

장기층군의 함탄층에서 산출되는 흡착기능성 광물 자원의 부존 환경 및 자원잠재성 평가

Mineralization Environments and Evaluation of Resources Potentials for the Absorbent-functional Mineral Resources Occurred in the Coal-bearing Formation of the Janggi Group

노진환(Jin Hwan Noh)*

강원대학교 지질학과
(Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

요약: 쇄설성 퇴적층 위주의 퇴적상을 갖는 것으로 알려진 영일 지역 장기층군의 함탄층 내에 실제로는 상당한 규모의 화산쇄설성 퇴적암류가 혼재된다. 전체적으로 이 함탄층은 화성쇄설성 암상과 단순 쇄설성 암상이 교호되는 양상을 보인다. 부석편을 함유하는 응회암과 응회질 사암이 함탄층의 특징적인 화산쇄설성 암상을 이룬다. 상·하부 함탄층의 화산쇄설성 암석에서 속성기원으로 산출되는 변질광물로는 몬모릴로나이트와 클리놉틸로라이트가 주된 광물상을 이루고 여기에 단백석과 석영이 수반된다. 광물조성과 양이온 치환능력 면에서 일부 층군에서는 응회질 암석들이 저품위 제올라이트나 벤토나이트 광층을 이룬다. 또한 대부분 1 m 미만의 박층을 이루기 때문에 전형적인 제올라이트나 벤토나이트 자원으로서의 유용성과 잠재성은 낮은 것으로 판단된다. 그렇지만 인접하는 이들 광층들이 함께 개발될 수 있다면, 광물조성과 CEC 수치 면에서 산성백토와 같은 흡착기능성 광물자원으로서의 활용 가능성은 충분한 것으로 평가된다.

주요어: 함탄층, 화산쇄설성, 속성기원, 몬모릴로나이트, 클리놉틸로라이트, 제올라이트, 벤토나이트, 흡착기능성 광물자원, 활용 가능성

ABSTRACT: In the coal-bearing formations of the Janggi Group, which are reported as typical clastic sediments, several beds of volcanoclastic rocks are actually found in the Yeongil area. The coal-bearing formations generally exhibit alternating lithologic characteristics of pyroclastic and epiclastic sedimentary facies. Tuff and tuffaceous sandstone rich in pumice fragments are characteristic in the coal-bearing formations. Diagenetic minerals found in the pyroclastic rocks of the upper and lower coal-bearing formations are montmorillonite, clinoptilolite, opal-CT, and quartz. Several tuffaceous beds correspond to the low-grade ores of zeolites and bentonite, and moreover, these ores mostly occur as thin beds less than 1 m in thickness. Thus, the potential of altered tuffaceous rocks as the resources typical of zeolite and bentonite seems to be low. However, based on mineral composition and CEC determinations, it can be evaluated that these tuffaceous rocks

*교신저자: jhnoh@kangwon.ac.kr

mostly have the promising potential for utilization as the absorbent-functional mineral resources such as acid clays, if these low-grade ores plus adjacent tuffaceous rocks are collectively exploited.

Key words : coal-bearing formations, volcanoclastic, diagenetic origin, montmorillonite, clinoptilolite, zeolite, bentonite, absorbent-functional mineral resources, potential for utilization

서 언

우리나라의 제 3기층에 부존되는 광물자원에 대한 연구는, Tateiwa (立岩 巖, 1924)에 의해 처음으로 지질도폭 작성을 위한 조사가 이루어진 이래 상당한 공백기를 거친 후에, 1970년대 말부터 제올라이트와 벤토나이트를 중심으로 활발히 이루어져 왔다(상기남, 1976; Noh and Kim, 1982, 1986; Moon, 1984; Noh, 1984, 1985; Noh and Boles, 1989). 이 같은 연구들에 의해서 제올라이트와 벤토나이트는 마이오세(Miocene)기에 형성된 육성층군(즉, 장기층군이나 어일층군)의 화산쇄설성 퇴적층에 부존되고 이들의 생성은 주로 속성작용에 의거한다는 사실이 밝혀진 바 있다. 그렇지만 이 같은 연구들은 대부분 장기층군이나 어일층군의 화산쇄설성(volcanoclastic) 퇴적층들(눌대리응회암층, 용동리응회암층 등)에 대해서 이루어진 것으로써, 쇄설성(clastic) 위주의 퇴적층으로 알려진 함탄층을 대상으로는 광물자원 탐사를 위한 노력도 없었을 뿐만 아니라 지금까지 별다른 연구도 이루어지지 않았다.

최근에 장기층군의 함탄층 내의 일부 층군에서도 화산쇄설성 퇴적층이 개재되고 여기에도 소규모로 제올라이트나 벤토나이트의 광체가 부존된다는 사실이 필자에 의해서 지적된 바 있다(노진환, 1989, 2001). 또한 최근에 이 함탄층에서 소위 '산성백토(acid clay)'의 원광이 국내 기업에 의해서 채굴된다는 사실을 감안하면 이 층에 부존되는 제올라이트와 벤토나이트에 대한 본격적인 연구의 필요성이 제기되는 상황이다.

따라서 이 연구를 통해서 제3기 장기층군의 표식지인 금광동 지역을 중심으로 함탄층 내에 개재되는 응회질 암석들의 산출상태와 속성변질 양상을 밝히고자 한다. 또한 이 층 내에 부존하는 제올라이트(zeolite)와 벤토나이트(bentonite)의 광화양상 및 광물특성을 구명함으로써 이들의 부존자원으로서의 잠재성을 평가하고자 한다.

