충남 서부 서산충군 내 해포석의 산출

송석환^{1*} · 임호주² · 이우석²

¹중부대학교 토목공학과, ²국립환경과학원 생활환경연구과

Occurrences of Sepiolites within a Seosan Group, Western Part of Chungnam

Suckhwan Song^{1*}, Koju Lim² and Wooseok Lee²

¹Department of Civil Engineering, Joongbu University

²Indoor Environment and Noise Division, National Institute of Environmental Research

This study examines the mineralogy of sepiolites occurred within the carbonaceous rocks of Songak schist and Pyeongtaek migmatitic gneiss of Precambrian Seosan group, in the western part of Chungnam. Host rocks of the sepiolite were dolomitic rocks and have experienced hydrothermal alteration and metamorphism. Mesozoic granite is assumed as a main source of hydrothermal alteration for the dolomitic rocks. Some of the tremolite asbestos coexist with the sepiolites. Representative sepiolite and tremolite samples were collected from the layers cracks or fractures of the dolomitic rocks and/or examined with microscope with microscope, XRD, SEM and TEM. Sepiolites are mainly recognized along the cracks assumed as pathways of hydrothermal solution. Tremolites are mainly found at layers or cracks of the dolomitic rocks and occur as asbestos as well as non-asbestos forms. It was confirmed that some of the tremolite asbestos were coexisted with the sepiolites. Overall results suggest that the occurrences of sepiolites within the dolomitic rocks mainly result in the hydrothermal alteration and the fluid from the acidic rocks, possibly granites. It also suggests that coexisting tremolite asbestos were formed by similar geological environment.

Key words : sepiolite, tremolite asbestos, dolomitic rocks, hydrothermal alteration

본 연구는 충남 서부 서산충군 내 송악 편암 층과 평택 혼성 편마암 층내에서 산출되는 해포석의 산출 및 이의 광물학적 조사에 대해서이다. 해포석의 모암은 백운암질암이고 열수 변질 및 변성 작용의 영향을 받았다. 중생대 화강암류가 백운암질 석회암 열수 변질의 주요 근원으로 예상된다. 일부의 투각섬석 석면이 해포석과 같이 공존한다. 대표적인 해포석 및 투각섬석 시료들이 엽리, 균열, 열극에서 채취되었고, 이러한 시료는 편광현미경, XRD, SEM, TEM으로 관찰, 분석되었다. 해포석은 주로 열수의 통로로서 추측되는 균열을 따라 산출되며, 투각섬석은 주로 백운암질암의 엽리 및 열극을 따라 산출되고 석면형 또는 비석면형으로서 산출된다. 일부의 해포석은 투각섬석 석면과 공존하며 산출되는 것으로 확인되었다. 전체적인 결과 들은 연구 지역의 백운암질암 내 해포석은 화강암류와 같은 산성암체로부터 유입된 열수 작용에 의해 형성되었으며, 해포석과 공존하는 투각섬석도 해포석의 형성과정과 유사한 지질환경에서 형성되었음을 암시한다.

주요어 : 해포석, 투각섬석 석면, 백운암질암, 열수 변질

1. 서 론

최근에 이슈가 되고 있는 석면관련 보도로 제조업으로 이용하는 제품 중에 석면이 함유되어 있고, 중공업

분야에서 부수적으로 이용되는 석면 함유 가능 암석에서 석면이 발견되고 있으며, 건축 및 토목 분야에서 이용하는 석면 함유 가능 암석에 석면이 노출되었다는 내용들이 포함되어 있다. 이외에도 일부 지표 토양 중

*Corresponding author: shsong60@naver.com

에 석면이 발견되고 있다는 내용도 있는데, 언론 내용들의 대부분은 석면이 인체의 건강에 위해하다는 것에만 초점을 맞추고 있다.

석면광물 외에 자연 상 암체 내에서는 물리화학적 특성이 유사해서 석면 광물로 오해를 받는 광물들이 있다. 이 광물 중 하나가 해포석이다(Galan and Ferrero, 1982; Alvarez, 1984; Yenyol, 1992). 일부 연구들은 이 광물이 갖는 섬유상 특성 (Takatsugu *et al.*, 2004) 또는 실험적인 결과를 근거(Chung *et al.*, 2006; Warheit *et al.*, 2010)로 해포석을 석면 유사 물질 또는 채해 물질로 포함시키기도 한다.

