

산유국 진입을 위한 국내 석유개발 기술...

강 주 명*

우리나라가 산유국의 희망을 안고 석유개발을 시작한지도 근 30년이 되어가고 있다. 이 분야는 다른 학문과는 달리 그 성격상 모든 이공분야의 복합·종합성(Multi-discipline engineering)을 그 특징으로 들 수 있다.

석유공학은 미국에서 1900년대초에 독립적 학문으로 생성되어 아주 급속히 발전 되어온 비교적 새로운 학문으로 볼 수 있다. 이 학문이 짧은 연수에도 불구하고 이렇게 급속히 발전 될 수 있었던 원동력은 이 분야의 연구에 대한 미국에너지(energy)기업의 과감하고도 지속적인 투자에 기인한다. 그리하여 오늘날 석유개발에 관련된 연구 및 기술개발은 거의 전부가 미국에 의하여 주도적으로 추진되고 있다.

우리나라는 1960년대 말부터 미국 및 유럽 계통의 석유개발 회사들에 의해 국내 대륙붕탐사 작업이 간헐적으로 진행되어 왔다.

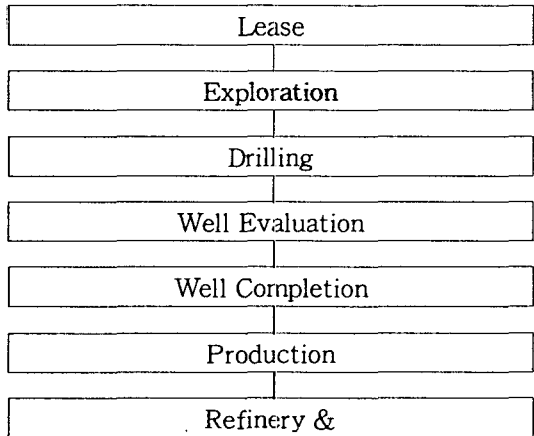
이후 1970년대 말 1, 2차 오일쇼크를 경험하면서 석유공급원의 원활한 확보를 위하여 1980년 중반부터 국내 대륙붕 탐사 및 시추작업이 본격화 되고 해외 유전개발을 위한 자본 및 기술 투자가 적극적으로 유도되는 정책이 전개되었다. 그리하여 석유탐사 기술부문에는 어느정도 기술의 축적이 이루어지게 되었고 석유공학 기술은 국내 대륙붕 연안의 가스층 발견과 일부이지만 해외 유전개발 사업시 운영권자로서의 참여등으로 인력 양성 및 기술 축적을 위한 토대가 마련되고 있다. 본문에서는 작금의 대륙붕 개발 및 해외 유전개발사업에 필요한 기술을 학술적 관점에서 고찰하기 위하여 석유개발단

계를 항목별로 설명하고 그 단계에 필요한 기술의 현재의 국내 수준과 사업 현황을 분석하고자 한다. 석유개발의 주요 단계는 별표와 같다.

1. 광구권확보(Lease)

석유개발의 첫 단계는 석유탐사 및 개발을 위한 광구권의 확보이다. 이러한 권리의 확보를 위한 방법으로는 다음 세가지를 들 수 있다.

a. 지상 또는 지하의 모든 권리의 확보를 위한 토지의 매입 : 이 방법은 막대한 예산이 소요되므로 거의 이용하지 않는다.



b. 석유 및 천연가스(gas)를 개발하기 위한 지상 및 지하의 사용권 확보

c. 석유부존의 확인을 위한 탐사만을 행하기 위해 석유 및 천연가스 개발권을 유보한 채 지상의 토지 사용권만을 확보, 이 방법이 가장 경제적이다.

