

전북 진안 및 무주 지역의 지구조환경의 진화 및 중요 지질유산

오창환^{1,2} · 이병춘^{1,2,*} · 이승환^{1,2} · 김명덕^{1,2} · 이보영^{1,2} · 최승현³

¹전북대학교 지구환경과학과

²전북대학교 지구환경시스템연구소

³전라북도 자연생태과

요 약

전라북도 진안지역의 대표적인 지질유산은 한반도에서 유일하게 역암으로 만 구성된 마이산과 그 주변에 형성된 운장산, 구봉산, 운일암반일암이며, 무주지역의 대표적 지질 유산은 향적봉을 포함한 무주구천동 33경과 적상산이다. 백악기(130-75 Ma)에 일어난 좌수향 주향이동 단층 운동에 의해 진안분지와 무주분지가 생성되었고 그에 관련되어 일어난 화산활동에 의해 운장산, 구봉산, 운일암반일암 그리고 무주구천동 일부를 구성하는 화산암이 형성되었다. 신생대에 일어난 우수향 주향이동 단층운동에 의해 진안분지와 무주 분지가 융기되어 마이산, 적상산을 포함한 진안-무주 고원지대를 형성하였다. 무주 구천동 일부와 향적봉은 2.0-1.9 Ga 경에 대륙화산호 지역에서 형성된 화성암과 퇴적암이 1.86 Ga경에 변성작용을 받아 만들어진 고원생대 변성암으로 구성되어있다. 이들 지질 유산은 한반도와 아시아의 지구조 운동 해석에 중요할 뿐 아니라 아름답고 신비로운 경관을 제공해 주며 다양하고 풍부한 생태, 문화, 역사 자원을 형성시켰기 때문에 진안과 무주 지역은 지질유산을 중심으로 생태, 역사, 문화가 함께 엮어진 지질관광 시스템을 성공적으로 구축할 수 있는 장소로 국가지질공원 및 세계지질공원으로 적합한 곳이다.

주요어: 진안, 무주, 마이산, 무주구천동, 국가지질공원, 세계지질공원

Changwhan Oh, Byungchoon Lee, Seunghwan Lee, Myungdeok Kim, Boyoung Lee and Seunghyun Choi, 2016, The tectonic evolution and important geohéritages in the Jinan and Muju area, Jeollabuk-do. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 5, p. 709-738

ABSTRACT: In jeollabuk-do, the representative geohéritage in the Jinan area is Maisan which is the unique mountain in the Korean Peninsular consisting solely of conglomerate together with Unjangsan, Gubongsan and Unilam-Banilam. The representative geohéritages in the Muju area are Mujugucheondong 33 scenic masterpieces including Hangeokbong and Jeoksangsan. During Cretaceous (130-75 Ma), the Jinan and Muju basins formed due to the left lateral strike slip movement with volcanic activity which formed volcanic rocks which consists Unjangsan, Gubongsan and Unilam-Banilam and parts of Mujugucheondong. These basins uplifted by the right lateral strike slip movement during Cenozoic resulting Muju-Jinan highland including Maisan and Jeoksangsan. The Hangeokbong and parts of Mujugucheondong consist of Paleoproterozoic gneisses which formed by metamorphism(at 1.86 Ga) of igneous and sedimentary rocks originated in the continental arc tectonic setting at 2.0-1.9 Ga. These geohéritages are important for the interpretation of tectonic activity occurred in Korean Peninsular and Asia and provide not only beautiful sceneries but also a diverse and abundant ecologic, cultural and historical resources. Therefore, the Jinan and Muju areas are one of the best places for constructing successful geo-tour system combining ecology, history and culture resources with geohéritages as the center and suitable for the National Geopark and World Geopark.

Key words: Jinan, Muju, Maisan, Mujugucheondong, National Geopark, World Geopark

(Changwhan Oh, Byungchoon Lee, Seunghwan Lee, Myungdeok Kim and Boyoung Lee, Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea; Changwhan Oh, Byungchoon Lee, Seunghwan Lee, Myungdeok Kim and Boyoung Lee, Basic Science Research Institute, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea; Seunghyun Choi, Natural Ecology Division, Jeollabuk-do provincial Government, Jeonju 54968, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-63-270-3397, E-mail: leebyungc@hanmail.net

1. 서 언

지질학은 지구의 이치를 연구하는 학문으로 우리의 삶에 매우 밀접한 관계를 가지고 있으나 그 중요성이 일반인에게 크게 인지되지 못하고 있는 것이 현실이다(Heo and Choi, 2007; Jeon, 2010). 많은 아름다운 경관이 암석을 포함한 지질과 관련이 있으며 지역 간의 생태, 문화, 역사의 차이를 결정하는 중요한 요인들 중 하나가 바로 지질작용에 의해 만들어진 산맥을 포함한 산줄기이다. 하지만 이러한 지질의 중요성을 알릴 수 있는 기회가 별로 없었다. 다행히 지난 해 세계지질공원이 유네스코의 정식 프로그램이 되면서 지질학의 중요성을 알릴 수 있는 중요한 기반이 마련되었다. 세계지질공원이란 가치 있는 지질 자원을 중심으로 하며 지역의 관광산업을 활성화시켜 지역의 경제발전을 도모함으로써 지역 주민으로 하여금 지질자원의 중요성과 이를 보존해야 하는 당위성을 인식하게 하는데 큰 역할을 할 것으로 기대된다(Lee *et al.*, 2009; Woo, 2014). 그리고 세계 지질공원의 개념은 지질에만 집중하는 것이 아니라 지질을 중심으로 생태, 문화, 역사를 종합적으로 연결시키는 것을 근간으로 삼고 있기 때문에 이는 지역의 종합 관광 시스템 개발과 그에 의한 관광 활성화 및 지역 경제 발전에 큰 역할을 하게 될 것이며 또 한편으로는 지역주민이 적극적으로 참여하는 것을 필수 요소로 하고 있어 지역 공동체의 활성화를 유발하게 되어 지역의 발전을 이룩하는데 큰 공헌을 할 것이다(Kim, 2009; Lee *et al.*, 2009). 이러한 세계지질공원 프로그램에 맞추어 국내에서도 국가지질공원 프로그램이 만들어져 운영 중이다(Lee *et al.*, 2009; Secretariat of National Geopark, 2013; Yoon and Kim, 2015; You, 2016). 현재 제주도, 울릉도와 독도, 부산, 강원평화, 청송, 무등산권, 한탄-임진강이 국가지질공원으로 지정되어 운영 중이다. 이중 제주도가 세계지질공원으로 지정되어 있으며 현재 청송 국가지질공원이 세계지질공원 지정을 신청하여 심사 중에 있다. 국가지질공원은 세계지질공원의 기반이 될 뿐 아니라 그 지역의 종합 관광의 체계화와 지역 주민 협의체의 활성화를 통해 지역 발전에 큰 역할을 할 것으로 생각된다(You and Lee, 2013). 따라서 국가지질공원은 지역의 발전에 공헌함으로써 일반인에게 지질학의 중요성을 인식시키

는데 매우 중요한 역할을 할 것으로 예상된다(Lee *et al.*, 2009; You and Lee, 2013; Yoon and Kim, 2015). 그리고 세계지질공원으로 선정될 경우 유네스코라는 브랜드 가치를 얻게 됨으로서 전 세계에 자동적으로 선전이 되어 많은 관광객을 유치하는데 큰 도움이 되며 지역 상품의 질을 인정받아 지역 상품 판매량 증가에도 큰 도움이 될 것이다. 따라서 많은 지역이 국가지질공원 인증에 많은 관심을 갖고 있다.

전라북도에도 많은 우수한 지질 자원을 보유하고 있으며 그 중 하나가 한반도에서 유일하게 역암으로만 구성된 마이산과 그 주변에 화산작용에 의해 형성된 운장산, 구봉산, 운일암 반일암을 보유하고 있는 진안 지역과 덕유산 향적봉으로부터 나제통문에 이르는 무주구천동과 적상산을 보유하고 있는 무주 지역이다. 특히 마이산은 세계적으로도 매우 드문 역암으로만 형성된 산으로 전국에 잘 알려져 있으며 조선창업의 정신적 지주로 전해지고 있다. 그리고 무주는 천연기념물인 무주 구상화강편마암과 덕유산을 보유하고 있을 뿐 아니라 무주구천동, 태권도공원, 반딧불축제 등에 의해 전국적으로 잘 알려졌으며 2016년 올해의 관광지로 선발되었다. 이들 지역이 이렇듯 유명해진 것은 지질학적인 자원의 우수성에 기반을 두고 있다. 하지만 이 지역에서 지질학의 중요성이 거의 제대로 알려져 있지 않고 있는 안타까운 현실이며 이러한 문제를 해결할 필요가 절실하다. 또한 이들 지역이 세계지질공원이 된다면 국내 뿐 아니라 국제적으로 잘 알려져 지역의 발전에 큰 진전이 있게 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 진안과 무주 지역의 지질유산에 대한 연구를 수행하여 중요 지질유산을 발굴하고 지질학의 중요성을 알리며 동시에 지역의 생태, 문화, 역사와 연계된 지질관광의 기반을 마련하며 국가지질공원 인증을 받을 수 있는 준비 자료를 제시하고 향후 세계지질공원 신청의 바탕을 마련하고자한다. 연구를 위해 야외조사를 수행하고 야외조사를 통해 채취된 암석에 대한 박편 관찰 및 중요 암석에 대한 SHRIMP, K/Ar 연령분석, 전암 화학 분석을 실시하였고 이러한 조사에 근거한 연구결과를 기존 연구 자료와 종합하여 진안과 무주의 중요 지질유산의 형성과정을 밝혔다. 그리고 더 나아가 이 지역의 지질유산 형성과 아시아 지구조 운동간의 관계에 대한 연구도 수행하였다.

2. 지질 개요

한반도의 기저부는 3개의 기반암으로 구성되어 있으며 북으로부터 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴가

위치한다. 영남육괴는 북쪽 위치한 옥천변성대와 태백산 분지에 의해 경기육괴와 구분되며 남동쪽에서 경상분지와 접하고 있다(그림 1). 영남육괴는 선캄브리아시대 고원생대 시기의 정편마암류와 준편마암

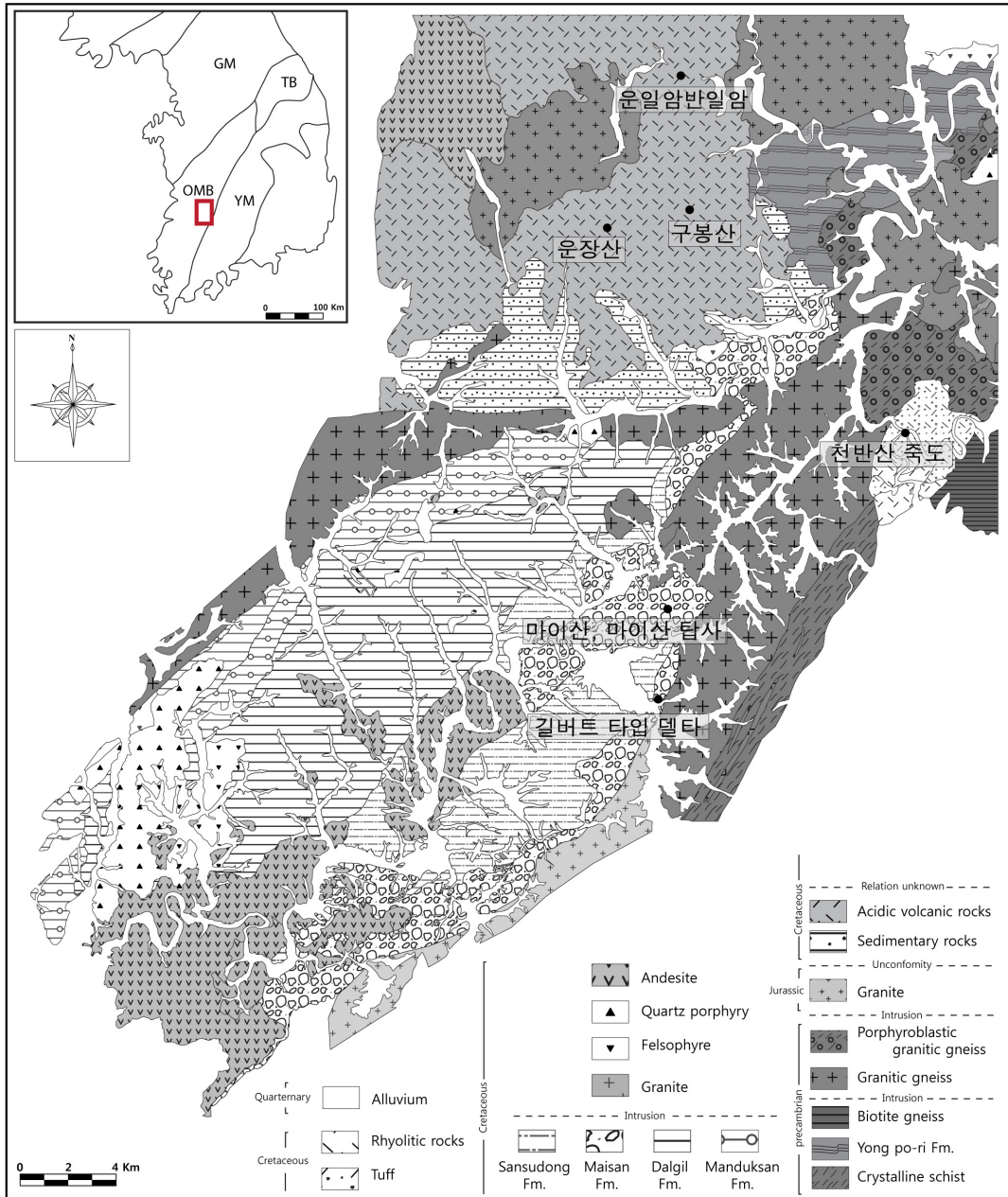


Fig. 1. (a) Tectonic map of the Korean Peninsula (after, Oh, 2006 and Lee *et al.*, 2016). (b) Geological map of the Jinan area (after, Lee, 1992 and Hong *et al.*, 1966 and Kim *et al.*, 1984 and Kim *et al.*, 1973). Abbreviations are as follows: GM = Gyeonggi Massif; OMB = Okcheon metamorphic belt; TB = Taebaeksan Basin; YM = Yeongnam Massif; GB = Gyeongsang Basin.

류로 주로 구성되어 있으며 강원도 남동부와 경상북도 북부에서 전라남도 남동부까지 분포하는 것으로 알려져 왔다. 기존 연구에 따르면 영남육괴 동부에 속하는 소백산 지괴에서는 약 1,996-1,926 Ma 경에 섭입대 환경에서 형성된 정편마암류와 약 2,000 Ma 이후 퇴적된 변성퇴적암이 약 1,889-1,840 Ma 경에 변성작용을 받아 형성된 준편마암류 그리고 이와 동시기에 변성퇴적암이 용융되어 형성된 S-type의 우백질 복운모 화강편마암이 광범위하게 분포하고 있음이 보고되었다(Kim and Cho, 2003; Chang *et al.*, 2003;

Kwon *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2005, 2010; Kim *et al.*, 2012, 2014).

