

충남 대천해수욕장과 서천군 마량리 지역에 분포된 남포층군 변성퇴적암층의 변성지구조 진화

송용선* · 최정윤 · 박계현

부경대학교 환경지질학과

The Tectono-metamorphic Evolution of Metasedimentary Rocks of the Nampo Group Outcropped in the Area of the Daecheon Beach and Maryangri, Seocheon-gun, Chungcheongnam-do

Yong-Sun Song*, Jungyoun Choi, and Kye-Hun Park

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

요약: 충남 대천해수욕장부근과 서천군 마량리 일대에 변성역암, 변성사암, 천매암 등으로 구성된 변성퇴적암층이 노출되어 있다. 원암의 구성으로 볼 때 남포층군 중의 조계리층에 대비되며, 대표적인 변성광물군은 흑운모-백운모-석영(\pm 사장석 \pm 녹니석)과 흑운모-백운모-석류석-석영(\pm 사장석 \pm 녹니석)으로 중압변성의 각섬암상 중 석류석대에 속한다. 지질온도압력계에 의해 계산된 온도-압력조건은 560~595°C에 6.9~8.2 kb이다. 천매암에서 분리된 흑운모의 K-Ar 연대는 143.2 \pm 3.6 Ma, 122.6 \pm 2.4 Ma 및 124.8 \pm 2.4 Ma인데 뒤의 두 연대는 후기에 열적교란을 받은 것으로 판단된다. 기 발표된 연대측정에 의하면 대동누층군의 생성시기는 187~175 Ma로 (Han *et al.*, 2006; Jeon *et al.*, 2007) 이 연구의 결과들과 조합하여 대보조산운동기에 일어난 이 지역에서의 변성지구조적 진화과정을 유추하였다. 남포층군 퇴적 직후인 175 Ma 부근에 습곡작용과 중첩된 트러스트운동으로 지각의 두께증가가 시작되었고, 정점변성작용을 거친 후 지각확장에 따른 정단층운동으로 흑운모의 폐쇄온도까지 빠르게 삭박되면서 냉각되는 과정을 겪었다.

핵심어: 남포층군, 대동누층군, 대보조산운동, 변성퇴적암, 변성작용, 변성지구조진화, K-Ar 흑운모 연대

Abstract: The metasedimentary rocks of the Nampo Group consisting of metaconglomerates, metasandstones, phyllites are exposed in the area of the Daecheon beach and Maryangri, Seocheon-gun. Their typical metamorphic assemblages of Bt-Mus-Grt-Qtz (\pm Pl \pm Chl) and Bt-Mus-Qtz (\pm Pl \pm Chl) indicate that they have been under intermediate P/T type metamorphism and were metamorphosed to garnet zone grade of amphibolite-facies during the Daebo Orogeny. Pressure-temperature conditions of peak metamorphism estimated from geothermobarometries are 560~595°C, 6.9~8.2 kb respectively. The results of K-Ar biotite age determination are 143.2 \pm 3.6 Ma, 122.6 \pm 2.4 Ma and 124.8 \pm 2.4 Ma and the last two ages are considered as the results of later-stage thermal perturbation. On the bases of the formation age of Daedong Supergroup of 187~172 Ma (Han *et al.*, 2006; Jeon *et al.*, 2007) combined with the results of this study, the hypothetical model of tectonometamorphic evolution of the study area during Daebo Orogeny is proposed. Crustal thickening resulted from folding and duplexing of thrusts in the area initiated at around 175 Ma just after sedimentation of Nampo Group. And then rapid cooling by normal faulting due to crustal extension followed immediately after the peak metamorphism to the closure temperature of biotite.

Key words: Nampo Group, Daedong Supergroup, Daebo Orogeny, Metasediments, Metamorphism, Tectono-metamorphic evolution, K-Ar biotite age

*Corresponding author

Tel: 82-51-629-6627; Fax: 82-51-629-6623; E-mail: yssong@pknu.ac.kr

서 론

대동누층군은 송림변동기에 한반도 곳곳에 발달된 소규모 호수분지에 퇴적된 트라이아스기 말기에서 쥐라기 초기의 지층으로, 한반도 남부에서는 경기도 연천부근과 김포일대, 충청남도 충남탄전 일대, 그리고 문경과 단양-영월일대에 발달되어 있다. 김포와 연천 일대의 대동누층군은 김포층군으로, 문경과 단양-영월 일대의 것은 반송층군, 그리고 충남탄전 일대의 것은 남포층군으로 분류되고 있다.

이들 대동누층군의 퇴적암층들은 역암, 역질사암, 사암 및 셰일의 호층으로 구성되어 있으며 지역적으로 변화가 있으나 대부분 탄층을 협재하고 있어 김포탄전, 충남탄전, 문경탄전 등으로 개발되어 왔다. 대동누층군의 퇴적암층들은 기반암인 선캠브리아 편마암류와 조선누층군, 그리고 평안누층군과는 부정합적이지만 후기의 변형작용으로 흔히 이들 기반암들과 단층 또는 트러스트 경계를 이루며, 대보조산운동기 이후의 화강암들의 관입을 받았다. 퇴적시기는 화석으로 볼 때 트라이아스 말기에서 쥐라기 초기로 알려져 있는데, 최근에 대동누층군 중의 응회암층과 사암층에서 분리된 저콘의 SHRIMP U-Pb 연대는 약 190~170 Ma로 퇴적시기가 쥐라기 초에서 중기에 걸침을 지시하고 있다 (Han *et al.*, 2006; Jeon *et al.*, 2007).

기존 연구들(예, 민경덕 외, 1992)에 충남탄전 동남부의 일부 남포층군이 변성되어 천매암 또는 규암화되어 있다거나, 약한 변질 또는 변성작용(주로 접촉변성작용)을 받은 부분도 있다고 언급되어 있으나 현재까지 변성작용의 특성이나 그 정도에 대해 구체적으로 보고된 것은 없다.

최근 연구자들은 충남 대천의 대천해수욕장과 서천군 마량리 지역에 분포된 퇴적암층의 조사에서 이들이 상당한 정도의 광역변성작용을 받아 천매암 내지 천매암질 편암, 변성역암 및 변성사암의 특징을 잘 보여주고 있음을 관찰하게 되었다. 이 연구는 이들 변성퇴적암층의 암석학적 특성, 변성작용과 변성연대를 보고하고, 변성지구조적 진화과정을 추정하여 대동누층군의 퇴적 이후에 일어난 대보조산운동의 특성에 대한 자료를 제공하고자 한다.

지질개요

충남탄전 일대의 남포층군은 남한에서 가장 넓게 분포된 대동누층군으로 기반암인 경기육괴의 선캠브리아기 변성퇴적암류 및 화강암질 편마암류를 부정합으로

피복하거나 단층 또는 트러스트접촉을 하고 있으며, 중생대 화강암류의 관입을 받고 있다(Fig. 1). 남포층군은 북북동-남남서 방향의 축을 가진 습곡구조와 역시 주로 북북동-남남서 주향의 단층과 트러스트들이 발달되어 있는데(김동숙, 1981), 이들 단층과 습곡구조는 쥐라기의 대보조산운동기에 형성된 것으로 해석되고 있다(Reedman and Um, 1975; Cluzel 1992). 현재까지는 이 지역에 대한 구조지질학적 연구가 미흡하여 단층과 습곡작용의 상세한 특성은 제대로 알려져 있지 않다. 경기육괴의 기반암들은 고도 변성된 선캠브리아기 편마암과 편암류로 구성되어 있으며 주 변성시기는 고원생대인 약 19억 년 전이다(Lee *et al.*, 2003 등).

남포층군은 하부로부터 하조층(또는 월명산층), 아미산층, 조계리층, 백운사층, 성주리층으로 세분되며, 하조층, 조계리층, 성주리층은 주로 역암과 사암으로 아미산층과 백운사층은 주로 사암과 흑색셰일로 구성되어 있다(서해길 외, 1980; 최현일 외, 1987). 남포층군의 전체 총후는 약 2,500 m(전희영 외, 1990)로 알려져 있지만 북쪽의 오천과 오서산 지역 남포층군은 각각 약 3,350 m와 4,650 m인 것으로 보고되었다(에가와 코우스케와 이용일, 2006).

연구방법

변성광물들의 화학조성분석은 부산대학교 공동실험실습관의 Cameca SX100 모델 EPMA를 이용하였으며, 분석조건은 가속전압 15 keV, 빔전류 20 nA, 빔사이즈 1 μm , 측정시간 10 sec이다. 분석에는 영국의 P&H Developments Ltd.에서 제조한 표준물질을 사용하였으며, 종류와 원소함량은 알바이트(Si 32.1%, Na 8.71%), 정장석(Al 9.81%, K 12.18%), 금홍석(Ti 59.95%), 스펜클라라이트(Fe 69.94%), 페리클레이스(Mg 60.3%), 로도나이트(Mn 32.85%), 규회석(Ca 34.12%), 산화크롬(Cr 68.42%), 중정석(Ba 58.84%) 등이다. X-선 매핑의 조건은 15 keV, 40 nA, 검출시간 20 msec, 빔사이즈 0.1 μm 에 스텝사이즈 4 μm 이고 해상도는 512*512였다.

변성조건은 GeoThermoBarometry 프로그램 version 2.1(Spear and Kohn, 1999)와 Holdaway(2000)의 흑운모-석류석(GB) 지온계를 이용한 석영-흑운모-사장석-석류석(GBPQ) 지압계(Wu, C.M. *et al.*, 2004)를 이용하여 구하였다. GeoThermoBarometry 프로그램을 이용한 계산에는 일반적으로 널리 이용되는 흑운모-석류석 지온계(Hodges and Spear, 1982; Ganguly and Saxena, 1984; Perchuk and Lavrenteva, 1983; Indares and Martignole, 1985; Ferry and Spear, 1978; Patino

