 편향되어 있으며, 전체 평균 값은 30.3°이다(표 3; 그림 3). 이를 장기분지, 어일-와읍분지, 하서분지 그리고 정자분지로 지역별로 나누어 살펴보면, 각각 평균 24.6°, 39.4°, 45.9° 그리고 24.9°로써 지역에 따라 다소 차이를 보여주고 있으나 모두 시계방향으로 편향되어 있다. 이러한 점들은 포항분지 이남 지역에 전기 마이오세 동안 전반적인 시계방향의 지괴회전운동이 발생하였으나, 지괴의 회전량은 동일하지 않고 구조구역에 따라 달라질 수 있음을 알려준다.

한편, 지심쌍극자(GAD: Geocentric Axial Dipole) 모델을 근거한 현재 지자극을 기준으로 고지자극을 이용해 계산된 시대별 지괴 수평 회전량을 살펴보면(그림 3), 고제3기 데사이트질 화산암류, 전기 마이오세 암석 그리고 중기 마이오세의 암석의 경우에 평균이 각각  $51.0^{\circ} \pm 18.2^{\circ}$ ,  $30.4^{\circ} \pm 5.4^{\circ}$ , 그리고  $6.7^{\circ} \pm 5.8^{\circ}$ 로써 젊은 지층으로 갈수록 수평 회전량이 감소하는 경향이다. 또한 포항분지 연일층군의 경우에는 오차

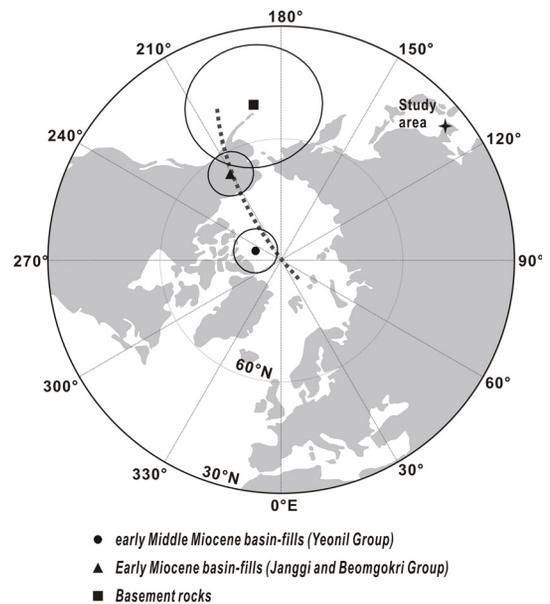


Fig. 3. Comparison of paleomagnetic poles of the basement rocks and basin-fills of the Miocene basins, SE Korea.

범위 내에서 지괴의 회전이 인지되지 않는다(그림 3). 이는 고제3기 이래로 전기 마이오세에 이르기까지 지속적인 우수향 전단응력이 작동하여 지괴의 시계방향 회전운동이 발생하였으나, 연일층군이 퇴적되기 시작한 시점인 약 17 Ma 경에 이르러서 이러한 회전운동은 거의 종결되었음을 암시한다.

### 3.2 분지의 당겨열림 확장과 지괴 경동

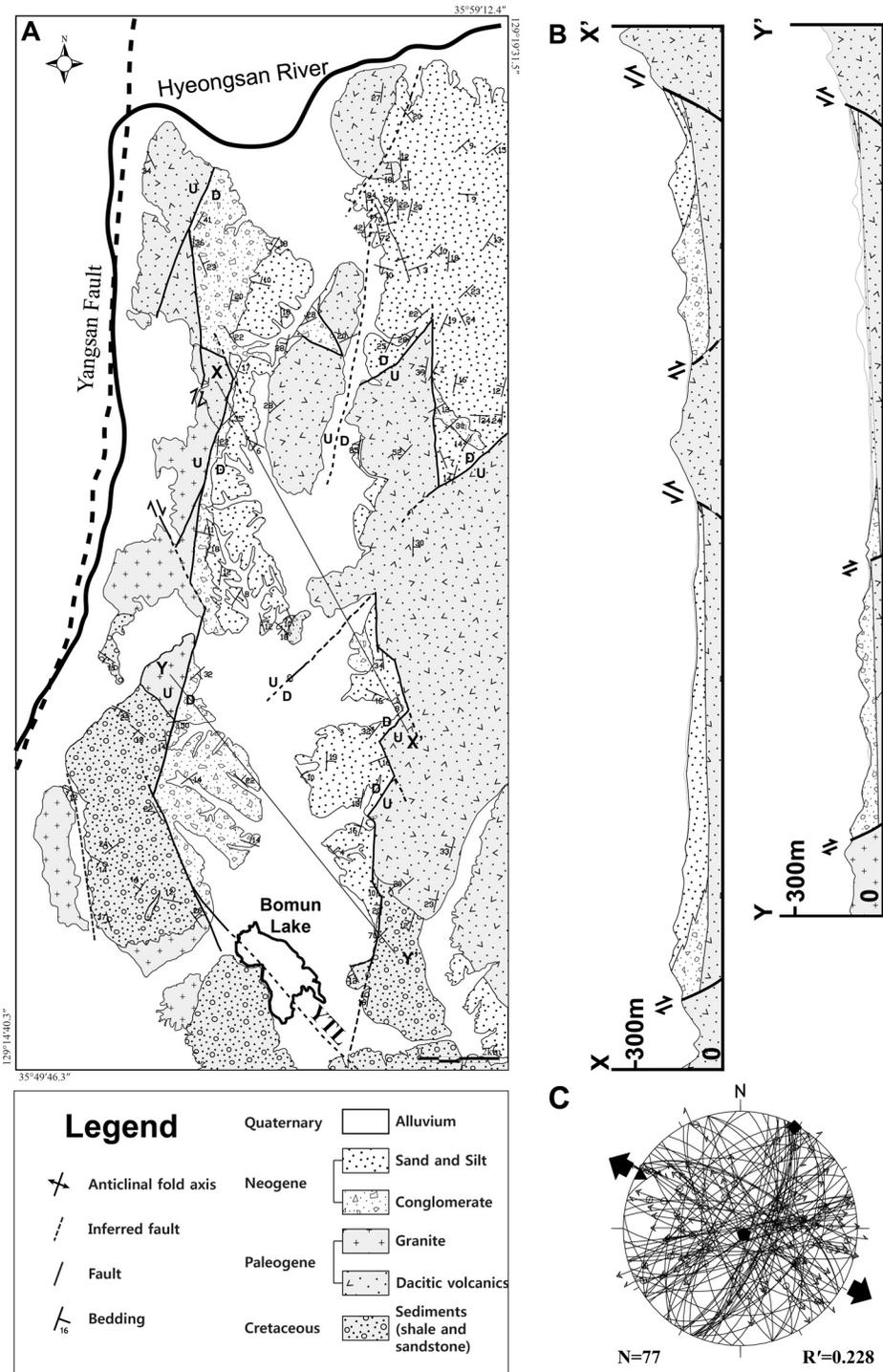
한반도 남동부에 분포하는 퇴적분지들은 마이오세 지각변형의 가장 주요한 결과물 중 하나이다(그림 1B). 포항분지 이남의 장기, 와읍, 어일, 하서 그리고 정자분지의 분지발달사와 관련한 연구결과들을 종합하면(Son and Kim, 1994; Kee *et al.*, 1995; Son *et al.*, 2000a, 2000b; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012), 이들 분지들은 모두가 북서-남동 방향의 지각신장을 지시하는 북북동 내지 북동 방향의 축을 가진 일련의 지구 혹은 반지구의 기하를 형성하고 있다(그림 1B와 2). 분지의 경계단층들은 크게 두 가지 단층군으로 구분할 수 있다: (1) 북북동 내지 북동 방향의 정단층군, (2) 북북서 내지 북서 방향의 우수향 주향이동단층군. 이들 두 단층군은 대부분 40°~60°의 각도로 서로 사교한다. 먼저, 정단층군은 분지의 북서부와 남동부의 경계를 형성하고 있다. 북서부 경계단층은 남동쪽으로 경사져 있으며 점완/서가형의 단층기하를 보여주는 반면, 남동부 경계단층은 북서부 경계단층의 반향단층(antithetic fault)으로 활동하였으며 북서부 경계단층에 비해 상대적으로 변위량이 작다. 때문에 이곳 기반암과 분지충전물의 지층은 단층 인접부 일부를 제외하고는 일관되게 북서 방향으로 경사져 있어 분지가 확장하는 동안 분지 바닥이 경동된 양상이다(Son and Kim, 1994; Son *et al.*, 2000a, 2000b; Cheon *et al.*, 2012). 또한, 고기의 지층일수록 지층의 경사각이 커지는 경향을 보여주고 있어 지괴경동은 퇴적과 동시에 발생한 것으로 판단된다. 한편, 우수향 주향이동단층군은 분지의 북동부와 남서부의 경계를 이루고 있으며 서로 짝을 이루고 주변위대로서 활동하였다.

이들 분지의 충전물에 발달하는 구조들은 대부분 신장구조로서 성장단층을 포함하는 정단층과 염기성 암맥들이 널리 관찰되며 이들은 모두 분지의 경계단층 중 정단층군과 거의 평행한 북동 내지 북북동의 주향을 가진다. 또한 분지 내외에서 실시된 취

성변형요소들을 이용한 고응력장 복원에서는  $\sigma_1$  또는  $\sigma_2$ 가 수직 혹은 아수직이며, 최대수평응력( $\sigma_{Hmax}$ )과 최소수평응력( $\sigma_{Hmin}$ )이 각각 북동과 북서 방향으로 북서-남동 방향의 횡인장 응력장을 지시한다. 이상의 결과들을 종합하면, 포항분지 이남의 전기 마이오세 분지들은 북서 내지 북북서 방향의 우수향 주향이동단층들 사이에서 발생한 서북서-동남동 내지 북서-남동 방향의 인장응력 하에서 확장된 당겨열림분지로서, 북동 내지 북북동 방향의 지구 내지 반지구의 기하를 형성하며 퇴적과 동시에 북서 방향으로 지괴가 경동되는 지각변형을 겪은 것으로 해석된다.

