

일본 제3기 해성 퇴적분지에서의 스멕타이트 매몰 속성작용

Burial Diagenesis of Smectite in the Tertiary Marine Basin, Japan

손 병 국(Byeong-Kook Son)*

한국지질자원연구원

(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) 30, Gajeong-dong,
Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea)

요약: 일본의 제3기 해성 퇴적분지 석유탐사 시추공에서 회수된 이질암에서 산출되는 일라이트-스멕타이트 혼합층 점토광물에 대하여 광물학적 및 화학적 연구를 수행하였다. X-선회절분석에 의하면 매몰심도가 증가함에 따라 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물을 구성하는 스멕타이트 성분층은 감소하고 일라이트 성분층은 증가한다. 또한 매몰심도 4,000 m에서 불규칙배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물은 규칙배열(R=1)의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물로 변화한다. 이 매몰심도는 약 100°C의 매몰온도를 지시하며 유기물분석 결과와 잘 일치되고 있다. 그러나 현재의 지온구배를 고려할 때 100°C의 매몰온도는 3,000 m이다. 이와 같은 차이는 약 2,500 m에 존재하는 역단층에 의하여 일부 지층이 중복되고 더욱 매몰되었기 때문에 발생한 것으로 해석된다. 화학분석에 의하면 매몰심도가 증가함에 따라 일라이트-스멕타이트의 Si 성분은 감소하고 Al과 K성분은 증가한다. 이것은 일라이트-스멕타이트의 사면체층에서 Si를 Al이 교대함에 따라 사면체층에서 발생하는 전하량을 보완하기 위하여 사면체 층간에 K이 유입되는 것을 시사한다. 이 반응에 필요한 K은 K장석과 운모류에서 유입되었을 것으로 생각된다.

주요어: 제3기 해성퇴적분지, 석유탐사, 일라이트-스멕타이트, 혼합층 점토광물, X-선 회절분석

ABSTRACT: Mineralogical and chemical examinations were performed on interstratified illite-smectite (I-S) minerals that occur in the mudstones from a petroleum exploration well in the Tertiary marine basin, Japan. X-ray diffraction analysis shows that component layers of illite in the interstratified I-S increase with increasing burial depth while those of smectite decrease. In addition, the randomly (R=0) interstratified illite-smectite is changed into R=1 ordered I-S at a depth of about 4,000 m, which corresponds to the result of organic analysis and indicates a burial temperature of about 100°C. However, the present geothermal gradient shows that the conversion of the random I-S to R=0 ordered I-S is likely to occur at 3,000 m. This discrepancy may be interpreted by the reverse fault at 2,500 m which resulted in a deeper burial of sediments up to 1,000 m. Chemical analysis also shows the compositional variation in I-S with increasing depth: a decrease in Si and an increases in Al and K, indicating that the substitution of Al for Si in tetrahedral sheets is compensated by the addition of K to interlayers. K may be derived from K-feldspar and micas, which is present in the mudstones.

*교신저자: sbk@rock25t.kigam.re.kr

Key words : interstratified illite-smectite, petroleum exploration, Tertiary marine basin, X-ray diffraction analysis

서 론

두껍게 쌓인 쇠설성의 이질암 지층 내에서 매몰심도 및 온도가 증가함에 따라 이팔면체 스멕타이트 광물이 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물의 단계를 거쳐 일라이트로 변화하는 소위 일라이트화 반응은 점토광물에 대한 매몰속성작용 중에서 가장 잘 알려져 있다(Hower, *et al.*, 1976; Son *et al.*, 2001). 스멕타이트에서 일라이트로 변하는 과정에 대한 메카니즘은 아직도 명확하게 밝혀져 있지 않으며 계속 논쟁거리로 남아 있다(Nadeau *et al.*, 1984; Ahn and Peacor, 1986; Altaner and Ylagan, 1997; Inoue *et al.*, 2004). 그러나 이팔면체 스멕타이트 광물이 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물의 단계를 거쳐 일라이트로 변화하는 일반적인 경향 자체는 세계의 여러 퇴적분지에서 확인되고 있으며 확실하게 인정을 받고 있다(Środoń and Eberl, 1984).

