한반도 남동부 경상호의 조구조 배경과 호화산작용

황상구*

안동대학교 지구환경과학과

Tectonic Setting and Arc Volcanisms of the Gyeongsang Arc in the Southeastern Korean Peninsula

Sang Koo Hwang*

Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

요 약: 한반도에는 백악기에 북동-남서 방향으로 달리는 여러 화산호들을 형성하였으며 그 중에서 경상분지의 남동부를 지나는 경상호가 가장 우세하다. 백악기 전기 화산작용은 하양층군의 여러 층군에 대체로 알칼리 혹은 칼크알칼리 현무암질 용암류로 구성되는 화산층을 협재시켰다. 백악기 후기 화산작용은 경상호 내에 두꺼운 칼크알칼리 안산암질 및 유문암질 화산층을 형성하였다. 이 화산작용은 (1) 먼저 현무암질 및 안산암질 용암류의 분출로 특징되며, (2) 후에 데사이트질-유문암질 화쇄강하, 대규모 화쇄류의 분출로 이어지고 이에 관련하여 칼데라와 칼데라후 암맥과 돔의 형성으로 특징지어진다. 백악기 전기(약 120 Ma)에 북쪽에서 북북서 방향으로 약간 변화됨으로서 사각방향의 이자나기판 섭입작용은 북동내지 북북동 방향의 좌수향 주향이동 단층을 형성하면서 경상호의 배호 지역에 인리형 분지가 열리고 동쪽으로 확장되어 배호분지를 형성하였다. 이때 배호분지에는 압압의 감소와 함께 마그마 생성의 촉진으로 용암류를 분출시켰으며, 하양층군의 여러 층군에 화산성 협재층을 형성하였다. 따라서 경상분지는 대륙 열곡작용에 의해 형성된 배호분지로 해석된다. 배호분지의 확장과 더불어 경상분지에서는 호화산작용이 100 Ma 무렵부터 이미 시작되었으며, 백악기 후기로 가면서 격렬하게 지속되었고 화산호를 형성하였다. 백악기 후기(약 90 Ma)에 이자나기판의 섭입방향은 북북서 방향에서 북서 방향으로 변화됨으로서 분지발달이 종식되었으며, 대륙연변부에 대해 사각에서 직각방향으로의 변화는 마그마 생성이 용이하게 유도되어 백악기 후기 동안에 화산작용이 지속적으로 진행되게 하였다. 한편 대구-부산 사이에 북서 방향의 폭넓은 화산대는 이자나기-태평양 해령의 빠른 북서향 섭입작용으로 슬랩창의 높은 열원에 의한 화산작용과 무관하지 않다.

주요어: 경상호, 배호분지, 화산성협재층, 호화산작용, 화산호

Abstract: The Gyeongsang Arc is the most notable of the Korea Arc that is composed of several volcanic arcs trending to NE-SW direction in the Korean peninsula. The Hayang Group has many volcanogenic interbeds of lava flows by alkaline or calc-alkaline basaltic volcanisms during early Cretaceous. Late Cretaceous calc-alkaline andesitic and rhyolitic volcanisms reconstructed the Gyeongsang Arc that consist of thick volcanic strata on the Hayang Group in The Gyeongsang Basin. The volcanisms characterize first eruptions of basaltic and andesitic lavas with small pyroclastics, and continue later eruptions of dacitic and rhyolitic ash-fall and voluminous ash-flow with some calderas and then domes and dykes. During the Early Cretaceous (about 120 Ma), oblique subduction of the Izanagi plate to NNW from N direction results in sinistral strike-slip faults to open a pull-apart basin in back-arc area of the Gyeongsang Arc, in which erupted lava flows from generation of magma by a decrease in lithostatic pressure. Therefore the Gyeongsang Basin is interpreted into back-arc basin reconstructed by a continental rifting. Arc volcanism began in about 100 Ma with exaggeration of the back-arc basin in the Gyeongsang, and then changed violently to construct volcanic arcs. During the Late Cretaceous (about 90 Ma), orthogonal subduction of

*Corresponding author

Tel: 054-820-5469

E-mail: hwangsk@andong.ac.kr

the Izanagi plate to NW from NNW direction ceased development of the basin to prolong violent volcanisms.

Key words: Gyeongsang Arc, Back-arc basin, Volcanogenic interbed, Arc volcanism, Volcanic Arc

서 언

아시아 대륙의 동연부는 오랜 기간 동안 유라시아 대륙 아래로 고태평양판(paleopacific plate)이 침강되는 섭입대에 위치하여 고생대 후기부터 신생대까지 조구조운동과 관련된 다양한 지질현상을 나타낸다(Maruyama et al., 1997). 한반도는 아시아 대륙의 동연부의 중간에서 중국 동부, 일본열도와 러시아 동부 간의 중요한 조구조의 연결부에 위치한다. 그러므로 한반도는 북중국과 남중국의 충돌 이후에 수차례에 걸친 조구조운동의 변화에 따르는 지질작용의 증첩으로 복잡한 지질을 보여준다. 따라서 한반도 남동부의 백악기 화산암류도 지금까지 나온 자료를 아시아 대륙의 동연부의 조구조운동과 연계하여 분석함으로써 백악기 화산작용을 시공간적 관계를 종합적으로 검토할 수 있다.

한반도는 백악기 동안 아시아 대륙 아래로 고태평양판인 이자나기판(Izanagi plate)의 섭입으로 인해 여러 육성분지와 화산호(volcanic arcs)를 형성하였다(Chough et al., 2000). 가장 큰 경상분지는 육성 퇴적층과 다양한 화산층으로 두껍게 채워져 경상누층군을 형성하고 있다. 이 경상누층군은 이들의 산상과 화산 및 비화산 퇴적물의 상대적 함량에 따라서 3개의 층군으로 구분되었다(Chang, 1975). 즉 신동층군은 대부분 비화산성 지층으로 구성되고, 그 위에 국부적으로 화산층을 포함하는 하양층군과 화산층이 절대적으로 우세한 유천층군이 차례로 놓인다(Chang, 1975; Choi, 1986).

유천층군의 화산암류는 경상분지의 여러 곳에서 암석학적 연구를 통해 화산호에 밀접한 유사성을 가진다고 이미 여러 차례 언급되었다(Min et al., 1982; 윤성효, 1988; 김상욱 외, 1991; 김상욱과 이재영, 1993). 그래서 황상구와 김상욱(1994a)은 유천층군 화산암류가 경상분지의 남동부에서 남해안으로 연장되는 활모양의 화산대를 백악기 동안 거대한 유라시아 대륙 동연부의 화산호 체인의 일부로 보고 이 체인 내에 존재하는 한국호(Korean Arcs) 중에서 경상호(Gyeongsang Arc)라고 하였다.

한반도 남동부에서 경상호는 경상분지와 함께 백악기 동안에 일어났던 조구조 및 마그마 패턴을 실제로 기록하여 현재까지 보존하고 있다. 따라서 필자는 연구의 목적으로 경상분지 퇴적층에 협재하는 화산층의 층서적 의미와 경상호에 보존된 화산암류의 암석화학적 의미를 종합적으로 검토하는 것이다. 그리고 안산암질-유문암질 화산작용의 조구조적 의미는 무엇이며, 백악기 동안에 경상호의 조구조 배경과 화산작용과의 관계를 다루고자 한다.

조구조 및 지질 배경

유라시아 대륙판의 동연부는 백악기 전기에 이자나기판의 사각섭입으로 유도되는 좌수향 렌취 조구조운동을 겪었다(Klimetz, 1983; Kim et al., 1997). 이 때 한반도는 이 섭입작용으로 인해 좌수향 렌취 조구조운동과 함께 호화산작용(arc volcanism)을 받았다. 한반도 남동부에는 경상분지가 큰 퇴적분지로 형성되었으며 반면에 작은 분지들이 경기육괴와 옥천대의 여러 지역에 형성되었다. 이 작은 분지들은 여러 주향 이동 단층대를 따라 여러 지역에서 좌수향 전단운동에 의해 형성되었다. 경상분지는 인리형 혹은 전단인장형 분지이며(Lee, 1999; Chough et al., 2000; Kim et al., 2003), 분지 형성의 초기상이 플룸-관련 마그마작용에 조합된 열곡 성인이었다(Okada, 2000). 분지형성은 이자나기 해양판이 유라시아 대륙판에 대해 직각방향의 섭입작용으로 인해 이동방향이 변화하는 백악기 후기에 끝났지만, 호화산작용은 더 격렬하게 진행되어 성숙된 화산호를 만들어나갔다(유인창 외, 2006).

경상분지에는 백악기 동안에 약 9 km 두께의 육성 퇴적암층과 화산암층으로 축적되었다. Chang(1975)은 경상분지 충진물을 화산성 암층의 포함 여부와 축적량에 의해 3개의 주요 층군으로 구분하였다. 즉 경상누층군은 하부의 신동층군, 중부의 하양층군과 상부의 유천층군으로 구성된다. 신동층군과 하양층군 가운데 특히 진주층과 신라역암은 쇄설성 저어콘의 SHRIMP 연대측정에 의하면 아пти안(Aptian) 내지 알

비안(Albian)에 형성되었다(이태호 외, 2010). 유천층군은 주로 안산암질-유문암질 용암, 응회암과 각력암으로 구성되며, 소량으로 화산쇄설암과 드물게 지표쇄설암을 포함한다(Reedman et al., 1989; 김상욱 외, 1991; 황상구와 김상욱, 1994a, b; 윤성호, 1998b).

경상분지는 낙동곡분이라 부르는 북북동 방향의 기다란 곡분으로 열렸으며, 여기에 2-3 km 두께의 신동층군이 퇴적되었다(Chang, 1975, 1988; 장기홍, 1977). 후에 이 분지는 동쪽으로 크게 확장되었고 대부분 하양층군이 축적되었다. 이 분지는 매우 차별적으로 확장되었으며, 유천, 의성과 영양 소분지(혹은 블록)로 구획되는 원인이 되었다(원종관 외 1978). 소분지 간에는 침하, 용기 혹은 단층운동 등의 지각운동으로 두께의 측방변화를 초래하였고, 암질과 층서의 차이를 일으키는 원인이 되었다(Chang, 1975; 장기홍, 1977).

경상분지의 구성층들은 횡적으로 이동하면서 대비되지 않고, 다른 암질을 가지기 때문에 몇몇 연구자들이 이 경상분지를 여러 소분지 혹은 블록으로 나누게 하였다. 장기홍(1977)은 이 분지를 낙동곡분과 3개의 블록(밀양, 의성과 영양블록)으로 구분하였고 반면에 원종관 외(1978)는 유천, 의성과 영양소분지라는 명칭을 사용하여 장기홍(1977)의 밀양, 의성과 영양블록에 각각 대비시켰다.