* 서울工大 자원공학과 부교수

2. 탐사(Exploration)

탐사단계에는 그 학문적 성격에 따라 지질학적 탐사, 지화학적 탐사, 그리고 물리적 탐사 등을 들 수 있는데 간단하게 석유탐사와 관련시켜 요약해보면 다음과 같다.

i) 지질학적 탐사(Geological exploration)

근원암 및 석유의 성질과 그 이동에 대한 조사 (Source rock study & age of entrapment & migration)

ii) 지화학적 탐사(Geochemical exploration)

석유 이동시 그 중력에 의하여 지상으로 분출된 탄화수소의 추적도에 대한 조사

iii) 지구물리적 탐사(Geophysical exploration)

유전이 되기 위하여 그것을 함유할 구조가 있어야 하는데 그 구조의 중력적, 지력적, 탄성적 특성을 이용한 구조적 탐사

① 중력(Gravity)탐사 : 유층 상부층서의 중력적 특성과 근접지역의 중력적 특징과의 대비에 의한 중력이상도(Gravity anomaly)의 분석에 따른 구조적 탐사

② 자력(magnetic)탐사 : 유층과 근접 지층의 자력의 상이성을 이용한 유층하부구조의 판별에 대한 탐사

③ 탄성과(seismic)탐사 : 지층은 밀도에 따라 그 고유의 탄성속도가 있는데 대표적인 저류층인 sandstone이나 limestone도 그 고유의 탄성속도에 의하여 확인되고 또한 그 저류층에 포함되어 있는 유체는 더욱 명확한 탄성속도 대비를 나타내므로 이러한 탄성속도를 이용한다.

이러한 각종 탐사에 의하여 저류층의 구조가 확인되면 유정의위치(well-site)또는 좌표심도(Target depth)가 정해진 후 시추단계로 넘어간다.

3. 시추(Drilling)

시추단계는 그 목적에 따라 다음과 같이 나누어진다.

a. Exploration drilling

탐사단계에서 확인된 지질층서구조 및 저류층구조만을 근거로 하여 시추하는데 상업적인 유전을 발견할 확률은 2%미만이고 또한 경제성을 고찰하지 않은 저류층을 발견할 가능성도 10%를 넘지 못한다.

b. Development drilling

석유시추 결과 석유부존이 확인되고 경제성 및 석유를 포함한 저류층의 크기를 평가하기 위한 시추(appraisal delineation)와 석유생산을 목적으로 하는 시추등이 있다.

석유시추 작업과정에서 특기할 사항들인 casing설치작업은 지층의 수평압력에 대한 시추공 보전 및 시추이수(drilling mud)에 의한 환경오염을 방지하기 위해 요구된다. 그리고 시추공의 심도가 깊어짐에 따른 casing pipe의 중력에 의한 하향 운동편향을 막기 위하여 casing pipe를 주변지층에 정착시키는 작업을 하게 되는데 이를 cementing작업이라 한다.

이런 작업들은 시추작업이 시작되기 전에 미리 계획된 작업들이다. 그런데 종종 지층의 복잡성 또는 시추단면에 생성된 압편 제거효율의 저하에 기인하여 생긴 지층의 접착력에 의하여 drill pipe의 일부를 시추공속에서 잃어버리는 경우가 있는데 이것을 회수하기 위해 fishing작업을 한다.이 작업을 통해서도 drill pipe의 회수가 불가능한 환경에는 방향성 시추를 수행한다. 방향성 시추는(그림 1. 참조) 이런 용도 뿐만 아니라 지하조건이 시추에 적절하지 않은 환경들을 포함한, 각종 수직시추가 불리한 환경에 유익하게 이용되고 있다. 이 방향성 시추는 1950년대 후반에 개발되어 시추작업 개선에 크게 기여했을 뿐만 아니라 또한 시추경비 절감에도 큰 도움이 되었다. 그러나 실제 이 방향성 시추작업을 추진하는데에는 많은 어려운 기술들이 요구된다. 이런 방향성시추기술은 시추작업에서 첨단 기술에 속하는데 근래에 들어 컴퓨터 및 기기산업의 발달에 의해 시추작업을 용이하게 하는 많은 시추작업 설계모형들이 개발되어 지하 10km 이상까지 시추가능하게 되었다.