연구 방법

상·하부 함탄층을 중심으로 층의 분포와 지질 경계의 설정, 주상도 작성 및 표품 채취 등을 위해 야외 조사를 실시하였다. 암색은 미국 지질학회에서 발간된 표준 암색 도감(Rock Color Chart)에 따라 정하였다. 상·하부 함탄층에서 산출되는 응회암류의 광물조성과 속성광물을 파악하기 위하여 주사전자현미경(SEM) 관찰, 전암단위(bulk sample)의 X-선회절(XRD) 분석을 하였다. X-선회절 분석기(Rigaku model D/Max-2200)의 실험 조건은 $CuK\alpha_1$ 을 사용하여 40 kV/30 mA의 가속 전압 및 전류 조건에서 $3^\circ \sim 45^\circ$ 의 구간을 분당 $1^\circ(2\theta)$ 의 속도로 연속적으로 주사하는 방식으로 설정되었다. 또한 속성광물인 벤토나이트와 제올라이트의 광석으로서의 활용 가능성을 타진해보기 위해 양이온치환능력 실험(Cation Exchange Capacity: CEC)을 실시하였다. 이 실험은 메틸렌블루 방법(Methylen Blue Method)과 암모늄아세테이트 방법(Ammonium Acetate Method)으로 실시하였다. 또한 일부 시료에 대해서는 비표면적(specific surface area)과 pH 측정도 하였다. 이 같은 일련의 화학적 실험 과정은 모두 영국 지질연구소에서 제안된 표준실험 방법에 따라 수행되었다.

일반 지질

연구 지역은 전체적으로 화산쇄설성(volcanoclastic) 퇴적환경이 우세했던 마이오세의 퇴적층이 비교적 정연하게 분포하는 가운데, 이를 뚫고 제 3기의 말엽에 분출한 것으로 여겨지는 현무암 내지 안산암이 산정부를 중심으로 분포하는 지질 양상을 보인다(그림 1). 이 지역은 장기층군의 최하부층인 장기역암층이 기저를 이루며 그 위를 눌대리응회암층, 금광동층, 하부함탄층, 하부현무암질응회암층, 상부함탄층이 정합적으로 놓이고, 이들을 범곡리층군인 망해산

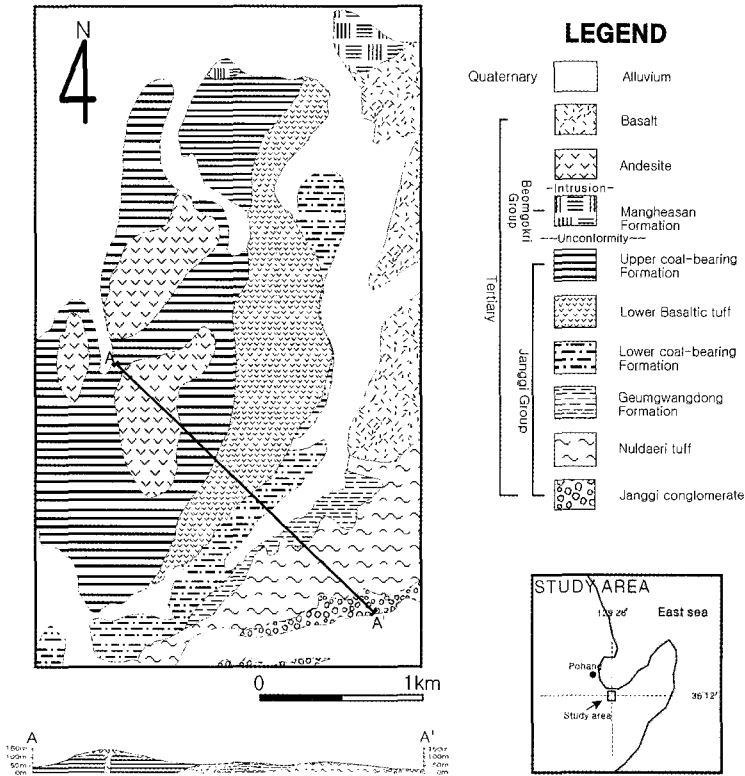


Fig. 1. Geologic and index maps of study area.

층이 부정합적으로 피복한다. 이 지역에서는 장기층군의 표식지인 장기-양포 지역에서 잘 발달하는 상부층준인 금오리층과 상부현무암질응회암층이 분포되지 않는 것이 특징이다. 이 지역 퇴적층들은 대개 미고결상으로 노출되고 풍화에도 취약한 양상을 나타낸다.

이 지역은 갈탄(lignite)을 포함하는 특징적인 쇄설성(clastic) 암상 위주의 퇴적층인 함탄층이 비교적 두텁게 잘 발달하는 것이 특징이다. 이 층은 전체적으로 장기층군 지질시대 전반에 걸쳐 왕성했던 화산활동의 단속적인 휴지기를 시사하는 쇄설성 퇴적상의 암상을 보인다. 즉, 장기층군 지질시대 초기의 늪대리 화산활동과 그 이후에 현무암 분출이 교차되는 휴지기 동안에 기반암으로부터 쇄설성 퇴적물들이 유입되어 사암, 역암 및 탄질 셰일 등이 주로 퇴적됨으로써 함탄층이 형성된 것으로 파악된다. 그렇지만 함탄층 내에도 국지적인 산성 내지 중성의 화산활동의 영향으로 응회암류가 개재된다. 함탄층은 현무암의 국지적인 열하분출(fissure eruption)

에 의해 형성된 하부 현무암질 응회암층에 의해서 층서상 상부함탄층과 하부함탄층으로 구분된다. 하부함탄층에서는 응회질 사암, 암편질 응회암, 유리질 응회암등의 화산쇄설성 퇴적암이 최하부에 1 매의 응회암층을 가지는 상부함탄층에 비해서 상대적으로 자주 개재되는 것이 특징이다.

이 지역 장기층군의 주향과 경사는 평균적으로 $N40^{\circ}\sim 50^{\circ}E/30^{\circ}\sim 40^{\circ}NW$ 인데 비해서 망해산층군의 경우에는 $N65^{\circ}E/25^{\circ}NW$ 를 보이기 때문에 분포상으로도 뚜렷한 부정합 관계를 이룬다. 지질도에 표시된 망해산층군의 부정합적 분포 관계는 이번 연구를 통해 처음으로 보고되는 것으로써, 이 지역에서 최초로 지질도폭 조사를 수행하고 층명과 층서를 설정했던 Tateiwa (1924)에 의한 지질 분포를 일부 수정한 결과이다.