화산호의 윤곽과 분포양상

화산호는 섭입에 관련된 마그마작용의 결과로 형성되는 화산열도 혹은 화산산맥이 직선상 혹은 호상으로 이어지는 연결체이다(Perfit and Davidson, 2000). 이 화산호는 마그마 과정에 의해 생성되는 지각 위에 존재하며, 흔히 화산활동과 심성활동의 부가지역을 포함하고 다양한 화산암층과 퇴적층이 보존되는 분지를 포함한다. 화산호는 지각의 종류에 따라 대륙호와 해양호가 있으며 대륙호에는 흔히 배호분지와 조합될 수도 있다.

경상분지에서 화산암류는 유천소분지에 가장 밀집되어 분포하며, 이곳으로부터 서남서 방향으로 남해안을 따라 길게 뻗치고 북북동 방향으로 흩어져 분포한다(Fig. 1). 그래서 이 분포 양상은 한반도 남동부를 따라 활모양으로 호상 분포를 보여주는 화산대를 형성하며, 그 성인은 백악기에 아시아 대륙 남동부에서 섭입작용에 따라 일어난 호화산작용(arc volcanism)

에 의한 것으로 설명된다(김상욱 외, 1991, 1998; 김상욱과 이재영, 1993; 황상구와 김상욱, 1994a). 그래서 황상구와 김상욱(1994a)은 한반도 남동부의 이 화산대를 유라시아 대륙판의 동변부를 따라 캄차카 반도 북부, 연해주, 일본 내대, 한반도 남동부, 중국 화남 지역으로 연결되는 거대한 아시아대륙 동변부의 화산호 체인의 일부로 보았고 이 체인 내에 존재하는 한국호(Korean Arcs)의 여러 화산호 중에서 경상호(Gyeongsang Arc)라고 하였다. 지난 수십년 동안 경상분지 화산암류는 그 성인에 대해 백악기에 이나자기(혹은 쿨라) 해양판의 섭입작용에 의해 유라시아 대륙판의 연변부를 따라 일어난 호화산작용의 결과물로 해석해 왔었다(김상욱 외, 1991, 1998; 김상욱과 이재영, 1993; 황상구와 김상욱, 1994).

경상호는 대구-부산 사이에서 폭이 약 150 km로서 가장 넓으며, 길이가 서남서 방향으로 약 250 km 정도로 연장되고 북북동 방향으로 약 200 km 정도 연장되며 일본호의 남서부와 연결된다. 이 경상호의 남동쪽의 외측부는 해수에 잠기며 북서쪽의 내측부는 경상분지의 퇴적층을 덮거나 그 하부에서 퇴적층에 협재되어 있다. 여러 곳에 수반되는 곡분은 퇴적층으로 쌓여있으며 그 두께가 대개 얇지만 상당히 두껍고 넓은 곳도 있다.

이 화산호는 경상분지의 남동측에서 횡적으로 폭이 매우 넓고 종적으로 여러 화산호가 겹치는 복합호(complex arc)를 이루지만 서남서 방향으로 가면서 갑자기 좁아지는 단일호를 이루고 서단부에서 다시 넓어져 이중으로 된다. 남해안을 따라 이 화산호의 윤곽은 외측부가 많은 섬들로 구성되고 일부는 물에 잠겨있는 성숙된 화산호를 이룬다. 내측부는 남해안을 따라 백악기 이전의 고기 대륙기반암 위에 놓이는 대륙호로 정의 된다. 그래서 필자는 이 서남서 연장부를 남서대(혹은 남해호; Namhae arc)라 부르며 다른 지대와 구분해서 설명하기가 편리하다.

이 화산호는 북북동 방향으로 가면서 약 40 km 거리를 두고 단절되다가 영천 북부에서 다시 여러 화산지역(volcanic field)으로 흩어져 나타나며 동해안을 따라 다소 밀집되어 있다. 그래서 그 윤곽은 백악기 퇴적층 위에 놓여있기 때문에 매우 명확하지만 화산호로서 연결성이 약간 부족하여 쉽게 정의되지 않는 다소 산만한 화산호를 나타낸다. 그리고 필자는 이 북북동 연장부를 편리하게 설명하기 위해 북동대(혹은 동해호; Donghae arc)라 부르고 두 화산호가 겹

Fig. 1. Index map(a) and geological map(b) of the Gyeongsang Basin. A, Juwangsang; B, Muposang; C, Guamsang; D, Naeyeonsang; E, Geumseongsang; F, Hwasang.

치는 경남지역을 호복합대(arc complex zone)라 부르며 다른 지대와 구분해서 설명하기가 편리하다.

경상호의 외측부 경계는 대부분 해수에 잠겨 명확하지 않지만 일반적으로 해구로부터 일정한 거리를 두고 평행하게 달린다. 이 외측부 경계선은 화산전면부(volcanic front)로 정의되고 일본의 경우에 해구축

으로부터 150~130 km 거리에서 평행하게 놓이며 (Sugimura, 1960), 화산전면부로부터 베니오프대 간의 심도는 130~200 km 범위이다. 그러나 이 경상호에서는 화산전면부로부터 해구 간의 거리와 베니오프대 간의 심도는 정확하게 알 수 없지만 앞으로 풀어야 할 숙제 중의 하나이다.

화산중심의 밀집도와 배열

경상분지에서 화산암류는 이 경상호를 따라서 조밀하게 분포되어 있다. 비록 백악기 화산은 증명될 수 없지만 이 지역에서 정밀한 매핑에 의해 칼데라와 화산관입체와 같은 개별 화산중심(volcanic center)이 여러 곳에서 인지되며 기타 심성암체의 분포가 간접적으로 화산중심의 존재를 암시해준다. 그런데 화산중심의 밀집도와 분출물의 두께는 해안측, 즉 화산전면부를 따라 최고이고, 점이적으로 북서쪽의 배호측으로 가면서 감소하는 경향을 나타낸다. 그래서 배호측에서 분출물 두께의 감소는 화산호의 경계를 불명확하게 하는데, 그 원인은 배호분지의 퇴적층과 화산층의 교호와 화산쇄설층에 의한 애프론(Chough and Sohn, 2010)의 모호한 경계 때문으로 볼 수 있다.

경상호에서 화산중심의 분포밀도는 화산호를 따라 가면서 혹은 횡단하면서 다르게 나타난다. 특히 경남의 북합대에서 여러 개의 화산중심이 해안을 따라 그 내측으로 이중 혹은 삼중으로 놓인다. 화산중심 간의 거리는 일정하지 않고 매우 불규칙하지만 대체로 5 km에서 40 km 범위이고 평균 20 km 내외이다. 이 해안측에서 화산중심의 밀집도가 높고, 배호측에서 일반적으로 낮지만 지역적으로 상당히 높은 곳도 있다.

북동대는, 남서대와 북합대와 대조적으로, 호화산작용의 전형적인 화산전면부가 부족할 뿐만 아니라, 화산전면부가 잘 정의되지 않는다. (1) 이러한 이유는 더 낮은 분출률과 화산중심 밀집도에서 찾을 수 있겠고 유문암질 화산층보다 하부층인 안산암질 화산층이 부족함에서 알 수 있겠다. 또한 후기에 동해의 형성으로 그 일부가 분리되어 떨어져 나갔다고 할 수도 있겠다. 그러나 일부의 분리설은 현 상황에서 상부층인 유문암질 화산층이 절대적으로 우세함에서 충분한 이유가 되지 못한다. (2) 이들의 원인은 섭입판이 북동대의 화산 아래에서 활동이 상대적으로 적었음을 암시해준다. 즉 백악기 후기에 섭입판이 남서대와 북합대 아래에서 활발하였지만 북동대 아래에서는 거의 활동하지 않았음을 암시해준다. 그러므로 필자는 현재 상황이 동해 인접부에서 강한 화산작용이 있었을 때의 고제3기 전기 화산작용의 잔류물을 나타낸다고 생각한다.

화산중심의 분포는 지역적으로 짧은 체인으로 배열을 하며 해안선, 즉 화산전면부에 고각 혹은 예각으로 교차한다(윤성효, 1987; 황상구와 김상욱, 1990,

1994a). 이 배열 방향성은 지역적으로 ‘약대’에 의해 지배되는 배열로 해석한다는 것은 어렵지만, 그러나 지표 가까이의 지각에서 인장성 단열을 형성하는 가장 쉬운 방향인 광역적 σ_{Hmax} 의 방향성을 반영하는 것으로 더 잘 해석된다. 그래서 광역적 압축성 의력을 고려한다면, 분출열극과 관입암맥의 방향은 최고 압축의 축에 거의 평행하게 배열된다고 볼 수 있다.

하양층군의 백악기 전기 화산작용 기록

한반도에서 복잡한 변성대와 다양한 암층은 유라시아판의 동변대를 따라 복잡한 산맥과 섭입대를 가진 넓은 연변해로 특징되는 환경에서 형성되었음을 가리킨다. 그리고 넓은 분포의 저반상 심성암체는 고생대 후기에서 중생대 중기에 왕성한 조산운동과 마그마 활동이 일어났음을 나타낸다.

백악기에 들어와 여러 지역에 크고 작은 분지가 발생되면서 화산작용이 일어나기 시작하였다. 특히 경상분지는 규모가 크고 분지가 넓은 만큼 그 발달과정이 다양하였고 화산작용도 그 과정에 따라 규모와 특징이 매우 다르게 진행되었다.

백악기 전기 동안에는 경상분지가 동쪽으로 확장되면서 국부적이지만 현무암질 화산작용이 간헐적으로 빈번하게 일어났고 유문암질 화산작용이 한차례 일어나 분지를 광역적으로 덮었다. 이 현무암질 화산작용은 규모가 작지만 하양층군에 여러 차례 용암류를 협재하였지만 국부적으로 일어났다. 이들은 칠곡층 상부에 청룡사현무암이 렌즈상으로 협재되며, 함안층(혹은 사곡층) 아래에 학봉현무암과 오십봉현무암이 렌즈상으로 놓이고 상부에 세천동현무암과 대전사현무암이 렌즈상으로 협재된다. 함안층의 상위 경계부에 1~5 m 두께의 구산동응회암(유문암질)이 측방으로 200 km 까지 판상으로 넓게 퍼져 있다(Sohn et al., 2009). 구산동응회암의 아래에 혹은 위에 함안 및 하마현무암이 일어났다(김상욱 외, 2000). 그리고 채약산현무암은 송내동층과 건천리층 사이에 렌즈상으로 협재되어 있다(김상욱 외, 2000).

