



극한지 장거리 천연가스 배관의 운전조건 평가

김영표 · 김호연 · *김우식

한국가스공사 가스연구원

(2016년 8월 2일 접수, 2017년 2월 23일 수정, 2017년 2월 24일 채택)

Evaluation of Operating Conditions for the Natural Gas Transmission Pipeline in the Arctic Environment

Young-Pyo Kim · Ho-Yeon Kim · *Woo-Sik Kim

KOGAS Research Institute, KOGAS, Ansan, 426-790, Korea

(Received August 2, 2016; Revised February 23, 2017; Accepted February 24, 2017)

요약

극한지 천연가스 배관의 운전온도 범위는 가스 공급을 최적화하고 운전동안 극한지 환경에 대한 충격을 최소화하기 위해 기본적으로 제어되어야 한다. 배관에 흐르는 가스의 온도는 Joule-Thomson 효과와 배관과 토양의 열전달에 의존한다. 따라서 본 연구에서는 매설 천연가스 배관의 열전달과 Joule-Thomson 효과를 상세히 고려하였다. 토양온도는 0 ~ -20 °C, 총괄열전달계수는 0 ~ 5.5 W/m²K로 가정하였다. 토양온도와 총괄열전달계수 변화에 따른 배관 길이방향의 가스온도 변화와 압력손실을 동시에 계산하였다. 또한, 본 연구에서는 HYSYS 프로그램을 사용하여 토양온도와 총괄열전달계수에 따른 상변화와 하이드레이트 생성을 예측하였다.

Abstract - The operating temperature range of the natural gas pipeline in Arctic environment would be controlled primarily to optimize gas throughput and to minimize the environmental impact resulting from operation of such pipelines. The temperature of the gas as it flows through the pipeline is a function of both the Joule-Thomson effect and the pipe to soil heat transfer. Therefore, the heat transfer and Joule-Thomson effect of the buried natural gas pipeline in this study were carefully considered. Soil temperatures and overall heat transfer coefficients were assumed to be 0 ~ -20 °C and 0 ~ 5.5 W/m²K, respectively. The gas temperature and pressure calculations along a pipeline were performed simultaneously at different soil temperatures and overall heat transfer coefficients. Also, this study predicted the phase change and hydrate formation for different soil temperatures and overall heat transfer coefficients using HYSYS simulation package.

Key words : Natural gas pipeline, Joule-Thomson effect, soil heat transfer, phase envelope, hydrate

1. 서론

극한지 장거리 천연가스 배관은 극한지에서 생산된 천연가스를 원거리 소비자에게 수송하기 위해 반드시 필요하다. 극한지에 매설되는 천연가스 배관을 설계할 때 특별한 고려가 필요하다. 천연가스 배관의 유동설계는 예상되는 모든 조건에서 배관 설계수명 동안 적절한 흐름이 지속될 수 있는가를 결정하는 것

으로 수송되는 유체의 물리적 특성, 공급유량, 가스온도와 압력, 배관길이와 고도, 배관이 횡단하는 지역의 환경 등 다양한 인자를 고려하여야 한다. 이러한 다양한 인자가 극한지 장거리 천연가스 배관의 압력에 미치는 영향은 이전 연구에서 기 수행한 바 있다[1]. 가스 압력에 대한 고려뿐만 아니라 극한지 매설 천연가스 배관은 주변 토양과 배관사이의 열유동이 가스온도에 미치는 영향을 고려해서 설계하여야 한다. 극한지 장거리 천연가스 배관 내 가스온도는 배관의 운송 능력, 승압기지 설계, 하이드레이트 생성, 천연가스 상변화, 배관에 작용하는 열응력, 영구동토층의

*Corresponding author: wskim@kogas.or.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

동결융기 및 응해침하, 방식 설계와 내부코팅 손상 등에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 극한지 장거리 자원이송망을 안전하고 경제적으로 운용하기 위해서는 가스압력 뿐만 아니라 가스온도를 정확히 평가하여야한다.

극한지 장거리 천연가스 배관은 운전조건에서 상변화가 발생하지 않고 하이드레이트가 생성되지 않도록 설계하여야 한다. 특히 극한지 장거리 천연가스 배관과 같이 저온에서 운전되는 배관을 설계하는 경우 천연가스 성분에 대한 상태도 평가와 하이드레이트 생성 평가는 반드시 수행하여야 한다. 천연가스가 응축되어 배관 내 액체상이 존재하거나 하이드레이트가 생성되면 설계 시 계산한 배관 유동해석에 큰 오류가 발생하게 되고, 배관에 연결된 설비에 큰 문제를 일으킬 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 극한지 장거리 천연가스 배관의 운전조건에서 상변화 및 하이드레이트 생성 여부를 평가하였다.