시추과정에서 가장 위험한 것은 석유저류층 상단을 굴착할 때의 압력조절 실패에 의한 blow out의 발생이다. 발생 당시 신속한 대비에 실패할 경우 유전 전체를 폐쇄해야 할 뿐만 아니라 막대한 재산 및 인명의 손실을 초래한다. 이런 복잡한 시추과정을 거치는 동안 그 지역에 대한 많은 층서학적 구조 지질학적 정보를 얻을 수 있는데 이러한 정보들은 다음 시추작업시 지대한 도움을 주어 경비 절감 및 안전 대책에 긴요히 이용된다. 많은 석유용역회사에서 제공하고 있는 mud logging도 그러한 것들 가운데 일부인데, 이것은 시추환경의 지압(pore pressure)에 관한 정보를 제공하여 검층(well logging) 해석의 정확성을 높여준다.

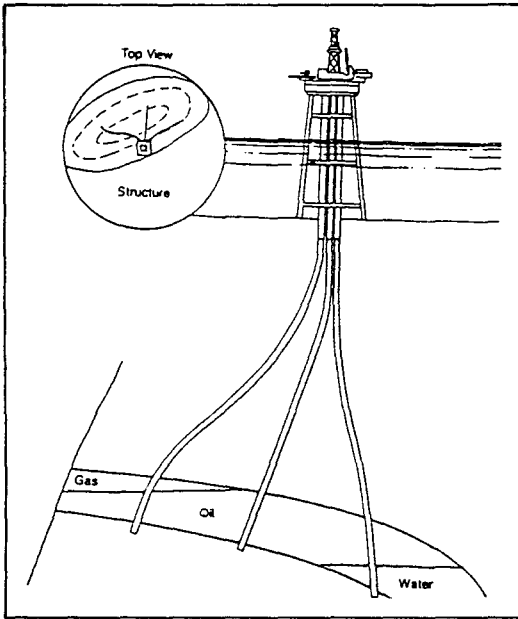


그림 1 방향성 시추

4. 유전평가(Well evaluation)

석유 저류층의 지압 상태에 관한 정보는 석유 시추작업 과정 중에 입수되지만 유전의 종합적 상태를 평가하기 위해서는 저류층의 공극률(porosity)분포 및 유체 포화도(fluid saturation)측정등이 well logging service에 의해 반드시 요구된다. 예를 들어 유전의 경제성 검

사에 필수적인 자료인 석유 매장량(oil initially in place)는 다음 계산식에 의해 산출된다.

$$OIIIP = A \times h \times \phi \times S_o$$

A : 면적 (area extent)

h : 저류층 두께 (reservoir thickness)

ϕ : 공극률 (porosity)

S_o : 석유포화도 (oil saturation)

공극률 분포와 유체 포함 상태는 여러 검층 방법에 의하여 직·간접적으로 측정되는데 그 대표적인 검층 방법은 다음과 같다.

i) 전기탐사 (electrical survey)

전기적 검층방법은 저류층 및 저류유체, 그리고 시추 이수의 전기적 성질을 이용하여 저류층의 물리적 특성을 측정하는데 그 종류는 지층의 전기화학적 성질을 이용한 SP-log에 의한 저류층 발견 시추이수의 저류층 침투 정도에 따른 비저항성을 조사하여 저류층의 공극상태와 유체 포화상태를 측정하는 것 등이다. 시추 이수의 침투 정도는 저류층에 따라 다양하므로 시추이수에 의한 침투를 받은 지역의 저항조사는 micro resistivity log에 의해 주로 측정된다. 이때 그 종류와 측정 심도는 용역회사에 따라 다르고 보통은 이러한 기구를 3~4개를 조합하여 측정한다.

ii) 방사선 검층 (Gamma ray)

이 검층방법은 퇴적암층에 있는 방사선 물질 함유 정도를 측정하는 것인데 그 대표적 방사선 물질인 K와 U는 shale층에 많이 퇴적되어 있다. 이 특성을 이용하여 shale층을 확인하고 저류층내 clay minerals에 의한 전도성 오염 등을 측정한다.

iii) 수소 검층 (Neutron log)

이것은 주로 수소원소의 함유 정도에 따라 반응하므로 저류층의 공극 속에 있는 물 및 탄화수소의 포화 정도를 측정하여 저류층을 발견한다. 이 방법으로는 유체가 물인지 탄화수소인지 구별이 안되므로 저류층의 유체에 의한 포화 상태만을 측정한다.

