

### 제 3기 연일층군의 층서, 암상 및 속성 광물상

## Stratigraphy, Lithology and Diagenetic Mineral Facies of the Tertiary Yeonil Group

노진환 (Jin Hwan Noh)

### 요 약

홍해 지역 연일층군의 퇴적상, 암상, 층서적 구분 및 속성 광물상 사이의 밀접한 성인적 연계성을 논의하였다. 연일층군 중·하부의 역암 및 사암에는 퇴적 분지의 서측 연변부의 제 3기 화산암류에서 유래한 화산쇄설물이 함유된다. 연일층군 중·하부 층군의 부분적 화산쇄설성 암상 및 퇴적상과 이를 뚜렷하게 괴복하는 연장성이 양호한 규질 이암층의 존재를 근거로 연일층군을 춘북층과 포항층으로 새로이 2분할 것을 제안한다. 연일층군의 속성 광물상은 기본적으로 원암의 암상과 조성에 의존되는 양상을 보인다. 연일층군 퇴적암류에서 관찰되는 주요 속성 광물로는 홀란다이트, 스멕타이트, 방해석, 및 단백석 등이 있다. 춘북층의 역암 및 사암은 대부분 조립질의 홀란다이트가 주요 교결물을 이루는 것이 특징이다. 춘북층의 부분적 화산쇄설성 암상은 이 속성 기원 제올라이트의 생성을 조장하였다. 홀란다이트와 단백석 등과 같은 기타 속성 광물들의 광물상과 스멕타이트의 조성을 근거로 연일층군의 매몰 온도가 40~60°C에 달했던 것으로 해석하였다.

**주요어 :** 연일층군, 춘북층, 포항층, 화산쇄설성, 속성 광물상, 제올라이트 교결물, 홀란다이트

**Abstract :** In the Heunghae area, genetic relationships among sedimentary facies, lithology, stratigraphy and diagenetic mineral facies of the Yeonil Group, are discussed. Conglomerate and sandstone of lower to middle parts of the Yeonil Group contain considerable amounts of volcanoclastic sediments, which were derived from the Tertiary volcanics exposed in the western margins of the sedimentary basin. A new stratigraphic division of the Yeonil Group into the Chunbuk and Pohang Formations is proposed on the basis of sedimentary facies, lithologic characteristics including volcanoclastic feature, and the presence of a key bed of siliceous mudstone overlying the Chunbuk Formation. Diagenetic mineral facies largely depend on the lithology and composition of sediments. Heulandite, smectite, calcite, and opal-CT are commonly found as diagenetic minerals in the Yeonil Group. Among these authigenic minerals, heulandite occurs as the coarse-grained main cement in conglomerates and sandstones of the Chunbuk Formation. Formation of the zeolite cement is favored by partial volcanoclastic lithology of the Chunbuk Formation. Smectite composition and diagenetic mineral facies such as heulandite and opal-CT may reflect that the Yeonil Group has undergone a shallow burial temperature ranging 40~60°C.

**Key Words :** Yeonil Group, Chunbuk Formation, Pohang Formation, volcanoclastic, diagenetic mineral facies, zeolite cement, heulandite

### 서 언

연일층군은 그동안 많은 고생물학자들에 의해서 주로 생물 서학적 관점에서 연구되어 왔었다 (Kim, 1965; Yoon, 1975; Lee, 1984; Bong, 1985). 이들의 연구 결과로 연일층군이 마이오세 시기에 퇴적된 해성층이라는 것은 주지의 사실이 되었다. 최근에 활발히 수행된 연일층군의 퇴적 환경 및 퇴적상에 대한 일련의 연구들을 통해서 (Chough *et al.*, 1989; Hwang and

Chough, 1990; Hwang, 1993), 연일층군 하부 및 중부의 퇴적층들이 선상지-삼각주 (fan-delta) 퇴적 환경하에서 이루어졌다는 사실이 알려졌다.

일반적으로 선상지 퇴적 환경의 퇴적층들은 불량한 황적 분포, 역암 위주의 암상 및 얇은 매몰 특성으로 인해서 석유 부존 가능성이 희박한 것으로 알려져 있다 (Nilsen, 1982). 따라서 선상지 내지 선상지-삼각주 계 퇴적암들의 속성 작용과 속성 광물상에 대한 연구가 전세계적으로 결여되어 있는 실정이다. 국내에서도 연일층군의 퇴적암류들을 단순히 미고결된 역암 또는 사암 그리고 현미경 관찰이 어려운 이암으로 취급해 온 경향이 있었다. 따라서 이 층의 속성 작용은 물론 광물 조성 및 암상에 대한 연구가 간과되어 왔다.

필자는 이 논문을 통해서 연일층군을 구성하는 퇴적암들의

\* 이 연구는 한국과학재단의 연구비 지원 ('93 핵심전문 연구과제, 과제번호: 931-0400-007-2)에 의한 연구임.

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

퇴적상 및 암상과 속성 광물상의 내용을 밝히고, 근원지 (provenance)로서의 퇴적 분지 주변부의 지질과 천북층의 암상을 비교·검토하여 이에 따른 속성 광물상과의 연계성을 해석하고자 한다. 또한 연일층군 퇴적암의 분포 및 암상을 연구하는 과정에서 파악된 내용을 근거로 연일층군에 대한 새로운 층서 구분의 체계를 제시하고자 한다.

### 연구 방법

홍해 지역을 중심으로 퇴적 분지 주변부의 지질과 제 3기층의 분포 및 산출 상태를 면밀히 조사하였다. 제 3기 퇴적암류들의 표본 채취는 대부분 심한 풍화 양상을 보이는 노두 표면에서 일정 깊이 (20~30 cm 정도)까지 파낸 후에 이루어졌다. 채취된 표본은 대부분 취약한 형태를 이루기 때문에, 운반 과정에서 원조직이 와해되지 않도록 플라스틱 용기에 담아서 보존하였다. 역암 및 사암의 표본들은 실내에서 낮은 점도의 에폭시 수지를 이용하여 진공 조건 (10<sup>-2</sup> Torr)에서 고화시킨 후에 박편을 제작하였다. 역암과 사암 내의 점토 광물이나 제올라이트와 같은 속성 광물들의 효과적인 추출을 위해서 초음파 진탕기를 사용하여 처리하였다. 역암의 사질부와 사암의 암상은 물론 속성 광물들의 조성 및 조직을 조사하기 위해서 편광현미경과 주사전자현미경 (SEM) 관찰을 하였다. 사암과 역암의 사질부의 골격 조성 (framework composition)은 편광현미경 하에서 표본당 500점 이상 계수하여 구하였다. 속성 광물들의 감정을 위해 X-선회절 분석 (XRD)을 실시하였다. 또한 전자현미 분석 (electron microprobe analysis)을 통해서 속성 광물들과 장석류 광물들의 화학 조성이 분석되었다. 전자현미 분석은 속성 광물들의 전자 빔에 대한 취약한 물성을 고려하여 가능한 낮은 전류 (2 nA) 조건하에서 시행하였다. 이암들의 화학 조성을 구하기 위해서 X-선형광 분석 (XRF)을 실시하였다.