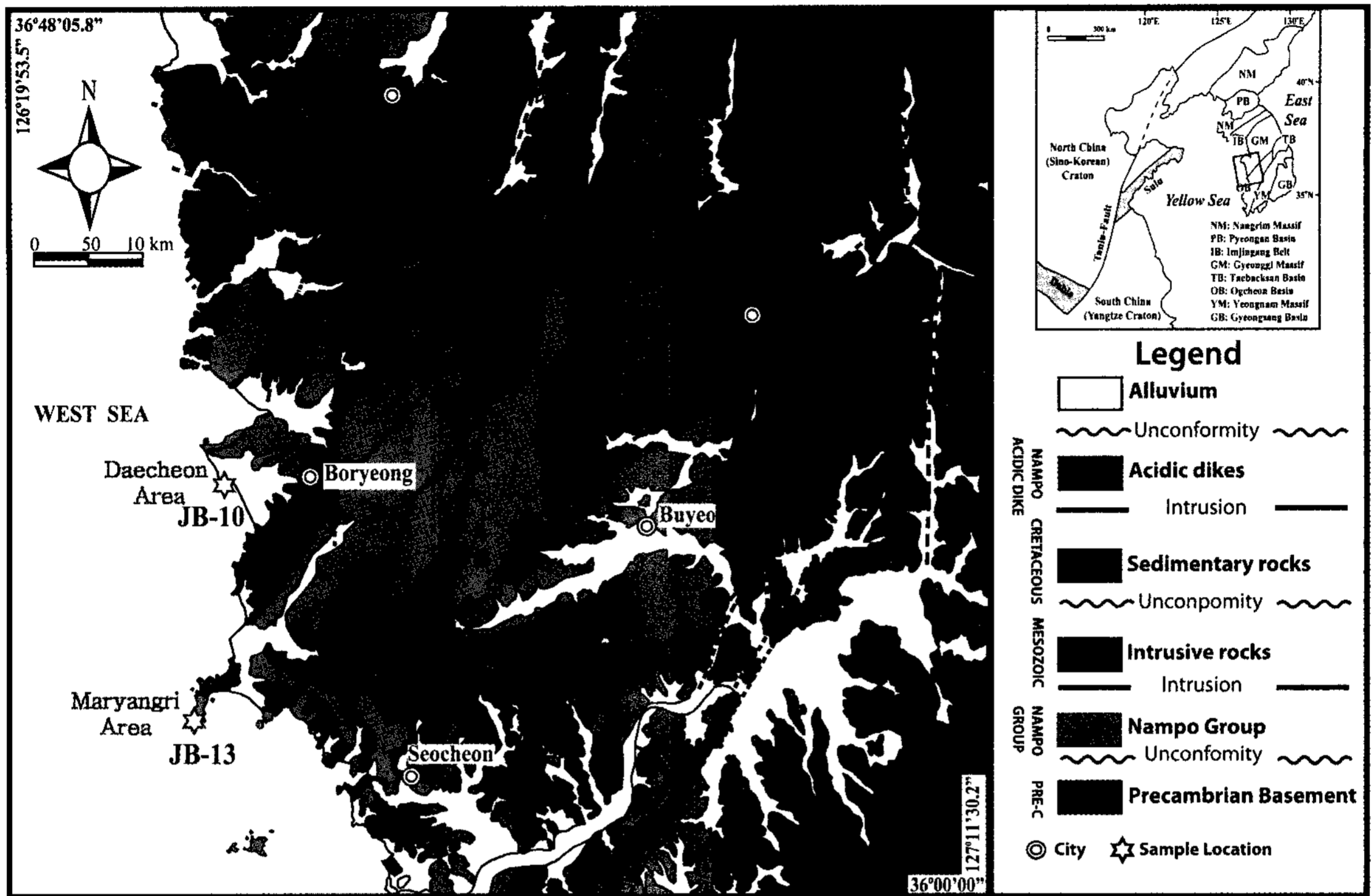


Fig. 1. Simplified geological map of the study area around Chungnam coal field, Korea modified after Lee *et al.* (1996).

Douce *et al.*, 1993; Kleemann and Reinhardt, 1994; Holdaway *et al.*, 1997; Gessman *et al.*, 1997)와 석류석-사장석-백운모-흑운모(GPMB) 지압계(Ghent and Stout, 1981; Hodges and Crowley, 1985; Powell and Holland, 1988; Holdaway *et al.*, 1997; Hoisch, 1990, 1991)을 이용하였다. 또한 흑운모-석류석(GB) 지온계(Holdaway, 2000)와 석영-흑운모-사장석-석류석(GBPQ) 지압계(Wu *et al.*, 2004)를 적용하여 구한 변성온도-압력조건과 비교하였다.

변성퇴적암층 중의 흑운모에 대한 K-Ar 연대를 측정하였다. 흑운모들은 전암시료를 텅스텐카바이드 재질의 Jaw Crusher로 분쇄한 후 체로 80~120 mesh 크기의 입자들을 걸렀으며, 이들을 초음파세척한 후 전자선별기와 중액, 그리고 마지막 수선(handpicking)과정을 거쳐 분리하였다. 연대측정은 한국기초과학지원연구원 동위원소실에 의뢰하여 K-Ar 법으로 연대를 측정하였다. K의 정량에는 원자흡광분광분석기(모델명: Unicam 989), Ar 측정에는 Micromass사의 모델 VG5400 질량분석기를 이용하였는데 자세한 분석조건과 방법은 김정민(2001)에 따랐다.

노두기재

대천해수욕장 지역

대천해수욕장 남쪽 끝 해안가 부근에 변성된 역암, 역질사암, 사암의 호층과 천매암화 된 세일층으로 구성된 노두가 노출되어 있다. 노두는 동서로 100 m 정도 되는데 내륙쪽은 주로 변성사질암과 천매암질암으로 서쪽은 주로 역암과 사암의 호층으로 구성되어 있다. 역질암층에 포함된 역들은 규암, 편마암, 화강암질암이 주이고 어두운 색의 세립질 퇴적암기원 역 또는 응회암 역들도 드물지 않게 산출된다. 역들은 대부분 원마도가 매우 좋으나 어두운 색의 퇴적암기원 역 중에는 각력들도 가끔 포함되며, 엽리를 따라 신장되어 있다. 역의 크기는 1~2 cm에서 10 cm가 넘는 것까지 다양하여 분급은 불량한 편이다(Fig. 2a). 변성된 사암층은 중조립질 사암에서 함력질 사암까지 암상변화가 있지만 분급은 비교적 양호하고 흔히 사층리구조를 보인다. 세일층 암층은 천매암 또는 천매암질 편암으로 변성되었고, 엽리가 잘 발달되어 있으며 부분적으로 파랑벽개와 선구조를 보이기도 한다. 흔히 흑운모가 점

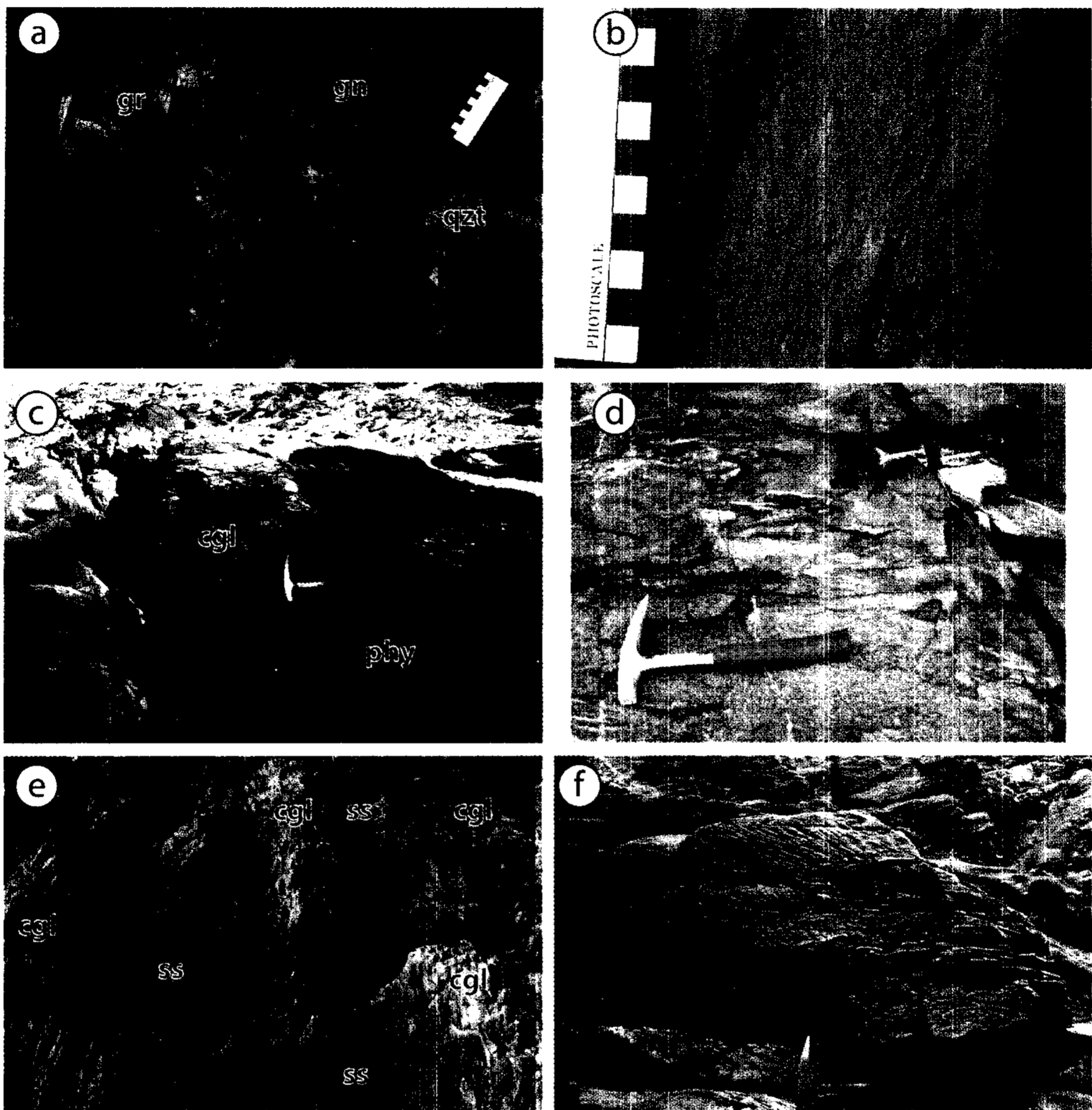


Fig. 2. Outcrop photographs of the Nampo group metasedimentary rocks. (a) Boulders and cobbles in metaconglomerate formation mainly consisting of quartzite and gneisses with well-rounded shape. Some sedimentary cobbles (dark) showing rather angular shape. (b) Biotite porphyroblasts bearing preferred orientation parallel to foliation of phyllite. (c) Recumbent fold in alternating formation of metaconglomerate and phyllite. (d) Lenses of metamorphosed black shale arranged along with recumbent fold plane indicating necking into boudins. (e) Tight to isoclinal fold in the Nampo Group metasediments. (f) Cross-bedding in metasandstones.

문상의 반상변정으로 산출되며(Fig. 2b) 부분적으로 석류석이 반상변정을 이루기도 한다. 엽리는 부분에 따라 변하는데 $N56^{\circ}W$ 에 $25^{\circ}NE$ 정도이고 층리는 대략 $N10^{\circ}W$ 에 $68^{\circ}NE$ 로 엽리와 층리는 서로 상당한 각으로 사교하고 있다. 역암층, 사암층 셰일층들이 자주 반복적으로 협재되어 산출되는 것은 원래의 교호퇴적층이 습곡을 받아 반복현상이 더 심화되었음이 노두에서 잘 관찰되는데 이 지역에서는 주로 횡와습곡을 이루고 있다(Fig. 2c). 천매암 내지 천매암질 편암 중에는 종종 검은색의 탄질물이 풍부한 부분이 엽리를 따라 신장된

렌즈상으로 포함되어 있는데 횡와습곡을 따라 배열되는 양상은 얇은 흑색셰일층이 변형 및 변성작용을 받을 때 습곡되면서 부단화되었음을 지시한다(Fig. 2d). 변성퇴적암층은 노두상에서 1-2 m 두께의 산성암맥과 수 조의 얇은 두께의 페그마타이트맥들의 관입을 받고 있다.

