

포항-감포 지역산 규조토의 산출상태와 응용광물학적 특성

Occurrence and Applied-mineralogical Characterization of Diatomite from the Pohang-Gampo Area

노진환(Jin Hwan Noh)*

강원대학교 지질학과

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

요약 : 감포 지역의 육성 화산쇄설성 퇴적층인 어일층과 해성층인 포항 지역의 포항층에서 규조토가 대개 1 m 미만의 박층을 이루며 부존된다. 어일층에 부존되는 규조토는 상대적으로 고품위를 이루고 속성변질의 정도도 미미한 상태로 산출된다. 이에 비해서 연일층군의 상위 층위에 부존하는 규조토는 상대적으로 저품위를 이루고 산출지에 따라 심하게 속성변질된 양상을 보인다. 속성변질된 규조토에서 규조편의 광물상인 단백질의 결정도가 증대되어 궁극적으로는 규조 폐각의 변형과 규조토의 조직적 변화를 수반하면서 석영으로 전이되는 양상이 인지된다. 이 같은 규조토의 속성작용은 매몰정도에 의존되기 보다는 주로 속성수의 접촉 및 관여 정도에 의해 규제되는 화학적 속성작용의 형식으로 진행된 것으로 해석된다. 포항-감포 지역산 규조토들의 화석상, 광물상, 화학조성 및 기타 물질들을 주사전자현미경 관찰, X-선회절 분석, 화학분석, 비표면적 측정 등의 방식으로 그 품위와 품질 평가와 관련하여 면밀히 조사하였다. 전반적으로 외국의 유명한 산지의 광석들에 비해서 그 품위와 품질 면에서 불리한 입장에 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나 포항 지역의 일부 해성 규조토 광상들은 저품위 광체를 이루지만 경량 내화물 제조용과 같은 특정 용도로는 개발될 수 있는 소위 '점토질 규조토 (moler) 유형'을 이룬다. 또한 이 유형의 규조토 층은 연일층군 상부에 자주 개재되고 비교적 두터운 광층을 형성하기도 하기 때문에, 앞으로 이 층에서 개발 잠재성이 있는 점토질 규조토 광체의 탐광과 개발을 위한 체계적이고도 정밀한 조사가 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

주요어 : 포항-감포, 규조토, 속성변질, 단백질, 화학적 속성작용, 품위와 품질, 점토질 규조토

ABSTRACT : In the Pohang-Gampo area, several diatomite beds occurred in mostly thinner than 1 m are embedded in the Pohang Formation of marine environment and the pyroclastic Eoil Formation. The diatomite from the Eoil Formation is constituting the high-grade ore altered slightly by diagenesis. In contrast, the diatomite intercalated within the upper horizon of the Yeonil Group is comparatively low-grade and highly altered in places. During diagenesis, an increasing of crystallinity of opal, i.e., the original mineral component of diatom, results in ultimately the mineral transition to quartz with accompanying a drastic change in morphology and texture of the altered diatomite. The diagenetic alteration appears to have undergone by way of the chemical diagenesis, which is largely controlled by degree of fluid contact, rather than burial diagenesis. For the diatomite from the Pohang-Gampo area, careful SEM observations, XRD, chemical analyses, and determination of specific surface area were done to identify the fossil species, mineral and chemical composition, and other physical properties in

*교신저자: jhnoh@kangwon.ac.kr

the view of assesment of grade and quality. The domestic diatomite ores are evaluated to be not good in grade and quality, compared to those of famous foreign localities. However, some diatomite deposits of marine origin from the Pohang Formation is constituting a peculiar clay-rich type, i.e., moler applicable to the special usage such as a manufacturing of lightweight brick. Because such a diatomite is frequently intercalated relatively as a thicker bed in the upper part of the Yeonil Group, a systematic and careful investigation should be done for the exploitation and development of an economic diatomite deposit of the moler type.

Key words : Pohang-Gampo, diatomite, diagenetic alteration, opal, chemical diagenesis, grade and quality, moler

서 론

학술적으로 규조토(珪藻土, diatomaceous earth)는 수중에서 서식하는 부유성 단세포 조류의 일종인 규조(珪藻, diatom)의 잔해물로 구성된 퇴적물 내지 퇴적암을 지칭한다. 규조토는 대개 백색 내지 연미색을 띠고 미립질(대개 10~150 μm)이며 취약한 토상의 물성을 보인다. 이들이 속성작용에 의해서 부분적으로 고화되어 퇴적암 내지 퇴적층의 형태를 이룬 것을 학술적으로 규조암(diatomite)이라고 부르고, 부존자원으로 개발되는 것은 대부분 여기에 속한다. 그렇지만 현재 국내에서 광산물의 명칭으로는 규조토로 통용되고 있고, 외국에서도 'kieselguher' 등의 용어로도 불려지기 때문에 용어상 다소간의 혼란이 있는 상황이다.

규조토는 그 규질 화석편의 특별한 공동 조직과 조성에 의해서 파생된 여과(filteration) 및 흡착 특성 그리고 물성적으로 가볍고 안정한 재질 특성 등을 지니는 산업적으로 유용한 광물질이다. 규조토는 2000 여년 전에 그리스 사람들에 의해서 경량 전자재로 처음 사용된 이래, 1860년대에는 다이내마이트의 제조에서도 사용되는 등, 산업 응용 면에서 그 유래가 비교적 오래된 것으로 알려져 있다(Harben and Kuzvart, 1996). 그렇지만 여과재, 충전재, 흡착재 등으로써 현대 산업에 다양하게 응용되기 시작한 것은 20세기 중반부터 관련 산업의 발달과 더불어 본격적으로 이루어진 것으로 보인다.

국내에서 규조토는 과거 일제시대 말기인 1940 년대에 감포-포항 일대의 제3기층에 대해서 조선총독부 산하의 지질조사소 요원들에 의해 조사되어 소규모로 채광되었던 것으로 알려져 있다(立岩 巖, 1976). 해방 이후에 2,000~3,000톤 규모로 이루어졌던 규조토의 개발은

1970~1980 년대에 감포 지역에 소재하던 '한국규조토공업주식회사'를 중심으로 국내 총생산 실적이 20,000톤 정도에 이를 정도로 성행하였다(대한광업진흥공사, 1979). 그 후에는 국내에 부존되었던 규조토 광상들이 대부분 채진되기 시작하여 2000년대 이후에는 국내에서의 개발은 거의 이루어지지 않고 주로 수입에 의존하게 되었다.

규조토는 학술적으로 매우 흥미로운 부존환경 및 광물특성을 갖는 특이한 광물자원이고 현대 산업에서 그 유용성이 점차 증대될 것으로 예견되는 산업광물들 중에 하나로 여겨진다. 그렇지만 한때는 일부 수출까지도 하였던 것으로 알려진 이 광물자원에 대해 현재까지 국내에서는 간단한 몇 가지 조사보고 형태의 문헌들 이외에는 별다른 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 특히 규조토의 광물특성에 따른 광석 평가는 그 용도와 관련하여 매우 중요한 사안임에도 불구하고 그 동안 학계에서 전혀 다루어지지 않았다. 현재에도 그렇지만 앞으로는 이 광물자원을 전적으로 수입해서 관련 산업에 사용해야 된다는 점을 감안하면, 규조토에 관한 광물특성 평가와 그에 따른 적절한 응용방안의 모색을 위한 지식 체계와 기술의 확립은 관련 산업계의 발전을 위해서 시급히 해결되어야 할 사안인 것으로 사료된다.

이 같은 배경과 맥락에서 이 논문에서는 우선 국내산 규조토의 부존환경, 산출상태, 광물상 및 광물특성을 밝히고자 한다. 또한 이 광물질의 용도와 관련하여 품위(grade) 및 품질(quality) 기준 상의 평가 주안점을 응용광물학적으로 논의하고자 한다.

