

35번 고속도로 고성 교차로 지역 공룡발자국의 보존을 위한 응용광물학적 연구

Applied Mineralogy for the Conservation of Dinosaur Tracks in the Goseong Interchange Area

정 기 영 (Gi Young Jeong)^{1,*} · 김 수 진 (Soo Jin Kim)²

¹안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)
²서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부
(School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

요약 : 대전-통영간 35번 고속도로 고성교차로 건설공사현장에서 발견된 공룡발자국화석의 보존 및 전시를 위한 응용광물학적 연구를 실시하였다. 백악기 공룡발자국 퇴적암은 흑색점토층과 암회색 실트층의 호층으로 구성되어 있으며, 수평 또는 수직 열극에는 방해석맥이나 표성기원의 산화철 또는 산화망간 침전물이 충전되어 있다. 광물조성은 전반적으로 석영, 엘바이트, K장석, 방해석, 녹니석, 일라이트, 백운모, 흑운모와 미량의 인회석, 금홍석으로 구성되어 있으며, 방해석과 엘바이트는 실트층, 그리고 석영, 일라이트, 녹니석은 점토층에 부화되어 있다. 주원소인 Al, Fe, Mg, K, Ti, P는 점토층, Ca, Na, Mn은 실트층, 그리고 미량원소인 V, Cr, Co, Ni, Cs, Zr, REE, Th, U 등은 점토층에 부화되어 있다. 탄소의 경우, 무기탄소는 실트층에 방해석의 형태로 농집되어 있으며, 유기탄소는 흑색점토층에 부화되어 있다. 흑색점토층은 열극을 따라 부분적으로 유기탄소가 이차적으로 산화제거되어 연황색 점토층으로 변질되었다. 점토광물이 풍부한 흑색 및 연황색 점토의 층리를 따른 선택적 박리현상, 실트층의 기질 또는 수직절리의 주요 충전물인 방해석의 용해성과 낮은 강도는 발자국 화석 표본의 향후 물리적, 화학적 훼손을 촉진할 수 있는 잠재적 요소로 평가되었다.

주요어 : 공룡, 고성, 광물학, 보존과학

ABSTRACT : Cretaceous sedimentary rocks bearing dinosaur tracks in the Goseong interchange area were studied for their conservation and public display in the aspect of applied mineralogy. Black clay layers alternate with silt layers in the sedimentary rocks. The vertical and horizontal fissures are commonly filled with calcite veinlets, supergenetic iron and manganese oxides. The rocks are composed of quartz, albite, K-feldspar, calcite, chlorite, illite, muscovite, and biotite, with minor apatite and rutile. Silt layers are relatively rich in calcite and albite, whereas clay layers are abundant in quartz, illite, and chlorite. Al, Fe, Mg, K, Ti, and P are enriched in the clay layers, while Ca, Na, and Mn in silt. Most of trace elements including V, Cr, Co, Ni, Cs, Zr, REE, Th, and U are enriched in clay layers. Inorganic

*교신저자: jearth@andong.ac.kr

carbon are present in silt layers as calcite, while organic carbon in black clay layers. The black clay layers were partly altered to yellow clay layers along the fissures, simultaneously with the decrease of organic carbon. Selective exfoliation of clay-rich black and yellow clay layers, calcite matrix of silt layers and calcite infillings of fissures are estimated as the major weakness potentially promoting chemical and physical degradation of the track-bearing rock specimens.

Key words : dinosaur, mineralogy, Goseong, conservation science

서 언

최근 남부 해안지역의 경상계 퇴적암에서 다수의 공룡발자국화석들이 발견되어 이 일대가 세계적인 발자국 화석산지로 주목되고 있는 바, 이의 보존과 전시를 위한 보존과학적 연구도 활발히 진행되고 있다(양승영, 1982; 허민, 1997; 김수진외, 2000; 한국고생물학회, 2002). 대전-통영간 35번 고속도로 고성 교차로 건설 현장 2개소에서 절토 작업중에 1999년 7월 공룡발자국 화석들이 경상계 퇴적암층 중에서 발견되었다. 이들은 현재 보존을 위하여 해체되어 현장사무소로 운반되어 임시 보관되고 있으며, 향후 전시관을 설립하여 복원 전시될 예정이다(김수진외, 2002). 발자국화석 퇴적암은 두꺼운 암반이 제거되고 새로운 온도, 압력, 습도, 화학적 환경에 적응하는 과정에서 균열, 풍화, 변색 등의 물리적 및 화학적 훼손이 예상된다(김수진, 2001a, 2001b; Agnew *et al.*, 1989). 압력의 제거에 기인한 균열의 발달이나 박리현상, 그리고 대기 수분과의 반응 등에 의한 물리적 변형 현상 등은 지속적인 측정과 관찰이 요구된다. 수직적인 광물조성변화, 층리, 퇴적구조, 절리, 광물맥과 같은 퇴적암의 불균질한 특성은 변형과 훼손이 기계적인 취약대를 따라 일어날 가능성을 지시하므로, 물성학적, 암석학적, 광물학적, 화학적, 조직학적 특징에 대한 다각도의 분석연구가 필요하다. 본 연구의 목적은 퇴적암의 광물학적 및 미조직학적 특징들을 분석하여 향후 발자국 화석 퇴적암들을 재조합하고 장기 전시하는 과정에서 예상되는 훼손과정들을 알아보고 예방을 위한 자료를 제시하는 것이다.

시 료

총 76개의 육식 및 초식공룡발자국이 포함된 화석표본들은 경남 고성군 고성읍 우산리 28번

지의 삼성건설(주) 현장사무소와 고성읍 거류면 은월리 542-1번지 울트라 건설(주) 현장사무소 두 곳에 보관되어 있다. 암석 표본의 총면적은 60 m²이고 총무게는 19 톤이다. 보관중인 공룡 발자국화석 퇴적암과 함께 발굴현장의 동일 층준 퇴적암 시료를 상하표기하면서 채취하여 원조직이 훼손되지 않도록 보관하였다.

