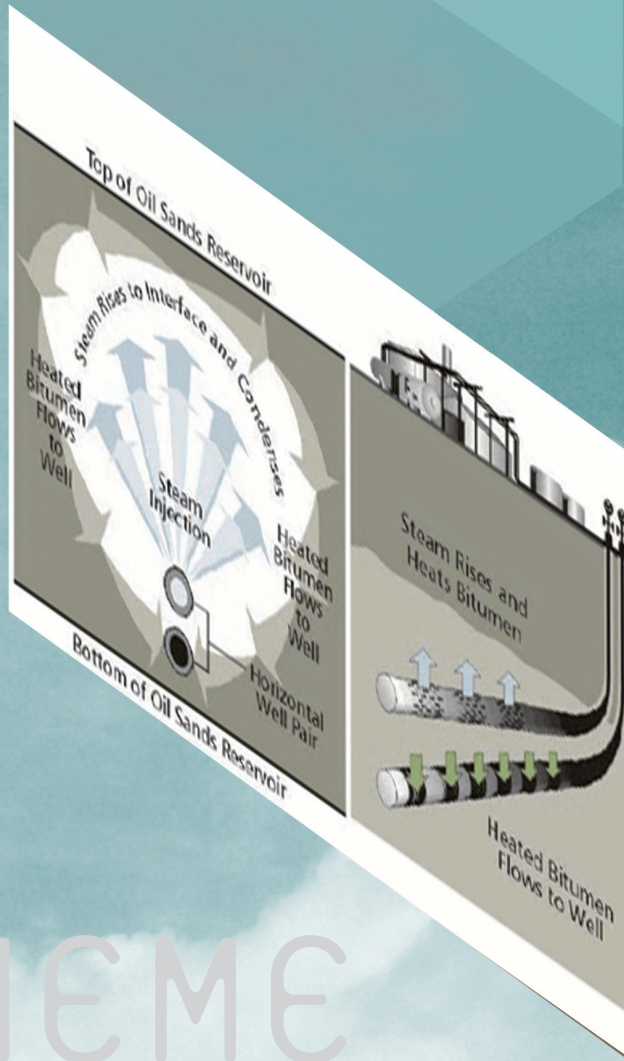




THEME

비전통 오일 개발 기술

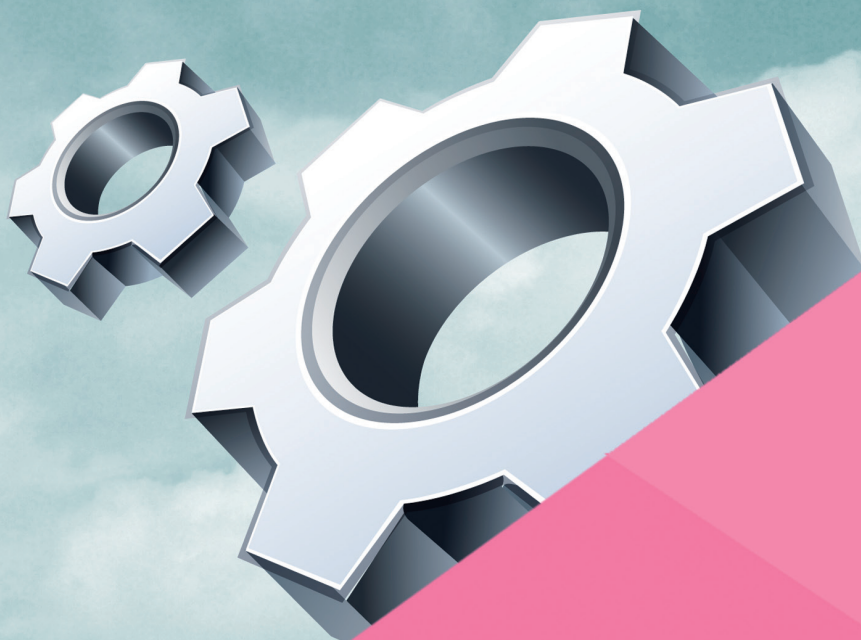
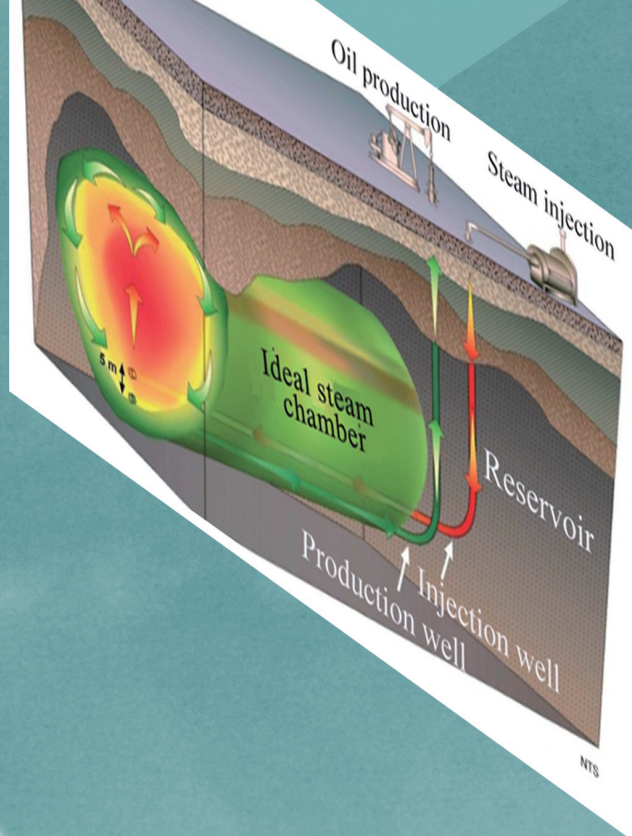
● 담당위원 : 박정규 책임연구원(한국지질자원연구원)

THEME 01 비전통 오일의 생산 공법

THEME 02 미립분 및 광미 처리 공정 소개

THEME 03 비전통 오일 생산 플랜트 설계 및 시공을 위한 기술 소개

THEME 04 비전통 자원 개발 비용 절감을 위한 디지털 테크놀로지



비전통 오일의 생산 공법

민 배 현 이화여자대학교 기후·에너지시스템공학과 부교수
 김 민 이화여자대학교 국지재해기상예측기술센터 연구교수
 권 서 윤 이화여자대학교 기후·에너지시스템공학과 박사과정

| e-mail: bhmin01@ewha.ac.kr
 | e-mail: min.kim@ewha.ac.kr
 | e-mail: sykwon024@ewhain.net

이 글에서는 중질유와 오일 샌드 등 점성도가 높은 비전통 오일의 생산 공법을 소개한다.

중질유 저류층의 생산 개요

최근 고유가 시대를 다시 맞이함에 따라 중질유 (heavy oil), 오일 샌드(oil sands) 등 비전통 오일의 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 중질유와 오일 샌드는 전통 석유 자원에 비해 점성이 높고 품질이 떨어져 상대적으로 생산 비용과 개질 비용이 높고 시장 가격이 낮은 단점이 있지만 풍부한 매장량이 장점이다. 국제에너지기구에 따르면 비전통 오일의 부존량은 6조 배럴, 가채 매장량은 5,000억~1조 배럴로 막대하며 캐나다, 베네수엘라, 러시아, 미국 등 30여 개국에 분포하는 것으로 추정된다. 특히 캐나다는 중질유와 오일 샌드 매장량이 풍부하다. 캐나다 오일 샌드는 약 1조 8,400억 배럴의 부존량을 가지고 있으며, 잔존 가채 매장량은 1,613억 배럴이다. 비전통 오일은 오일의 높은 점성도로 인한 낮은 회수율과 오일 생산량 대비 높은 물 생산량의 문제를 겪을 수 있으므로 오일 생산량을 유지할 수 있는 생산 운영 계획을 수립하여야 한다.

중질유와 오일 샌드를 명확히 구분하는 기준은 없으나 일반적으로 중질유는 비중 20° API 이하이며 점성도 100~10,000cp의 액상 석유를, 오일 샌드는 비중 12° API 이하이며 점성도 10,000cp 이상의 비튜멘

(bitumen)을 의미한다. 비튜멘(역청)은 오일이 모래, 물과 섞인 상태로 굳어져 반쯤 고체 상태로 지표면 인근에 부존한다(그림 1). 보통 오일 샌드 2톤에서 오일 1배럴을 생산할 수 있다. 오일 샌드를 채굴하는 방식은 크게 두 가지이다. 첫 번째는 천부 지층의 오일 샌드를 기계로 직접 채굴하는 방식으로, 채굴한 오일 샌드는 분쇄 후 온수와 섞어 원심 분리기로 오일을 추출한다. 두 번째는 시추를 통해 심도 75~80m 이상의 심부 지층에 매장된 오일 샌드에서 오일을 즉시 추출하는 방식으로 오일 샌드 생산의 약 80%가 이에 해당한다.

심부 중질유와 오일 샌드의 생산 공법은 온도에 따라 1차 생산 기법(cold production), 열주입 공법, 용매 주입 공법 세 가지로 분류하는데 이는 오일 점성도가 온도에 크게 영향을 받기 때문이다(그림 2). 1차 생산 기법은 중질유의 점성도가 충분히 낮아 열주입 없이도 경제적으로 생산할 수 있는 경우 사용하는 방법으로 다중수평정, 다가지수평정, CHOPS(Cold Heavy Oil Production With Sand), 수공법(waterflooding), 폴리머주입법, 가스주입법 등이 있다. 열주입 공법은 고점성 오일의 점성도를 낮추기 위해 증기(steam), 열수, 현장 연소 등 열에너지를 주입하여 오일을 생산하는 방법으로 Cyclic Steam Stimulation(CSS), 현장 연소법(ISC : In-situ

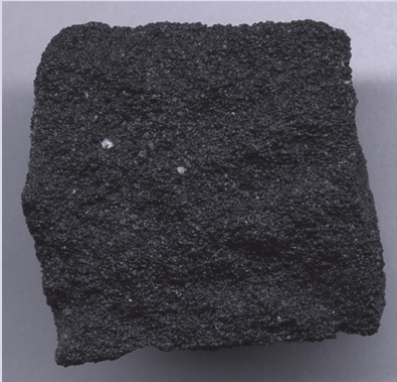


그림 1 오일 샌드 표본

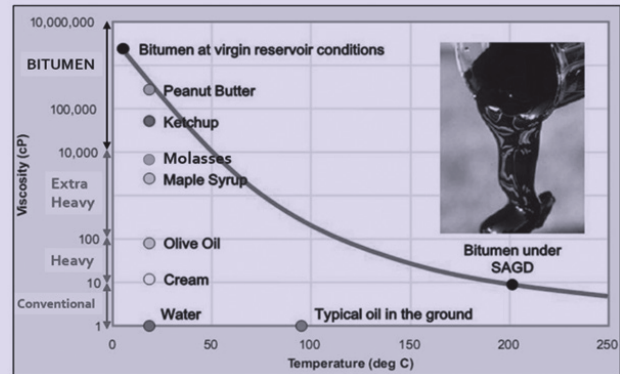


그림 2 온도와 오일 점성도의 관계

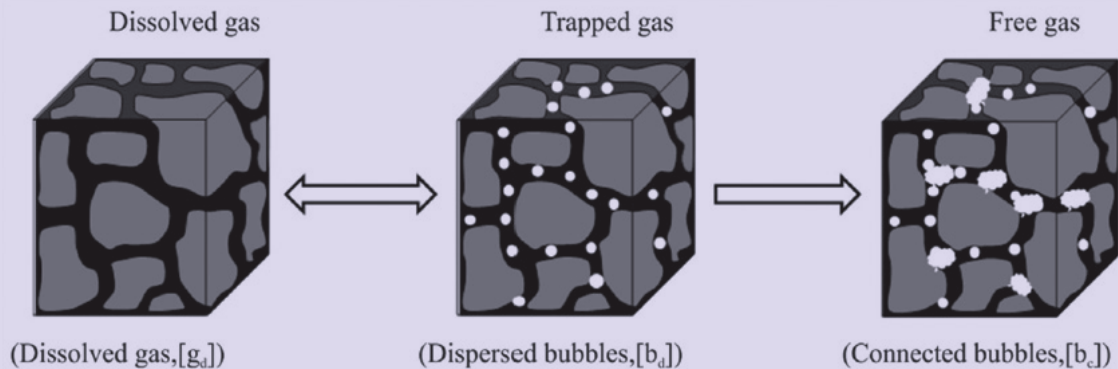


그림 3 CHOPS 생산 공법에서 원홀 형성 과정

Combustion), Steam Assisted Gravity Drainage(SAGD) 등이 있다. 용매(solvent) 주입 공법은 탄화수소 용매 또는 용매 혼합물을 주입하여 오일 점성도를 낮추는 Vapor Extraction(VAPEX)과 용매와 증기를 함께 주입하여 열주입 공법의 효율을 개선하는 ES-SAGD(Expanding Solvent SAGD)가 대표적이다.