퇴적층의 매몰심도가 깊어짐에 따라 매몰온도도 증가하게 되며, 온도가 증가하게 되면 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물을 구성하고 있는 일라이트 성분층의 비율은 점차 점이적으로 증가하고 스멕타이트 성분층의 비율은 감소한다. 또한 일라이트 성분층의 비가 50% 이하이고 스멕타이트 성분층이 50% 이상인 초기매몰의 저온조건에서는 두 성분층은 불규칙 배열 상태의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물(R=0 I-S로 표시)을 형성한다. 그러나 매몰이 더욱 진행되어 매몰온도가 더욱 높아지게 되어 일라이트 성분층의 함량이 스멕타이트 성분층의 함량보다 많아지게 되면 규칙배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물(R=1 I-S로 표시)을 형성하게 된다. 이와 같이 스멕타이트 성분층이 감소하고 일라이트 성분층이 증가하면서 R=0 I-S에서 R=1 I-S로 전이되는 과정의 메카니즘에 대해서는 아직도 확실하게 밝혀지지 않고 있다. 그러나 이와 같은 I-S 변화는 온도에 지배된다는 것이 명확하기 때문에 퇴적층의 속성작용 정도의 지시자 또는 매몰온도의 지시자로서 사용되어 왔다(Pollastro, 1990, 1993). 특히 유기물을 다량 함유하고 있는 퇴적층에서 석유가 생

성되는 온도조건과 규칙배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물(R=1 I-S)이 나타나는 온도가 거의 일치하기 때문에 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물의 연구는 석유탐사에서도 응용되고 있다(Son *et al.*, 2001).

우리나라 육상에 분포하는 퇴적층인 포항지역의 제3기 지층에서는 퇴적층의 두께가 얇고 매몰온도가 낮기 때문에 불규칙 배열 상태의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물(R=0 I-S)만 산출되고 있다(Son, 1996). 또한 중생대 경상분지의 퇴적층은 온도가 매우 높아 이미 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물의 단계를 거의 지난 상태이며, 일라이트만이 산출되고 있다(손병국 외, 1994). 그럼으로, 우리나라의 육상에 분포하고 있는 퇴적층에서는 매몰온도의 증가에 따른 일라이트-스멕타이트 혼합층광물의 점이적인 변화과정을 관찰할 수 없다. 따라서 이 연구는 우리나라의 제3기 지층과 성인과 시기가 같은 것으로 알려진 일본 제3기 지역의 석유시추공 시료를 대상으로 하여 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물의 변화과정을 광물학적 및 화학적으로 밝히고자 수행하였다.

연구지역 및 시추공

동해의 동부지역과 인접한 일본의 연안지역은 제3기 지층이 넓게 분포하고 있으며 이 제3기 지층에서 석유가 산출되고 있다. 석유탐사를 위하여 많은 시추가 이루어 졌으며 시추공에서 회수된 암편 시료를 사용하여 이 연구를 수행하였다(그림 1). 연구된 시추공은 아키타현의 대륙봉지역에 위치하며 총심도는 4,802 m에 이른다(그림 2). 시추공이 위치한 지역은 마이오세에서 플라이스토세에 이르는 쇠설성 또는 화산쇄설성 퇴적물이 두껍게 쌓여있는 지역이다. 구조적으로는 횡압력을 받아 습곡과 역단층이 발달해 있다(그림 3). 지층은 하부로부터 온나가와층, 후나가와층, 텐토쿠지층, 사사오카층으로 구성되어 있다. 온나가와층은 주로 이질퇴적암으로 되어 있으며 산성응회암과 사암이 협재되어 있다. 온나가와층을 정합적으로 덮고 있는 후나가와층도 비슷한 암상을 가지고 있다. 텐토

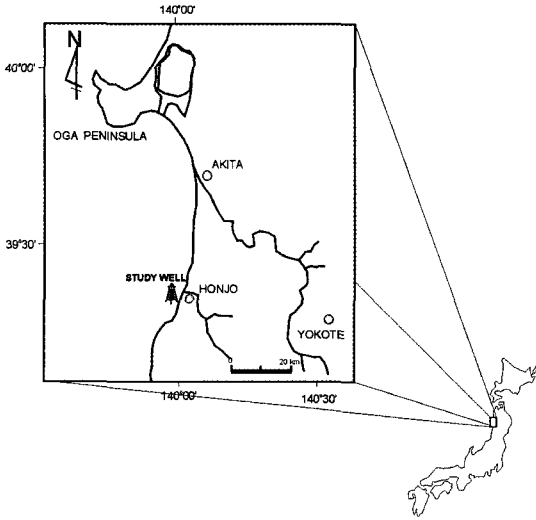


Fig. 1. Location of the study well.

쿠지층은 실트질 이암과 사암으로 구성되어 있다. 또한 사사오카층은 주로 실트질 이암으로 되어 있으며 응회암과 사암이 협재되어 있다. 시추공 시료에서 볼 수 있는 전체적인 암상은 암회색의 이질암이 우세하며, 사암과 응회암이 협재되어 있는 양상을 보여주고 있다(그림 2). 이질암은 주로 점토광물로 구성되어 있으며 석영, 장석, 제올라이트 등이 부수광물로서 나타난다. 또한 이질암은 다량의 유기물이 함유되어 있어 석유 근원암으로 생각되고 있다. 시추공이 있는 지역은 구조적으로 습곡과 역단층으로 되어 있다. 따라서 후나가와층과 텐토쿠지층이 역단층에 의하여 약 2,500 m 심도에서 반복되어 나타난다(그림 2, 3).

