

대구 부근 하부 하양층군(백악기) 사암과 이암의 속성 광물과 속성 작용의 규제 요인

신영식¹ · 추창오² · 이윤종³ · 이용태⁴ · 고인석^{2,*}

¹대구가톨릭대학교 사범대학 부속 무학고등학교, 712-907 경북 경산시 하양읍 도리리 77

²경북대학교 지질학과, 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

³경북대학교 지구과학 교육과, 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

⁴동북고등학교, 134-060 서울특별시 강동구 둔촌동 180-2

Controls on Diagenetic Mineralogy of Sandstones and Mudrocks from the Lower Hayang Group (Cretaceous) in the Daegu Area, Korea

Young Sik Shin¹ · Chang Oh Choo² · Yoon Jong Lee³

Yong Tae Lee⁴ and In Seok Koh^{2,*}

¹Muhak High School, Hayangup Kyungsansi Kyungpook, 712-900, Korea

²Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

³Department of Earth Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

⁴Dongbuk High School, Dunchondong Kangdonggu Seoul 134-060, Korea

Abstract : Authigenic minerals found in sandstones and mudrocks of the Lower Hayang Group (Cretaceous) in the central part of the Kyungsang Basin are carbonate minerals (calcite, dolomite), clay minerals (illite, chlorite, C/S, I/S and kaolinite), albite, quartz and hematite. Characteristic diagenetic mineral assemblages are as follows: albite-chlorite (including C/S)-hematite in the Chilgog Formation, albite-illite-calcite in the Silla Conglomerate, illite-chlorite-hematite in the Haman Formation and albite-chlorite-dolomite in the Panyawol Formation, respectively. Among clay minerals reflecting the physical and chemical change of the diagenetic process, illite, the dominant clay mineral, occurs in every formation in the study area. Chlorite occurs mainly in green or gray sandstones and mudrocks, or in sandstones and mudrocks of the Chilgog Formation which contains a high content of volcanic materials. Based on the mineral assemblage, diagenetic minerals are strongly related with source rocks. Judging from the illite crystallinity, diagenesis of sandstones and mudrocks in the study area reached the late diagenetic stage or low grade metamorphism. The diagenetic process was much influenced by intrusion of the Bulguksa granite, content of organic materials, grain size, and depositional environment rather than burial depth.

Keywords : Lower Hayang Group, sandstone, mudrock, diagenetic mineral, diagenesis

요약 : 경상분지 중앙부에 분포하는 백악기 하부 하양층군의 사암과 이암에서 산출되는 속성광물은 탄산염 광물(방해석, 백운석), 점토 광물(I/S, C/S, 일라이트, 녹니석 및 캐올리나이트), 알바이트, 석영 및 적철석이 대부분을 이루고 있다. 각 층별 특징적인 속성 광물상으로는, 칠곡층에서는 알바이트-녹니석(C/S포함)-적철석이, 신라역암은 알바이트-일라이트-방해석이, 함안층에서는 일라이트-녹니석-적철석이, 반야월층에서는 알바이트-녹니석-백운석이 산출된다. 속성 작용 과정의 물리, 화학적 환경 변화를 지시하는 점토 광물로는 일라이트가 전층군을 통하여 보편적으로 산출되나, 녹니석(C/S포함)은 회색 또는 녹색암이나 화산기원 물질의 함량이 높은 칠곡층 사암과 이암에서 주로 나타난다. 이러한 속성 광물상에 근거할 때, 속성 광물의 생성은 일차적으로 기원암과 밀접히 연관된 것으로 판단된다. 또한, 일라이트 결정도를 기준으로 이 지역의 사암과 이암은 후기 속성 작용 단계 내지 저변성 단계에 해당되며, 속성 작용은 매몰 심도 보다 백악기 화강암체의 관입, 유기물의 함량과 입자의 크기 및 퇴적환경의 영향을 크게 받은 것으로 보인다.

주요어 : 하부 하양층군, 사암, 이암, 속성 광물, 속성 작용

서 언

경상분지 내의 백악기 퇴적암류에 대한 연구는 Tateiwa(1929)에 의해서 최초로 도폭이 조사된 이래 층서, 퇴적 환경 및 퇴적상, 기원지 해석, 속성 변질 작용 등 여러 분야에서 활발하게 진행되어 왔다 (Chang, 1977, 1988; Choi, 1985; 고인석, 1986; 고인석 외, 1994). 그러나 경상분지 내의 퇴적암류는 속성 작용을 심하게 받아 많이 변질되었으므로 기본적으로 속성 작용에 대한 해석이 정립되지 않는 상황에서, 퇴적암류에 대한 정확한 해석은 매우 어렵다. 그 동안 속성 작용에 대한 연구가 사암을 중심으로 부분적으로 수행되어왔다(노진환과 박현수, 1990; 고인석 외, 1994). 하양층군은 퇴적 시기에 퇴적 분지의 확장과 이에 따른 퇴적 환경의 변화 및 화산 물질이 다량 유입된 것이 특징적이다(Chang, 1977, 1988; 고인석 외, 1994; 신영식 외, 2001). 또한, 퇴적 후에는 백악기 화성 활동의 영향을 직접적으로 받았으므로(Hong, 1983; 장기홍과 박순옥, 1997) 속성 변질 작용에 다양한 변수가 작용하였을 것으로 예상된다.

다. 따라서, 경상분지 내 퇴적암류의 속성 작용은 분지의 발달 과정과 퇴적 환경적인 이해에 바탕을 두고 해석되어야 할 필요가 있다.

고령에서 대구를 거쳐 하양까지를 연결하는 지역은 경상분지의 중앙부로 신동층군과 하부 하양층군의 퇴적층이 잘 노출되고 있다(Fig. 1). 특히 이 지역은 다양한 환경에서 형성된 하부 하양층군의 신선한 노두를 관찰할 수 있으므로 하부 하양층군의 속성 작용 과정을 연구 검토하기에 적합한 곳이다. 이 연구는 고령군에서 대구광역시를 지나 경산군 하양읍에 걸쳐서 나타나는 하부 하양층군의 이암과 사암을 대상으로 속성 광물상을 살펴보고, 속성 광물의 생성과 전이 및 속성 작용의 규제 요인을 밝히는 데 초점을 맞추었다.

