

## 삼척탄전 장성일대에 분포하는 하부페름기 장성층 사암의 속성작용

박현미 · 유인창 · 김형식

고려대학교 지구환경과학과

**요 약** : 삼척탄전 장성일대에 분포하는 하부페름기 장성층은 사암, 셰일, 탄질 셰일, 및 석탄층이 교호하는 함탄쇄설성 윤회층이다. 이들 장성윤회층내의 사암에 대한 광물조성과 속성상의 연구를 통해 장성층 사암내 속성작용을 이해하기 위한 퇴적암석학적 연구가 시행되었다. 장성윤회층 사암은 60%의 석영(대부분 단결정질 석영)과 36%의 기질 및 교질물로서 구성되며, 소량(<4%)의 장석, 암편 및 부수광물이 나타난다. 주요 구성광물로서 단결정질 석영과 기질 및 교질물로서 점토광물이 높은 함량을 차지함으로써, 장성층 사암은 석영질 기질 사암으로 분류되며, 일부 암편질 사암이 나타나기도 한다. 또, 장성층 사암에는 다짐작용, 석영과성장 및 점토광물(일라이트, 카올리나이트 및 녹니석)에 의한 교결화작용, 주요 구성광물의 용해 및 2차 공극 형성, 파이로필라이트의 침전 등을 포함하는 일련의 속성광물공생이 관찰된다. 이러한 속성광물공생은 장성사암의 주요구성광물과 지층수 사이에 일어났던 유기 및 무기 기원물의 상호 반응이 만들어낸 결과로 이해될 수 있다. 즉, 장성층 사암과 교호하는 탄질 셰일 및 셰일층의 속성작용으로부터 생성된 Si, Al 및 유기산은 세일수와 함께 사암층내로 이동됨으로써 사암내 지층수를 변화시켰으며 이들 지층수는 사암의 주요구성광물과의 반응으로 사암내 석영과성장 및 카올리나이트, 일라이트 등의 자생 점토광물을 침전시켰다. 또, 파이로필라이트의 형성은 유기-무기 상호반응과 직접적인 관련은 없지만, 장성층 사암내 구성광물과 유기산 및 CO<sub>2</sub>의 반응은 2차 공극을 발달시키고 외부로부터 실리카 풍부한 용액의 유입을 용이하게 함으로써 파이로필라이트의 형성에 간접적인 영향을 준 것으로 판단된다.

**핵심어** : 장성층, 사암의 속성작용, 석영과성장, 점토광물, 셰일

### 서 언

사암의 속성작용은 퇴적 및 조구조의 환경을 반영하는 사암의 광물조성에 영향을 받으며, 단순한 광물조성을 갖는 석영사암(quartz arenite)에서 나타나는 속성작용은 화학적으로 불안정한 광물조성을 갖는 장석사암(arkose)이나 암편사암(lithic arenite)에서 나타나는 속성작용보다 상대적으로 제한된 속성광물 공생을 보인다(Coombs, 1954; Dickinson, 1962; Brown and Thayer, 1963). 이러한 단순 광물조성을 갖는 석영사암에서의 속성작용 연구는 석영의 교결화작용과 다짐작용의 결과로 나타나는 1차공극의 감소에만 주목되어 왔다(Heald, 1950; Siever, 1959). 그러나 속성작용의 결과로 사암내 나타나는 교질물들은 비슷한 광물조성을 보이는 사암이라도 지층의 특성, 지온구배율, 매물심도 및 지층수의 화학성분 등 복합적 요소들의 시·공간상의 분포에 따라 각기 다르게 나타난다(Helmold and Kamp, 1984; Lanson *et al.*, 1996). 유기물 풍부한 셰일이 사암과 교호하는 경우, 셰일의 다짐작용과 셰일의 주구성물인 점토광물의 열축매효과는 유기

물과 점토광물의 속성작용으로 생성된 유기산과 메탈이온을 사암의 지층수로 운반하여 지층수의 화학성분을 변화시키며 사암의 구성 광물들과의 상호반응함으로써 사암내 속성작용을 유도하는 것으로 알려져 왔다(Taguchi *et al.*, 1986).

삼척탄전 장성지역에 분포하는 하부페름기의 장성층은 사암과 셰일 또는 탄질 셰일이 교호하며 지층내 탄층을 협재한다. 이 연구에서는 장성층 사암의 속성산물을 통해 장성층의 속성작용에 대한 메카니즘을 이해하고 속성 광물들의 기원을 고찰하였다. 이를 위해 장성층의 암상을 기재하고 수직층서상 장성층 사암의 광물조성과 화학성분을 검토하였다. 또 장성층 사암의 조성광물들의 산출상 등 암석학적 특징을 기재하였으며 속성기원 자생광물의 종류 및 속성구조, 교질물의 특성, 광물공생 관계 등을 관찰하였다.

### 일반 층서

이 연구의 대상지역은 삼척탄전 남동부에 위치하는 태백시 장성동 일대이다(Fig. 1). 연구지역의 일

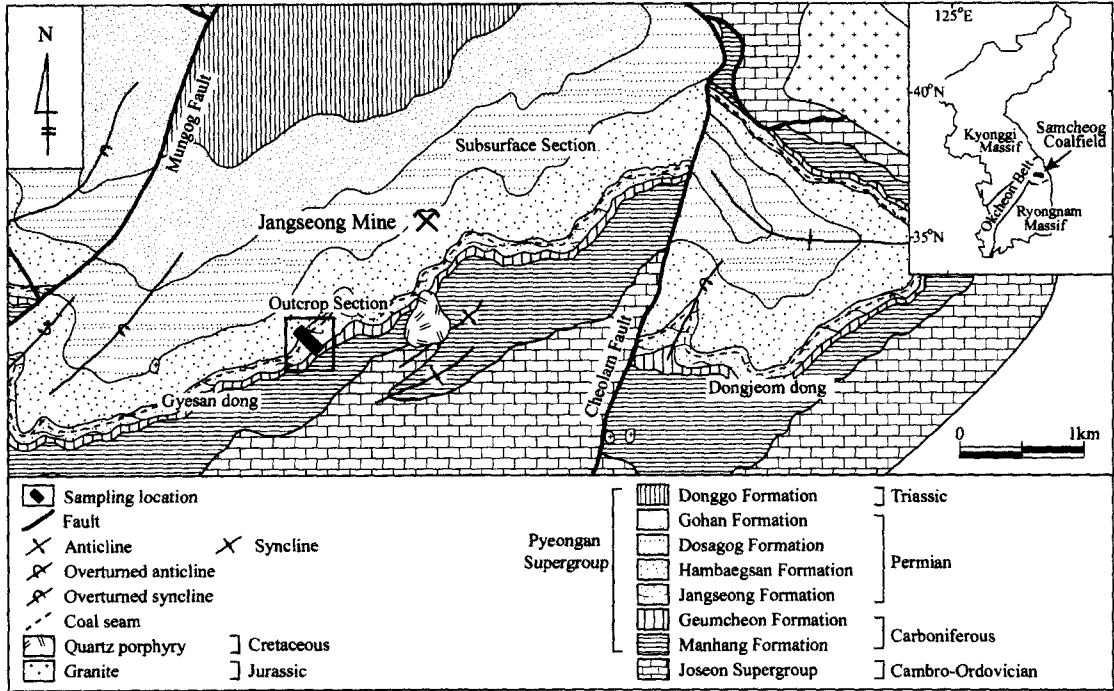


Fig. 1. Geologic map of the study area (from the Geologic Investigation Corps of Taebagsan Region, 1962).

반 층서는 선캠브리아기 변성암복합체를 기반암으로 하여 캄브로-오오도비스기의 조선누층군과 석탄기에서 트라이아스기에 이르는 평안누층군으로 대별된다(Fig. 1). 이들 고생대 지층들은 대체로 북동-남서방향을 주향으로 북경사하여 연구 지역 내에 대상으로 분포하며, 트라이아스기에서 백악기 초에 이르기까지 송림변동, 대보조산운동 등 대규모 구조운동에 의한 단층과 습곡에 의해 심하게 교란되어 있다(Fig. 1).