### 연일층군 층서상의 문제 설정

연구 지역은 최근에 Hwang (1993) 그리고 Chough *et al.* (1989)에 의해서 일반 지질, 퇴적상 및 퇴적 환경 등이 매우 상세하게 조사된 바 있고, 그 전에도 많은 고생물학자들에 의해서도 퇴적 환경 및 생층서적인 관점에서 집중적으로 연구되어 왔다. 그동안 층 구분에 대한 많은 논란이 있었으나 (Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986), Chough *et al.* (1989)의 연구 결과로 연일층군은 선상지-삼각주 (fan-delta) 퇴적 환경에서 이루어

졌고 퇴적상과 암상 변화에 따른 천북층, 학림층, 흥해층, 및 두호층으로 이루어지는 4개 층의 구분이 가능하다는 보고가 있었다 (Table 1). 따라서 필자는 당초에 이와 같은 기존의 연구 결과를 토대로 연일층군 퇴적암류들의 암상과 속성 광물상을 기술하려고 하였다. 그러나 조사 결과 기존의 지층 구분에 다소 문제가 있고 속성 광물상을 연구하는데 중요한 배경이 되는 퇴적물의 기원에서 화산 활동의 영향이 간과되었음을 알게 되었다.

퇴적암의 층 구분은 기본적으로 암상의 변화에 의거해야 하고 또한 야외에서 식별이 가능해야 한다는 것은 주지의 사실이다. 그러나 연일층군에 대한 기존의 층 구분은 너무 세분되어 층 상호간의 경계가 다소 모호하게 설정된 관계로 야외에서 그 경계를 식별하기 곤란하다. 이는 연일층군 중·하부 층군의 주된 암상을 이루는 역암 및 사암층의 불량한 횡적 연장성과 상호 유사한 암상 변화를 보이는 학림층과 흥해층의 구분 기준이 모호하게 설정된데 (즉, 학림층: 사암 위주의 암상, 흥해층: 사암 및 이암의 혼재상)에 기인하는 것으로 여겨진다. 최근에 Chough *et al.* (1989)과 Hwang (1993)에 의해서 제시된 4분법의 층서 구분도 퇴적상과 암상의 차이에 따라 너무 세분되어 야외에서 식별하기 어렵고, 지질도상으로도 세부 퇴적층의 분포를 가능하기 어렵게 설정되어 있다. 또한 층서 구분에 있어서 선상지-삼각주 퇴적상 개념이 너무 강조되므로서 이 퇴적상계를 포괄하는 기존의 두호층도 선상지-삼각주 퇴적계의 말단부 퇴적상 (distal facies)에 속하는 것으로 (즉, 연일층군의 모든 퇴적층이 이 퇴적 환경에서 퇴적된 것으로) 많은 사람들이 오해하고 있는 실정이다. 여기에 고생물학자들에 의한 다양한 생층서학적 층서 구분의 시도로 이들의 층명에 대한 상당한 혼란이 야기되고 있는 실정이다.

### 연일층군의 암상 변화와 층서

연일층군은 백악기 화강암과 부분적으로 접촉 변성된 경상계 퇴적층이 기반을 이루지만, 지표상에서는 대체로 대상으로 분포하는 제 3기 화산암류와 경계를 이룬다 (Fig. 1). 제 3기 화산암류는 주로 응회암류로 구성되지만 (Fig. 2A), 곳에 따라 소규모의 유문.데싸이트 (rhyodacite) 내지 데싸이트 (dacite) 암체로서 분포하기도 한다. 연일층군 하부의 주된 암상인 역암에는 이들 화산암편이 흔히 발견된다 (Fig. 2B).

연일층군의 중·하부는 암상의 변화가 심하고 층의 횡적 연장이 지극히 불량한 선상지-삼각주계 (fan-delta system) 특유

Table 1. Stratigraphic correlation of Yeonil Group.

Tateiwa (1924)	Um <i>et al.</i> (1964)	Kim (1965)	Yoon (1975)	Yun (1986)	Chough <i>et al.</i> (1989)	This study (1994)
Ennichi Shale	Yonam F.	Oomockdong F.	Yonghan F.	Duho F.	Duho F.	Pohang F. (200~300 m)
	Duho F.	Pohang F.	Duho F.			
	Idong F.	Eedong F.	Idong F.	Hagieon F.	Heunghae F.	
	Huenghae F.	Daegock F.	Heunghae F.			
	Hakrim F.	Songhakdong F.	Hagieon F.			
Senpoku Conglo.	Chunbuk Conglo.	Seoam Conglomerate	Chungogsa F.	Chunbuk Conglo. F.	Chunbuk F.	Chunbuk F. (300~500 m)
			Danguri Conglo.			

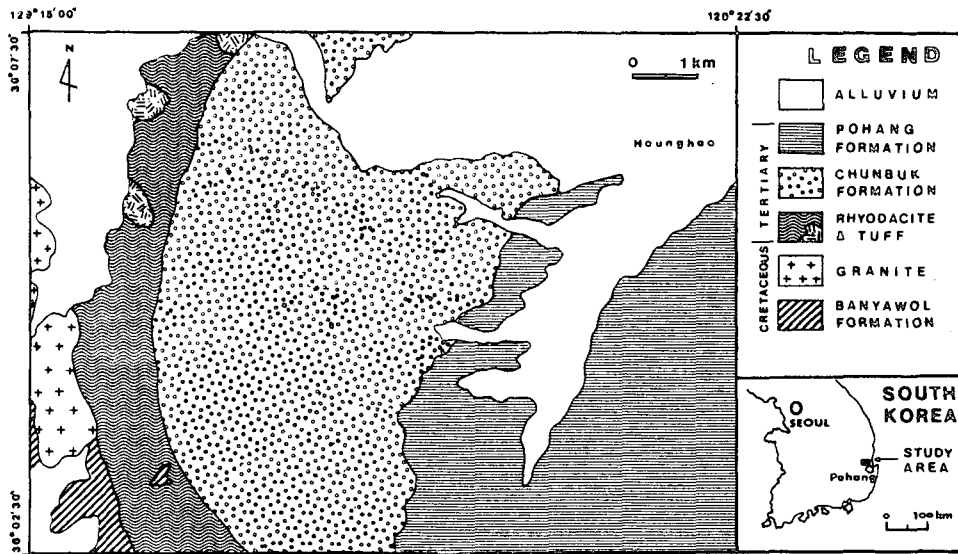


Fig. 1. Geologic and index maps of Heunghae area.

