

산청회장암체 내 철-티탄 광체와 고철질 백립암의 산상

김중선 · 안성호 · 조형성 · 송철우 · 손 문* · 류총렬¹ · 김인수

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹한국지질자원연구원

Occurrences of Fe-Ti Ore Bodies and Mafic Granulite in the Sancheong Anorthosites, Korea

Jong-Sun Kim, Seong-Ho Ahn, Hyeongseong Cho, Cheol-Woo Song, Moon Son*,
Chung-Ryul Ryoo¹ and In-Soo Kim

Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

요 약: 한반도 남부 산청회장암체 내에는 철-티탄 광체와 고철질 백립암이 분포한다. 이들에 대한 상세한 야외 노두 스케치와 더불어 산상과 분포 특징을 기재하였다. 또한 암석학적 특징을 종합하여 광체를 분류하고 광체와 백립암 사이의 암석성인적 관련성을 해석하고자 하였다. 철-티탄 광체는 모암인 회장암질암과의 경계 특성과 내부변형 정도에 따라, 규칙 관입광맥형과 불규칙 광맥군형으로 나누어진다. 전자는 회장암질암과 일정한 방향의 관입경계를 이루며 내부에는 뚜렷한 연성전단변형이 인지되는 반면, 후자는 구불구불하고 불규칙한 관입경계를 보이며 내부 연성전단변형은 거의 인지되지 않는다. 철-티탄 광체는 회장암질암의 엽리를 절단하고 있으며 회장암을 포획하고 있어, 광체는 회장암질암 엽리의 생성 이후에 관입하였다. 고철질 백립암도 주변 회장암질암을 관입·포획하며 관입경계와 거의 평행한 엽리가 관찰된다. 또한 백립암은 광체들과 거의 동일한 화학조성의 티탄철석을 함유하며 주변 회장암질암의 내부로 주입, 연장되어 광체로 변화됨이 관찰된다. 이상의 사실들은 연구지역 백립암은 주변 철-티탄 광체의 모암임을 지시한다.

핵심어: 산청회장암체, 철-티탄 광체, 규칙 관입광맥형, 불규칙 광맥군형, 고철질 백립암

Abstract: Fe-Ti ore bodies and mafic granulite occur in the Sancheong anorthosites, south Korea. In order to determine their petrogenetic relationship and to classify the Fe-Ti ore bodies, we have synthetically analyzed characteristics in the field, such as distribution and occurrence, and petrologic features through detailed outcrop sketches. The ore bodies are divided into the regular vein dike- and irregular veinlet swarm types, according to their characteristics of contact with the anorthosites and internal structures. The former shows the tabularly intrusive contact and the pervasively ductile-sheared interior, while the latter, the irregularly tortuous contact and the almost intact interior. Most of the ore bodies are cross-cutting the foliation of the anorthosites and possess abundant anorthositic xenoliths, indicating their intrusion after the formation of foliation in the anorthosites. The mafic granulite, also bearing abundant anorthositic xenoliths, shows interior foliations nearly parallel to intrusion contact, and has abundant ilmenites approximately the same as those of the Fe-Ti ore bodies in chemical composition. And its intrusion into adjacent anorthosites is observed and the intrusion is finally changed into an irregular veinlet swarm type ore body. It is, thus, interpreted that the granulite in the study area was the host material of Fe-Ti ore bodies.

Key words: Sancheong anorthosites, Fe-Ti ore, regular vein dike type, irregular veinlet swarm type, mafic granulite

*Corresponding author
Tel: 051-510-2248
E-mail: moonson@pusan.ac.kr

서 론

회장암은 기원이 명확하게 알려져 있지 않으나, 현대적인 의미로 90% 또는 그 이상이 사장석으로 구성된 염기성 심성암류를 말한다(Ashwal, 1993). 원생대의 회장암체 중 세계적으로 가장 넓은 분포를 보이는 매시프형(massif-type) 회장암은 선캄브리아기의 일정한 시간범위에서 광범위하게 분포한다는 점에서 오랫동안 초기 지구의 열적 진화사와 원생대 초대륙의 진화를 해석하기 위한 학문적인 관심의 대상이 되고 있다(Barker, 1983; Ashwal, 1993; Mukherjee and Das, 2002; Zhao *et al.*, 2004; Longhi, 2005; Morisset *et al.*, 2009). 또한 회장암의 분화와 정치과정에서 철과 티타늄을 비롯한 희유금속광상을 흔히 배태시키고 있어 자원경제적인 측면에서도 회장암의 연구가 꾸준히 이루어지고 있다(Ashwal, 1982; Duchesne *et al.*, 1985; Kolker *et al.*, 1990; McLelland *et al.*, 1994; Mitchell *et al.*, 1996; Årbäck and Stigh, 2000; Hébert *et al.*, 2005; Charlier *et al.*, 2006, 2008, 2010).

우리나라에는 하동-산청 지역에 특징적으로 매시프형으로 알려진 회장암이 넓게 산출된다. 이곳 회장암은 분포 특징에 따라 아원형의 산청회장암체와 그 남쪽의 남북방향으로 길쭉한 하동회장암체로 구분된다(Jeong, 1980, 1982). 특히 하동회장암체 내에는 철-티탄광체가 존재하고 있음이 밝혀져 있어 많은 관심과 연구가 있어 왔다(정지곤 외, 1989; 김수영과 서정률, 1990; 김수영 외, 1991; 서정률 외, 1992; 이종만 외, 1999; 고상모 외, 2003; 지세정 외, 2008; 정재성 외, 2010; 고상모, 2010).

한편 고상모(2010)에 의하면 국내 티탄철자원은 경기도 연천과 연평광산에서 장기간 생산된 연유로 오늘날 생산량이 급격히 감소하고 있어 향후 티탄철광의 수입 의존율이 높아지고 자급률이 급격히 감소될 것으로 예측하고 있다. 이러한 상황에서 연간 수요량 300,000톤이 전량수입 된다면 원광가격 기준 약 500억 원에 달할 것으로 보고한 바 있다. 따라서 추가적인 철-티탄 자원의 발견은 향후 이 자원의 개발과 비축 측면에서 그 의의는 매우 크다.

최근 기존의 철-티탄 광체들이 보고되었던 하동회장암체가 아닌 산청회장암체내에도 철-티탄 광체의 산출이 보고되었으며(안성호 외, 2009), 특히 이번 야외 조사에 의해 이들 광체와 인접한 곳에서 회장암질암

의 내부로 주입되어 광체로 변화되는 다량의 티탄철석을 함유한 고철질 백립암이 발견되었다. 이는 이 고철질 백립암이 철-티탄 광체와 성인적으로 관련되었을 가능성을 암시하고 있어, 이에 대한 연구는 철-티탄 광체의 기원을 밝힌다는 측면에서 연구가치가 높다 하겠다. 또한 고철질 백립암은 회장암질 포획암을 포함하고 있는데, 이러한 양상은 이 지역 선캄브리아기 지사 해석에도 새로운 실마리를 제공할 수 있다. 따라서 본 연구는 산청회장암체 내의 철-티탄 광체와 고철질 백립암을 대상으로 상세한 노두 스케치를 통해 세밀한 야외 특징과 상호 관련성을 기재하였으며, 더불어 지질구조와 암석학적 특징 등을 종합·분석하여 두 암상 간의 암석성인적 관련성을 해석하는데 목적이 있다.

지질학적 배경

연구지역은 지체구조적으로 영남육괴 남서부에 해당한다(Fig. 1). 영남육괴 남서부 지리산지구는 선캄브리아의 준편마암류와 정편마암류로 구성되며 지리산편마암복합체로 통칭된다. 지리산편마암복합체는 동쪽 연변부에서 남북 방향으로 분포하는 산청-하동 회장암질암에 의해 관입되고, 다시 중생대 고철질 반려암, 섬장암과 섬록암 등의 심성암 복합체에 의해 관입된 것으로 알려져 있다(남기상 외, 1989; 정지곤 외, 1991; 박계현 외, 2006). 저어콘의 U-Pb와 Pb-Pb 전암분석법에 의한 영남육괴 기저 변성암류의 원암 생성 시기는 약 1,900~2,100 Ma로 알려져 있으며(권성택 외, 1995; Turek and Kim, 1995, 1996; Cheong *et al.*, 2000), 변성연대는 영남육괴의 전 지역에 걸쳐 약 1,700~1,800 Ma인 것으로 보고되어 있다(이광식 외, 1997; 박계현 외, 2000; Cheong *et al.*, 2000). 한편, 산청-하동 회장암류의 관입 시기는 Sm-Nd 동위원소법에 의해서 $1,678 \pm 90$ Ma로 보고되어 있다(Kwon and Jeong, 1990). 그러나 이를 변성연대로 해석하는 견해도 있으며(박계현 외, 2000), 박계현 외(2001)는 산청-하동 회장암체 중 함티탄 회장암류에서 분리한 석류석, 사장석 및 유색광물들에 대한 Sm-Nd 동위원소 분석을 통하여 1.79 ± 0.09 Ga의 최소 생성 연대를 구하였다. 한편, 김동연 외(1998)는 산청-하동 회장암질암의 서편에 분포하는 흑운모 편마암, 메타택틱 편마암, 안구상 편마암이 차노카이트 내지 차노카이트질 암석인 것으로 보고하고, 이 차노카이트는

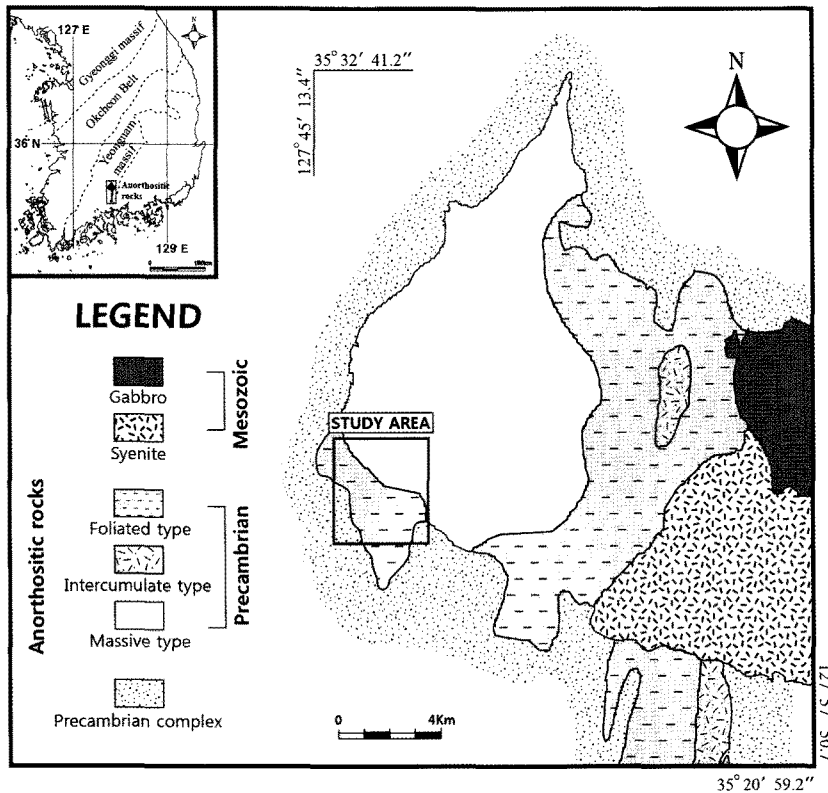


Fig. 1. Geological map of the Sancheong anorthosites and their vicinities (after Jeong et al., 1989).

산청-하동 회장암질암의 관입에 의해 백립암상에 이르는 고도의 변성작용을 겪은 것으로 해석하였다(박계현 외, 2001; 김동연 외, 2002). 그리고 회장암 관입 이후에는 반려암, 섬록암, 섬장암이 관입하였으며, K/Ar 법으로 측정된 연대는 각각 169.58 ± 2.57 , 162.1 ± 0.35 , 182.5 ± 1.46 Ma로 보고되었다(정지곤 외, 1991).

연구지역 주변의 반려암에 대한 몇몇 연대측정 결과가 제시되어 있는데, 먼저 이상원과 윤성호(1994)는 마천 일대의 반려암질암의 Rb/Sr 전암연대를 248 ± 9.2 Ma로 제시하였으며, 이후 마천층상관입암체의 연구(송용선 외, 2007)에서 Kim and Turek (1996)의 저콘 U-Pb 연대측정 결과를 인용하여 223 Ma를 제시한바 있다. 한편, Kim et al. (2003)은 산청회장암체의 동편에 분포하는 조립질의 각섬석 반려암의 U-Pb 저어콘 연대를 203.8 ± 3.3 Ma로 보고하였다. 산청섬장암의 전암연령(Rb-Sr 방법)은 211 ± 23 Ma(박계현 외, 2006)이며, 이 섬장암은 부암산 북측에서 주변의 쥘라기 화강암에 의해 관입된다(김옥준 외, 1964; 김동학 외, 1998). 따라서 연구지역의 심성암류

는 섬장암과 반려암질암은 트라이아스기에, 이후 쥘라기 화강암의 순으로 관입한 것으로 보인다.