조선누층군을 부정합으로 피복하는 평안누층군은 하부로부터 석탄기의 만항층과 금천층, 페름기의 장성층, 함백산층, 고한층, 도사곡층 및 트라이아스기의 동고층으로 세분된다(Fig. 1). 특히, 이 연구의 대상층인 하부 페름기 장성층은 삼척탄전내의 주 가행탄층들을 포함하고 있으며, 과거 사동동상부에 해당하는 함탄쇄설성 퇴적층으로서 흑색 조립질 기저사암, 세일, 탄질 세일 및 석탄층을 기본단위로 하는 윤희층들이 수직층서상 네 번(JA, JB, JC 및 JD) 반복되어 나타나는 것으로 해석되어져 왔다(Cheong, 1969; Fig. 2). 최하부(JA) 윤희층은 약 20 m 두께의 층후를 갖는 퇴적층으로서 회색의 조립 사암을 기저로 하여 그 위에 흑색 세일이 놓이는 단위층이 한 두번 반복되며, 극히 일부 박층의

탄층이 협재된다. 두 번째(JB) 윤희층은 암회색의 중립 및 조립 사암을 기저로 하여 그 위에 흑색 세일과 일매 이상의 석탄층이 탄질 세일 또는 흑색 세일에 협재되어 나타난다. JB의 층후는 10~40 m 범위 위로 횡적 변화가 심하며, 두 번째 윤희층의 석탄층(하탄층)이 일부 가행되기도 하나, 지역적으로 JA와 JB의 윤희층이 결층되기 때문에 일반적이지는 않다. 약 50 m의 층후를 가지는 세 번째(JC) 윤희층은 삼척 탄전내 전지역에 걸쳐 가장 뚜렷하게 발달되는 윤희층으로 두꺼운 암회색 역질 사암 및 역암을 기저 사암으로 하여 흑색 세일, 탄질 세일 및 2~5 m 층후의 석탄층(본탄층)이 순차적으로 놓이며 그 위를 두꺼운 흑회색 세일층이 박층의 석탄층(상탄층)을 협재하며 놓인다. 삼척 탄전 전체를 통하여 JC 윤희층의 석탄층이 본탄층으로서 가행되고 있으며, 본탄층 직상부의 세일층내에 아틴스키안(Artinskian)을 지시하는 식물화석이 다량 산출되어진다(Chun, 1985, 1987). 네 번째(JD) 윤희층은 약 20 m의 층후를 가지며 흑색의 중립 및 세립 기저 사암과 박층의 석탄층을 협재한 세일층으로 이루어져 있다. 일부 기저 사암층의 발달이 미약한 경우에는 JD 윤희층 전체가 세일층으로 대표되기도 한다.

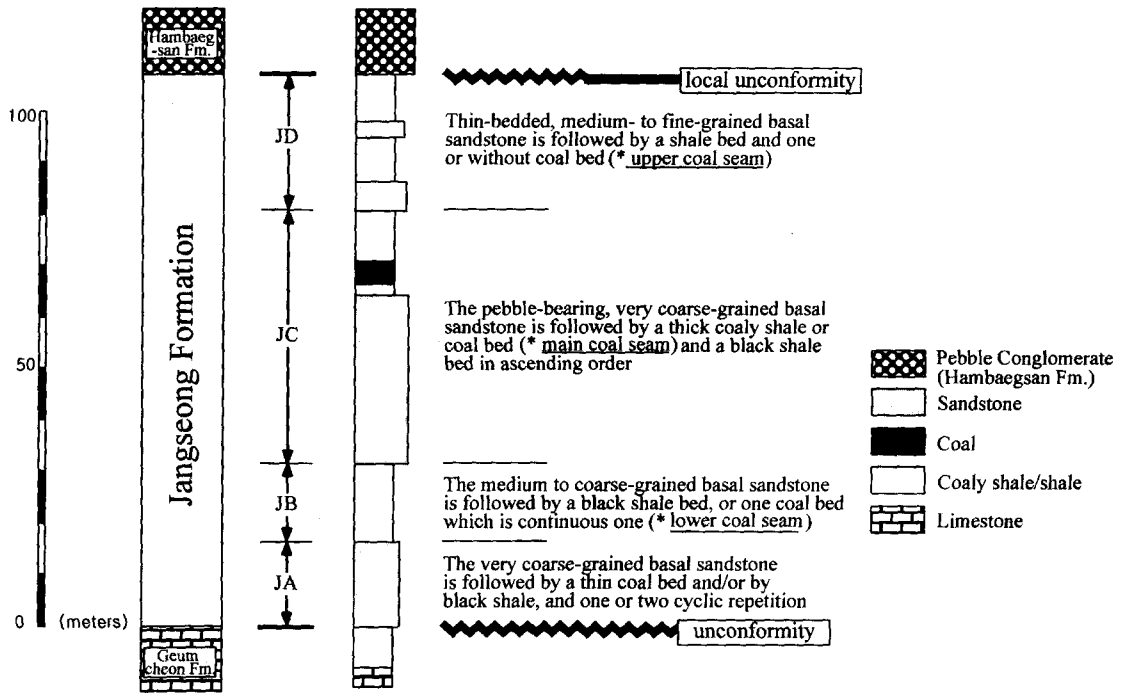


Fig. 2. Type section of the Jangseong Formation (Cheong, 1969). The Jangseong Formation consists of four cyclothem (JA, JB, JC, and JD). Each cyclothem is characterized by vertical repetition of the basal sandstone followed by shale, coaly shale, coal, and shale.

그러나, 수직 층서상 나타나는 윤회층에 의한 지층의 구분 및 이를 기준으로 한 지층의 대비는 공간상에서 일어날 수 있는 퇴적의 다양성을 간과하고 있기 때문에, 퇴적분지 전지역에 걸쳐 일어나는 퇴적 양상 및 층서 관계 등, 실제적 퇴적사를 연구하는데 있어서 장애가 되고 있음이 지적되어 왔다(Wilgus *et al.*, 1988; Galloway 1989; Van Wagoner *et al.*, 1990). 최근에 들어 유인창 외 (1997)는 장성층의 표식 층서에 대한 재검토를 시도하면서 장성층을 하나의 층서적 불연속면에 의해 시간적으로 격리되어진 두 개의 독립된 퇴적계로 해석하였으며, 이를 기준으로 한 삼척탄전 전반에 걸친 새로운 층서 해석의 필요성을 강조하였다.

### 장성층의 정밀 기재

장성층에 대한 층서학적 기재를 재검토하고, 재검토된 층서 단면을 기준으로 장성층 사암들의 광물조성 및 속성작용에 대한 수직 층서상의 변화를 알아보기 위해 장성광업소 후문 계산동에 나타나는 야외 노두에서 장성층을 정밀 기재하였다(Fig. 3). 계산동 단면은 장성광업소 후문쪽 황지천을 따라

나타나는 90 m 두께의 노두로, 하부 금천층과의 경계는 현생 퇴적물에 의해 덮혀 있어 노출되어 있지 않으나, 상한의 경계는 유백색의 조립질 사암인 함백산층에 의해 피복되는 것을 관찰할 수 있다. 장성층은 기저사암, 세일 혹은 탄질세일, 석탄층, 세일 등의 윤회층으로 보고되어 있으나 계산동 단면에서는 사암과 세일이 빈번히 교호되는 양상외에는 뚜렷한 윤회층이 관찰되지 않으며 탄층은 풍화되어 잘 나타나지 않는다.

그러나, 계산동 단면에서의 장성층은 하위로부터 33 m 층위의 탄질세일 위에 극조립질 사암이 나타나는 층준을 경계로 하부와 상부가 뚜렷하게 나뉘어지는 경향을 보인다(Fig. 3). 하부장성층은 세일로부터 상부로 갈수록 암회색의 중립질 사암으로 전이되는 상향조립화의 단위층으로 구성되어 있으며, 사암은 대부분 괴상이나 평행엽층리, 파동엽층리, 평행 및 준평행 층리 등이 나타난다(Fig. 4A). 이에 반해 상부장성층은 하부장성층과는 달리, 조립질사암을 기저로하여 상부로 갈수록 세일 또는 탄질 세일로 전이되는 상향 세립화의 단위층으로 구성되어 있는 특징을 보인다(Fig. 4B). 상부장성층의 기저사암들은 2-4 cm 크기의 역들을 가지며,

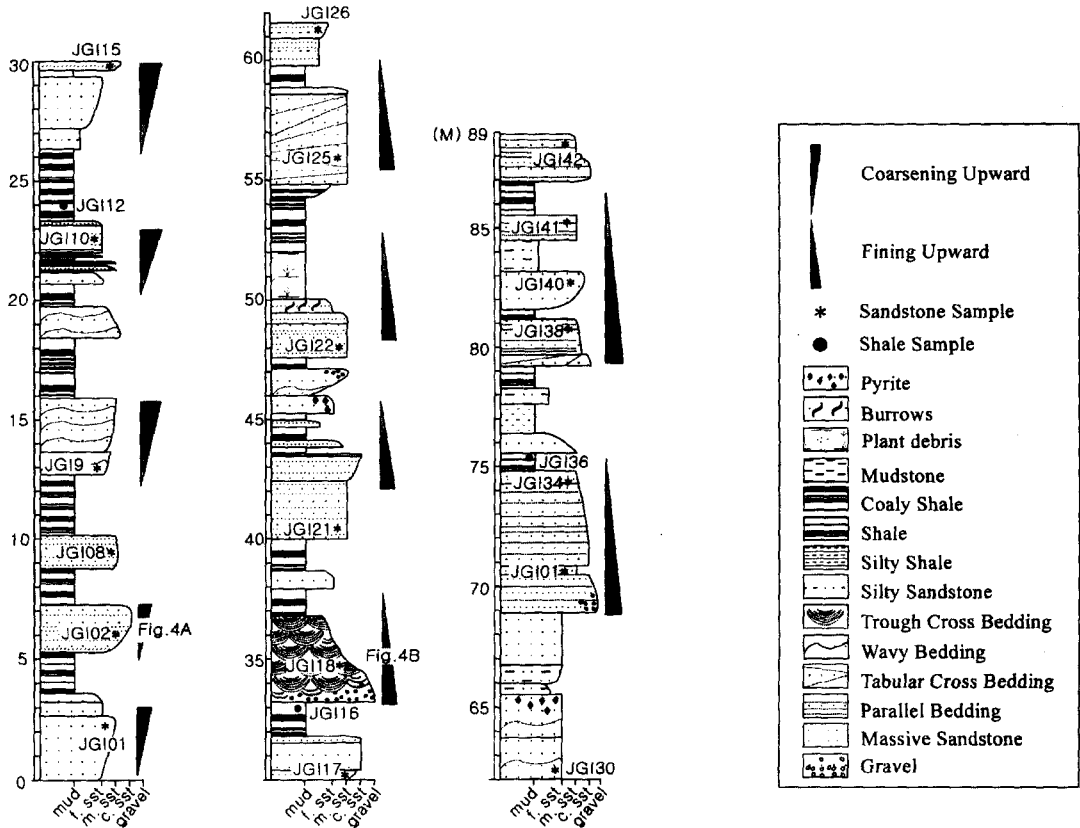


Fig. 3. Measured stratigraphic section at Gyesandong, showing the cyclicity of the Jangseong Formation. Note the stacking pattern change of sedimentary units from coarsening-upward to fining-upward at 33 meter interval.

