

졸른호펜 석회암의 퇴적성인에 대한 점토광물학적 연구

문지원¹ · 박명호² · 송윤구^{1*} · 문희수¹

¹연세대학교 지구시스템학과, ²독일 뷔르쯔부르크대학 지질고생물학연구소

Clay Mineralogical Study on Genetic Environment of the Solnhofen Limestone

Ji-Won Moon¹, Myong-Ho Park², Yungoo Song^{1*} and Hi-Soo Moon¹

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

²Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Würzburg, D-97070 Würzburg, Germany

Variation in relative contents of clay minerals was used to genetically interpret depositional environment of the Upper Jurassic Solnhofen limestone. Mineralogical examination of whole rocks and clay fractions indicates that the *fäule* and *flinz* beds are composed mainly of calcite and quartz with minor amount of clay minerals such as illite, kaolinite, and smectite. Smectite shows a trend of illitization: illite layers increase with increasing of burial depth. With increasing burial depth, relative abundance of kaolinite with quartz and illite increases. This implies that the Solnhofen basin was formed during the transgression based on reduce of terrigenous influx.

Key words : Solnhofen limestone, clay minerals, transgression, terrigenous influx, Upper Jurassic

상부쥐라기 졸른호펜 석회암의 생성환경을 해석하기 위하여 점토광물의 상대함량 변화를 고찰하였다. 전암시료 및 점토입도시료에 대한 광물학적 연구결과에 따르면 포일레층과 플린츠층은 공히 방해석과 석영을 주구성광물로, 소량의 일라이트, 카올리나이트와 스멕타이트를 함유하고 있다. 스멕타이트는 속성작용을 통해 심도에 따라 일라이트화 작용을 심하게 받았으며, 카올리나이트는 심도의 증가에 따라 상대함량이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 결과는 다음과 같은 가능성을 제시한다. 즉, 육상기원을 지시하는 카올리나이트 및 석영과 일라이트 등의 쇄설입자의 유입이 상 위구간으로 갈수록 감소하고 탄산염광물의 함량이 증가함은 해침을 통해 육성퇴적물의 유입이 감소했음을 의미한다.

주요어 : 졸른호펜 석회암, 점토광물, 해침, 속성작용, 상부쥐라기

1. 서 론

최근까지 독일 남부지역의 졸른호펜 석회암에 대한 연구는 대부분 고생물학과 관련된 연구가 주종을 이루고 있다. 졸른호펜 석회암을 소위 화석광상(*fossilagerstätte*)의 대표적인 예라고 하는데(Seilacher, 1970; Shield, 1998), 이는 시조새 화석 등 다양한 종류의 화석 산출과 직접적인 관계가 있다. 그러나 졸른호펜층에서 발견된 수많은 화석은 사실 수세기 동안 수집된 결과일 뿐이다. 실제로 석회암은 화석을 빈약하게 함유하고 있다.

60년대 이후로 졸른호펜층에 대한 퇴적학적 연구가 시작되었다(Barthel, 1964; Keupp, 1977; Hemleben, 1977; Barthel, 1978; Koch *et al.*, 1994). 특히 졸른호펜 석회암이 퇴적된 분지의 진화과정을 해수면 변화와 함께 설명하고 있는데, Keupp(1994)는 해침과정에 의하여 졸른호펜층이 형성되었다고 설명한 반면, Park and Fürsich(2001)는 일률적인 해침이나 해퇴의 퇴적과정으로 설명하기보다는 층을 상부와 하부로 나누어 형성과정을 설명하였다. 즉 졸른호펜 상부층과 하부층의 상부에 있는 슬럼프층만 해퇴 시에 형성된 층이고 다른 졸른호펜층의 부분은 해침 중에 형성되었다고 설명하였다.

본 연구에서는 그동안 의견이 분분한 졸른호펜 석회

*Corresponding author: yungoo@yonsei.ac.kr

암의 퇴적환경을 구명하고자 점토광물을 포함하는 광물의 반정량, 정성분석을 시도하였다. 주된 연구방법으로 점토광물을 다룬 논문은 지금까지 몇 편만이 있다(Hüchel, 1974; Barthel *et al.*, 1990). Hüchel(1974)의 연구결과에 의하면, 졸른호펜층의 호층에는 점토광물의 양이 비슷하게 들어있으며, 탄산염광물과 비탄산염광물에서만 약간의 차이를 보인다고 하였다. 그러나 그의 연구지층은 졸른호펜층(Tithonian)과는 관련 없는 하부지층(Kimmeridgian)을 연구한 결과이다. Barthel *et al.*(1990)의 연구에서는 점토광물이 호층에서 3%에서 20%까지 차이를 보이지만 이는 졸른호펜층을 포함하는 광범위한 지층의 평균치이다. 이와 같이 시조새 화석의 산출로 세계적으로 유명한 졸른호펜층에 대한 지금까지의 점토광물학적 연구가 놀라울 정도로 미미함을 알 수 있다. 따라서 우리는 이 논문에서 일차적으로 졸른호펜층을 이루고 있는 호층의 광물학적 특성을 연구하였다. 또한 코아 길이(층서)에 따라 어떤 광물학적 변화를 보이며 퇴적분지가 진화되어왔는지도 논의하였다.

2. 남부 프랑코니아 알프스의 지질과 층서

졸른호펜층이 분포해 있는 남부 프랑코니아 알프스(Southern Franconian Alb)는 뮌헨과 뉘른베르크의 중간에 위치해 있다(Fig. 1). 이 지역에서 쥐라기 층은 500 m 이상 두껍게 발달되어 있다(Flügel *et al.*, 1992; Koch, 2000). 거의 모든 지층은 남동쪽으로 약간 기울어져 있으나, 지층의 경사는 수평에 가까울 정도로 완

만하며, 최상부의 쥐라기 지층은 풍화를 받아 결층이 되었다(Meyer and Schmidt-Kaler, 1994). 부정합으로 백악기 상부의 석회암이 레겐스부르크(Regensburg)와 그 주변지역에 부분적으로 분포되어 있다. 이후 신생대 제3기와 제4기의 쇄설퇴적물이 여러 지역에 걸쳐 퇴적되었다(Barthel *et al.*, 1990).

소위 알트뮐(Altmühl) 그룹이라고 부르는 상부 쥐라기의 퇴적층이 연구지역에 잘 발달되어 있다(Freyberg, 1964). 알트뮐 그룹의 최하부는 약간 무른 석회암의 가이젠탈(Geisental)층으로 구성되어 있다. 마이크로이트 입자로 이루어진 졸른호펜층이 그룹의 중간층을 구성하고 있으며, 그 상부로 두꺼운 층상의 석회암인 뫼른스하임(Mörnsheim)층이 있다. 세 지층 중에 졸른호펜층은 암질의 특성에 따라 더 세분할 수 있다(Barthel *et al.*, 1990): (1) 하부졸른호펜석회암, (2) 하부슬럼프층, (3) 상부졸른호펜석회암, (4) 상부슬럼프층(Fig. 2). 그러나 졸른호펜층은 퇴적분지에 따라 슬럼프층을 보이지 않기도 한다(Meyer and Schmidt-Kaler, 1989).