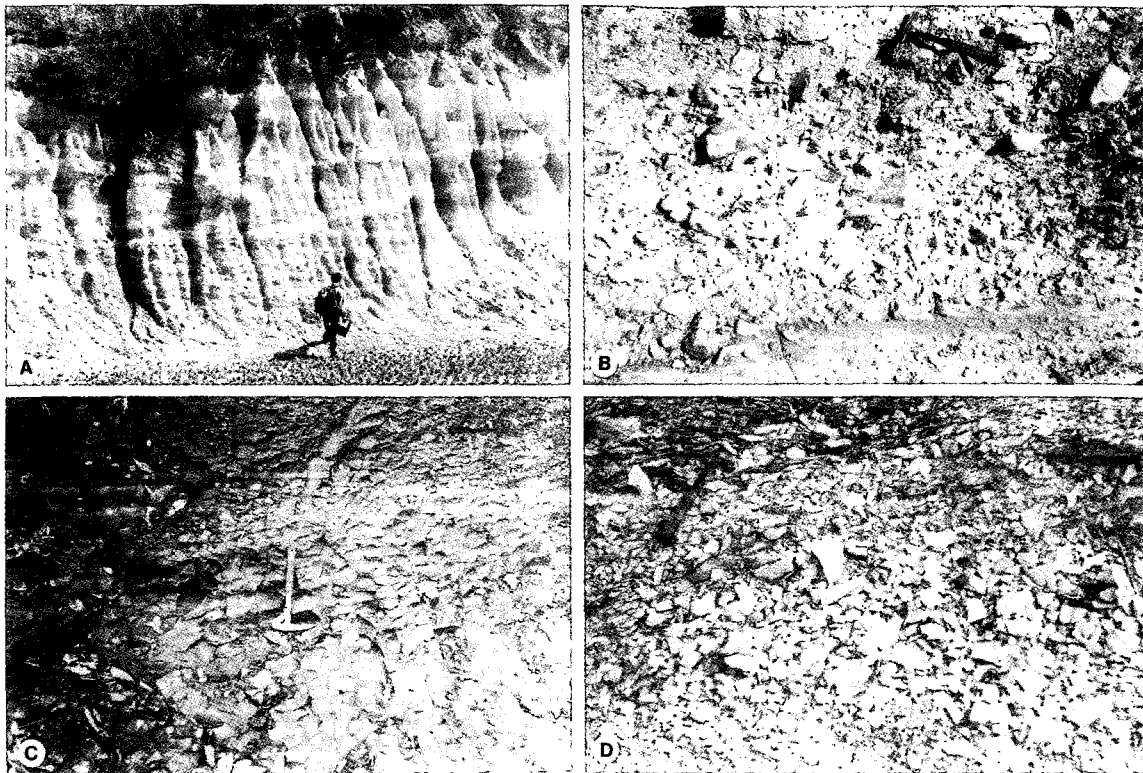


Fig. 2. Field occurrences of characteristic Tertiary rocks. A. Stratified lapilli tuff in the Tertiary volcanics. B. Conglomerate containing abundant volcanic fragments in the Chunbuk Formation: Note the more angular and smaller appearance of volcanic pebbles (arrow) vs. Cretaceous granite and hornfels. C. Characteristic weathering surface of bentonitic mudstone in the Chunbuk Formation. D. Siliceous shaly mudstone overlying Chunbuk formation: Note the hackly weathered appearance accompanying conchoidal fracturing.

의 퇴적 양상을 나타낸다 (Hwang, 1993). 그러나 소위 홍해층 중부부터는 비교적 층의 연장성이 좋은 이암 위주의 암상이 비교적 정연하게 분포하는 경향을 보인다. 따라서 필자는 이와 같은 암상과 퇴적상의 확연한 차이를 근거로 연일층군을 크게

2분하는 것이 보다 합리적이라는 생각을 갖게 되었다. 연일층군의 암상 변화를 점검해 보면, Hwang (1993)에 의해서 이미 상세히 보고된 바와 같이, 대체로 하부에서는 상향 조립화 되다가 중·상부부터는 상향 세립화 및 박층화 되는 (upward

fining and thinning) 경향을 보인다 (Fig. 3). 여기서 연장성이 양호한 20~30 m 두께의 특징적인 규질 이암 내지 세일의 암층을 (Fig. 2, 3)을 경계로 연일층군을 2분하면, 그 상·하위의 퇴적층들은 암상 및 퇴적상에 있어서 뚜렷한 차이를 나타낸다. 이 이암층의 하부는 선상지-삼각주계 특유의 역암 및 사암 위주의 암상과 층의 횡적 연장성이 지극히 불량한 퇴적상을 이루는 반면, 그 상부는 주로 이암 및 세일 위주의 연장성이 양호하고 정연한 층리를 보이는 퇴적상으로 확연하게 구분된다. 이 이암 층군의 하부에서도 단속적으로 선상지-삼각주계의 말단부 퇴적상 (distal facies)에 속하는 이암들이 분포하지만, 이들은 건층 (key bed)을 이루는 규질 이암과는 암색과 풍화 양상에 있어서 뚜렷한 차이를 보인다 (Fig. 2C, 2D). 과거 조사자들의 지질도에는 두호층이 그 하위의 층 내에 일부 잔적되는 형식으로 표시된 이 암층은 조사 결과 연구 지역을 북동 방향으로 가로지르면서 지속적으로 잘 발달하는 것으로 밝혀졌다.

이 규질 이암층은 야외에서 연한 황갈색 (beige)을 띠고 마치 장기층군의 세일라이트 광석같은 조각지 모양의 깨어짐이 발달하는 것이 특징이다 (Fig. 2D). 대개 이암의 암상이나 국부적으로 세일상으로 전이되어 나타나기도 한다. 미국 서부 지역에서 볼 수 있는 소위 "porcellanite"와 같은 극미립의 치밀한 암색으로 구성 성분의 대부분이 단백석 (opal-CT)으로 이루어진 규질 이암 (siliceous mudstone)이다 (Fig. 4). 현미경 하에서 구조편이 흔히 관찰되지만 구조암(diatomite)으로는 볼 수 없고 대부분 무기질 규산 성분들 (아마도 미세한 규질 화산재와 이들의 용해·침전물)로 구성된다. 전술한 바와 같이 이 층의 하

부에도 (기존의 층 분류상으로는 학림층과 홍해층 하부) 이암이 간헐적으로 연장성 없이 개재되지만, 이들은 보다 어두운 암갈색의 암색을 띠고 스멕타이트 (smectite)를 많이 함유하는 벤토나이트질 이암 (bentonitic mudstone)의 암상으로서 성분적으로도 규질 이암과는 판이하다 (Table 2, Fig. 4). 이 이암층은 규질 이암보다는 횡적 연계성이 불량하고 상대적으로 낮은 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량비와 높은 작열 감량 (즉, 이는 스멕타이트와 유기물이 많이 함유됨을 지시함)을 나타낸다 (Table 2).