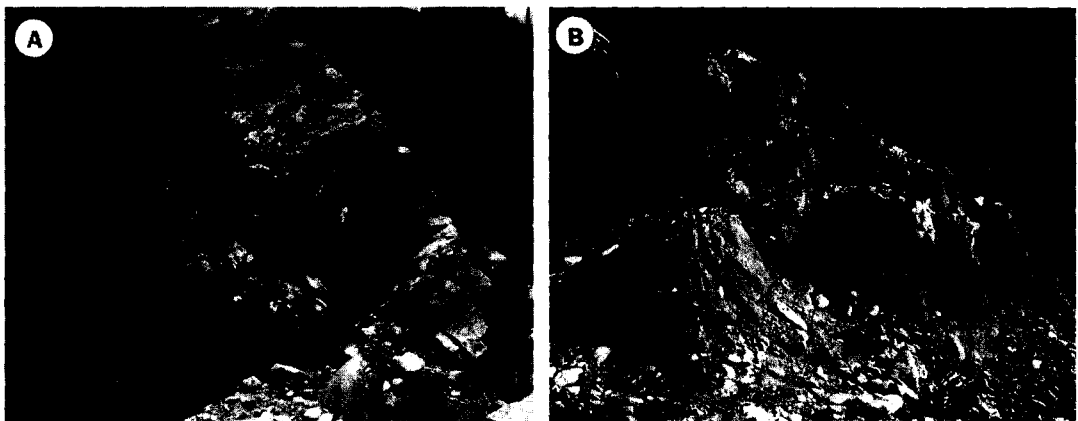


Fig. 4. The outcrop exposure of the Jangseong Formation at Gyesandong along the Hwangji stream near Jangseong Mine. Stratigraphic top is to the right. A) Coarsening-upward unit of the lower Jangseong Formation. The unit is composed of thin- to medium-bedded, fine- to medium-grained sandstones. Individual 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 *Stigmaria*-bearing mudstone and coaly shale. Note the scouring base and lenticular geometry of sandstone beds. Hammer for scale.

기질의 양에 따라 흑색에서 회색 혹은 유백색의 암색을 띤다. 기저사암내에는 10~15 cm 정도의 두께를 가지는 판상의 사층리 및 곡사층리 등의 퇴적구조가 잘 발달되어 있으며(Fig. 4B), 기저사암을 피복하는 흑색 셰일 또는 탄질 셰일층 내에는 *Stigmaria* 및 식물화석이 발견된다.

## 연구 방법

장성층 사암의 퇴적암석학적 연구를 위해 정밀 기재된 계산동 단면을 따라 약 4~5 m 간격으로 층리에 수직인 방향으로 19개의 중립 및 조립질 사암을 채취하였다(Fig. 3). 채취된 사암시료는 박편으로 제작되어 현미경 관찰과 모달 분석을 실시하였으며 모달분석은 Gazzi-Dickinson의 방법에 의해 300개 이상의 점셈(point counting)이 이루어졌다(Table 1). 또한, 사암의 성분 분석을 위해 12개 시료에 대해서는 X선 형광분석(XRF)을 병행하였다(Table 2).

점토광물동정을 위해 19개의 사암과 4개의 셰일 시료에 대한 X선 회절분석(XRD)을 수행하였

다. 각 시료는 삼투막 투과 방법(millipore filter transfer method)과 유리 슬라이드 방법(glass slide method) 등을 이용하여 정방위시료(oriented mount)로 만들었다. 정방위 시료에 대해 2~35°2 $\theta$  까지 2 degree/min으로 X선을 투사하여 점토광물 회절 결과를 얻었다. 구별하기 곤란한 점토광물을 위해 일부 시료는 550°C에서 1시간 열처리 후 다시 X선을 투사하였다. X선 회절 분석 기기는 Rigaku RINT 1200 회절기(diffraction)이며 40 kV, 20 mA에서 Ni-filtered CuK 선을 이용하였다. 또 일부 박편에 대해서는 박편에 직접 X선을 투사하여 광물을 인지하는 M-XRD를 수행하였다.

점토광물 및 속성공생 광물들의 정밀 감정을 위해 사암에 대한 주사전자현미경(SEM; scanning electron microscopy) 분석을 실시하였다. 가능한 오염되지 않은 신선면을 약 1 mm 크기의 작은 조각으로 깨어 내어 SEM 시료판(specimen plung)에 붙이고 하루정도 건조시킨후 JFC-1100E를 사용하여 약 200 Å 두께로 금코팅을 하였다. 이용 기기는 JEOL JSM-5310LV이며 20 kV 및 25 kV의 가속전압으로 관찰하였다.

**Table 1.** Modal analysis of the Jangseong sandstones in the Jangseong area.

Sample No.	Framework grains							Matrix and cement				Total
	Qm	Qp	F	Lv	Lm	Ls	Micas	Acc.	Matrix	Clay	Quartz	
JG101	45.8	1.3	0.0	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	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	0.0	1.0	1.0	2.6	13.3	23.7	100.0
JGI08	78.9	0.0	0.6	0.6	0.6	0.0	0.3	4.5	0.0	1.3	14.3	100.0
JGI10	54.5	26.0	0.0	0.0	0.0	0.3	2.6	0.3	2.6	7.5	6.2	100.0
JGI15	61.0	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.6	14.9	5.8	100.0
JGI17	56.5	2.6	0.0	0.0	1.3	0.0	0.6	0.0	23.1	9.1	6.8	100.0
JGI18	49.7	18.2	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.3	8.4	12.3	10.4	100.0
JGI21	55.0	16.3	0.0	0.0	1.6	0.0	0.3	0.0	9.1	15.3	2.3	100.0
JGI22	64.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	9.4	12.0	13.3	100.0
JGI25	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	13.3	23.4	100.0
JGI26	64.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	5.8	23.1	100.0
JGI30	54.5	2.6	0.0	0.0	0.0	1.0	2.6	1.0	14.3	18.2	5.8	100.0
JGI32	56.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	18.2	7.8	100.0
JGI34	47.4	2.3	4.5	4.5	4.5	1.3	0.6	0.0	31.5	10.4	1.9	100.0
JGI38	57.1	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	7.1	100.0
JGI40	68.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.3	1.3	21.3	5.0	100.0
JGI41	46.1	25.0	0.0	0.0	1.6	11.4	0.3	0.6	0.3	13.3	1.3	100.0
JGI42	53.0	1.3	0.0	0.0	6.2	1.3	3.2	0.6	10.7	6.8	16.9	100.0

Qm=monocrystalline quartz, Qp=polycrystalline quartz, F=feldspar, Lv=volcanic rock fragment, Lm=metamorphic rock fragment, Ls=sedimentary rock fragment, Acc.=accessory minerals

Table 2. Major element composition of the Jangseong sandstones in the Jangseong area.