1차 생산 기법

CHOPS는 중질유 저류층에 널리 적용되고 있는 대표적인 기술로 오일과 모래를 함께 생산하는 기법이다. 오일 생산에 따라 저류층의 압력이 하락하면서 발생하는 가스로 인하여 미고결 상태인 지층을 구성하는 모래 입자가 움직이면서 유체 유동성이 증가하고

채널이 형성되어 유정 주위로 원홀(wormhole)이라 불리는 유체 투과도가 높은 지역이 형성된다(그림 3). CHOPS는 저류층 순 두께(net pay)가 얇은 지역에서도 효과적으로 사용되는 방법으로, 생산 초기에 모래의 생산 비율이 15%까지 이르다가 생산이 안정적으로 이루어지면 5% 정도를 유지하는 것으로 알려져 있다. CHOPS는 생산 비용은 낮으나 생산된 모래의 처리 및 5-15% 정도의 낮은 최종 회수율이 한계로 남아 있다. 최근에는 일차 생산법을 적용한 후 수공법(waterflooding), 폴리머 공법(polymer flooding) 등을 후속으로 적용하는 방안이 고려되고 있다.

수공법은 저류층에 물을 주입하여 잔존 오일을 물로 밀어서 생산하는 공법이다. 저류층 특성 및 오일의 종류에 따라 초기 오일의 5-50%에 달하는 양을 회수할 수 있다. 중질유 저류층에서도 수공법은 널리 사용

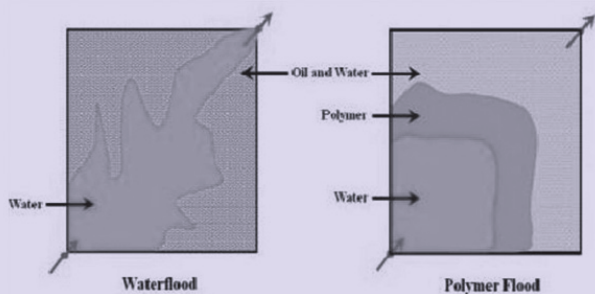


그림 4 수공법(좌)과 폴리머 주입법(우)의 유체 분포 양상

되는 방법이다. Mei 등(2012)에 따르면 지난 50년간 서부 캐나다에서는 300 사례 이상의 저류층에서 수공법을 적용하여 회수율을 개선하였다. 중질유 저류층에서 수공법은 저류층의 이방성과 비균질성에 민감하기 때문에 수공법과 폴리머 주입법을 조합하여 증진 회수를 시도할 수 있다.

폴리머 주입은 수공법 과정에서 채널링 현상으로 인해 미회수된 오일이 있을 때 유용하다. 물보다 점성도가 높은 폴리머를 주입하여 미회수된 오일을 생산정을 향해 밀어주기 때문에 오일 생산량을 높이고 물 생산량을 낮출 수 있다. 그림 4는 저류층 내에 물을 주입한 경우와 폴리머를 주입한 경우의 접촉 효율을 비교한 그림이다. 일반적으로 수공법 실시 이후 폴리머 주입법을 실시하는데, 폴리머가 저류층 내에 균등한 단면을 형성하면 다시 물을 주입하여 밀어줌으로써 개선된 효과를 기대할 수 있다. 폴리머 주입법은 저류층 두께가 얇고, 물 생산 비율이 높아 열주입 공법의 적용이 어려운 지역에서 오일 회수율을 높이기 위한 기법으로 고려할 수 있다.

열주입 공법

열주입 공법은 증기, 열수, 현장 연소 등으로 열에너지를 저류층에 주입하여 중질유 점성도를 낮추어 오일을 생산하는 방법이다. 열주입 공법은 1차 생산 기법에 비하여 오일 회수율이 높은 장점이 있으나 열에너

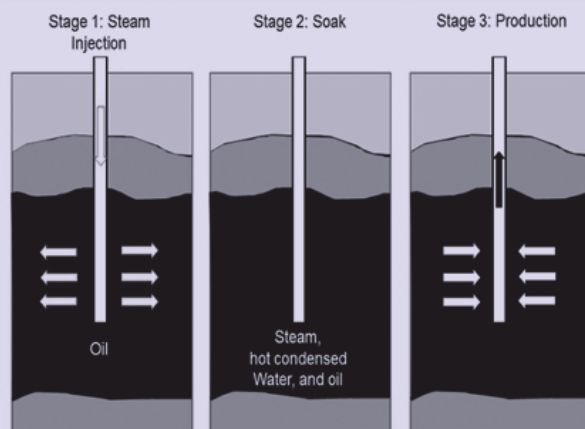


그림 5 Cyclic Steam Stimulation(CSS)

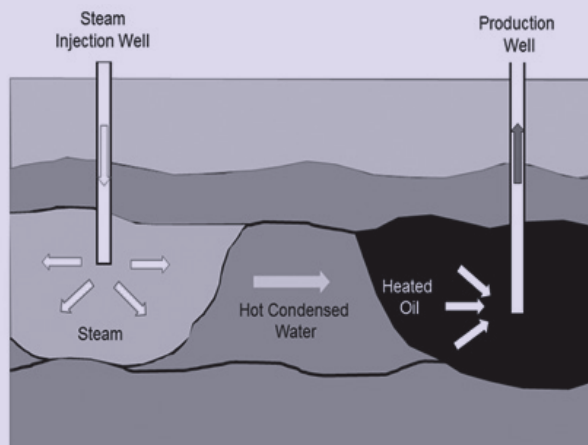


그림 6 증기 주입법

지 발생 비용과 물처리 비용을 고려해야 한다는 단점이 있다. 특히 두께가 얇고 주변에 대수층이 있는 중질유 저류층은 지층수가 생산정 내부로 침투하는 워터코닝(water coning) 현상이 발생하는 경우 주입한 열이 대수층 또는 인접 지역의 물층으로 빠져나가는 열 손실이 일어나 생산 효율이 급격히 떨어질 수 있다.

CSS는 단일 유정으로 증기를 주입한 후, 일정 기간이 지난 후에 동일 유정으로 오일을 생산하는 방식이다(그림 5). Steam soak 또는 huff and puff로 불리기도 한다. 이 기술은 회수율이 약 30%에 달하며, 초기 생산 속도가 빠르고, 층으로 이루어진 저류층에서

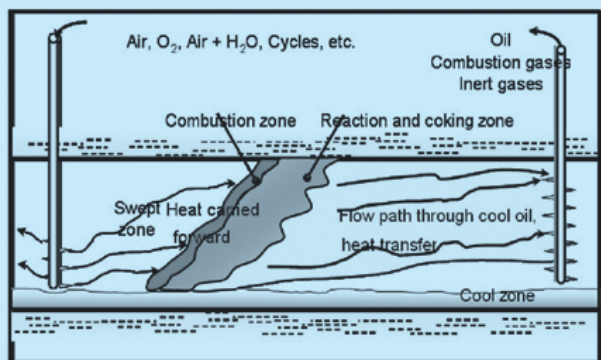


그림 7 현장 연소법

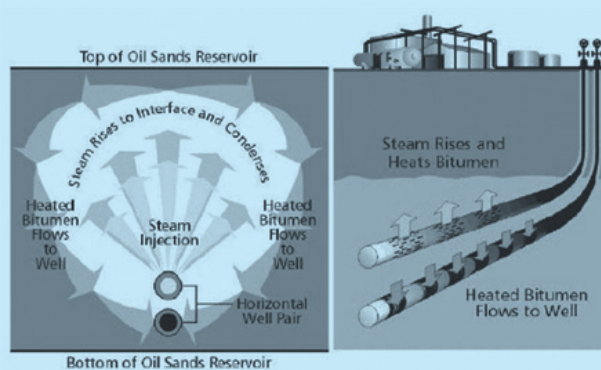


그림 8 SAGD

효과적이다.

증기 주입법은 다중 유정에서 사용하는 공법으로서, 다양한 간격과 위치의 패턴에서 주입정으로 증기를 주입하고 다른 유정들에서 생산하는 공법이다(그림 6). 증기가 중질유를 밀어내는 효과와 동시에 중질유의 점성도를 낮추는 기능에 착안하여 생산하는 공법이다. 적합한 증기 주입 속도와 유정과 유정 사이의 유동성이 좋은 경우 회수율을 40% 정도까지 높일 수 있다. 이 공법은 증기의 낮은 밀도로 인한 소실, 저류층의 이방성, 증기 진행면의 관찰 등이 극복해야 할 부분이다.

현장 연소법은 공기 주입정에서 시작된 발화면이 생산정으로 전파해가는 기법이다(그림 7). 오일 일부를 연소시킬 때 발생하는 열이 잔존 오일의 점성도를 낮춤으로써 오일을 생산한다. 발화된 석유, 또는 연소

잔유물이 남게 되고, 연소가 석유 분자를 분해한다. 다만 안정적인 현장 적용을 위해서는 저류층 내 연소 메커니즘이 명확히 규명될 필요가 있다.

SAGD는 두 개의 수평정(오일 생산정과 증기 주입정)으로 구성된 유정쌍(well pair)을 활용하여 오일 샌드 및 초중질유를 생산하는 대표적인 열주입 공법이다(그림 8). 일반적으로 증기 주입정은 오일 생산정의 5-10m 위로 평행하게 위치시키며, 생산정은 저류층 기저로부터 약 2m 위에 위치시킨다. 따라서 저류층 두께가 15-20m 이상으로 충분히 확보된 저류층에서 적합한 공법이다. SAGD 기법을 운영하기에 앞서 약 3개월 정도 주입정과 생산정에서 동시에 증기를 주입하는 예열(preheating) 과정을 통하여 주변 저류층의 온도를 높이는 과정을 거친다. 이후 주입정을 통해 증기를 지속적으로 주입하면 주입정 위쪽으로 부채꼴 모양의 증기 챔버(steam chamber)가 형성된다. 형성된 증기 챔버에 의해 비튜멘의 점성도가 감소함에 따라 유동이 가능해진 비튜멘은 응축된 증기와 함께 중력에 의해 증기 챔버의 벽면을 따라 저류층 하부로 유동하여 생산정을 통해 생산된다. SAGD의 오일 회수율은 50-70%이지만 증기 챔버의 수직 유동을 저해하는 저류층 내 세일층의 분포 또는 열에너지 손실이 발생하는 물층의 존재 등 지질학적 조건이 회수율에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 주입된 증기가 저류층 외부로 손실되지 않도록 최대 증기 주입 압력은 저류층 상부 덮개암에서 균열이 발생하는 균열 압력(fracture pressure)을 초과하지 않는 범위 내에서 운영하는 것이 일반적이다.