해포석은 점토광물로 복잡한 합 마그네슘 층상 규산염 광물이다. 화학 구조식은 $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$ 으로서, 섬유상, 또는 미립의 입자 또는 견고한 형태로서 산출된다(Brauner and Preisinger, 1956; Brindley, 1959; Nagata *et al.*, 1974; Hillier, 2003; García-Romero and Suárez, 2010; Giustetto *et al.*, 2011).

해포석은 페인트의 증점제, 액상세제, 접착제, 잉크, 광택제, 화장품의 침전제 및 부유제, 석고 반죽, 유리 코팅, 천공의 찌꺼기, 비료, 건축 단열제 및 충전제(휘강도 보강용) 등에 사용되어 진다 (Galan, 1996; Viseras and Lopez-Galindo, 1999).

이 광물은 미국의 유타 및 네바다 주(Ehlmann *et al.*, 1962), 서부 텍사스 및 뉴 멕시코 (McLean *et al.*, 1972), 터키의 Siva 분지(Yalçin and Bozkaya, 2006), 스페인의 Vicalvaro(Galan, 1996), 일본의 Tochigi Prefecture (Hayashi *et al.*, 1969), 탄자니아와 케냐의 Amboseli 분지(Hay *et al.*, 1995) 등의 탄산염암(Ehlmann *et al.*, 1962) 및 사문암(Yalcin and Bozkaya, 2004)에서 산출이 된다.

이 광물은 한국에서 2009년 석면 사건 이후 석면의 대체 물질로서 업체에서 이용이 되고 있다. 국내 일부 연구들도 이 광물이 한국내 석면 및 석면 함유 가능 광산에서 산출될 가능성이 있음을 암시한다.

대표적인 연구로 Hwang (1991)은 울산사문석광산에서 해포석이 사문암과 염기성암체와의 접촉부에 발달된 열극충진상 세맥에서 산출됨을 언급하고 있다. 산상 및 광물학적 특성으로 볼 때 이 해포석은 열수용액에서 직접 침전하여 형성된 것으로 해석하였다.

Choi *et al.* (2010)는 전북 장수군 선캄브리아기의 백운암질 석회암을 채굴하는 광산에서 채취된 섬유상 광물이 해포석임을 확인하였으며, 백운암질 석회암이 변질을 받아 사문석 광물과 수반되어 나올 수 있음을 언급했다.

본 연구는 당진지역 송악면 일대의 백운암에 협재되어 산출되는 해포석에 대해서이다. 일부 암체에서는 각섬석계 석면이 해포석과 공존하며 산출된다. 이 지역에 대한 기존의 국내 연구들에 백운암 내 각섬석계 광물에 대한 보고는 있지만 (Lee *et al.*, 1989) 해포석의 산출 및 각섬석계 석면에 대한 연구는 수행된 바 없다.

따라서, 본 연구는 당진의 서산층군 내 송악편암 그리고 평택혼성편마암 내에 협재되어 있는 백운암질암에서 산출되는 해포석 및 각섬석계 석면의 야외 산상을 기재하고, 해포석 및 각섬석계 석면에 대한 광물학적 특성을 밝히고자 한다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1. 일반 지질

연구 지역에는 하부로부터 선캄브리아기의 서산층군, 경기 편마암 복합체와 이를 관입하는 시대 미상의 각섬암, 주라기 및 백악기 화성암류가 있다(Kim *et al.*, 1979, Lee *et al.*, 1989). 서산층군에는 송악편암과 평택혼성편마암이, 경기 편마암 복합체에는 반상변정질 편마암과 온양 편마암이 있다(Fig. 1).

각각을 살펴 보면 서산층군 중 송악편암은 중립-조립질이며 석영운모편암, 석영장석질편암, 흑연편암, 결정질석회암, 석회규산염암, 규암 등으로 구분된다. 대표적인 암상은 석영운모편암이고 평택혼성편마암과 점이적인 변화를 보인다.

흑연편암은 표토상에서는 암흑색을 띠며, 약간의 적철색을 함유한다. 석회암은 단속적으로 운모편암의 주향을 따라 연장된다. 흑연편암내에 협재되는 것은 결정질로서, 암석의 폭은 약 100 m 정도이다. 지역에 따라 석회질편암 및 석회암, 석회규산염암과 규암이 호층을 이루기도 한다.

평택혼성 편마암은 호상편마암이 주이나, 그 외에 화강암질편마암, 주입편마암 등이 같이 산출된다. 송악편마암체와 여러 곳에서 점변상으로 직접하며 중첩습곡과 추정단층들에 의해 심히 교란을 받았고 신평화강암, 조립화강암 등에 의해 관입을 받고 있다.