규질 이암은 연일층군에 대한 기존의 4분법 지층 구분에서는 홍해층의 중·하부에 해당되는 층군에 개재된다. 이 암층을 건층으로 연일층군을 2분하여 하부를 천북층, 그 상부를 포항층이라고 기술하고자 한다. 여기서 사용한 천북층의 개념은 기존의 역암 위주의 천북층, 사암 위주의 학림층과 홍해층의 하부 층군을 포괄하는 것으로, 결과적으로 선상지-삼각주 퇴적계에 속하는 연일층군의 모든 퇴적층들이 여기에 속하게 된다. 포항층은 기존의 두호층과 홍해층의 중·상부를 포괄하는 층으로서 선상지-삼각주 퇴적계 즉, 천북층을 피복하는 이암 및 세일 위주의 암상을 이루는 퇴적층을 의미한다. 이 층은 선상지-삼각주 퇴적계 직후에 육지로 부터의 퇴적물의 공급이 원활하게 이루어지지 않는 퇴적 조건에서, 주로 해양성 부유 퇴적물 (hemipelagic to pelagic sediments)들이 퇴적되므로서 형성되었다. 이 층은 연장성이 양호하고 규질 성분이 풍부한 이암과 세일 위주의 퇴적상을 이루는 것이 특징이다. 여기서 기존의 두호층은 이 층과는 그 하한 설정에 있어서 다소 차이가

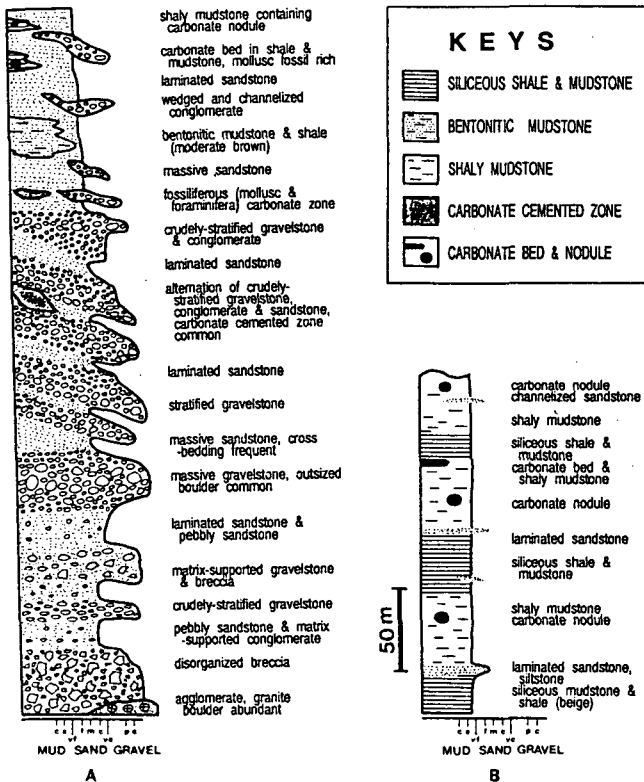


Fig. 3. Simplified columnar sections of the Yeonil Group in the study area (A. Chunbuk Formation, B. Pohang Formation).

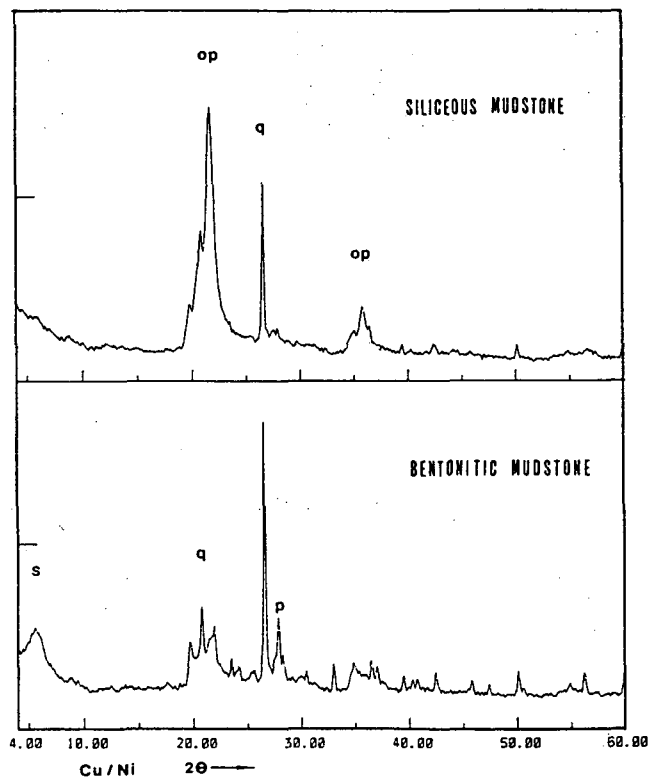
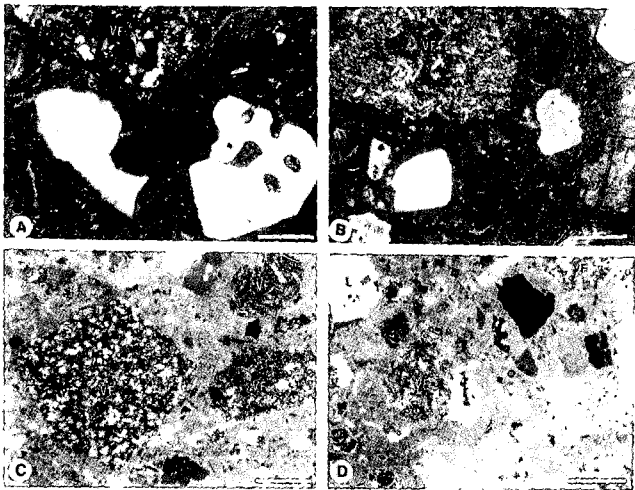


Fig. 4. X-ray diffraction patterns for bulk samples of bentonitic mudstone (Chunbuk Formation) and siliceous mudstone (Pohang Formation): opal-CT (op), quartz (q), smectite (s), plagioclase (p).

**Table 2.** Representative bulk-rock analyses (wt%) of mudstones using by X-ray fluorescence analysis (XRF).

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
BM-1	60.01	11.95	5.14	0.55	0.11	0.94	1.66	1.81	0.99	0.07	15.85	99.06
SM-1	77.79	9.81	1.53	0.37	0.00	0.28	0.59	1.19	0.19	0.06	7.33	99.16

\*total Fe, LOI: loss on ignition

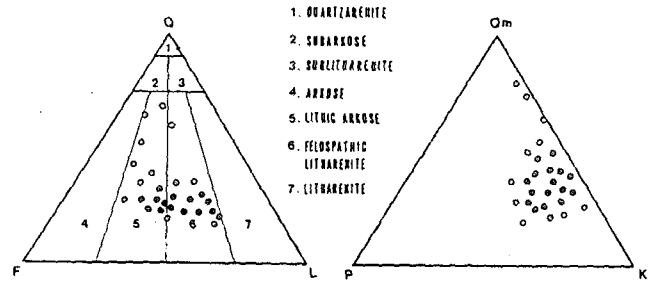


**Fig. 5.** Polarizing micrographs of volcanic rocks and volcanoclastic pebbly sandstones (scale bar 0.1 mm). A. Welded ash-flow tuff including large dacitic lapilli (vf): Note the vitrified embayment of quartz phenocryst (lower right). B. Crystal lapilli tuff with volcanic fragment (vf) and phenocrysts of quartz (white) and plagioclase (lower right). C. Various volcanic fragments (vf) apparently derived from the Tertiary volcanic sequences in the carbonate-cemented sandstone of the Chunbuk Formation. D. Volcanic fragments (vf) and epiclastic quartzofeldspathic grains in the carbonate-cemented sandstone of the Chunbuk Formation: Note foraminiferal tests in the lower left.

