

태백산분지 (백운산 향사대) 장성지역에 분포하는 하부페름기 장성층의 고지온

유인창* · 박현미* · 도성재* · 최선규*

Paleotemperature of the Lower Permian Jangseong Formation, Jangseong Area, Taebaegsan Basin (Baegunsan Syncline)

In-Chang Ryu*, Hyun-Mee Park*, Seong-Jae Doh and Seon-Gyu Choi*

ABSTRACT: The Lower Permian Jangseong Formation, Taebaegsan basin (Baegunsan Syncline), represents a coal-bearing siliciclastic succession which was later modified by the Songrim or Dabo orogeny. Sandstone petrography and clay mineralogy were studied to understand the thermal history of the Jangseong Formation during basin evolution. Petrographic study indicates that Jangseong sandstones are composed of quartz, feldspar, lithic fragments (metamorphic and sedimentary), and varying proportions of matrix and cement. The dominance of quartz (<97%) over feldspar (<1%) and lithic fragments (<2%) classifies most Jangseong sandstones as quartz arenites or quartzwackes, but lithic graywackes and sublithic arenites locally occur. The diagenetic features of these sandstones include mechanical compaction, cementation by quartz and clays, dissolution of framework grains and development of secondary porosity, and late-stage clay pore-filling. Clay minerals identified in the Jangseong Formation by X-ray diffraction analysis are illite, kaolinite, and pyrophyllite with a minor amount of chlorite and micas. The illite, kaolinite, and pyrophyllite appear to be largely authigenic based on their well-crystallized forms. These authigenic clay minerals form clay coats/rims and late-stage pore-filling cements. Illite crystallinity shows that the Jangseong Formation has been in late-diagenetic zone to early-epizone, which ranges in temperature from 200°C to 300°C. In addition, kaolinite-pyrophyllite transition suggests that paleotemperature of the formation has reached at least 265°C. Such temperature is likely to be consistent with homogenization temperatures of fluid inclusions in quartz veins in the formation. Thus, the Jangseong Formation has been subjected to paleotemperature of about 265°C. The major heat source responsible for the paleotemperature may be hydrothermal solutions. The passage of hydrothermal solutions was probably assisted by fractures created during the basin-modifying tectonism of the Taebaegsan basin.

서 론

퇴적암 지층에 대한 고지온 (paleotemperature)의 추정에는 퇴적물이 퇴적분지내로 유입된 이후, 지하 심부로 매몰되는 동안 겪는 열적 성숙에 대한 정보를 제공하기 때문에 퇴적암의 매몰속성작용 및 퇴적분지의 발달사를 이해하는데 있어서 필수적 단계이다 (Allen, Allen, 1990). 일반적으로 퇴적암 지층에 대한 고지온의 추정은 퇴적암층 내에 포함되어 있는 코노돈트

(conodont)와 같은 미화석들의 색변화지수 및 유기물 마세랄중 비트리나이트 (vitrinite)의 반사도 또는 점토 광물들의 상전이 및 결정도 등을 이용하여 추정한다. 그러나 미화석들의 색변화지수나 비트리나이트의 반사도를 이용한 고지온의 추정은 이들의 산출이 불량한 퇴적암층에는 적용될 수 없는 한계가 있으며, 특히 고온의 영향을 받은 퇴적층에서의 비트리나이트 반사도는 이방성을 보여주기 때문에 매몰 심도에 따른 고지온의 추정에 있어서 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다. 반면에 점토광물을 이용한 고지온의 추정은 점토광물이 거의 모든 퇴적암 지층에서 산출되므로 퇴적암의 종류에 제한을 받지 않고 적용할 수 있다.

* 고려대학교 지구환경과학과 (Department of Earth & Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea), E-mail: inchang@kucncx.korea.ac.kr

Frey (1970)는 지층의 온도가 증가하면 카올리나이트가 파이로필라이트로 전이됨을 보여주었으며, Weaver (1961)는 쇠설성 퇴적암에서 속성작용과 변성작용의 단계를 일라이트 결정도를 이용하여 처음으로 규명하였다. 이후로 퇴적암에서 산출되는 파이로필라이트의 상전이 온도와 일라이트 결정도는 그 지층의 최고 온도를 기록하는 지질온도계로서 이용되고 있다. 또한 퇴적암내에 포획되어있는 유체포유물들은 유체의 온도, 압력 및 성분 등에 관한 직접적인 정보를 주기 때문에 유체포유물의 균질화 온도를 측정함으로써 점토광물을 이용한 방법과 함께 퇴적암의 고지온을 보다 정량적으로 추정할 수 있게 되었다.

본 연구의 목적은 태백산분지 (백운산 향사대) 장성 지역에 분포하는 함탄쇄설성 퇴적층인 하부페름기 장성층에 대한 퇴적암석학적 연구를 통하여 장성층이 지하 심부로 매몰되는 동안 일어나는 매몰속성작용의 메커니즘을 이해하고, 매몰속성작용동안 자생된 점토광물들을 이용하여 고지온을 추정함으로써 장성층의 지열사를 유추하는데 있다. 이를 위해 장성층 사암의 속성상 및 자생점토광물의 산출상을 기술하고, 점토광물의 결정도 및 상전이 관계, 석영맥내 유체포유물들의 균질화온도 등을 이용하여 장성층의 고지온을 추정하였으며, 이를

토대로 태백산분지 장성지역의 구조변형운동과 관련하여 장성층에 영향을 준 열원의 성인을 고찰하였다.

일반 지질

본 연구의 대상지역은 태백산분지 (백운산 향사대) 남동부에 위치하는 태백시 장성동 및 계산동 일대로, 선캠브리아기 변성암 복합체를 기반암으로 캄브로-오도비스기의 조선누층군, 석탄기에서 트라이아스기에 이르는 평안누층군 및 백악기의 지층들이 연구지역 내에 분포한다 (Fig. 1). 조선누층군을 부정합으로 덮고 있는 평안누층군은 하부로부터 석탄기의 만항층과 금천층, 페름기의 장성층, 함백산층, 고한층, 도사곡층 및 트라이아스 초기의 동고층으로 세분된다 (Fig. 1). 이들 석탄기 및 트라이아스 초기의 지층들은 대체로 북동-남서 방향을 주향으로 북경사하여 연구지역 내에서 대상으로 분포하며 트라이아스기 중기에서 말기에 이르는 송림변동 혹은 유라기 중기의 대보조산운동에 의한 단층과 습곡에 의해 심하게 교란되어 있다 (Fig. 1).

본 연구의 주 대상층인 하부 페름기 장성층은 과거 사동동 상부에 해당하는 함탄쇄설성 퇴적층으로 흑색 조립질 기저사암, 셰일, 탄질셰일 및 석탄층을 기본단위

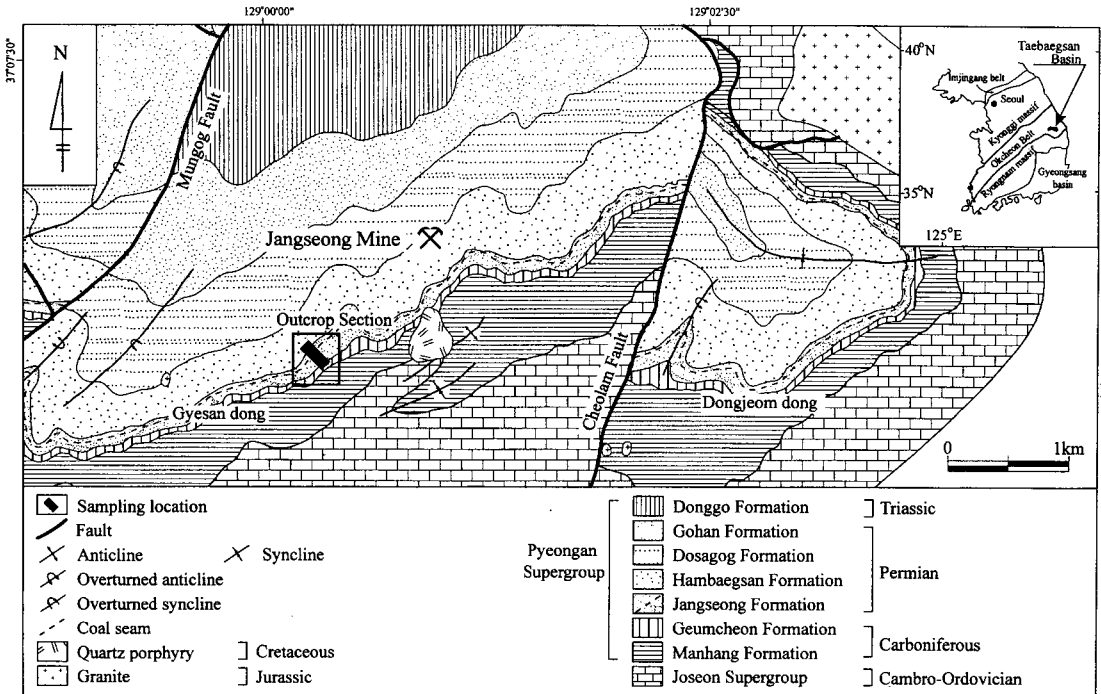


Fig. 1. Geologic map of the study area (modified after Cheong, 1969).