이 암체 내에 소량의 규암과 석회암의 협층이 존재하고 여러 곳에서 석영맥, 화강암질암맥의 관입을 받았다. EW주향의 단층 외에도 NW-SE, NS 방향의 단층들이 존재한다. 흑연편암은 대상으로 분포하고, 석회암은 극소량이나 혼성편마암 중에 호상으로 협재된다. 일부 지역에서 신평화강암체와 관입접속을 하고, 사문암화 되어 있다. 변성상은 대체로 중온저압~중온중압

Fig. 1. Geological map of the study area and sample localities.

형에 속한다.

경기편마암복합체 중 반상결정질편마암은 평택혼성 편마암과는 점변하고, 조립화강암이 관입하고 있다. 이의 연장부는 WWN-EES 방향의 단층에 의해 단절되어 분포한다.

온양편마암은 석회암의 협층을 포함하고, 부분적으로 복운모화강암에 관입당하고 있다. 그 외에 국부적으로 소규모의 각섬암맥이 온양편마암을 관입하고 있다. 이 암석은 감람석 현무암에 의해 관입당하고 있다.

전체적으로 연구 지역의 탄산염질암들은 중생대의 편마상각섬석화강암, 흑운모 화강암, 신평화강암, 복운모화강암, 조립 화강암 등 산성암체에 의해 관입되고 있다.

2.2. 시료 채취

당진 송악면 지역을 대상으로 2010년 중반부터 2011년까지 중반 까지 1 년여 동안 상세한 야외 조사를 실시하였다. 야외 조사로서 석면 함유 가능 암석인 백운암의 분포에 대해 확인을 하였고, 열수의 유입이 가능할 것으로 추정되는 암석 엽리(Layer), 균열(Crack) 및 열극(Fracture)에서 2차적으로 형성된 광물 시료를 채취하였다.

2.3. 관찰 및 분석 방법

해포석 및 석면으로 추정되는 광물에 대한 관찰 및

분석을 위해 기존의 광천 지역의 연구와 같은 방법(Song *et al.*, 2008)으로 시료를 제작하여 관찰하였다. 또한 해포석으로 추정되는 광물에 대해서도 XRD 분석, SEM 관찰, TEM 관찰을 실시하였다. 투과섬석에 대해서는 PLM 분석이 추가적으로 진행하였다.

1) 박편관찰: 박편의 제작을 위한 단계는 암석 절단기로 절단, 절단면의 연마, 연마한 면을 접착제로 슬라이드 그라스에 접착, 열판으로 약 30분 간 가열하여 굳히기, 굳힌 시료를 암석절단기로 2 mm 이하의 두께로 평행하게 절단, 다시 절단면을 전자와 같은 방법으로 연마, 그리고 관찰의 순서를 따랐다. 제작된 박편에 대해 편광현미경으로 광물 조합을 관찰하고, 대표적인 부분에 대해 사진 촬영을 하였다. 연구에서 사용된 편광현미경(Polarized Light Microscopy, PLM)은 BX51, Olympus (Japan)이다.

2) 편광현미경(PLM)에 의한 광학적 분석: PLM 분석은 미국환경보호청(Enviromental Protection Agency, EPA)의 EPA600/R93-116방법으로 진행 하였고, 광물질의 형태,색상, 다색성,굴절률, 신장부호,분산염색, 소광특성, 복굴절 등을 확인하였다. 분석을 위해 시료를 100 μm 이하로 분쇄한 후 75 μm (200 mesh) 크기의 체에 체가름 하였다. 체가름 후 슬라이드 유리 위에 굴절시약 1~3 방울을 떨어뜨린 후, 시료의 일정량

을 슬라이드 유리 위 굴절시약에 담근다. 이 시료를 바늘, 핀셋 등으로 시료를 적절히 분리한 후, 분쇄하여 슬라이드 유리 위에 고르고 평평하게 배치시킨다. 커버 유리로 덮고, 커버 유리를 핀셋이나 고무 등으로 살짝 눌러주어 공극을 제거하였다. 모두 5개의 굴절액을 사용하여 6종의 석면섬유를 판별하였다. 분석에 사용한 기자재는 ATOMICSCOPE, PS300(한국) 편광 현미경이다.

