

해설



석유개발과 점토광물

손 병 국

한국지질자원연구원 정책연구실

퇴적층 내에 함유되어 있는 유기물은 지하 심부의 온도 및 압력 조건에서 변화를 하게되며, 어느 일정 조건이 되면 완전히 석유로 변하는 것으로 알려져 있다. 즉, 프랑크톤의 유해와 식물편 등 유기물을 다량 함유하고 있는 이질암이 지하에 매몰되어 온도가 올라가게 되면, 함유되어 있던 생물체의 고분자 유기물, 탄수화물, 단백질, 지질, 리그닌 등의 성분에서부터 탄산가스와 물이 빠져나가고, 산소가 감소하게 되며, 탄화수소만 풍부하게 된다.

이와 같은 과정을 유기물이 성숙된다고 하는데, 이 성숙과정을 거쳐 유기물은 석유와 천연가스로 변하게 된다. 이때 점토광물은 유기물을 함유한 이질암 지층을 구성하는 주성분이고 유기물과 같은 온도·압력 조건에서 변화하기 때문에, 이질암 지층에서 일어나는 점토광물 변화를 추적하면 석유생성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이질암에서 생성된 석유는 압력이 낮은 상부로 이동하게 되고 사암과 같은 입자 사이에 공간이 있는 지층을 만나게 되면 석유를 집적시키게 된다. 이처럼 사암과 같은 공극이 풍부한 암석이 석유저류암이 될 수 있다. 그런데 사암 내의 공극에는 점토광물의 침전이 활발히 일어나기 때문에, 점토광물은 공극률과 투수율에 영향을 주어져 저류층의 특성에 영향을 줄 뿐만 아니라 석유생산

과정에서도 커다란 영향을 주게 된다.

또한 석유시추에서 필수 불가결하게 사용되고 있는 시추이수(drilling mud)의 주성분은 점토광물이다. 석유시추에서 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 로터리식 시추에서 사용되고 있는 이수는 일종의 친수 콜로이드이고, 이 콜로이드의 주성분은 직경 2 μ m의 점토광물이다. 이 점토광물은 이수의 역할 중 가장 중요한 시추공벽 형성을 위한 성질, 점성과 첨가물질의 현탁 등과 같은 유동학적 모든 성질을 나타내는 이수의 주요 구성성분이다(須藤, 1966; Bourgoyne et al., 1991).

이처럼 점토광물은 석유의 생성과 보존 뿐만 아니라 석유시추에도 관련되어 있기 때문에 석유탐사 및 개발에서 그 이용가치가 인정되고 있다. 따라서 이 글에서는 석유지질학적 측면에서 점토광물의 역할과 석유공학적인 측면에서 점토의 역할을 기술하고자 한다.

석유의 생성과 점토광물

매물온도가 상승함에 따라 유기물의 성숙은 무기물 즉, 광물의 변화와 깊게 관련되어 진행된다. 이암에 일반적으로 함유되어 있는 스�멕타이

트는 고분자의 유기물에서 원유의 구성물질인 포화탄화수소로 변화되는 성숙반응에 촉매로서 작용을 한다고 한다(Johns and Shimoyama, 1972). 또한, 스멕타이트의 층간에는 양이온과 물 등이 분포되어 있지만 탄화수소를 흡착하는 능력도 있다. 특히 유기물이 성숙되는 동안에 생긴 탄화수소를 흡착하는 능력도 있다. 이처럼 스멕타이트는 석유의 생성에 관련되어 있다. 지하에서 석유가 생성되기 시작하는 약 80~100℃ 정도의 온도에서 스멕타이트는 스멕타이트/일라이트 혼합층 광물로 변화되고 이 과정에서 대량의 물이 방출된다(그림 1: Johns and Shimoyama, 1972).

