

독일 남부지역에 분포한 상부쥐라기 중생대 줄른호펜 석회암의 퇴적성인에 대한 광물학적 연구

문지원¹⁾, 박명호²⁾, 송윤구¹⁾, 문희수¹⁾

Mineralogical Characteristics on Genetic Environment of the Upper Jurassic Solnhofen Limestone of Southern Germany

Ji-Won Moon¹⁾, Myong-Ho Park²⁾, Yungoo Song¹⁾ and Hi-Soo Moon¹⁾

1. 서론

독일 남부지역의 줄른호펜 석회암에 대한 연구의 대부분은 고생물학과 관련된 연구가 주종을 이루고 있다. 줄른호펜 석회암을 소위 화석광상의 대표적인 예라고 하는데 (Seilacher, 1970; Shield, 1998), 이는 시조새 화석 등 다양한 종류의 화석산출과 직접적인 관계가 있다. 그러나 줄른호펜층 내에서 실제로 석회암은 화석을 빈약하게 함유하고 있다.

60년대 이후에 줄른호펜층에 대한 퇴적학적 연구가 시작되었다 (Hemleben, 1977; Koch *et al.*, 1994). 특히 줄른호펜 석회암이 퇴적된 분지의 진화과정을 해수면 변화와 함께 설명하고 있는데, Keupp (1994)는 해침과정에 의하여 줄른호펜층이 형성되었다고 설명한 반면, Park과 Fürsich (2001)는 일률적인 해침이나 해퇴의 퇴적과정으로 설명하기보다는 층을 상부와 하부로 나누어 형성과정을 설명하였다. 즉 줄른호펜 상부층과 하부층의 상부에 있는 슬럼프층만 해퇴 시에 형성된 층이고 다른 줄른호펜층의 부분은 해침 중에 형성되었다고 설명하였다.

이 논문에서는 그동안 의견이 분분한 줄른호펜 석회암의 퇴적환경을 구명하고자 점토광물을 포함하는 광물의 반정량, 정성분석을 시도하였다. 주된 연구방법으로 점토광물을 다룬 논문은 지금까지 몇편만이 있다 (Hückel, 1974; Barthel *et al.*, 1990). Hückel (1974)의 연구결과에 의하면, 줄른호펜층의 호층에는 점토광물의 양이 비슷하게 들어있으며, 탄산염광물과 비탄산염광물에서만 약간의 차이를 보인다고 하였다. 그러나 그의 연구지층은 줄른호펜층(Tithonian)과는 관련 없는 하부지층(Kimmeridgian)을 연구한 결과이다. Barthel *et al.* (1990)의 연구에서는, 점토광물이 호층에서 3%에서 20%까지 차이를 보이지만 이는 줄른호펜층을 포함하는 광범위한 지층의 평균치이다. 따라서 우리는 이 논문에서 일차적으로 줄른호펜층을 이루고 있는 호층의 광물학적 특성을 연구하였다. 또한 코아 깊이(층서)에 따라 어떤 광물학적 변화를 보이며 퇴적분지가 진화되어왔는지도 논의하였다.

2. 코아의 시추 위치와 길이

코아 Plaka 2-3과 Plaka 3-2는 바이에른 국립지질연구소의 주관 하에 1998년 시추되었으며, 줄른호펜층 대부분을 커버하고 있다 (Fig. 1).

코아 Plaka 2-3은 남부 프랑코니아 알프스의 중심에 위치한 아이히스태트 (Eichstätt) 서쪽 분지 (Schernfeld)에서 시추한 33.3 m 길이의 코아이다. 두 번째 코아인 Plaka 3-2도 남부 프랑코니아 알프스에서 시추하였고, 코아의 길이는 115 m이다.