연구방법

원암 시료는 실험실에서 절단하여 수직 및 수평 퇴적구조를 관찰하였으며, 실제현미경으로 표면 변색현상의 종류와 분포를 관찰하였다. 원암 시료는 점토와 실트층을 구분하여 200 mesh 이하의 분말로 미분쇄하여 전암화학분석과 X선 회절분석(X-ray diffraction, XRD)을 실시하였다. 이와 별도로 표면의 다양한 색상을 띠는 변질물과 침전물의 얇은 층을 긁어 내어 원암과의 광물조성차이를 XRD로 분석하였다. XRD 분석은 회절범 단색화장치와 Cu X선관이 부착된 Rigaku D/MAX2200 모델의 XRD기기를 이용하였다. 원조직과 변질조직의 보다 자세한 관찰을 위하여 원시료의 연마박편을 제작하였다(Jeong and Kim, 1993). 준비된 연마박편은 원암시료와 함께 Oxford 에너지분산분석기(energy dispersive X-ray spectrometer, EDS)가 부착된 JEOL JSM 6300 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)에 의한 암석조직관찰과 EDS에 의한 정성화학분석을 실시하였다. 시료의 주원소 및 미량 원소 화학분석은 유도결합플라즈마방출 및 질량분광법(inductively coupled plasma emission and mass spectrometry, ICP-OES & MASS) 그리고 퇴적암의 무기탄소(inorganic carbon) 및 유기탄소(organic carbon) 함량은 단계적 산처리(sequential extraction), 적외선분광법(infrared spectroscopy), 원소분석기(element analyser)로 측정하였으며, 이상의 화학분석은 캐나다의 Actlab

에 의뢰하여 실시하였다.

화석표본의 육안적 기재

공룡발자국화석은 암회색 퇴적암으로서 실트암 또는 이암으로 분류할 수 있다. 퇴적구조인 건열들이 망상으로 잘 발달되어 있고, 전체적으로 암회색을 띠나, 단면 슬랩 관찰에 의하면, 두꺼운 암회색 실트층에 얇은 흑색점토층이 교호하는 퇴적조직을 보인다(Fig. 1a). 각 층들은 종종 건열에 의하여 썩기 모양으로 수직 절단되어 있고, 그 틈은 실트로 채워져 있다(Fig. 1a). 수직열극에는 지하수로부터 침전된 적갈색의 산화철 광물들이 벽면에 흡착되어 있거나(Fig. 1a), 수 mm 정도 두께의 방해석 세맥이 충전되어 있다(Fig. 1b). 방해석 세맥들은 부분적으로 수평열극을 충전하기도 한다.

발자국화석표면에는 1 mm 이하의 매우 얇은 연황색 점토층들이 흔히 관찰된다(Fig. 1c). 이들은 대부분 층리에 평행한 수평절리면에서만 관찰되고, 단단한 내부의 원래 퇴적조직인 암회색 실트층에서는 관찰되지 않는다(Figs. 1c, 2a, 2b, 2c, 2d). 즉, 연황색 점토층은 원래 흑색점토층이었던 부분이 절리를 따라 선택적으로 변질된 것으로 추정된다. 연황색 점토층은 수평절리면이나 균열 주변 1 mm 이내에서만 국한되어 나타나며(Figs. 2d, 2e), 이는 이차적인 원인 즉 절리를 따라 침투한 지하수 또는 열수와 암석과의 반응에 의한 교대작용에 기인한 변색현상으로 판단된다. 연황색 점토 변질대의 일부는 적갈색과 흑갈색을 띠기도 하는데, 전자는 산화철, 후자는 산화망간에 기인한다(Fig. 2b). 암회색 실트층이 연황색 실트층으로 변색되지 않았는데, 이는 암회색 실트층이 견고하여 변색을 촉발하는 유체의 침입을 용이하게 하는 절리가 발달되지 않았기 때문이거나 실트층 내에 변색의 원인이 될만한 성분이 없었기 때문으로 추정된다. 연황색의 원인에 대해서는 뒤에 기술할 광물조성과 화학조성분석 결과에서 다시 토의하고자 한다.

전반적으로 공룡발자국퇴적암편의 상위표면은 대개 흑색이나 연황색을 띠는데, 이는 점토층의 강도가 실트층보다 약하여 선택적으로 수평절리가 잘 발달하였고, 따라서 토목공사나 발굴과정에서 암회색의 실트층보다는 흑색점토층

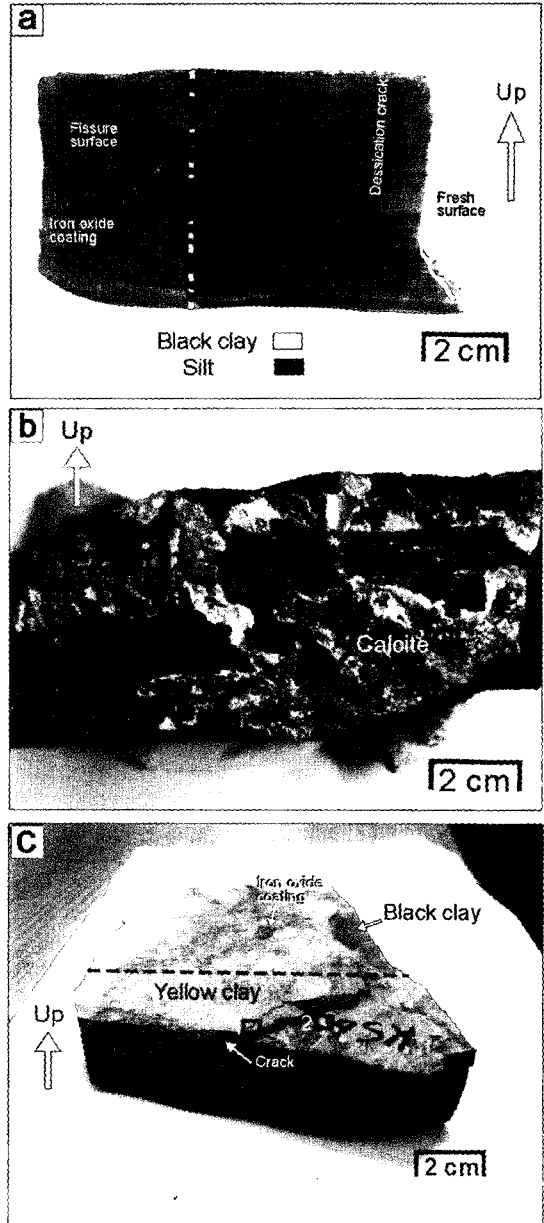


Fig. 1. Sedimentary rocks bearing dinosaur tracks. a) Vertical section showing the alternation of thick silt and thin black clay layers. Supergenic iron-oxides coat the surface of vertical fissures. b) The surface of vertical fissures showing the infillings of calcite. c) The upper surface showing the yellow and black clay layers with brown iron-oxide spots.