연구지역인 무주-진안 지역은 소백산 지괴의 남동 연장선이자 영남육괴의 북쪽 경계부의 중앙에 위치하고 있다(그림 1, 2). 따라서 이 지역의 기반암도 주로 선캠브리아기 고원생대 시기의 정편마암류와 준편마암류로 주로 구성되어 있으며 편암이 함께 나타난다. 무주 지역의 정편마암류는 야외에서 관찰되는 광물, 구조에 따라 화강편마암, 복운모 화강편마암, 우백질 화강편마암으로 구분 되고, 이들 중 복운

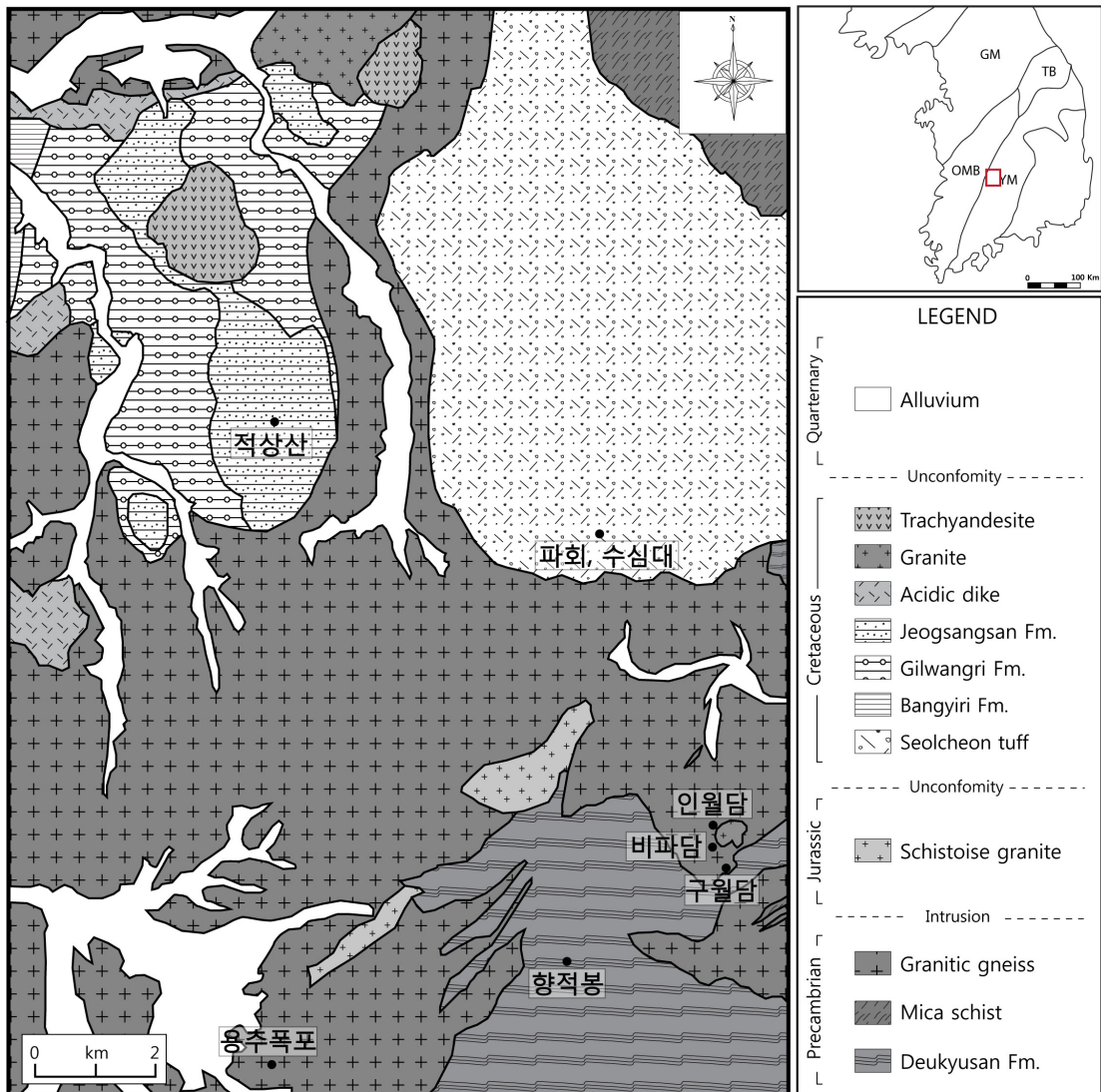


Fig. 2. (a) Tectonic map of the Korean Peninsula (after, Oh 2006 and Lee *et al.*, 2016). (b) Geological map of the Muju area (after Oh *et al.*, 2013). Abbreviations are same as those in Fig. 1.

모 화강편마암의 경우 약 1,875 Ma경에 충돌과 관련된 환경에서 관입한 암체로 보고되었다(그림 2; Oh *et al.*, 2013). 장기리도폭 남동부와 무풍도폭 남서부에 걸쳐서 나타나는 덕유산층은 주로 흑운모편암, 석류석편암으로 이루어져 있고 화강암질 편마암류와는 점이적인 관계를 갖는다(Lee and Nam, 1969; Park and Lee, 1969). 정편마암인 화강편마암류와 준편마암류인 덕유산변성암복합체 외에 국지적으로 반정질 화강편마암과 각섬암이 관찰된다. 각섬암의 경우 화산호 환경과 판내부 환경에서 형성된 두 종류의 각섬암이 존재하며 각섬암의 생성 시기는 고원생대로 확인되었다(Lee *et al.*, 1997). 무주지역 서측에서는 편암과, 각섬암, 대리암이 주를 이루고 있는 거목니층이 덕유산층과 정합관계로 놓여 있다. 진안지역의 기반암은 진안도폭 서측에 광범위하게 분포하고 있으며 주로 선캠브리아기 시기에 형성된 화강편마암과 변성퇴적암복합체로 구성되어 있으며 변성퇴적암복합체는 운모편암, 천매암, 점판암, 규암 그리고 석회암 등으로 이루어져 있다(그림 1).

동북아시아 대륙에 위치한 한반도내와 그 주변에는 백악기 분지가 형성되어 있다. 백악기 분지로 대표적인 분지는 경상분지와 남황해분지이며 이외에도 소규모의 백악기 분지들이 북동-남서방향으로 존재하는 커다란 단층대를 따라 나타난다(Lee, 1999; Ryang, 2013). 이들 소규모 백악기 분지들은 모두 좌수향 주향이동 단층 활동으로 인해 형성된 인리형 분지(pull apart basin)이며 분지 안으로는 층적선상지, 층적 평야, 또는 호수나 강과 같은 다양한 퇴적 환경 하에서 퇴적된 육성 퇴적물과 단층활동과 함께 수반된 화산활동으로 인한 화산암과 화산쇄설성 퇴적암들이 협재되어 나타나고 있다(Lee, 1999; Ryang 2013). 화산암은 중성에서 산성질에 해당하는 암석들로 주로 이루어져 있다.

진안-무주 지역은 호남 전단대에 위치하고 있으며 마이산을 포함하고 있는 진안분지도 백악기에 만들어진 소규모 인리형 분지들 중에 하나로서 호남 전단대 영동-광주 단층대를 따라 존재하는 광주단층과 전주단층의 좌수향 주향이동 단층 활동으로 인해 형성된 마름모꼴의 인리형 분지이다(Lee, 1992; Lee and Chough, 1999; Noh *et al.*, 2009). 무주지역에 나타나는 무주분지도 역시 백악기에 만들어진 인리형 분지이다(Park and Lee, 1997, 2000). 진안분지

와 무주분지의 기반암은 선캠브리아기의 결정질 편암과 이것을 관입한 선캠브리아기 정편마암류, 그리고 유라기에 관입한 화강암류로 구성되어있으며 백악기에 분지가 형성되면서 만들어진 퇴적암들이 이 기반암을 부정합으로 덮고 있다(Lee, 1992; Park and Lee, 1997).

진안분지 내에 백악기에 형성된 퇴적암은 크게 4개 층군으로 분류가 되며 역암, 사암, 흑색셰일, 응회암질암 등으로 구성된 만덕산층과 응회암, 흑색셰일 그리고 응회암질 셰일로 구성된 달길층, 사암, 흑색셰일로 이루어진 산수동층 그리고 역암으로 주로 구성된 마이산역암층으로 나타난다(Lee, 1992; Lee and Chough, 1999). 그리고 기존 연구에 의하면 그 위를 산성질 화산암인 유문암과 산성질 응회암이 덮고 있으며 산성질 화산암류 상부를 안산암과 안산암질 응회암이 덮고 있다(Lee, 1992). 무주분지는 백악기 퇴적암으로 주로 구성되어있으며 백악기 퇴적암은 응회질 사암과 역암, 역질 사암, 이암으로 구성된 방이리층, 역암과 사암으로 구성된 길왕리층, 유리질 응회암, 화산력질 응회암, 화산력질암, 안산암으로 구성된 적상산층으로 나뉜다. 그리고 이 퇴적암들을 조면안산암이 덮고 있다(Lee and Nam, 1969; Park and Lee, 1969, 1997; Kim *et al.*, 2008).

진안분지와 무주분지가 형성될 때 주변 단층이 지하 깊은 곳까지 연결되어 이 단층들을 통해 마그마가 이동해 오므로서 두 분지 주변과 분지 내에 화산암과 화산쇄설암이 형성되었을 것으로 예상된다. 진안분지와 접하고 있는 북부 및 동부 지역에는 화산쇄설성암과 용암으로 구성된 천반산과 운장산이 나타나고 있으며 진안분지와 무주분지 내에도 백악기 화산암과 화산쇄설암이 나타난다. 이들 분지들은 시기는 분명치 않으나 신생대에 융기하여 마이산 및 적상산을 형성하였고 그 원인은 이 분지들을 형성시켰던 좌수향 주향이동 운동이 우수향 주향이동 운동으로 바뀌었기 때문으로 예상된다. 그 이후에 계속된 침식과 융기에 의해 무주-진안지역의 지질명소와 지형이 형성되었다.

3. 분석 방법

3.1 Shrimp 연대측정 방법

무주 지역의 지질유산을 형성하고 있는 암석의 형

Table 1. The SHRIMP zircon age data of the granitic gneiss and biotite schist from the Muju area in the Yeongnam Massif.

Spot	U (ppm)	Th (ppm)	Pb* (ppm)	Th/U (ppm)	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		Apparent ages (Ma)			position	
					$\pm\%$	$\pm\%$	$\pm\%$	$\pm\%$	$\pm\%$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	\pm	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	\pm			
MJ091 granitic gneiss																	
MJ091-1.1	461	311	142	0.70	2.8	0.79	0.1229	0.29	6.1	0.8	0.358	0.79	1975	± 13	1999	± 5	core
MJ091-2.1	550	251	158	0.47	3.0	1.18	0.1214	0.48	5.6	1.3	0.334	1.18	1858	± 19	1976	± 9	core
MJ091-7.1	644	192	155	0.31	3.6	0.77	0.1205	0.84	4.6	1.1	0.279	0.77	1587	± 11	1964	± 15	core
MJ091-9.1	467	146	86	0.32	4.7	2.52	0.1164	0.90	3.5	2.7	0.215	2.52	1255	± 29	1902	± 16	core
MJ091-10.1	167	73	47	0.45	3.1	0.85	0.1205	0.48	5.4	1.0	0.326	0.85	1819	± 13	1964	± 9	core
MJ091-11.1	1157	327	135	0.29	7.4	2.53	0.1087	0.69	2.0	2.6	0.136	2.53	822	± 20	1778	± 13	core
MJ091-12.1	324	100	90	0.32	3.1	0.80	0.1228	0.66	5.5	1.0	0.324	0.80	1808	± 13	1998	± 12	core
MJ091-17.1	456	213	128	0.48	3.1	1.17	0.1234	0.31	5.6	1.2	0.327	1.17	1826	± 19	2005	± 6	core
MJ091-18.1	332	69	79	0.22	3.6	0.80	0.1221	0.80	4.7	1.1	0.278	0.80	1580	± 11	1987	± 14	core
MJ091-19.1	541	207	138	0.39	3.4	0.78	0.1208	0.31	4.9	0.8	0.296	0.78	1672	± 11	1968	± 5	core
MJ091-20.1	367	189	84	0.53	3.7	0.80	0.1203	0.38	4.4	0.9	0.267	0.80	1525	± 11	1960	± 7	core
MJ091-21.1	470	213	115	0.47	3.5	1.56	0.1203	0.32	4.7	1.6	0.285	1.56	1617	± 22	1961	± 6	core
MJ091-23.2	1505	375	168	0.26	7.7	0.76	0.1017	0.34	1.8	0.8	0.130	0.76	788	± 6	1655	± 6	rim
MJ091-25.2	1722	44	47	0.03	31.5	1.16	0.0446	1.79	0.2	2.1	0.032	1.16	201	± 2	-79	± 44	rim
MJ091-26.2	1171	45	154	0.04	6.5	0.75	0.1063	0.89	2.2	1.2	0.153	0.75	917	± 6	1737	± 16	rim
MJ091-1.2	2369	54	61	0.02	33.2	0.75	0.0485	1.91	0.2	2.0	0.030	0.75	192	± 1	125	± 45	rim
MJ091-2.2	1062	22	205	0.02	4.4	2.89	0.1049	2.43	3.3	3.8	0.225	2.89	1310	± 34	1712	± 45	rim
MJ091-3.2	1088	33	155	0.03	6.0	1.93	0.1015	1.27	2.3	2.3	0.166	1.93	989	± 18	1651	± 23	rim
MJ091-5.2	955	34	145	0.04	5.6	1.08	0.1083	0.31	2.6	1.1	0.177	1.08	1053	± 10	1770	± 6	rim
MJ091-6.2	1011	37	210	0.04	4.1	0.77	0.1095	0.50	3.7	0.9	0.242	0.77	1397	± 10	1790	± 9	rim
MJ091-7.2	1118	42	145	0.04	6.6	0.76	0.1069	1.09	2.2	1.3	0.151	0.76	906	± 6	1748	± 20	rim
MJ091-13.2	1165	280	192	0.25	5.2	0.76	0.1118	0.27	3.0	0.8	0.192	0.76	1133	± 8	1828	± 5	rim
MJ091-14.2	1019	46	160	0.05	5.5	0.75	0.1096	0.55	2.8	0.9	0.183	0.75	1083	± 8	1792	± 10	rim
MJ091-16.2	1014	27	153	0.03	5.7	0.83	0.1073	1.45	2.6	1.7	0.176	0.83	1043	± 8	1754	± 27	rim

Errors are 1-sigma; Pb* indicates radiogenic portions.

a ^{204}Pb corrected data.

Table 1. Continued.

Spot	U (ppm)	Th (ppm)	Pb* (ppm)	Th/U (ppm)	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*		²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U		Apparent ages (Ma)			positi on	
					±%	±%	±%	±%	±%	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±			
MJ097A biotite schist																	
MJ097A-1.1	252	24	73	0.10	2.97	4.0	0.1183	0.54	5.49	4.0	0.337	4.0	1871	±65	1930	±10	core
MJ097A-2.1	455	88	137	0.20	2.85	4.4	0.1195	0.41	5.78	4.4	0.351	4.4	1937	±73	1949	±7	core
MJ097A-4.1	618	216	192	0.36	2.76	1.7	0.1250	0.54	6.24	1.8	0.362	1.7	1993	±29	2029	±10	core
MJ097A-5.1	77	44	27	0.59	2.48	1.9	0.1339	0.88	7.44	2.1	0.403	1.9	2182	±35	2150	±15	core
MJ097A-7.1	546	45	163	0.09	2.87	2.3	0.1210	0.93	5.82	2.5	0.349	2.3	1929	±39	1971	±17	core
MJ097A-8.1	333	196	124	0.61	2.30	1.4	0.1534	0.88	9.20	1.7	0.435	1.4	2327	±28	2384	±15	core
MJ097A-10.1	700	337	270	0.50	2.23	2.4	0.1526	0.26	9.45	2.4	0.449	2.4	2392	±48	2375	±4	core
MJ097A-12.1	635	285	195	0.46	2.80	1.4	0.1257	0.35	6.20	1.4	0.358	1.4	1971	±23	2038	±6	core
MJ097A-15.1	413	102	134	0.25	2.66	5.7	0.1264	1.46	6.56	5.9	0.377	5.7	2061	±100	2049	±26	core
MJ097A-17.1	335	56	104	0.17	2.76	2.0	0.1235	0.46	6.18	2.1	0.363	2.0	1995	±34	2008	±8	core
MJ097A-18.1	883	33	325	0.04	2.33	3.8	0.1596	1.42	9.44	4.1	0.429	3.8	2301	±74	2452	±24	core
MJ097A-19.1	584	181	199	0.32	2.52	2.4	0.1327	0.30	7.27	2.4	0.397	2.4	2157	±44	2134	±5	core
MJ097A-20.1	109	6	38	0.06	2.45	1.7	0.1397	0.66	7.87	1.8	0.409	1.7	2209	±31	2223	±11	core
MJ097A-21.2	437	39	133	0.09	2.82	2.8	0.1177	0.37	5.75	2.8	0.355	2.8	1956	±47	1921	±7	core
MJ097A-22.1	1282	36	395	0.03	2.79	2.3	0.1190	0.69	5.89	2.4	0.359	2.3	1976	±39	1942	±12	core
MJ097A-3.2	552	5	159	0.01	2.99	2.6	0.1150	1.61	5.31	3.0	0.335	2.6	1862	±41	1879	±29	rim
MJ097A-12.2	409	3	119	0.01	2.95	1.6	0.1129	0.44	5.28	1.7	0.339	1.6	1881	±27	1847	±8	rim
MJ097A-13.1	579	4	171	0.01	2.91	2.1	0.1139	0.33	5.40	2.1	0.343	2.1	1903	±35	1863	±6	rim
MJ097A-14.1	544	5	158	0.01	2.96	2.1	0.1138	0.39	5.30	2.2	0.338	2.1	1878	±35	1860	±7	rim
MJ097A-16.1	491	5	141	0.01	2.99	2.3	0.1144	0.41	5.28	2.4	0.335	2.3	1862	±38	1871	±7	rim
MJ097A-17.2	531	6	150	0.01	3.05	2.6	0.1137	0.79	5.14	2.7	0.328	2.6	1830	±42	1859	±14	rim
MJ097A-19.2	385	3	112	0.01	2.94	1.4	0.1127	0.80	5.28	1.6	0.340	1.4	1887	±23	1844	±14	rim
MJ097A-20.2	502	3	150	0.01	2.87	1.9	0.1134	0.37	5.45	1.9	0.348	1.9	1927	±32	1854	±7	rim
MJ097A-21.2	321	3	91	0.01	3.02	2.3	0.1137	0.44	5.18	2.3	0.331	2.3	1842	±37	1859	±8	rim

Errors are 1-sigma; Pb* indicates radiogenic portions.
^a ²⁰⁴Pb corrected data.

Table 2. The K/Ar age of volcanic rocks in the Jinan basin.