3)X선 회절 분석기(XRD)를 이용한 분석: 분석을 위해 시료 10 g을 과쇄하여 75 μm 이하(200 mesh)로 체질 후 통과된 분말 시료를 분석하였다. 이때 시료의 분말은 표면이 매끈하고 미세한 압분체를 사용하였다. 시료의 비중에 따라 1-2 g 정도의 시료를 취하여 알루미늄 홀더에 넣고 수평이 되도록 유리 슬라이드로 다듬은 후, 준비된 홀더를 엑스선 회절기의 고니오미터에 장치하여 엑스선 회절 분석을 실시하였다. 측정 결과를 미국표준기술연구소(NIST)의 표준참고물질(SRM)과 비교하여 석면의 여부와 종류를 해석하였다. 사용된 X선 회절분석기는 X-PertPRO Multi Purpose X-Ray Diffractometer, PANalytical사이다(분석 조건은 Cu Ka(알파)선, Ni-Filter, 가속전압 40 kV, 전류 30 mA, scab speed 0.13°/s, step size 0.026° 2 θ).

4)주사 전자 현미경(SEM)을 이용한 광학적 특성 및 화학적 분석: 시료를 50 μm 이하로 분쇄하여 15 nm로 Pt 코팅하고, 이 시료를 만 배 확대하여 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM)을 이용, 섬유조직의 형태를 확인하였다. 이 방법은 주로 시료 표면의 정보를 얻을 수 있고 시료의 두께, 크기 및 준비에 크게 제한을 받지 않는다. 광학 현미경에 비해 집점 심도가 2배 이상 깊고, 또한 광범위하게 집점을 맞출 수 있어 입체적인 상을 얻는 것이 가능하다.

또한 에너지 분광 장치(Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDX)를 이용하여 화학분석을 실시하였다. 이용된 주사전자현미경은 TESCAN MIRA(독일)이며 분석 조건은 가속전압 15 kV, working distance 14.98 mm, SEM 배율 1.50 kx이다.

5)투사전자현미경(TEM)에 의한 광학적 특성: 채취된 시료를 막자사발에 넣고 뿜으며, 염산을 첨가시켜 탄산염을 포함하는 물질들을 용해시킨다. 석면 입자를 추출하기 위해 0.22 μm MCE filter로 거른 다음, 필터

를 투명화 시키고, 플라즈마 에칭기(plasma etcher)로 필터 표면을 회화한다. 탄소증발기를 이용하여 표면을 탄소로 코팅하며, TEM 시료 격자에 올려놓는다. 이 미디엄 필터를 아세톤용액이 든 Jaffe washer로 완전히 용해시키고 시료는 ED와 EDXA 기능을 갖는 가속전압 80에서 120 keV TEM을 이용하여 분석을 진행한다.

이 분석법은 가속전압에 의해 발생된 전자선이 시편을 거쳐 투과될 때, 그 투과된 강도 차에 의해 형광 스크린 상에 명암으로 시편의 영상을 얻을 수 있다. 투과전자현미경의 직접배율 범위는 통상 100배에서 100만배 가량으로 관찰이 가능하고 석면 섬유와 비 석면 섬유를 구분할 수 있으며 석면의 종류 또한 구분할 수 있다. 실험에 이용된 투과전자현미경은 Tecnai G2 (FEL, 미국)을 이용하였고, 분석 조건은 가속전압 120 keV 이다.

3. 결과 및 토의

3.1. 야외에서의 관찰

상세한 야외 조사 결과 당진의 서산충군 내 송악편암 그리고 평택혼성편마암내에 협재되어 있는 백운암의 균열에서는 해포석이 산출되고, 엽리(Layer), 균열(Crack) 및 열극(Fracture)에는 투각섬석 및 양기석 광물 및 섬유 형태 각섬석계 석면이 산출되었다. 일부 지역에선 해포석과 공존하며 각섬석계 석면이 산출되었다(Figs. 2 and 3). 일반적으로 엽리면을 따라서는 투각섬석 및 양기석이 우세하고, 1~9 cm의 균열 및 10 cm 이상의 열극에는 투각섬석 및 양기석이 해포석과 같이 산출되었다. 이 암석은 부분적으로 활석화되어 있다.

좀 더 자세히 살펴보면 해포석은 지질도상 서산충군 송악편암내 결정질 석회암, 석회 규산염암층에서 존재한다. 이 인접부에 화강암류가 있고, 석영 맥들이 분포하고 있다. 또한 지질도에 기재 되지 않았던 열수의 근원으로 추정되는 산성관입암체들이 도처에 분포하고 있다. 또한 같은 조건에서 투각섬석 및 양기석 석면이 발견되고, 일부는 해포석과 공존하며 산출된다. 즉 탄산염질암이 열수와 작용을 통해 해포석과 투각섬석계 석면이 형성되었음을 암시한다.