마량리 지역

충남 서천군 마량리 지역에 서천도폭(김봉균과 손석진, 1963)에서 내도둔층으로 명명된 변성퇴적암층이 분

포되어 있다. 서천도폭조사자들은 이 변성퇴적암층을 인접한 대동누층군과 분리하여 보다 고기의 변성퇴적암층으로 보고 양자 사이를 단층접촉으로 기재하였다. 마량리 남쪽 끝 부분 해안가에 노출되어 있는 변성된 역암, 역질사암, 사암 및 셰일의 호층으로 구성된 변성퇴적암층을 조사하였다. 엽리와 층리는 대체로 거의 평행하거나 약간 사교하며, 역질암층과 사질암층 및 셰일층이 급사 내지 등사습곡을 이루며 반복층을 이루고 있다(Fig. 2e). 엽리의 방향은 역시 부분에 따라 변화가 있으며 주향은 N20°E에서 N36°W, 경사는 12~56°SE이고, 층리는 서천도폭(김봉균과 손석진, 1963)에 의하면 N10°W에 50°-70°NE 정도이다. 역암층 중의 역들은 1~2 cm 크기에서 10여 cm까지 다양하여 분급이 불량한 편이고 곳에 따라 40~50 cm 이상의 매우 큰 역도 산출된다. 역들은 주로 규암, 편마암 및 화강암질암들이며 대체로 원마도가 높고 엽리방향으로 신장 배열되어 있다. 사암층에는 사층리가 아주 잘 발달되어 있으며(Fig. 2f), 세립질 암층들은 천매암화 되어 현저한 엽리구조를 보여준다.

암층대비

대천해수욕장 지역의 노두는 이 지역을 처음 조사한 Shimamura(1931)의 1/5만 남포도폭에서 백운사층으로 분류되어 있다. 그러나 최근의 대동누층군 조사자들의 분류를 따르면 노두에서 산출되는 역암층의 특징은 조계리층에 대비된다. 백운사층 중에 협재된 역암층은 3 cm 이하의 작은 역들로 구성되어 있어 큰 역들이 포함되는 조계리층 역암층과 구별되는 것으로 알려져 있으며(김동숙, 1981), 남포층군의 기저역암층인 하조층(또는 월명산층)의 역의 구성보다는 조계리층에 가깝다. 또한 이 지역의 북동쪽에 위치한 오서산과 오천리 지역 남포층군 중의 조계리층(에가와 코우스케와 이용일, 2006)의 역의 구성과 매우 흡사하며, 역의 원마도가 높고 신장되어 있는 특징은 오서산 지역 조계리층에 대비됨을 지시한다.

충남 서천군 마량리 지역 서해안에 남쪽으로 돌출된 지역에 분포된 변성퇴적암층은 인접한 대동누층군의 희이산층의 연장부에 해당되나, 서천도폭조사자(김봉균과 손석진, 1963)들은 이 지역의 퇴적암층이 상당한 변성을 받아 편암화된 특징을 보이므로 대동누층군 이전의 고기의 변성퇴적암층으로 보고 내도둔층으로 명명하였다. 또한 희이산층과 변성퇴적암층 사이를 단층으로 판단하였다. 이 지역에 분포된 역암층의 특징 역시 조계리층에 잘 대비되며 희이산층은 조계리층에 대

비되는 층이므로 동일한 층의 연장부일 것으로 판단된다. 그리고 희이산층에서 이 변성퇴적암층으로 가면서 변성정도가 급하게 변함은 서천도폭에서 기재한 바와 같이 단층접촉임을 지시한다.

변성작용

변성조직

변성역암이나 변성사암의 경우 원래의 쇄설기원 역이나 압편, 석영, 장석 등의 결정들이 변형되어 있고 석영, 장석 입자들은 재결정되어 불규칙한 경계면을 보인다. 세립질 기질부는 흑운모와 백운모, 재결정된 석영 등으로 구성되어 있으며 운모들은 평행배열되어 엽리를 이루고 있으나 중-조립질의 석영과 장석입자들에 의해 제한을 받아 천매암에 비해 평행배열의 정도가 약하다. 셰일층이 변성된 천매암 내지 천매암질 편암의 경우 세립질의 백운모와 흑운모, 석영들이 매우 규칙적이고 평행한 엽리를 잘 이루고 있다(Fig. 3a). 흔히 흑운모가 천매암질암 중에 엽리를 따라 배열된 반상변정을 이루는데 이들 흑운모는 길이가 보통 1~2 m이고 폭도 0.5~1 mm 정도로 상당히 조립이고 적갈색을 띤다. 대천 지역의 경우 부분에 따라 1~2 mm 크기의 석류석이 반상변정으로 산출된다(Fig. 3b). 내도둔 지역 천매암 중의 흑운모는 대천 지역의 것에 비해 대체로 세립질이고 색깔도 녹색에서 옅은 적갈색을 띠며, 흑운모들이 반점상의 포이킬로블라스트를 이루기도 한다(Fig. 3c). 대체로 변성사암층의 기질부에 재결정된 운모들은 0.1~0.3 mm 정도로 매우 세립질이지만(Fig. 3d) 천매암 내지 천매암질 편암의 운모들은 0.5~2 mm 정도로 오히려 천매암 내지 천매암질 편암 중의 운모들이 조립화된 경향을 보인다(Fig. 3a & b). 이는 천매암 내지 천매암질 편암의 모암인 셰일이 운모를 구성하는 성분이 보다 풍부하고, 원래의 입도가 작아 표면자유에너지가 커서 변성작용동안 더 빠르게, 크게 성장한 재결정작용의 한 특징을 잘 보여주는 것으로 해석된다. 주상의 티탄철석과 흑운모가 엽리에 거의 수직으로 발달된 후조산성(post-tectonic) 재결정작용의 산물로 산출되기도 하며, 녹니석은 관찰하기 어렵다. 천매암질암에서 렌즈상으로 산출되는 검은 압편 부분은 주로 세립질의 백운모와 석영, 그리고 불투명한 탄질물들로 구성되어 있다. 흔히 모나자이트, 저어콘, 불투명광물들이 미량으로 산출된다.

변성광물의 화학조성

변성작용 동안 재결정된 변성광물들의 화학조성을

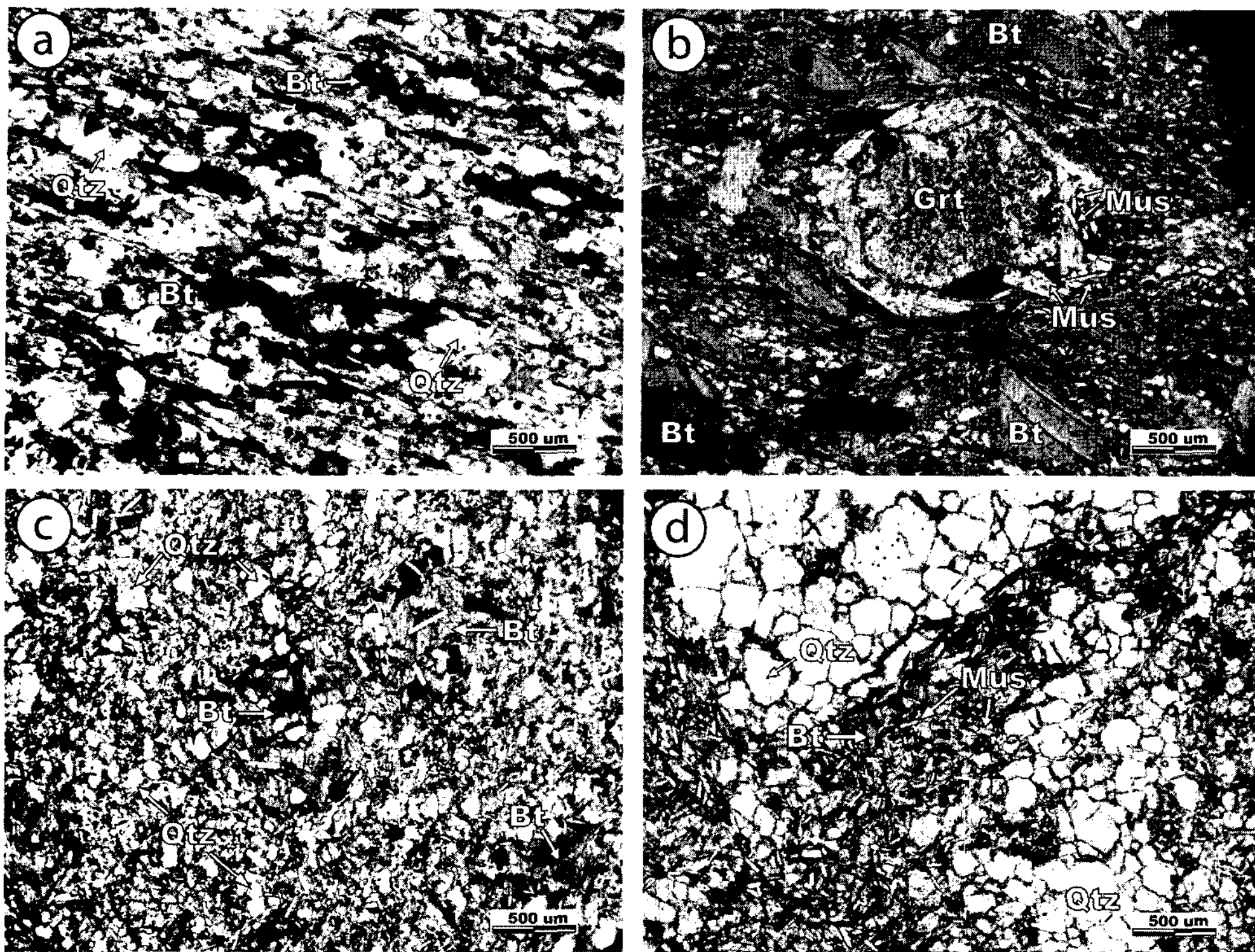


Fig. 3. Photomicrographs of metamorphic textures from metasedimentary rocks of the Nampo group. (a) Phyllites showing strong foliation according to preferred orientation of biotite, muscovites and elongated quartz grains. (b) Phyllite from Daechon area with lots of porphyroblasts of biotites and garnets showing strongly foliated texture. (c) Phyllite from Mariangri area showing glomeroporphyritic texture of biotites. (d) Metasandstone including rather small grains of mica.

알기 위해 변성작용에 의해 완전히 재결정된 변성광물들로 구성된 천매암질 암 중의 흑운모, 백운모, 석류석, 그리고 세립질의 석영과 함께 재결정된 조직을 보이는 미립질의 사장석을 전자현미분석기로 주성분 화학조성을 분석하였다. 분석대상 연마박편은 대천지역에선 석류석을 포함한 시료(JB-10)와 석류석이 산출되지 않는 시료(JB-10-口) 각 1개, 내도둔지역에선 2개의 천매암질 암(JB-13과 JB-13-口)을 선정하여 제작하여 분석하였다.

