

국내 석유자원탐사 퇴적분지의 광물온도

Mineral Temperatures of the Sedimentary Basins for Petroleum Resources Exploration, Korea

손 병 국(Byeong-Kook Son)*

한국지질자원연구원

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

요약 : 우리나라 육상의 제3기 포항분지와 백악기 경상분지, 그리고 동해와 서해의 대륙붕 퇴적분지에 대하여 일라이트-스멕타이트 점토광물 변화에 의하여 퇴적층 온도를 인지하고, 이를 근거로 하여 석유생성과의 관련성을 연구하였다. 포항분지는 불규칙배열의 일라이트-스멕타이트만 산출되며, 이것은 석유가 생성되기 어려운 100°C 이하의 매우 낮은 온도를 지시한다. 이에 반해, 경상분지는 일라이트만 산출되면, 일라이트 결정도 값에 의하면 이 지역은 200°C 이상의 높은 온도를 지시한다. 따라서 경상분지는 석유생성 단계를 이미 지난 상태인 것으로 생각된다. 동해의 대륙붕 지역은 상위 지층에서 불규칙배열의 일라이트-스멕타이트가 산출되지만, 약 2,500 m 이상의 매몰심도에서는 석유생성을 기대할 수 있는 온도를 지시하는 R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트가 산출된다. 서해 대륙붕 지역은 상위 구간에서는 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트(R=0 I-S)가 나타나며, 중간의 구간에서는 R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=1 I-S)가 나타나고, 하위의 심부 구간에서는 R=3 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=3 I-S)가 나타난다. 이 지역은 석유생성단계에서 가스생성 단계에 이르는 양호한 탄화수소 생성의 온도 조건을 보여주고 있다. 일라이트-스멕타이트 점토광물로 측정된 온도는 우리나라 육상분지에서는 석유가 존재하기 어렵다는 것을 보여준다. 그러나 대륙붕 지역은 석유와 가스를 생성하기 좋은 온도조건이므로 석유가스의 발견이 기대된다.

주요어 : 포항분지, 경상분지, 대륙붕, 일라이트-스멕타이트, 점토광물, 석유생성

ABSTRACT : The potential of petroleum generation was investigated by clay mineralogical changes of illite-smectite on the sedimentary basins: Tertiary Pohang basin and Cretaceous Gyeongsang basin on land, and offshore basins east and west of Korea. Only disordered illite-smectite mixed layer minerals occur in the Pohang sediment, where petroleum generation cannot be expected due to low temperatures below 100°C. By contrast, the Gyeongsang basin is characterized by the occurrence of illite and high temperatures above 200°C which are obtained by illite crystallinity. The high temperatures indicate that the Gyeongsang sediment has already passed through the oil generation stage. The change of disordered illite-smectite to R=1 ordered illite-smectite is shown in the sediment of the East Sea continental shelf area at a depth of 2,500 m. Therefore, the oil generation can be expected in the sediments below the depth of 2,500 m. The sequential change of disordered illite-smectite to R=3 ordered illite-smectite through R=1 ordered illite-smectite occurs in the sediments of West Sea continental shelf area with burial depth which shows the favorable condition for oil and gas generation. The temperatures of sediments measured by illite-smectite indicate that hydrocarbon potential is very low in the onland basins but high in the continental shelf areas.

Key words : Pohang basin, Gyeongsang basin, illite-smectite, clay mineral, petroleum generation

*교신저자: sbk@kigam.re.kr

서 론

세계적으로 석유자원의 양은 고갈되고 있고 새로 발견되는 석유자원의 양은 소비되는 양을 따라가지 못하고 있다. 따라서 세계 각국은 석유자원 확보에 국가의 역량을 집중하는 상황에 있다. 우리나라의 석유탐사는 1970년대 포항지역에서 석유발견이 기대되면서부터 포항분지와 경상계 지층에 대하여 대대적인 석유탐사활동이 진행된 바 있다. 그러나, 육상에서의 석유탐사가 실패함에 따라 이후의 우리나라 석유탐사 활동은 대륙붕 지역에 대하여 집중되어 왔으며, 수십 년 간의 탐사활동결과 대륙붕 6-1광구 지역에서 천연가스가 발견되어 상업적 생산을 시작하였다. 이후에도 추가적인 매장량확보를 위하여 대륙붕에서의 석유탐사는 계속되고 있다. 또한, 동해의 심해 울릉분지에서는 새로운 미래의 에너지 자원으로 부상되고 있는 가스하이드레이트 탐사도 수행되고 있다(강동효 외, 2009; 유동근 외, 2008; 손병국 외, 2008).

과거의 석유탐사는 단순히 배사구조 트랩을 찾아 석유를 발견하였지만 이제는 석유의 생성, 배출, 이동, 집적을 종합적으로 추적하는 석유시스템의 개념을 가지고 석유를 찾고 있다(Magoon and Dow, 1994; 이보라와 손병국, 2007). 이 과정에서 석유의 생성을 위한 퇴적층의 온도를 인지하는 것이 매우 중요하게 되었다. 일반적으로 퇴적층에 존재하는 유기물의 변화로부터 온도를 인지하였으나(Price, 1983; Espitalié *et al.*, 1985; Stach *et al.*, 1982; Peters *et al.*, 2005) 유기물은 모든 지층에서 산출되는 것이 아니기 때문에 점토광물이나 실리카 광물과 같이 200℃ 미만의 낮은 온도에서 변화가 나타나는 광물들을 사용하여 퇴적층의 온도를 추정하고, 이를 바탕으로 석유생성에 대한 기본 틀을 설정하여 석유탐사를 수행해오고 있다. 준안정상의 점토광물인 스�멕타이트는 거의 모든 퇴적암층에 존재하며, 매물온도가 증가함에 따라 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물의 단계를 거쳐 일라이트로 변화되어 간다(Hower *et al.*, 1976). 따라서, 일라이트-스멕타이트 혼합층 점토광물은 근원암의 매물온도 추정을 위한 결정적인 도구가 되고 있다(손병국, 2006; Pollastro, 1990; Pollastro, 1993; Son, 1996; Son *et al.*, 2001). 스�멕타이트는 온도 증가에 따라 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층광물로 변화되며, 온도가 더 증가하게 되면 일라이트로 변화하게 된다. 이 과정은 200℃ 미만의 온도에서

일어나므로 석유생성이 100~180℃ 사이에서 이루어짐을 고려할 때 석유광상을 이루는 퇴적층에 대한 온도 지시자가 될 수 있다. 또한, 매물온도가 더욱 증가하게 되면 일라이트-스멕타이트 혼합층광물의 스�멕타이트 성분층은 모두 일라이트 층으로 변화하여 일라이트 단일광물로 산출된다. 일라이트는 온도가 증가할수록 결정도가 증가하게 되어 X-선 회절도 상에서 더욱 뾰족한 피크로서 나타난다. 피크의 뾰족한 정도는 일라이트 결정도로 표시되며 이 또한 온도의 지시자로서 사용되고 있다(Kisch, 1987; Kisch, 1991; Kübler, 1966; Kübler *et al.*, 1979). 그러므로 퇴적층내의 스�멕타이트-일라이트 변화를 인지하여 온도를 설정하면 석유생성과 석유시스템을 이해하고 석유발견에 이용되어 질 수 있다.