층서 및 암상

이 지역은 하부 장기층군의 표식지로서 장기

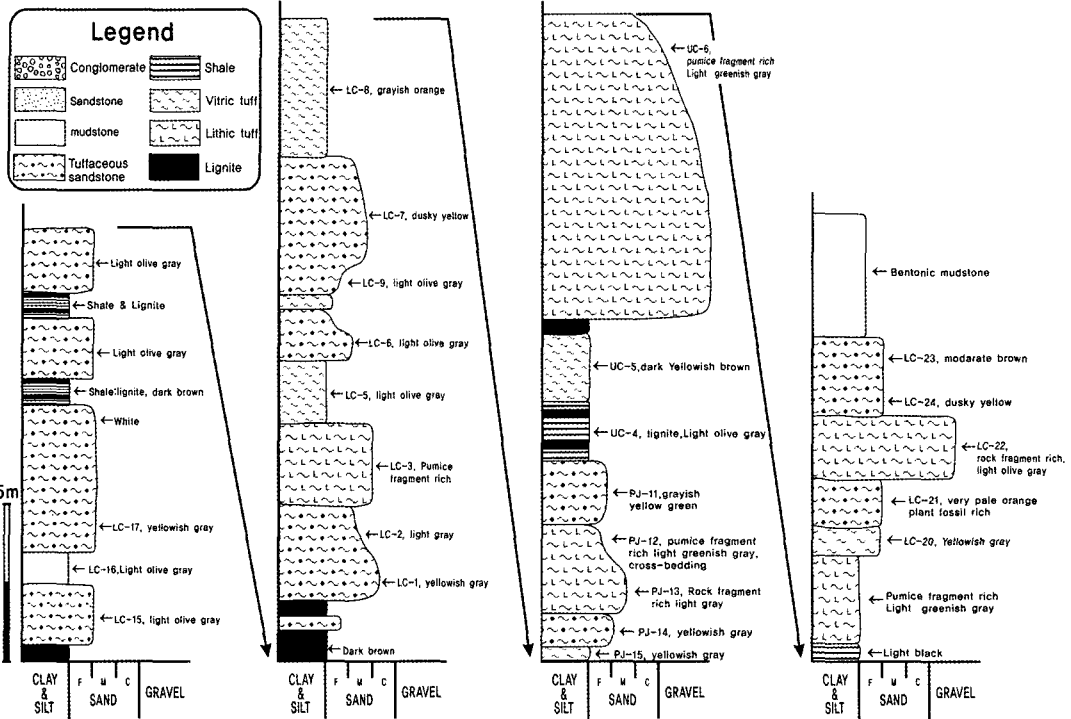


Fig. 2. Columnar sections of the Lower Coal-bearing formation.

층군이 이 지역에서 최대 1.5~2 km의 두께를 이루며 분포한다. 다른 장기층군 분포 지역에 비해서 특히 함탄층이 두텁게 잘 발달하는 것이 특징이다. 이 지역에 분포하는 장기층군의 각층에 대한 층서관계와 암상을 함탄층을 중심으로 기재하면 다음과 같다.

장기역암층은 장기층군의 최하부층으로 최대 150 m의 두께를 가지며 분포한다. 이 층은 주로 역암 및 사암으로 구성되고 간간히 소규모의 갈탄이 협재된다. 역암을 구성하는 암력의 원마도는 양호하며 그 직경이 10~50 cm 정도의 범위를 보인다. 이 역암층은 대부분 분급이 불량한 기질지지(matrix-supported)의 역암으로 구성된다. 또한 암력의 성분은 대부분 화산암류로 구성된다. 그 위에 놓이는 놀대리 응회암층의 최대 두께는 200 m에 달하고 주로 층리 발달이 미약한 유백색의 유리질 응회암으로 구성된다. 그 상위의 금광동층은 일부 지역(금광동 지역)에만 국한되어 나타난다. 이 층의 두께는 최대 100 m이고 엽상 층리가 잘 발달된 황갈색 내지 황회색을 띠는 셰일로 구성된다. 이 셰일 위주의 층 내에서는 흔히 식물화석이 산

출된다.

최대 두께 110 m에 이르는 하부함탄층은 주로 응회질 사암(tuffaceous sandstone), 암편질 응회암(lithic tuff), 유리질 응회암(vitric tuff), 셰일, 갈탄, 이암으로 구성된다. 지금까지 알려진 바와는 달리 화산쇄설성 퇴적암층들이 많이 개재되는 것으로 나타난다. 층서상으로는 하부로부터 갈탄을 기저로 하여 응회질 사암, 셰일, 암편질 응회암, 유리질 응회암, 벤토나이트질 이암 등의 순서로 놓인다(그림 2). 갈탄은 하부함탄층의 하부와 중부 층준에서 걸쳐 나타나며, 대부분 셰일 층 내에서 대개 1 m 미만의 박층을 이루며 수매 개재된다. 응회질 사암층의 입자의 크기는 대부분 세립에서 중립질을 이루고 암색은 밝은 황회색(light olive gray) 내지 갈색(moderate brown)을 띠며, 상부 층준에서는 식물화석이 흔히 산출되는 것이 특징이다. 암편질 응회암은 주로 부석질 암편을 함유하는 것이 특징이고, 하부 함탄층의 중부 층준에서 두텁게 발달한다. 부석편의 크기는 1~35 mm의 범위로 다양한 입도와 형태를 이룬다. 암색은 밝은 녹색(light greenish gray) 내지 밝은 황회색을