지질 개요

한반도 동남부에 위치한 경상분지는 대보조산운동 이후 형성된 육성 퇴적분지의 성격을 띠며, 화산활동과 지구조운동을 근거로 3단계의 진화과정을 거쳐

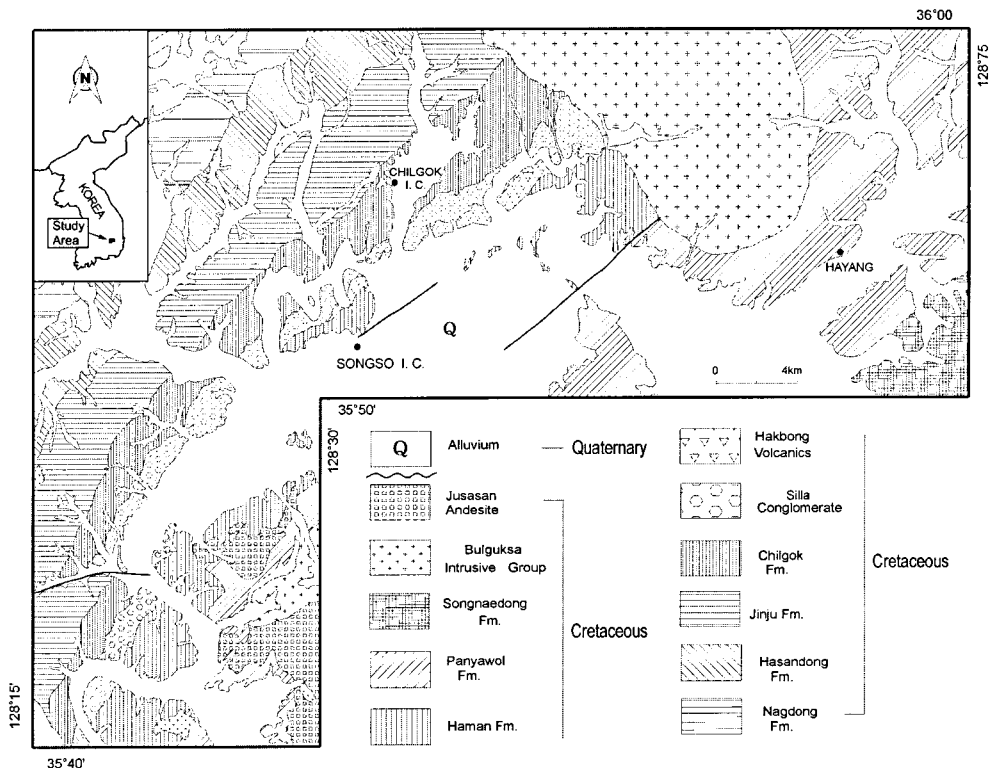


Fig. 1. Geological map of the study area.

형성되었다(Chang, 1975, 1977, 1988). 즉, 선화산성 퇴적상과 일치하는 신동층군, 퇴적암층내에 화산암류의 협재가 특징인 하양층군 및 화산활동절정기에 형성된 유천층군의 3단계 진화과정을 거쳤다. 하양층군은 퇴적시기에 지구조운동으로 퇴적분지는 밀양, 의성, 영양의 세 개의 소분지로 나누어진다(Chang, 1975, 1977, 1988). 이 연구 대상지역은 밀양소분지 북부에 해당되며, 대구지역을 중심으로 분포하는 하부 하양층군에 속하는 칠곡층, 신라역암, 함안층 및 반야월층을 주 대상으로 하였다(Fig. 1). 연구 지역에 분포하는 이들 층들은 다음과 같은 특징을 보인다.

칠곡층은 사암, 셰일 및 역암으로 구성되며, 적색층과 응회질 사암의 협재가 특징이다. 적색의 이암은 부분적으로 석회질이며 암적색의 결핵체를 함유하기도 한다. 상부 사암들은 역질암으로 상위의 신라역암과는 점이적인 상변화를 가진다. 화산력은 원마도가 불량하여 근거리를 이동한 퇴적동시성(syndepositional) 퇴적물로 간주된다. 적색의 이암에서는 건열이 자주 수반되며 층후는 450-500m(최대 650m, 대구지역)이다.

신라역암은 적색, 갈회색의 역암, 역질사암, 사암, 이암, 사질이암 및 회색셰일로 구성되며 이회암의 결핵체가 들어있다. 역의 성분은 화강편마암, 규암, 응회질사암 및 안산암 등으로 크기는 약 5cm 정도이다. 층의 두께는 대구지역에서 약 240m이다. 대구 이남에서는 연장성이 우세한 반면 팔공산 이북에서는 이 층의 퇴적상은 나타나지 않는다. 역암층의 상한은 학봉화산암 또는 함안층과 정합적으로 접한다.

학봉화산암층은 대구 지역에서 신라역암층과 함안층 사이에서 나타나며, 주로 현무암질 용암, 김괴암과 사암으로 구성되어 있다. 최대 층후는 400m이며 횡적 범위는 약 17km 정도이다.

함안층은 신라역암을 정합적으로 피복한다. 적색과 녹색의 이암, 사질 이암이 주된 암상을 이루며 응회질 사암 및 역질 사암이 협재된다. 대구 지역에서 층의 두께는 800m이다. 하부는 적색이암이 우세하며 약간의 사암이 협재되나, 중부는 녹색의 사암과 적색의 사질이암 등이 호층을 이룬다. 상부는 회색의 이암이 우세하고 적색의 이암이 협재된다. 물결자국, 건열 등이 발달한 범람원 퇴적물로 알려져 있다.

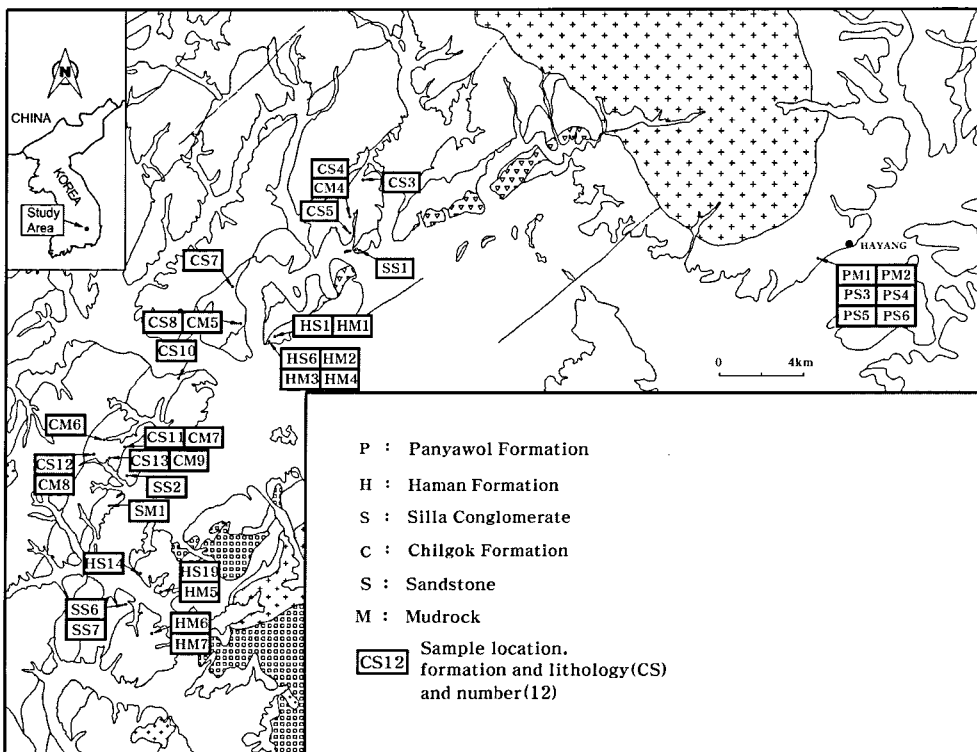


Fig. 2. Sampling locality map of the study area.

반아월층은 함안층을 정합적으로 피복하며 층의 두께는 약 1100m이다. 암회색 내지 흑색 세립과 세립질 사암으로 구성되며 이회암이 협재된다. 유조화석(서승조, 1985)이 많이 산출하는 점은 이 층의 퇴적 환경으로 육성호수환경이 지배적이었음을 지시한다.