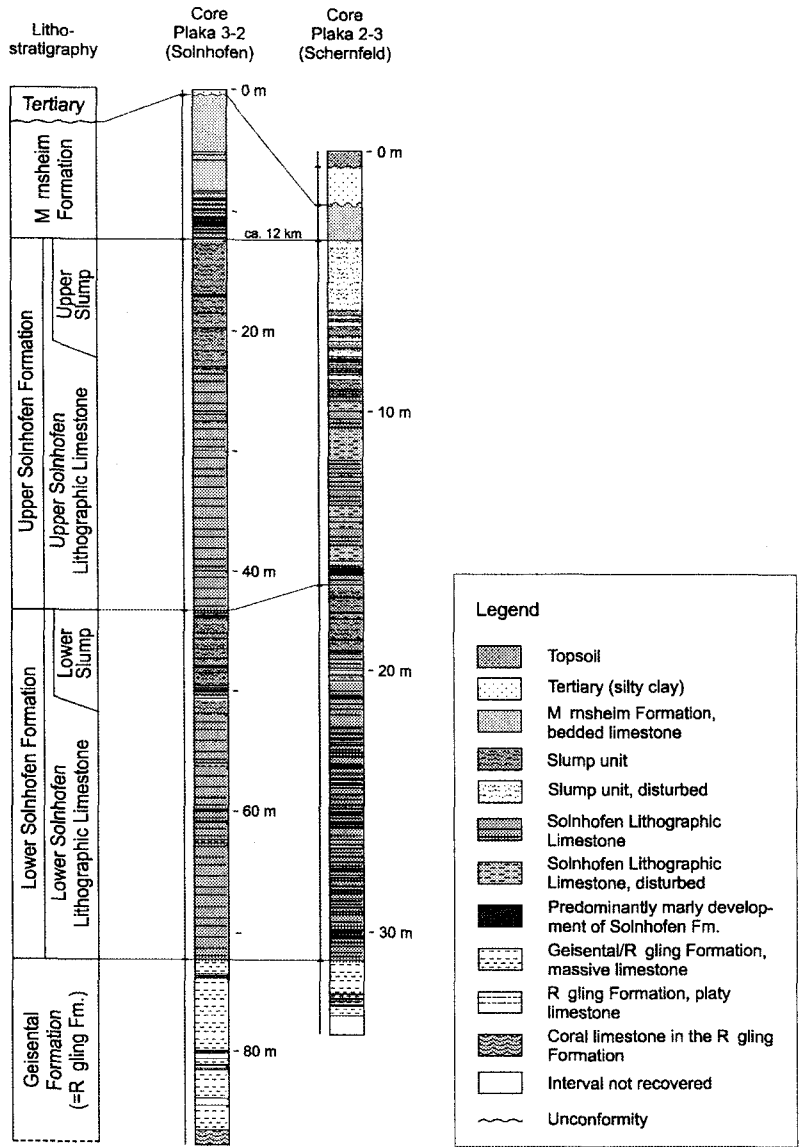


Fig. 1. Lithostratigraphic correlations of the cores. Only the sections of the cores relevant to the present study have been depicted.

3. 광물분석 결과

3.1 전암시료분석

전암에 대한 광물분석은 기계적으로 분쇄된 분말시료를 이용하여 XRD pattern을 얻고 이를 토대로 동정 및 반정량 분석을 실시하였다. 코어 Plaka 2-3에서 전암시료의 광물조합은 매우 유사하며, 단지 일라이트의 4.49 Å 과 2.58 Å 피크를 이용하여 포일레층과 플린츠층의 구별이 가능하였다. 소량 함유되어 있지만 카올리나이트와 스멕타이트 역시 최대한 동정하였다. 반면 코어 Plaka 3-2에서는 방해석과 석영이 동정되었을 뿐, 심도에 따른 결정도나 상대함량의 연속적인 증가 또는 감소를 규정하기 어려운 불규칙성을 보인다.