II. 가스온도에 영향을 미치는 주요 인자

매설배관은 열유동이 차단된 배관이 아니라 배관 내 가스는 주변 토양과 온도차가 존재하기 때문에 배관표면에서는 가스로부터 혹은 가스 내로 열유동이 발생한다. 온도차는 토양으로 배관두께를 횡단하여 반경방향 열유동을 일으키며, 열유동의 강도는 온도차에 비례한다. 열전달은 전도, 대류 및 복사 중 한 가지 이상이 결합하여 발생한다. 배관시스템에서는 세 가지 열전달모드가 동시에 발생하지만 복사는 전도와 대류에 의한 열전달과 비교하여 상대적으로 무시할 만큼 작다. 가스와 배관 주변 토양과의 열전달만 고려하면 가스는 배관길이에 따라 토양의 온도에 따라 냉각되거나 가열되며, 열유동의 강도는 배관길이에 따라 점차 감소한다.

배관에 흐르는 유체의 마찰은 배관길이 방향으로 압력손실을 일으키며, 이러한 압력감소는 Joule-Thomson(J-T) 효과로 인하여 가스온도를 변화시킨다. 가스 공급량이 많을 때 J-T 효과에 의한 냉각은 토양온도 아래로 가스온도를 감소시킬 수 있다.

가스온도는 배관 반경방향 열전달뿐만 아니라 압력손실로 인한 J-T 효과로 인하여 변화한다. 배관 내에서 상변화가 발생하지 않을 때 배관거리에 따른 가스온도 변화는 식 1과 같다[2]. 식 1의 첫 번째 항목은 주변 토양과 가스의 열전달에 의한 온도 변화이며, 두 번째 항목은 J-T 효과에 의한 온도변화이다.

$$\Delta T = - \int_{L_1}^{L_2} \frac{U_O \pi D_{ID} \Delta T_{LMTD}}{Q_m C_P} dL + \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{dT}{dP} \right) dL \quad (1)$$

식 1에서 보는 바와 같이 극한지 장거리 천연가스 배관의 가스온도는 총괄열전달계수, 토양온도, 천연가스의 열용량 및 J-T 계수 등 다양한 변수에 의존한다. 단열재가 없는 배관의 경우, 총괄열전달계수는 배관 내 유체의 대류, 배관과 배관코팅을 통한 전도와 토양저항의 합으로 식 2에 따라 계산한다[3].

$$U_O = \frac{1}{h_i} + \frac{D_{ID} \ln \left(\frac{D_{OD}}{D_{ID}} \right)}{2k_p} + \frac{D_{ID} \ln \left(\frac{D_{OD} + 2t_c}{D_{OD}} \right)}{2k_c} + \frac{D_{ID} \ln \left(\frac{4H_d}{D_{OD} + 2t_c} \right)}{2k_s S} \quad (2)$$

Table 1은 천연가스, 배관, 고밀도 폴리에틸렌 코팅과 다양한 토양의 열전도도이다[4-7]. 본 연구에 사용된 배관의 외경은 1,219 mm, 두께는 27.0 mm 이며, 고밀도 폴리에틸렌 코팅의 두께는 ISO 21809-1 규격에 따라 3.3 mm로 결정하였다[8]. 러시아 STO Gazprom 2-2.1-249-2008 규격에 따르면 외경이 1,000 ~ 1,400 mm 인 가스배관의 최소 매설깊이는 1.0 m로 규정하고 있으므로 본 연구에서 매설 깊이는 1.0 m로 결정하였다[9].

일반적으로 단열되지 않은 매설 가스배관 시스템의 총괄열전달계수는 0.83 ~ 4.54 W/m²K 이고, 단열된 경우는 0.28 ~ 1.14 W/m²K로 알려져 있다[2]. 배관을 단열하면 총괄열전달계수는 감소한다. 극한지 장거리 천연가스 배관의 정확한 가스온도를 평가하기 위해서는 사용되는 배관과 주변 환경에 대한

Table 1. Thermal conductivities of pipeline system

Classification	Thermal conductivity (W/mK)
Natural gas	0.02 ~ 0.23
Carbon steel	36.0 ~ 54.0
High density polyethylene coating	0.42-0.51
Backfill soil	0.3 ~ 1.6
Clay	0.15-2.5 (dry ~ water saturated)
Sand	0.15-4.0 (dry ~ water saturated)
Dry gravel	0.7
Fractured bedrock (granite)	1.4-4.0

Table 2. Mean soil temperatures for the northern regions of Alaska

Location	Latitude	Average soil temperature at buried depth of 0.65 m
Toolik Lake	68°63'N	0 ~ -13 °C
Coldfoot	67°15'N	1 ~ -7 °C