Sample No.	Rock type	K (wt%)	Sample weight (g)	40Ar/39Ar ratio (10-8ccST P/g)	39Ar/39Ar ratio (10-8ccST P/g)	36Ar (10-10ccS TP/g)	d36Ar (10-10ccS TP/g)	T (Ma)	dT	Airfraction (%)
JA141219-1	Rhyolitic	3.444	0.00455	1221.88	1.11	54.02	0.20	89.2	1.7	11.6
JA141209-7	Rhyolitic	3.181	0.00494	1115.43	1.02	41.66	0.15	88.1	1.7	9.9
JA141209-6	Rhyolitic	2.035	0.00472	728.03	0.66	46.34	0.16	89.9	1.8	15.8
H.purple	Rhyolitic	3.707	0.00441	1329.61	1.22	49.96	0.18	90.1	1.8	10.0
G.dyke	Andesitic	1.988	0.00476	596.33	0.54	70.60	0.18	75.7	1.5	25.9
A.Breccia	Basaltic	1.810	0.00455	671.32	0.61	46.43	0.18	93.1	1.8	17.0

성 시기를 확인하기 위해 충청북도 청원군 오창읍에 위치한 기초과학지원연구소 오창분원 초정밀분석동에서 고분해능 이차이온 질량 분석기(Sensitive High-resolution Ion Microprobe, SHRIMP)를 이용해 연대측정 분석을 실시했다. 저어콘은 각 시료별로 조분쇄기(Jaw crusher)로 분쇄 후 표준 망체를 이용해 180 메쉬에 해당하는 부분을 우선적으로 분리했다. 분리된 시료를 패닝(panning)하고 증액을 이용해 증광물을 회수했다. 이후 실체 현미경을 이용해 저어콘을 추출했고 SL-13 (U=2387ppm) 및 FC-1 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.1859$)과 함께 에폭시수지에 고정시켰다. 고정된 저어콘의 이미지를 촬영하기 위해 JEOL JSM-6610LV를 이용해 음극선발광(cathodoluminescence) 영상을 촬영했으며, SHRIMP 분석동안 저어콘의 내부구조를 함께 관찰했다. 빔의 분석직경은 25-20 μm 이며 SHRIMP 분석을 통해 획득한 자료는 SQUID 2.5와 Isoplot 3.7 소프트웨어를 이용해 자료를 처리했으며 보다 자세한 분석방법과 절차는 Lee *et al.* (2016)에 명시되어 있다. 각 시료의 연대는 International Union of Geological Sciences (IUGS)에서 제시한 상수를 이용해 결정했으며(Steiger and Jager, 1977) 분석 결과는 표 1과 같다.

3.2 K/Ar 연대측정 방법

K의 정량과 Ar 동위원소비 측정은 한국기초과학지원연구원 대덕 본소에서 실시되었다. K의 함량은 원자흡광분광법(AAS)으로 정량화되었으며 그 오차는 5% 이내로 평가된다. Ar 동위원소비는 Ar 추출라인과 연결된 VG5400 모델 불활성 기체 질량 분석기(static vacuum mass spectrometer)로 측정되었다. 분석기간 동안 측정된 표준물질의 연대 측정 결

과를 보면 Baba-1 흑운모는 11.6 ± 0.2 Ma (추천치 = 11.6 ± 0.4 Ma)였다. K-Ar 연대 계산에 사용된 붕괴상수와 K의 동위원소 존재 비는 $\lambda\beta = 4.962 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$, $\lambda\epsilon = 0.581 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$, $^{40}\text{K}/\text{K} = 0.01167$ (atomic%)로 Steiger and Jager (1977)를 참조하였다. K-Ar 연대측정 결과는 표 2와 같다.

3.3 전암분석 방법

진안과 무주 지역에 나타나는 화산암류와 무주 지역에 나타나는 정편마암류의 지화학적 특징을 확인하기 위해 전암분석을 실시했다. 분석을 위해 화산암류와 정편마암류를 위치에 관계없이 무작위로 채취했으며, 채취된 시료는 약 90% 분쇄되어 약 250 그램(g)씩 분리했다. 이후 분리된 시료의 균질성을 위해 200 메쉬에서(mesh) 약 95% 분쇄했다. 주원소, 미량원소 그리고 희유원소는 캐나다 Activation Laboratories에 설치된 유도결합 플라즈마 원자방출 분광기(FUS-ICP-AES; TermoHarrel-Ash ENVIRO II)와 유도결합 플라즈마 질량분석기(FUS-ICP/MS; Perkin Elmer Optima 3000)을 이용했고 분석결과는 표 3과 같다.

4. 분석결과

4.1 연대측정

4.1.1 화강편마암(용추폭포)

용추폭포(N35°50'25.70", E127°41'5.09")를 구성하고 있는 화강편마암에서 분리된 저어콘의 크기는 보통 중립질(100-150 μm)에 해당하며, 2:1 내지 2.5:1의 종횡비를 갖는다. 음극선발광 영상을 통해 저어콘 내부구조를 확인해본 결과, 저어콘의 중심부에서는 일반적으로 회색내지 밝은 색의 진동누대구조 및 호상

Table 3. Whole rock compositions of the granitic gneiss, acidic to mafic volcanic rocks from the Muju and Jinan area in the Yeongnam Massif.

Location	Muju area					Jinan area			
Rock type	Granitic gneiss			Basalt		Bsaltic andesite		Andesite	
Sample No.	M09-1A	MJ8-5A	MJ5-7	J-sec-Ab	J-sec-Am	CA13-3	J-sec-G	CH09-6	J-sec-M
Major elements (wt%)									
FeO	2	4.1	1.3	3.8	2.9	6.1	5.1	4.8	3.8
SiO ₂	72.06	71.04	74.96	45.71	46.71	52.76	54.22	59.09	62.5
Al ₂ O ₃	13.8	13.2	13.12	19.41	16.77	18.88	17.28	16.96	16.16
Fe ₂ O ₃	0.48	0.34	0.2	5.33	2.35	1.92	2.25	0.66	1.45
MnO	0.018	0.071	0.014	0.096	0.203	0.099	0.123	0.105	0.086
MgO	0.33	1.92	0.27	4.82	3.93	3.92	3.88	2.23	3.14
CaO	1.24	0.93	1.34	4.97	10.03	5.86	6.1	4.86	2.52
Na ₂ O	3.37	1.44	2.98	4.3	3.5	3.74	3.47	3.3	2.79
K ₂ O	4.34	3.51	4.31	1.9	2.32	1.4	2.24	2.65	3.43
TiO ₂	0.218	0.14	0.106	1.172	1.089	1.29	0.864	0.797	0.867
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.03	0.45	0.38	0.56	0.26	0.31	0.32
LOI	0.47	1.43	0.36	6.18	9.18	3.38	3.05	3.42	3.27
Total	98.6	98.62	99.15	98.56	99.68	100.6	99.4	99.72	100.8
Trace elements (ppm)									
Sc	3	12	1	21	17	22	21	13	15
V	14	43	10	169	109	199	188	104	102
Cr	30	260	210	90	70	70	40	20	60
Co	3	10	2	20	15	18	20	11	13
Ni	< 20	20	< 20	40	30	30	N.A	N.A	30
Cu	< 10	50	10	N.A	N.A	30	30	10	10
Zn	< 30	70	< 30	100	90	100	80	80	80
Ga	18	16	14	21	17	22	20	19	19
Ge	1	1	1	1.7	1.9	1.4	1.5	1.3	1.8
Rb	186	143	131	77	92	34	70	59	130
Sr	99	117	86	751	678	925	677	625	542
Y	6	23	5	27.5	31.4	27.9	19.3	23.6	24.4
Zr	98	197	87	273	188	273	127	185	260
Nb	6	3	2	11.4	9.5	12.3	4.4	6.9	10.9
Cs	4	8.5	1.8	7.3	7.9	3.7	3.1	1.6	5.1
Ba	696	737	547	492	1496	1199	671	1032	1400
La	32.2	22.3	23.7	59.8	44.2	58.9	25.2	36.9	58.8
Ce	60.5	42.1	45.6	114	93.4	121	51	73.6	114
Pr	6.32	4.45	4.9	12.9	10.9	14	5.89	8.38	12.3
Nd	20.9	16.1	17.1	48.2	41.7	52.7	23.1	31.5	44.4
Sm	3.7	2.8	3.1	8.29	7.85	8.88	4.41	5.47	7.28
Eu	0.6	0.77	0.53	2.09	2	2.46	1.38	1.66	1.95
Gd	2.7	3	2.5	6.63	7.05	7.05	4.07	5.04	5.68
Tb	0.4	0.6	0.3	0.94	1.02	0.97	0.62	0.73	0.82
Dy	1.6	4.2	1.2	5.4	5.62	5.41	3.47	4.14	4.54
Ho	0.2	0.9	0.2	1.04	1.09	1.01	0.67	0.81	0.87
Er	0.6	2.5	0.4	2.92	3.04	2.96	1.96	2.51	2.5
Tm	0.08	0.4	0.05	0.413	0.405	0.421	0.284	0.37	0.356
Yb	0.5	2.7	0.3	2.57	2.38	2.53	1.73	2.31	2.19
Lu	0.07	0.44	0.04	0.388	0.356	0.396	0.273	0.375	0.34
Hf	3.3	5.5	2.5	5.2	4	5.2	2.7	3.7	5
Ta	0.9	0.4	0.6	0.71	0.59	0.56	0.29	0.45	0.72
Pb	28	21	26	15	18	18	6	15	20
Th	12.3	7.5	10.4	8.28	6.62	5.52	4.83	6.83	10.9
U	2.4	1.2	1.8	1.08	1.14	0.87	0.75	1.12	1.68
(La/Yb) _N	46.19	5.92	56.67	16.69	13.32	16.70	10.45	11.46	19.26

N.A = Not Analysis

Table 3. Continued.

Location	Jinan area																
Rock type	Rhyolite										Tuff						
Sample No.	J-sec -K	J-sec -I	813 -I	J-sec -D	J-sec -E	J-sec -F	J-sec -H	209 -4	09 -17	CR12 19-1	1209 -10	227 -3	227 -5-1	225 -11	118 -4	225 -4	227 -14
Major elements (wt%)																	
FeO	3.20	2.00	2.60	1.20	1.40	1.80	1.70	3.10	2.40	0.90	1.40	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
SiO ₂	65.70	67.05	66.92	73.95	70.09	72.63	71.41	71.25	72.89	78.45	71.29	77.89	74.60	70.80	69.19	72.74	72.69
Al ₂ O ₃	13.79	16.82	14.22	11.82	14.15	14.22	14.79	14.41	14.10	12.10	14.50	12.77	14.04	14.82	13.68	13.88	14.03
Fe ₂ O ₃	0.92	0.91	0.39	0.39	0.52	0.36	0.71	0.00	0.00	0.36	0.05	0.73	1.49	2.49	2.93	1.99	2.02
MnO	0.06	0.05	0.07	0.06	0.09	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.03	0.01	0.00	0.05	0.07	0.05	0.06
MgO	2.42	1.03	0.88	1.45	0.68	0.44	0.42	1.01	0.45	0.07	0.53	0.04	0.10	0.67	0.92	0.46	0.43
CaO	3.50	2.21	2.69	2.27	2.73	1.51	1.60	1.35	0.71	0.30	0.96	0.12	0.25	1.69	2.82	1.48	1.60
Na ₂ O	1.65	3.47	3.56	1.70	3.05	3.70	3.68	3.65	4.71	3.26	4.03	4.13	3.66	4.02	4.62	3.77	4.39
K ₂ O	3.24	3.48	3.20	3.40	3.80	4.23	4.49	3.11	3.94	4.62	5.35	2.81	4.64	4.11	3.99	4.11	3.79
TiO ₂	0.66	0.56	0.39	0.24	0.32	0.33	0.32	0.52	0.24	0.06	0.22	0.11	0.28	0.38	0.39	0.30	0.33
P ₂ O ₅	0.07	0.15	0.11	0.05	0.06	0.07	0.06	0.09	0.07	0.01	0.07	0.01	0.09	0.11	0.11	0.09	0.10
LOI	5.03	3.03	3.37	3.50	3.01	1.38	1.56	1.88	0.87	0.56	0.89	1.23	0.37	0.64	1.07	0.93	0.53
Total	100.6	101.0	98.70	100.2	100.1	100.9	101.0	100.8	100.6	100.8	99.47	99.84	99.52	99.78	99.79	99.80	99.89
Trace elements (ppm)																	
Sc	9.00	5.00	6.00	2.00	3.00	3.00	3.00	7.00	3.00	2.00	1.00	5.20	3.00	4.20	5.00	3.40	3.10
V	60.00	16.00	40.00	12.00	11.00	11.00	11.00	44.00	15.00	N.A	18.00	<1	13.60	20.50	26.90	15.80	14.70
Cr	50.00	N.A	20.00	N.A	N.A	N.A	N.A	40.00	N.A	20.00	0.00	4.70	4.20	9.80	12.70	5.40	5.30
Co	8.00	N.A	4.00	N.A	N.A	N.A	N.A	5.00	2.00	N.A	2.00	124.3	69.10	82.30	164.9	107.7	134.6
Ni	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0.40	2.90	5.60	8.00	3.80	2.90
Cu	10.00	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	20.00	1.60	3.80	3.70	4.80	4.20	3.80
Zn	60.00	70.00	50.00	50.00	60.00	50.00	50.00	40.00	N.A	N.A	40.00	57.50	21.00	35.80	30.50	26.80	33.00
Ga	19.00	20.00	16.00	13.00	15.00	16.00	17.00	17.00	16.00	11.00	14.00	16.50	14.80	12.40	11.70	11.70	11.40
Ge	2.10	1.40	1.70	1.80	1.60	1.60	1.50	1.40	1.20	1.50	1.00	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Rb	148	113	102	113	125	129	145	105	109	139	123	133.9	174.7	127.4	110.6	132.0	155.0
Sr	177	438	244	236	404	352	362	425	258	65.00	190	32.20	146	312	335	264	254.
Y	29.70	22.00	18.10	15.30	20.10	18.60	18.70	22.80	19.20	16.20	5.90	17.90	11.70	13.40	12.70	12.90	13.50
Zr	251.0	250.0	165.0	168.0	232.0	221.0	233.0	236.0	180.0	59.00	151.0	60.70	68.50	57.80	66.90	67.80	68.40
Nb	12.00	10.80	7.20	6.50	9.90	9.60	10.00	11.00	7.50	8.60	4.80	22.40	14.70	12.00	5.50	9.90	15.40
Cs	12.10	6.50	2.90	6.40	4.40	3.50	4.50	14.60	1.40	4.40	0.90	1.80	3.60	2.50	2.70	3.00	3.30
Ba	949.0	1162	899	1622	1372	1182	1168	601	719	228	972	157	302	733	689	688	358
La	45.40	58.50	42.30	39.70	53.80	55.10	54.90	46.90	50.10	17.40	12.70	14.20	33.00	41.50	34.70	35.10	38.10
Ce	82.90	111.0	78.60	76.80	103	104	102	87.20	94.30	34.00	24.30	29.40	61.30	74.60	63.20	67.00	68.00
Pr	9.36	11.80	8.04	7.99	10.80	10.70	10.70	9.29	9.94	3.96	3.24	3.60	6.60	8.10	6.90	6.90	7.10
Nd	34.00	40.30	26.80	26.90	35.30	36.00	35.50	32.50	32.60	13.60	12.10	12.80	21.20	26.20	22.40	22.00	22.70
Sm	6.31	6.69	4.33	4.27	5.56	5.89	5.70	5.58	5.16	2.97	1.99	3.40	3.50	4.60	3.90	4.10	3.80
Eu	1.37	1.63	1.18	0.87	1.20	1.20	1.23	1.12	0.76	0.23	0.51	0.30	0.70	0.90	0.90	0.80	0.70
Gd	5.65	4.81	3.57	3.22	4.09	4.20	4.06	4.55	3.85	2.52	1.54	0.70	0.40	0.60	0.50	0.50	0.50
Tb	0.88	0.69	0.55	0.46	0.57	0.59	0.58	0.67	0.59	0.42	0.21	3.70	3.10	3.80	3.40	3.50	3.30
Dy	5.01	3.90	3.10	2.67	3.40	3.33	3.36	3.94	3.23	2.63	1.10	4.20	2.60	3.00	2.80	2.90	2.70
Ho	0.97	0.76	0.61	0.51	0.68	0.65	0.63	0.77	0.63	0.55	0.20	0.80	0.50	0.60	0.50	0.60	0.50
Er	2.89	2.27	1.79	1.51	2.02	1.89	1.88	2.44	1.92	1.71	0.55	2.20	1.50	1.80	1.60	1.70	1.80
Tm	0.41	0.33	0.27	0.23	0.31	0.28	0.29	0.34	0.30	0.28	0.08	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.30
Yb	2.52	2.12	1.98	1.45	1.97	1.83	2.00	2.36	1.97	1.96	0.52	2.30	1.60	1.80	1.60	1.70	1.90
Lu	0.41	0.35	0.31	0.23	0.31	0.30	0.30	0.37	0.31	0.33	0.09	0.30	0.30	0.20	0.20	0.30	0.30
Hf	6.10	5.20	3.40	3.40	4.50	4.60	4.50	5.50	3.80	2.00	3.30	4.00	2.70	2.50	2.80	3.10	3.10
Ta	1.04	0.81	0.61	0.58	0.80	0.80	0.81	0.99	0.63	1.02	0.69	1.30	1.00	0.90	0.60	0.70	1.30
Pb	17.00	16.00	15.00	15.00	21.00	19.00	17.00	11.00	15.00	13.00	24.00	51.50	20.40	22.70	26.40	24.40	24.30
Th	14.50	14.40	10.40	11.30	15.10	15.60	15.40	15.60	13.40	15.30	9.40	28.70	25.20	20.60	19.10	21.20	25.70
U	2.32	1.99	1.79	1.77	2.20	1.86	2.03	2.45	1.56	2.29	1.61	4.90	5.10	3.10	3.10	2.90	3.80
(La/Yb) _N	12.92	19.79	15.32	19.64	19.59	21.60	19.69	14.25	18.24	6.37	17.52	4.43	14.79	16.54	15.56	14.81	14.38

N.A = Not Analysis

누대구조가 관찰되며 저어콘 중심부 주변에서 어두운색의 누대구조가 없는 저어콘이 관찰된다. 저어콘의 중심부는 높은 Th/U 비율(0.70-0.22)을 갖는 반면, 저어콘 주변부에서는 두 개의 저어콘(0.26-0.25)을 제외하고는 낮은 Th/U 비율(0.04-0.02)을 갖는다. 12개의 저어콘 중심부와 주변부에 대한 U-Pb 동위원소 분석치를 웨스틸 콘코디아 다이어그램에 도시 했다(그림 2a). 저어콘 중심부에서 2005 ± 6 - 1978 ± 13 Ma의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 연령이 측정되었고, 저어콘 주변부에서는 주로 1828 ± 5 - 1655 ± 6 Ma의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 연령이 측정되었으며 두 개의 입자에서는 201 ± 2 - 192 ± 1 Ma에 해당하는 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연령이 측정 되었다. 저어콘 중심부 측정치들로부터 2001 ± 14 Ma의 상부교차 연대와 243 ± 68 Ma의 하부교차연령을 얻었다(그림 3a). 저어콘 주변부에서의 측정치들로부터는 1837 ± 52 Ma의 상부교차 연대와 196 ± 72 Ma의 하부 교차연대가 측정 되었다.