코아 Plaka 2-3에서 결정도 (피크강도/반치폭)는 일라이트가 일부 편차를 보이거나 예상대로 심도가 낮아짐에 따라 증가함을 보여준다 (Table 1). 포일레층과 플린츠층을 분리하여 도시한 결과, 석영과 일라이트의 결정도는 심도가 낮아짐에 따라 점차로 증가함을 보인다. 방해석의 경우, 일부 편차를 보이거나, 육안감정결과 연속된 층의 평균값을 보면 점차 증가한다 (Table 1). 이러한 편차는 용해도가 높은 방해석이 지하수면의 상승 및 하강에 따라 용해/침전이 반복되어 영향을 받은 것으로 사료된다. 플린츠층과 포일레층 방해석의 상대함량은 각각 4번과 2번의 정형곡선을 보인다. 반면 Plaka 3-2 시료의 방해석과 석영의 결정도는 Plaka 2-3 시료에 비해 비교적 일정한 값을 보여준다.

Plaka 2-3 전암시료에 대한 반정량 분석결과, 방해석이 가장 우세하며 (90-100 %), 일라이트 (0-17 %)와 석영 (0-6 %)의 순으로 구성되어 있다. 코아 Plaka 2-3에 대한 정량분석치를 평균값으로 살펴보면 두드러진 경향은 보이지 않으나 (Table 1), 포일레층과 플린츠층 공히, 방해석의 상대함량은 심도가 낮아짐에 따라 서서히 감소하는 반면, 석영과 일라이트질 광물의 상대함량은 증가한다. 특히 하부슬럼프층의 18.76 m 심도의 포일레층은 비정상적인 다량의 석영과 일라이트를 함유하며, 따라서 방해석의 상대함량은 특이하게 낮게 나타난다. 이는 포일레층 혹은 플린츠층의 생성환경의 급격한 변화를 지시하는 지시자로 사료된다.

Table 1. Variations of crystallinity and relative contents of Plaka 2-3 core samples with depth according to lithostratigraphy.

Lithostratigraphy	N		Crystallinity (cps/FWHM)			Semiquantification		
			Calcite	Quartz	Illite	Calcite	Quartz	Illite
Upper Slump	1	Max	16769	132	132	96	0	4
		Min	16769	132	132	96	0	4
		Ave	16769	132	132	96	0	4
Upper Solnhofen	3	Max	24629	1123	184	100	3	6
		Min	10253	167	0	91	0	0
		Ave	18484	524	61	97	1	2
Lower Slump	3	Max	25346	941	168	99	2	4
		Min	14804	175	0	94	1	0
		Ave	21147	502	56	97	1	1
Lower Solnhofen	28	Max	27250	3021	556	99	6	17
		Min	10023	195	0	77	1	0
		Ave	21373	1239	180	92	3	5
Geisental	1	Max	25017	5664	271	94	10	6
		Min	20696	1200	0	90	3	0
		Ave	22800	2985	149	91	6	3

3.2 점토입도분석

Plaka 2-3 시료는 전암시료에 대한 측정결과와 달리 일라이트와 카올리나이트의 결정도는 모두 감소하는 경향을 보이며, 포일레층과 플린츠층을 구분하여 도시한 결과도 동일하였다. 반정량분석 결과, 점토광물을 거의 포함하지 않는 플린츠층에 의해 반정량시 제한점이 많았으며, 하부슬럼프층과 하부줄른호펜층이 상부슬럼프층과 상부줄른호펜층보다 다량의 점토광물을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 이는 상부층의 입도분포가 하부층에 비해 크기 때문으로 사료된다.

Plaka 3-2 시료 분석결과 스멕타이트가 미량으로 산출되며, 대부분 일라이트와 카올리나이트를 주 구성 점토광물로 가지고 있다. Hüchel (1974)에 의하면 플린츠층과 포일레층의 점토입도의 함량은 유

사하며, 주로 일라이트, 카올리나이트, 스멕타이트로 구성되어 있는 것으로 보고된 바 있지만, 스멕타이트의 경우 쥐라기 이후의 속성작용을 통해 상당히 일라이트화 되어 있다. 에틸렌글리콜 처리 후 스멕타이트로 분류하였던 일라이트/스멕타이트 혼합층상광물의 001 피크는 각각 심도가 깊어짐에 따라 저면 간격이 줄어드는 경향을 보인다 (Fig. 2). 이는 속성작용에 의한 일라이트화 작용을 의미한다.