특히 이곳에는 백운암을 채굴했던 송악 채석장이 분포하고 있다. 이 채석장 폭은 동서 방향으로 400-500 m에서 700-800 m 폭이고, 길이는 남북 방향으로 900-1000 m이다. 야외에서 이 암체는 백색에서 암회색. 암녹색을 띠며 대부분이 괴상이나, 부분적으로 층상으로

Fig. 2. Field views of the studied area and representative samples. A) for the sepiolite within cracks of the dolomitic rocks, B) for a fragment of the sepiolites, C) for typical Songak schist, D) for a dolomitic rock containing tremolites, E) for Pyeongtaek migmatic gneiss, and F) for a dolomitic rock containing tremolites.

산출된다. 이 암석에서 해포석이 균열에 1 mm- 3 cm 두께로 해포석이 산출되고, 열수 유입통로인 열극에서 1 mm- 10 cm 두께의 투각섬석 및 양기석이 산출된다.

일부 경우는 10 cm가 넘는 각섬석계 석면 암체 덩어리가 산출되는 데 이는 열수가 모암 내 유입되기 전에 모암내에는 어느 정도 크기의 불규칙한 모양의 공간이 존재해 있었고, 이 공간에 열수가 유입되었으며, 이 때 모암과의 상호 반응을 거쳐 형성된 각섬석계 석면이 형성된 것으로 추정된다.

또한 평택 혼성 편마암에도 석회암이 협재되고, 이곳에서 해포석이 발견이 되고, 흔히 투각섬석 및 양기석 석면이 산출되기도 한다. 이들 암석은 석영맥, 화강암

질 암맥과 같은 산성 관입암체에 의해 관입되어 있다.

송악 편암과 같이 평택 혼성 편마암 층내의 석회암 질암에서 산출되는 투각섬석과 해포석도 탄산염질암이 열수와의 작용을 통해 투각섬석 및 해포석이 형성 되었음을 암시한다.

즉 연구 지역에서 백운암질 암 인근에 분포하는 중생대 화강암류가 해포석의 형성시 열수의 근원으로 추정되고, 각섬석계 석면의 원인자로 추정된다.

이런 백운암체 내 해포석의 산상은 충북 제천 수산면 채석장에서도 발견이 되고 있다. 일제 치하에 이곳에서는 지피, 또는 기피(석유피)라 불리는 광물이 채취되었다고 전해지는데, 이 광물은 백운암질암의 균열

Fig. 3. Representative photomicrographs of sample fragment from the studied area. A1) for the typical Songak schist showing foliation, B2) for a dolomitic rock containing recrystallization, C1) for dolomitic rocks within the Pyeongtaek migmatic gneiss showing coexisting dolomite and tremolite asbestos, and D) for a dolomitic rock containing tremolite asbestos. Abbreviations: Bi for biotite, Q for Quartz, Do for Dolomite and Tr for Tremolite.

및 열극에서 산출되며, 해포석으로 확인 되었다. 이 곳에서도 열수의 유입 통로로 추정되는 염리, 균열, 열극을 따라 투각섬석 및 양기석과 같이 산출되며, 일부는 해포석과 공존하며 산출되기도 한다.

3.2. 편광현미경(PLM)에 의한 관찰 및 광학적 분석

편광 현미경을 이용해서 광물들의 광학적 특성을 확인하였고, 석면 광물의 종류를 파악하였다. 석면 함유 가능 암석에 대한 관찰 결과 대상 암석은 백운암화된

결정질 석회암으로 확인 되었다(Fig. 3).

이 암석들은 주 구성 광물로 방해석 및 백운석을, 그 외에 소량의 석영, 흑운모, 사장석 등을 포함한다. 방해석은 능면체의 방향으로 방해석은 3 방향의 벽개면을 보인다. 백운석은 판자 모양(tabular), 만곡면(curved face), 주상(columnar), 입상(granular), 과상(massive) 형태를, 방해석은 결정질(crystalline), 입상(granular), 과상(massive), 능면체(rhombohedral)의 결정형태를 보였다.

Table 1. Representative PLM results of the tremolite and actinolite asbestos from the Dangjin area

Locality	Sample Num.	Tremolite	Actinolite	Morphology
Songak schist	DJ 11-01		○	straight, acicular
	DJ 11-02	○		bundle, twist
	DJ 11-03	○	○	straight
Pyeongtaek gneiss	DJ 12-01	○		bundle, twist
	DJ 12-02		○	straight
	DJ 12-03	○	○	acicular, twist

각섬석계 광물은 두 방향의 벽개면을 보이는 육각형 형태이거나 침상 구조를 보였다(Fig. 3). 해포석으로 추정되는 광물은 백색 및 회백색을 띠고, 섬유상 형태를 보였다.