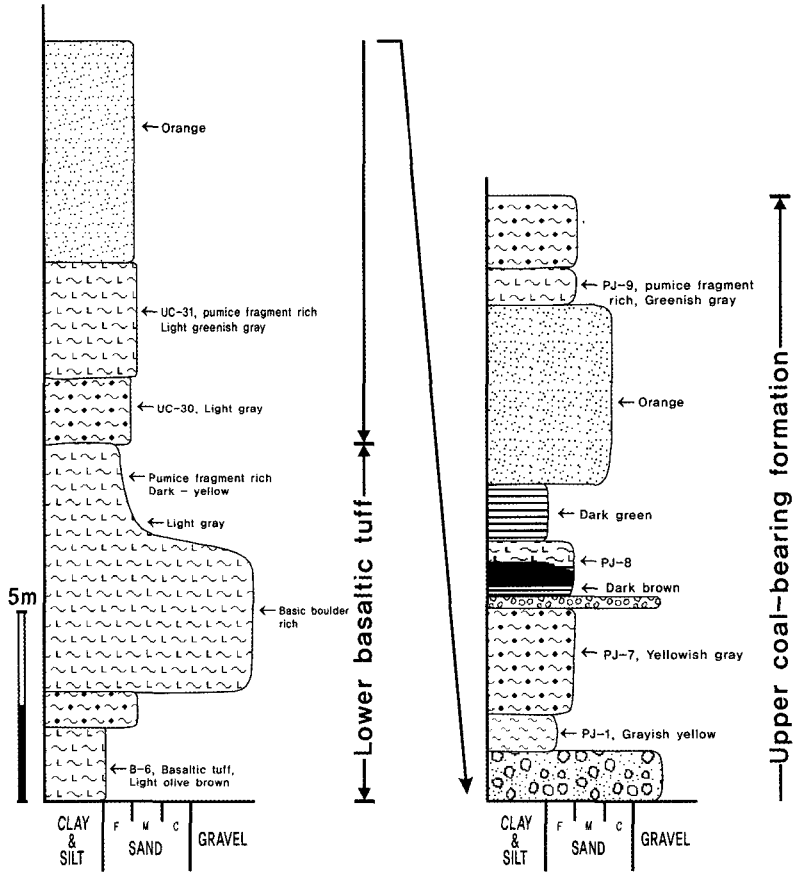


Fig. 3. Columnar sections of the Lower Basaltic Tuff and Upper Coal-bearing formation.

보인다. 하부함탄층의 응회암류에 흔히 수반되는 진주 암편은 진주암 특유의 동심원상(concentric)의 열극을 보인다.

하부현무암질응회암층은 하부함탄층과 상부함탄층을 구획짓는 역할을 하는 층이다. 주된 암상은 암편질 응회암이지만, 층리를 따라 연속성이 불량하고 부분적으로 현무암상으로 전이되는 양상을 보인다. 이 층의 암편질 응회암에는 크기가 다양한 현무암질 암편이 많이 함유되는 것이 특징이며, 암색은 황갈색(olive brown) 내지 회갈색(grayish brown)을 띤다.

최대 200 m 정도의 두께로 발달하는 상부함탄층은 주로 사암, 역암, 암편질 응회암, 갈탄, 셰일이 주된 암상을 이룬다. 하부함탄층에 비해서 응회암류의 개재 빈도가 현격히 줄어 전체적으로 전형적인 쇄설성 퇴적상을 이루는 것이 특징이다. 상부 함탄층은 하부로부터 응회질 사

암, 암편질 응회암, 사암, 역암, 셰일 층의 순서로 놓인다(그림 3). 응회질 사암은 담회색(light gray)을 띠며 사층리가 잘 발달된다. 전체적으로 밝은 녹회색(light greenish gray)을 띠는 암편질 응회암의 암편은 대부분 부석으로 되어 있으며 그 크기는 1~10 mm로 나타난다. 연미색 내지 주황색을 띠는 사암은 대개 미고결된 상태로 산출되며 입자의 크기는 세립질 내지 중립질의 양상을 보인다. 갈탄은 상부함탄층 중부와 상부층준에 많이 개재되며, 셰일과 암편질 응회암층 사이에서 대개 1~2 m의 두께를 이루며 산출된다(그림 3). 이에 비해서 상부 층준에서는 갈탄이 대개 50 cm 미만의 박층으로 반복해서 수매 개재되는 것이 특징이다.

망해산층은 장기층군의 상부 층군인 범곡리 층군에 속하며, 이 지역의 북단에만 국한되어 상부함탄층과 부정합적인 관계를 이루며 분포

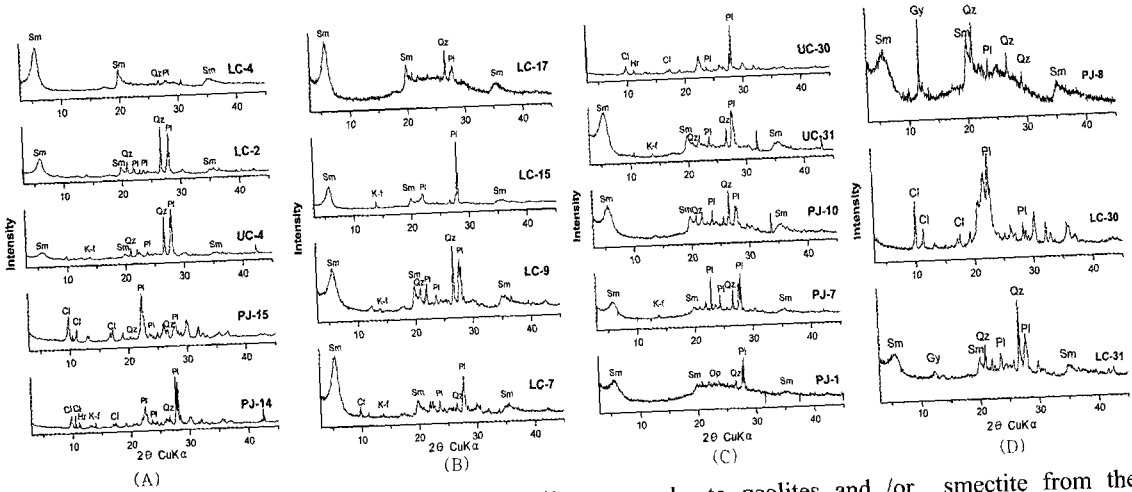


Fig. 4. X-ray diffraction patterns for altered tuffaceous rocks to zeolites and /or smectite from the coal-bearing formations: Sm. smectite, Cl. clinoptilolite, Qz. quartz, Pl. plagioclase, Op. opal-CT, Gy. gypsum.