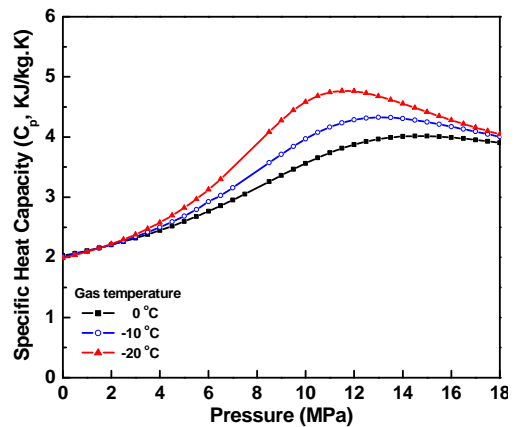
Table 3. Composition of the natural gas used in this study

Composition	Mole %
CH ₄	89.9
C ₂ H ₆	5.8
C ₃ H ₈	1.7
i-C ₄ H ₁₀	0.1
n-C ₄ H ₁₀	0.2
n-C ₅ H ₁₂	0.1
N ₂	0.7
CO ₂	1.5
Specific gravity	0.622

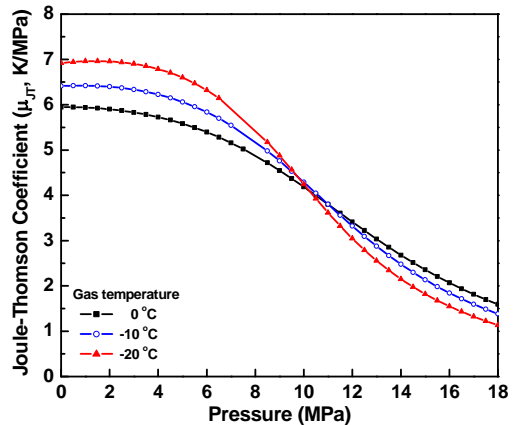
정보 등 다양한 변수를 토대로 총괄열전달계수를 계산하여야 한다. 위에서 살펴본 천연가스, 배관, 코팅 및 토양의 열전도도, 배관외경 및 두께, 코팅두께와 매설깊이를 기준으로 총괄열전달계수는 최소 0.22 W/m²K 이고 최대 5.56 W/m²K로 계산되었다.

토양온도는 극한지 장거리 천연가스 배관이 건설되는 매설깊이 지점 지중온도를 조사하여 반영하여야 한다. 극한지인 알래스카 Toolik lake와 Coldfoot 지역의 매설심도 0.65 m에서 평균 토양온도는 Table 2와 같다[10]. Toolik lake의 평균 토양온도는 0 ~ -13 °C 이고 Coldfoot의 평균 토양온도는 1 ~ -7 °C 이다. 북위 70도에 위치한 알래스카 북쪽 Prudhoe Bay의 평균 토양온도는 최소 -20 °C 정도일 것으로 예상된다.

배관 내 천연가스의 열용량과 J-T 계수는 천연가스 성분, 가스온도 및 가스압력에 따라 변화한다. 천연가스 조성은 Table 3과 같이 가정하였으며, 이러한 천연가스의 열용량과 J-T 계수는 REFPROP 프로그램으로 계산하였다[11]. 가스온도와 압력에 따라 천연가스의 열용량과 J-T 계수의 변화는 Fig. 1과 같다. 가스온도와 관계없이 저압에서 압력이 증가함에 따라 천연가스의 열용량은 증가하고, 특정 압력에서 최대 값을 나타내며, 고압에서 압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여준다. 가스온도와 관계없이 압력이 증가하면 천연가스의 J-T 계수는 감소하는



(a) Specific heat capacity



(b) Joule-Thomson coefficient

Fig. 1. Specific heat capacity and Joule-Thomson coefficient according to gas pressure and temperature in the pipeline.

것으로 나타났다. 압력에 따른 천연가스의 열용량과 J-T 계수의 변화는 Marić의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다[12].

III. 가스 온도 및 압력 평가

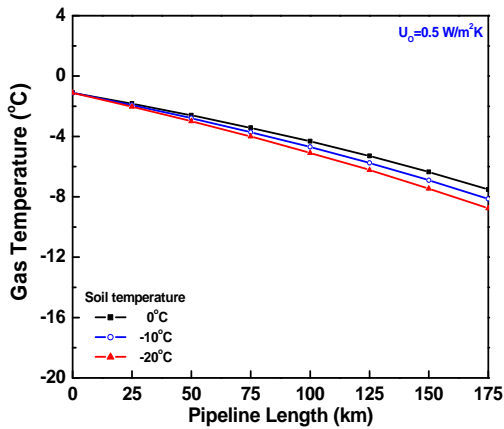
본 연구에서는 총괄열전달계수와 토양온도에 따른 극한지 장거리 천연가스 배관의 가스온도를 평가하고자 한다. 앞의 계산 결과를 토대로 총괄열전달계수는 0 ~ 5.5 W/m²K로 변화시켰으며, 알래스카 지역 토양온도를 고려하여 토양온도를 0 ~ -20 °C로 변화시켰다. 천연가스 공급유량은 127.4×10⁶ m³/day, 배관에 최초로 인입되는 가스압력은 17.2 MPa, 인

입 가스온도는 $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 승압기지 간격은 175 km 로 가정하였다.