산청-하동 회장암류는 광물조합 그리고 구성광물의 함량과 조직에 따라 괴상형, 간극누적형, 엽상형으로 분대되거나(정지곤 외, 1989; 이종만 외, 1999), 우백질 반려암과 회장암으로 구분되기도 한다(권순진, 1991; 고보균, 2006). 산청회장암체는 괴상형 회장암이 중앙부를 넓게 차지하고 있으며 주변에 엽상형과 일부 간극누적형 회장암이 분포하고 있다(Fig. 1; 정지곤 외, 1989). 정지곤 외(1989)는 사장석 An 함량 그리고 단사휘석 및 사방휘석과 같은 유색광물 함량의 지역적인 변화를 근거로, 산청회장암체는 중앙부의 괴상형 회장암에서부터 주변의 엽상형 회장암으로 단일 마그마가 분화된 것으로 해석하였다. 반면 이종만 외(1999)는 하동지역 회장암류의 성인과 관련한 연구에서 세 유형의 회장암은 단일 마그마의 연속적인 분화작용의 결과로 해석한 기존 연구결과와는 달리, 시기가 다른 최소 2회의 다이아피어의 관입에 의해 회장암체가 형성되었음을 주장하며, 엽상형이 먼

지 정치된 후 간극누적형과 괴상형이 정치된 것으로 해석하였다. 하지만 연구지역의 철-티탄 광체들은 회장암류의 유형과 관계없이 회장암과 뚜렷한 경계(산점상 광체 제외)를 가지며 발달하고 있어, 세 가지 유형의 회장암류가 모두 완전히 정치된 이후에 관입한 것으로 해석된다(안성호 외, 2010). 이는 최근 정재성 외(2010)에 의해 하동 함티탄 광체가 회장암이 결정화되고 엽리가 형성된 이후에 관입하였다는 해석과 일치한다. 또한 이인경 외(2009)도 하동의 함티탄 광체는 엽기성 암맥의 형태로 괴상형 회장암을 관입하여 회장암을 포획하고 있음을 보고한 바 있다.

김광호와 정재일(1994)은 하동-산청 회장암에 대한 고지자기 연구를 통해 1,750 Ma 경의 고위도가 약 30°S로 한반도가 당시 호주대륙의 서쪽에 붙어 있었음을 제안하였다. 이와는 달리 강희철 외(2001)는 회장암류에 대한 잔류자기 연구를 통하여 고생대 말인 1,800 Ma 경에 하동-산청 회장암체는 고위도 18°S에서 북중국지괴 그리고 호주 북부지역과 함께 초대륙 로디니아(Rodinia; Rogers and Santosh, 2004 등)의 일부를 이루고 있었던 것으로 해석하였다. 한편, 김성욱 외(1999)는 대자율비등방성 연구로 자기적 엽리구조가 북서-남동 방향의 수평압축응력을 지시하며, 이 압축력은 회장암체 관입 이후에 이차적으로 작용된 광역적 지구구조운동의 결과로 해석한 바 있다. 구조지질학적 연구로 이덕선과 강지훈(2010)은 하동-산청지

역의 남북방향 지체구조는 대규모 칼집형 습곡작용과 밀접한 관련성이 있음을 보고하였으며, 산청회장암 내 암맥군의 연구(안성호 외, 2010)에서 엽기성 암맥군을 4개 조(M-55, M-30, M-10, M-NW)로 그리고 산성 암맥은 2개 조(F-NE, F-NW)의 암맥군으로 분류하고, M-55 F-NE M-30 M-10 M-NW F-NW 순으로 관입한 것으로 보고되었다.

철-티탄 광체와 고철질 백립암의 분포와 산상

철-티탄 광체

철-티탄 광체와 고철질 백립암은 산청회장암체의 서쪽 경계부에 해당하는 경남 산청군 금서면 방곡리에서 발견된다. 광체는 남북 방향의 방곡천과 동서 방향의 상사계곡에 집중되어 나타난다. 상사계곡에서 티탄광체는 대략 남북 방향으로 회장암질암을 여러 곳에서 관입하고 있으며, 이러한 양상은 계곡을 따라 수 km에서 관찰된다(Fig. 2). 고철질 백립암은 상사계곡 보다 남쪽에 위치하는 동서방향의 소계곡과 자해리에서 발견된다. 철-티탄 광체는 특징적으로 고철질 백립암의 분포지를 기준으로 인접한 북쪽에서만 산출된다(Fig. 2).

연구지역 철-티탄 광체는 모암인 회장암질암과의 경계 특성과 내부 변형구조의 유무에 따라 두 종류로

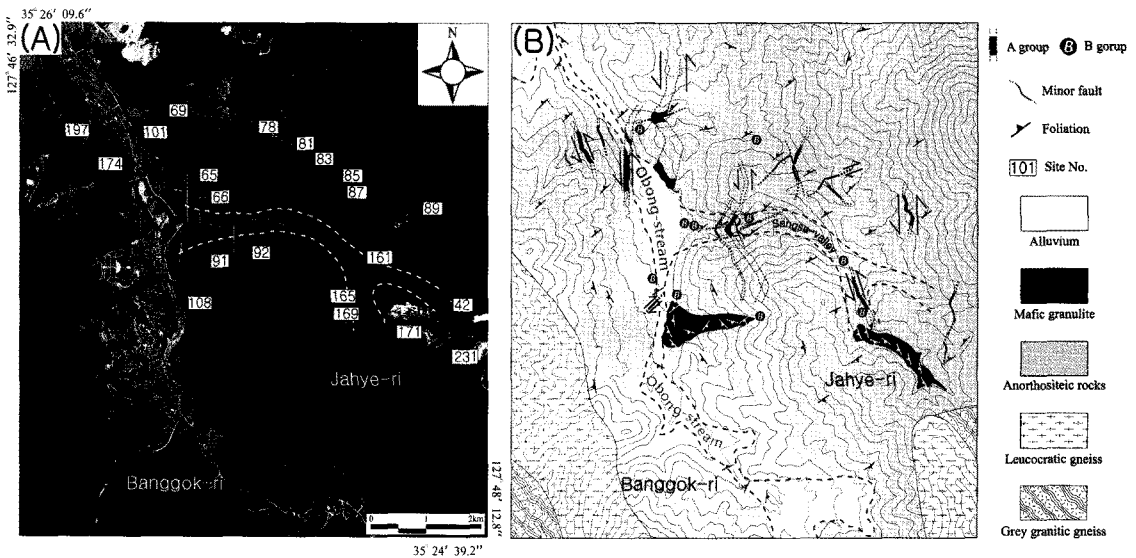


Fig. 2. (A) Aerial photograph and (B) geological map in the study area showing the outcrop localities and distribution of Fe-Ti ore bodies. A group : regular vein dike type, B group : irregular veinlet swarm type.

나누어진다. 즉, 맥상으로 회장암질암을 일정한 방향으로 관입하고 내부에 연성전단변형이 인지되는 그룹(규칙 관입광맥형, regular vein dike type: 이하 A 그룹)과 관입방향이 불규칙하며 내부에 연성전단변형 구조가 인지되지 않거나 인지된다 할지라도 일부 미약하게 인지되는 그룹(불규칙 광맥군형, irregular veinlet swarm type: 이하 B 그룹)으로 나누어진다. 광체의 상세한 야외산상을 기재하기 위해 대표노두를 선정하고 조사선을 설치하여 세밀한 스케치 조사를 실시하였다.

A 그룹 : 규칙 관입광맥형

101과 102 지점 : 노두의 전면에 오봉천이 남에서 북으로 흐르고, 노두는 대략 30° 서쪽으로 경사져 있다(Fig. 3). 회장암질암은 전반적으로 괴상이나 부분적으로 N62°E/72°NW 방향의 미약한 엽리가 관찰된다. 축선거리 34~40 m의 지점에서 층적층에 덮이나 두 노두에서 관찰되는 철-티탄 광체는 본래 단일 광체일 것으로 판단된다. 광체의 연장은 101과 102 지점에서 각각 22 m와 34 m로서 지표에서 확인되는 철-티탄 광체들 중에서 가장 연장이 좋다. 회장암질암과는 N06°E/44°NW의 경계를 형성하며(Fig. 3A), 내부에는 외래암편(xenolith)인 회장암질암들이 좌수향 연성전단에 의해 신장되고 σ 와 δ 형으로 변형되어 있다(Fig. 3B, D). 또한 각섬석을 비롯한 유색광물과 함께 티탄철석이 육안으로 잘 관찰된다(Fig. 3C). 이곳에 발달하는 염기성 암맥은 총 15개로 대부분 북동-남서 방향으로 발달한다(Fig. 3). 이들 암맥은 철-티탄 광체를 절단하고 있어 광체보다는 후기이다. 특히 축선거리 17 m 지점의 철-티탄 광체의 연장을 규제하는 암맥 내부에는 다량의 포획암이 포획되어 있으며, 포획암은 모암인 회장암질암이 대부분이고 드물게 편마암류가 포함된다(Fig. 3A).

69 지점 : 상사계곡 북쪽에 동서로 발달하는 소계곡에 위치한 노두이다(Fig. 2A). 회장암질암에는 유색광물의 배열에 의해 N78°E/79°NW의 미약한 엽리가 나타난다. 이 노두에 발달하는 철-티탄 광체는 맥상으로, 양쪽 경계(N7°W/40°SW와 N2°W/32°SW)가 모두 관찰되어 이로부터 계산된 광폭은 약 12 m이다(Fig. 4A, B). 노두 서측에는 모암인 회장암질암과 변성암이 각력으로 포획되어 있는 암맥이 발달하고, 이 암맥은 N45°E/40°SE의 염기성 암맥을 절단하고 있다. 일부 암맥들은 N45°E/72°SE 방향의 암맥경계로부터 연장되는 소단층(N86°E/72°SE)에 의해 우수향의 변

위를 보인다(Fig. 4C). 철-티탄 광체의 내부는 회장암질 포획암들이 좌수향의 연성전단변형에 의해 변형되어 있다. 그리고 광체의 내부에는 규칙절리(N44°W/67°NW)가 발달하는데(Fig. 4D), 이들 절리는 광체 내 회장암질 포획암을 절단하고 일정한 방향으로 연속성이 좋으며, 절리 내에는 유색광물이 충전되어 있다. 암맥은 북동-남서 방향으로 총 6매가 관찰된다.

91 지점 : 상사계곡 입구에서 동쪽으로 약 200 m 지점의 노두이다(Fig. 2A). 이곳 철-티탄 광체는 주변 회장암과 N07°W/43°SW의 뚜렷한 경계를 가지는 폭 약 1.3 m의 맥상 광체이다(Fig. 5A, D, E). 모암인 회장암 내부에 유색광물들의 배열로 인지되는 엽리는 광체에 의해 연장이 규제된다(Fig. 5A). 광체 내부에는 회장암과의 경계와 거의 평행한 N09°W/39°SW의 전단엽리가 발달한다. 광체 내에는 장경이 30 cm 이상인 거력의 회장암질 포획암도 관찰된다. 이 포획암은 전단엽리와 거의 평행하게 장축이 배열되나 포획암 내부에 희미하게 관찰되는 엽리는 주변 전단엽리와 고각으로 사교한다(Fig. 5B). 그리고 좌수향의 연성전단변형을 받은 수 cm 크기의 회장암질 포획암들도 관찰된다(Fig. 5C). 이곳 철-티탄 광체는 N86°E/72°SE의 소단층에 의해 후기에 우수향으로 변위된다(Fig. 5F). N60°E/60°NW의 관입면을 가진 염기성 암맥 1매도 관찰된다.

92 지점 : 상사계곡 입구 동편 약 250 m 지점의 노두이다(Fig. 6). 회장암질암 내에는 유색광물의 배열로 N55°E/61°NW의 희미한 엽리가 인지된다. 철-티탄 광체의 서편 경계는 확인되지 않으나, 동편은 회장암질암과 N15°W/63°SW의 비교적 일정한 방향으로 판상으로 경계된다(Fig. 6A). 광체의 동편에는 장경이 1 m가 넘는 거력의 회장암질 포획암들이 대체로 경계면과 평행하게 배열되며 광체 내 엽리는 포획암의 경계를 따라 회전되는 특징을 보인다(Fig. 6B). 또한 광체 내에 수 mm에서 수 cm 크기의 회장암질 포획암들이 연성전단변형에 의해 신장되어 나타난다(Fig. 6C). 회장암질암에는 세 조의 절리군(J_1 : N48°W/55°NE; J_2 : N3°E/81°SE; J_3 : N31°E/79°SE)이 관찰되며(Fig. 6D), 염기성 암맥은 N28°E/74°NW, N41°W/7°3SW의 자세로 2매가 광체를 관입하고 있다.

요약하면, A 그룹 광체는 북북서~북북동으로 배열되며 50°~70°로 서쪽으로 경사진 대체로 일정한 방향성을 가진다. 또한 수 cm에서 십여 m의 폭을 가지며, 확인된 연장은 최소 10 cm에서 최대 56 m이다.