연구 방법

규조토의 산출상태와 주변 암상 및 지질을 파악하기 위해서 포항-감포 지역의 대표적 산지를 중심으로 야외 조사를 실시하였다. 암색은 미국 지질학회에서 발간된 표준 암색 도감(Rock Color Chart)에 따라 정하였다. 규조토 광석들을 구성하는 규조 화석종의 감정을 위해 주사전자현미경(SEM) 관찰을 시행하여 그 결과를 경북대학교 고생물학 연구팀(이성주 교수)의 도움을 받아 해석하였다. 규조토의 광물조성과 속성광물상을 파악하기 위하여 편광 및 주사전자현미경 관찰과 X-선회절(XRD) 분석을 시행하였다. X-선회절 분석기(Rigaku model D/Max-2200)의 실험 조건은 $\text{CuK}\alpha_1$ 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. 이 외에도 규조토 광석으로서의 활용 가능성을 타진해보기 위해 화학분석은 물론 백색도, 질소 가스를 사용하는 BET 방식의 비표면적(specific surface area) 측정 등을 시행하였다.

부존환경 및 산출상태

규조토의 원천인 규조는 해수와 담수에서 모두 서식하고 그 종의 숫자가 12,000 여종에 달할 정도로 다양한 미생물로서, 한 개체가 서식 여건만 주어지면 한달 이내로 대략 100,000에 이르는 개체수로 증식될 수 있는 생태 양상을 보이는 것이 특징이다(Tappan, 1980). 규질 화석상을 이루는 규조편들은 대체로 그 세포막(frustule)들이 방사상의 대칭성을 이루는 유형(Centrales Group)과 축상 대칭성을 보이는 유형(Pennales Group)으로 구분된다(Harben, 2002). 이에 따라 전자는 주로 윤좌, 원반, 팔프공 등과 같은 구상 형태를 이루고 후자는 주로 편구상 또는 침상 내지 사다리 형태를 이룬다. 이 같은 규조의 종 및 형태상의 다양성에 기인하여 규조토의 독특한 다공성 기능이 유발되고, 왕성한 번식력에 의해서 그 잔해들이 부존자원으로서 개발이 가능한 규모의 퇴적층을 이루게 된다.

현생 생물이기도한 규조는 지질시대를 통해서 백악기말부터 그 개체 수가 증가하기 시작하여 제 3기에 들어 가장 번성하였다. 따라서

간혹 제 4기 층에서도 광상을 이루기도 하지만, 대부분의 경제성 있는 규조토 광상들은 전 세계적으로 제 3기층에 부존된다(Harben, 2002). 규조는 충분한 습기와 햇빛 그리고 영양소만 있으면 심지어 토양이나 암반 위에서도 서식할 수 있는 것으로 알려져 있다(Bradbury, 1988). 규조는 수중에 존재하는 인산염 및 질산염 성분을 주된 영양소로 하여 서식하지만, 이들 영양소 외에 규조의 골격성분이 되는 SiO_2 를 필수적으로 섭취해야만 생존할 수 있는 생태상의 특징이 있다. 따라서 규조가 번성하려면 규산 성분이 대규모로 지속적으로 공급될 수 있는 서식 여건의 조성이 필수적이다. 이 같은 여건은 지질학적으로 화산활동과 밀접한 연관을 갖는다. 퇴적분지 근처에서의 왕성한 화산활동은 지화학적으로 불안정하여 물에 녹기 쉬운 성분이며 SiO_2 가 풍부한 화산재의 공급을 원활하게 하여 규조의 번성을 조장하는 것으로 알려져 있다(Harben, 2002). 대부분의 대규모 규조토 광상들이 이 같은 화산쇄설성 퇴적암층 내에 부존된다는 사실이 이를 반증한다. 따라서 시기적으로는 제 3기 동안에 가장 화산활동이 왕성했던 마이오세(Miocene)의 퇴적층에서 규조토가 많이 산출된다.

규조토 광상은 전 세계적으로 최대의 매장량을 보이는 미국 서부의 'Lompoc' 지역의 광상이 유명하다. 'Cellite'사에 의해서 연간 30만톤 이상 개발되어 전 세계로 공급되고 있는 이 광상에서는 해성 기원인 양질의 규조토 광층이 마이오세 퇴적층(주로 Monterey Formation) 내에서 10 m 미만의 층상을 이루며 규질 이암 내지 셰일들과 교호되는 양상으로 산출되는 것으로 알려져 있다(Harben, 2002). 그 밖의 호성(lacustrine) 기원의 규조토 산지로 유명한 프랑스 남부의 'Massif Central' 지역의 광상과 덴마크, 중국, 스페인, 일본 등지의 광상들이 주요 산지로 알려져 있다.

국내에서 규조토는 포항-경주 일대의 제 3기층과 칠원 지역의 제 4기층에서 일부 산출된다. 부존자원으로서의 잠재성이 인정될만한 규조토 광상들은 대부분 포항-경주 일대의 제 3기층에 부존된다(그림 1). 2000년까지는 포항의 장성광산을 비롯하여 4개소의 광산에서 소규모로 개발되어 생산실적이 알려진 바 있지만(한국지질자원연구원, 2005), 현재는 대부분 개발이 중단