이와 같이 방출된 물은 일부의 유기물을 녹이거나 생성된 석유를 이동시킬 수 있다. 이때 유기물의 성숙에 의해 생긴 유기산이 지층수로 용해되어 나가는 것도 알려져 있다. 이 유기산을 함유한 지층수는 사암 내의 장석 등 입자를 용해

하는 성질을 가지고 있다. 이때 일부는 지층수 중에 용해된 알미늄, 규소 등에서 카올리나이트로 침전하지만 많은 부분이 공극으로 남는다. 이렇게 하여 생긴 공극(소위 2차공극)이 양호한 저류암을 형성한다.

이처럼 온도상승에 수반되는 유기물의 성숙과 점토광물의 변화는 하나의 일관된 관계로서 상호작용에 의하여 석유가 생성되고 이동되어 석유광상이 형성된다. 점토광물은 석유광상의 형성에 도움만을 주는 것은 아니다. 이질 사암은 함유된 점토성분이 공극을 막기 때문에 저류암으로서의 능력을 저하시키는 경우도 있다. 따라서 석유개발은 점토광물의 특성을 충분히 고려하여 수행될 필요가 있는 것이다.

점토광물 지질온도계

점토광물은 다른 광물, 암석조각과 함께 하천수에 의하여 호수나 바다와 같은 분지 지역으로 운반된다. 분지에 계속하여 흙과 모래가 운반되어 들어가서 퇴적을 계속하게 되면 최초에 퇴적된 퇴적물은 계속하여 지하 깊은 곳에 매몰된다. 퇴적 직후 모래와 흙은 압력과 화학반응에 의하여 고결되어 사암과 이암 혹은 셰일로 변해간다. 지질학에서는 퇴적 직후부터 매몰에 수반되어 퇴적물에서 일어나는 다양한 물리화학적 변화 전체를 숙성작용이라고 부르고 있다.

지하의 심부로 갈수록 온도와 압력이 상승하기 때문에 매몰된 퇴적물 내의 점토광물은 퇴적된 직후에 고온·고압의 조건이 된다. 지각내부의 온도 상승률을 나타내는 지하증온율의 평균치는 약 30℃/km 이다. 예를 들면, 지하 2km에서는 온도는 약 60℃, 해수 등에 의한 수압력을 제외하고 생각하면 압력은 약 200기압까지 상승한다. 일반적으로 온도가 상승하면 반응속도가 크

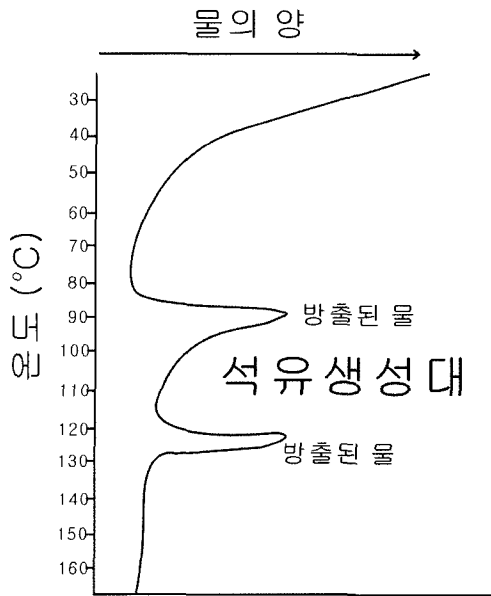


그림 1. 퇴적층 내에서 매몰온도 증가에 따른 물의 양.

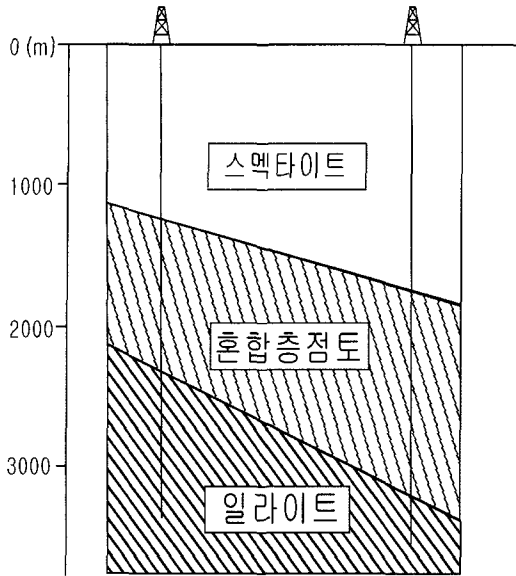


그림 2. 매몰심도 증가에 따른 점토광물의 변화.