남부 프랑코니아 알프스에는 크게 두 가지의 퇴적상이 발달되어 있다. 지배적인 암질은 지층의 층면이 발달한 소위 일반 퇴적상(normal facies)이고, 다른 종류는 산호나 해면류의 부산물로 형성된 소위 암초 퇴적상(reef facies)이다(Zeiss, 1977; Leinfelder *et al.*, 1994; Reitner *et al.*, 1995). 알트뮐 그룹에서는 일반 퇴적상이 졸른호펜층의 상부와 중간 부분에서 발달되어 있는 반면, 암초 퇴적상은 졸른호펜층의 바로 상, 하부에 놓이는 가이젠탈층과 뫼른스하임층에서 상대적으로 발달되어 있다.

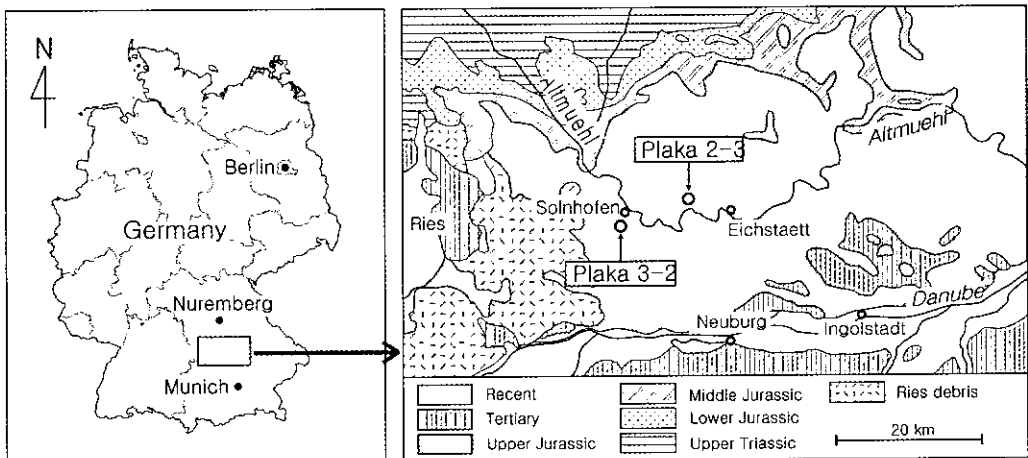


Fig. 1. Location of the study cores with general geology of the Southern Franconian Alb and adjacent areas of southern Germany. Geological map based on Barthel (1978).

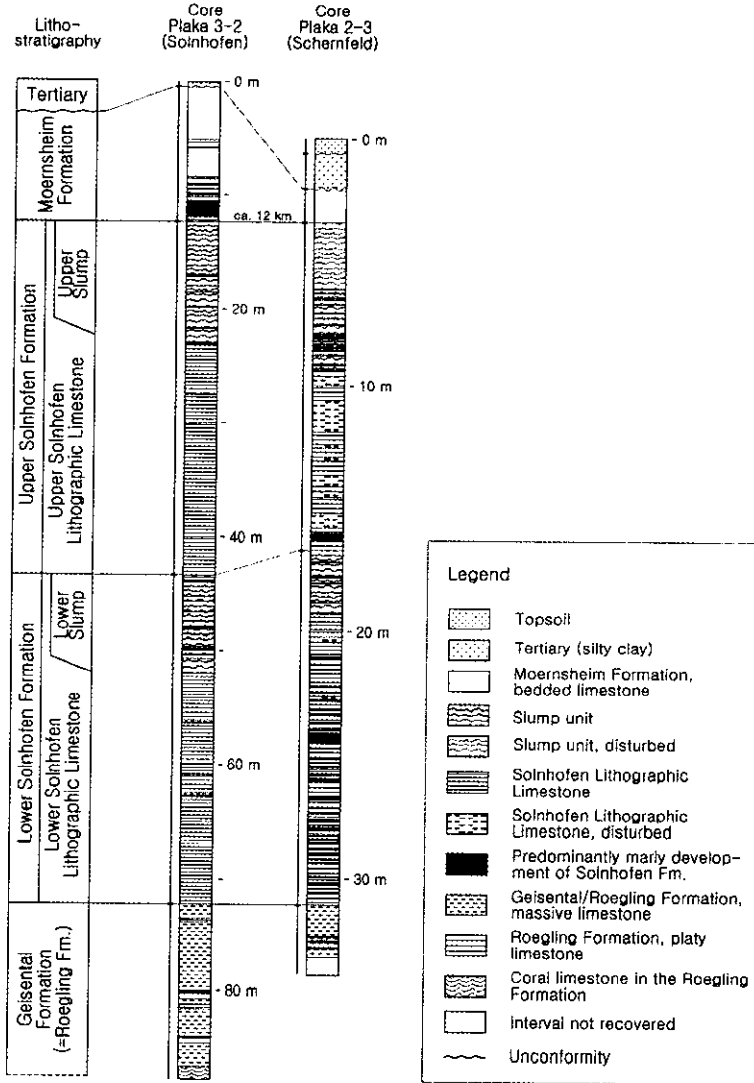


Fig. 2. Lithostratigraphic correlations of the cores. Only the sections of the cores relevant to the present study have been depicted.

3. 코아의 처리와 광물분석 방법

3.1. 시추 코아

코아 Plaka 2-3과 Plaka 3-2는 바이에른 주립지질연구소의 주관 하에 1998년 시추되었으며, 졸른호펜층 전체 부분을 포함하고 있다(Figs. 1, 2). 코아 Plaka 2-3은 남부 프랑코니아 알프스의 중심에 위치한 아이히슈테트(Eichstätt) 서쪽 분지(Schernfeld)에서 시추한 33.3 m 길이의 코아이다. 시추한 고도는 550 m이고, 위치는 북위 48°57', 동위 11°07'이다. 두 번째 코아인 Plaka 3-2도 남부 프랑코니아 알프스에서 시추하였고,

위치의 Plaka 2-3보다는 서쪽인 졸른호펜 시 근교이며, 491 m의 고도와 북위 48°56', 동위 10°58'의 위치에서 시추하였다. 코아의 길이는 115 m이다. 코아는 길이축 방향으로 절단하여, 반은 보존코아로서 반영구적으로 보존되며, 나머지 반이 분석코아로서 분석하고자 하는 목적에 따라 사용되었다.

