

포항 분지의 제3기 장기층군에서 산출된 규화목의 산출상태와 구성광물

김 종 현*

공주대학교 지구과학교육과, 314-701, 충남 공주시 신관동 182

The Mode of Occurrence and Composing Minerals of Petrified Woods from the Tertiary Janggi Group of Pohang Basin in Korea

Jong-Heon Kim*

Department of Earth Science Education, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

Abstract: The mode of occurrence of petrified woods from the Tertiary strata of Pohang Basin in Kyeongsangbug-do suggests that the petrified woods are all allochthonous fossils. Petrified woods as well as various types of wood fossils such as carbonized woods and charcoal woods were found. However, some lignified organic remains are rarely found in the bark part of petrified woods. X-ray diffraction analysis showed three types of minerals including Opal-CT, Opal-C, and quartz+crystalite. The presence of these minerals indicates that silicification occurred under the low temperature. The tuffs are considered to be main source of supply of silica. Analysis of the kind of composing minerals and the condition of tissue preservation can predict that silicification is mainly occurred by replacement.

Keywords: Janggi Group, allochthonous, petrified woods, replacement

요 약: 경북 포항의 장기층군에서 산출된 규화목의 산출상태로부터 판단하면 규화목은 모두 이지성 화석임을 지시한다. 장기층군에는 규화목과 함께 탄화목, 목탄도 발견되며, 일부의 규화목에는 껍질부분에 갈탄화된 유기물이 일부 남아있는 것도 있다. 규화목의 X-선 회절 분석으로부터 Opal-CT, Opal-C, 석영+크리스토파라이트의 3가지 유형이 확인되었다. 이러한 광물의 존재는 규화작용이 비교적 낮은 온도에서 일어났음을 지시한다. 실리카(SiO_2)의 주공급원은 용회암으로 추정된다. 규화목의 구성광물의 종류와 조직 보존 상태로부터 판단하면 규화작용은 주로 치환에 의해 일어난 것으로 추정된다.

주요어: 장기층군, 이지성, 규화목, 치환

서 언

포항 분지의 도구 지역에 분포하는 제3기층에서 규화목을 비롯한 많은 식물화석이 산출되고 있지만, 이들에 대한 국내 연구자들의 연구는 극히 미미하다. 최근에 이르러 Jeong et al.(2003, 2004)에 의해 처음으로 포항산 규화목의 조직학적인 연구가 이루어졌다. 식물화석에 대한 연구는 Kim(2005), 김종현(2008), 김종현과 최성일(2008)에 의해 일부 수행되었다.

규화목은 과거의 식생, 고기후 및 고환경 등에 대한 많은 정보를 제공해 주는 화석이다. 이러한 규화목은 각 시대의 지층에서 그리고 세계의 곳곳에서 산출되고 있기 때문에 많은 연구가 이루어졌다. 지금까지 규화목에 대한 연구의 대부분은 규화목의 조직 관찰로부터 수종(樹種)을 결정하거나 고환경을 추정하는 것이었다. 규화목 형성의 메커니즘(mechanism)에 대한 연구는 그리 많지 않다(e.g. Drum, 1968a, b; Leo and Barghoon, 1976; Furuno et al., 1986a, b; Furuno, 1987; Akahane and Furuno, 1993; Akahane, 1996; Akahane et al., 1999, 2004; Oishi, 2001, 2003). Buurman(1972)이 언급한 바와 같이, 규화목 형성의 메커니즘에는 크게 치환(replacement)과 충전

*Corresponding author: jongheon@kongju.ac.kr
Tel: 82-41-850-8298
Fax: 82-41-850-8299

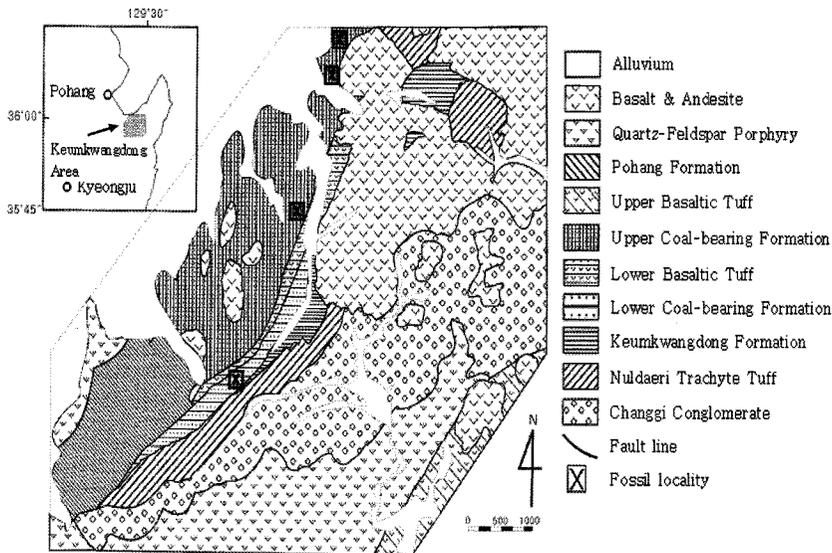


Fig. 1. Geological map of study area (after Kim et al., 1975) and fossil locality.