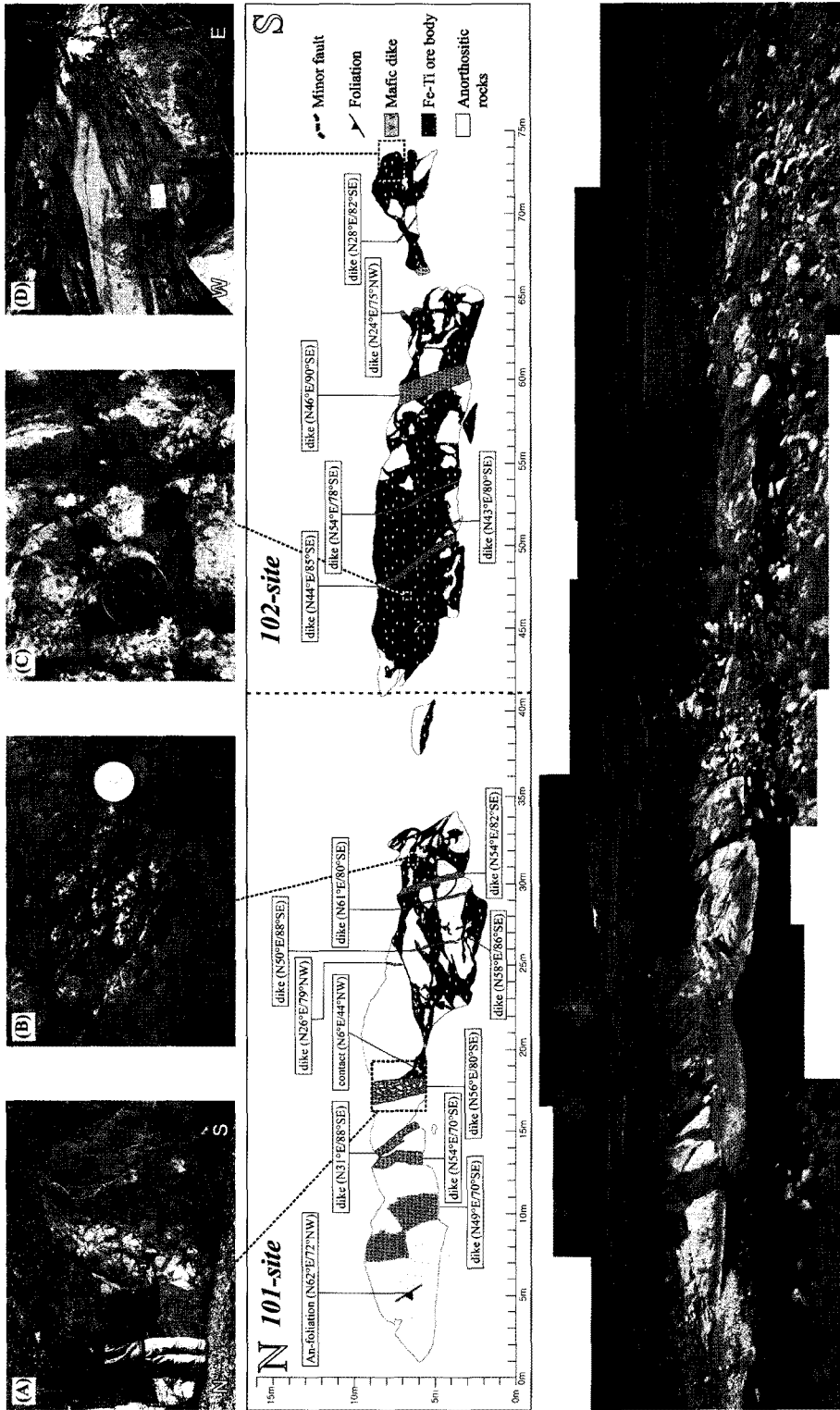


Fig. 3. Outcrop sketch and photographs of Fe-Ti ore bodies (A group) and dikes in 101 and 102 sites. (A) Anorthositic xenolith-bearing mafic dike intruding into Fe-Ti ore body. (B) Deformed mega-plagioclases and anorthositic xenoliths surrounded with mafic minerals including amphibole, garnet, and ilmenite. (C) Dark coloured ilmenite mega crystal (center) observed with the naked eyes. (D) Stretched mega-plagioclases and anorthositic xenoliths aligned almost parallel to shear foliation.

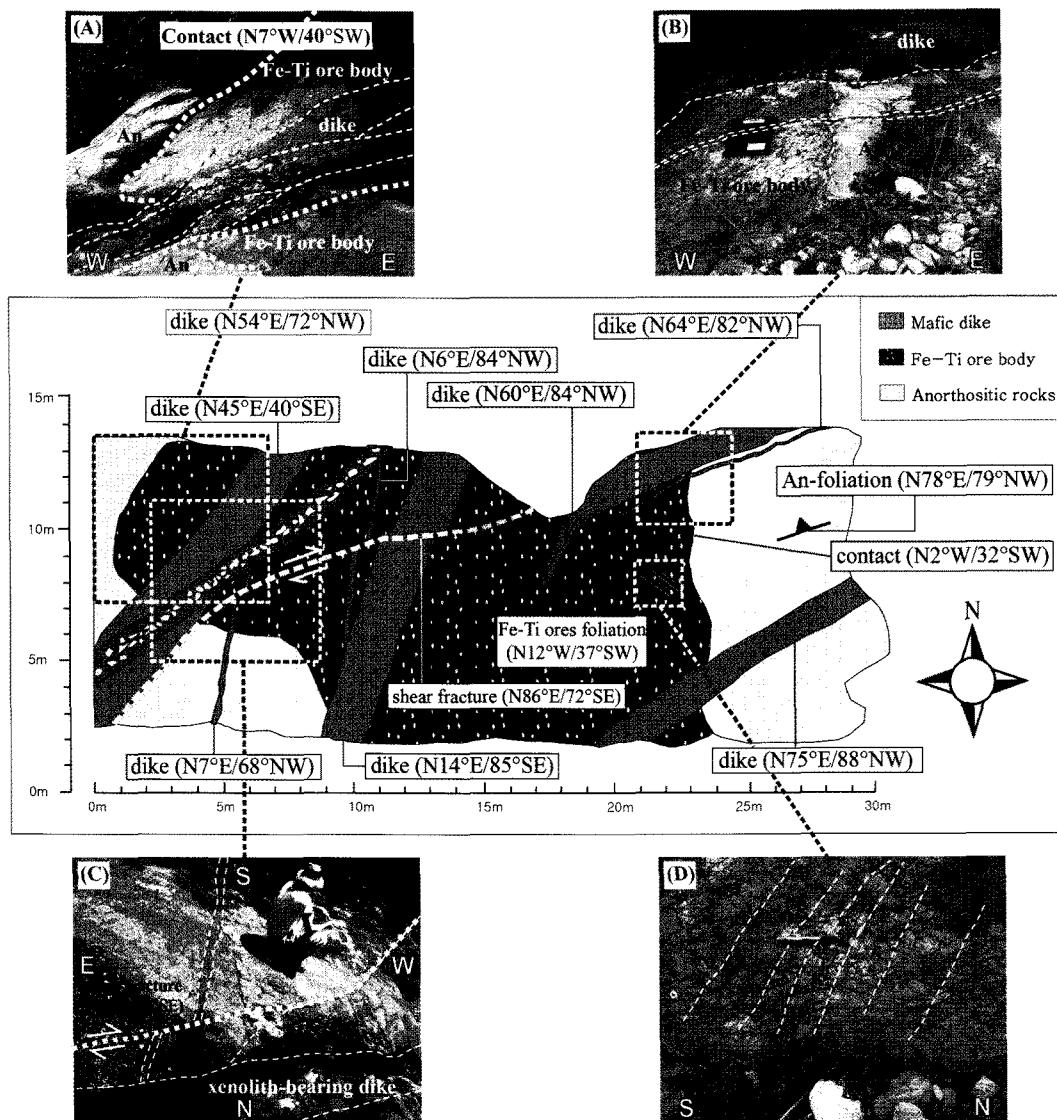


Fig. 4. Outcrop sketch and photographs of Fe-Ti ore body (A group) and dikes in 69 site. (A) Western and (B) eastern boundaries of the ore body showing the tabular sharp contacts which are intruded by mafic dikes. (C) Mafic dikes laterally displaced by a dextral strike-slip fault. (D) Systematic fractures cross-cutting the deformed anorthositic xenoliths within the Fe-Ti ore body. An : anorthosites.

이들 광체는 좌수향의 연성전단변형에 의해 회장암질 포획암과 사장석 광물편들이 신장되고 σ - 또는 δ -형으로 변형되어 광체 내에 발달하는 전단엽리에 거의 평행하게 배열되는 특징을 보인다. 광체 내 전단엽리는 주변 모암과의 경계면과 거의 평행하며 모암인 회장암질암 내 엽리와 대부분 고각으로 사교한다. 또한 거력의 회장암질 포획암 근처에서 포획암 경계를 따라 전단엽리가 휘어지는 양상도 관찰된다. 이상의 특

징들은 철-티탄 광체가 회장암질암 내에 엽리가 만들어지고 상당히 고화된 이후에 관입하였으며, 이후 철-티탄 광체에 후기 좌수향연성전단변형이 집중되었을 가능성을 시사한다.

B 그룹 : 불규칙 광맥군형

65 지점 : 상사계곡의 입구부에 위치하는 노두이다 (Fig. 2A). 회장암질암의 내부에는 엽리가 관찰되지

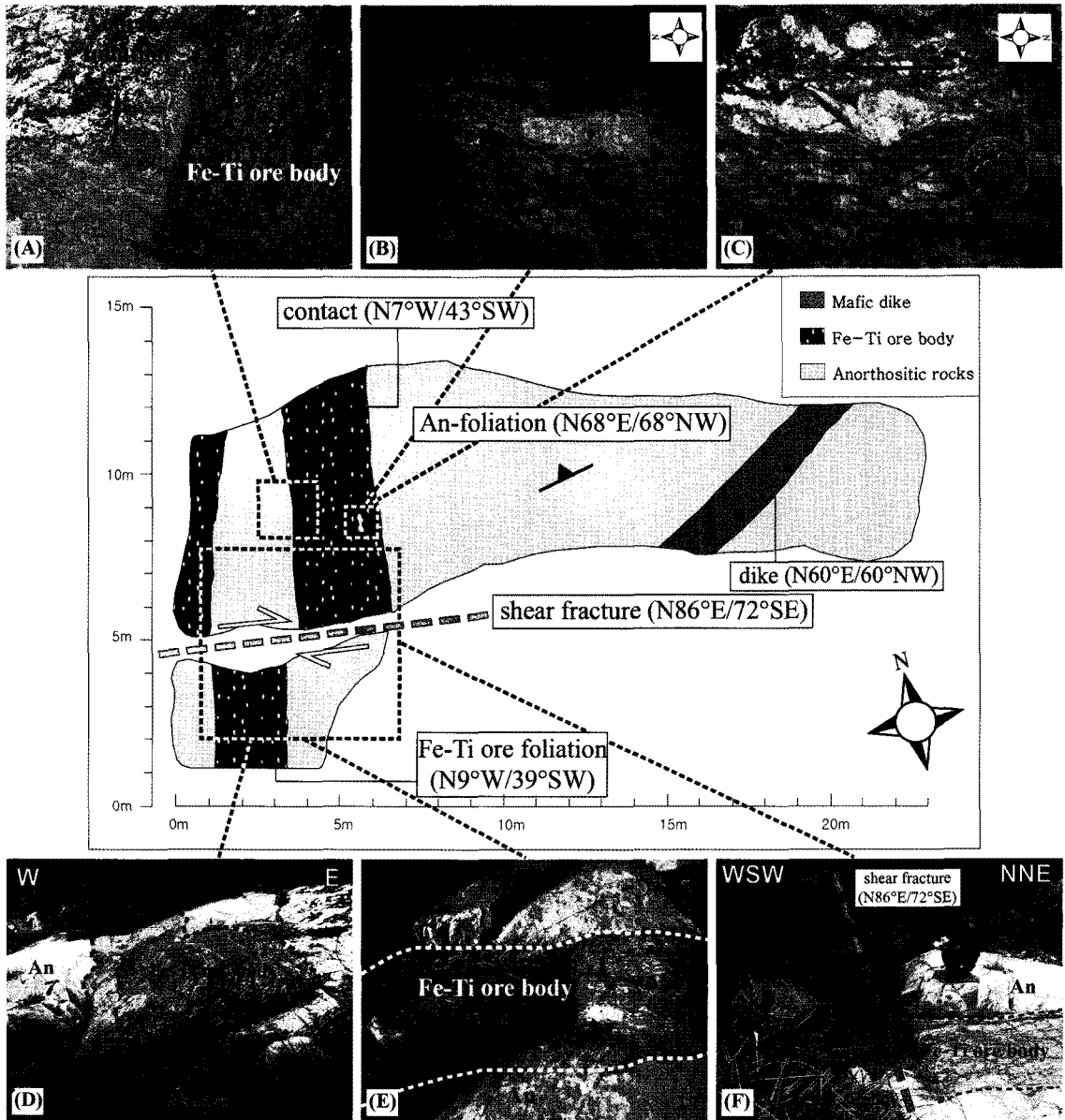


Fig. 5. Outcrop sketch and photographs of Fe-Ti ore body (A group) and dikes in 91 site. (A) Nearly perpendicular intersection of the dike-like ore body and the foliations of surrounding anorthosites. Note the interior foliations of ore body almost parallel to their tabular contact. (B) A large anorthositic xenolith aligned parallel to the interior foliations of ore body. Note its own foliations almost perpendicular to the interior foliations of ore body. The xenolith is ca. 30 cm in maximum diameter. (C) δ -typed deformed anorthositic xenolith indicating sinistral shearing. (D, E) Dike-like Fe-Ti ore body in vertical and horizontal view, respectively. (F) Fe-Ti ore body laterally displaced by a dextral faulting. An : anorthosites.