게되기 때문에 저온에서는 거의 일어나지 않던 점토광물의 결정구조 변화를 수반한 반응이 고온에서는 활발히 일어나게 된다(古賀, 1997; 大津賀, 1997). 예를 들면 스멕타이트는 퇴적암의 지층수에 존재하는 칼륨이온과 알루미늄이온의 반응으로 일라이트와 녹니석으로 변화된다. 스멕타이트에서 일라이트로 변화될 경우에는 스멕타이트/일라이트 혼합층광물이라고 하는 점이적인 광물상을 경유하여 변화하게 된다(그림 2).

스멕타이트/일라이트 혼합층광물은 층상의 점토광물인 스멕타이트와 일라이트가 규칙적으로 혹은 불규칙적으로 쌓인 구조를 갖는 점토광물이다. 이 같은 변화에서 지층수 내의 칼륨과 알루미늄이 소실되고 결정구조내의 물이 빠져나간다. 많은 지역의 시추조사 결과, 온도가 50~60℃가 되면 혼합층이 되기 시작하며, 100℃에 도달하게 되면 변화가 급속히 진행된다는 것이 알려져 있다(Pollastro, 1993). 불규칙 혼합층광

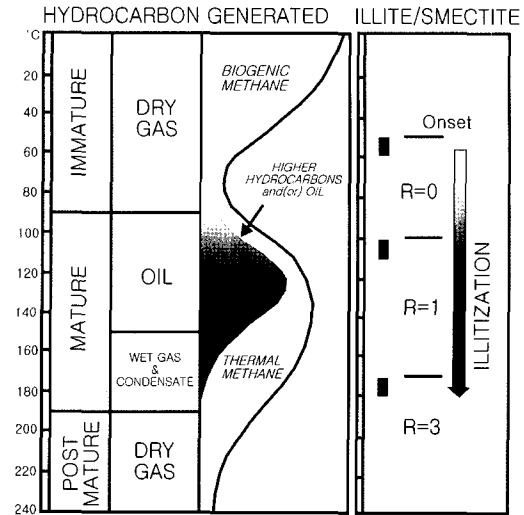


그림 3. 석유생성온도와 스멕타이트 광물의 변화.

물을 “R=0 일라이트/스멕타이트” 라고 하며 규칙 혼합층 광물은 R=1, 2, ... 등으로 스멕타이트층과 일라이트층의 배열형태에 따라 정수를 붙여서 나타낸다. 불규칙 R=0 일라이트/스멕타이트에서 규칙의 일라이트/스멕타이트(R=1)로 변화되는 온도는 약 100℃로써 알려져 있다. 또한 유기물이 성숙하여 석유가 생성되기 시작하는 온도도 약 100℃이다(그림 3).

따라서 불규칙 R=0 일라이트/스멕타이트에서 규칙의 일라이트/스멕타이트(R=1)로 변화되는 온도를 알면 이 지층에서 석유가 생성될 수 있는지 없는지 알 수 있게 된다. 즉, R=1 일라이트/스멕타이트 광물과 유기물을 함유하고 있는 지층은 석유가 생성되었을 가능성이 있는 지층으로 생각할 수 있다.