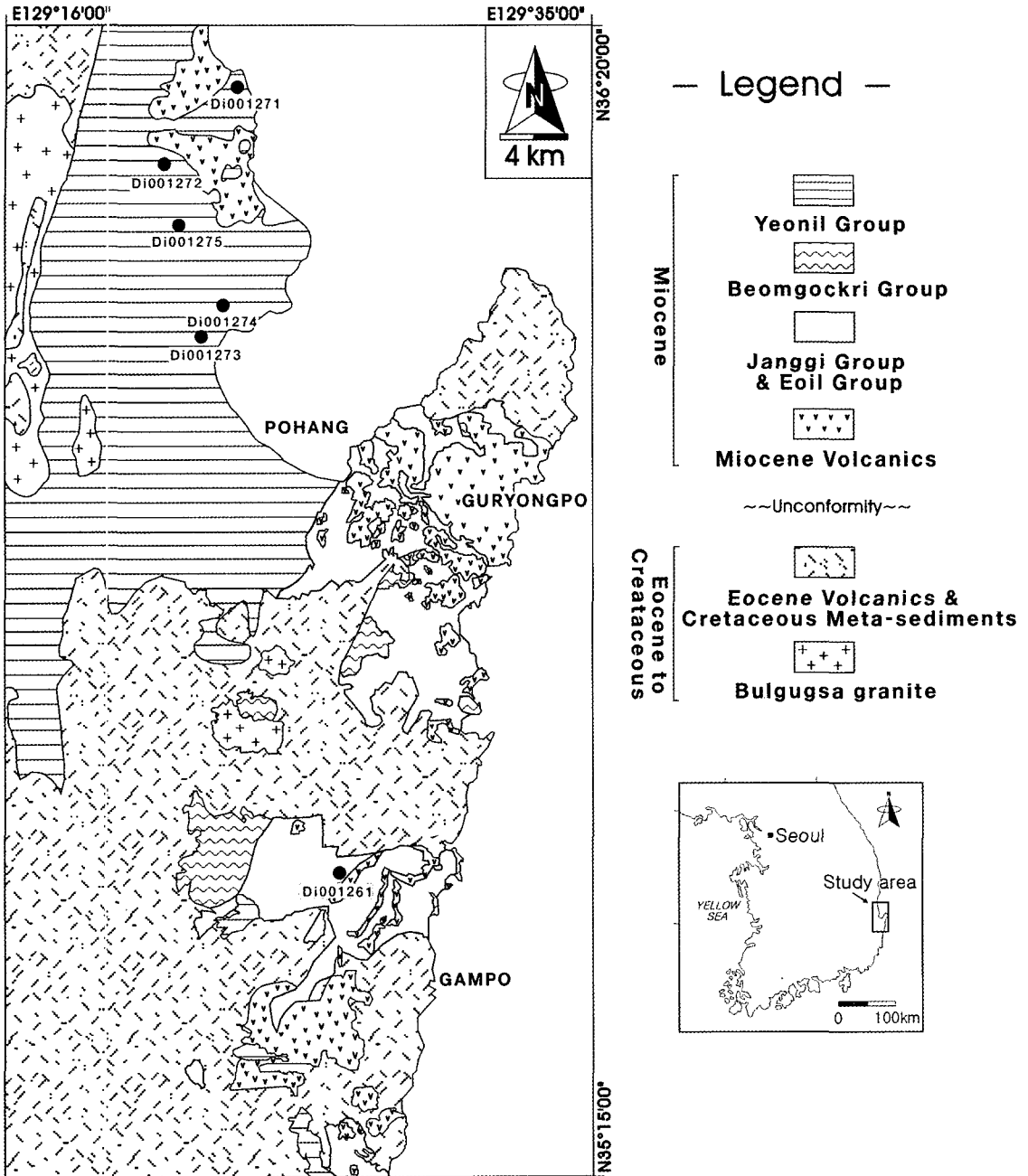


Fig. 1. Geologic and index maps illustrating localities and geologic background of some diatomite deposits in the Pohang-Kyongju area.

된 상태인 것으로 파악된다. 포항-경주 지역의 제 3기층에서 산출되는 규조토는 육성층군인 어일층군의 중상부 층군(어일층)과 그 상위 층

군인 연일층군의 상부 해성 기원의 층군(포항층)에서 산출되는 것으로 구분될 수 있다(그림 1). 전자는 국내의 대표적인 규조토 산지로서

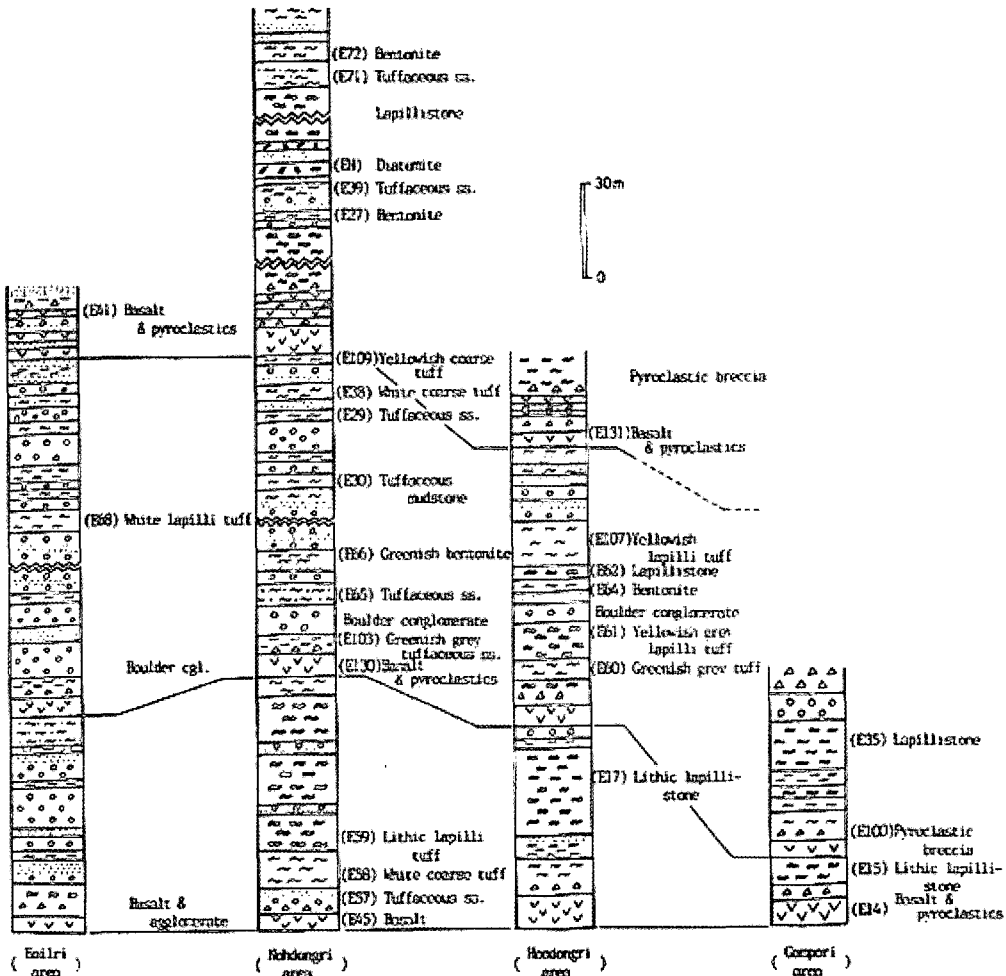


Fig. 2. A correlation of stratigraphic columns of the Eoil Formation including diatomite beds with different localities (Kim, 1988).

지금은 거의 채진되었지만 과거 일제시대 말경부터 1980년대까지 활발히 개발되었던 광상이다. 후자는 전자보다는 뒤늦게 개발되었지만 최근까지도 내화물 제조나 농업 용도로 일부 개발되었던 규조토 광상으로서 흥해 지역의 해안 부근에 주로 부존된다(그림 1).

감포 지역의 어일층 상부에서 산출되는 규조토는 육성 기원의 광상을 이루고, 응회암 내지 응회질 사암 내에서 대개 1~2 m 정도의 박층을 이루며 2 매 개재되는 양상으로 부존된다(그림 2, 김기업, 1988). 비교적 연장성이 좋은 편이나 층후가 불규칙하고 곳에 따라서는 렌즈상으로 산출되기도 한다(그림 3). 야외에서 대

개 담황색을 띠지만 건조되면 더욱 가벼워지면서 색상도 밝아지는 양상을 보인다. 규조토 층 내에 간혹 암회색 내지 암녹색을 띠는 단백석(opal-CT)이 10~20 cm 정도 두께로 렌즈상 내지 단괴상을 이루며 층리와 평행하거나 사교되는 양상으로 수반된다. 이 지역에서 산출되는 규조토는 주위의 지질환경과 퇴적상의 특징으로 보아 전형적인 화산쇄설성(pyroclastic) 퇴적 환경에서 형성되었음이 분명하다. 제 3기 마이오세에 있었던 호성(lacustrine) 퇴적분지 근처에서의 빈번한 화산활동의 결과, 화산재의 형태로 규산 성분이 많이 유입됨으로써 규조 서식에 적합한 환경이 조성된 것으로 여겨진다.

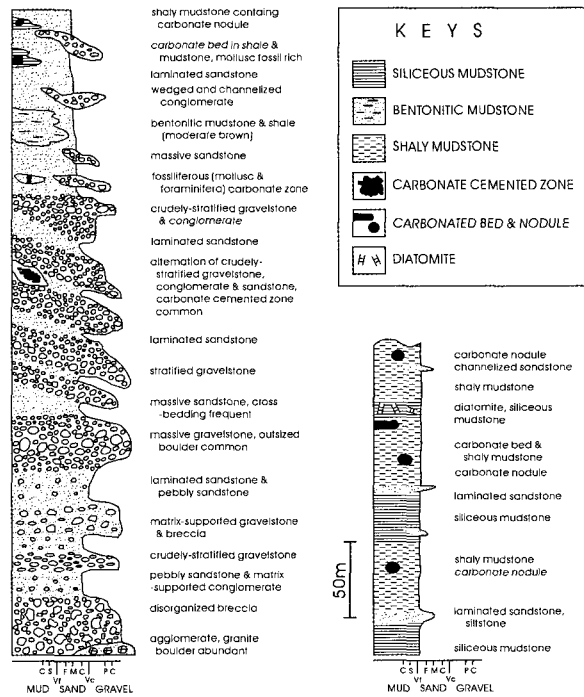


Fig. 3. A stratigraphic column of the Yeonil Group including diatomite beds.