한편, 약 17 Ma에 시작되어 주로 중기 마이오세 초 동안 확장된 포항분지는 북북동 방향으로 벌어진 썩기 형태를 보이는 분지이다(그림 1B, C). 대부분의 기존 연구들에서 포항분지는 서편이 양산단층에 의해 경계되며, 이 단층이 주변위대로서 우수향 주향이동단층운동을 하여 확장된 당겨열림분지로 해석되어 왔다(Han *et al.*, 1987; Kim, 1992; Yoon and Chough, 1995; Choi, 2006). 그러나 최근의 상세한 야외조사를 통해 포항분지의 서편은 양산단층과 접하지 않으며, 이 보다 동편에 위치하는 북북서의 이음단층(transfer fault)과 북북동~북동 방향의 정단층들의 분절로 이어지는 지그재그 형태의 단층대로 경계됨이 보고되었다(Sohn and Son, 2004; Song *et al.*, 2012). 또한 분지의 동남편은 북동 내지 북북동 방향의 정단층들이 릴레이식으로 배열된 오천단층계에 의해 구획되고 있음이 밝혀졌다(Cheon *et al.*, 2012).

포항분지 남부(소위 보문지역)의 최근 상세한 구조지질학 연구결과를 살펴보면(Song *et al.*, 2012), 분지의 서편 경계단층은 확연한 지그재그 형태로 양산단층으로부터 약 2~3 km 동편에 위치한다. 또한 이 단층은 북북동과 북북서의 분절단층으로 구성된다(그림 4). 야외에서 북북동 단층들은 60° 내외로 경사져 있으며 뚜렷한 단층애를 형성함이 관찰된다(그림 5). 단층과 인접한 기반암은 심하게 파쇄되어 있으며, 분지충전물은 주로 단층각력들이 재동되어 퇴적된 층리가 불량한 역지시성 각력암이다. 역암 내 역들은 대부분 주변 기반암 기원으로 십여 cm에서 최대 1 m 이상의 분급이 매우 불량한 각력들로 구성된다. 이들 경계단층 인접부에서 얻어진 단층이



**Fig. 4.** (A) Geological map of the southern part (Bomun area) of the Pohang Basin with (B) the representative cross-sections. YTL: Yeonil Tectonic Line. (C) Fault-slip data from the basements adjacent to the border faults (lower-hemisphere, equal-area projection). Divergent arrows represent horizontal stretching ( $\sigma_{Hmin}$ ) calculated by the method of Choi (1991). The principal stress axes  $\sigma_1$  (filled pentagons),  $\sigma_2$  (filled squares), and  $\sigma_3$  (filled triangles) are also projected. N: number of data, R':  $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ .

동 자료를 이용한 고응력장 분석에서는 서북서-동남동 방향의 수평 인장응력이 도출되었다(그림 4C). 한편, 북북서 방향의 단층들은 대부분 70~80° 내외의 고각으로 분지를 향해 경사져 있으며 단층면에서는 우수향 횡인장 운동감각이 관찰된다. 이는 북북서 단층들은 북북동 방향의 정단층들을 잇는 이음단층임을 지시한다.

포항분지 서편 경계단층의 운동양식에 대한 정보를 제공하는 또 다른 연구로 Hong *et al.* (1998)은 분지 경계부에 발달하는 4개의 선상지-삼각주 내 역들을 이용해 공급지를 분석하여 선상지-삼각주계가 퇴적되는 동안 분지 서편 경계를 따라 주향이동운동이 발생하지 않았다는 결론을 얻은 바 있으며, Sohn and Son (2004)은 고주산 선상지-삼각주계의 퇴적상과 구조 분석을 통하여 이곳 퇴적물은 분절된 정단층들의 이음부(transfer zone)에서 주로 공급되었고 최소 3번의 퇴적 동시성 정단층 운동에 의해 퇴적

작용이 제어된 것으로 해석한 바 있다. 이상의 결과들은 포항분지의 서편 경계가 주향이동단층이라는 기존 주장은 재고되어야 하며, 이 보다는 여러 개의 이음단층으로 분절된 북북동 방향의 정단층들이 분지의 침강을 주도하였음을 지시한다. 한편, 포항분지 서쪽 경계단층은 좌향 스텝핑(left-stepping)되며 남쪽으로 이어지다 분지 남단에서 연일구조선과 약 50° 각도로 사교함이 주목된다(그림 1B). 뒤에 자세히 설명될 연일구조선은 한반도 남동부의 마이오세 지각변형 특징들을 규제하는 서쪽 한계선으로써 포항분지 확장 시작기인 약 17 Ma에 운동을 시작한 우수향 주향이동단층대이다(Son *et al.*, 2002, 2007; Cheon *et al.*, 2012).

포항분지의 동남쪽 경계인 오천단층계는 북동 내지 북북동 방향의 정이동 내지 횡인장성 좌수향 사교이동 단층들이 하나의 다발을 이루며 북동 방향으로 배열되는 릴레이식 단층계이다(그림 1B; Cheon

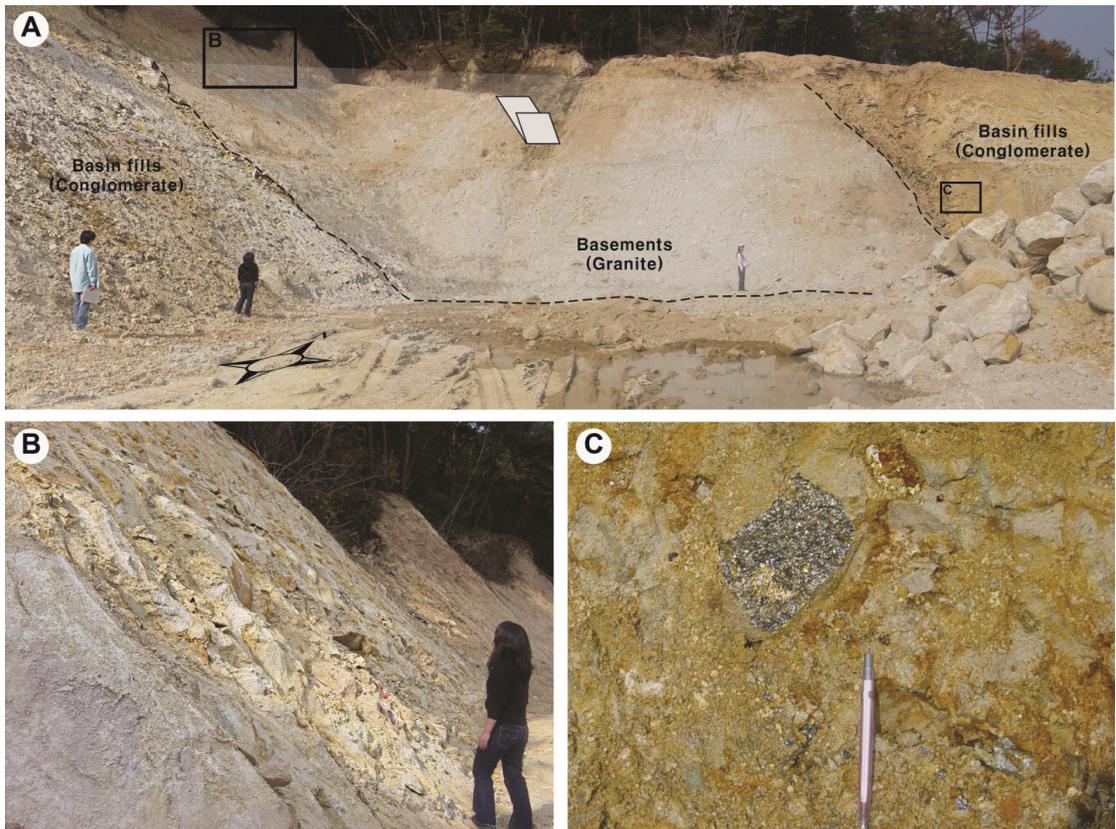


Fig. 5. Outcrop photographs showing (A) the NNE-trending western border fault of the Pohang Basin and (B) the pervasively fractured basement rock and (C) the basin-filling disorganized angular conglomerate adjacent to the fault.

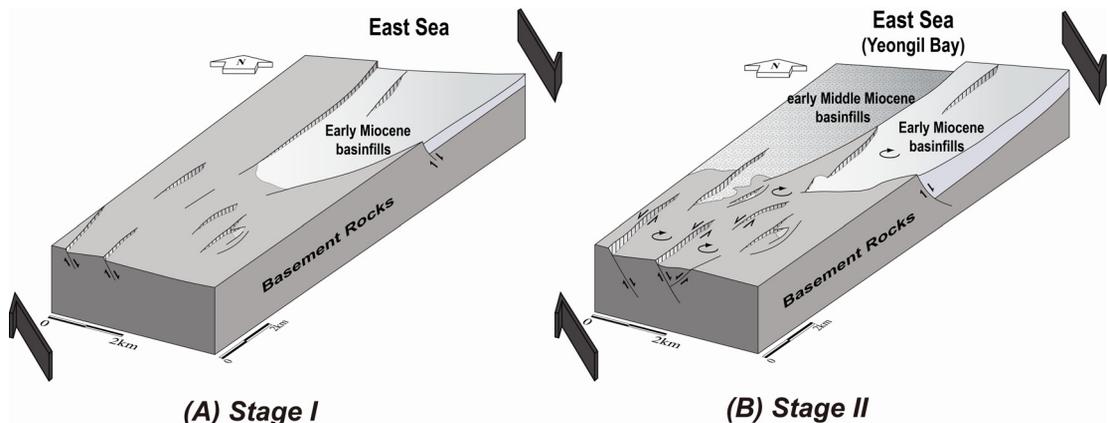
*et al.*, 2012). 이들 단층 중 가장 규모가 큰 단층(오천 단층)이 중기 마이오세의 포항분지와 전기 마이오세의 장기분지를 직접 경계하는데, 이 단층은 남서쪽으로 갈수록 수직 변위가 줄어드는 가위단층의 기하와 운동학적 특징을 가진다. 이 단층은 전기 마이오세에는 장기분지의 서편 경계단층으로 활동하였으나, 약 17 Ma에 이르러 퇴적중심의 갑작스런 이동과 함께 포항분지의 동남쪽 경계단층으로 재활동된 것으로 해석된다(그림 6). 또한 이 단층은 전기 마이오세 동안에 작동된 북북서 방향의 우수향 전단력에 의해 시계방향으로 점진적으로 회전되면서 운동각각이 정이동에서 좌수향 사교이동으로 변화된 것으로 보고되었다(Cheon *et al.*, 2012). 고자기학적 연구에 따르면 포항분지 서쪽 경계단층의 서편 분지 기반암의 잔류자기는 편향되지 않은 반면(Kang, 1995), 오천 단층계 동편의 장기반도 암석들의 잔류자기는 시계 방향으로 평균 약 25° 회전되어 있어 이러한 해석을 지지한다(그림 1C; Kim *et al.*, 1986; Kim and Kang, 1989; Min *et al.*, 1994).