석류석은 자형 내지 반자형의 반상변정으로 산출되는데 내부에 석영 등의 미립질 광물포유물을 함유하고 있다(Fig. 3c & d). 광물포유물들의 배열은 그 경향성이 뚜렷하지는 않지만 내부에서는 엽리에 큰 각으로 사교하는 방향을 보이고 맨 바깥쪽 주변부에서는 희미하지만 엽리에 수렴하는 동조산성(syn-tectonic) 결정형을 이루는 것으로 보인다. JB-10 연마박편에서 서로 떨어져 있는 2개의 석류석 반상변정(JB-10 (1)과 (2))을 선택하여 X-선 성분매핑을 하고, 석류석 입자들을 가

로질러 중심부에서 주변부로 가면서 점분석을 하여 성분변화의 양상을 조사하였다. X-선 성분매핑사진(Fig. 4 & 5)은 중심부는 Mn 성분이 풍부하고 주변부는 Fe와 Mg 성분이 풍부해지는 동심원상의 점진변성의 성장누대구조를 잘 보여준다. 2개의 석류석 반상변정에 대한 전자현미분석 결과는 중심부에서 주변부로 가면서 엘먼딘 함량은 72.3%에서 78.5%로, 파이로프는 3~5%로 증가하나, 그로슬라는 18.1%에서 15%로, 스페사틴은 10.3%에서 1%로 감소하는데 스페사틴 성분의 변화가 가장 뚜렷함을 보여준다(Table 1과 Fig. 6).

흑운모는 JB-10의 서로 다른 석류석 반상변정 주위에서 각각 3~4점을 분석하였는데, 각각의 평균값이 거의 동일함에서 보는 바와 같이 각 시료 내에선 입자에 따른 성분변화가 미약하고 거의 일정한 조성을 보이므로 시료별로 분석치의 평균값을 취하였다(Table 2). 흑운모들은 비교적 Fe 함량이 높은 편이며, 적갈색이 강하고 입자가 큰 대천지역의 흑운모($X_{Mg} = 0.323 \sim 0.356$)에 비해 녹갈색을 띠며 입자가 작은 내도둔지역의 것

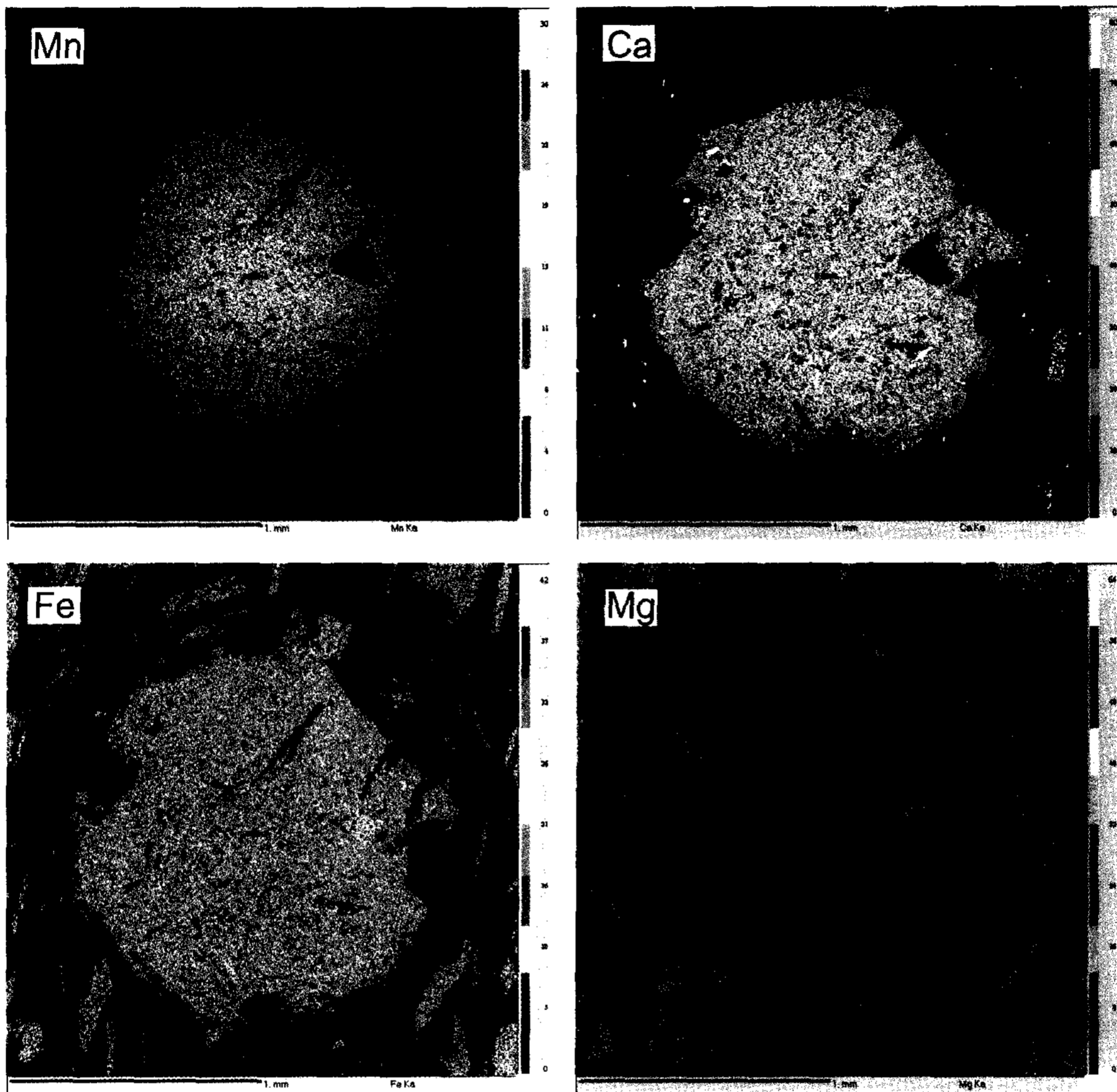


Fig. 4. X-ray composition maps of Mn, Ca, Fe and Mg of the garnet porphyroblast (JB-10 (1)).

($X_{Mg} = 0.243 \sim 0.285$)이 보다 높은 Fe 함량을 보이며 Ti 성분도 약간 높다. 모암의 조성은 유사하므로 이러한 차이는 변성도의 차이에 의한 것으로 보인다. 백운모도 시료별로 분석된 입자들의 평균값을 취하였는데 약간의 Fe와 Mg 함량을 갖는 보통의 백운모 조성을 보인다.

사장석은 크기도 매우 작고 일부 암석에서 소량으로 산출되는데 대천지역의 한 천매암에서 3개의 입자를 분석하였다. 입자 크기가 작아 한 입자에서 한 점씩만 분석할 수 있었는데 그 분석된 조성은 An 함량이 26에서 35까지로 올리고클레이스 내지 안데신에 해당된다. 분석 점에 따른 조성의 차이는 사장석이 약간의 누대구조를 이루고 있기 때문으로 판단된다. 변성도가 증가할 때 석류석의 생성반응이 진행됨에 따라 사장석의

An 함량이 점진적으로 감소되는 경향을 따랐을 것이다. 석류석의 산출과 사장석의 조성은 이 지역 변성작용이 각섬암상(amphibolite facies)에 도달하였음을 지시한다.

변성조건

이 지역 변성암류에서 산출되는 변성광물군은 변성작용동안 거의 완전히 재결정작용을 거친 천매암질암에서 얻을 수 있다. 대표적인 변성광물군은 석영+백운모+흑운모(+사장석+녹니석)이고 대천지역의 경우 석영+백운모+흑운모+석류석(+사장석+녹니석)도 부분적으로 산출된다. 이러한 광물군은 전형적인 바로비안형의 흑운모대와 석류석대에 해당되며, 각섬암상의 변성상에 속한다.

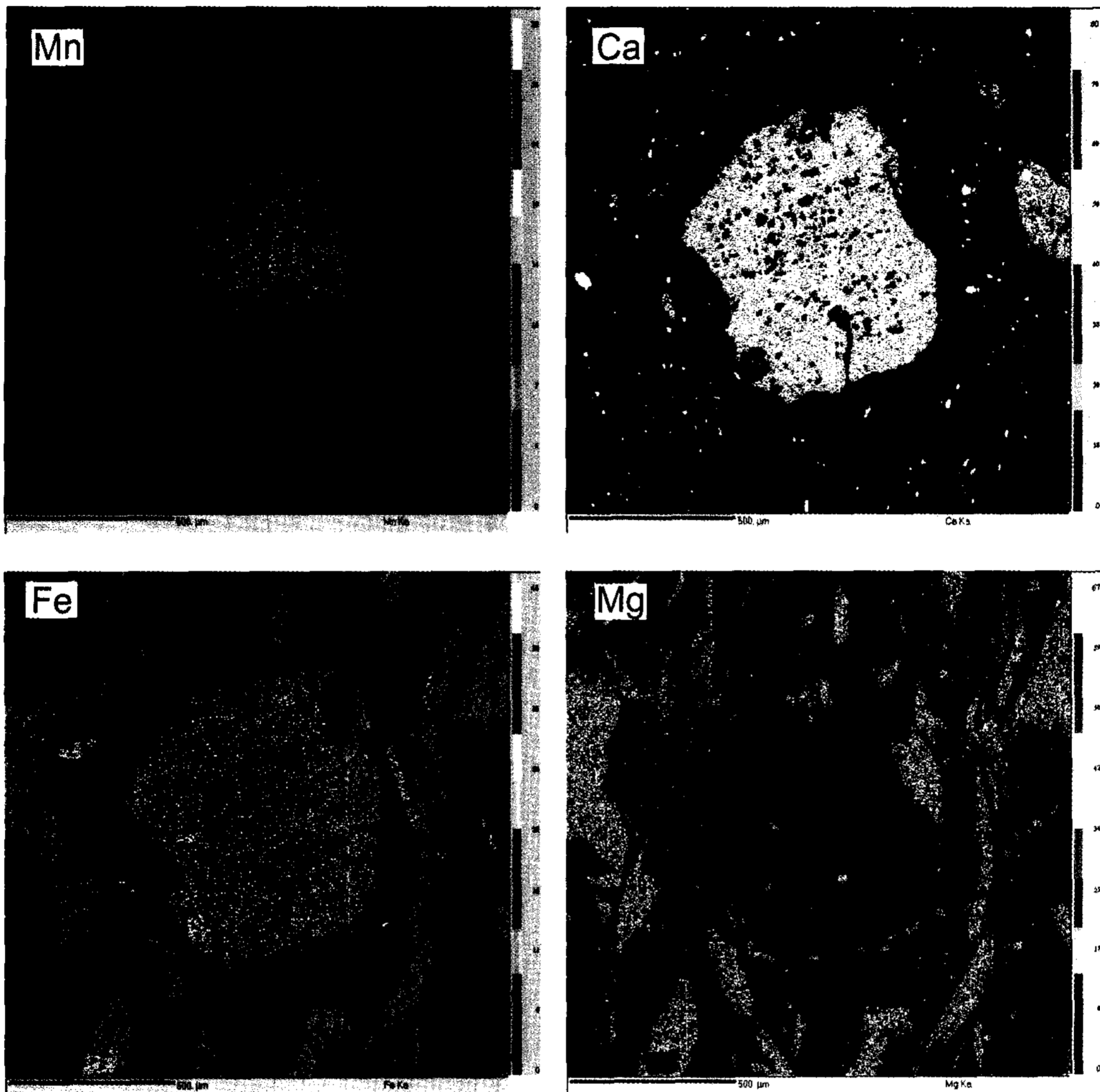


Fig. 5. X-ray composition maps of Mn, Ca, Fe and Mg of the garnet porphyroblast (JB-10 (2)).