에서 분리된 저어콘의 크기는 보통 중립질($120\text{-}80 \mu\text{m}$)에 해당하며, 2:1 내지 1.5:1의 종횡비를 갖는다. 음극선발광 영상을 통해 저어콘 내부구조를 확인해본 결과, 저어콘의 중심부에서는 일반적으로 회색내지 밝은 색의 진동누대구조, 호상누대구조가 관찰되며 이와 함께 부분누대구조 또는 누대구조가 없는 부분이 관찰된다. 저어콘 중심부 주변에서 어두운색의 누대구조가 없는 저어콘이 관찰된다. 저어콘의 중심부에서는 넓은 범위의 Th/U 비율(0.59-0.03)을 갖는 반면, 저어콘 주변부에서는 한 개의 저어콘(0.09)을 제외하고는 일관적인 Th/U 비율(0.01)을 갖는다. 15개의 저어콘 중심부와 10개의 저어콘 주변부에 대한 U-Pb 동위원소 분석치를 웨스틸 콘코디아 다이어그램에 도시 하였다(그림 2b). 저어콘 중심부에서 2452 ± 24 - 1921 ± 7 Ma의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 연령이 측정되었고, 저어콘 주변부에서는 1887 ± 47 - 1847 ± 8 Ma의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 연령이 측정되었다. 저어콘 주변부 측정치들로부터 1861.9 ± 6.7 Ma (MSWD=0.69)의 상부교차연령을 얻었고, 불일치도가 높거나 오류가 큰 분석치를 제외 하고 $1861.4 \pm$

4.1.2 흑운모 편암(향적봉)

향적봉(N $35^{\circ}50'10.40''$, E $127^{\circ}42'41.96''$) 흑운모 편암

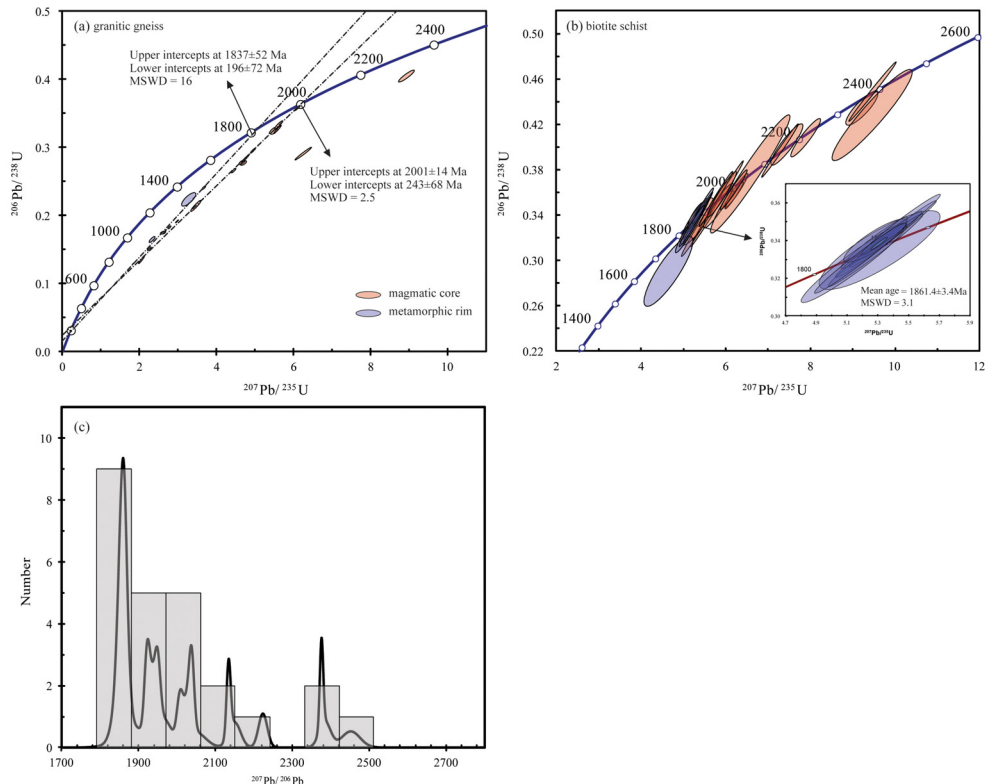


Fig. 3. The Concordia and probability-density plots of SHRIMP U-Pb isotopic analyses of zircons for granitic gneiss.

3.4 Ma (MSWD=3.1)의 일치연령을 얻었다(그림 2b). 화강편마암에서도 1837 ± 52 Ma의 변성연령이 인지되었으나 후기에 일어난 열적교란작용과 높은 오류값으로 볼 때 흑운모 편암에서 확인된 1861.4 ± 3.4 Ma가 좀 더 정확히 변성작용시기를 나타내는 것으로 생각된다.

4.1.3 K/Ar 연대측정

진안분지내에 나타나는 화산암에 대하여 K/Ar 연령 측정을 실시하였다. 염기성 화산암으로 부터는 93.1 Ma의 분출연령을 얻었고 염기성 화산암을 덮고 있는 산성 화산암으로 부터는 90.1-88.1 Ma의 분출 연령을 얻었다. 그리고 산성 화산암을 관입하고 있는 중성질 암맥으로 부터는 76.7 Ma의 관입 연령을 얻었다. 이들 연령은 진안분지내 화산 분출 활동이 93 Ma 경이나 그 이전부터 시작되었으며 76 Ma 경에는 매우 두터운 화산암이 지표에 쌓여 있었던 것을 지시한다. 그리고 화산분출 초기에는 염기성 화

산암이 분출되었고 그 이후 주로 산성 화산암이 분출되었으며 최종적으로 중성 화산암이 분출하였을 가능성을 지시하며 동시에 진안분지 형성 및 퇴적작용이 93 Ma 이전부터 시작되었음을 지시한다. Yi *et al.* (1998)이 양치식물의 포자 연구를 통해 밝혀진 퇴적 연대인 125-130 Ma를 고려해볼 때 진안분지 형성이 시작된 이후 약 30 Ma가 경과된 후 화산 분출이 시작되었을 가능성이 있다.

4.2 지화학 분석

4.2.1 고원생대 화강편마암

화강편마암의 SiO_2 함량은 74.96-71.04 wt.%이며 높은 알칼리 성분($Na_2O=3.37-1.44$, $K_2O=4.34-3.51$)을 갖는 반면 상대적으로 낮은 MgO (1.92-0.27), CaO (1.34-1.24), TiO_2 (0.218-0.106) 그리고 P_2O_5 (0.04-0.03) 성분을 갖는다. 총알칼리 vs. SiO_2 다이어그램에서 대부분의 시료가 화강암 영역에 도시되며(그림 4a), K_2O vs SiO_2 다이어그램에서 High-K 영역에 도시

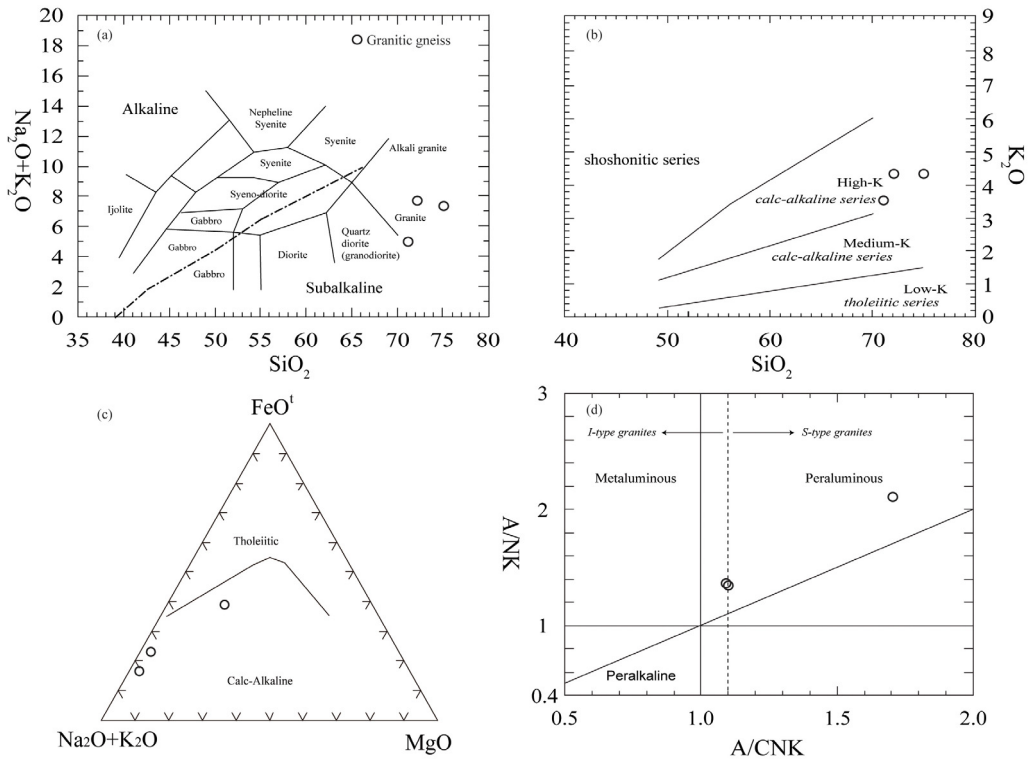


Fig. 4. Geochemical classifications of the granitic gneiss. (a) total alkali vs. SiO_2 diagram (after Cox *et al.*, 1979), (b) K_2O vs. SiO_2 diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976), (c) FeO^t - Na_2O+K_2O - MgO diagram, (d) A/NK vs. A/CNK plot (after Maniar and Piccoli, 1989).

되었다(그림 4b). 암석의 분화 경로를 알아보기 위해 AFM 다이어그램에 도시해본 결과 대부분 섭입작용과 관련 있는 칼크-알칼리 영역에 도시되었다(그림 4c). 화강편마암들을 화학성분에 따라 분류하기 위해 $Al_2O_3/Na_2O + K_2O$ (A/NK) vs. $Al_2O_3/CaO + Na_2O + K_2O$ (A/CNK) 다이어그램에 도시해본 결과 퍼알루미너스한 화강암으로 확인되었다(그림 4d). 한 개의 시료에서 다른 시료에 비해 높은 A/CNK 값이 인지되는데 이는 다른 시료들에 비해 상대적으로 많은 백운모의 함량에 의한 것으로 생각 된다. 화강편마암의 희토류 원소 거동을 알아보기 위해 희토류 원소 다이어그램에 도시해본결과 대부분 상

대적으로 경희토류 원소가 부화되어 있고 중희토류 원소가 결핍되어있는 특징이 나타나고 ((La/Yb)N=56.67-5.92), 유로퓸(Eu)의 부(-)의 이상치가 관찰된다(그림 5a). 화강편마암을 거미 다이어그램에 도시해본결과 상대적 이온반경이 커다란 친석원소가(Large ionic lithophile element) 고장력원소(High field strength element) 보다 대체 적으로 부화되어 있고 니오븀(Nb), 탄탈륨(Ta), 인(P), 티타늄(Ti)의 강한 부(-)의 이상치가 관찰된다(그림 5b). 이는 섭입과 관련된 환경에서 형성된 암석에서 나타나는 특징들이다(Lee *et al.*, 2016). 화강편마암의 지구조 환경을 확인하기 위해 지구조 분별도에 도시했다. Rb vs. Y+Nb 다이어

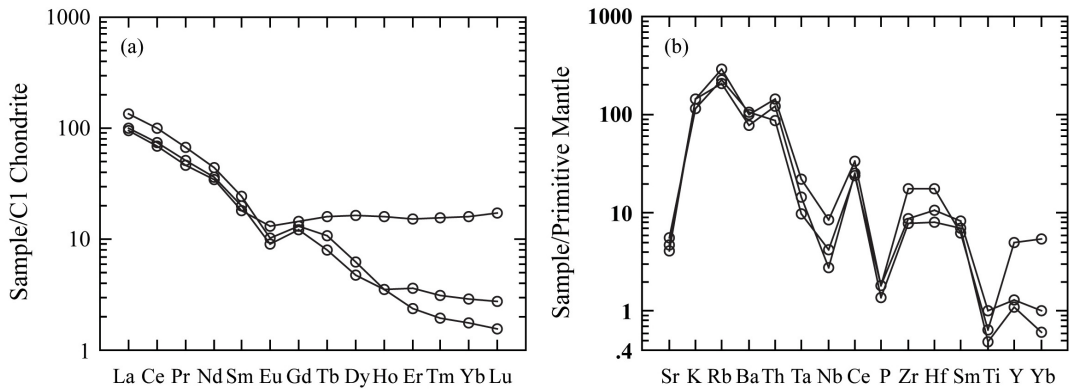


Fig. 5. (a) Chondrite-normalized REE and (b) Primitive-mantle-normalized multi-element patterns for granitic gneiss. These diagrams are normalized to the chondrite and primitive mantle compositions of Sun and McDonough (1989).

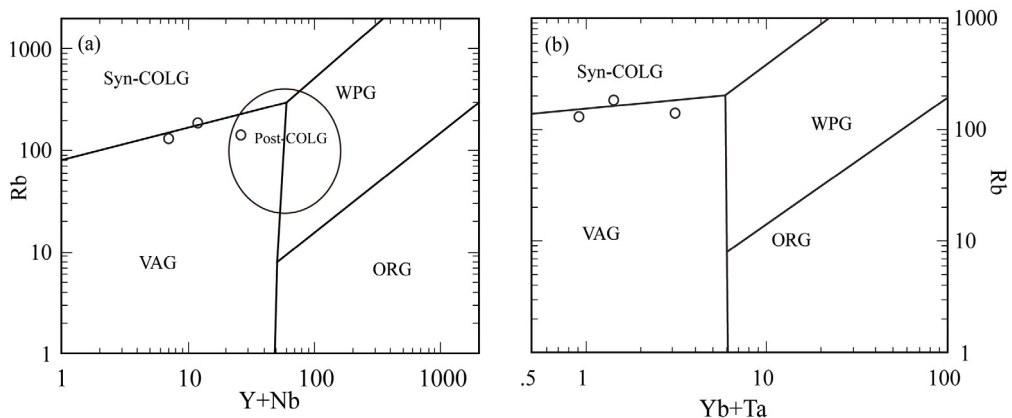


Fig. 6. Tectonic discrimination diagrams for granitic gneiss. (a) Rb vs. Y + Nb (after Pearce *et al.*, 1984), (b) Rb vs. Yb+Ta diagram (after Pearce *et al.*, 1984). Abbreviations in the tectonic discrimination diagrams, Post-COLG = post-collisional granite, Syn-COLG = syn-collisional granite, VAG = volcanic-arc granite, WPG = within-plate granite, ORG = ocean-ridge granite.

그림에서 1개의 시료는 충돌 동시형 화강암 영역에 도시되나 다른 두 시료는 화산호 환경 영역에 도시된다(그림 6a). Rb vs. Yb+Ta 다이어그램에서도 1개의 시료는 충돌 동시형 화강암 영역에 도시되었고 다른 두 시료는 화산호 환경에 도시되었다(그림 6b).