(filling or permineralization)이라는 2개의 서로 다른 작용이 알려져 있다. Felix(1897)와 Buurman(1972) 등은 치환이 규화작용의 진정한 과정이라 생각하였으나, Schopf(1971), Leo and Barghecon(1976), Sigleo(1978, 1979), Scurfield and Segnit(1984) 등은 반대로 충전이라고 하였다. 그러나, 대다수의 연구자들은 규화작용의 메커니즘에 관계없이 규화물에 조직이 보존되어 있을 때 규화작용의 용어를 사용한다(Gallwitz, 1954, 1955). 어떤 연구자는 규화물에 유기물이 남아 있을 때 충전이라는 용어를 사용하기도 한다(Kraut, 1933).

본 연구는 포항 분지의 도구 지역에 분포하는 장기층군에서 채집한 규화물의 산출상태와 구성광물 그리고 규화물의 형성 메커니즘에 대해 알아보고자 한다.

지질개요

포항 분지의 제3기층은 Tateiwa(1924)에 의해서 연일, 구룡포 및 감포 지역이 처음 조사된 이래, 많은 국내외 학자들에 의해 연구되었다. 이들은 주로 고생물학, 퇴적학 및 층서학 분야의 연구이다(엄상호 외, 1964; 김봉균, 1970; Lee, 1975; 장세용, 1976; 김봉균과 최덕근, 1977; Takahashi and Kim, 1979; 백광호 외, 1979; Yoon, 1975, 1976, 1982; 전희영, 1982; Yun, 1986; 전희영 외, 1990; 이영길, 1993 등).

Tateiwa(1924)는 포항 분지의 제3기층을 하부의 장기통과 상부의 연일통으로 구분하였고, 장기통은 다

시 장기층군과 범곡리층군으로 세분하였다. Kim et al.(1975)는 장기층군, 범곡리층군, 연일층군으로 구분하였으나, Kim(1984, 1987)은 범곡리층군을 장기층군의 최상부층으로 보고 두 층군을 합쳐 하부의 양북층군과 상부의 연일층군으로 구분하였다. 윤선(1998)은 양남분지의 제 3기층을 하부로부터 범곡리층군, 장기층군 및 연일층군으로 구분하였으며, 범곡리층군을 최하위층군으로 놓은 것은 기존 연구자들의 층서구분과 다르다.

여기에서는 Kim et al.(1975)의 층서구분을 따라 장기층군, 범곡리층군, 연일층군으로 구분하였다. Kim et al.(1975)에 의하면, 장기층군은 하부 장기층군, 중부 장기층군, 상부 장기층군으로 구분되며, 이들은 서로 부정합 관계이다. 규화물은 중부 장기층군에 해당하는 하부함탄층과 상부함탄층에서 채집되었다. 하부함탄층은 넓은 지역에 걸쳐 분포하며, 주로 사암, 세일, 백색 응회암, 역암 및 수매의 갈탄층으로 구성되고 백색응회암층이나 갈탄층에서 재목화석이 산출된다. 하부함탄층은 금광동 지구와 장기 지구에 분포하며 주로 사암, 역질 사암, 역암, 세일, 백색 내지 회색의 응회암 및 수매의 갈탄층이 협재되어 있다. 연구 지역의 지질도 및 화석의 산출지점은 Fig. 1과 같다.

연구 방법

규화물은 동해면 도구 일대에 분포하는 하부함탄층과 상부함탄층의 4개의 화석 산지(Fig. 1)로부터 50

Table 1. Chemical composition of petrified woods (wt%)

Specimen no.	1	2	3
SiO ₂	91.01	92.75	85.47
Al ₂ O ₃	1.43	-	2.92
Fe ₂ O ₃	0.67	3.33	2.93
FeO	0.22	0.60	0.34
MnO	0.05	0.07	0.06
Na ₂ O	0.10	0.13	0.18
K ₂ O	0.05	0.06	0.06

여개의 표본을 채집하였다. 규화목을 구성하고 있는 광물의 종류를 알기 위하여 5개의 표본을 선정하여 X선 회절 분석을 실시하였다. X선 회절 분석은 일본 큐슈대학교의 Shimazu X선 회절분석기를 이용하였다. 측정 조건은 Cu 대음극을 사용하였고, 전압 30 kV, 전류 15 mA, 분석속도 1°/min, 그리고 측정 범위 2θ=10~40°이다. 또한, 규화목의 주성분을 알기 위하여 임의로 3개의 표본을 선정하여 공주대학교의 X선 형광분석기(XRF, SEA2220A-ID-0097)로 분석하였다.

연구 결과

화학성분 및 X선 회절 분석

Table 1은 장기층군에서 산출된 규화목 3개를 분석한 결과이다. 이들은 거의 대부분 SiO₂(85.4-92.7 wt%)로 구성되어 있고, Al₂O₃(1.4-2.9 wt%)와 Fe₂O₃(0.6-3.3 wt%)가 소량 포함되어 있다. 이것으로 보아 채집된 화석은 모두 규화목임을 알 수 있다.