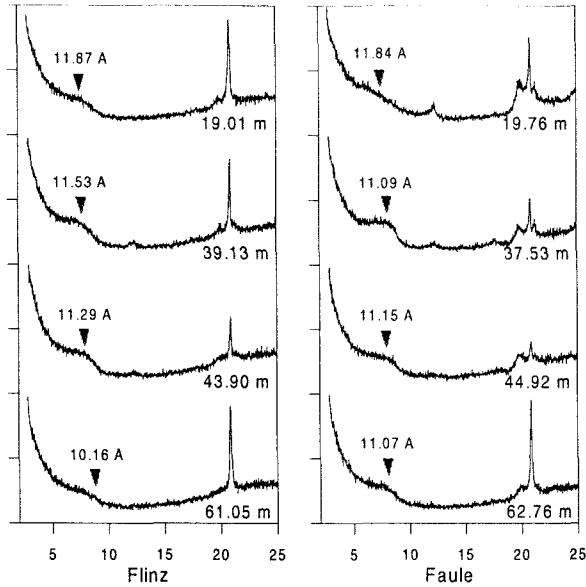


Fig. 2. Peak shifts to low angle for representative clay fractionated samples of Plaka 3-2 after sodium acetate treatments.

7. 토의

스멕타이트와 녹니석은 공기 중에서 비교적 불안정한 점토광물로 분류되어 왔다. 그리고 내륙의 토양에서 가장 두드러진 풍화산물인 카올리나이트는 해양에서 대륙쪽으로 접근함에 따라 점토광물조합 내의 상대함량이 증가하는 점토광물이다 (Moon *et al.*, 2001). 중위도 해양에서 자생광물로 주로 산출되는 녹니석이 전혀 발견되지 않는 점으로 미루어, 슬럼프층과 줄른호펜층에 퇴적된 점토광물의 기원은 내륙에서부터 기원했거나 쥐라기 이후 풍화산물로서 형성된 것으로 사료된다. 이것은 코아 위치가 과거의 해안선으로부터 더욱 더 멀어졌음을 의미하며, 이러한 유추해석은 코아의 깊이가 깊어짐에 따라 점차 증가하는 카올리나이트의 함량에 의해 뒷받침된다.

이와 같이 시대에 따른 카올리나이트의 상대함량의 감소는 내륙으로부터 공급되어오는 쇄설물의 함량이 감소함을 의미하고 이때의 생성환경은 해침에 해당된다. 상부 커플릿의 두께 (포일레층, 0.88 mm와 플린츠층, 17.75 mm)는 하부의 것 (포일레층, 3.22 mm와 플린츠층, 30.66 mm)보다 작다. 본 분지가 연약한 coccospheres가 보존될 정도의 약한 다짐작용을 받았다 하더라도 상부층의 두께가 하부의 것보다 얇아지는 것은 해안선으로부터 멀어지면서 유입되는 퇴적물의 양이 감소하거나 또는 원거리 이동에 따른 입도 감소와 관련있기 때문으로 해석되어진다. 그러나 줄른호펜층은 공해의 퇴적환경이 아니고 산호초와 같은 연안장애물에 의하여 해수의 유입이 어느 정도 제한된 석호의 환경이란 주장이 주류임을 감안한다면 (Keupp, 1977; Barthel *et al.*, 1990; Koch *et al.*, 1994), 해안선으로부터 멀어지는 거리나 깊이도 역시 제한될 수밖에 없다. 또한 석호는 일반적으로 20 m 이하의 깊이를 가지며

최대 60 m의 깊이를 초과하는 경우가 매우 드물다는 것도 감안해야 한다.