않는다. 철-티탄 광체는 다양한 크기의 회상암질 포획암을 포함하며 구불구불하며 매우 불규칙한 관입경계를 보인다(Fig. 7A). 광체를 절단하는 일부 전단면 상에는 좌수향의 전단작용으로 의한 신장선구조가 관

찰되기도 하나(Fig. 7C, D), A 그룹 광체와는 달리 광체 내 포획암은 연성전단변형을 거의 받지 않은 상태이다(Fig. 7B). 염기성 암맥은 6매가 발달하며 주로 북동-남서 방향으로 다양한 폭으로 회상암질암을 관

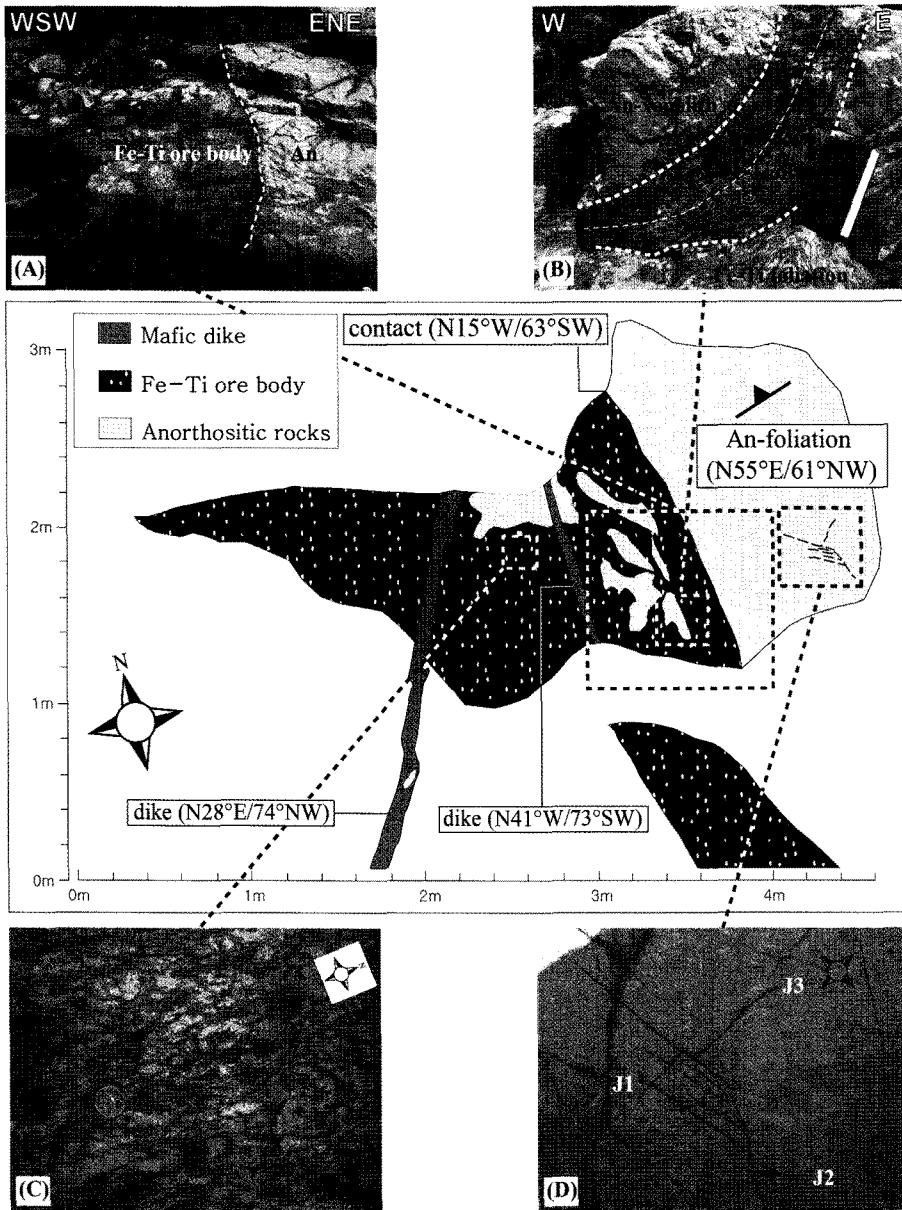


Fig. 6. Outcrop sketch and photographs of Fe-Ti ore body (A group) and dikes in 92 site. (A) Eastern boundary of the ore body showing a sharp and almost planar contact. (B) Curving foliation in the ore body along the boundary of large anorthositic xenolith. (C) Anorthositic xenoliths stretched and aligned along the interior foliations within Fe-Ti ore body. (D) Three joint sets observed in the anorthosites. An : anorthosites.

입하고 있다.

66 지점 : 65 지점에서 약 60 m 동쪽에 위치한 노두이다(Fig. 2A). 회장암질암 내에 엽리와 연성변형에 의한 변형구조가 관찰되지 않는다. 약 10~11 m 측선 지점에서 북북동 방향으로 비교적 일정한 방향성을 가지는 세맥도 관찰되나, 철-티탄 광체는 전체적

으로 불규칙하게 회장암질암을 관입하고 있다(Fig. 8A, B). 회장암질 포획암은 연성변형되지 않았거나 미약하게 변형되었으며 거정의 티탄철석 또는 자철석의 산화광물이 육안으로 관찰된다(Fig. 8C). 일부 세맥의 광체 경계면에서 전단변형으로 유색광물들이 신장된 신장선구조가 관찰되기도 한다(Fig. 8D). 이곳에

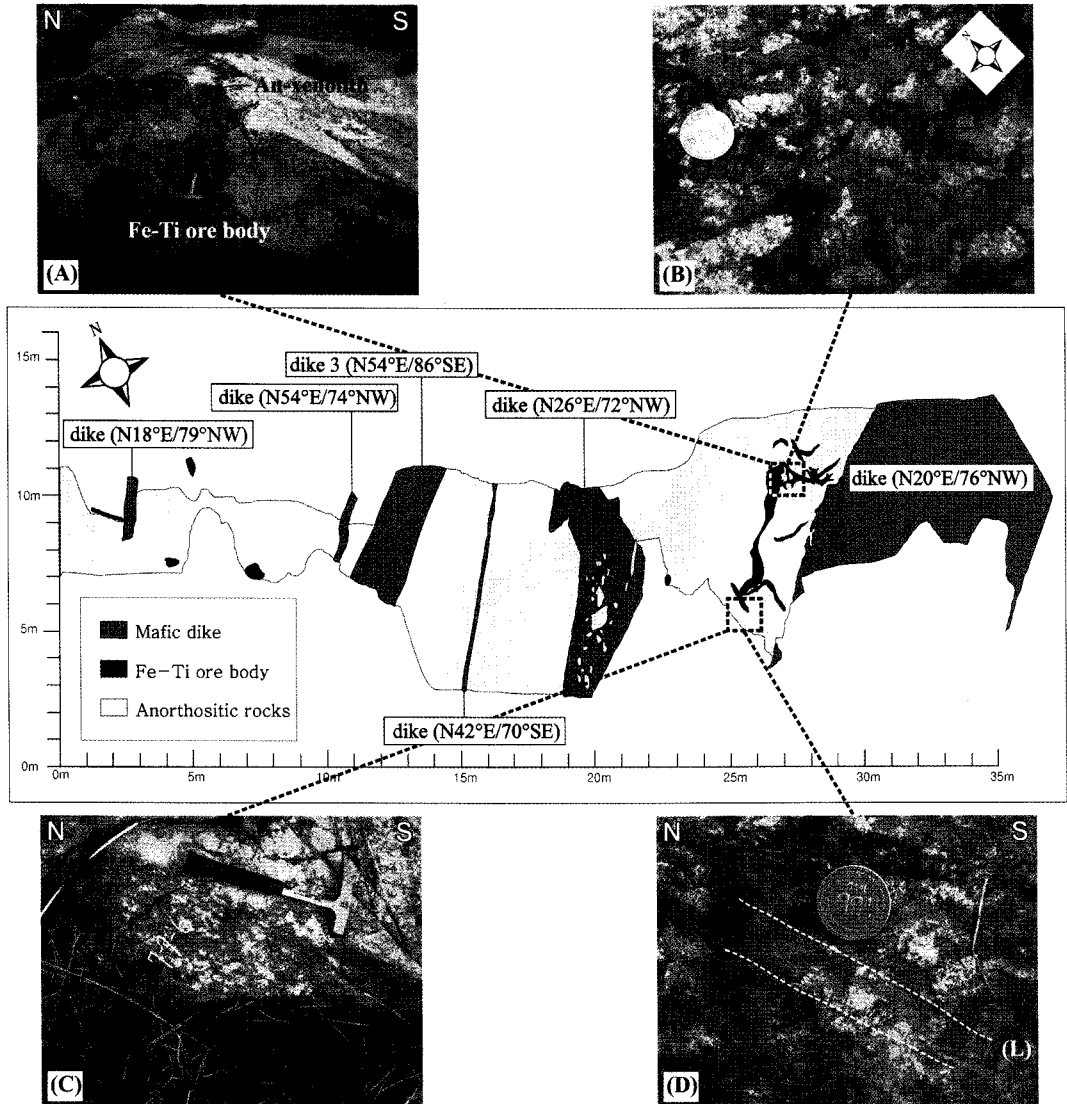


Fig. 7. Outcrop sketch and photographs of Fe-Ti ore body (B group) and dikes in 65 site. (A) Fe-Ti ore body showing irregularly tortuous contacts with the anorthosites. (B) Almost intact anorthositic xenoliths within the ore body. (C, D) Stretching lineation (L) observed on shear surfaces in the ore body. An : anorthosites.

는 6개의 엽기성 암맥과 1개의 산성 암맥이 회장암질 암을 관입하고 있으며 이들은 횡절관계에 의한 선후 관계가 잘 나타난다(안성호 외, 2010).

67 지점 : 66 지점 인근 노두로(Fig. 2A), 회장암질 암에 유색광물의 배열로 인한 미약한 엽리가 일부 관찰되나 뚜렷한 변형 흔적은 관찰되지 않는다. 이곳은 구불구불하고 불규칙한 관입경계가 전형적으로 관찰되는 노두로써(Fig. 9), 광체 내에는 다양한 크기의 회장암질 포획체가 관찰되며 이들은 매우 약한 연성

전단변형을 받은 양상이다(Fig. 9A, B). 약 10 m 측 선거리 지점에는 약 5 cm 폭을 가진 광체가 세맥으로 발달하는데, 이러한 세맥상의 광체는 대체로 북북동 방향으로 배열된다(Fig. 9C). 한편 광체 내에는 수 cm의 직경을 가진 다수의 회장암질 암편 내지 사장석 입자들이 관찰된다. 이들은 후기 취성변형으로 만들어진 미세한 단열들이 북북동 방향으로 발달한다(Fig. 3D). 이러한 단열 내에는 주변 기질부의 각섬석과 녹니석 등의 세립질 유색광물들이 주입되어 채워

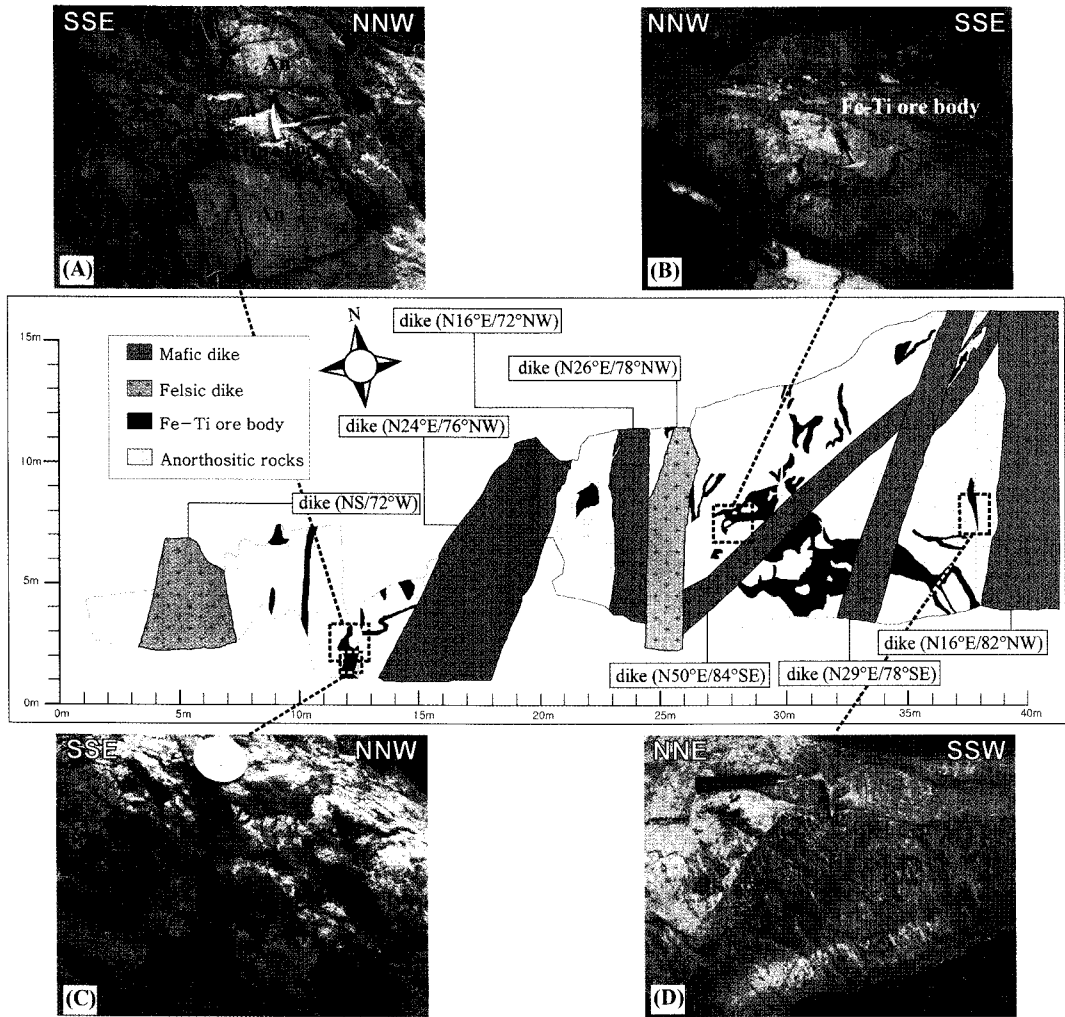


Fig. 8. Outcrop sketch and photographs of Fe-Ti ore body (B group) and dikes in 66 site. (A, B) Fe-Ti ore bodies showing irregularly tortuous contacts with the anorthosites. (C) Oxide minerals of ilmenite and magnetite observed with the naked eyes. (D) Stretching lineation (L) observed on shear surface in the ore body. An : anorthosites.