개량 열주입 공법

CSS, 증기 주입법, SAGD 등 열주입 공법은 중질유 및 오일 샌드 저류층에 널리 이용되어 왔지만 각 공법은 장점과 단점을 갖고 있기에 장점을 부각시키고 단점을 최소화하는 것이 필요하다. CSS는 초기 회수율

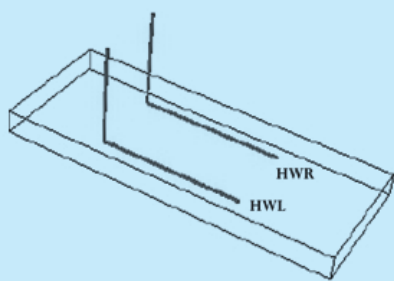


그림 9 CSS와 증기 주입법

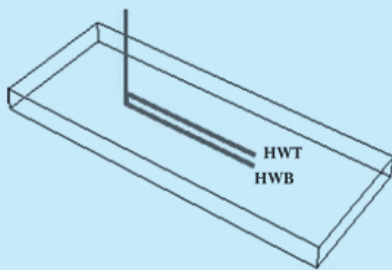


그림 10 일반 SAGD

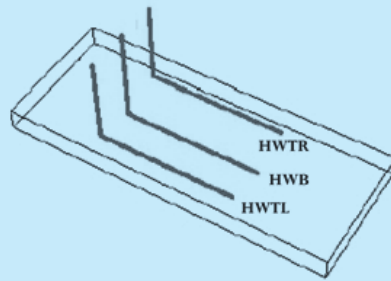


그림 11 SAGD(주입점 두 개)

이 빠르지만, 저류층이 두꺼울 때 효과적이다. 증기 주입법은 유정간 유동성 및 등방성이 양호할 경우 회수율이 높지만, 증기의 낮은 밀도로 인한 소실 및 저류층 이방성으로 인해 효율이 감소할 수 있다. SAGD는 두 개의 수평정과 증력 기능을 배합하여 회수율이 높지만, 주입정과 생산정이 상하로 위치해야 하기 때문에 저류층 두께가 두꺼워야 하는 한계가 있다. 이에 단일 열주입 공법들을 적절히 배합한 개량 열주입 공법 등이 연구되고 있다.

Luo 등(2006)은 기존의 증기 주입법, CSS, SAGD를 수평정에 적용하는 한편, 각 공법을 적절히 조합시키는 방법으로 최적의 회수율을 도출하였다. 두 개 혹은 세 개의 수평정을 사용하여 CSS 후 증기 주입법 적용, 수평정 위치에 따른 SAGD를 통한 회수율 등을 저류층 전산모사를 통해 분석하였다. 기존의 CSS, 증기 주입법, SAGD에 CSS와 증기 주입법을 접목시키는데, CSS와 증기 주입법의 결합에 있어서 증기 주입 기간 및 주기를 각기 다르게 함으로써 다양한 결과를 도출하였다. 특히 SAGD의 경우 동일 증기 주입량에, 수평 주입정을 한 개로 하였을 때와 두 개로 한하였을 때 확연히 다른 결과를 나타내었다. 이외에도 증기 주입량을 동일하게 하고, 다양한 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 9-11은 CSS와 SAGD 수행에 있어서 수평정에 대한 설명을 돕기 위해 삽입하였다. 그림 9는 CSS를 다년간 수행한 후 증기 주입법을 수행하는 경우, 그림 10은 한 개의 상부 수평정 HWT

에서 증기 주입한 후 하부 수평정 HWB에서 생산하는 경우, 그림 11은 그림 10의 증기 주입량을 두 개의 상부 수평정에서 균등하게 나누어 주입한 후 한 개의 HWB에서 생산하는 경우이다. CSS 수행 후 증기 주입법 수행 시에 각 공법에 배분된 시간 조정을 통해 그 결과가 다르게 나올 수 있음을 연구하였다. 이상의 선행 연구 결과에 따르면, 열주입 공법을 단독으로 쓰는 경우보다 적절히 조합하여 사용하면 보다 이른 시간에 오일을 회수할 수 있을 뿐 아니라, 최종 누적 오일 생산량도 더 높일 수 있음을 알 수 있었다.

용매 주입 공법

용매 주입 공법은 온도, 압력 등 저류층 조건에서 오일과 쉽게 혼합되는 탄화수소 용매나 이산화탄소, 질소, 배출가스 등을 주입하여 오일의 유동도를 감소시켜 생산하는 공법이다. 오일과 가스의 혼합에 의한 오일 유동성 증가, 오일 파괴 팽창이 주요 생산 원리이다. 주로 사용하는 탄화수소 용매는 프로판(C_3H_8), 부탄(C_4H_{10}), 펜탄(C_5H_{12}), 헥산(C_6H_{14})이 있다.

LPG(Liquefied Petroleum Gas) 주입법은 오일과 쉽게 혼합되는 LPG를 주입하여 총 유체 점성도를 낮추는 방식이다. 이산화탄소 주입법은 1, 2차 생산으로 낮아진 저류층 압력을 상승시키기 위하여 주입정으로 물을 주입한 후에 이산화탄소를 주입한다. 초기에는 석유와 혼합하지 않으나, 시간이 지나면서 이산

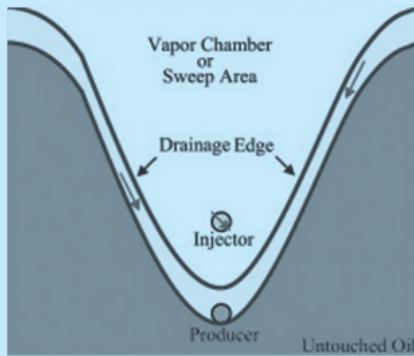


그림 12 VAPEX 단면도

화탄소와 석유의 접촉면에서 경질유가 이산화탄소와 혼합된 지역이 생성된다. 이 혼합 지역의 화합물은 오일에 용해되면서 오일 유동성을 높이고, 그 결과 오일 회수율이 증가한다. 그러나 이산화탄소가 오일에 적절히 용해되지 않으면 핑거링(fingering) 현상이 일어나 생산 효율이 낮아질 수 있다. 이산화탄소보다 저렴한 질소를 주입하는 방식 또한 가능하다.

VAPEX는 기화된 탄화수소 용매나 탄화수소 용매 혼합물을 중질유 저류층에 주입하고 비튜멘에 용매가 용해되면서 비튜멘 점성도를 낮추어 생산하는 방법이다(그림 12). VAPEX는 한 쌍의 수평정을 이용하여 비튜멘을 회수하는 원리에 있어서 SAGD와 유사하나, 증기 대신 탄화수소 용매나 탄화수소 용매 혼합물을 주입한다는 점에서 SAGD와 차이가 있다. VAPEX의 핵심은 탄화수소 용매를 가능한 오랜 시간 기체상으로 유지하여 비튜멘의 탈 아스팔트화(de-asphalting) 과정을 통해 오일 품질을 향상시키는 것이다. 다만 용매가 오일에 용해되는 속도가 느려 오일 회수율이 SAGD에 비해 다소 낮은 것으로 알려져 있다. 효과적인 용매 혼합물은 저류층의 이슬점에 가까운 기체상 용매이며, 용매 주입 주기 등을 최적화하여 생산 효율을 개선할 수 있다.

ES-SAGD는 SAGD의 에너지 효율을 향상시키기 위해 SAGD에 소량의 탄화수소 용매를 함께 주입하

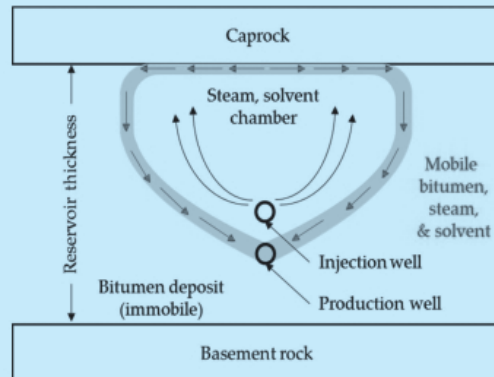


그림 13 ES-SAGD 단면도

는 공법이다(그림 13). 용매를 함께 주입함으로써 오일 생산량은 향상시키고 증기 주입량은 줄임으로써 오일 샌드 생산성 지표인 회수율은 높이고 주입 증기-생산 오일 비율은 SAGD에 비해 낮출 수 있다. 주입된 증기와 탄화수소 용매의 혼합물은 증기 챔버를 통과해 챔버의 가장자리를 향해 유동한다. 고온의 증기는 비튜멘에 열을 전달하고 탄화수소 용매는 비튜멘에 용해되어 비튜멘을 희석한다. 이 과정에서 탄화수소 용매에 의해 비튜멘의 탄화수소 구성 성분비가 변하며 이로 인해 적은 에너지로도 비튜멘의 점성도가 충분히 낮아진다. 이때 주입 용매의 단가가 동일한 양의 비튜멘 생산으로 얻는 수익보다 높으므로 탄화수소 용매의 저류층 잔류량에 대한 고려가 필요하다.

한국은 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 통해 2022년 4월부터 2028년 12월까지 6년 9개월간 오일 생산 플랜트의 패키지화 설계 및 통합 실증 기술 개발에 착수하였다. 다수의 비전통 오일 생산 및 이송 플랜트 핵심 공정과 기술이 결합되는 패키지화 설계, 실증 플랜트의 건설·운영 등을 통한 비전통 오일 생산·처리·인프라 분야의 해외 현지 실증 실적 확보를 통한 사업화를 추진하고 있다. 이 글이 현지 실증에 적합한 비전통 오일 생산 공법의 선정과 설계 기술 개발을 위한 기초 자료로 활용되기를 기대한다.

백 철 승 (재)한국골재산업연구원 책임연구원

| e-mail: baekcs@ark.re.kr

주 계 영 (재)한국골재산업연구원 책임연구원

| e-mail: zoozoo@ark.re.kr

이 글에서는 세일가스를 포함한 비전통 자원의 개발 과정에서 발생하는 모래 입자 및 미세 광미의 고형화에 적용이 가능한 국내 석재, 골재 산업에서 운영 중인 폐수 처리 공정 기술에 대해 소개하고자 한다.

비전통 오일의 생산 공정은 오일 채취 및 추출 과정에서 대량의 모래 및 액상의 ‘유체 미세 광미(fluid tailings)’가 발생한다. 해외의 비전통 오일 생산 기업들은 액상의 미세 광미를 매립장에 저장하여 재사용수와 광미를 분리하는 전통적 방식을 사용하고 있다.

그러나 최근 환경 보호에 대한 관심이 증가함에 따라 적정 수분 함량 관리, 채취 후 10년간 매립장 운영 관리 등 오일 샌드 기업의 환경적 책임을 강화하고 있다. 최근 국내에서도 오일 샌드 생산 기술 실증화가 추진됨에 따라 유체 광미와 유사한 미세 입자를 대량으로 처리하는 모래 생산용 샌드 플랜트 및 고형화 설비의 소개를 통해 비전통 자원 개발에 필요한 국내 보유 기술에 대한 이해를 돕고자 한다.

