파이프라인을 통한 천연가스 수송시 관련 문제점과 그 해결 방안

장 승룡
한국가스공사 연구개발원
유체유동연구팀 선임연구원

1. 머리말

천연가스는 자연적으로 발생하는 연소성 탄화수소 가스와 불순물의 혼합물로서 그 사용의 시작은 150년 이상 되었으나 최근 들어 그 수요가 급증하고 있다. 이에 대한 가장 큰 원인으로서 천연가스는 액체 연료에 비하여 저장 및 수송이 어렵기 때문이다. 개발 초기에 천연가스는 오직 생산지역에서만 사용되었으며 초과되는 생산량은 공기에 배출시키거나 태워버렸다. 이러한 현상은 유전에서 석유와 함께 생산되는 천연가스의 경우에는 더욱 현저하였다.

그림 1은 일반적인 천연가스 생산 및 처리 시스템을 보여주며 가스전에서 소비자에게 도달하기까지의 모든 절차를 보여준다. 그 이후 큰 직경을 가진 고압 파이프라인, 승압기의 개발 및 저류층에서의 가스 저장 기술의 발달과 함께 천연가스 생산 및 수송에 필요한 기술 개발이 싹트게 되었다.

미국의 경우, 1980년대의 천연가스가 연료로 차지하는 비율은 전체 에너지 수요의 30%를 초과하였는데 이는 1920년대의 4%와 1950년대의 18%에 비교할 때 괄목할만한 성장을 보여준다. 수요의 급증에 따라 그 가격이 상승하여 미국의 경우 1950년대의 평균 가격은 $0.07/Mscf 이었으나 1970년대 후반에는 $0.17/Mscf, 1980년대에는 $0.90/Mscf로 가격이 인상되었으며 일부 지역에서는 $9.00 /Mscf로 판매되기도 하였다.

천연가스 수요의 급증에 따라 과거에 비하여 산지로부터 더욱 광범위한 지역으로 가스 수송이 이루어지고 있다. 현재 파이프라인은 천연가스 수송에 있어서 가장 경제적인 수단이며 제작, 설치가 용이하고 그 수명이 길다. 또한 이러한 수요 급증 현상은 육상 개발뿐만 아니라 해저 개발도 요구하고 있으므로 해저에 존재하는 천연가스는 향후 급증하는 천연가스의 보고가 될 것이며 또한 그 개발 심도도 지속적으로 증가하리라 생각한다.

이러한 상황에 따른 수송 지역의 다변화 및 수송거리의 연장화로 인하여 수송에 따르는 많은 문제점이 발생하므로 가스 수송 분야는 이러한 문제점들의 기술적 해결 방안을 모색하고 있다.

몇 가지 예로서, wet gas와 condensate 수송, 천연가스 수화물 및 고체 불순물의 축적으로 인한 배관 막힘, transient 및 부식 (corrosion) 조절 등이 있다.

본 글에서는 이러한 수요 급증에 따라 증가하고 있는 파이프라인을 통한 천연 가스 수송시 앞서 언급한 몇 가지 관련 문제점들을 정리하고 그 문제점들에 대한 간략한 해결방안을 제시하고자 한다.

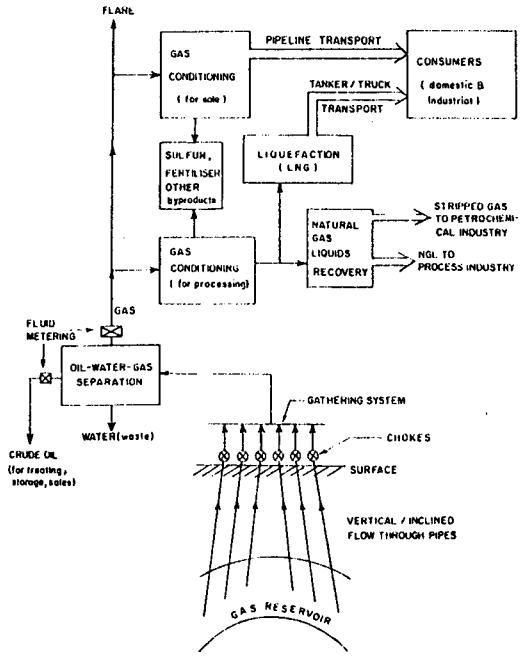

그림 1. 천연가스 생산 및 처리 시스템

2. Wet Gas 와 Condensates

천연가스의 습도 (wetness)는 반드시 수분의 존재만을 의미하지는 않으며 일반적으로 펜탄 (pentane) 이상의 높은 비중을 가진 요소가 상당량 존재함을 의미한다.