iv) 밀도 검층 (Density log)

저류층의 특성은 비저류층에 비해 밀도(den-

sity)가 작다. 그 이유는 저류층의 공극에 유체가 포함되어 있기 때문이다. 이런 특성을 이용하여 저류층이 확인된다.

v) 음파 검층(Sonic or acoustic log)

진원에서 발생한 음파는 지층을 따라 운동하는데 지층이 단단하고 균질한 물질일수록 빨리 움직이며 지층속의 이질적(유체)에 도달할 경우 부근의 속도에 비하여 현격히 줄어든다. 이런 특성을 이용하여 저류층의 유체 포화상태를 측정하는 방법이다. 이런 검층방법은 지역조건에 따라 일부 혹은 전부 요구된다. 검층에 의해 다양하게 수집된 정보로 저류층의 물리적 특성을 파악한 뒤 경제성 검사에 들어간다. 이 경제성 검사는 본인의 전공분야 밖이므로 여기서는 배제한다. 이 검층방법에서 하나 특기할 사항은 석유생산에 필수적인 사항인 저류층의 유체 전도성(permeability)을 직접적으로 구할 수 없으므로 단지 간접적·실험적 식에 의한 평가만이 가능하다.

5. 유정완결(Well completion)

이 단계에서는 시추단계 및 유전평가에 의하여 판별된 석유부존의 유무상태, 그리고 경제성에 따라 작업의 방향이 결정된다.

i) 석유부존이 없는상태(Dry hole)

이 경우라면 반드시 뚫린 시추공은 cement나 slurry등에 의해 메워져야 한다. 외국의 경우 연방법이나 주법에 의해 이 작업이 요구된다.

ii) 석유부존이 확인된 상태

석유의 부존은 확인되었지만 석유를 저류층에서 지상으로 회수하기 위해서는 몇가지 기본적인 조사가 시행된다. 그 중의 하나가 석유생산성 조사(Drill stem test)이다. 이 조사를 통해 저류층의 유체 전도성이 측정되고 또 저류층의 배수범위가 결정된다. 이 조사의 또하나의 목적은 저류층의 유체 전도성에 대한 시추이수에 의한 오염도(skin factor)의 계산이다.

석유시추 과정에서 지하에서 생성된 암편을

제거하기 위하여 이용되는 시추이수는 적절한 정도를 유지하기 위한 Bentonite와 비중 조절을 위한 Barite등이 주성분인데 특히 bentonite는 저류층을 통과시 저류층의 공극을 막아 주변의 유체 전도성을 급격히 저하시킨다. 일단 감소된 유체 전도성은 석유생산량을 급격히 감소 시킴으로써 인위적으로 유체전도성을 증가시켜 주어야 한다. 유체 전도성을 증가시키는 방법은 저류층의 화학적, 물리적 성질에 의해 결정되는데 저류층이 석회암(Limestone)인 경우는 산이 석회암을 용해시키는 성질을 이용한 acidizing, 또는 저류층의 시추공 주변지역을 지상에서 유체를 통하여 가한 압력으로 부분파쇄시켜 유체 전도성을 높이는 fracturing 등이 있다. Acidizing 이나 fracturing 작업은 시추이수에 의해 오염된 저류층의 유체 전도성을 원상복귀시키는 정도를 넘어서 몇 갑절의 석유생산 가능성을 증가시킬 수도 있다. 이 단계에 속하는 또다른 석유생산 준비작업은 석유시추 방법과 밀접하게 관련되어 있는데 석유시추시 그 지역의 지질학적 환경때문에 종종 시추공의 밑바닥까지 casing 이 요구되는 cased hole completion 과 시추공의 일부만 casing 에 의해 밀폐되고 저류층은 시추공과 바로 연결된 open hole completion 이 있다. 그 종류에 따라 석유생산에 준비되는 작업도 상이하다.