이 지역에서 가장 변성도가 높은 석류석을 포함하는 광물군에 대해 GeoThermoBarometry 프로그램(Spear and Kohn, 1999)와 Holdaway(2000)의 흑운모-석류석(GB) 지온계를 이용한 석영-흑운모-사장석-석류석(GBPQ) 지온계(Wu *et al.*, 2004)를 적용하여 구한 변성온도-압력조건들은 Fig. 7 및 Table 3과 같다. 지질온도압력계에 사용된 흑운모의 조성은 석류석 주위에 있는 흑운모 입자들의 분석치의 평균을 구하였고, 점진누대구조를 잘 보이는 석류석은 정점의 온도를 구하기 위해 가장 바깥쪽 조성을 사용하였다. 사장석은 석류석과 바로 공생하는 부분에서는 성분분석을 하지 못하여 석류석이 잘 산출되지 않는 부분에서 측정된 값을 적용하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 사장석의 성분은 분석점에 따라 차이가 있어 An 함량이 가장 낮은 것과 가

장 높은 것을 각각 적용하여 측정치를 비교하였다. 지온지온계에 의해 구해진 변성조건은 GeoThermoBarometry 프로그램을 이용해 구한 평균값이 570~595°C, 6.9~8.2 kb이고, GB-GBPQ의 경우 560~580°C, 7.0~8.2 kb로 거의 동일한 계산결과를 얻었다.

측정된 변성온도-압력 조건을 온도-압력도에 도시하고, 변성니질암에서의 흑운모와 석류석 등변성도선의 조건을 한정하는 몇 가지 주요 변성반응곡선들을 함께 도시하여 비교해 본 결과 지온지온계에 의해 구해진 온도-압력조건은 낮은 스페사틴 함량($X_{Mn}^{Grt} = 0.1$ 이하)을 갖는 석류석대의 조건(Spear, 1993)과 잘 부합되고 있다(Fig. 8). 분석된 두 석류석 중 Mn 함량이 더 낮고 Fe와 Mg 함량이 높은 JB-10 (1)의 반상변정의 맨 바깥쪽 주변부와 An 함량이 낮은 사장석의 조성이 보다

Table 1. Compositions of garnets from metasediments of Nampo Group.

Specimen	JB-10a					JB-10b							
	rim	center				rim	rim	center				rim	
Point No.	1-16	1-17	1-18	1-19	1-20	1-21	2-2	2-1	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7
SiO ₂	36.88	36.78	36.51	36.70	37.00	36.71	36.45	36.74	36.50	40.55	36.64	37.12	36.61
TiO ₂	0.03	0.06	0.09	0.08	0.06	0.07	0.09	0.04	0.22	0.03	0.10	0.05	0.06
Al ₂ O ₃	20.75	20.59	20.26	20.69	20.72	20.78	20.77	20.69	20.71	19.24	20.73	20.65	21.07
FeO*	34.99	33.41	30.97	31.66	32.80	34.92	34.72	32.39	32.72	30.64	33.04	34.17	35.28
MnO	0.72	2.36	4.63	4.24	2.47	0.98	0.62	2.36	2.84	2.89	2.12	1.49	0.42
MgO	1.26	1.02	0.81	0.75	0.96	1.14	1.31	1.04	0.97	0.85	1.11	1.11	1.39
CaO	5.41	5.65	6.42	6.16	6.13	5.42	5.39	5.99	5.69	5.68	5.74	5.56	5.25
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.03	0.00	0.03	0.05	0.00	0.02	0.04
Total	100.05	99.87	99.69	100.31	100.17	100.06	99.38	99.24	99.69	99.94	99.47	100.18	100.12
Numbers of cations on the basis of 24 oxygens													
Si	5.979	5.982	5.965	5.954	5.989	5.958	5.948	5.991	5.947	6.460	5.969	6.008	5.931
Ti	0.003	0.007	0.011	0.009	0.007	0.009	0.011	0.005	0.028	0.003	0.012	0.006	0.008
Al	3.964	3.947	3.901	3.957	3.953	3.975	3.995	3.976	3.976	3.613	3.982	3.938	4.022
Fe	4.744	4.544	4.232	4.296	4.440	4.741	4.738	4.417	4.459	4.083	4.502	4.625	4.780
Mn	0.099	0.326	0.640	0.583	0.339	0.135	0.085	0.326	0.392	0.389	0.292	0.204	0.058
Mg	0.304	0.247	0.198	0.182	0.231	0.276	0.318	0.253	0.237	0.203	0.269	0.269	0.336
Ca	0.940	0.984	1.124	1.071	1.063	0.943	0.942	1.047	0.993	0.969	1.001	0.964	0.910
Cr	0.001	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004	0.004	0.000	0.004	0.006	0.000	0.002	0.005
Total	16.034	16.037	16.071	16.055	16.025	16.041	16.041	16.015	16.036	15.726	16.027	16.016	16.050
Xalm	0.779	0.745	0.683	0.701	0.731	0.778	0.779	0.731	0.733	0.723	0.742	0.763	0.786
Xprp	0.050	0.040	0.032	0.030	0.038	0.045	0.052	0.042	0.039	0.036	0.044	0.044	0.055
Xgrs	0.154	0.161	0.181	0.175	0.175	0.155	0.155	0.173	0.163	0.172	0.165	0.159	0.150
Xsps	0.016	0.053	0.103	0.095	0.056	0.022	0.014	0.054	0.064	0.069	0.048	0.034	0.010
Xfe	0.940	0.948	0.955	0.959	0.951	0.945	0.937	0.946	0.950	0.953	0.944	0.945	0.934

*total Fe as FeO .

*Xalm=Fe/(Fe+Mg+Ca+Mn), Xprp=Mg/(Fe+Mg+Ca+Mn), Xgrs=Ca/(Fe+Mg+Ca+Mn), Xsps=(Mn/(Fe+Mg+Ca+Mn), Xfe=Fe/(Fe+Mg)

정점변성의 조건에서 얻어진 것으로 보면 이 지역에서
의 최고 변성작용의 조건은 약 600°C, 8.2 kb로, 남포
층군의 변성퇴적암층이 약 30 km 깊이까지 매몰되었
음을 지시한다.

변성연대

변성연대

변성퇴적암층 중의 흑운모를 분리하여 K-Ar 연대를
측정하였다. 연대측정에 이용된 흑운모들은 대천해수
욕장 지역 노두에서 1개, 내도둔 지역에서 2개의 천매
암 시료를 채취하여 분리하였다. 흑운모들은 편광현미
경에서 적갈색 내지 녹색을 띠며 입자 크기는
0.5~1 mm 정도이다. Table 4는 연대측정 결과이다. 내
도둔 지역의 시료는 143.2±3.6 Ma와 122.6±2.4 Ma이

고, 대천 지역의 한개 시료는 124.8±2.4 Ma이다. 대천
과 내도둔 두 지역에서 측정된 K-Ar 흑운모 연대 중
120 Ma 부근의 연대를 보이는 두 시료는 후기의 열적
교란을 받은 것으로 생각된다. 주승환(1983)의 인접 경
기육괴 변성암에 대한 일부 흑운모 Rb-Sr 연대측정에
서도 이 연구에서 측정된 143 Ma와 거의 유사한 연대
가 보고된 바 있다.

측정된 흑운모의 K-Ar 연대인 143 Ma는 정점변성작
용의 연대라기보다는 용기되어 흑운모의 폐쇄온도인
280°C(Harrison *et al.*, 1985)까지 냉각되었을 때의 시기를
나타낸다. 광역변성대가 정점 변성작용 후에 냉각되는
속도에 대한 연구는 변성대의 시기나 지역에 따라 냉각
속도가 다를 수 있어 이 지역과 같은 변성대에서
정점변성온도인 600°C 정도에서 280°C까지 320°C 정도
냉각되는데 얼마나 걸렸는지 알기는 쉽지가 않다.

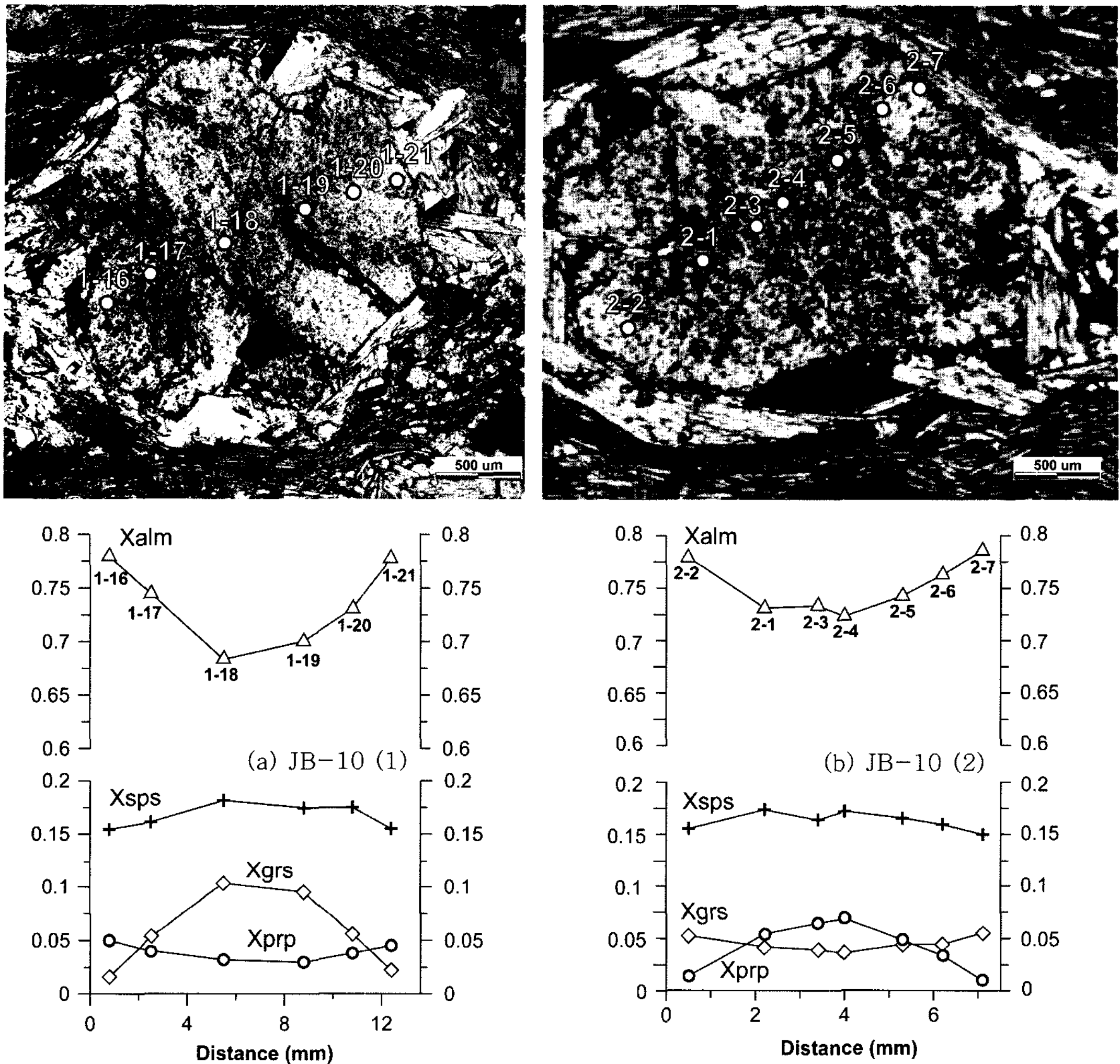


Fig. 6. Zoning profiles of garnet porphyroblasts. (a) JB-10 (1), (b) JB-10 (2).