이상의 사실들을 모두 종합하면, 동해의 확장으로 인해 남북 내지 북북서의 우수향 전단력이 지속적으로 작동되던 한반도 남동부에 전기 마이오세에는 오천단층계 이남의 해안에 지각변형이 집중되었으나 약 17 Ma에 이르러 지각변형이 보다 넓게 확장되어 서쪽의 연일구조선이 하나의 주요 주변위대로서 우수향 주향이동단층운동을 시작하였으며, 이때

포항분지의 서편 경계부에 분지의 침강을 주도하는 북북동 방향의 정단층들과 이를 잇는 북북서 방향의 이음단층이 만들어진 것으로 해석된다(Son, 1998; Son *et al.*, 2007; Cheon *et al.*, 2012). 따라서 포항분지는 보다 남쪽의 전기 마이오세 분지들과 동일하게 연일 구조선과 해저에 발달하는 북북서 방향의 주요 단층인 동한단층(Kim, 1992; Lee *et al.*, 1999)이 주변위대로서 짝을 이루고 두 단층의 이음부에 서북서-동남동 방향의 인장력이 작동하여 만들어진 하나의 당겨열림분지로 해석된다. 한편, 오천단층은 포항분지 서편 경계단층의 반향단층으로 운동하였으나, 서편 경계단층과는 달리 지각변형 동안 시계방향의 수평 회전운동을 겪었으며 남서쪽으로 연장되지 못해 남서쪽으로 갈수록 변위가 줄어드는 가위단층의 특징을 가진다. 이로 인해 포항분지는 북북동 쪽으로 갈수록 넓어지는 썩기 모양을 형성한 것으로 해석된다.

### 3.3 퇴적중심의 이동과 연일구조선

전기 마이오세 동안의 지각변형 동안 분지들은 주로 오천단층계 보다 남쪽의 해안을 따라 집중적으로 확장되었다(그림 1B와 C). 또한 이 시기에 분지의 확장축이 북동에서 남서쪽으로 파고드는 일종의 전파열개(propagating rifting; Auzende *et al.*, 1995; Tamaki, 1995)를 겪었으며, 약 17 Ma에 이르러서는 퇴적중심이 남서쪽 그리고 북서쪽으로 빠르게 이동되어 중기 마이오세에는 보다 서편의 연일구조선인



**Fig. 6.** Schematic block diagrams showing the roles of the Ocheon Fault System on the evolution of the Janggi and Pohang basins (from Cheon *et al.*, 2012). (A) Stage I: Subsidence of the Janggi Basin during Early Miocene. (B) Stage II: Clockwise rotations of faulted blocks due to continuous dextral simple shear during Early Miocene and the rapid subsidence of the Pohang Basin at late Early Miocene (about 17 Ma). See the text for detailed explanation.

접부와 북쪽의 포항분지에서 활발한 퇴적활동이 진행되었다. 또한 중기 마이오세에는 해침이 발생하여 포항분지와 그 이남의 어일, 정자 그리고 울산분지에서 *Vicarya-Anadara* 화석군으로 대표되는 해성층이 퇴적되었다(Yoon, 1992). 하나의 분지 내에서 이러한 전파열개 양상을 대표적으로 가장 잘 보여주는 곳은 와읍분지로서, 분지 내 충전물의 상대 연령이 북동에서 남서쪽으로 갈수록 점차 젊어지는 특징을 잘 보여준다(그림 2; Son *et al.*, 2000a, 2000b, 2005). 와읍분지는 지질구조와 지층의 분포에 따라 세 개의 구조구역 즉, 북동지괴, 중앙지괴 그리고 남서지괴로 구분된다. 이들 지괴들은 모두 퇴적 동시성 단층들에 의해 구획되며, 북동, 중앙, 남서지괴의 순서로 충전물의 퇴적연령이 젊어지고 젊은 지층일수록 지층의 경사가 약해지는 특징이 뚜렷하다(Son *et al.*, 2000a, 2005). 이와 유사하게 어일분지도 북동에서 남서로 갈수록 지층의 연령이 젊어지는 양상이 잘 관찰된다. 이 분지도 북동소분지와 남서소분지로 구조구역이 나누어지는데, 전자는 대부분 전기 마이오세 퇴적물로 충전되어 있는 반면, 후자는 중기 마이오세 해성 퇴적물이 분포한다. 따라서 와읍분지와 어일분지의 경우는 분지의 북동부에서 확장이 시작되어 시간이 지남에 따라 남서쪽으로 확장축이 확산되는 일종의 전파열개의 과정을 겪었던 것으로 판단된다.

17 Ma 경의 갑작스런 퇴적중심의 이동은 연일구조선의 운동과 밀접히 관계된다. 앞서 언급한 바와 같이 연일구조선은 포항분지의 당겨열림 확장을 주도한 서쪽 주변위대로서, 북북서로 연장되다 경주시 보문지역에서 포항분지의 서편 경계단층과 연결된다(그림 1). 또한 연일구조선은 와읍분지와 울산분지의 서편 경계를 이루고 있는데, 두 분지와 그 사이의 연일구조선 인접부에는 연일층군에 대비되는 육성 역암과 해성 사암 및 이암들이 분포하고 있다. 이는 전기 마이오세에 동해가 확장되는 동안 동해안에 가해진 북북서방향의 우수향 전단력이 서쪽의 내륙으로 전파되었으며, 이 응력은 연일층군이 퇴적되기 시작하던 약 17 Ma에 이르러 연일구조선의 단층운동을 발생시켰음을 지시하고 있다(Son *et al.*, 2002).

연일구조선은 기존 고자기학적 연구들로부터 널리 알려져 있던 한반도 남동부의 시계방향 지괴 수평회전운동의 서쪽 한계선이 어디인가에 대한 의문

을 해결하고자하는 연구에서 출발하여, 이후 후속적인 야외조사로부터 이 한계선이 울산단층선으로부터 약 5 km 동편에 위치한 폭 수십 m의 연속적인 단층 파쇄대로 그 존재가 추적·확인되었다(그림 1; Kang *et al.*, 1996; Son *et al.*, 1997, 2002; Kim *et al.*, 1998; Son, 1998). 대부분의 기존 국내외 학자들은 이곳 지괴 수평회전을 한반도 남동부의 주요 구조선인 양산단층 또는 울산단층이 우수향 주향이동단층으로써 활동한 결과로 해석하여 왔다(Han *et al.*, 1987; Kim, 1992; Yoon and Chough, 1995; Fabbri *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000의 다수). 이를 확인하기 위해 먼저 양산단층 주변에서 실시된 고자기 연구에서, 그 결과는 기대와 다르게 단층 양편 암석들의 잔류자기가 모두 편향되지 않음이 나타났다(Kang *et al.*, 1996). 이후 울산단층 일원의 불국사화강암류에 대한 고자기 연구에서도(Son *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 1998) 울산단층선으로 알려진 울산-경주간 계곡선 양편 암석들에서 잔류자기의 편향이 나타나지 않았다. 반면, 흥미롭게도 동해안의 마이오세 분지 지역에서 널리 나타나는 잔류자기의 시계방향 편향현상이 울산단층선으로부터 동쪽으로 약 5 km 이상 떨어진 지역에서만 관찰되었다(그림 7). 따라서 울산단층선 동편 약 5 km 지점에 마이오세의 지괴 수평회전을 규제한 구조선이 있을 것으로 추정하고, 이 구조선으로 “연일구조선”으로 최초 명명되었다(Son *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 1998). 이에 후속적인 상세한 지질도작성을 통해 추정된 연일구조선이 폭 수십 m의 연속적인 단층 파쇄대임이 추적·확인되었을 뿐만 아니라, 시계방향 지괴회전 외에도 동해연변 지역에서 마이오세에 활발하였던 화산과 퇴적활동 그리고 분지를 확장시킨 정단층들의 서쪽 연장과 염기성 암맥군의 방향성도 규제하고 있음이 밝혀졌다(Kim *et al.*, 2002; Son *et al.*, 2002). 따라서 연일구조선은 한반도 남동부에서 발생한 마이오세 지각변형을 최종적으로 규제한 서쪽 한계선이 분명한 것으로 판단된다.