3.2. 광물분석

XRD 분석을 위하여 총 76 개의 시료를 코아로부터 얻어 다음과 같이 분석하였다: 시료를 ballmill(PM4 모델, Retsch)에 15분 동안 분쇄하였다. 900 mg의 시료

에 30 ml Na_2CO_3 (pH 10)으로 현탁액을 만들었다. 점토입자는 48 시간 동안 진동기에 넣고 혼든 후 침강법에 의하여 얻었다. 그러나 코아 Plaka 3-2의 거의 모든 시료와 코아 Plaka 2-3의 플린츠층 시료에서는 점토입자가 거의 들어있지 않아서, 분리액으로부터 추출한 미세입자는 대부분 미립의 석영과 방해석이었다.

점토입자가 많은 시료를 위한 필터전이방법과 점토입자가 적은 전이피펫방법을 이용하여 만들어진 방향성시편과 전압시료(110 mg)에 대해 반정량분석을 실시하였다. 처리하지 않은 시료 및 이들을 에틸렌글리콜 처리(75°C, 16시간) 열처리(550°C, 1시간) 시료의 분석은 Mac Science MXP-3 XRD System(Ni-filtered $\text{Cu-K}\alpha$ radiation, 40 kV/30 mA)을 이용하였다. 측정시간은 0.02° 2 θ 당 2초였다.

XRD의 반정량분석시 전압에 대해서는 reference intensity ratio(RIR)를 점토입도에 대해서는 mineral intensity factor(MIF)를 이용하여 수행하였다(Moon *et al.*, 2000). NEWMOD2로부터 취한 MIF(=1)는 모든 시료에서 나온 일라이트 계산에 이용되었고, 피크의 세기는 피크의 배경을 뺀 피크의 순수 높이로 처리하였다(Sonnenveld and Visser, 1975).

코아 Plaka 3-2는 점토질이 거의 들어있지 않기 때문에, Jackson(1969)이 요약한 다음과 같은 방법을 추가로 채택하였다. 약 900 ml 증류수에 82 g의 CH_3COONa 을 용해시킨 완충액을 교반기 위에서 27 ml의 빙초산에 섞은 다음에, 초산으로 pH를 5로 맞추며 1 L로 희석한다. 무게를 달고 분쇄시킨 샘플을 250 ml의 완충액이 든 비이커에 넣는다. 이산화탄소의 기포가 거의 없어질 때까지 자석이 든 교반기 위에서 반응을 시킨다.

4. 코아의 일반적 암상

코아 Plaka 2-3은 상부 가이젠탈층부터 졸른호펜층의 최상부까지의 층서를 보이며, 그 위를 제3기 퇴적층이 부정합으로 얹혀 덮고 있는 반면, 코아 Plaka 3-2는 가이젠탈층의 상부부터 시작하여 졸른호펜층을 걸쳐 뫼른스하임층 하부까지의 지층을 갖고 있다(Fig. 2). 졸른호펜층에 협재된 슬럼프층은 층서 지시자로 유용하게 이용되고 있다(Barthel *et al.*, 1990). 그러나 최근 연구결과에 따르면, 슬럼프층의 경계는 일부가 층서지시자로 사용될 수 없다고 한다(Park and Fürsich, 2001). 단지 하부슬럼프층의 상부면은 졸른호펜 상부층과 하부층의 경계로, 상부슬럼프층의 상부면은 졸른호

펜층과 뫼른스하임층의 경계로 각각 이용될 수 있음을 밝혔다. 코아를 이루고 있는 세 층의 일반적 암상은 다음과 같다:

1. 가이젠탈층 : 무른 석회암으로 주로 구성되어 있으며 층리가 발달되어 있지 않다. 층의 최상부에 두세 개의 쳐어트층이 발달되어 있는 경우가 많기 때문에, 쳐어트층의 상부를 졸른호펜층과의 경계로 이용한다. 그러나 코아 Plaka 3-2에서는 쳐어트층이 전혀 존재하지 않는다. 그리고 코아의 최하부는 암초 퇴적상이 발달한 석회암을 보인다.

2. 졸른호펜층 : 졸른호펜층은 점토성분을 상대적으로 많이 갖고 있는 석회암(소위 포일레층, *fäule bed*)과 대부분이 탄산염광물로 이루어진 석회암(소위 플린츠층, *flinz bed*)의 호층으로 이루어져 있다. 이는 광산의 광부들에 의해 불리던 이름으로 포일레층은 점토성분 때문에 물렁물렁하게 썩은 과일과 같다하여 붙여진 이름이며, 플린츠층은 반대의 경우로 현지 학자들의 인용에 의해 사용되다가 굳어진 이름이다. 층의 두께는 코아 Plaka 2-3에서는 27.8 m이고, 코아 Plaka 3-2에서는 Plaka 2-3의 두 배 이상인 59.9 m이다. 두 코아 모두 상부층이 카르스트작용을 받아서 많이 파괴되었으나, 층서지시자인 슬럼프층이 발달되어 있어서 암질상으로 상부와 하부층의 경계를 나누기가 쉬운 편이다(Fig. 3).

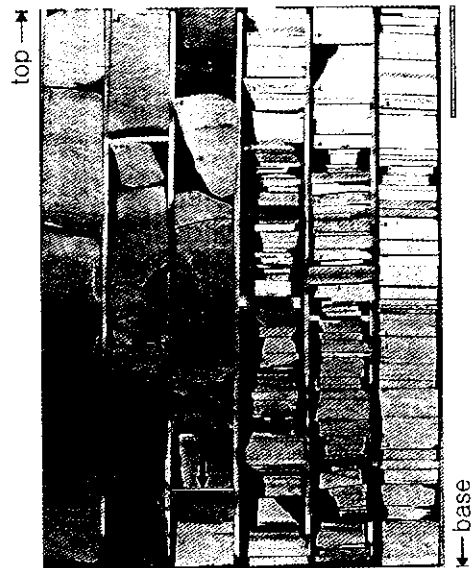


Fig. 3. Core plate showing the boundary between the Lower Slump and the Lower Solnhofen Lithographic Limestone (arrow) in core Plaka 3-2. Interval between 49.5 and 52.5 m. Scale bar=10 cm. n=no recovery.

3. 뫼른스하임층 : 두꺼운 층상석회암이 주구성 암석이고 판상석회암이 일부분 협재되어 있다. 층의 하부에서 졸른호펜층과 마찬가지로 포일레층과 플린츠층이 교대되기도 하여 이런 경우엔 층의 경계를 정하기가 쉽지 않다. 그러나 뫼른스하임 하부층의 암석은 졸른호펜층에 비하여 규질 성분이 상대적으로 풍부한 편이다. 규질 성분중엔 옥수(chalcedony)와 같이 이차적으로 형성된 광물이 교질물로 존재하기도 한다.