개 요

오일 샌드를 이용한 비전통 오일 생산 기술은 표층 및 지하층의 세일과 모래에 포함된 역청 성분을 물리·화학적으로 추출·생산하는 기술로서 채취 및 분리 과정에서 대량의 미세 입자 부산물이 발생한다. 이때 상대적으로 입자 크기가 큰 모래와 미세 입자는 대부분 물에 섞여 광미 처리 공정으로 운반되어 매립 처리된다. 입자 크기가 0.075mm 이상 크기인 모래는 일부 표

면수를 제외하면 비교적 쉽게 물을 제거할 수 있으나 그보다 작은 크기의 미세 입자는 물리적, 화학적 방식의 침전·탈수 공정이 필요하다.

국내 골재(모래) 생산 업체들은 대형 매립지를 확보하기 어려운 공간적, 사회적 여건상 대부분 침전 및 탈수·고형화 처리 시설을 운영하고 있으며 최종적으로 30% 이하 함수율을 가진 케이크(cake) 상태로 미세 입자를 고형화하여 석산, 간척지, 도로 등의 매립용 및 성토용 재료로 재활용하거나 사업장 폐기물로 매립하고 있다. 미세 광미 및 골재 무기성 오일의 고형화 처리 공정은 에너지, 비용 측면에서 기존 매립지 매립 방식보다 비용 및 관리에 대한 경제적 부담이 증가하는 문제가 있으나 자연 침전 방식 매립지에서 예상되는 환경 피해는 물론, 작은 공간에서도 신속하게 처리할 수 있는 것과 더불어 산업용수의 활용률을 증대시킬 수 있는 장점이 있다.

샌드 유닛 기술

골재 산업에서 운영하고 있는 주요 설비는 암석을 파쇄하여 자갈을 생산하는 파쇄 설비(크리싱 유닛, crushing unit)와 모래를 생산하는 샌드 유닛(sand unit)로 구분된다.



그림 1 골재 생산 플랜트

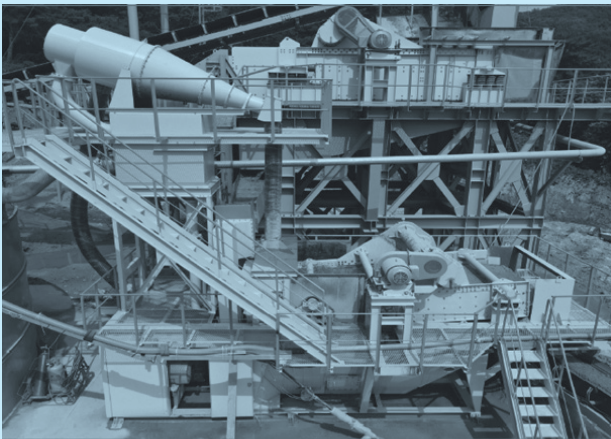


그림 2 샌드 유닛

샌드 유닛은 파쇄 장비에서 나온 모래와 토사, 미세 입자를 분리하는 선별 공정, 침전조와 슬러지 탱크에서 토사와 미세 입자를 침전시키는 침전 공정, 침전된 슬러지를 필터 프레스 등을 이용하여 슬러지 케이크를 만드는 탈수 공정으로 구성된다.

파쇄 설비

골재의 생산 과정은 암석을 필요한 크기로 분쇄하기 위해 저장-파쇄-선별을 반복하는 공정으로 파쇄 설비는 저장 설비와 연결되어 있다. 저장 설비는 1차 파쇄 설비와의 거리, 반입되는 재료(암석)의 용량, 공

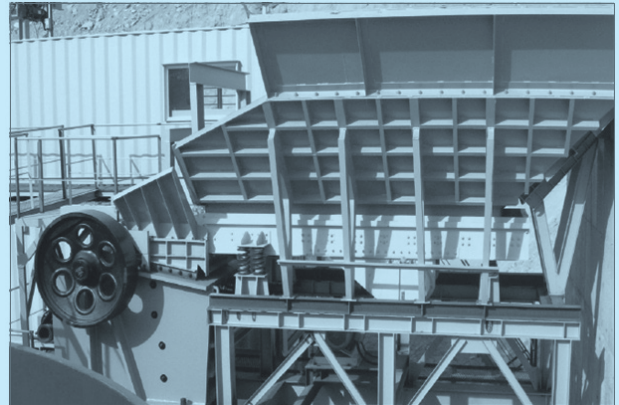


그림 3 1차 파쇄 설비(jaw-crusher)

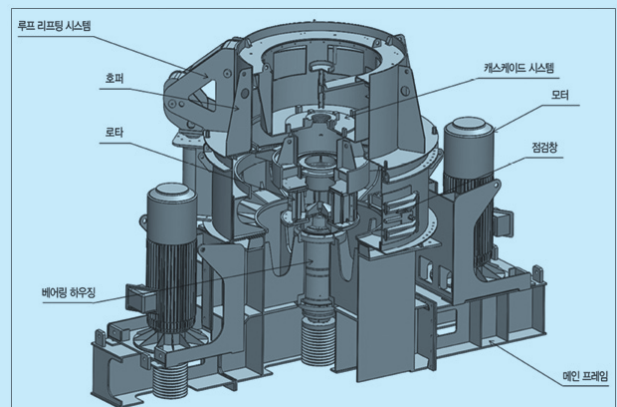


그림 4 모래 생산용 임팩트 크러셔

급 피더의 크기에 따라 결정되며 콘크리트 구조물(stockpile) 또는 철 구조물(steel hopper) 등으로 제작되며, 저장 설비와 파쇄 설비 간 이동이 필요한 경우 원석 피더(stock feeder)를 이용하여 운반하는데 에이프론(apron), 진동 또는 그리즐리(vibration and grizzly), 벨트(belt) 방식 등이 있다.

암석의 분쇄는 대석(大石)의 크기를 줄이는 1차 조쇄(primary crushing) 설비와 작은 입자로 파쇄하는 2차 조쇄(secondary crushing) 설비로 구분된다. 1차 조쇄 설비는 조크러셔(Jaw crusher), 자이레토리 크러셔(gyratory crusher) 등이 있으며 국내 자갈 및 모래 생산 업체 대부분은 200~400ton/h 규모의 상

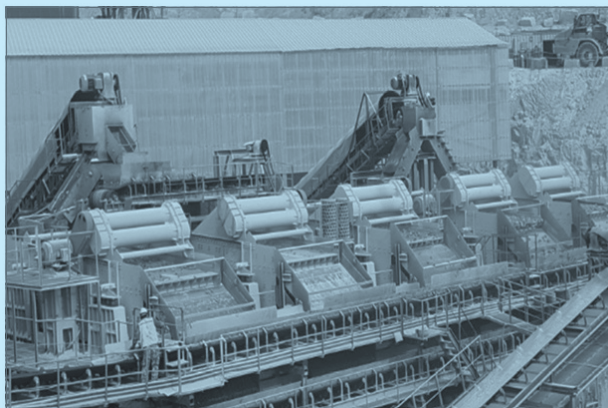


그림 5 진동 스크린

글 토글형 조크리셔를 사용하고 있다. 2차 조쇄 설비는 콘크리셔(cone crusher)가 주로 사용되고 있으며 콘케이브를 스프링으로 들어 올리는 사이몬스식(simon's)형과 유압 실린더로 지지하는 유압식(hydraulic)으로 구분된다.

모래 생산용 파쇄 설비는 롤러밀(roll mill), 로드밀(rod mill), 롤크리셔(roll crusher), 수평형 및 수직형 임팩트 크리셔(impact crusher) 등이 있다. 국내의 많은 골재 업체에서 사용하고 있는 VSI 타입 크리셔는 입자의 운동 속도를 이용하여 암석을 파쇄하는 것으로 작동 원리는 원심 분리 펌프와 유사하며 재료가 로터 중심으로 들어가면서 외벽으로 가속되는 과정에서 입자가 서로 부딪히면서 파쇄가 이루어진다.

샌드 유닛 선별 공정

파쇄 공정을 통해 생산된 모래는 약 30% 가량의 0.075mm 이하 크기를 가진 미세 입자와 진흙 등의 불순물을 포함하고 있다. 이러한 미세 입자와 불순물을 제거하는 설비로 진동 스크린, 중력 관성 선별기, 스크류디칸터, 멀티사이클론 등이 사용된다.

진동 스크린은 세척수를 사용하는 습식과 세척수를 사용하지 않는 건식용이 있다. 진동 스크린은 편심



그림 6 실트 포집용 멀티사이클론

을 가진 축을 회전시켜 얻어지는 진폭과 가진력을 이용하여 원료를 선별하게 되는데 스크린 각도에 따라 경사식과 수평식이 있다. 그리고 진동 스크린은 세척 장치의 설치 방법에 따라 스크린의 효율 차이가 발생하는데 스프레이의 압력과 간격이 맞지 않는 경우 선별력이 저하되고 선별 장치의 망막힘 현상이 발생하게 되므로 가진력을 2.5G 이상으로 유지하고 스프레이 분사 조건을 최적화해야 망막힘 현상을 줄일 수 있다. 국내에서 생산된 진동 스크린은 대부분 가로 길이와 세로 길이를 제품명에 사용하는 경우가 많아 규모와 처리량을 쉽게 파악할 수 있다. 최근에는 고무 재질과 폴리우레탄 재질의 망을 사용하고 있는데 금속 재질에 비해 처리량은 떨어지나 내구성이 뛰어나고 스크린 교체가 비교적 간편한 장점이 있다. 국내 진동 스크린 제조 기술은 2010년 이전까지는 정확한 설계 및 진동 이론에 근거하지 않고 Lordberg(핀란드), Kawasaki(일본), Telsmith(미국), Metsto(네덜란드), Sandvic(미국) 등의 외국 제품을 임의로 모방한 제품이 많았으나 최근 진동 편심축이 상부에 위치한 상부 구동 방식의 진동 스크린 설계 기술을 확보하였으며 주요 부품인 베어링, 샤프트 등의 품질 또한 개선되어 현재는 국내 제품 및 부품의 사용 비율이 높은 편이다.

중력 관성 선별기는 물의 사용 여부에 따라 건식과 습식으로 나뉘며 중력 관성을 이용한 중력 관성 분급기와 중력 관성 분급기를 반대로 세운 모양의 원심 중력 분급기로 세분된다. 건식의 경우 습기에 의해 모래 크기의 입자에 미세 입자가 부착되는 경우 분급이 어렵기 때문에 미분 함유량이 적은 경우 정확한 분급이 어려운 단점이 있다. 습식의 경우 나선형 분급기 방식과 동력 사이클론 방식이 있는데 2000년대 초반까지는 국내 부순 모래(쇄석 모래) 생산량이 적었던 관계로 나선형 분급기를 사용하였으나 대량 생산 및 고품질을 요구하는 수요처가 늘어남에 따라 동력 사이클론 방식의 선별기가 대중화되었다. 동력 사이클론을 이용한 미분 선별 장치는 샌드 펌프를 통해 모래, 미세 입자가 혼합된 공정수를 일정한 압력으로 사이클론에 공급하여 선별하는 방식으로 안정적인 분급이 가능한 장점이 있으며 골재 품질 규격 준수를 위해 0.075mm 크기를 기준으로 97% 이상 분리가 가능한 성능을 제공하고 있다. 또한 동력 사이클론과 별도로 소형 멀티사이클론을 추가적으로 설치하여 0.035mm 크기까지 제거가 가능하다.

샌드 유닛 침전 및 탈수 공정

모래와 분리된 미세 입자들은 탈수 공정 모래 생산 과정에서 발생하는 미세 입자를 응집제를 이용하여 플록(floc)을 만들어 농축시키는 침전 농축조와 탈수 및 고형화 설비 벨트 프레스(belt press), 디칸터(decanter), 필터 프레스(filter press) 등을 통해 처리된다.