## 4. 토 의

### 4.1 분지발달사

현재까지 수행된 다양한 연구결과들을 토대로 마이오세 분지발달사를 정리하면 다음과 같다. 제3기

동해확장으로 인해 발생한 한반도 남동부의 지각변형은 올리고세 말부터 시작된 것으로 판단된다. 당

시 지각변형의 최초 화산활동 결과로 판단되는 효동리화산암류는 구획화된 분지를 충전하지 못하며 어

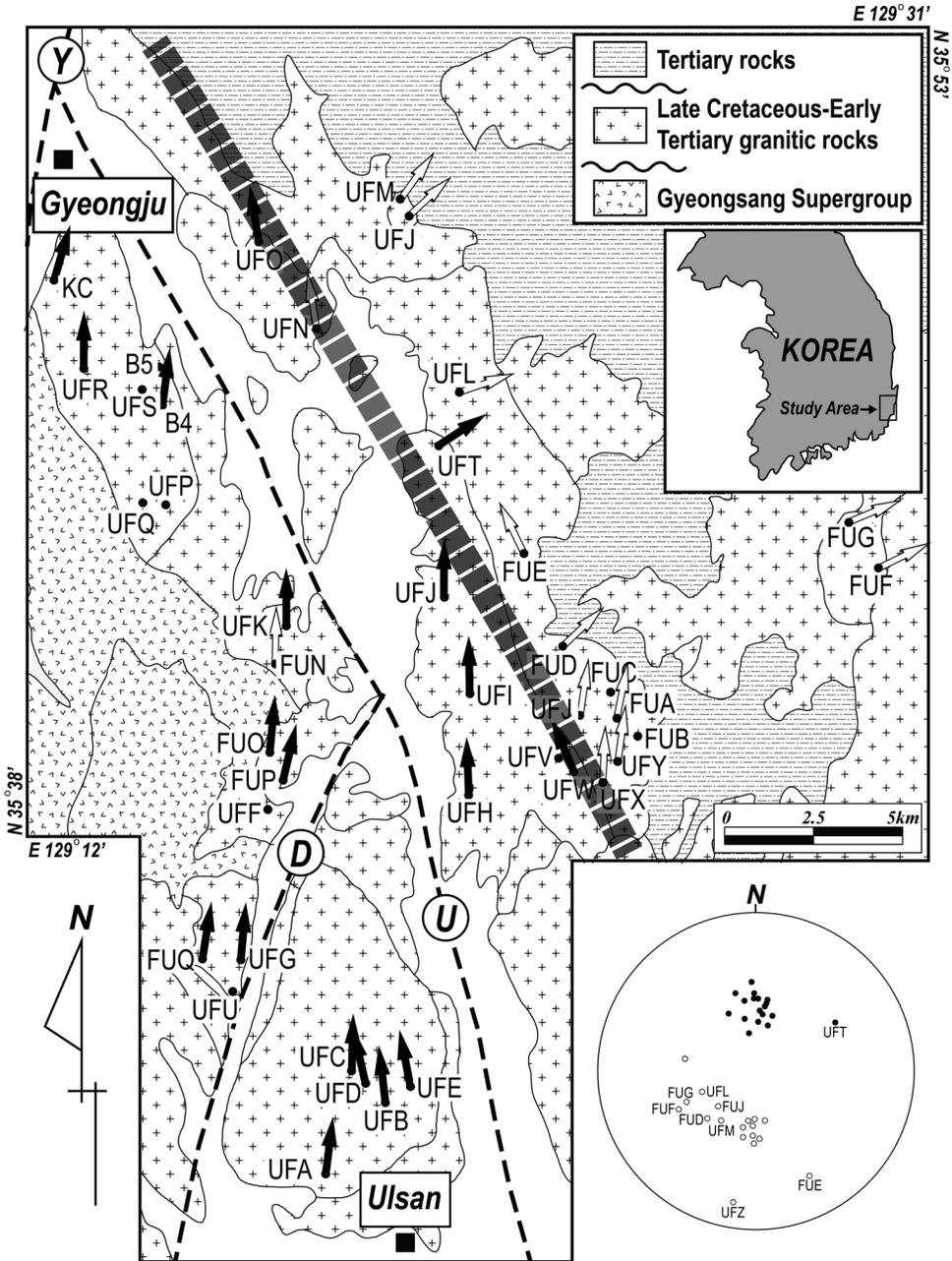


Fig. 7. Result map showing the declinations of site-mean ChRMs in the vicinities of the Ulsan Fault (modified from Son, 1998 and Kim *et al.*, 1998). Solid (white) arrows represent the sample sites with normal (reversed) ChRM polarity, whereas solid dots without arrow represent the sample sites from which no stable ChRM direction could be obtained. Note a dotted shadow band which represents a suspected tectonic line (=Yeonil Tectonic Line). Inset: Site-mean ChRM direction from all granitic sites. Solid (open) symbols represent the sample sites with positive (negative) ChRM inclinations. Y: Yangsan Fault, U: Ulsan Fault, D: Dongrae Fault.

일본지 경계단층의 외곽에서 분지기반을 형성하고 있다(그림 1과 2). 이 화산암류는  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  연대가  $24.0 \pm 0.5 \text{ Ma}$  (표 2; Kim *et al.*, 2005)로써 오천단층계 이남 지역의 중앙부에 국지적으로 분포하며, 백악기 하양층군 퇴적암류와 불국사화강암류를 부정합으로 피복하고 이후 연일층군에 의해 부정합으로 피복된다(Son *et al.*, 2002). 이는 활발한 지각확장으로 여러 분지지역 도처에서 다발적으로 발생한 전기 마이오세 화산활동과는 달리, 올리고세 말의 효동리 화산활동 양식은 보다 능동적(active)으로 상승한 마그마에 의해 국지적으로 발생한 일종의 중심(center) 분출이었을 가능성을 시사한다.

분지를 충전하는 전기 마이오세 범곡리와 장기층군의 절대연령은 22~18 Ma 사이에 집중되는데(표 2), 이는 22 Ma 경에 한반도 남동부에 본격적인 분지확장이 시작되었음을 지시한다. 당시의 지각변형은 오천단층계 이남의 해안 지역에서만 활발히 발생하였으며, 이때 북북서 방향의 우수향 주향이동단층들이 주변위대가 되어 이들의 이음부에 서북서-동남동 방향의 인장력이 작동해 정자, 어일, 하서, 와읍 등의 전기 마이오세 당겨열림 퇴적분지들이 만들어졌다(Son and Kim, 1994; Kee *et al.*, 1995; Son, 1998; Son *et al.*, 2000a, 2000b, 2002, 2005). 장기분지의 경우에는 전체 분지 기하와 확장형식이 아직 완전히 밝혀지지는 않았으나, 최근 이 분지의 남부 일원에 대한 상세한 야외조사 연구결과들(Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012)은 다른 전기 마이오세 분지들과 유사한 분지 기하와 경계부의 운동 특성을 보여주고 있어 장기분지도 동일한 확장형식을 가질 것으로 판단된다.

한반도 남동부의 전기 마이오세 지각변형은 몇 가지 주요한 특징을 가진다. 첫째, 지괴의 시계방향 수평회전운동이 발생하였다. 분지 별로 편차가 있으나, 전기 마이오세 암석들의 잔류자기들은 일괄되게 시계방향으로 편향되었다. 한편, 이들의 편향 값은 기반암인 고제3기 화산암류에 비해 평균 약  $20^\circ$  작은 값이다(표 3; 그림 3). 이는 한반도 남동부가 고제3기 이래로 전기 마이오세 동안 지속적인 우수향 전단력 응력장의 지배를 받았으며, 이에 따라 간헐적일 수는 있으나 지괴의 수평 회전도 지속되었음을 의미한다. 둘째, 북서향 지괴 경동이 발생하였다. 전기 마이오세 분지 일원의 연구들에 따르면, 단층활

동과 화산작용으로 교란된 일부 지역의 것들을 제외하면 기반암과 분지충전물의 층리가 북서 또는 서북서 방향으로 경사되고 젊은 지층일수록 경사각이 얕아지는 경향이 있다(Son and Kim, 1994; Son *et al.*, 2000a, 2000b, 2005; Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012). 이는 북북동 내지 북동 방향의 분지 경계단층들 중 남동으로 경사진 단층이 서북서-동남동 또는 북서-남동 방향의 지각 신장을 주도한 퇴적동시기 점완/서가형 정단층들임을 지시한다. 셋째, 분지들은 확장축이 북동에서 남서쪽으로 파고드는 일종의 전파열개를 겪었다. 앞서 설명한 바와 같이 이러한 특징이 가장 뚜렷한 분지는 와읍 분지(그림 2)로써, 전기 마이오세 동안 활발한 동해 확장으로 한반도 대륙연변에 가해진 우수향 전단력이 시간이 지나면서 점차 육지 쪽으로 전파되었음을 알려준다.

전기 마이오세 말 약 17 Ma에 이르러, 한반도 남동부는 지각변형의 크기와 범위가 갑자기 확대되면서 퇴적 중심과 환경의 급작스런 변화를 겪게 된다. 포항분지의 침강으로 대표되는 이러한 이차 마이오세 지각변형은 연일구조선의 운동과 밀접한 관련을 가진다(그림 1, 6). 연일구조선은 전체적으로 북북서 방향을 가지나 북북서와 남북 내지 북북동 방향의 단층분절들이 지그재그 형태로 이어지는 우수향 주향이동단층대로 북으로 포항분지의 서편 경계단층과 연결된다(Son *et al.*, 2002, 2007; Kim *et al.*, 2002). 이 구조선은 한반도 남동부의 마이오세 지각변형의 특징인 퇴적분지의 발달, 지괴의 시계방향 수평 회전, 지괴의 북서향 경동 등을 규제하는 서쪽 한계선이다(Son, 1998; Kim *et al.*, 1998, 2002; Son *et al.*, 2002, 2007). 연일구조선의 인접부, 특히 남북 내지 북북동 방향의 단층분절을 따라 포항분지 하부 충전물에 대비되는 비화산성 역암 및 사암들이 분포하고 있어(그림 1B), 운동 시기는 약 17 Ma부터로 해석된다. 연일구조선과 약  $50^\circ$  각도로 사교하는 포항분지의 서편 경계단층은 전체적으로 북북동 방향으로 연장되나 이 또한 북북동과 북북서 방향의 분절단층들이 지그재그로 이어지는 양상을 보인다(그림 1B, 4). 이곳 북북동 단층들은 분지의 확장 과정에서 정단층 운동을 한 반면, 북북서 단층은 정단층들 사이의 이음단층으로써 이곳 이음부에서 다량의 퇴적물이 공급되어 선상지-삼각주계가 만들어졌다(Hwang *et*

al., 1995; Hong *et al.*, 1998; Sohn and Son, 2004). 이후 분지는 빠른 침강을 겪었으며 해침이 발생하여 한반도 남동부의 퇴적환경이 육성에서 해성으로 변화되었다. 노두와 대심도 시추코아로 얻어진 해양 퇴적물의 고생물학 자료(Yoon, 1979; Kim, 1990; Byun, 1995; Yi and Yun, 1995; Byun and Yun, 1996/1997)를 근거하면, 포항분지 내 퇴적은 약 10 Ma까지 지속되었다.