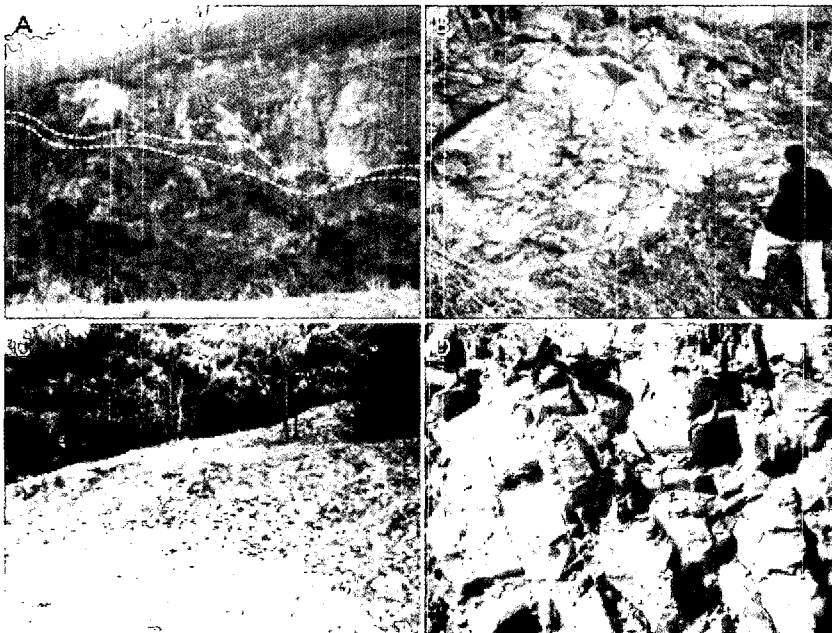


Fig. 4. Field occurrences of diatomite from the Tertiary Formation. (A) A diatomite bed (dashed line) intercalated between tuffaceous sediments from the Eoil Formation in the Gampo area. (B) Thin beds of diatomite (white) included within tuffaceous sediments from the Eoil Formation in the Gampo area. (C) Open pits for the excavation of diatomite from the Pohang Formation in the vicinity of Heunghae area. (D) Diatomaceous siliceous mudstone from the Pohang Formation in the Pohang area.

포항-홍해 지역에 주로 분포하는 연일층군은 장기층군이나 어일층군의 상위에 부정합적으로 놓이는 마이오세 시기의 퇴적층군으로서, 하부에서 선상지-삼각주계(fan-delta system) 퇴적상을 이루는 천북층(과거의 천북역암층 및 학림층)과 상위의 원양성 퇴적물(pelagic to hemipelagic sediments) 위주의 포항층(홍해층 및 두호층)으로 구분된다(노진환, 1994). 규조토는 주로 해성층인 포항층 상부에서 산출된다(그림 3). 포항층은 선상지-삼각주계 퇴적 말기에 공급지의 삭박으로 퇴적물의 유입이 쇠퇴함에 따라, 원양성 부유 퇴적물, 특히 규조의 파편이나 규질 연니(siliceous ooze)같은 원양의 부유성 퇴적물과 규조 잔해물들이 서서히 침전됨으로써 형성되었다(노진환, 1994). 내륙으로부터 간헐적으로 세립 퇴적물이 유입될 경우에는 부분적으로 세일의 암상을 나타내기도 하지만, 이 층은 대부분 규질 이암(siliceous mudstone)이 주된 암상을 이룬다(그림 4). 이 같은 규질 이암들 사이에는 층준에 따라 단속적으로 규조토가 부존된다. 성인적으로는 유명한 미국 캘리포니아의 규조토 광상과 유사한 생성환경을 보인다. 즉, 미국 서부의 'Lompoc' 광산처럼 해안선을 따라 규조토 광상이 분포하고 규질 이암류와 밀접한 층서적 연관성을 보이며 산출되는 유사한 퇴적 양상을 보인다. 이는 대륙붕 내지 해안 분지 내에서 육상 퇴적물의 공급이 적었던 시기에 일시적으로 영양염류와 규산이 풍부한 여건이 조성되어 규조토 광상이 형성되었을 개연성을 지시하는 것으로 여겨진다. 이 지역의 규조토는 부분적으로는 순수한 규조토 조성을 보이는 경우도 있지만, 대개 주위의 규질 이암과 더불어 식별이 용이하지 않을 정도로 저품위를 이룬다. 규조토의 단위 광층으로는 대개 1 m 전후의 박층을 이루지만 그 개재 정도가 빈번하여 전체 광상의 규모 면에서는 상당한 잠재성이 인정될 수 있는 상태로 산출된다. 따라서 현재에도 상토 원료용과 같은 저급한 용도로 규질 이암과 함께 일부 개발되고 있지만, 앞으로 정밀한 탐광이 이루어진다면 상당한 규모의 양질의 규조토 광상이 새롭게 개발될 수도 있을 것으로 여겨진다.

광물상, 광물특성 및 광석 유형

마치 눈 결정처럼 다양한 형태를 보이는 규조 각질부는 기본적으로 함수규산(hydrous silica, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)의 조성을 갖는 것이 특징이다. 현생 규조류의 조성은 거의 'silica gel'과 같은 비정질 상태를 이루지만, 화석상의 규조는 용해도가 상대적으로 낮은 'opaline silica (opal-A)'의 조성을 갖는 것으로 알려져 있다(Kamatani, 1971). 그렇지만 X-선회절 분석에 의하면 대개 크리스토파라이트(cristobalite) 내지 트리디마이트(tridymite) 광물상의 단백석(opal-CT)인 것으로 나타난다(Harben and Kuzvart, 1996). 대개 속성변질에 의해 야기되는 것으로 알려진이 같은 광물상의 변화가 심화되면 비표면적은 $10 \sim 30 \text{ m}^2/\text{g}$ 에서 $0.5 \sim 5 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 감소하지만 비중은 그 반대로 2.0에서 2.3으로 그리고 굴절율은 1.40에서 1.49 정도로 증대되는 경향을 보인다(Calacal and Whitmore, 1987).

규조토의 산업적 응용 가치를 유발하는 광물 특성, 즉 주요 상업적 특성(commercial property)은 (1) 높은 공극율과 비표면적을 지닌 미세 입상체 특성, (2) 화학적으로나 열적으로 안정한 단백석질 광물상 및 (3) 경량 광물질이면서 적당한 강도와 내구성을 지닌 밝은 색상의 제질 특성으로 정리될 수 있다(표 1). 규조토의 높은 공극율과 비표면적은 미세한 입도와 불규칙한 형상을 갖는 규조의 입자 특성과 그 종류에 따라 세포막에 규칙적으로 형성되는 미세 공극(대개 $1 \mu\text{m}$ 이하)에 의해 파생된다(Breese, 1994; Harben, 2002). 규조토의 응용에서 여과재, 흡착·흡수재 등으로서의 주요 기능은 대부분 이 특성에 기인한다. (2)의 특성은 함수규산 성분, 즉 그 화학조성에 의한 것으로, 이는 통상 화학적 반응성이 낮을 뿐만 아니라 최소한 $1,400^\circ\text{C}$ 정도까지의 고열에서도 견디는 규조토 특유의 물질적 특성을 의미한다. 이 같은 특성에 의해서 규조토는 단열재나 내화물의 원료로서도 사용된다. (3)의 특성은 (1)과 (2)의 복합적 결과로서 파생되는 규조토의 제질 특성으로서, 이에 의거하여 각종 충전재 및 연마재 등으로서의 성능이 유발된다.