X선 회절 분석 결과는 Fig. 2와 같다. 규화목을 구성하는 광물은 종류에 따라서 크게 3개 유형으로 구분할 수 있다. 1형은 크리스토팔라이트(cristobalite)와 트리디마이트(tridymite)만으로 구성되고, 2개의 표본에서 이와 같은 패턴이 나타난다. 2형은 크리스토팔라이트(cristobalite)와 트리디마이트(tridymite) 이외에 석영(quartz)의 피크가 현저하게 또는 약하게 나타나며, 2개의 표본에서 나타난다. 3형은 석영(quartz)이 대부분이며 크리스토팔라이트를 소량 포함하는 것으로 1개의 표본에서 나타난다.

각 지층에서 발견된 규화목은 대체로 층리에 평행하거나 비스듬한 상태로 묻혀있고, 발견된 표본 중에는 크기에 관계없이 뿌리가 붙어 있는 화석은 하나도 없다. 또한, Shimakura(1937)에 의해 평양 부근에

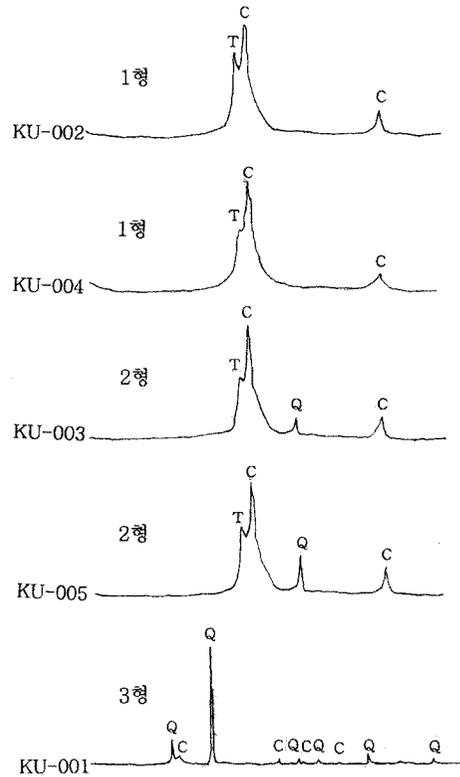


Fig. 2. X-ray diffraction pattern of wood fossils from the Janggi Group (T=tridymite, C=cristobalite, Q=quartz).

서 발견된 화석림(petrified forest)과 같이 현지성을 지시하는 직립수간 화석이 발견되지 않는 것으로 보아, 이들은 모두 유수에 의해 운반되어 매몰된 이지성 화석으로 판단된다.

규화목을 단면상에서 보면 원형에 가깝게 형태가 보존된 것도 있고(Fig. 3의 A), 압축에 의한 변형을 받아 찌그러진 것도 보인다(Fig. 3의 B, C). 일반적으로 겉씨식물의 연재(softwood)는 속씨식물의 경재(hardwood)에 비하여 유연하고 치밀하지 못하다. 그러므로 퇴적될 때에 목재가 층리와 평행한 상태로 놓였을 경우, 속성작용 동안에 압축작용을 받으면 겉씨식물의 목재는 속씨식물의 목재에 비하여 압력의 직각방향으로 더 많이 변형된다. 따라서, 변형이 많이 일어난 목재화석은 대부분 겉씨식물이 많다.

규화목과 함께 산출되는 화석에는 탄화목(Fig. 3의 D, E)과, 소량이지만 목탄(Fig. 3의 G)도 발견된다. 탄화목은 역청탄화된 상태로 나타나며 나무의 결이 육안으로도 잘 관찰된다.

한편, 규화목의 일부에서 중심 부분은 충분히 규화

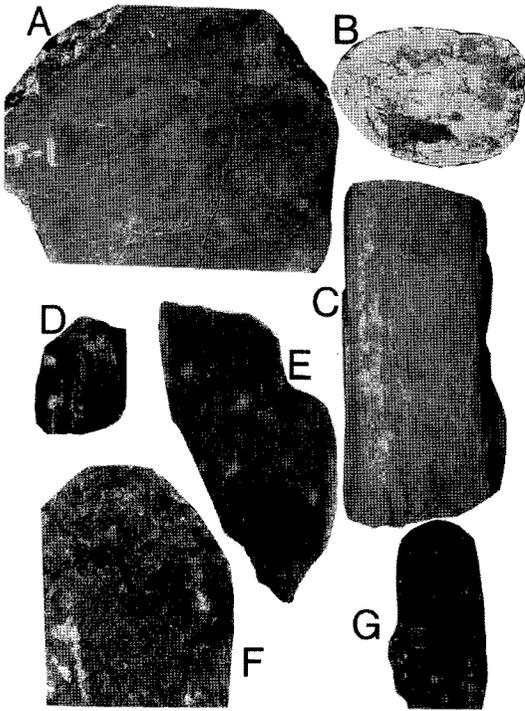


Fig. 3. Mode of occurrence of petrified wood fossils.