이 연구는 우리나라의 남동부에 분포하는 제3기 퇴적층과 백악기 경상누층군의 퇴적층, 그리고 동해의 대륙붕 석유탐사 지역과 서해의 대륙붕 석유탐사지역을 대상으로 이 지역의 스�멕타이트 및 일라이트 점토광물을 연구하여 각각의 퇴적층 온도를 밝힘으로써 석유생성과의 관련성을 연구한 것이다. 현재 대륙붕에서는 석유탐사가 계속되고 있고 공개가 제한적이기 때문에 한정된 자료와 시료를 사용하여 연구가 되었다. 또한, 시추공명은 가명으로 하였으며 시추공의 위치도 명확히 하지 않았다. 그러나, 지역을 대표할 수 있는 시료를 사용하여 분석하였기 때문에 제시된 결과는 크게 다르지 않음을 밝혀둔다.

대상지역 및 연구방법

포항분지와 대륙붕지역 분지들의 연구를 위하여 과거 석유탐사를 위해 시추된 시추공으로부터 매물 심도별로 이질암 시료를 채취하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 경상분지에 대해서는 야외에서 이질암 시료를 채취하여 분석하였다(그림 1). 포항분지 시추위치는 석유가 제3기 지층을 대표할 수 있는 위치인 포항시 중심부이며 약 400 m가 시추되었다. 석유가 기대되는 제3기 지층의 두께는 매우 얇아서 최대 약 700 m 정도이다. 경상분지에 대해서는 군위와 의성지역의 야외노두에서 층서상의 하위층부터 상위층에 이르는 모든 지층들을 가로지르면서 시료를 채취하였다. 동해의 6-1광구 지역에서 지금까지 약 23개의 석유탐사시추가 이루어졌다. 이 가운데서 전체를 대표할 수 있는 1개의

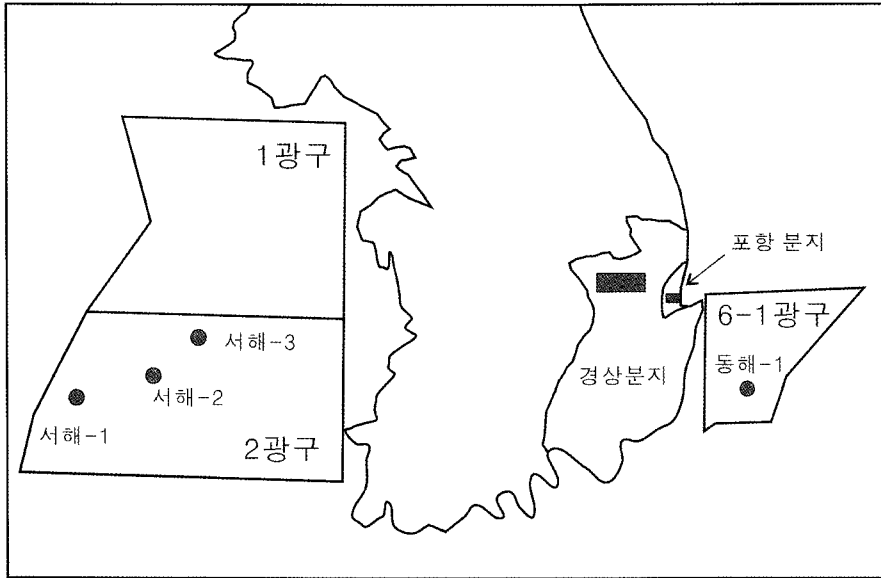


Fig. 1. Areas and wells for study.

시추공에 대하여 심도별로 이질암 시료를 채취하여 분석하였다. 이 지역은 현재 개발 중에 있기 때문에 한개 공의 시료에 대하여 제한된 시료만을 분석할 수 있었다. 그러나 전체를 대표할 수 있는 시추공을 선정하였기 때문에 전체적인 경향성을 해석하는 데는 무리가 없다. 서해 대륙붕 1광구와 2광구 지역에서 현재까지 5개 공이 시추되었으나 이 중 2광구의 3개공에서 이질암 시료를 심도별로 선택하여 분석하였다(그림 1).

채취된 이질암 시료는 통상적인 점토광물 연구 방법에 따라 먼저 2 μm 이하 입도의 시료를 분리하여 X-선회절 분석을 수행하였다. 그러나, X-선회절도에서 일라이트-스멕타이트의 변화를 관찰하기 위해서는 다른 점토광물의 중첩과 간섭을 피해야 하므로 0.2 μm 미만 입도의 시료도 분리하여 X-선 회절분석 하였다. 자연 건조된 방향성 시료에 대하여 먼저 X-선회절 분석을 실시하였으며, 이어서 에틸렌글리콜처리, 열처리를 하여 다시 X-선회절 분석을 실시하였다. NEWMOD 소프트웨어를 사용하여 일라이트-스멕타이트 혼합층광물의 타입, 그리고 일라이트 성분층과 스멕타이트 성분층의 비를 정량적으로 계산하였다(Reynolds, 1985). 스멕타이트 성분층이 완전히 사라지고 일라이트로 변화된 시료에 대해서는 일라이트 피크의 결정도를 Kubler Index와 Weaver Index를 사용하여 계

산하였다(Kisch, 1987; Kisch, 1991; Kübler, 1966; Kübler *et al.*, 1979).

점토광물 변화에 의하여 추정되는 온도와 비교를 위하여 석유탐사에서 흔히 사용되는 록에발 열 분석기를 사용하여 총유기물 함량과 열분해 T_{max} 온도를 분석하였다. 록에발 분석에서 구해지는 열분해 T_{max} 온도는 퇴적층의 온도를 지시할 수 있는 온도의 지시자로 알려져 있다(Espitalié *et al.*, 1985). 록에발 T_{max} 온도는 불활성 기체로 채워진 조건하에서 시료를 600°C까지 가열하는 동안 발생하는 탄화수소 양이 최대가 되는 온도로서, T_{max} 435°C는 퇴적층에서 석유가 생성되기 시작하는 매물온도인 약 100°C와 일치하는 것으로 알려져 있다(Burtner and Warner, 1986). 또한, 경상분지 시료에 대해서는 탄질물 시료를 채취하여 비트리나이트 반사도에 의한 Ro값을 구하였으며 점토광물 변화와 비교하였다(Stach *et al.*, 1982). Ro값은 반사도 0.5%가 되면 석유생성 온도에 도달한 것으로 보고 있다.

국내의 전 지역을 대상으로 한 연구이기 때문에 기존의 석유탐사 보고서로부터 자료를 추출하여 분석된 점토광물 결과와 비교하였다. 그러나 많은 자료는 비공개 자료이기 때문에 이 논문에서는 제한된 자료만 제시하였다.

