

극한지 온도조건에 파이프라인 내부 열유동 영향변수 평가

조철희¹ · 황수진¹ · 장춘만² · 이준호^{1†}

¹인하대학교 조선해양공학과, ²한국건설기술연구원 환경연구소

Numerical Study about Influence Variables of Permafrost Pipeline by using Thermal Flow Analysis

CHUL H. JO¹, SU-JIN HWANG¹, CHOON-MAN JANG², JUN-HO LEE^{1†}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University
100, Inha-Ro, Nam-Gu, Incheon, 402-751, Republic of Korea

²Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology
283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

Abstract >> This paper describes thermal flow characteristics in various pipelines: straight pipeline and curved pipeline. In the permafrost area, pipelines are exposed to an extremely low temperature (-40°C). In this situation, three-dimensional flow analysis should be analyzed to investigate thermal effects such as pressure drop, temperature change, velocity deficit and distribution change of liquid droplet of internal fluid. In this paper, multi-phase and multi-species analysis was introduced to analyze the flow characteristics of permafrost pipelines on the vertical support members above ground.

Key words : Pipeline(파이프라인), Permafrost(영구동토), CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학), Natural Gas(천연가스), Thermal Flow(열유동), Multiphase Flow(다상유동)

1. 서 론

세계적으로 지구 온난화 방지를 위한 온실가스 배출 규제가 시작되었고, 환경규제도 또한 강화되고 있다. 그러나 세계 각국의 기간산업은 화석연료에 기반하고 있기 때문에 화석연료 의존도는 매우 높고 자원 확보의 중요성 또한 크게 증가하고 있는 실정이다. 화석연료 자원 확보를 위해 강대국 간의 경쟁이 치열해지고 있으며, 지속적이고 안정적인 에너지 확

보를 위해 육상에서 해양 및 극한지로 그 영역을 확장시키고 있다¹⁾. 그러나 석유나 천연가스의 정제시설과 소비지역은 대부분 서유럽과 북미 동해안에 집중되어 있어서 극지에 위치한 생산지에서 이들 지역까지 운송해야 하는 문제를 가지고 있다.

천연가스 이송용 파이프라인을 극한지에 설치하는 방법은 크게 지하에 매설하는 지중매립식과 지상의 가설대 위에 설치하는 고상식으로 나뉜다. 고상식 파이프라인의 경우 -40°C부터 +20°C까지의 외기온도에 노출되게 되는데 이 경우 파이프라인 내부 유체의 온도, 압력, 속도, 액적 변화 등 열유동 측면에서의 분석이 수행되어야 한다. 그러나 극한지 온도

[†]Corresponding author : ljunh330@inha.edu

[접수일 : 2014.06.10 수정일 : 2014.08.02 게재확정일 : 2014.08.31]

Copyright © 2014 KHNES

조건이 반영된 다성분-다상유동 해석사례는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 극한지에서 채굴된 천연가스의 이송을 위해서 설치되는 고상식 파이프라인 주변의 외기온도 변화에 따른 다상-다성분 유동해석을 수행하였다. 그리고 극한온도에서의 3차원 수치시뮬레이션을 통해 관망 성능 특성을 평가하였다.

2. CFD 해석

극한온도조건에서의 파이프라인 내부 유체의 3차원 열유동 특성을 분석하기 위해 직관과 곡관에 대한 CFD 해석이 수행되었다. 다상유동에 대해 정확도가 높다고 알려진 상용코드 ANSYS Fluent v.13이 사용되었으며 천연가스의 다양한 가스 조성과 액적에 의한 영향을 고려하기 위해 다성분-다상유동 해석이 수행되었다. 직관 CFD 해석에서 참고문헌과의 비교를 통해 다성분-다상유동 해석기법의 신뢰성을 확보하였으며, 외기온도조건을 변화시킴으로써 온도에 의한 내부 유체 영향을 관찰하였다. 또한, 직관에서 수립된 해석 기법을 바탕으로 다양한 곡관(R=3D, 5D, 7D)에서의 극한온도조건(-40°C ~ +20°C) 해석이 수행되었다.

2.1 직관

2.1.1 모델링 및 격자 생성

유동 특성 상 짧은 관에 대해서는 외기온도에 대한 영향을 관찰하기 어려울 뿐만 아니라 관내 유동의 불완전한 발달로 인해 정확도가 낮아진다. 따라서 계산을 위한 파이프라인을 모델링 시, 충분한 길이를 확보해야 한다. 해석에 사용된 직관의 내부 유체 크기는 직경 0.68m, 길이는 1,500m이며 직경과 길이를 비롯한 직관 모델링 데이터 및 경계조건은 천연가스 파이프라인에서의 다성분-다상 유체의 천이유동 분

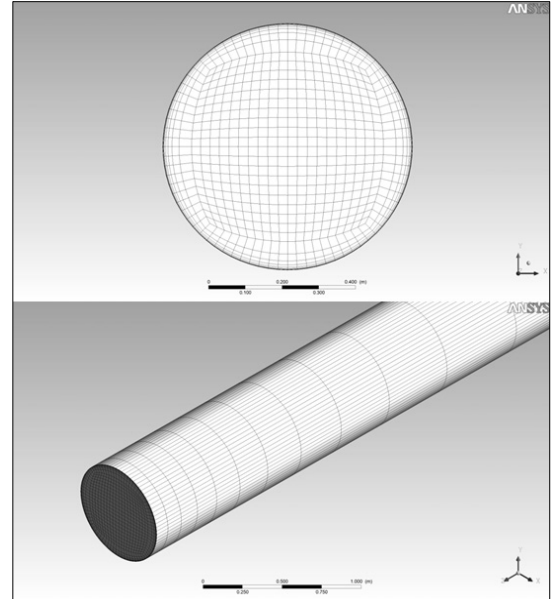


Fig. 1 Mesh (straight pipeline)

Table 1 Mesh information

Node	Elements	Max. y+	Mesh Type	Tool
3,122,000	3,038,480	4.92 @wall	Structural	ICEM CFD mesh tool

석사례²⁾를 참고하였다. 생성된 직관의 격자를 Fig. 1에 나타내었고 격자 정보를 Table 1에 나타내었다.