시료 및 실험방법

제3기 퇴적층을 관통하여 시추한 총심도 4,802 m 시추공 시료에서 약 200 m 간격으로 각 심도를 대표하는 암편들을 핀셋을 사용하여 골라내었다. 골라낸 암편들을 막자사발에 증류수와 함께 넣어 지나친 힘을 가하지 않고 분쇄한 다음 초음파로 분산시켰다. 분산된 현탁액을 원심 분리하여 2 μm 이하 입도의 시료와 0.2 μm 미만 입도의 시료를 분리하여 X-선회절 분석을 수행하였다. X-선회절 분석은 자연건조된 시료와 에틸렌글리콜시료, 열처리 시료에 대하여 수행하였다. 0.2 μm 미만 입도의 시료는 거

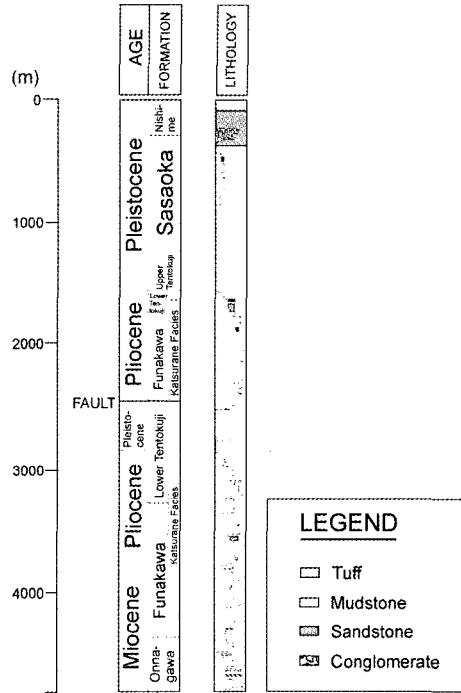


Fig. 2. Stratigraphy and lithology of the well.

의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물만으로 구성되어 있어서 0.2 μm 미만 입도의 시료들에 대하여 좀 더 자세한 정밀 X-선회절분석을 실시하였으며 NEWMOD 소프트웨어를 사용하여 일라이트 성분층과 스�멕타이트 성분층의 비를 정량적으로 구했다. 또한 거의 순수한 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물로 다른 불순물 점토광물이 섞이지 않은 시료에 대해서는 전자현미분석(EPMA)에 의하여 화학분석을 실시하였다. 전자현미분석은 0.2 μm 미만 입도의 분말시료를 얇은 디스크 펠렛으로 만들어 분석하였다. 펠렛의 편평성과 광택을 얻기 위하여 시료와 접하는 프레스의 표면을 다이아몬드페이스트로 연마하였다. 한편, 각 암편시료에 포함된 유기물분석을 위하여 록에발 열분석기를 사용하였으며 총유기탄소량(TOC)과 T_{max} 온도를 구하였다. 암편을 분쇄하여 시료를 록에발 열분석기의 불활성 기체 내에서 600°C 까지 가열하였다(Espitalié *et al.*, 1985). T_{max} 온도는 시료를 600°C 까지 가열하는 동안 발생하는 탄화수소 양이 최대가 되는 온도로서 T_{max} 435°C는 퇴적층에서 석유가 생성되기 시작하는 매몰온도인 약 100°C와 일치하는 것으로 알려져 있다(Burtner and

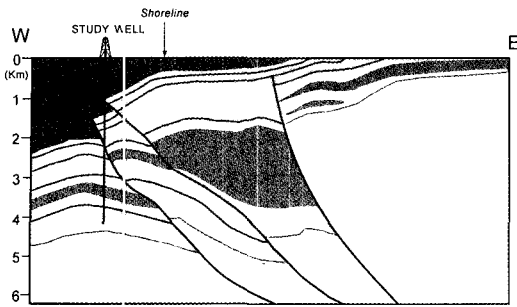


Fig. 3. Cross section of the area including the study well (modified from Ozawa *et al.*, 1977).

Table 1. Reichweite and percent of illite layers in interstratified illite-smectite (I-S)

Depth (m)	% illite layer in I-S	Reichweite
1500	23	R = 0
1600	13	R = 0
1800	20	R = 0
2000	25	R = 0
2200	20	R = 0
2400	14	R = 0
2600	21	R = 0
2800	37	R = 0
3000	33	R = 0
3200	40	R = 0
3400	34	R = 0
3600	40	R = 0
3800	42	R = 0
4000	60	R = 1
4200	70	R = 1
4400	75	R = 1
4600	80	R = 1
4800	80	R = 1

Warner, 1986).