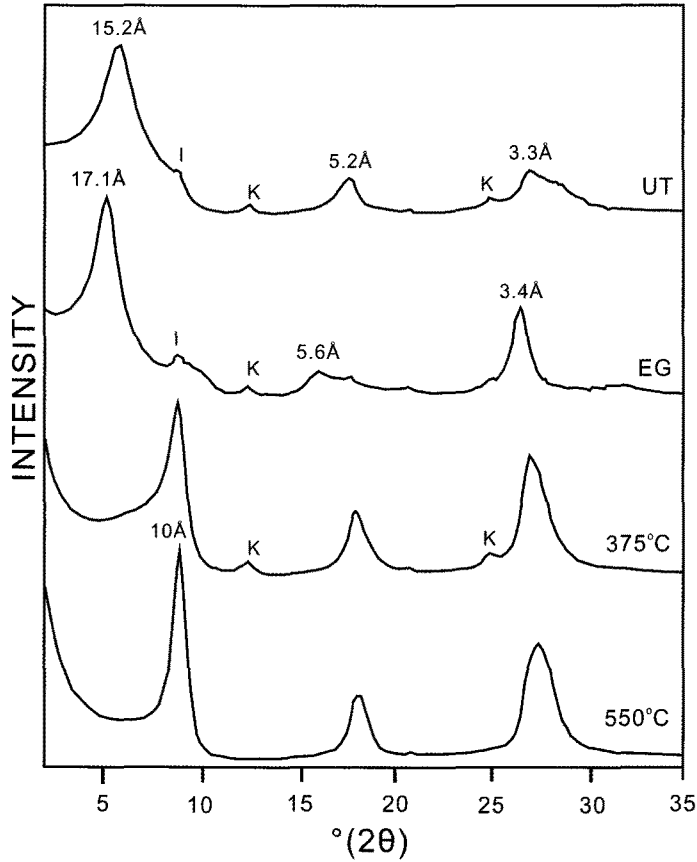


Fig. 2. Representative X-ray powder diffraction patterns of R=0 ordered interstratified smectite-illite in the Pohang mudstone. UT: untreated sample, EG: ethylene glycol sample, 375°C: heated sample to 375°C, 550°C: heated sample to 550°C.

연구결과

포항분지

X-선 회절분석에 의하면 분석된 모든 시료의 X-선 회절도는 전형적인 스�멕타이트 점토광물을 지시하는 X-선 회절도를 보여준다. 즉, 주 피크는 약 15 Å에서 나타나며, 시료를 에틸렌글리콜 처리시 17 Å로 이동한다. 또한, 375°C로 열처리하면 이 피크는 사라진다(그림 2). 그러나, 에틸렌글리콜 처리된 시료의 X-선 회절도에서 17 Å 피크의 저각도쪽 바탕선(baseline)이 상당히 올라가 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 이 스�멕타이트 광물이 상당한 양의 일라이트층(10 Å 성분층)을 가지고 있는 불규칙배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물(R=0, I-S)임을 지시한다(Inoue *et al.*, 1989). 시추공에서 약 50

m 간격으로 시료를 채취하여 분석한 결과를 표 1에 제시하였다. NewMod 소프트웨어에 의하여 계산된 스�멕타이트 성분층은 72~65% 범위이며, 일라이트 성분층 함량은 28~35%에 이른다(그림 3). 그러나 퇴적심도 증가에 따른 점이적인 일라이트 성분층의 증가는 보여주지 않는다(표 1). 결과적으로 포항지역 이질암층을 구성하는 주 점토광물은 완전한 스�멕타이트 성분층만으로 구성되어 있는 스�멕타이트는 아니며, 일라이트 성분층을 함유한 불규칙배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물이다. 따라서 스�멕타이트 성분층이 감소하고 일라이트 성분층이 증가함에 따라 17 Å 피크의 크기는 작아지며 이 피크의 저각도쪽 바탕선의 강도는 증가하는 경향으로 나타난다.

록에발 열분석에 의한 암석 중의 총유기탄소 함량과 열분해 T_{max} 온도를 보면 대부분의 시료는 약

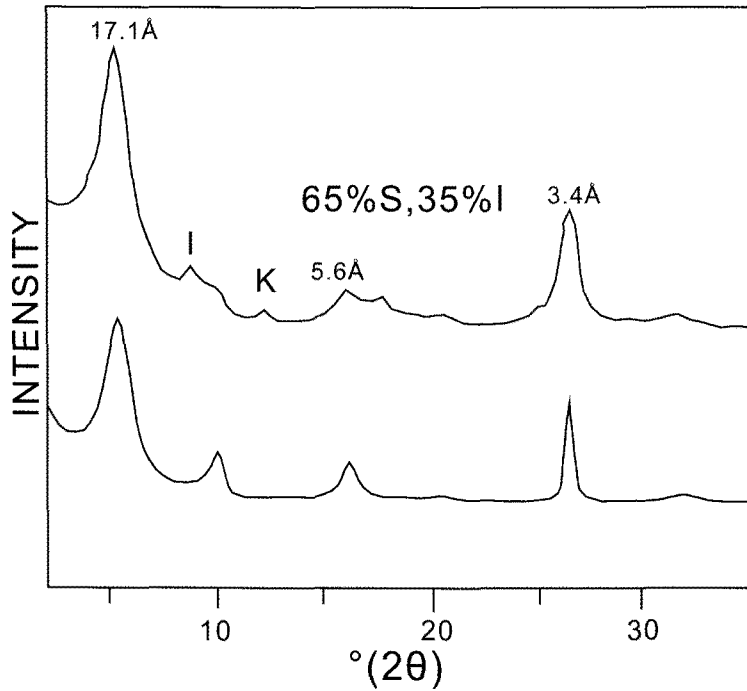


Fig. 3. Actual (upper) and simulated (lower) X-ray powder diffraction patterns of R=0 ordered interstratified smectite-illite with 65% smectite layers and 35% illite layers in the Pohang mudstones.

Table 1. Illite layer percentage in illite-smectite and Total organic carbon (TOC) content by RockEval pyrolysis

Depth (m)	%Illite in I-S	T _{max}	%TOC
103.4	31	426	1.48
137.4	31	428	1.36
149.8	35	429	1.6
195	33	427	1.56
252	28	428	1.96
307.7	30	421	1.48
349	32	427	1.28
417	32	419	1.38

1.5%의 총 유기탄소 함량을 보여주고 있다(표 1). 일반적으로 총유기탄소 함량이 0.5% 이상을 가진 이질암을 석유생성 가능한 암석으로 분류하고 있기 때문에 포항분지의 이질암은 석유를 생성하기에 매우 양호한 석유근원암으로 분류될 수 있다(Peters, 2005). 그러나, 열분해 T_{max} 온도는 419~429°C를 보여주며 석유생성 온도인 T_{max} 온도 435°C에는 도달하지 못하고 있다.