스멕타이트 이외의 점토광물도 지하라고 하는 새로운 환경에서는 다른 광물로 변화된다. 카올리나이트도 용액내의 칼륨이온과 반응하여 일라이트로 변화된다. 스멕타이트에서 일라이트를 생성하는 반응에서는 석영이 침전된다. 전술한 일라이트가 생성되는 반응에서 밝혀진 바와 같

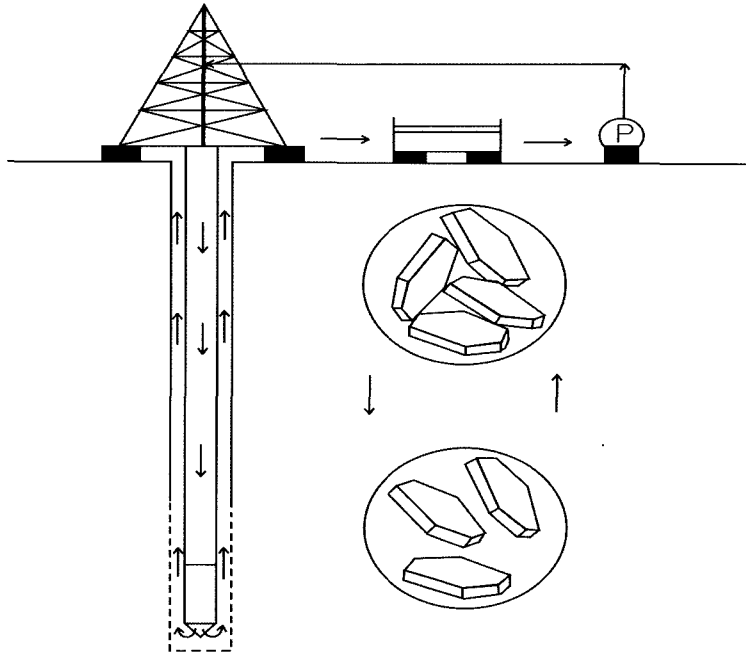


그림 4. 석유시추시의 이수 순환도 (P: 펌프).

이 온도와 압력의 상승과 물이 유실되는 방향으로 반응이 진행되기 때문에 속성작용의 진행과 관련되어 물이 적고 밀도가 큰 광물로 변화된다. 반응하고 있는 광물의 주변에는 보통 물이 있으나 그 물에 용해되어 있는 이온의 종류와 농도는 다양하다. 또한, 장소마다 산화·환원 조건도 다르다. 이처럼 주위에 존재하고 있는 물의 성질이 다른 것은 점토광물의 생성과 소실에 강하게 영향을 준다. 속성작용 초기에는 이처럼 물의 성질에 대응하여 다양한 점토광물이 생긴다. 그래서 이것은 속성작용 후기의 온도 압력이 상승한 조건하에서는 일라이트와 녹니석으로 변화해 버린다.

시추 이수

점토(주로 벤토나이트)를 현탁시킨 유체를 순

환시키면서 지각에 구멍을 뚫는 시추는 석유·천연가스 탐사 및 시추, 각종 토목공사 등에서 필수적인 기술이다. 인체를 예로 든다면 시추 유체의 역할은 피의 순환에 해당될 정도로 매우 중요하다. 로터리식 시추유체 순환의 개념은 그림과 같다(그림 4). 즉, 시추가 진행되는 동안 물과 점토가 섞인 형태인 시추이수는 펌프로부터 시추파이프로 주입되게 된다. 시추파이프의 맨 끝에는 초강력 금속제와 다이아몬드로 만들어진 비트라는 것이 장착되어 지각을 뚫고 들어가며, 이수는 이 비트로부터 제트류로 되어서 강하게 분사된다. 비트에 의하여 깨어진 지층의 암편들은 분사된 이수에 흡수되어 파이프와 시추공벽 사이를 통하여 지상까지 도달하게 된다. 시추이수는 비트가 있는 하부에서는 점성이 낮고, 상승하면서 점성은 점차 높아지게 되는데 유동학(rheology)에서는 연화와 경화를 반복하는 이수의 이와 같은 특성을 식소트로피(thixotropy)라고 하며,

이것은 그림 4와 같이 스펙타이트 입자의 특성에 기인한다(古賀, 1997). 이수공학적으로 점토광물 이외에 여러 다른 첨가제를 첨가하여 이수의 중량을 높이는 등, 이수의 유동성은 제어되며 안전하고 신속하게 시추할 수 있도록 한다.