침전 농축조는 모래 생산 과정에서 발생한 미립자를 플록화시켜 침전, 농축시키는 설비로 콘(cone)과 원통형인 디칸터 타입이 있다. 콘 타입은 높은 탱크 상부에서 미립자의 플록을 자연적으로 침강시켜 콘의 하부로 플록이 모여지게 되어 있는 구조로 초기 설치 후 가동 시에는 높은 곳에서부터 플록을 형성함에

따라 응집 시간이 길어지는 장점이 있으나 시간이 경과함에 따라 플록 슬러지가 탱크에 밀착되어 용량이 감소하고 콘 최하부가 경화되는 경향이 있어 주기적인 정비가 필요하다. 원통형은 상부 중앙에 교반 장치(agitator) 또는 스크래퍼(scraper)가 설치되어 있는 구조로 플록이 원형 탱크의 하부로 침전되면 스크래퍼를 통해 슬러지 상부를 중심으로 모아주며 이를 슬러지 펌프로 이송하는 방식이다. 원통형의 경우 스크래퍼를 통해 강제적으로 제거하므로 탱크 내 슬러지가 굳는 현상은 없으나 설치에 필요한 면적과 충분한 높이(4.5m 이상) 확보가 필요하다.

벨트 프레스 및 디칸터는 소량의 슬러지를 케이크화하는 데 적합하며 시간당 약 4m³ 이하 처리에 사용된다. 벨트 프레스는 플록화된 미립자를 회전하는 벨트와 접촉시켜 프레스로 압착하는 방식이며 디칸터는 원통형의 회전체에 플록화된 미립자를 투입하는 방식으로 스크류가 내장된 디칸터의 경우 강한 원심력에 의해 회전통 내 고체가 중력 분리되며 회전 차이를 가진 스크류에 의해 분리된 입자가 배출되는 방식으로 원심력으로 분리되는 공정 특성상 미세 입자도 분리가 가능하다. 디칸터의 구동부는 스크래퍼의 회전 저항력의 크기에 따라 작동하며 회전 저항력은 침전조 바닥에 적재되어 있는 슬러지의 농도에 따라 변화한다. 그러나 스크류를 고속 회전하기 위한 모터 및 인버터 등의 고가의 정밀 기계 장치가 필요하며 마모로 인한 유격이 증가할 경우 분리 효율이 급격히 감소하는 문제와 유지보수에 많은 비용이 소요되는 문제 등으로 국내 모래 생산 업체에서는 사용하지 않고 광업 분야에서만 일부 사용하고 있다. 이외에도 사이클론의 고유한 형상에서 발생하는 와류를 발생시켜 부유된 입자의 비중 차에 따라 미세 입자를 분리하는 기술도 최근 설비를 구축한 일부 모래 생산 업체에서 운영되고 있다.

필터 프레스는 기계적 구조가 복잡하고, 여과포의 수명이 오래가지 못하는 단점이 있으나, 처리 고형 물



그림 7 침전 농축조

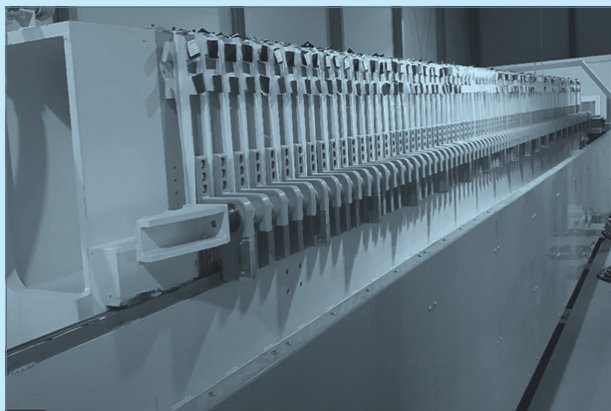


그림 8 필터 프레스

질의 함수율이 낮고 탈리액(재사용수)이 비교적 깨끗한 장점으로 많은 모래 생산 업체에서 운영 중에 있다. 필터 프레스는 수평식과 수직식이 있으며 국내 모래 업체들은 여과 효율은 떨어지지만 기계적 신뢰성이 높고 여과포 교체가 손쉬운 수평 방식의 필터 프레스를 주로 사용한다. 수평 방식은 수평 방향으로 필터판을 배열하여 필터 챔버를 형성하고 슬러리 공급 펌프의 압력하에서 여과될 액체 물질은 각 필터 챔버에 공급되며 여과포에 의해 탈수가 진행되어 챔버 내부에는 고형물만 남게 된다. 이후 필터 프레스가 열리고 고형화된 미세 입자 케이크는 분리·제거되며 필터천을 청소하고 플레이트를 다시 고정하여 필터 챔버를



그림 9 필터 프레스 배출 케이크

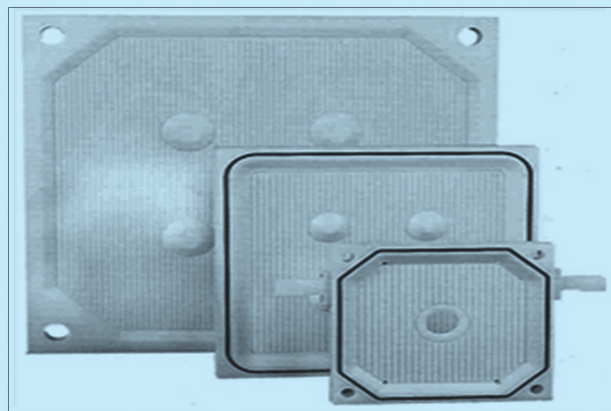


그림 10 필터 프레스 여과판

형성하는 작업을 반복하게 된다.

여과판의 경우 멤브레인(membrane)과 챔버(chamber, recess) 타입으로 구분된다. 2000년대 초반 도입된 대부분의 필터 프레스는 최대 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 압력 기준으로 설계되어 멤브레인 방식을 많이 사용하였으나 최근에는 $15\text{kg}/\text{cm}^2$ 성능을 제공하는 슬러리 펌프를 사용함에 따라 챔버, 리세스 방식의 여과판을 사용하고 있다. 멤브레인형은 1차 피딩 펌프(feeding pump)에 의해 형성된 여실 내의 여과 케이크에 수압이나 공압을 이용하여 멤브레인 여과막을 팽창시켜 2차로 잔류여액을 강제로 배출시켜 탈수 효과를 높여주는 방식으로 난여과성 탈수에 효과가 좋다. 챔버형은

여과판을 압착하여 챔버를 형성시킨 후 여액(slurry)을 강제로 투입하여 탈수하는 형식으로 여과 면적이 넓고 케이크 두께가 얇을수록 탈수에 효율적이다.

샌드 플랜트 처리 용량 및 설계 시 고려사항

미세 입자 및 골재 무기성 오니 등의 처리 품질 및 용량 산정을 위한 각 수치는 플랜트의 흐름을 구성하는 각 설비의 배치, 조합에 따라 큰 차이를 가져올 수 있으며 유사 플랜트의 설계 경험과 운영 데이터 확보가 필수적이다. 미세 광미를 포함한 미세 입자 고형화 공정의 설계를 위해서는 운전 일수, 계획 휴지 일수, 1일 가동 운전 시간, 폐수 유입량, 미세 입자 등 고형

화물 함량 등 설계에 필요한 데이터 확보와 더불어 유사 플랜트의 가동 경험을 통한 예상 가동률 등의 경험적 자료가 반영되어야 한다. 일반적인 모래 생산 공정의 경우 각 설비의 설계 시 작업 관리와 기계 정비의 영향을 고려하여 통상 기준값이 85~90%가 되도록 하여 10% 가량의 여유가 있도록 설계한다. 이외에도 플랜트 설치 시 설치 장소에 대한 건축 제한(높이, 면적 등) 사항, 설치·장비·보수 등을 위한 통로 확보, 원격 및 일괄 통제를 위한 시야 확보 및 중앙 감시 지원, 폭우·혹한·폭설 등의 대책이 설계에 포함되어야 한다.

비전통 오일 생산 플랜트 설계 및 시공을 위한 기술 소개

김 장 진 (주)KOMS 회장	e-mail: jjkim@komsgroup.com
최 성 수 (주)KOMS 사장	e-mail: sschoi@komsgroup.com
김 현 국 (주)KOMS 사장	e-mail: hkkim@komsgroup.com
박 찬 일 (주)KOMS 부사장	e-mail: cipark@komsgroup.com
차 상 호 (주)KOMS 전무	e-mail: shcha@komsgroup.com
김 영 민 성화산업(주) 부장	e-mail: youngmin.kim@seonghwa.co.kr
강 신 현 성화산업(주) 차장	e-mail: shinkyun.kang@seonghwa.co.kr
이 재 구 성화산업(주) 대리	e-mail: jaegu.lee@seonghwa.co.kr

이 글에서는 캐나다 동토 지역 오일 샌드(oil sand)의 생산 플랜트 건설을 위해서 필요한 피드(FEED: Front End Engineering Design) 패키지 기술, 플랜트 구축 및 시운전 기술에 대해 개괄적으로 소개하고자 한다.

최근 유가 상승과 우크라이나 전쟁 등으로 오일의 필요성이 다시 대두되고 있어서 그동안 생산 비용 문제로 더디게 진행되었던 비전통 오일 개발이 캐나다 및 동남아를 중심으로 다시 활성화되고 있다. 국내 기술로 비전통 오일 생산 플랜트를 턴키(turn key)로 수주하기 위해서 피드(FEED: Front End Engineering Design), 상세 설계, 시공 및 시운전과 관련된 기술을 확보해야 한다. 일반적으로 오일 샌드의 생산 방법은

저류층의 심도에 따라 노천 채굴법과 지하 회수 기법으로 구분된다. 오일 샌드 매장량의 20%는 얇은 심도에 위치해 노출 채굴법으로 생산하고 80%는 심부에 위치하여 지하 회수 기법을 통해 생산하고 있다. 이 글에서는 비전통 오일 생산 플랜트 중 가장 어려운 환경에 있는 캐나다 지역 오일 샌드 생산 플랜트를 기반으로 피드(개념 설계, 기본 설계), 상세 설계, 시공 및 시운전 관련 기술에 대하여 소개하고자 한다. 피드는 중

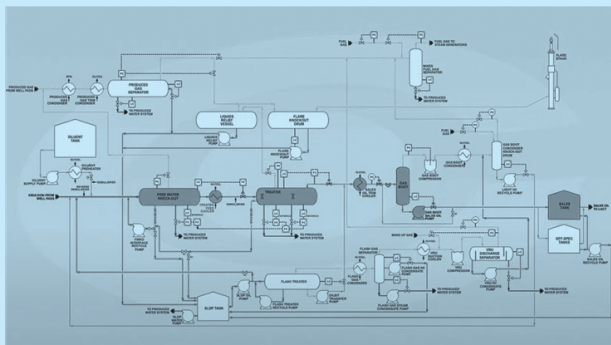


그림 1 오일 샌드 플랜트 콘텐도사 PFD 예시

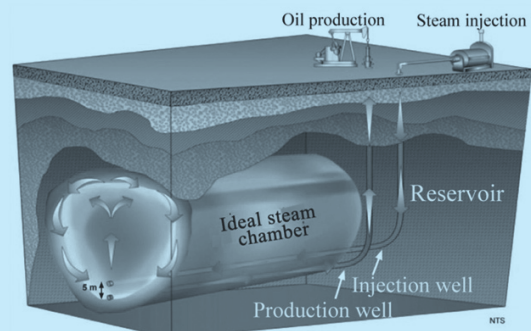


그림 2 SAGD 공법 예시(출처 : Jamali (2014))

표 1 오일 샌드 생산(foiled gathering system) 피드 시 고려 사항(출처: KOMS)