되었으나, 그 외측이 갈탄화된 상태로 보존된 것도 있다(Fig. 3F). 이것은 수간이 퇴적물 속에 묻혀있는 동안에 실리카가 풍부하게 포함된 공극수가 재목의 도관이나 가도관을 통하여 조직 내로 침투하기 때문에 중심부는 규화가 잘 일어나고, 주변부의 껍질 부분은 규화가 잘 일어나지 않았기 때문이다. 그리고 속성작용 동안에 규화가 불충분한 껍질 부분은 석탄화 작용을 받아 갈탄화되었다고 생각한다. Oishi(2001)는 규화목 중에 포함되는 유기물의 원자비로부터 규화목이 지층 속에서 석탄생성과 마찬가지로의 탄화작용과 속성작용을 받는다는 것을 밝힌 바가 있는데, 장기층군의 규화목이 좋은 예에 속한다.

구성광물

Fig. 2의 X선 회절 분석에서와 같이 규화목은 구성광물에 따라 크리스토팔라이트+트리디마이트(1형), 크리스토팔라이트+트리디마이트+석영(2형), 석영+크리스토팔라이트(3형)의 3가지로 분류할 수 있다. Jones and Segnit(1971)는 천연의 함수규산광물을 구성 광물에 따라 Opal-A(highly disordered, near

amorphous), Opal-CT(disordered α -cristobalite, α -tridymite) 및 Opal-C(well-ordered α -cristobalite)로 분류하고, 각각의 X선 회절 패턴을 제시하였다. 본 연구에서 분석한 규화목에는 비정질의 Opal-A에 해당하는 것은 나타나지 않는다. 1형은 전형적인 Opal-CT에 해당하고, 석영을 포함하는 2형은 Opal-CT 또는 Opal-C에 속하는 것으로 볼 수 있지만, 여기에서는 Opal-C로 해석한다. 그리고 석영+크리스토팔라이트로 구성되는 3형은 X선 회절 패턴으로 보아 Jones and Segnit(1971)의 α -cristobalite에 비슷하다. 즉, 3형은 1형 및 2형보다 결정 작용이 더 진행된 것을 의미하지만 완전히 석영의 단계에는 이르지 못한 것을 보여준다. 따라서, 이들은 변성 과정에서, Opal-A \rightarrow Opal-CT \rightarrow Opal-C \rightarrow 석영으로 변화해 가는 중간 단계의 과정을 보여주고 있다고 생각된다. 그리고 Fig. 2의 위쪽에서 아래쪽으로 내려갈수록 변성도가 더 진행되고 결정화도가 높아지는 것을 알 수 있다.

위에서 언급한 Opal-CT는 연일층군내에 협재된 수매의 이암에서도 관찰된다. Garrison et al.(1979)에 의하면, 이암에 들어있는 Opal-CT는 단백질 내지 규질 구조각이 매물에 수반하는 속성작용에 의해 형성된 것이며, 그와 같은 변화는 50-80°C에서 잘 일어난다고 하였다. 따라서, 장기층군의 규화목은 연일층군과 같이 낮은 온도에서 규화작용이 일어난 것을 지시한다. 이것은 규화목이 많이 산출되는 함탄층내의 유기물의 변성도로부터 추정된 온도와의 일치한다. 즉, 규화목이 많이 산출되는 상부함탄층내의 유기물의 변성도는 비트리나이트 반사율 측정 결과에 의하면(박홍수와 박석환, 1986), 갈탄에서 아역청탄 단계에 도달해 있다. 유기물이 지중에 매몰된 후 유기물이 물리화학적 작용에 의해 화학반응이 일어나기 시작하는 온도는 50°C 이상이며(Bostic, 1973), 역청탄이 만들어지는데 필요한 전형적인 온도는 100~170°C로 알려져 있다(Teichmüller, 1987). 따라서, 역청탄보다 변성도가 낮은 갈탄이나 아역청탄은 50~100°C의 범위 내에서 일어난 것으로 볼 수 있다.

위와 같은 저변성 작용은 속성 작용의 초기 단계를 지시하는 것이며, 광물상에 의한 분대로는 불석상에 해당한다(Aihara, 1985). 실제로 규화목은 불석 광산이 채굴되고 있는 곳에서 많이 산출되고 있으므로 유기물에 의한 변성도와 광물상에 의한 분대는 잘 일치한다.

토 의

위에서 언급한 바와 같이, 규화목을 구성하는 광물에는 크리스토팔라이트+트리디마이트(1형), 크리스토팔라이트+트리디마이트+석영(2형), 석영+크리스토팔라이트(3형)가 있지만, 적어도 조사된 규화목 중에는 석영(quartz)이나 옥수(chalcedony)만으로 구성된 화석은 없다. 규화목을 구성하는 광물의 종류는 규화목의 형성 메커니즘에 중요한 단서를 제공해 준다. Buurman(1972)은 전자현미경을 이용한 규화목의 상세한 연구로부터, 트리디마이트(tridymite)는 세포벽을 치환하는 반면에 옥수나 석영은 충전에 의해서 화석화된다고 하였다. 이것에 근거하면 트리디마이트가 많이 포함된 장기층군의 규화목은 주로 치환작용에 의해 형성되었음을 암시한다.

