

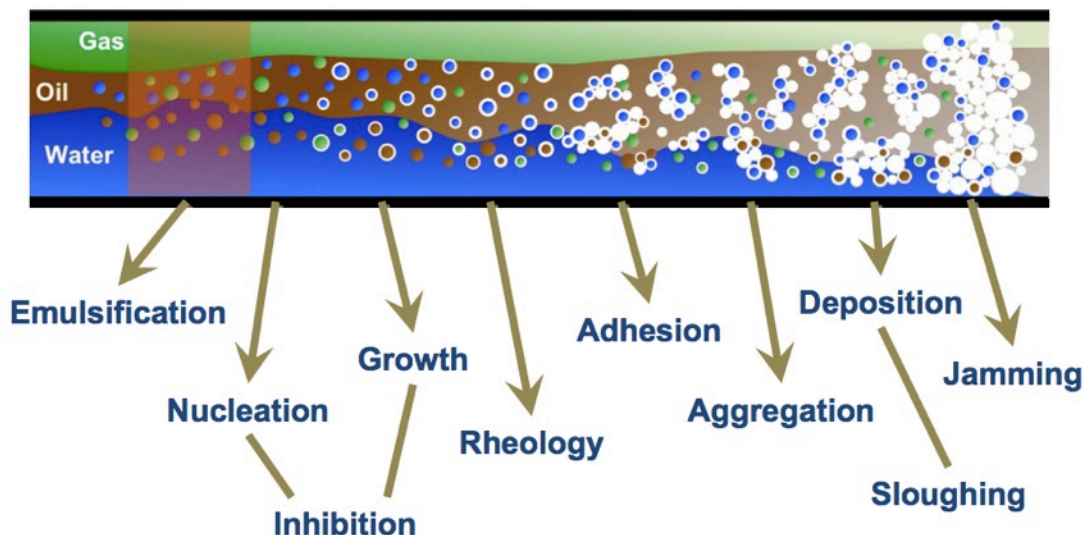
## 제 5 장 유동안정성 확보기술 II

지난 4장 강의에 이어서 유동안정성 확보 기술의 신기술에 대하여 소개하고자 한다.

이전에 소개한 재래식 기술, 특히 THI (thermodynamic hydrate inhibitor) 투입에 따른 과량 주입 비용 저감 및 효율성 제고를 위해 해외 에너지 기업들은 자체적으로 가스의 유동성 확보를 위한 신기술을 개발 중이다. 현재까지 알려진 억제 기술 중 업계의 주목을 받고 있는 기술로는 THI 주입량의 약 20~60분의 1 정도만 투입하면서도 비슷한 억제 효과를 보이는 LDHI (low dosage hydrate inhibitor)와 수송관 외벽에 전열 (heating)을 가하여 수송 중 하이드레이트 생성점 이상의 온도를 유지하려는 DEHS (direct electrical heating system) 및 하이드레이트를 슬러리 상으로 이송하되 침적과 응집을 방지하도록 조건을 조절하는 cold flow technology 등이 있다.

### I. LDHI

LDHI는 기존의 THI와 유사하거나 동일한 수준의 효과를 보이면서도 투입하는 억제제 용량을 혁신적으로 줄여줄 수 있는 신규 억제제이다. 이를 이해하기 위해서는 파이프라인 내에서의 하이드레이트 생성과정에 대한 이해가 필요하다. 다음의 그림에 하이드레이트가 생성되어 성장, 확대되는 일련의 과정을 표현하였다.



오일, 가스, 그리고 생성수가 함께 파이프라인 통해 이송되면서 하이드레이트 생성이 가능한 온도, 압력 조건의 구간을 통과하게 되면 먼저 하이드레이트 핵 (nucleus)이 형성되는 것부터 시작한다. 핵은 성장하고 (growth) 하이드레이트 입자들이 서로간의 접착력을 통해 응어리 지게 되며 (adhesion) 큰 덩어리

리로 뭉쳐지고 (agglomeration) 이러한 덩어리들은 벽면에 침착 (deposition)하게 된다. 침착된 덩어리들이 계속 늘어나게 되면 (jamming) 결국 플러깅까지 이르게 된다. 하이드레이트의 생성, 성장을 억제하려는 LDHI의 접근은 핵 형성과 성장의 단계에서 더 이상 하이드레이트가 자라나거나 엉켜붙지 못하도록 만드는 것을 목표로 한다.

