
Global Report

고지대 및 저온상태에서 3상 파이프라인을 이용한 오일-가스-수자원 채집 및 운송에 대한 연구

1. 개요

- 1.1. 열역학 모델의 구성 및 수정
- 1.2. 오일-가스 채집 및 운송반경 계산
- 1.3. 차트의 응용 프로그램 조건

2. 결론

1. 개요

오일-가스(oil-gas) 채집 및 운송시스템은 운송과정에서 발생하는 열에너지 소비가 총 에너지소비량의 50~70%를 차지한다. 이에 오일을 가열하여 파이프라인의 응축을 방지함으로써 운송과정에서 마찰손실을 줄여야 한다[1]. 지구상의 모든 유전들이 매장량이 점점 줄어들면서 후반단계에 들어감에 따라 채집된 석유에 수분함량이 높아지고 있으며, 생산비용 대비 수익은 점점 더 나빠지고 있다[2]. 따라서 고지대나 낮은 온도에서 오일-가스 채집 및 수송을 통해 열에너지 소비를 줄이는 것이 중요하고 어려운 문제로 대두되고 있다. 고지대나 저온에서 오일-가스 채집 및 운송 시 파이프라인이 정상적으로 작동할 수 있는지 여부를 결정하는 것은 오일-가스를 채집하는 반경의 크기에 달려있다. 1950년대부터 2000년대 초반까지 많은 연구자들은 열 유압 모델(thermal hydraulic model)의 구성 및 계산을 위해 3상 흐름(오일-가스-물)의 온도 및 압력 강하를 계산하기 위해 많은 경험적 모델을 제안했으며, 이러한 모델의 계산결과도 현실에 부합하는 것으로 입증되었다[3][4][5][6]. 그러나 특정 파이프라인에 사용할 수 있는 모델이 거의 없었기 때문에 파이프라인의 실제 작동과 일치하지 않아 큰 오류가 발생하였다. 이에 유전 측정 데이터와 결합된 오일-가스-물 3상 파이프라인(oil-gas-water three-phase pipeline) 운송의 경험적 온도/압력 강하 모델을 수정하고 맞춤 필요가 있다.

조사에 따르면, 일부 연구자들은 오일-가스 채집 및 운송 반경을 계산할 때 3상 파이프라인을 통해 운송되는 원유의 열 및 유압특성에 대한 온도변화에 따른 오일의 물리적 파라미터의 영향을 고려하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 이 연구에서는 3상 혼합 파이프라인의 열 유압 모델을 설정한 다음, 파이프라인의 실제 작동 파라미터에 따라 설정 모델을 수정하여 수정된 모델을 파이프라인의 열 및 유압 분배를 계산하는 데 이용한다. 3상 파이프라인 종단의 압력이나 온도가 한계치에 도달하는 시점에서 채집 및 운송 반경을 계산함으로써 보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. 마지막으로 이러한 계산방법을 기반으로 단일 계수감도분석 방법을 이용하여 오일-가스 채집 반경에 영향을 미치는 요인에 대한 민감도를 분석한다. 더 높은 감도를 가진 인자는 채집반경 차트를 그리는 데 사용되며, 이는 3상 파이프라인이 고지대나 저온상태에서 채집 및 운송을 수행할 수 있는지에 대한 기술적 지원을 제공한다.

1.1. 열역학 모델의 구성 및 수정

유전의 a-b 파이프라인을 연구대상으로 선택하였다. 파이프라인의 총 길이는 3,100m, 매장된 깊이는 0.8m, 외경은 114mm, 벽두께는 4.5mm이다. 파이프의 매체는 석유, 가스 및 물이며, 원유의 동결점은 34°C, 원유의 밀도는 20°C에서 882.6 kg/m³이다. 원유의 점도와 특정 열용량을 실험적으로 측정하였으며, 측정에 이용된 원유의 구성요소별 몰 분수(Molal fraction)를 <표 1>에 나타낸다.

<표 1> 원유의 구성요소별 몰 분수(Molal fraction)

원유의 구성요소	몰 분수(Molal fraction)[%]
C1	91.81
C2	4.05
C3	1.27
i-C4	0.19
n-C4	0.07
i-C5	0.01
n-C5	0.03
N2	1.85
CO ₂	0.72

* 자료 : Gao Wei et al., “ Research and application on the gathering and transportation radius chart of multi-phase pipelines in high water cut stage”, Case Studies in Thermal Engineering 21 (2020) 100654, p.3.