	생산/회수 시스템	공급/분배 시스템	정두단지(well pads)
생산 시스템	생산 방식 - 증기 중력 구배법 - 팽창 용매-증기 중력 구배법	공급/분배 배관망 - 가스 공급	정두(wellheads) 설계
	스팀 오일 비율 SOR(Steam Oil ratio)	- 용수 공급 및 처리	분리기(separator)
	일일 생산 오일량 BPD(Barrel per day)	- 스팀 공급/배분	생산량 계측 설비
		- (팽창 용매 회수 라인, 팽창 용매-증기 중력 구배법을 이용한 시스템의 경우 적용)	현장의 간섭 최소화
		유정 연결 장치	운전 효율 최대화
		스팀 라인과 생산 라인 등은 열손실을 방지하기 위하여 보온되어야 함.	정두단지당(well pad)당 5 ~ 13쌍의 유정(well)
			중앙 처리 시설(central processing facilities)과의 연결

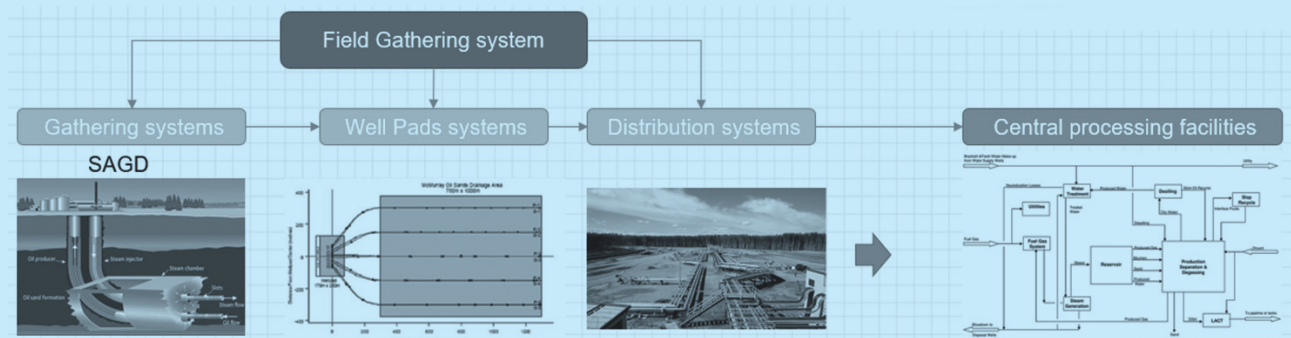


그림 3 오일 생산 플랜트 핵심 공정도

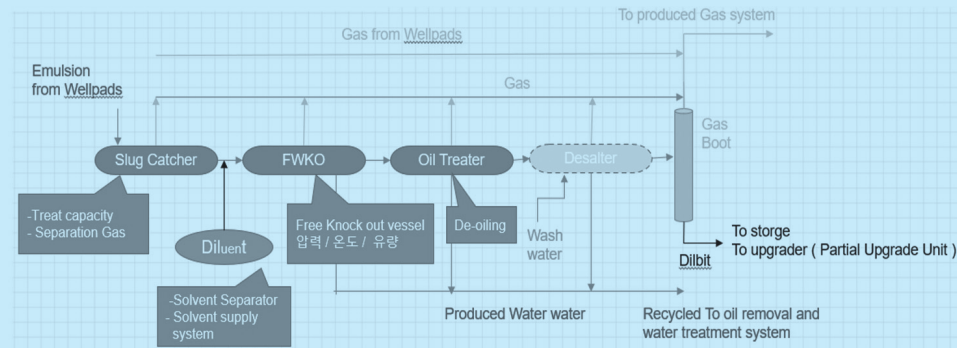


그림 4 오일 샌드 생성수 처리(produced liquids treating)(출처: KOMS)

기 중력 구배법(SAGD : Steam Assisted Gravity Drainage)를 기반으로 팽창 용매-증기 중력 구배법(ES(Expanding-Solvent) SAGD) 방식을 응용 적용이 가능한 부분을 기본으로 기본 디자인(basic

design), 공정 흐름도(process flow diagram)를 포함한 내용을 기술하였으며, 시공 및 시운전은 개괄적으로 요구되는 사항에 관하여 기술하였다.

FEED 설계

오일 생산 플랜트의 핵심 공정은 생산 설비(field gathering facilities)와 중앙 처리 설비(central processing facilities)로 구분할 수 있다. 생산 설비 구성은 그림 3과 같다. 생산 설비는 생산/회수 시스템, 공급/분배 시스템, 정두단지를 피드에 고려해야



중양 처리 설비는 생산수 처리(produced liquids treating), 수처리(water treatment), 생산 가스 처리(produced gas treating), 증기 발생기, 저장고가 피드에 반영되어야 한다. 가장 일반적인 증기 중력 구매법의 생산수 처리의 경우, 여러 공정이 필요하고 그림 4와 같은 공정을 거치게 되며, 오일 샌드 중양 처리 장치의 공정 흐름도는 그림 5와 같다.

탐(oil removal systems)인 스킴 탱크(skim tank), 유도 가스(induced gas) 또는 유도 정적 부상 분리(induced static flotation), 오일 필터로 구성하고, 수처리 시스템(경도 강하)은 석회 연수기, 중력 여과 장치, 강산 양이온 교환기 및 약산 양이온 교환기 등으로 구성해야 하며 그림 6과 같이 공정 흐름도를 구성할 수 있다. 생산 가스 처리 시스템은 탈황 설비, 탈수 설비, 유황 회수 설비로 구성되어야 하고, 개략적인 공정 흐름도는 그림 7과 같다.

또 하나의 중요한 공정인 증기 발생기는 증기 중력 구배 시스템에 공급될 때, 100% 품질의 증기를 공급해야 한다. 재증발 증기(flashed steam)는 저증압으로 처리해야 하며 고품질 보일러 급수를 위한 고온 석회 연수기(hot lime softener), 폐열 회수 장치 등을 고려해야 하며 필요 시 업그레이드 프로세스도 피드

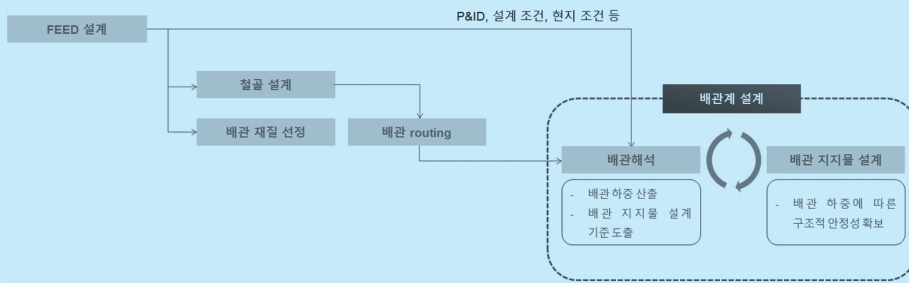


그림 9 배관 상세 설계 순서도

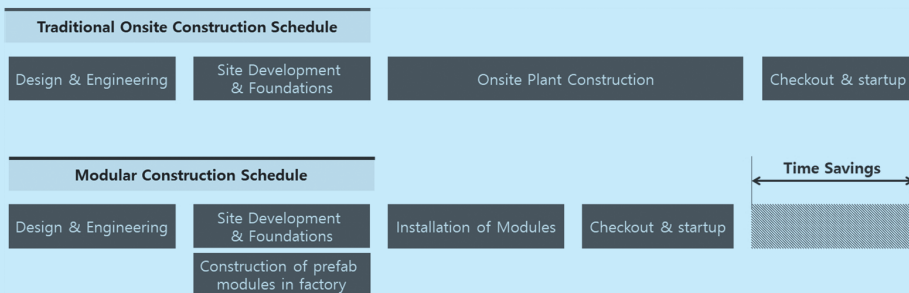


그림 10 플랜트 건설 방법에 따른 공사 기간

에 적용해야 한다. 증기 발생기는 그림 8과 같이 공정 흐름도로 나타낼 수 있다. 보일러 시스템은 최소한 80%의 증기를 발생시킬 수 있는 용량의 증기 발생기, 100% 품질의 고압 증기 분리 시스템을 피드에 적용해야 한다. 오일 샌드 피드에서 주요하게 고려해야 할 부분은 경제적인 회수 방식(economic recovery), 효율적인 스팀 오일 비율(SOR : Improved Steam Oil Ratio)이며, 노상 채굴(oil sand mining) 방법의 경우 90%, 지하 회수법(in-situ oil sand)의 경우 20~60%로 스팀 오일 비율(SOR) 범주 편차가 매우 크며, 전통 오일의 경우, 경유(light oil) 30%, 중유(heavy oil)는 20% 수준이다. 즉, 증기 중력 구배법(SAGD) 또는 팽창 용매-증기 중력 구배법(ES-SAGD)을 통해 경제성 및 환경에 직접 영향을 미치는 스팀 오일 비율의 개선의 여지가 매우 크다. 피드 설계를 통한 기본 설계와 상세 설계, 장비 개발 등으로 오일 샌드 개발 비용을 지속적으로 낮출 수 있고, 수처리의 개선까지 이어진다면 경제성을 갖춘 오일 샌드 필드 개발이 가능하다.

상세 설계 기술

배관계 설계

FEED 설계 이후 현지 시설 설계, 설치 시설물 간의 간섭 체크, 현지 시공 물량의 정확한 산출 및 현장 설치 도면의 작성 등을 위해 상세 설계가 수행된다. FEED 단계의 정보를 기준으로 각 기기의 조달 용이성을 사전에 판단하고 철골(steel structure)과 배관계(piping system)가 먼저 설계된다. 배관의 재질은 공사를 수행하기 위한 규격(code)이나 표준(standard)

을 바탕으로 이송 유체 특성과 설계 온도(design temperature)에 따라, 배관의 두께와 지름은 각각 설계 압력(design pressure)과 유량에 의해 결정되고, 철골 설계 결과 및 공간 상에 배치된 많은 기기들의 위치 등에 따라 배관 경로(routing) 및 3D 레이아웃(layout)이 결정된다. 배관 경로가 결정되면 배관의 구조적 안정성 및 각종 요구 조건에 대한 검증을 위해 배관 해석이 수행된다. 배관 해석은 기존에 작성된 설계 자료와 플랜트 작동 및 설계 조건에 따라 수행되어 배관 위치에 따른 하중을 산출한다. 산출된 하중 값과 3D 레이아웃을 바탕으로 관련 규격(code)에 맞춰 배관 지지물이 설계된다. 배관계 설계는 제작, 설치 간 발생하는 문제로 설계 수정이 빈번하기 때문에 수정 용이성을 고려하여 설계되어야 한다.

모듈 설계 기술

과거에는 플랜트 건설 시 배관, 철골 등을 스푼(spool) 단위로 이송하여 플랜트 건설 현장에서 용접



그림 11 제작을 고려한 모듈 설계 예시

등을 통해 조립하는 방식으로 진행됐으나 최근에는 플랜트를 모듈화(modularization)시켜 현장에서의 작업을 최소화하고 있다. 일반적으로 모듈은 조립식(pre-assembly) 공법과 표준 모듈 공법이 있다. 표준 모듈 공법은 표준화된 모듈을 최대한 조합하여 시스템을 구성하는 공법이다. 표준 모듈 공법은 모듈이 표준화되어 있어 제작 시 발생이 가능한 오차가 최소화되며 제작 라인의 자동화가 가능하다. 최근의 플랜트 모듈 기술 동향은 조립식 공법에서 표준 모듈 공법으로 발전되고 있는 추세이며, 발전 플랜트 분야에서는 표준 모듈 공법에 대한 파일럿(pilot) 프로젝트를 통해 실증하고 있다. 모듈은 FEED 단계에서 플랜트 레이아웃을 생산 공정 단위로 나누고, 시공 효율, 운송의 용이성을 고려하여 표준화된다. 특히, 오일 샌드 플랜트 건설 현장은 주로 내륙에 위치하기 때문에, 모듈 설계 시 해상 및 육상 운송에 적합한 크기의 단위로 표준화하여야 한다.