규조토 광석은 대개 주요 광석 성분인 규조 잔해물 외에 점토광물, 화산재, 석고 등과 같은 불순 광물 성분들을 함유한다. 특히 주요 불순

Table 1. Mineralogical characteristics, commercial properties and their relevant application of typical diatomite

	Mineralogical Characteristics		Commercial Properties & Application	
			Properties	End Use
diatomite	mineral phase	opal-A, opal-CT	porous, fine-grained, irregular shape, high sorption & specific surface area	filters, absorbents, carriers, fertilizers, stabilizers, insecticides
	impurities	clays, chert, salt, gypsum, pyrite		
	skeleton size	mostly 50~100 μm		
	color	creamy to off white	chemically inert, low bulk density, low thermal conductivity, thermally resistant	lightweight bricks, thermal & sound insulators, filters fireproofers, functional fillers
	SiO ₂ contents	85~94 wt%		
	free moisture	4 wt%		
	specific gravity	2.0		
	melting temperature	1,400~1,600°C	light colored, moderate hardness, pH & refractive index	fillers & extenders, mild abrasives, toothpaste
	pH	8		
	hardness	4.5~6.0		
refractive index	1.40~1.46			

Source: R.C.Y. Breese, 1994, Industrial Minerals and Rocks, L.L.Y. Chang, 2002, Industrial Mineralogy, P.W. Harben, 2002, The Industrial Minerals HandyBook

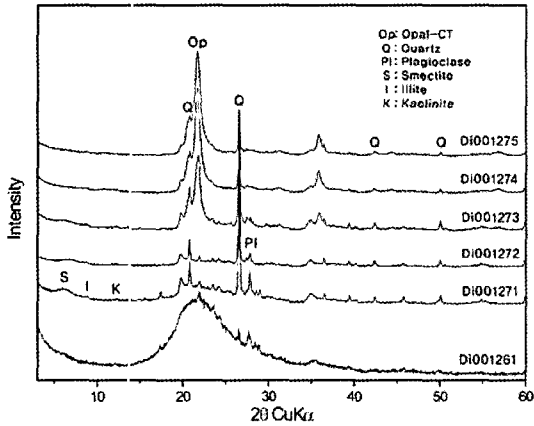


Fig. 5. X-ray diffraction patterns for domestic diatomite ores from the Tertiary formations (Di001261; diatomite from the Eoil Group in the Gampo area, others: diatomites from the Yeonil Group in the Pohang-Heunghae area).

물을 이루는 점토광물들을 많이(통상 30% 이내의 범위) 함유하는 규조토 광석 유형을 ‘moler’ 또는 ‘moler earth’라고 구분한다(Harben, 2002). 이 같은 저품위 규조토 광석들은 고급 용도로는 사용할 수 없고 내화물 및 경량 전자재 제

조용도 등으로 그 응용 범위가 한정되지만, 부존자원의 수급 측면에서는 대규모로 이루어질 수 있는 여지가 있기 때문에 일부 국가에서는 별도의 광산물로 취급되고 있는 상황이다.

포항-경주 일대에서 산출되는 국내산 규조토 광석을 X-선회절(XRD) 분석, 화학 분석 및 주사전자현미경(SEM) 관찰 등을 통해서 기본적으로 그 광물상, 화학조성 및 광물특성을 조사해 보았다. X-선회절 분석결과에서 알 수 있듯이 규조토를 구성하는 주된 광물상은 단백석이고 이들은 산출지에 따라 그 결정도에 있어서 상당한 차이가 있음을 보여준다(그림 5). 이는 규조가 사멸되어 퇴적된 이후에 필연적으로 겪게되는 숙성작용에 의한 변질의 결과로써, 감포 지역의 육성층에서 산출되는 규조토보다 흥해-포항 지역의 해성층에서 산출되는 것들이 상대적으로 더 변질되어 결정도가 높게 나타난다.

일반적으로 포항-흥해 지역산 규조토 주변에서 주된 압상을 이루는 규질 이암은 세일보다 단백석(opal-CT)과 석영이 풍부하지만 스멕타이트(smectite)같은 점토 광물의 양은 매우 적게 함유되는 것이 특징이다. 그렇지만 전반적

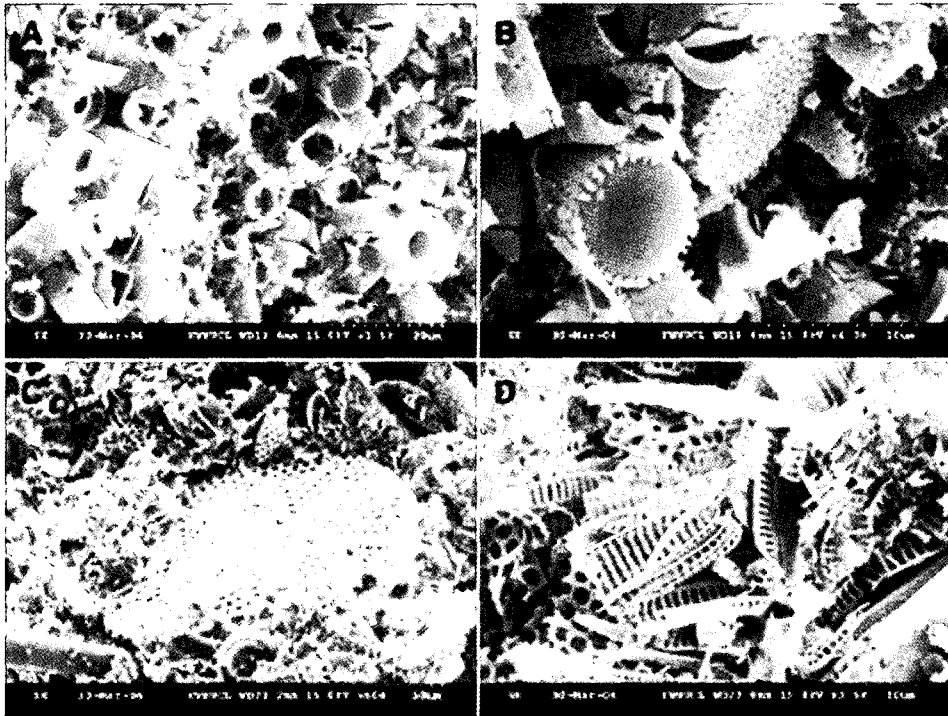


Fig. 6. Scanning electron micrographs of domestic diatomite ores showing various diatom skeletons. A, B. lacustrine diatom (*Aulacoseria* sp.) skeletons from the Eoil Formation in Gampo area. C. Marine diatom (*Thalassiosira* sp.) skeletons from the Pohang Formation in the Heunghae area. D. Marine diatom (*Fragilaria* sp.) skeletons from the Pohang Formation in the Heunghae area.