져 있다. 이곳에는 10 cm에서 1 m에 이르는 폭을 가진 총 7개의 염기성 암맥이 북북동 방향으로 회장암질암을 관입하고 있다.

이상과 같이 B 그룹은 주변 회장암질암과 구불구불하고 불규칙한 경계를 이루며, 광체가 산포되어 있는 특징을 보인다. 광체 내부에는 수 mm부터 수십 cm의 다양한 크기의 회장암질 포획암과 사장석 광물편이 관찰되나 후기 연성전단변형은 인지되지 않거나 일부 노두에서만 미약하게 인지된다. 또한 티탄철석을 비롯한 불투명광물과 유색광물들이 미약한 염리를 형성하기도 하나 일정한 방향성은 가지지 않는다. 따라서 B 그룹 광체는 회장암질암과의 경계 특징과 내

부구조가 A 그룹 광체와 뚜렷하게 구분된다.

고철질 백립암

고철질 백립암은 상사계곡 남쪽에 위치하는 동서 방향의 소계곡과 자혜리 큰상재골에서 발견된다. 백립암은 서북서로 길쭉한 동부암체와 동서로 길쭉한 서부암체로 분리되어 존재하지만 이들 두 암체는 지하에서 단일 암체로 연결될 가능성이 있다(Fig. 2B). 고철질 백립암의 상세한 야외산상을 기재하기 위해서 대표노두(108 지점)를 선정하여 조사선을 설치하고 스케치조사를 실시하였다(Fig. 10).

고철질 백립암 내에는 유색광물의 배열에 의한 염

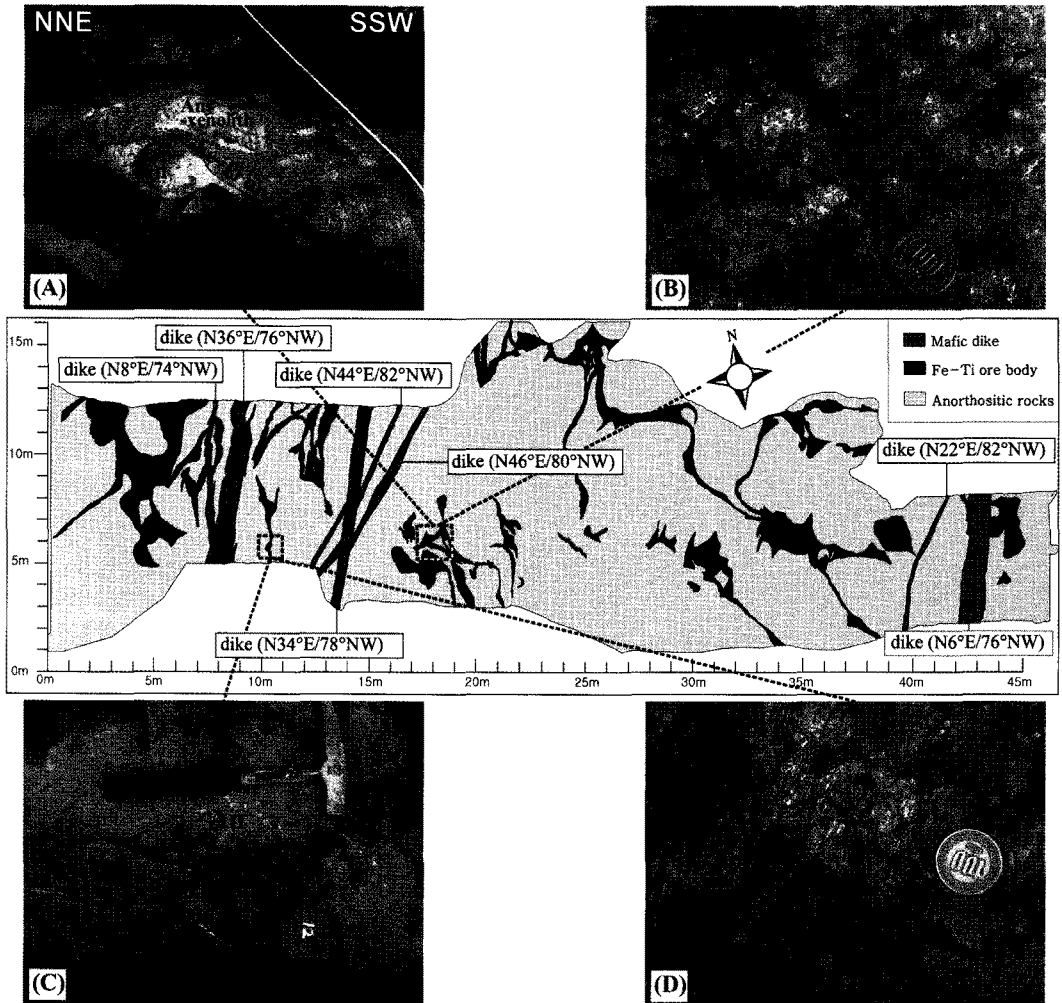


Fig. 9. Outcrop sketch and photographs of Fe-Ti ore body (B group) and dikes in 67 site. (A) Fe-Ti ore body showing irregularly tortuous contacts with the anorthosites. (B) Almost intact anorthositic xenoliths within the ore body. (C) NNE-trending Fe-Ti ore veinlet. (D) Brittle-fractured mega plagioclases within the ore body showing tiny mafic minerals injecting into the fractures. An : anorthosites.

리가 발달하며, 이러한 엮리는 주변 회장암질암과의 경계와 거의 평행하는 경향을 보인다(Fig. 10A, C). 백립암 내에는 최소 1 cm에서 최대 1 m까지 다양한 크기의 각진 회장암질 포획암들이 관찰되는데, 주변 백립암 내의 엮리는 포획암의 경계부를 따라 휘어지는 경향이 있다(Fig. 10B). 또한 백립암은 고도의 변성암으로서 유색광물의 함량이 높아 주변 회장암질암과는 뚜렷이 구분되는데, 유색광물로는 세립질의 티탄철석과 현정질의 석류석이 다수 관찰된다(Fig. 10D).

일부 경계부에서는 고철질 백립암이 불규칙하게 회

장암질암내로 맥상으로 주입되는 모습이 관찰된다(Fig. 10E~H). 고철질 백립암에서 주입되어 회장암질암 내로 연장되는 맥들은 아주 불규칙적인 방향성을 보이며 B 그룹의 광체로 변해가고(Fig. 10E), 이들 내부에는 연성전단변형이 인지되지 않거나 또는 아주 미약하게 인지된다. 이러한 특징은 고철질 백립암이 철-티탄 광체의 형성과 밀접히 관련됨을 지시하며, 지금까지 밝혀지지 않은 산청-하동 회장암체 내에 배태된 철-티탄 광체의 성인에 대한 중요한 단서를 제공한다.

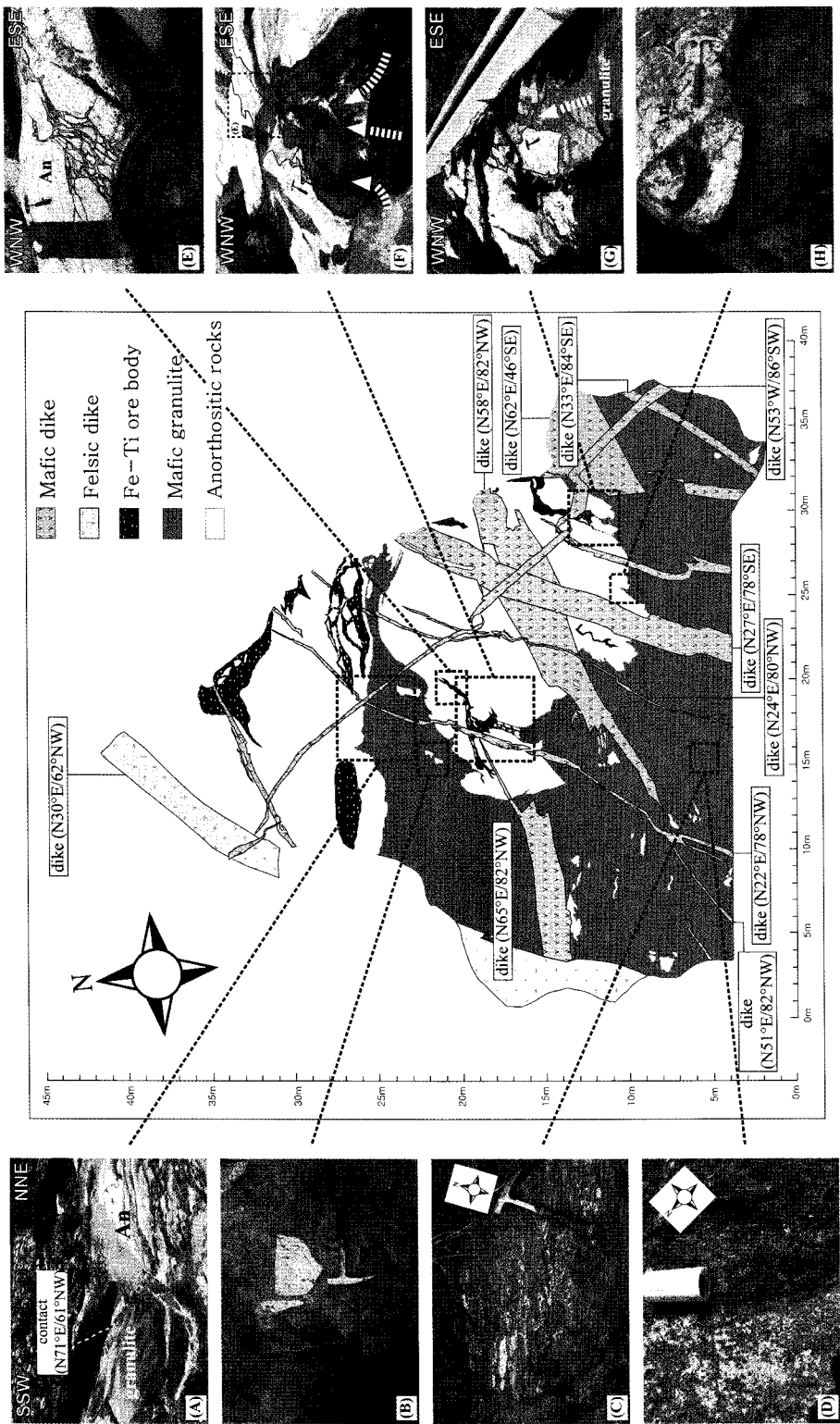


Fig. 10. Outcrop sketch and photographs showing complex relationships among anorthosites, mafic granulite, Fe-Ti ore bodies, and dikes in 108 site. (A) Contact between the anorthosites and mafic granulite. (B) Very-angular anorthositic xenoliths and adjacent curving foliations within the granulite. (C) Foliations within the granulite tend to be parallel to its boundary. (D) Mafic mineral assemblage consisting of garnet and orthopyroxene with tiny ilmenites. (E)-(H) Injection of the mafic granulite into the anorthositic rocks, which is gradually changed into the B-group ore body. White arrows indicate the injection direction. An : anorthosites.

박편관찰과 전자현미분석

정지곤 외(1989)의 회장암 분대를 따르면 연구지역 철-티탄 광체 노두는 엽상형 회장암의 분포지에 해당한다(Fig. 1). 그러나 하동지역 철-티탄 광체에 대한 연구(정재성 외, 2010)에서도 지적된 바와 같이, 산청 회장암의 세 가지 암상(Fig. 1)의 경계는 실제로는 명확하지 않고 겹이적이거나 하나의 노두에서도 다양한 암상이 혼재되는 특징을 보여준다. 따라서 철-티탄 광체는 특정 암상의 회장암에 수반되지 않는다. 연구지역 광체 주변 회장암은 엽리가 없거나 미약하게 발달하며, 희미하게 발달하는 엽리는 광체에 의해 절단되며 광체 내에 발달하는 엽리와는 고각도로 사교한다(Fig. 5A). 회장암질암의 엽리는 대부분 각섬석과 철산화광물의 배열로 인지된다. 회장암질암을 현미경에 관찰하면(Fig. 11A), 전체적으로는 중립의 등립질 조

직이 우세하다. 사장석은 0.5~3 mm 정도의 크기를 가지고, 특징적으로 누대구조를 보이지 않는다. 주로 알바이트 쌍정을 가지고, 간혹 쌍정을 가지지 않는 결정에서 파동소광이 관찰된다. 유색 광물은 소량이나 대부분 각섬석으로 구성되고, 일부는 휘석의 잔존 구조가 남아 있다. 또한 사장석 입자간 경계에서 세 결정이 서로 120° 각을 가지는 입상변정질(*granoblastic*) 조직을 잘 보여준다. 이는 회장암의 관입 이후 광역적인 변성작용에 의한 재결정작용을 시사한다. 간혹 흑운모와 사장석의 변질에 의한 견운모 등도 관찰된다.