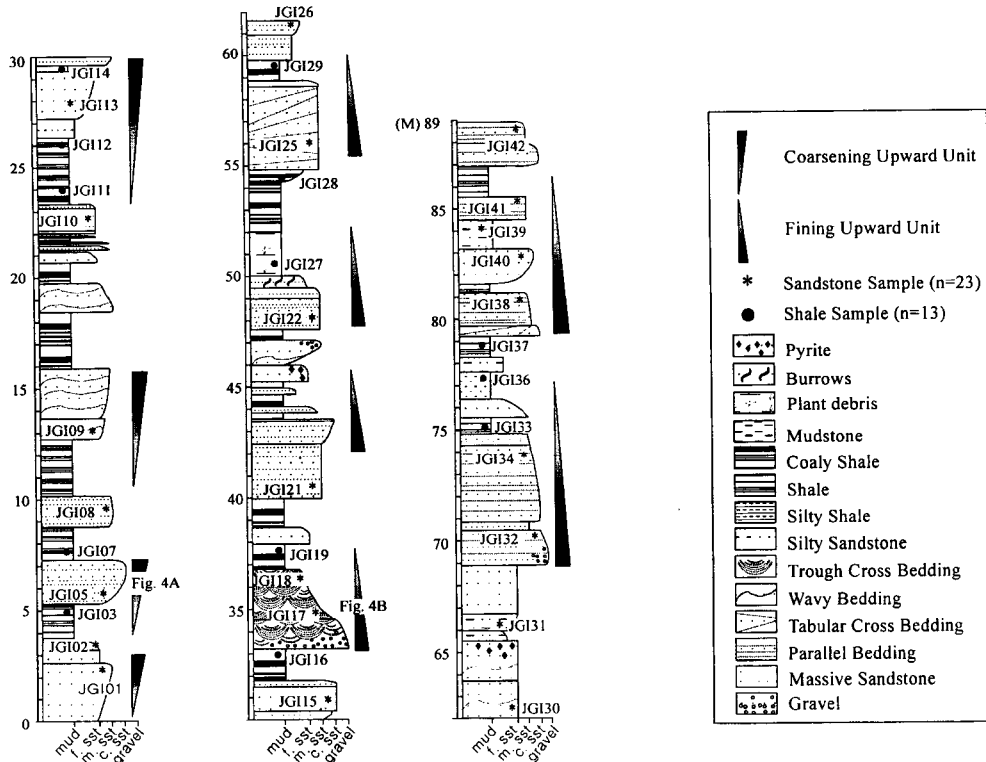


Fig. 2. Measured stratigraphic section at Gyesandong. Note the change in stacking pattern of sedimentary units from coarsening-upward to fining-upward at an interval of 33 m.

로 하는 윤회층들이 수직층서상 네 번 반복되어 나타나는 것으로 해석되어져 왔다 (Cheong, 1969). 본 연구의 주대상 층서단면 (계산동 층서단면)은 장성광업소 후 문쪽 황지천을 따라 노출되어 있는 약 90 m 두께의 장성층 노두로, 하부 금천층과의 경계는 현생 퇴적물에 의해 덮여 있어 노출되어 있지 않으나 상한의 경계는 유백색의 조립질 사암인 함백산층에 의해 피복되어 있다 (Fig. 1). 계산동 단면에서는 사암과 셰일이 빈번히 교호되는 양상 외에는 뚜렷한 윤회층의 관찰이 용이하지 않으며 탄층은 풍화되어 잘 나타나지 않는다. 그러나 계산동 단면에서의 장성층은 하위로부터 33 m 층위의 탄질셰일 위에 극조립질의 사암이 나타나는 층준을 경계로 하부와 상부가 뚜렷하게 나뉘어지는 경향을 보인다 (Fig. 2). 즉, 하부장성층은 셰일로부터 상부로 갈수록 암회색의 중립질 사암으로 전이되는 상향조립화의 단위층들로 구성되어 있으며, 사암은 대부분 괴상이나 평행엽층리, 파동층리, 평행 및 준평행 층리 등이 나타난다 (Fig. 3A). 반면, 33 m 상위의 상부장성층은 조립질 사암을 기저로 하여 상부로 갈수록 셰일 또는 탄질셰일로 전이되는 상향세립화의 단위층들로 구성되어 있

는 특징을 보인다 (Fig. 3B). 상부장성층의 기저사암들은 2~4 cm 크기의 역들을 가지며, 기질의 양에 따라 흑색에서 회색 혹은 유백색의 암색을 띤다. 기저사암 내에는 10~15 cm 정도의 두께를 가지는 판상의 사층리 및 곡사층리 등의 퇴적구조가 잘 발달되어 있으며, 기저사암을 피복하는 흑색 셰일 또는 탄질셰일층 내에는 스티그마리아 (*Stigmaria*) 및 식물화석들이 다수 발견된다.

연구 방법

계산동 층서 단면상에 분포하는 장성층에서 약 3 m 간격으로 사암 23개 및 셰일 13개 등 총 36개의 암석시료를 채취하였다 (Fig. 2). 채취된 암석시료들에 대한 점토광물 분석을 위해 X선 회절분석 (XRD)을 수행하였다. 점토광물의 분리 및 정제를 위해 암석시료를 직경 5 mm 정도로 파쇄시킨 후, 이를 증류수와 함께 절구에 넣고 분쇄하여 현탁액을 만들었다. 현탁액 내의 점토광물이 충분히 분산되도록 1분 정도 초음파 처리를 한 후, 최종적으로 원심분리기를 사용하여 2 μm 이하

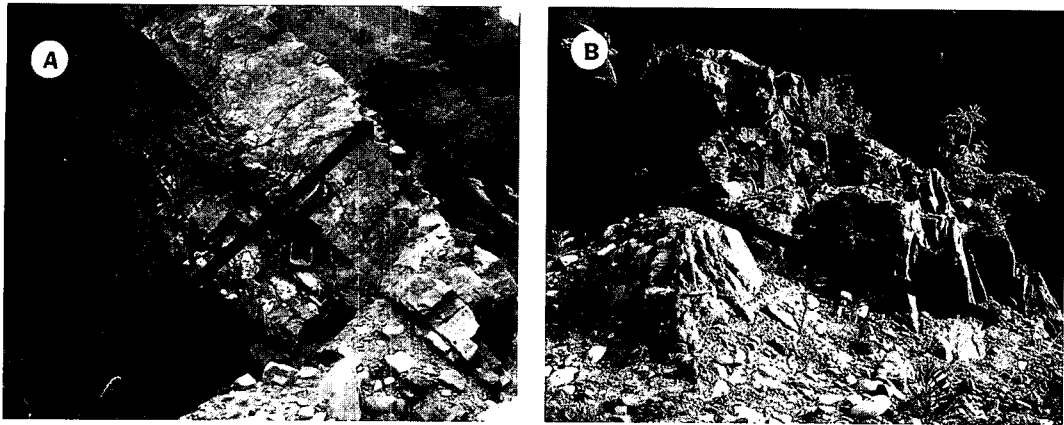


Fig. 3. The outcrop exposure of the Jangseong Formation at Gyesandong along the Hwangji stream near Jangseong coal Mine. Stratigraphic top is to the right. A) Coarsening-upward unit of the lower Jangseong Formation. The unit is composed of thin- to medium-bedded, fine- to medium-grained sandstones. Individual sandstone beds are wave rippled, parallel-laminated, and parallel to subparallel-bedded. Field bag for scale. B) Fining-upward unit of the upper Jangseong Formation. 5-meter thick, trough cross-bedded, coarse- to very coarse-grained sandstone bed is overlain by bioturbated *Stigmariabearing* mudstone and coaly shale. Note the scouring base and lenticular geometry of sandstone beds. Field bag for scale.

Table 1. Model analysis of Jangseong sandstones, Jangseong area, Taebaegsan basin (Baegunsan Syncline).

Sample No.	Framework Grains							Matrix and Cement			Total
	Qm	Qp	F	Lm	Ls	Mica	Acc.	Matrix	Cly	Quartz	
JG101	45.8	1.3	0.0	0.0	0.0	4.9	9.7	0.0	38.3	0.0	100.0
JG102	31.2	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	1.9	51.6	11.7	0.0	100.0
JG108	57.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	2.6	13.3	23.7	100.0
JG109	78.9	0.0	0.6	0.0	0.0	0.3	4.5	0.0	1.3	104.3	100.0
JG110	54.5	26.0	0.0	0.0	0.3	2.6	0.3	2.6	7.5	6.2	100.0
JG115	61.0	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.6	14.9	5.8	100.0
JG117	56.5	2.6	0.0	1.3	0.0	0.6	0.0	23.1	9.1	6.8	100.0
JG118	49.7	18.2	0.0	0.6	0.0	0.0	0.3	8.4	12.3	10.4	100.0
JG121	55.0	16.3	0.0	1.6	0.0	0.3	0.0	9.1	15.3	2.3	100.0
JG122	64.0	0.6	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	9.4	12.0	13.3	100.0
JG125	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	13.3	23.4	100.0
JG126	64.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	5.8	23.1	100.0
JG130	54.5	2.6	0.0	0.0	1.0	2.6	1.0	14.3	18.2	5.8	100.0
JG132	56.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	18.2	7.8	100.0
JG134	47.4	2.3	4.5	0.0	1.3	0.6	0.0	31.5	10.4	1.9	100.0
JG138	57.1	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	7.1	100.0
JG140	68.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.9	0.3	1.3	21.3	5.0	100.0
JG141	46.1	25.0	0.0	1.6	11.4	0.3	0.6	0.3	13.3	1.3	100.0
JG142	53.0	1.3	0.0	6.2	1.3	3.2	0.6	10.7	6.8	16.9	100.0
Average	56.0	7.8	0.3	0.6	0.8	1.1	1.2	9.9	13.1	9.2	

Qm; monocrytalline quartz, Qp; polycrytalline quartz, F; feldspar, Lm; metamorphic rock fragment, Ls; sedimentary rock fragment, Acc.; accessory minerals, cly; clay.