시공 및 시운전

플랜트 건설을 위해 필요한 공사 작업은 크게 현장 기초 공사, 모듈 운송 및 조립, 시운전으로 나눌 수 있다. 현장에서 작업하는 공사 기간을 최소화하기 위해 플랜트 기초 공사에는 주로 강관 파일이 적용된다. 강



그림 12 모듈 가조립을 통한 모듈 간 정렬(alignment) 확인

관 파일은 해머로 항타가 가능하여 급속 시공이 가능하고 다른 재질에 비해 큰 응력을 견딜 수 있다. 강관 파일 선정은 지반 조건, 하중 조건에 따라 재질 및 크기를 결정하고 지지층 깊이에 따라 길이가 결정된다. 특히 지지층의 경우, 캐나다 북부 지역 특성상 매우 낮은 기온 지역이기 때문에 현지 실정에 맞는 기초 공사가 필요하다.

기초 공사 이후 플랜트 모듈이 현장에서 시공된다. 오일 샌드 플랜트는 다양한 설비와 구조 부재의 조합으로 구성되기 때문에 복잡한 형상을 가지고, 하나의 모듈에는 많은 체결부(connection point)가 존재하기 때문에 제품 크기 대비 높은 정밀도를 요구한다. 따라서 설계된 모듈은 현장에서 문제가 발생하지 않고 조립되도록 설계-제작되어야 한다. 모듈 특성상 제작 단계에서 누적된 용접 등에 의한 열변형이 발생하여 체결부 위치가 틀어져 조립이 안 되는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 예방하기 위해서 제작된 인접 모듈을 가조립하여 각 모듈의 체결부에 대한 정렬(alignment)을 확인한다. 최근에는 3D 스캐너를 활용하여 3D 모델링 정보와 실제 제작된 모듈의 정보를 비교하여 설계-제작 근사율을 파악하거나 광파기를 활용하여 조립 정밀도를 체크하여 시공 가부를 판단할 수 있다.

플랜트 시공이 완료되면 정상 작동 여부를 파악하

기 위해 시운전을 수행한다. 시운전은 크게 사전 시운전(pre-commissioning), 시운전(commissioning), 스타트업(start-up), 성능 시험(performance test)으로 나눌 수 있다. 시공과 시운전 사이인 사전 시운전 과정에서는 각 설비 정렬, 회전 기계의 단독 가동(solo run) 등을 확인하고 배관의 누수 시험, 계장(instrument & control) 시험을 수행한다. 이후 시운전 단계에서 주요 장비를 시험 운전한다. 이 단계에서 각 구성품의 기능 시험(function test), 부 시스템

(sub-system), 패키지(package) 단계의 성능 시험이 진행된다. 스타트업 단계는 플랜트가 정상적으로 운전 가능한 상태로 해당 기간 시험 운전을 거치면서 국부적으로 발생하는 문제에 대한 해결(trouble shooting)과 시스템의 건전성이 평가된다. 이후 성능 시험에서 설계된 조건에서 안정적으로 생산이 가능한지 시험한다. 이를 성공적으로 마치면 시운전 단계가 마무리된다.

서 유 택 서울대학교 조선해양공학과 교수

| e-mail: yutaek.seo@snu.ac.kr

박 기 흠 서울대학교 조선해양공학과 연구원

| e-mail: rlhma16@snu.ac.kr

이 나 영 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

| e-mail: yna0722@snu.ac.kr

이 글에서는 비전통 자원 개발 비용 절감과 운전 효율 향상을 위해 필요한 기계 학습, 빅데이터, 디지털 트윈 기술을 소개하고자 한다.

최근 오일 샌드와 셰일 가스 등 비전통 자원(unconventional resource) 개발의 가장 큰 걸림돌은 개발 비용이다. 오일 샌드에 수증기를 주입하거나 셰일층을 파쇄하는 것은 큰 비용을 유발하고, 코로나 19 이후 유동성 문제와 시장 불안정성이 심해지면서 비전통 자원 생산의 핵심 단어는 ‘시간’이 되었다. 생산 시간, 정비 시간, 첫 오일 생산 시점, 현금화 시점 등 개발 비용에 영향을 주는 시간을 심각하게 바라보게 되었고, 비전통 자원을 운전하는 기업들은 더욱 고 효율화에 집착하게 되었다. 이 글에서는 비전통 자원 개발에 적용되고 있는 디지털 기술들에 대해 살펴보고, 향후 기술 개발 방향을 논하고자 한다.

개 요

비전통 자원을 생산하기 위한 시추 및 완결 비용은 장비 공급의 지체와 인건비 상승 압박으로 빠르게 상승하고 있으며, 이로 인해 시추 기간과 개발 비용에 대한 압박도 심해지고 있다. 하지만, 현재의 기술 수준으로는 생산 효율이 한계에 부딪히고 있으며, 실제로 2018년 상반기 퍼미안 분지(Permian Basin)에 투자된 개발 비용이 8% 증가했지만 생산 유량은 단

1.4% 증가하는 데 그쳤다. 비용은 증가하는 반면 생산량 증가는 이루어지지 않으니, 개발 기업들은 더욱 빠르게 시추와 개발을 진행하는 악순환을 되풀이하고 있다.

이런 악순환을 해결하기 위한 대책은 비용을 줄이고, 생산 시기를 앞당기면서 생산량을 최대화할 수 있는 디지털 기술이다. 최근 자동차와 제약, 항공 우주 등에서 두각을 나타내고 있는 디지털 기술들이 빠르게 비전통 자원 생산에 적용되고 있다. 디지털 유전 등의 개념은 새로운 것이 아니지만, 이제 본격적으로 적용될 수 있는 시점이 온 것이다.

우리나라도 다양한 디지털 기술을 개발해왔으며 해양 플랜트와 자원 생산을 위해 개발된 기술들도 있다. 생산 공정의 최적 제어를 위해 IMC(Internal Model Control) 기술을 개발했고, 저류층과 플랜트를 연결해 모사할 수 있는 통합 시뮬레이션 기술이 개발되었다. 플랜트 운전 상황을 모니터링하면서 이상을 감지하고 예측 정비를 통해 운전 시간을 증가시킬 수 있는 기술도 개발되었다. 비전통 자원이 필요로 하는 기술은 ① 생산성 증대를 통한 효율 향상, ② 자동화 및 지능 제어, ③ 생산 시간 극대화를 위한 신뢰성 확보 등을 위한 기술들이다. 최근 많은 국내 기업들이

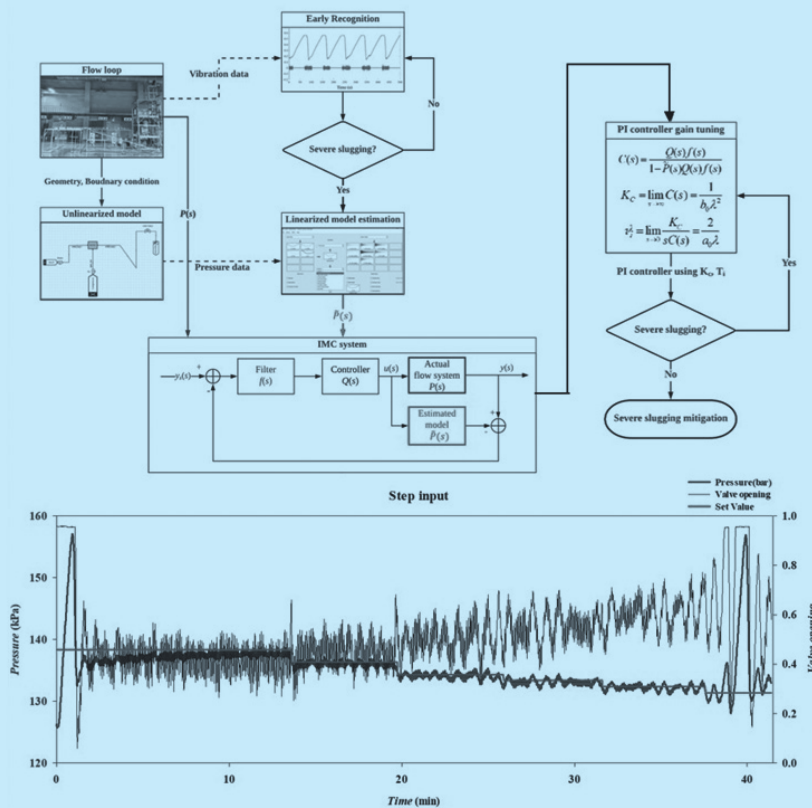


그림 1 IMC를 이용한 밸브 제어와 생산량 증대

디지털 플랜트를 위한 핵심 기술을 개발하고 있다. 비전통 자원 개발에 활용될 수 있는 디지털 기술들을 살펴보고자 한다.

비전통 자원 개발을 위한 디지털 기술

효율 향상은 비전통 자원 개발 비용 절감을 위해 가장 중요한 요소이다. 다양한 기술을 적용할 수 있지만, 한 예로 유체 생산을 위해 Variable Frequency Drive(VFD)를 이용한 펌프를 사용하는 것이다. 유량을 원하는 범위에서 제어하면 여러 개의 동속 모터를 이용할 때보다 50% 이상 에너지 비용 절감이 가능하다. 반면에 유량 제어가 복잡해지므로 디지털 기술을 적용한 제어가 필요하다. 원하는 범위에서 생산 유체

의 유량을 제어하기 위해서는 밸브를 효과적으로 운전하는 것이 필요한데, IMC를 적용한 밸브 제어가 한 방법이다. 일반적인 제어 방법은 미리 정해진 설정값(set value)과 측정값을 비교해 밸브를 제어하는 것인데, IMC는 시스템을 모사한 모델을 이용해 제어를 위한 변수를 미리 산출하는 것이 특징이다. 측정값과 모델로부터 예측한 값을 비교하기 때문에 더욱 정교한 제어가 가능해진다. 그림 1에서 IMC를 적용한 슬러그 제어 개념도와 결과를 보여준다. 다상유동 모델을 이용해 운전 시스템의 모사 모델을 구축하고, 슬러그 유동이 발생하는 경우 안정화를 위해 필요한 제어값을 빠르게 찾아내 유동을 안정화하고 있다. 이와 더불어 슬러그로 인한 불안정성을 피하면서 생산량을 증가시

킬 수 있다. 그림 2에서 유동 안정을 위한 밸브 개방(valve opening)값은 0.4였지만, 시뮬레이션을 통해 0.6까지 운전이 가능함을 확인하고, 서서히 밸브 개방값을 증가시켜 생산량을 증가시켰다.

일반적인 On/Off 방식의 단순한 제어는 플랜트 운전을 쉽게 해주지만, 생산 효율 증대를 위해서는 섬세한 제어가 필요하다. IMC를 포함한 최신 디지털 기술은 공정의 효과적인 제어가 가능하며, 앞으로도 더욱 발전할 것이다.