철-티탄 광체의 주요 구성광물은 각섬석, 사장석, 산화광물 그리고 석류석이며, 소량의 인회석, 석영 등이 관찰된다(Fig. 11B). A 그룹의 철-티탄 광체에서 사장석은 각진 외형을 보이고, 각섬석을 비롯한 유색 광물들은 하나의 집합체로 존재하며 일정한 방향으로 배열되어 있기도 한다. 한편 티탄철석은 사장석 입자

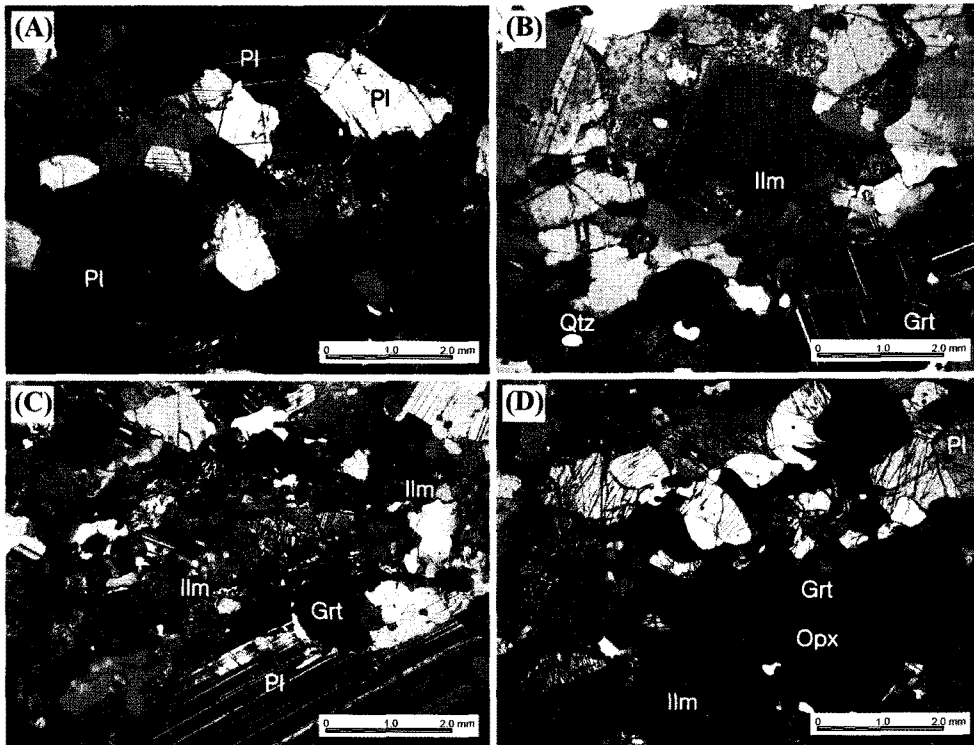


Fig. 11. Thin-section photomicrographs of anorthosite, Fe-Ti ores, and mafic granulite in the study area (under crossed polars, X20). (A) Foliated-type anorthosite showing abundant plagioclase and minor amphibole, as well as a granoblastic texture with well-developed 120° grain boundary intersections. (B) A group Fe-Ti ore body showing opaque minerals existing among amphiboles and coarse grained plagioclases. (C) B group Fe-Ti ore body showing more fine grained and albite-twinned plagioclase. (D) Mafic granulite showing a granoblastic texture with minerals including plagioclase, orthopyroxene, garnet, and ilmenite. Pl : plagioclase, Am : amphibole, Ilm : ilmenite, Qtz : quartz, Grt : garnet, Opx : orthopyroxene.

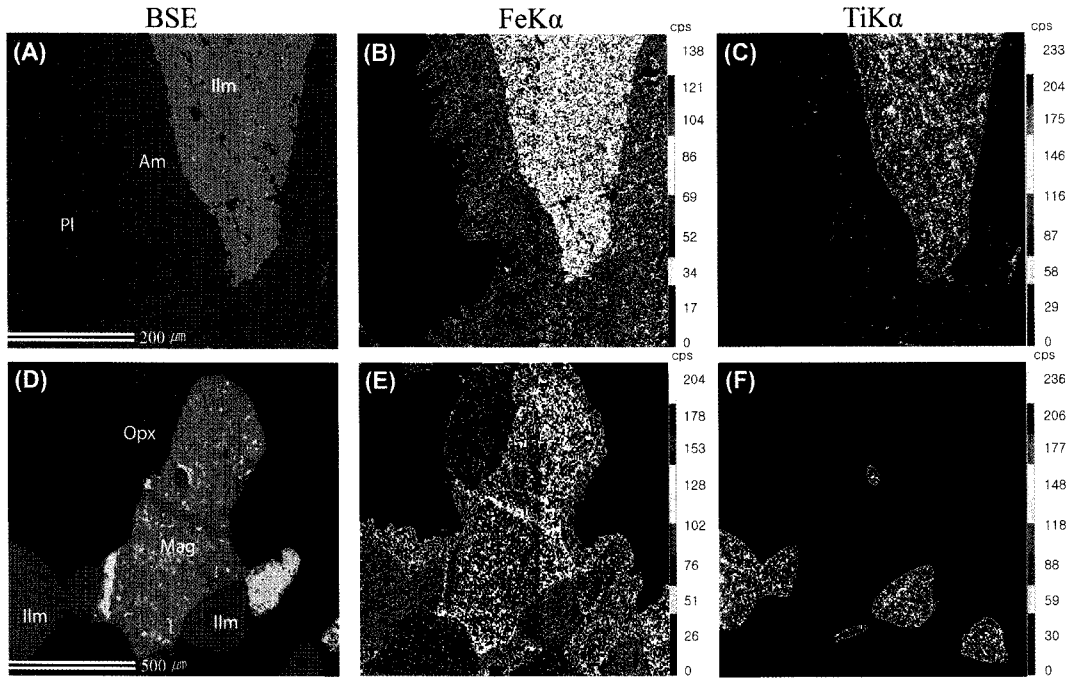


Fig. 12. Back-scattered electron images (BSE; A, D) and X-ray mapping images (B, C, E, F) of Fe-Ti minerals in the A group ore body (A, B, C) and the mafic granulite (D, E, F). Fe mapping (B, E) and Ti mapping (C, F) images of Fe- Ti minerals. Ilm: ilmenite, Am: amphibole, Pl: plagioclase, Opx: orthopyroxene, Mag: magnetite.

들 사이에서 유색광물들과 함께 나타나는 특징을 보이며, 티탄철석과 사장석의 경계에서 녹니석이 관찰된다. B 그룹의 철-티탄 광체(Fig. 11C)는 A 그룹과 광물조성에 있어 차이를 보이지는 않지만 광물들의 입자크기가 상대적으로 작은 경향이 있다. 티탄철석과 각섬석은 사장석 결정들 사이 또는 단열면을 충전하고 있고, 일부 사장석들은 취성변형에 의해 깨져 변위를 보이기도 한다. 고철질 백립암은 0.5~2 mm 내외의 입자크기를 보이고, 구성광물은 주로 사방휘석, 석류석, 사장석, 티탄철석 등이며, 소량의 녹니석이 관찰된다(Fig. 11D). 유색광물이 많은 부분과 사장석이 풍부한 5 mm 정도의 띠로 구분되기도 한다. 철-티탄 광체와 비교했을 때 특징적으로 사방휘석과 같은 유색광물의 함량이 현저하게 높고 엽리와 평행한 방향으로 배열된 특징을 보인다.

철-티탄 광체와 고철질 백립암의 연마박편을 제작하여 Fe-Ti 산화광물의 존재여부와 조직을 관찰하였다. 전자현미분석(EPMA)은 부산대학교 공동실험실습관에서 실시하였다. 기종은 CAMECA SX100이며, 분석 가속전압은 15 keV이고, 조사 전류는 20 nA, 빔 직경 1-5 μm의 조건으로 실험했다. 오차범위와 정확

도는 ±0.3%이다. 산화광물은 대부분 티탄철석과 자철석이다(Fig. 12). 한편, 하동 광체의 경우 정지근 외(1989)는 자철석, 적철석, 황철석, 황동석, 자류철석 등도 보고한 바 있다. A 그룹 광체와 고철질 백립암에 대하여 후방산란전자(BSE) 이미지(Fig. 12A, D)와 X-선 매핑 이미지(Fig. 12B, C, E, F)를 살펴보면, 광체 내 산화광물은 주로 티탄철석으로 존재하며 백립암에서는 티탄철석이 자철석과 함께 나타난다. 그러나 A 그룹의 경우도 야외에서 휴대용대자율 측정기(SM-30)로 측정된 대자율 값이 100×10^{-3} (SI unit)을 초과하는 광체가 있는 것으로 미루어 자철석이 풍부한 부분이 함께 존재할 것으로 판단된다. 티탄철석의 성분을 살펴보면(Table 1), 전체적으로 유사한 조성을 보이고 있다. TiO_2 의 함량은 A 그룹(101, 102, 69 지점)에서 50.70~51.96 wt.%, B 그룹(174 지점)에서 49.77~50.97 wt.%, 고철질 백립암에서 50.93~51.50 wt.%의 값을 보인다.

회장암질암과 철-티탄 광체의 엽리

회장암질암의 엽리는 발달정도, 연속성 등에서 차

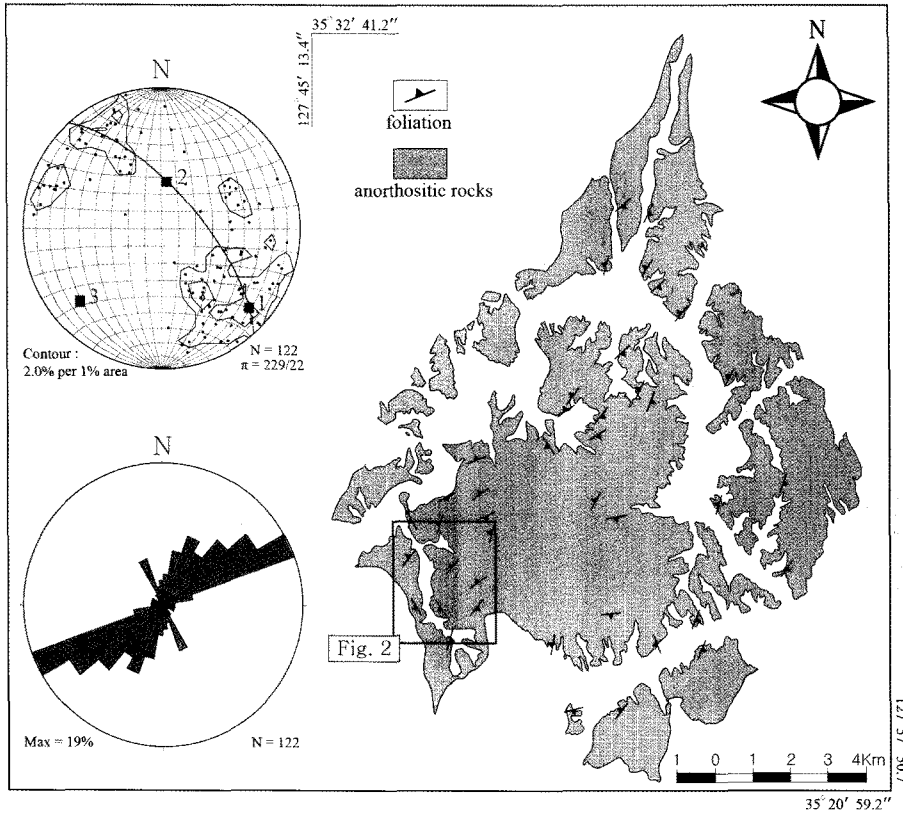


Fig. 13. Attitudes of distribution of foliations observed in the anorthosites. Inserted contoured diagram showing a fold axis estimated from best-fitting π -circle using the attitudes of foliations.

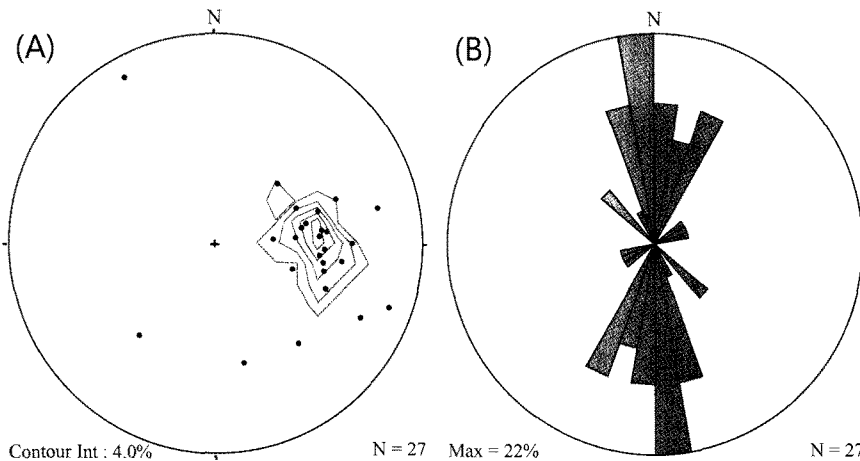


Fig. 14. (A) Contoured π - (lower hemisphere, equal area projection) and (B) rose diagrams showing the attitudes of foliations observed within the A group Fe-Ti ore bodies.

이를 보이나 산청회장암질암 전반에서 관찰할 수 있다(Fig. 13). 지역적으로 차이가 있으나 북동 방향이 가장 우세하며 많은 것들의 경사가 고각이다. 엽리

자세를 투영망에 도시하면, 노두규모에서는 확인되지 않는 남서로 저각의 축(N49°E/22°NW)을 가진 습곡이 인지된다. 이러한 북동-남서 방향의 습곡은 하동

회장암체 내의 엽리를 이용해 얻은 북북동-남남서 방향의 습곡(정재성 외, 2010)과 자세가 유사하다. 한편 산청 회장암체 내 엽리들은 철-티탄 광체와 염기성 암맥들에 의해 연장이 규제되고 있어, 이들은 광체와 염기성 암맥들의 관입 이전에 만들어진 것으로 판단된다.