연구방법

시료채취는 대구를 중심으로 중앙고속도로 칠곡 IC에서 구마고속도로 성서 IC 사이의 고속도로 주변과, 대구-고령 및 대구-하양간 국도 변에 잘 노출된 신선한 사암과 이암을 층준과 암질에 따라 체계적으로 시료를 채취하였다(Fig. 2). 채취된 사암들을 박편으로 제작하여 편광현미경하에서 사암의 주구성 광물의 변질 양상을 관찰하였다. 사암과 이암에서 속성광물의 미세조직 및 산출상태를 관찰하기 위하여 주사전자 현미경(scanning electron microscope, SEM) 관찰을 실시하였다. 이암과 사암에서 속성광물의 조성은 전암(bulk sample) 단위의 X-선 회절 분석(X-ray diffractometer, XRD)을 실시하였다. 또한 점토광물의 감정을 위하여 2 μm 이하의 입자를 분리하였다. 점토광물의 감정을 위한 X-선 회절 분석용 시료는 1cm 미만으로 파쇄된 이암과 사암의 쇄편들을 증류수와 함께 막자사발(mortar)에 넣고 부드럽게 절구공이(pestle)를 움직여 얻은 점토광물들의 현탁액을 따로 분리하여 상온에서 24시간 중력침전 시킨 후 최상층으로부터 10cm 이상인 수위의 부유물만을 채취한 후, 원심분리기를 이용하여 2 μm 이하의 점토광물을 분리하였다. 분리된 2 μm 이하의 점토광물의 정방위 시료를 제작하여 점토광물들의 저면간격(d-spacing) 및 일라이트 결정도 지수(Kübler index, KI)를 구하였다. 점토광물들의 격자 팽창성을 파악하기 위한 X-선 회절분석용 시료는 60°C의 온도조건에서 에틸렌 글리콜(ethylene glycol)로 건조기내에서 20시간 포화시켜 준비하였다. 카올리나이트와 녹니석을 구별하기 위하여 2 μm 이하의 시료를 1몰 농도의 염산과 24시간 반응시킨 후 정방위 시료로 제작하였다.

결 과

X-선 회절분석

연구 지역의 사암과 이암에서 나타나는 속성광물로는 점토광물(일라이트, 녹니석, C/S, I/S, 카올리나이

트), 탄산염광물(방해석, 백운석), 석영, 장석(주로 알바이트) 및 적철석 등이다. 속성광물들의 산출종도와 빈도를 X-선 회절분석과 편광현미경 및 주사전자현미경(SEM) 관찰에 근거하여 반정량적으로 나타내었다(Table 1).

상기 속성광물들은 층서상 뚜렷한 분대를 이루면서 나타나는 것은 아니지만, 암질, 암색 및 퇴적층 단위 별로 다소간의 특징을 보여준다. 진 층군을 통하여 일라이트가 가장 보편적으로 산출되는 속성광물로, 암색이나 입자의 크기에 상관없이 진 층군에 걸쳐 양적으로도 풍부하다. 이와 함께 칠곡층에서는 알바이트와 녹니석(C/S포함) 및 적철석이, 신라역암층은 알바이트와 일라이트, 방해석이, 함안층에서는 일라이트, 녹니석, 적철석이, 반아월층에서는 알바이트와 녹니석 및 백운석이 산출된다. 적색의 사암과 이암에서는 일라이트 및 적철석이 주된 속성광물상을 이루나, 녹색 내지 회색의 이암에서는, 일라이트와 함께 녹니석이 산출된다. 그러나, 회색과 녹색의 이암이나 사암과 함께 산출되는 적색의 사암(SS6)과 이암(HM6)에서는 녹니석이 산출된다. 즉, 동일한 노두에서 채취한 시료는 입자의 크기가 동일할 경우 암색에 관계없이 속성광물상은 유사하다.

스멕타이트, 카올리나이트 및 I/S는 층서상 뚜렷한 특징을 보이지 않으며 드물게 몇 개의 층준에서 나타난다. 이들 광물은 에틸렌글리콜 처리와 염산 처리를 한 시료의 X-선 회절 분석을 통해서 인지된다. I/S가 일부 층준에서 드물게 불규칙적으로 나타나는 것과는 달리 C/S는 연구 지역에서 층서상 하위에 있는 칠곡층 중부의 일부 사암과 이암 시료에 국한되어 양적으로 풍부하게 산출된다.

X-선 회절분석에서 녹니석 피크의 001/002비는 녹

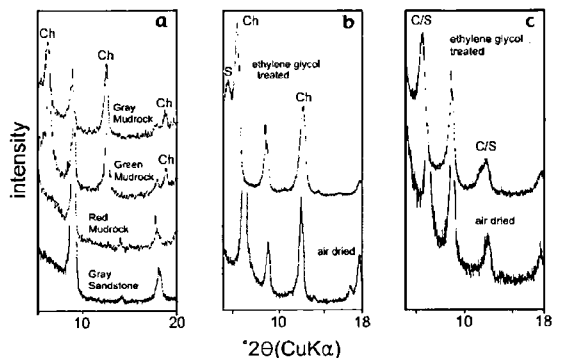


Fig. 3. XRD pattern of authigenic minerals (<2 μm).

Table 1. Authigenic minerals (<2 μ m) of the sandstones and mudrocks in the study area.

Sample	Q	Ab	Ca	Do	I	I/S	Ch	C/S	Sm	Ka	He	color	KI	001/002
PS3	*	**	*	-	***	-	***	-	-	-	-	gray	0.32	0.60
PS4	*	*	*	-	***	-	***	-	-	-	-	gray	0.37	0.47
PS5	*	*	*	-	-	-	***	-	-	-	-	gray	-	0.46
PS6	*	**	*	-	***	-	-	-	-	-	-	gray	0.37	-
PM1	*	*	*	**	***	-	***	-	-	-	-	gray	0.28	0.45
PM2	*	*	*	***	*	-	*	-	-	-	-	gray	0.28	-
HS1	*	*	-	-	***	-	-	-	-	-	*	red	0.37	-
HM1	-	-	-	-	***	-	-	-	-	-	*	red	0.46	-
HS6	*	*	*	-	***	-	-	-	-	-	-	gray	0.43	-
HM2	*	*	*	-	***	*	-	-	-	-	*	red	0.30	-
HM3	*	*	*	-	***	-	***	-	-	-	-	green	0.30	0.65
HM4	*	*	*	-	***	-	***	-	-	-	-	gray	0.32	0.70
HS14	-	-	-	-	***	-	-	-	-	-	*	red	0.45	-
HS19	*	-	-	-	***	*	-	-	-	-	-	gray	0.37	-
HM5	*	-	-	-	***	-	-	-	-	-	*	red	0.49	-
HM6	*	*	*	-	***	-	***	-	-	*	*	red	0.34	0.53
HM7	**	*	**	-	***	-	***	-	*	*	-	green	0.34	0.46
SS1	*	*	-	-	***	-	-	-	-	-	*	red	0.30	-
SS2	-	-	-	-	***	-	-	-	-	-	-	red	0.37	-
SS6	*	*	*	-	***	-	**	-	-	*	*	red	0.48	1.00
SS7	**	*	-	-	***	-	*	-	-	-	-	gray	0.52	1.00
SM1	*	-	*	-	***	-	-	-	*	-	*	red	0.67	-
CS3	*	*	-	-	***	-	**	-	-	-	-	gray	0.54	0.86
CS4	*	*	-	-	*	-	***	-	-	-	-	gray	0.37	1.00
CM4	*	*	*	-	***	-	***	-	-	-	-	gray	0.43	0.59
CS5	*	*	-	-	***	*	**	-	-	-	*	red	0.35	0.67
CS7	*	*	-	-	***	-	-	-	-	-	-	gray	0.56	-
CS8	*	*	-	-	***	-	-	***	-	-	*	red	0.52	-
CM5	*	-	*	-	***	-	-	**	-	-	*	red	0.56	-
CM6	*	*	*	-	***	-	-	**	-	*	*	red	0.52	-
CS10	*	**	-	-	***	-	-	*	-	-	*	red	0.57	-
CM7	*	*	-	-	***	-	-	**	-	-	*	red	0.45	-
CS11	*	*	*	-	*	-	-	***	-	-	*	red	0.56	-
CM8	*	-	-	-	***	*	**	-	-	-	*	red	0.63	0.90
CS12	*	*	-	-	***	-	**	-	-	-	-	gray	0.34	0.53
CM9	*	-	*	-	***	-	**	-	-	-	*	red	0.55	0.90
CS13	*	*	-	-	***	-	***	-	*	*	-	gray	0.45	-