결과 및 토의

일라이트-스멕타이트 광물의 특성

X-선 회절분석에 의하면, 이질암을 구성하는 광물조성은 점토광물과 세립의 석영이 주성분이며, 점토 중에는 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물이 가장 많은 양으로 산출되고 있다. 일라이트, 카올리나이트, 녹니석은 소량으로 산출되

고 있다. 장석도 이질암의 성분이며 K-장석과 사장석이 산출되고 있다. 소량의 제올라이트도 산출되는 데 시추공의 상부구간에서는 제올라이트 중에서 클리놉틸로라이트가 산출되며 하부구간에서는 아날심이 나타난다.

2 μm 미만 입도 분말시료의 X-선회절도에서는 일라이트-스멕타이트 혼합층광물, 카올리나이트, 녹니석이 함께 나타나기 때문에 일라이트-스멕타이트 혼합층광물의 특성을 정확하게 인지하기가 어렵다. 그러나 0.2 μm 미만 입도의 분말 X-선회절도에서는 일라이트-스멕타이트 혼합층광물만이 나타나는 경우가 많고 기타의 점토광물은 미량으로 나타나고 있다. 따라서 일라이트-스멕타이트 혼합층광물의 연구를 위해서는 0.2 μm 미만 입도의 분말 X-선회절도가 주로 사용되었다. 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물의 일라이트 성분층과 스멕타이트 성분층을 구하기 위하여 0.2 μm 미만 입도의 분말 X-선회절도에 대하여 NEWMOD 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션하였으며, NEWMOD로 계산된 회절도와 실제의 회절도가 일치하였을 때 두 성분층의 함량이 결정되었다. X-선 회절분석과 NEWMOD 시뮬레이션에 의한 일라이트-스멕타이트 혼합층광물의 일라이트 성분층과 스멕타이트 성분층의 비율은 매몰심도가 증가함에 따라 뚜렷하게 변화한다(그림 4). 즉, 매몰심도가 증가함에 따라 스멕타이트 성분층은 감소하며 일라이트 성분층은 점차로 증가해 간다(표 1, 그림 4). 매몰심도 약 3,800 m까지는 불규칙 배열(R=0)의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물이 산출된다. 그러나 약 4,000 m에서는 불규칙 배열의 I-S가 규칙배열의 I-S (R=1)로 변화된다. X-선회절도에서 보는 바와 같이 불규칙 배열(R=0)의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물은 에틸렌글리콜 처리된 시료에서 17Å에서 001 피크가 나타나며, 스멕타이트 성분층의 비가 감소하고 일라이트 성분층의 비가 증가함에 따라 이 피크의 저각도 쪽의 바탕선이 높아지면서 피크의 강도가 약해진다. 한편 규칙배열(R=1)의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물은 에틸렌글리콜처리를 하지 않았을 경우 11~12 Å 사이에서 주 피크가 나타나며 에틸렌글리콜처리를 하였을 경우 이 피크는 두개의 피크로 쪼개져 나타난다(그림 4).

Table 2. Electron microprobe analysis of interstratified illite-smectite (I-S)

	Sample depth (% I in I-S)				
	1600 m (13% I)	2200 m (20% I)	3000 m (33% I)	4200 m (70% I)	4600 m (80% I)
SiO ₂	61.35	62.96	58.20	56.46	56.01
Al ₂ O ₃	19.16	19.77	21.06	26.58	25.43
Fe ₂ O ₃ *	5.87	6.90	5.34	4.09	3.01
MgO	2.81	2.34	3.31	2.22	2.63
MnO	0.05	0.06	0.02	0.05	0.03
CaO	0.55	0.22	0.77	0.53	0.80
Na ₂ O	0.49	0.44	0.66	0.44	0.39
K ₂ O	3.92	3.96	4.50	5.45	5.53
Total	94.20	96.66	93.85	95.84	93.84
Numbers of cations on the basis of O ₂₀ (OH) ₄					
Si	7.87	7.90	7.58	7.21	7.29
Al(IV)	0.11	0.10	0.42	0.79	0.71
Σtet.	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al(VI)	2.80	2.82	2.81	3.21	3.19
Fe	0.57	0.65	0.52	0.39	0.29
Mg	0.54	0.44	0.64	0.42	0.51
Mn	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Σoct.	3.91	3.92	3.98	4.03	4.00
Ca	0.08	0.03	0.11	0.07	0.11
Na	0.12	0.11	0.17	0.11	0.10
K	0.64	0.63	0.75	0.89	0.92
Σint.	0.84	0.77	1.02	1.07	1.13
Tet. Charge	0.11	0.10	0.42	0.79	0.71
Oct. Charge	0.81	0.70	0.71	0.35	0.53
Int. Charge	0.92	0.80	1.13	1.14	1.24