천연가스 파이프라인의 현장 운영 조건은 일반적으로 높은 비중을 가진 요소의 이슬점 (dew-point) 부근이기 때문에 가스의 열역학적인 phase behavior로 인하여 응축(condensation)이 발생한다. 응축 현상은 가스 파이프라인을 단상 유동 (single-phase flow)에서 이상 유동 (two-phase flow) 상태로 변화시킨다.

미국의 경우 가스 수요의 급증으로 인하여 멕시코만의 심해저 가스전 생산이 활발히 진행됨에 따라 파이프라인 주변의 낮은 해저 온도 조건에서 장거리를 통한 습식 가스가 수송되고 있으며 이와 같은 조건에서 응축물의 형성은 파이프라인 내에 상존하게 된다. 가스 파이프라인에서 응축물이 존재할 경우 가스 수송의 효율을 감소시키며 주변 장비들의 손실 및 오동작을 유발시킨다. 그러므로 가스 파이프라인내의 응축물의 예측 및 제거 기술은 파이프라인의 설계 및 운영을 향상시킨다. 많은 연구 결과 wet gas는 dry gas 에 비교하여 phase envelop의 이슬점 위치를 상당히 변화시키며 이러한 습도의 존재는 phase envelop의 크기를 증가시켜 건식가스보다 더 높은 온도에서 액체를 발생시키므로 그 양을 증가시킨다.

그림 2는 건식가스와 습식 가스의 일반적인 phase envelop를 비교한 것이다. phase envelop에 표시된 선들은 세 가지 유량에서 가스 수송 파이프라인의 압력 및 온도의 변화를 나타낸다. 이것은 매우 중요한 사실을 보여주는데 그것은 phase envelop를 이용하여 파이프라인 운영을 계획할 수 있다는 점이다.

그러므로 이러한 phase envelop를 이용한 열역학적 모델 개발 및 이용은 응축물의 발생점 및 그 양의 예측을 가능하게 할 것이며 이에 따른 파이프라인의 효율적인 운영이 가능해질 것이다.

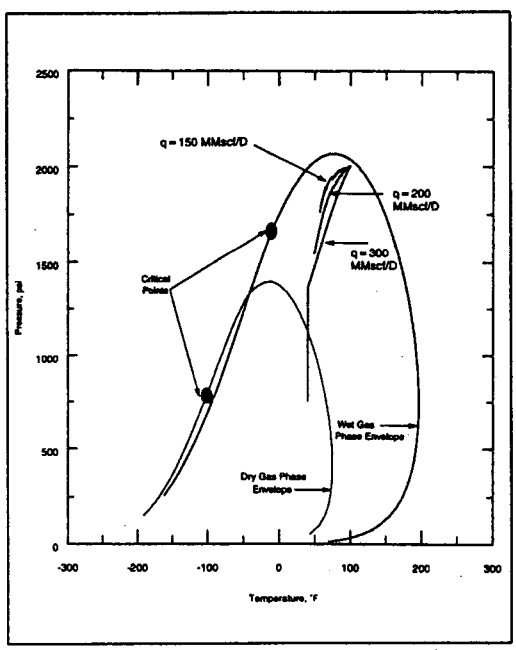

그림 2. dry gas와 wet gas의 phase envelop 비교

3. 다상유동 모델링의 활용

앞서 언급한바와 같이 파이프라인으로 wet gas를 수송할때 일정한 양의 액체가 포함되므로 다상 유동 문제로 간주되어진다. 비록 단일상의 가스를 파이프라인 입구에서 송출한다해도 retrograde condensation 현상에 의해 응축물이 형성된다.

이러한 액체의 존재는 파이프라인 내의 압력 손실을 상당히 증가시키는데 전체 체적 0.5% 정도의 적은 응축물이 존재할 경우에도 단일상 가스 유동에 비하여 30%나 더 압력 손실이 증가한다. 이러한 이유로 인하여 신뢰성있는 wet gas 예측 모델 개발이 필요하며 이는 파이프라인의 설계에 매우 중요하다.

또한 파이프라인이 경사져 있을 때 수평관에 비하여 낮은 경사 부분에 액체가 축적됨으로써, 천연가스의 이동을 방해하는 현상이 발생하며 또한 이동하더라도 일단 가스 응축물이 생성되면 파이프라인을 따라 진행하면서 하류 지점의 압력, 온도 변화에 따라 유동 형태(flow pattern)가 지속적으로 변화하므로 경사각이 유동 형태에 미치는 영향도 모델 개발시 고려되어야 한다. 왜냐하면 유동 형태에 따라 발생하는 압력 손실이 상이하기 때문이다.