비선형 회귀분석을 통해 원유의 점도와 온도 간의 관계는 식 (1), (2)과 같이 계산할 수 있다:

$$\lg \mu_o = \frac{10143}{t^2} - \frac{322.94}{t} + 0.9476, 33.34 < t \leq 70 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\lg \mu_o = -\frac{4635.3}{t^2} + \frac{416.56}{t} - 7.6425, 22.28 < t \leq 33.34 \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 t 는 원유의 온도[°C], μ_o 는 t°C, Pa·s에서 원유의 동적 점도를 나타낸다. 특정 열용량과 온도 사이의 관계는 식 (3), (4), (5)와 같이 계산할 수 있다:

$$c_o = -0.00006t^2 + 0.0318t + 2.4237, 20 < t \leq 33 \quad \dots\dots\dots (3)$$

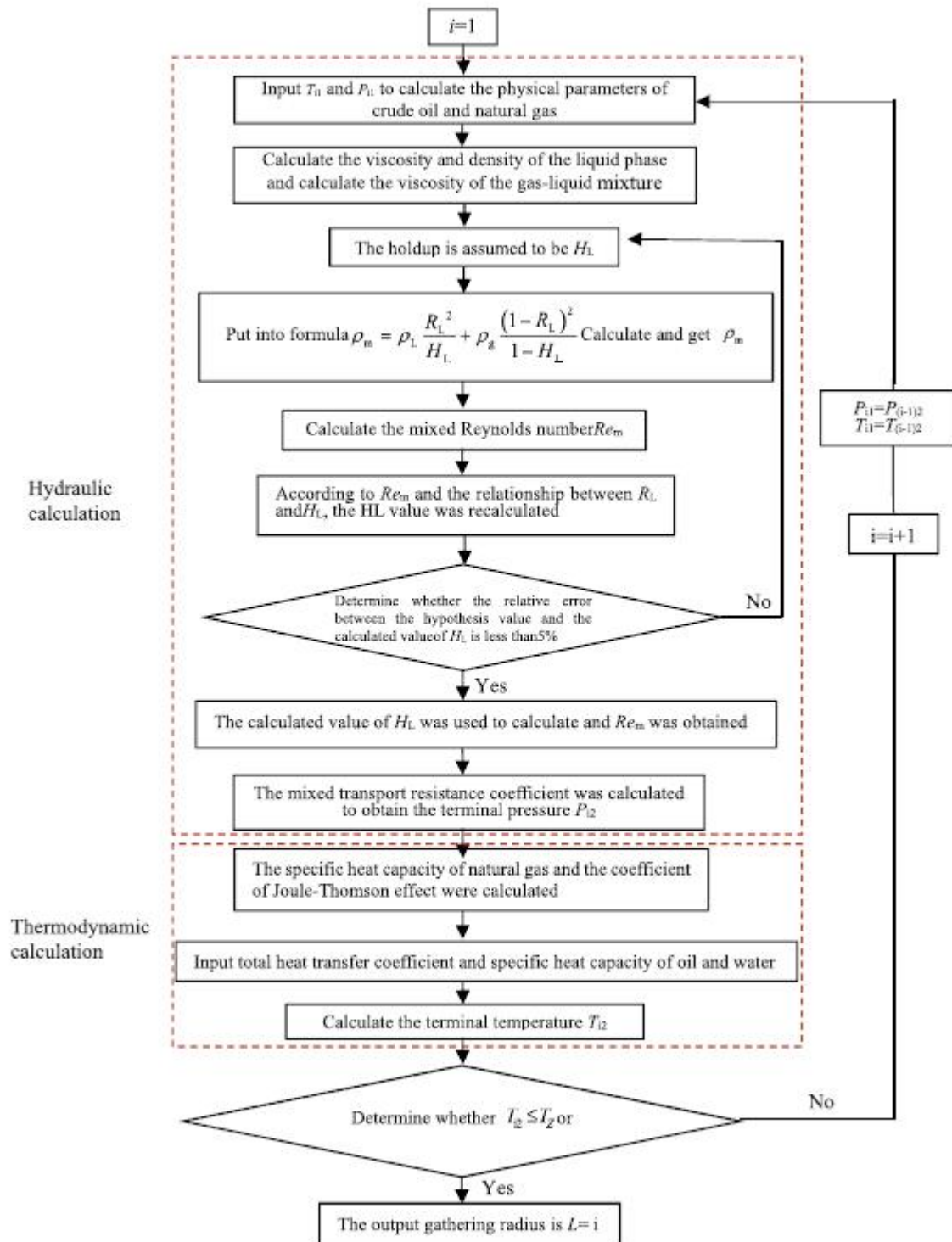
$$c_o = 0.0028t^2 - 0.2887t + 9.9903, 33 < t \leq 54 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$c_o = -0.0001t^2 + 0.0143t + 2.0898, 54 < t \leq 63 \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 t 는 원유의 온도[°C], C_o 는 t°C, kJ/(kg·°C)에서 원유의 특정 열용량을 나타낸다.