그러나, 재목이 퇴적물 속에서 규화작용이 일어날 경우, 치환이나 충전 어느 하나로 고정된 것은 아닌 듯 하며 또한, 퇴적환경이나 화석의 생성과정에 따라서도 다르게 나타날 것으로 추정된다. 이것은 Akahane and Furuno(1993)의 연구로부터 확인이 되었다. Akahane and Furuno(1993)는 온천수에 자연적으로 들어간 재목이 규화되는데 있어 비정질의 Opal-A 성분인 규산 구상체가 중요한 역할을 수행한다는 것을 밝혔다. 그들에 의하면, 처음에 규산 구상체가 도관이나 목부조직의 내강(內腔) 표면에 부착이 되고, 이들이 점차로 침전하여 서서히 공동을 메워가는 충전이 일어나고, 한편으로는 목질부의 세포벽이 규산에 의해 치환되어 가는 작용에 의해 규화목이 형성되어 간다고 하였다. 수관 계통을 통한 규산의 이동 현상은 신선한 재목을 규산질 콜로이드 용액이나 에칠실리케이트 용액에 넣은 실험에서 이미 확인되었다(Drum, 1968a, b; Leo and Barghoom, 1976; Schulze and Theden, 1942; Akahane et al., 1999; Oishi, 2001, 2003). 특히, Akahane et al.(1999)은 규산 구상체가 어떻게 목부조직의 내부까지 도달했는가에 대해 실험으로부터 상세히 언급하였다. 이러한 실험은 직접적으로 세포벽의 치환의 과정을 보여주기 보다는 충전과정을 보여준다.

온천수에는 언제나 과포화된 Opal-A가 부유하는 상태로 존재하는데(Akahane et al., 1993), 여기에서 Opal-A가 침전이 되기 위해서는 열수용액의 온도나 압력의 하강 또는 물의 증발이 요구된다(Darragh et al., 1976; Akahane et al., 2004; <http://www.abdn.ac.uk/>

rhytnie/sinter.htm). Opal-A의 침전에 영향을 주는 또 다른 요소에는 용액의 pH, 용해되지 않은 다른 광물의 존재, 유기물의 존재, 또는 살아있는 시아노박테리아의 작용 등이 있다(Konhauer et al., 2001).

일본의 경우와 같이 온천수에서 규화된 재목의 발견은 이미 Lacroix(1911)에 의해 보고된 바가 있고 그와 같은 온천수의 환경은 지질시대에 규화목이 형성된 장소의 하나로 알려져 있다(Leo and Barghoom, 1976; Akahane and Furuno, 1993; Akahane et al., 1999). 장기층군의 규화목은 퇴적물 속에서 재목이 규화된다는 점에서 온천수의 환경과는 서로 다르지만 규화되어 가는 과정은 비슷했을 것으로 추정된다. 즉, 공극수 중에 포함된 비정질 규산이 도관이나 가도관을 통하여 세포의 내강까지 도달한 후 침전 내지는 석출에 의해 충전이 일어나고, 한편에서는 규산이 세포벽을 치환하는 작용이 일어났을 것으로 추정된다. 그리고 비정질 규산은 속성작용 동안에 주변 환경과 주어진 조건에 따라 차별적으로 Opal-CT나 Opal-C로 그리고 석영+크리스토팔라이트로 결정화가 진행된 것으로 볼 수 있다.

한편, Nishida(2005)가 언급한 바와 같이, 온천수나 규산질 콜로이드 용액 등을 이용한 식물체로의 침투 실험은 재목이 규화되는데 걸리는 기간이 기존에 생각해 왔던 것보다 의외로 빨리 진행될 수 있다는 것을 강하게 시사하고 있다.

규화목의 조직의 보존 상태도 규화목의 형성 메커니즘과 밀접한 관계가 있다. Asano(1964)에 의하면, 규화목에서 조직의 보존은 치환과 충전에서 서로 다르게 나타난다. 즉, 세포의 내강에 충전 작용이 일어날 경우 단지 내강만을 충전하는 것이 아니라, 세포막의 일부를 분해하여 부피의 변화를 일으키게 하거나, 세포막의 물질에 비하여 규산이 현저하게 많을 경우는 규화가 현저하게 진행되어 세포막이 얇아져 잘려지거나, 혹은 불규칙한 입자로 포함되기도 한다. 이러한 경우에는 조직의 보존이 그다지 좋지 않은 것으로 알려져 있다. 반면에 치환에서는 조직이 비교적 잘 보존된다.

Buurman(1972)은 트리디마이트로 된 표본이 조직의 보존이 가장 좋다고 하였다. 이것은 규화목의 세포벽을 구성하고 있는 광물에 많이 들어있는 무질서의 트리디마이트(disordered tridymite)가 세포벽을 치환했기 때문이다. 이러한 트리디마이트의 고유한 특성은 무질서한 인규석과 셀룰로오스와의 사이에 어떤