* Total Fe as Fe₂O₃

일라이트-스펙타이트의 화학적 특성

0.2 μm 미만 입도의 순수한 일라이트-스펙타이트 혼합층 광물에 대한 전자현미분석치와 분석치를 가지고 계산한 양이온 수를 표 2에 정리하였다. 분석결과를 보면 매물심도에 따른 분명한 변화가 인지된다. 특히, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Fe₂O₃ 성분의 매물심도에 따른 변화가 뚜렷하게 인지된다. 즉, 매물심도가 증가함에 따라 SiO₂ 와 Fe₂O₃의 함량은 감소하고 Al₂O₃의 함량과 K₂O의 함량은 증가하는 경향으로 나타난다(표 2, 그림 5). 그러나 다른 성분들의 변화

는 확실하게 인지되지 않는다. 매물심도가 증가함에 따라, 사면체층의 Si를 Al이 치환하면서 사면체층에서의 전하가 증가하는 경향도 보인다. 또한 팔면체층에서는 Fe의 감소와 Al의 증가도 인지된다(표 2). 분석결과를 삼각다이아그램에 도시하여 보면 매물심도가 깊은 곳의 시료일수록 스펙타이트 성분층 양은 적게 나타나고 일라이트 성분층의 양은 크게 나타난다. 전체적으로 보면 불규칙배열의 I-S 지역에서 규칙배열의 I-S 지역으로 이동함을 잘 보여준다. 또한 변화의 방향은 팔면체 전하가 증가되는 방향이 아니고, 사면체 전하가 증가되는 방

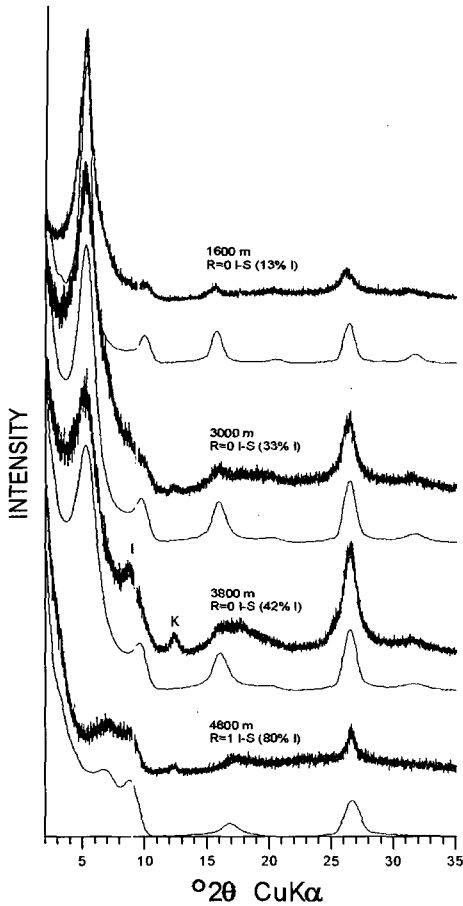
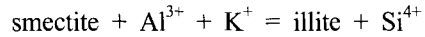
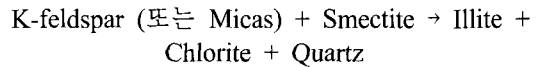


Fig. 4. X-ray powder diffraction patterns of interstratified illite-(glycol)smeectite, which are compared with calculated patterns. K is kaolinite and I is discrete illite.

향으로 변화하여 간다(그림 6). 이와 같은 결과를 종합해 볼 때 스멕타이트의 일라이트화는 팔면체층보다는 주로 사면체층에서 일어나는 것을 알 수 있다. 즉, 사면체층의 Si 대신 Al이 교대됨에 따라 사면체층의 전하량이 증가하고 이를 보상하기 위하여 K의 함량도 증가되는 것으로 해석할 수 있다. 이와 같이 스멕타이트에서 일라이트로 변화하여 가는 과정은 다음 반응식으로 정의 될 수 있을 것이다.



이러한 반응이 성립하기 위해서는 외부로부터 K의 유입이 요구된다. 분석된 이질암들은 모두 많은 양의 K-장석을 함유하고 있으며 K-장석은 일라이트화를 위한 K 성분의 공급원이 될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 이질암의 구성성분인 쇠설성 일라이트 등의 운모류도 K의 공급원으로 생각될 수 있다. 한편, Hower *et al.* (1976)은 일라이트화 과정을 다음의 반응관계로 설명하였다.