의 점토광물을 분리하였다. 분리된 $2\mu\text{m}$ 이하의 점토 광물들은 삼투막 투과 방법 (Millipore Filter Transfer Method)과 유리 슬라이드 방법 (Glass Slide Method)등을 이용하여 정방위 시료를 만들었다. 정방위 시료에 대해 시간율 (time constant) 2s, 주사율 (scan

rate) $0.5^\circ/20/\text{min}$ 의 분석조건으로 $2\sim 35^\circ 2\theta$ 까지 X 선을 조사하여 점토광물의 회절도를 얻었고, 이를 통해 각각의 점토광물을 감정하였다. 일부 시료는 550°C 에서 1시간동안 열처리 후 다시 X선을 조사하였다. X선 회절 분석 기기는 Rigaku RINT 1200이며 40 kV,

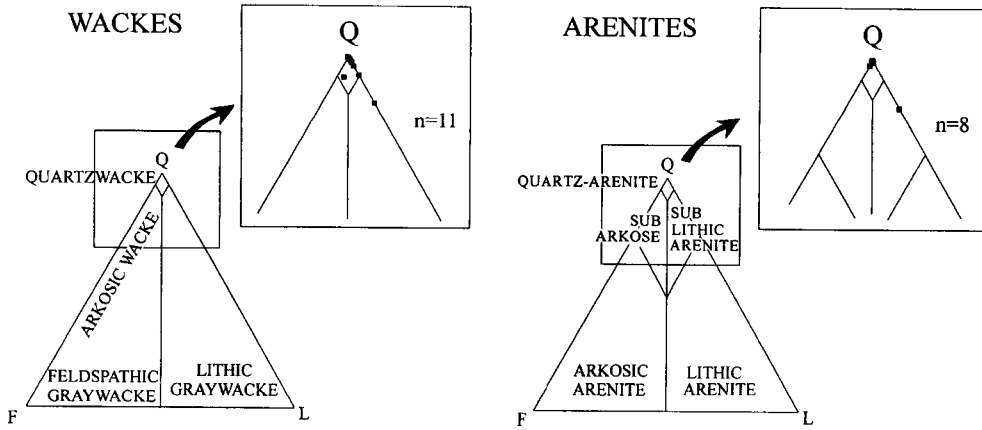


Fig. 4. Petrographic classification (after Dott, 1964 and Leeder, 1982) of the Jangseong sandstones. Most Jangseong sandstones are classified as quartz arenites, quartzwackes, and sublithic arenite and lithic graywacke. Q: quartz, F: feldspar, and L: lithic fragment.

20 mA에서 니켈필터를 사용한 구리파장 (Ni-filtered CuK α)을 이용하였다. 23개의 사암시료 중 중립질 및 조립질 사암 19개를 선별하여 박편제작을 하였으며 각 박편당 300개 이상의 점셈 (point count)을 통한 모달 분석이 병행되었다 (Table 1). 일부 선별된 사암시료에 대하여 점토광물의 감정 및 속성광물의 공생 연구를 위해 주사전자현미경 (scanning electron microscopy) 분석을 실시하였다. 아울러, 장성층 내에 발달되어 있는 석영맥으로부터 시료를 채취하여 미국 지질조사소 (U.S. Geological Survey) 가스-용액 가열냉각기 (gas-flow heating-freezing system)를 사용, 가열실험을 통해 석영맥 시료의 유체포유물에 대한 균질화온도를 측정하였다.

퇴적암석학적 연구

장성층 사암의 광물조성 및 속성상

장성층 사암은 주로 석영 및 암편으로 구성되어 있으며 소량의 정장석과 운모, 전기석, 클리노조이사이트, 스피넬 및 저어콘 등이 부수광물들로 포함된다. 모달분석 결과에 의하면, 장성층 사암은 주요구성광물이 68%, 기질 및 교결물이 32%로 (Table 1), Dott (1964) 및 Leeder (1982)의 사암 분류법에 의해 대부분 석영 사질암 (quartz arenite) 혹은 석영 기질암 (quartz-wacke)으로 분류되며 일부 준암편질 사암 (sublithic arenite)과 암편질 기질암 (lithic graywacke)도 나타난다 (Fig. 4). 장성층 사암의 주요구성광물 중 가장 우세하

게 나타나는 석영은 평균 64% 이고 암편과 장석은 각각 평균 1.4%, 0.3%이며 (Q₉₇FiL₂), 백운모 및 기타 부수광물은 평균 2%로 나타난다 (Table 1).

장성층 사암에서의 속성작용은 다짐작용, 석영 및 점토광물에 의한 교결화작용, 용해작용에 의한 2차 공극 발달 및 공극충진, 열극의 발달 및 열극충진 등이 관찰된다.

다짐작용에 의해 운모는 석영입자 사이에서 휘어져 있는 형태로 관찰되며 (Fig. 5A), 암편들은 연성변형을 일으켜 원래 암편의 형태를 유지하지 못하고 붕괴되어 가기질 (pseudomatrix)을 형성한다 (Fig. 5B). 장성층 사암에서의 석영입자들은 대부분 과성장되어 있으며, 기질 및 점토 교결물의 함량이 적은 일부 시료에서는 석영의 과성장이 공극을 메우면서 연결되어 있는 규암질 구조 (quartzitic texture)가 나타난다 (Fig. 5C). 점토 광물들은 상당히 높은 복굴절을 보이며 석영입자 주위를 둘러싸고 있는 형태 또는 공극충진상으로 관찰된다 (Fig. 5D, 5E). 석영입자 주위를 둘러싸고 있는 점토광물은 인접 석영입자에 의해 눌러져 있는 형태로 관찰되는데 이는 점토광물의 침전 후에도 다짐작용이 계속 되었음을 보여준다 (Fig. 5D). 장성층 사암에서 용해작용은 석영입자와 공극충진상의 점토광물 사이에서 볼 수 있으며, 석영입자들의 가장자리는 용해되어 그 자리에 파이로필라이트가 충전되어 나타난다 (Fig. 5E). 또한, 장성층 사암에는 기질과 석영 입자를 가로지르는 열극이 발달되어 있으며 이들 열극들도 역시 파이로필라이트에 의해 충전되어 있다 (Fig. 5F).

이러한 속성상들의 상대적 선후 관계에 따라 장성층

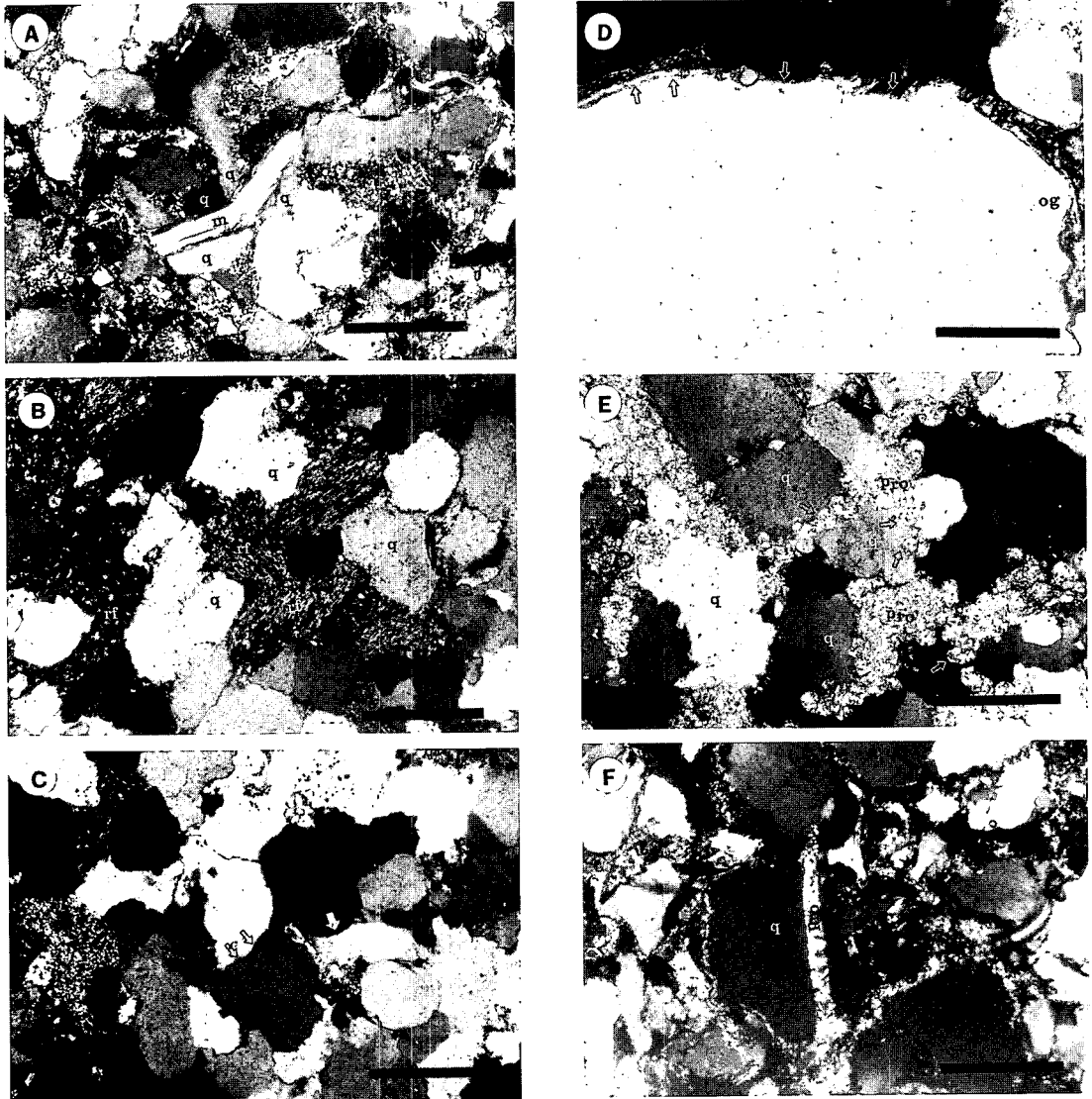


Fig. 5. Thin-section photomicrographs of Jangseong sand-stones. A) Muscovite (m) is deformed between adjacent quartz grains (q). Scale bar = 1 mm. B) Lithic fragments (rf) are deformed plastically and flowed into intergranular pore space between quartz grains (q) to form pseudomatrix. Scale bar = 1 mm. C) Contacts between adjacent over-growths are irregular compromise boundaries produced by mutual interference during crystal growth (arrows). Scale bar = 1 mm. D) The clay rim cement (arrows) on the quartz-overgrowth (og). The clay rim cement is cut by adjacent quartz because of compaction. Scale bar = 1 mm. E) Pore-filling pyrophyllite (Pro). Quartz grains (q) appear to have been partially dissolved (arrows). Scale bar = 0.5 mm. F) Fracture-filled pyrophyllite (Pro) in a detrital quartz grain (q). Scale bar = 1 mm.