화산층의 빈번한 협재는 하양층군 퇴적작용의 초기 단계에서부터 분류성 혹은 폭발성 화산작용이 고철질 혹은 규장질 마그마로부터 일어났음을 지시한다. 그리고 화산작용의 빈도와 강도는 시간이 지남에 따라 증가하였다. 함안층 상단에서의 화산성 협재층은 경

Table 1. Isotope ages dated from volcanic rocks intercalated in the Hayang Group

No.	Age(Ma)	Methods	Dated materials	Rock type	Geological information	References
1	113.4±2.4	Ar-Ar	Hornblende	Andesite	Silla Conglomerate	Kim et al., 2005
2	110.4±2.0	SHRIMP U-Pb	Zircon	Matrix	Silla Conglomerate	Lee et al., 2010
3	79.4±4.0	K-Ar	Whole rock	Olivine basalt	Hakbong Basalt	Min et al., 1982
4	97.1±2.0	LA-ICP-MS U-Pb	Zircon	Tuff	Gusandong Tuff	Jwa et al., 2009
5	97.3±1.8	LA-ICP-MS U-Pb	Zircon	Tuff	Gusandong Tuff	Jwa et al., 2009
6	94±4	K-Ar	Whole rock	Basaltic andesite	Chaeyaksan Basalt	Yun, 1998a

상호로부터 광역적 화산조구조성 사건을 나타낸다고 해석된다. 화산성 협재층은 113.4-94 Ma 연대를 나타낸다(Table 1). 그리고 함안층 위에 놓이는 구산동층 회암은 U-Pb 저어콘 연대가 97~96 Ma로 칼크알칼리 계열의 규장질 마그마에 의한 것이다.

유천층군의 화산작용 기록

유천층군의 화산암류는 경상분지 동남부를 따르고 남해안으로 연장되는 화산대라는 것으로 보고 이에 수반되는 심성암류를 합쳐서 경상호(황상구와 김상욱, 1994a) 혹은 경상화산호라고 칭하였다(Chough and Sohn, 2010). 한반도에서 경상호는 남서일본호의 연장이며, 이자나기판의 고섭입대에 대체로 평행하게 놓였을 것이다. 그리고 경상분지는 진화 전반에 걸쳐 신장성 혹은 전단인장성 의력 지배하에 있었다고 조 구조 배경을 고려하면 배호분지로 언급될 수 있다(Marsaglia, 1995). 따라서 경상분지는 유천층군의 화산대를 화산호로서 조구조적 의미를 가미할 때 배호분지라는 성격을 가지게 된다.

경상호는 다양한 화산암류로 구성되고 약간의 퇴적

암을 협재한다. 이 화산암류는 크게 주사산 안산암질 암류와 운문사 유문암질암류의 2개 층서단위로 묶여진다(김상욱과 이영길, 1981). 전자는 주로 안산암질 용암, 집괴암 혹은 응회각력암과 드물게 응회암으로 구성되며 반면에 후자는 테사이트질 내지 유문암질 용암과 용결 혹은 비용결 응회암으로 주로 구성된다(황상구와 김상욱, 1990; 윤성호, 1998b; 정종욱과 좌용주, 2000; 황상구 외, 2002). 퇴적암층은 역암, 사암, 이암과 이회암으로 구성되고 역시 국지적으로 용암류와 응회암을 협재한다(장태우 외, 1983; 김규봉과 황상구, 1988; 손문 외, 2009). 그러므로 경상호는 대체로 안산암질내지 유문암질 조성의 다양한 용암, 응회암과 관입암들로 주 암상을 구성한다.

경상호에서 현무암 및 안산암들은 K-Ar 연대가 80.4-61.1 Ma 범위를 가진다(Table 2). 복합대에서 80.4-61.7 범위이고 북동대에서 71.4-61.1 Ma 범위로서 북동대가 젊은 편이다. 테사이트 및 유문암들은 K-Ar 연대가 78-54 Ma 범위이며 복합대에서 78-63 Ma 범위이고 북동대가 67.3-54.0 Ma 범위이다(Table 3). 그러나 이들은 Rb-Sr 연대가 복합대에서 80.8 Ma이고 북동대에서 63.6-56 Ma 범위이다. 여기서 80.8 Ma의

Table 2. Rb-Sr and K-Ar ages dated from basalts and andesites in the Gyeongsang Arc

No.	Age(Ma)	Methods	Dated materials	Rock type	Geological information	References
1	80.4±2.4	K-Ar	Whole rock	Andesite	Western Suncheon	Min et al., 1988
2	76.0±2.3	K-Ar	Whole rock	Andesite	Southern Namhae-gun	Min et al., 1988
3	74.5±3.7	K-Ar	Whole rock	Porphyritic andesite	Northern Cheongdo	Min et al., 1982
4	77.3±3.8	K-Ar	Whole rock	Hornblende andesite	Eastern Cheongdo	Min et al., 1982
5	65.8±3.3	K-Ar	Whole rock	Augite basalt	Eastern Miryang	Min et al., 1982
6	69.6±3.4	K-Ar	Whole rock	Andesite lava	Sinbulsan, W. Ulsan-gun	Yun, 1998b
7	65.9±3.2	K-Ar	Whole rock	Andesitic lava	Sinbulsan, W. Ulsan-gun	Yun, 1998b
8	65.4±3.3	K-Ar	Whole rock	Biotite andesite	Gijang-gun, Busan	Min et al., 1982
9	64.2±3.2	K-Ar	Whole rock	Hornblende andesite	Gijang-gun, Busan	Min et al., 1982
10	61.7±3.1	K-Ar	Whole rock	Augite basalt	Songjeong-ri, Busan	Min et al., 1982
11	71.4±2.3	K-Ar	Whole rock	Basalt	Geumseongsan caldera	Kim et al., 1997
12	61.1±1.5	K-Ar	Whole rock	Basaltic andesite	Seonamsan caldera	Kim et al., 1997

Table 3. Rb-Sr and K-Ar ages dated from dacites and rhyolites in the Gyeongsang Arc

No.	Age(Ma)	Methods	Dated materials	Rock type	Geological information	References
1	114.6±9.1	Rb-Sr	Whole rock	Adakite	Jindong granitoid	Wee et al., 2006
2	80.8±1.5	Rb-Sr	Whole rock	Rhyolitic rocks	Samryangjin caldera	Hwang and Cheong, 1998
3	63.6±3.4	Rb-Sr	Whole rock	Tuff	Muposan Tuff	Hwang and Kim, 2006
4	63±13	Rb-Sr	Whole rock	Tuff	Juwangsan Tuff	Hwang et al., 2007
5	56±11	Rb-Sr	Whole rock	Tuff	Guamsan Tuff	Hwang, 2002
6	71	K-Ar	Whole rock	Dacitic welded tuff	Choiyeongsan cauldron	Yun and Sang, 1988
7	78~64	K-Ar	Whole rock	Rhyolitic welded tuff	Unmunsa volcanic complex	Yun and Sang, 1988
8	71~63	K-Ar	Whole rock	Rhyodacitic welded tuff	Jangsan cauldron	Yun and Sang, 1988
9	67.3±1.5	K-Ar	Whole rock	Rhyolite intrusion	Geumseongsan caldera	Kim et al., 1997
10	66.8±1.5	K-Ar	Whole rock	Rhyolite	Geumseongsan caldera	Kim et al., 1997
11	55.0±1.3	K-Ar	K-feldspar	Feldspar porphyry	Seonamsan caldera	Kim et al., 1997
12	54.5±1.2	K-Ar	Whole rock	Rhyolite tuff	Hwasan caldera	Kim et al., 1997
13	54.0±1.5	K-Ar	Matrix	Rhyolite tuff	Hwasan caldera	Kim et al., 1997

Rb-Sr 연대가 밀양-양산 지역에서 유문암질암류의 최상부임을 감안하면 복합대에서 K-Ar 연대는 이보다 더 고기로서 백악기 후기 화산작용에 의한 결과로 생각되며 북동대의 유문암질암류는 고제3기 화산작용에 의한 것으로 생각된다.

백악기 후기의 화산작용

백악기 후기 동안에는 현무암질 화산작용이 초기에 수반되지만 안산암질 화산작용이 훨씬 우세하게 일어났으며, 후기로 가면서 국부적으로 유문암질 화산작용이 일어나 대량의 회류암층을 형성하였다. 그리고 지하에 잔류하던 대규모의 산성 마그마는 냉각되어 현재 저반 혹은 암주로 노출하게 되었다.

안산암질 화산작용은 호복합대에서 가장 풍부하게 일어났으며 다음으로 남서대에서도 상당히 크게 일어났고 북동대에서 가장 적게 국지적으로 발생하였다. 이들은 일반적으로 하부에 화산각력암(volcanic breccia)이 두껍게 깔려 있으며 상부로 가면서 흔히 화산쇄설암(volcaniclastite)과 용암이 교호하여 성층화산(stratovolcano)의 양상을 보여준다(김상욱 외, 1993; 김규봉과 황상구, 1988). 또한 이들은 다양한 관입암상과 화산돌 등이 조합되어 있는 복합화산(composite volcano)의 형태를 나타낸다. 전형적인 복합화산은 초기단계에 화성쇄설물과 용암류의 교호 분출로 인해 성층화산을 형성해나갔지만 후기에 수많은 관입체로 복잡해진다. 복합화산의 활동은 화산체가 형성되는 강력한 분출의 짧은 기간과 상대적인 휴지기의 장기간의

교호로 특징되어 있다. 분출물은 화산과정의 초기에 가장 크고 점차 성장의 후기단계로 가면서 감소한다.

안산암질 화산작용은 일반적으로 큰 분출 동안에 사건의 전형적 순서는 (1) 화산회 및 부석 강하의 원인이 되는 수직 분연주의 형성; (2) 화쇄류 형성의 분출; (3) 용암류의 분출로 진행되었다. 그래서 이 화산작용은 화성쇄설암과 용암류의 중첩으로 인하여 큰 성층화산을 형성하는 것이 특징이었으며 그 아랫부분의 일부가 여러 곳에 잔존되어 있다.

