



극한지 천연가스 수송배관의 열유동적 특성

김호연 · 김영표 · [†]김우식

한국가스공사 가스기술연구원

(2015년 9월 8일 접수, 2015년 10월 22일 수정, 2015년 10월 23일 채택)

Thermo-Fluid Characteristics of Pipeline Transportation of Natural Gas at Artic & Northern Ice Environments

Ho-Yeon Kim · Young-Pyo Kim · [†]Woo-Sik Kim

R&D Division, KOGAS, Ansan 426-790, Korea

(Received September 8, 2015; Revised October 22, 2015; Accepted October 23, 2015)

요약

극한지 천연가스 수송배관망의 기술개발은 동토지역의 특수성을 고려해야 하는 매우 흥미롭고 도전적인 분야로서 본 연구는 수송배관의 핵심기술을 파악하기 위하여 극한지 애로기술에 대한 문헌조사와 주요 영향인자를 파악하였다. 특히, 열유동 고려사항에 대한 문헌조사를 통하여 극한지 천연가스 수송배관망 유동확보기술을 개발하기 위한 이론적 접근 주제를 정할 수 있었고, 또한 이론 해석을 통한 기본적인 결과를 도출할 수 있었다.

Abstract - The technology development of pipeline transportation of natural gas at artic and northern ice environments should be considered with unique characteristics of permafrost territory as a very interesting and challenging area. This work is to investigate bottleneck techniques and major impact factors through a literature search to figure out the core technology of the transport pipeline. Especially, theoretical approach themes could be determined to develop the technology flow assurance for permafrost regions through documentary survey on the considerations of thermo-fluid. Also, basic results through theoretical approaches could be achieved.

Key words : technical considerations, pipeline transportation, natural gas, flow assurance

I. 서론

극한지 천연가스 수송배관망 설계는 동토지역의 특수성을 반영해야 하기 때문에 민감한 기술적 사안들이 존재한다. Degeer & Nessim은 [1] 극한지 지상 및 해저 배관 설계 시 직면하는 도전적인 문제들을 기술하고 있다. 그 문제들은 빙쇄굴(ice scour), 영구동토층 해빙(permafrost thaw), 동상(frost heave), 누출감지 및 방지(leak detection and containment) 등이다. 또한, Pipelines International 잡지는 [2] Trans-Alaska 파이프라인의 건설 및 운영 시 극복해야 했던 기술적 쟁점들을 논술하고 있으며, 그것들은 동토의

큰 건설부하, 영구동토층 해빙에 의한 배관좌굴, 알래스카인 사냥 시 오발사고에 의한 배관손상, 순록들의 이동 방해 등이고, 해결책들을 제시하고 있다.

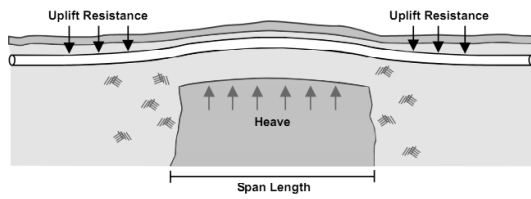
본 연구는 극한지 천연가스 수송배관망의 설계, 건설, 운영 시에 기술적으로 고려해야 될 애로기술들에 관한 문헌조사를 수행하고, 종합적으로 정리하고자 하며, 특히 극한지 천연가스 수송배관망의 열유동 분야에서 다루어야 하는 핵심기술들을 언급하고, 이론적 접근 결과에 대하여 기술하고자 한다.

II. 극한지 애로기술

극한지 천연가스 수송배관 설계관련 기술은 엔지니어링 설계 보고서에 [3] 언급되어 있다. 본 연구에서 그 기술의 핵심사항들을 정리하였으며, 영구동토

[†]Corresponding author:wskim@kogas.or.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

극한지 천연가스 수송배관의 열유동적 특성



Cross-Section of Cold Pipe in Unfrozen Soil

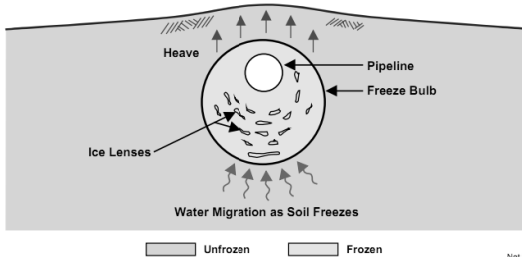
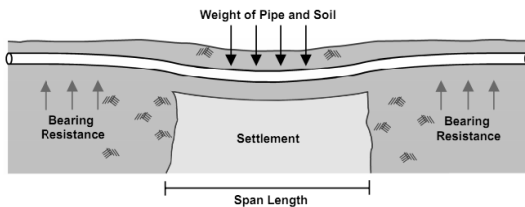


Fig. 1. Frost heave.