5. 졸른호펜층의 호층과 퇴적입자

졸른호펜층을 이루는 포일레층과 플린츠층은 모두 mm 규모의 엽리로 이루어져 있고, 포일레층의 엽리가 플린츠층의 그것보다는 평균적으로 더 얇다. 두 층에서 발견되는 엽리는 규칙적으로 교호하고 있다 (Hemleben and Swinburne, 1991; Swinburne and Hemleben, 1994; Park and Fürsich, 2001). 남부 프랑코니아 알프스의 동부지역과는 달리 (Link and Fürsich, 2001), 본 연구지역의 졸른호펜 석회암은 유기물질을 거의 함유하고 있지 않기 때문에 유질 석회암에서 보이는 것과 같은 짙은 색을 띠지 않는다. 포일레층은 황갈색(10YR 7/2; Rock-Color Chart, 1995)에서 회색빛 오렌지색(10YR 7/3)이고, 플린츠층은 이보다 약간 밝은 황갈색(5Y 7/1)이 대부분이다.

철이나 망간에 의해 형성된 덴드라이트가 층의 경계나 엽리 사이의 분리면(parting plane)에 잘 발달되어 있다. 방해석으로 주로 구성된 매트릭스는 4 μm 이하이고, 대부분은 입자크기가 1-2 μm 사이인 마이크라이트(micrite)이다 (Flügel and Franz, 1967; Flügel, 1982). 그러나 일부는 후기 neomorphism에 의해 형성된 7-9 μm 직경의 마이크로스파르(microspar)로 구성되어 있다.

SEM 관찰에 의하면 원생생물의 calcisphere나 코콜리드와 같은 미화석과 점토광물이 드물게 관찰된다. 코콜리드는 포일레층 뿐만 아니라 플린츠층에서도 존재한다. 간혹 코콜리토포리드의 원형체가 거의 그대로 발견되기도 하는데, 이는 중생대 지층으로선 다짐작용과 같은 속성작용을 상대적으로 약하게 받았음을 암시한다 (Scholle, 1978). 거시화석 중에 발견되는 종류는 극피류의 *Saccocoma tenella*이다 (Frickhinger, 1994). 이 종은 전통적으로 자유로운 유영생활을 했다고 믿어왔지만 (Seilacher et al., 1985), 최근 연구에 따르면 제한된 움직임만을 가졌던 저서종이라는 반대의 연구결과가 나오고 있다 (Milsom, 1994; Manni et al., 1997). 그러나 어떤 경우에도 연근해나 수심 50 m보다 낮은

천해환경에서 서식한 화석종임에는 틀림이 없다. 그밖에 용융 작용에 의해 형성된 능면체의 미세공간이 박편에서 관찰되기도 한다 (Mäuser, 1988).

6. 광물분석 결과

6.1. 전암시료분석

전암에 대한 광물분석은 기계적으로 분쇄된 분말시료를 이용하여 XRD pattern을 얻고 이를 토대로 동정 및 반정량 분석을 실시하였다. 반정량 분석시 전암에 대해서는 RIR 방법을, 점토입도에 대해서는 에틸렌 글리콜 처리한 방향성 시료에 대해 MIF 방법으로 실시하였다. Plaka 2-3에서 전암시료의 광물조합은 매우 유사하며, 단지 층상규산염광물이 포함되는 경우 흔히 발견되는 4.49Å과 2.58Å 피크를 이용하여, 포일레층과 플린츠층의 구별이 가능하였다. 소량 함유되어 있지만 카올리나이트와 스벵타이트 역시 최대한 동정하였다 (Fig. 4). Plaka 2-3에서 주구성광물인 방해석과

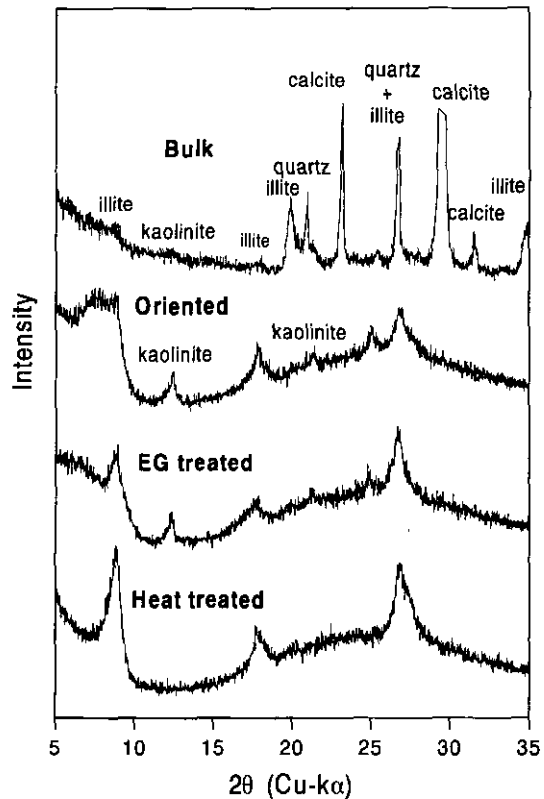


Fig. 4. XRD patterns of representative sample at 18.76 m depth.

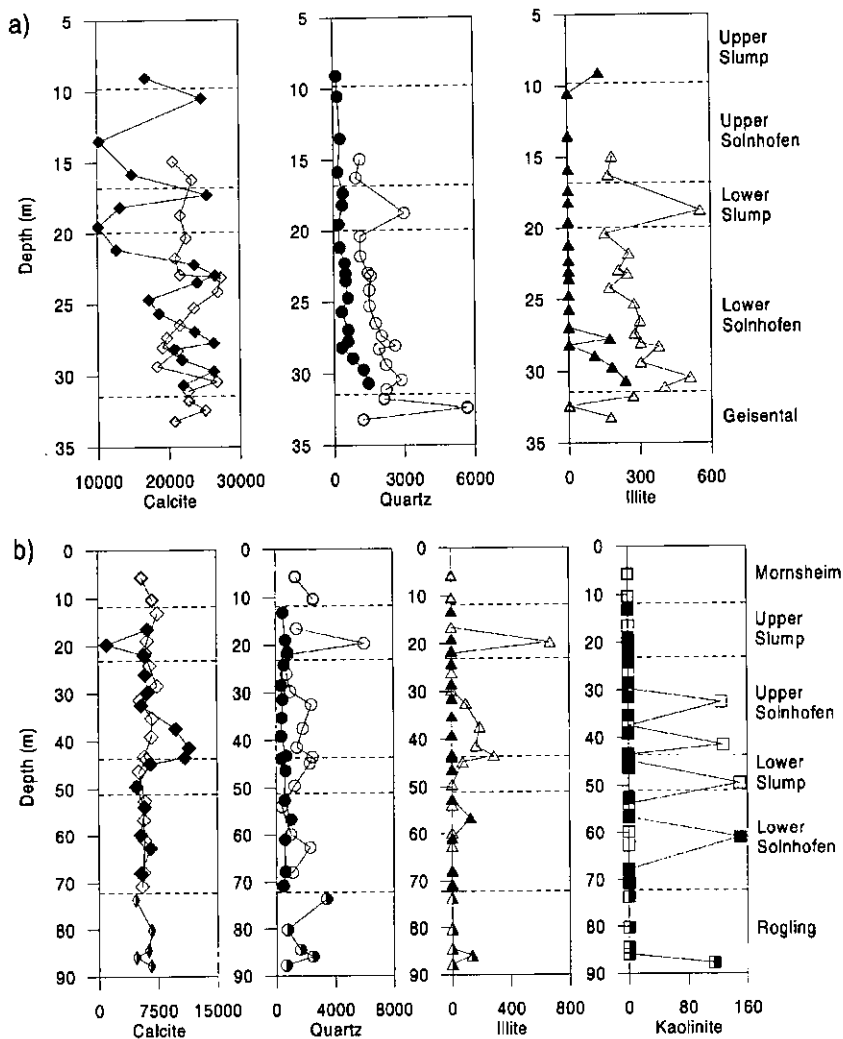


Fig. 5. Variations of crystallinity (intensity/width) of Plaka 2-3 (a) and Plaka 3-2 (b) core samples with depth. Open symbols: Fäule, solid symbols: Flinz in the Slump and Solnhofen layers.