섬유상 석면 광물을 확인하기 위해 EPA 600/R92-116 방법으로 동정하였다. 그 결과 당진의 서산충군 내 송악편암 그리고 평택혼성편마암내에 협재되어 있는 백운암내에서 석면 유형의 침상을 보이는 투각섬석 및 양기석 석면이 동일하게 확인되었다(Table 1).

3.3. X선 회절 분석기(XRD)를 이용한 분석

해포석으로 추정되는 시료와 투각섬석 및 양기석으로 확인된 시료를 100 μm 이하로 분쇄하여 XRD로 분석하였다. 대표적인 시료의 결과치가 Fig. 4에 있다. 분석 결과 당진의 서산충군 내 송악편암 그리고 평택

혼성편마암내에 협재되어 있는 백운암내에서 해포석이 확인 되었고, 투각섬석 및 양기석이 동일하게 확인되었다. 일부 시료는 투각섬석 및 양기석이 공존하며 검출되었다.

즉 서산충군 내 송악편암 그리고 평택혼성편마암내에 협재되어 있는 백운암내 균열, 열극에서 채취된 시료에서 해포석이 관찰 되었다. 또한 균열, 열극 및 작은 세맥에서 산출되는 투각섬석 및 양기석은 석면 유형의 광물로 판명되었다.

3.4. 주사 전자 현미경(SEM)을 이용한 광학적 특성 및 화학적 분석

PLM 및 XRD 관찰 결과 섬유상을 보이는 각섬석계 석면으로 관찰된 시료 중 대표적인 시료에 대해 2만배 확대하여 주사전자 현미경으로 관찰을 하였다. 관찰 결

Fig. 4. Representative XRD results of samples from the studied area. A) for sepiolite coexisting with calcite(DJ 06-01), B) for talc coexisting with calcite(DJ 06-03), C, D) for tremolite coexisting with actinolite (DJ 11-03, DJ 12-01).

Fig. 5. Representative SEM results of sepiolites(A, B) and tremolites(C, D) from the studied area. Sepiolites(A, B) showing twisted and wave shapes, and tremolites(C, D) showing acicular or curved shapes.

과 침상조직의 형태인 것들 대부분은 석면으로서 투각섬석 및 양기석으로 확인되었다 (Fig. 5). XRD 관찰 결과 해포석으로 추정되는 시료에 대해 각섬석계 석면을 관찰했던 방법과 같이 관찰을 했다. 그 결과 파동상을 보이는 광물은 해포석으로 판명되었다. 에너지 분광 장치 (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDX)를 이용한 화학분석 결과 해포석은 높은 Si(68.6-71.8 wt %) 및 Mg(27.2-30.4 wt %)값과 낮은 Fe(0.9-1.9 wt %)을 보여, 비교적 낮은 Si(56.1-56.7 wt %)와 Mg(23.1-26.3 wt %)값과 높은 Fe(2.8-3.6 wt %)와 Ca(13.9-

17.0 wt %)값을 보이는 투각섬석과 명확한 차이를 보였다(Fig. 5)

3.5. 투사전자현미경(TEM)에 의한 광학적 특성

PLM 및 XRD 관찰 결과 섬유상을 보이는 각섬석계 석면으로 관찰된 시료 중 대표적인 시료에 대해 2 만배 확대하여 주사 전자 현미경으로 관찰을 하였다(Fig. 6). 결과 침상조직의 형태인 것들 대부분은 각섬석계 석면이었고, 파동상을 보이는 광물은 해포석으로 판명되었다 (Fig. 6).

Fig. 5. Continued.

3.6. 석면의 대체제로서의 해포석, 그리고 해포석의 위해성

석면의 위해성이 알려지면서 해포석은 석면의 대체제로서 오랜 시간 동안 산업제품으로서 사용되어 왔다. 하지만 일부의 연구들은 해포석의 제품속의 석면의 존재를 지적하고, 위해성의 연구들은 해포석의 건강위해 가능성을 암시하기도 한다.

Takatsugu *et al.* (2004)는 중국으로부터 온 석면의 대체 물질로서의 장 섬유 형태의 해포석을 분석하였다. 이 연구에서는 3D-LM(three dimensional particle measurement laser microscope)과 PLM를 사용하였

는데 분석결과 투각섬석 석면이 % 단위로 검출되었다 하였다.

현재 인체에 대한 해포석의 유전독성, 생식독성 및 발암성에 대한 자료가 불충분한 실정이다. 하지만 일부 해포석에 대한 위해성의 연구들은 해포석의 흡입결과와 위해성 가능성에 대해 언급하고 있다.