사암의 속성광물공생표를 도시하였다 (Fig. 6). 장성층 사암에는 다짐작용이 광범위하게 인지되며 초기 속성작용 동안에는 석영과성장이 우세하게 나타난다. 이후 점토광물이 석영입자 주위에 또는 공극내에 침전되었으며, 매몰심도가 증가하고 속성작용이 진행되면서 석영입자 및 기질들은 용해작용을 겪었고, 이에 따른 2차 공극이

형성된 후, 후기속성작용동안 파이로필라이트의 충전작용이 있었던 것으로 사료된다.

장성층 사암의 점토광물

장성층 사암은 점토광물이 주요 교결물질로 나타남으

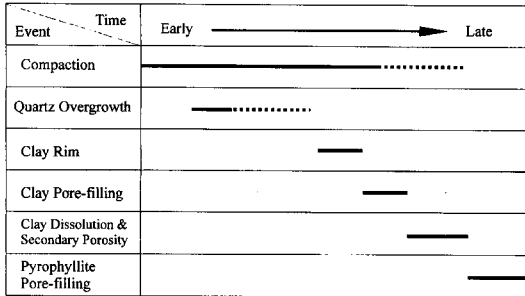


Fig. 6. Paragenetic sequence in Jangseong sandstones.

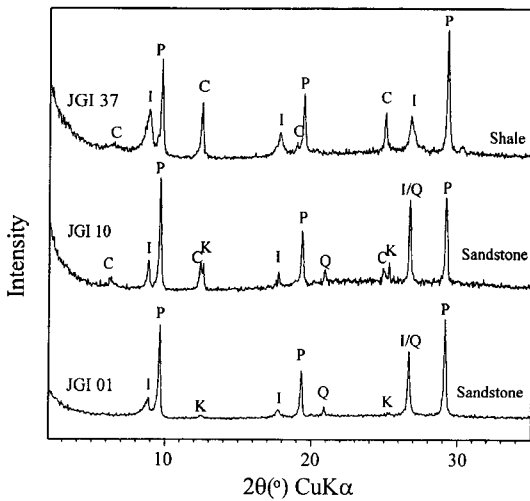


Fig. 7. Representative XRD pattern of the air dried <2 μm fraction of sandstones and shales from the Jangseong Formation. C: chlorite, I: illite, K: kaolinite, P: pyrophyllite, and Q: quartz.

로써 매몰속성작용에 있어서 점토광물이 상당히 중요한 역할을 하였음을 보여준다. X선 회절 분석을 통해 인지된 점토광물들은 일라이트, 파이로필라이트, 카올리나이트 및 소량의 녹니석등이다 (Fig. 7). X선 회절 분석 결과에 의하면, 일라이트는 10.1Å (001), 5.00Å (002), 3.38Å (003)에서 인지되는데, 10.1Å (8.6° 2θ) 위치에서 가장 큰 강도를 보여주며, 3.38Å에서 석영의 (101)면과 겹쳐 나타난다. 이들 X선 회절도의 형태는 대체로 높은 강도와 첨도를 보여줌으로써 장성층이 높은 열적 성숙과정을 겪었음을 보여준다 (Fig. 7). 파이로필라이트의 (001), (002), (003)면은 9.20Å, 4.60Å, 3.068Å의 위치에서 나타나며, 3.068Å의 위치에서 가장 큰 강도를 보여준다. 또, 카올리나이트의 X선 회절은 7.16Å와 3.58Å에서 기록되고 있다. X선 회절도의 강도를 이용한 정량분석을 통해 점토광물들의 상대적

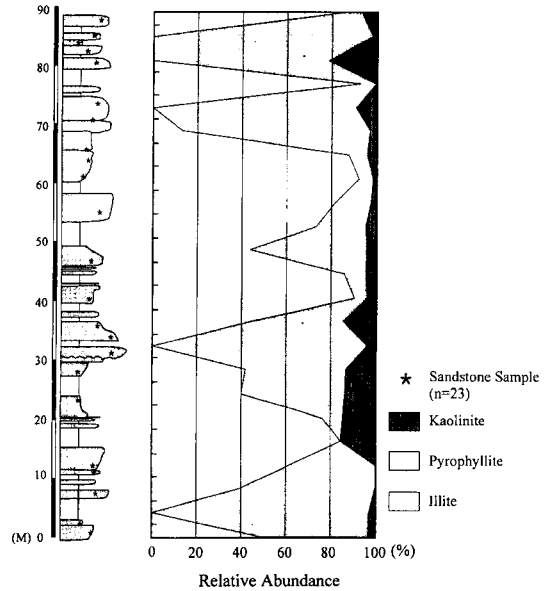


Fig. 8. Relative abundance of clay minerals from the Jangseong Formation.

함량을 장성층의 수직 층서 단면상에 도시한 결과, 장성층의 하부에서 상부까지의 수직 층서상의 특별한 경향성은 나타나지 않았으며, 대부분의 시료에서 일라이트와 파이로필라이트가 높은 비율을 점유하고 있음을 보여준다 (Fig. 8).

장성층 사암의 열성숙도

장성층 사암은 비교적 단순한 광물조성을 가지기 때문에 장석질 사암 (arkose)이나 암편질 사암 (lithic arenite)에서 나타나는 속성작용보다 상대적으로 제한된 속성광물공생을 보인다. 이러한 단순 광물조성을 갖는 석영질 사암에서 속성작용의 결과로 나타나는 사암내 교결물들은 지은구배율이나 매몰 심도 등에 의한 지층의 온도 혹은 지층수의 화학성분 등의 복합적 요소들의 시·공간상의 분포에 따라 각기 다르게 나타난다 (Helmold and Kamp, 1984; Lanson *et al.*, 1996). 장성층 사암에서 많은 가기질의 발견은 상당량의 암편이 다짐작용에 의해 붕괴되었으며, 붕괴된 암편은 지층수와의 반응으로 교결화작용 등의 지속적인 속성작용을 겪음으로써 원래의 암편의 흔적은 사라지고, 현재 장성층 사암의 광물조성과 같이 높은 기질 및 교결물의 함량을 보여 주는 것으로 판단된다. 가기질의 발달과 점토광물의 기질 및 교결물의 높은 함량 이외에도 석영의

과성장이 보여주는 규암질 구조등의 속성상은 장성층 사암이 비교적 높은 온도의 속성작용을 겪었음을 보여 주며, X선 회절분석에서 나타나는 점토광물의 종류와 회절도의 형태는 이러한 사실을 지지한다. 특히, 앵키변성작용 (anchi-metamorphism)의 지시광물로 알려져 있는 파이로필라이트의 출현은 장성층이 상당히 높은 열적 성숙을 겪었음을 지시한다 (Frey, 1987; Brattli, 1997).

고지온의 추정

일라이트의 결정도

일라이트의 결정도는 위버지수 (Weaver Index)와 큐블러지수 (Kubler Index)로 표현된다. 위버 지수는 X선 회절도에서 일라이트 (001)면을 지시하는 10.0Å 위치에서의 높이와 10.5Å 높이의 비 ($WI = H(10.0\text{Å}) / h(10.5\text{Å})$)로 나타내며 결정도가 증가할수록 그 값이 크다. 위버 지수는 X선 회절도에서 첨도가 너무 크면 오차를 많이 포함하기 때문에 주로 비변성 퇴적암에서만 이용된다 (Blenkinsop, 1988). 큐블러 지수는 일라이트 결정격자로부터 반사되는 (001)면에서 X선 회절강도의 1/2 높이의 폭으로 정의되며 $\Delta 2\theta$ 로 표시한다. 큐블러 지수는 결정도가 증가할수록 감소하는데, 시간을 2s, 주사율 0.5의 분석조건에서 큐블러 지수가 0.21 $\Delta 2\theta$ 이하이면 에피변성작용의 영역 (epizone), 0.37 $\Delta 2\theta$ 와 0.21 $\Delta 2\theta$ 사이에 있으면 앵키변성작용의 영역 (anchi-zone), 0.37 $\Delta 2\theta$ 이상이면 속성작용의 영역 (diagenesis)으로 정의한다 (Kisch, 1990).