CS3, Chilgok sandstone 3; SS1, Silla sandstone 1; HM2, Haman mudrock 2; PM1, Panyawol mudrock 1; Q, quartz; Ab, albite; Ca, calcite; Do, dolomite; I, illite; Ch, chlorite; Sm, smectite; Ka, kaolinite; He, hematite; KI, Kübler index; 001/002, chlorite peak intensity ratio of 14Å and 7Å; ***, abundant; **, common; *, little; -, absent.

니석에 포함된 철과 마그네슘의 상대적인 함량비를 나타낸다(Hillier *et al.*, 1996). 이 연구 지역에서 산출되는 녹니석은 001면(14Å)의 피크가 강한, 마그네슘 함유량이 높은 녹니석이 우세하게 나타난다(Fig. 3a, Table 1).

동일 장소에서 쌍으로 시료를 채취한 이암과 사암에서, 속성 광물상은 일부 사암시료에서 알바이트가 산출되는 점을 제외하고는 암질에 상관없이 이암과

사암은 상호 유사한 광물상을 보인다. 사암에서만 알바이트가 산출되는 현상은 이암에 비해 사암에서, 장석의 알바이트화작용이 용이하였기 때문으로 해석되며(Lee and Lee, 1998), 화학조성상, 사암에서 Na함량이 높게 나타난다(신영식 외, 2001).

탄산염광물중 방해석은 소량이나마 전 층군에서 고루 산출된다. 그러나 백운석은 반야월층의 일부 층군에서 다량 관찰된다.

일라이트 결정도

X선 회절분석에서 일라이트의 (001)회절선은 변성 정도가 증가함에 따라 점차적으로 피크(peak)가 뾰족하게 된다. 이를 수치화 시킨 일라이트 결정도(illite crystallinity)는 Küber 지수(KI)로 나타내어지며, (001)회절선의 1/2인 높이에서의 폭을 2θ값으로 나타낸 것으로, 속성작용단계(diagenetic stage)와 저변성 작용 단계(low grade metamorphic stage)를 나누는 기준으로 많이 사용된다(Kübler, 1967, 1968).

연구 지역의 사암과 이암에서 측정한 KI는 사암에서 0.30-0.57, 이암에서 0.28-0.63을 보여준다(Table 1). 따라서 KI값을 근거로 볼 때, 이 연구 지역의 사암과 이암은 Kisch(1987)가 제시한 속성작용 단계(diagenetic stage, KI=0.42-1.0)내지 전이대 단계(transitional stage, KI=0.25-0.42)에 해당된다. 연구 지역에서 KI값은 층서상 위치에 따라 뚜렷한 특징을 보이지 못하며, 가장 상부층인 반야월층의 이암에서 가장 낮은 값을 보인다. 또한, 암색과 KI값 사이에도 뚜렷한 규칙성을 보이지 않는다(Table 1).

암질의 차이에 기인한 KI의 변화를 알아보기 위하여 총 8개의 노두에서 사암과 이암시료를 쌍으로 채취하였다(Fig. 2). 동일한 노두에서 쌍으로 채취한 사암과 이암시료에서는 두 장소에서 채취한 시료(CS11-CM7, HS6-HM2)를 제외하고는 이암보다 사암에서 더 낮은 KI값을 보인다(Table 1).

속성광물의 산출

편광현미경 관찰

연구 지역의 사암은 암상과 층준에 따라 다양하게 퇴적변질된 양상을 보여준다. 흔히 관찰되는 퇴적변질 양상으로는 골격 성분(framework component)들의 물리, 화학적 변화, 탄산염광물의 생성 및 변질, 점토 광물의 생성 및 철산화물의 형성 등을 들 수 있다. 사암의 골격입자들은 광물성분에 따라 다소 차이를 보이나, 현미경하에서 부분적으로 용식되거나, 변형된 모습을 보인다. 퇴적물 입자간의 접촉으로는 장접촉(長接觸)과 요철접촉(凹凸接觸)이 우세하다. 석영입자들은 심하게 다짐작용을 받은 경우 압력 용해(pressure solution)되어 불합된 변질양상을 보이며, 이러한 경우 운모의 결정편들은 입자 사이에서 만곡되거나 골곡 변형된 양상을 보인다(그림 4a). 사장석은 대부분의 층준에서 알바이트화작용(albitization)과 화

학적 용탈작용(chemical leaching)을 받아 심하게 변질된 양상을 보인다. 변질된 사장석은 현미경하에서 윤곽이 뚜렷하지 않으며, 2차적인 공극과 미립의 탄산염광물과 점토광물이 수반된다. 또한 부분적으로 방해석에 의해 교대된 사장석을 흔히 볼 수 있다(그림 4b). 흑운모를 비롯한 함철 유색광물들은 부분적으로 용식되거나 적철석에 의해 교대된 양상을 보인다. 풍부하게 산출되는 화산암편내에서는 함철 유색광물들이 부분적으로 변질되어 형성된 어두운 색의 석기와 사장석의 작은 결정들이 관찰된다.

사암의 교질물(cement)은 구성입자들 사이의 공극을 충전(充填, pore-fillings)한 방해석, 녹니석 및 적철석 등이다. 이 지역 중요한 속성변질 양상으로서 탄산염광물이 거의 모든 사암에서 관찰된다. 탄산염광물은 대부분 방해석이고, 드물게 능철석 또는 백운석이 산출된다. 현미경하에서 방해석은 점토광물과 혼재되어 나타나는 극미립의 집합체(fine-grained calcite)와 비교적 큰 결정을 이루며 균일한 간섭색을 보이는 두가지 형태로 산출된다. 후자는 흔히 사장석을 교대하거나 속성작용 후기에 공극을 충전한 양상으로 산출된다(그림 4e).

이 지역 사암의 중요한 점토광물 교질물로 녹니석 균의 점토광물(C/S, 녹니석)을 들 수 있다. 녹니석은 녹색 또는 회색을 띠는 사암과 화산암편이 풍부한 칠곡층 사암에서, 공극을 충전한 양상으로 나타난다(그림 4f). 교결상 석영, 즉 규질교질물(silica cement)은 입간 충전상으로 교결하거나(Fig. 4d), 드물게는 쇄설성 석영입자 위에 과성장(overgrowth)한 양상을 보인다.