Chung *et al.* (2006)은 랫드에 대한 서로 다른 형태의 해포석의 흡입독성 시험결과를 발표 하였다. 이 결과 해포석은 실험동물에서 폐 무게를 증가시키고, 폐 조직의 육아종 및 가벼운 섬유화 발현을 나타내어 폐에 영향을 미치는 물질로 판단된다고 하였다. 하지만

Fig. 6. Representative TEM results of sepiolites (A) and tremolites(B1, B2) from the studied area.

해포석의 열처리 및 종류에 따른 독성 정도가 뚜렷하지 않다고 언급 하였다.

Warheit *et al* (2010)은 수컷 랫드에 해포석 1 mg/kg, 5 m/kg 농도로 기관지 주입 후 폐독성 효과를 관찰한 결과를 발표하였다. 이 연구에 따르면 고용량(5 mg/kg) 군에서 호중구성 염증반응을 유발하지만 단기간 지속되며, 최소한의 폐포대식세포의 응집과 다핵세포가 관찰된다고 하였다. 폐포관 및 폐포 인접부의 약간의 국소적 중격 비후가 관찰되지만, 폐 이외의 기관에서는 관찰되지 않았다. 7.4 μm 의 길이를 가지고 있는 중국산 해포석은 2.8 μm 이하의 Vicalvaro 해포석에 비해 폐 무게를 증가시키고, 폐 섬유형성과 육아종을 잘 형성한다고 언급 하였다.

이 연구들은 해포석의 위해성은 추후 연구의 여지가 있음을 암시한다. 하지만 지질현상에서 공존 가능성을 고려 해볼 때 산업적으로 해포석 제품에서 석면이 존재할 가능성이 있음도 고려 할 필요가 있음을 암시한다.

4. 결 론

본 연구는 충남 서부 선캄브리아기의 서산충군지역에서 해포석의 존재에 대해서이다. 조사 대상 지질층은 송악 편암 층과 평택 혼성 편암암 층내의 백운암질암으로 이 암석들은 수차례의 열수 변질 및 변성 작용의 영향을 받았다.

연구를 위해 상세 지질조사를 실시하였고, 모암 및 열수의 유입통로로 해당되는 엽리(Layer), 균열(Crack) 및 열극(Fracture)에서 시료를 채취, 편광현미경을 통해 관찰하였고, XRD, SEM, TEM으로 분석을 수행하였다. 연구 결과는 아래와 같다.

첫째 해포석은 주로 열수의 통로로서 추측되는 백운암질암의 균열을 따라 수 mm-수 cm 두께로서 산출되었다. 이는 박편관찰 및 XRD, SEM, TEM의 분석으로 확인이 되었다.

둘째 박편관찰, PLM 관찰, 그리고 XRD, SEM, TEM의 분석결과 백운암질암의 엽리 및 열극을 따라 산출되는 광물은 투각섬석 및 양기석으로 확인되었다. 이들 광물은 석면형으로 뿐만 아니라 비석면형으로서도 산출이 된다.

셋째 균열 및 열극에서 산출되는 일부 해포석은 투각섬석 석면과 공존하며 산출되었다. 이는 상세 지질조사 및 실내 관찰, 그리고 분석을 통해 확인되었다.

넷째 백운암질암 인근에 분포하는 중생대 화강암류와 같은 산성암체가 백운암질암내에서 해포석의 형성시 열수의 근원으로 추정되고, 각섬석계 석면의 원인자로 추정된다.

다섯째 해포석의 위해성은 연구의 여지가 남아 있지만 지질현상에서 해포석과 각섬석계 석면과의 공존 가능성을 고려 해볼 때 산업적으로 쓰이는 해포석 제품에서 각섬석계 석면이 산출됨에 대한 가능성을 암시해 준다.