장성층의 사암 및 셰일 등 36개의 시료에 대한 X선

회절분석 결과 중 일라이트가 산출된 28개의 시료에 대해 큐블러 지수를 측정된 결과, 큐블러 지수는 평균 0.24 $\Delta 2\theta$ 였으며 0.14~0.42 $\Delta 2\theta$ 사이에서 분포하였다 (Fig. 9). 이를 큐블러-위버 지수 도표에 도시하면, 3개의 시료는 속성작용 영역에, 16개의 시료는 앵키변성작용 영역에, 9개의 시료는 에피변성작용 영역에 해당되며, 사암과 셰일에서 큐블러 지수의 차이가 발견되지 않음으로써 장성층의 일라이트 결정도는 암석의 종류에 영향을 받지 않고 있음을 보여준다 (Fig. 9).

일라이트 결정도에서 속성작용 영역과 앵키변성작용 영역의 경계 (0.37 $\Delta 2\theta$)는 비트리나이트 반사도 (Rm) 2.5~3%에 해당하는데 이 경계의 최소 온도는 200°C이며, 석탄의 진화단계 중 무연탄이 생성되는 곳이다 (Kisch, 1974; Kisch, 1987). 또한 앵키변성작용 영역과 에피변성작용 영역의 경계 (0.21 $\Delta 2\theta$)는 비트리나이트 반사도로 최소 5%에 해당하며 이 경계의 온도는 300°C이고, 석탄의 진화 단계로는 변성무연탄이 생성되는 곳이다 (Duba, Williams-Jones, 1983). 따라서 장성층에서 사암과 셰일에서 측정된 일라이트 결정도에 의하면, 장성층은 속성작용단계를 넘어 약 200°C에서 300°C를 약간 상회하는 앵키변성 정도의 열성숙도를 갖는다고 해석될 수 있다 (Fig. 9).

유체 포유물의 균질화 온도

장성층 내에는 폭이 1~10 cm이고 길이가 수십 cm인 작은 규모의 석영맥들이 관찰된다. 석영맥은 조립질 사암에서는 대부분 불규칙한 형태로 나타나며 일부 세립질 사암 혹은 셰일에서는 층리에 평행하게 관찰됨으로써 석영맥을 형성시킨 유체는 공극을 및

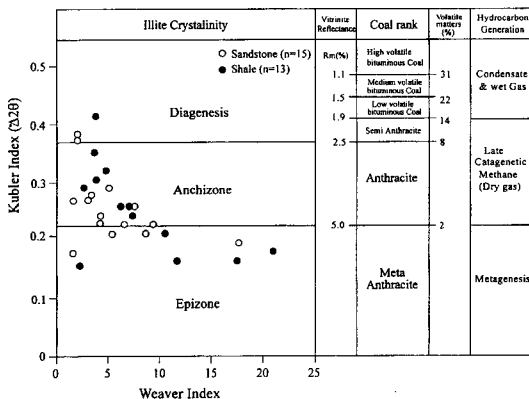


Fig. 9. Illite crystallinity of the Jangseong Formation, compared with organic maturity (modified after Kisch, 1974).

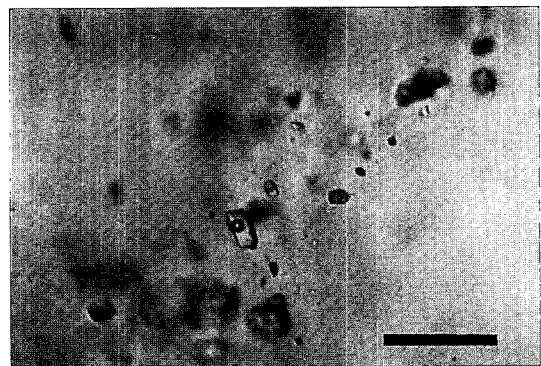


Fig. 10. Photomicrograph of primary fluid inclusions in quartz vein from the Jangseong Formation. Scale bar = 50 μ m.

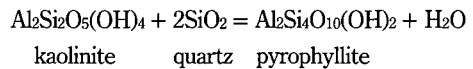
투수율의 차이에 따라 유입되었을 것으로 추정된다. 이들 석영맥에서 시료를 채취하여 석영맥 내에 포획되어있는 유체포유물들의 균질화 온도를 측정하였다. 석영맥 내의 유체포유물은 대부분 액상과 기상의 2상 포유물이며 (Fig. 10), 기상의 부피는 유체포유물 전체 부피의 10% 내외로 가열시 액상으로 균질화한다. 유체포유물의 크기는 5~20 μm이며 대부분 부정형이 많았으나 일부 타원형과 원형의 형태로도 관찰된다 (Fig. 10).

장성층에서 유체포유물에 대한 균질화 온도는 가열 실험시 ±2% 측정오차를 포함하며 압력 보정이 이루어지지 않은 상태이므로 일반적으로 유체포유물이 포획된 최소 온도를 지시한다. 장성층에서 유체포유물의 균질화 온도는 113~270 °C로 상당히 넓은 온도 범위를 보여주며 190~200 °C에서 가장 높은 빈도수를 보여준다 (Fig. 11). 이렇게 넓은 온도 범위로 나타나는 유체포유물의 균질화 온도는 지층수의 순환 혹은 다양한 온도를 가진 다른 열수기원의 유체에 기인할 수 있으며 초기 포획된 유체포유물이 퇴적암내 지층 온도가 상승하면서 일부 유체포유물에 대해 온도의 재평형화작용이 일어나면 초기 포획 온도보다 더 높은 온도를 가질 수 있다 (Goldstein, 1986). 또, 광역적 용기와 침식에 의한 하중감소로부터 냉각이 진행되는 동안 유체로부터 광물의 침전작용이 계속되었기 때문인 것으로 해석될 수도 있다 (Pollastro, Barker, 1986). 일반적으로 장성층내의 석영맥과 같이 유체로부터 침전되는 맥의 경우, 유체의 압력은 암석의 하중 압력과 동일할 만큼 높아야 한다 (Pollard, Segall, 1987). 석

영맥의 산출상은 유체가 공극을 및 투수율의 차이에 따라 장성층 내로 침투되었음을 반영하고 있기 때문에 장성층의 공극을 채우고 남은 유체가 높은 압력에 의해 장성층내에 열극을 만든 것으로 사료된다. 따라서 현미경에서 관찰되는 파이로필라이트의 이차 공극 충전상은 석영맥을 만든 열수와 동일 기원일 가능성이 높다. 그렇다면, 장성층에서 나타나는 석영맥은 파이로필라이트 생성과 유사한 시기 혹은 이후에 형성된 속성작용 말기의 지질사건이므로, 장성층내 다양한 유체포유물의 균질화 온도는 유체포유물이 포획된 이후 더 높은 온도로 가열되어 재평형된 결과라기보다는 열수가 냉각되면서 석영이 결정화되어 가는 온도를 반영하는 것으로 보는 것이 타당하다. 유체포유물의 균질화 온도가 190~200 °C의 온도범위에서 가장 높은 빈도수를 보이는 것은 석영의 결정화 작용이 이 온도에서 가장 활발하게 일어났기 때문이며 가장 높은 온도를 가지는 270 °C의 유체포유물은 장성층을 통과한 유체의 최소 온도를 반영한다고 할 수 있다. 따라서 장성층은 최소 270 °C의 열수의 영향을 받았다고 할 수 있다.

카올리나이트-파이로필라이트 상전이

파이로필라이트는 지층내 온도와 압력이 증가되어 비트리나이트 반사도가 1.2~1.9% (Max. 2.2%)에 이르면 카올리나이트가 다음의 화학반응에 의해 전이를 일으킴으로서 생성되는 것으로 알려져 있다 (Frey, 1987; Brattli, 1997).



X선 회절 분석 결과에 의하면, 장성층에서 파이로필라이트는 36개의 시료 중 28개의 시료에서 카올리나이트와 함께 나타났으며 6개의 시료에서는 파이로필라이트만, 2개의 시료에서는 카올리나이트만 나타났다 (Table 2). 이와 같이 장성층 대부분의 시료에서 파이로필라이트와 카올리나이트가 함께 공존하는 결과로부터 장성층은 카올리나이트가 파이로필라이트로 전이되는 온도-압력 조건에서의 열성숙도를 기록하였던 것으로 추정된다.

파이로필라이트는 지층수의 압력이 암석의 하중압력과 같을 때 ($a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$), 1 kbar 환경에서 290 °C 이하의 온도에서 생성되는 것으로 알려져 있다 (Frey, 1987; Brattli, 1997). 압력의 변화에 따른 파이로필라

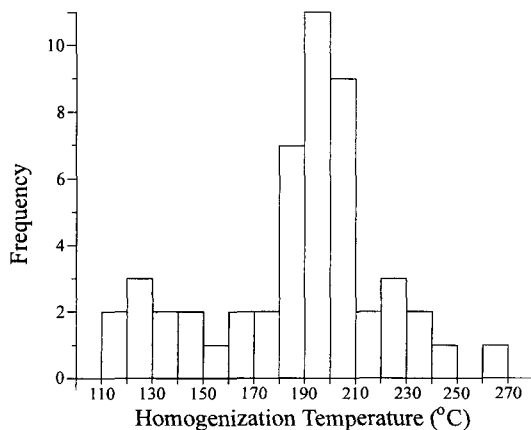


Fig. 11. Histogram showing homogenization temperatures of fluid inclusions in the quartz vein from the Jangseong Formation.

Table 2. XRD results for clay minerals in the Jangseong Fordmation, Taebaegsan basin (Baegunsan Syncline).