미국의 Grenville (Mezger *et al.*, 1989; Cosca *et al.*, 1991) 같은 선캠브리아 조산대의 경우는 냉각속도가 매우 느려 2~4°C/Ma 정도에 불과하나 캐나다의 제3기 변성암복합체인 Valhalla 복합체 (Parrish *et al.*, 1988; Spear and Parrish, 1996; Spear, 2004)의 경우는 후자의 경우 정점변성 부근의 초기에는 아주 짧은 기간 동안 200°C/Ma 이상의 매우 빠른 냉각을 거친 후 20~30°C/Ma의 상당히 빠른 속도로 10~20 Ma 동안 냉각된 것으로 보고되었다. 초기의 급냉각은 차가운 기저압 위로 트러스트한 결과이며, 후기의 느려진 냉각 속도는 저각의 정단층에 의한 확장과 삭박작용에 의한 것으로 해석되었다. 후기 백악기에 800°C의 고도 변성을 받은 Grand Forks 복합체의 경우 정점변성부근의

초기에는 11°C/Ma의 속도로 느리게 냉각되다 각섬석의 K-Ar 폐쇄온도인 530°C부터 흑운모 폐쇄온도까지는 25°C/Ma로 냉각속도가 증가하였다 (Laberge and Pattison, 2007). 반면, 캐나다의 Newfoundland 지역의 경우는 석류석이 성장한 550°C 정도의 정점에서 흑운모의 Ar 폐쇄온도까지 냉각되는데 60~70 Ma 정도 걸렸다 (Vance and O'Nions, 1990).

이 지역 남포층군들이 여러 조의 북북동-남남서 방향의 단층과 트러스트에 의해 변위된 특징으로 볼 때 연구지역은 Valhalla 복합체나 Grand Forks 복합체와 같이 구조운동에 의한 용기와 삭박작용을 받았을 가능성이 높다. 연구지역의 경우 정점변성 후의 냉각과정을 알 수 있는 연대자료는 없지만 단층운동에 의한 용

Table 2. Compositions of biotites, muscovites and plagioclases from metasediments of Nampo Group.

Mineral	Biotite					Muscovite					Plagioclase		
Sample													
No.	JB-10a	JB-10b	JB-10-□	JB-13-□	JB-13	JB-10a	JB-10b	JB-10-□	JB-13-□	JB-13	JB-10-□	JB-10-□	JB-10-□
Point													
No.	1-29	2-10	3-35	b-53	a-47	1-28	2-11	3-37	b-61	a-44	38	39	40
SiO ₂	34.29	34.32	34.66	33.68	34.07	48.41	47.8	48.22	46.28	46.31	61.04	58.58	58.9
TiO ₂	1.77	1.9	2.13	2.85	2.54	0.46	0.6	0.77	0.98	0.67	0.02	0	0.04
Al ₂ O ₃	18.91	18.68	18.32	17.14	17.2	37.32	37.69	36.71	35.85	34.56	24.54	25.88	25.79
FeO	24.49	23.75	23.04	26.17	24.42	1.67	1.49	1.69	2.17	1.79	0.07	0.15	0.08
MnO	0.02	0.08	0.19	0.11	0.1	0	0.04	0.01	0	0			
MgO	6.39	6.34	7.14	4.9	5.5	0.74	0.58	0.79	0.6	0.71	0.01	0.02	0.01
CaO	0	0.08	0	0.09	0.01	0	0	0	0.01	0	5.5	7.55	7.14
Na ₂ O	0.15	0.18	0.21	0.11	0.06	0.61	0.65	0.45	0.37	0.4	8.5	7.56	7.69
K ₂ O	8.53	8.38	8.76	8.34	8.53	9.76	9.56	9.8	10.24	9.62	0.11	0.1	0.09
	94.55	93.71	94.45	93.39	92.43	98.97	98.41	98.44	96.5	94.06	99.79	99.84	99.75
Total	98.4	97.53	98.32	97.13	96.18	103.7	103.11	103.14	101.07	98.52			
						22 O					36 O		
Si	5.401	5.444	5.451	5.436	5.513	6.19	6.122	6.194	6.096	6.22	2.716	2.625	2.637
AlIV	2.599	2.556	2.549	2.564	2.487	1.81	1.878	1.806	1.904	1.78	1.287	1.367	1.36
AlVI	0.912	0.936	0.846	0.696	0.793	3.814	3.81	3.752	3.661	3.69	4.003	3.992	3.997
Ti	0.21	0.226	0.251	0.345	0.309	0.044	0.058	0.074	0.097	0.067	0.001	0	0.001
Fe	3.226	3.151	3.031	3.533	3.305	0.178	0.159	0.182	0.239	0.201	0.003	0.006	0.003
Mn	0.002	0.011	0.026	0.016	0.014	0	0.004	0.001	0	0			
Mg	1.501	1.5	1.673	1.179	1.326	0.14	0.111	0.151	0.119	0.143	0.001	0.001	0.001
Ca	0	0.013	0	0.015	0.002	0	0	0	0.002	0	0.262	0.362	0.343
Na	0.046	0.054	0.064	0.034	0.018	0.15	0.161	0.112	0.095	0.105	0.733	0.657	0.667
K	1.714	1.695	1.757	1.717	1.761	1.592	1.562	1.606	1.721	1.648	0.006	0.006	0.005
F	0.193	0.257	0.277	0.14	0.2	0.188	0.057	0.135	0	0			
Total	15.804	15.843	15.925	15.675	15.728	14.106	13.922	14.013	13.934	13.854	1.002	1.026	1.016
Xmg	0.318	0.323	0.356	0.250	0.286	0.440	0.411	0.453	0.332	0.416			
X(Ti)	0.036	0.039	0.043	0.060	0.054	0.011	0.014	0.018	0.024	0.016			
XAl(VI)	0.156	0.161	0.145	0.121	0.138	0.913	0.920	0.902	0.889	0.900			
XAn*											0.262	0.353	0.338
XAb*											0.732	0.641	0.657
XOr*											0.006	0.006	0.005

기와 삭박에 의해 흑운모의 폐쇄온도까지 냉각되는데 10 Ma 정도 걸렸고, 변성작용의 정점부근에서 석류석이 성장하는데 5~10 Ma 정도의 시간이 걸리는 점 (Spear, 1993, p. 727-728)을 고려하면 매몰 후 석류석의 생성온도에 도달하여 정점변성이 시작된 시기는 대략 155 Ma 부근일 것으로 추정된다.

온도-압력-시간 경로

충상단층모델의 경우 트러스트에 의한 지각두께증가

가 시작된 후 침식이 시작될 때까지 대략 20 Ma 정도의 시간간격이 존재하므로(Spear, 1993, p. 6) 연구지역에서의 구조운동의 시작은 대략 흑운모의 K-Ar 연대보다 35~40 Ma 이전인 175~180 Ma 부근이 될 것이다. 저콘의 SHRIMP U-Pb 연대측정에 의해 결정된 남포층군의 퇴적시기(약 190~170 Ma)와 비교하면 구조운동으로 트러스트들이 겹치면서 지각두께가 증가되기 시작한 시기는 175 Ma 정도로, 대동누층군은 퇴적 후 바로 구조운동에 의한 매몰과 변성작용을 받았으며, 단층운동과 같은 구조적 용기과정에 의해 상당히 빠른

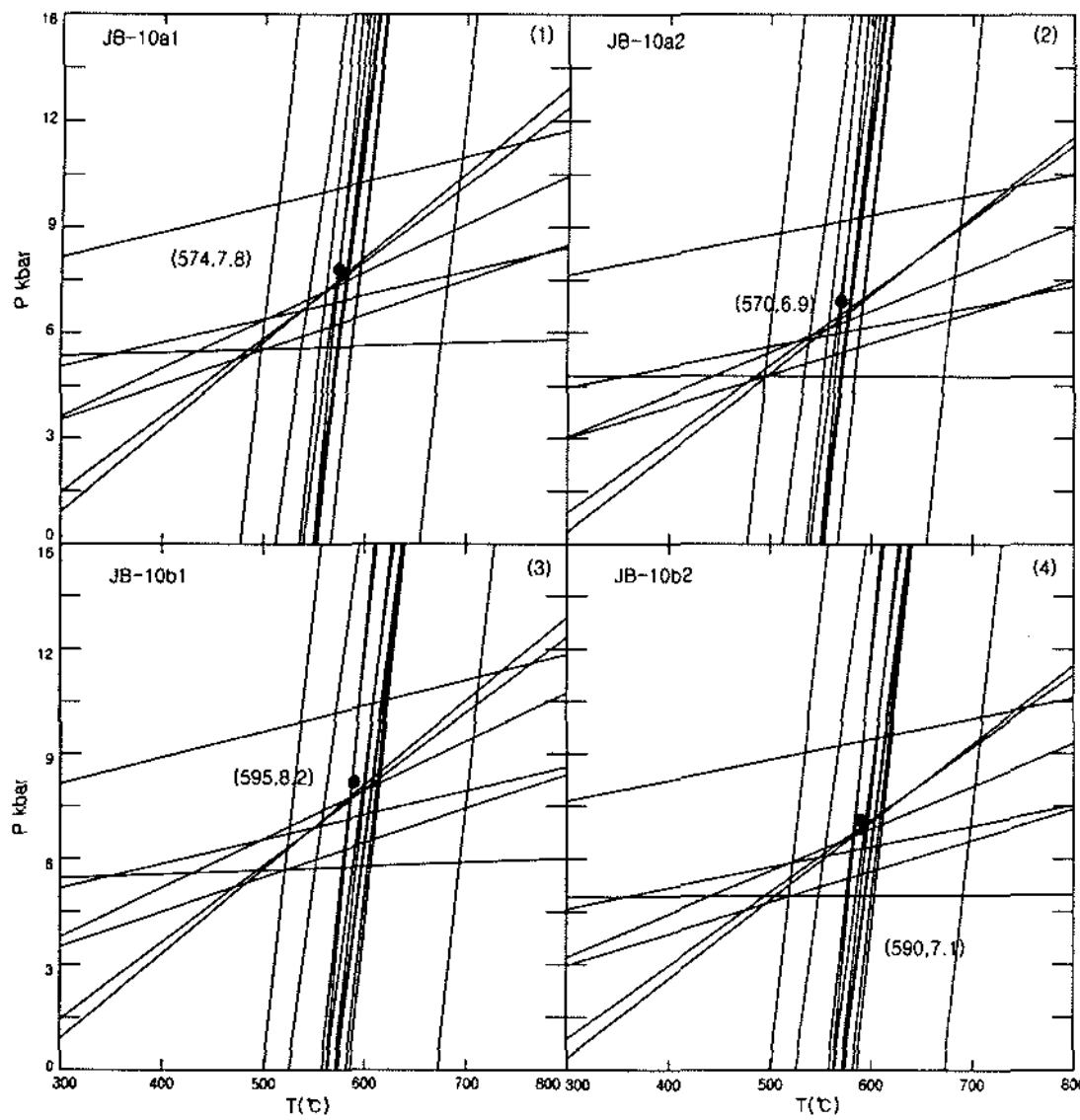


Fig. 7. Results of geothermobarometric calculations for the assemblage of garnet-muscovite-biotite-plagioclase-quartz from metasedimentary rocks of the Nampo Group using GeoThermoBarometry program (Spear and Kohn, 1999). Grt-Bt thermometer calibrations: 1 = Ferry and Spear (1978), 2 = Hodges and Spear (1982), 3 = Ganguly and Saxena (1984; symmetric Garnet solution model), 4 = Ganguly and Saxena (1984; asymmetric Garnet solution model), 5 = Perchuk and Lavrent'eva (1983), 6 = Indares and Martignole (1985), 7 = Ferry and Spear with Berman (1990) garnet solution model, 8 = Patino Douce *et al.* (1993), 9 = Holdaway *et al.* (1997), 10 = Gessmann *et al.* (1997), 11 = Kleemann and Reinhardt (1994). Grt-Pl-Mus-Bt barometer calibrations: a = Ghent and Stout (1981; Fe end member), b = Ghent and Stout (1981; Mg end member), c = Hodges and Crowley (1985), d = Powell and Holland (1988) with Hodges and Spear (1982) garnet activity model, e = Powell and Holland (1988) with Ganguly and Saxena (1984) garnet activity model, f = Hoisch (1990; Fe end member), g = Hoisch (1990; Mg end member).