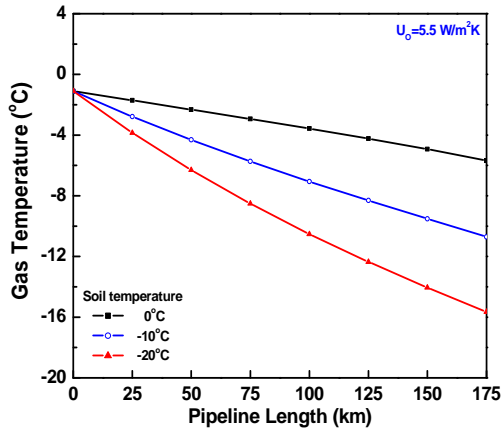
배관길이에 따른 가스 온도와 압력 변화는 25 km 구간으로 나누어 계산하였다. 최초 17.2 MPa 로 인입된 가스는 25 km 구간에서 가스온도가 $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 일정하다는 가정 하에서 압력손실을 계산하였다. 배관거리에 따른 가스 압력손실 계산은 AGA 유동방정식을 사용하였다[13]. 인입 가스온도 $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 천연가스가 배관길이 25 km 를 흐른 뒤 그 지점의 가스온도를 열전달 수치해로 계산하였으며, 앞에서 계산한 압력변화와 REFPROP 프로그램으로 계산된 J-T 계수를 곱하여 J-T 효과에 의한 가스온도 변화를 계

산하였다. 배관길이 25 km 를 흐른 뒤 가스온도는 열전달 수치해로 계산한 값과 J-T 효과에 의한 온도변화를 합하여 결정하였다. 이렇게 계산된 가스압력과 온도는 다음 25 km 구간의 인입압력과 가스온도가 되며, 이 구간의 가스압력과 온도를 앞의 절차에 따라 반복적으로 배관길이 175 km 를 계산하는 방법을 사용하였다.

Fig. 2는 총괄열전달계수가 0.5 및 $5.5\text{ W/m}^2\text{K}$ 일 때 토양온도와 배관거리에 따른 가스온도 변화이다. 가스온도는 열전달 효과와 J-T 효과를 동시에 고려한 값이다. 총괄열전달계수가 증가하고 토양온도가 감소하는 경우 가스온도는 더욱 크게 감소하는 것으로 나타났다. 배관거리에 따라 가스온도는 토양온도

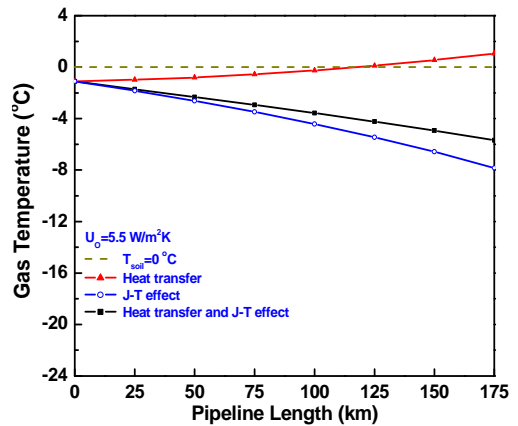


(a) $U_o = 0.5\text{ W/m}^2\text{K}$

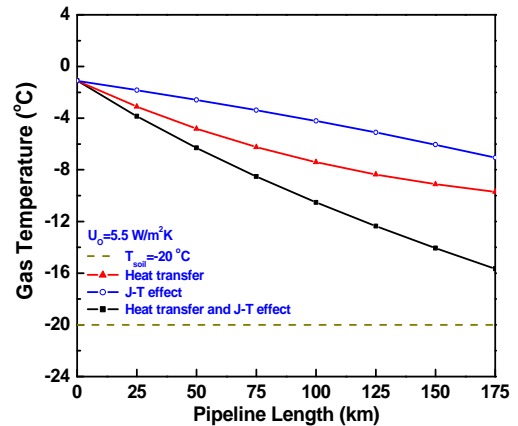


(b) $U_o = 5.5\text{ W/m}^2\text{K}$

Fig. 2. Gas temperature profile according to pipeline length and soil temperature at 0.5 and $5.5\text{ W/m}^2\text{K}$ of overall heat transfer coefficient.