4.2.2 백악기 화산암

진안 분지 화산암은 산성 및 중성 화산암이 주로 나타나며 드물게 염기성 화산암도 나타난다. 진안 분지내 산성 화산암은 총알칼리 vs. SiO_2 다이어그램에서 각각 유문암과 데사이트에 도시되며 염기성 화산암은 현무암에 도시된다(그림 7a). 중성 화산암은 안산암과 현무암질 안산암에 도시된다. 이에 반해 무주에 나타나는 설천 응회암은 산성 화산암인

유문암으로 구성되어 있다(Kim *et al.*, 2008). 두 지역의 산성 화산암은 K_2O vs SiO_2 다이어그램에서 High-K 영역에 도시 되었다(그림 7b). 암석의 분화 경로를 알아보기 위해 AFM 다이어그램에 도시해본 결과 대부분 섭입작용과 관련 있는 칼크-알칼리 영역에 도시 되었다(그림 7c). 또한 진안분지 화산암과 무주 설천 응회암을 화학성분에 따라 분류하기 위해 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (A/NK) vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (A/CNK) 다이어그램에 도시해본 결과, 진안분지 산성 및 중성 화산암과 무주 설천응회암은 각각 2개 시료를 제외하고는 모두 페알루미너스한 암석인 것으로 확인 되었고, 염기성 화산암은 메타알루미너스와 페알루미너스 영역에 각각 한 개씩 찍힌 것이 확인되었다(그림 7d). 진안분지 중성 및 산성질 화산암과 무주 설천응회암의 희토류 원소

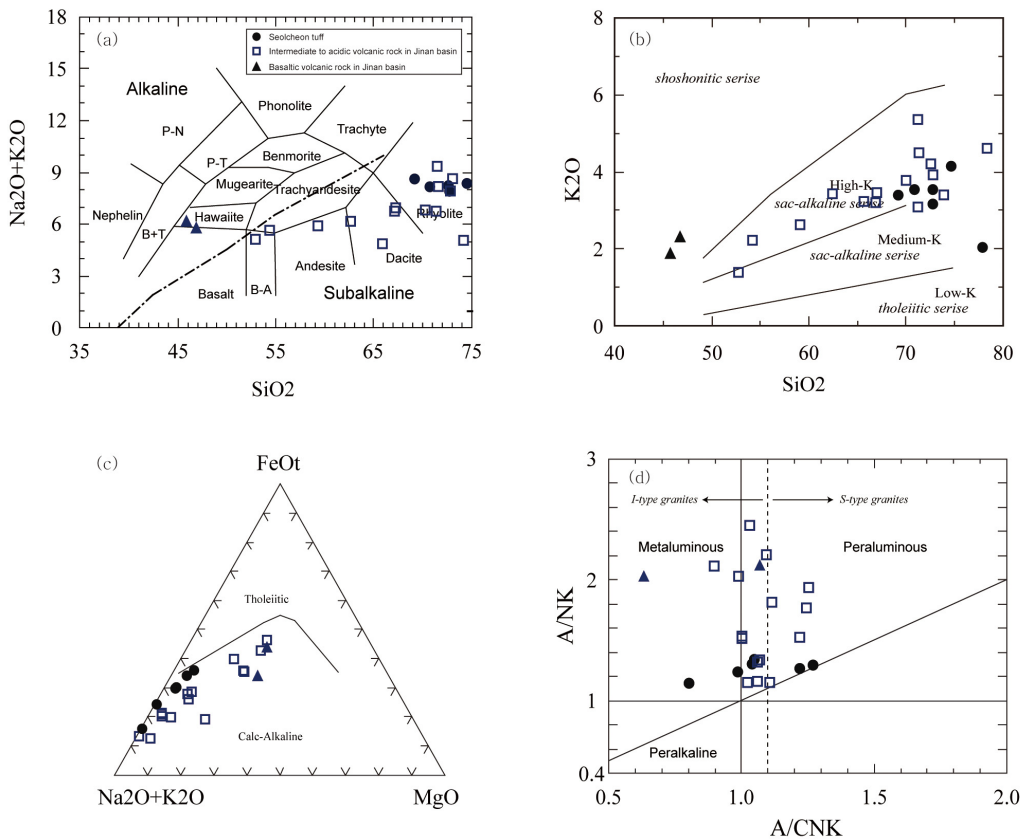


Fig. 7. Geochemical classifications of the seolcheon tuff, acidic to mafic volcanic rocks in the Jinan area. (a) Total alkali vs. SiO_2 diagram (after Cox *et al.*, 1979), (b) K_2O vs. SiO_2 diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976), (c) $\text{FeO}^1\text{-Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O-MgO}$ diagram, (d) A/NK vs. A/CNK plot (after Maniar and Piccoli, 1989).

거동을 알아보기 위해 희토류 원소 다이어그램에 도시해본결과 대부분 상대적으로 경희토류 원소가 부화되어 있고 중희토류 원소가 결핍되어있는 특징이 나타나고((La/Yb)N=21.60-11.46) 일부 시료에서는 유로퓸(Eu)의 부(-)의 이상치가 관찰된다(그림 8a, 8b).

진안분지 내 염기성 화산암에서도 역시 경희토류 원소가 부화되어 있고 중희토류 원소가 결핍되어있는 특징이 나타난다((La/Yb)N=16.70-10.45) (그림 8c). 두 지역에서 나타나는 산성 및 중성 화산암을 거미 다이어그램에 도시해본결과 상대적 이온반경이 커

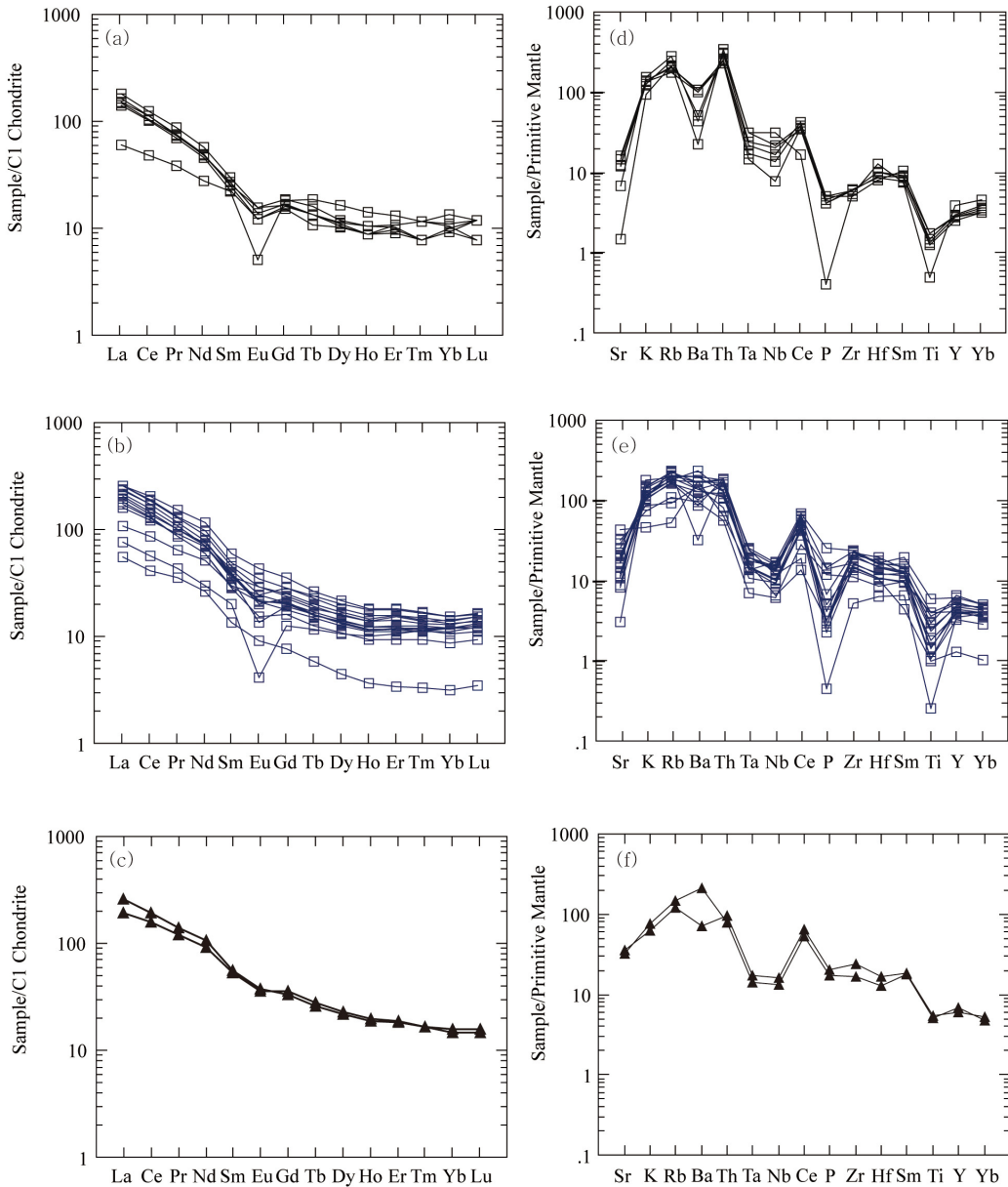


Fig. 8. (a-c) Chondrite-normalized REE and (d-f) Primitive-mantle-normalized multi-element patterns for seolcheon tuff, acidic to mafic volcanic rocks in the Jinan area. These diagrams are normalized to the chondrite and primitive mantle compositions of Sun and McDonough (1989). Symbols are same as those in Fig. 7.

다란 친석원소(Large ionic lithophile element) 고장력원소(High field strength element) 보다 대체 적으로 부화되어 있고 니오븀(Nb), 탄탈륨(Ta), 인(P), 티타늄(Ti)의 강한 부(-)의 이상치가 관찰된다(그림 8d, 8e). 이는 섭입과 관련된 환경에서 형성된 암석에서 나타나는 특징들이다. 한편 염기성 화산암의 경우 산성 및 중성 화산암과 마찬가지로 상대적 이온반경이 커다란 친석원소(Large ionic lithophile element) 고장력원소(High field strength element) 보다 대체 적으로 부화되어 있으며 니오븀(Nb), 탄탈륨(Ta)의 부(-)의 이상치가 관찰되나 산성 및 중성 화산암과 달리 인(P), 티타늄(Ti)의 강한 부(-)의 이상치가 관찰되지 않는다(그림 8f). 또한 지구조 환경을 확인하기 위해 지구조 분별도에 도시해본 결과, Rb vs. Y+Nb와 Rb vs. Yb+Ta 다이어그램에서 모든 시료가 화산호 환경 영역에 도시된다(그림 9a, 9b). 이에 반해 염기성 화산암의 경우 Ti-Zr-Y, Ti-Zr-Sr, TiO_2 -MnO-P₂O₅ 지구조 분별 다이어그램에서는 calc-alkaline basalt에 도시되나 Zr/Y-Zr 지구조 분별 다이어그램에서는 판내부환경에 도시된다(그림 10a-10d).

5. 진안-무주지역의 지구조 환경

진안-무주 지역은 영남육괴 동북부인 소백산 지괴와 마찬가지로 2.0-1.9 Ga 경인 고원생대에 대륙화산호 지역이었으며 1.86 Ga 경에 변성작용을 받았다

(Lee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012, 2014). 이는 진안-무주 지역이 소백산 지괴의 연장선임을 지시한다. 진안-무주 지역과 연결되는 경북 및 강원도에 분포하는 소백산 육괴에 대한 연구와 무주 구상화강편마암에 대한 연구는 진안-무주 지역의 변성작용이 6.0-8.4 kbar (약 20-30 km) 깊이에서 일어났으며 변성작용을 일으킨 지구조운동은 대륙충돌었음을 지시한다(Kwon *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2010; Oh *et al.*, 2013). 진안-무주 지역은 쥐라기 시기에도 역시 대륙화산호 지역이었고 이시기에 화강암의 관입이 있었다. 쥐라기 화강암의 관입 깊이가 Cho and Kwon (1994)에 의해 대략 3.3-6.1 kbar로 예상되었으며 이는 대략 10-20 km 지하에 해당한다. 따라서 고원생대 변성암이 쥐라기 화강암에 관입되기 이전에 10-28 km 깊이까지 융기하여 있었음을 알 수 있다. 백악기 시기에도 진안-무주 지역은 쥐라기에 이어 계속적으로 대륙화산호에 위치하고 있었으나 화산작용을 일으키는 섭입대가 쥐라기에 비해 한반도에서부터 떨어진 상태였다. 백악기에 일어난 좌수향 운동에 의해 형성된 진안 및 무주 분지들에 퇴적암이 백악기 중기까지 퇴적되었으며 그 주변에 화산 분출이 활발히 일어났다(Ryang, 2013). 고원생대 변성암과 쥐라기 화강암이 백악기 시기의 화성암에 의해 관입되거나 퇴적암과 화산쇄설암으로 덮여있는 사실은 백악기 화성작용 및 퇴적작용 이전에 진안-무주 지역이 지표 혹은 지표에 가까운 지하로 융기하여 있었음을 지시한다. 진

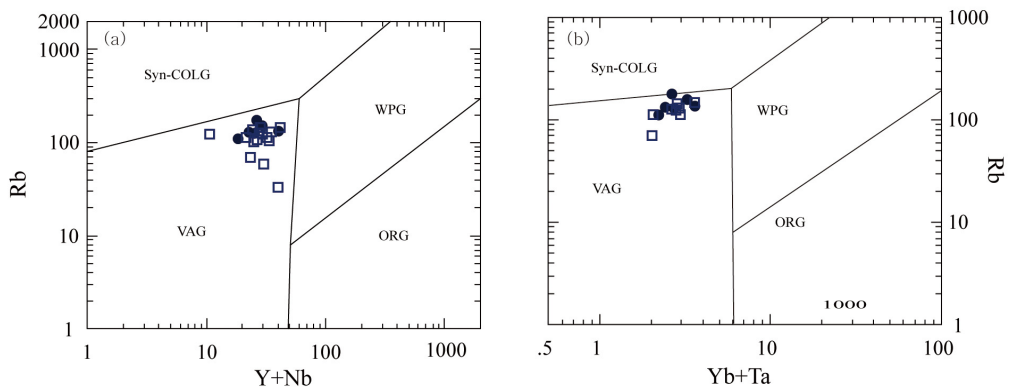


Fig. 9. Tectonic discrimination diagrams for seolcheon tuff and acidic to intermediate volcanic rocks in the Jinan area. (a) Rb vs. Y + Nb (after Pearce *et al.*, 1984), (b) Rb vs. Yb+Ta diagram (after Pearce *et al.*, 1984). Abbreviations in the tectonic discrimination diagrams, Syn-COLG = syn-collisional granite, VAG = volcanic-arc granite, WPG = within-plate granite, ORG = ocean-ridge granite.

안-무주 지역에 많이 나타나는 감입곡류는 백악기 퇴적 및 화산작용 이후에도 용기가 일어났음을 지지한다.

5.1 선캠브리아기 지구조환경

화강편마암에서 보여주는 높은 알칼리성분, A/CNK 값과 낮은 MgO, CaO 값으로 미루어 볼 때 화강편

마암은 S-type 화강암인 것으로 판단되며(그림 4). 경희토류원소의 부화된 패턴과 음의(-) Nb, Ta, Ti, P 이상치를 고려해 볼 때 화강편마암의 근원암은 화산호 환경에서 만들어진 마그마일 가능성이 높다(Lee *et al.*, 2016). 지구조 분별도에서 대체적으로 화산호 환경 영역에 도시되는 걸로 보아 화산호 환경에서 형성된 것으로 판단된다(그림 5, 6). 화강편마암의

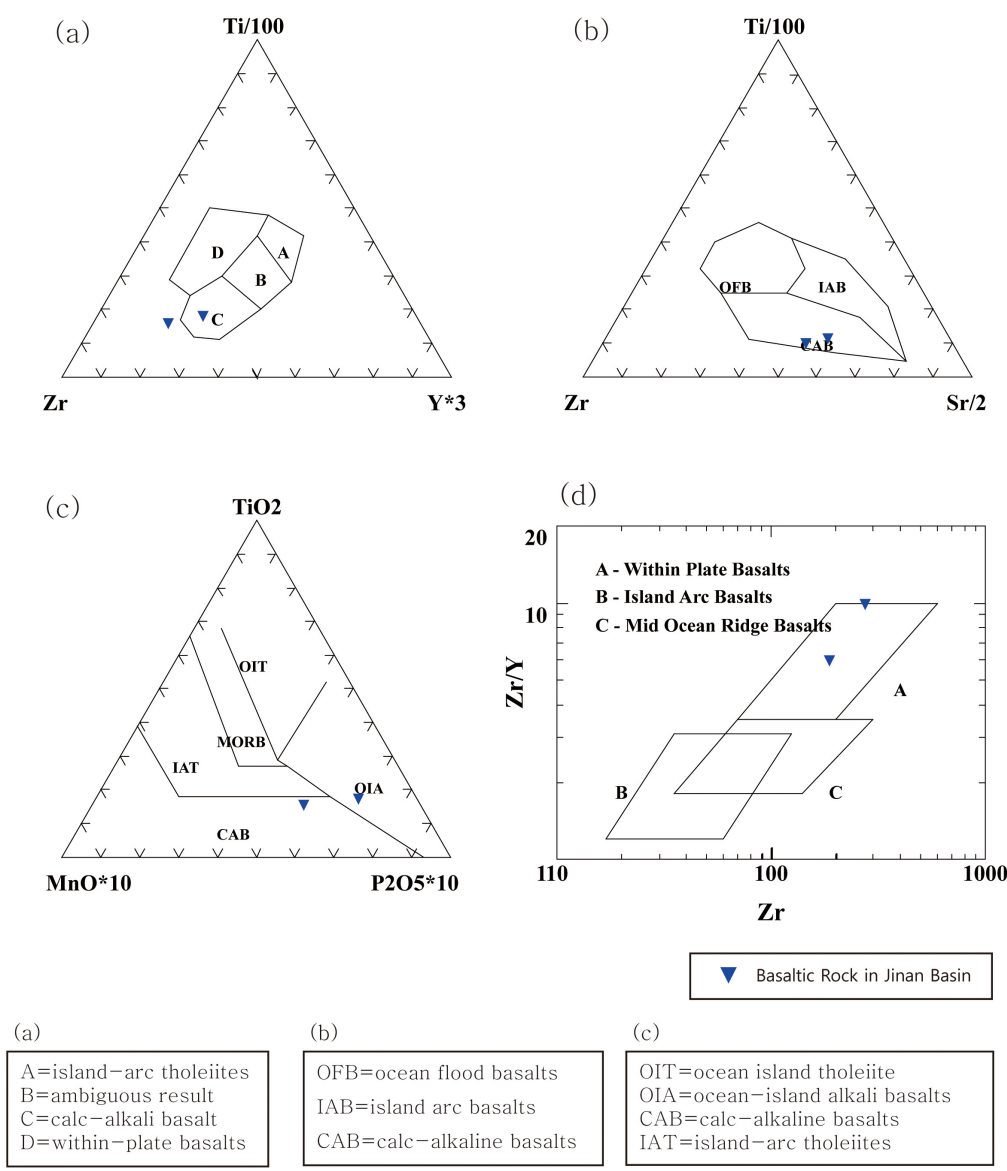


Fig. 10. Tectonic discrimination diagrams for mafic volcanic rocks in the Jinan area. (a) Ti/100-Zr-Y*3 (after Pearce and Cann, 1973), (b) Ti/100-Zr-Sr/2 (after Pearce and Cann, 1973), (c) TiO₂-MnO*10-P₂O₅*10 (after Mullen, 1983), (d) Zr/Y vs Zr (after Pearce, 1983).