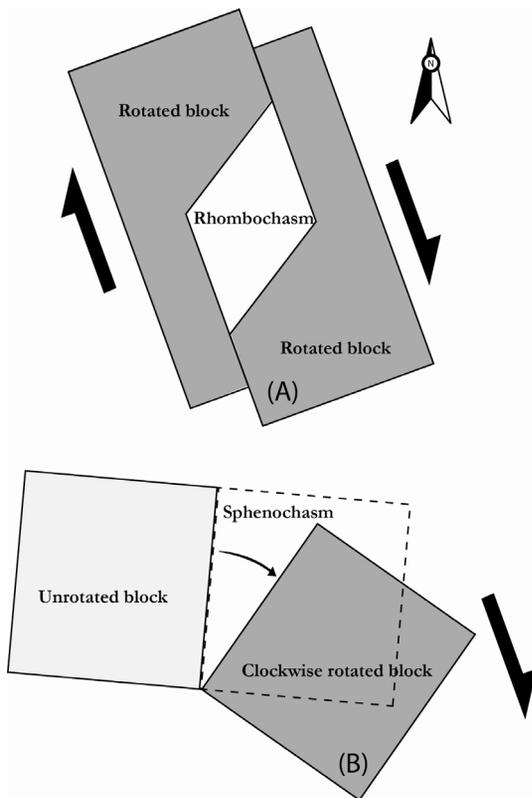
한편, 한반도 남동부 분지들은 모두 북북서 방향의 주변위대 사이의 당겨열림으로 확장된 분지들이지만, 주변 지괴의 운동 특징에 따라 평행사변형꼴 분지(parallelogram-shaped basin; rhombochasm)와 쐐기형 분지(wedge-shaped basin; sphenochasm)로 나눌 수 있다(그림 8; Son, 1998; Son *et al.*, 2007). 전자는 시계방향으로 회전하는 기반암 지괴들 내에서 북서-남동 방향의 지각확장에 의해 생성되었으

며, 후자는 시계방향으로 수평 회전하는 지괴와 회전하지 않는 지괴 사이에서 지각의 부채꼴 확장에 의해 만들어졌다. 평행사변형꼴 분지는 정자, 하서, 어일, 와읍 그리고 장기분지 그리고 쐐기형 분지로는 울산과 포항분지가 해당된다. 이들 분지 내 층전물의 연령을 근거로 할 때 전자는 전기 마이오세에 그리고 후자는 중기 마이오세초에 주로 확장되었다(그림 1). 이는 공간적으로 차별적인 지괴의 회전운동이 분지의 기하와 확장 방식을 결정하는 주요한 요인이 될 수 있음을 보여준다.

#### 4.2 지구조적 의미

동해의 확장은 태평양 서부 연변에서 발생한 신생대 지각변형의 가장 중요한 결과물 중 하나이다(Jolivet *et al.*, 1994; Taira, 2001). 동해의 확장형식은 현재까지 일치된 견해가 없이 연구자에 따라 다양하게 제안되고 있으나 크게 두 가지 운동학적 모델 즉, 부채꼴식 확장(Otofuji and Matsuda, 1983, 1987; Otofuji *et al.*, 1985, 1991, 1994; Hayashida *et al.*, 1991)과 당겨열림 확장(Otsuki and Ehiro, 1978; Lallemand and Jolivet, 1985/1986; Kimura and Tamaki, 1986; Jolivet *et al.*, 1991, 1994, 1995; Kim, 1992; Fournier and Jolivet, 1995; Fabbri *et al.*, 1996; Son *et al.*, 2005)으로 구분될 수 있다. 한반도 남동부는 동해의 남서 경계부에 위치하고 있어 이곳의 지각변형 특징은 동해의 확장형식과 진화사에 대한 이해를 높이는 데 중요하다. 이번 연구는 마이오세 동안 한반도 남동부에 지속적인 지괴의 시계방향 회전운동이 발생하였으며(그림 3; 표 3) 분지들이 북북서 방향의 주변위대에 의해 당겨열림 확장한 특징을 보여주고 있어, 동해가 확장하는 동안 강력한 우수향 전단력이 작동되었음을 알 수 있다. 이는 동해가 부채꼴식 확장보다는 당겨열림 확장을 하였다는 주장을 지지해주는 것이다. 그러나 동해의 당겨열림 확장을 주장하는 기존 연구들은 거의 모두가 한반도 남동부의 마이오세 분지 발달 과정에서 주변위대는 양산단층과 같은 북북동 주향의 단층들이므로 여겨왔으나, 이번 연구는 북북동 주향의 단층들은 정단층 운동을 하였으며 연일구조선을 포함하는 북북서의 단층들이 우수향의 주변위대이었음을 보여준다.

한반도 남동부와 일본열도 남서부 사이 대한해협 일원의 육상과 해상의 지질 및 지구물리탐사 자료들

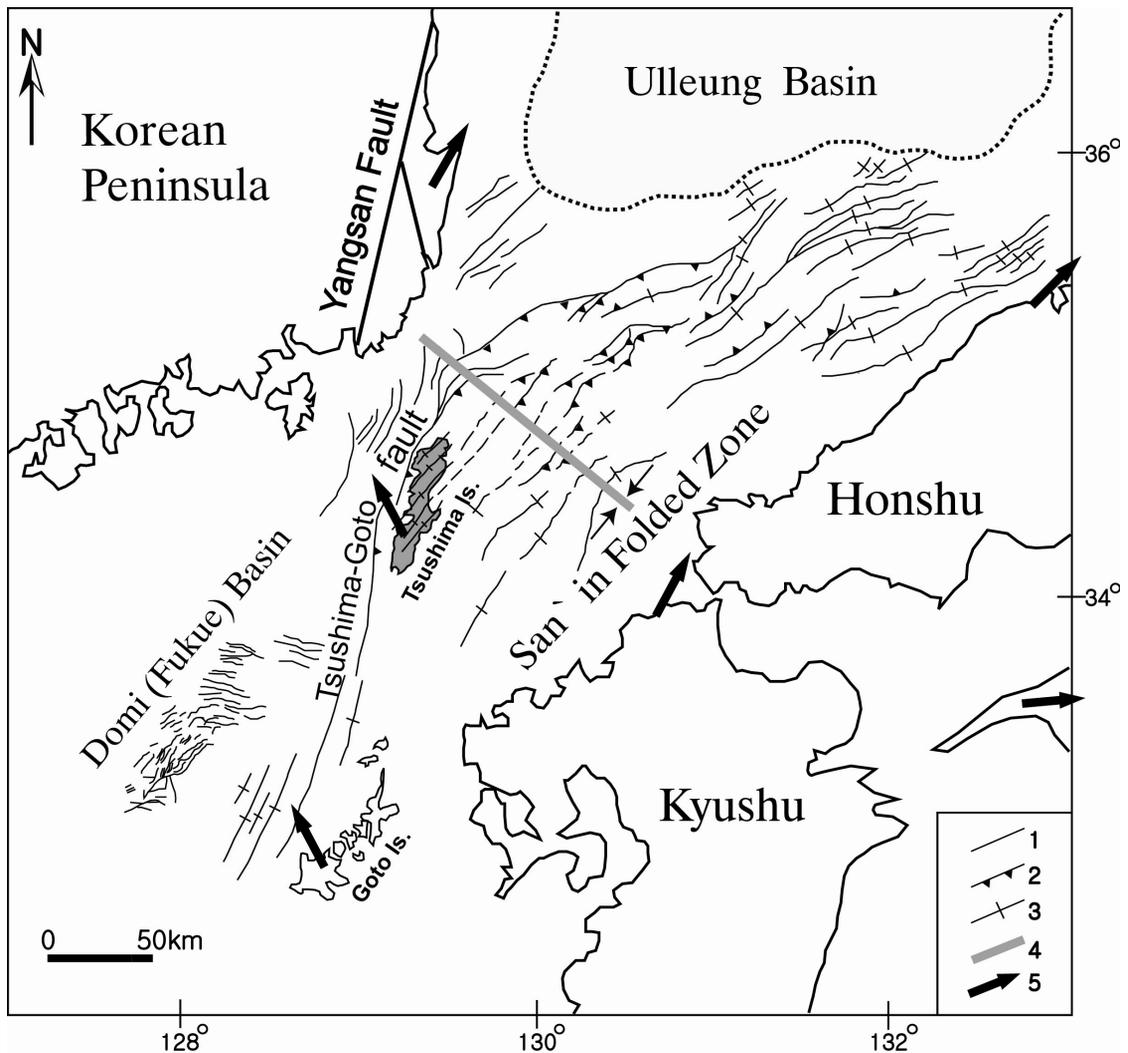


**Fig. 8.** Two kinematic models explaining the opening of the Miocene basins in southeast Korea (from Son, 1998). (A) Parallelogram-shaped basin model (rhombochasm). (B) Wedged-shaped basin model (sphenochasm). Both are originated by NNW-trending dextral simple shear.