Cross-Section of Warm Pipe in Frozen Soil

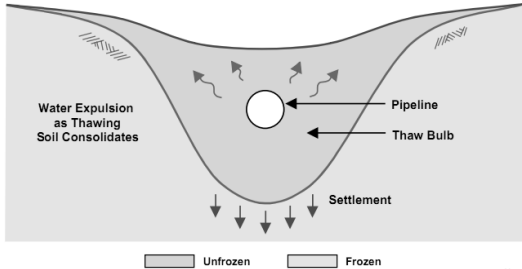


Fig. 2. Thaw settlement.



Fig. 3. Seasonal constraints.

층에 영향을 주는 인자들은 다음과 같다.

- 대기온도 (air temperature)
- 적설높이 (snow depth)
- 초목 (vegetation)
- 토양형 (soil type)
- 수역 근접성 (proximity to waterbodies)

극한지 수송배관은 열전달, 지질공학적 인자들, 구조공학적 인자들을 요구한다. 토양 내 수분의 결빙 및 해빙은 동상 (frost heave) 및 해동침하 (thaw settlement)를 유발하며, 그 부하들은 배관설계, 건설, 운영 시 고려되어야 한다. 따라서 극한지 배관의 일반적인 지상배관과의 차이점은 다음과 같다.

- 운전온도제어
- 동상 및 해동침하에 의한 지질공학적 부하
- 영구동토층 지형의 건설표층 교란 영향
- 건설 및 유지보수 시 계절적 제약성
- 영구동토층 내 토목건설 기술

영구동토층에서 나타나는 현상들을 소개하고, 그 영향인자에 대해 간단히 피력하고자 한다. Fig. 1은 동상현상으로 온도구배에 따라 수분유입에 의하여 발생된 동토의 체적팽창을 보여 주고 있다. 본 현상의 영향인자는 동토깊이 (freeze depth), 수분함량(moisture depth), 토양 입자크기 (soil gradation), 온도구배 (temperature gradient), 토압 (soil pressure) 이다. Fig. 2는 해동침하현상으로 해빙에 의하여 발생된 동토의 체적감소를 보여 준다. 본 현상의 주요인자는 해동깊이 (thaw depth), 얼음함량 (ice content), 토양 입자크기 (soil gradation) 이다. 동상 및 해동침하 현상은 지중식 매설배관에서 나타나는 현상으로 선로 제거 및 건설작업에 의한 표층 변화와 연간 평균운전온도가 0℃ 이상인 배관에서 발생된다. Fig. 3은 동절기 건설사진을 보여 주고 있으며, 굴착 시 동토로 인한 작업부하가 크게 발생되고 이로 인한 건설비용이 크게 증가한다. 또한 유지보수 시 오지에 있는 배관에 접근할 때, 도로 인프라 구축이 미비한 관계로 어려움이 발생된다.

III. 열유동 고려사항

영구동토에 자원이송망을 건설하기 위해 열유동적으로 고려해야 할 사항들은 Ryden의 [4] 논문에서 기술되어 있다. 액체상태인 오일 수송의 경우, 그 유체의 온도는 영구동토의 표층 온도보다 높고, 기체상태인 가스수송의 경우, 그 반대로 경제적 운전을

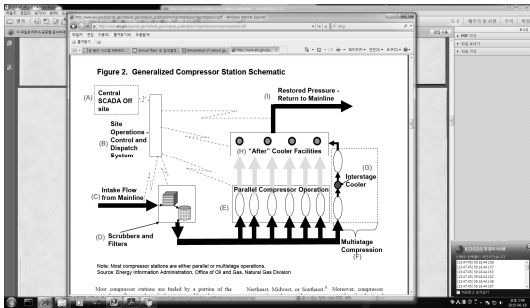


Fig. 4. Typical Compressor Station Schematic.