일라이트화 반응에서 유리된 실리카 성분은 석영으로 침전할 수 있을 것이다. 또한 분석결과에서 팔면체층의 Fe 함량이 감소하고 있는데, 이때 유리된 Fe는 위의 반응식과 같이 녹

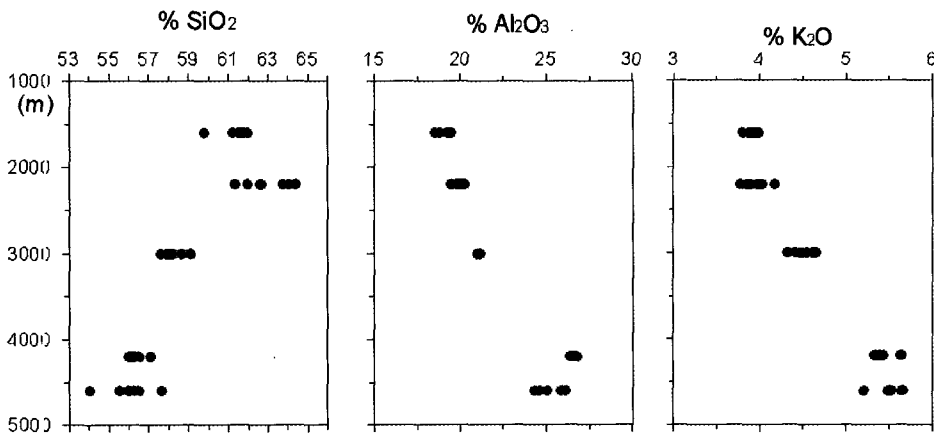


Fig. 5. Compositional variation of interstratified I-S with increasing burial depth.

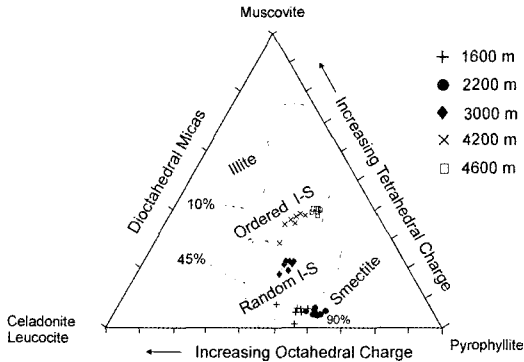


Fig. 6. Interstratified I-S plotted in the triangular composition diagram, muscovite-celadonite-pyrophyllite. Curves of percent smectite layers are counted by Śródoń and Eberl (1984).

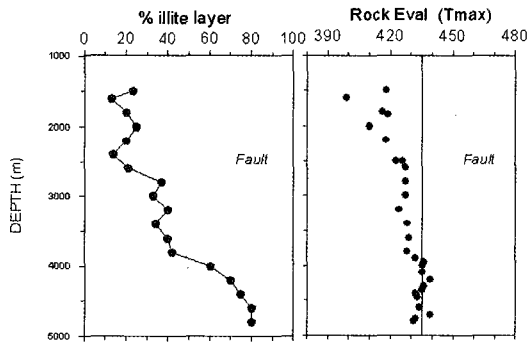


Fig. 7. Comparison between I-S and T_{max} .

니석을 형성하였을 것으로 생각된다.

일라이트-스멕타이트 광물의 매물속성변화

전체적으로 볼 때 매물심도가 증가함에 따라 일라이트-스멕타이트 혼합층광물의 스�멕타이트 성분층은 감소하고 상대적으로 일라이트 성분층은 증가하고 있다(그림 7). 또한 3,800 m와 4,000 m 사이에서 일라이트 성분층의 비가 50%를 넘으면서 불규칙배열의 혼합층광물에서 규칙형의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물로 바뀐다. 일라이트 성분층이 증가되는 양상은 잘 알려진 걸프만 지역의 시추공에서의 변화와 매우 유사하다(Hower *et al.*, 1976). 그러나 증가 곡선을 잘 살펴보면 약 2,000 m에서 2,800m 사이에서는 증가되기 않고 감소하다가 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 3,800 m

Table 3. Organic carbon content (TOC) and T_{max} values by Rock-Eval pyrolysis

Depth (m)	TOC	T_{max} (°C)
1500	0.87	418
1600	0.69	399
1800	0.61	416
1838.3*	1.65	419
2000	0.82	410
2200	0.48	418
2502.4*	0.75	426
2507.4*	0.63	423
2600	0.84	427
2800	0.97	427
3000	1.01	427
3200	0.95	424
3400	0.75	428
3600	1.19	429
3800	0.88	428
3900	0.88	432
3950	0.70	436
4000	1.25	435
4100	0.94	435
4200	0.87	439
4300	1.14	436
4350	1.11	435
4400	0.84	432
4450	1.24	433
4600	0.86	434
4700	1.36	439
4753.23*	1.21	432
4800	0.79	431