A 그룹 광체 내에는 좌수향 전단변형에 의한 전단 엽리가 발달한다. 전단엽리는 각섬석과 같은 유색광물과 불투명 광물의 배열과 포획암과 사장석의 변형으로 인지되며, 엽리의 방향은 주변 회장암질암과의 경계면과 거의 평행한 북북동~북북서로 평균 남북 방향이다(Fig. 14). 이는 회장암질암의 엽리와는 차이가 나며 서로 고각도로 사교함을 의미한다. 광체 내에는 다양한 크기의 회장암질 포획암이 존재하는데, 특히 A 그룹 광체 내의 포획암은 전단엽리와 평행하게 배열되며 전단엽리는 포획암의 경계부를 따라 회전되는 경향을 있다. 이는 광체가 관입할 때 회장암질암 암편들을 포획하였으며, 이후 발생한 연성전단변형으로 전단엽리가 형성되고 포획암은 전단면에 거의 평행하게 신장되거나 재배열되었음을 의미한다. 한편, B 그룹 광체에는 연성전단작용으로 인한 포획암의 신장과 전단엽리가 거의 인지되지 않는다. 이는 후기 연성전단작용이 A 그룹 광체에 집중되었음을 시사한다.

토 의

A와 B 그룹 광체의 관계

연구지역 A와 B 그룹의 철-티탄 광체는 공통적으로 회장암질암을 관입·포획하고 있지만, 후기 연성전단변형의 정도와 경계 특성에서 차이를 보인다. 연성전단변형은 광체의 관입 이후에 발생한 것으로 판단됨에도 불구하고, A 그룹에는 전반적으로 뚜렷이 인지되는 반면 B 그룹에서는 거의 인지되지 않는데, 이와 같은 차이의 원인으로서는 크게 두 가지 가능성을 생각해 볼 수 있다. 첫째, A와 B 그룹 광체들은 동시에 회장암질암을 관입하였지만 후기 좌수향 연성전단변형은 차별적으로 받았을 가능성이 있다. 둘째, 처음부터 두 그룹의 관입시기가 다를 가능성이 있다. 하지만 후자의 경우, A와 B 그룹은 모두 고철질 백립암체의 북쪽에 규제되어 분포하며 동일한 광물조성과 지화학적 특성을 보이고, A 그룹의 광체와 고철질 백립암 또는 B 그룹 간에 선후관계가 인지되지 않는다는 점에서 전자의 경우가 더 설득력이 있다 하겠다.

또한 남북 방향의 연성전단변형이 모암인 회장암질암에서는 거의 관찰되지 않고 단지 철-티탄 광체 내에만 집중되어 나타남은 전단변형이 실제로 차별적으로 작동될 수 있음을 가시적으로 보여준다.

한편, 연구지역의 A 그룹 광체는 측방으로 연장되면서 B 그룹 광체의 특징인 불규칙한 관입 형태로 변해가기도 하며(Fig. 3), 또한 불규칙 광맥들 사이에 A 그룹과 유사한 방향으로 비교적 규칙적으로 관입한 세맥들도 함께 관찰된다(Fig. 8과 9). 따라서 이들 두 그룹은 서로 독립적이지 않으며, 관입 시의 기존 단열체제나 지하 응력장 그리고 광체를 형성시킨 유체(또는 마그마)의 압력 조건 등이 달라 결과적으로 광체의 관입 형태(규칙 또는 불규칙)와 폭 등의 산상의 차이가 발생하였을 가능성이 높다. 또한 이러한 다양한 관입 조건에 의한 광체의 산상 차이는 후기 전단작용에 의한 변형 정도가 서로 달라지는 원인이 되었을 것으로 판단된다. 바꾸어 말하면, 폭이 크고 외부응력에 잘 배향된 규칙적인 관입경계를 보이는 광체의 경우에는 주변 모암인 회장암질암과의 강인성(competency)의 차이가 극대화되면서 보다 전단변형이 집중되고 뚜렷한 전단엽리와 변형구조가 만들어졌을 가능성이 높다. 실제로 야외에서 A 그룹 광체는 B 그룹에 비해 규모가 훨씬 크며 남북으로 잘 배열되어 있다. 이러한 차별 변형은 하동 회장암체 내 광체에서도 유사하게 관찰된 바 있다(정재성 외, 2010).

하동지역 철-티탄 광체는 층상, 맥상 그리고 산점상으로 구분된 바 있다(이종만 외, 1999). 이를 이번 산청지역 광체의 분류와 비교하면, A 그룹 광체는 맥상에 그리고 B 그룹 광체는 산점상 광체에 대비된다. 한편, 이종만 외(1999)의 층상 광체는 주변 회장암질암의 엽리와 거의 평행하게 배태하는 엽리를 보이는 광체를 말하는 것으로 이번 연구에서는 이에 정확하게 부합되는 광체는 발견되지 못하였다. 그러나 하동과 산청지역의 회장암질암은 모두 후기 압축력에 의해 엽리가 북동 내지 북북동 방향으로 습곡되어 있어 이를 관입한 A 그룹 광체(맥상 광체)의 일부는 엽리와 거의 평행한 자세를 가질 가능성이 있다. 또한 하동지역의 경우에 일부 광체와 주변 회장암체가 후기의 전단작용을 모두 매우 심하게 받은 경우가 있어 이러한 경우에는 광체와 회장암체가 심하게 압쇄암화되며 전단엽리와 평행하게 조직이 전체적으로 전위(transposition)되어 층상 광체를 형성할 가능성이 있다(정재성 외, 2010).

철-티탄 광체와 고철질 백립암의 관계

연구지역 고철질 백립암은 철-티탄 광체와 성인적으로 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. 고철질 백립암의 경계부에는 주변 회장암질암의 내부로 주입되고 연장되어 구불구불하고 불규칙적인 관입경계를 보이는 B 그룹의 광체로 변화하는 양상이 뚜렷이 관찰된다(Fig. 10). 백립암은 철-티탄 광체와는 유색광물의 함량 차이는 있으나 유사한 유색광물 조합과 함께 티탄철석이 흔히 산출되며, 이 티탄철석은 철-티탄 광체의 것과 유사한 화학적 조성을 가진다(Table 1).

한편, 철-티탄 광체들은 고철질 백립암에 규제되어 그 북쪽 인접부에만 나타난다. 이러한 분포 특징은 현재의 북쪽이 고철질 백립암을 만든 마그마 챔버의 상부일 가능성을 시사한다. 이종만 외(1999)에 의하면 회장암을 형성시킨 마그마 다이어피어가 지표를 향하여 상승하면서 변화압력조건하에서 다량의 사장석정출로 인하여 휘발성물질의 농도가 상당히 높아졌고, 잔류마그마가 높은 압력 하에서 반고화된 회장암에 압착여과작용에 의하여 정치되어 광체가 형성된 것으로 해석하였다. 이 해석을 따르면 고철질 백립암은 회장암질 마그마의 잔류마그마에 해당하며, 휘발성물질이 풍부한 잔류마그마가 상부로 상승하면서 회장암에 일종의 수압단열작용(hydraulic fracturing)을 가하여 일시적인 취성변형을 발생시켜(정재성 외,

2010) 주변 회장암질 포획암을 많이 포함하는 광체를 형성한 것으로 해석할 수 있다. 그러나 현재 광체가 회장암질암의 엽리와 조화적이지 못하고 절단하고 있다는 점은 회장암의 관입과 엽리의 형성 그리고 고철질 백립암의 관입 사이에는 상당한 시간적 간격이 있었음을 의미한다. 바꾸어 말하면, 회장암 내에 엽리가 만들어지고 더욱이 습곡되는 과정 동안 잔류마그마가 고화되지 않고 남아 있었을 것인지는 매우 의심스럽다. 따라서 고철질 백립암과 철-티탄 광체를 형성시킨 마그마는 연구지역 회장암질암을 만든 마그마와는 상당한 시간적 차이를 가진 성인적으로 다른 마그마일 가능성이 높다.

변성사

지리산 편마암 복합체 동쪽 연변부에 남북 방향의 대상으로 분포하는 산청-하동 회장암질암이 관입하고, 이들은 다시 중생대 고철질 반력암, 섬장암과 섬록암 등의 심성암 복합체에 의해 관입된 것으로 알려져 있다(남기상 외, 1989; 정지곤 외, 1991; 박계현 외, 2006). 그러나 이번 조사에서 고온의 변성암에 해당하는 고철질 백립암이 회장암질암을 관입하고 있음이 관찰되어 이러한 기존 생각에 일부 수정이 요구된다.

김형식(1970)에 의해 소백산육괴의 지리산 지역 편마암류에 백립암상의 변성암이 넓게 분포하는 것으로

Table 1. Representative chemical compositions (wt.%) of ilmenite from Fe-Ti ore bodies in the Sancheong anorthosites and mafic granulite

Rock type	Fe-Ti ore body										Mafic granulite			
Sample No.	1-1	1-5	2-6	3-5	4-1	6-1	6-5	7-1	7-6	8-1	9-1	14-1	14-2	14-9
Site No.	174	174	101	101	101	102	102	69	69	102	102	108	108	108
SiO ₂	0.00	0.00	0.05	0.04	0.02	0.08	0.05	0.06	0.05	0.05	0.09	0.04	0.04	0.03
TiO ₂	49.77	50.97	51.39	51.14	51.43	51.74	51.99	51.65	51.16	50.70	51.96	50.93	51.50	51.52
FeO	47.85	48.31	46.10	47.27	47.50	46.64	46.65	45.37	46.51	45.33	46.61	47.42	46.87	47.03
MnO	0.86	0.81	0.99	0.79	0.78	0.91	1.08	1.92	1.70	1.82	0.94	0.31	0.32	0.33
MgO	0.12	0.09	0.00	0.13	0.10	0.10	0.03	0.12	0.07	0.07	0.00	0.26	0.04	0.20
CaO	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01
Na ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.29	0.00	0.00	0.00	0.01
Total	98.62	100.19	98.55	99.39	99.85	99.53	99.81	99.14	99.54	98.29	99.61	98.99	98.77	99.13
O = 6														
Si	0.000	0.000	0.003	0.002	0.001	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002
Ti	1.940	1.951	1.987	1.967	1.968	1.983	1.985	1.984	1.966	1.975	1.975	1.965	1.987	1.980
Fe	2.073	2.056	1.982	2.021	2.021	1.987	1.980	1.938	1.988	1.963	1.963	2.034	2.010	2.010
Mn	0.038	0.035	0.043	0.034	0.034	0.039	0.046	0.083	0.074	0.080	0.080	0.013	0.014	0.014
Mg	0.009	0.007	0.000	0.010	0.008	0.008	0.002	0.009	0.005	0.005	0.005	0.020	0.003	0.015
Ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.000	0.001
Cations	4.06	4.049	4.015	4.034	4.032	4.021	4.016	4.017	4.036	4.026	4.026	4.034	4.016	4.021

보고되기는 하였으나, 이상만(1980)에 의해 소백산 변성대가 상부 앰피블라이트상에서 앰피블라이트상 그리고 녹렴석-앰피블라이트상이 차례로 증첩된 후퇴변성작용을 거듭해 온 것으로 보고되어(이상만 외, 1981; 이상만과 김형식, 1984; Lee et al., 1986; 송용선과 이상만, 1989 등) 소백산육괴의 최고 변성도를 상부 앰피블라이트상 내지 앰피블라이트상으로 취급되었다. 그러나 이후 송용선과 류호정(1993)은 휘석을 함유한 백립암 변성상의 존재를 다시 보고하기 시작하여, 지리산 지역의 반상변정질편마암에서 산출되는 백립암질 포획암을 연구하여 약 800-850°C와 6 kb의 백립암상의 초기변성조건을 제시하였다(송용선, 1999). 또한 김동연 외(2002)는 지리산 지역의 차노카이트에 대한 연구에서도 백립암 변성상의 존재를 보고하고 있어 지리산편마암복합체 여러 지역에서 백립암상의 변성이 인지된다. 이번 조사에서 확인된 야외 산상과 상대적 선후관계를 근거하면, 연구지역에는 회장암질암의 정치 회장암질암의 엽리 형성과 습곡 고철질 백립암의 모암인 엽기성 마그마 관입 백립암상의 변성작용의 순으로 지사를 해석할 수 있어 백립암상의 변성작용은 회장암질암의 엽리가 형성된 이후로 해석된다.

결 론

산청회장암체에 나타나는 철-티탄 광체와 고철질 백립암을 대상으로 상세한 노두 스케치를 실시하고 야외 산상과 분포특징을 기재하였다. 이와 함께 암석학적 특징을 종합하여 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

1. 연구지역 철-티탄 광체는 주변 회장암질암과의 경계특성과 내부변형 특성에 따라 (1) 회장암질암과 일정한 방향의 관입경계를 이루며 뚜렷한 내부 연성 전단변형이 인지되는 규칙 관입광맥형(A 그룹)과 (2) 구불구불하고 불규칙한 관입경계를 가지며 연성전단 변형구조가 거의 인지되지 않는 불규칙 광맥군형(B 그룹)으로 구분된다.

2. 이들 두 그룹은 동일한 시기에 회장암질암을 관입하였으나, 기존 단열체제, 응력장 그리고 광체를 형성시킨 유체의 압력 등의 차이로 관입경계와 폭 등에서 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한 폭이 크고 외부응력에 잘 배향된 규칙적인 관입경계를 보이는 A 그룹 광체의 경우에는 주변 모암인 회장암질암과의 강인성의 차이가 극대화되어 전단변형이 집중되고

뚜렷한 전단엽리와 변형구조가 만들어진 것으로 해석된다.

3. 고철질 백립암의 경계부에는 주변 회장암질암의 내부로 주입되고 연장되어 B 그룹의 광체로 변화됨이 관찰되며, 백립암에는 철-티탄 광체와 동일한 지화학 조성을 가진 티탄철석이 산출되고 있어 연구지역 백립암은 철-티탄 광체의 기원암으로 판단된다.

4. 연구지역에는 선캄브리아기에 회장암질암의 정치→회장암질암의 엽리 형성과 습곡→고철질 백립암의 모암인 엽기성 마그마 관입→백립암상의 변성작용이 순차적으로 발생한 것으로 해석된다.