을 따라 잘 떨어져 나와 좀더 쉽게 노출되었기 때문이다. 또한 흑색점토층의 발달된 수평절리

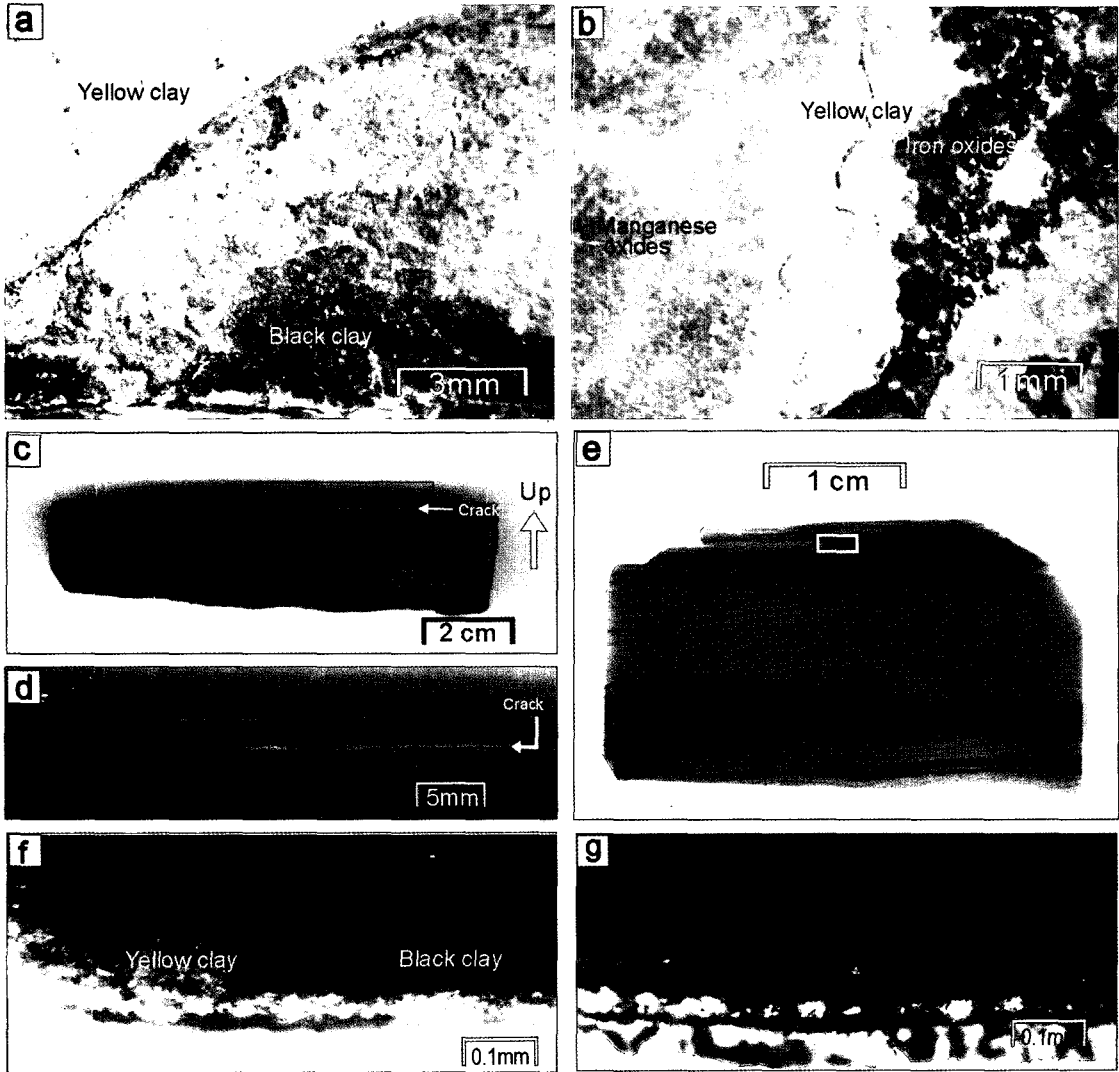


Fig. 2. Yellow clay layers. a) The image magnified from the box 1 in Fig. 1c showing a thin yellow clay layer grading into a black clay. b) The magnified from the box 2 in Fig. 1c. Supergene iron and manganese oxides in the cracks of yellow clay layers. c) Cross section made along the dashed lines showing the distribution of the yellow clay along the fissures. d) Magnified from the box in c showing the alteration of black layer to yellowish layer locally along the horizontal crack. e) A thin section made from the portion indicated as the box in c. f) Image magnified from the box in e showing the gradual transition of yellow to black clay. Plane-polarized light. g) Crossed-polarized image of f.

를 따라 지하수나 열수와 같은 유체의 침입이 용이하여, 수평절리에 접한 흑색점토층이 연황색 점토층으로 변질되었을 것이고, 따라서 역시 발광과정에서 연황색 점토층이 노출될 확률이 높은 것이다. 유체의 본질에 관해서는 좀 더 연구가 필요하지만, 일반적으로 지하수는 지하 깊

이 순환하는 과정에서, 물-암석반응을 거쳐 pH가 증가하고 방해석에 포화된다(정기영 외, 2003).