Unit : wt%

Sample	Jangseong formation												Pettijohn(1963)			
	JGI01	JGI02	JGI08	JGI09	JGI15	JGI17	JGI18	JGI22	JGI34	JGI40	JGI41	JGI42	QA	LA	GW	AR
SiO <sub>2</sub>	80.76	79.61	89.76	86.01	93.43	97.55	82.69	94.12	89.37	92.55	85.63	84.20	95.40	66.10	66.70	77.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.25	15.76	4.20	4.77	3.30	2.17	8.42	3.52	6.14	5.55	11.60	5.83	1.10	8.10	13.50	8.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	0.43	0.18	0.38	3.38	0.29	0.20	2.93	0.35	0.94	0.65	0.37	4.47	0.60	5.20	5.10	2.20
TiO <sub>2</sub>	0.89	1.23	0.91	0.54	0.03	0.08	0.39	0.04	0.22	0.07	0.16	1.82	0.20	0.30	0.60	0.30
MnO	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.24	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	1.40	3.50	0.70
MgO	0.10	0.01	0.11	0.49	0.03	0.04	0.47	0.08	0.12	0.08	0.04	0.95	0.10	2.40	2.10	0.50
CaO	0.02	0.06	0.03	0.04	0.03	0.02	0.06	0.03	0.03	0.05	0.01	0.02	1.60	6.20	2.50	2.70
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.10	0.90	2.90	1.50
K <sub>2</sub> O	0.91	0.00	0.70	1.44	0.78	0.13	1.99	0.84	1.20	0.02	0.01	0.61	0.20	1.30	2.00	2.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.14		0.10	0.20	0.10
L.O.I	3.39	3.02	1.35	1.79	1.89	0.57	2.00	1.19	1.70	1.17	2.27	1.83				
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.10	5.05	21.37	18.03	28.31	44.95	9.82	26.74	14.56	16.68	7.38	14.44	86.73	8.16	4.94	8.86

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* : Total Fe, L.O.I.=Loss on ignition

QA=quartz arenite, LA=lithic arenite, GW=graywacke, AR=arkose

### 사암의 조성

#### 박편 관찰 및 모달 분석

장성층 사암들의 주요 구성광물/framework minerals)은 석영 및 암편이며 부수광물로서 소량의 정장석과 운모, 전기석, 클리노조이사이트, 스피, 저어

콘 및 황철석 등이 나타난다(Fig. 5). 모달분석 결과에 의하면, 장성층 사암은 주요구성광물이 64%, 기질 및 교질물이 36% 로(Table 1), Dott(1964)의 사암 분류에 따르면 석영질 기질 사암(quartz wacke)에 해당되며 일부 암편질 사암이 나타나기도 한다(Fig. 6). 세립에서 조립까지 다양한 입도를 보이는 장성층 사암의 분급도는 대체로 불량하며, 낮은 원마도와 구

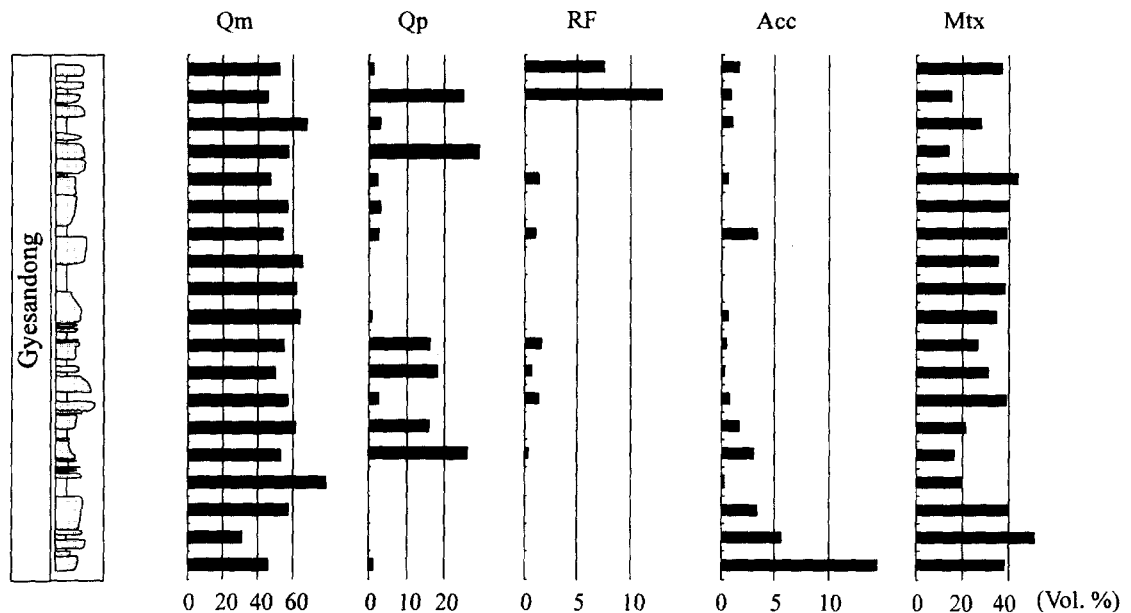


Fig. 5. Relative abundance of framework minerals and matrix from the Jangseong sandstones. Qm: monocrystalline quartz, Op: polycrystalline quartz, RF: rock fragments, Acc: accessory minerals, Mtx: matrix and cement.

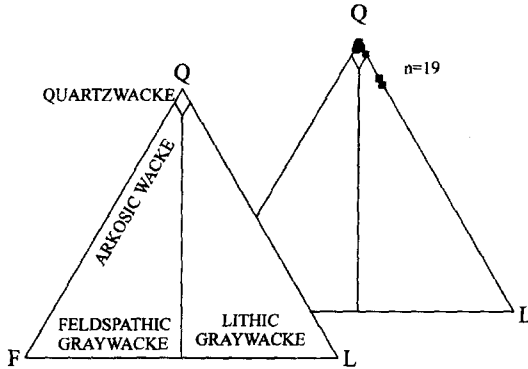


Fig. 6. QFL plot of the Jangseong sandstones. Most Jangseong sandstones are classified as quartzwackes according to the scheme of Dott (1964), but lithic graywackes also occur.

형도를 갖는다

장성층 사암의 주요구성광물 중 석영은 31~87%로 상당히 우세하게 나타나며, 대부분 단결정 석영이나, 일부 복결정 석영도 포함된다. 단결정 석영은 대부분 직소광 또는 약한 파동소광을 보이며, 복결정 석영은 모자이크 구조와 좌우로 길게 신장된 구조가 나타난다. 암편은 최고 13%까지 나타나며 평균 0.6%를 점유한다. 그 중 석영-백운모 편암, 천매암 및 규암 등의 변성암편이 60%이고, 쳐트 및 이암 등의 퇴적암편이 40%를 차지한다. 석영-백운모 편암의 암편은 신장된 석영과 석영사이에서 운모들이 휘어진 형태로 관찰되며 입도는 약 0.5~0.8 mm 이다. 쳐트와 이암의 암편은 1 mm 내외의 크기를 가지며 암편 입자의 경계는 불명확하여 기질과의 구별이 용이하지 않다. 장석은 단지 2개의 시료에서만 정장석으로 발견되었으며 모두 견운모로 변질되어 있다. 운모는 전체 성분의 1.5%를 차지하며 대부분 백운모이다. 중광물은 주로 갈색 또는 옅은 녹색을 띠는 전기석이며 방사형 소광을 보여주는 클리노조이사이트, 스피넬, 저어콘도 일부 나타난다. 불투명 광물로는 2 mm 크기의 조립질 황철석이 자형으로 산출된다.

### X선 형광분석

장성층 12개의 사암시료에 대한 X선 형광분석을 수행하고 분석결과를 Pettijohn(1963)의 사암 성분 분류표와 비교하였다(Table 2). 장성층 사암은 전반적으로 석영사암보다는 화학적 성숙도가 떨어지며 그레이와크(graywacke) 혹은 암편사암보다는 높은 성숙도를 보여주고 있다(Table 2). 화학적 성

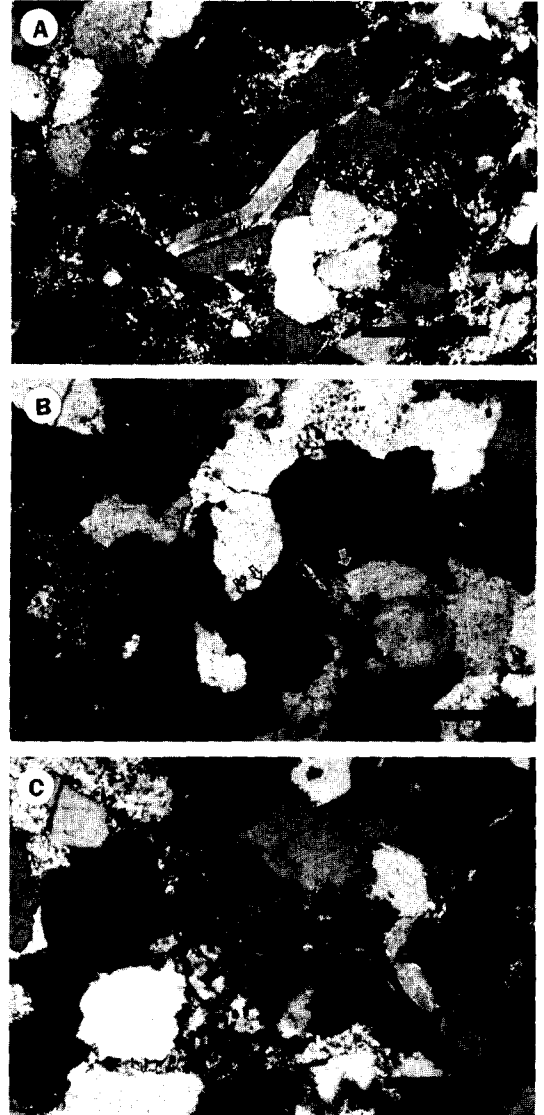


Fig. 7. Thin-section photomicrographs of the Jangseong sandstones, showing compactional features. A) Muscovite (m) is strongly deformed between adjacent quartz grains. Scale bar=1 mm. B) Quartz (q) grain boundaries are characterized by long contact and concave-convex contact (arrow). Scale bar=1 mm. C) Lithic fragment have deformed plastically and flowed into intergranular pore space to form pseudomatrix. Scale bar=1 mm.