① 무개공법(Closed hold completion) : 이것은 첫째 저류층이 casing 에 의해 시추공과 분리되어 있으므로 그 연결이 선결조건인 이 연결작업을 일컬어 perforation이라 한다. 이 작업은 화약을 장전하여 저류층 지점까지 강하한 후 발파시켜 저류층에 접한 casing 에 구멍을 뚫어 저류층과 시추공을 연결시킴으로써 생산이 가능하게 한다.

② 유개공법(Open hole completion) : 이 생산준비단계에서는 저류층의 전면이 시추공에 노출되어 있으므로 그 생산량도 높고 작업에 소요되는 경비도 비교적 낮다. 그러나 석유생산에 가장 큰 영향을 주는 사항은 시추공 주위의 유체 전도성의 보존이다. Acidiizing 또는

Fracturing에 의하여 유체전도성을 증가시킬 수는 있지만 저류층의 전면이 압력에 노출되어 있는 까닭에 그 견고성은 시간이 흐름에 따라 약해진다. 이것을 보강하기 위한 방법으로는 인위적 유체 전도성보장 (Linear completion with gravel packing) 등이 있다. 이 단계의 마지막 고려사항으로 시추공에 의해 확인된 저류층의 수와 production tubing의 수에 따라 single completion 또는 dual completion 등을 결정한다.

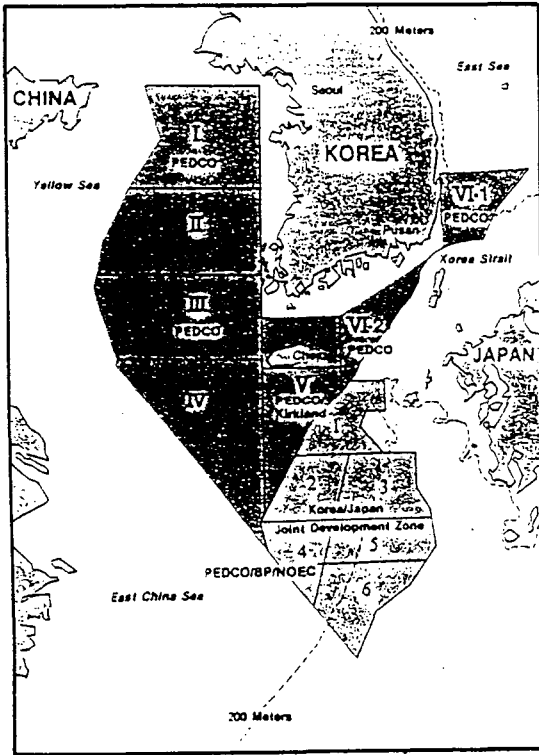


그림 2 광구도

6. 생산단계 (Production stage)

위에서 열거한 석유생산 준비작업에 의하여 석유생산단계에 이르게 되는데 이 과정에서 고려되어야 할 사항으로는 저류층의 유체적 특성 (reservoir type), 저류층의 에너지 상태에 따라 분류해 보면 다음과 같다.

i) 일차생산 (Primary production)

저류층이 가진 자연 에너지가 석유가 저류층을 통과하는데 소비되는 에너지, 생산정 (production well)을 따라 올라오는데 소비되는 에너지 및 지상의 저장탱크까지 오는데 소비되는 에너지 등 모든 에너지를 충당할 만큼 충분한 경우 인위적인 에너지의 보강장치가 필요없는 자연적 생산이 가능하게 된다.

ii) 이차생산 (Secondary production)

저류층의 석유가 생산됨으로 인한 에너지 감소로 인하여 많은 석유가 저류층에 남아 있음에도 불구하고 자연적 생산이 불가능한 경우 injection well을 통한 물의 저류층 주입에 의해 석유를 뒤에서 밀어줌으로써 production well을 통해 석유를 생산한다.

iii) 삼차생산 (Production)

가장 값이 싼 물이 아닌 다른 방법에 의해 석유의 재생산을 시도하는 것으로 carbon flooding, alcohol flooding, thermol flooding, steam flooding, steam injection 등이 있으며 현재 산유국에서 이 분야의 연구가 가장 활발하다.

여기에서 참조할 사항은 1차생산에서 자연적 에너지의 효율적 사용과 보존을 위해 부설되는 Artificial lift나 sucker rod pumping 등은 자연적 에너지의 시간연장 뿐만 아니라 생산량의 극대화에 도움을 준다는 사실이다.