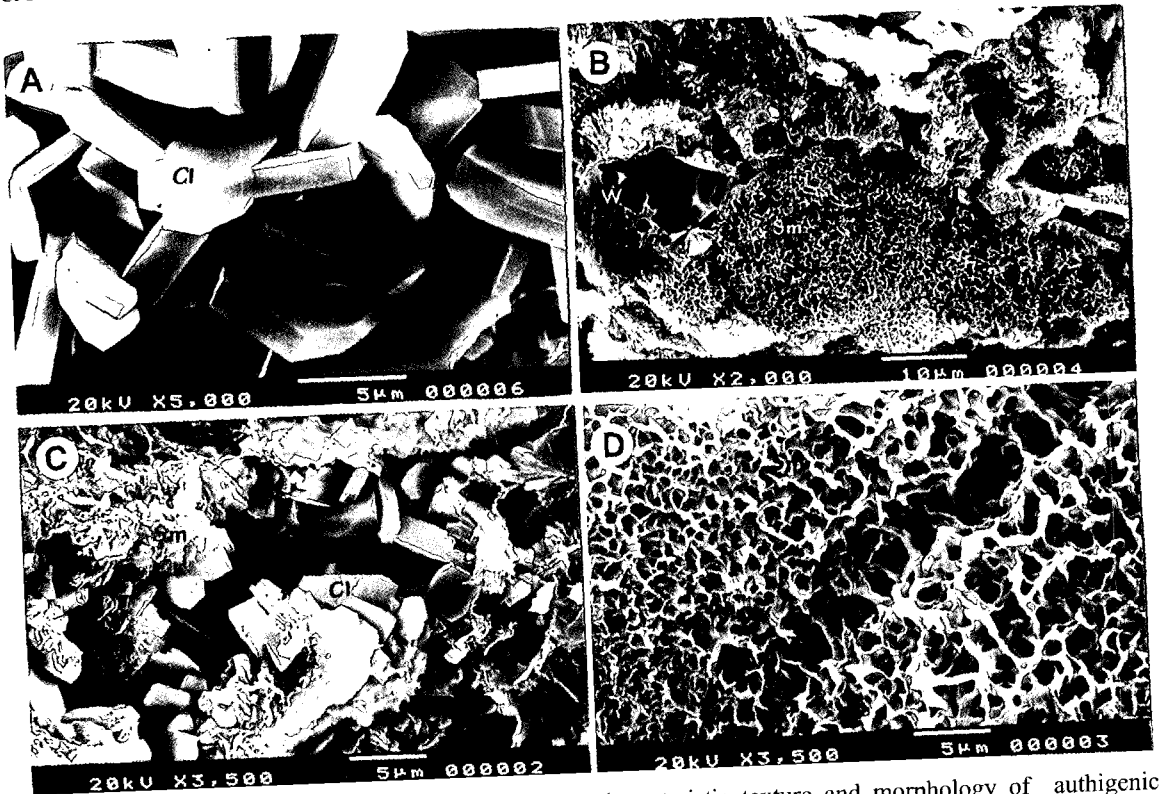


Fig. 5. Scanning electron micrographs showing the characteristic texture and morphology of authigenic minerals from the lower (A, B) and upper (C, D) coal-bearing formations. A. Tabular coffin-shaped morphology of well-formed clinoptilolite (cl) from tuffaceous sandstone. B. Crystal aggregates of smectite (sm) in vitric tuff. C. Spatial relationship between clinoptilolite (cl) and smectite (sm) in the tuffaceous sandstone. D. Crystal aggregates of smectite (sm) from the lithic tuff.

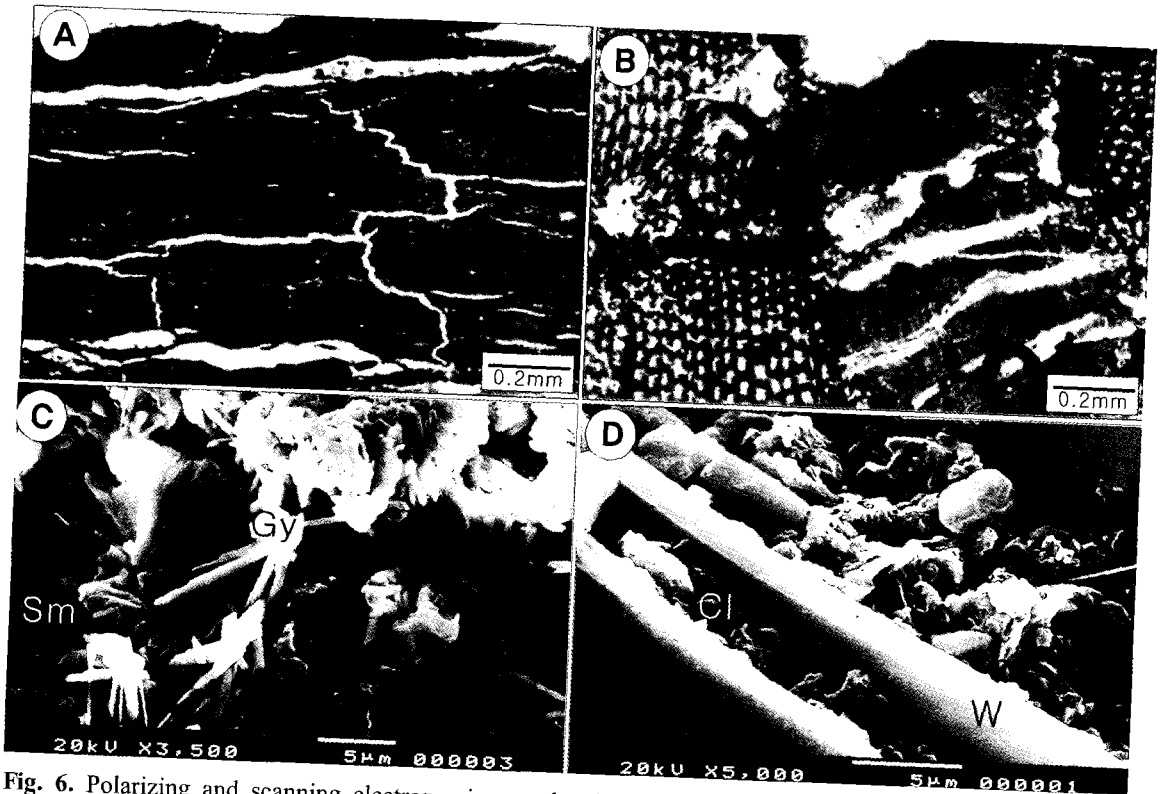


Fig. 6. Polarizing and scanning electron micrographs showing the characteristic texture and morphology of gypsum and clinoptilolite from the lignite of the Lower Coal-bearing Formation. A, B. Typical shrinkage cracks and coalified wood stuffs found in the lignite bed. C. Gypsum and smectite perched on the lignite: Gy, gypsum, Sm, smectite. D. Clinoptilolite filled the shrinkage crack of the lignite: Cl, clinoptilolite, W: coalified wood stuff.