구조적 관계에 기인하는 것으로 Buurman(1972)은 해석하였다. 최근에 무질서한 인규석과 셀루로즈와의 구조적 관계가 목재내의 셀루로즈의 양과 밀접한 관계가 있다는 사실이 Oishi(2001)의 규화목 생성 실험에서 밝혀졌다. Oishi(2001)에 의하면, 재목조직 중의 셀루로즈는 수중의 규산의 침전을 촉진시키기 때문에 재목조직에 셀루로즈계의 성분이 많이 잔존하는 경우는 비정질 규산이 석출하기 쉽고, 반대로 그 양이 적으면 비정질 규산이 석출하기 어렵다. 또한, 동일 재목에서도 비정질 규산의 석출이 빨리 진행된 곳만이 규화되어 재목의 조직 구조가 보존된 규화목으로 되고, 비정질 규산의 석출이 늦은 부분은 탄화작용이 우선하기 때문에 재목의 구조는 파괴되어 석탄화되고, 규화목 중에 탄화된 부분으로 남는다고 하였다. 장기층군의 규화목은 적어도 관찰된 화석에서는 수관계통이 통하는 중심부는 비교적 조직의 보존이 양호하다. 이것은 퇴적물 속에 묻힌 상태에서 목재의 조직이 부패되어 탄화가 일어나기 전에 빨리 규화가 일어난 것을 지시한다. 일부의 규화목은 주변부에 탄화된 유기물이 남아 있는 채로 발견되기도 하는데, 그곳은 규화가 불충분하게 일어난 곳이며 수관계통이 없는 부분에 해당한다.

규화목은 주로 육상 퇴적 환경에서 생성되나, 때로는 해성 퇴적 환경에서도 생성될 수 있다. 대다수의 학자들은 화산쇄설암의 풍화가 실리카의 주요한 기원이라고 생각하고 있다. 특히 응회암과 화산암은 실리카의 중요한 공급원으로 알려져 있다(Murata, 1940; Siever and Scott, 1963; Dorf, 1964; Schopf, 1971; Leo and Barghoorn, 1976; Stein, 1982). 포항산 규화목은 주로 불석 광산이 가해되고 있는 곳이나 응회암층에서 산출되고 있는 것으로 보아(김중환과 문희수, 1978), 실리카의 주요 공급원은 응회암으로 추정된다. 그러나, 화산쇄설물이 없는 지역에서도 풍화작용에 의해 기원된 규산에 의해 규화작용이 일어날 수 있고, 미고결된 퇴적물 속에서도 규화목은 형성될 수 있다. 이러한 예는 덴마크의 마이오세의 모래로 구성된 미고결 퇴적물에서 규화목이 발견된 예를 들 수 있다(Weibel, 1996).

결 론

1. 장기지역의 목재화석은 모두 이지성 화석이며 겉씨식물은 속씨식물에 비하여 더 압축된 형태로 나

타난다.

2. 장기층군의 목재화석은 대부분 규화목에 속하며, 기타 탄화목, 목탄 등도 드물게 산출되고, 규화목의 일부에는 그 주변부에 갈탄화된 유기물이 남아있는 것도 있다.

3. 규화목의 구성광물은 Opal-CT, Opal-C, quartz+crystalite의 3가지 유형이 확인되었다. 이들의 존재는 규화작용이 낮은 온도에서 일어난 것을 지시한다.

4. 구성광물의 종류와 조직 보존의 상태로부터 판단하면 장기층군의 규화목은 주로 치환작용에 의해 규화작용이 일어난 것으로 추정된다.

5. 실리카의 주공급원은 응회암으로 추정된다.

사 사

본 논문에 건설적인 지적을 해주신 두 분의 심사 위원께 감사드립니다. 원고를 읽고 유익한 조언을 해 준 공주대학교 신동복 교수에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김봉균, 1970, 한국의 신제3기 퇴적층에 관한 연구. 지질학회지, 6, 77-96.
- 김봉균, 최덕근, 1977, 포항 지역 제3기층 저서성 유공충의 Species Diversity. 지질학회지, 13, 111-120.
- 김종현, 2008, 포항 분지의 장기층군에서 산출된 재화석의 광물학적 특성. 한국 지구과학회 2008년도 춘계학술발표대회 논문집, p. 37.
- 김종현, 최성일, 2008, 포항분지의 장기층군 금광동층에서 산출된 메타세콰이아 (*Metasequoia*) 화석에 대한 고찰. 한국지구과학회지, 29, 319-327.
- 김중환, 문희수, 1978, 3기층 퇴적암의 중 불석의 산출상태. 광산지질, 11, 59-68.
- 박홍수, 박석환, 1986, 국내탄의 석탄암석학적 특징. 한국광산지질학회지, 22, 141-150.
- 백광호, 봉필윤, 최덕근, 1979, 포항지역의 마이오세(Miocene) 지층의 미고생물학적 연구. 자원개발연구소 조사연구보고, 6, 9-46.
- 염상호, 이동우, 박봉순, 1964, 포항도폭설명서(1:50,000). 국립지질조사소, 1-21(in Koreans), 1-10(in English).
- 윤 선, 1998, 신생대충. 이종혁, 원종관, 김정환, 이창진(편집), 한국의 지질, 대한지질학회, 서울, 274-321.
- 이영길, 1993, 한국 포항분지 신제3기 연일층군에서 산출되는 해서규조 *Chaetoceros*속과 규조 휴면포자. 고생물학회지, 9, 24-52.
- 장세용, 1976, 포항의 제3기층과 일본지질의 충서대비연구. 광산지질, 9, 1-11.
- 전희영, 1982, 포항지역에 분포하는 제3기층군의 고식물군