로터리식 굴진법이 사용되기 시작한 초기에는 유체는 물만 사용되었다. 이때 유체는 단지 시추압편을 지표까지 운반하는 매체로써만 생각되었다. 그러나 물만으로는 시추공벽이 무너져서 시추를 계속할 수 없는 경우가 자주 일어났고, 그 후 물 대신에 점토 현탁액을 사용하면 물만 사용했을 경우에는 붕괴되었던 지층도 붕괴되지 않고, 용이하게 시추를 계속할 수 있는 것이 판명됨에 따라 순환유체로써 물-점토 현탁액이 사용되게 되었다. 물과 점토의 현탁액인 이수는 다음 9가지의 중요한 역할을 한다.

즉, 1) 비트가 회전하면서 지층의 암석을 파쇄 시킴에 따라 이수는 압편을 지표까지 운반한다. 2) 비트와 드릴파이프를 냉각하고 부드럽게 한다. 3) 시추공벽에 얇은 불투수성의 이질벽을 만들어서 공벽이 붕괴되는 것을 방지한다. 4) 지층 압력과 지하에 존재하는 석유와 가스, 물 등이 분출하지 않도록 억제한다. 5) 순환을 일시적으로 멈추었을 때 시추압편과 이수첨가제가 가라앉지 않도록 이수 내에 보존하는 역할을 한다. 6) 석유·가스층에 대한 피해를 최소화한다. 7) 지표에서 모래성분과 시추압편류 등을 쉽게 분리한다. 8) 시추파이프와 케이싱 중량의 일부를 지탱한다. 9) 시추된 지층에 대한 이해를 극대화할 수 있게 한다. 이와 같은 역할을 다하기 위한 양호한 이수의 구비조건은 다음과 같은 것들을 들 수 있다. 1) 이수의 비중은 시추공의 압력과 균형을 맞출 수 있는 적절한 것, 2) 점성이 낮고 적정 범위 내에 있을 것, 3) 탈수량이 적을 것, 4) 공벽을 형성한 이수는 두께가 얇고 강할 것, 5) 벤토나이트 기타 점토류, 실트 등 저비중 고

형물의 함유량이 적당하고 모래성분이 적을 것, 6) 지층의 붕괴를 억제하는 기능이 우수할 것, 7) 윤활성이 우수할 것, 8) 염수, 시멘트, 기타 전해질에 대한 저항력이 우수할 것, 9) 온도, 압력에 대한 안정성이 클 것, 10) 전기 검층의 해석이 가능한 것, 12) 이수제조 비용이 가능한 한 저렴할 것 등이 필요하다. 그러나 한 종류의 이수에서 이 조건의 전부를 만족시키는 것은 불가능하다. 따라서 지하의 제조조건에 가장 적합한 조건을 갖는 이수가 선택적으로 사용되고 있다.

이수의 주요 성질

점토와 물의 혼합체인 시추이수의 가장 중요한 성질은 점성이다. 점성은 액체가 평행하게 흐르는 조건에서 이 흐름에 저항하는 성질이며 고체의 탄성과 대비되는 유체의 물성이다(강주명, 1990). 물, 글리세린, 묽은 기름과 같은 보통의 액체는 뉴턴의 유체라고 한다. 뉴턴의 유체를 전단력과 전단속도의 관계로 도시하면 그림과 같이 원점을 통과하며 직선이 된다(그림 5).

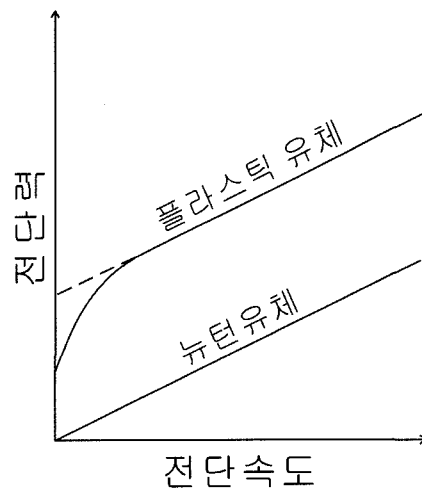


그림 5. 뉴턴유체와 플라스틱유체의 유동곡선.