LDHI는 대표적으로 KHI (kinetic hydrate inhibitor)와 AA (anti-agglomerant) 두 가지로 구분한다. THI가 물질 생성 조건을 조절해 미연에 차단하는 목적을 갖고 있다면 LDHI는 하이드레이트 생성 후에 작용해 성장과 응집의 속도를 늦춰 흐름을 원활하게 하려는 의도로 이용된다. 적용 공정 설계가 기존의 THI와 비슷하여 용이하고 주입량 대비 효율이 좋은 점이 특징이다.

KHI는 그 단어가 담고 있는 의미처럼 하이드레이트의 핵 형성 후 성장의 속도를 늦추는 작용을 하는 물질이며 AA는 하이드레이트의 생성을 용인하되 이들의 응집을 방해하고 탄화수소 상에 하이드레이트 입자를 분산시키는 작용을 하는 물질이다. KHI에서 주요 역할을 하는 것은 수용성의 polymer 인데 결정화에 필요한 활성화 에너지를 높임으로써 하이드레이트 결정 생성을 지연시키거나 이미 생성된 하이드레이트 결정핵 표면에 수소결합으로 연결되어 그 이상의 성장을 방해한다. KHI는 하이드레이트 생성반응의 속도에 관여하여 반응을 지연시키는 효과를 낸다. hydrocarbon/water/inhibitor 계가 하이드레이트 생성 영역에 들어간 순간부터 처음 하이드레이트 결정이 시작되기까지의 생성유도시간 (induction time)을 늘린다.

AA는 하이드레이트 생성을 직접 억제하는 것이 아니라 생성된 조그마한 결정들이 덩어리로 응집되는 것을 방지하는 역할을 한다. AA는 하이드레이트 표면에 붙어서 주변의 조그마한 하이드레이트 결정들을 서로 분산시킨다. 이러한 작용으로, 생성된 하이드레이트가 슬러시 형태로 배출되므로 플러깅을 방지할 수 있다.

KHI는 주로 해상이나 얕은 해저 설비에서 쓰이고 있으나 심해저 설비에의 적용 가능성을 시험하는 프로젝트가 진행 중이다. AA 또한 KHI와 비슷한 환경에서 사용하지만 멕시코만에서 수행된 심해저 시스템에서의 적용 성능 평가는 성공적이었다. 억제제 특유의 점성에 의한 압력강하를 제외하면 별다른 문제가 없는 것으로 보고되고 있다. 특정상황에서는 KHI와 THI를 혼합사용하는 것이 효율적일 때가 있다. KHI 고분자와 sub-cooling (하이드레이트 생성가능 압력과 운용압력의 차이 혹은 그 온도의 차이) 정도를 증가시키는 THI를 혼용하여 개발하고 있다. AA의 경우 유체 내에서 작동 잔류 시간에 한계가 있기 때문에 만약 설비 시스템이 적절하게 통제되지 못하면 사용 중 억제 효과가 감소하여 위험을 초래할 수 있다. 또한 THI와 마찬가지로 억제제의 과량 투입은 생산물의 질을 떨어뜨릴 수 있으며 화학물질 농도의 증가로 배출기가 오염될 우려가 있다.

LDHI는 THI에 비해 재생 설비를 위한 인프라가 요구되지 않기 때문에 CAPEX와 OPEX가 낮은 편이며 소규모의 저장 탱크와 수송관이 필요할 뿐이다. 다만 아직까지 화학 재료의 가격이 USD 4~6/lb로 고가이며 thermal insulated pipeline (USD 1 million/km)을 사용하는 점이 비용의 상승을 야기한다. LDHI는 억제제 기술 분야에서 성장 가능성이 가장 높고 효율 면에서 검증된 방식이다. 업계에서는 기존

의 THI를 대체하기 위해 고분자의 종류와 성분을 달리해서 저비용/고효율/친환경의 방향으로 억제제를 생산하기 위한 다양한 시도를 진행 중이다.