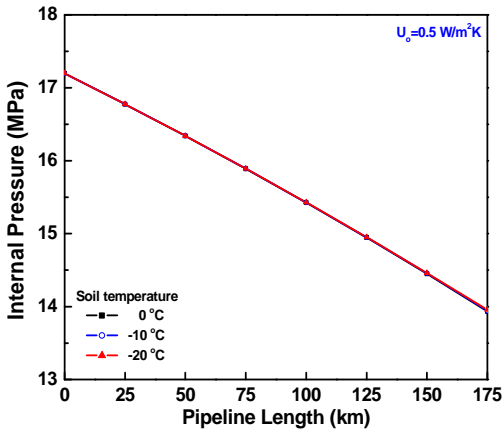


(a) $T_{\text{soil}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

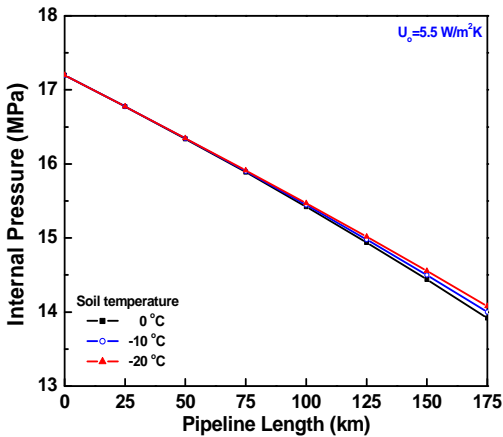


(b) $T_{\text{soil}} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Gas temperature profile according to pipeline length and soil temperature at $5.5\text{ W/m}^2\text{K}$ of overall heat transfer coefficient.



(a) $U_o = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$



(b) $U_o = 5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Fig. 4. Gas pressure profile according to pipeline length and soil temperature at 0.5 and 5.5 W/m²K of overall heat transfer coefficient.

에 접근하는 것이 아니라 연속적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 배관거리가 증가함에 따라 동일 배관 간격에서 압력손실이 커지고, Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 낮은 압력에서 J-T 계수가 커지기 때문에 열전달효과 보다 J-T 효과에 의한 온도 감소효과가 크게 작용하기 때문이다.

Fig. 3은 총괄열전달계수 5.5 W/m²K 이고 토양온도가 0 과 -20 °C 일 때 배관거리에 따른 열전달 효과에 의한 온도 변화, J-T 효과에 의한 온도 변화 및 이를 합한 가스온도 변화를 보여주고 있다. 토양온도가 0 °C일 때 가스방향으로 열이 유입되어 열전

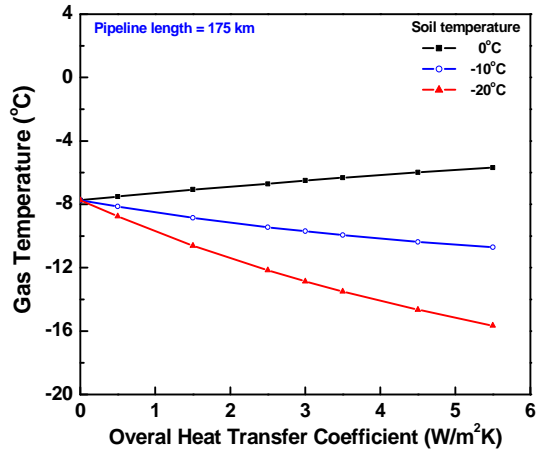


Fig. 5. Gas temperature according to soil temperature and overall heat transfer coefficient at 175 km of pipeline length.

달에 의한 가스온도는 배관거리에 따라 계속 증가함을 알 수 있다. 배관거리에 따라 압력손실이 발생하기 때문에 J-T 효과로 인하여 가스온도는 연속적으로 감소함을 알 수 있다. 열전달 효과와 J-T 효과를 더한 가스의 온도는 J-T 효과가 지배적이기 때문에 배관거리에 따라 연속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 토양온도가 -20 °C일 때 가스쪽으로부터 토양방향으로 열이 유출되어 열전달 효과에 의한 가스온도는 배관거리에 따라 계속 감소함을 알 수 있다. J-T 효과에 의한 온도감소는 토양온도가 0 °C 일 때와 비슷하다. 이는 가스온도 변화에 의한 압력변화가 크지 않기 때문이다. 열전달에 의한 가스온도 감소와 J-T 효과에 의한 가스온도 감소가 더해져 더욱 큰 온도감소를 보여준다.