그러나 시추이수와 같은 콜로이드액의 점성은 그림과 같이 원점을 통과하지 않으며 일정한 크기가 되어야 직선적인 관계를 보여준다. 다시 말하면 전단력이 작은 경우에는 고체와 같은 성질을 보이고 전단력이 크게 됨에 따라서 점점 반고체적인 성질을 보여주게 되고, 일정한 전단력이 되면 액체적인 성질을 보여 준다. 이와 같은 성질을 갖는 액체를 빙엄(Bingham)의 플라스틱유체 혹은 빙엄의 유체라고 한다. 플라스틱 유체의 점성도는 힘의 단위를 기준으로 하여 표시될 수 있는데, 통상적인 점성도의 단위는 포이즈(poise)로서 1 포이즈는 $1 \text{ dyne} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2$ 이다. 그러나 시추공학에서는 유체의 특성상 1 포이즈의 1/100인 센티포이즈(centipoise; cp)를 사용한다. 시추이수의 점성은 이수 중에 함유되어 있는 콜로이드 점토류의 입도, 형태, 기타 복잡한 계면 전기 현상에 의해서 크게 좌우되는 성질이다.

이수로서 양호한 성질을 갖기 위해서는 지층 내의 점토류가 이수 내에서 팽윤 및 분산하는 것을 강력히 억제시키고 이수 내의 점토 함유량을 일정 범위 이내로 유지함과 동시에 농집된 점토류를 고르게 분산시키는 것이 필요하다. 이 때문에 분산제가 사용된다. 분산제는 점토입자의 표면에 흡착하여 점토입자간의 인력을 감소시킴으로써 이수의 점성을 작게 하는 기능을 갖는 물질이다. 과거에는 축합인산염, 알칼리류가 주로 분산제로 사용되었다. 그러나 이것들은 유효범위가 좁아서 어느 경우에는 아주 유효하지만 조금만 잘못 첨가하여도 역효과가 나기도 하고 온도에 대하여 매우 약한 것 등 결점을 가지고 있다. 분산제에 대한 연구가 현저히 진행되어, 이제는 보다 안전한 후민산과 리그닌 유도체 같은 복잡한 유기물이 널리 사용되고 있다.

분산제의 작용 메카니즘은 다음과 같이 생각되고 있다. 즉, 분산제의 기능은 점토입자가 가

지고 있는 잔류원자가를 중화시키는 기능이다. 깨진 결합상태(broken bond)인 점토입자의 표면 위에 음이온이 흡착되면 이들의 잔류원자는 거의 완전히 만족되게 된다. 이같은 음이온 중에는 후민산 이온, 리그닌술폰산 이온, 탄닌산 이온 등이 잘 알려져 있다. 깨진 결합상태에서 이처럼 음이온이 흡착되면 전리에 의해 생긴 약한 입자음전하에 의해 반발력이 증가한다.

이 반발력이 잔류원자에게 의하여 생긴 입자간 장력보다도 클 경우에는 입자간 접촉은 감소하게 된다. 따라서 입자간의 마찰력과 입자가 접촉하여 망상구조를 형성하는 경향은 감소하게 된다. 그 결과 점성도 감소하게 된다. 한편, 지하 깊이 시추를 계속하게 되면 압력이 증가하게 되고, 이에 따라 이수의 비중도 높아져야 한다. 이수의 비중을 높이기 위한 가중(加重)물질로는 산화철과 방연석이 사용되기도 하지만, 일반적으로 중정석(barite)의 분말이 사용된다.