1.2. 오일-가스 채집 및 운송반경 계산

오일-가스 채집 및 운송반경은 파이프라인의 시작 압력이 가장 낮은 입구측 온도와 압력의 조건하에서 파이프라인에서 원유운송을 구동할 수 있는 거리를 나타낸다. 따라서 채집 및 운송반경을 계산할 때 파이프라인의 축 온도강하 및 압력강하를 동시에 고려해야 한다. 파이프의 온도강하는 파이프에서 매체의 물리적 파라미터와, 파이프의 압력강하에 영향을 미친다. 따라서 오일-가스 채집 및 운송에 대한 계산 결과의 정확도를 향상시키기 위해서는 오일, 가스 및 물의 3상혼합 운송 파이프라인의 온도 및 압력강하를 계산할 필요가 있다. 채집 및 운송반경 계산과정에서 파이프라인은 길이가 1m인 여러 개의 불연속적인 작은 세그먼트로 구성되고, 시작온도와 압력이 입력되며, 첫 번째 세그먼트에서 원유 및 천연가스의 점도 및 밀도와 같은 물리적 파라미터가 계산된다[7]. 이어서, 제1 파이프 세그먼트의 단말 온도와 압력이 결정되는데 이는 제2 파이프 세그먼트의 시작 파라미터가 된다. 따라서 파이프 세그먼트의 종단온도는 최소 허용온도(T_2) 이하이거나 이와 동일할 때까지 계산된다. 이때 단말 압력은 최소 허용 가능한 입구 압력 P_2 보다 작거나 동일하다. 이 시점에서 각 섹션의 총 길이가 곧 오일-가스 채집 및 운송반경이 된다. 이러한 계산과정은 [그림 1]과 같다.



* 자료 : Gao Wei et al., “ Research and application on the gathering and transportation radius chart of multi-phase pipelines in high water cut stage”, Case Studies in Thermal Engineering 21 (2020) 100654, p.6.

[그림 1] 오일-가스 채집 및 운송반경 계산과정

1.3. 차트의 응용 프로그램 조건

a-b 파이프라인의 작업조건과 관련된 파라미터는 <표 2>와 같다:

<표 2> 파이프라인의 작동 파라미터

시작점 온도[℃]	주변 온도[℃]	오일-가스 생산량[t/d]	수분 함량[%]
47	21	197	89

* 자료 : Gao Wei et al., “ Research and application on the gathering and transportation radius chart of multi-phase pipelines in high water cut stage”, Case Studies in Thermal Engineering 21 (2020) 100654, p.10.

오일-가스 운송스테이션A에서 생산된 유체의 입구온도는 45℃(원래 운영체제는 오일-가스 운송스테이션A의 관리자들이 가열용로를 통해 출구온도를 47℃로 올린 다음 중앙 처리스테이션B로 이송한다는 것이다.), 주변온도에 따라 쿨리할 차트 플레이트는 도 5(c)이다. 채집된 오일-가스 운송반경은 시작점 온도, 오일-가스 생산능력 및 수분함량을 결합하여 계산된다. 오일-가스의 수분함량과 채집 및 운송반경 사이의 관계곡선에 따르면, 시작점 온도가 45℃일 때 오일-가스의 수율과 채집 및 운송반경 사이의 관계에 따라 197t/d에 대응하는 채집 및 운송반경은 3,300m이며, 수분함량 비율이 89%일 때 이에 해당하는 채집 및 운송반경은 3,080m이다. 197t/d에 대응하는 채집 및 운송반경(3,300m)은 실제 파이프라인의 길이(3,100m)보다 크기 때문에 파이프라인을 실온에서 채집하고 운반할 수 있다. 즉, 이러한 작업 조건에서 채집된 오일-가스는 환송스테이션A에서 들어오는 액체를 가열하지 않고 중앙 가공스테이션B로 안전하게 운반할 수 있게 되는 것이다. 스테이션 A에 사용되는 가열 용광로는 천연가스 연료가 공급되는데 이때 현장적용 효과는 채집 및 운송반경 차트의 개선된 작업시스템을 적용함으로써 53.8m³의 천연가스 소비량을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 기술은 고지대나 저온상태에서 동일한 사양 및 유사한 작동 파라미터를 가진 오일-가스 채집 및 운송을 수행할 수 있는지에 대한 기초를 제공한다. 이를 기반으로 오일-가스 채집 및 운송반경은 특정 오일-가스의 특성 파라미터, 파이프라인 사양 및 작동 파라미터에 따라 재계산될 수 있다. 아울러 각각의 영향을 받는 인자의 감도는 기준 상태분석에 의해 결정되고, 지상 채집 및 운송작업에 대한 지침을 제공한다.