광물조성

XRD와 SEM-EDS을 종합해 보면 퇴적암을 구

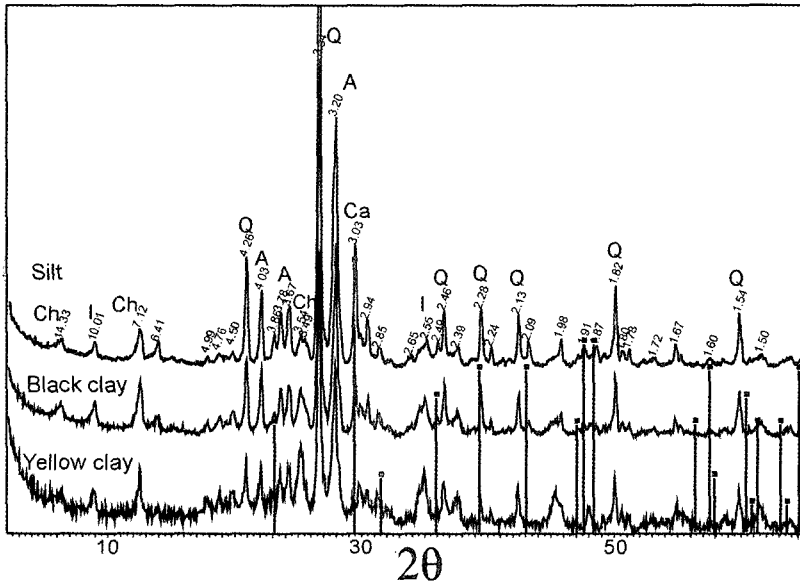


Fig. 3. XRD patterns of the silt, the black clay and the yellow clay. A: albite, Ca: calcite, Ch: chlorite, I: illite, Q: quartz. Bars with squares at the top are peak positions of the calcite in JCPDS files.

성하는 광물은 대체로 석영, 엘라이트, 방해석, 녹니석, 일라이트 등의 주성분 광물과 K장석, 백운모, 흑운모 등의 부성분 광물, 그리고 미량의 인회석, 금홍석으로 구성되어 있으나, 방해석과 엘라이트는 실트층, 그리고 석영, 일라이트, 녹니석은 점토층에 부화되어 있다(Fig. 3). 실트층에서 엘라이트와 방해석이 함께 산출되므로, 속성과정 중에 쇄설성 Na-Ca 사장석의 엘라이트화 작용의 결과로 방출된 Ca가 방해석으로 침전된 것으로 판단된다. 이와 같은 사장석의 엘라이트화 작용은 경상계 퇴적암에서는 흔히 보고되는 현상이다(노진환과 박현수, 1990; 이용일과 전홍조, 1995). 층상규산염 광물로서 일라이트와 녹니석 외에 기타 다른 광물의 함량은 적다.

흑색점토층은 실트층과 광물 조성이 거의 같으나, 방해석의 양이 크게 감소한 반면에 석영, 일라이트, 녹니석의 양은 약간 증가하였다. 다수 퇴적암 시료들의 X선회절분석결과, 발자국화석 퇴적암별 광물 조성은 공통화석산출지 내에서는 거의 동일한 것으로 보인다. 암석 풍화의 관점에서 보면 구성광물 중에서 용해도가 높고 기계적 강도가 약한 방해석이 암석의 훼손을 촉진할 수 있는 가장 중요한 광물이다. 방해석은 수직

및 수평 미세열극을 충전하는 주요 광물로서 이들의 용해 작용은 암석의 균열을 촉발할 뿐만 아니라, 용해 작용이 없다 하더라도 그 자체의 강도가 약하므로 방해석 맥을 따라 쉽게 균열이 발달할 수 있다.

연황색 점토층과 흑색점토층 사이에서는 광물조성 차이가 인지되지 않았으며(Fig. 3), 이는 연황색 점토층의 생성원인이 광물조성 변화에 기인하지 않음을 의미한다. 즉 열극을 따라 유입된 유체에 의하여 변색이 되었다 하더라도, 이는 방해석의 용해 작용과 같은 광물학적 반응의 결과가 아니다. 다른 가능성으로 흑색점토층의 흑색을 띠게 하는 유기물의 산화제거를 생각할 수 있는데, 이는 연황색 및 흑색층의 유기탄소 함량의 분석을 통해서 확인되었다.

미조직

실트층

Fig. 4a는 발자국퇴적암시료의 암회색 실트층의 후방산란전자상(back-scattered electron image)이다. 보다 조립질인 실트층은 석영, K장석, 엘라이트, 방해석 등이 아원형 입자를 형성하고