위하여 가스냉각이 필요하며, 동토층보다 온도가 낮게 된다고 보고하고 있다.

1970년대에 건설된 알래스카 1,300 km 수송배관의 실사례로부터 시사점들을 찾아 볼 수 있다. 오일 수송의 경우, 실제 대기온도에서 수송은 가능하지 않으며, 적어도 경제적으로 바람직하지 않은데, 그 온도에서 점성이 높고, 밀랍처럼 될 것이기 때문이다. 오일의 점성은 유정에서 80℃까지 가열을 통하여 약 200배 정도 감소하게 된다. 알래스카 직경 0.12 m 수송배관은 단열을 통한 열손실 없이 약 60-65℃로 유지되었다. 만약 오일이 대기 또는 토양온도까지 냉각된다면, 오일유동은 200-300배 정도 더 빨라야 한다. 결과적으로 오일 수송배관은 중온의 일정한 온도를 유지해야 하고, 이로 인하여 지반침하를 피할 수 없게 된다. 예측 가능한 지반침하, 해동의 위험, 조치들에 대한 기술개발은 Williams [5] 에 의해서 요약되었다.

침하 또는 함몰의 정도는 해동층 내 얼음의 양에 지배적이며, 최대 침하는 과잉얼음 (excess ice) 또는 지반얼음 (ground ice) 존재하는 곳에서 나타난다. 배관유체의 열로부터 지반얼음의 해동을 막아야 하는 필요성은 분명하다.

이런 문제들을 해결하기 위한 방안은 고상식 수송 배관과 히트파이프의 원리를 이용한 Thermal VSM (Vertical Support Members) 이 제안되었다. 고상식 수송배관은 강한 바람이 있는 경우에 열소산을 피할 수 없기 때문에 결과적으로 무수의 암모니아 냉매를 사용하는 Thermal VSM 방법이 최적안이 되었다.

가스수송의 경우, 중요한 필수조건은 안전성과 경제성이며, 오일수송과의 근본적인 차이는 가스의 체적을 줄여, 수송량을 증가시키는 것이다. 따라서 수송배관 중간에 압축 스테이션이 필요하다. 건설 및 배관주변에서의 해동 또는 예측되지 않은 교란 등에 의한 사소한 결함도 쉽게 누출로 나타나며, 최악의 경우, 폭발로 이어질 수 있다.

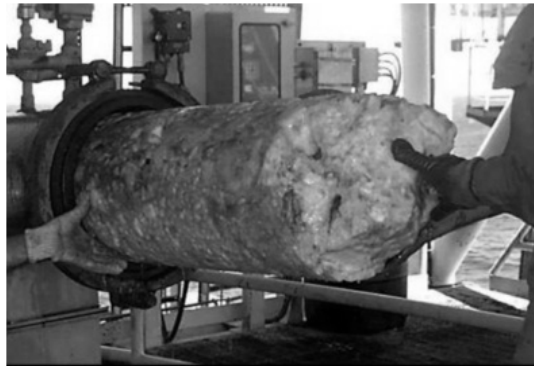


Fig. 5. Gas Hydrate Formation in a Subsea Pipeline. Picture from Petrobras (Brazil).

가스압축은 온도를 상승시키지만, 그 가스가 냉각될 경우, 수송배관은 해동침하의 위험없이 영구동토층에 매설될 수 있다. Fig. 4는 전형적인 압축기 스테이션의 개략도를 보여 주고 있으며, 가스 압축 후, 가스냉각을 위한 냉동설비를 갖추고 있다. 그래서 가스수송의 기술적 이슈는 110기압 이상의 고압 송출과 동결온도 -10℃ 또는 더 낮은 온도에 있다.

초기에 가스배관은 매설된 지반보다 온도가 더 낮으며, 배관주변의 지반온도는 점차적으로 낮아지게 된다. 그 지반은 영구히 동결되며, 동결체는 표층 쪽으로 팽창하게 되고 활성층인 해동층은 점점 얇아지게 되며, 결국 영구동토층으로 변화하게 된다. 이것을 동상현상이라 한다.

극한지 천연가스 배관수송에서 수분을 포함하고 있는 경우, Fig. 5처럼 하이드레이트가 생성되는 문제가 발생할 수 있다. 이 현상은 배관 내 압력강하에 의한 온도저하와 열손실에 의해서 발생할 수 있다.