Sample No.	Illite	Prophyllite	Kaolinite	Chlorite	Lithology
JG101	○	○	○	×	sandstone
JG102	×	○	○	×	sandstone
JG103	○	○	○	×	shale
JG105	○	○	×	×	sandstone
JG107	○	○	×	×	shale
JG108	○	○	×	×	sandstone
JG109	×	×	○	○	sandstone
JG110	×	○	○	×	sandstone
JG111	○	×	○	×	shale
JG112	○	○	×	×	shale
JG113	○	○	○	×	sandstone
JG114	○	○	×	×	shale
JG115	×	○	○	×	sandstone
JG116	○	○	○	×	shale
JG117	×	○	○	×	sandstone
JG118	○	○	○	×	sandstone
JG119	○	○	○	×	shale
JG121	○	○	○	×	sandstone
JG122	○	○	○	×	sandstone
JG125	○	○	○	×	sandstone
JG126	○	○	○	×	sandstone
JG127	○	○	○	×	shale
JG128	○	○	○	○	shale
JG129	○	○	○	○	shale
JG130	○	○	○	×	sandstone
JG131	○	○	○	×	sandstone
JG132	○	○	○	×	sandstone
JG133	○	○	○	×	shale
JG134	○	○	○	×	sandstone
JG136	○	○	○	×	shale
JG137	○	○	○	×	shale
JG138	×	○	○	○	sandstone
JG139	○	○	×	×	sandstone
JG140	×	○	○	○	sandstone
JG141	×	○	○	○	sandstone
JG142	×	○	○	×	sandstone

○; occurrence, ×; no occurrence

이트의 생성온도를 알아보기 위하여 광물공생의 평형상태를 열역학적으로 계산한 Berman (1991)의 TWQ (Thermobarometry With estimation of Equilibration state) 프로그램을 이용하면, 물의 활동도가 1일 때 ($a_{H_2O}=1$) 파이로필라이트의 생성온도는 1 kbar 압력에서 280 °C, 2 kbar 압력에서 295 °C이며 파이로필라이트가 가장 높은 생성온도를 가지는 6 kbar 압력에서는 309 °C로 나타난다 (Fig. 12).

파이로필라이트의 생성 반응식은 H₂O를 포함하고 있기 때문에 반응에 관련된 유체내의 H₂O의 양에 의해서 파이로필라이트가 생성되는 온도는 달라지게 된다. 실제 반응에 참여한 H₂O의 농도는 활동도로 표현되는

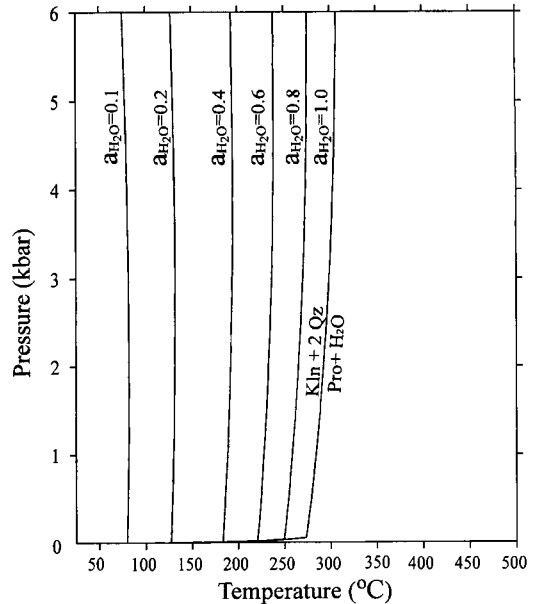


Fig. 12. P-T diagram for kaolinite-to-pyrophyllite transformation at different water activities. Calculated with TWQ (Thermobarometry With estimation of Equilibration state; Berman, 1991). Kln: kaolinite, Qz: quartz, Pro: pyrophyllite.

데 자연상태에서 물의 활동도는 일정하지 않다. 퇴적암 지층내 유기물이 포함되어 있는 경우 유기물은 열적 성숙도가 증가함에 따라 CH₄ (혹은 CO₂) 등의 가스를 방출하며 CH₄ (혹은 CO₂)의 방출량은 육상고등식물 기원의 유기물일수록 많은 것으로 알려져 있다 (Laplante, 1974). 유기물에 의한 CH₄ (혹은 CO₂)의 방출은 지층수의 성분을 변화시키고 물의 활동도를 저하시키기 때문에 파이로필라이트의 생성 온도는 더 낮아질 수 있다 (Fray, 1987). 장성층은 함탄쇄설성 퇴적층으로 지층내의 유기물 함량이 풍부하고 이들의 기원이 대부분 육상 고등식물이기 때문에 장성층에서 물의 활동도는 CH₄ (혹은 CO₂)의 영향을 받아 1 보다 작았을 것으로 예상할 수가 있다. 압력 1~2 kbar에서 물의 활동도를 0.8로 가정했을 때, 석영과 카올리나이트의 반응을 통해서 형성되는 파이로필라이트의 생성 온도는 약 265 °C이며 물의 활동도 0.1~0.2를 가정했을 때 200 °C 이하로 떨어진다 (Fig. 12). 또, 가장 높은 파이로필라이트의 생성 온도를 가지는 압력 6 kbar를 가정하면, $a_{H_2O} = 0.8$ 일 때, 석영과 카올리나이트의 반응을 통한 파이로필라이트의 생성 온도는 약 278 °C이며 물의 활동도 0.1~0.2에서는 200 °C 이하의 온도에서도 파이로필라이트의 생성이 가능하다.

연구지역에서 파이로필라이트의 생성과 관련된 물의 활동도와 압력 조건에 대해서는 알려진 바가 없기 때문에 장성층에서 파이로필라이트의 생성 온도를 정확히 언급하기는 어렵지만, 장성층의 일라이트 결정도가 보여주는 열성속도, 유체포유물의 균질화 온도, 1 보다 작은 물의 활동도 및 퇴적압이 가질 수 있는 최대압력 등을 고려한다면, 장성층내의 파이로필라이트는 265 °C 내외의 온도범위에서 생성되었을 것으로 추정된다.

토 의

장성광업소 갱내에 위치한 장성층의 탄층에서 비트리나이트 반사도를 측정할 기존 자료에 의하면, 비트리나이트 반사도는 이방성을 보여주며 최대반사도 (Rmax.)는 6.2~7.0%, 최소반사도 (Rmin.)는 3.9~ 4.2%, 평균 비트리나이트 반사도 (Rm)는 5.1~5.5% 이다 (박석환, 1990). 장성층의 평균 비트리나이트 반사도 (Rm)를 석탄의 탄화정도와 비교하면, 무연탄 혹은 변성 무연탄 영역에 해당한다 (Fig. 9). 따라서 일라이트 결정도와 석탄의 탄화정도에 의하면, 장성층은 300 °C를 약간 상회하는 열의 영향을 받았던 것으로 추정할 수 있다. 그러나 일라이트 결정도와 석탄의 탄화정도는 온도뿐만이 아니라 구조적 운동에 의해 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Teichmuller, 1987). 석탄의 변성무연탄화 (meta-anthracitization)의 원인은 보통 전단응력과 관련되어 있으며 석탄의 이방성은 지층의 하중 압력에 의해서 생성될 뿐 아니라 구조적 응력에도 크게 영향을 받는다 (Teichmuller, 1987). 또한, 비트리나이트의 이방성은 비트리나이트의 정확한 최대반사도를 측정하는데 장애가 되기 때문에 무연탄 및 변성 무연탄에서 비트리나이트 반사도를 이용한 석탄의 탄화도 측정은 그 신뢰도를 보장할 수 없다 (Teichmuller, 1987). 또한, 일라이트 결정도는 구조적 변화가 심한 곳일수록 높게 나타난다. 태백산분지는 트라이아스의 송림변동과 주라기의 대보조산운동 등 심한 구조 운동을 받아 트러스트와 단층 및 습곡이 발달된 지역이기 때문에 구조적인 영향을 배제할 수 없다. 따라서 장성층에서 측정된 일라이트 결정도와 비트리나이트 반사도에 의한 단순 고지온의 추정은 실제 온도보다 높게 평가 될 수 있다는 점을 감안해 볼 때, 장성층은 앵키변성작용 영역과 예피변성작용 영역의 경계를 지시하는 300 °C 보다는 낮은 온도의 영향을 받았을 가능성이 높다. 따라서 일라이트 결정도가 보여주는 이러한 특성

을 고려하여 석영맥 내의 유체포유물에 의한 균질화 온도 및 카올리나이트-파이로필라이트 상전이 온도와 대비시키면 장성층의 고지온은 대략 265~270°C 내외이었을 것으로 사료된다.

퇴적분지내의 지온구배율은 지역별 열류량에 따라 달라지며 이러한 열류량은 분지의 종류, 판경계와의 근접성, 관입암체 및 열점과의 거리에 관계된다 (Spear, 1993). 따라서 장성층에 영향을 준 열의 성인은 연구지역의 분지발달사와 함께 이해되어야 하며 장성층의 분지 발달사를 토대로 장성층에 영향을 준 열원에 대한 가능성을 고려하여야 한다.