숙도는  $\text{SiO}_2$  함량 혹은  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 함량으로 알 수 있는데 장성층 사암에서 이들 성분은 석영사암에 가장 가깝게 나타난다. 그러나,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와  $\text{K}_2\text{O}$  성분은 석영사암에서의 성분보다 전반적으로 높게 나

타남으로써 기질내 점토광물 함량이 높음을 보여준다. CaO는 어떤 종류의 사암보다도 낮게 나타나는데 실제 현미경 관찰에서 탄산염광물이나 탄산염교결물이 나타나지 않는 것과 잘 일치한다.  $Fe_2O_3$ 와 MgO의 함량은 퇴적암에서 적철석, 황철석, 휘석, 각섬석, 흑운모 등의 유색광물들과 관련이 있다. 장성층 사암의 현미경 관찰에서 황철석, 적철석, 흑운모가 소량 발견되며 X선 형광분석결과에서 역시,  $Fe_2O_3$ 와 MgO 함량은 낮게 나타났다. 그러나  $Fe_2O_3$ 와 MgO 함량은 석영사암보다는 약간 높은 함량을 보이며 Na<sub>2</sub>O 성분은 거의 나타나지 않는다. SiO<sub>2</sub> 함량 변화에 따른 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO의 함량 변화에서, SiO<sub>2</sub>의 함량이 변함에 따라 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량은 작아지는 경향이 있으나 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 MgO는 SiO<sub>2</sub>의 함량 변화에 별 영향을 받지 않고 낮게 나타남으로써 장성층 사암이 석영사암에 가까운 석영질 기질 사암임을 보여준다.

### 기원암

모달분석에서 장성층 사암은 높은 석영함량, 압편과 장석의 부족 등 광물학적으로 높은 성숙도를 보여준다. 또한 X선 형광분석 결과에서 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O 성분의 함량은 높았으며 Na<sub>2</sub>O, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO 함량은 낮았다. 이 두 실험결과에 의하면, 장성층 사암은 광물학적으로 높은 성숙도를 보여주며 퇴적물의 광물조성상 석영질 기질 사암에 해당하지만, 일부 압편질 사암이 나타나기도 한다. 구성입자들의 원마도나 구형도 및 분급도 등 조직적 성숙도는 높지 않게 나타남으로써 기원지로부터 퇴적물의 이동거리는 멀지 않았음을 지시한다. 따라서, 장성층 사암에서의 모달분석과 X선 형광분석을 통한 화학성분으로 볼 때, 장성층 사암의 높은 광물학적 성숙도는 퇴적물의 먼거리 이동 혹은 속성작용에 의한 것이라기 보다는 기원지로부터 공급된 퇴적물의 광물학적 단순성에 기인한다고 볼 수 있다. 따라서, 장성층 사암의 기원암은 석영질 사암이었을 것으로 판단되며 이는 Yu *et al.*(1997)의 평안누층군의 하부지층들의 기원암이 장석을 포함하지 않은 석영질 사암 혹은 규암으로 추정된 것과 같은 결과로 해석될 수 있다.

## 사암의 속성작용

### 속성상

#### 다짐작용

장성층 사암에서 다짐작용은 운모와 압편 및 석

영입자에서 관찰된다. 운모는 석영입자 사이에서 휘어지거나 꺾여서 나타나며(Fig. 7A), 석영입자들은 장접촉 혹은 요철접촉으로 나타난다(Fig. 7B). 이암 및 편암압편들은 연성변형을 일으켜 원래의 압편의 형태를 유지하지 못하며 붕괴되어 가기질(pseudomatrix)을 형성하기도 한다(Fig. 7C).

### 석영의 교결화작용

장성층 사암에서 석영의 교결화작용은 석영 과성장(quartz overgrowth)으로 나타나며 석영 과성장 은 모달분석 결과에 의하면 전체성분의 약 7%를 점유한다(Table 1). 석영입자와 석영 과성장은 함께 소광하는 광학적 연속성이 나타나므로, 이들의 구분은 석영입자의 가장자리에 나타나는 검은테(dust rim)에 의해 구분할 수 있다(Fig. 8A, 8B).

### 점토광물의 교질화작용

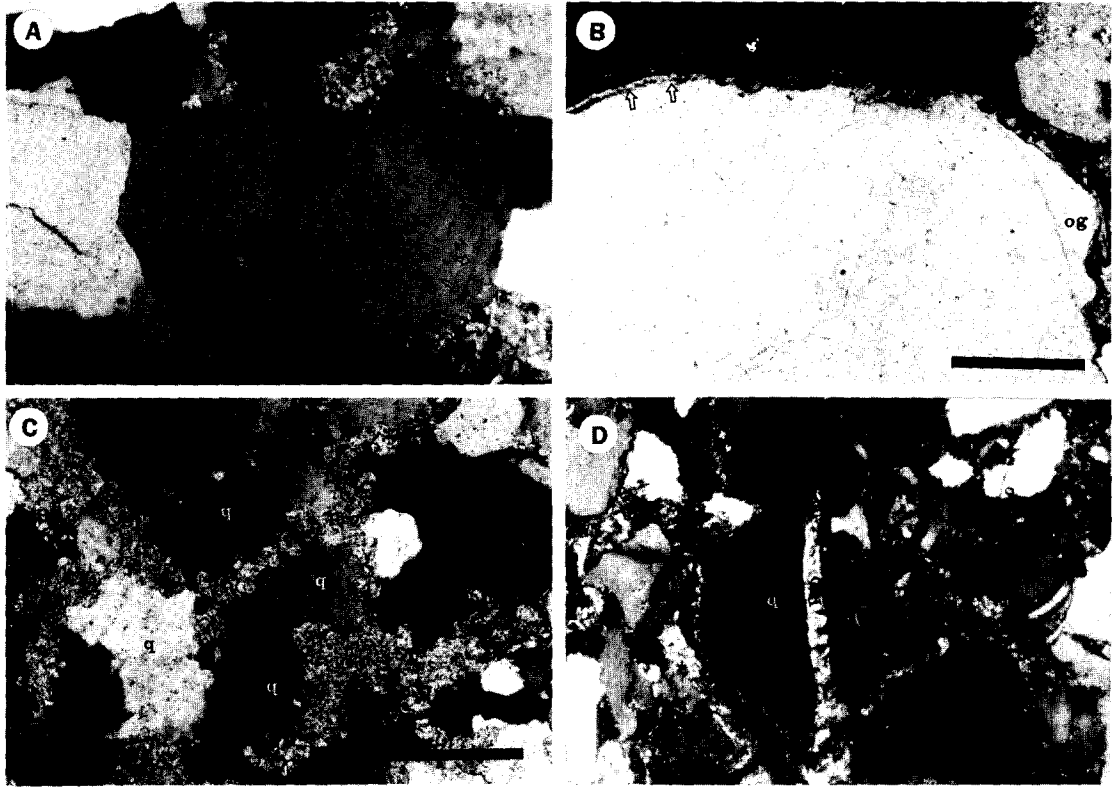
현미경하에서 자생 점토광물은 석영입자의 주위를 둘러 싸고 있는 림(rim)상이나 공극 충전(pore filling)상으로 관찰된다(Fig. 8B, 8C, 8D). 이들 점토광물의 동정을 위하여 X선 회절분석과 SEM 분석을 실시하였다. X선 회절분석에서 인지된 장성층 사암의 점토광물은 일라이트, 카올리나이트, 파이로필라이트 및 소량의 녹니석 등이다(Fig. 9). 이들 점토광물들은 수직 층서상의 함량분포에서 특별한 경향을 보여주지 않으나, 상대적 함량은 일라이트와 파이로필라이트가 높게 나타난다.

XRD 피크에서 일라이트는 결정도가 상당히 좋을 보여준다(Fig. 9). 또한 10.0 Å 피크는 장성층 하부에서 상부까지 8.7° 2θ로 일정하게 나타난다. 이러한 일라이트의 높은 결정도와 10.0 Å 피크의 위치는 장성층 사암에는 일라이트와의 혼합형 점토광물이 존재하지 않음을 의미한다. 석영입자 주위의 림상의 교결물로 나타나는 점토광물은 상당히 높은 복굴절을 가지기 때문에 일라이트인 것으로 추정되며, 대부분 용해작용의 흔적이 나타난다. 현미경 관찰에서 석영을 둘러 싸고 있는 이들 림상의 점토광물들은 인접 석영입자에 의해 잘려져 있는 형태가 관찰되었는데 이는 림상의 점토광물의 생성 후에도 다짐작용이 계속되었음을 보여준다(Fig. 8B). 일부, 장성층 사암에서 카올리나이트가 공극충진상으로 인지된다(Fig. 10). 카올리나이트는 전형적인 책구조(book structure)를 보여주며 직경은 약 10 μm이다(Fig. 10).