또한 응축물 형성 과정은 충분히 다중 성분(multi-component) 상거동 이론에 의하여 설명되는 반면 그 이동에 관련된 이론은 아직 정립되어 있지 않다. 그 이유는 형성된 응축물은 유동 가스에 관련된 모든 수력학적 힘과 관련이 있는데 이러한 힘들 사이의 불명확한 관계로 인하여 그 순 효과를 예측하기 어렵기 때문이며 이것은 가스/액체 경계면과 유동 형태의 기하학적 배치에 의해 더욱 복잡해진다.

이러한 문제 해결을 위한 접근 방법의 하나는 다상 유동 묘사를 이용한 모델링이다. 그러나 가스 응축물 유동 문제는 고유한 다상 유동 모델링의 문제가 아닌데 그 이유는 일반적인 다상 유동 모델의 경우, 적어도 파이프라인 입구에서 액체 및 가스 유량이 정의되지만 가스 응축물 문제에서는 이것이 가능하지 않으며 시스템이 첫 번째 액체 방울의 형성 지점까지는 단상 유동으로 존재하므로 그 지점까지는 단상 문제가 적용되어진다. 이후 액체가 생성됨에 따라 이상 유동 문제로 전환되지만 더욱 어려운 점은 사전에 응축 시작점과 응축물 양의 정확한 예측이 불가능하다는 것이다.

이와 같이 문제는 일반적인 이상 유동 모델을 사용할 수 없으며 따라서 개발되는 모델은 응축 시작점과 응축량 및 유체 이동을 예측할 수 있는 단상과 다상 유동 모델이 복합된 복합 모델 (complex model)이어야 한다. 또한 형성된 액체 일부는 유동 상황에 따라 하류 지점에서 재기화(revaporization) 된다는 점도 고려하여야 한다.

정리하면 응축 및 재기화 가능성과 이상 유동 발생 지점 예측, 경계면에서의 질량 전달, 상거동 및 유동 형태 변화 예측은 가스 응축물 문제를 해결할 수 있는 모델링 개발에 있어서 가장 중요한 요소이다.

4. 수화물의 발생 및 그 영향

천연가스 수화물 (hydrate)은 얼음 또는 젖은 눈과 외형상 매우 유사한 고체의 결정이지만 얼음보다는 훨씬 밀도가 작으며 clathrates라 불리는 성분으로 분류된다.

가스 파이프라인에서 수화물의 형성은 이 라인의 최적 운영에 역효과를 초래하며 만약 이로 인하여 관내가 막힐 경우 큰 사고를 유발시킨다.

일반적으로 수화물 형성은 늘 저온에서 발생하는 것으로 생각하기 쉽지만 높은 압력에서 운영시 상대적으로 고온 (70oF)에서도 형성된다. 특히 차가운 해저면을 따라 습한 가스를 운반하

는 해저 파이프라인의 경우, 수화물 형성은 상존하게 된다. 수화물 형성 조건은 물의 존재 및 이슬점 이하에 존재하는 천연가스이며 만약 물이 존재하지 않는다면 수화물 형성은 이루어지지 않는다.

이를 제거하기 위해서는 수화물 형성 온도 이상으로 온도를 상승시키기 위한 높은 압력이 필요하다. 수화물 형성을 촉진시키는 요소로는 높은 속도, 압력 맥동, 작은 결정 핵의 존재 및 황화수소 (H2S)와 이산화탄소 (CO2)의 존재를 들 수 있다.

이러한 수화물을 제거하는 방법을 dehydration이라 하는데 수송 파이프라인에서의 수화물 형성 억제, 산성가스 유동에서 설비의 부식 방지를 위해서 필요하며 첨가제를 주입하는 방법이 많이 사용되고 있다.

가장 흔히 사용되는 첨가제로는 암모니아, 염분, 글리콜 및 메탄올이며 이들은 수화물 형성 온도를 저하시켜 파이프라인에서의 수화물 형성을 억제한다. 이중 메탄올과 글리콜은 가장 많이 사용되는 억제제(inhibitor)이지만 값이 비싼 것이 단점이다. 그러나 수화물 문제가 간헐적으로 발생하여 히터나 탈수 장비 설치가 비경제적일 때는 메탄올 또는 글리콜의 사용이 경제적이다.