장성광업소의 시추자료에서 얻은 갱내 심도별 온도 기록을 토대로 장성지역의 현재 지온구배율을 계산하면 약 31 °C/km 이다 (Fig. 13). 이 지온구배율을 장성층에 적용하였을 경우, 장성층이 265 °C 내외의 온도에 도달하기 위해서는 약 8~9 km의 매몰심도를 가져야 하며, 장성층이 8~9 km로 매몰되었더라면, 현재 장성층 상위를 피복하는 지층의 두께가 약 2 km 내외이므로 6~7 km 가량의 퇴적층이 침식에 의해 사라졌어야 한다. 그러나 트러스트와 같은 지층의 구조운동은 퇴적과 침식을 가정하지 않고도, 장성층을 6~7 km 이상

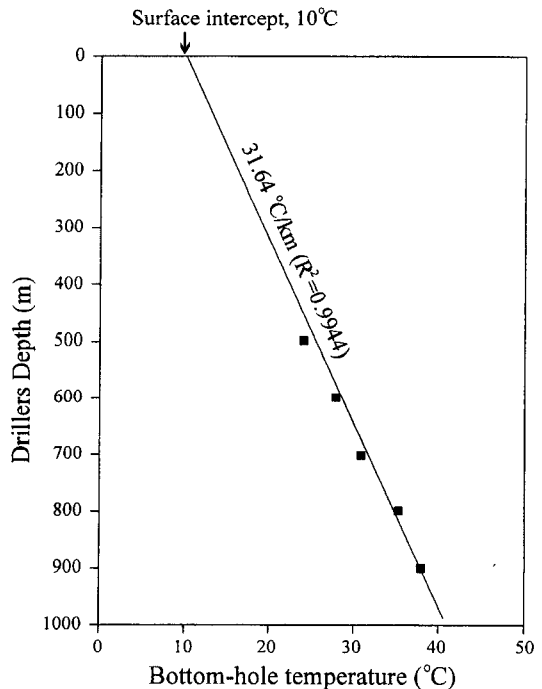


Fig. 13. Present geothermal gradient calculated from bottom hole temperatures. Bottom-hole temperatures were obtained from well data at Jangseong mine.

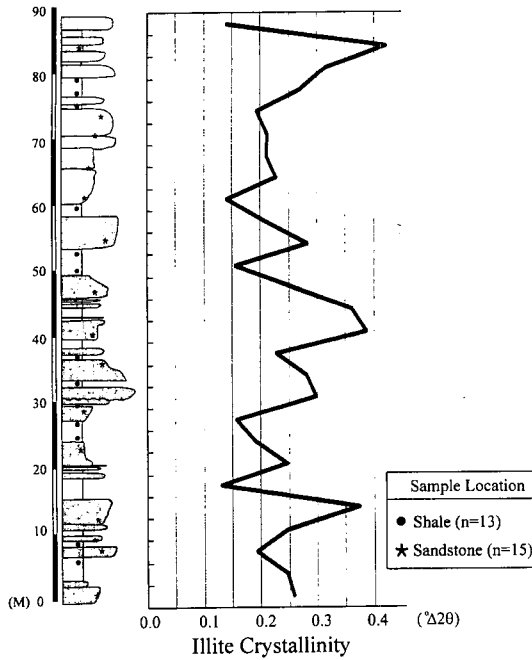


Fig. 14. The distribution of illite crystallinity in the Gye-sandong section of the Jangseong Formation.

지하 심부로의 매몰을 쉽게 설명할 수 있다. 만일, 구조적 혹은 층서적 지층의 하층이 장성층을 지하 심부로 매몰시키고 온도를 상승시킨 주원인이라면, 장성층의 수직 층서에 대비된 일라이트 결정도는 지층의 하위로 갈수록 더 커져야 한다. 그러나 장성층 상부에서 하부로의 일라이트 결정도의 증가 양상은 나타나지 않고, 상당히 불규칙하게 나타난다 (Fig. 14). 또한, 장성층 하위의 지층인 만항층에서 최근 Lee & Ko (1997)에 의해 측정된 일라이트 결정도는 장성층과 동일한 0.24 $\Delta 2\theta$ 의 평균값을 보여준다. 만항층은 장성층보다 하위의 지층이므로 더 높은 열성속도를 보여주어야 함에도 불구하고 일라이트 결정도로 나타낸 이들 두 지층의 열성속도는 상당한 근사치를 보이기 때문에 장성층에 영

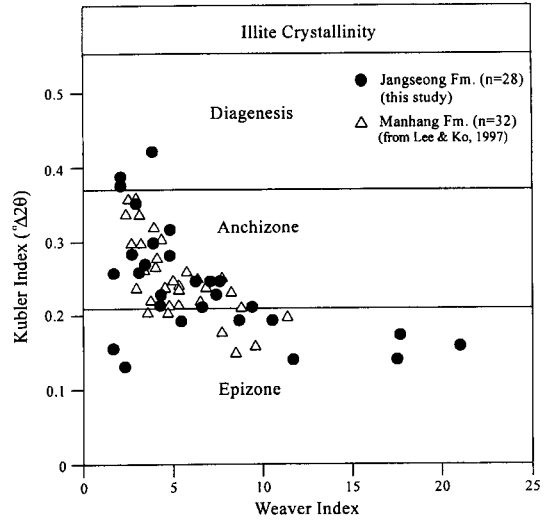


Fig. 15. Illite crystallinity of the Jangseong and Manhang formations. KI-WI (Kubler Index-Weaver Index) data of the Manhang Formation are from Lee and Ko (1997).

향을 준 열원을 층서적 혹은 구조적 매몰에 의한 요인만으로 설명하기 어렵다 (Fig. 15). 그러나, 만항층과 장성층의 두께는 매몰에 의한 지층의 온도상승의 효과를 평가하기에 충분하지 않으므로, 장성층에서 매몰 변성작용에 대해서는 향후 연구에서 검증될 필요가 있다.

마그마의 관입은 지온의 구배를 변화시키는 주요 원인이며 이는 관입암체의 온도 및 형태, 모양의 온도, 가스 및 여러 관입암의 관입 시기에 따라 다양하게 나타난다 (Spear, 1993). 이러한 마그마의 관입과 관련된 지온구배의 변화는 관입암체로부터의 거리에 따라 그 영향이 다르게 나타난다. 본 연구지역의 1 km 인근에는 트라이아스기 말기의 황반암 암주 (lamprophyre stocks; 213 Ma; Yun, Siberman, 1979)와 석영반암, 유문암, 휘록암 등의 백악기 및 그 이후의 화성암류 (49~67 Ma; 원종관 등, 1994)들이 분포한다 (Fig. 1). 연구지역에서 시료채취의 위치는 화성암체로부터 거리에 있어서 큰 차이가 없기 때문에 일라이트 결정도의 화

Table 3. Published data of hydrothermal temperatures from Yeonhwa Mine, Taebaegsan basin (Baegunsan Syncline).

Methods	Minerals	T(°C)	References
Fluid inclusion	quartz, sphalerite	180~355	Yun, So(19991)
Sulfur isotope	pyrite, sphalerite	265~387	Yun, So (1991)
Carbon isotope	calcite	200~300	Yun, So (1991)
Mineral assemblage & composition	pyrrhotite, spalerite arsenopyrite	230~350	Koh et al. (1992)
Sulfur isotope	sulfide minerals	273~566	Kim, Nakai (1980)
Fluid inclusion	fluorite	150~380	Chung (1986)
Fluid inclusion	quartz	138~334	Moon (1991)

강압체에 의한 영향을 논하기 곤란하나, 관입암체와 관련된 열수의 활동이 장성지역에서 장성층 내 피로필라이트를 생성시키고 높은 일라이트 결정도를 갖게 한 원인이 될 수 있다. 현미경하에서 관찰되는 2차 공극과 열극내의 피로필라이트의 충전 및 장성층내의 석영맥의 산출상은 장성층이 열수의 영향을 받았음을 반영한다. 연구지역 인근의 태백산광화대 (예: 연화광상)에서 황화광물로부터 측정된 황동위원소 (δS^{34}) 자료에 의하면, 황화광물은 백악기 (73 Ma) 화성암류에서 기인한 열수용액이 성인으로 황화광물의 생성 온도는 273~566°C이며 (Moon, 1991; Yun, So, 1991; Table 4), 연화광상내 광체들의 유체포유물로부터 추정된 열수의 온도는 138~380°C로 보고되어 있다 (Chung, 1986; Moon, 1991; Yun, So, 1991; Table 3). 이러한 자료들은 일라이트 결정도와 피로필라이트의 생성 온도로부터 추정된 장성층의 고지온과 비교적 근사치를 보여 주고 있다.

트라이아스기 초 아시아판과 혼슈블럭의 충돌에 의해 구조변형이 시작된 태백산분지는 (Cluzel *et al.*, 1990), 트라이아스기의 송림 변동과 주라기의 대보조산운동을 겪었다. 이러한 대규모 구조운동은 분지내 열류량을 증가시키는 원인이 되며 분지내 많은 구조선들이 열수의 이동을 원활하게 함으로써 분지 전체로 열의 전도를 용이하게 하였으며, 분지내 퇴적암 지층의 균일한 온도 상승에 기여할 수 있다. 본 논문에서 일라이트 결정도와 구조선의 영향을 명확히 검증할 수 없으므로 이 지역의 구조운동이 장성지역 장성층의 직접적인 열원이었다는 증거는 없지만, 태백산분지의 열수는 상기의 대규모 조산운동과 관련하여 보고되어 있으며, 이러한 조산운동은 이지역에 복잡한 지질구조를 형성시켰기 때문에 장성층의 고지온이 태백산분지의 구조운동과 무관하다고 생각되지 않는다.

따라서, 본 연구지역에서 속성작용의 영역을 넘어 앵키변성영역 및 초기단계의 에피변성영역에 이르는 장성층의 열적 성숙은 열수의 영향이 가장 크게 나타남으로써 태백산 분지가 겪은 구조 변형운동과 이에 수반된 열수용액이 주요 원인인 것으로 추정될 수 있다. 즉, 태백산분지의 대규모 조산운동은 이 지역에 많은 습곡과 트러스트 및 단층을 가져왔고 이러한 구조 변형운동은 분지내 열류량을 증가시켰을 뿐만 아니라 많은 구조선들을 발달시켰으며 이 구조선들을 따라 열수용액의 원활한 유입은 장성층내 피로필라이트 등의 앵키변성광물을 형성시켰던 것으로 사료된다.