있을 뿐만아니라 이 층의 표식지를 의미하는 층명으로도 적절치 못한 것으로 여겨진다. 따라서 포항층이라는 층명은 Kim (1965)이 이미 사용한 바 있지만, 포항시 전체가 이 층의 주된 분포지가 된다는 사실에 의거하여 이 층명을 새롭게 확대 해석하여 사용하고자 한다 (Table 1).

**천북층의 화산쇄설성 암상**

앞에서 이미 언급한 바와 같이 연일층군의 서측부에는 제 3기 화산암류가 대상으로 분포한다. 과거에 백악기 화산암류로 기재된 바 있는 이 화산암류는 산출상태, 암상 및 변질 양상에 있어서 백악기 화산암류와는 사뭇 다르다. 특히 백악기 화산암류에서 흔히 볼 수 있는 변질 양상, 즉 사장석 반정의 알바이트화 작용, 탄산염 광물 또는 로오몬타이트 (laumontite)같은 제올라이트 광물로의 변질, 녹렴석화 작용 등의 양상을 찾아 보기 어렵다. 이 화산암류는 유문·데싸이트 내지 데싸이트 (rhyodacite-dacite)의 암질의 장석 반암류 및 규장암 (felsite)과 라필리 또는 결정질 응회암 (lapilli to crystal tuff) 암상 (Fig.



**Fig. 6.** Ternary diagrams showing the framework composition of sandstones and sandy parts of conglomerate in the Chunbuk Formation: quartz (Q), feldspar (F), lithic fragment (L), monocrystalline quartz (Qm), plagioclase (P), K-feldspar (K).

5A, 5B)의 응회암류가 주된 암상을 이루고, 여기에 국지적으로 현무암질 라필리 응회암이 혼재되는 다소 복잡한 화산 분출 및 분화상을 보이는 지층이다. 이 화산암류는 뚜렷한 열극 분출 (fissure eruption) 양상을 시사하는 분포 및 산출 상태를 보이는 바, 이는 퇴적 분지 형성 초기에 이루어진 단층선을 따라 분출하였음을 말해주는 것으로 해석된다. 이와 같은 화산암류가 연일층군의 분포지, 즉 퇴적 분지 내에서는 발견되지 않는 것으로 보아 이 화산 활동은 분명히 연일층군 퇴적 시기 이전에 야기된 것으로 해석된다. 이 화산암체의 일부 암상 (즉 규장암)에 대해서 연대 측정된 자료가 예오세 (44.03 Ma)로 보고된 것 (이현구 외, 1992)을 감안하더라도 위와 같은 해석은 가능한 것으로 여겨진다. 따라서 단층 작용에 의한 퇴적 분지 형성과 더불어 야기된 이와 같은 제 3기 화산 활동은 선상지 퇴적 환경을 조성하는데 기여한 것으로 생각된다. 다시 말해서 점성도가 높은 화산암류를 수반하는 이 산성 화산 활동이, 단속적으로 야기된 단층 작용과 함께, 선상지 퇴적 과정에 필수적인 퇴적 분지 근처에서의 높은 지형의 형성을 조장하였을 것으로 여겨진다.

천북층을 구성하는 역암 및 사암들은 일견해서는 화산 쇄설성 양상을 찾아 보기 어렵지만, 야외에서 자세히 관찰하면 역암에서 암편이 부분적으로 화산암류로 구성되어 있음을 알 수 있다 (Fig. 2B). 큰 압력은 대부분 백악기 화강암이나 호운펠스로 구성되지만, 비교적 작고 풍화에 의해서 파쇄되어 있는 (아마도 화산암편이 상대적으로 변질에 약해서 팽창성 점토 광물을 많이 함유하기 때문인 것으로 여겨짐) 암력들은 대개 제 3기의 화산암편인 경우가 대부분이다. 역암의 사질부나 사암을 편광 현미경 하에서 관찰하면 이와 같은 화산쇄설성 (volcanoclastic) 암상은 더욱 두드러진다. 지역적으로 다소 큰 차이를 보이지만 화산암류의 미편들이 흔히 산재되고 (Fig. 5C,

5D) 각상의 (rectangular) 사장석이 드물지만 함유되는 것이 특징적이다. 여기서 천북층 퇴적물의 주요 공급원 역할을 한 화강암이 사장석이 전혀 없는 알칼리 화강암이라는 사실을 감안하면, 위와 같은 사장석편들의 함유 정도는 당연히 제3기 화산암류에 그 근원을 찾을 수밖에 없다.

천북층의 역암의 사질부와 사암들의 광물 조성을 분석하면, 대부분 화산 쇄설성 사암에서 흔히 볼 수 있는 lithic arkose 내지 feldspathic litharenite 영역에 도시된다 (Fig. 6). 여기서 다소 석영편이 많은 쪽으로 동떨어져 있는 시편들은 하도 퇴적상 (channelized deposits)의 사암들이다. 사암 및 역질 사암들은 대체로 알칼리 장석이 사장석보다 다소 많이 함유되는 장석 조성을 나타낸다. 그러나 화강암이 거의 전부 퍼싸이트 (perthite)인데 비해서, 천북층의 사암 및 역암의 사질부의 장석질 퇴적립들은 정장석과 새니딘 (sanidine) 위주의 알칼리 장석의 조성을 보이는 것이 특징이다. 사장석은 약간 변질된 상태로 산출되며, 전자현미 분석에 의하면 대개 알바이트-올리고클래스 (albite-oligoclase) 범위의 조성 ( $An_{0.3} \sim An_{17.1}$ )을 갖는 것으로 나타난다. 천북층의 화산 쇄설성 양상은 이 층에 개재되는 이암이나 셰일들이 포항층과는 달리 저품위 벤토나이트 (bentonite)와 같은 조성을 보인다는 데에서도 찾아 볼 수 있다. 왜냐하면 벤토나이트는 스멕타이트 (smectite) 군 광물을 다량 함유하는 수층 퇴적된 응회암의 속성 변질암의 일종이라는 것은 주지의 사실이기 때문이다.

위에서 기술된 바와 같이 천북층의 퇴적물들은 암편과 퇴적립의 조성에 있어서 현격한 조성상의 차이를 보인다. 퇴적암력들의 조성은 지역적으로 큰 폭의 차를 보이기 때문에 정량화할 수는 없으나 대체로 백악기 암석들, 특히 이 퇴적 분지의 기반을 이루는 알칼리 화강암이 주된 성분을 이룬다. 이에 비해서 사암이나 역암의 사질부에는 제3기 화산암류의 미세 암편과 결정편이 보다 많이 함유된다. 이와 같은 퇴적립의 기원에 있어서 입도에 따른 퇴적물의 선택적인 유입 현상은 아마도 근원암의 물성의 차이에 기인한 것으로 해석된다. 다시 말해서 괴상의 견고한 화강암체와 보다 취약하고 쇄편상 집합체 형태의

제3기 응회암이 풍화·침식의 과정에서 유리되는 양상이 현격히 다르기 때문일 것으로 여겨진다. 퇴적물의 이동 거리가 짧은 선상지-삼각주 퇴적 환경 하에서 화강암 기원의 퇴적물들은 상대적으로 큰 입자를 이루지만, 원래 미세한 조직 및 입도의 제3기 화산암류들은 이에 비해서 미편이나 미세한 퇴적물로서 퇴적 분지에 유입될 개연성이 클 것으로 해석된다. 이와 같은 퇴적 환경과 근원암의 물성 차이에 의해서 천북층은 위에서 언급한 바와 같은 독특한 부분적 화산쇄설상을 이루게 된 것으로 생각된다.