근원암이 관입한 시기를 알아보기 위해 수행한 연대 측정 결과 관입 시기는 약 2.0 Ga로 확인되었다. 흑운모 편암에서 확인된 가장 젊은 상속핵 연대인 1921 ± 7 Ma (그림 2c)를 고려해 볼 때 흑운모 편암의 근원물질은 약 1,921 Ma 이후 퇴적 되었다가 1,861 Ma경에 변성작용을 경험했던 것으로 보이며 이 시기에 화강편마암의 근원암도 동시에 변성작용을 경험한 것으로 보인다. 이러한 지질학적 현상은 2.0-1.86 Ga 경에 소백산지역에서 일어난 지질학적 사건과 유사하며(Kim *et al.*, 2014), 이를 종합해 보면 소백산과 덕유산을 연결하는 소백산지괴는 2.0-1.9 Ga경에 대륙화산호 지역이었으며 이후 1.86 Ga경에 광역변성작용을 받았고, 소백산지괴에 대한 기존연구를 통해 연구지역의 고원생대 화성암과 퇴적암이 $767-815^{\circ}\text{C}$, 6.0-8.4 kb 조건에서 변성작용을 받았을 것으로 예상할 수 있다(Kown *et al.*, 2003). 이는 이들 암석이 지하 20-30 km에 지하에서 변성을 받았음을 지시한다.

5.2 고원생대 이후와 쥐라기 까지의 지구조 환경

연구지역에는 고원생대 이후부터 쥐라기 이전까지 형성된 암석이 거의 나타나지 않으며 쥐라기에는 한반도 동부와 남부에 형성되어있던 섭입대에 의해 형성된 대륙화산호 환경에서 생성된 화강암이 연구

지역을 관입하였다. 쥐라기 화강암이 관입한 깊이가 대략 10-20 km임을 고려하면 고원생대 기저암이 쥐라기 이전에 10-20 km 지하까지 용기되었음을 지시한다. 이후 고생대 변성암과 쥐라기 화강암은 다시 백악기 퇴적과 화산작용 이전에 지표나 지표 근처까지 용기하였고 이때 쥐라기 이전에 지표에 형성되었던 퇴적암 및 화산암은 대부분 침식, 삭박되어 사라진 것으로 추정된다.

5.3 백악기-신생대의 지구조 환경

백악기에 해당하는 130-100 Ma 사이에 시베리아 대륙이 한국과 중국을 포함한 대륙과 충돌하면서 인도를 제외한 아시아가 최종적으로 완성되었고 이때 일어난 충돌이 남쪽으로 압축력을 가하였다(Lee *et al.*, 2011). 이 압축력에 의해 한반도에 존재하던 북동 방향의 주향이동 단층들이 좌수향으로 움직였다(그림 11). 이때 이러한 주향이동 단층들이 서로 어긋나는 지역에서 인장력이 가해지며 인리형 분지들이 한반도내 여러 지역에서 형성되었다(Lee, 1999; Ryang, 2013). 여러 북동 방향의 주향이동 단층들이 많이 발달되어 있는 호남전단대에 위치한 진안 지역에서도 소규모의 인리형 분지인 진안 분지가 형성되었다(Lee, 1992; Lee and Chough, 1999; Noh *et al.*, 2009). 이

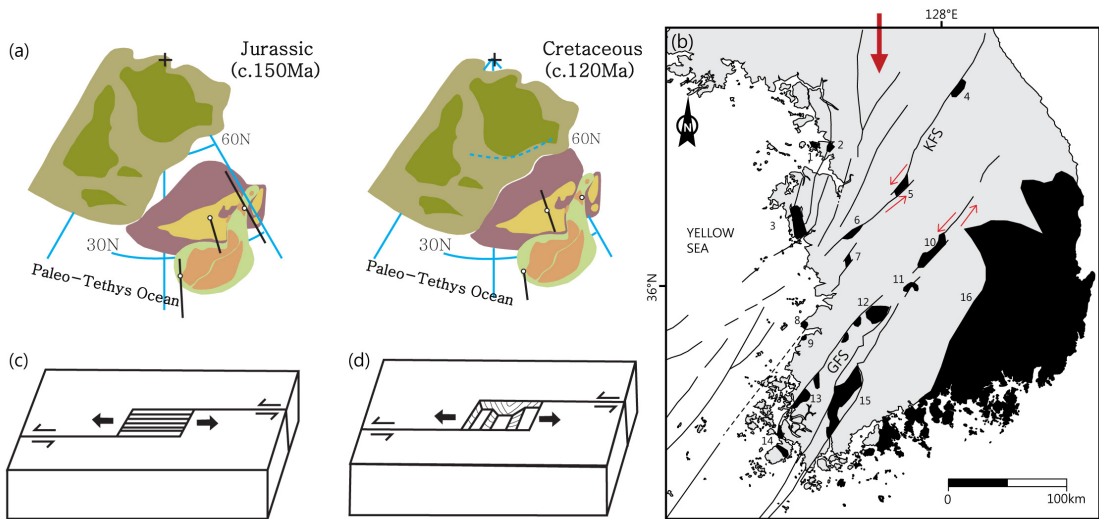


Fig. 11. (a) Tectonic reconstruction map of the East Asia region during Jurassic to Cretaceous (after Lee *et al.*, 2011), (b) The distribution map of the Cretaceous basins and strike-slip fault system in the Korean Peninsula. (after Lee *et al.* (1999) and Geology of Korea, (1998) and Ryang, 2013), (c) The mimetic diagram of the sinistral slip fault, (d) The mimetic diagram for the sunk sedimentary basin.

러한 인리형 분지는 무주 에서도 형성되었다(Park and Lee, 1997). 진안 분지의 남동쪽 경계부에는 경사가 급한 분지 경계가 존재하였고 이 지역에 역들이 대규모로 공급되어 분지 내 호수 하부에 대규모의 역암층을 형성시켰다. 진안 및 무주 분지 형성시 분지 주변에 발달한 단층이 점점 깊은 곳까지 연결되어 지하 깊은 곳에 존재하던 마그마가 지표로 올라올 수 있는 길을 제공하였고 인장력에 의해 분지 하부의 지각의 두께가 감소함으로써 분지 주변과 분지 내부에서 많은 화산작용이 일어났다. 그 결과 진안 분지 주변에는 운장산, 구봉산, 천반산이 만들어졌다. 본 연구에서 수행된 연령 측정과 기본 연구를 종합해보면 진안 분지는 130 Ma 경 이전의 백악기에 생성되기 시작되었고 관련된 화산작용은 88-75 Ma 까지 지속되었다(Yi *et al.*, 1998). 무주분지도 진안 분지와 유사한 지구조운동을 받았고 그 결과 역암을 포함한 퇴적암이 분지내 호수에 퇴적되면서 분지내와 주변에 화산작용이 일어났다(Park and Lee, 2000). 그 결과 무주 분지 상부에 화산암이 쌓였으며 주변에 설천리 응회암이 형성되었다.

인도 대륙이 곤드와나 초대륙 으로부터 분리되어 북쪽으로 이동해서 55-25 Ma 사이에 아시아와 충돌

했다(Cho *et al.*, 2014). 이 때 발생한 충돌은 동쪽으로 압축력을 발생시켰고 한반도도 그 영향을 받았을 것으로 생각된다. 이러한 동쪽 방향으로의 압축력에 의해 한반도내 북동 방향의 단층들이 백악기와 반대로 우수향 운동을 했을 것으로 예상된다(그림 12). 우수향 운동을 할 경우 좌수향 운동시 인장력을 받던 부분이 압축력을 받게 되어 상승하게 된다. 이러한 상승에 의해 진안분지를 포함하여 호남전단대를 따라 형성된 분지들이 주변 화산암과 함께 융기하였을 것으로 예상된다. 이 시기에 진안분지의 역암도 상승하여 마이산을 형성하였고 무주 분지내 퇴적암과 화산암도 융기하여 적산산을 형성하였다. 이렇게 상승한 분지내 퇴적암들과 그 주변 화산암에 의해 노령산맥이 형성되었을 것으로 생각된다. 현재 이에 대한 지질학적인 증거는 제시되지 못했다. 하지만 노령산맥에 의하여 분리된 만경-동진을 포함한 금강수계와 섬진강 수계에 서식하는 쉬리에 대한 유전자 조사결과 노령산맥에 의해 분리된 두 수계에 살고 있는 쉬리는 현재 형태가 다르나 38 Ma 이전에는 동일한 조상을 갖고 있었음이 확인하였고 이를 근거로 노령산맥이 38 Ma 경에 생성되었다는 연구결과가 발표되었다(Song and Bang, 2015). 이 시기는 앞서 언

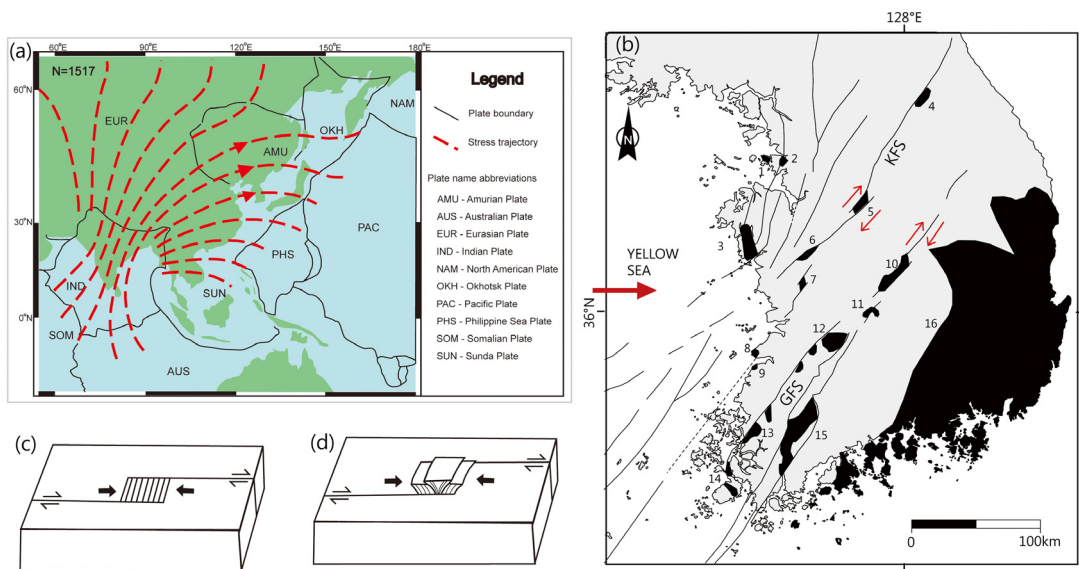


Fig. 12. (a) Regional stress map of the East Asia (after Cho *et al.*, 2014), (b) the distribution map of the Cretaceous basins and strike-slip fault system in the Korean Peninsula. (after Lee *et al.* (1999) and Geology of Korea, (1998) and Ryang, 2013), (c) the mimetic diagram of the dextral slip fault, (d) the mimetic diagram for the uplifted sedimentary basin.

급된 인도와 아시아대륙이 충돌한 시기 내에 속한다. 이는 노령산맥이 인도 충돌 의해 일어난 한반도 내 북동방향의 주향이동 단층들의 우수향 이동에 의해 호남 전단대내 백악기 분지들이 주변 화산암과 함께 용기하여 형성되었다는 해석이 타당성이 있음을 지시한다. 하지만 이를 명확히 밝히기 위해서는 앞으로 많은 연구가 필요하다 그리고 이 시기에 노령산맥과 지리산 줄기 사이에 존재하던 광주 주향이동 단층대에서도 용기가 일어나 무등산을 포함한 북북동 방향의 산줄기가 생겨나 영산강 수계과 섬진강 수계가 분리하였을 것으로 예측된다.

6. 중요 지질 유산

무주와 진안지역에는 고원생대와 백악기에 형성된 암석들로 구성된 중요한 지질유산들이 많이 분포하고 있다(그림 13). 무주 지역의 대표적인 지질유산으로는 무주구천동의 향적봉, 구월담, 비파담, 인월

담, 파회와 수심대 그리고 덕유산 줄기에 해당되는 칠연 및 용추 폭포가 있다(그림 2). 그리고 무주와 덕유산 사이에 위치한 천일 폭포를 포함하는 적상산과 무주 북쪽에 나타나는 천염기념물인 무주 구상화강 편마암도 대표적인 지질유산이다. 진안지역의 대표적 지질유산으로는 역암으로 구성된 마이산과 주변에 화산암으로 구성된 천반산, 구봉산 그리고 운일암 반일암이 있다. 그리고 마이산에는 매우 특이한 풍화산물인 타포니가 나타나며 백운교 주변에는 진안분지 형성시 호수로 유입되는 퇴적작용을 잘 보여주는 길버트 타입의 퇴적구조가 나타난다.

6.1 고원생대 암석내 지질유산

덕유산은 고원생대 암석으로 주로 이루어져 있으며 향적봉, 구월담, 비파담, 인월담, 용추 폭포 등의 지질유산을 포함하고 있다. 향적봉에는 편암이 그리고 구월담에는 혼성질 편마암이 나타난다. 그리고 비파담, 인월담, 용추폭포는 화강편마암으로 구성되



Fig. 13. distribution map for the important geoheritage site.

어있다. 또한 무주 북쪽에 나타나는 무주 구상화강 편마암도 고원생대 암석이다(그림 14).

6.1.1 향적봉, 구월담, 비파담, 인월담

덕유산 북쪽에 발달한 내 무주구천동에는 구월담,

비파담, 인월담을 비롯한 많은 담과 폭포들이 절경을 이루며 위치하고 있고 덕유산 서쪽에 발달된 칠연계곡에도 칠연폭포와 용추폭포가 분포되어 있다. 덕유산을 포함한 무주 지역은 고원생대인 20-19억 년 전에 안데스 산맥과 같은 대륙화산호 환경에 놓



Fig. 14. The photo for the panorama of the Paleoproterozoic geoheritage in the Muju area. (a) The jeoksangsan, (b) The guwoldam, (c) The bipadam, (d) The inwoldam, (e) The youngchoo water fall, (f) The orbicular granite gneiss.

여있었다. 이 시기에 섭입 되는 해양지각과 퇴적물로부터 공급된 물과 유체에 의해 화산호 하부 맨틀이 녹아 마그마가 형성되었고 형성된 마그마는 주변 맨틀보다 가벼워져 상승하여 맨틀위에 위치한 지각에 열을 공급하였다. 이 열에 의한 지각의 용융에 의

해 형성된 마그마가 굳어서 비파담, 인월담을 구성하고 있는 화강편마암의 원암인 화산호 화강암을 형성하였다. 그리고 구월담에 나타나는 변성암인 혼성질 편마암의 원암은 화산호 환경에서 퇴적된 퇴적암이다. 향적봉에는 편암이 나타나며 이들의 원암 또



Fig. 15. The photo for the panorama of the Cretaceous geoheritage in the Jinan area. (a) The susimdae, (b) The Paohe, (c) The Maisan, (d) The tapony, (e) Structure of the gilbert type delta (after Noh *et al.*, 2009).