으로 포항층의 퇴적암들은 단백석 → 석영으로의 상전이 과정과 연관된 규질 속성작용(silica diagenesis)의 영향을 많이 받은 것으로 알려져 있다(노진환, 1994). 이 같은 점을 고려한다면, 포항-홍해 지역의 해성규조토 광석들도 마찬가지로 규질 속성작용에 의해서 단백석 상의 결정도 증가와 더불어 석영이 수반될 정도로 심하게 규화·변질된 것으로 여겨진다(그림 6, 7). 포항-홍해 지역산 규조토에서는 규조편의 규산 광물상이 'opal-CT'나 석영으로 재차 변질됨으로써 규조의 형태가 와해되어 있는 경우가 많지만, 일부 광상들에서는 그 변질 정도가 덜해서 규조각을 통해서 그 종을 분명히 동정할 수 있을 정도로 변질이 미약하게 작용된 곳도 있다. 규조토가 동일한 층준에서 이 같이 지역적으로 서로 다른 변질 양상을 보이는 것은 이 같은 규조토의 속성변질이 그 심도에 따른 매몰속성작용(burial diagenesis)이 아니고 그 주변암의 여건과 공극수의 화학조성에 의존

된 일종의 'insitu alteration' 형식으로 진행되었음을 시사하는 것으로 해석된다. 포항-홍해 지역의 일부 규조토 광상(영일광산 등)의 광석들은 1차적 퇴적물의 상태로 혼입된 것으로 사료되는 상당량의 점토광물들(스멕타이트, 일라이트 및 고령석)을 함유하는 것으로 나타난다(그림 5). 이 저품위 광석들은 전형적인 규조토라기보다는 전술한 바와 같은 소위 'moler'형 광석에 가까운 광물조성 및 광물상을 갖는다.

경북대학교 규조연구팀(책임자: 이성주 교수)에 감정을 의뢰하여 동정한 바에 의하면, 제 3기층에서 산출되는 규조토를 이루는 규조 화석들은 그 세포막들이 방사상의 대칭성을 이루는 'Centrales Group'과 축상 대칭성을 보이는 'Pennales Group'들이 모두 공존하는 것으로 나타난다(그림 6). 그 세부 종으로는 육성 규조토에서는 '*Aulacoseria* sp.'가 대부분을 이루고 해성 규조토에는 '*Thalassiosira* sp.', '*Stephanodiscus niagarae* Ehrenberg', '*Fragilaria* sp.'

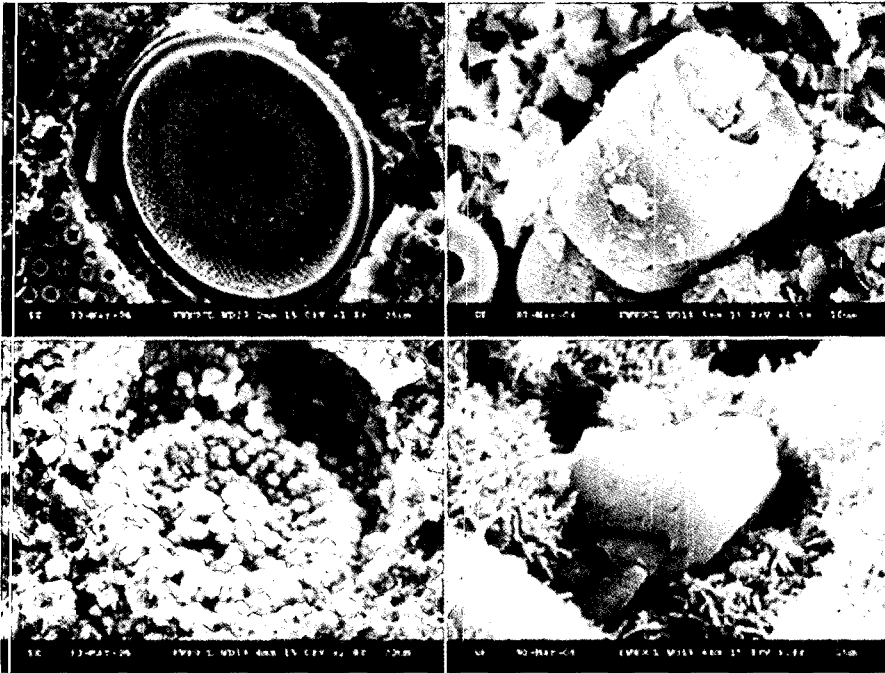


Fig. 7. Scanning electron micrographs of domestic diatomite ores showing characteristic porous structure of the diatom skeletons and their alteration mode. (A) Radial diatom (*Stephanodiscus niagarae* Ehrenberg) frustles including numerous symmetrical micro-voids. (B) A diatom skeleton coated with amorphous silica by slight alteration resulting from diagenesis. (C) Relicts of diatom frustules altered to opal-CT lepispheres by diagenetic alteration. (D) An association of opal-CT and authigenic quartz found in the altered diatom skeleton.

등이 다양한 균집을 이루는 것이 특징이다.

품위 및 품질 평가

일반적으로 산업광물에서 그 광석의 품위(grade)는 유용 광물성분의 절대적인 함량이나 함유 수준을 지칭하고, 품질(quality)은 그 용도 적합성에 따른 광물학적 제반특성을 의미한다. 이 양자는 별도의 개념으로서 품위가 좋다하여 특정 용도로서의 품질이 반드시 좋은 것은 아니다(노진환, 2002). 또한 산업광물에서 광석의 품위는 화학분석치를 기준으로 평가될 수 없고, X-선회절 정량분석 등을 통해서 그 광물 함유 수준이 정량되어야 한다. 그렇지만 규조토의 경우에는 이 같은 품위 개념이나 산정 방식이 단순히 적용될 수 없다. 왜냐하면 규조토의 유용 성분은 특정한 광물이 아니라 규조라는 단세포 식물의 잔해, 화석이기 때문이다. 또

한 이 화석은 2차적 변질에 의하여 변형 및 변질되면 유용 성분으로서의 그림 7에서 보듯이 효용 가치를 잃을 수도 있기 때문이다. 물론 간접적이기는 하지만 규조편의 함량은 규조 특유의 화학조성, 즉 SiO_2 나 그 광물상인 단백질의 함유 수준으로 가름될 수도 있겠지만 여기에는 현실적으로 상당한 오류가 수반될 개연성이 크다. 즉, 규산 성분의 함량으로 품위를 평가할 경우에는 흔히 공생하는 석영을 비롯한 규산염 광물들의 존재에 의해서 오산될 가능성이 있을뿐더러 규조 화석의 물질적 변질상태, 즉 2차적 속성변질에 의한 규조편의 변형 및 변질 양상이 고려될 수 없다는 문제가 제기된다. 그렇다고 해서 규조 화석의 광물 성분, 즉 단백질의 함량으로 그 품위를 평가하기도 어려운 실정이다. 비정질에 가까운 이 광물의 특성상 X-선회절법으로 계량하기도 용이하지 않을 뿐만 아니라, 산지에 따라 그 결정도가 다양하

Table 2. Chemical composition of diatomites from the Tertiary formations in Korea and those from the other countries

	Korea						USA*		China*	Denmark*
	Gampo		Pohang-Heunghae				Lompoc, CA	Nevada	Jilin	Moler
	Di00 1261	Di00 1271	Di00 1272	Di00 1273	Di00 1274	Di00 1275				
SiO ₂	85.82	66.92	67.39	75.13	82.28	87.61	89.70	89.82	90.07	67.80
Al ₂ O ₃	2.17	10.23	14.09	11.62	8.81	5.71	3.72	2.32	1.98	10.30
TiO ₂	0.12	0.43	0.61	0.50	0.24	0.25	0.10	0.11	0.09	1.21
Fe ₂ O ₃	0.92	2.97	3.48	1.79	0.53	0.57	1.09	0.84	0.67	6.85
MnO	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	-	-	-	-
MgO	0.18	0.66	0.70	0.56	0.28	0.27	0.55	0.47	0.28	1.64
CaO	0.21	0.13	0.17	0.09	0.09	0.06	0.30	0.30	0.39	1.35
Na ₂ O	0.20	0.69	1.07	0.49	0.16	0.13	0.31	0.67	0.22	0.46
K ₂ O	0.25	1.28	1.74	1.70	0.82	0.86	0.41	0.19	0.35	1.47
P ₂ O ₅	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.10	0.01	0.06	0.21
LOI	10.85	14.51	9.78	6.87	5.24	4.07	3.70	5.40	6.30	7.91
Total	100.72	97.88	99.08	98.81	98.48	99.55	99.98	100.27	100.41	99.20

*: E.A. Dublanc et al., September 1993, Industrial Minerals

게 변화되고 무기 기원의 퇴적물 중에서도 흔히 수반되기 때문에 이 자료에만 의거하여 규조토의 품위를 산정하는 것은 이론적으로나 현실적으로 타당하지 않다. 이론적으로는 주사전자현미경 하에서 규조편을 동정하면서 그 빈도를 계측하여 규조토의 품위를 산정하는 것이 타당하지만, 이는 현실적으로 적용할 수 없는 방식이다.