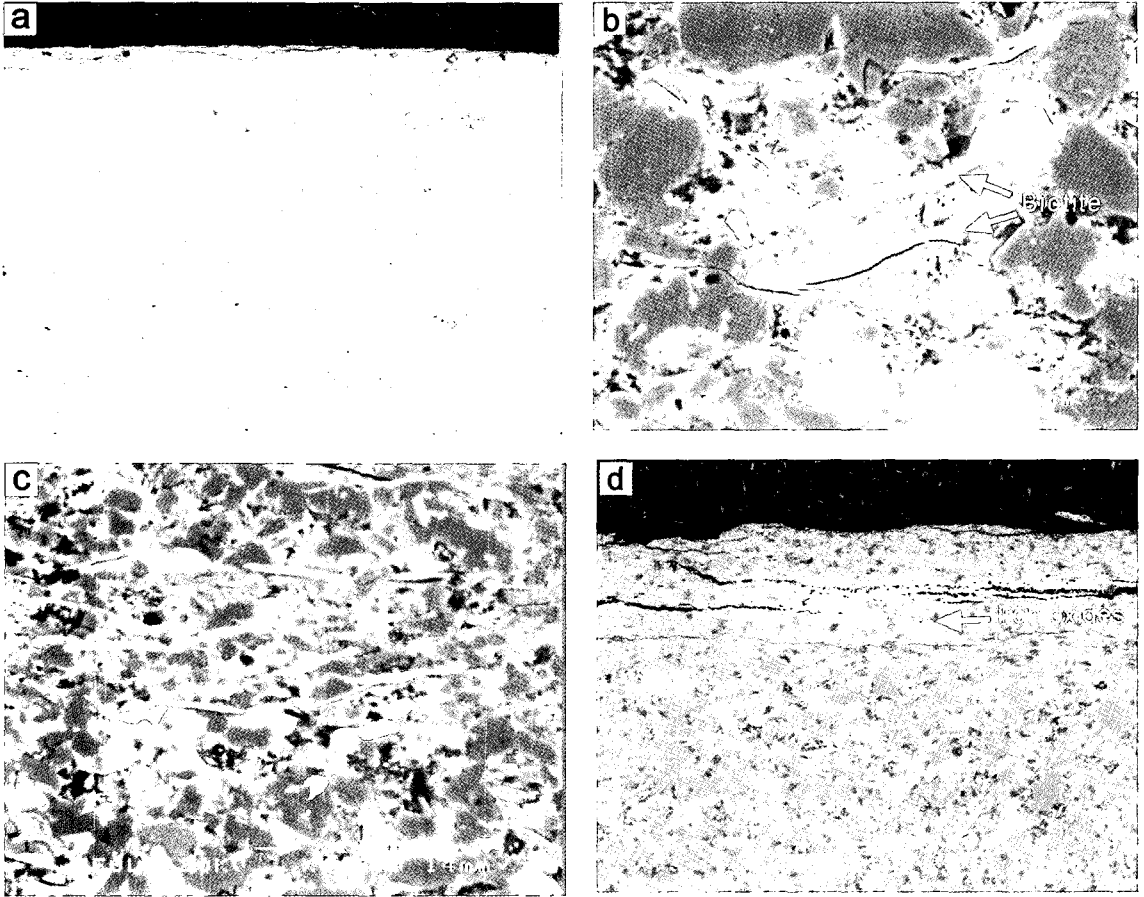


Fig. 4. BSE images of silt layers on a polished thin section. a) Alternation of coarse and fine silt layers. b) An image magnified from the coarse layer. Biotite flakes were buckled and fanned out at the edges. c) An image magnified from the fine layer. d) Iron oxides precipitate in the horizontal microfissures.

있으며 엽상 백운모, 녹니석, 흑운모가 분산되어 분포하고 있다(Fig. 4b). 층상규산염광물들은 석영과 K장석 사이에 끼어 심하게 휘어져 있고, 엽편 가장자리가 부채모양으로 벌어지면서 입자의 원형이 상당히 훼손되어 있다. 그외 소량의 인회석과 금홍석이 추가로 감정되었다. EDS 분석에 의하면 흑운모나 녹니석의 화학조성에서 상당한 변화가 관찰되었다. 세립질 실트층도 광물조성이나 조직이 조립질 실트와 거의 동일하다(Fig. 4c). 다만 석영입자의 크기가 작아서, 운모류의 변형현상이 미미하므로, 수평방향으로 일정하게 배열되어 층리를 보다 잘 정의하고 있다. 시편의 표면에는 열극을 따라 산화철 집합체가 침전되어 있다(Fig. 4d).

흑색 및 연황색 점토층

연황색 점토층이 흑색점토층으로 색상이 연속적으로 변해가는 부분(Fig. 2d에서 화살표로 표시된 부분)을 선정하여 박편을 제작하였다(Fig. 2f). 박편의 편광현미경 관찰결과 흑색이 연황색으로 변하는 과정에서 조직상의 차이는 거의 없다(Figs. 2f, 2g). 연황색층과 흑색층이 공존하는 시료의 단면을 SEM으로 관찰한 결과(Fig. 5a), 흑색점토층(Fig. 5b)과 연황색 점토층(Fig. 5c) 사이에 공극 크기와 분포, 점토광물의 배열상태, 광물 종류의 차이는 거의 없었다. 이는 앞서 언급한대로 색상 차이는 광물조성의 차이보다는 흑색유기물의 함량 차이에 기인함을 의미한다.

화학조성

주원소 및 미량원소

실트층과 흑색점토층의 전암화학분석을 실시한 결과, 두 층 사이에는 뚜렷한 원소조성의 차이가 있었다. 주원소로서 Al, Fe, Mg, K, Ti, P가 흑색점토층에 상대적으로 부화되어 있었으며, Ca, Na, Mn은 암회색 실트층에 부화되어 있었다(Table 1, Fig. 6). 그러나 Si의 함량은 두 부분 사이에 뚜렷한 경향성을 보이지는 않았다. 암회색 실트층에 Ca가 부화되어 있다는 사실은 XRD 분석에서 확인된 바와 같이 방해석의 존재와 일치한다. 동시에 Na는 사장석의 활발한 엘바이트화 작용의 산물이다. 반면에 Al, Fe, Mg, K, Ti가 흑색점토층에 부화되어 있음은 일라이트, 녹니석, 흑운모 등이 흑색점토층에 부화되어 있기 때문이다.

흑색점토층과 암회색 실트층의 미량원소 전암화학분석을 실시한 결과, V, Cr, Co, Ni, Sc, Rb, Cs, Zr, REE, Th, U을 포함한 많은 미량원소들이 흑색점토층에 부화되어 있었다(Table 2). 점토광물과 유기물이 흑색점토로 퇴적되는 환원 환경하에서 물속에 용해되어 있던 미량원소들이 유기물이나 점토광물에 흡착되어 집적되는 경향이 있다(김중환, 1989; Wignall, 1994; Jeong *et al.*, 2004). 이들 미량원소는 퇴적당시에는 유기물이나 점토광물에 흡착되어 있었을 것이나, 고도의 속성작용을 거치면서 재결정작용과 자생광물 형성과정을 거치면서 주로 녹니석, 일라이트, 흑운모 등의 광물구조 내에 포획되어 있는 것으로 생각된다(Wignall, 1994). 한편, 실트층에는 미량원소 중에서 Pb, Sr, Cu만이 부화되어 있는데 이들은 Ca와 함께 실트층의 방해석에 함유되어 있는 것으로 판단된다.

탄 소

암회색 실트층과 흑색점토층의 탄소함량을 분석한 결과, 총탄소 함량은 암회색 실트층이 평균 1.61 wt%, 흑색점토층이 0.92 wt%였으며, 유기탄소 함량은 암회색 실트층이 0.09 wt%, 흑색점토층이 0.37 wt%였다(Table 3). 따라서 무기탄소의 경우, 실트층에 방해석의 형태로 다량 함유되어 있으나, 흑색점토층에는 소량 함유되