Table 1. Variations of crystallinity and relative contents 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

Table 1. Continued.

Lithostratigraphy	N	Crystallinity (cps/FWHM)			Semiquantification			
		Calcite	Quartz	Illite	Calcite	Quartz	Illite	
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

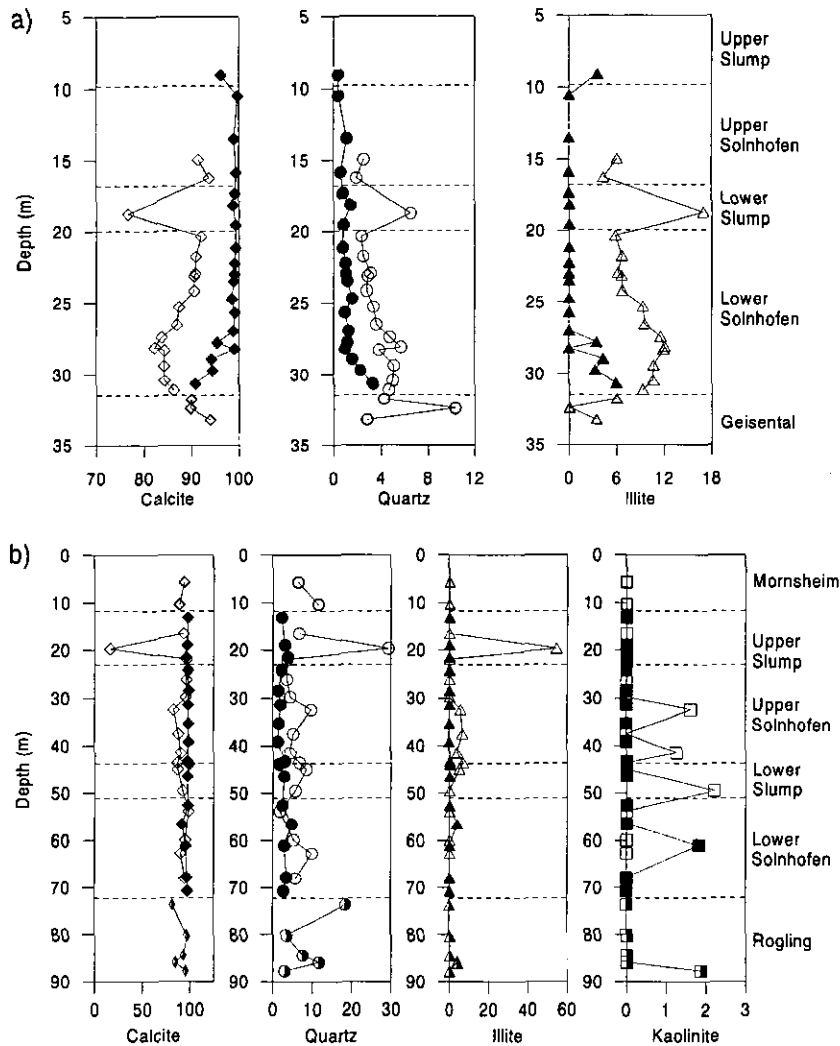


Fig. 6. Variations of relative contents (weight base) of Plaka 2-3 (a) and Plaka 3-2 (b) core samples with depth. Open symbols: Fäule, solid symbols: Flinz in the Slump and Solnhofen layers.

석영 이외의 광물도 비교적 관찰이 용이했던 반면 (Figs. 5a, 6a), 코어 Plaka 3-2에서는 방해석과 석영이 동정되었을 뿐, 심도에 따른 결정도(Fig. 5b)나 상대함

량(Fig. 6b)의 연속적인 증가 또는 감소도 발견되지 않았다.

코어 Plaka 2-3에서 결정도(피크강도/반치폭)는 일라

이트가 일부 편차를 보이거나 예상대로 심도가 깊어짐에 따라 증가함을 보여준다(Table 1). 포일레층과 플린츠층을 분리하여 도시한 결과, 석영과 일라이트의 결정도는 심도가 깊어짐에 따라 점차로 증가함을 보인다. 방해석의 경우, 일부 편차를 보이거나 (Fig. 5a), 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 4회와 2회의 정형곡선을 보인다. 반면 Plaka 3-2 시료의 방해석과 석영의 결정도는 Plaka 2-3 시료(Fig. 5a)에 비해 비교적 일정한 값을 보여준다(Fig. 5b).

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 깊어짐에 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(Fig. 6a). 이는 포일레층 혹은 플린츠층의 생성환경의 급격한 변화를 지시하는 지시자로 사료된다.

한편 Plaka 3-2 시료에서 방해석과 석영의 상대함량은 상당히 균일하게 유지되나, 19.76 m 심도의 시료는 타구간의 결과와 비교 시 상당한 이상치를 보인다. 전암시료에 대한 X선 회절분석시 일라이트와 카올리나이트가 trace로 인식되는 시료들도 많았으나, 잡음과의 구별이 거의 가지 않는 피크에 대해서는 주구성광물의 상대함량 결정에 오차를 더 할 수 있으므로 무시하였다.

6.2. 점토입도분석

Plaka 2-3 시료 중 심도 9.08 m, 10.52 m, 15.83 m, 21.15 m, 22.26 m, 23.02 m와 25.69 m의 시료는 필터 전이방법으로 방향성시편을 제작하기 힘든 점토함량이 매우 낮은 플린츠층에 해당하는 시료였으며, 피펫방법으로 만든 방향성 시편에서조차 점토광물의 인지가 불가능하였다. 석회암 내에 들어있는 점토시료는 분산시 응집현상을 일으키므로 여러 단계의 분산처리과정을 거쳤기 때문에(Table 2) 이들 시료 내에서의 오차발생 가능성은 크다. 그러나 동일조건으로 처리하였기 때문

Table 2. Observed results for suspension degree under the carbonate effect.