규조토의 품위에 관여되는 변수가 이처럼 복잡하기 때문에 그 품위를 정확하게 수치상으로 표시하기 어렵다. 따라서 주사전자현미경 하에서 그 화석상과 그 변질 정도를 관찰하고 X-선 회절 분석을 통해서 그 광물상과 수반광물들의 조성을 파악한 후에, 이를 바탕으로 규조토의 화학조성, 즉 SiO₂의 함유 수준으로써 그 품위를 평가하는 것이 합리적인 방안이 될 것으로 여겨진다.

국내산 규조토는 외국의 유명 산지의 광석들에 비해서 전반적으로 낮은 품위를 보인다. 그렇지만 감포 지역의 육성 규조토는 주사전자현미경 하에서 고순도의 규조 화석의 함유도를 보이고 X-선 회절 분석에서도 'opal-CT' 위주의 단순 광물조성을 보인다. 이 규조토는 속성변질 정도에 있어서도 미약하고 규산 함량을 기

준으로도 외국의 유명 산지의 광석과 비교해도 손색이 없을 정도로 고품위 광석을 이룬다(표 2). 이에 비해서 포항-홍해 지역산 해성 규조토들은 대부분 저품위 광석 유형을 이루는 것으로 평가된다. 규산 성분의 함유 수준에 있어서는 일부 광석들(Di001274와 Di001275)이 80 wt% 이상의 함량을 보이지만, 주사전자현미경 및 X-선 회절 분석에 의하면 대부분 상대적으로 결정도가 높은 상태의 단백석과 석영으로 변질되어 그 형태와 구조가 왜곡된 상태로 존재하기 때문에 품위를 논하기 어려울 정도로 저질 규조토로 평가된다. 나머지 해성 규조토들은 화학조성과 광물조성에 있어서 덴마크산 'moler'형 규조토와 대비될 수 있을 정도로 규조 화석편의 함유도가 낮은 저품위 광석을 이룬다. 특히 점토광물의 함유도가 높으면서도 규조편의 변형과 변질 정도가 덜한 영일광산(Di001271)의 광석이 'moler' 유형에 가장 근접하는 품위를 보이는 것으로 평가된다.

규조토 광석의 품질에 영향을 주는 요소는 다양하지만, 그 중에서도 중요한 것은 규조 종의 유형과 다양성, 평균입도, 입도분포, 2차적 변질정도 및 불순물 함유도 등이 거론될 수 있을 것이다. 통상 고품위의 규조토 광석 1 m³

Table 3. Physical properties of diatomite used as commercial filter aids (after Kadey, 1983)

	Grade*	Color	Density Lb per Cu Ft		Screen Analysis, % Retained, 150 Mesh	pH	Specific Gravity	Water Absorption	Relative Flow Rate	Typical Applications, Filtration
			Dry	Wet						
Calcined Natural	{ Filter-Cel	Gray	7.0	15.9	1.0	7.0	2.10	235	100	Vegetable oil catalyst
	{ Celite 505	Pink	8.0	21.0	-	7.0	2.15	170	135	Apple juice
	{ Standard Super-Cel	Pink	8.0	17.2	3.0	7.0	2.15	255	200	Beer and Wine
	{ Celite 512	Pink	8.0	17.9	4.0	7.0	2.15	250	300	Sugar
Flux Calcined	{ Hyflo Super-Cel	White	9.0	17.2	5.0	10.0	2.30	245	500	Dry cleaning solvents, chemicals, etc. (most widely used filter aid)
	{ Celite 501	White	9.5	16.9	8.0	10.0	2.30	250	750	Grape juice
	{ Celite 503	White	9.5	17.2	9.0	10.0	2.30	240	900	Industrial and potable water
	{ Celite 535	White	12.0	17.6	9.0	10.0	2.30	245	1350	Industrial wastes
	{ Celite 545	White	12.0	18.0	12.0	10.0	2.30	240	2160	Swimming pools
	{ Celite 550	White	18.1	21.0	20.0	8.0	2.30	220	2380	Pharmaceuticals
	{ Celite 560	White	19.5	20.0	50.0	10.0	2.30	220	7500	Phosphoric acid

*Grades listed are Manville registered trademarks.

내에는 2~3 종의 규조 화석들의 잔해가 3000 만개 가량 포함될 수 있을 정도로 미세한 입상 조성을 이룬다(Harben and Kuzvart, 1996). 따라서 고순도의 규조토는 통상 자체 무게의 2~3배 정도의 물을 흡수할 정도로 높은 다공성을 지닌다(표 3). 이 같은 미세한 규조편들 사이의 공간 형성은 규조토의 여과 특성과 직접 연계된다. 다양한 형태의 규조편들, 즉 다양한 규조 종들의 잔해가 비교적 엉성하게 집합체를 이루는 것이 여과 용도의 품질 요건에서 주요 사항이 된다. 여기서 규조의 세포막 자체에 발달하는 다공성 구조도 보조적 역할을 한다. 따라서 12,000 종에 달하는 규조 종의 다양성은 결과적으로 다양한 여과 기능성을 갖는 규조토의 특성을 지시한다. 일반적으로 이 같은 다공성은 속성변질에 의해서 미세 공극들이 메워지게 됨에 따라 저하되는 경향을 보인다. 점토광물들과 같은 불순물들의 존재도 다공성 저하의

요인이 될 수 있다. 규조 화석편은 기본적으로 결정구조상 전하 결손이 없는 SiO₂ 단성분 구조형을 이루기 때문에, 다공성 매체로서의 규조토의 투과, 흡수 및 흡유 특성은 전적으로 모세관 현상에 의한 것으로서 결정화학적 특성에 기인한 제올라이트나 벤토나이트에서의 흡수 및 흡착 특성과는 메카니즘 상의 차이가 있다.