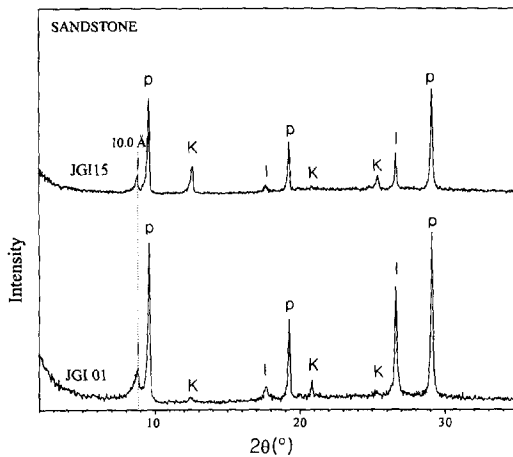
### 용해작용 및 2차 공극의 충전

장성층 사암에서 용해작용은 석영입자와 공극충





**Fig. 8.** Thin-section photomicrographs of the Jangseong sandstones, showing quartz overgrowth, clay rim cement, and clay pore-fills. A) Quartz overgrowth (og) with dust ring (arrow). Scale bar=0.5 mm. B) Clay rim cement (arrows) and quartz overgrowth (og). Clay rim cement is cut by adjacent quartz grain. Scale bar=1 mm. C) Pyrophyllite (pro) fills secondary pore space that formed by dissolution of quartz grains. Note the dissolved grain boundaries of quartz grains (arrows). Scale bar=0.5 mm. D) Fracture-filled pyrophyllite clay (pro). Faint medial suture line within the fracture implies that pyrophyllite grow inward from walls of fracture. Scale bar=1 mm.



**Fig. 9.** Representative XRD pattern of the air dried  $<2 \mu\text{m}$  fraction of the Jangseong sandstones. The  $10 \text{ \AA}$  peak of illite shows the high sharpness without shifting. I; illite, P; pyrophyllite, K; kaolinite, Q; quartz.

진상의 점토광물 사이에서 볼 수 있다. 석영입자들의 가장자리는 용해되어 있으며 그 자리에 점토광물이 충전되어 나타난다(Fig. 8C). 숙성작용동안 석영의 용해작용은 장성층내 2차 공극을 생성시켰으며, 2차 공극은 새로운 점토광물로 충전되었다. 2차 공극충진 물질은 X선 회절분석을 통해 파이로필라이트임이 확인되었으며(Fig. 9), 이는 기존의 카올리나이트가 석영의 용해작용으로 생성된 실리카 또는 외부로부터 유입된 실리카가 풍부한 용액과의 반응으로 파이로필라이트를 형성시킨 것으로 보여진다.

파이로필라이트는 점토광물의 용해작용에 의한 2차 공극외에 열극(fracture)에서도 발견된다(Fig. 8D). 장성층 사암에는 기질, 혹은 석영 입자를 가로질러 많은 열극이 발달되어 있으며 이들 열극들도 파이로필라이트로 충전되어 있다(Fig. 8D).

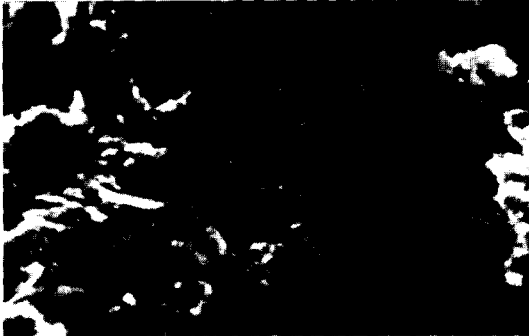


Fig. 10. SEM photomicrograph of the booklet type pore-filling kaolinite. Scale bar=20 μm O; quartz overgrowth, K; Kaolinite.

**기타 속성작용**

장성층 사암의 기타 속성작용으로는 탄질화작용(coalification)이 나타난다. 장성층 사암의 탄질물은 점토광물의 교결물질과 유사한 부동구조(floating texture)를 보여 주며 공극을 메우고 있다. 이것은 유기물이 기질과 함께 채워져 있다가 속성작용동안 유기물의 탄질화작용이 일어나면서 생성된 것으로 보이며, 0.5 mm 이상의 조립질 황철석이 자형으로 산출된다. 황철석은 모든 속성상을 가로질러 나타남으로써 가장 후기에 침전된 것을 알 수 있다.

**속성공생**

장성층의 사암에서는 다짐작용, 석영의 교결화작용, 점토광물의 교결화작용, 점토광물의 용해작용 및 파이로필라이트에 의한 2차 공극 및 열극충진작용, 황철석 형성 등의 속성상이 관찰된다. 박편관찰과 X선 회절분석 및 SEM 분석을 토대로, 이들 속성작용의 상대적 선후 관계에 따라 속성공생을 도시하였다(Fig. 11). 장성층 사암에는 다짐작용이 광범위하게 나타나며 초기 속성작용 동안에 석영 과성장이 있었다. 이후 점토광물이 립상 및 공극충진상으로 나타나며, 매몰심도가 증가하고 속성작용이 진행되면서 점토광물의 용해작용이 있은 후, 이에 따른 2차 공극이 형성되었다. 용해작용에 의한 2차 공극과 열극의 발달 후에는 파이로필라이트의 충진작용이 있었던 것으로 판단된다.

**토 의**

장성층 사암에서 가장 먼저 생성된 자생광물은 석

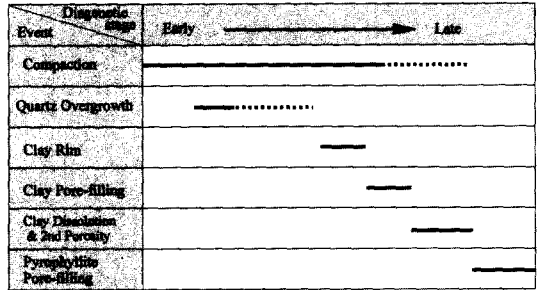
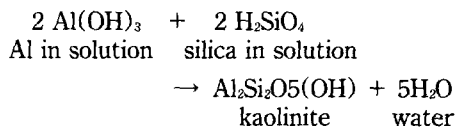


Fig. 11. Generalized paragenetic sequence of the Jang-seong sandstones.

영입자 주위로 과성장된 석영이다(Fig. 8A, 8B). 사암내 교결물질로 나타나는 석영의 기원은 장석의 변질작용과 용해작용(Hawkins, 1978), 탄산염 광물의 실리카 광물로의 치환작용(Walker, 1960), 화산유리질 실리카의 용해작용(Fuchtbauer, 1974), 압력용해작용(Waldschmidt, 1941; Bjorykke and Egeberg, 1993; Dutton, 1993; Walderhaug, 1994), 점토광물의 변이시 방출되는 실리카(Siever 1962; Hower *et al.*, 1976; Boles and Franks, 1979) 등의 무기기원 실리카와, 사암층과 교호하는 셰일 또는 탄층으로부터 유래된 유기기원의 실리카로 알려져 있다(Ruppert *et al.*, 1985; Davies, *et al.*, 1984). 장성층 사암에는 탄산염 광물이나 장석 및 화산암편, 화산 유리질 물질 등이 포함되어 있지 않기 때문에 이들 광물의 변질 혹은 용해작용에 의한 실리카는 장성층 사암내의 과성장된 석영의 기원물로 기대할 수 없다. 또한, 장성층 사암에서 압력용해작용은 일부 인지되나, 모두 석영 과성장 이후에 나타나기 때문에 압력용해작용시 방출된 실리카만으로 장성층 사암의 과성장된 석영의 기원을 설명하기 힘들다. 따라서 장성층 사암에서 초기 속성작용 동안 있었던 과성장된 석영의 기원은 장성층 사암의 단순한 광물조성 및 장성층이 탄층과 셰일을 협재하는 지층이라는 점에서 셰일로부터 유래된 유기기원 실리카와 속성작용에 따른 점토광물의 전이로부터 방출되는 무기기원의 실리카라고 추정되어 질 수 있다.

장성층 사암의 SEM 관찰에서는 자생의 카올리나이트가 인지된다(Fig. 10). P<sub>h</sub> 조건이 중성정도가 가까울 때 전형적인 카올리나이트의 반응식은 다음과 같다.



상기식에 의하면, 카올리나이트가 침전하기 위해서는 알루미늄 이온의 공급을 필요로 한다. 장석 부재의 장성층 사암에서 가장 논리적인 알루미늄의 공급원은 암편과 점토광물이다. 장성층 사암에는 속성작용에 의해 파괴된 암편인 가기질이 발견되며, 일부 점토광물과 암편의 용해작용이 인지된다 (Fig. 7, 8). 이러한 용해작용은 카올리나이트의 형성에 필요한 알루미늄 이온을 지층수내로 공급하였을 가능성을 시사한다. 또, 셰일 혹은 탄층내 유기물은 실리카 외에 알루미늄 이온도 포함하기 때문에 (Ruppert *et al.*, 1985) 장성층 사암과 교호하는 셰일 혹은 탄층도 알루미늄의 공급원일 가능성이 있다. 일반적으로 알루미늄은 그 자체로는 이동성이 없지만, 유기산과 함께 존재할 경우 유기산에 흡착되어 착화합물을 상태로 이동할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Surdam *et al.*, 1984; Moncure *et al.*, 1984). 유기물이 풍부한 셰일에서 속성작용이 진행되면, 유기물은 분해되어 유기산과 CO<sub>2</sub> 가스를 생성시키며 이들은 셰일의 주요 구성성분인 점토광물이 속성작용에 의해 방출한 셰일수와 함께 다짐 작용 혹은 열팽창 등에 의해 사암내로 이동된다 (Dickinson, 1953; Barker, 1972; Taguchi *et al.*, 1986). 유기산과 CO<sub>2</sub> 가스는 지층수와 사암내 주요 구성광물들과의 반응을 촉진시키며 유기산에 의해 운반된 메틸이온은 사암의 공극 내 카올리나이트 등의 새로운 광물로 침전된다 (Edman and Surdam, 1986). 장성층 사암의 공극을 메우고 있는 탄질물은 장성층에서 이미 유기산의 방출이 있었음을 지시하며 장성층의 셰일에 대한 XRD 분석결과는 일라이트, 카올리나이트, 파이로필라이트, 녹니석 등의 사암과 동일한 점토광물 조성을 보여줌으로써 장성층 사암과 셰일이 상호 성분 교류가 있었음을 간접적으로 보여준다 (Fig. 12).