참고문헌

- Alvarez, A. (1984) Sepiolite: properties and uses. In: Singer, A., Galán, E. Eds., *Palygorskite-Sepiolite. Occurrences, Genesis and Uses*. Elsevier, Amsterdam, p.253-287.
- Brauner, K. and Preisinger, A. (1956) Struktur und Entstehung des Sepioliths. *Tschermaks Mineral. Petrog. Mitt.*, v.6, p.120-140 (in German).
- Brindley, G.W. (1959) X-ray and electron diffraction data for sepiolite. *Amer. Mineral.*, v.44, p.495-500.
- Choi, S.H., Lee, J.H. and Cho, S.H. (2010) A study on the sepiolite from the dolomite mine, Jangsue, Jeonbuk. *Petrological Society of Korea and Mineralogical Society of Korea, Annual Joint Conference*, p.27-28.
- Chung, Y.H., Han J.H., Sung J.H. and Yu, I.J. (2006) A Respiratory Toxicity Study of Sepiolite in Sprague-Dawley Rats. *J. Toxicol. Pub. Health*, v.22, p.237-244.
- Ehlmann, A.J., Sand, L.B. and Regis, A.J. (1962) Occurrences of sepiolite in Utah and Nevada. *Economic Geology*, v.57, p.1085-1094.
- Galan, E. and Ferrero, A. (1982) Palygorskite-sepiolite clay of Lebrija, southern Spain. *Clays and Clay Minerals*, v.30, p.191-199.
- Galan, E. (1996) Properties and applications of Palygorskite-sepiolite clays. *Clay Minerals*, v.31, p.443-453.
- García-Romero, E. and Suárez, M. (2010) On the chemical composition of sepiolite and palygorskite. *Clays and Clay Minerals*, v.58, p.1-20.
- Giustetto, R., Levy, D., Wahyudi, O., Ricchiardi, G. and Vitillo, J.G. (2011) Crystal structure refinement of sepiolite/indigo Maya Blue pigment using molecular modelling and synchrotron diffraction. *European Journal of Mineralogy*, v.23, p.449-466.
- Hay R.L., Hughes R.E., Kyser T.K., Glass H.D. and Liu J. (1995) Magnesium-rich clays of the Meerschaum mines in the Amboseli basin, Tanzania and Kenya. *Clays and Clay Minerals*, v.43, p.455-466.
- Hayashi, H., Otsuka, R. and Imai, N. (1969) Infrared study of sepiolite and palygorskite on heating. *The American Mineralogist*, v.53, p.1613-1624.
- Hillier, S. (2003) Clay Mineralogy, in GV Middleton, MJ Church, M Coniglio, LA Hardie, and FJ Longstaffe eds., *Encyclopaedia of sediments and sedimentary rocks*: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht., p.139-142.
- Hwang, J.Y. (1991) Mineralogy of Sepiolite from the ulsan serpentine mine. *J. Miner. Soc. Korea*, v.4, p.108-118.
- Kim, D.H., Choi, W.C. and O, I.S. (1979) 1: 50000 Geological map of the Asan sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Miner Resources.
- Lee, S.M., Kim, H.S., Na, K.C. and Park, B.Y. (1989) 1: 50000 Geological map of the Tangjin -Changgohang. Korea Institute of Energy and Resources.
- McLean S.A., Allen, B.L. and Craig, J.R. (1972) The occurrence of sepiolite and attapulgite on the southern high plains. *Clays and Clay Minerals*, v.20, p.143-149.
- Nagata, H., Shimoda, S. and Sudo, T. (1974) On dehydration of bound water of sepiolite. *Clays and Clay Minerals*, v.22, p.285-293.
- Song, S.H., Hwang, J.H., Hwang, B.G. and Kim, H.W. (2008) Occurrence types and mineralogical characteristics of asbestos for the Kwangcheon area, Chungnam. *Korean Industrial Hygiene Association*, v.18, n.4, p.271-281.
- Takatsugu, M., Ryo, M., Yukio, K., Nobuaki, K. and Norihiko, K. (2004) Method of Quantitative Analysis for Fibrous Tremolite Contaminated in Long Fiber Sepiolite. *Journal of the Clay Science Society of Japan*, v.43, p.192-196.
- Warheit, D.B., Sayes, C.M., Frame, S.R. and Reed, K.L. (2010) Pulmonary exposures to Sepiolite nanoclay particulates in rats: Resolution following multinucleate giant cell formation. *Toxicology Letters*, v.192, p.286-93.
- Yalçın, H. and Bozkaya, Ö. (2004) Ultramafic rock-hosted vein sepiolite occurrences in the Ankara ophiolitic melange, Central Anatolia, Turkey. *Clays and Clay Minerals*, v.52, p.227-239.
- Yalçın, H. and Bozkaya, Ö. (2006) Mineralogy and geochemistry of Paleocene ultramafic- and sedimentary-hosted talc deposits in the southern part of the Sivas Basin, Turkey. *Clays and Clay Minerals*, v.54, p.333-350.
- YENİYOL, M. (1992) Geology, mineralogy and genesis of YENİDOĞAN (SİRİHİSAR) sepiolite deposit. *Mineral Res. Expl. Bull.*, v.114, p.51-64.