적철석으로 대표되는 철산화물의 생성과 관련된 퇴적변질도 흔히 관찰된다. 철산화물은 직접 침전에 의해 공극을 채우거나, 쇄설성 입자 주위를 감싸는 양상으로 나타난다. 후자의 경우, 쇄설성 입자로는 흑운모와 같은 유색광물과 고결질 화산암편이며, 화산암편내에는 검은 색의 석기로, 유색광물에서는 주변부나 결정내의 벽개면을 따라 철산화물이 나타난다(Fig. 4c). 황철석은 회색과 녹색의 사암과 이암에서 뚜렷한 자형을 이루며 나타난다.

점토광물의 산출양상

이 연구 지역의 사암과 이암에서 산출되는 점토광물로는 일라이트와 녹니석균이 대부분이며, 이들은 골격 성분을 교대하거나, 피복상(grain coatings) 및

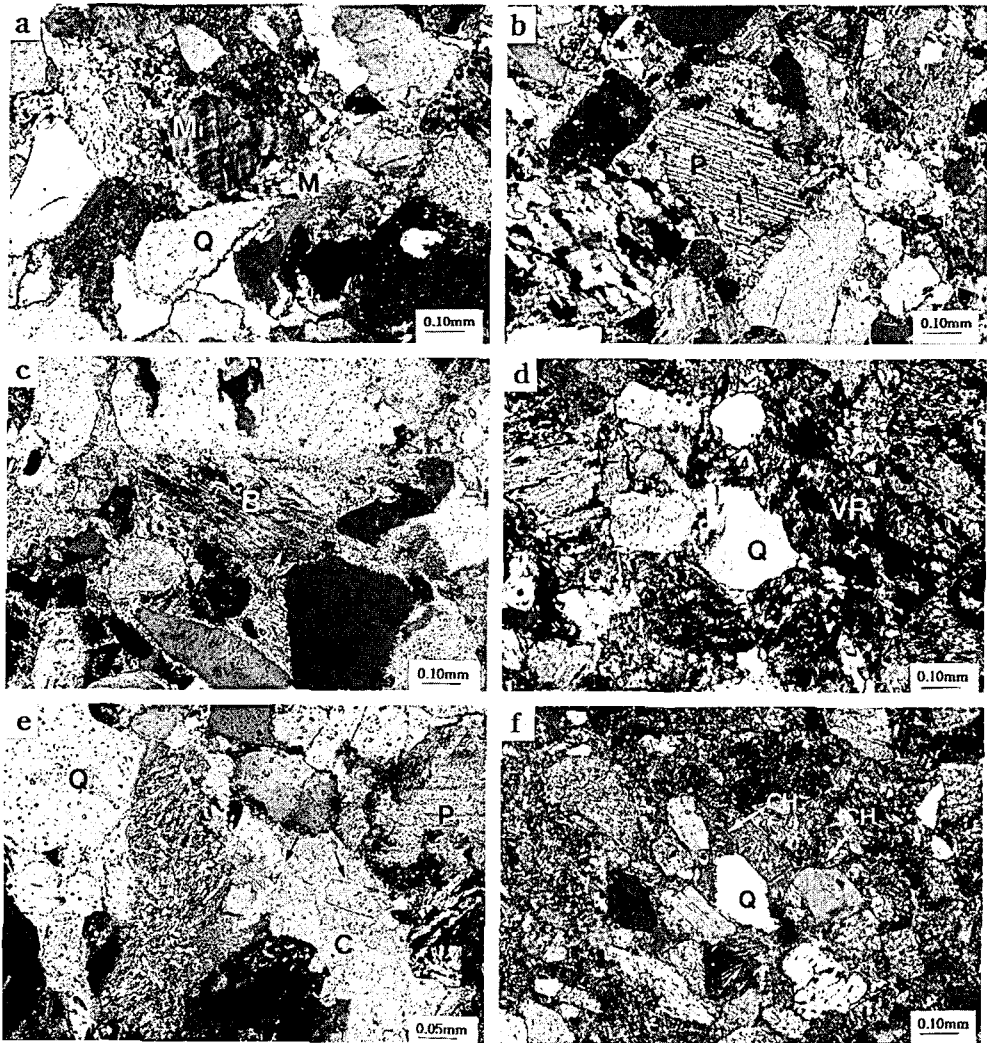


Fig. 4. Photomicrographs showing the mode of diagenetic alteration. a) Physical deformation of a muscovite flake (M) between microcline (Mi) and quartz (Q) grains in the sandstone (CS1) of the Chilgog Formation (crossed nicols). b) Plagioclase (P) partially replaced by calcite (arrow) in the sandstone (HS 19) of the Haman Formation (crossed nicols). c) The alteration to hematite (arrow) along the cleavages of biotite (B) in the sandstone (CS10) of the Chilgog Formation (crossed nicols). d) The dark colored groundmass due to alteration of the basic volcanic rock fragment (VR) in the sandstone (CS10) of the Chilgog Formation (crossed nicols). e) Large calcite (C) filling the pore between euhedral quartz (arrow), detrital quartz (Q) and plagioclase (P) grains in the sandstone (SS1) of the Silla Conglomerate (crossed nicols). f) Pore filling chlorite (CH) in the tuffaceous sandstone (CS4) of the Chilgog Formation quartz (Q) (crossed nicols).

공극충전상으로 산출된다.

일라이트는 주사현미경 하에서 다양한 형태로 산출된다. 먼저, 칠곡층 사암에서 엽편상의 일라이트 사이에서 캐올리나이트의 특징적인 결정형태인 책구조 (booklet texture)를 보이는 일라이트가 산출된다 (Fig. 5b). 또한, 알바이트 입자 위에 직접 일라이트 결정이

성장하여, 알바이트가 피복되어지는 양상을 보이며 (Fig. 5c), 입자사이의 공극을 충전한 양상으로 산출되기도 한다 (Fig. 5d). 편광현미경 하에서 녹니석은 연한 녹색 또는 무색을 띠며 공극을 충전하거나, 함철광물의 2차적인 변질로 형성되기도 한다. 주사현미경 하에서 녹니석은 형태상으로 판(plates) 모양이나