Lithostratigraphy	Depth	Fäule	Flinz	Chert
Upper Slump	9.08		×	
	10.52		×	
Upper Solnhofen	13.49		×	
	14.94	**		
	15.83		×	
Lower Slump	16.25	**		
	17.34			****
	18.16		×	
	18.76	○		
	19.53		×	
	20.39	**		
	21.15		×	
Lower Solnhofen	21.78	***		
	22.26		×	
	22.96	**		
	23.02		×	
	23.17	*		
	23.53			****
	24.18	**		
	24.71		×	
	25.31	*		
	25.69		×	
	26.51	○		****
	26.96			****
	27.38	○		****
27.76			****	
28.07	**			
28.18		×		
28.29	○			
28.92			****	
29.38	o		****	
29.73			****	
30.45	*			
30.67		×		
31.11	*			
	31.77			×
Geisental	32.42			****
	33.21			×

○, suspension at deionized water;

*, suspension after Na₂CO₃ treatment. Numbers mean trial times;

×, no distinct suspension after five times treatment

에 이들의 변화 경향은 분지의 생성환경의 변화를 지시한다 할 수 있다.

전암시료에 대한 측정결과와 달리 일라이트와 카올리나이트의 결정도는 모두 감소하는 경향을 보이는데 (Fig. 7), 이는 전암 분석시 소량으로 산출되는 점토광

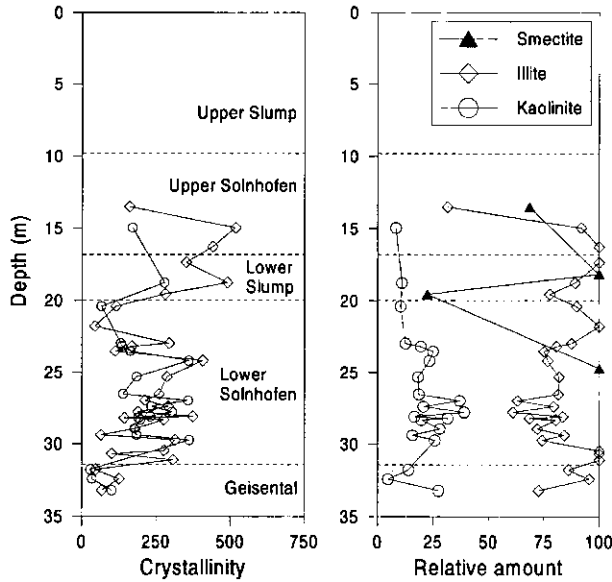


Fig. 7. Variations of crystallinity and relative contents of Plaka 2-3 with depth according to subformation.

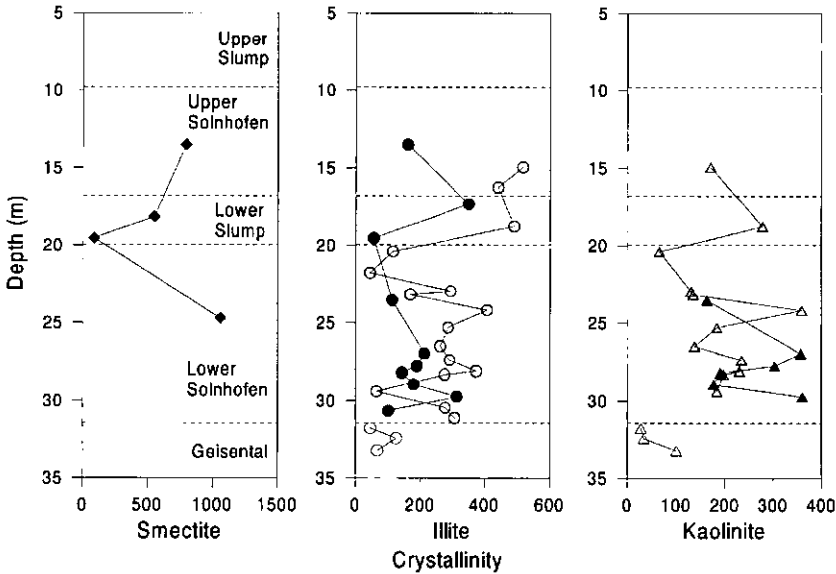


Fig. 8. Variation of crystallinity of clay minerals of Plaka 2-3 with depth. Bold symbols: Fäule, solid symbols: Flinz, open symbols: chert.

물에 대한 정량분석이 오차를 가질 수 있음을 지시하며, 이 경우 변화경향은 점토 입도에 대해 분석한 값을 따르는 것이 타당하리라 생각된다. 이는 기존의 연구가(Moore and Reynolds, 1989) 지시한 바대로 X선 회절을 이용한 광물의 정량분석은 점토광물이 주구성광물인 경우 각 구성성분 함량의 10%, 그 구성비가 20% 미만인 경우에는 $\pm 20\%$ 오차도 양호한 것으로 간주되

므로 결정도 또한 회절도형을 이용해 계산하므로 오차가 발생할 수밖에 없다고 생각된다. 포일레층과 플린츠층을 구분하여 도시한 결과도 동일하였다(Fig. 8).

반정량분석 결과, 점토광물을 거의 포함하지 않는 플린츠층에 의해 반정량시 제한점이 많았으며, 하부슬럼프층과 하부줄른호펜층이 상부슬럼프층과 상부줄른호펜층보다 다량의 점토광물을 함유하고 있는 것으로 나

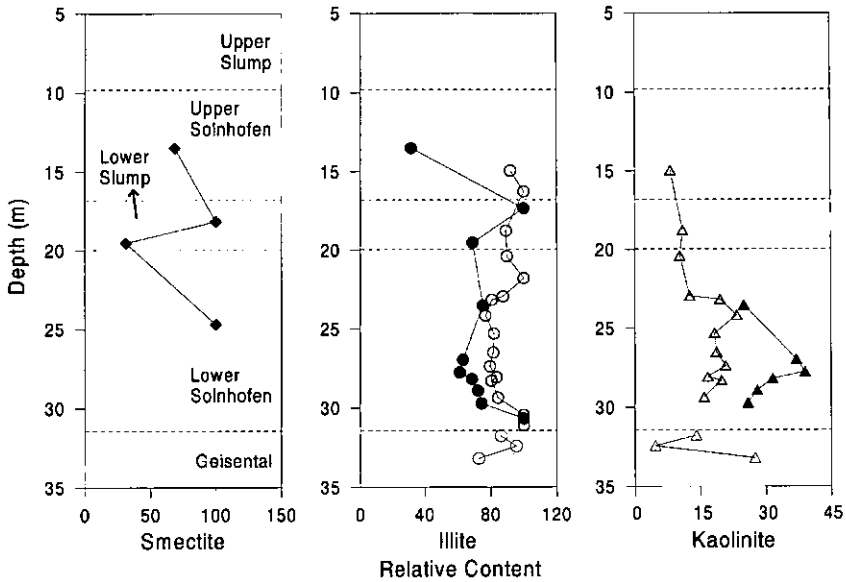


Fig. 9. Variation of relative contents of clay minerals of Plaka 2-3 with depth. Bold symbols: Fäule, solid symbols: Flinz, open symbols: chert.