한 화산호 환경에서 형성된 퇴적암이다. 이들 지질 유산을 구성하는 고원생대 화성암과 퇴적암들은 18억 6천만 년 전 경에 강한 광역변성작용을 받아 화강편마암, 혼성질편마암, 편암으로 변성되었으며 변성작용의 원인은 확실치는 않으나 대륙충돌에 의해 발생하였을 가능성이 있다.

향적봉은 소백산맥 줄기와 지리산 줄기가 서로 만나는 곳으로 한반도에서 여섯 번째로 높은 산이다. 이곳에서는 맑은 날 지리산 노고단을 포함한 주변의 고봉들이 잘 관찰된다(그림 14a). 구월담에 나타나는 혼성질 편마암은 화산호 주변에서 만들어진 퇴적암들이 지구조 운동에 의해 지하로 밀려들어가 높은 온도와 압력을 받게 되고 이로 인해 변성작용을 받아 만들어진 변성암이다. 변성작용시 맑은 광물(석영, 정장석, 사장석)로 이루어진 암석 일부가 녹아 유체가 되어 주변의 녹지 않은 어두운 광물로 구성된 부분을 관입하고 섞이면서 혼성질 편마암이 만들어졌다(그림 14b). 비파담은 좁은 폭포와 폭포하부의 커다란 담이 마치 비파 모양을 하고 있다. 비파담 주변에는 돌개구멍(포트홀, pothole)이 많이 나타나며 하부의 커다란 담도 큰 돌개구멍으로서 이는 단층이나 절리 등에 자갈이나 암괴가 들어가 빠져나오지 않고 물살에 따라 회전하면서 암석을 깎아내서 만들어졌다. 유속이 증가하고 유량이 풍부해지면서 회전운동이 더 잘 일어나고 그 결과 구멍이 커져 비파담과 같은 큰 담을 형성되었을 것으로 생각된다(그림 14c). 인월담은 약간 계단형의 평편한 지형을 보여주며 이는 인월담을 구성한 화강편마암 내에 발달한 수평 및 수직 절리를 따라 일어난 풍화 침식의 결과로 생각된다(그림 14d).

6.1.2 용추폭포, 무주 구상화강편마암

용추폭포와 칠연폭포는 구월담과 인월담과 마찬가지로 20-19억 년 경에 화산호 환경에서 형성된 화강암으로 구성되어 있으며 18억 6천만 년 전 경에 변성을 받았다. 이 폭포들은 계단식 형태를 잘 보여주며 특히 용추폭포에서 계단식 폭포가 잘 발달되어 있다(그림 14e). 이러한 계단식 폭포는 편마암내에 발달한 수평 수직 절리나 단층을 따라 일어나 풍화 침식의 결과로 생각된다. 무주 북쪽에 나타나는 무주 구상화강편마암은 20-19억년 경에 화산호 환경에서 관입한 화강암질 마그마대로 빠져 들어간 작은 크기

의 퇴적암들이 18억 6천만년 경에 변성을 받아 형성된 것으로 생각된다. 무주 구상 화강편마암은 검은 타원형의 무늬들로 구성되어 있어 호랑이를 연상시키기도 하며 일부 타원형의 무늬는 검은 중심부와 우백색의 가장자리 띠로 구성되어 있어 마치 과거 화폐인 엽전을 연상케 한다(그림 14f). 이러한 타원형의 무늬는 마그마대로 빠져 들어간 작은 규모의 퇴적암이 원래 역암을 구성하고 있던 둥근 역이였기 때문일 수도 있고 변성과정 중 만들어졌을 가능성도 있다. 그리고 우백색의 가장자리 띠는 변성작용시 퇴적암의 일부가 녹아 만들어진 유체가 빠져나가다 검은 중심부 주변에서 결정화되어 형성되었을 것으로 생각된다.

6.2 백악기 암석내 지질유산

6.2.1 수심대와 파회

수심대와 파회는 설천리 응회암으로 구성된 외 무주구천동에 위치한다(그림 15a, b). 이 지역에서는 1억년전 백악기에 화산이 폭발하였으며 화산폭발시 공중으로 비산한 암편, 광물, 화산재, 용암이 떨어져 쌓여 만들어진 화산쇄설암으로 이루어져있다(Park and Lee, 1997; Kim *et al.*, 2008). 이들 뜨거운 화산쇄설물이 쌓인 후 식으면서 부피가 감소하였고 이때 많은 수직 및 수평 절리(암석 내에 생성된 균열)가 생성되었다. 이후 하천에 의한 침식 작용 시 수직 절리를 따라 암석이 무너지면서 절벽과 여러 형태의 봉우리가 형성되었으며 수평절리 침식에 의해 평평한 바닥을 형성되어 절벽과 평바위가 하천과 잘 어우러진 절경인 수심대가 형성되었다. 수직 절리는 북동 및 북서 두 방향으로 발달하였다. 하천은 주로 북서 방향의 절리를 따라 생성되었으나 일부구간에서 북동 방향 절리를 따라 하천흐름이 바뀌었다가 다시 북서 방향으로 바뀌면서 하천이 거의 수직으로 굽어지는 파회가 형성되었다.

6.2.2 마이산과 타포니, 길버트타입 구조

백악기에 해당하는 1억3천만 년 전—8천만 년 전 사이에 시베리아 지괴가 한국과 중국을 포함한 지괴와 충돌하면서 남쪽으로 가한 압력에 의해 한반도내 존재하던 북동 방향 주향이동 단층들이 좌수향 운동을 하였다. 이때 두 좌수향 주향이동 단층 사이에 위치한 진안 지역이 잡아당겨져 가라앉아 진안분지가

형성되었다(그림 11). 이때 가파른 경사를 가졌을 것으로 예상되는 진안분지 동남쪽 경계에 굽은 자갈과 바위가 공급되었다. 이 퇴적물들이 분지 내에 형성된 호수에 퇴적되어 콘크리트와 비슷하게 생긴 역암이 형성되었다. 그 후 3천 8백만 년 전 경 인도가 아

시아대륙과 충돌하면서 동쪽으로 가한 힘에 의해 한반도내 북동 방향의 주향이동 단층들이 백악기와 반대로 우수향으로 움직이면서 진안 분지에 압축력이 가해졌다(그림 12). 이로 인해 호수 밑에서 형성된 역암이 솟아올라 마이산을 포함한 주변의 역암으로



Fig. 16. The photo for the panorama of the Cretaceous geoheritage in the Muju and Jinan area. (a) The cheonbansan, (b) The gubongsan, (c) The woonilam-banilam, (d) The cheonil water fall, (e) The hyangjeokbong.

형성된 산들을 형성되면서 진안고원이 만들어졌다(그림 15c). 이 시기에 마이산과 함께 북동쪽의 적상산에서 남서쪽의 내장산으로 연결되는 노령산맥이 만들어졌고 마이산을 포함한 노령산맥의 능선을 중심으로 북쪽의 금강 수계와 남쪽의 섬진강 수계가 나뉘어졌다. 그 결과 양편 수계의 어류를 포함한 생태계가 분리되어 진화하였다.

마이산의 표면에 타포니라 불리는 구멍들이 나타난다(그림 15d). 역암은 자갈과 바위가 석회질 혹은 점토질로 구성된 기질에 의해 서로 결합된 암석이다. 오랜 세월이 지나면서 지하수에 의해 역암내 석회질 기질이 녹아나오거나 겨울에 역암내 틈으로 유입된 물이 얼고 녹으면서 발생하는 동결쪼기작용에 의해 기계적 풍화를 받아 역암의 결합력이 약화된다. 그 결과 역암이 역암으로 떨어져 나와 작은 구멍이 형성된다. 이 현상이 계속되면서 작은 구멍들이 서로 연결되어 확장되어 타포니가 형성되었다. 타포니는 햇빛이 잘 비쳐 동결쪼기작용이 잘 일어날 수 있는 남쪽 면에 잘 발달된다.

진안분지 남동쪽 경계에 해당하는 백운교 인근 하천 주변의 노두에 길버트형 퇴적구조가 잘 나타난다. 이는 진안분지 남동부 경계에서는 빠르게 흐르던 하천에 의해 운반되던 퇴적물이 에너지가 적은 잔잔한 호수에 공급되어 퇴적되었음을 지시한다(그림 15e).

6.2.3 천반산, 구봉산 및 운일암반일암

진안분지의 동쪽과 북쪽에 위치한 주변지역에는 대체로 남북 방향으로 발달한 화산암들이 나타나며 이들 화산암들은 천반산, 구봉산 그리고 운일암반일암을 포함한다. 이 지역에서는 9천만 년 전과 8천만 년 전 사이에 백악기에 화산작용이 일어났다. 천반산은 화산폭발시 공중으로 비산한 암편, 광물, 화산재, 용암이 떨어져 쌓여 만들어진 화산쇄설암으로 이루어져있다(그림 16a). 화산쇄설암 형성 이후 지각이 빠르게 융기하였고 이에 의해 하방 침식이 수직적으로 강하게 일어났다. 그 결과 이 지역이 완만한 평지형이었을 때 발달하였던 곡류하천의 형태가 잘 유지되면서 곡선형의 수직 절벽과 하안단구가 함께 나타나는 감입곡류가 형성되었다. 곡선형의 수직 절벽은 하안 단구와 함께 장엄하고 아름다운 천반산의 경치를 제공한다.

구봉산은 선형으로 나타나는 산줄기로 9개의 봉

우리로 구성되어 있다(그림 16b). 구봉산의 하부는 반정질을 보이는 반심성암으로 구성되어 있으며 상부로 가면서 반정의 크기가 감소하다가 최상부에서는 거의 유리질로 구성된 유문암으로 변화한다. 상부로 갈수록 암석 내에 수직 방향의 맥들이 많이 발달하고 있다. 이는 구봉산이 마그마가 유입된 선형의 관입체이며 하부는 지하에서 상대적으로 천천히 냉각되었고 상부는 지표에 노출되어 빠르게 냉각되었음을 지시한다.

운일암반일암 계곡의 암석들은 약 9천8천만 년 전 사이 백악기에 진안분지 형성시 생성된 단층을 따라 지표로 이동하여 분출한 형성된 유문암질 용암층들이 쌓여서 형성되었다(그림 16c). 운일암 반일암 계곡 유문암내에는 용암의 흐름에 의해 얇은 줄무늬 조직이 자주 관찰되며 용암이 흘러내린 구조가 절벽면에 나타나기도 한다. 운일암반일암 계곡의 유문암내에 형성된 수평 및 수직 절리의 간격이 넓다. 따라서 수평 및 수직 절리를 따라 일어난 풍화 침식에 의해 큰 바위 덩어리가 계곡으로 떨어져 계곡에 많은 거석이 나타난다. 때로는 큰 바위 덩어리가 산 정상에 남아 돌 부처의 얼굴 모양을 한 대불바위를 포함한 여러 기이한 모양을 형성시키고 있으며 하천의 거석과 함께 절경은 만들고 있다. 운일암반일암을 포함하는 운장산 줄기는 남북으로 발달하여 금강 수계와 동진-만경강 수계를 나누고 있다.

6.2.4 적상산과 천일폭포

적상산은 마이산을 형성한 진안분지와 함께 만들어진 무주분지 내에 퇴적된 퇴적암과 그 위를 덮는 화산암으로 구성되어있으며 진안분지와 마찬가지로 신생대에 융기하여 적상산을 형성하였을 것으로 생각된다. 적상산 상부의 저수지가 화구였을 가능성이 있어 이에 대한 연구가 필요하다. 적상산 상부는 화산 폭발시 공중으로 비산한 화산재, 암석파편, 광물들이 떨어져 쌓인 화산쇄설암인 응회암으로 구성되어있다. 이 응회암이 두껍게 쌓인 후 식으면서 발생한 부피 감소에 의해 수직 균열인 절리가 많이 생성되었고 그 중 일부 절리가 벌어져 넓은 수직 틈이 생겼고 그 수직 틈을 따라 물이 흘러내면서 특이한 폭포인 천일폭포가 만들어졌다(그림 16d). 또한 수직 절리에 의한 깎아지른 듯한 암벽에 빨간 단풍나무가 많아 적상산이라는 이름이 지어질만큼 아름다운 경

관을 자랑한다(그림 16e).

7. 진안 무주 지역의 지질공원으로서의 중요성

무주-진안 지역에서는 여러 개의 산줄기가 만나고 그 결과 여러 개의 하천이 만나는 곳이다(그림 17). 무주 덕유산 정산인 향적봉은 한반도에서 6번째로 높은 산으로서 이곳에서 소백산에서 시작하여 남동쪽으로 뻗은 소백산맥의 줄기와 남북 방향으로 발달된 지리산 축이 만나는 곳이며 낙동강 수계와 금강 수계가 나누어지는 분수령에 위치하고 있다. 그리고 무주에 위치한 적상산은 서남쪽으로는 노령산맥이 시작되는 장소이다. 이곳에서 시작된 노령산맥은 진안의 마이산으로 이어진다. 마이산을 중심으로 그 주변의 화산들은 노령산맥을 형성하면서 금강 수계와 섬진강 수계를 나눈다. 또한 대략 북쪽으로 뻗어있는 운장산을 포함한 화산지형은 금강 수계와 동진-만경강 수계를 나눈다. 이렇듯 무주-진안 지역은 세계의 산줄기가 서로 만나고 4개의 수계가 나누

어지며 한반도 내륙에서 지리산 다음으로 높은 향적봉을 포함하고 있는 남한의 중심으로 볼 수 있다. 또한 무주-진안은 이러한 다양한 지질 및 지리적 요인에 의해 매우 다양한 생태, 문화, 역사가 발생하고 존재해 온 곳이기 때문에 지질을 중심으로 생태, 문화, 역사 자원이 서로 잘 연결된다. 예로 노령산맥의 형성에 의해 노령산맥 북쪽의 만경-동진 및 금강 수계에서 살고 있는 쉬리와 남쪽의 섬진수계에 살고 있는 쉬리가 서로 다르다. 이러한 무주-진안 지역에서의 지질과 생태간의 밀접한 관련성은 이제까지 서로 통합되지 못한 채 활용되어온 생태, 문화, 역사 부분의 관광자원을 지질 자원을 중심으로 묶는 통합 관광을 성공적으로 추진할 수 있음을 지시한다. 통합 관광이 성공적으로 추진될 경우 무주-진안 지역 발전에 큰 도움이 될 것이다.

현재까지 노령산맥 형성에 대한 지질학적 연구는 수행된 바가 없다. 하지만 이번 연구를 통해 노령산맥이 호남전단대의 주향이동단층의 운동에 의해 형성되었을 가능성이 높음이 확인되었다. 호남전단대

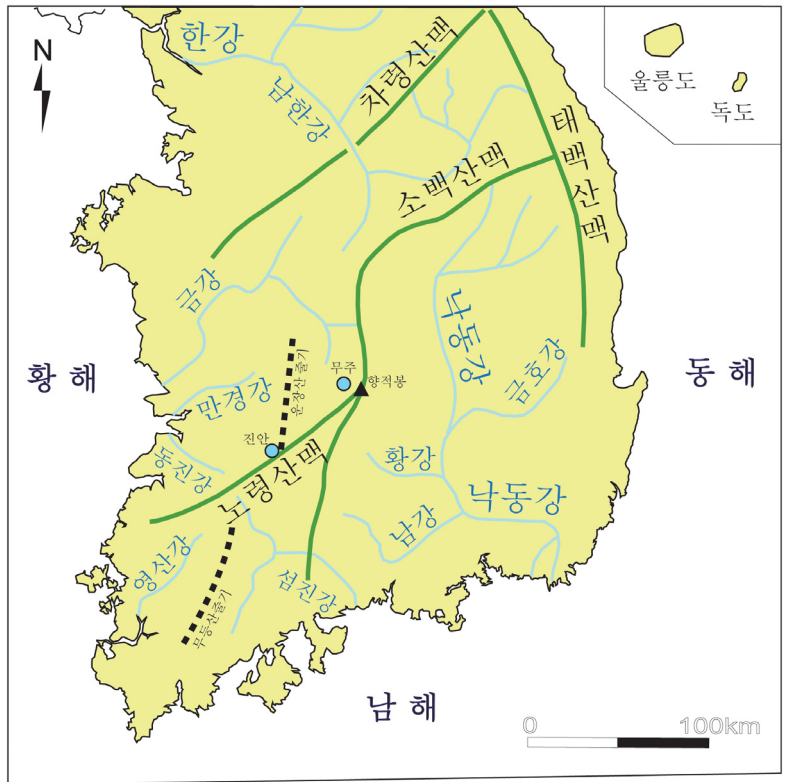


Fig. 17. The map of mountain range and water system in the Muju and Jinan area.