결과적으로 극한지 가스수송배관의 고려할 사항은 가스온도 저하이며, 이로 인한 동상현상 및 가스 하이드레이트 형성이다. 가스온도 저하는 압축기 후단에 있는 냉동기에 의해 1차적으로 저하되고 배관 내에서는 Joule-Thomson 효과에 의한 추가적인 온도저하가 발생된다. 따라서 극한지 열유동은 배관 내 가스 온도저하와 배관주변의 토양 온도변화 그리고 배관단열에 대하여 집중할 필요가 있으며, 이는 극한지 해외배관사업 참여를 위한 유동확보 (Flow Assurance) 기술을 개발하는 데 있다.

IV. 수송배관의 압력 및 온도 강화

극한지 천연가스 수송배관망의 추진하고 있는 가상 프로젝트 모델은 Zyryanska에서 Aldan까지로

2,000 km 이상의 거리를 수송하는 것으로 잠정적으로 결정되었다. 따라서, 천연가스 수송 시 발생될 수 있는 배관의 압력강하를 확인해 보기 위하여 다음의 가스유동모델식들을 [6] 이용하여 그 결과를 비교하고자 한다.

$$q = K \left[\frac{T_s}{P_s} \right]^{1.0} \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) d^5}{f \gamma L T_m z_m} \right]^{0.5} E \quad (1)$$

$$q = K \left[\frac{T_s}{P_s} \right]^{1.0} \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) d^{5.333}}{\gamma L T_m z_m} \right]^{0.5} E \quad (2)$$

$$q = K \left[\frac{T_s}{P_s} \right]^{1.0788} \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) d^{4.854}}{f \gamma^{0.8541} L T_m z_m} \right]^{0.5394} E \quad (3)$$

$$q = K \left[\frac{T_s}{P_s} \right]^{1.02} \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) d^{4.961}}{f \gamma^{0.961} L T_m z_m} \right]^{0.51} E \quad (4)$$

$$q = K \left[\frac{T_s}{P_s} \right]^{1.0} \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) d^5}{\gamma L T_m z_m} \right]^{0.5} F_t \quad (5)$$

여기서, K는 상수 계수이며, 그 값은 참고문헌을 표기되어 있다. 식 (1)은 Basic 모델이며, 식 (2)는 Weymouth 모델, 식 (3)은 Panhandle A 모델, 식 (4)는 Panhandle B 모델, 식 (5)는 AGA 모델을 나타낸다.

Fig. 6는 각 모델별 거리에 따른 압력강하를 보여

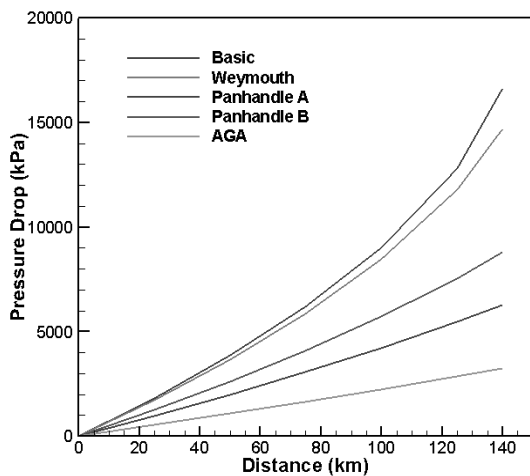


Fig. 6. Pressure Drop per Distance with Each Model.

주고 있다. 본 결과의 계산조건은 압력 20 MPa, 배관직경 40", 가스 수송 속도 10 m/s 일 때 이다. 본 결과로부터 Basic 및 Weymouth 모델은 기본 압력강하 식에서 유도된 것으로 배관 내 압력강하를 과잉 계산하는 것으로 판단되며, AGA 모델은 거리에 따른 압력강하가 매우 선형적인 특성을 보여 주고 있는데, 이것은 매우 매끈한 배관에 잘 맞는 모델로 확인되었다. 이것은 AGA 모델에서 사용하는 전달 계수 F_t 를 살펴 보면 알 수 있는 데, 그 식은 다음과 같다.