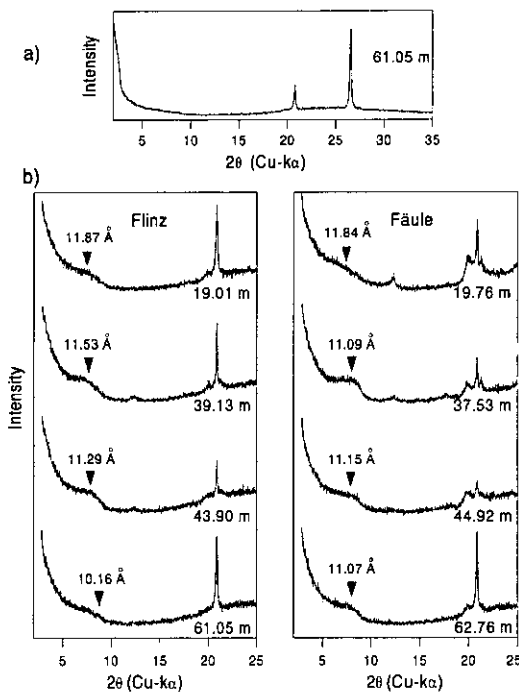


Fig. 10. (a) Representative sample of Plaka 3-2 at 61.05 m depth showing little clay minerals. (b) Peak shifts to low angle for representative clay fractionated samples of Plaka 3-2 after sodium acetate treatments.

타났다(Fig. 9).

Plaka 3-2 시료의 방향성 시편은 19.76 m 심도의 시료를 제외하고는 거의 분산이 일어나지 않아 모두 피펫전이방법으로 시편을 제작하였다. 5회에 걸친 탄산나트륨 처리 후 전암시료와 피펫전이방법에 의한 방향성 시료에 대한 X선 회절도형의 차이는 거의 발견되지 않았다. 따라서 방해석을 제거하기 위해 탄산염 광물 제거 반응을 2회에 걸쳐 실시하였으나 대량의 석영과 정량분석을 실시하기 곤란한 극소량의 점토광물만이 인지되었다(Fig. 10a). 분석결과 스멕타이트의 경우 미량으로 산출되며, 대부분 일라이트와 카올리나이트를 주구성 점토광물로 가지고 있다. Hüchel(1974)에 의하면 플린츠층과 포일레층의 점토입도의 함량은 유사하며, 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. 10b). 이는 속성작용에 의한 일라이트화 작용을 의미한다.

7. 토 의

독일 남부지역의 천해성 연해는 과거 테티스해의 최

북단에 해당하는 지역이다. 또한 이는 다시 5개의 퇴적상으로 세분되고(Geyer and Gwinner, 1979; Meyer and Schmidt-Kaler, 1983), 본 연구지역은 상부쥐라기의 프랑코니아 퇴적상의 남단에 해당된다. 이것은 중부 스웨비아 분지의 북동쪽 연장선상이 된다.

스멕타이트와 녹니석은 공기 중에서 비교적 불안정한 점토광물로 분류되어 왔다(Boles and Franks, 1979; Segal *et al.*, 1987). 그리고 내륙의 토양에서 가장 두드러진 풍화산물인 카올리나이트는 해양에서 대륙쪽으로 접근함에 따라 점토광물조합 내의 상대함량이 증가하는 점토광물이다(Moon *et al.*, 2000). 중위도 해양에서 자생광물로 주로 산출되는 녹니석이 전혀 발견되지 않는 점으로 미루어, 슬럼프층과 졸른호펜층에 퇴적된 점토광물의 기원은 내륙에서부터 기원했거나 쥐라기 이후 풍화산물로서 형성된 것으로 사료된다. 이것은 코아 위치가 과거의 해안선으로부터 더욱 더 멀어졌음을 의미하며, 이러한 유추해석은 코아의 심도가 깊어질수록 증가하는 카올리나이트의 함량에 의해 뒷받침된다. 또한 카올리나이트의 변화 뿐만 아니라 전암에 대한 상대함량 분석 결과, 석영과 일라이트 등의 쇄설입자의 유입이 상위구간으로 갈수록 감소하고 탄산염광물의 함량이 증가하는 것도 해침을 지시한다.

이와 같은 카올리나이트의 상대함량의 증가는 내륙으로부터 공급되어오는 쇄설물의 함량이 감소함을 의미한다. 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 감소하기 때문으로 해석되어진다. 그러나 졸른호펜층은 공해의 퇴적환경이 아니고 산호초와 같은 연안장애물에 의하여 해수의 유입이 어느 정도 제한된 석호의 환경이란 주장이 주류임을 감안한다면(Barthel, 1964, 1978; 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(Tomczak and Godfrey, 1994).

이 점토광물연구에 의한 해침 해석은 Keupp(1994)의 고생물학적, 퇴적학적 연구결과와 유사하다. 그는 극피류 화석인 *Saccocoma*를 원양성 부유종이라고 가정하여 산출량의 증감에 따라 해침/퇴퇴의 환경을 추

론하여 결론을 내렸다. 그러나 *Saccocoma*는 저서종이었는지 모른다는 반대의 결과들이 나왔다고 앞서서도 이미 언급한 바 있다(Milsom, 1994; Manni *et al.*, 1997). 게다가 Park and Fürsich(2001)의 연구결과에 따르면 코아에서 발견된 *Saccocoma*의 산출은 그런 감소하는 추세를 전혀 보이고 있지 않다.

점토광물 결과들이 해침의 환경을 지시한다고 하더라도, 몇 가지 문제점이 남아 있다. 무엇보다 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.

사 사

코아 작업을 도와준 바이에른 주립지질연구소(뮌헨)의 T. Pürner에게 감사를 드린다. 박편제작에 폴란드 Krakow의 P. Kulbicki와 사진작업에 독일 Würzburg 대학의 H. Schönig 등이 수고하였다. 이 논문은 한국 과학재단 2000년도 목적기초연구(2000-2-13100-004-3) 지원과 두뇌한국21의 일부 연구비 보조로 수행되었으며 이에 감사드린다. 또한 논문을 심사해 주신 한국지질자원연구원 손병국 박사님과 무명의 심사위원께 건설적 비평과 조언에 대하여 감사드린다.