화산각력암은 초기 분화구 형성과 용암돔의 붕괴에 의한 암괴회류(block and ash flow)로부터 유래된 화성쇄설성 각력암(pyroclastic breccia)이 우세하지만, 용암류가 지표수로 흘러들어가면서 급냉파쇄작용(quench fragmentation)에 의한 유리쇄설성 각력암(hyaloclastitic breccia)도 수반된다. 그러나 유리쇄설암(hyaloclastite)이 발견되에도 불구하고 베개 용암과 베개 각력암(pillow breccia)은 관찰되지 않는다. 그 이유는 수중에서 뜨거운 용암류가 폭발하지 못하고 베개 용암을 형성할 정도의 수압을 가질 수 있는 깊은 수심(이론적으로 2190m 이상)이 아니었음을 반영한다. 화산쇄설암은 하부에선 화성쇄설물(pyroclast)에 외래물질이 상당히 유입되어 섞인 층회암(tuffite), 혹은/그리고 화성쇄설물이 재이동되면서 입자들의 분급과 원마도가 비교적 양호한 재포쇄설암(epiclastic rock)이 우세하며, 중부에선 폭발성 분출에 의해 직접 현 위치에 정착된 화성쇄설암(pyroclastic rock)이 우세하다. 이 화산쇄설암은 입도분석에 의하면 라필리

응회암이 가장 우세하고 응회각력암과 응회암이 수반된다. 용암은 하부에 흐름각력화작용(flow brecciation)으로 인한 자생쇄설성 각력암(autoclastic breccia)을 수반하며, 퇴적층과 접촉부에선 물에 의한 급냉파쇄작용에 의해 유리쇄설성 각력암을 관찰할 수도 있다.

분출물의 조성은 초기에 대표적으로 고철질 안산암(혹은 현무암질 안산암)이었지만, 후기로 갈수록 규장질 데사이트내지 유문암으로 진화하였다. 주 성층화산 성장의 말기에, 마그마는 더 규장질이고 점성이 더 커지며, 화산회 분출과 대규모 화쇄류의 생성은 더 자주 일었다. 이 지역은 이러한 복합화산 형태의 화산중심이 밀집되고 화산관입체가 조합된 두꺼운 화산복합체를 형성함으로써 대규모 화산조구조성 저지를 형성하였다(차문성과 윤성호, 1988).

백악기 후기에 유문암질 화산작용은 복합대와 남서대에서 안산암질 화산작용보다 상대적으로 적게 일어났으며 북동대에서 거의 발생하지 않았다. 이들은 대부분 회류상(ash-flow phase)으로 분출하여 회류응회암(ash-flow tuff)으로 중첩되어 있으며 초기 분출상으로 흔히 플리니언 혹은 수증기플리니언 강하상(fall phase)으로 강하응회암(fallout tuff)을 수반하였다(황상구 외, 1997, 1998). 일반적으로 큰 분출 동안에 사건의 전형적 순서는 (1) 화산회 및 부석 강하의 원인이 되는 수직 분연주의 형성; (2) 화쇄류 형성의 분출로 진행되었다. 그러나 (3) 용암류의 분출은 이 지역에서 나타나지 않거나 혹은 화산관입체로 끝나는 경우가 많다.

유문암질 화산작용은 큰 칼데라 함몰을 유도하는 큰 용적의 회류 분출의 특징이었다. 화쇄류 분출은 일시적으로 일어나고 전형적으로 매우 짧은 기간을 지속하였다. 그래서 이 회류응회암체는 여러 곳에서 지하 천부의 저반과 함께 대규모 크라카토아(Krakatau)형 칼데라와 조합되어 있다(차문성과 윤성호, 1988; 황상구와 김상욱, 1990; 황상구, 1998, 1999). 즉 이 회류응회암체는 칼데라 경계를 따라 외곽부에 외류(outflow)로 보다 얇게 존재하고 반면에 칼데라 내부에 매우 두껍게 분포한다(황상구, 1996, 1998, 1999). 또한 이들은 환상 및 중앙 관입암체로 조합되어 있고 기타 심성암체에 의해 화산체로서의 윤곽이 파손되어 나타난다. 그렇지만 이 함몰구조들은 발달과정으로 보면 대부분 크라카토아형 혹은 바이아스(Valles)형 칼데라(Williams, 1941)로 분류되며, 기하학적 형태로 보면 하향자루형, 뚜껑문형, 깔데기형, 소생형과 등지

형 등이 관찰된다.

회류응회암은 흔히 용결작용으로 회색을 띠고 용결엽리를 보여주며 전반적으로 괴상을 띠지만 완배열상석리(eutaxitic fabric) 혹은 평행배열상석리(parataxitic fabric)를 나타낸다(황상구 외, 1997, 1998). 또한 심한 치밀용결을 받았을 경우는 용암과 구별하기가 쉽지 않는 경우도 있다. 강하응회암은 입도분석에 의하면 라필리응회암과 조립응회암으로 구성되며, 이들의 교호로 층리가 발달되고 분급이 양호한 편이다. 또한 라필리응회암 중에는 세립질 화산회로 구성되면서 누적라필리(accretionary lapilli)를 함유하는 것도 관찰된다(황상구, 1998). 그러므로 이 누적라필리는 이 응회암이 수증기마그마성 폭발(phreatomagmatic explosion)에 의한 강하상으로 육상 퇴적되었음을 지시해준다.

고제3기 전기의 화산작용

경상분지에서 이전의 화산과정과 구별할 수 있는 고제3기 전기의 화산작용은 대규모 규질 화쇄류 분출이었다. 특히 북동대에서 깊게 절개된 화쇄류대지가 여러 곳에서 인식되며, 이곳은 대부분 두꺼운 용결 회류응회암의 광범위한 산출을 지시해준다. 이들은 주요 화산중심으로부터 육상에 분출하였고 얼마의 화산 중심 지역은 분출 후에 대규모 칼데라를 형성하였다. 이 암층들은 K-Ar 혹은 Rb-Sr 연대가 각각 67.3-54.0 Ma, 63.6-54 Ma 범위로서 대부분 고제3기 전기에 속하고, 기타 화산호보다 연대가 매우 젊은 편이다(윤성호와 상기남, 1994; Kim et al., 1997; 황상구, 2002, 2007; 황상구와 김상호, 2006).

북동대에서 화산암류는 칼데라와 조합되어 있으며(윤성호, 1988, 1993; Park, 1990; 황상구, 2002), 이들은 한반도의 남동부가 화산연속체의 퇴적지일 뿐만 아니라 넓게 퍼지는 대규모 회류응회암을 생성시키는 수많은 화산중심이었음을 지시해준다. 이 회류응회암체는 이 지역에서 칼데라 경계를 따라 외곽부에 외류(outflow)로 존재하는 경우가 거의 발견되지 않지만, 고기 분출암체 혹은(그리고 퇴적암체 등에 둘러싸여 칼데라 내부에만 매우 두껍게 분포하고 있다(윤성호, 1988, 1993; 황상구와 김성규, 1999; 황상구, 2002). 그래서 이 회류응회암체는 칼데라 지역에서 퇴적암체 등에 둘러싸여 한정된 분포를 보여준다. 또한 이들은 환상 유문암맥 혹은 응회암맥으로 조합되어 있고 경우에 따라 중앙 심성암체를 가진다. 후칼데라 활동은 구암산의 경우에 있어서 같은 규질 마그마에 의해 특

정저 있고 아마도 작은 용암돔 혹은 용암류를 분출했던 화산 뿌리로 생각되는 특징적인 관입체가 칼데라 내부에 형성되어 있다(황상구, 2002; 황상구 외, 2002). 그래서 화산중심 지역은 지질이 매우 복잡하게 구성되는 만큼, 그 화산과정도 칼데라 발달과정에 따라 복잡하게 진행되었다(윤성호, 1988, 1993; 황상구, 2002).

그러나 화류용회암체는 칼데라와 무관하게 화쇄류 대지로 산출되는 경우도 있다(윤성호 외, 2000; 안웅산과 황상구, 2007; 황상구 외, 2007). 이 암체들은 흔히 심하게 용결되어 있고 반정과 부석을 흔하게 함유하며, 화학조성이 SiO_2 63~81% 범위로서 데사이트질 내지 유문암질이다(윤성호, 1988, 1993; 윤성호와 상기남, 1994; 황상구, 2002, 2007; 황상구와 김상호, 2006). 반정 광물은 풍부한 사장석과 석영과 부분적으로 흑운모 혹은/그리고 각섬석에 의해 특징지워진다. 부석들은 흔히 편평화되어 용결엽리를 보여주고 일정한 배열로 방향성을 가지는 경우도 있다.

화쇄류대지로 멀리 퍼져나간 암체는 흐름 지시자들로부터 이들의 공급지를 알아내는데 이용되었으며, 그 공급지는 대부분 현재 위치보다 동쪽 혹은 동남쪽의 동해안 근처로 알려져 있다(안웅산과 황상구, 2007; 황상구 외, 2007). 이 암체는 짧은 기간에 일시적으로 분출되어 분출물이 매우 크며 대체로 하나의 냉각단위(cooling unit)를 형성한다. 따라서 이 냉각단위들은 대부분 치밀용결되어 화색을 띠고 그 하부와 상부가 부분용결 혹은 비용결 상태로 존재한다(황상구, 2007).

화산암류의 암석계열

경상분지에서 화산암류는 알칼리 계열과 칼크알칼리 계열의 2개의 암석계열이 인지된다. 백악기 전기에는 알칼리 계열의 암석이 우세하고 칼크알칼리 계열의 암석이 수반되지만(김상욱 외, 2000; 윤성호 외, 2000), 반면에 백악기 후기와 고제3기 전기에는 일부 심성암을 제외하고 대부분 칼크알칼리 계열의 암석으로만 산출된다(김상욱 외, 1991, 1998; 김상욱과 이재영, 1993; 황상구와 김상욱, 1994a).

알칼리 계열은 일반적으로 반정과 석기단계에서 Ca-부족 휘석 없이 감람석과 Ca-풍부 사방휘석 간의 반응관계가 없는 것이 특징적이다(Kuno, 1968b). 감람석과 알칼리장석은 현무암의 석기에서 흔하게 산출된다. 켈슈타이트(Kaersutite)가 약간의 현무암에서

산출되고 알칼리 각섬석과 흑운모는 후기단계 암석에서 특징적으로 나타난다.

칼크알칼리 계열은 AFM도에서 쏘리아이트 계열과 분리되어 잘 정의되는 영역에 떨어진다. 여기서 칼크알칼리 계열은 쏘리아이트 계열보다 더 낮은 FeO^*/MgO 비를 가진다. 석기 휘석 광물군과 FeO^*/MgO 비 간의 상관관계는 칼크알칼리 계열의 마그마에서 보다 높은 H_2O 함량 때문이다. 이는 초기의 자철석 분리와 후기 마그마에서 철농집의 억제를 유도하는 철의 산화를 일으키며, 피죤나이트 자리에 자소휘석 정출을 유도하는 정출온도를 낮춰준다(Kuno, 1966b).