용기 및 삭박과정을 거친 것으로 해석된다. 한반도에서 일어난 이 시기의 구조운동은 대보조산운동으로 불리는데, 대보조산운동이 이 지역에서는 대동누층군 퇴적 직후에 바로 시작되었음을 지시하고 있다. Fig. 9는 앞에서 구한 변성온도-압력 조건, 연대측정 결과 및 추정된 구조운동의 시기 등을 종합하여 연구지역 남포층군 변성암류가 겪어온 P-T-t 역사를 재구성해 본 것이다. 남포층군의 퇴적 직후인 175 Ma 부근에 대보조산운동에 의한 여러 조의 트리스트단층이 겹치면서 지각 두께가 증가되어 연구지역 변성퇴적암류는 적어도 30 km(약 9 kb)까지 매몰되었다. 남포층군의 현재 층후는

Table 3. Pressure-Temperature conditions of peak metamorphism of metasediments from Nampo Group.

Sample No.	GeoThermoBarometry		GB-GBPQ thermobarometer ^c	
	T°C ^a	P Kb ^b	T°C	P Kb
JB-10a1	574	7.8	564	8.1
JB-10a2	570	6.8	562	7
JB-10b1	595	8.2	578	8.2
JB-10b2	590	7.1	575	7.1

a: Average temperatures of 11 geothermometric calculations from Spear, F.S. & Kohn, M (1999)'s GeoThermoBarometry program v. 2.1.

b: Average pressures of 7 geobarometric calculations from Spear, F.S. & Kohn, M (1999)'s GeoThermoBarometry program v. 2.1.

c: GB-GBPQ thermobarometer by Wu *et al.* (2004).

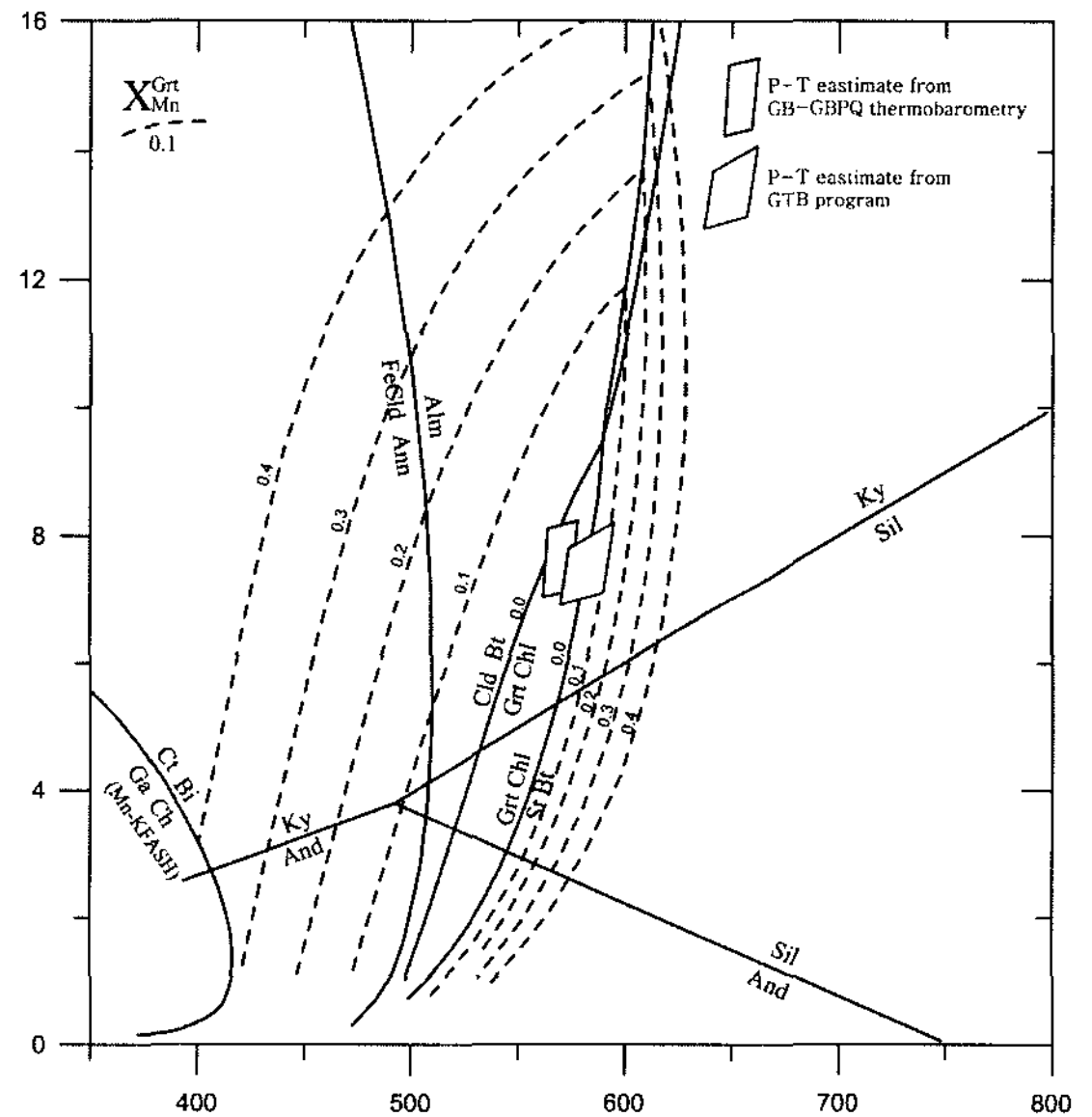


Fig. 8. P-T diagram illustrating simplified KFMASH petrogenic grid with XMnGrt isopleths (modified after Figure 10-9 in Spear, 1993) and P-T estimates for metamorphism of the Nampo Group metasedimentary rocks.

가장 두꺼운 오서산 지역에서 약 4,650 m(에가와 코스케와 이용일, 2006)이다. 퇴적 당시의 전체 층후를 알 수는 없지만 5 km는 되었을 것으로 가정하면 보통의 지열구배 조건에서 100~150°C 정도였을 것이다. 대부분의 남포층군 지역에서 뚜렷하게 광역변성을 받은 특징이 잘 나타나지 않는 것은 초기 조건이 이와 크게 다르지 않음을 지시한다. 매몰 후 약 9 kb의 조건에서 열적이완에 의한 지열구배의 증가로 침식이 시작되는

Table 4. K-Ar ages of biotites from metasediments of Nampo Group.

Sample No.	K (wt%)	Sample weight (g)	40 radiogenic 10^{-8} ccSTP/g	delta 40 radiogenic 10^{-8} ccSTP/g	$^{36}\text{Ar } 10^{-10}$ ccSTP/g	T (Ma)
JB10	5.941	0.00459	2979.37	2.45	56.51	124.77±2.41
JB-13a	6.236	0.00461	3606.96	29.63	46.92	143.17±2.98
JB-13b	7.075	0.00431	3484.42	2.84	107.17	122.61±2.37

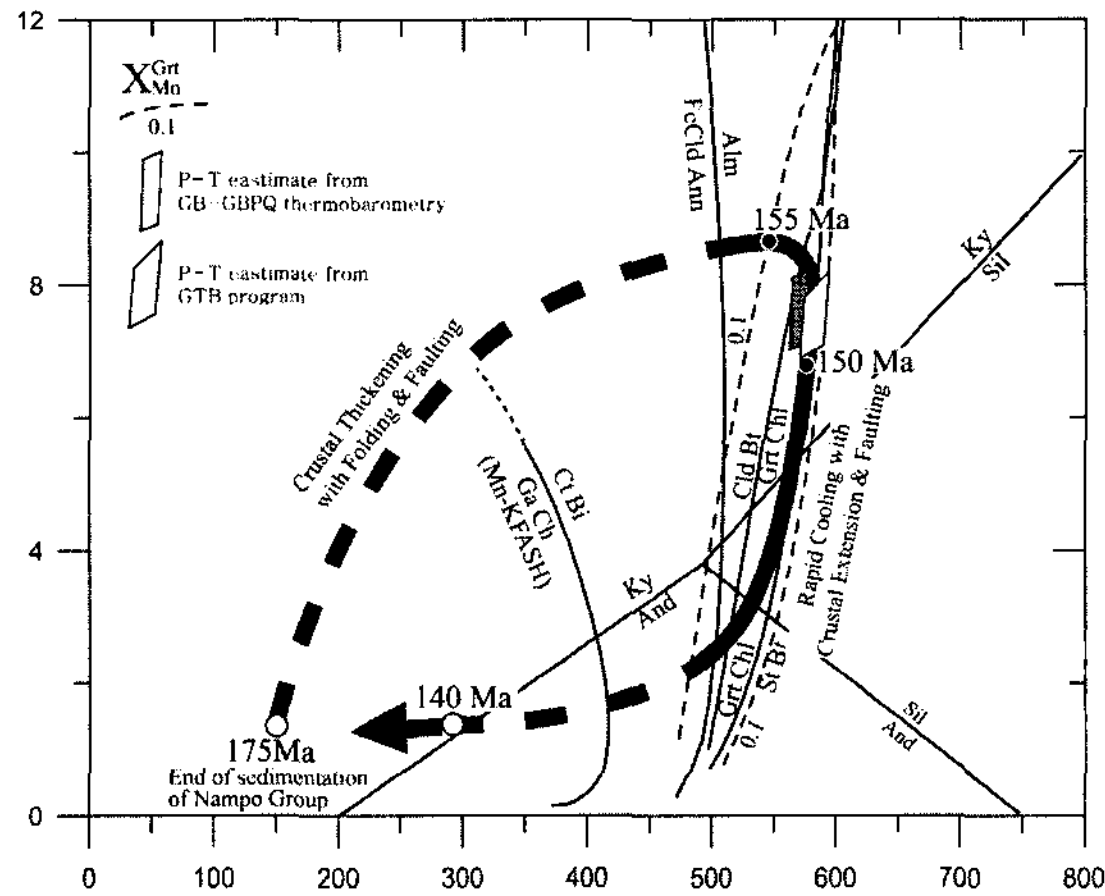


Fig. 9. P-T-t paths for metasedimentary rocks of the Nampo group. Dashed and solid arrows represent hypothetical prograde and proposed retrograde P-T paths.