을 종합하면(MITI, 1972, 1973, 1974; Itoh *et al.*, 1992; Choi *et al.*, 1994; Yoon and Chough, 1995; Itoh and Nagasaki, 1996; Itoh, 2001), 이곳에 발달하는 올리고세~마이오세 지질구조는 쓰시마-고토 단층대를 중심으로 동편에는 북동 내지 동북동 방향의 압축구조가 그리고 서편에는 북동 내지 동서 방향의 인장구조가 우세한 것으로 특징지어진다(그림 9). 따라서 쓰시마-고토 단층대는 동해확장과 관련한 제3기 지각변형을 주도한 주요 구조선으로써 인

근 지판 경계에서 발생한 지구조 응력을 해소시키고 전파의 장벽이 된 주 단층으로 인식되어 왔다. 또한 이곳의 인장구조는 동해가 확장되는 동안 쓰시마-고토 단층대의 우수향 주향이동의 결과로 그리고 압축 구조는 이후 약 15 Ma 이후에 발생한 응력반전에 의한 좌수향 주향이동의 결과로 해석되어 왔다(Jolivet and Tamaki, 1992; Fabbri *et al.*, 1996; Itoh, 2001).

그러나 최근 Kim *et al.* (2008)의 대마도 일원에 대한 구조지질학적 연구에 따르면, 분지 확장기 동



**Fig. 9.** Regional structural map of the Korea Strait and its vicinities showing that compression structures (San'in Folded Zone) and tensional structures (Domi Basin) are dominantly distributed in the areas to the east and to the west of the Tsushima-Goto Fault, respectively (modified from Kim *et al.*, 2008). 1. normal faults, 2. thrust faults, 3. folds, 4. inferred axial trace of second-stage folding of the San'in folded zone caused by CCW block rotation of the adjacent area to the Tsushima-Goto Fault, 5. paleomagnetic mean declinations (after Fabbri *et al.*, 1996 and this study).

**Table 4.** Summary of the tectonic history and igneous activities in the Tsushima Island (from Kim *et al.*, 2008).

Geological Time			Tectonic Events	Igneous Activities		
PERIOD	EPOCH	AGE (Ma)				
TERTIARY	MIOCENE	Late	11.2	Counterclockwise rotation (28°) & Northeastward crustal tilting refolding of the San'in folded zone  Tectonic inversion : NNW-SSE compressional stress field	Felsic intrusive rocks : Quartz porphyry & Granite	
		Middle	13			
			15			
			16.4			
			17			
		Early		Second-stage crustal extension : NW-SE tensional stress field NE-trending normal faults	----- ? ----- Dacitic tuff & lava ----- ? -----	
	OLIGOCENE					
Late		23.8	25	First-stage crustal extension : NNE-SSW tensional stress field rifting & WNW-trending normal faults		

\*Gray-color arrows represent the apparent compressional stress direction caused by counterclockwise rotation.

안에 후기 올리고세에는 남북 내지 북북동-남남서 방향의 인장응력이 작동하였으나 이후 전기 마이오세에는 북서-남동의 인장응력으로 응력장이 변화되었음을 보고하고 있다(표 4). 이러한 응력장의 변화는 대마도 서남쪽 쓰시마-고토 단층대의 서편 도미(후쿠에)분지를 대상으로 실시된 Itoh (2001)의 탄성파탐사 결과에서도 확인된다. 현재로서는 이러한 응력 방향의 변화에 대한 원인은 정확히 알 수 없으나, 동해확장 초기에는 쓰시마-고토 단층대 동편의 일본열도가 남쪽 또는 남남서쪽으로 이동하였으며, 이때 쓰시마-고토 단층대는 우수향 주향이동운동을 하였을 가능성을 암시한다. 또한 전기 마이오세에 이르러서는 이 단층대는 주향이동이 아니라 정이동이 우세한 단층으로 재활되었음을 시사한다. 이러한 연구 결과를 한반도 남동부 지각변형사와 대비하면, 전기 마이오세 분지들이 북북동 내지 북동의 정단층으로

구획되고 확장방향이 일관되게 서북서-동남동 내지 북서-남동인 점(Son and Kim, 1994; Son, 1998; Son *et al.*, 2000a, 2005; Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012)과 부합된다. 그러나 한반도 남동부의 경우에는 올리고세의 남북 내지 북북동-남남서 방향의 분지발달은 인지되지 않는다는 점에서 차이를 보이는데, 이는 올리고세에 한반도 남동부에 활발한 분지확장은 없었으나 동해의 초기 확장에 수반되어 양산단층이 우수향 주향이동단층으로 운동하였을 가능성을 시사한다.

한편, 대마도는 약 15 Ma의 산성질 관입암(Takahashi and Hayashi, 1985, 1987)의 관입사건 이전에 습곡 작용이 대부분 종결된 양상을 보여주고 있어, 대한해협 일원의 지구조응력 반전은 대략 전기-중기 마이오세의 경계 시점에 시작된 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2008). 이러한 응력반전은 약 16 Ma에 북상하

던 필리핀해판의 쿠루시오 고대륙(Kurohsio Paleoland) 또는 이즈-보닌 아크(Izu-Bonin arc)가 일본열도 남서단과 충돌한 결과이다(Hayashida *et al.*, 1991; Kimura *et al.*, 1991; Otofujii *et al.*, 1991; Kim, 1992; Jolivet *et al.*, 1995; Hall, 2002; Son *et al.*, 2007). 이로 인해 일본열도 남서부는 광역적인 시계방향 회전을 겪었으며, 배후 해상에는 산닌습곡대가 형성되었다(Shimada, 1977; Ishikawa and Tagami, 1991; Choi *et al.*, 1994; Fabbri *et al.*, 1996). 이후 북북서 방향의 압축 응력이 누적되어 약 15 Ma 경에는 쓰시마-고토 단층대가 좌수향 주향이동단층으로 재활동하면서 대마도 일원은 반시계방향의 지괴회전 운동을 겪고(Ishikawa *et al.*, 1989), 이로 인해 산닌습곡대가 재습곡을 받아 북동 방향의 2차 습곡축이 만들어진 것으로 판단된다(그림 9; Kim *et al.*, 2008). 한반도 남동부의 경우에도 약 15 Ma에 이르러 현무암질 마그마가 비알칼리에서 알칼리 계열로 갑자기 변화되며 연일층군 퇴적 이후에는 지괴의 시계방향 회전이 중단되므로, 15~16 Ma 경에 필리핀해판과 일본열도 남서단의 충돌로 인한 지구조 응력반전의 영향을 받은 것으로 판단된다. 이러한 응력반전은 북서-남동 방향의 횡압축으로 한반도 남동부의 응력 환경을 변화시켰으며(Moon *et al.*, 2000), 포항분지의 달전현무암(Son and Kim, 2006)과 정자분지 일원 일부 지괴(Son *et al.*, 1996)에서 관찰되는 반시계방향 지괴회전을 발생시켰을 가능성이 높다. 또한 당시의 응력반전은 지각을 전반적으로 용기시켜 약 10 Ma에는 포항분지의 퇴적이 종결된 것으로 판단된다.

## 5. 결론

한반도 남동부에 발생한 마이오세 지각변형과 분지발달에 대한 다양한 연구결과들을 종합·분석하여 층서와 지각변형 특징들을 정리하고, 이를 토대로 얻어진 층서, 분지발달사 그리고 이들의 지구조적 의미를 요약하면 다음과 같다.

1) 동해확장과 관련하여 생성된 화산암류와 분지층전물은 크게 하위로부터 효동리화산암류, 범곡리층군, 장기층군 그리고 연일층군으로 구분된다. 효동리화산암류는 한반도 동남부에 본격적인 분지확장이 시작되기 이전의 지각변형 초기 단계인 올리고세 말에 국지적으로 분출한 테사이트~안산암질 화

산암복합체이다. 범곡리층군과 장기층군은 전기 마이오세 동안 동해안가를 따라 발생한 활발한 지각신장으로 만들어진 분지들을 충전하는 암석들로 각각 테사이트와 현무암질 물질을 포함하는 화산기원 지층들 그리고 각각에 수반된 육성 퇴적층으로 재정의되며, 전자는 후자에 의해 정합으로 피복된다. 연일층군은 약 17 Ma의 연일구조선의 운동에 의해 갑자기 한반도 남동부의 퇴적중심이 북쪽과 서쪽으로 이동되면서 만들어진 포항분지와 그 이남의 연일구조선 동편 연변을 따라 퇴적된 비화산성 육성 및 해성 퇴적암류를 총칭한다. 한편, 장기층군 내에 다량 포함되어 있는 현무암질 화산암류는 약 15 Ma에 이르러 비알칼리에서 알칼리 계열로 갑자기 변화된다. 이 두 종류의 화산암류는 향후 상세한 암석학적 연구를 통해 구분되어야 한다.

2) 전기 마이오세 지각변형 동안 한반도 남동부에는 북북서 방향의 주변위대를 가지는 평행사변형꼴 당겨열림분지의 생성과 함께 특징적으로 지괴의 수평회전운동, 북서향의 지괴 경동 그리고 분지의 확장축이 북동에서 남서쪽으로 파고들면서 퇴적중심이 이동되는 전파열개 과정을 겪었다. 약 17 Ma에 이르러 연일구조선과 함께 포항분지의 서편 경계단층이 운동하기 시작하여 한반도 남동부는 지각변형의 범위가 갑자기 확대되면서 퇴적 중심과 환경(육성→해성)의 급작스런 변화를 겪었으며 포항분지와 울산분지로 대표되는 췌기형 당겨열림분지가 만들어졌다. 연일구조선과 포항분지의 서편 경계단층은 경주시 보문지역에서 약 50° 각도로 사교하는데, 이들 단층은 동해확장과 관련한 한반도 남동부의 마이오세 지각변형의 여러 특징을 규제하는 서편 한계선이다.

3) 동해의 확장 모델은 크게 부채꼴식과 당겨열림 확장으로 구분되는데, 한반도 남동부의 지각변형 특징들은 이중 당겨열림 확장을 강력히 지지한다. 한반도 남동부의 전기와 중기 마이오세 초의 지각변형은 동해 울릉분지의 남북 내지 북북서-남남동 방향의 확장으로 인해 서쪽 대륙 연변에 가해진 지속적인 우수향 단순전단력에 의해 발생하였다. 당시의 지각변형은 기존에 알려진 바와 달리 양산단층 운동과는 무관하며, 연일구조선을 포함하는 북북서 방향의 주변위대들의 우수향 주향이동에 의해 주도되었다. 또한 이들 주변위대 사이의 북북동 방향의 단층

들은 대부분 점완/서가형 정단층으로 운동하며 분지를 확장시켰다.