Kuno(1965)는 그의 자소휘석질 암석계열의 현무암-안산암-데사이트-유문암과 이에 동질인 심성암을 칼크알칼리 계열에 국한시키자고 하였다. 왜냐하면 이 암석계열의 화학적 변화 경향이 일반적으로 칼크알칼리 계열의 특징으로 받아들이는 것과 일치하기 때문이다. Kuno의 자소휘석질 암석계열은 사방휘석이 석기 광물로서 특징적으로 나타나지만, 반면에 쏘리아이트 및 알칼리 계열에서는 나타나지 않는 데서 나온 용어이다.

암석계열을 지리적 위치로 살펴보면, 알칼리 계열의 암석은 대부분 경상호를 벗어난 배호분지에서 하양층군에 협재하는 현무암질 화산층에서만 산출된다. 칼크알칼리(자소휘석) 계열의 암석들은 하양층군에 협재되는 현무암층을 제외하고 경상호의 전반에 걸쳐서 가장 풍부하다. 또한 쏘리아이트 계열은 경상화산호의 육상에서 발견되지 않지만, 일본열도에서 외측부 화산호의 화산전면부를 따르는 지대에 주로 국한되어 산출되는 점을 고려하면, 어렵겠으나 해수에 잠긴 부분에서 발견될 가능성도 있다.

하양층군에서 현무암질 화산작용은 저알칼리의 쏘리아이트는 없지만 알칼리 현무암과 칼크알칼리 현무암을 포함하는 다양한 현무암질 계열을 산출한다. 청룡사 및 하마현무암은 알칼리 계열을 나타내고 경상호로부터 떨어진 배호분지 중간에서 산출되지만(김상욱 외, 2000), 오십봉, 세천동 및 대전사 현무암은 칼크알칼리 계열을 나타내고 경상호 중에서 북동대 내측 경계부에 근접하여 산출된다(김상욱 외, 2000; 윤성호 외, 2000). 그러나 학봉, 함안 및 채약산현무암은 배호분지 중간에서 산출되면서도 주원소 판별도에서 알칼리 계열을 나타내고 미량원소 판별도에서 칼크알칼리 계열을 나타내는 양면성을 나타낸다(김상욱 외, 2000).

Table 4. Contents of K₂O, Ba, Sr, Th, La, Ni, Cr and Co, which are normalized against SiO₂ 60% on a Harker diagram, from the composite zone of the Gyeongsang Arc

Area	Distance from coastline	K ₂ O (wt%)	Ba (ppm)	Sr (ppm)	Rb (ppm)	Th (ppm)	La (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	Co (ppm)	Rb/Sr	La/Sm	References
Jindong Adakite	15 km	1.0	250	460	80	4	16	8	30	13	0.174	4	Wee et al., 2006
Geoje Island	-25 km	1.8	330	450	75	5	15	29	34	85	0.167	4	Yun et al., 1997
Gadeok Island	-5 km	1.6	300	360	50	6	15	25	28	35	0.139	4	Koh et al., 2004
Busan Songdo	3 km	2.1	450	700	55	7	20	75	20	10	0.079	2.2	Yun et al., 1996
Miryang-Yangsan	38 km	2.2	450	430	50	8	22	25	30	18	0.116	4.5	Hwang & Kim, 1994
Jain	63 km	2.9	750	380	11		34	15	20	12	0.029	7.0	Kim et al., 1993
Gyeongsan caldera	87 km	2.9	650	335	80		24	16	30		0.239	6	Park et al., 2006

칼크알칼리 계열의 암석들은 하양층군에 협재되는 현무암층을 제외하고 경상호의 전반에 걸쳐서 가장 풍부하게 산출된다. 경상호 화산암류의 주원소와 미량원소 조성과 REE 패턴에 의하면 이들은 대륙지각 아래의 섭입대에서 형성되는 전형적인 칼크알칼리(자소회석) 계열이라는 것을 보여준다(김상욱 외, 1991; 황상구와 김상욱, 1994b; 정종욱과 좌용주, 2000; 윤성호 외, 2000; Park et al., 2006).

현무암층들이 산출위치가 다르고 조성이 두 계열로 구분되는 것은 경상분지의 확장작용과 섭입작용에 따라 지각구조의 변화로 인해 마그마의 성인이 각각 달랐음을 암시한다고 생각된다. 알칼리 현무암은 내륙 쪽 깊은 곳에서 발생하는 호화산작용의 결과물로 간주할 수도 있겠지만 신장성 의력에 의한 분지 확장시에 열곡작용(rifting)으로 일어나는 열곡화산작용의 산물로 생각된다. 왜냐하면 이 현무암들보다 후기이지만 칼크알칼리 화산암이 이들의 산출지보다 더 멀리 떨어진 곳에서도 산출되기 때문이다. 그리고 칼크알칼리 현무암과 구산동응회암을 비롯하여 경상호의 화산암류는 해양판의 섭입작용으로 상위 대륙판에 발생하는 호화산작용의 결과물로 해석된다.

화산호에서 암석학적 변화

횡적 변화

경상분지에서 화산암류는 화산호 지역에 대부분 칼크알칼리 계열의 화산암류로만 산출되고 배호분지에 알칼리 계열의 현무암층으로 일부분 산출된다. 이러한 암석계열의 지리적 분포는 화학조성에서도 뚜렷한 누대 패턴을 보여준다. 하크변화도에 도시할 때, 칼크알칼리(혹은 자소회석질) 계열은 거제도에서 중-

K 암대(Suite)이고(윤성호 외, 1997) 부산 지역에서 고-K 암대와 중-K 암대에 걸쳐 있으며(윤성호 외 1996) 밀양-양산 지역에서 고-K 암대이다(황상구와 김상욱, 1994b). 따라서 알칼리가 도서 지역에서 배호지역으로 가면서 더 풍부해진다.

개개 화산증심에 대해서 일정한 함량의 SiO₂에 대해 표준화한 K₂O 함량과 해안선으로부터 거리 간의 관계를 고려하면(Table 4) 베니오프대 심도를 추정할 수 있다. 백악기 심성암류와 화산암류에서 확인된 바와 같이(이상만 외, 1987; Sung et al., 1999). 개개 화산호에서 SiO₂ 60%로 표준화한 K₂O 함량은 화산호의 베니오프대의 동일 심도에 따라 대체로 점진적으로 증가한다(Fig. 2). K₂O와 유사한 방식으로 배호지역으로 하면서 Ba, Th, La의 함량도 점진적 증가를 확인할 수 있고(Fig. 3, 4) 반면에 Co, Cr, Ni 함량도 점진적 감소를 확인할 수 있다(Table 4; Fig. 5).

Fig. 2. Variation of K₂O with distance from coastline in the composite zone of the Gyeongsang Arc. ○, Geoje Island area; ●, Gadeok Island area; △, Busan Songdo area; ▲, Miryang-Yangsan area; □, Jain area; ■, Gyeongsan caldera area.

Fig. 3. Variations of Ba and Sr with distance from coastline in the composite zone of the Gyeongsang Arc. Symbols are the same as in Fig. 2.

Fig. 4. Variations of Th and La with distance from coastline in the composite zone of the Gyeongsang Arc. Symbols are the same as in Fig. 2.

Fig. 5. Variations of Ni and Co with distance from coastline in the composite zone of the Gyeongsang Arc. Symbols are the same as in Fig. 2.

La의 함량과 La/Sm 비도 점진적 변화를 확인할 수 있다(Table 4). 특히 경상호에서 각 화산중심의 LREE 평균치는 해안측부에서 배호분지로 가면서 점차 증가하고 반면에 같은 암석에서 좁은 범위 내에서 MREE가 상대적으로 거의 같다는 것을 보여준다(Fig. 6). 그러나 경산 칼데라 부근의 암상은 이 패턴으로부

Fig. 6. REE patterns of six areas in the composite zone of the Gyeongsang Arc. Symbols are the same as in Fig. 2.

터 이탈되는 양상을 보이는데, 이에 대한 원인은 앞으로 찾아내야 할 과제이다.

그리고 여러 화산중심에서 연구에 의하면, 층서에 따라 현무암에서 안산암과 데사이트를 지나 유문암까지 거의 평행한 단면에서 REE가 연속적인 증가를 보이는데, 이러한 REE 증가는 천부 마그마 저장고에서 분별결정작용을 지시한다고 해석되었다(김진섭, 1990; 윤성호 외, 1997; 윤성호, 1998; 황상구와 김상욱, 1994b).

종적 변화

화학조성에서 여러 상관관계는 화산암류의 암석성인과 대륙지각의 구조 간의 연결고리를 암시해준다. Ui and Aramaki(1978)는 일본열도의 전반에 걸쳐 K_2O 값과 Bouguer 중력이상 간의 네거티브 상관관계를 지적하였으며, 이는 분별결정작용 동안에 아마도 대륙지각의 다양한 역할을 반영한다. K_2O 60%로 표준화한 각 지역의 K_2O 함량은 북동대에서 0.6-2.5% 범위를 보여주고(Table 5) 북서대에서 1.6-2.9% 범위이며(Table 4) 남서대에서 2.4%를 나타낸다. 앞에서 설명한 바와 같이, 이 K_2O 함량은 도서 지역 혹은 해안에서부터 배호분지로 갈수록 증가하는 경향을 나타내는데(Fig. 2, 6), 이는 대륙호에서 베니오프대의 심도가 대륙쪽으로 가면서 증가한다는 것을 암시한다.

한편 북동대에서 K_2O 함량이 상대적으로 낮은 것은 화산전면부가 아마도 해안 가까이에 위치했다는 것을 암시하며, 남서대에서 득량만에서조차도 K_2O 함량이 높은 것은 아마도 화산전면부가 해안선에서 더 멀리 떨어져 있다는 것을 암시한다. 그래서 K_2O 함량은 전반적으로 북동대에서 남서대로 가면서 증가하는 경향을 보여주는 것으로 생각된다.

Table 5. Contents of K_2O , which are normalized against SiO_2 60% on a Harker diagram, from the northeastern zone of the Gyeongsang Arc

Geologic information	Distance from coastline	K_2O (wt%)	References
Naeyeonsan Tuff	9 (3) km	1.2	Yun et al., 2000
Juwangsang Tuff	23 (9) km	0.6	Hwang et al., 2007
Muposan Tuff	18 (13) km	1.0	Hwang and Kim, 2006
Guamsan caldera	19 km	2.0	Hwang, 2002
Jukjang area	30 (35) km	2.1	Jeong and Jwa, 2000
Hwasan caldera	55 km	2.2	Yun, 1988
Geumseongsan caldera	60 km	2.5	Yun, 1993
Deukryang Bay	2 km	2.4	Yun et al., 1996

Parenthesized passages represent distances from coast to each inferred vent.