결 론

장성층 사암은 주요구성광물이 68% ($Q_{97}F_{i}L_2$), 기질 및 교결물 32%로, 일부 준암편질 사암과 암편질 기질암을 포함한 석영 사질암 혹은 석영 기질암에 해당된다. 장성층 사암에는 다짐작용, 석영 및 점토광물 (일라이트, 키클리나이트 및 녹니석)에 의한 교결화작용, 용해작용에 의한 2차 공극의 발달 및 열수변질작용에 의한 피로필라이트의 침전 등의 속성상과 광물공생이 관찰된다. 이와 같은 퇴적암석학적 연구 결과에 의하면, 장성층의 사암은 점토광물이 주요 교결물질로 나타나며 이들 점토광물 중 피로필라이트의 침전과 일라이트의 X선 회절도의 형태는 장성층이 높은 열적 성숙을 겪었음을 시사한다.

장성층에서 측정된 일라이트 결정도는 0.14~0.42 $\Delta 2\theta$ (평균값 0.24 $\Delta 2\theta$)의 범위를 가지며 이는 장성층이 앵키변성작용 또는 저에피변성작용 영역에 해당하는 열적 성숙을 겪었음을 지시한다. 장성층내 발달된 석영맥으로부터 측정된 석영내 유체포유물의 균질화 온도는 113~270°C의 범위에서 나타나며 장성층에서 피로필라이트는 약 265~270°C 범위까지 이르렀을 것으로 추정된다. 따라서 일라이트 결정도와 피로필라이트의 생성온도 및 유체포유물 균질화 온도를 종합하여 해석하면, 장성층의 고지온은 약 265~270°C 범위까지 이르렀을 것으로 판단된다.

트러스트, 습곡 그리고 마그마 관입등을 수반하는 태백산 분지의 후기 구조운동은 장성층내 온도를 상승시키는데 중요한 영향을 미쳤던 것으로 사료되며 장성층 사암에서 나타나는 2차 공극 및 열극 충전상 피로필라이트의 침전, 장성층내에 발달된 많은 석영맥 및 연구지역 인근의 대규모 석영 반암의 발달등은 장성층에 높은 열성숙도를 가져오게 한 주요 열원이 열수와 관련되어 있음을 보여준다. 따라서 장성층의 높은 열성숙도는 태백산 분지가 겪은 구조 변형운동과 이에 수반된 열수용액이 가장 큰 원인이었다는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 1998년도 기초과학연구소 학술연구 조성비 (BSRI-98-5304) 지원 하에 이루어졌다. 본 논문의 초고를 읽고 건설적인 비평을 해 주신 서울대학교 이용일 교수와 연세대학교 유강민 교수에게 감사드린다. X선 회절분석과 점토광물의 해석에 많은 조언과 도움을 주신 한국자원연구소 손병국 박사와 장성향 및 장성일

대의 지질조사를 위해 협조해 주신 대한석탄공사 장성 광업소 김철수 과장에게 감사드립니다.

참고문헌

- 박석환 (1990) 삼척탄전과 충남탄전 석탄의 암석학적, 지화학적 연구. 서울대학교 이학박사 학위 논문, 142p.
- 원종관, 이문원, 노진환, 이해경 (1994) 통리분지에서의 백악기 화산활동. 지질학회지, 30권 p. 542-562.
- Allen, P.A. and Allen, J.R. (1990) Basin analysis: Principles and applications. Blackwell Scientific Publications, London, 451p.
- Berman, R.G. (1991) Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: A new technique with petrologic applications. Canadian Mineralogy, v. 29, p. 833-855.
- Blenkinsop, T.G. (1988) Definition of low-grade meta-morphic zones using illite crystallinity. Journal of Metaphic Geology, v. 6, p. 623-636.
- Brattli, B. (1997) A rectorite-pyrophyllite-chlorite illite assemblage in pelitic rocks from Colombia. Clay Mineralogy, v. 32, p. 425-434.
- Cheong, C.H. (1969) Stratigraphy and paleontology of Samcheog coalfield, Korea (1). Journal of the Geological Society of Korea, v. 5, p. 13-56.
- Chung, J.I. (1986) Ore mineralogy and petrology of zinc-lead-silver ores from the Yeonhwa I Mine, Republic of Korea. Ph.D. thesis (unpublished), Waseda University. 471p.
- Cluzel, D., Cudet, J.P. and Lapiere, H. (1990) Geodynamics of the Ogcheon Belt (South Korea). Tectonophysics, v. 183, p. 41-56.
- Dott, R.H., Jr. (1964) Wacke, graywacke and matrix: What approach to immature sandstone classification. Journal of Sedimentary Petrology, v. 35, p. 626-632.
- Duba, D. and Williams-Jones, A.E. (1983) The application of illite crystallinity, organic matter reflectance, and isotopic techniques. In Frey, M. (ed.) Low temperature metamorphism, Blackie & Son Ltd., Glasgow, 351p.
- Frey, M. (1970) The step from diagenesis to metamorphism in pelitic rocks during Alpine orogenesis. Sedimentology, v. 15, p. 261-279.
- Frey, M. (1987) Very low grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. In Frey, M. (ed.) Low temperature metamorphism, Blackie & Son Ltd., Glasgow, p. 9-58.
- Goldstein, R.H. (1986) Re-equilibration of fluid inclusions in low temperature calcium carbonate cement. Geology, v. 14, p. 792-795.
- Helmold, K.P. and van de Kamp, P.C. (1984) Diagenetic mineralogy and controls on albitization and laumontite formation in Paleogene arkoses, Santa Ynez Mountains, California. In McDonald, D.A. and Surdam, R.C. (eds.) Clastic Diagenesis. American Association of Petroleum Geologists Memoir 37, p. 239-286.
- Kim, K.H. and Nakai, N. (1980) Sulfur isotope composition and isotopic temperatures of some base metal ore deposits, South Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v. 16, p. 124-134.
- Kisch, H.J. (1974) Anthracite and meta-anthracite coal ranks associated with anchimetamorphism and very low stage metamorphism, I, II, III. K. Ned. Akad. Wet. Amsterdam., Proc. Ser. B 77 (2), p. 81-118.
- Kisch, H.J. (1987) Correlation between indicators of very low grade metamorphism. In Frey, M. (ed.) Low temperature metamorphism, Blackie & Son Ltd., Glasgow, p. 227-300.
- Kisch, H.J. (1990) Calibration of the anchizone: A critical composition of illite crystallinity scales used for definition. Journal Metamorphic Geology, v. 8, p. 31-46.
- Koh, Y.K., Choi, S.G., So, C.S., Choi, S.H., and Uchida, E. (1992) Application of arsenopyrite geo-thermometry and sphalerite geobarometry to the Taebaek Pb-Zn (-Ag) deposit at the Yeonhwa I mine, Republic of Korea: Mineralium Deposita, v. 27, p. 58-65.
- Lanson, B., Beaufort, D., Berger, G., Baradat, J. and Lachapagne, J.C. (1996) Illitization of diagenetic kaolinite to dickite conversion series: Late-stage diagenesis of the Lower Permian Rotliegend sandstone reservoir, offshore of the Netherlands. Journal of Sedimentary Research, v. 66, p. 501-508.
- Laplante, R.E. (1974) Hydrocarbon generation in Gulf Coast Tertiary sediments: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 58, p. 1281-1289.
- Lee, Y.I. and Ko, H.K. (1997) Illite crystallinity and fluid inclusion analysis across a Paleozoic unconformity in Central Korea. Clays and Clay Minerals., v. 45, p. 147-157.
- Leeder, M.R. (1982) Sedimentology. George Allen & Unwin, London, 344p.
- Moon, K.J. (1991) Review of skarn ore deposits at the southern limb of the Baegunsan syncline in the Taebaek basin of South Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v. 27, p. 271-292.
- Pollard, D.D. and Segall, P. (1987) Theoretical displacements and stresses near fractures in rocks. In Atkison, B.K. (ed.) Applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surfaces, in fracture mechanics of rocks, Academic Press, London, p. 277-349.
- Pollastro, R.M. and Barker, C.E. (1986) Application of clay mineral, vitrinite reflectance, and fluid inclusion studies to the thermal and burial history of the Pinedale Anticline, Green River basin, Wyoming. In Gautier, D.L. (ed.) Roles of organic matter in sedimentary diagenesis, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists special publication 38, p. 73-83.
- Spear, F.G. (1993) Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Mineralogical Society of American Washington, D.C., 799p.
- Teichmuller, M. (1987) Recent advances in coalification studies and their application to geology. In Scott, A.C. (ed.) Coal and coal-bearing strata: Recent advances, Geological Society Special Publication Classics, London, p. 127-169.
- Weaver, C.E. (1961) Clay minerals of the Ouachita structural belt and the adjacent foreland. In Flaun, P.T., Goldstein, A. Jr., King P.B. and Weaver, C.E. (eds.) The Ouachita Belt, University of Texas Publication. 6120, p. 147-160.
- Yun, S. and Silberman, M.L. (1979) K-Ar geochronology of igneous rocks in the Yeonhwa-Ulchin zinc-lead district and southern margin of Taebaegsan basin. Journal of the Geological Society of Korea, v. 15, p. 89-99.
- Yun, S.T. and So, C.S. (1991) A stable isotope study of the Taebaek Pb-Zn-Ag orebodies at the Yeon-hwa I mine. Proceeding of Annual Symposium, The Korean Institute of Mining Geology, p. 37-55.