경상분지

경상분지 이질암에는 스택타이트나 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물은 존재하지 않으며 일라이트만 산출되고 있다. 이는 경상분지 이질암은 이미 상당한 온도에 도달하여 있음을 지시한다. 따라서 경상분지에 대해서는 일라이트 결정도, 즉 온도 상승에 의하여 일라이트의 10 Å 피크가 좁고 뾰족해지는 정도를 측정하였다. 일라이트 결정도는 Kubler 지수와 Weaver 지수로써 측정하였다(Kisch, 1987; Kisch, 1991; Kübler, 1966; Kübler *et al.*, 1979). 각 지층의 이질암에서 측정된 Weaver 지수와 Kubler 지수 값을 표 2에 정리하였다. 최하부층인 낙동층으로부터 최상부층인 사곡층에 이르기까지 층서상의 위치에 따른 결정도의 증가현상, 즉 하부층이 상부층에 비하여 결정도가 크게 나타나는 현상은 특별히 관찰되지 않는다. 측정된 일라이트 결정도 값을 그림으로 도시하면 대부분의 일라이트 결정도 값은 다이어제네시스 지역과 엔키존 지역의 경계부와 엔키존의 내부에 위치한다(그림 4). 특히, 눈에 띄는 것은 엔키존 내부 깊숙이 위치하는 값들

Table 2. Crystallinity values and Vitrinite Ro

Formation name	Kubler index	Weaver index	Vitrinite %Ro
Sagog Fm.	0.34 ~ 0.55	1.98 ~ 6.77	
Geomgog Fm.	0.30 ~ 0.42	3.08 ~ 4.65	
Hupyeongdong Fm.	0.32	4.17	
Iljig Fm.	0.30 ~ 0.46	2.55 ~ 3.51	2.32 ~ 3.58
Jinju Fm.	0.45 ~ 0.62	1.73 ~ 2.57	2.63 ~ 3.27
Hasandong Fm.	0.45 ~ 0.52	1.97 ~ 2.58	2.83 ~ 3.06
Nagdong Fm.	0.39 ~ 0.54	2.02 ~ 2.36	2.62 ~ 3.78

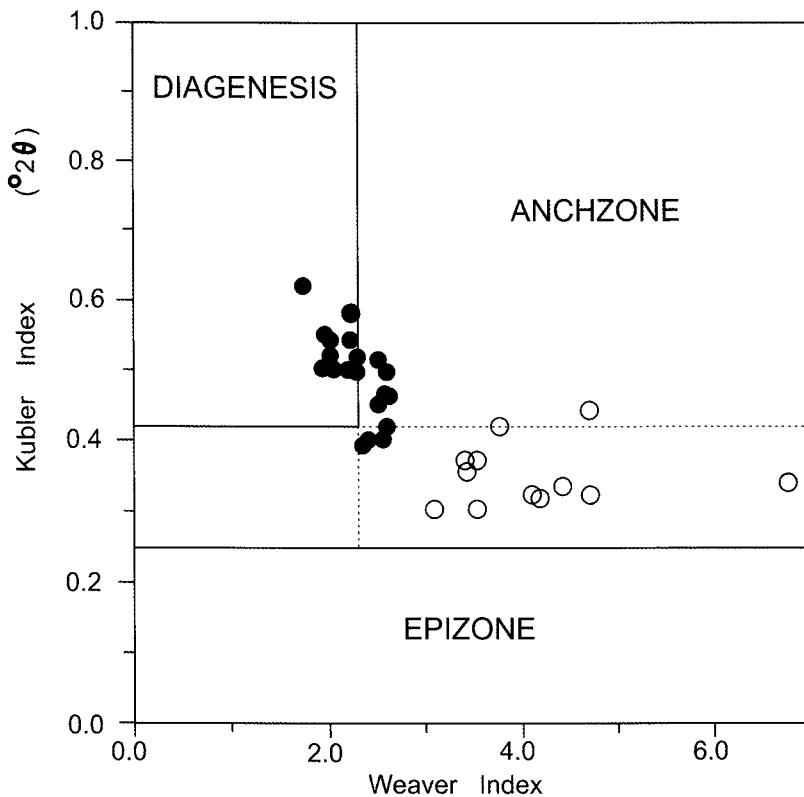


Fig. 4. Distribution of illite crystallinity values based on Kubler and Weaver index. Open circles indicate samples from the outcrops close to intrusives, and solid circles indicate samples from the outcrops without intrusives.

을 보여주는 시료는 모두 주변 지역에 화성암 관입체가 존재하는 지역에서 채취한 시료들이다. 관입체의 영향을 받지 않은 곳에서 채취된 시료는 모두 다이아제네시스 지역과 앵키존 지역의 경계부에 위치한다(그림 4). 일반적으로 다이아제네시스지역과 앵키존지역의 경계는 약 200 °C에 이르는 것으로 알려져 있다.

동해 대륙붕 분지

동해의 울릉분지 남서연변부에 해당하는 대륙붕 6-1 광구지역은 돌고래와 고래로 이름 붙여진 석유 유망구조가 발견되어 왔으며, 이 유망구조들에 대하여 시추작업이 이루어져 왔다. 이 시추공 중 대표적인 동해-1공 시료에 대하여 일라이트-스펙타이

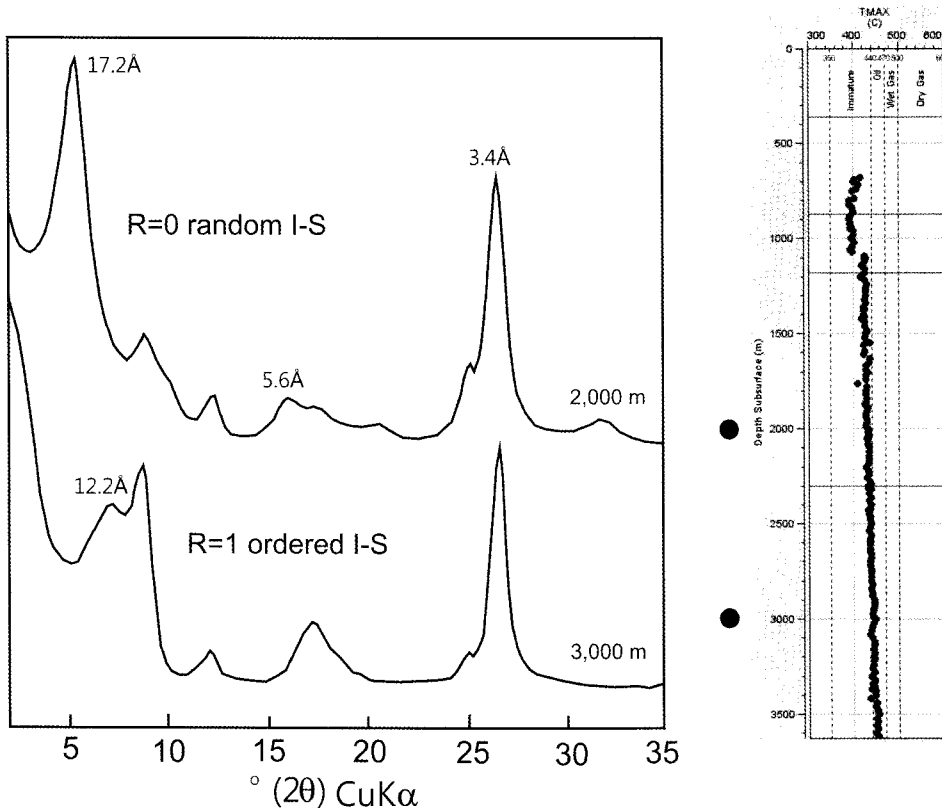


Fig. 5. Representative X-ray powder diffraction patterns of interstratified smectite-illite with RockEval T_{max} . Solid circles indicate the sample depths of 2,000 m and 3,000 m.