4) 동아시아 일원에는 약 16 Ma에 북상하던 필리핀해판 쿠루시오 고대륙 또는 이즈-보닌 화산호가 일본열도 남서단과 충돌하여 인장응력에서 압축응력으로 지구조 응력이 반전되어 산닌습곡대가 형성되고 쓰시마-고토 단층대가 좌수향 주향이동운동을 함으로써 단층대 주변 지괴가 반시계방향으로 회전되었다. 약 15 Ma에는 한반도 남동부도 이러한 지구조 응력반전의 영향하에 놓이게 되어 현무암질 마그마의 성분이 비알칼리에서 알칼리 계열로 변화되고, 분지 지역이 전반적으로 융기되기 시작하여 10 Ma 경에는 포항분지를 포함한 모든 퇴적분지 내의 퇴적 활동이 종결된 것으로 결론지어진다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주관의 '이산화탄소 지중저장 실증을 위한 저장지층 특성화 및 기본 설계 기술개발(GP2012-030)' 과제와 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 (재)한국이산화탄소 포집 및 처리 연구개발센터의 지원을 받아 수행된 연구(2012-0008918)이다. 본 논문의 심사과정에서 유익한 의견을 주신 충북대학교 이철우 교수님과 전북대학교 양우현 교수님께 감사드린다.

## 참고문헌

- Auzende, J.-M., Pelletier, B. and Eissen, J.-P., 1995, The North Fiji Basin: Geology, structure and geodynamic evolution. In: Taylor (ed.), Backarc Basins: Tectonics and Magmatism, 139-175.
- Byun, H., 1995, Cenozoic dinoflagellate cysts from the Pohang basin and the southern margin of the Ulleung basin. Ph.D. Thesis, Chungnam National University, Daejeon, 283 p (in Korean with English abstract).
- Byun, H. and Yun, H., 1996/1997, Late Cenozoic dinocysts from the exploration wells of the Pohang basin and the continental shelf of Korea. In: Nishimura, S. and Tsuchi, R. (eds), Proceedings of Sixth International Congress on Pacific Neogene Stratigraphy and IGCP-355, Gyeongju (1997) and San Jose (1996), 15-30.
- Cheon, Y., Son, M., Song, C.W., Kim, J.-S. and Sohn, Y.K., 2012, Geometry and kinematics of the Ocheon Fault System along the boundary between the Miocene Pohang and Janggi basins, SE Korea, and its tectonic implications. *Geoscience Journal*, 16, 253-273.
- Choi, D.L., Oh, J.K. and Satoh, M., 1994, Cenozoic Geological Structures and Tectonic Evolution of the Southern Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *The Korean Society of Petroleum Geology*, 2, 59-70 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.-O., Choi, S.H., Lee, D.-C. and Kang, H.C., 2013, Geochemical evolution of basaltic volcanism within the tertiary basins of southeastern Korea and the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 249, 109-122.
- Choi, P.Y., 1991, Method for determining the stress tensor using fault slip data. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 383-393 (in Korean with English abstract).
- Choi, P.Y., 2006, 'Singwang strike-slip duplex' around the Pohang basin, SE Korea: its structural evolution and role in opening and fill of the Miocene basin. *Geoscience Journal*, 10, 145-157.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, 52, 175-235.
- Fabrizi, 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. and Jolivet, L., 1995, Neogene stress field in SW Japan and mechanism of deformation during the Sea of Japan opening. *Journal of Geophysical Research*, 100, 24295-24314.
- 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 University, Texas, USA, 132 p.
- Han, J.H., Kwak, Y.H., Son, J.D. and Son, B.K., 1987, Tectonic evolution and depositional environments of the Tertiary sedimentary basin, southeastern part of Korea. Report KR-86-2-(B)-4, Korea Institute of Energy and Resources, Seoul, 109 p.
- 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 Letters*, 18, 1095-1098.
- Hong, S.W., Chough, S.K. and Hwang, I.G., 1998, Provenance of coarse-grained detritus in fan-delta systems,

- Miocene Pohang basin, SE Korea: implications for boundary fault movements. *Geoscience Journal*, 2, 46-58.
- Hwang, I.G., Chough, S.K., Hong, S.W. and Choe, M.Y., 1995, Controls and evolution of fan delta systems in the Miocene Pohang basin, SE Korea. *Sedimentary Geology*, 98, 145-179.
- 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. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 43, 229-253.
- Ishikawa, N., Torii, M. and Koga, K., 1989, Paleomagnetic study of the Tsushima island, southern margin of the Japan Sea. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 41, 797-811.
- Itoh, Y., 2001, A Miocene pull-apart deformation zone at the western margin of the Japan Sea back-arc basin: implications for the back-arc opening mode. *Tectonophysics*, 334, 235-244.
- Itoh, Y. and Nagasaki, Y., 1996, Crustal shortening of Southwest Japan in the Late Miocene. *The Island Arc*, 5, 337-353.
- Itoh, Y., Nagasaki, Y. and Ishii, Y., 1992, Geohistory of the San-in and Kita-Kyushu areas inferred from seismic studies. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, 57, 53-58 (in Japanese with English abstract).
- Jin, M.S., Kim, S.J. and Shin, S.C., 1988, K/Ar and fission-track datings for volcanic rocks in the Pohang-Kampo area. Report KD-87-27, Korea Institute of Energy and Resources, Daejeon, 51-88 (in Korean with English abstract).
- Jin, M.S., Kim, S.J., Shin, S.C. and Lee, J.Y., 1989, K/Ar and fission-track datings for granites and volcanic rocks in the southeastern part of Korean peninsula. KD-88-6D, Korea Institute of Energy and Resources, Daejeon, 53-84 (in Korean with English abstract).
- Jolivet, L., Huchon, P. and Brun, J.P., 1991, Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *Journal of Geophysical Research*, 96, 4367-4384.
- Jolivet, L., Shibuya, H. and Fournier, M., 1995, Paleomagnetic rotations and the Japan Sea opening. In: Natland, J. (Ed.), *Active margins and marginal basins of the western Pacific*. Geophysical Monograph, 88, American Geophysical Union, Washington, D.C., 355-369.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the Northeast Japan Arc. *Proceedings, the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127-128, 1311-1331.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *Journal of Geophysical Research*, 99, 22237-22259.
- Jung, S., Kim, M.C., Cho, H., Son, M. and Sohn, Y.K., 2012, Basin fills and geological structures of the Miocene Yangpo subbasin in the Janggi-myeon, Pohang, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 49-68 (in Korean with English abstract).
- Kang, H.-C., 1995, Palaeomagnetism of Kyongsang Supergroup and Igneous Rocks in the Kyongsang Basin, Korea. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Busan, 190 p (in Korean with English abstract).
- Kang, H.-C., Kim, I.-S., Son, M. and Jung, H.-J., 1996, Palaeomagnetic study of sedimentary and igneous rocks in the Yangsan strike-slip fault area, SE Korea. *Economic and Environmental Geology*, 29, 753-765 (in Korean with English abstract).
- Kee, W.-S. and Doh, S.-J. 1995, Geological Structures in the Southern Part of the Tertiary Eoil Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 10-20 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.K., 1970, A study on the Neogene Tertiary deposits in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 6, 77-96 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.K. and Yoon, S., 1978, Some molluscan fossils from the uppermost part of the Neogene deposits of the Pohang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 14, 1-12.
- Kim, H., Song, C.-W., Kim, J.-S., Son, M. and Kim, I.-S., 2008, Tertiary Geological Structures and Deformation History of the Southern Tsushima Island, Japan. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 175-198 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.-S., 1992, Origin and tectonic evolution of the East Sea (Sea of Japan) and the Yangsan fault system: a new synthetic interpretation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 84-109 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.-S. and Kang, H.-C., 1989, Palaeomagnetism of Tertiary rocks in the Oil (Eoil) basin and its vicinities, southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 273-293 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.-S. and Kang, H.-C., 1996, Palaeomagnetism of Tertiary basins in Southern Korea: 1. Changgi basin. *Economic and Environmental Geology*, 29, 357-367 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.-S., Son, M., Jung, H.-J., Lee, J.-D., Kim, J.-J. and Paik, I.S., 1998, Geological characteristics of Kyongju-Ulsan area: Palaeomagnetism and magnetic susceptibility of the granite rocks in the Ulsan fault area. *Economic and Environmental Geology*, 31, 31-43 (in Korean with English abstract).