국내산 규조토 광석들 중에서 여과제 용도로 사용될 수 있는 것은 감포 지역의 광석들이 가능할 것으로 여겨진다. 규조 종에 있어서 'Aulacoseria sp.' 위주의 비교적 단순한 조성을 보이는 하지만, 속성변질이 미약하고 원통상의 개체들이 비교적 고품위를 이루며 엉성한 집합체를 이루기 때문에 여과제로 적합할 것으로 평가된다. 그렇지만 포항-홍해 지역산 광석들은 점토질 불순물을 흔히 함유할 정도로 저품위를 이루고 속성변질을 많이 받았기 때문에

Table 4. Physical properties of domestic diatomites and some commercial diatomaceous fillers

sample & brand name	color	oil absorption (mL/100 g)	refractive index	surface area (m ² /g)
Di001261	yellowish gray	100	1.44 ~ 1.47	29.4
Di001271	light olive gray	119.5	1.43 ~ 1.45	53.0
Di001272	grayish orange	77	1.44	53.8
Di001273	pale yellowish brown	66.5	1.44 ~ 1.45	68.2
Di001274	very pale orange	83	1.44 ~ 1.45	87.6
Di001275	very pale orange	74	1.43 ~ 1.45	87.0
Celite 321A* (paper)	light grey	210	1.40	100 ~ 400
Celite 281* (paint)	white	110	1.46	0.5 ~ 12.3
Celite 392* (fertilizer)	buff	210	1.43	100 ~ 400

*: Celite registered trademarks (Source: R.O.Y. Breese, 1994, Industrial Minerals and Rocks)

대부분 여과제 용도로 고려되기 어려운 품질 특성을 나타낸다. 이들 중에는 비표면적 값이 상당히 높아서 다공성도 어느 정도 우수할 것으로 오판될 수도 있지만, 이는 속성변질에 의해서 생성된 속성광물들(opal-CT와 smectite)에 의한 것으로 여과 특성과 연관된 미세공극의 발달과는 무관하고 오히려 이를 메우는 역효과를 가져다 주었을 것으로 여겨진다.

충진재로서의 품질 적합성을 검토하기 위해서 'Cellite'사의 제품들의 품질 규격과 대비해 보았다(표 4). 감포 지역산 규조토는 흡유율은 비교적 우수하지만, 의외로 낮은 비표면적 수치를 보였다. 이는 규조 종 자체의 형태와 미세 공극이 다른 규조 종에 비해서 비표면적이 작게 발달하는 특성에 기인한 것으로 여겨진다. 이 규조토는 페인트 제조용 충진재로서의 요건에는 부합되지만, 기타 다른 충진재 용도로는 외국산에 비해서는 뒤떨어지는 품질 특성을 나타내는 것으로 평가된다. 이에 비해서 포항-홍해 지역의 규조토들은 전반적으로 충진재의 국제적 품질규격의 수준에 훨씬 미달하는 낮은 품질 성향을 보인다. 일부 시료들은 비교적 높은 비표면적 값을 보이지만, 이는 전술한 바와 같이 규조 폐각에 의한 것이라기보다는 대부분 2차적 변질광물에 의한 것이기 때문에 별다른 의미가 없다.

결론적으로 국내산 규조토들은 그 부존 규모

는 물론 품위와 품질 면에서도 외국산과 비교하여 유리한 입장에 있지 않은 것으로 여겨진다. 고급의 용도로는 정제과정이나 품질개선을 위한 처리과정을 거쳐 제한적으로 사용될 수밖에 없다. 그렇지만 농업용, 건자재 및 연마재 같은 다소 저급한 용도로는 면밀한 품질 검증이 이루어진다면 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 여겨진다.

결 언

규조토는 지질시대를 통해서 주로 제 3~4기에 걸쳐서 번성했던 규조의 잔해물로 구성된 일종의 생물기원의 퇴적암이다. 규조의 골격조성을 이루는 규산 성분의 원활한 공급이 규조토 부존환경의 기본적 요건이다. 규조는 물이 있는 곳에서는 어디에서도 서식할 수 있지만, 개발할만한 규모로 규조토가 형성되기 위해서는 대량 번식과 사멸이 이루어질 수 있는 퇴적환경이 조성되어야 한다.

포항-감포 지역에서 규조토의 산출은 화산쇄설성 퇴적환경을 갖는 어일층과 해양 대륙붕 내에서 규산 성분이 집적될 수 있는 소분지와 같은 특별한 퇴적환경이 조성된 것으로 보이는 포항층에서 인지된다. 이 지역에서 산출되는 규조토들은 대개 1 m 미만의 박층을 이루며 소규모로 부존된다. 이 같은 규조토의 속성적

용은 매몰정도에 의존되기 보다는 주로 속성수의 접촉 및 관여 정도에 의해 규제되는 화학적 속성작용의 형식으로 진행된 것으로 여겨진다.

규조토는 규조 화석을 유용성분으로 상품가치를 갖는 특별한 산업광물이다. 따라서 여타의 광물자원들과는 달리 특정 화학성분이나 광물성분으로 그 품위를 산정하기 어렵고 주사전자현미경 관찰 등을 병행하여 종합적으로 평가해야 한다. 특히 현미경 관찰을 통한 규조토의 화석상의 동정은 물론 그 입도, 형태, 변질 정도 등에 대한 조사는 규조토의 품위 및 품질 평가에 있어서의 기본적인고도 주요한 사안이다. 국내산 규조토들은 전반적으로 외국의 유명한 산지의 광석들에 비해서 그 품위와 품질 면에서 불리한 입장에 있다고 볼 수 있다. 그렇지만 규조토와 관련된 탐광 기술, 광물 특성 평가 및 정제 기술 부문에서의 지식기반이 제대로 갖추어지면 자원의 확보 및 제품의 수입 대체 측면에서 부분적으로는 개선될 여지가 충분히 있다고 여겨진다. 특히 포항 지역의 일부 해성 규조토 광상들은 저품위 광체를 이루지만 경량 벽돌이나 내화물 제조와 같은 특정 용도로는 사용될 수 있는 소위 '점토질 규조토 유형(moler type)'을 이룬다. 또한 이 같은 유형의 규조토는 인일층군 상부에 자주 개재되고 비교적 두터운 광층을 형성하기도 한다. 따라서 앞으로 이 층을 비롯한 연일층군 상부의 전반에 걸쳐 개발가치 있는 점토질 규조토 광체의 탐광과 개발을 위한 체계적이고도 정밀한 조사가 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

사 사

이 연구는 2006년도에 이루어진 한국과학재단의 국가지정연구²²소재은행 사업(산업광물은행)의 일환으

로 수행되었다. 이 논문의 발간은 부분적으로 강원대학교 자원개발연구소의 재정적 지원에 의해서 이루어졌다. 이 논문 준비 과정에서 야외 조사와 자료정리를 도와준 강원대학교 광물학연구실의 학생들과 규조 화석 감정에 도움을 준 경북대학교 이성주 교수에게 사의를 표하고자 한다. 또한 이 논문을 심사해준 황진연 교수와 익명의 심사자에게 감사한다.

참 고 문 헌

- 김기업 (1988) 감포지역 제3기 응회암질 암석의 불석화작용에 관한 연구, 석사논문, 강원대학교 대학원, 81 p.
- 노진환 (1994) 제3기 연일층군의 층서, 암상 및 속성 광물상. 한국석유지질학회지, 2, 91-99.
- 대한광업진흥공사 (1979) 한국의 광산물. 652 p.
- 한국지질자원연구원 (2005) 자원총람, 568 p.
- 立岩 巖 (1976) 한반도 지질학의 초기 연구사, 경북대학교출판부, 657 p.
- Breese, R.O.Y. (1994) Diatomite, In: Industrial Minerals and Rocks, 6th Edition, D.D. Carr (ed), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 397-411.
- Calacal, E.L. and Whittemore, O.J. (1987) The sintering of diatomite. American ceramic Society Bulletin, 66, 790-793.
- Chang, L.L.Y. (2002) Industrial Mineralogy: Materials, Processes, and Uses. Prentice Hall, 472 p.
- Harben, P.W., 1999, The Industrial Minerals HandyBook. Industrial Minerals Information Ltd., 296 p.
- Harben, P.W. and Kuzvart, M. (1996) Industrial Minerals: A Global Geology. Industrial Minerals Information LTD., 462 p.
- Tappan H. (1980) The Paleobiology of Plant Protists. W.H. Freeman Co., San Francisco.

2006년 12월 7일 원고접수, 2006년 12월 18일 게재승인.