- 연구. 한국동력자원연구소. 조사연구보고, 제14호, 7 p.
 전희영, 김동학, 업상호, 봉필운, 이호영, 최성자, 김유봉, 김복철, 권영인, 이동영, 박영수, 최영섭, 1990, 한반도 진화생물에 의한 퇴적분지연구(III). 과학기술처, KR-91-(T)-17, 145 p.
- Aihara, A., 1985, The Geochemistry of fossil fuel deposit. In Sasaki, A., Ishihara, S., and Seki, Y. (eds.), Mineral Resources and Engineering Geology. John Wiley and Son, NY, USA, 61-79.
- Akahane, H., 1996, Petrification of wood from the viewpoint of geology. *Inorganic Material*, 3, 492-497.
- Akahane, H. and Furuno, T., 1993, Recent silicified woods in the Tateyama Hot spring (Shin-yu), Toyama Prefecture. *Journal of Geological Society of Japan*, 99, 457-466. (in Japanese with English)
- Akahane, H., Furuno, T., Miyajima, H., Goto, M., Ota, T., and Yamamoto, S., 1999, Experimental study on wood silicification in the stream of hot spring water-Estimation of rapidity and mechanism of silicification. *Journal of Geological Society of Japan*, 105, 108-115.
- Akahane, H., Furuno, T., Miyajima, H., Yoshikawa, T., and Yamamoto, S., 2004, Rapid silicification in hot spring water: An explanation of silicification of wood during the Earth's history. *Sedimentary Geology*, 169, 219-228.
- Asano, G., 1964, Mode of Occurrence and Microscopic structure of the so-called "Matsuiwa" (a silicified wood). *Journal of Kyushu Mining*, 32, 181-201. (in Japanese with English abstract)
- Bostic, N.H., 1973, Time as a factor in thermal metamorphism of phytoclastics (coal particles). *Compte Rendu 7 Congress of International Stratigraphy and Geology of Carbonifere*, Krefeld, 2, 181-193.
- Buurman, P., 1972, Mineralization of fossil wood. *Scripta Geology*, 12, 1-43.
- Darragh, P.J., Gaskin, A.J., and Sanders, J.V., 1976, Opals. *Scientific American*, 234, 84-95.
- Dorf, E., 1964, The petrified forests of Yellowstone Park. *Science of America*, 210, 107-114.
- Drum, R.W., 1968a, Petrification of plant tissue in the laboratory. *Nature*, 218, 784-785.
- Drum, R.W., 1968b, Silicification of *Betula* woody tissue in vitro. *Science*, 161, 175-176.
- Felix, J., 1897, Untersuchungen ber den Versteinungsprozess und Erhaltungszustand pflanzlicher Membranen. *Zeitschrift Deutschen Geologischen. Gesellschaft*, 49, 182-192.
- Furuno, T., 1987, Silicified woods and formation. *Denshikenbikyoku*, 22, 15-24.
- Furuno, T., Watanabe, N., Goto, T., and Yokoyama, K., 1986a, Microstructure and silica mineralization in the formation of silicified woods I. Species identification of silicified woods and observation with a scanning electron microscope. *Mokuzai Gakkaishi*, 32, 387-400.
- Furuno, T., Watanabe, N., Goto, T., and Yokoyama, K., 1986b, Microstructure and silica mineralization in the formation of silicified woods II. Distribution of organic carbon and the formation of quartz in the structure of silicified woods. *Mokuzai Gakkaishi*, 32, 575-583.
- Gallwitz, H., 1954, Verkalkung und Verkieselung von Holzern in der Braunkohle des Geiseltales. *Wissenschaften Zeitschr University Halle, Mathematics Naturelles*, 4, 41-44.
- Gallwitz, H., 1955, Kalk, Kieselsure und Schwefeleisen in der Braunkohle des Feiseltales und ihre Bedeutung fir die Fossilisation. *Palontologie Zeitschr*, 29, 33-37.
- Garrison, R.E., Mack, R.E., Lee, R.E., Lee, Y.G., and Chun, H.Y., 1979, Petrology, Sedimentology and Diagenesis of Miocene Diatomaceous and opal-CT mudstones in the Pohang Area, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 15, 230-252.
- Jeong, E.K., Kim, K.S., Kim, J.H., and Suzuki, M., 2003, Comparison of Korea and Japanese Tertiary fossil floras with special references to the genus *Wataria*. *Geosciences Journal*, 7, 157-161.
- Jeong E.K., Kim, K.S., Kim, J.H., and Suzuki, M., 2004, Fossil woods from Janggi Group (Early Miocene) in Pohang Basin, Korea. *Journal of plant Research*, 11, 183-189.
- Jones, J.B. and Segnit, E.R., 1971, The nature of Opal 1. Nomenclature and constituent phases. *Journal of Geological Society of Australia*, 18, 57-68.
- Kim, B.K., 1984, Cenozoic Biostratigraphy of South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 46, 85-96.
- Kim, B.K., 1987, Cenozoic Erathem. In Lee, D.S. (ed.), *Geology of Korea*. Geological Society of Korea, Korea, 202-221.
- Kim, B.K., Cheong, C.H., and Kim, S.J., 1975, Stratigraphic studies on the lignite-bearing strata distributed in the Yeongil district, North Gyeongsang-do, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 11, 240-252.
- Kim, J.H., 2005, Fossil *Albizia* Legume(Mimosaceae) from the Miocene Duho Formation of the Yeonil Group in the Pohang Area, Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 26, 166-171.
- Konhauser, K.O., Phoenix, V.R., Bottrell, S.H., Adams, D.G., and Head, I.M., 2001, Microbial-silica interaction in icelandic hot spring sinter: Possible analogues for some Precambrian siliceous stromatolites. *Sedimentology*, 48, 415-433.
- Kraut, H., 1933, Die Chemische Untersuchung der gyptischen Kieselholz. *Abhandlungen Bayerische Akademie Wissenschaften Math-Naturelles Wissenschaften Abteilung*, 16, 16-23.
- Lacroix, A., 1911, Sur la silicification de vgtaux par les sources thermales. *Bulletin of the Society of France*,