한다. 이 층은 연구 지역 내에서 그 하부만 노출되는 관계로 암편질 응회암으로만 구성된다. 이 층은 그 분포가 미약하고 망해산층 하부의 특징적인 암상인 진주암이 기저를 이루지 않는 관계로 과거 조사자들에 의해서는 상부현무암질 응회암층으로 잘못 인식되어 왔다.

속성변질 양상 및 광물조성

전술한 바와 같이 이제까지 탄층을 함유하는 전형적인 쇄설성 퇴적층으로 인식되어 오던 함탄층 내에 응회암류가 의외로 많이 포함된다. 특히 하부 함탄층 내에는 층 두께 기준으로 30~40% 정도에 달하는 응회암류가 개재된다. 이 응회암류들은 제올라이트나 스멕타이트로 속성변질 되어 불석질 응회암류(zeolitic tuffs) 또는 벤토나이트(bentonite)와 같은 암상으로 전이된

산출 양상을 보인다. 여기에는 속성광물로서 스멕타이트 광종에 속하는 몬모릴로나이트(montmorillonite), 제올라이트 광종인 클리놉틸로라이트(clinoptilolite) 및 단백석(opal-CT)이 주로 수반된다(그림 4).

함탄층의 속성 작용에 따른 변질광물들의 조성은 원암의 조성과 암상에 따라 다르게 나타난다. 또한 층서적 위치에 따라 광물 분대를 이루며 단위 암상의 층준에 정합적(concordant)인 관계를 갖는 전형적인 속성변질 양상을 보인다. 이 같은 속성변질 기원을 뒷받침하는 이 함탄층에서의 특징적인 변질 양상으로 소위 'opal-CT' 상의 단백석의 존재와 갈탄(lignite) 수준의 탄화작용과 연계된 변질광물들(제올라이트와 몬모릴로나이트)의 밀접한 공생관계 등이 거론될 수 있을 것이다(Noh, 1989; 노진환, 1984).

이 지역의 함탄층에서 산출되는 제올라이트

Table 1. Cation exchange capacity of the zeolites and bentonites from the coal-bearing formations (unit: meq/100 g)

Sample Number	Formation	Lithology	Ore type	Methylene Blue Method	Ammonium Acetate Method
UC-30		tuffaceous sandstone	zeolite	10.87	136.58
UC-31		lithic tuff	bentonite	55.65	79.03
PJ-1	UCF	vitric tuff	bentonite	17.59	58.24
PJ-7		lithic tuff	bentonite	27.97	40.43
PJ-10		vitric tuff	bentonite	33.62	37.89
PJ-14		tuffaceous sandstone	zeolite	11.96	85.50
PJ-15		vitric tuff	zeolite	14.29	113.21
UC-4		tuffaceous sandstone	bentonite	28.05	39.51
LC-2		tuffaceous sandstone	bentonite	34.78	47.05
LC-4	LCF	vitric tuff	bentonite	45.96	50.99
LC-7		tuffaceous sandstone	zeolitic bentonite	38.99	80.17
LC-9		vitric tuff	bentonite	36.63	45.46
LC-15		tuffaceous sandstone	bentonite	42.97	52.99
LC-17		tuffaceous sandstone	bentonite	29.49	45.58

UCF: Upper Coal-bearing Formation, LCF: Lower Coal-bearing Formation.

광물로는 클리놉틸로라이트가 주된 광물상을 이룬다. 몬모릴로나이트는 상·하부 함탄층의 전 층준에 걸쳐 거의 모든 암층에서 흔히 수반되지만, 클리놉틸로라이트는 하부함탄층의 중부 층준과 상부함탄층의 상부 층준에 한정되어 주로 응회암류 내에서 산출된다. 제올라이트로 속성변질된 응회암류 내에서도 몬모릴로나이트는 초기 변질물(incipient alterations)로서 항상 소량 수반된다. 또한 규질 응회암류에서는 이들 외에 흔히 단백석이 수반되는 것이 특징이다.

상·하부 함탄층의 응회암류에서 산출되는 몬모릴로나이트는 대부분 화산 유리질 입자들을 피복하거나 입자 주위를 치환하는 형태로 나타난다(그림 5). 이에 비해서 제올라이트는 화산 유리질 성분의 내부가 용해되어 생긴 공극이나 사장석 내부에서 정출하는 양상으로 산출된다(그림 5). 간혹 상부 함탄층의 암편질 응회암에 함유되는 부석편(pumice fragment)의 공극이나 갈탄의 열극 내에서도 클리놉틸로라이트가 관찰되기도 한다.

함탄 층에 흔히 개재되는 갈탄 내에서도 클

리놉틸로라이트와 몬모릴로나이트가 열극 층진상을 이루며 산출된다(그림 6). 또한 갈탄의 열극 내에서 이들 외에 속성변질 광물로서 석고 결정들이 흔히 수반되는 것이 특징이다. 이러한 속성변질 광물들은 갈탄의 주변암에서 유래된 속성수가 갈탄의 열극 사이로 유입되어 생성된 것으로 판단된다. 갈탄 내의 속성광물상은 그 층준에 따라 다소 다르게 나타난다. 세일 층 내부에서 산출되는 갈탄의 경우에는 몬모릴로나이트와 석고가 수반되며, 응회암층 내부에서 산출되는 갈탄에서는 주로 클리놉틸로라이트가 산출되는 경향이 있다.

광물 조성에 따른 양이온 교환 특성

함탄층에 부존되는 제올라이트와 벤토나이트의 부존자원으로서의 잠재성을 평가하기 위해서 양이온 치환능력(CEC: cation exchange capacity)을 측정하였다. 이 양이온 치환능력은 치환되는 양이온들의 종류, 제올라이트와 스�멕타이트의 구조상의 특징, 온도 등의 요소들에 의

해 결정된다. 일반적으로 순수한 제올라이트의 CEC 값은 200~400 meq/100 g이며, 순수한 벤토나이트의 경우에는 80~100 meq/100 g인 것으로 알려져 있다(Inglethorpe *et al.*, 1993; Pabalan and Bertetti, 2001).