카올리나이트가 존재하는 환경에 K<sup>+</sup> 이온이 공급된다면 자생의 일라이트가 침전될 수 있다 (Bjorlykke and Aagaard, 1992). 만일, 일라이트와 카올리나이트가 같은 환경조건에서, 유사한 시기에 생성되었다면 K<sup>+</sup> 이온의 공급원은 카올리나이트와 마찬가지로 암편과 점토광물의 용해작용 및 셰일수로부터 기원할 수 있다. 그러나, K<sup>+</sup> 이온은 퇴적층내 새로운 용액의 유입시 이동 가능하므로 외부로부터의 유입 가능성도 고려할 수 있다.

장성층 사암의 현미경관찰에서 파이로필라이트는 가장자리가 용해된 석영입자들 사이 및 열극내에서 공극충진상으로 발견된다 (Fig. 8C). 파이로필라이트는 카올리나이트와 실리카의 반응으로 생성

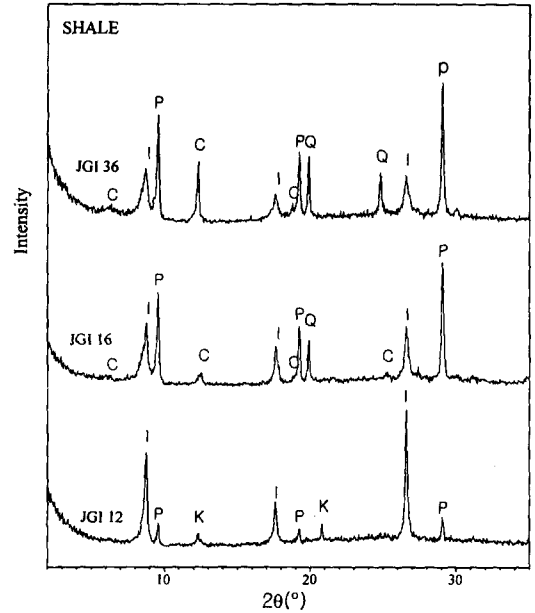
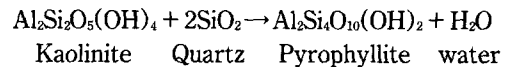


Fig. 12. Representative XRD pattern of the air dried  $< 2 \mu\text{m}$  fraction of the Jangseong shales. I; illite, P; pyrophyllite, K; kaolinite, C; chlorite, Q; quartz.

된다 (Tomson, 1970).



파이로필라이트를 형성시킨 카올리나이트의 기원물은 이미 생성된 자생의 카올리나이트로 생각되어 질 수 있다. 그러나 장성층 사암과 셰일의 XRD 결과에서 나타나는 파이로필라이트의 높은 강도는 파이로필라이트의 상대적 함량이 점토광물 중에서 가장 높음을 지시하며, 이렇게 높은 파이로필라이트의 함량은 장성층 사암에는 자생의 카올리나이트와 함께 쇄설기원의 카올리나이트도 상당량 포함되어 있으리라는 추측을 하게 한다 (Fig. 9, 12). 또, 파이로필라이트의 산출상은 실리카의 기원에 있어 두 가지 가능성을 제시해 준다 (Fig. 8C). 첫째로는 가장자리가 용해된 석영입자로부터 장성층 사암의 주요 구성광물의 용해작용에 의해 방출된 지층수내 실리카이며 둘째로는 열극 충전상의 파이로필라이트로부터 외부 용액의 침투시 운반된 실리카를 고려할 수 있다. 연구지역의 인근에 나타나는 많은 화성암의 관입암체와 계산동 단면에서 장성층내 발견되는 석영 세맥, 그리고 현미경 관찰에서 가장 후기에 생성된 2 mm 크기의 조립질 황철석은 외부로부터 열수의 유입을 지시하며 이러한 열수는 장성층

사암내로 실리카를 운반해옴으로써 파이로필라이트를 생성시켰을 것으로 판단된다. 그러므로 파이로필라이트의 형성은 상기에 언급한 유기-무기 상호 반응과 직접적인 관련은 없는 것으로 보이며 다만, 장성층 사암내 구성광물과 유기산 및 CO<sub>2</sub>의 작용은 2차 공극을 발달시킴으로써 외부로부터 유입된 실리카 풍부한 용액을 장성층 사암내로 용이하게 침투시키는 간접적 역할을 하였을 것으로 사료된다.

장성층 사암에서 자생광물의 기원물질에 대한 이해는 장성층 사암의 조성과 셰일층과 교호하는 사암의 특징으로부터 추론한 것이므로, 자생 광물의 정확한 기원물질 및 유기물의 역할에 대한 규명을 위해서는 안정동위원소 분석, 전자 현미분석, 부정방위 시료에 대한 XRD 분석 등 보다 정밀한 실험방법이 수행되어야 하며, 아울러 유기물과 무기물의 상호작용에 의한 자생광물의 생성반응은 연구지역의 지열사(geothermal history)와 연관지어 충분히 논의되어야 할 것이다.

## 결 론

모달분석에서, 장성층사암의 평균 광물조성은 60%의 석영과 점토광물의 기질 및 36%의 교결물로 구성되며, 장석, 암편, 부수광물등이 4% 이하로 소량 나타난다. 또한 X선 형광분석에서, 장성층사암은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O 성분의 높은 함량과 Na<sub>2</sub>O, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO 성분의 낮은 함량을 보여 준다. 이와 같이 장성층 사암은 석영의 높은 함량 및 기질 및 교결물로 나타나는 점토광물의 우세에 의해 퇴적물의 광물조성상 석영질 기질 사암으로 분류되며 일부 암편질 사암이 나타나기도 한다. 또, 자생광물과 교결물과의 조직적 관계에 의하면 장성층 사암은 다짐작용, 석영과성장 및 점토광물에 의한 교결화작용, 구성입자광물의 용해 및 2차 공극 형성, 파이로필라이트의 침전 등을 포함하는 일련의 속성광물공생이 나타난다. X선 회절분석을 통해 확인된 장성층 사암내 점토광물은 카올리나이트, 일라이트, 파이로필라이트 및 소량의 녹니석이며 셰일에서도 같은 조성의 점토광물이 인지된다.

장성층 사암의 광물조성 및 탄층과 셰일, 사암 등이 교호하는 장성층의 암상을 고려해 볼 때, 장성층 사암에서 나타나는 속성광물공생은 사암의 주요 구성광물과 지층수 사이에 일어났던 유기물과 무기물의 상호 반응이 속성단계를 거치면서 만들어낸 결과로 해석되어 질 수 있다. 즉, 장성층 사암과 교호하는 탄질 셰일 및 셰일층의 속성작용으로부터 생

성된 실리카와 알루미늄 및 유기산은 셰일수와 함께 사암층내로 이동됨으로써 사암내 지층수의 성분을 변화시켰으며 이들 지층수는 사암의 주요구성광물과의 반응으로 사암내 석영과성장 및 카올리나이트, 일라이트등의 자생 점토광물을 침전시켰다. 파이로필라이트의 열극충진 구조와 조립질 황철석의 출현 및 야외노두에서 장성층 사암내의 석영세맥 등은 외부로부터 열수의 유입을 지지하며, 파이로필라이트는 이러한 실리카 풍부한 열수와 카올리나이트의 반응으로 생성되었기 때문에 유기-무기상호 반응과 직접적인 관련은 없는 것으로 판단된다. 그러나, 2차 공극을 발달시킨 장성층 사암내 구성광물과 유기산 및 CO<sub>2</sub>의 반응은 외부로부터 실리카 풍부한 용액의 유입을 용이하게 함으로써 파이로필라이트의 형성에 간접적 영향을 주었을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 교육부 1997년도 기초과학 학술연구 조성비(BSRI-97-5422)에 의해 지원되었으며 이에 사의를 표한다. 논문에 읽고 건설적인 비평과 충고를 해주신 강원대학교 노진환 교수님과 한국 자원연구소의 손병국 박사님과 신성천 박사님께 감사드린다.