트 혼합층광물 분석을 실시하였다(그림 5). 분석 결과 2,500 m까지의 상위 구간에서는 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트(R=0 I-S)가 산출되며 하위 심부 구간에서는 R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=1 I-S)가 산출되는 것이 확인되었다. 에틸렌글리콜 처리된 시료에서 상부 구간의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물은 17.2 Å에서 주 피크가 나타나며, 저각도 쪽 바탕선이 상당히 올라가 있는 것을 볼 수 있다(그림 5). 이것은 이 일라이트-스멕타이트 혼합층광물이 불규칙 배열의 R=0 I-S임을 지지하고 있다. 한편, 그림 5의 X-선 회절도에서 볼 수 있는 바와 같이 2,500 m보다 깊은 심부구간의 시료에서는 5~8° (2θ) 사이의 위치에서 피크가 나타나는데, 이것은 전형적인 R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물임을 지지하고 있다(Moore and Reynolds, 1997).

서해 대륙붕 분지

서해 대륙붕 시추공들은 전 시료 모두, 상위 구간에서는 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트(R=0 I-S)가 나타나며, 중간의 심도 구간에서는 R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=1 I-S)가 나타나고, 하위의 심부 구간에서는 R=3 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=3 I-S)가 산출되고 있다(그림 6~8).

먼저 가장 서쪽에 위치하는 서해-1공 시료의 X-선 회절도를 그림 6에 매물심도 증가에 따라 도시하였다. R=0 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물은 에틸렌글리콜 처리시 17 Å (약 5° 2θ)에서 주 피크가 나타난다. 중간의 R=1 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물은 녹리석의 14 Å 피크와 일라이트의 10 Å 피크 사이에서 넓게 나타난다. 그리고 하위 구간의 R=3 배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물은 10 Å에서 나타나며 저각도 쪽이 불룩한 비

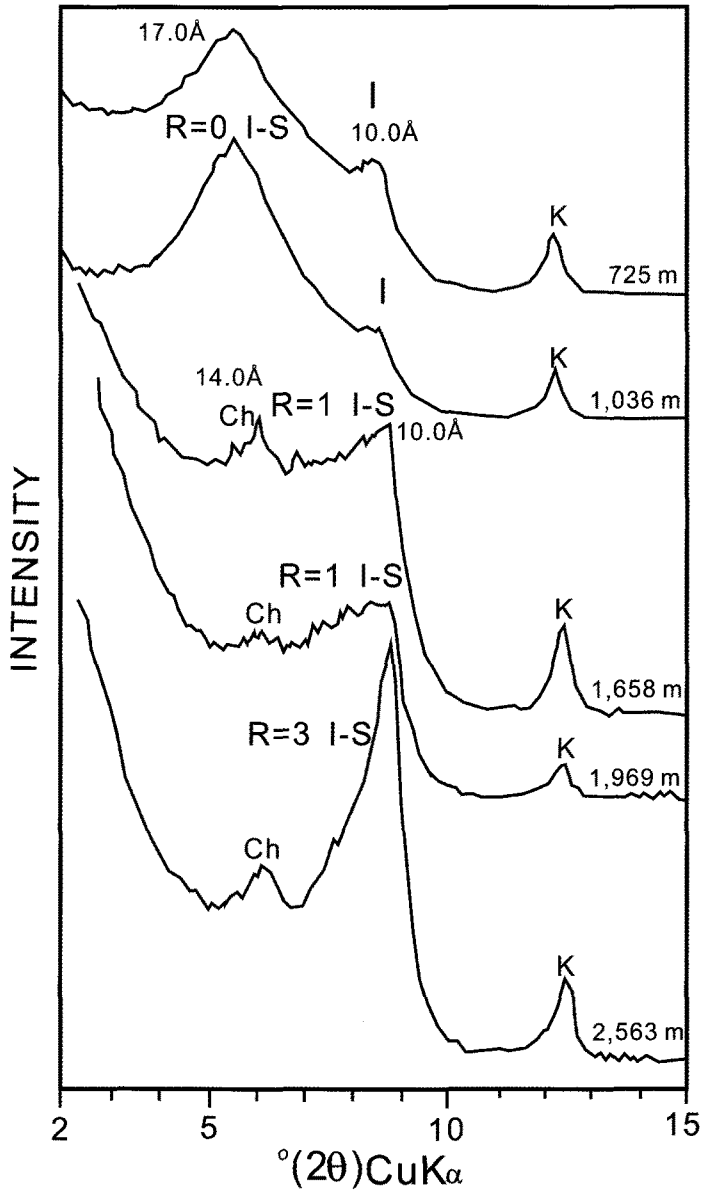


Fig. 6. X-ray powder diffraction patterns of interstratified smectite-illite with increasing depth in the West Sea-1 well. Sample depths are indicated at the ends of each pattern.

대칭형으로 나타나는 특징을 보인다(그림 6). 이 시추공은 매물심도가 증가함에 따라 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 즉, 1,658 m보다 상위 구간에서는 불규칙 배열(R=0)의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물이 산출되고 1,658 m부터는 R=1 배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물이 산출된다. 또한 2,563 m 하

위에서는 R=3 배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물이 산출된다.

서해-2공은 1,700 m에서 2,500 m 사이 구간의 시료가 확보되지 않았기 때문에 이 구간의 시료는 분석되지 않았다. 시료가 없는 구간의 상위는 불규칙(R=0) 배열의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물이 산출되며, 하부는 R=3 규칙배열의 일라이

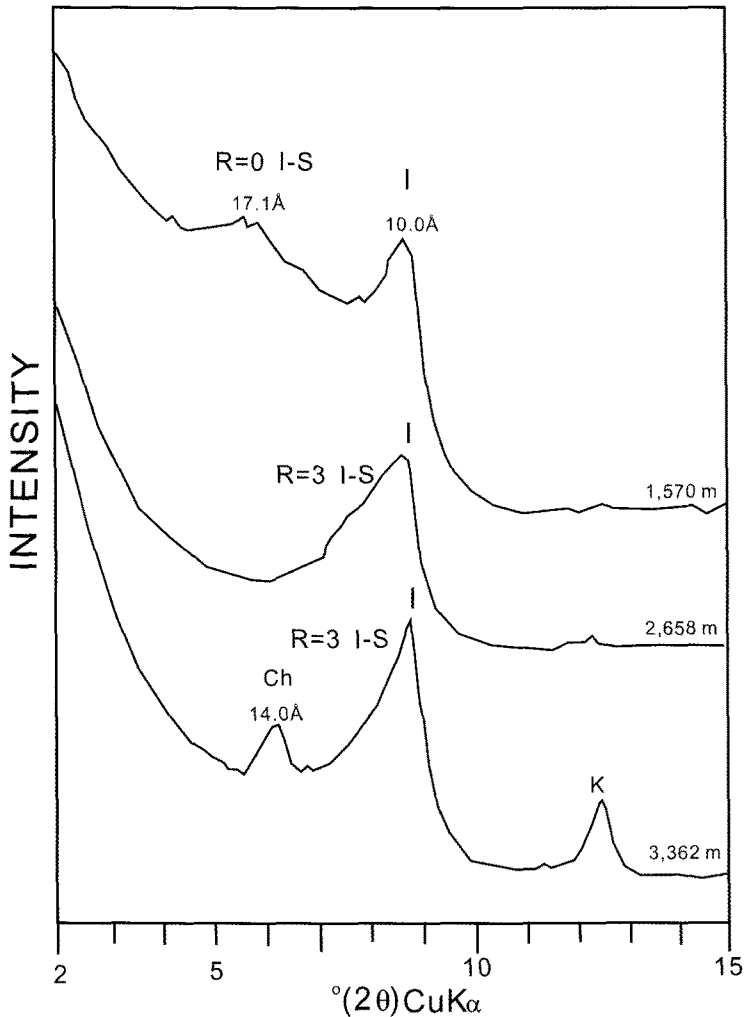


Fig. 7. X-ray powder diffraction patterns of interstratified smectite-illite with increasing depth in the West Sea-2 well.