## 2. 직접 전열 난방 (Direct Electrical Heating System; DEHS)

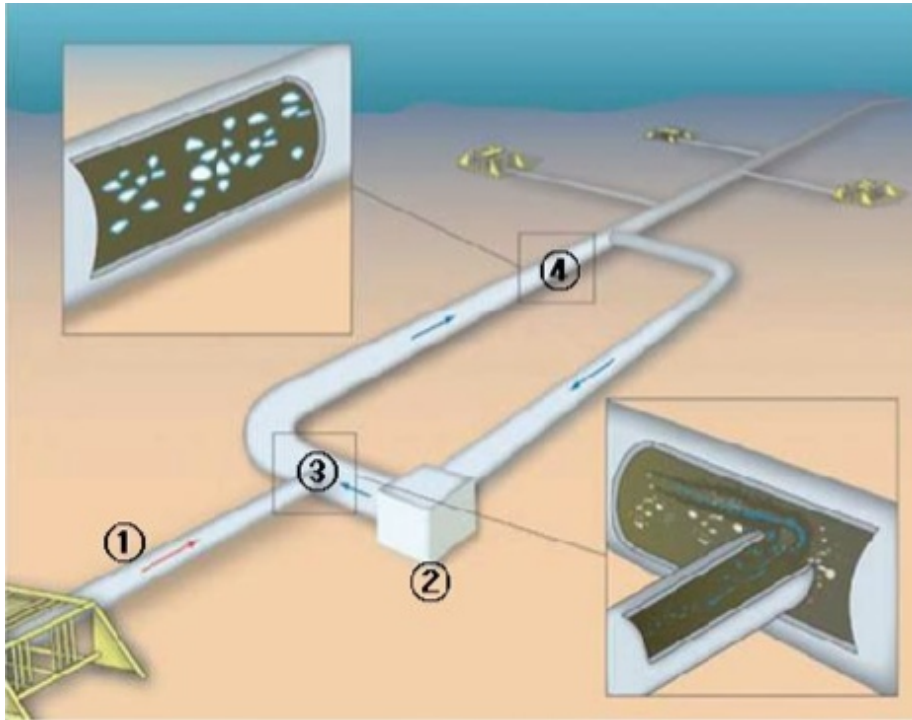
수송관에 직접 전기에너지를 이용하여 열을 주입함으로써 유동성을 확보하는 방안으로 노르웨이의 SINTEF가 고안한 직접 전열 난방은 금속 전도체를 통해 교류를 이용하여 관을 가열하는 방식이다. 현재 알려진 보온 방식 중 가장 경제성과 신뢰도가 높은 방법으로 관의 외벽을 전기를 이용하여 하이드레이트 생성점 이상으로 승온시켜 통과시킨다. 두 개의 케이블을 관의 양 끝단에 연결하여 닫힌 회선계를 구성하고 전류로 인해 방출된 열 에너지를 이용하는 시스템이다. 이 외에도 induction system을 이용한 기술이 있지만 아직 막대한 비용이 투입되는 관계로 기술연구 대상에서 제외하고 있다.

단열재질로 된 송유관은 정상상태 흐름 중에는 보온할 필요가 없으며, 이론상으로 만약 길이가 500km 로 확장 되더라도 필요한 부분에 언제든지 가열 할 수 있도록 설계한다. 하이드레이트 생성을 피하기 위해 유체의 온도는 25°C 이상을 유지하면 되는데, 대략 5km 단위 길이당 1 MW의 에너지 공급이 필요하다. 가열 시스템은 주위의 수분과 전기적으로 연결된 양극들로 유지하고, 바닷물은 관에 평행한 전기 도관으로 활용한다. 이는 전류가 수송 영역의 양극 내에서 관과 물을 통해 흐르는 것을 의미하며, 양극은 부식 방지의 역할도 수행하게 된다. 외부의 열을 이용하여 하이드레이트 생성 조건 이상의 온도를 유지하기 때문에 내부 유체의 조성비 (오일/수분/기체)나 환경에 영향을 받지 않는다. 설령 오랜 기간의 가동 중간에 의해 플래킹 효과가 나타났을 지라도 재 가열을 통해 간단히 해결할 수 있다. 케이블 설치 실수나 부식에 의한 관 벽의 구멍 생성을 우려하는 목소리가 있지만, 지속적인 감시 체계나 양극의 역할로 큰 문제가 되지는 않는다고 보고되었다. 다만, 보온에 들어가는 에너지의 손실이 다른 억제법에 비해 큰 편이다.