내 전주와 순창을 연결하는 지역에 발달한 주향이동 단층들이 백악기에 좌수향 운동을 하였고 주향이동 단층 사이에 진안분지를 포함한 인리형 분지가 형성되었다. 이러한 좌수향 운동들은 인도를 제외한 아시아 대륙이 형성되는 최종시기인 백악기 초에 시베리아 지괴가 한국과 중국을 포함한 지괴와 충돌하면서 남쪽으로 가한 힘에 의해 발생했다. 좌수향 주향이동단층 운동에 의해 형성된 인리형 분지 내에서는 퇴적물이 퇴적되어 퇴적암이 형성되었고 그 주변에는 분지형성과 관련된 단층을 따라 마그마가 올라와 화산암을 형성하였다. 그 후 신생대에 주향이동 단층들이 백악기와 반대로 우수향 이동을 함으로서 인리형 분지가 만들어진 곳이 압축력이 가해졌고 이로 인해 백악기의 분지들과 주변 화산암들이 용기하면서 노령산맥이 형성된 것으로 예상된다. 우수향 주향이동운동에 의한 용기는 앞에서 언급되었듯이 생물학적이 연구 결과 38 Ma에 강하게 일어난 것으로 판단되며 우수향 주향이동 운동은 히말라야 산맥을 형성시킨 인도와 아시아 대륙의 충돌에 의해 동쪽으로 가해진 힘에 의한 것으로 생각된다. 한편 무주지역의 고원생대 화강편마암들은 소백산지괴에 분포하는 고원생대 화강편마암과 마찬가지로 2.0-1.9 Ga에 현재 안데스 산맥과 같은 대륙 화산호 환경 하에서 만들어졌으며 1.86 Ga에 변성을 받았음이 확인되었다. 그리고 아직 확실히 않으나 그 변성작용이 히말라야 산맥을 형성한 것과 같은 대륙충돌이었을 가능성이 높다. 이러한 사실들은 무주-진안 지역이 한반도 뿐 아니라 아시아 형성과 관련된 지구조 운동 해석에 매우 중요하며 산맥 형성에 대한 새로운 이론을 연구할 수 있는 중요한 장소로서 지질학 가치가 높음을 지시한다. 또한 한반도 일부 지역에 존재 하였던 고원생대 섭입대와 충돌대에 대한 연구 그리고 나아가 고원생대 콜롬비아 초대륙 내에 무주-진안을 포함한 영남육괴 위치 연구에 매우 중요하다.

진안분지 내에 위치한 마이산은 한반도내에서 역암으로만 구성된 유일한 산이며 국제적으로도 매우 드물거나 유일할 가능성이 있다. 따라서 마이산은 지질학적으로 그 가치가 매우 높다. 또한 마이산은 지질학적 특이성 때문에 이성계와 조선왕조에게는 특별한 의미를 갖게 된 곳이다. 고려말 무장이었던 이성계는 어느 날 신인으로부터 금척을 받는 꿈을 꾸었다고 한다. 그리고 우왕 6년(1380)년 왜구를 무

찌르고 개선하는 길에 마이산 근처를 지나게 되었는데 꿈에 신인으로부터 받은 금척을 받은 장소와 너무나 흡사한 마이산을 보고 깜짝 놀랐다고 전해온다. 조선 500년 동안 용상의 뒤에 걸려있던 오봉일월도의 산은 마이산을 형성화한 것으로 알려지고 있다. 은수사의 이름도 이성계가 이곳에 물을 마시고 은같이 맑다고 하여 지어진 이름이라고 한다. 기도를 무사히 마치고 기념하기 위한 증표로 씨앗을 심었는데 이것이 청실배나무라고 전해온다. 이성계와 마이산에 얽힌 전설을 기리기 위해 몽금척을 재연하고 마이산제를 개최하고 있다. 태조 이성계가 마이산을 중요하게 생각했던 것은 첫째 아들을 군으로 봉할 때 마이산이 위치한 진안 명칭과 같은 진안 대군으로 책봉한 사실에서도 잘 인지된다. 또한 마이산에는 암마이봉 절벽 앞에 세워진 탐사에는 국내에서 유일한 자연석을 쌓아올려 세워진 80여개의 탐이 조성되어있다. 원래는 108개의 탐으로 구성 되어 있었으며 이들 탐사는 이 지역의 기운을 눌러 세상을 평안히 하기 위해 세워졌다고 한다. 진안이라는 이름도 바로 기운을 눌러 세상을 편안히 한다는 의미이다. 이곳에서는 정안수를 떠 높으며 고드름이 자라서 올라가는 역고드름 현상이 발견되는데 그 원인은 아직 밝혀지지 않고 있으며 많은 이가 이곳의 기가 매우 높기 때문이라고 생각하고 있다. 풍수지리적 설명에 따르면 마이산을 중심으로 북으로는 운장산, 대둔산, 계룡산이 남쪽으로는 팔공산과 지리산으로 서쪽으로는 만덕산과 모악산으로, 동쪽으로는 덕유산과 만주지산으로 이어지는 산맥들이 십자형으로 산태극을 이룬다한다. 그리고 암마이봉과 수마이봉 사이에 있는 천황문을 분수령으로 하늘에서 떨어지는 빗줄기가 북쪽으로는 금강, 남쪽으로는 섬진강을 만들어 수태극을 이룬다. 이렇게 산태극과 수태극의 한가운데 있기 때문에 영험한 경험한 기운이 생겨난다고 해석을 하기도 한다. 그리고 마이산 남쪽 사면을 따라 타포니가 많이 분포한다. 이들 타포니는 물이 역암 틈으로 들어가 열고 녹는 것을 반복하고 지하수가 역을 교결시키고 있는 석회질 성분을 유출시켜 역암내 역들의 결합력을 약화시켜 역이 떨어져 나옴과 역이 떨어져 나온 구멍들이 합쳐져 커다란 구멍을 벽면에 만들어놓은 구조이다. 이러한 역암내 대규모 타포니 지형 또한 진안지역에서만 볼 수 있는 특징이며 이 지역 사람들은 이러한 대규모

타포니 안에 수선루와 같은 정자를 지어 즐기거나 고금당과 같은 절이 만들어 종교 활동을 하였다. 즉 마이산 지역은 지질학적인 중요성 뿐 아니라 지질학적 특이성 때문에 많은 특이하고 중요한 역사, 문화가 만들어지고 보존된 곳으로 국내 어느 지역보다 지질, 문화, 역사가 잘 어우러져 있어 국내 지질공원은 물론 향후 세계지질공원으로서도 가능성이 매우 높은 지역이다.

8. 결 론

진안 및 무주 지역은 지질공원으로서의 가치가 매우 높아 앞으로 국가지질공원과 세계지질공원 인증을 위한 노력이 필요하다. 그 이유는 다음과 같다.

- 1) 진안 지역의 마이산은 국내에서 매우 독특하고 특이하며 세계적으로도 매우 희귀한 거의 역암으로만 구성된 산이다.
- 2) 진안과 무주 지역에 나타나는 진안분지와 무주분지의 형성과정과 이들 분지가 융기 과정은 아시아가 형성되는 지체구조와 밀접한 관련을 가지고 있어 진안과 무주 지역은 한반도 뿐 아니라 아시아의 지구조운동 해석에 매우 중요하다.
- 3) 진안과 무주 지역에서 시작하여 목포로 연결되는 노령산맥은 좌수향 주향 이동 단층이 우수향으로 재활성되면서 형성되었을 가능성이 높다. 따라서 전주 및 무주 지역은 이러한 새로운 산맥형성 이론을 연구하기에 중요한 지역이다.
- 4) 무주 덕유산 정산인 향적봉은 소백산 줄기와 지리산 줄기가 만나는 곳이며 낙동강 수계와 금강 수계가 나누어지는 분수령에 위치하고 있다. 그리고 마이산을 중심으로 그 주변의 화산들은 노령산맥을 형성하면서 금강 수계와 섬진강 수계를 나눈다. 또한 대략 북쪽으로 뻗어있는 운장산을 포함한 화산지형은 금강 수계와 동진-만경강 수계를 나눈다. 이렇듯 무주-진안 지역은 3개의 산줄기가 서로 만나고 4개의 수계가 나누어지며 한반도 내륙에서 지리산 다음으로 높은 향적봉을 포함하고 있는 남한의 중심이 되는 매우 중요한 지역이다.
- 5) 진안과 무주 지역에서는 여러 산줄기가 만나고 여러 하천이 갈라지면서 생성된 다양하고 풍부한 생태, 문화, 역사 자원을 갖고 있다. 또한 마

이산은 그 특이성 때문에 조선 건국 사와 관련된 많은 역사와 전설과 어우러져있을 뿐 아니라 탐사나 타포니를 이용한 정자나 절등 돌을 이용한 문화가 잘 발달되어있다. 따라서 진안과 무주 지역은 지질자원을 중심으로 생태, 역사, 문화가 함께 엮어진 종합관광 시스템을 성공적으로 구축할 수 있는 곳이다.

사 사

이 논문 작성에 도움을 주신 환경정책연구평가원 이수재 박사, 전북대 진성욱 교수, 전주대 최영기 교수께 감사를 드린다. 또한 이 연구를 위해 야외조사와 박편제작에 도움을 준 전북대 지구환경과학과 학부생들에게도 고마운 마음을 전한다. 그리고 이 논문을 심사하면서 여러 좋은 조언을 해주신 류춘길 박사와 익명의 심사자께 감사를 드린다. 이 연구는 전라북도의 국가지질공원인증 용역과제에 의해 지원받았다.

REFERENCES

- Chang, H.W., Turek, A. and Kim, C.B., 2003, U-Pb zircon geochronology and Sm-Nd-Pb isotopic constraint for Precambrian plutonic rocks in the northeastern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 37, 471-491.
- Cho, D.L. and Kwon, S.-T., 1994, Hornblende Geobarometry of the Mesozoic Granitoids in South Korea and the Evolution of Crustal Thickness. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 41-61 (in Korean with English abstract).
- Cho, H.S., Kim, M.C., Kim, H.J. and Son, M., 2014, Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) of the Quaternary Faults SE Korea: Application to the Determination of Fault Slip Sense and Paleo-stress Field. *Journal of Petrological Society of Korea*, 23, 75-103 (in Korean with English abstract).
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, J., 1979, *The Interpretation of Igneous Rocks*. Geo. Allen Unwin, London, 308-331.
- Heo, C.H. and Choi, S.H., 2007, A Study on the Development of Geological and Geomorphological Landscape Resources to Promote Tourism Geology: A Case Study. in *Taeon Seashore National Park*. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28, 75-86 (in Korean with English abstract).

- Hong, M.S., Yoon, S. and Gil, T.J., 1966, Geological report of the Galdam sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 5 p (in Korean with English abstract).
- Jeon, Y.G., 2010, Geotourism in Korea. *Journal Of The Korean Geomorphological Association*, 17, 53-69.
- Kim, C.H., 2009, Geopark's Activities and Geographical Meanings in Korea. *Journal Of the Korean Geomorphological Association*, 16, 57-66.
- Kim, J. and Cho, M., 2003, Low-pressure metamorphism and leucogranite magmatism, northeastern Yeongnam Massif, Korea: implication for Paleoproterozoic crustal evolution. *Precambrian Research*, 122, 235-251.
- Kim, J.H. and Lee, I.K., 1973, Geological report of the Yongdam sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 7 p (in Korean with English abstract).
- Kim, K.B., Choi, W.C., Hwang, J.H. and Kim, J.H., 1984, Geological report of the Osu sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 7 p (in Korean with English abstract).
- Kim, M.S., Yun, S.H. and Koh, J.S., 2008, Petrological Study on the Seolcheon Tuff in The Yeongnam Massif, Muju. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 199-217 (in Korean with English abstract).
- Kim, N., Cheong, C.S., Park, K.H., Kim, J. and Song, Y.-S., 2012, Crustal evolution of northeastern Yeongnam Massif, Korea, revealed by SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Research*, 21, 865-875.
- Kim, N., Cheong, C.S., Yi, K., Song, Y.S., Park, K.H., Geng, J.Z. and Li, H.K., 2014, Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on the Precambrian crustal evolution of the north-eastern Yeongnam Massif, Korea. *Precambrian Research*, 242, 1-21.
- Kwon, Y.W., Oh, C.W. and Kim, H.S., 2003, Granulite-facies metamorphism in the Punggi area, northeastern Yeongnam Massif, Korea and its tectonic implications for east Asia. *Precambrian Research*, 122, 253-273.
- Lee, B.C., Oh, C.W. and Yi, K., 2016, Geochemistry, zircon U-Pb ages, and Hf isotopic compositions of Precambrian gneisses in the Wonju-Jechon area of the southern Gyeonggi Massif: Implications for the Precambrian tectonic evolution of Korea and northeast Asia. *Precambrian Research*, 283, 169-189.
- Lee, D.S. and Nam, K.S., 1969, Geological report of the Janggi-Ri sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 7 p (in Korean with English abstract).
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous. *The Island Arc*, 8, 218-231.
- Lee, K.S., Cheong, C.S., Park, K.H. and Chang, H.W., 1997, Geochemical and Sm-Nd Isotopic Study of Amphibolite from the Muju Area, Korea. *The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 30, 313-320 (in Korean with English abstract).
- Lee, S., Sagong, H., Choi, J., Moon, Y., Lee, M., Kim, E., Choi, D., Lee, K. and Cho, H., 2009, Concepts and Implications of UNESCO Geoparks. Policy report 2009-8, Korea Environment Institute, 139 p.
- Lee, S.G., Asahara, Y., Tanaka, T., Kim, N.H., Kim, K.H., Yi, K., Masuda, A. and Song, Y.S., 2010, La-Ce and Sm-Nd isotopic systematics of early Proterozoic leucogranite with tetrad REE pattern. *Chemical Geology*, 276, 360-373.
- Lee, S.G., Shin, S.C., Jin, M.S., Ogasawara, M. and Yang, M.K., 2005, Two Paleoproterozoic strongly peraluminous granitic plutons (Nonggeori and Naedeokri granites) at the northeastern part of Yeongnam Massif, Korea: Geochemical and isotopic constraints in East Asian crustal formation history. *Precambrian Research*, 139, 101-120.
- Lee, S.H. and Chough, S.K., 1999, Progressive changes in sedimentary facies and stratal patterns along the strike-slip margin, northeastern Jinan Basin (Cretaceous), Southwest Korea: implications for differential subsidence. *Sedimentary Geology*, 123, 81-102.
- Lee, Y.Y., 1992, Stratigraphy, depositional environments, and evolution of the cretaceous Chinan basin. Ph.D thesis, Seoul National University, Seoul, 287 p.
- Lee, Y.S., Han, H.C., Hwang, J.H., Kee, W.S. and Kim, B.C., 2011, Evidence for significant clockwise rotations of the Korean Peninsula during Cretaceous. *Gondwana Research*, 20, 904-918.
- Kim, N.H., Cheong, C.S., Yi, K.W., Song, Y.S., Park, K.H., Geng, J.Z. and Li, H.K., 2014, Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on the Precambrian crustal evolution of the north-eastern Yeongnam Massif, Korea. *Precambrian Research*, 242, 1-21.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 635-643.
- Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, 53-62.
- Noh, B.S., Ryang, W.H. and Cho, K.S., 2009, The Responses of Elementary Teachers and the Development of Teaching Materials for Geological Fieldwork in the Area of Mai Mountain. *Journal of Korean Earth Science Society*, 30, 869-882 (in Korean with English abstract).
- Oh, C.W., 2006, A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: histories from the Late

- Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Research*, 9, 47-61.
- Oh, C.W., Lee, B.Y. and Yi, K., 2013, The Origin and Age of the Orbicular Granite Gneiss in Wangjungri, Muju. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 117-135.
- Park, B.S. and Lee, Y.J., 1969, Geological report of the Mupung sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 7 p (in Korean with English abstract).
- Park, J.W. and Lee, Y.I., 1997, Lithostratigraphic revision of the Cretaceous Muju Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 33, 65-77 (in Korean with English abstract).
- Pearce, J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth C.J. and Norry M.J. (eds.), *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich, 230-249.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, 290-300.
- Pearce, J.A. Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks of the Kastamonu area northern turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 31, 58-63.
- Ryang, W.H., 2013, Characteristics of strike-slip basin formation and sedimentary fills and the Cretaceous small basins of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 31-45 (in Korean with English abstract).
- Secretariat of National Geopark, 2013, National Geopark of Korea, Guidebook. Korea National Park Service, 50.
- Song, H.-Y. and Bang, I.-C., 2015, *Coreoleuciscus aeruginos* (Teleostei: Cypriniformes: Cyprinidae), a new species from the Seomjin and Nakdong rivers, Korea. *Zootaxa*, 3931(1), 140-150.
- Steiger, R.H. and Jager, E., 1977, Subcommission on geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 359-362.
- Sun, W.D. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and process. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication, 42, 313-345.
- Woo, K.S., 2014, Qualification and prospect of national and global geoparks in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 3-19 (in Korean with English abstract).
- Yi, S., Yun, H. and Lee, J.-D., 1998, Palyonfacies of the Sansudong Formation (Lower Cretaceous), Jinan Basin, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 14(1), 1-13.
- Yoon, K.-H. and Kim, N.-J., 2015, The role and Meaning of Geotourism from the Perspective of National Geoparks Appointment. *Journal of Tourism Studies*, 27, 53-82.
- You, G.J., 2016, A study on the status and conservation of the Korea National Geopark. *Journal of Photo Geography*, 26, 39-56.
- You, G.J. and Lee, S.K., 2013, Preliminary Study For Geotourism -Focused On Jeju Geopark With Degree Centrality In Social Network Analysis-. *Journal of Photo Geography*, 23, 49-64.

Received : September 6, 2016

Revised : October 31, 2016

Accepted : October 31, 2016