Fig. 7. Variation of K_2O with distance from coastline in the Donghae zone of the Gyeongsang Arc. ○, Naeyeonsan Tuff; ●, Juwangsang Tuff; △, Muposan Tuff; ▲, Guamsan caldera; □, Jukjang area; ■, Hwasan caldera; ◇, Geumseongsan caldera.

$^{87}Sr/^{86}Sr$ 초기비는 규칙적인 누대변화를 찾을 수 없다. 대신에, 북동대 지역에서는 0.70498~0.70550 범위 (황상구, 2002; 황상구와 김상호, 2006; 황상구 외, 2007)로서 비교적 낮은 값(0.7055 이하)이고, 호북합대 지역도 0.70521로서(황상구와 정창식, 1998) 비교적 낮은 값으로서 거의 비슷하다. 반면에 채약산현무암은 0.7054~0.7062 범위로서 약간 높은 편이다(윤성호, 1998a). 경상호와 배호분지에서 나온 암석은 0.70498과 0.7062 사이의 다소 넓은 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 비의 범위를 갖지만, 그러나 대부분 0.7050보다 더 낮고, 암형 혹은 지리적 분대와 상관관계가 거의 없지만, 그러나 채약산현무암에서 다소 높은 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 비를 갖는 암석(0.7055 이상)은, 풍부한 포획체와 규장질 광물의 외래 결정과 같은, 일반적으로 지각혼입의 증거를 보여준다.

암석성인적 의미

대규모 칼크알칼리 화산작용은 이내 화강암질 심성

작용이 뒤따랐다. 이 화강암질암은 세립질내지 중립질 섬록암-화강섬록암을 포함하며 반상 조직과 I형 특징을 가진다(Jin, 1980). 암석학적 및 지화학적 특성은 이 암석의 천부 정치를 지시한다(Lee, 1992; 조동룡과 권성택, 1994). 이들은 섭입 관련 마그마작용과 조합되는 하부지각 혹은 상부 맨틀에 화성 근원암으로부터 유래되었다고 해석된다(Jin, 1980; Hong, 1987; Jwa et al., 1990). 칼크알칼리 화산작용과 화강암질 심성작용은 역시 동원성이라고 해석된다(이상만 외, 1987). 동위원소연대 자료를 종합하면, 화산작용과 조합된 심성작용은 대체로 화산작용에 뒤따라 일어났다는 것을 보여준다.

Ni, Cr과 Co는 감람석에서(Cr의 경우는 역시 단사회석에서)강하게 농집되기 때문에, 이들은 분별결정작용 동안에 빠르게 떨어진다. 양산 칼데라 외측부에서 주사산 안산암질암류에서 Ni 함량이 30 ppm(46, 13)이고, 삼랑진 칼데라의 세립질 화강섬록암(환상암맥)에서 Ni 함량이 53 ppm(41, 53, 66)이다. 일본에서 가장 고철질 현무암에서 Ni 함량이 감람석과 평형을 이루는 현무암질 마그마(100 ppm 이하)보다도 100 ppm 이하로 현저히 더 낮은 편이다. 그러므로 경상호 지역에서 안산암은 분출 전에 감람석과 단사회석의 분별결정작용을 상당히 크게 겪었음에 틀림없다.

Sr 동위원소는 해안측에서 배호 지역으로 경상호를 횡단하면서 덜 방사성의 경향을 나타낸다. $^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{238}U/^{204}Pb$ 과 $^{232}Th/^{204}Pb$ 비는 같은 방향으로 증가하며, 이때 모 및 딸 동위원소비 간에는 부의 상관관계를 나타낸다. 그러나 이 자료는 오랫동안 세워진 수평 맨틀 불균질성에 의해 설명될 수 없다. 이 동위원소 자료에 대한 가능한 설명은 (1) 지각혼입, (2) 수직으로 분별된 맨틀 내의 다른 레벨에서 마그마 생성, (3) 섭입 해양지각으로부터 퇴적상 Pb의 추가로 가능

하다(Tatsumoto, 1969; Tatsumoto and Knight, 1969). 대륙물질의 혼입은, 앞에서 토의한 바와 같이, 배호분지의 화산암류를 제외하고 일반적으로 낮은 Sr 동위원소비에 의해 배제된다. 이 경상호에서, 부조화적인 REE 패턴은, 때때로 매우 높은 La/Yb 비와 함께, 역시 지각물질에 의한 근본적인 혼입을 암시해준다. HREE의 낮은 패턴은 일본 아래에서 HREE의 고갈된 상부맨틀의 존재 때문이거나 혹은 석류석의 존재에서의 부분용융 때문일 것이다.

일반적으로 베니오프대 심도와 상관있는 알칼리와 기타 불호정성원소의 누대변화는 해양판 섭입에 의해 결정되는 마그마 생성기구에 의해 일반적으로 설명된다. 아마도 모 현무암질 마그마는 맨틀웨지의 부분용융의 정도차이에 의하거나 혹은 용융작용의 심도차이에 의하거나 혹은 두 기구의 조합에 의해 생성될 수 있다. 용융작용의 시작심도에서 석류석은 중요한 역할(REE 패턴 참조)을 하지만, 그러나 상부맨틀에서 감람석과 휘석(±사장석)은 주요 정출상이다. 현무암질 마그마 생성의 가장 초기단계에 휘발성분(주로 H_2O)의 효과는 아직도 모호한 점이 많지만, 그러나 하부지각으로 올라온 마그마에서 휘발성분 함량은 화산전면부에서 멀어지면서 더 높아진다. 그러므로 분별결정작용과 함께 쌍을 이루는 지각혼입은 다른 현무암질 계열보다도 칼칼알칼리 계열의 안산암-테사이트-유문암에서 우세하게 작용하였다.

호화산작용에서 가장 중요한 특징 중에 하나는 화산호의 해구측 경계부로서 화산전면부의 형성이다. 화산전면부 아래에서 지진의 발생심도는 약 100 km로서 거의 일정하다고 알려져 있다(Gill, 1981; Haukesson, 1985; Tatsumi, 1986). Tatsumi(1986)는 100 km 심도에서 각섬석의 탈수작용에 의해 나온 H_2O 유체가 함수 감람암의 고상선 온도를 갖는 지역, 즉 마그마가 생성되는 곳으로 올라온다고 제시하였다. 이 마그마는 다이아피르 형태로 직선으로 바로 올라오기 때문에 탈수지역 바로 위에 화산전면부가 형성된다. 화산의 밀집도는 화산전면부를 따라 가장 높고 배호쪽으로 감소한다(Sugimura et al., 1963). 맨틀웨지에서 만들어진 마그마의 용적은 화산전면부 바로 아래에서 가장 크다(Tatsumi, 1986).

일반적으로 부분용융과 화산작용은 해양지각으로부터 H_2O 의 탈수작용에 의해 감람암의 고상선 하강의 결과이라고 일반적으로 받아진다(Fyfe and McBirney, 1975; Defant and Drummond, 1990; Peacock, 1990;

Davies and Stevenson, 1992). 섭입 해양판에서 탈수작용의 종식은 본질적으로 각섬석의 안전평형 경계인 100km로 정의된다(Furukawa, 1993). 하강하는 암권에서 나오는 H_2O 는 전호 맨틀웨지와 반응하여 함수광물을 정출시킨다. 이 함수 감람암은 맨틀웨지에서 더 높은 PT 지역 아래로 예인되고 이 맨틀웨지에서 천부의 잠정적 마그마 공급지역으로 H_2O 를 방출시킨다.

섭입 해양지각은 압력 지배를 받는 각섬암이 약 70~80 km 심도에서 에클로자이트로 탈수반응을 겪는다고 한다(Liu et al., 1996). 얼마의 모델에서, 이 결과로 나온 유체 유입은 맨틀웨지에서 수직으로 일어나고 이때 형성된 각섬석 감람암은 웨지에서 대류와 함께 아래로 이동하여 고상선 1000°C에 도달하고(Green, 1973; Wyllie, 1979) 부분용융을 겪게 된다(Tatsumi, 1986).

경상호의 조구조 진화

해양판의 섭입, 다양한 해양물질의 추가, 그리고 대륙호의 발달은 주라기 이래 북동 아시아 연변부에서 주요 지질과정이었다(Taira, 2001). 일본호 체인은 한반도의 남쪽 끝에서 활모양으로 회전하면서 남서쪽에서 북동쪽으로 수천km 뻗어나간다. 백악기 전기에, 북동 아시아 연변부는, 이자나기판의 북쪽으로 사각 섭입에 의해 유도되는, 좌수향 렌퀴 조구조운동을 받기 시작하였다(Klimetz, 1983). 약 120 Ma에 이자나기판의 섭입방향이 북쪽에서 북북서 방향으로 약간 변화되었다(Maruyama et al., 1997). 한반도에서 이러한 사각방향의 섭입양상은 NE-NNE 방향의 좌수향 주향이동 단층을 형성하고 변위가 지속적으로 확장됨으로서 경상호의 배호 지역에서 인리형 분지가 열리도록 유도하였다(Lee, 1999).

경상분지는 이러한 조구조운동 하에서 북북동 방향의 좁은 곡분(낙동곡분)으로 시작되었다고 한다(Chang, 1975, 1988; 장기홍, 1977). 이 낙동곡분은 갑자기 동쪽으로 확장되었고 경상분지의 대부분에 후기 지층의 퇴적작용이 뒤따랐다(Chang, 1975, 1988; 장기홍, 1977; Chang et al., 1999, 2003). 분지가 확장될 때, 퇴적지가 점차 동쪽으로 옮겨가면서 얇은 호수로서 의성 및 영양 소분지가 발달되기 시작하였다.

인리형 분지발달은 지각의 두께가 얇아지는 열개현상을 동반함으로서 압압의 감소와 함께 마그마 생성을 촉진시켰으며, 열개지는 마그마의 이동통로로 이

용됨으로서 용암류를 분출시켰을 것이다. 그러므로 신라역암층의 아래와 위에 협재되는 청룡사현무암과 학봉현무암은 분지 확장과 조구조동시성 화산작용의 결과라고 해석된다. 따라서 경상분지는 대륙 열곡작용에 의해 형성된 배호분지로 해석된다.

또한 배호분지의 형성과 더불어 화산호가 형성되었고, 넓은 배호 지역도 역시 화산호로부터 구산동용회암과 같은 화성쇄설성 분출에 의해 호화산작용의 영향을 받기 시작하였다. 그러므로 경상분지에서 호화산작용은 100 Ma 무렵부터 이미 시작되었으며(Chough and Sohn, 2010), 백악기 후기로 가면서 격렬하게 지속되었다.