Fig. 4는 총괄열전달계수가 0.5 및 5.5 W/m²K일 때 토양온도와 배관거리에 따른 가스압력 변화이다. 총괄열전달계수가 0.5 W/m²K 일 때 토양온도 변화에 의한 가스압력 변화는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 작은 총괄열전달계수로 인하여 가스온도 변화가 크지 않기 때문이다. 총괄열전달계수가 5.5 W/m²K로 증가하는 경우 토양온도 변화에 따른 가스압력 변화의 정도는 0.5 W/m²K 일 때보다 조금 증가함을 알 수 있다. 열전달 효과 및 J-T 효과로 인한 가스온도 변화는 가스압력에 미치는 영향이 크지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 배관길이 175 km 지점에서 토양온도와 총괄열전달계수에 따른 가스온도 변화이다. 총괄열전달계수가 0 W/m²K로 토양과 배관사이의 열전달

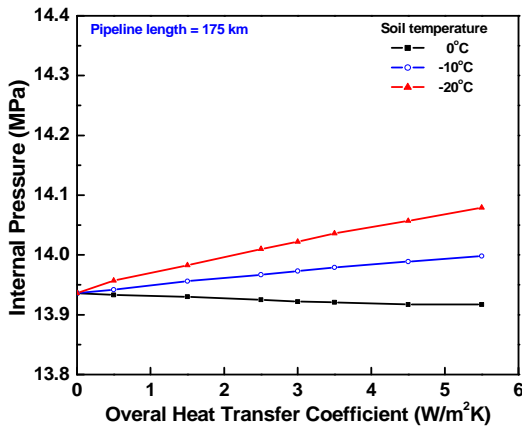


Fig. 6. Gas pressure according to soil temperature and overall heat transfer coefficient at 175 km of pipeline length.

이 없을 때 배관길이 175 km 지점에서 가스온도는 -7.7 °C 이다. 즉 인입 가스온도가 -1.1 °C 임을 감안하면 J-T 효과에 의한 온도감소는 -6.6 °C 이다. 배관거리 175 km에서 총괄열전달계수가 5.5 W/m²K 이고 토양온도가 0 °C 일 때 가스온도는 -5.7 °C 이고, 총괄열전달계수가 5.5 W/m²K 이고 토양온도가 -20 °C 일 때 가스온도는 -15.6 °C 이다. 인입 가스온도 -1.1 °C 보다 토양온도가 0 °C로 높은 경우에는 총괄열전달계수가 증가함에 따라 가스온도가 증가함을 알 수 있다. 반대로 토양온도가 -10과 -20 °C로 인입 가스온도보다 낮은 경우에는 총괄열전달계수가 증가함에 따라 가스온도가 감소함을 알 수 있다. 이는 천연가스와 토양과의 열전달 효과로 인하여 인입 가스온도보다 토양온도가 높은 경우에는 토양으로부터 가스 방향으로 열이 유입되고, 인입 가스온도보다 토양온도가 낮은 경우에는 가스로부터 토양 방향으로 열이 유출되기 때문이다.

Fig. 6은 배관길이 175 km 지점에서 토양온도와 총괄열전달계수에 따른 가스압력 변화이다. 총괄열전달계수가 0 W/m²K로 토양과 배관사이의 열전달이 없을 때 배관길이 175 km 지점에서 가스압력은 13.94 MPa 이다. 이는 열전달의 의한 가스온도 변화는 없고 J-T 효과에 의한 변화와 배관마찰에 의한 압력손실을 고려한 가스압력이다. 인입 가스온도 -1.1 °C 보다 토양온도가 0 °C로 토양온도가 높은 경우에는 총괄열전달계수가 증가함에 따라 가스온도가 증가하게 되고 이로 인하여 압력손실은 증가함을 알 수 있다. 반대로 토양온도가 -10 °C와 -20 °C로 인입 가스온도보다 낮은 경우에는 총괄열전달계수가 증

가함에 따라 가스온도가 감소하게 되고 이로 인하여 압력손실은 감소함을 알 수 있다. 총괄열전달계수가 5.5 W/m²K 로 동일할 때 토양온도가 0 °C인 경우 가스압력은 13.92 MPa 이고, 토양온도가 -20 °C 일 때 가스압력은 14.08 MPa로 압력차는 0.16 MPa 이다. 열전달효과 및 J-T 효과에 의한 가스온도 변화는 가스압력에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

극한지 장거리 천연가스 배관의 가스온도와 압력을 정확히 평가하기 위해서는 배관시스템에 대한 총괄열전달계수를 정확히 평가하여야 한다. 또한, 실제 극한지 장거리 천연가스 배관이 통과하는 지역의 토양온도는 일정하지 않기 때문에 실제 측정된 토양온도를 사용하면 더욱 정확한 가스온도 예측이 가능하다.

IV. 상변화 및 하이드레이트 생성

극한지 장거리 천연가스 배관의 운전조건에서 상변화 및 하이드레이트 생성 여부를 평가하였다.