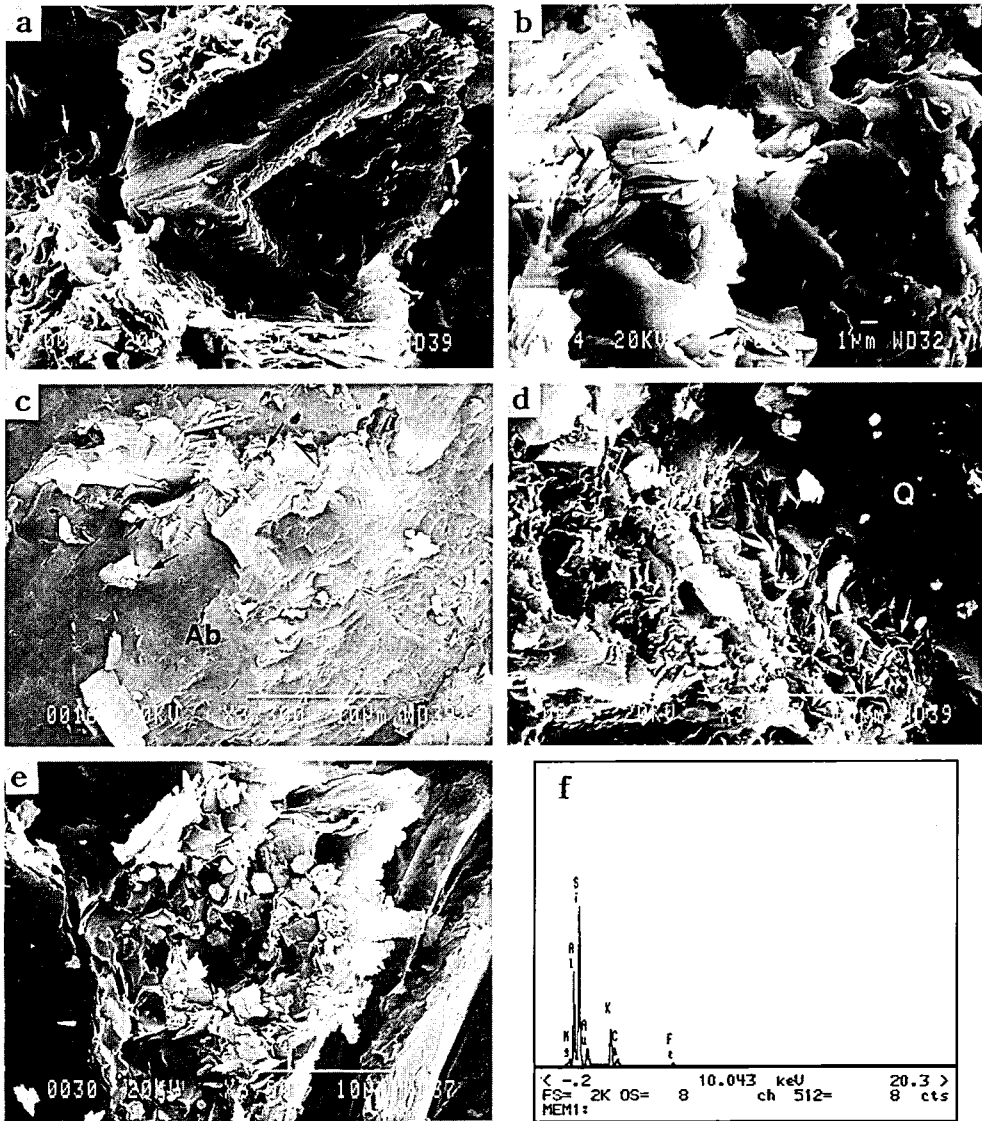


Fig. 5. SEM micrographs showing characteristic authigenic textures of some important diagenetic minerals. (a) Smectite (S and arrow) of weby morphology in the mudrock (CM7) of the Chilgog Formation. (b) Booklet shaped illite (arrow) in the sandstone (CS12) of the Chilgog Formation. (c) Authigenic illite (arrow) on the detrital albite grain (Ab) in the mudrock (CM7) of the Chilgog Formation. (d) Detrital quartz grain (Q) contacted with fine-grained authigenic illite (arrow) in the sandstone (SS6) of the Silla Conglomerate. (e) Authigenic pore-filling chlorite, showing cabbage-shaped, in the sandstone (SS6) of the Silla Conglomerate. (f) EDX of the booklet shaped illite (Fig. 5b) in the sandstone (CS12) of the Chilgog Formation.

양배추 모양이 흔히 관찰된다(Fig. 5e). 이러한 모양은 MgO가 풍부한 녹니석이 형태에 가깝다(Hillier *et al.*, 1996). 또한 공극을 채우거나 입자를 피복하는 형태로 흔하게 산출된다. 쇠설성 입자의 용해에 의해 형성된 2차공극을 따라 침전된 모습과, 쇠설성 광물

입자 위의 자생적으로 형성된 양상은 녹니석이 퇴적 후에 형성된 속성기원임을 지시한다. 연구 지역에서 스�멕타이트는 드물게 산출되며 칠곡층 적색이암에서 스�멕타이트는 특징적인 거미집(webby)구조를 보인다(Fig. 5a).

토 의

속성광물의 생성과 전이

연구 지역의 사암과 이암에서 산출되는 속성광물은 전술한 바와 같이 일라이트, 녹니석, 스멕타이트, 캐올리나이트 및 혼합 층상(mixed-layered) 점토광물인 C/S와 I/S, 탄산염광물(방해석, 백운석), 및 적철석 등이 있다.

점토광물은 속성작용의 결과로 형성되며, 매물조건에 따라 결정 화학적으로 연속적인 변화 추이를 보인다(Boles and Franks, 1979; Eslinger and Pevear, 1988; Hower, 1981; Hower *et al.*, 1976). 이 지역에서 혼합 층상(mixed-layered) 점토광물인 C/S와 I/S의 존재는 이 지역에 스멕타이트가 초기 점토광물로 존재했음을 시사한다. 일라이트와 녹니석의 선행 물질로 간주되는 스멕타이트는 건조한 육성환경이나 화산쇄설물의 함량이 높은 환경에서 형성되는 데(Bjørlykke and Aagaard, 1992), 다양한 환경에서 스멕타이트는 일라이트나 녹니석으로 전이된다. 스멕타이트와 일라이트는 화학적 성질이 상당히 상이하여 일라이트화작용에는 통상 다른 광물이 반응물과 생성물로 작용하게 되면, 고유의 스멕타이트는 완전히 용해된다(Boles and Franks, 1979). 60내지 80°C에서 석영에 대해 거의 포화된 실리카용액(aqueous silica)이 형성되면, 상대적으로 불안정한 스멕타이트는 용해된다(Aagaard and Helgeson, 1983; Sass *et al.*, 1987). 이때 스멕타이트에서 일라이트 혹은 녹니석으로 변화는 공극수와 퇴적물과의 초기 과정반응에서 Mg²⁺, K⁺의 농도와 관련될 것으로 생각된다. 즉, 스멕타이트는 Mg²⁺, 혹은 K⁺와 반응하여 녹니석 혹은 일라이트와 석영을 형성하고 이때 유리된 Ca²⁺는 방해석의 생성을 초래하게 될 것이다. 따라서, 사암에서 자생의 석영을 교대하거나, 공극을 충전한 양상으로(그림 4e), 산출되는 거정질의 방해석은 후기 속성작용의 산물로 해석된다.

캐올리나이트는 일부 층군에서 소량으로 산출된다(Table 1). 칠곡층 하부의 회색 사암(CS12)에서 채구조를 보이는 일라이트의 존재는 일라이트가 캐올리나이트를 교대하여 형성되었을 가능성을 암시한다(Ehrenberg and Nadeau, 1989). Bjørlykke *et al.* (1986)과 Ehrenberg and Nadeau(1989)는 북해 사암에서 캐올리나이트의 일라이트화 작용의 심도는 3.5km 내지 4km이며, 이때의 온도는 130°C 내지

140°C로 추정하였다.

흑운모와 같은 유색광물의 결정내의 벽개면을 따라 형성된 철산화물(Fig. 4c)과 고철질 화산암편내에서 검은 색의 석기로 나타나는 철산화물(Fig. 4d)은 퇴적후 속성작용단계에서 형성된 것으로 적색층에서 적색을 띄게 하는 색소로 작용한다(Choo *et al.*, 2002).