트-스멕타이트(I-S) 혼합층광물이 산출된다(그림 7). 따라서 시료가 없는 1,700 m에서 2,500 m 사이 구간에서 R=1 규칙형 배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물이 산출될 가능성이 있다. 전체적으로, 서해-2공의 퇴적심도에 따른 온도 증가 경향은 서해-1공의 경우와 비슷할 것으로 생각된다.

서해-3공에서도 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물의 변화를 뚜렷하게 볼 수 있다. 631 m까지의 상위구간에서는 불규칙 배열(R=0)의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물이 산출된다. 631 m에서 1,372 m 사이에서 R=1 배열의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물이 산출된다. 1,372 m

이하의 구간에서는 R=3 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물이 산출된다(그림 8).

토 의

육상퇴적분지의 석유생성 온도

포항지역은 우리나라에서 가장 석유산출이 기대되었던 곳이다. 그러나, 이 지역 제3기 해성퇴적층에서는 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물(R=0 I-S)만 산출되고 있다. 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층광물은 시추된 총 심

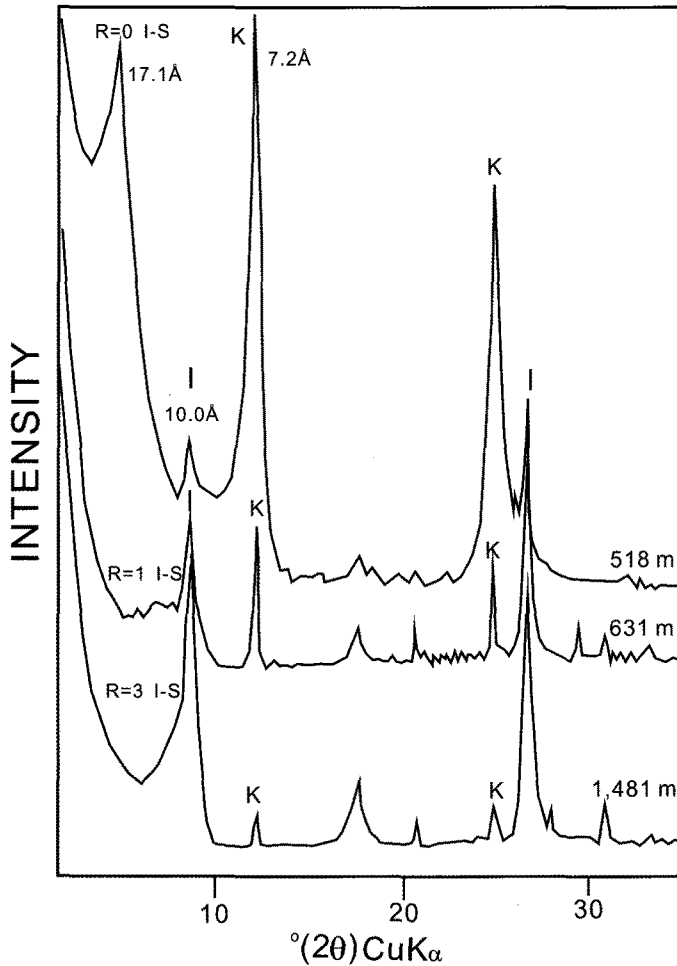


Fig. 8. X-ray powder diffraction patterns of interstratified smectite-illite with increasing depth in the West Sea-3 well.

도구간에서 산출되며, 심도에 따른 일라이트 성분층의 증가와 스�멕타이트 성분층의 감소는 뚜렷하게 나타나지 않고 있다(표 1). 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물에서 규칙형 혼합층 광물로 변화하는 온도는 약 100°C로서 이는 석유의 생성이 시작되는 온도(Oil Window)와 거의 일치한다(Pollastro, 1990; Pollastro, 1993; 그림 9). 또한, R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물이 존재하는 구간은 석유생성 구간의 온도와 일치하며, 가스생성구간은 R=3 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물의 산출과 일치된다(그림 9). R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물의 존재가 석유가 생성될 수 있는 온도, 즉 오일윈도우를 지시한다는

것을 고려한다면, 포항분지 지역은 석유가 생성될 수 있는 온도에 도달하지 못하였음을 지시한다. 또한, 매물심도에 따른 일라이트 성분층의 감소도 관찰되지 않는다. 다만, 최대 35%까지 일라이트 성분층을 가진 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물이 나타나는 데, 이는 약 50~70°C 정도의 매물온도를 지시하는 것으로 추정된다(Burtner and Warner, 1986). 이와 같이 매물온도가 매우 낮게 나타나는 이유는 제3기 퇴적층의 두께가 700 m를 넘지 않으며, 이 지역은 매물 후에 융기되고 삭박되어 더 이상 온도가 상승하지 못한 것으로 생각된다.

경상분지 지층 대부분의 일라이트 결정도 측정값들은 다이아제네시스 지역과 앤키존 지역의 경

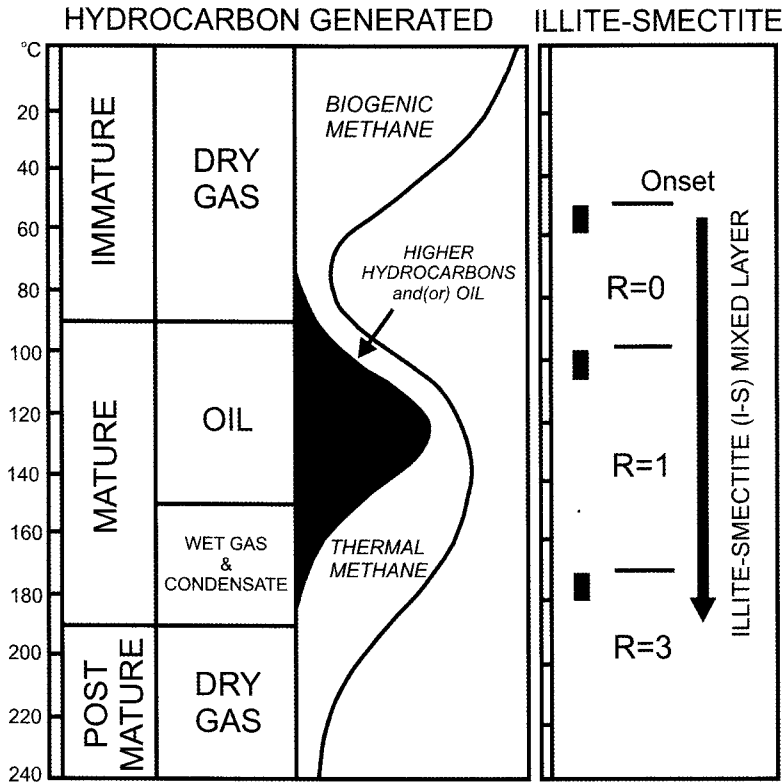


Fig. 9. Hydrocarbon generation temperatures with change of illite-smectite (modified after Pollastro, 1990).