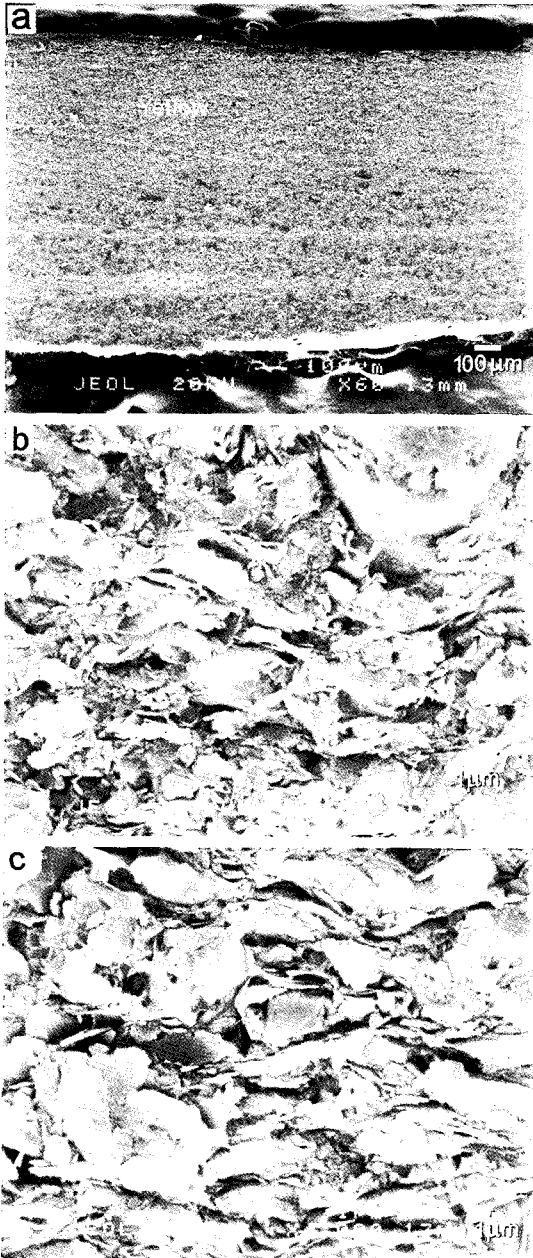


Fig. 5. SE images of the chip of yellow and black clay layer in original sample. a) No textural differences between yellow and black layers. b) An image magnified from the black clay layer. c) An image magnified from the yellow clay layer.

Table 1. Major element compositions of the silt (S) and black (B) clay in the track-bearing sedimentary rocks (wt%) determined by inductively-coupled plasma spectrometry

Sample	3S	3B	4S	4B	5S	5B	6S	6B	7S	7B	S average	B average
SiO ₂	55.46	60.23	64.15	60.86	60.18	59.85	63.71	59.53	56.21	59.63	59.94	60.02
Al ₂ O ₃	14.50	15.64	13.73	15.10	12.66	15.27	12.70	15.44	13.41	15.18	13.40	15.33
Fe ₂ O ₃	3.50	5.37	2.62	5.50	2.83	5.57	2.73	5.61	3.61	5.69	3.06	5.55
MnO	0.06	0.08	0.05	0.03	0.08	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06	0.05
MgO	1.63	3.01	1.46	3.08	1.62	3.36	1.52	3.39	2.14	3.42	1.67	3.25
CaO	8.23	2.67	4.97	2.54	8.01	2.69	6.20	2.87	8.07	2.86	7.10	2.73
Na ₂ O	5.57	3.58	4.78	3.96	4.37	3.50	4.49	3.52	4.09	3.46	4.66	3.60
K ₂ O	1.95	3.22	2.86	2.96	2.45	3.25	2.13	3.22	2.89	3.41	2.46	3.21
TiO ₂	0.54	0.97	0.48	0.93	0.43	0.90	0.44	0.88	0.40	0.81	0.45	0.90
P ₂ O ₅	0.12	0.16	0.12	0.18	0.10	0.39	0.12	0.17	0.11	0.17	0.11	0.21
LOI	8.20	5.48	4.92	4.98	7.41	5.02	6.16	5.61	7.67	5.25	6.87	5.27
Total	99.76	100.41	100.13	100.14	100.14	99.83	100.24	100.30	98.67	99.92	99.79	100.12

Table 2. Trace element contents of the track-bearing sedimentary rocks (S: silt layer, B: black clay) (ppm) determined by inductively coupled plasam mass spectrometry. (-) indicates "under detection limit". Bold-faced elements are enriched in the black clay layers

Elements	3S	3B	4S	4B	5S	5B	6S	6B	7S	7B	S average	B average
V	55	104	46	104	36	98	42	96	39	86	43.77	97.46
Cr	24	41	-20	40	-20	44	-20	39	-20	42	-11.23	41.25
Co	7	19	7	7	4	8	4	13	5	11	5.40	11.75
Ni	22	28	-20	27	-20	27	-20	27	-20	74	-11.70	36.63
Sc	7	15	8	16	8	17	8	16	9	14	8.00	15.60
Zr	97	229	161	217	120	229	122	202	125	184	125.00	212.20
Cu	64	26	28	15	14	17	24	22	25	21	30.96	20.42
Ga	12	19	10	18	10	19	10	19	11	17	10.79	18.29
Rb	60	117	75	97	70	122	62	109	80	122	69.34	113.52
Sr	608	275	402	287	498	286	365	266	556	306	485.88	284.05
Y	21	31	18	31	19	35	19	30	20	30	19.33	31.58
Zr	97	221	151	213	121	225	122	195	121	187	122.36	207.98
Cs	3.3	8.7	3.2	6.6	4.1	10.2	3.2	7.8	4.7	10.2	3.69	8.71
Ba	667	548	522	462	538	486	644	677	729	516	619.93	537.89
La	25.0	42.1	24.8	40.5	26.5	42.2	25.9	38.6	26.0	38.3	25.64	40.32
Ce	55.2	85.2	51.5	84.0	54.7	87.2	53.2	79.5	52.3	78.6	53.38	82.90
Pr	5.07	7.69	4.83	7.61	5.01	7.96	4.95	7.28	4.85	7.26	4.94	7.56
Nd	22.8	32.6	21.2	32.4	21.8	33.7	21.8	31.5	21.5	31.3	21.83	32.27
Sm	5.0	6.4	4.6	6.6	4.6	6.9	4.7	6.4	4.5	6.2	4.68	6.50
Eu	1.17	1.11	0.92	1.17	0.87	1.15	0.93	1.11	0.95	1.08	0.97	1.12
Gd	4.5	5.4	4.1	5.8	4.1	6.0	4.1	5.6	4.2	5.6	4.23	5.69
Tb	0.8	0.9	0.6	0.9	0.7	1.0	0.7	0.9	0.7	0.9	0.70	0.95
Dy	4.0	5.4	3.4	5.5	3.6	6.0	3.6	5.4	3.8	5.2	3.70	5.48
Ho	0.7	1.1	0.6	1.1	0.7	1.2	0.7	1.0	0.7	1.0	0.67	1.09
Er	1.9	3.5	1.8	3.4	1.9	3.7	1.9	3.3	2.0	3.2	1.89	3.42
Tm	0.26	0.56	0.28	0.54	0.28	0.60	0.28	0.53	0.31	0.50	0.28	0.55
Yb	1.6	3.6	1.7	3.5	1.7	3.9	1.8	3.5	1.9	3.3	1.72	3.54
Lu	0.23	0.52	0.23	0.49	0.23	0.56	0.24	0.48	0.26	0.47	0.24	0.51
Hf	3.4	7.3	4.9	6.9	4.2	7.4	4.1	6.6	4.3	6.0	4.15	6.84
Pb	50	8	24	5	12	9	13	11	16	10	22.97	8.58
Th	8.3	18.1	8.9	17.7	9.1	19.9	8.1	18.4	8.4	17.5	8.55	18.31
U	2.4	4.1	1.8	3.7	1.7	3.9	1.7	3.6	1.8	3.4	1.87	3.72