두번째 석유생산 단계의 고찰은 저류층의 유체적 특성에 의한 것으로 저류층이 함유하고 있는 유체의 특성을 따라 생산, 회수도 (recovery factor)가 결정되는데 그의 분류는 다음과 같다.

i) Solution gas drive

생산전 저류층의 고압력에 의해 탄화수소 액체에 포함되어 존재하는 탄화수소, 가스가 생산에 의한 압력감소에 따라 gas로 발생, 팽창하는 힘에 의해 이루어지는 생산이다. 이러한 생산 기법에 의한 초기생산은 전체 매장량에 대해 보통 30% 미만이다.

ii) Gas cap drive

초기 저류층은 gas, oil, water로 형성된 삼

상의 유체분포상태 (Three phase reservoir)로 존재하는데 시추공의 굴착으로 인하여 유출이 가능해지고 이에 따라 gas가 팽창하는 힘만으로 oil을 밀어 내어 생산하는 구조이다. 이러한 생산구조에 의해서는 전체 oil매장량의 25~30%의 회수가 가능하다.

iii) Natural water influx

이 생산구조에 의해서는 전체 석유 매장량의 50%이상 회수가 가능하다. 인근의 저수층으로부터 석유생산으로 인해 비워진 공극에 끊임없이 물이 채워지는 구조로 평균 저류층압력의 감소가 다른 구조에 비해 가장 완만하게 나타난다. 즉 저류층유체를 움직이게 하는 압력의 감소를 극소화하여 자연 에너지에 의한 생산회수 기능이 증대하게 된다.

iv) Compaction drive

일반적으로 생산회수가 기능에 의해 생산되는 oil은 전체 oil매장량의 5%미만이나 일부 지역의 Venezuela oil들은 이 회수기능에 의해

전체매장량의 50% 이상 회수가 된 적이 있다. 이 생산회수기능은 저류층을 누르는 상부지층의 압력 (Overburden pressure)과 저류층내에 분포하는 저류층 압력과의 차이에 의해 조정되는 공극부피가 생산으로 인한 저류층압력의 감소로 축소됨에 따라 그 축소된 공극 부피만큼 oil이 생산되는 것으로 저류층이 견고하지 않을 경우 이 회수기능에 의한 생산이 증가된다.

일반적으로 위에 기술한 어느 한가지 회수기능만으로 oil이 생산되는 경우는 없으며 대개 2~3가지의 복합적 기능에 의하여 oil이 회수된다. 이 생산회수 기능도(recover factor)는 저류층내의 유체 부존 포화상태에 결정되지만 그 정량적 계산은 근래 computer산업발전이 힘입어 computer를 이용한 reservoir simulation등에 의하여 구해진다. 이렇게 구해지는 생산회수기능도는 생산가능량을 계산하기 위해 다음의 식에 이용된다.

$$\text{Recoverable oil} = \text{RF} \times \text{OIIP}$$

해외 석유개발 참여 현황

국 별	광 구 명	참여 년도	한 국 측 지분(%)	한국측 참여회사	운영권자	비 고
에멘	Marib	1984	24.5	공사, 유공, 삼환, 현대	Hunt	생산중
인도네시아	West Madura	1981	50	공사, 코데코, 대우, 쌍용	Kodeco	생산중
	Warim	1987	15	공사, 경인, 유공, 럭키금성	Conoco	2공시추
오스트레 일리아	Timor		25	공사, 경인, 대우, 현대,	Marathon	1공시추
	Zoca91-10	1991		럭키금성, 마주코, 대성		
이집트	Timor		15		Marathon	2공시추
	Zoca91-11					
	Khalda	1989	10	공사, 삼성, 현재정유, 럭키금성	Repsol	생산중
말레이시아	SK-7	1987	29.75	공사, 삼성, 유공,	OPIC	6공시추
에쿠아돌	Block-13	1989	25	공사, 경인	Unocal	3공시추
	R.A.K	1989	35	공사, 현대, 유공, 럭키금성	IPL	-
에미레이트						
리비아	NC173 /174	1990	50	공사, 대우, 현대, 마주코, 대성	Lasmo	-
베트남						
	Block-11-2	1992	70	공사, 쌍용, 대우, 대성, 삼환, 현대, 삼성, 럭키금성	공사	-
아르헨티나	Palmar-largo	1992	14	공사, 동원, 동국방직, 한보, 고려합섬	Pluspetrol	생산중
앙골라	2-92	1993	15	공사, 대우	Total	-