* Conventional core sample

와 4,000 m 사이에서 증가되는 폭이 큰 것을 알 수 있다. 2,000 m에서 2,500 m 사이에서 일라이트 성분층이 증가되기 않고 감소경향을 보이다가 다시 2,500 m 이후의 심도에서 다시 증가하는 경향을 보이는 것은 이 심도에서 대규모의 트러스트 역단층이 존재하여 지층이 중복되어 있기 때문에 나타나는 것으로 생각된다(그림 3. 참조). 또한 3,800 m에서부터 증가 폭이 크게 나타나는 것은 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트(R=0)에서 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=1)로 전이하는 상전이 과정에서 나타나는 것으로 생각된다(그림 7). 스�멕타이트가 일라이트로 변화하는 메카니즘에 대한 초기

의 연구에 의하면, 불규칙배열의 일라이트-스펙타이트에서 규칙배열(R=1)의 일라이트 스펙타이트로 전이되는 과정은 연속적으로 일어나며 기본 결정구조는 유지된 채 변화되는 것으로 생각했다(Aronson and Hower, 1976; Hower *et al.*, 1976). 그러나 그 후의 많은 연구들에 의하면 불규칙배열의 일라이트-스펙타이트는 완전히 용해가 일어나게 되며, K-장석이나 운모류에서 K의 공급을 받아 규칙배열(R=1)의 일라이트-스펙타이트 광물이 침전되어 형성되는 것으로 해석하고 있다(Eberl, 1993; Nadeau *et al.*, 1984, Inoue *et al.*, 2004). 따라서 3,800 m 부터 4,000 m 사이의 좁은 심도구간에서 일라이트 성분층의 비가 빠르게 증가하면서 규칙배열(R=1)의 일라이트-스펙타이트 광물로 변하는 것은 이러한 용해에 의한 재침전의 가능성을 시사한다.

스펙타이트가 일라이트화 되는 과정에서 가장 주요한 요소는 매몰온도이다. 지금까지의 연구에 의하면 불규칙 배열(R=0)의 일라이트-스펙타이트에서 규칙배열(R=1)의 일라이트-스펙타이트로 전이되는 온도는 연구된 지역마다 차이는 있으나 대부분의 지역에서 약 100°C로 나타나고 있다(Pollastro, 1990). 따라서 연구된 시추공에서 불규칙 배열(R=0)의 일라이트-스펙타이트에서 규칙배열(R=1)의 일라이트-스펙타이트로 전이되는 매몰심도는 약 4,000 m이다. 그러므로 4,000 m의 매몰심도에서 약 100°C의 매몰온도에 도달한 것으로 생각된다. 이질암 내에 존재하는 유기물을 분석한 결과도 이와 잘 일치하고 있다(표 3). 즉, 록에발 T_{max} 온도 435°C는 매몰온도 약 100°C를 지시한다(Espitalié *et al.*, 1985; Burtner and Warner, 1986). 연구된 시추공에서 록에발 T_{max} 온도 435°C는 약 4,000 m에서 도달된다(그림 7). 이것은 불규칙 배열(R=0)의 일라이트-스펙타이트에서 규칙배열(R=1)의 일라이트-스펙타이트로 전이되는 매몰심도가 4,000 m인 것과 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 매몰심도 약 4,000 m가 매몰온도 100°C를 지시한다고 할 수 있다. 그러나 시추시에 측정된 온도를 가지고 계산된 이 시추공의 지온구배는 3.04°C/100 m이다. 이 지온구배를 고려하면 약 3,000 m에서 100°C에 도달해야 할 것이다. 그러나 매몰온도, 즉 고지온은 약 4,000 m에서 100°C에 도달하였다. 이와 같

은 불일치는 약 2,500 m에 존재하는 역단층으로 해석할 수 있을 것으로 생각된다. 이 지역은 횡압력에 의하여 역단층이 형성되고 지층이 증복되었기 때문에 상대적으로 하반에 해당되는 지층들의 매몰심도는 더욱 깊어지게 되어 고지온과 현재의 온도 간에는 약 1,000 m의 심도 차이가 존재하는 것으로 생각된다. 역단층에 의한 지층이 반복현상은 그림 2와 그림 3에서 잘 볼 수 있다.