속성 작용의 규제 요인

녹니석군 광물(C/S 포함)은 칠곡층의 대표적인 속성광물이다. 칠곡층에는 적색을 포함한 모든 암석에서 녹니석군이 나타난다. 그러나 칠곡층 이외의 층에서는 녹니석은 회색 내지 녹색의 이암과 사암에서 주로 산출된다. 칠곡층의 적색 사암에서는 다른 층 사암에 비해서 사장석과 화산암편의 함량이 높으며(신영식 외, 2001), 응회암질 사암에서 공극충전형 녹니석이 풍부하다(Fig. 4f). Fig. 5e에서 나타나는 녹니석 결정은 형태상, Mg가 풍부한 모습을 보인다(Hillier *et al.*, 1996), 이는 X-선 회절분석에서 001면(14Å)의 피크가 강하게 나타나는 녹니석의 특징과도 일치된다. 신영식 외(2001)에 따르면 연구 지역의 사암과 이암에서 녹니석이 풍부한 시료에서 화학성분상 높은 MgO 함량을 보인다. 이는 칠곡층 퇴적시기에 분지 주변의 활발한 화산활동이 있었음을 시사하며, 이 때 유입된 고철질 광물이나 화산암편이 속성작용을 거쳐 자생적인 녹니석을 형성한 것으로 판단된다. 이러한 사실은 광물조성과 화학성분과의 관련성을 언급한 신영식 외(2001)의 연구와도 잘 부합된다. 그러므로 이 지역의 속성작용은 일차적으로 기원물질과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

일라이트의 결정도는 온도, 칼륨의 공급, 암질, 반응시간, 유압(fluid pressure) 및 응력 등의 영향을 받는다(Frey, 1987). 이 중 온도가 일라이트 결정도에 가장 큰 영향을 미치며(Kübler, 1967, 1968), 만일 온도의 상승이 퇴적물의 매물과 관련이 있다면, 매물심도가 높을 것으로 예상되는 층서상 하위에 있는 층이 더 높은 일라이트 결정도 즉, 낮은 Kübler 지수를 기대할 수 있다. 그러나 일라이트 결정도는 하부의 칠곡층 보다 상부의 반야월층에서 특히, 반야월층 이암에서 높은 결정도를 보여준다. 노진환과 박현수(1990)와 노진환과 최우일(2001)은 신동층군에서의 속성 변질작용은 기본적으로 매물 심도를 시사하는 층서적 위치에 따라 지배된다고 하였다. 그러나 Lee and Lee(2001)는 이암의 KI값을 이용하여, 열적 성숙

도를 구한 결과, 백악기 화강암류의 영향으로 상위 층군인 하양층군이 신동층군보다 오히려 더 높은 열적성숙도를 보인다고 하였다. 이 연구지역에서 현재 지표에 노출된 관입암이 위치와 시료 채취지점과의 거리를 단순 비교하였을 때, 관입암과 근거리에 위치한 반야월층의 시료와 함안층의 일부시료(HM5, HM6, HM7 등)에서 낮은 KI값을 보인다. 이러한 점은 Lee and Lee(2001)의 견해에 부합된 양상을 보인다. Lee and Lee(2001)는 KI를 이용하여 열적 성숙도(thermal maturity) 측정을 목적으로 하였으므로 측정에는 이암만을 사용하여 다른 요소가 KI에 미치는 영향을 고려하지 않았으나, 실제로 다른 요소가 결정도에 영향을 미칠 수 있다.

퇴적물의 입도가 결정도에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 동일한 노두에서 채취한 사암과 이암 시료를 비교해 보면, 전술한 바와 같이 대체로 이암에 비해 사암에서 높은 결정도를 보인다(Table 1). 사암과 이에 수반된 이암에서 조립질 퇴적물은 높은 공극률과 투수율 때문에 입자사이에서 공극수의 순환이 용이하여, 일라이트의 결합을 촉진시켜 세립질 퇴적물에 비해 높은 결정도를 보인다(Dunoyer de Segonzac, 1970). 또한, 투수성이 좋은 지역에 K의 농도가 높은 유체가 공급될 경우, 일라이트의 결정도를 높일 수 있다(Huang, 1992; Uysal *et al.*, 2000). 이 지역에서 초기에 공극수로부터 유입된 K양을 정확히 알 수는 없으나, 현미경하에서 K-장석이 변질된 양상은 일라이트화 작용에 필요한 K가 속성 변질작용 동안 공급되었음을 강하게 시사한다. 또한, 연구 지역에서 광범위하게 관찰되는 K-장석의 알바이트화 과정(Lee and Lee, 1998)에서 유리된 K도 공급되었을 것이다.

연구 지역에서 하위의 3개 층과는 달리 반야월층에서는 사암에 비해 이암에서 높은 결정도를 보인다(Table 1). 퇴적환경적인 측면에서 하성환경인 하위의 3개 층과는 달리, 반야월층은 호소환경이 지배적이다. 경상분지내의 퇴적암류에서 퇴적환경의 차이에 기인한 암상에 따라 유기물의 함량은 현저한 차이를 보여준다. 유기물의 함량은 적색암에 비하여 비적색암에서 높고, 비적색암 중에서도 회색이나 녹색 암석에 비해 암회색 내지 흑색에서 높으며, 동일한 흑색의 암석 중에서도 세립질일수록 유기탄소의 보존상태가 양호한 것으로 보고되고있다(엄상호 외, 1983). 이렇게 유기물이 풍부한 이암에서는, 탄화수소가 성숙되는 동안 발생된 유기산에 의해 K를 포함하는 광물상

의 용해가 발생하여 일라이트화작용을 촉진시킨다(Eberl, 1993; Small, 1994; Li *et al.*, 1997). 그러므로 반야월층에서 사암에 비해 이암의 결정도가 높은 이유는 유기물의 함량과 관련이 있을 것으로 판단된다. 따라서 전술한 퇴적물내의 유기물 함량과 퇴적물의 입도는 근본적으로 퇴적환경을 반영하므로, 일라이트 결정도를 결정하는 요소는 온도뿐만 아니라 퇴적물의 입도, 유기물의 함량 및 퇴적환경의 영향도 고려해야 할 것으로 생각된다.

결 언

1. 경상분지 중앙부에 분포하는 백악기 하부 하양층군의, 사암과 이암에서 산출되는 속성광물로는 탄산염광물(방해석, 능철석, 백운석), 점토광물(I/S, C/S, 일라이트, 녹니석 및 캐올리나이트), 알바이트, 석영 및 적철석이 대부분을 이루고 있다. 각 층별로 특징적인 광물상을 살펴보면, 칠곡층에서는 알바이트와 녹니석(C/S포함) 및 적철석, 신라역암은 알바이트와 일라이트 및 방해석이, 함안층에서는 일라이트, 녹니석, 적철석, 반야월층에서는 알바이트와 녹니석 및 백운석이 산출된다.

2. 점토광물은 녹니석과 C/S 및 일라이트가 주된 점토광물상을 이루고 스멕타이트와 캐올리나이트 및 I/S가 드물게 산출된다. 이 중 일라이트는 전 층군을 통하여 가장 보편적으로 산출되며, 녹니석은 녹색과 회색의 암석과 일부 층군에 국한되어 풍부하게 산출된다. 칠곡층의 암편질 사암과 이암에서 녹니석이 풍부하게 산출되는 점은 본 역에서 속성광물의 생성이 일차적으로 기원암과 밀접히 연관된 것으로 판단된다.

3. 일라이트 결정도에 근거할 때, 연구지역의 사암과 이암은 후기 속성작용단계 내지 저변성단계에 해당된다. 그런데 층서상의 위치에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않는 것은 속성작용이 매물심도에 의한 규제보다 백악기 화강암체의 관입과 퇴적환경의 영향이 중요함을 시사한다.