7. 정유 및 수송 (Refinery and transportation)

각 생산회수기능에 의해 회수된 탄화수소는 압력과 온도에 따라 액화 또는 기화되는데 일반적으로 저류층내에 액체로 존재하던 탄화수소는 압력과 온도의 감소에 따라 액·기체 분리기 (separator)를 통과하면서 액화 탄화수소는 tank에 저장되어 정유공장으로 운송되고 분리된 기체 탄화수소는 인근 발전소 및 공장에 배관으로 연결되어 1차 연료로 사용된다.

이 이후의 원유 정제 및 처리는 화공분야에 의하여 이루어진다. 엄밀히 말해 석유공학은 팀 사탐 (team)에 의해 결정된 well site를 시추하는 것으로 시작되어 원유가 석유저장 tank를 떠나기 직전까지 일어나는 모든 작업을 취급한다. 이 정의로써 석유공학은 석유탐사와 구분되고 화공분야와도 엄밀히 분리되어 자연을 1차적으로 이용하는 독자적인 공학영역을 차지한다.

국내 석유개발사업 및 기술현황

그동안 국내 대륙붕 탐사 및 시추사업 (그림 2. 참조)과 해외유전 개발사업 (표1 참조)을 수행해 오면서 전술한 석유개발 단계 분야별로 초보적이지만 다양하게 기술축적이 이루어져 왔다. 먼저 초기의 계약단계는 몇 번의 공동개발 참여 및 국내 대륙붕에 대한 외국 석유회사의 광구권 신청 등의 경험을 통하여 다른 단계에

비해서는 비교적 꾸준히 발전되어 왔다고 볼 수 있다. 다음 단계인 석유탐사는 국내 대륙붕 탐사자료에 대한 해석방법 및 기술이 외국 석유회사에서 개발되어 국내에 도입되는 과정에서 비교적 광물자원의 물리적 탐사에 경험이 많은 자원연구소를 중심으로 기술이 축적되어 왔다. 석유개발의 단계 중에서 석유공학에 관한 부분은 기술습득에 대한 계획 부재와 아울러 그 학문의 성격상 관련산업에의 이용을 위하여 절대적으로 필요한 현장경험의 부족 등으로 국내에서 기술축적이 어려웠다. 따라서 우리나라 일반공학의 수준상태와 비교해 볼때 석유공학분야는 상대적으로 낙후되었다고 볼 수 있다.

그러나 국내 대륙붕 연안의 시추작업이 본격화되고 해외 유전개발 사업의 활성화로 전문인력의 수요가 증가추세이고 몇몇 대학에서 석유공학 관련 강좌 및 교수진이 확보되어 미래의 석유개발 사업의 전망을 밝게 해주고 있다. 석유개발 기술의 축적은 단기간에 이루어지는 것이 아니고, 또한 투자의 효과도 조기에 나타나지 않기 때문에 지속적이고 인내심 있는 범국민적 관심과 지원이 필요하다. 이러한 여건이 형성되면 석유개발 기술의 선진화 및 자립화는 앞당겨질 것이고 궁극적으로는 해외 유전 및 국내 대륙붕 개발에서 기술부족으로 인한 불이익을 최소화 하고 우리 실정에 맞는 기술용역의 수출에도 석유공학분야가 기여할 것이다.

本學會發刊書籍

ANFO 爆劑新發破學, 東亞出版社

新火藥發破學, 機電研究社

新火藥發破學解說, 寶晋齊

서울地下鐵工事 3,4號線發破工法. (非賣品)

岩石 力學, 機電研究社

岩石 力學解說 同上

智山許墳博士回甲紀念集