Table 3. Inorganic and organic carbon contents of the track-bearing sedimentary rocks (C wt%) determined by elemental analyser. S: silt, B: black clay

	3S	3B	4S	4B	5S	5B	6S	6B	7S	7B	S average	B average
Total	1.84	0.87	1.13	0.91	1.85	0.87	1.42	0.97	1.82	1.00	1.61	0.92
Inorganic	0.16	0.36	0.08	0.40	0.09	0.30	0.06	0.38	0.07	0.39	0.09	0.37
Organic	1.68	0.51	1.05	0.51	1.76	0.57	1.36	0.59	1.75	0.61	1.52	0.56

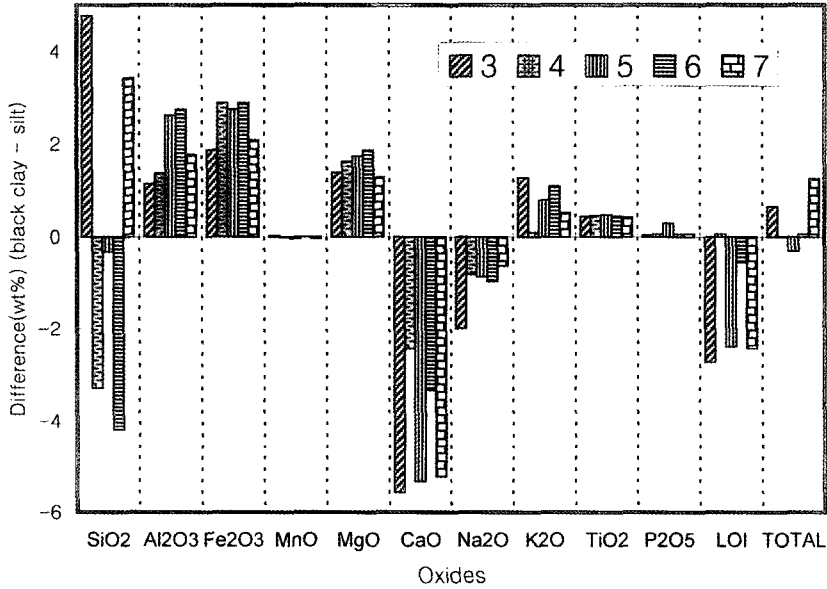


Fig. 6. The difference in major elements between silt and black clay layers (five samples).

Table 4. Elemental compositions of black (B) and yellow (Y) clays (wt%) determined by elemental analyser

Sample (%)	C	N	H	O	S
4B	1.32	0.08	0.42	3.51	0
4Y	0.75	0.09	0.51	3.85	0
6B	0.84	0.06	0.41	3.4	0
6Y	0.33	0.07	0.49	4.08	0
B average	1.08	0.07	0.415	3.455	0
Y average	0.54	0.08	0.5	3.965	0

Table 5. Calcite contents in silt calculated from the contents of inorganic carbon and CaO (wt%)

Sample	CaCO ₃ (from inorganic C)	CaCO ₃ (from CaO)
3	14.0	14.7
4	8.8	8.9
5	14.7	14.3
6	11.3	11.1
7	14.6	14.4
Average	12.7	12.7

어 있다. 유기탄소의 경우, 흑색점토층에 상대적으로 농집되어 있다(Fig. 7). 그러나 화학분석에 필요한 충분한 양의 흑색점토 시료를 준비하는 과정에서 혼입된 실트와 XRD 분석 및 SEM 관찰결과를 고려하면 흑색점토층 내의 방해석은 매우 적은 것으로 판단된다. 따라서 흑색점토층의 탄소는 대부분 유기 탄소로 존재하는 것으로 판

단된다.

흑색점토층과 그 변질물로 생각되는 연황색 점토층의 원소분석을 실시한 결과, 흑색점토층에 비하여 연황색층에서 탄소가 40~60% 정도 감소하였다(Table 4). 원소분석에는 수 mg의 극미량 시료만 필요하므로 최대한 순수한 시료들을 분리할 수 있었다. 흑색점토층 탄소의 대부

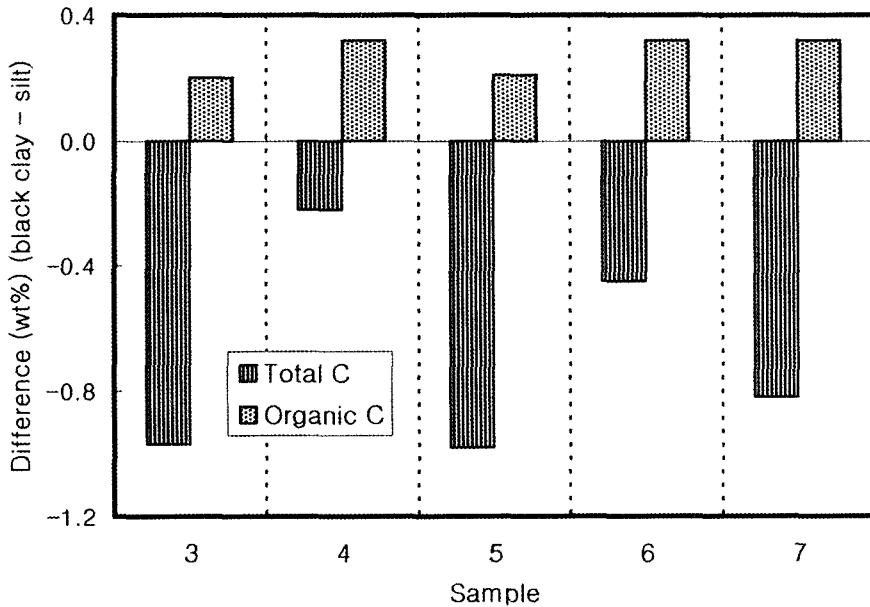


Fig. 7. The difference in inorganic and organic carbons between silt and black clay layers (five samples).