Fig. 7은 천연가스 상태, 물의 함량에 따른 하이드레이트 생성 곡선 및 총괄열전달계수와 토양온도에 따른 가스배관 운전조건을 나타내었다. 천연가스 상태도 및 하이드레이트 생성 곡선은 Aspen HYSYS 프로그램으로 평가하였다. 본 연구에 사용된 천연가스의 임계온도는 -61.3 °C이고 임계압력은 6.3 MPa 이다. Fig 7에서 보는바와 같이 총괄열전달계수 0.5 ~ 5.5 W/m²K와 토양온도 0 ~ -20 °C에서 가스압력과 가스온도는 단상영역에서 변화하기 때문에 상변화는 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 총괄열전달계수 및 토양온도에 따른 운전조건 변화는 물의 함량에 따라 극한지 장거리 천연가스 배관에 하이드레이트를 생성시킬 수 있는 것으로 나타났다.

극한지 장거리 천연가스 배관을 건설할 때 토양온도를 제어하는 것은 현실적으로 어렵다. 총괄열전달계수를 낮게 유지하기 위해서는 배관을 단열해야 하는데 장거리 배관에서 경제적인 방안은 아니다. 따라서 천연가스 정제 및 처리시설에서 천연가스 내 물의 함량을 조절하는 것이 가장 경제적이라 생각된다. TransCanada 사의 Alaska Pipeline Project 설계 제안서에서는 천연가스의 물 함량을 최대 20 ppm으로 제한하고 있다[14]. Fig 7에서 보는 바와 같이 천연가스의 물 함량이 최대 25 ppm 일 때 하이드레이트 생성을 피하기 위해서는 총괄열전달계수를 0.5 W/m²K 이하가 되도록 설계해야 한다. 이는 매설배관이 건조한 토양에서 운영되거나 필요하면 단열해야 한다는 것을 의미하며 경제적으로나 현실적으로

가능하지 않은 방안이다. 물의 함량을 16 ppm 이하로 제한하는 경우 총괄열전달계수, 0.5 ~ 5.5 W/m²K 및 토양온도, 0 ~ -20 °C에서 하이드레이트 생성 없이 극한지 장거리 천연가스 배관을 안정적으로 운전할 수 있는 것으로 나타났다.

V. 결론

총괄열전달계수 및 토양온도가 극한지 장거리 천연가스 배관의 가스온도 및 압력에 미치는 영향을 평가하였으며, 이를 토대로 상변화 발생 및 하이드레이트 생성을 피할 수 있는 운전조건을 고찰하였다. 본 연구는 극한지 장거리 천연가스 배관에 대한 운전압력과 온도를 평가하고, 이를 토대로 상변화 및 하이드레이트 생성 여부를 판단하는 유동설계 기술을 확보하는데 있다.

(1) 매설 천연가스 배관시스템의 총괄열전달계수는 최소 0.22 W/m²K 이고 최대 5.56 W/m²K 이다.

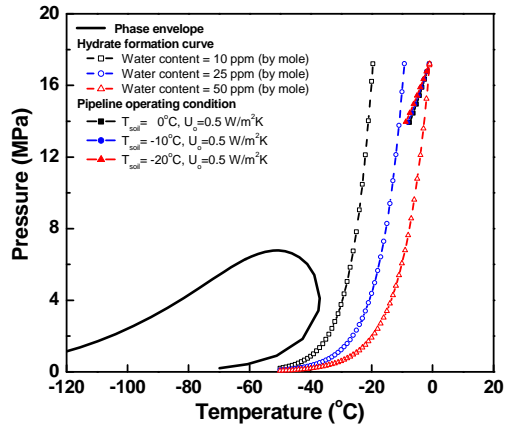
(2) 총괄열전달계수가 증가하고 토양온도가 감소하는 경우 가스온도는 더욱 크게 감소하는 것으로 나타났다. 배관거리에 따라 가스온도는 토양온도에 점근적으로 접근하는 것이 아니라 연속적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 배관거리가 증가함에 따라 동일 배관간격에서 압력손실이 커지고, 낮은 압력에서 Joule-Thomson 계수가 커지기 때문에 열전달효과보다 Joule-Thomson 효과에 의한 온도 감소효과가 크게 작용하기 때문이다.

(3) 총괄열전달계수가 0 W/m²K로 토양과 배관 사이의 열전달이 없을 때 배관길이 175 km 지점에서 가스온도는 -7.7 °C로 Joule-Thomson 효과에 의한 온도감소는 -6.6 °C인 것으로 나타났다.