- Minral, 34, 208-211.
- Lee, W.J., 1975, Discovery of the Miocene *Kalopanax* leaf from the Geumgwangdong Formation, Southeastern Korea. University Journal, Busan National University, Natural Science Series, 20, 47-52.
- Leo, R.F. and Barghoorn, E.S., 1976, Silicification of Wood. Botanical Museum Leaflet Harvard University, 25, 1-47.
- Murata, K.J., 1940, Volcanic ash as a source of silica for the silicification of wood. America Journal of Science, 238, 586-596.
- Nishida, H., 2005, Cretaceous plants of Japan based on permineralized fossils. Fossils, 78, 5-20. (in Japanese with English abstract)
- Oishi, T., 2001, Genesis of Petrified woods. Propose of classification method from organism. Crystal Letters, 16, 17-23. (in Japanese)
- Oishi, T., 2003, On the classification and genesis of petrified woods. Resource and Material, 8, 351-252. (in Japanese)
- Schopf, J.M., 1971, Notes on plant tissue preservation and mineralization in a permian deposit of peat from Antarctica. America Journal of Sciences, 271, 522-543.
- Schulze, B. and Theden, G., 1942, Das Eindringen aufgestrichener Holzschutzmittel in Kiefernspiltholz. Holz, 5, 239-247.
- Scurfield, G. and Segnit, E.R., 1984, Petrification of wood by silica minerals. Sedimentary Geology, 39, 149-167.
- Shimakura, M., 1937, Jurassic erect stumps unearched at the court of the 77th regiment of Heizyo, Korea. Journal of Geological Society of Japan, 44, 722-730. (in Japanese)
- Siever, R. and Scott, R.A., 1963, Organic Geochemistry of silica. In Breger, I. (ed.), Organic Geochemistry, Pergamon Press, NY, USA, 579-595.
- Sigleo, A.C., 1978, Organic geochemistry of silicified wood, Petrified Forest National Park, Arizona. Geochimica Cosmochimica Acta, 42, 1397-1405.
- Sigleo, A.C., 1979, Geochemistry of silicified wood, Petrified Forest National Park, Arizona. Chemical Geology, 26, 151-163.
- Stein, C.L., 1982, Silica recrystallization in petrified wood. Journal of Sedimentology and Petrology, 52, 1277-1282.
- Takahashi, K. and Kim, B.K., 1979, Palynology of the Miocene Formation in the Yeonil Bay District, Korea. Palaeontographica, Band 170, Abteilung B, 10-80.
- Tateiwa, I., 1924, Geological Atlas of Chosen, no. 2, Eunichi, Kyuryuho and Choyo sheets. Geological Survey of Chosen (Korea), 1-6, 3 maps.
- Teichmüller, M., 1987, Organic material and very low-grade metamorphism. In Fery, M. (ed.), Low temperature metamorphism. Chapman and Hall Company, UK, 114-161.
- Weibel, R., 1996, Petrified wood from an unconsolidated sediment, Voervadsbro, Denmark. Sedimentary Geology, 101, 31-41.
- Yoon, S., 1975, Geology and Palaeontology of the Tertiary Pohang District, Korea, part 1. Geology. Journal of the Geological Society of Korea, 11, 187-214.
- Yoon, S., 1976, Geology and Palaeontological study of the Tertiary Deposits of Janggi-Eoil District of Korea. No 1. Stratigraphy and geologic age of the Songjeon Formation. Journal of Busan University, 21, 11-19.
- Yoon, S., 1982, Tertiary stratigraphy of the Eoil Basin, Korea. Journal Geological Society of Korea, 18, 173-180.
- Yun, H.S., 1986, Emended stratigraphy of the Miocene Formation in the Pohang Basin, part 1. Journal of Palaeontological Society of Korea, 2, 54-69.
- <http://www.abdn.ac.uk/rhynie/sinter.htm> (2008.11.26일 검색)

2008년 10월 6일 접수

2008년 11월 26일 수정원고 접수

2008년 12월 4일 채택