계부에 도시되는 것과 앵키존 깊숙이 위치되는 것들로 나누어진다(그림 4). 앵키존에 깊이 들어가 위치하는 값들을 보여 주는 시료들은 대부분 시료를 채취한 주변에 관입체가 발달되어 있는 곳에서 채취된 시료에서 나타나고 있다. 다이아제네시스지역과 앵키존지역의 경계부의 온도는 약 200°C로 알려져 있다. 따라서, 경상누층군의 이질암석 중에서 관입체의 영향이 적은 지역에서 채취한 시료들의 일라이트 결정도 분석 결과로부터 이지역의 매물온도는 약 200°C를 지시하는 것으로 해석될 수 있다. 경상분지의 온도가 200°C 이상임을 고려하면 이 지역에는 이미 석유의 생성 단계를 지났으며 건성가스의 생성 단계에 도달하여 있음을 알 수 있다(그림 9).

석유가 생성될 수 있는 양호한 온도 조건이 약 100~170°C임을 생각한다면 포항지역의 제3기분지는 이 온도에 도달하지 못한 상태이고 백악기 경상분지 지역은 이미 이 온도를 넘어선 단계에 있음을 알 수 있다. 따라서 우리나라 육상지역에서는 석유의 존재를 기대하기 어려운 상태인 것으로 생

각된다.

대륙붕 퇴적분지의 석유생성 온도

동해 대륙붕 지역은 제3기 마이오세 이후에 퇴적된 두꺼운 해성 퇴적물로 구성되어 있으며, 일라이트-스멕타이트 분석에 의하면 약 2,400 m 심도에서 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트(R=0 I-S)에서 R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=1 I-S)로 변화되는 것이 관찰된다. 또한, 거의 같은 심도에서 RockEval 열분석 온도도 T_{max} 435°C에 도달하고 있다(그림 5). 매물심도에 따른 이와 같은 변화는 이 지역의 지층에서 일반적으로 관찰된다. 동해-1공 주변에서 일라이트-스멕타이트 혼합층광물은 이 지역 지층을 구성하는 주 광물이며 약 2,500 m 이상의 매물심도에서부터는 R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=1 I-S)가 산출된다. R=1 규칙배열의 일라이트-스멕타이트(R=1 I-S)가 나타나기 시작하는 매물심도는 RockEval 열분석 온도 T_{max} 온도 435°C와도 잘 일치하고 있으며 이 심

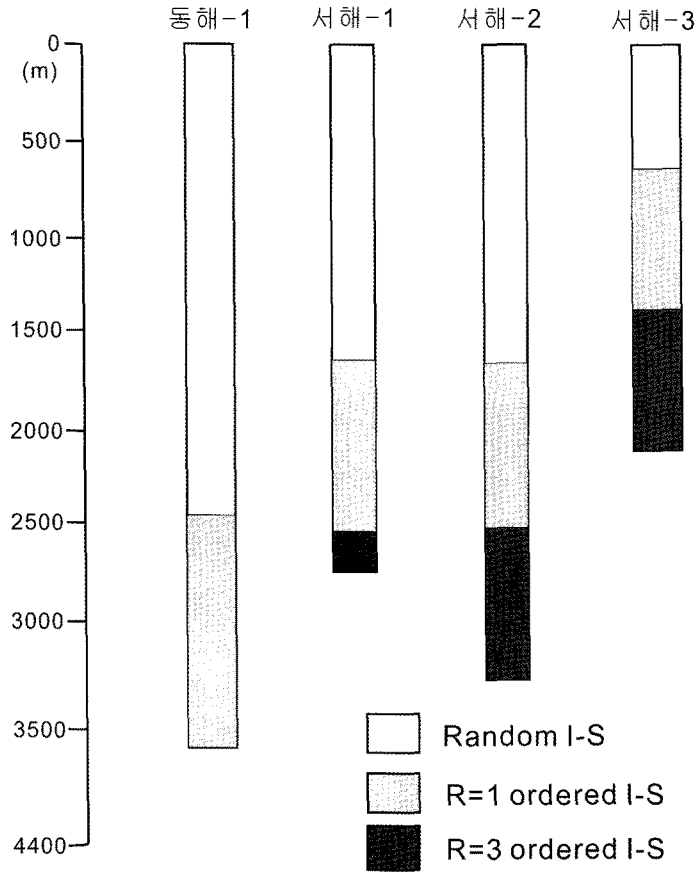


Fig. 10. Changes of illite-smectite in ordering type with increasing burial depth.

도는 탄화수소가 생성될 수 있는 온도에 해당된다. 이 지역의 모든 시추공의 T_{max} 온도 435°C 는 2,500 m보다 깊은 매몰심도에서 도달하고 있다. 이것은 이 지역의 심부는 석유가 생성될 수 있는 조건에 있다는 것을 지시하고 있다.

서해광구 시추공의 경우 전 시료 모두 상위 구간에서는 불규칙 배열의 일라이트-스멕타이트($R=0$ I-S)가 나타나며, 중간 구간에서는 $R=1$ 규칙배열의 일라이트-스멕타이트($R=1$ I-S)가 나타나고 있으며, 하위의 심부 구간에서는 $R=3$ 규칙배열의 일라이트-스멕타이트($R=3$ I-S)가 나타난다. 서해-1공은 $R=1$ 배열의 I-S가 나타나는 1,658 m부터 석유 생성 온도에 도달한 것으로 추정된다. 이 심도 이하의 퇴적층에 유기물이 함유되어 있었다면 석유 생성단계에 도달하였을 것이다. 또한 약 2,563 m에서 $R=3$ 규칙배열의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물이 산출되는데, 이 심도는 가스생성 구간의 온

도를 지시하여 준다. 따라서 이 심도 이하의 퇴적층에 유기물이 함유되어 있었다면 가스 생성이 기대되었을 것이다. $R=1$ 일라이트-스멕타이트가 형성되는 온도를 100°C 로 생각할 수 있으며 $R=3$ 일라이트-스멕타이트가 나타나는 온도를 $170\sim 180^{\circ}\text{C}$ 라는 점을 고려할 때 이 시추공 하부는 매우 높은 온도를 지시하고 있다(그림 9). 서해-3공은 $R=1$ 배열의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물 생성 구간인 631 m에서 1,372 m 사이의 구간이 석유 생성구간인 것으로 생각된다. 1,372 m 하위의 구간은 가스생성 단계에 해당될 것으로 생각된다. 서해-3공은 서해-1공과 서해-2공과 비교하여 볼 때 $R=1$ 배열의 일라이트-스멕타이트(I-S) 혼합층 광물이 처음 나타나는 구간은 1,000 m 정도 앞게 나타난다. 3개 시추공의 열성속도 구간을 비교하여 보면 서해-1공과 서해-2공은 비슷한 열성속도 구간을 보여주며, 서해-3공은 이들보다 높은 열성속도를 보

여준다. 이것은 서해-3공은 서해-1공과 서해-2공 지역보다 더욱 용기되었거나 주변에 화산암체와 같은 후기의 열공급원이 있었을 것으로 생각된다.