## 참고문헌

- 손치무, 정창희, 김봉균, 이상만, 1967, 삼척탄좌 정밀 조사보고, 탄전지질조사보고, 8, 49-72.
- 유인창, 도성재, 백광호, 최선규, 1997, 삼척탄전 장성지역에 분포하는 페름기 장성층의 층서에 대한 재고찰. 지질학회지, 33-2, 78-86.
- Barker, C., 1972, Aquathermal pressuring-role of temperature in development of abnormal pressure zones. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 56, 2068-2071.
- Bjorlykke, K. and Egeberg, P.K., 1993, Quartz cementation in sedimentary basins. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 77, 1538-1548.
- Bjorlykke, K. and Aagaard, P., 1992, Clay minerals in North Sea sandstone. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, special publication 47, 66-80.
- Boles, J.R. and Franks, S.G., 1979, Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas: implication of smectite diagenesis on sandstone cementation. Journal of Sedimentary Petrology, 49, 55-70.

- Brown, C.E. and Thayer, T.P., 1963, Low grade mineral facies in Upper Jurassic and Lower Jurassic rocks of the Aldrich Mountains, Oregon. *Journal of Sedimentary Petrology*, 33, 411-425.
- Cheong, C.H., 1969, Stratigraphy and Paleontology of Samcheog coalfield, Korea(1). *Journal of Geological Society of Korea*, 5, 13-56.
- Chun, H.Y., 1985, Permo-Carboniferous plant fossils from the Samcheog coalfield Gangweondo, Korea (1). *Journal of Paleontological Society of Korea*, 1, 95-122.
- Chun, H.Y., 1987, Permo-Carboniferous plant fossils from the Samcheog coalfield Gangweondo, Korea (2). *Journal of Paleontological Society of Korea*, 3, 1-27.
- Coombs, D.S., 1954, The nature and alteration of some Triassic sediments from Southland, New Zealand. *Royal Society of New Zealand Transactions*, 82, 65-109.
- Curtis, C.D., 1978, Possible links between sandstone diagenesis and depth-related geochemical reactions occurring in enclosing mudstones. *Quarterly Journal of Geological Society of London*, 135, 107-117.
- Davies, A., Russel, S.J., Rimmer, S.M. and Yeakel, J.D., 1984, Some genetic implications of silica and aluminosilicates in peat and coal. *International Journal of Coal Geology*, 3, 293-314.
- Dickinson, G., 1953, Geological aspect of abnormal reservoir pressures in Gulf Coast Louisiana. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 37, 410-432.
- Dickinson, W.R., 1962, Petrology and diagenesis of Jurassic andesitic strata in central Oregon. *American Journal of Science*, 26, 481-500.
- Dott, R.H., Jr., 1964, Wacke, graywacke and matrix: what approach to immature sandstone classification? *Journal of Sedimentary Petrology*, 35, 626-632.
- Dutton, S.P., 1993, Influence of provenance and burial history on diagenesis of Lower Cretaceous Frontier Formation sandstones, Green River Basin, Wyoming. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63, 665-667.
- Edman, Janell D. and Surdam, Ronald C., 1986, Organic-inorganic interactions as a mechanism for porosity enhancement in the upper cretaceous Ericson sandstone, Green river basin, Wyoming. In *Roles of organic matter in sedimentary diagenesis* (ed. D.L. Gautier), Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 38, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, 85-109.
- Fuchtbauer, H., 1974, *Sediments and Sedimentary Rocks*. New York, Wiley, 464p.
- Galloway, W.E., 1989, Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 73, 125-142.
- Hawkins, P.J., 1978, Relationship between diagenesis, porosity reduction, and oil emplacement in late Carboniferous sandstones reservoirs, Bothamsall Oilfield, E. Midlands. *Geological Society of London, Journal*, 135, 7-24.
- Heald, M.T., 1950, Authigenesis in west Virginia sandstones. *Journal of Geology*, 58, 624-633.
- Helmold, Kenneth P. and van de Kamp, Peter C., 1984, Diagenetic mineralogy and controls on albitization and laumontite formation in Paleogene Arkoses, Santa Ynez Mountains, California. In *Clastic Diagenesis* (ed. D.A. McDonald and R.C. Surdam), American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 239-286.
- Hower, J., Eslinger, E.V., Hower, M.E. and Perry, E.A., 1976, Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediments: Mineralogical and chemical evidence. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 87, 725-737.
- Lanson, B., Beaufort, D., Berger, G., Baradat, J. and Lacharpagne, 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* 66, 3, 501-508.
- Ruppert, F.R., Cecil, C.B., Stanton, R.W. and Christian, R.P., 1985, Authigenic quartz in upper Freeport coal bed, west-central Pennsylvania. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55, 3, 0334-0339.
- Pettijohn, F.J., Potter P.E. and Siever, R., 1986, *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag New York Inc., 553p.
- Siever, R., 1962, Silica solubility, 0-230°C and the diagenesis of siliceous sediments. *Journal of Geology*, 70, 127-250.
- Surdam, Ronald C., Boese, Steven W. and Crossey, Laura J., 1984, The Chemistry of Secondary porosity. In *Clastic Diagenesis* (ed. D.A. McDonald and R.C. Surdam), American Association of Petroleum Geologists, Memoir 37, 127-149.
- Taguchi, K., Shimoda, S., Itihara, Y., Imoto, N., Ishiwatari, R., Shimoyama, A., Akiyama, M. and Suzuki, N., 1986, Relationship of organic and inorganic diagenesis of Neogene Tertiary rocks, northeastern Japan. In *Roles of organic matter in sediment diagenesis* (ed. D.L. Gautier), Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, special publication 38, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, 47-64.

- Tomson A.B., 1970, A Note on the kaolinite-pyrophyllite equilibrium. *American Journal of Science*, 268, 454-458.
- Van Wagoner, J.C., Mitchum, R.H., Campion, K.M. and Rahmanian, V.D., 1990, Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies. *American Association of Petroleum Geologists, Methods in Exploration Series* 7, 55p.
- Walderhaug, O., 1994, Temperatures of quartz-cemented sandstones from offshore mid-Norway-Possible evidence for continued quartz cementation during oil emplacement. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, 203-385.
- Walker, T.R., 1960, Carbonate replacement of detrital crystalline silicate minerals as a source of authigenic silica in sedimentary rocks. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 71, 145-152.
- Waldschmidt, W.A., 1941, Cementing materials in sandstones and their influence on the migration of oil. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 25, 1839-1879.
- Willgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G. St. C., Postamentier, H.W., Ross, C.A. and Van Wagner, J.C., 1988, Sea level changes: an integrated approach, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication* 42, 407p.
- Yu, K.M., Lee, G.H. and Boggs, Sam Jr., 1997, Petrology of late Paleozoic-early Mesozoic Pyeongan Group sandstones, Gohan area, South Korea and its provenance and tectonic implications. *Sedimentary Geology*, 109, 321-338.

(책임편집 : 노진환)

(1998년 9월 10일 접수, 1998년 10월 5일 수리)

## Sandstone Diagenesis of the Lower Permian Jangseong Formation, Jangseong Area, Samcheog Coalfield

Hyun Mee Park, In Chang Ryu and Hyung Shik Kim

*Department of Earth & Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

**ABSTRACT** : The coal-bearing siliciclastic rocks of the Lower Permian Jangseong Formation, Samcheog coalfield, represent a megacyclothem which shows cyclic repetitions of sandstone, shale, coaly shale, and coals. Petrographic, geochemical, and SEM studies for sandstone samples, and XRD analysis for clay minerals were carried out to understand diagenesis in the sandstones of the Jangseong Formation. The Jangseong sandstones are composed of 60% quartz (mainly monocrystalline quartz) and 36% clay matrix and cement with minor amounts of feldspar, lithic fragments and accessory minerals (less than 4%). Jangseong sandstones are classified mostly as quartzwackes and partly as lithic graywackes according to the scheme of Dott(1964). The textural relationships between authigenic minerals and cements in thin sections and SEM photomicrographs suggest the paragenetic sequence as follows; (1) mechanical compaction, (2) cementation by quartz overgrowth, (3) formation of authigenic clay minerals (illite, kaolinite), (4) dissolution of framework grains and development of secondary porosity, and (5) later-stage pore-filling by pyrophyllite. We propose that these diagenetic processes might be due to organic-inorganic interaction between the dominant framework grains and the formation water. The Al, Si ions and organic acid, derived from dewatering of interbedded organic-rich shale and coals, were transported into the Jangseong sandstones. This caused changes in the chemistry of the formation water of the sandstones, and resulted in overgrowth of quartz and precipitation of authigenic clay minerals of kaolinite and illite. The secondary pores, produced during dissolution of clay and framework grains by organic acid and CO<sub>2</sub> gas, were conduit for silica-rich solution into the Jangseong sandstones and the influx of silica-rich solution produced the late-stage pyrophyllite after the expanse of kaolinite. The origin of the solution that formed pyrophyllite is not likely to be the organic-rich formation water based on the observation of fracture-filling pyrophyllite in the Jangseong sandstones, but the process of pyrophyllite pore-filling was indirectly related to organic-inorganic interaction.

**Key words** : Jangseong formation, Sandstone diagenesis, Quartz overgrowth, Clay minerals, Shale