우리의 점토광물연구에 의한 해침 이론은 Keupp (1994)의 고생물학적, 퇴적학적 연구결과와 유사하다. 그는 극피류 화석인 *Saccocoma*를 원양성 부유종이라고 가정하여 산출량의 증감에 따라 해침/해퇴의 환경을 추론하여 결론을 내렸다. 그러나 *Saccocoma*는 저서종이었을지 모른다는 반대의 결과들이 있으며 (Milsom, 1994; Manni *et al.*, 1997), 또한 본연구결과에 따르면 코아에서 발견된 *Saccocoma*의 산출은 그런 감소하는 추세를 전혀 보이고 있지 않다.

점토광물 결과들이 해침의 환경을 지시한다고 하더라도, 몇 가지 문제점이 남아 있다. 무엇보다도 졸른호펜층은 단일퇴적상을 보이지 않을 뿐만 아니라 점진적으로 변하는 단순한 퇴적상도 갖고 있지 않다. 특히 졸른호펜층 중간과 상부에 불규칙하게 협재되어 있는 슬럼프층의 형성과정도 졸른호펜층의 전체 퇴적과정과 함께 풀어야 할 앞으로의 과제이다.

8. 사 사

코아 작업을 도와준 바이에른 주립지질연구소(뮌헨)의 T. Pürner에게 감사를 드린다. 박편제작에 폴란드 Krakow의 Kulbicki와 사진작업에 독일 Würzburg 대학의 H. Schönig 등이 수고하였다. 이 논문은 두뇌한국21의 일부 연구비 보조로 수행되었으며 이에 감사드린다.

9. 참고문헌

- Barthel, K.W., Swinburne, N.H.M. and Conway Morris, S. (1990) Solnhofen: A study in Mesozoic Palaeontology. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 236 p.
- Hemleben, C. (1977) Allochthone und autochthone Sedimentanteile in den Solnhofener Plattenkalken. N. Jb. Geol. Paläont. Mh., v. 1977, p. 257-271.
- Hüchel, U. (1974) Vergleich des Mineralbestandes der Plattenkalke Solnhofens und des Libanon mit anderen Kalken. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., v. 145, p. 153-182.
- Keupp, H. (1977) Ultrafazies und Genese der Solnhofener Plattenkalke (Oberer Malm, Südliche Frankenalb). Abh. Naturhist. Ges. Nürnberg, v. 37, 128 p.
- Koch, R., Senowbari-Daryan, B. and Strauss, H. (1994) The Late Jurassic »Massenkalk Fazies« of Southern Germany: Calcareous sand piles rather than organic reefs. Facies, v. 31, p. 179-208.
- Manni, R., Nicosia, U. and Tagliacozzo, L. (1997) *Saccocoma* as a normal benthic stemless crinoid: an opportunistic reply within mud-dominated facies. Palaeopelagos, v. 7, p. 121-132.
- Milsom, C.V. (1994) *Saccocoma*: a benthic crinoid from the Jurassic Solnhofen limestone, Germany. Palaeontology, v. 37, p. 121-129.
- Moon, J.-W., Moon, H.-S., Song, Y. and Lee, G.H. (2000) Clay minerals from tidal flat sediments at Youngjong Island, Korea, as a potential indicator of sea-level change. Clay Miern., v. 35, p. 841-855.
- Park, M.-H. and Fürsich, F.T. (2001) Cyclic nature of lamination in the Tithonian Solnhofen Plattenkalk of southern Germany and its palaeoclimatic implications. Intern. J. Earth Sci., in press.

주요어 : 졸른호펜, 점토광물, 쥐라기, 퇴적성인

- 1) 연세대학교 지구시스템학과
- 2) 뷔르쯔부르크대학 지질고생물학 연구소