천북층의 부분적 화산쇄설성 양상은 일반적으로 선상지 퇴적 환경에서 퇴적물의 공급은 분지의 바로 인접부에서 유래된다는 논리 (Nilsen, 1982)에도 잘 부합되는 것으로 생각된다. 요컨대 이와 같은 분지 가장자리에서의 화산 활동과 천북층의 부분적 화산쇄설성 양상은 최근에 해석된 Hwang (1993)의 선상지-삼각주계의 퇴적 과정을 보완시켜 주는 내용이 될 것으로 생각된다. 또한 이와 같은 천북층의 퇴적 및 암상에서의 화산 활동의 영향은 천북층의 속성 광물상, 특히 제올라이트 교결물 (zeolite cement)의 생성과 직접 연계되는 중요성을 갖는다.

### 연일층군 퇴적암류의 속성 광물상

연일층군 역암의 사질부, 사암, 이암 및 탄산염 결핵체 등을 X-선회절분석, 편광현미경 및 주사전자현미경 관찰을 통해서 조사하여 속성 광물로서 홀란드이트 (heulandite), 스멕타이트, 방해석, 백운석 (dolomite), 단백석 (opal-CT), 녹니석, 석영, 황철석, 석고 (gypsum), 배사알루미나이트 (basaluminite) 등이 감정되었다 (Table 3, 4). 이 중에서 산출 빈도가 높고 사암의 주요 교결물 (main cement)로서 산출되는 것은 홀란드이트, 스멕타이트, 방해석 및 단백석인 것으로 밝혀졌다 (Fig. 7). 홀란드이트는 천북층의 역암 및 사암에서 가장 흔히 산출되는 속성 광물로서, 많이 함유될 경우에는 10 vol%에 달하는 경우도 있다. 천북층 내에서 유공층이나 패류 화석을 많이 함유하는 해성층에 속하는 역암과 사암중에는 탄산염 광물이 주요 교결

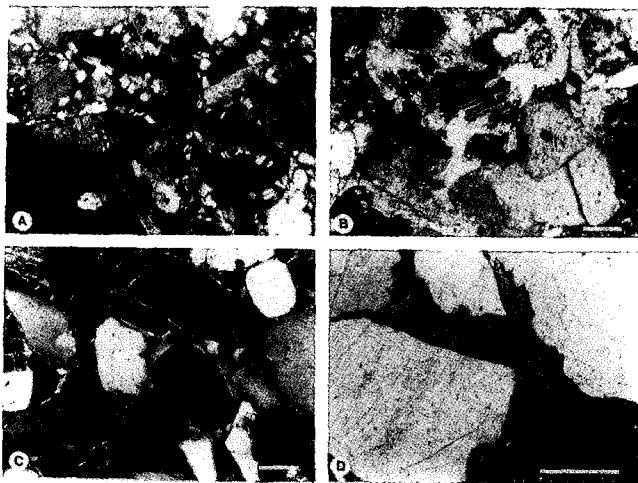
Table 3. Diagenetic mineral facies of Yeonil Group.

FORMATION	AUTHIGENIC MINERALS	CHEMICAL FORMULA	HOST ROCKS
POHANG FORMATION (200~300 m)	opal-CT smectite dolomite calcite quartz basaluminite	$SiO_2 \cdot nH_2O$ $(Na,K)_x(Al_{2-x}Mg_x)Si_4O_{10}(OH)_2$ $CaMg(CO_3)_2$ $CaCO_3$ $SiO_2$ $Al_2SO_4(OH)_{10} \cdot 5H_2O$	mudstone & shale mudstone, shale & sandstone carbonate nodule & bed carbonate nodule & bed mudstone & shale carbonate nodule
CHUNBUK FORMATION (300~500 m)	heulandite calcite dolomite smectite opal-CT chlorite pyrite goethite gypsum	$CaAl_2Si_7O_{18} \cdot 6H_2O$ $CaCO_3$ $CaMg(CO_3)_2$ $(Na,K)_x(Al_{2-x}Mg_x)Si_4O_{10}(OH)_2$ $SiO_2 \cdot nH_2O$ $(Mg,Fe,Al)_{12}Si_6Al_2O_{20}(OH)_{16}$ $FeS_2$ $FeO(OH)$ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	conglomerate & sandstone sandstone & conglomerate sandstone mudstone, shale & sandstone sandstone & conglomerate sandstone & conglomerate conglomerate & sandstone conglomerate & sandstone mudstone & shale

**Table 4.** Electron microprobe analyses of heulandite and smectite from conglomerates and sandstones of the Yeonil Group.

	heulandite				smectite		
	1	2	3	4	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	61.37	62.06	61.35	61.52	39.43	40.73	39.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.08	14.89	14.79	15.18	26.21	24.66	27.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	—	—	0.01	—	6.40	7.66	6.99
MnO	0.08	—	0.01	0.01	—	—	0.04
MgO	1.34	1.30	1.31	1.42	1.43	1.28	1.35
CaO	4.89	5.15	5.10	5.21	0.63	0.47	0.50
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.11	0.12	0.12	0.09	0.16	0.16
K <sub>2</sub> O	0.95	0.97	0.86	0.98	1.03	1.68	1.45
Total	82.77	84.48	83.55	84.44	75.22	76.64	77.10

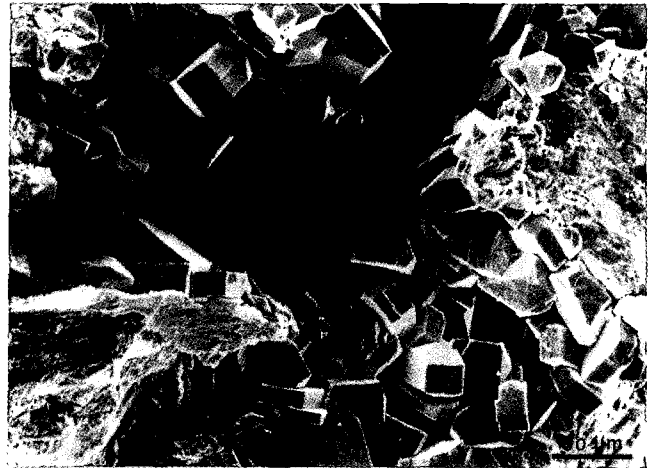
\*total iron



**Fig. 7.** Polarizing micrographs showing characteristic occurrence of authigenic minerals in Yeonil Group (scale bar: 0.1 mm). A. Heulandite cements rimming around detrital grains in the conglomerate of the Chunbuk Formation. B. Calcite cements filling intergranular cavities in the sandstone of the Chunbuk Formation. C. Birefringent clay coatings (smectite) of the quartz-rich channelized sandstone in the lower part of the Pohang Formation. D. Opal-CT (dark) constituting the intergranular cements together with birefringent smectitic clay mineral in the sandstone of the Chunbuk Formation.