이수로 사용되는 점토

이수용으로 사용되고 있는 대표적인 점토는 1) Na-벤토나이트, 2) Ca-벤토나이트, 3) 애타펄 자이트(attapulgit)의 3종류이다. 이 점토들은 이수의 종류, 시추공의 조건 등에 의하여 사용 목적을 달리하지만 일반적으로 사용되고 있는 점토이다.

Na-벤토나이트는 주로 담수와 혼합하여 사용되면, 우수한 점성과 식소트로피(thixotropy) 성질을 유지함과 동시에 양호한 공벽을 형성한다. 또한 높은 윤활성을 보여주기 때문에 가장 일반적으로 사용되는 점토이다. 이수용으로 널리 사용되는 Na-벤토나이트는 주로 미국 와이오밍산의 벤토나이트이다.

Ca-벤토나이트는 칼슘염과 마그네슘염을 비교적 많이 함유하고 있는 물을 사용하여 이수를 만들 경우에 주로 사용되고 있다. 이 벤토나이트는 15,000 ppm 정도의 염분과 석고의 오염에 대하여 비교적 강한 저항성을 갖는 특징이 있다.

에터펠자이트는 염수 중에서도 매우 높은 점도를 나타내기 때문에, Na-벤토나이트와 Ca-벤토나이트로는 이수기능이 현저히 떨어지든지 혹은 전혀 효과가 나타나지 않는 염수 혹은 해수를 사용하여 이수를 만드는 경우에 주로 사용된다. 그러나 에터펠자이트는 벤토나이트와 달리 구조가 침상이기 때문에 치밀한 이수벽은 만들지 못하고 탈수량이 현저히 많은 결점이 있다. 이때 탈수량을 줄이기 위하여 유기콜로이드 첨가제를 첨가하기도 한다. 일반적으로 에터펠자이트는 단독으로 사용되는 경우는 드물며 Ca-계 벤토나이트와 병용하여 사용하는 경우가 많다.

결 언

현재 석유는 연료·에너지 자원뿐만 아니라 석유화학 공업의 원료로서 인간생활에서 없어서는 안될 필수품이다. 오늘도 세계 도처에서는 석유 자원의 확보를 위해 석유 탐사와 시추가 계속되고 있다. 점토와 점토광물은 이 중요한 석유산업에서도 역할을 하고 있다.

퇴적지층을 구성하는 점토광물은 퇴적환경과 속성작용정도를 지시한다. 점토광물 연구자들이 지질학적 지식과 연관시켜 점토광물의 산출상태

와 점토광물 변화에 주목하여 퇴적층을 해석한다면, 석유탐사에 유용한 지질자료를 제공해 줄 수 있을 뿐 아니라 석유시추에 사용되는 이수용 벤토나이트의 확보에도 도움을 줄 수 있을 것이다.

참고 문헌

강주명, 1990, 석유공학개론, 서울대학교 출판부, 서울, 388p.

古賀 愼, 1997, 粘土とともに(粘土鑛物と材料開發), 三共出版, 東京, 161p.

大津賀 望, 1997, 粘土の世界, 日本粘土學會, KDD クリエイティズ, 東京, 257p.

須藤 俊男, 1966, 粘土ハンドブック, 日本粘土學會, 技報堂, 東京, 1113p.

Bourgoyne Jr., A.T., Millheim, K. K., Chenevert, M.E., and Young Jr., F.S., 1991, Applied drilling engineering, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX., 502p.

Johns, W.D., and Shimoyama, A., 1972, Clay minerals and petroleum-forming reaction during burial and diagenesis: AAPG Bull., v. 56, 2160-2167.

Pollastro, R.M., 1993, Considerations and applications of the illite/smectite geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of Miocene to Mississippian age, Clays and Clay Minerals, 41, 119-133.

표지 제자(題字) 설명

본 잡지의 제자(題字)는 2000년도 국전 특선 작가이신 가산(嘉山) 김택수(金宅洙) 선생께서 써주셨습니다. 가산 선생님은 개인적으로는 충북대 지질학과 안중호 교수의 장인이십니다.