## 3. Cold Flow Technology

1990년 대 후반, SINTEF 기술진이 처음 고안했던 방법으로, 기술 및 경제성 판단에서 긍정적인 반응을 보인 영국 BP (British Petroleum)와 합작을 통해 공동 연구를 수행 중이다. Cold Flow 기술은 오일 및 가스 광구에 적용을 목적으로 오일의 흐름에 하이드레이트를 슬러리 상으로 함께 수송하면서 AA를 주입하여 도중에 응집을 방해한다. 천연가스 광구에서도 콘덴세이트와 수분이 차지하는 비중에 따라 본 기술의 적용 가능성을 결정지을 수 있다. SINTEF-BP가 제안한 Cold Flow 기술의 핵심은 미세한 크기의 가스 하이드레이트를 생성시키고, 이후 수송관에서 하이드레이트 성장을 억제하는 점에 있으며, 이 작업은 생산정에 수송관을 통한 흐름이 들어가기 전에 수행하게 된다. 하이드레이트 분말은 wellhead에서 배출된 가스, 콘덴세이트, 수분 흐름이 냉각된 well stream의 하이드레이트 입자들과 만날 때 급속하게 생성되며 이 입자들은 seed crystal로 작용한다. 이러한 현상을 crash cooling이라고 하는데 수송관 주위에 박막처

럼 빠르게 감싸게 된다. 만약 온도가 적절하다면 막은 점차 하이드레이트 화 하며 성장하게 되고 이 성장 메커니즘으로 유체 흐름 내의 모든 수분을 흡수하기에 이른다. 하이드레이트의 생성 요인 중 하나인 수분이 존재하지 않으면 수송관에 하이드레이트 플러킹 현상도 발생하지 않게 된다. 다음의 그림 cold flow 기술의 메커니즘을 설명하려고 한다.



- (1) 고온의 가스가 광구에서 뽑아져 나옴 (from wellhead)
- (2) dry 하이드레이트를 포함한 저온의 유체 흐름이 well-flow와 연결
- (3) (1), (2) 흐름이 만나며, well-stream의 가스는 냉각됨. sticky한 하이드레이트가 dry 형태로 변환
- (4) 하이드레이트가 분말 형태로 변환되며 무수분의 well-stream이 안정적인 유동성을 가짐

Cold flow 기술은 여러 위협 요소들을 지니고 있다. 가장 큰 문제점은 슬러리 형태의 유동 특성으로 플러깅 효과를 일으킬 만한 잠재력을 가지고 있다는 점이다. SINTEF-BP에 따르면 그간의 평가 실험에서 관련 문제가 발생한 적은 없다고 발표했지만 생산 현장에서의 적용을 위해서는 철저한 검증이 필요한 기술이다. 이 외에 냉각 공정도 공학적인 측면에서 신경을 써야 하는 부분이다. 하이드레이트의 형성 과정은 발열 과정이기 때문에 생성된 열은 다른 부분으로 확산 되어야만 한다. SINTEF는 수송관에서 2~10 km에 달하는 유체를 주변 수분의 온도와 비슷한 수준으로 냉각시키는 방법을 택하고 설계가 단순한 공정을 모색하고 있다. 이 방식은 수송관에서 주변 해수로의 열전달 메커니즘을 고려해야 하는 기술적인 문제이기에 엔지니어링 측면에서의 접근이 필요하다.

타 기술들에 비해 화학물질 첨가가 적은 편이라 환경 친화적이며 심해 환경에서이 건설비용을 비교해 보았을 때 대략 USD 1 million 정도의 비용을 절감할 수 있어 경제적인 것으로 보고되고 있다. 이는

cold flow 공정에 상대적으로 부피가 큰 화학물질들이 주입되지 않아 수송관의 직경을 줄일 수 있기 때문인데, 비용의 길이와 직경에 비례하는 수송관의 특성상 평균 USD 0.2~0.5 million/km 정도를 절감할 수 있다. 노르웨이 유전에서 cold flow 기술 테스트가 성공적인 결과를 보였으며 2008년 SINTEF는 직경 69mm의 관을 탑재한 파일럿 규모 공정의 성능 테스트를 끝낸 상태이다. BP는 2015년까지 실용화 배치를 목표로 하고 있고 BP와 SINTEF는 공정의 상업화를 위한 협력 업체를 모색 중인 것으로 보고되고 있다.