그림 3은 천연가스에서 수화물 형성 예측을 위하여 사용되는 압력-온도 곡선을 나타낸다. 그 외에 유동 파이프라인 내의 불순물의 최소화, 적합한 치수의 밸브 사용 및 초크의 적합한 배치 등도 수화물 억제에 도움이 된다.

수송 파이프라인에서 가장 중요한 기술적 해결 과제의 하나는 수화물로 인한 파이프라인의 막힘 감지 및 이러한 막힘을 제거하는 것이다. 비록 phase envelop에서의 수화물의 형성 조건을 예측할 수 있다고 하여도 수화물에 의한 막힘 여부및 그 존재 지점을 예측하는 기술은 거의 전무한 실정이다. 현재까지 수송 파이프라인에서 수화물 막힘의 감지 및 그 위치를 예측하

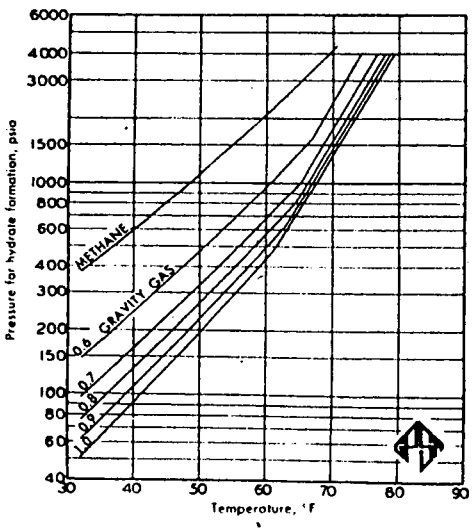

그림 3. 천연가스 수화물 형성 예측을 위한 압력-온도 곡선

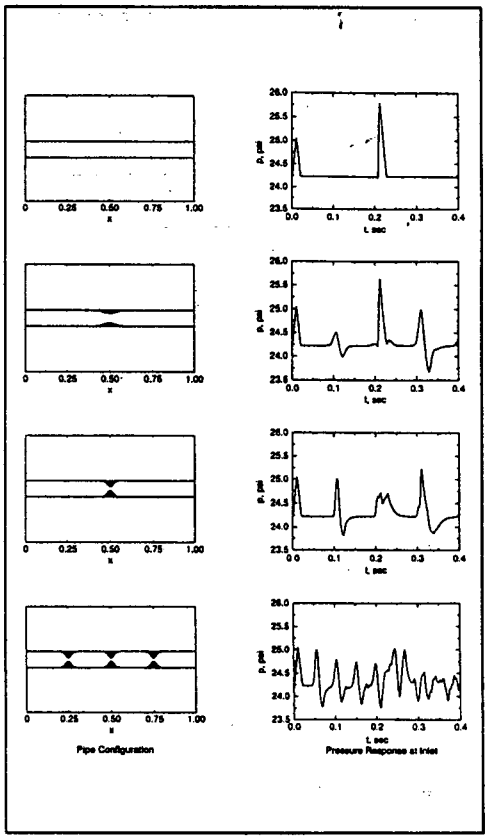

그림 4. 압력 transient 사용에 의한 파이프라인 막힘 현상 감지

기 위한 방법으로 transient 전파를 이용하는 것이다.

그림 4는 유동 상황에 따라 파이프라인 내에서 변화되는 조건을 파이프라인 입구에서 압력계로 감지한 결과이다.

모든 경우, 파이프라인의 출구 밸브를 닫은 상태로 입구에서 압력 펄스를 집어넣는데 그 반향은 닫힌 출구 밸브와 수화물의 존재 지역에서 발생하며 이들은 파이프라인의 입구에서 감지된다.

5. Sour Gas 생산 및 처리

천연가스 수요의 급증에 따라 황화수소(H2S)를 포함하는 천연가스의 개발이 증가하고 있다. 황화수소와 이산화탄소를 포함하는 천연가스를 sour gas라고 하며 이들을 제거한 가스를 sweet gas라고 한다. 그 이유는 물이 존재할 때 이들 성분은 산성 물질을 생성하기 때문이다.

저류층으로부터 생산된 가스는 미소량에서부터 0.30% 이상의 범위에 걸친 황화수소를 포함하는데 일반적으로 천연가스 판매 계약시 가스 내의 4 ppm 이하의 황화수소 농도를 요구하므로 황의 제거는 매우 정교하게 이루어져야 한다. 일반적으로 이산화탄소 (CO2)의 농도는 1~ 4% 범위에서 존재한다.