$$F_t = F_f \left[4 \log \left(\frac{Re}{\sqrt{1/f}} \right) - 0.6 \right] \quad (6)$$

위 식에서 마찰계수는 로그눈금 하에서 Re 수가 증가함에 따라 일정하게 감소한다. 위 식과 수력학적으로 매끈한 관과 난류 상의 매끈한 관에서 마찰 계수 식을 보면 동일한 특성을 갖는 다는 것을 알 수 있으며, 그 식들은 다음과 같다.

$$f = 0.316 / Re^{0.25} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log (Re \sqrt{f}) - 0.8 \quad (8)$$

상기 식들이 매끈한 관의 마찰계수를 대표하는 식들로 식 (7) 및 (8)은 식(6)과 상수 계수에서의 차이만 있을 뿐 동일한 특성을 갖는 식들이다.

결과적으로 Panhandle A 및 B 모델들이 극한지 천연가스 수송배관에서의 압력강하를 예측하는 데 실용적인 것으로 판단된다.

본 모델들을 사용하여 가상 프로젝트에 적용한다면, 그 압력강하는 89.39 MPa과 125.63 MPa 이다. 결과적으로 천연가스의 장거리 수송에서 승압관리소는 반드시 필요하다는 것을 알 수 있었다.

압력강하는 기체에서 Joule-Thomson 효과라고 하는 온도강하를 수반하게 된다. 즉, 압력강하는 기체를 팽창하게 하며, 완전단열인 경우, 기체의 온도가 압력강하에 비례하여 감소하는 현상이며, 팽창변처럼 국부적인 곳에서도 발생하지만, 수송배관에서도 점진적으로 압력감소, 즉 단열팽창이 일어나는 배관에서도 동일하게 온도강하가 발생하는 현상이다. 일반적으로 알려진 압력강하에 따른 천연가스의 온도강하는 10기압 당 5.56 °C로 알려져 있으며, Joule-Thomson 계수 식은 다음과 같이 표현된다.

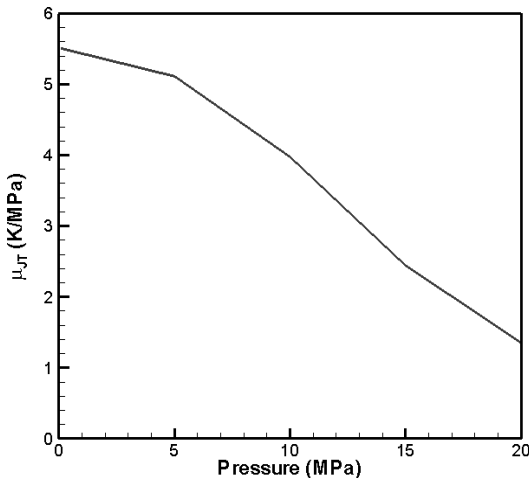


Fig. 7. Joule-Thomson Coefficient with Pressure.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \frac{V}{C_p} (\alpha T - 1) \quad (9)$$

Fig. 7은 천연가스의 압력별 Joule-Thomson 계수를 보여 주고 있다. 본 결과로부터 가상 프로젝트 모델에서 발생하는 총 온도강하는 완전단열 가정 하에 Panhandle A의 결과에서 312.87 K이며, Panhandle B의 경우 439.71 K이다. 따라서 극한지 천연가스 수송배관은 단열처리나 히터를 이용한 방법을 적용하는 것이 필요하다.

V. 수송배관 주변의 열유동

극한지에서 매몰된 천연가스 수송배관망의 열유동 특성을 관찰하기 위하여 다공성 물질의 유동을 해석할 수 있는 BPM (Brinkman Penalization Method) [7] 를 사용하고자 한다. 무차원 압축성 유동의 2차원 BPM 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{\phi} \frac{\partial m_j}{\partial x_j} \quad (10)$$

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = -\frac{\partial m_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{1}{K} u_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{\partial (e+p)u_j}{\partial x_j} + \frac{1}{Re} \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{1}{Re Pr (\gamma-1)} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{T}{K} \quad (12)$$