분이 유기탄소임을 고려하면 흑색 점토층이 연 황색 점토층으로 변하는 과정에서 유기탄소가 상당히 손실된 것으로 판단된다.

방해석함량

무기탄소함량으로부터 계산한 실트층의 방해석함량은 평균 12.7 wt%였다(Table 5). 주원소분석의 CaO 함량으로부터 계산한 방해석 함량도 12.7 wt%로서 무기탄소함량으로부터 계산한 값과 아주 잘 일치하고 있다. 이는 또한 사장석이 대부분 알바이트로 존재함을 의미한다. 방해석은 화학적으로 풍화에 매우 약하고 모스(Mohs) 경도가 3으로 기계적 내구성이 약하므로 발자국 화석표본의 향후 물리적, 화학적 훼손을 촉진할 수 있는 주요 광물로 평가된다.

결 론

공룡화석지 퇴적암은 얇은 흑색점토층과 두꺼운 암회색 실트층이 교호하며, 수평/수직 열극들은 심부기원의 방해석맥으로 흔히 충전되어 있고, 일부 천부기원의 산화철, 산화망간 침전물로 피복되어 있다. 흑색점토층의 수평 절리는

심부에서 지하수와의 반응에 의하여 유기탄소가 산화제거되어 부분적으로 연황색으로 변색되어 있다. 광물조성은 공룡화석 산출지 내에서는 거의 동일한데, 암회색 실트층에는 방해석과 알바이트, 흑색점토층에는 석영, 일라이트, 녹니석의 양이 좀 더 많다. 주원소로서 Al, Fe, Mg, K, Ti, P가 흑색점토층에, Ca, Na, Mn은 암회색 실트층에, 그리고 V, Cr, Co, Ni, Cs, Zr, REE, Th, U 등의 미량원소들은 흑색점토층에 부화되어 있다. 흑색점토층이 연황색 점토층으로 변질되는 과정에서 유기탄소의 함량이 크게 감소하였다. 점토광물의 정향배열로 층리가 잘 발달된 흑색 및 연황색 점토층을 따른 박리현상, 그리고 화학적 및 물리적 내구성이 약한 방해석은 발자국화석표본의 향후 물리적, 화학적 훼손을 촉진할 수 있는 중요한 요소로 평가되었다.

사 사

본 원고를 심사하고 조언을 주신 이정후 교수님과 조현구 교수님, 황진연 편집위원장님께 감사를 드립니다. 그리고 실험실작업을 도와준 이봉호 학생에게도 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 김수진, 이정후, 노진환, 안중호, 최진범, 조현구, 최현수, 유재영, 정기영, 김강주 (2000) 해남 공룡화석지 보존방안 학술연구. 전라남도 해남군, p. 271.
- 김수진 (2001a) 석조문화재 보존을 위한 국가적 과제: 보존과학적 접근. 제13회 한국문화재보존과학회 춘계학술대회 발표논문집, 17-21.
- 김수진 (2001b) 한국의 석조문화재 보존. 대한지질학회 대한자원환경지질학회 공동학술대회 논문집 “문화재보존에 있어서 지질학의 역할”, 16-26.
- 김수진, 양승영, 김항목, 백인성, 엄수학, 도진영, 장세정 (2002) 대전-통영간 고속도로 고성 IC 공룡발자국 화석 발굴조사 용역보고서. 한국도로공사, p. 210.
- 김중환 (1989) 구룡산(옥천)함우라늪 흑색 점판암 지화학 및 성인. 광산지질, 22, 35-63.
- 노진환, 박현수 (1990) 고령 지역 경상누층군 사암의 속성작용 및 속성광물. 지질학회지, 26, 371-392.
- 양승영 (1982) 상부 경상층군에서 발견된 공룡의 족흔에 관하여. 지질학회지, 18, 37-48.
- 이용일, 전홍조 (1995) 거제도에 분포하는 전기 백악기 장목리층 사암의 속성작용. 지질학회지, 31, 32-46.
- 정기영, 김강주, 김종용, 박재형, 이도영, 박순길 (2003) 포항-경주지역 양산단층대 주변의 고불소 지하수 산출 특성. 지질학회지, 39, 371-384.
- 허민 (1997) 해남 우항리 공룡발자국 화석 학술연구보고서. 전남대학교 기초과학연구소, p. 117.
- 한국고생물학회 (2002) 고성군 지역 공룡 화석지 기초학술조사 보고서. 한국고생물학회, p. 205.
- Agnew, N., Griffin, H., Wade, M., Tebble, T., and Oxnam, W. (1989) Strategies and techniques for the preservation of fossil tracksites: an Australian example. In: Gillette, G. and Lockley, M.G. (eds.), *Dinosaur tracks and traces*, Cambridge University Press, 397-407.
- Jeong, G.Y. and Kim, S.J. (1993) Boxwork fabric of halloysite-rich kaolin formed by weathering of anorthosite in the Sancheong area, Korea. *Clays and Clay Minerals*, 41, 56-65.
- Jeong, G.Y., Cheong, C.-S., Kim, H. (2004) Mineralogy, geochemistry, and paleogeography of metaliferous black slates in the Ogcheon Belt, Korea. Abstract 32nd International Geological Congress Session G14.01 “Mineral deposits associated with black shales”.
- Wignall, P.B. (1994) *Black Shales*. Clarendon Press, Oxford, p. 127.

2004년 8월 9일 원고접수, 2004년 8월 31일 게재승인.