사 사

이 논문을 위해 유익한 조언을 해 주신 심사자와 편집위원장께 감사드린다. 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- 강희철, 김인수, 손문, 2001, 하동-산청지역에 분포하는 고원생대 말의 회장암질암에 대한 잔류자기 연구. 지질학회지, 37, 269-286.
- 고보균, 2006, 하동-산청 회장암복합체의 성인에 대한 암석학적·지화학적 연구. 강원대학교 박사학위논문, 154p.
- 고상모, 2010, 하동-산청 티탄철석 광상의 광체배태 양상. 광물학회지, 23, 25-37.
- 고상모, 유장한, 김용욱, 이한영, 김수영, 송민섭, 2003, 하동-산청-합천지역 심성암체의 티타늄과 장석자원 탐사 및 광상평가. 한국지질자원연구원 보고서, KR-03(c)-16, 70p.
- 권성택, 이진한, 박계현, 전은영, 1995, 단양 천동리 지역 옥천대/영남육괴의 접촉관계와 소위 화강암질 편마암의 Pb-Pb 연대. 암석학회지, 4, 144-152.
- 권순진, 1991, 경남 산청군 덕천강 일대에 분포하는 하동-산청 회장암질암에 대한 암석학적 연구. 연세대학교 석사학위논문, 130 p.
- 김광호, 정재일, 1994, 하동-산청지역에 분포된 회장암질암 및 엽기성 심성암의 고지자기 연구. 지질학회지, 30, 81-92.
- 김남장, 강필중, 1965, 한국지질도(1:50,000) 진교도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 33p.
- 김동연, 송용선, 박계현, 1998, 지리산 동부지역에 분포된 차노카이트(chamockite)의 암석학, 지구화학 및 지구연대학. 대한지질학회 제53차 학술발표회 초록집, 35-36.
- 김동연, 송용선, 박계현, 2002, 지리산 동부 지역에 분포하는 차노카이트의 변성작용과 성인에 관한 연구. 암석학회지, 11, 138-156.
- 김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 한국지질도(1:250,000)

- 부산도폭 및 설명서. 한국자원연구소, 62p.
- 김성욱, 최은경, 김인수, 1999, 하동-산청 지역에 분포하는 회장암질암에 대한 대지를 비등방성 연구. 지구물리학회지, 2, 169-178.
- 김수영, 서정률, 1990, 하동 및 울진 지역 Ti-REE 및 Li 광물에 대한 광상 및 시추탐사 연구. 희유금속광물자원조사연구 보고서, 한국동력자원연구소, KR-90-2D-1, 112p.
- 김수영, 서정률, 양정일, 김상배, 1991, 하동-울진지역 희유금속 광물자원 조사연구. 희유금속광물자원조사연구 보고서, 한국자원연구소, KR-91-2D-1, 156p.
- 김옥준, 박희인, 김기태, 홍만섭, 박양대, 윤선, 1964, 한국 지질도(1:50,000) 산청도폭 및 설명서. 경상남도, 25p.
- 김형식, 1970, 한국 서남부일대의 광역변성작용에 관하여. 지질학회지, 6, 97-118.
- 남기상, 유환수, 이종덕, 1989, 한국지질도(1:50,000) 산청도폭 및 설명서. 동력자원연구소, 24p.
- 박계현, 김동연, 송용선, 2001, 지리산 지역 차노카이트와 합티탄철석 회장암질암의 Sm-Nd 광물연대 및 성인적 관계. 암석학회지, 10, 27-35.
- 박계현, 김동연, 송용선, 정창식, 2006, 중생대 산청섬암암의 Rb-Sr 조성과 의미. 암석학회지, 15, 1-9.
- 박계현, 송용선, 박맹언, 이승구, 류호정, 2000, 동북아시아 지역 선크브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구: 1. 지리산지역 변성암이 변성연대. 암석학회지, 9, 29-38.
- 서정률, 박성원, 이평구, 오민수, 이봉주, 1992, 하동지역 희유금속 광물자원 조사연구. 희유금속광물자원조사연구 보고서, 한국자원연구소, KR-92-1C-2, 72p.
- 송용선, 1999, 소백산육괴 서남부 지리산지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암. 암석학회지, 8, 34-45.
- 송용선, 김동연, 박계현, 2007, 고철질-초고철질 마천관입암의 층상구조 개관. 암석학회지, 16, 162-179.
- 송용선, 류호정, 1993, 지리산일대 소백산편마암체의 다변성작용. 한국암석학회 제2차 학술발표회 요약집, 20.
- 송용선, 이상만, 1989, 소백산육괴 중앙부 선크브리아 변성암류의 암석학적 연구. 지질학회지, 25, 451-467.
- 안성호, 김종선, 조형성, 손문, 김인수, 류충렬, 2009, 원생대 산청회장암체 내에 새롭게 보고되는 합티탄광체와 우후질 백립암. 2009년 추계지질과학연합학술발표회 논문집, 160.
- 안성호, 김종선, 조형성, 송철우, 손문, 류충렬, 김인수, 2010, 한반도 남부 원생대 산청회장암체 내 암맥군의 분류와 상대연령. 지질학회지, 46, 13-30.
- 이광식, 정창식, 박계현, 장호완, 1997, 무주지역 각섬암의 지구화학 및 Sm-Nd 동위원소 연구. 자원환경지질, 30, 313-220.
- 이덕선, 강지훈, 2010, 영남육괴 지리산지구 하동-산청 지역에 발달하는 대규모 칼집형 습곡. 2010년 추계지질과학연합학술발표회 논문집, 60.
- 이상만, 1980, 지리산(하동-산청) 지역의 변성이질암의 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 16, 1-15.
- 이상만, 김형식, 1984, 소위 울리층군 및 원남층군의 변성암석학적 연구-태백산일대를 중심으로-. 지질학회지, 20, 195-214.
- 이상만, 나기창, 이상현, 박배영, 이상원, 1981, 소백산육괴(동남부)의 변성암복합체에 대한 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 17, 169-188.
- 이상원, 윤성효, 1994, 지리산 북부 마천일대의 반려암질암에 대한 암석학적 연구 및 Rb/Sr 전암연대. 대한자원환경지질학회 제27차 학술발표회 발표논문 요약집, 32.
- 이인경, 박상준, 지세정, 최상훈, 2009, 하동-산청 티타늄 광체의 성인연구. 대한자원환경지질학회 2009년도 춘계 지질과학기술 공동학술대회 논문집, 373.
- 이종만, 정지곤, 김원사, 1999, 하동지역 회장암질암의 진화 및 합티탄광체와 성인적 관련성에 대한 예비연구. 지질학회지, 35, 321-336.
- 정재성, 김종선, 조형성, 송철우, 손문, 류충렬, 지세정, 김인수, 2010, 원생대 하동회장암체 내 철-티탄 광체의 산상과 변형. 암석학회지, 19, 31-49.
- 정재성, 송철우, 안성호, 김종선, 손문, 류충렬, 지세정, 김인수, 2009a, 원생대 하동회장암체 내 합티탄 반려암질 회장암의 산상과 지질구조. 대한자원환경지질학회 2009년도 춘계 지질과학기술 공동학술대회 논문집, 257.
- 정재성, 송철우, 김종선, 손문, 류충렬, 지세정, 김인수, 2009b, 원생대 하동회장암체의 지질구조와 변형사. 2009년 추계지질과학연합학술발표회 논문집, 261.
- 정지곤, 김원사, 서병민, 1991, 경상분지 서부 인접 지역에 위치한 열기성 및 초열기성암의 성인에 관한 연구. 대한지질학회 제 46차 정기학술대회 발표논문 요약, 지질학회지, 27, 530-531.
- 정지곤, 김원사, Watkinson, D.H., 1989, 하동지역에 분포한 회장암질암의 구조와 티타늄광체의 산출상태. 지질학회지, 25, 98-111.
- 지세정, 고상모, 박상준, 고인세, 서정률, 김대영, 유장한, 김수영, 이미정, 김용욱, 이재호, 김유동, 이한영, 김인준, 허철호, 류충렬, 2008, 국내 전락광물자원 재평가와 광상탐사 요소기술 개발. 한국지질자원연구원 보고서, GP2007-017-2008(2), 121-157/ 403p.
- Ashwal, L.D., 1982, Mineralogy of mafic and Fe-Ti oxide-rich differentiates of the Marcy anorthosite massif, Adirondacks, New York. Am. Mineral., 67, 14-27.
- Ashwal, L.D., 1993, Anorthosites. Springer, Berlin, 422p.
- Årebäck, H. and Stigh, J., 2000, The nature and origin of an anorthosite associated ilmenite-rich leuconorite, Hakefjorden Complex, south-west Sweden. Lithos, 51, 247-267.
- Barker, D.S., 1983, Igneous rocks. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 417p.
- Charlier, B., Duchesne, J.-C. and Auwera, J.V., 2006, Magma chamber processes in the Tellnes ilmenite deposit (Rogaland Anorthosite Province, SW Norway) and the formation of Fe-Ti ores in massif-type anorthosites. Chemical Geology, 234, 264-290.
- Charlier, B., Sakoma, E., Sauvé, M., Stanaway, K., Auwera, J.V. and Duchesne, J.-C., 2008, The Grader layered intru-

- sion (Havre-Saint-Pierre Anorthosite, Quebec) and genesis of nelsonite and other Fe-Ti-P ores. *Lithos*, 101, 359-378.
- Charlier, B., Namur, O., Malpas, S., de Marneffe, C., Duchesne, J.-C., Auwera, J.V. and Bolle, O., 2010, Origin of the giant Allard Lake ilmenite ore deposit (Canada) by fractional crystallization, multiple magma pulses and mixing. *Lithos*, 117, 119-134.
- Cheong, C.S., Kwon, S.T. and Park, K.H., 2000, Pb and Nd isotopic constraints on Paleoproterozoic Crustal evolution of the northeastern Yeongnam massif, South Korea. *Precambrian Research*, 102, 207-220.
- Duchesne, J.C., Roelands, I., Demaiffe, D. and Weis, D., 1985, Petrogenesis of monzonitic dykes in the Egersund Ognan anorthosite (Roganland, S.W. Norway): trace elements and isotopic (Sr, Pb) constraints. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 90, 214-225.
- Hébert, C., Cadieux, A.-M. and van Breemen, O., 2005, Temporal evolution and nature of Ti-Fe-P mineralization in the anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) suites of the south-central Grenville Province, Saguenay - Lac St. Jean area, Quebec, Canada. *Can. J. Earth Sci.*, 42, 1865-1880.
- Jeong, J.G., 1980, Petrogenesis of anorthosite and related rocks in Hadong-Sancheong district, Korea. Ph. D. dissertation, Seoul National University, 153p.
- Jeong, J.G., 1982, Petrology studies on anorthositic rocks in Hadong-Sancheong district, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 18, 83-108.
- Kim, C.B. and Turek, A., 1996, Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Jour.*, 30, 323-338.
- Kim, C.-B., Chang, H.-W. and Turek, A., 2003, U-Pb zircon ages and Sr-Nd-Pb isotopic compositions for Permian-Jurassic plutons in the Ogcheon belt and Ryeongnam massif, Korea: Tectonic implications and correlation with the China Qinling-Dabie belt and the Japan Hida belt. *Island Arc*, 12, 366-382.
- Kolker, A., Hanson, G.N. and Lindsley, D.H., 1990, Geochemical evolution of the Maloin Ranch pluton, Laramie Anorthosite Complex, Wyoming: trace elements and petrogenetic models. *Am. Mineral.*, 75, 572-588.
- Kwon, S.T. and Jeong, J.G., 1990, Preliminary Sr-Nd isotope study of the Hadong-Sancheong anorthositic rocks in Korea: implication for their origin and for the Precambrian tectonics. *J. Geol. Soc. Korea*, 26, 341-349.
- Lee, S.M., Kim, H.S. and Oh, I.S., 1986, Metamorphic petrology of Precambrian gneisses in Samcheok-Jukbyeon area. *J. Geol. Soc. Korea*, 22, 257-277.
- Longhi, J., 2005, A mantle or mafic crustal source for Proterozoic anorthosites? *Lithos*, 83, 183-198.
- McLelland, J., Ashwall, L. and Moore, L., 1994, Composition and petrogenesis of oxide-, apatite-rich gabbro-norites associated with Proterozoic anorthosite massifs: examples from the Adirondack Mountains, New York. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116, 225-238.
- Mitchell, J.N., Scoates, J.S., Frost, C.D. and Kolker, A., 1996, The Geochemical evolution of anorthosite residual magmas in the Laramie Anorthosite Complex, Wyoming. *J. Petrol.*, 37, 637-660.
- Morisset, C.-E., Scoates, J.S., Weis, D. and Friedman, R.M., 2009, U-Pb and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronology of the Saint-Urbain and Lac Allard (Havre-Saint-Pierre) anorthosites and their associated Fe-Ti oxide ores, Quebec: Evidence for emplacement and slow cooling during the collisional Ottawa orogeny in the Grenville Province. *Precambrian Research*, 174, 95-116.
- Mukherjee, A. and Das, S., 2002, Anorthosites, granulites and the supercontinent cycle. *Gondwana Research*, 5, 147-156.
- Rogers, J.J.W. and Santosh, M., 2004, Continents and Supercontinents. Oxford University Press, 289p.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1995, U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 29, 243-258.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1996, U-Pb zircon ages for Precambrian rocks in southwestern Ryeongnam and southwestern Gyeonggi massif, Korea. *Geochemical Journal*, 30, 231-249.
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A. and Li, S.Z., 2004, A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, 67, 91-123.

2011년 5월 26일 접수

2011년 5월 27일 심사개시

2011년 6월 25일 채택