- Kim, J.-S., Son, M., Kim, J.S. and Kim, I.-S., 2002, Tertiary dyke swarms and their tectonic importance in the south-eastern part of the Korean peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 11, 169-181 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., Son, M., Kim, J.-S. and Kim, J., 2005,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of the Tertiary dike swarm and volcanic rocks, SE Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 93-107 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H. and Doh, S.-J., 1994, Paleomagnetic study of the Tertiary formations in the Yangnam basin. *Journal of Korean Earth Science Society*, 15, 36-45 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Doh, S.J. and Lim D.S., 1994, Paleomagnetic study of the Tertiary Formations in the Janggi peninsula. *Journal of Korean Earth Science Society*, 15, 278-285 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Doh, S.-J., Hwang, C.-S. and Lim, D.S., 1993, Paleomagnetic study of the Yeonil Group in Pohang Basin. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 26, 507-518 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Won, J.K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M.W., 1986, Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks for Guryongpo area. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 19, 231-239.
- Kim, M.C., Kim, J.-S., Jung, S., Son, M. and Sohn, Y.K., 2011, Classification and stratigraphy of the Miocene basin fills in the northern area of the Janggi-myeon, Pohang, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 585-612 (in Korean with English abstract).
- Kim, W.H., 1990, Significance of Early to Middle Miocene planktonic foraminiferal biostratigraphy of the E-core in the Pohang basin, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 6, 144-164 (in Korean with English abstract).
- Kissel, C. and Laj, C., 1989, Paleomagnetic rotations and continental deformation. Kluwer, 516 p.
- Kimura, G. and Tamaki, K., 1986, Collision, rotation, and back-arc spreading: In the case of the Okhotsk and Japan Seas. *Tectonics*, 5, 389-401.
- Kimura, T., Hayashi, E. and Yoshida, S., 1991, *Geology of Japan*. University of Tokyo Press, 287 p.
- Kwon, C.W., Jeong, J.O. and Sohn, Y.K., 2011, Sedimentary records of rift to pull-apart tectonics in the Miocene Eoil Basin, SE Korea. *Sedimentary Geology*, 236, 256-271.
- Lallemant, S. and Jolivet, L., 1985/1986, Japan Sea: a pull-apart basin? *Earth and Planetary Science Letters*, 76, 375-389.
- Lee, H.K., Moon, H.-S., Min, K.D., Kim, I.-S., Yun, H. and Itaya, T., 1992, Paleomagnetism, stratigraphy and geologic structure of the Tertiary Pohang and Changgi basins; K-Ar ages for the volcanic rocks. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 25, 337-349 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.S., Ishikawa, N. and Kim, W.K., 1999, Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean peninsula: tectonic implications for the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, 304, 131-149.
- Miall, A.D., 1990, *Principles of sedimentary basin analysis*. 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag, 668 p.
- Min, K.D., Kim, W.K., Lee, D.H., Lee, Y.S., Kim, I.-S. and Lee, Y.-H., 1994, Paleomagnetic study on the Tertiary rocks in Pohang area. *Economic and Environmental Geology*, 27, 49-63 (in Korean with English abstract).
- MITI (Ministry of International Trade and Industry, Japan), 1972, Report on the Regional Geological Survey, Tsushima-Kamiagata District of the 1971'Fiscal Year. 29 p (in Japanese).
- MITI (Ministry of International Trade and Industry, Japan), 1973, Report on the Regional Geological Survey, Tsushima-Kamiagata District of the 1972'Fiscal Year. 34 p (in Japanese).
- MITI (Ministry of International Trade and Industry, Japan), 1974, Report on the Regional Geological Survey, Tsushima-Kamiagata District of the 1974'Fiscal Year. 52 p (in Japanese).
- Moon, T., Son, M., Chang, T.-W. and Kim, I.-S., 2000, Paleostress reconstruction in the Tertiary basin areas in southeastern Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 21, 230-249 (in Korean with English abstract).
- Noh, J.H. and Hong, J.S., 2010, Pyroclastic lithology and stratigraphy of the Beomgokri Group of Tertiary age in Janggi area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 141-156 (in Korean with English abstract).
- 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. *Geophysical Journal International*, 105, 397-405.
- Otofujii, Y., Kambara, A., Matsuda, T. and Nohda, S., 1994, Counterclockwise rotation of northeast Japan: Paleomagnetic evidence for regional extent and timing of rotation. *Earth and Planetary Science Letters*, 121, 503-518.
- Otofujii, Y. and Matsuda, T., 1983, Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of southwest Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, 349-359.
- Otofujii, Y. and Matsuda, T., 1987, Amount of clockwise rotation of Southwest Japan- fan shape opening of the southwestern part of the Japan Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 85, 289-301.
- Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S., 1985, Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism. *Nature*, 317, 603-604.

- Otsuki, K. and Ehiro, M., 1978, Major strike-slip faults and their bearing on spreading in the Japan Sea. *Journal of Physics of the Earth*, 26, S537-S555.
- Paik, I.S., Lee, H.I., Kang, H.C., Kim, K., Jeong, E.-K., Kim, J. and Kim, H.J., 2011, Fossil woods from the early Miocene Sinjeongri Formation, Ocheon, Pohang City: Occurrence, preservation, and taphonomy. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 613-633 (in Korean with English abstract).
- Paik, K.-H., Woo, K.S. and Park, Y.A., 1992, Paleogeography and Paleoenvironment of the Middle Miocene Songjeon Formation, Yangnam Basin, Korea. *The Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 142-151.
- Shim, S.-H., Park, B.-J., Kim, T.-H., Jang, Y.-D., Kim, J.-H. and Kim, J.-J., 2011, Petrology of the Tertiary basaltic rocks in the Yeonil and Eoil basins, southeastern Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 1-21 (in Korean with English abstract).
- Shimada, N., 1977, Lead-zinc ore deposits of the Tsushima Island, Nagasaki Prefecture, with special reference to Shigekuma-type mineralization. *Memoir of the Faculty of Science, Kyushu University, Series D* 23, 417-480.
- 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*, 181, 321-330.
- 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., 1998, Formation and evolution of the Tertiary Miocene basins in southeastern Korea: Structural and paleomagnetic approaches. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Busan, 233 p (in Korean with English abstract).
- Son, M., Chong, H.-Y. and Kim, I.-S., 2002, Geology and geological structures in the vicinities of the southern part of the Yonil Tectonic Line, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 175-197 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kang, H.-C. and Kim, I.-S., 1996, Palaeomagnetism of Tertiary basins in southern Korea: 3. Chongja-Ulsan basins and its vicinities. *Economic and Environmental Geology*, 29, 509-522 (in Korean with English abstract).
- Son, M. and Kim, I.-S., 1994, Geological structures and evolution of the Tertiary Chongja basin, southeastern margin of the Korean peninsula. *Economic and Environmental Geology*, 27, 65-80 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, I.-S., Lee, D., Lee, J.-D., Kim, J.S. and Paik, I.S., 2000b, Geological characteristics in the eastern part of the Ulsan fault area, Korea: Structural Geology and Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) in the Tertiary Miocene Waup basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 195-216 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, I.-S. and Sohn, Y.K., 2005, Evolution of the Miocene Waup basin, SE Korea, in response to dextral shear along the southwestern margin of the East Sea (Sea of Japan). *Journal of Asian Earth Sciences*, 25, 529-544.
- Son, M., Kim, J.-S., Chong, H.-Y., Lee, Y.H. and Kim, I.-S., 2007, Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their tectonic implications. *The Korean Society of Petroleum Geology*, 13, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim J.S., Jung, S., Ki, J.S., Kim, M.-C. and Sohn, Y.K., 2012, Tectonically controlled vent migration during maar-diatrem formation: An example from a Miocene half-graben basin in SE Korea. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 223-224, 29-46.
- Son, M., Kim, S.-H., Kim, J.S., Song, C.-W. and Kim, I.-S., 2009, Age and Structural Origin of the Tertiary Churyeong Breccia in the Gyeongju City, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 137-151 (in Korean with English abstract).
- 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*, 104-109.
- Son, M., Seo, H.J. and Kim, I.-S., 2000a, Geological structures and evolution of the Miocene Eoil basin, southeastern Korea. *Geosciences Journal*, 4, 73-88.
- Song, C.W., Son, M. and Sohn, Y.K., 2012, Geometry and kinematics of the western marginal faults of the Miocene Pohang basin, SE Korea, and their tectonic implications. *AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, Singapore, August 13-17*, 241 p.
- Taira, A., 2001, Tectonic evolution of the Japanese island arc system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 109-134.
- Takahashi, K. and Hayashi, M., 1985, Fission track ages of igneous rocks from Tsushima islands (I). *Bulletin of the Faculty of Liberal Arts, Nagasaki University, Natural Science*, 25, 9-19 (in Japanese).
- Takahashi, K. and Hayashi, M., 1987, Fission track ages of igneous rocks from Tsushima Islands (II). *Bulletin of the Faculty of Liberal Arts, Nagasaki University, Natural Science*, 27, 19-21 (in Japanese).
- Tamaki, K., 1995, Opening Tectonics of the Japan Sea. in

- Taylor (ed.), Backarc Basins: Tectonics and Magmatism, 407-420.
- Tateiwa, I., 1924, 1:50,000 Geological atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kuryuho and Choyo sheets. Geological Survey of Chosen (in Japanese).
- Yi, S. and Yun, H., 1995, Miocene calcareous nannoplankton from the Pohang basin, Korea. *Palaeontographica (B)*, 237, 113-158.
- Yoon, S., 1979, Neogene molluscan fauna of Korea. *Memoir of Geological Society of China* 3, 125-130.
- Yoon, S., 1982, Tertiary Stratigraphy of the Eoil Basin, Korea. *The Journal of the Geological Society of Korea*, 18, 173-180.
- Yoon, S., 1986, Tectonic history of the Tertiary Pohang and Yangnam basins, Korea. In Nakagawa, H., Kotaka, T. and Takayanagi, Y. (eds.), *Essays in Geology Professor Nobu Kitamura Commemorative Volume*, 637-644.
- Yoon, S., 1989, Tertiary stratigraphy of the southern Korean Peninsula. In Liu, G., Tsuchi, R. and Lin, Q. (eds.), *Proceedings of the international Symposium: Pacific Neogene Continental and Marine Events, IGCP-246*, Nanging University Press, 195-207.
- Yoon, S., 1992, Geology of the Tertiary Yangnam and Pohang basins, Korea. *Bulletin of the Mizunami Fossils Museum*, No. 19, 13-31.
- 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.
- 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.
- Yun, H., 1986, Emended stratigraphy of the Miocene formations in the Pohang basin, Part I. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 2, 54-69.
- Yun, H., Lee, H.-K. and Song, S., 1995, Basic Volcanic Rocks in the Pohang Basin and its Stratigraphic and Petrogenetic Implications. *Journal of Paleontological Society of Korea*, 11, 125-145.
- Yun, H., Paik, K.H., Chang, S. and Yi, S., 1990, Microfossil Assemblages from the Bomun Area. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 6, 1-63.
- Yun, H., Yi, S. and Byun, H., 1997, Tertiary system of Korea. *Paleontological Society of Korea Special Publication*, 3, 1-30.

---

투 고 일 : 2012년 11월 18일

심 사 일 : 2012년 11월 19일

심사완료일 : 2013년 1월 7일