결 론

이 연구는 일라이트-스펙타이트(I-S)의 속성 변화과정을 광물학적 및 화학적으로 잘 보여주고 있다. 즉, 매몰심도와 매몰온도가 증가함에 따라 스펙타이트 성분층은 감소하고 일라이트 성분층은 증가한다. 일라이트화 과정은 사면체층과 사면체층 사이의 층간에서 일어나는데, Si를 Al이 교대함에 따라 사면체층에서 나타나는 전하량을 보충하기 위하여 층간에 K가 유입되는 방식으로 진행되는 것을 보여주고 있다. 또한, 이 I-S 변화를 추적하면 지층의 고지온을 추정할 수 있음을 명백하게 증명해 주고 있다. 보통 퇴적지층의 고지온은 탄질물의 반사도 등에 의하여 추적할 수 있는 것으로 알려져 있지만 실제로 탄질물은 모든 지층에서 산출되는 경우는 드물다(Heroux *et al.*, 1979). 이에 비하여 스펙타이트나 일라이트 점토광물은 거의 모든 퇴적층에서 산출되기 때문에 지층의 고지온을 추정하기 위해서는 점토광물 연구가 유용한 지시자가 될 수 있다. 이 연구는 매몰심도에 따른 성분층의 변화 곡선을 정밀 추적하면 퇴적층의 매몰사와 변화사를 추정하는 데도 이용할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 “대륙붕 석유시스템 및 저류층 통합관리 기술연구” 과제의 일환으로 수행되었다. 논문원고는 조현구 교수와 김영규 교수의 세심한 지적에 의하여 개선되었다.

참 고 문 헌

- 손병국, 정태진, 오재호, 곽영훈 (1994) 의성지역 경상누층군의 열적진화와 속성작용, 한국석유지질학회지, 제2권, 제2호, 83-90.
- Ahn, J.H. and Peacor, D.R. (1986) Transmission and analytical electron microscopy of the smectite-to-illite transition. *Clays and Clay Minerals*, 34, 165-179.
- Altaner, S.P. and Ylagan, R.F. (1997) Comparison of structural models of mixed-layer illite/smectite and reaction mechanisms of smectite illitization. *Clays and Clay Minerals*, 45, 517-533.
- Aronson, J.L. and Hower, J. (1976) Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 2. Radiogenic argon evidence. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 738-743.
- Burtner, R.L. and Warner, M.A. (1986) Relationship between illite/smectite diagenesis and hydrocarbon generation in lower Cretaceous Mowry and Skull Creek shales of the northern Rocky mountain area. *Clays and Clay Minerals*, 34, 390-402.
- Eberl, D.D. (1993) Three zones for illite formation during burial diagenesis and metamorphism. *Clays and Clay Minerals*, 41, 26-37.
- Espitalié, J., Deroo, G. and Marquis, F. (1985) La pyrolyse Rock Eval et ses applications. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 40, 563-784.
- Heroux, Y., Chagnon, A. and Bertrant, R. (1979) Compilation and correlation of major thermal maturation indicators. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63, 2128-2144.
- Hower, J., Eslinger, E.V., Hower, M.E. and Perry, E.A. (1976) Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1. Mineralogical chemical evidence. *Geological Society of American Bulletin*, 87, 725-737.
- Inoue, A., Meunier, A. and Beaufort, D. (2004) Illite-smectite mixed layer minerals in felsic volcanoclastic rocks from drill cores, Kakkonda, Japan. *Clays and Clay Minerals*, 52, 66-84.
- Nadeau, P.H., Wilson, M.J., Mchard, W.J. and Tait, J.M. (1984) Interparticle diffraction: A new concept for interstratified clays. *Clays and Clay Minerals*, 19, 757-969.
- Ozawa, A., Takayasu, T., Ikebe, Y. and Huzioka, K. (1977) Geology of the Honjo district. Quadrangle Series 1:50,000, Akita (6) No. 28. Geological Survey of Japan, 54p.
- Pollastro, R.M. (1990) The illite/smectite geothermometer - Concept, methodology, and application to basin history and hydrocarbon generation. In *Application of Thermal Maturity Studies to Energy Exploration*. Nuccio, V.F. and Barker, C.E., eds., 1-18.
- Pollastro, R.M. (1993) Considerations and applications of the smectite/illite geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of Miocene to Mississippian age. *Clays and Clay Minerals*, 41, 119-133.
- Son, B.-K. (1996) Mineralogy and diagenesis of interstratified I/S in the Tertiary Yeonil sediment, SE Korea. *Clay Science*, 9, 359-384.
- Son, B.-K., Yoshimura, T. and Fukasawa, H. (2001) Diagenesis of dioctahedral and trioctahedral smectites from alternating beds in Miocene and Pleistocene rocks of the Niigata basin, Japan. *Clays and Clay Minerals*, 49, 333-346.
- Środoń, J. and Eberl, D.D. (1984) Illite: In *Micas*, S.W. Bailey, ed., *Reviews in Mineralogy*, Mineralogical Society of America, 13, 495-544.

2006년 10월 18일 원고접수, 2006년 12월 18일 게재승인.