그리고 백악기 후기(약 90 Ma)로 접어들면서 이자나기판의 섭입방향은 북북서 방향에서 북서 방향으로 변화됨(Maruyama et al., 1997)으로서 분지발달이 종식되었으며, 대륙연변부에 대해 사각에서 직각방향으로의 변화는 마그마 생성이 용이하게 유도되어 백악기 후기 동안에 화산작용이 지속적으로 진행되게 하였다.

유라시아 대륙의 동변부에서 백악기 후기의 대규모 화산작용은 약 90~70 Ma 전에 북북동-남남서 방향의 해구에 도달한 이자나기-태평양 해령(Izanagi-Pacific ridge)의 빠른 북서향 섭입작용에 따르는 높은 열에너지의 원인이라 하였다(Miyashiro, 1972; Uyeda and Miyashiro, 1974; Hilde et al., 1977; Engebretson et al., 1985; Maruyama et al., 1997; Kinoshita, 1995). 이러한 높은 열원으로 인한 화산작용은 대구-부산 사이에 북서-남동 방향의 폭넓은 화산대를 형성했던 것과 무관하지 않다. 해령 섭입에 따른 섭입판의 슬랩창을 반영하는 것으로 생각해볼 수 있다(Thorkelson, 1996). 그러나 비록 호마그마작용(arc magmatism)이 중생대 후기에서 신생대 전기 동안 모든 태평양 연변부의 특징이라 하지만, 북동 시베리아에서 사할린을 지나 동중국까지 아시아 대륙연변부를 따라 너비 1,000 km를 능가하는 면적에 대규모 호마그마작용의 정도는 단순한 섭입형 모델로 해석하기에는 무리가 따른다.

경상호의 주변은 상위 대륙판과 사각섭입의 해양판 간에 약한 커플링으로 인해 백악기 동안에 전체적으로 신장 상태 혹은 전단인장 상태에 있었던 것으로 해석된다. 왜냐하면 압축력을 나타내는 습곡, 트러스트 등의 퇴적동시성 변형구조가 요곡현상을 제외하고 거의 관찰되지 않기 때문이다. 그리고 하양층군의 여

러 층군에 현무암 및 응회암이 협재되고 여러 지역에 칼데라 및 화산조구조성 저지가 발달되어 있는 것은 신장성 혹은 전단인장성 의력의 지배하에 있었음을 암시해주기(Dickinson and Lawton, 2001) 때문이다.

하양층군과 유천층군에 기록된 바와 같이, 화산작용의 점진적 증가는 신장성 의력의 전반적인 증가가 있었다는 것을 암시한다. 왜냐하면 마그마 상승은 지각이 신장성 의력을 받는 곳에서 더 쉽게 일어나기 때문이다. 경상호에서 신장성 의력과 화산활동의 일시적 증가는 아마도 섭입각의 증가 때문이었으며, 이는 점진적으로 더 오래되고 더 무거운 해양판의 섭입이 원인인 것으로 보인다(Perfit and Davidson, 2000). 그래서 이 경상호는 상위 대륙판과 섭입 해양판의 약한 커플링으로 신장성 혹은 전단인장성 의력의 지배를 받았던 것으로 해석할 수 있다(Morgan et al., 2008). 그리고 42 Ma 전에 대륙판 아래로 섭입되는 해양판의 슬랩 백터는 갑자기 서북서 방향으로 변화하였고 새로운 조산윤회(orogenic cycle)가 시작되었다(Clague and Jarrard, 1973).

결론

백악기에 아시아대륙 동변부는 화산호 체인을 형성하였고 이 체인 내의 한반도에도 남동부를 따라 화산호를 형성하였다. 이 화산호가 한국호이고 북동-남서 방향으로 달리는 여러 대륙호로 구성되는 복식호이며 그 중에서 경상분지의 남동부를 따르고 남해안을 지나는 경상호가 가장 우세하다.

백악기 전기 화산작용은 하양층군의 여러 층군에 얇은 화산층으로 협재돼 있으며 알칼리 혹은 칼크알칼리 현무암질 용암류로 구성되어 있다. 백악기 후기 화산작용은 경상호 내에 넓게 퍼져있고 칼크알칼리 화산물질로 구성되며, 여기에는 흔히 칼크알칼리 심성암이 조합되어 산출된다. 백악기 후기 화산작용은 (1) 고기 암석이 고철질 현무암질 및 안산암질 용암류이며, (2) 신기 암석이 데사이트질-유문암질 화쇄강하, 화쇄류이고 이에 관련된 칼데라와 칼데라후 암맥과 돔으로 특징지어진다. 주요 분출과정은 대체로 플리니언 부석 및 화산회 강하로 시작하여, 화쇄류를 지나고 용암분출로 끝나는 패턴을 따른다.

경상호에서 백악기 화산암류의 전암조성은 SiO_2 에서 주요 모드와 함께 대부분 원소에 대해 연속적 분포를 보여준다. 이들은 K_2O 함량에 의해 중K 및 고

K 칼크알칼리 계열로 구별될 수 있다. 이들은 대체로 해안에서 점진적으로 멀어지면서 대체로 평행한 배열을 하고 후기로 가면서 고K 칼크알칼리가 우세한 경향을 나타낸다. 현무암에 비하여 안산암과 유문암이 양적으로 훨씬 더 풍부하다.

백악기 전기(약 120 Ma)에 이자나기판의 섭입방향이 북쪽에서 북북서 방향으로 약간 변화됨으로서 사각방향의 섭입작용은 NE-NNE 방향의 좌수향 주향이동 단층을 형성하면서 경상호의 배호 지역에 인리형 분지가 열리고 동쪽으로 확장되어 배호분지를 형성하였다. 이때 배호분지에는 암압의 감소와 함께 마그마 생성의 촉진으로 열개지를 이동통로로 용암류를 분출시켰으며, 하양층군의 여러 층군에 화산성 협재층을 형성하였다. 따라서 경상분지는 대륙 열곡작용에 의해 형성된 배호분지로 해석된다.

배호분지의 확장과 더불어 경상분지에서는 호화산작용이 100 Ma 무렵부터 이미 시작되었으며, 백악기 후기로 가면서 격렬하게 지속되었고 화산호를 형성하였다. 백악기 후기(약 90 Ma)에 이자나기판의 섭입방향이 북북서 방향에서 북서 방향으로 변화됨으로서 분지발달이 종식되었으며, 대륙연변부에 대해 사각에서 직각방향으로의 변화는 마그마 생성이 용이하게 유도되어 백악기 후기 동안에 화산작용이 지속적으로 진행되게 하였다. 대구-부산 사이에 북서 방향의 폭넓은 화산대는 이자나기-태평양 해령의 빠른 북서향 섭입작용으로 슬랩창의 높은 열원에 의한 화산작용과 무관하지 않다.

사 사

이 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 일반연구지원사업(과제번호 2010-0009118)의 일부이다. 심사를 맡아주신 부산대 윤성효 교수님과 경북대 장윤득 교수님에게 감사를 드린다. 또한 한국암석학회 20주년 기념 논문집 발간에 애써주신 편집관계자에게 감사를 표한다. 그리고 그림 작성에 안동대 한기환과 류한영의 도움이 있었다.

참고문헌

고정선, 김은희, 윤성효, 부산 가덕도 지역 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 13, 47-63.
김규봉, 황상구, 1988, 밀양도폭 지질 보고서. 한국동력자원연구소, 26p.

김상욱, 이영길, 1981, 유천분지 북동부 백악기 화산암류의 화산암석학 및 지질구조. 광산지질, 14, 35-49.
김상욱, 이재영, 김영기, 고인석, 1991, 남부 유천소분지에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적인 연구. 지질학회지, 27, 24-39.
김상욱, 황상구, 이윤종, 고인석, 2000, 경상분지내 백악기 현무암질 화산암류의 다양성. 암석학회지, 9, 1-12.
김진섭, 1990, 경상분지 동남부 일대에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적인 연구. 지질학회지, 26, 53-62.
김진섭, 윤성효, 1993, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I). 암석학회지, 2, 156-166.
민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환, 1982, 한국 남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구(I). 광산지질, 15, 123-154.
민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 김규한, 1988, 한국 남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구(II). 지질학회지, 24, 11-40.
박성욱, 장윤득, 황상구, 김정진, 2005, 경산칼데라 동부지역에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 특징. 암석학회지, 15, 90-105.
안웅산, 황상구, 2007, 청송 남동부 무포산호화암의 흐름 지시자로부터 유향 결정. 자원환경지질, 40, 319-330.
원종관, 강필중, 이상현, 1978, 경상분지의 구조해석과 igneous pluton에 관한 연구. 지질학회지, 14, 79-92.
위수민, 최선규, 유인창, 신흥자, 2006, 경상분지 서남부에 분포하는 백악기 진동화강암의 지화학적 특성: 아다카이트 특성을 중심으로. 자원환경지질, 39, 555-566.
유인창, 최선규, 위수민, 2006, 한반도 동남부 백악기 경상분지의 형성과 변형에 관한 질의. 자원환경지질, 39, 129-149.
윤성효, 1987, 경상분지 북부의 백악기 화산암물구조. 부산대학교, 이학박사 학위논문, 83p.
윤성효, 1988, 화산 환상화성암복합체의 발달사 및 콜드론 구조. 지질학회지, 24, 267-288.
윤성효, 1993, 의성분지 중앙부 금성산 화산암복합체의 화산활동과 콜드론 구조. 지질학회지, 29, 309-323.
윤성효, 1998a, 유천화산암 분포지 북부 백악기 채약산화산암의 암석화학 및 스트론튬 동위원소비 조성. 지질학회지, 34, 161-171.
윤성효, 1998b, 한국 남동부 유천화산암 분포지에 위치하는 백악기 화산암복합체의 암석학 및 화산활동사. 한국지구과학회지, 19, 408-424.
윤성효, 상기남, 1994, 경상분지 남부의 백악기 화산암복합체의 콜드론구조 및 지질년대. 한국지구과학회지, 15, 376-391.
윤성효, 이문원, 고정선, 김영라, 한미경, 2000, 경상분지 동북부 보경사화산암체의 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 21, 596-610.
윤성효, 이문원, 고정선, 김영라, 안지영, 2000, 청송 주왕산지역 대전사현무암의 암석화학적 연구. 암석학회지, 9, 84-98.
윤성효, 이준동, 이상원, 고정선, 서윤지, 거제도 화산암의 암석학적 연구. 암석학회지, 6, 1-18.