물을 이루며 산출되기도 한다. 초기에 소위 “micritic cement” 형태로 산출되는 것은 대개 백운석의 조성을 보이고, 후기에 공극충진상으로 비교적 조립의 결정형을 이루며 산출되는 탄산염 광물은 방해석으로 구성된다. 후자는 간혹 홀란다이트를 치환하는 조직 관계를 보이는 것으로 보아, 이 탄산염 광물이 제올라이트 보다는 후기의 속성 산물로 여겨진다. 포항층에 간혹 개재되는 하도상의 퇴적상을 이루는 사암에서는 제올라이트 광물이 발견되지 않고 스멕타이트가 퇴적물을 피복하는 형태 (grain coatings)로 산출된다 (Fig. 7C).

홀란다이트는 속성 기원의 산물로서는 특이할 정도로 조립질 (대개 0.01~0.05 mm)의 잘 발달된 결정형을 이루고 (Fig. 8),



**Fig. 8.** A scanning electron micrograph showing coffin-shaped heulandite crystals filling the intergranular cavities of the conglomerate in the Chunbuk formation.

대개 입간 충전상 (intergranular space-fillings)이나 퇴적립 주변의 테두리상 (grain rimmings)을 이루며 산출된다. 간혹 변형된 운모류 광물편의 벌어진 틈새에서 큰 결정으로 정출되거나 방해석에 의해서 교대 잔류된 양상으로 산출되기도 한다. 제올라이트 중에서 가장 다양한 고용체상을 이루는 홀란다이트군 광물들은 Si/Al 함유비와 열적 성질에 의해서 클리놉틸로라이트 (clinoptilolite)와 홀란다이트로 구분된다 (Boles, 1972). 분석 결과 천북층에 함유되는 것은 전형적인 홀란다이트의 광물상으로 Si/Al 함유비가 3.3~3.8의 범위에 높이고 (Table 4) Ca이 풍부하다 (클리놉틸로라이트는 Si/Al의 함유비가 대개 4 이상이고 알칼리가 풍부한 조성을 보임). 이는 화학 조성상 화산쇄설성 사암에서 초기의 속성 광물로 산출되는 홀란다이트와 유사하다 (Noh and Boles, 1993).

연일층군의 최대 층후가 불과 600~700 m에 불과하다는 사실에서도 예견되는 바와 같이, 천북층의 역암 및 사암에서 관찰되는 속성 광물상은 이 퇴적층이 얇은 매몰 환경 하에서 생성되었음을 강하게 시사한다. 홀란다이트에서 로오몬타이트로 (laumontite)의 상전이 (대개 80°~120° 범위에서 야기됨) 과정과 사장석 편이 뚜렷한 알바이트화 작용 (albitization)의 양상이 관찰되지 않는다는 사실은 이를 뒷바침한다. 그외에도 연일층군의 얇은 매몰 조건을 시사하는 속성 광물들의 산출 양상으로는 (1) opal-CT 유형의 단백석이 주된 교결물을 이루거나, (2) 석고가 속성 광물로서 이질 퇴적암류에 수반되는 양상과 (3) 흔히 적철석이나 침철석 (goethite) 같은 철의 산화 및 수산화 광물들이 퇴적립 피복상 (grain coatings)으로 산출되는 양상 등을 들 수 있다. 이와 같은 광물상의 특징은 연일층군이 지표 조건에 가까운 (near surface condition) 즉 매우 얇은 매몰 환경 (40°~60°C 정도)을 겪었음을 시사한다 (Kastner and Gieskes, 1983; Iijima, 1988; Surdam et al., 1989).

연일층군이 매우 얇은 매몰 조건의 속성 작용을 겪었을 개연성은 천북층의 사암이나 역암의 사질부의 퇴적립 주위를 피복하는 조직 (grain-coatings)을 이루며 흔히 산출되는 점토 광물들이 거의 순수한 스멕타이트의 조성을 보인다는 사실에서도



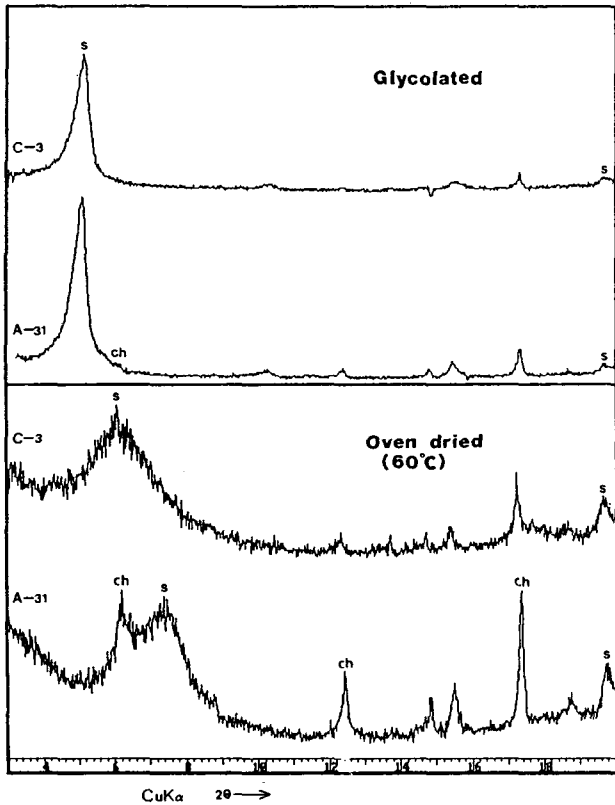


Fig. 9. X-ray diffraction patterns of fine fractions (2 μm) extracted from sandstones of the Chunbuk Formation (s. smectite, ch. chlorite).

유추될 수 있다 (Fig. 9). Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이, 사암으로 부터 추출된 2 μm 이하의 점토 시료들을 에칠렌글리콜로 처리하여 (glycolation) X-선회절 분석하면, 이들이 혼합층상 (mixed-layer)을 이루지 않고 순수한 스멕타이트의, 조성을 갖는다는 사실을 알 수 있다. 그러나 초기 속성 기원의 점토 광물로서 적은 양이지만 스멕타이트 이외에 녹니석과 같은 점토 광물이 발견되는 것은 다소 예외적인 것으로 여겨진다. 극미립으로 잔존되는 형식으로 드물게 산출되는 이 점토 광물은 완전한 X-선회절 분석이 어렵기 때문에 정확히 감정할 수 없으나, C/S같은 혼합 층상형 점토 광물이라기 보다는 순수한 녹니석에 가까운 것으로 해석된다 (Fig. 9). 이 점토 광물의 존재는 아마도, Surdam 등 (1989)이 화산쇄설성 사암에서 지적한 바와 같이, 원암이 지화학적으로 반응성이 높은 화산쇄설성 암상을 이루는 것과 성인적으로 유사한 것으로 생각된다.