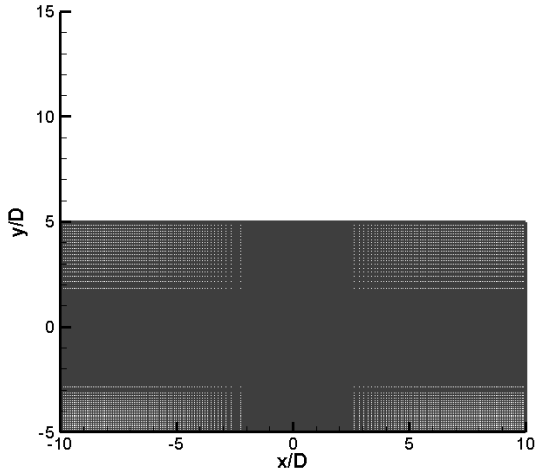


Fig. 8. Mesh of Computation Domain.

여기서, ϕ 는 공극률이고 0.5가 적용되었으며, K는 투과율을 나타내고 0.25를 사용하였다. 상기 식들은 C6F10의 공간차분과 공간필터링 방법을 이용한 직접 수치해법을 이용하여 풀 수 있다. 6차의 컴팩트 중앙 공간차분 방법은 [8] 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{3} f_{i-1} + f_i + \frac{1}{3} f_{i+1} = \frac{1}{9} \frac{f_{i+2} - f_{i-2}}{4h} + \frac{14}{9} \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h} \quad (13)$$

그리고, 10차의 컴팩트 중앙 공간필터링 방법은 [9] 다음과 같다.

$$\alpha_f \overline{f_{i-1}} + \overline{f_i} + \alpha_f \overline{f_{i+1}} = \sum_{n=0}^5 \frac{a_n}{2} (f_{i+n} + f_{i-n}) \quad (14)$$

여기서, 계수들은 참고문헌 [9]를 참고하기 바란다.

Fig. 8은 계산영역의 격자를 보여 주고 있으며, 400×250 격자를 사용하여 계산을 수행하였다. 계산 조건은 초기에 지상 부의 대기온도 263.15 K, 지중 온도 273.15 K, 배관내부 온도 268.15를 적용하였다. 그 조건은 Fig. 9에서 보는 바와 같다. 이때, 대기의 유속은 5 m/s로 하였다.

무차원 압축성 유동의 2차원 지배방정식은 CFL=0.27 정도에서 계산이 수행되었으며, 무차원 시간 100에서 계산을 종료하였다. Fig. 10은 x 방향의 속도성분 u의 필드데이터를 보여 주고 있다. 지상부에서는 초

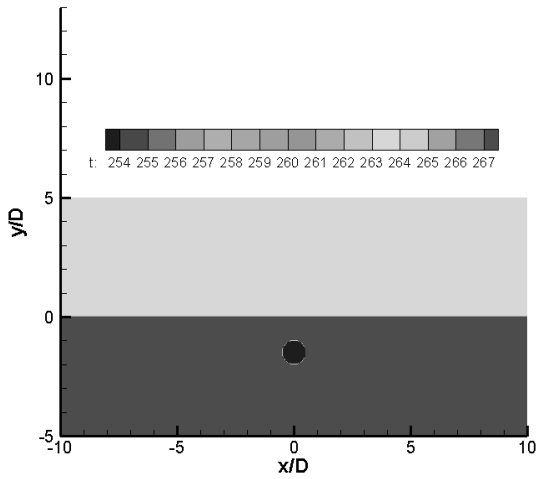


Fig. 9. Temperature Field at t=0.

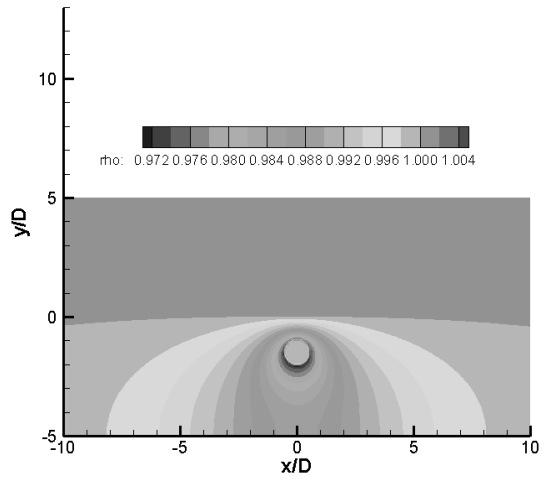


Fig. 11. Density Field at t=100.