자동화 및 지능 제어는 IoT 센서들을 이용한 실시간 운전 데이터 수집과 네트워크 구축에서 시작된다. 앞서 소개한 효율 향상을 위한 다양한 제어 기술들은 결국 플랜트에서 측정되는 센서값에 의존해 결정을 내릴 수밖에 없으므로, 디지털 기술의 바탕은 IoT 센

서를 이용한 데이터 획득과 네트워크를 통한 공유라고 할 수 있다. 최근 다양한 IoT 센서들이 공급되면서 플랜트에서 수집된 데이터는 생산 현장뿐 아니라 수천 km 이상 떨어진 엔지니어링 센터에도 실시간으로 공급된다. 엔지니어들은 플랜트에서 얻어진 빅 데이터를 다양한

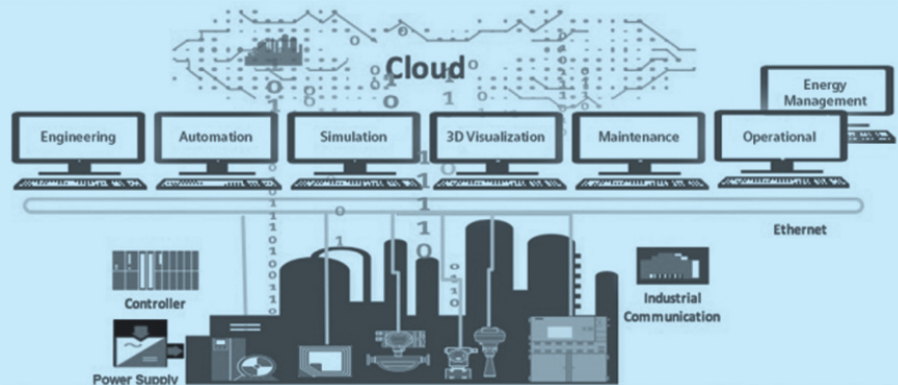


그림 2 Siemens에서 제시한 IoT 센서와 자동화 디지털 기술을 이용한 플랜트 운전

기계 학습 알고리즘을 이용해 분석하면서 전체 생산 시스템의 가시화(visibility)를 높인다. 그로 인해 플랜트 운영의 많은 부분이 자동 운전으로 전환되고 있으며, 운전 비용과 인건비 절감을 유도한다. Siemens사의 XHQ Operation Intelligence 소프트웨어를 오일 샌드 생산 현장에 적용하는 경우, 생산정에서 플랜트로 공급되는 가스와 오일 유량이 실시간으로 확인되고, 운전 현황과 함께 운전 비용과 투자 비용 현황, 현재 살펴봐야 할 주요 이슈 즉 비용, 안전, 가용도 등을 한꺼번에 확인할 수 있다.

이러한 지능 제어를 가능하게 해주는 요인은 IoT 센서의 우수한 가시화 성능과 투명성이다. 플랜트 운전 상황을 압력과 온도, 유량 등의 데이터에 기반해 실시간으로 분석하게 해주며, 효율 향상을 위한 운전 방안도 제시해준다. 오일 샌드와 함께 생산되는 모래는 비용 상승과 운전 중단에 많은 영향을 미치는데, Siemens사는 78 GHz FMCW radar level transmitter를 이용해 모래 생산 상황을 계속 모니터링할 수 있는 솔루션을 제공하고 있다. 그림 2는 플랜트 IoT 센서들로부터 얻어진 데이터를 이용해 자동화, 가시화, 유지 보수 등을 수행하는 개념도를 보여주고 있다. IoT 센서를 이용하는 경우 사이버 보안 문제가 있을 수 있으므로, 클라우드를 이용한 안전 관리 방안도 함께 제시하고 있다.

이상 감지 및 예측 유지/보수는 생산 효율 향상은 물론 비용 절감을 위해서도 꼭 필요한 사항이다. 오일 샌드 생산 플랜트에는 비상 상황에 대비할 수 있는 다양한 제어 모듈이 적용되었음에도 생산 중단이 자주 발생한다. 2018년 기준으로 생산 중단 상태인 플랜트라고 하더라도 매일 16,000 USD의 비용이 소모되기 때문에 생산 중단 시간과 횟수를 최소화해야 한다. 이와 더불어 많은 오일 샌드 프로젝트는 도심과 떨어진 고립지에서 이루어지고, 극한 환경에서 운전되는 경우가 많으므로 디지털 기술을 활용한 이상 감지와 예측 유지/보수는 안전한 플랜트 운영을 위해서도 필요한 기술이다. Halliburton사는 오일 샌드 플랜트에 공급되는 장비의 수명이 짧아서 유지/보수 비용이 증가함을 보고한 바 있다. 특히 모래 생산과 관련되어 펌프 작동이 중단되는 경우가 많으므로 오일 샌드 생산 플랜트에는 IoT 기술이 적용된 전기 구동 압력 펌프(electrified pressure pump)를 이용하기도 한다. 트럭으로 수송이 가능한 펌프 모듈은 터빈으로 작동하며, 모듈화가 되어 있고 작동 시작이 네 시간 이내에 이루어질 수 있다. 인공 지능에 기반한 펌프 상태 모니터링과 예측 유지/보수가 가능하다. 그림 3은 센서 데이터를 이용해 상태 모니터링과 이상 감지를 위한 알고리즘을 보여주고 있다. 예를 들어 펌프에서 얻어진 데이터는 LSTM(Long Short-Term Memory)

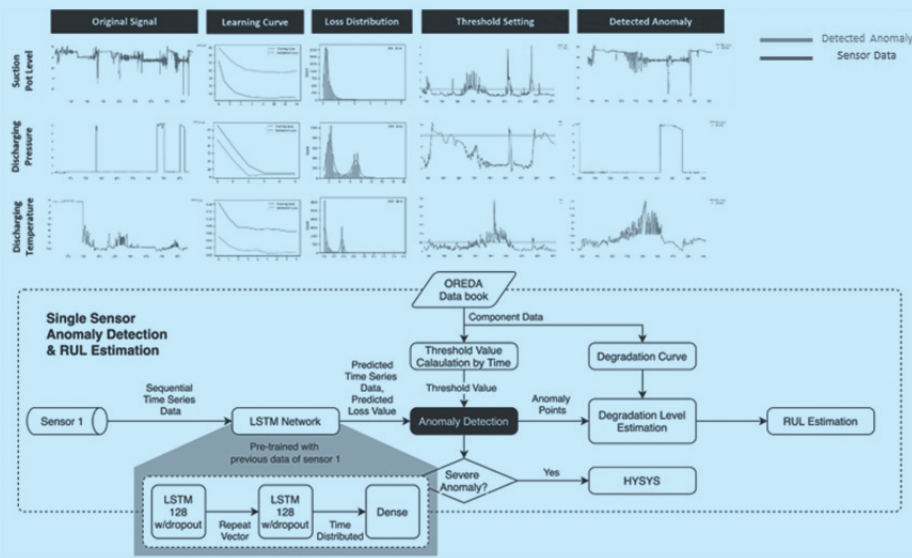


그림 3 센서 데이터를 이용한 이상 감지(anomaly detection) 및 잔여 수명 예측 알고리즘

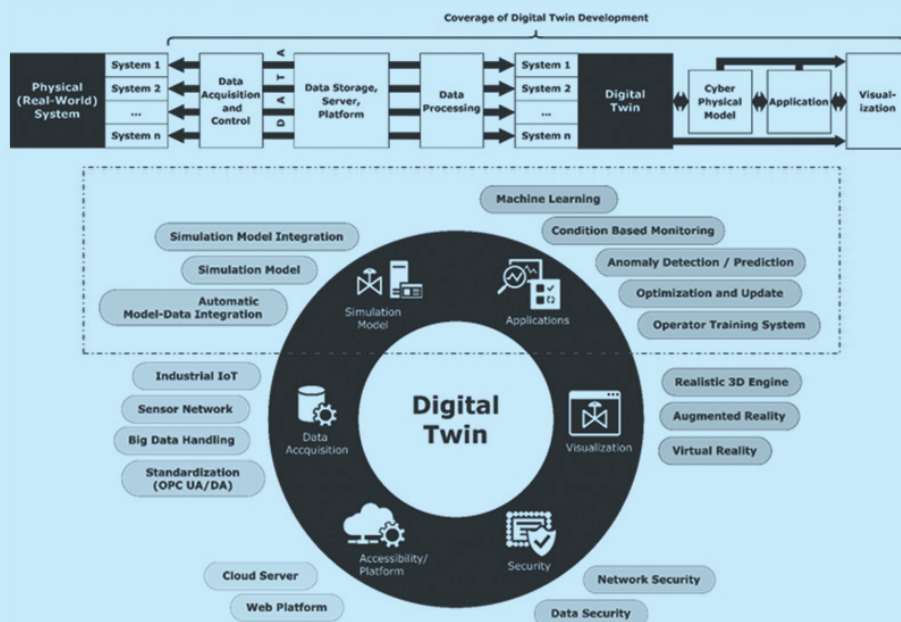


그림 4 디지털 트윈의 개념과 기술 적용 사례(출처: C. Cimino et al., <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>)

등 기계 학습 알고리즘을 활용해 정상시와 다른 이상 상황을 감지할 수 있으며, 펌프에 문제가 발생해 작동이 중지되는 상황을 미리 파악해 유지/보수를 시행할

수 있다. 펌프의 운전 특성을 기록해 잔여 수명을 예측하는 것도 가능하므로, 설치한 펌프를 최대한 사용하면서 문제 발생을 최소화할 수 있다. LSTM 외에도 다양한 기계 학습 알고리즘을 적용할 수 있으며, 분석된 데이터를 이용해 성능 최적화를 위한 제어를 수행하는 것도 가능하다.

중요한 점은 플랜트에서 기계 학습 알고리즘에 적용이 가능한 데이터를 획득하는 것이다. 정상 상태를 학습시키기 위해서는 다양한 운전 상황에 맞는 데이터를 충분히 획득해야 하며, 기계 학습 알고리즘이 이상 상황을 감지할 수 있도록 학습과 예측이 잘 이루어지는지 감독해줘야 한다.

앞서 논의한 다양한 디지털 기술들의 집합체는 오일 샌드 생산 플랜트의 디지털 트윈을 구현하는 것이다. 그림 4는 디지털 트윈의 개념과 적용 범위를 보여주고 있다. NASA에서 아폴로 프로그램의 일부로 탄생한 디지털 트윈은 2010년 들어서야 대중에게 받아들여지기

시작했다. 그림 4에서 소개한 개념과 같이 디지털 트윈은 실제 시스템에서 얻어지는 데이터를 다양한 프로세싱을 거쳐 디지털 세계에 구현하는 것으로 실제

시스템을 시뮬레이션할 수 있는 사이버-물리 모델(cyber-physical model)과 이상 감지, 잔여 수명 예측 등이 가능한 기계 학습 알고리즘, 3D 가시화 기술, 클라우드를 이용한 데이터 네트워크 구축을 모두 포괄한다. 이런 기능을 바탕으로 오일 샌드 생산 플랜트의 디지털 트윈이 구축된다면 실시간 상태 모니터링이 가능하고, 운전 상황별 에너지 소모량을 최적화할 수 있으며, 이상 감지 및 예측 유지/보수를 통해 생산 효율을 향상시킬 수 있다. 설계 단계에서는 그림 4에서 표시한 바와 같이 시뮬레이션 모델과 응용 기계 학습 알고리즘 개발이 필요하지만, 플랜트 건설 단계에

서는 데이터 획득을 위한 IoT 센서 배치 및 데이터 플랫폼 구축이 필요하고, 사이버 보안(cyber security)을 위한 클라우드 기반 또는 웹 기반 플랫폼을 구축할 필요가 있다. 최근 3D 가시화 엔진이 발전하면서 AR/VR 기술을 통해 플랜트 운전을 현실감 있게 가시화할 수 있으며, 나아가 시뮬레이션 모델과 연결해 다양한 동적 운전 시나리오를 만들고, 이를 이용해 엔지니어들의 훈련에 활용하는 것도 가능하다. 디지털 기술의 적극적인 활용을 통해 개발 비용 절감과 플랜트 운전 효율을 향상시키는 노력이 필요하다.