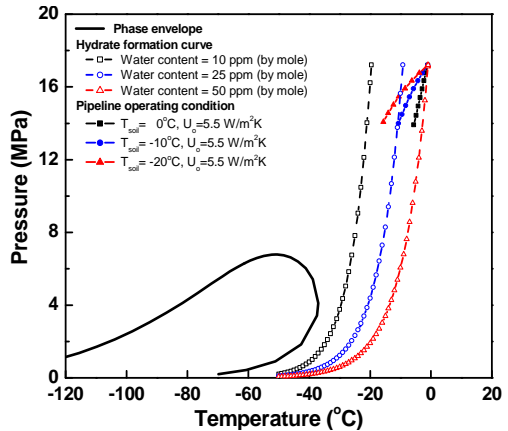
(4) 배관거리 175 km에서 총괄열전달계수가 5.5 W/m²K 이고 토양온도가 0 °C 일 때 가스온도는 -5.7 °C 이고, 총괄열전달계수가 5.5 W/m²K 이고 토양온도가 -20 °C 일 때 가스온도는 -15.6 °C 이다. 인입 가스온도보다 토양온도가 높은 경우에는 총괄열전달계수가 증가함에 따라 가스온도가 증가하고, 반대로 토양온도가 인입 가스온도보다 낮은 경우에는 총괄열전달계수가 증가함에 따라 가스온도가 감소함을 알 수 있다.

(5) 본 연구에 사용된 천연가스의 임계온도는 -61.3 °C이고 임계압력은 6.3 MPa 이다.

(6) 총괄열전달계수 0.5 ~ 5.5 W/m²K와 토양온도 0 ~ -20 °C에서 가스압력과 가스온도는 단상영역에서 변화하기 때문에 상변화는 발생하지 않는 것으로 나타났다.



(a) 총괄열전달계수 = 0.5 W/m²K



(b) 총괄열전달계수 = 5.5 W/m²K

Fig. 7. Phase envelope, hydrate formation curve according to water content and pipeline operating conditions at different soil temperatures and overall heat transfer coefficients.

(7) 총괄열전달계수 및 토양온도에 따른 운전조건 변화는 물의 함량에 따라 극한지 장거리 천연가스 배관에 하이드레이트를 생성시킬 수 있는 것으로 나타났다. 물의 함량을 16 ppm 이하로 제한하는 경우 총괄열전달계수, 0.5 ~ 5.5 W/m²K 및 토양온도, 0 ~ -20 °C에서 하이드레이트 생성 없이 극한지 장거리 천연가스 배관을 안정적으로 운전할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비 지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

사용기호

- ΔT : Temperature change, $T_2 - T_1$ [K]
 T_{soil} : Average soil temperature [K]
 U_o : Overall heat transfer coefficient [W/m^2K]
 D_{ID}, D_{OD} : Inside and outside diameter of the pipe [m]
 ΔT_{LMTD} : Log mean temperature distance [K]
 Q_m : Mass flow rate [kg/s]
 C_p : Heat capacity at constant pressure [J/kgK]
 L : Length of a pipe segment [m]
 P : Internal pressure [MPa]
 h_i : Inside heat transfer coefficient for the fluid in the pipe [W/m^2K]
 k_p, k_c, k_s : Thermal conductivity of the pipeline steel, coating and soil [W/mK]
 S : Shape factor for the buried pipe [-]
 t_c : Thickness of the coating [m]
 H_d : Burial depth of the pipe [m]

REFERENCES

- [1] Kim, Y. P., Kim, H. Y., and Kim, W. S., "Hydraulic Design of Natural Gas Transmission Pipeline in the Arctic Area", *KIGAS*, **20**(2), 58~65, (2016)
- [2] Petroskills, *Gas Conditioning and Processing*, (2014)
- [3] Carroll, J., *Natural Gas Hydrates, A Guide for Engineers*, 3rd ed., Elsevier Inc, (2014)
- [4] Jarrahan, A., and Heidaryan, E., "A Simple Correlation to Estimate Natural Gas Thermal Conductivity", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **18**, 446~450, (2014)
- [5] WIKIPEDIA, *List of Thermal Conductivities*, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_thermal_conductivities
- [6] The Engineering ToolBox, *Thermal Conductivity of Some Common Materials and Gases*, http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- [7] Li, Y., Dou, D., and Yu, Y., "Testing Backfill's Thermal Conductivity Improves Operations", *Oil and Gas Journal*, (2013)
- [8] International Standard ISO 21809-1, *Petroleum and Natural Gas Industries - External Coatings for Buried or Submerged Pipelines Used in Pipeline Transportation Systems - Part 1: Polyolefin Coatings (3-layer PE and 3-layer PP)*, (2011)
- [9] STO Gazprom 2-2.1-249-2008, *Main Gas Pipelines*, (2008)
- [10] BLACK & VEACH, *Alaska Pipeline Project: Gas Off-take Study*, (2011)
- [11] The National Institute of Standards and Technology, *REFPROP Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties*, (2010)
- [12] Marić, I., "A Procedure for the Calculation of the Natural Gas Molar Heat Capacity, the Isentropic Exponent, and the Joule-Thomson Coefficient", *Flow Measurement and Instrumentation*, **18**, 18~26, (2007)
- [13] Shashi, M. E., *Gas Pipeline Hydraulics*, Taylor & Francis Group, (2005)
- [14] TransCanada, *Application For License*, (2007)