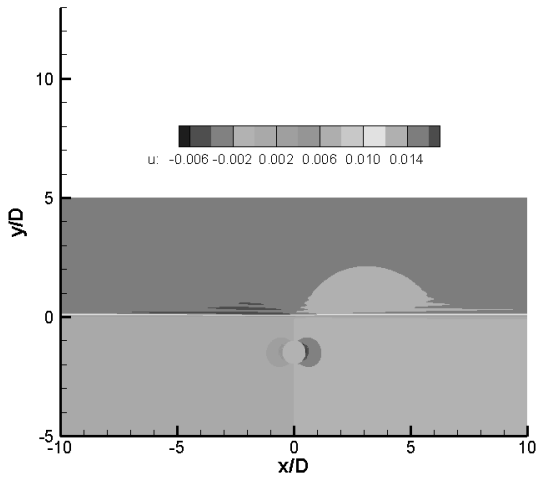


Fig. 10. U-velocity Field at t=100.

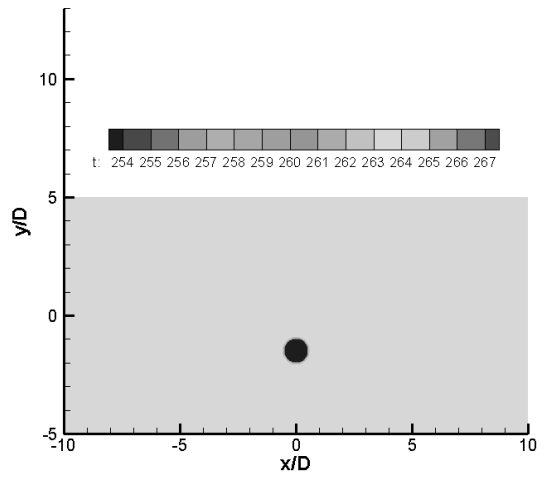


Fig. 12. Temperature Field at t=100.

기 속도가 일정하게 유지되고 있으며, 일부 지중배관 주변에서의 약간의 속도감소가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 지중배관에 의한 y 방향의 속도성분 증가로 인한 현상이다. 또한, 지중배관을 지나서 후류의 형성이 나타나는 것을 알 수 있다. 지중에서 매몰된 지중배관은 강체로서 작용하기 때문에 이 때 지중배관 내의 유속은 0 m/s가 되며, 지중배관 주변에 상승 및 하강하는 흐름이 발생되고, 하류에서는 후류가 형성되는 것이다. Fig. 11은 밀도장을 보여 주고 있으며, 지중배관 내에서는 밀도는 일정하게 하였으며, 지중배관 주변의 밀도는 계산결과에 의한 얻었다. 밀도는 지중배관 경계에서 가장 낮

게 나타나고 있으며, 토양의 하부 쪽으로 넓게 분포 하면서 지중배관으로부터 멀어지면서 증가하는 패턴을 보여 주고 있다. Fig. 12는 계산영역에서의 온도장을 보여 주고 있으며, 지중배관에 인접한 부분에서만 온도변화가 있는 것으로 나타나고 있으며, 그 이외의 계산영역에서는 큰 변화가 나타나지 않고 있다. 이것은 압축성 유동에서 유체의 온도는 상태방정식으로만 결정이 되기 때문에 나타나는 한계이다. 따라서, 압축성 유동해석에 의한 다공성 물질 내에서 유체유동 해석방법은 토양의 열전도율을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있는 것으로 나타났다. 향후 BPM 접근방법의 한계와 개선된 모델링 방법을

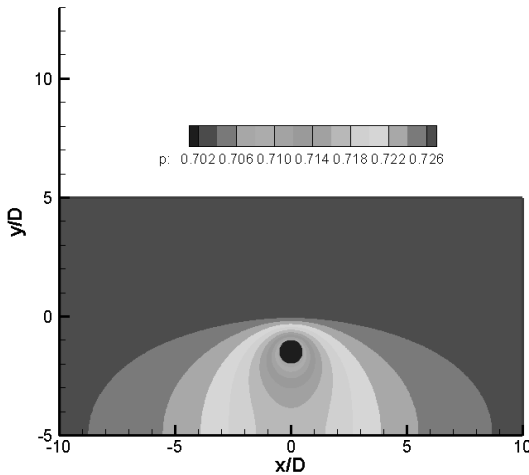


Fig. 13. Pressure Field at t=100.