포항층은 천북층에 비해서 매우 단순한 속성 광물상을 이룬다. 대부분 이암 및 세일로 구성되는 포항층은 단백석과 스멕타이트가 주요 속성 광물로서 산출되고 여기에 석영이 수반되는 경향을 나타낸다. 전 층준을 통해서 이암과 세일은 단백석 (SiO<sub>2</sub> nH<sub>2</sub>O) → 석영(SiO<sub>2</sub>)으로의 상전이 과정을 시사하는 속성광물 조성을 보인다 (Table 3). 특히 규질 이암의 미세 열극이나 탄산염 결핵체 내에서 간혹 발견되는 패류 화석내에 단백석과 자형의 석영이 미립의 집합체를 이루면서 공생하는 양상이 관찰된다. 이와 같은 공생관계는 60°C 이하의 매몰 조건을 시사

하는 것으로서 (Kastner and Gieskes, 1983), 천북층의 속성 광물상에서 유추된 40~60°C의 매몰 온도와 잘 부합된다. 포항층의 하부에 간헐적으로 개재되는 박층의 하도상 사암에는 홀란드다이트가 발견되지 않고 스멕타이트가 주된 교결물을 이룬다. 포항층의 이암 및 세일에서 흔히 발견되는 탄산염 결핵체의 기질은 돌로마이트로 이루어져 있고 이들 주변의 산화대에서 간혹 배사알루미나이트가 속성 광물로서 산출된다. 탄산염 결핵체의 용해 열극을 충전하는 형식으로 방해석이 산출되기도 한다.

## 결 언

연일층군은 선상지-삼각주 퇴적상의 역암 및 사암 위주의 천북층과 이 퇴적상계에 속하지 않는 이암 및 세일 위주의 포항층으로 2분하는 것이 타당할 것으로 여겨진다. 여기서 건층으로 제시될 수 있는 특징적인 규질 이암은 단순히 층서 구분의 기준이 될뿐만 아니라 연일층군의 퇴적 환경, 퇴적상, 암상 및 속성 광물상을 가름하는 중요한 기준이 된다. 연일층군 퇴적 직전 내지 동시에 야기된 화산활동의 결과로, 퇴적 분지 서측 가장자리에 분포하는 제 3기 화산암류들의 성분들이 천북층의 퇴적 시기에 중생대 기반암의 풍화쇄설물과 함께 혼입되었다. 이와 같은 제 3기 화산쇄설물의 부분적 유입은 lithic arkose 내지 feldspathic litharenite 골격 조성의 역암 및 사암 위주의 천북층의 암상을 규제했을 뿐만아니라, 속성 광물상에도 영향을 미쳐 홀란드다이트와 스멕타이트같은 속성 광물들의 생성을 조장하였다. 천북층은 홀란드다이트, 스멕타이트 및 방해석이 주요 교결물을 이루는데 비해서, 포항층에서는 단백석과 스멕타이트가 주요 속성 광물상을 이룬다. 이는 두 층들이 매우 얇은 매몰조건 (40~60°C)을 겪었고 암상과 퇴적상이 판이한 것 (즉, 부분적 화산쇄설상이며 역암 및 사암 위주인 천북층과 해양성 규질 연니 성분으로 이루어진 이암 및 세일 위주의 포항층 사이의 차이)에 기인한 것으로 해석된다.

## 사 사

이 논문은 한국 과학재단의 지원 (과제 번호: 931-0400-007-2)에 의해서 수행되었다. 이 연구에 필요한 전자현미 분석을 도와 준 서울 대학교의 장병욱 석사에게 감사한다. 또한 야외 조사에 참여한 강원 대학교 광물학 교실의 학생들 (93-94 학년도 졸업생 및 재학생)에게도 사의를 표하고자 한다. 또한 이 논문의 원고를 교열해주고 많은 조언을 해준 이정후 박사님과 익명의 심사자에게 감사한다.

## 참고 문헌

- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 1992, 포항 및 장기 분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조 연구: 화산암류의 K-Ar 연대, 광산 지질, 25, 337-349.
- Boles, J.R., 1972, Composition, optical properties, cell dimensions and thermal stability of some heulandite group minerals: *Amer. Miner.* 57, 1463-1493.



- Bong, P.Y., 1985, Palynology of the Neogene strata in the Pohang sedimentary basin. Ph. D. thesis, Seoul National University, 239 p.
- Chough, S.K., Hwang, I.G., and Choe, M.Y., 1989, The Miocene Doumsan Fan-delta, South Korea: A composite fan-delta system in back-arc margin, *Jour. Sedi. Petrol.*, 60, 445-455.
- Hwang, I.G., 1993, Fan-delta systems in the Pohang Basin (Miocene), SE Korea, Ph.D. thesis, Seoul National University, 923 p.
- Hwang, I.G. and Chough, S.K., 1990, The Miocene Chunbuk Formation, southeastern Korea: marine Gilbert-type fan-delta system, *Spec. Publs int. Ass. Sediment*, 10, 235-254.
- Iijima, A., 1988, Diagenetic transformations of minerals as exemplified by zeolites and silica minerals - A Japanese View, In: Chilingarian, G.V. and Wolf, K.H. (Eds.), *Diagenesis II*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 268 p.
- Kastner, M. and Gieskes, J.M., 1983, Opal-A to opal-CT transformation: A kinetic study. In: Iijima, A, Hein, J.R., and Siever, R. (Eds.), *Siliceous deposits in the Pacific region, Developments of Sedimentology*, 36, Elsevier, Amsterdam, 228 p.
- Kim, B.K., 1965, The stratigraphic and paleontologic studies on the Tertiary (Miocene) of the Pohang area, Korea. *Jour. Seoul National University, Sci. Tech. Ser.*, 15, 32-121.
- Lee, Y.G., 1984, Micropaleontological (Diatom) study of the Neogene deposits in Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, 286 p.
- Nilsen, T.H., 1982, Alluvial Fan Deposits: Sandstone Depositional Environments, Scholle, P.A. and Spearing, D. (Eds.), *AAPG Spec. Publ.*, 410p.
- Noh, J.H. and Boles, J.R., 1993, Origin of zeolite cement from the Miocene sandstones in the North Tejon oil field, California. *Jour. Sedi. Petr.*, 63, 248-260.
- Surdam, R.C., Thomas, L.D., Heasler, H.P. and McGowan, D.B., 1989, Porosity evolution of sandstone/shale systems, In: Huctcheon, I. E. (Ed.), *Short Course in Burial Diagenesis, Miner. Assoc. Canada*, 409 p.
- Tateiwa, I., 1924, Geologic atlas of Chosen: No. 2, Ennichi-Kyuroho and Choyo Sheet, *Chosen Geol. Survey*. 16 p.
- Um, S.H., Lee, D.W. and Park, B.S., 1964, Geological map of Korea, Pohang sheet (1:50000). *Geol. Surv. Korea*, 21 p.
- Yoon, S., 1975, Geology and paleontology of the Tertiary Pohang Basin, Pohang district, Korea, Part 1. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 11, 187-214.
- Yun, H.S., 1986, Amended stratigraphy of the Miocene formations in the Pohang Basin, 180 p.

---

1994년 11월 7일 원고접수