2. 결론

이 연구에서는 유전 현장에서 측정된 데이터와 결합하여 오일-가스-물 혼합 3상 운송 파이프라인의 열 및 유압 모델링을 통해 오일-가스의 채집 및 운송반경의 결합 계산방법을 제시하였다. 열 유압 모델은 파이프라인의 온도강하를 효과적으로 예측할 수 있으며, 계산된 값과 측정값 사이의 평균 상대오차는 각각 2.5%와 7.67%로 나타났다. 이러한 정확도는 실용적인 엔지니어링 응용조건을 충족하며, 열 유압 커플링으로 계산된 채집 및 운송반경도 정확함을 확인하였다. 단일 인자감도 분석방법은 오일-가스의 채집 및 운송반경에 영향을 미치는 요인(시작점 온도/액체 수율/질량 수분함량/주변온도/가스 생산속도/출발점 압력 등)의 감도를 평가하는 데 사용되었다. 이러한 감도분석을 기반으로 오일-가스-물 혼합 3상 운송 파이프라인이 개발되어 고지대나 저온상태에서 파이프라인 채집에 대한 기술지원을 제공할 수 있을 것이다. 오일-가스의 채집 및 운송반경에 영향을 미치는 요인이 파악되면 이러한 작업 조건 하에서 파이프라인의 채집 및 운송반경에 대한 차트 작성 및 컨설팅을 결정할 수 있을 것이다. 특히 파이프라인의 채집 및 운송반경이 파이프라인 길이보다 크면 고지대나 저온상태에서 효과적인 운송을 구현할 수 있을 것이다. 아울러 a-b 파이프라인의 채집 및 운송반경의 적용을 통해, 오일 스테이션A의 작업시스템을 개선하여 원래 작업시스템 대비 1일 53.8m³의 천연가스를 절감 할 수도 있다.

고지대나 저온상태에서 파이프라인을 이용하여 오일-가스-수자원을 운송하는 데에는 에너지소비가 급격히 증가할 수 있다. 이 연구에서는 열역학적 유압계산 모델링을 통해 측정 데이터에 따른 자원 채집 및 운송 관련 연구 및 응용프로그램을 제시하고 있다. 이 연구결과는 국내 고지대 및 산업현장의 오일, 가스 및 수자원 공급 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] S. Hu, G. Zhou, Q. Miao, Energy consumption analysis on eastern oil pipeline network[J], Oil Gas Storage Transp. 29 (5) (2010) 1–2.
- [2] H. Liu, Y. Gao, X.H. Pei, et al., Progress and prospect of downhole cyclone oil–water separation with single–well injection–production technology[J], Acta Pet. Sin. 39 (4) (2018) 463–471.
- [3] C.E. Schorre, Here’s how to calculate flow temperature in a gas pipeline [J], Oil Gas J. 9 (27) (1954) 66–68.
- [4] D.M. Coulter, M.F. Bardon, Revised equation improves flowing gas temperature prediction[J], Oil Gas J. 2 (26) (1979) 107–108.
- [5] H.H. Stapelberg, D. Mewes, The pressure loss and slug frequency of liquid–liquid–gas slug flow in horizontal pipes[J], Int. J. Multiphas. Flow 20 (2) (1994) 285–303.
- [6] P.L. Spedding, A. Murphy, G.F. Donnelly, et al., Pressure drop in three–phase oil–water–gas horizontal co–current flow: experimental data and development of prediction models[J] 3 (5) (2008) 531–543.
- [7] F.Y. Peng, Research on the Characteristics of Oil and Gas Multiphase Pipelines and Transportation Limit Distance in Low Permeable Oil Field, M.A. Thesis, Xi’an Shiyou University, Xi’an, China, 2012.

<원문제목> Research and application on the gathering and transportation radius chart of multi-phase pipelines in high water cut stage

<원문출처> Case Studies in Thermal Engineering 21 (2020) 100654