고안하는 것이 필요할 것으로 사료된다. Fig. 13은 압력장을 보여주고 있으며, 유속이 매우 낮은 영역에서 압력은 상태방정식에 의하여 지배를 받는 것으로 나타나고 있다. 지중배관의 앞면부에서 압력상승이 거의 나타나지 않고 있기 때문이다.

결과적으로 BPM을 이용한 압축성 유동해석은 지상부와 지중부의 유체의 상태량을 계산할 수 있으나, 토양이 가지고 있는 온도특성을 반영하지 못하는 단점이 나타났다. 따라서 토양의 온도 및 열전달 특성을 반영할 수 있는 유체-토양 간섭모델 개발이 필요하다.

VI. 결론

극한지 천연가스 수송배관의 기술적 고려사항은 문헌조사를 통하여 수행하였으며, 극한지 애로기술, 열유동 고려사항 등을 언급하였다. 또한, 수송배관의 압력 및 온도강하, 수송배관 주변의 열유동에 대한 해석적인 접근을 수행하였으며 기본적인 결과들을 도출할 수 있었다.

극한지에서 오일수송과 가스수송은 애로기술의 차이점이 존재하며, 그것은 오일수송의 경우, 해동 침하를 발생, 가스수송의 경우, 동상현상이 일어나는 차이점이 있었다. 또한, 유동확보 기술의 개발에 반드시 필요한 것은 배관 내 가스 온도저하 및 배관 주변 토양의 온도변화 예측에 대한 해석기술이며, 특히, 배관 내 온도저하 시 발생될 수 있는 가스하이드레이트 생성 예측 기술개발이다.

결론적으로 본 연구는 극한지 천연가스 수송배관망 설계기술 개발을 위한 문헌조사로 수행되었으며,

애로기술 및 유동확보를 위한 해석기술의 필요성을 확인하고 기본적인 해석틀을 확보하였다. 향후, 극한지 천연가스 수송배관망 설계를 위한 유동해석에 대한 고급기술을 개발할 것이다.

감사의 글

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

사용기호

- q : gas rate [std m³/day]
- P : absolute pressure [kPa]
- P_s : standard pressure [kPa]
- T_m : mean absolute temperature [K]
- T_s : standard temperature [K]
- d : inside diameter [m]
- L : pipe length [m]
- Z_m : mean compressibility factor
- f : Fanning friction factor
- E : pipeline efficiency
- F_t : transmission factor
- H : enthalpy
- V : gas's volume
- C_p : heat capacity of constant pressure
- T : absolute temperature

그리스 문자

- ρ : gas relative density
- μ_T : Joule-Thomson coefficient
- β : coefficient of thermal expansion

REFERENCES

- [1] DeGeer, D. and Nessim, M., "Arctic Pipeline Design Considerations", Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2008, June 15-20, Estoril, Portugal, OMAE2008-57802, (2008)
- [2] http://pipelinesinternational.com/news/overcoming_the_challenges_of_arctic_pipelines/8037
- [3] Mackenzie Gathering System, *Application to the National Energy Board for Approval of the Mackenzie Gathering System, Volume 2: Engineering Design* ed., August 2004, MGRA2-2, (2004)

- [4] Ryden and Erik, B., "Energy Flow to Artic Tundra Surface and Experiences of Induced Disturbances", *XX Polar Symposium, Lublin*, 429-438, (1993)
- [5] Williams, P. J., *Pipelines and Permafrost*, Physical Geography and Development in the Circumpolar North, Longmans, London, 98, (1979)
- [6] Petroskills, *Gas Conditioning and Processing, Volume 1: The Basic Principles*, (2015)
- [7] Liu, Q. and Vasilyev, O.V., "A Brinkman Penalization Method for Compressible Flows in Complex Geometries", *JCP*, 227, 946-966, (2007).
- [8] Lele, S.A., "Compact Finite Difference Schemes with Spectral-like Resolution", *JCP*, 103, 16-42, (1992).
- [9] Gaitonde, D.V. and Visbal, M.R., "Pade-type higher-order boundary filters for the navier-stokes equations", *AIAA*, 38(11), 2103-2112, (2000).