황화수소는 악취외에 독성이 매우 강하여 600 ppm 이상의 농도에서는 3~5 분내에 인체에 치명적이다. 그러므로, 적절한 처리 과정 없이는 가정용 연료로 사용이 적합하지 않으며 또한 황화수소는 가스 수송 및 처리 시스템에 연관된 모든 금속에 부식성이므로 시스템의 손실을 유발시킨다. 이산화탄소는 열량을 감소시키므로 단지 가스의 에너지를 증가시키기 위하여 제거된다. 또한 황화수소와 이산화탄소는 수화물 형성을 촉진시키는 역할도 한다. 이를 제거하기 위한 방법을 desulfurization이라 하며 고체에 흡착 (건식 처리) 및 액체에 흡수 (습식 처리) 시키는 방법이 있다. 습식처리에는 비재생 처리 (Chemsweet), 황화수소 분리를 포함한 재생 처리 (Amine Process) 및 황 원소 분리를 포함한 재생 처리등이 있다.

6. 부식 관련 문제

가스 파이프라인의 부식의 문제는 수년동안 가스 산업에서 지속적으로 발생하고 있다. 전통적인 방법의 하나인 부식 억제제 주입은 현재도 많이 사용되고 있다. 그러나 화학 억제제가 더욱 개선되고 있음에도 불구하고 부식은 계속 발생하고 있는데 그 이유는 화학 물질의 비효율성의 문제보다는 수송 시스템의 비효율성에서 비롯된다.

왜냐하면 일반적으로 가스 수송 파이프라인 내에 가스 응축물이 존재하므로 부식 억제제는 다상 유동 상황에서 이동하게 된다. 그러므로 억제제의 분포에 따른 농도 추적 기술이 부식 제거의 향상을 위하여 필요하며 이를 위하여 혼합, 다상의 수력학 모델 (compositional, multiphase hydrodynamic model)을 이용하여야 한다.

7. Transient의 감지 및 이용

거의 모든 가스 수송 파이프라인의 운영시 transient 현상이 발생하므로 이러한 현상을 예측할 수 있는 신뢰성있는 모델링의 개발은 수송 시스템에서 가스 수송의 최적 설계 및 배관망 주변 장비 (초크, 밸브, 승압기등)의 운영 거동 예측을 위하여 필요하다. 실제로 파이프라인과 배관망 주변 장비의 손실은 압력 동요를 유발시키며 이에 따른 천이 압력은 많은 사고를 발생시킨다.

이러한 transient의 예측은 현재 가스 수송을 연구하는 공학자가 직면한 가장 어렵고 도전적인 기술적 문제의 하나이며 다상 유동시 이러한 문제는 더욱 복잡해진다. 그러나 이러한 transient 현상은 운영과 안전 측면에서 많은 문제를 유발시키는 반면 가스 수송에 연관된 상당수의 문제를 해결하는 데에도 중요한 역할도 할 수 있다.

현재 이러한 transient 현상을 이용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있는데 예로서 배관내의 불순물을 감지하는 도구로서 transient 전파를 사용하는 것이다. 만약 이러한 transient 현상의 적절한 예측과 특성화가 가능하다면, 수화물 및 기타 불순물의 위치, 그 양 및 기하학적 배열을 예측할 수 있으며 이를 이용하여 공학자들은 그 대처 방안을 모색할 수 있다.

8. 맺는말

지금까지 천연가스 수송 파이프라인에서 발생 가능한 몇 가지 문제점 및 그 해결 방안을 간략히 정리하여 보았다. 천연가스는 환경적 측면에서 비오염성이고 그 양이 풍부하며 또한 최근 천연가스 자동차 (NGV; Natural Gas Vehicle)의 등장으로 인하여 더욱 수요가 증가할 전망이다.

이에 따라 육상 개발에만 의존하던 것에서 벗어나 심해저 가스전 개발이 지속적으로 증가할 것이므로 장거리 및 넓은 지역에 걸친 가스 수송은 필연적이라 하겠다. 이러한 장거리 수송에 따라 많은 문제가 발생하고 있으며 이중 몇 가지를 이 글에서 기술하였다.

현재 이 분야에 많은 연구가 진행되고 있으므로 점차 하나씩 문제가 해결되리라 생각하며 이 글이 향후 파이프라인 수송에 관련된 연구에 일익을 담당하여 가스 산업 분야에 공헌할 수 있기를 바라마지 않는다.