이 지역 함탄층에서 제올라이트와 벤토나이트의 양이온 치환능력 실험 결과, 메틸렌블루(Methylene Blue) 측정법에 의한 측정치를 기준으로 경우 하부함탄층의 제올라이트는 11~14.5 meq/100 g, 벤토나이트는 28~50 meq/100 g의 분석치를 갖는 것으로 밝혀졌다(표 1). 이에 비해서 상부함탄층의 제올라이트의 경우에는 11~14 meq/100 g, 벤토나이트는 17~56 meq/100 g로 측정되었다. 그렇지만 실질적인 총량적 양이온 치환능력(Total CEC)을 지시하는 암모늄아세테이트 법에 의한 측정치 수준에서는 하부함탄층의 제올라이트 광석의 경우 85~113 meq/100 g, 그리고 벤토나이트는 39~80 meq/100 g 값을 갖는 것으로 분석되었다. 또한 상부함탄층에서는 제올라이트와 벤토나이트의 CEC 값이 각각 136 meq/100 g, 37~79 meq/100 g에 해당되는 것으로 측정되었다(표 1).

여기서 제올라이트의 CEC 분석치가 메틸렌블루법과 암모늄아세테이트법의 결과 값에 있어서 많은 차이를 보인다는 점에 주목할 필요가 있을 것이다. 클리눔틸로라이트의 공동의 크기는 2~3 Å로 알려져 있다. 이에 비해서 메틸렌블루($C_{10}H_{18}N_3SCl \cdot nH_2O$) 이온 단면의 직경은 8.2 Å (Rubenstein, 2001) 정도로서 제올라이트의 세공구경보다 훨씬 크다. 따라서 이처럼 큰 메틸렌블루 이온은 클리눔틸로라이트 내의 공동에서 치환반응을 하지 못한다. 이러한 이유로 메틸렌블루법을 이용한 클리눔틸로라이트의 양이온 치환능력 측정은 불가능하다. 이에 비해서 층상구조를 이루는 몬모릴로나이트는 구조 단위 층 안에 메틸렌블루 이온이 들어가 치환반응을 할 수 있으므로, 이 방식에 의한 양이온 치환능력 측정이 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 함탄층의 제올라이트 광석에서 메틸렌블루 법에 의한 측정치가 전혀 무의미한 것만은 아닌 것으로 여겨진다. 즉, 이 방식에 의한 측정 수치는 바로 제올라이트에 수반되는 몬모릴로나이트의 함유 정도를 지시하는 것이기 때문이다. 그렇지만 스멕타이트를 전혀 포함하지 않거나 극미량 함유하는 제올라이트 광석

도 약간의 수치를 기록하는 바, 이는 제올라이트의 세공 내에서의 메틸렌블루 이온의 치환반응은 불가능하지만 입자 표면에서의 치환반응은 어느 정도 이루어짐을 시사한다.

하부함탄층의 일부 시료는 X-선회절 분석결과 제올라이트와 스멕타이트가 상당량 공존하고 있는 것으로 나타난다. 이 경우에는 메틸렌블루법에서는 스멕타이트와 주로 반응하여 CEC 값이 38.99 meq/100 g으로 측정되었고, 암모늄아세테이트 법에서는 스멕타이트와 제올라이트가 모두 반응하여 80.17 meq/100 g으로 분석된 것으로 해석된다. 전반적으로 하부함탄층보다 상부 함탄층에서 산출되는 광석들이 양이온 치환능력 면에서 큰 격차를 보이지는 않지만 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

부존자원으로서의 잠재성

전술한 바와 같은 X-선회절 분석과 CEC 측정 결과에 의거하면 연구 지역의 함탄층에서 산출되는 응회질 암층들은 6~7개 층준에서 품위와 품질 면에서 제올라이트와 저품위 벤토나이트 광석으로 개발될 수 있는 품위와 품질을 보인다. 특히 암모늄 아세테이트법에 의한 CEC 평가 수치로 100 meq/100 g 이상의 값을 보이는 상·하부함탄층 내의 2개의 제올라이트 광체들은 광석 그 자체만으로는 현재에도 활용 가치가 있는 것으로 여겨진다. 그러나 문제는 이 제올라이트 광체들이 산출상태에서 언급한 바와 같이 박층을 이루고 있다는 점이다. 통상적으로 대개 1 m 이상의 두께를 갖는 제올라이트와 벤토나이트가 개발 가능한 부존자원으로서 인정 될 수 있다는 점을 감안한다면, 전형적인 벤토나이트나 제올라이트로서의 이들의 자원 유용성과 잠재성은 낮은 것으로 평가된다.

그렇지만 최근에 그 수요가 점증되고 있는 산성백토(acid clay)나 활성백토(activated clay) 그리고 상토(bed soil)와 같은 인공 토양 원자재로서의 활용 가능성 측면에서는 잠재성이 클 것으로 여겨진다. 이 같은 흡착기능성 점토자원은 아직 광물학적으로 정확히 정의되지 않은 상황이지만, 대체로 높은 흡착성 및 적당한 양이온 치환능력(대개 20~50 meq/100 g)과 전형적인 제올라이트나 벤토나이트에 비해서 상대적으로 낮은 pH 조건을 갖는 점토질 광석의 의

Table 2. Chemical characteristics of crude ores utilizing currently for activated clays and zeolites occurred in the upper coal-bearing formation

Sample No	Cation Exchange Capacity (CEC, meq/100 g)		Specific Surface Area (BET Method, m ² /g)	pH
	Ammonium Acetate Method	Methylene Blue Method		
Ze0411051	41.8	39.1	76.5	9.1
Zc0411051-1	108.4	6.9	64.9	6.1