참고문헌

- Barthel, K.W. (1964) Zur Entstehung der Solnhofener Plattenkalke (unteres Untertithon). *Mitteil. Bayer. Staatssamml. Paläont. hist. Geol.*, v. 4, p. 37-69.
- Barthel, K.W. (1978) Solnhofen: Ein Blick in die Erdgeschichte. Ott Verlag Thun, 393 p., 50 fig., 81 pl., Basel.
- Barthel, K.W., Swinburne, N.H.M. and Conway Morris, S. (1990) Solnhofen: A study in Mesozoic Palaeontology. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 236p.
- Boles, J.R. and Franks, S.G. (1979) Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas; implications of smectite diagenesis on sandstone cementation. *J. Sed. Pet.* v. 49, p. 55-70.
- Flügel, E. (1982) *Microfacies Analysis of Limestone*. Springer, Berlin, 454p.
- Flügel, E. and Franz, H.F. (1967) Elektronenmikroskopischer Nachweis von Coccolithen im Solnhofener Plattenkalk (Ober-Jurra). *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, v. 127, p. 245-263.
- Flügel, E., Groiss, J.T., Koch, R., Senowbari-Daryan, B. and Zeiss, A. (1992) Facies and diagenesis of sponge-algal mudmounds (Franconian Alb). In Falk, F. (ed.)

- Guidebook. 13 IAS Reg. Meet. Sediment., Univ. Jena, Intern. Ass. Sediment., p. 99-132.
- Freyberg, B.v. (1964) Geologie des Weißen Jura zwischen Eichstätt und Neuburg/Donau (Südliche Frankenalb). Erlanger geol. Abh., v. 54, p. 1-97.
- Frickhinger, K.A. (1994) The fossils of Solnhofen: Documenting the Animals and Plants known from the Plattenkalks. Goldschneck, Korb, 336 p.
- Geyer, O.F. and Gwinner, M.P. (1979) Die Schwäbische Alb und ihr Vorland. Gebr. Borntraeger, Berlin, Samml. geol. Führer, v. 67, 271 p.
- Hemleben, C. (1977) Allocthone und autocthone Sedimentanteile in den Solnhofener Plattenkalken. N. Jb. Geol. Paläont. Mh., v. 1977, p. 257-271.
- Hemleben, C. and Swinburne, N.H.M. (1991) Cyclical deposition of the Plattenkalk facies. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A. (eds.) Cycles and Events in Stratigraphy. Springer, Berlin, p. 572-591.
- Hückel, U. (1974) Vergleich des Mineralbestandes der Plattenkalk Solnhofens und des Libanon mit anderen Kalken. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., v. 145, p. 153-182.
- Jackson, M.L. (1969) Soil chemical analysis-Advanced course. 2nd (eds), Library of Congress Catalogue, 895p.
- Keupp, H. (1977) Ultrafazies und Genese der Solnhofener Plattenkalk (Oberer Malm, Südliche Frankenalb). Abh. Naturhist. Ges. Nürnberg, v. 37, 128 p.
- Keupp, H. (1994) Aspects of the origin of the Solnhofen lithographic limestone facies based on a new core drilling in the Maxberg quarry. Geobios M. S., v. 16, p. 71-80.
- Koch, R. (2000) Die neue Interpretation der Massenkalk des süddeutschen Malm und ihr Einfluß auf die Qualität von Kalksteinen für technische Anwendungen (Beispiele aus der Fränkischen Alb). Archaeopteryx, v. 18, p. 43-65.
- 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.
- Leinfelder, R.R., Krautter, M., Laternser, R., Nose, M., Schmid, D.U., Schweigert, G., Werner, W., Keupp, H., Brugger, H., Herrmann, R., Rehfeld-Kiefer, U., Schroeder, J.H., Reinhold, C., Koch, R., Zeiss, A., Schweizer, V., Christmann, H., Menges, G. and Luterbacher, H. (1994) The origin of Jurassic reefs: Current research developments and results. Facies, v. 31, p. 1-56.
- Link, E. and Fürsich, F.T. (2001) Hochauflösende Feinstratigraphie der Oberjura-Plattenkalk von Painten, Südliche Frankenalb. Archaeopteryx, v. 19, accepted.
- 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.
- Mäuser, M. (1988) Zur Ultrafazies der Jachenhausener Plattenkalk (Malm Zeta, Südliche Frankenalb). Archaeopteryx, v. 6, p. 75-84.
- Meyer, R.K.F. and Schmidt-Kaler, H. (1983) Erdgeschichtliche sichtbar gemacht. Ein geologischer Führer durch die Altmühlalb. Bayer. Geol. Landesamt, Munich, 260 p.
- Meyer, R.K.F. and Schmidt-Kaler, H. (1989) Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm). Geol. Jb., v. A115, p. 3-77.
- Meyer, R.K.F. and Schmidt-Kaler, H. (1994) Fazieswandel und Probleme der Stratigraphie im Obermalm (Tithon) zwischen Solnhofen und Neuburg/D. (Bayern). Erlanger geol. Abh., v. 123, p. 1-49.
- 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 Miner., v. 35, p. 841-855.
- Moore, D.M. and Reynolds, R.C., Jr. (1989) X-ray diffraction and the identification and analysis of the clay minerals. Oxford University Press.
- 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.
- Reitner, J., Neuweiler, F., Flajs, G., Vigener, M., Keupp, H., Meischner, D., Paul, J., Warnke, K., Weller, H., Dingle, P., Hensen, C., Schäfer, P., Gautret, P., Leinfelder, R. R., Hüßner, H. and Kaufmann, B. (1995) Mud mounds: A polygenetic spectrum of fine-grained carbonate buildups. Facies, v. 32, p. 1-70.
- Rock-Color Chart Committee (1995) Rock Color Chart. (eds) Goddard, *et al.*, Geol. Soc. Am., New York.
- Scholle, P.A. (1978) A Color Illustrated Guide to Carbonate Rock Constituents, Textures, Cements and Porosities. Am. Ass. Petrol. Geol. Memoir, v. 27, 241p.
- Seilacher, A. (1970) Begriff und Bedeutung der Fossil-Lagerstätten. N. Jb. Geol. Paläont. Mh., v. 1970, p. 34-39.
- Segal, M.P., Buckley, D.E. and Lewis, C.F.M. (1987) Clay mineral indicators of geological and geochemical sub-aerial modification of near surface Tertiary sediments on the northeastern Grand Banks of Newfoundland. Canad. J. Earth Sci. v. 24, p. 2172-2187.
- Seilacher, A., Reif, W.E. and Westphal, F. (1985) Sedimentological, ecological and temporal patterns of fossil lagerstätten. Phil. Trans. Royal Soc., v. B311, p. 5-23.
- Shields, G. (1998) What are Lagerstätten? Lethaia, v. 31, p. 124.
- Sonneveld E.J. and Visser J.W. (1975) Automatic collection of powder data from photographs. J. Appl. Cryst., v. 8, p. 1-7.
- Swinburne, N.H.M. and Hemleben, C. (1994) The plattenkalk facies: A deposit of several environments. Geobios M. S., v. 16, p. 313-320.
- Tomczak, M. and Godfrey, J.S. (1994) Regional Oceanography: An Introduction. Pergamon, Oxford, 422 p.
- Zeiss, A. (1977) Jurassic stratigraphy of Franconia. Stuttgarter Beitr. Naturk., v. B31, p. 1-32.