사 사

이 논문은 2001년도 경북대학교의 연구비에 의하여 연구되었다. 또한 이 논문을 심사하고 세심하게 건설적인 조언을 주신 김정률 교수님과 익명의 심사위원께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 고인석, 1986, 낙동층군의 기원암에 관한 연구, 지질학회지, 22, 233-256.
- 고인석, 이용태, 김종근, 1994, 경상분지 백악기 상부 경상 누층군 사암의 퇴적변질. 한 국석유지질학회지, 2(2), 19-31.
- 노진환, 박현수, 1990, 고령지역 경상누층군 사암의 속성작용 및 속성광물. 지질학회지, 26, 371-392.
- 노진환, 최우일, 2001, 경북 군위지역 신동층군 사암의 속성광물상 및 속성작용. 지질학회지, 37, 323-344.
- 서승조, 1985, 경상분지 중앙부 하부 백악계의 지질과 고생물(윤조화석). 경북대학교 대학원 이학박사학위논문, 177 p.
- 신영식, 이용태, 이윤중, 고인석, 2001, 대구지역 하부하양층군(백악기)의 사암과 이암에 관한 암석화학. 지질학회지, 37, 153-168.
- 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 광영훈, 신성천, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구. 한국동력자원연구소, KIER-Bulletin-36, 124 p.
- 장기홍, 박순옥, 1997, 경상분지 중앙부의 구조발달사와 화산활동사, 자원환경지질, 30, 143-151.
- Aagaard, P. and Helgeson, H. C., 1983, Activity/composition relations among silicates and aqueous solution: II. Chemical and thermodynamic consequences of ideal mixing of atoms homological sites in montmorillonites, illites, and mixed-layer clays: Clay and Clay Minerals, 31, 207-217.
- Bjørlykke, K., Aagaard, P., Dypvik, H., Hastings, D. S. and Harper, A. S., 1986, Diagenesis and reservoir properties of Jurassic sandstones from the Haltenbanken area, offshore mid Norway. In Spencer, M. (ed.), Petroleum Geology of the Northern European Margin. Norwegian Petroleum Society, Graham and Trotman, London, 285-292.
- Bjørlykke, K. and Aagaard, P., 1992, Clay minerals in North Sea Sandstones. In Houseknecht, D. W and Pittman, E. D. (eds.), Origin, Diagenesis, and Petrophysics of Clay minerals in Sandstones, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 47, 65-80.
- Boles, J. R. and Franks, S. G., 1979, Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas. Journal of sedimentary Petrology, 49, 55-70.
- Chang, K. H., 1975, Cretaceous stratigraphy of Southeast Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 11(1), 1-23.
- Chang, K. H., 1977, Late Mesozoic stratigraphy, sedimentation and tectonics of southeastern Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 13, 76-90.
- Chang, K. H., 1988, Cretaceous Stratigraphy and Paleocurrent Analysis of Kyongsang Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 24(3), 194-205.
- Choi H. I., 1985, Sedimentology and Its Implications for Stratigraphic Classifications of the Cretaceous Gyeongsang Basin. Journal of the Geological Society of Korea, 21(1), 26-37.
- Choo, C. O., Shin, Y. S. and Koh, I. S., 2002, Mineralogical evidence for red coloration of sandstones at the Chilgok Formation of the Cretaceous Hayang Group, Southeastern Korea. Geosciences Journal, 6(2), 141-148.
- Dunoyer de Segonzag, G., 1970, The transformation of clay minerals during diagenesis and lower-grade metamorphism: A review. Sedimentology, 15, 281-346.
- Eberl, D. D., 1993, Three zones for illite formation during burial diagenesis and metamorphism. Clays and Clay Minerals, 41, 26-37.
- Ehrenberg S. N. and Nadeau, P. H., 1989, Formation of diagenetic illite in sandstones of the Garn Formation. Halten banken area, mid-Norwegian continental shelf. Clay Minerals, 24, 233-253.
- Eslinger, E. and Pevear, D., 1988, Clay minerals and sandstone diagenesis, In Eslinger, E. and Pevear, D. (eds.), Clay minerals for Petroleum Geologist and Engineers, SEPM Short Course, 22, 223-245.
- Frey, M., 1987, Very low-grade metamorphism of sedimentary rocks. In Frey, M. (ed.), Low Temperature Metamorphism, Blackie, Glasgow, 9-58
- Hillier S., Fallick A. E. and Matter A., 1996, Origin of pore-lining chlorite in the aeolian Rotliegend of Northern Germany. Clay Minerals, 31, 153-171.
- Hong, Y. K., 1983, Petrology and Geochemistry of the Cretaceous Palgongsan Granite, Southern Korea. Journal of Korea Institute Mining Geology, 16(2), 83-109.
- Hower, J., Eslinger, E., Hower, M. E. and Perry, E. A., 1976, Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediments- I. Mineralogical and chemical evidence. Geological Society American Bulletin, 87, 725-737.
- Hower, J., 1981, Shale diagenesis. In Longstaffe, F. G. (ed.), Clays and the Resource Geologists, Short Course Handbook, Mineralogical Association of Canada, 39-59.
- Huang, W. L., 1992, Illitic-clay formation during experimental diagenesis of arkoses. In Houseknecht, D. W. and Pittman, E. D. (eds.), Origin, Diagenesis, and Petrophysics of Clay minerals in Sandstones, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 47, 49-63.
- Kisch, H. J., 1987, Correlation between indicators of very low-grade metamorphism, In Frey, M. (ed.), Low Temperature Metamorphism, Blackie, Glasgow, 227-300.
- Kübler, B., 1967, La cristallinité de l'illite et les zones tout fait supérieures du métamorphisme. In Etschges Tectoniques, Neuchâtel University, Switzerland, 105-121.
- Kübler, B., 1968, Evaluation quantitative de métamorphisme par la cristallinité de l'illite. Bulletin Centre

- Recherche Pau-SNPA, 2, 385-397.
- Lee J. I., and Lee Y. I., 1998, Feldspar albitization in Cretaceous non-marine mud-rocks, Gyongsang Basin, Korea, *Sedimentology*, 45, 745-754.
- Lee J. I., and Lee Y. I., 2001, Kbler illite "Crystallinity" index of the Cretaceous Gyeongsang Basin, Korea: Implications for basin evolution. *Clay and Clay Minerals*, 49, 36-44.
- Li, G., Peacor, D. R., and Coombs, D. S., 1997, Transformation of smectite to illite in bentonite and associated sediments from Kaka Point, New Zealand: Contrast in rate and mechanism. *Clays and Clay Minerals*, 45, 54-67.
- Sass, N. C., Rosenberg, P. E. and Kittrick, J. A., 1987, The stability of illite/smectite during diagenesis: an experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2103-2115.
- Small, J. S., 1994, Fluid composition, mineralogy and morphological changes associated with the smectite-to-illite reaction: An experimental investigation of the effect of organic acid anions. *Clay Minerals*, 29, 539-554.
- Tateiwa, I., 1929, Geological Atlas of Korea, Waegwan-Taegu-Yongchon Sheets. Geological Survey of Korea.
- Uysal, I. T., Golding, S. D. and Audsley F., 2000, Clay-mineral authigenesis in late Permian coal measures, Bowen Basin, Queensland, Australia. *Clay and Clay Minerals*, 48, 351-365.

2002년 6월 10일 원고 접수
2002년 9월 9일 수정원고 접수
2002년 9월 28일 원고 채택