전체적으로 보면 서해 대륙붕 분지에서 시추된 지역은 심추심도에 비하여 높은 온도를 지시하여 주며 동해 대륙붕 분지의 온도와 비교하여 볼 때 상당히 높은 온도를 지시한다(그림 10). 이는 두 지역은 퇴적시기와 퇴적환경이 다르기 때문인 것으로 생각된다. 동해 분지는 전형적인 해성퇴적분지이며 신생대 마이오세에 퇴적되었다(이보라와 손병국, 2007). 그러나 서해분지는 육성환경에서 퇴적되었으며 퇴적시기도 동해분지의 퇴적시기보다 앞선다. 서해분지의 퇴적시기에 대해서는 시대를 결정할 수 있는 뚜렷한 고생물의 산출이 없어 백악기라는 설과 초기 신생대라는 설이 있지만 최근의 연구들은 백악기 설이 우세하게 대두되고 있다. 그러나 점토광물에 의한 석유 생성온도의 관점에서 볼 때 서해 퇴적분지는 동해분지에 비하여 상당히 높은 온도를 경험한 상태이며 가스생성 단계에 도달하였다.

결 론

저온에서도 민감하게 변화하는 일라이트-스멕타이트 점토광물에 의해 인지된 우리나라 육상과 대륙붕의 주요 퇴적분지의 온도는 이 지역들에 대한 석유생성 잠재력 정보를 제공한다. 포항분지 퇴적층은 100℃ 미만의 온도를 나타내고 있고 경상분지는 200℃ 이상의 높은 온도조건에 있다. 석유의 생성을 위한 적정온도 조건이 약 100~170℃임을 고려한다면 포항분지는 석유생성 온도 조건에 미치지 못하고 있으며, 경상분지 이미 석유생성 온도를 지난 것으로 생각된다. 따라서, 점토광물 온도 분석에 의한 국내 육상의 포항분지와 경상분지는 석유의 존재가능성이 낮은 것으로 생각된다.

그러나, 대륙붕 지역의 퇴적층 온도는 탄화수소 생성에 적합한 온도 조건에 들어 있음을 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물은 지시하여 준다. 동해의 대륙붕 분지는 2,500 m보다 깊은 심도에서 약 100℃의 석유생성 온도에 도달하였기 때문에 분지의 심부에서 석유나 가스가 생성되었을 것이며, 생성된 석유가스가 상위의 다공질 저류층으로 이동하여 집적되었을 것이다. 실제로 이 지역에서 양호한 가스층이 발견되어 생산되고 있는 것은 이 조건을 지지해 주고 있다. 서해 대륙붕 지역은 석유생성단

계에서 가스생성 단계에 이르는 양호한 탄화수소 생성 온도 조건을 보여주고 있다. 그러나 이 지역에서는 아직 석유나 가스는 발견되지 않고 있다. 이것은 이 지역 퇴적층은 충분한 양의 유기물을 함유하고 있지 못하고 있기 때문인 것으로 생각된다. 그러나, 석유가스 생성온도에 들어 있기 때문에 좀 더 충분한 탐사가 이루어지고 유기물이 풍부한 지역을 시추하게 된다면 석유발견이 가능할 것으로 보인다.

석유탐사의 새로운 개념과 새로운 석유자원의 개발이 활발히 진행됨에 따라 광물 연구의 중요성도 점차로 증가하고 있다. 석유 퇴적층에 대한 광물학적 정보는 석유시스템 분석과 저류트랩을 찾는 기초자료를 제공할 수가 있기 때문에 석유탐사에 크게 기여하고 있으며, 석유 발견확률을 향상시킬 수 있다는 것을 이 연구는 보여주고 있다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 연구과제 “석유탐사 자료의 통합정보화 및 정보시스템 개발”의 지원으로 수행되었다. 원고는 심사과정에서 개선되었다. 심사자들에 게 감사드린다.

참고문헌

- 강동효, 유동근, 박장준, 류병재, 구남형, 김원식, 박관순, 박근필, 김지수 (2009) 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 부존형태. 지질학회지, 45, 143-155.
- 손병국 (2006) 일본 제3기 해성 퇴적분지에서의 스멕타이트 매물 속성작용. 한국광물학회지, 19, 221-229.
- 손병국, 권영인, 천종화 (2008) 울릉분지 가스하이드레이트의 지시자 “자생 아라고나이트”. 한국암석학회, 한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 70-73.
- 유동근, 강동효, 구남형, 김원식, 김길영, 김병엽, 정순홍, 김영준, 이호영, 박근필, 이광훈, 박수철 (2008) 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 부존 지구물리증거. 지질학회지, 44, 645-655.
- 이보라, 손병국 (2007) 동해 울릉분지 남서연변부 대륙붕 지역의 석유시스템 모델링. 지질학회지, 43, 477-499.
- 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.
- Espitalié, J., Deroo, G., and Marquis, F. (1985) La pyrolyse Rock Eval et ses applications. Revue de l'Institute Francais du Petrole, 40, 563-784.

- 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., Bouchet, A., Velde, B., and Meunier, A. (1989) Convenient technique for estimating smectite percentage in randomly interstratified illite/smectite minerals. *Clays and Clay Minerals*, 37, 227-234.
- Kisch, H.J. (1987) Correlation between indicators of very low metamorphism. In: Frey, M. (ed.), *Low Temperature Metamorphism*. Blackie, Glasgow, 227-304.
- Kisch, H.J. (1991) Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory samples. *Journal of Metamorphic Geology*, 9, 665-670.
- Kübler, B. (1966) La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme. In: Schaer, J.P. (ed.), *Colloque sur les Etages Techniques*, Neuchatel, 105-122.
- Kübler, B., Pittion, J.-L., Heroux, Y., Charollais, J., and Weidmann, M. (1979) Sur le pouvoir réflecteur de la vitrinite dans quelques roches du Jura, de la Molasse et des Nappes préalpines, helvétiques de penniques, *Ecologae Geologicae Helvetiae*, 72, 347-373.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G. (1994) The petroleum system from source to trap. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir* 60, 3-24.
- Moore, D.M. and Reynolds, R.C. (1997) *X-ray diffraction and the Identification and analysis of clay minerals*. Oxford University, 378p.
- Peters, K.E., Walters C.C., and Moldowan, J.M. (2005) *The biomarker guide*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1155p.
- Pollastro, R.M. (1990) The illite/smectite geothermometer - Concept, methodology, and application to basin history and hydrocarbon generation. In: Nuccio, V.F. and Barker, C.E. (eds.), *Application of Thermal Maturity Studies to Energy Exploration*, 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.
- Price, L.C. (1983) Geologic time as a parameter in organic metamorphism and vitrinite reflectance as an absolute paleo-thermometer. *Journal of Petroleum Geology*, 6, 5-38.
- Reynolds, R.C. Jr. (1985) NEWMOD, A computer program for the calculation of one-dimensional diffraction patterns of mixed-layered clays: R. C. Reynolds, Jr., 8 Brook Rd., Hanover, NH.
- 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.
- Stach, E., Mackowsky, M.-Th., Teichmüller, M., Taylor, G.H., Chandra, D., and Teichmüller, R. (1982) *Stach's textbook of coal petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 535p.

접수일(2011년 8월 16일), 수정일(1차 : 2011년 9월 9일),
 게재확정일(2011년 9월 22일)