미한다. 광물조성 상으로는 몬모릴로나이트, 홀란다이트-클리놉틸로라이트(heulandite-clinoptilolite) 계열의 제올라이트 및 단백석이 주요 광물 성분을 이루는 것으로 알려져 있다. 실제로 활성백토로 개발되고 있는 상부함탄층 내에 부존하는 일부 응회질 암석에 대해서 이 같은 품질요건 사항들을 시험해 본 결과, 제올라이트와 벤토나이트 광석으로서는 적당하지 않지만 흡착기능성 점토로서는 활용 가능성이 충분한 것으로 평가되었다(표 2). 또한 이 같은 성향의 점토질 광층들은 속성변질된 응회암은 물론 응회질 사암에 이르기까지 다양한 응회질 암상에서 산출되기 때문에 단위 암층으로 한정되는 제올라이트와 벤토나이트와는 달리 인접하는 유사한 성향의 광층들이 동일한 목적에서 한꺼번에 개발될 수 있다. 따라서 단위 층이 박층을 이루는 함탄층 내에서도 대규모로 개발될 수 있는 여지가 충분하다고 여겨진다. 흡착능력이 떨어지는 광석은 인위적으로 산처리를 하여 개선할 수 있기 때문에, 양이온 교환성과 pH의 정도에 따라 산성백토 및 상토 원료 자원을 평가할 수 있을 것이다. 앞으로 이 같은 관점에서 세밀한 자원 조사가 이루어지면 그동안 도외시 되었던 흡착기능성 점토자원에 관한 부존자원으로서의 잠재성이 함탄층 분포지 내에서 새롭게 부각될 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

(1) 쇄설성 퇴적층 위주의 퇴적상을 갖는 것으로 알려진 장기층군의 함탄층 내에 실제로는 상당한 규모의 화산쇄설성 퇴적암류가 혼재되는 것으로 밝혀졌다. 함탄층은 전체적으로 화산쇄설성 암상과 단순 쇄설성 암상이 교호되는 퇴적상을 보인다. 함탄층은 부석편을 함유하는

응회질 암석(응회암 및 응회질사암)이 특징적인 화산쇄설성 암상을 이루고 층준에 따라 응회질 사암, 암편질 응회암, 유리질 응회암이 혼히 개재된다. 이들은 속성변질되어 클리놉틸로라이트, 몬모릴로나이트 및 단백석을 상당량 함유하고, 일부 응회질 암층에서는 전형적인 제올라이트나 저품위 벤토나이트 광층을 이룬다. 클리놉틸로라이트와 몬모릴로나이트는 탄층 내의 열극에서도 발견되고, 여기에서는 응회질 암석에서와는 달리 혼히 석고를 수반하는 것이 특징이다.

(2) 광물조성과 양이온 치환능력의 수치로 함탄층 내의 응회질 암석들의 부존자원으로서의 활용 가능성을 검토해 본 결과, 6~7 개의 단위 암상들이 광층으로 평가되었다. CEC 값에 있어서 상대적으로 하부함탄층에 비해 상부함탄층의 광석들이 약간 높은 것으로 나타났다. 그러나 대부분 박층을 이루기 때문에 전형적인 제올라이트나 벤토나이트 자원으로서의 유용성과 잠재성은 낮은 것으로 평가된다. 그렇지만 CEC 수치 면에서 산성백토와 같은 흡착기능성 점토 자원으로서의 활용 가능성은 충분한 것으로 판단된다. 또한 이 용도로는 동일한 속성변질 광물조성을 보이는 유사한 응회질 암층들이 함께 개발될 수 있기 때문에 개발 규모 면에서도 상당한 잠재성이 있는 것으로 평가된다.

사 사

이 연구는 2006년도에 이루어진 한국과학재단의 국가지정연구소재은행 사업(산업광물은행)의 일환으로 수행되었다. 이 논문의 발간은 부분적으로 강원대학교 자원개발연구소의 재정적 지원에 의해서 이루어졌다. 이 논문 준비 과정에서 야외 조사와 자료 정리를 도와준 강원대학교 광물학연구소의 학생들에게 사의를 표하고자 한다. 또한 이 논문을 심사해준 황

진연 교수와 익명의 심사자에게 감사한다.

참 고 문 헌

- 노진환 (1989) 장기지역 제3기층의 불석화작용, 지질학회지, 25, 34-41.
- 노진환 (2001) 제올라이트의 광물상 및 응용광물학적 특성 평가, 산업광물은행 심포지움 논문요약집, 37-38.
- 상기남 (1976) 천연 제올라이트. 광산지질, 9, 166-167.
- Inglethorpe S.D.J., Morgan D.J., Highley D.E. and Bloodworth A.J. (1993) Industrial Minerals Laboratory Manual-BENTONITE, British Geological Survey, 72-75.
- Moon, H.S. (1984) Mineralogy and geochemistry of fuller's earths (Ca-montmorillonite) from southern Korea. Ph.D. Thesis, University of London, U.K. (Unpublished).
- Noh, J.H. (1984) Genesis of zeolites and smectites from the Tertiary tuffaceous rocks in Janggi area. Jour. Geol. Soc. Korea, 20, 97-114.
- Noh, J.H. (1985) Mineralogy and Genesis of Zeolites and Smectites from the Tertiary Tuffaceous rocks in Yeongil area. Ph.D. Thesis, Seoul National University (Unpublished), 129 p.
- Noh, J.H. (1991) Paragenesis and phase relations of mesolite-natrolite-laumontite from the Tertiary mafic tuffs in Yeongil area. Jour. Geol. Soc. Korea, 27, 136-144.
- Noh, J.H. and Boles, J.R. (1989) Diagenetic alteration of perlite in the Guryongpo area, Republic of Korea. Clays and Clay Minerals, 37, 47-58.
- Noh, J.H. and Kim, S.J. (1982) Mineralogy and genesis of zeolites from the Tertiary tuffaceous rocks in Guryongpo area. Jour. Geol. Soc. Korea, 18, 1-10.
- Noh, J.H. and Kim, S.J. (1986) Zeolites from Tertiary tuffaceous rocks in Yeongil area: In: New Developments in Zeolite Science Technology, (eds.), Y. Murakami, A. Iijima, and J.W. Ward, Proceedings of the 7th International Zeolite Conference, Kodansha, 59-66.
- Pabalan, R.T. and Bertetti, F.P. (2001) Cation-exchange properties of natural zeolites. In: D.L. Bish and D.W. Ming (eds.), Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications. Mineralogical Society of America, Geochemical Society, 453-518.
- Rubenstein, S.D. (2001) ChemdrawTM, Phill Science Co.
- Tateiwa, I. (1924) Geological atlas of Chosen, Ennich and Choyo Sheets. Geol. map. Korea, 2, 42 p.

2006년 9월 13일 원고접수, 2006년 9월 22일 게재승인.