- 윤성효, 장현정, 고정선, 전라남도 순천시 득량면 침산 화산암물체에 대한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 17, 93-108.
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기 - 제삼기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23, 338-359.
- 이태호, 박계현, 천종화, 이기욱, 2010, 경상분지 진주층 및 신라역암의 SHRIMP U-Pb 연령분포 및 그 의미. 암석학회지, 19, 89-101.
- 장태홍, 1977, 경상분지 상부 중생계의 층서, 퇴적 및 지구조. 지질학회지, 13, 76-90.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 한국지질도 부산-가덕도폭. 한국동력자원연구소, 22p.
- 조등룡, 권성택, 1994, 남한의 중생대 화강암에 대한 가석석 지압계와 지각 두께의 진화. 지질학회지, 30, 41-61.
- 차문성, 윤성효, 1988, 한반도의 화산암물구조 및 환상복합암체에 관한 연구. 지질학회지, 24, 67-86.
- 황상구, 2002, 구암산 칼데라에 관련된 화산암류의 마그마 진화. 지질학회지, 38, 341-359.
- 황상구, 2007, 청송 동부 주왕산응회암의 냉각과정. 지질학회지, 43, 353-367.
- 황상구, 김상욱, 1990, 밀양 - 양산 간의 칼데라를 동반한 화류응회암. 지질학회지, 26, 329-340.
- 황상구, 김상욱, 1994a, 밀양 - 양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I): 암석구조조적 위치. 지질학회지, 30, 229-241.
- 황상구, 김상욱, 1994b, 밀양 - 양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(II): 암석성인. 지질학회지, 30, 563-577.
- 황상구, 김상호, 2006, 청송 남동부 무포산응회암의 마그마 과정. 지질학회지, 42, 253-271.
- 황상구, 김상욱, 이윤종, 1998, 삼랑진 칼데라의 화산작용과 화성과정. 암석학회지, 7, 147-160.
- 황상구, 손진담, 이병주, Reedman, A.J., 2002, 구암산 칼데라의 분출상과 화산과정. 암석학회지, 11, 74-89.
- 황상구, 이기동, 김상욱, 이재영, 이윤종, 1997, 원동 칼데라의 화산작용과 화산과정. 암석학회지, 6, 96-110.
- 황상구, 이병주, Reedman, A.J., 2007, 청송 동부 주왕산응회암의 마그마 과정. 지질학회지, 43, 65-81.
- 황상구, 정창식, 1998, 삼랑진 칼데라에 관련된 화성암류의 마그마 진화. 암석학회지, 7, 161-176.
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. J. Geol. Soc. Korea, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1988, Cretaceous stratigraphy and paleocurrent analysis of Kyongsang Basin, Korea. J. Geol. Soc. Korea, 24, 194-205.
- Chang, K.H., Filatova, N.I. and Park, S.O., 1999, Upper Mesozoic stratigraphic synthesis of Korean Peninsula. Econ. Environm. Geol., 32, 353-363.
- Chang, K.H., Suzuki, K., Park, S.-O., Ishida, k. and Uno, K., 2003, Recent advances in the Cretaceous stratigraphy of Korea. J. Asian Earth Sci., 21, 937-948.
- Choi, H.I., 1986, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. J. Geol. Soc. London, 143, 29-40.
- Chough, S.K., Jwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: A review and a new view. Earth Sci. Rev., 52, 175-235.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system. Earth-Science Reviews, 101, 225-249.
- Clague, D.A. and Jarrard, R.D., 1973, Tertiary Pacific plate motion deduced from the Hawaii-Emperor chain. Geol. Soc. Am. Bull., 84, 1135-1154.
- Davies, J.H. and Stevenson, D.J., 1992, Physical model of source region of subduction zone volcanics. J. Geophys. Res., 97, 2037-2070.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., 1990, Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347, 662-665.
- Dickinson, W.R. and Lawton, T.F., 2001, Tectonic setting and sandstone petrofabrics of the Bisbee basin(USA-Mexico). J. S. Am. Earth Sci., 14, 475-504.
- Engelbreton, D.C., Cox, A. and Gordon, R.G., 1985, Relative motion between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. Geol. Soc. Am. Special Paper, 206, 1-59.
- Furukawa, Y., 1993, Magmatic processes under arcs and formation of the volcanic front. J. Geophys. Res., 98, 8309-8319.
- Fyfe, W.S. and McBirney, A.R., 1975, Subduction and the structure of andesitic volcanic belts. Am. J. Sci., 275-A, 285-297.
- Gill, J.B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, 390p.
- Green, D.H., 1973, Experimental melting studies on a model upper mantle composition at high pressure under water-saturated and water-unsaturated conditions. Tectonophysics, 17, 285-297.
- Haukesson, E., 1985, Structure of the Benioff zone beneath the Shumagin Islands, Alaska: relocation of local earthquakes using three-dimensional ray tracing. J. Geophys. Res., 90, 635-649.
- Hong, Y.K., 1987, Geological characteristics of Precambrian, Jurassic and Cretaceous granites in Korea. J. Kor. Inst. Minin. Geol., 20, 35-60.
- Jin, M.S., 1980, Geological and isotopic contrasts of Jurassic and Cretaceous granites in South Korea. J. Geol. Soc. Korea, 16, 205-215.
- Jwa, Y.J., Lee, Y.I. and Orihashi, Y., 2009, Eruption age of the Kusandong Tuff in the Cretaceous Gyeongsang Basin, Korea. Geosci. J., 13, 265-273.
- Jwa, Y.J., Nakajima, T., Uchiumi, S. and Shibata, K., 1990, Geochronology and cooling history of Mesozoic granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. Geochem. J., 24, 93-103.
- Kim, S.B., Chough, S.K. and Chun, S.S., 2003, Tectonic controls on spatio-temporal development of depositional

- systems and generation of fining-upward basin fills in a strike-slip setting: Kyokpori Formation (Cretaceous), south-west Korea. *Sedimentology*, 50, 639-665.
- Kim, S.J., Lee, H.K. and Itaya, T., 1997, K-Ar ages and geochemistry for granitic and volcanic rocks in the Euseong and Shinryeong area, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, 30, 603-612.
- Kinoshita, O., 1995, Migration of igneous activity related to ridge subduction in southwest Japan and the East Asian continental margin from the Mesozoic to the Paleogene. *Tectonophysics*, 245, 25-35.
- Klimetz, M., 1983, Speculations on the Mesozoic plate tectonic evolution of Eastern China. *Tectonics*, 2, 139-166.
- Kuno, H., 1965, Some problems on calc-alkali rock series. *J. Japan. Assoc. Petrol. Mineral. Econ. Geol.*, 53, 131-142.
- Kuno, H., 1966, review of pyroxene relations in terrestrial rocks in the light of recent experimental works. *Mineral. J.*, 5, 21-43.
- Kuno, H., 1968, Differentiation of basaltic magmas. In: Hess, H.H. (Ed.), *Basalts*, vol. 2, Interscience, New York, 623-688.
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *Island Arc*, 8, 218-231.
- Lee, J.I., 1992, Mineralogy and petrology of the shallow-depth emplaced granitic rocks distributed in the southern part of the Kyeongsang basin, Korea. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, 13, 176-199.
- Liu, J., Bohlen, S.R. and Ernst, W.G., 1996, Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Letters*, 143, 161-171.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997, Paleogeographic maps of the Japanese islands, plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6, 121-142.
- Miyashiro, A., 1972, Metamorphism and related magmatism in plate tectonics. *Am. J. Sci.*, 272, 629-656.
- Morgan, J.P., Ranero, C.R. and Vannucchi, P., 2008, Intra-arc extension in Central America: links between plate motions, tectonics, volcanism, and geochemistry. *Earth Planet. Sci. Letters*, 272, 365-371.
- Okada, H., 2000, Nature and development of Cretaceous sedimentary basin in East Asia: a review. *Geosci. J.*, 4, 271-282.
- Park, K.H., 1990, A downsag caldera associated with the Chisulryong Volcanic Formation, near Kyeongju City, southern Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 26, 213-226.
- Peacock, S.M., 1990, Fluid processes in subduction zones. *Science*, 248, 329-337.
- Perfit, M.R. and Davidson, J.P., 2000, Plate tectonics and volcanism. In: Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H. and Stix, J. (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 89-113.
- Reedman, A.J., Park, K.H. and Evans, J.A., 1989, The age of granitoid intrusions and related mineralization in the Chisulryeong Mountain area, south-east Korea: constraints on the age of the Chisulryong Volcanic Formation and Yucheon Group volcanism. *J. Geol. Soc. Korea*, 25, 51-58.
- Sohn, Y.K., Son, M., Jeong, J.O. and Jeon, Y.M., 2009, Eruption and emplacement of a laterally extensive, crystal-rich, and pumice-free ignimbrite (the Cretaceous Kusandong Tuff, Korea). *Sedimentol. Geol.*, 220, 190-203.
- Sugimura, A., 1960, Zonal arrangement of some geophysical and petrological features in Japan and its environs. *J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. 2*, 12, 133-153.
- Sugimura, A., Matsuda, T., Chinzei, K. and Nakamura, K., 1963, Quantitative distribution of late Cenozoic volcanic materials in Japan. *Bull. Volc. Ser. 2*, 26, 125-140.
- Sung, J.G., Kim, J.S. and Yang, K.H., 1999, Petrochemical study on the volcanic rocks related to depth to the Benioff zone and crustal thickness in the Kyongsang basin, Korea: A review. *Econ. Environ. Geol.*, 32, 323-337.
- Taira, A., 2001, Tectonic evolution of the Japanese island arc system. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 29, 109-134.
- Tatsumi, Y., 1986, Formation of volcanic front in subduction zones. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 717-720.
- Tatsumoto, M., 1969, Lead isotopes in volcanic rocks and possible ocean-floor thrusting beneath island arcs. *Earth Planet. Sci. Letters*, 6, 369-376.
- Tatsumoto, M. and Knight, R.J., 1969, Isotopic composition of lead in volcanic rocks from central Honshu-with regard to basalt genesis. *Geochem. J.*, 3, 53-86.
- Thorkelson, D.J., 1996, Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation. *Tectonophysics*, 255, 47-63.
- Ueda, S. and Miyashiro, A., 1974, Plate tectonics and the Japanese islands: a synthesis. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85, 1159-1170.
- Ui, T. and Aramaki, S., 1978, Relationship between chemical composition of Japanese island volcanic rocks and gravimetric data. *Tectonophysics*, 45, 249-259.
- Williams, H., 1941, Calderas and their origin. *Calif. Univ., Dept. Geol. Sci., Bull.*, 25, 239-346.
- Wyllie, P.J., 1979, Magmas and volatiles components. *Am. Mineral.*, 64, 469-500.

2012년 8월 4일 접수
 2012년 8월 9일 심사개시
 2012년 9월 11일 채택