155 Ma까지 약 20 Ma 동안 가열과정을 겪었다. 이후 약 5 Ma 내외의 기간에 정점변성온도를 거치면서 석류석 반상변정이 성장하였고, 약 150 Ma에 단층운동에 의한 빠른 융기와 삭박이 시작되어 140 Ma에는 흑운모의 폐쇄온도인 280°C까지 냉각되었을 것이다. 이러한 지구조운동의 역사는 이 지역이 상당히 짧은 기간에 습곡과 트러스트운동에 의한 매몰과 변성작용을 겪은 후 빠르게 융기 및 삭박되었음을 지시하고 있다.

결 론

충남 대천해수욕장 남쪽 끝부분과 서천군 마량리 일대에 변성역암, 변성사암, 천매암 등이 호층을 이룬 변성퇴적암층이 노출되어 있다. 구성암종과 그 특징으로 볼 때 남포층군 중의 조계리층에 대비된다. 대표적인 변성광물군은 흑운모-백운모-석영(±사장석±녹니석)과 흑운모-백운모-석류석-석영(±사장석±녹니석)으로 중압 변성의 각섬암상 중 석류석대에 속한다. 여러 가지 지질온도압력계를 이용하여 구한 정점변성의 온도-압력 조건은 560~595°C에 6.9~8.2 kb이다. 천매암에서 분리된 흑운모의 K-Ar 연대는 143.2±3.6 Ma, 122.6±2.4

Ma and 124.8±2.4 Ma인데 뒤의 두 연대는 후기에 열적교란을 받은 것으로 판단된다. 기 발표된 연대측정에 의하면 대동누층군의 생성시기는 187~175 Ma로 이 연구의 결과들과 조합하여 대보조산운동기에 일어난 이 지역에서의 변성지구조적 진화과정을 유추하였다. 남포층군 퇴적 직후인 175 Ma 부근에 중첩된 트러스트운동으로 지각의 두께증가가 시작되었고, 정점변성작용을 거친 후 지각확장에 따른 정단층운동으로 흑운모의 폐쇄온도까지 빠르게 삭박되면서 냉각되는 과정을 겪었다. 이러한 변성지구조적 진화모델은 현재로서는 자료가 빈약하여 매우 추상적이지만, 저콘, 모나자이트 및 백운모 등 폐쇄온도가 다른 변성광물들에 대한 연대자료와 지질구조에 대한 보다 정밀한 추가정보가 얻어진다면 대보조산운동기의 이 지역에서의 지구조적 역사를 보다 정확히 규명할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 한국과학재단의 특정기초과제(R01-2004-000-10825-0)에 의해 지원되었으며 이에 감사드린다. 투고논문의 문제점들을 지적하고 유익한 조언을 해주신 조선대학교 안전상 교수님과 경북대학교의 김형수 교수님, 두 분의 심사자께 깊은 감사를 드린다. 논문의 작성과정에 많은 도움을 준 부경대학교 암석지구조환경연구실 대학원생 및 학부생들에게도 감사를 표한다. 특히, 그림과 도표작성 등에 헌신적으로 노력해 준 김남훈 석사에게 특별히 감사를 표한다.

참고문헌

김동숙, 1981, 충남탄전 충주부근의 지질. 지질학회지, 17, 161-164.
 김봉균, 손석진, 1963, 한국지질도 (1/50,000) 서천도폭 및 설명서. 한국지질조사소, 11 p.
 김정민, 2001, 한국기초과학지원연구원에 도입된 K-Ar 연대 측정 시스템: 개요 및 성능. 암석학회지, 10, 172-178.
 민경덕, 엄정기, 김동욱, 최용훈, 이윤수, 1992, 충남탄전에 분포하는 대동누층군에 대한 고지자기학적 연구. 광산지

- 질, 25, 87-96.
- 서해길, 김동숙, 박석환, 임순복, 조민조, 배두중, 이창범, 이돈영, 유형수, 박정서, 장운환, 1980, 충남탄전(1), 성주지역 석탄자원조사보고서, 2, 한국동력자원개발연구소, 42 p.
- 에가와 코우스케와 이용일, 2006, 오천 지역과 오서산 지역의 남포층군 층서: 부정합에 대한 조계리층 역암의 중요성. 지질학회지, 42, 635-643.
- 이병주, 김동학, 최현일, 기원서, 박기화, 1996, 1/250,000 대전 지질 도폭 설명서. 과학기술처, 59 p.
- 전희영 김동학, 엄상호, 봉필윤, 이호영, 최성자, 김복철, 권영인, 이동영, 박영수, 최영섭, 1990, 한반도 진화생물에 의한 퇴적분지 연구(II). 과학기술처, 288 p.
- 주승환, 1983, Rb-Sr법에 의한 한반도 경기육괴의 연대측정에 관한 연구. 한양대학교 박사학위논문, 139 p.
- 최현일, 김동숙, 서해길, 1987, 충남탄전 대동지층의 층서, 최적환경 및 분지발달. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-87-(B)-3, 97 p.
- Berman, R.G., 1990, Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. *Am. Mineral.*, 75, 328-344.
- Cluzel, D. 1992, Formation and tectonic evolution of early Mesozoic intramontane basins in the Ogcheon belt (South Korea): a reappraisal of the Jurassic "Daebo orogeny." *J. Southeast Asian Earth Sci.*, 7, 223-235.
- Cosca M.A., Sutter, J.F. and Essene, E.J., 1991, Cooling and inferred uplift/erosion history of the Grenville Orogen, Ontario: Constraints from Ar/Ar thermochronology. *Tectonics*, 10, 957-977.
- Ferry, J.M. and Spear, F.S., 1978, Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 66, 88-97.
- Ganguly, J. and Saxena, S. K., 1984, Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and applications to geothermobarometry. *Am. Mineral.*, 69, 88-97.
- Gessmann, C.K., Spiering, B. and Raith, M., 1997, Experimental study of the Fe-Mg exchange between garnet and biotite: Constraints on the mixing behavior and analysis of the cation-exchange mechanisms. *Am. Mineral.*, 82, 1225-1240.
- Ghent, E. D. and Stout, M. Z., 1981, Geobarometry and geothermometry of plagioclase-biotite-garnet-muscovite assemblages. *Contrib. to Mineral. Petrol.*, 76, 92-97.
- Han, R., Ree, J-H., Cho, D.R., Kwon, S-T. and Armstrong, R., 2006, SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and their implication for the Mesozoic tectonics. *Gondwana Research*, 9, 106-117.
- Harrison, T. M., Duncan, I. and McDougall, I., 1985, Diffusion of ^{40}Ar in biotite: temperature, pressure and compositional effects. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 50, 247-253.
- Hodges, K. V. and Spear, F. S., 1982, Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *Am. Mineral.*, 67, 1118-1134.
- Hodges K.V. and Crowley P.D., 1985, Error estimation in empirical geothermometry and geobarometry for pelitic systems. *Am. Min.*, 70, 702-709.
- Hoisch T.D., 1990, Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + plagioclase + garnet. *Contrib. to Mineral. Petrol.*, 104, 225-234.
- Hoisch T.D., 1991, Equilibria within the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + garnet + plagioclase, and implications for the mixing properties of octahedrally-coordinated cations in muscovite and biotite. *Contrib. to Mineral. Petrol.*, 108, 43-54.
- Holdaway, M. J., 2000, Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer. *Am. Mineral.*, 85, 881-892.
- Holdaway, M.J., Mukhopadhyay, B., Dyar, M.D., Guidotti, C.V. and Dutrow, B.L., 1997, Garnet-biotite geothermometry revised: New Margules parameters and a natural specimen data set from Maine. *Am. Mineral.*, 82, 582-595.
- Indares, A. and Martignole, J., 1985, Biotite-garnet geothermometry in the granulite facies: the influence of Ti and Al in biotite. *Am. Mineral.*, 70, 272-278.
- Jeon, H., Cho, M. Kim, H, Horie, K. and Hidaka. H., 2007, Early Archean to Middle Jurassic Evolution of the Korean Peninsula and Its Correlation with Chinese Cratons: SHRIMP U-Pb Zircon Age Constraints. *J. Geol.*, 115, 525-539.
- Kleemann U. and Reinhardt J., 1994, Garnet?biotite thermometry revised: the effect of AlVI and Ti in biotite. *European J. Mineral.*, 6, 925-941.
- Laberge, J.D. and Pattison, D.R.M., 2007, Geology of the western margin of the Grand Forks complex, southern British Columbia: high-grade Cretaceous metamorphism followed by early Tertiary extension on the Granby fault. *Can. J. Earth Sci.*, 44, 199-228.
- Lee, S.R., Cho, M., Hwang, J.H., Lee, B.-J., Kim, Y.-B. and Kim, J.C., 2003, Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Precambrian Res.*, 121, 25-34.
- Mezger, K, Hanson, G.N. and Bohlen, S.R., 1989, High precision U-Pb ages of Metamorphic rutile: Application to the cooling history of high-grade terranes. *Earth Planet Sci. Letter*, 96, 106-118.
- Parrish, R.R., Carr S.D., and Parkinson, D.L., 1988, Eocene extensional tectonics and geochronology of the southern Omineca belt, British Columbia and Washington. *Tectonics*, 7, 181-212.
- Patino Douce, A. E., Johnston, A. D. and Rice, J. M., 1993, Octahedral excess mixing properties in biotite: a working model with applications to geobarometry and geother-

- mometry. *Am. Mineral.*, 78, 113-13.
- Perchuk, L.L. and Lavrent'eva, I.V., 1983, Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. in: Saxena, S.K. (ed.): *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions*. *Adv. Phys. Geochem.*, 3, 199-239, Springer, New York.
- Powell, R. and Holland, T. J. B., 1988, An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *J. Meta. Geol.*, 6, 173-204.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, *The geology of Korea*. Geol. Miner. Inst. Korea, Seoul, 139 p.
- Shimamura, S., 1931, *Geological Atlas of Chosen*. Cheongyang, Daecheonri, Buyeo and Nampo Sheets. Geol. Surv. Chosen.
- Spear, F.S., 1993, *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Min. Soc. Am. Monograph Series. Min. Soc. Am. Washington, D.C., 799 p.
- Spear, F. S., 2004, Fast Cooling and Exhumation of the Valhalla Metamorphic Core Complex, Southeastern British Columbia. *International Geol. Review*, 46, 193-209.
- Spear F.S. and Kohn, M.J., 1999, *GTB program manual: Program Thermobarometry*. 42 p.
- Spear, F. S. and Parrish, R., 1996, Petrology and cooling rates of the Valhalla Complex, British Columbia, Canada: *J. Petrol.*, 37, 733-765.
- Vance, D. and O'Nions, R.K., 1990, Isotope geochronology of zoned garnets: growth kinetics and metamorphic histories. *Earth Planet Sci. Letter*, 97, 227-240.
- Wu, C.M., Zhang, J. and Ren, L.D., 2004, Empirical Garnet-Biotite-Plagioclase-Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium- to High-Grade Metapelites. *J. Petrol.*, 45, 1907-1921.

2008년 2월 13일 접수

2008년 2월 14일 심사개시

2008년 3월 3일 채택