2.1.2 경계조건

생성된 격자를 바탕으로 상용코드인 ANSYS Fluent v.13을 사용하여 경계조건을 설정하고 CFD 해석을 진행하였다. 여러 가지 성분의 천연가스 조성을 구현하기 위해 species transport model이 사용되었고 천연가스와 액적의 다상유동 해석을 위해 multiphase-mixture model, 열유동 해석을 위해 energy model이 사용되었으며 난류모델은 단순한 유동에서 정확도가 높다고 알려진 k-e realizable model이 사용되었다³⁾.

외기온도 조건을 고려하기 위해 직관 내 벽면 온도 조건을 열교환이 없는 완전단열조건, +20°C, -20°C, -40°C의 4가지 온도조건을 설정하였다. 내부 유체 온

Table 2 Natural Gas Composition Ratio (straight line)

Component	Overall Composition
CO ₂	0.0032
N ₂	0.0101
C ₁	0.7557
C ₂	0.1122
C ₃	0.0778
i-C ₄	0.0078
n-C ₄	0.0171
i-C ₅	0.0028
n-C ₅	0.0031
n-C ₆	0.0041
C ₇₊	0.0061

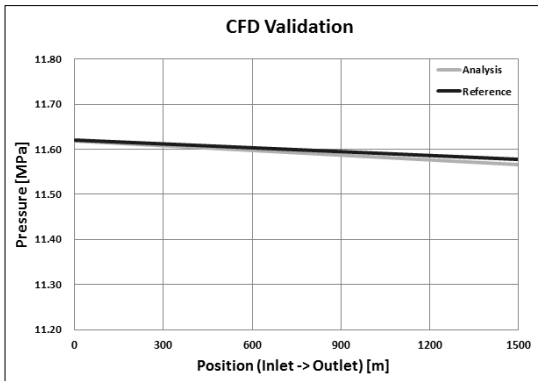


Fig. 2 CFD Validation

도는 49°C이고 입구 압력은 11.62MPa, 출구 속도는 7.641m/s로 설정하였다. 초기 액적(물)을 5%로 설정하였고, species transport model을 이용한 천연가스 조성비를 Table 2에 나타내었다.

2.1.3 해석 검증

2.1.1절에서 언급한 다성분-다상 유체의 천연유동 분석사례의 경계조건을 그대로 적용하여 동일한 출구 압력의 계산 여부를 확인하였고 이를 Fig. 2에 나타내었다. 출구압력 차이가 0.16%로 거의 동일한 결과를 보이며, 상용코드인 Fluent를 이용한 해석방법에 대한 신뢰성을 확보하였다.

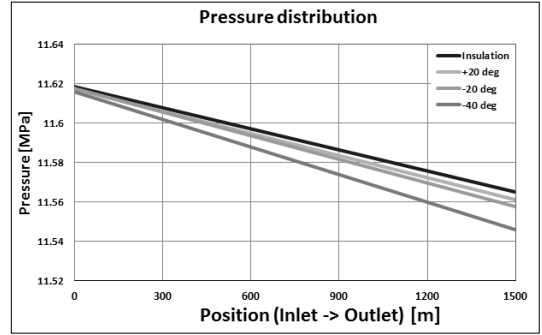


Fig. 3 Pressure Distribution

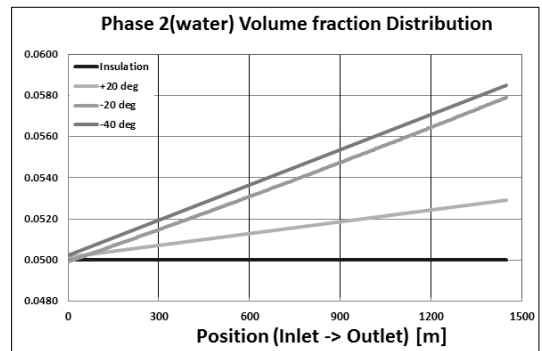


Fig. 4 Phase 2(water) Volume Fraction Distribution

2.1.4 해석 결과

2.1.3절의 검증 결과를 바탕으로 온도조건을 변화시켜 해석을 진행하였다. 열교환이 없는 완전단열조건과 +20°C, -20°C, -40°C의 온도조건을 부여하였고, 온도조건 변화에 따른 직관 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

단열조건에 비해 온도조건을 부여했을 때 압력강하 값이 더 커짐을 알 수 있다. 이를 통해 열 교환이 없는 단열조건은 관 길이 방향의 압력강하를 잘 예측하지 못하는 것을 알 수 있다. 압력 강하값은 온도조건이 낮아질수록 커지는 경향을 보이는데, 이는 낮은 온도조건으로 인한 천연가스 기체 분자의 운동이 둔화되면서 발생한 현상으로 예상된다.

Fig. 4에 관 길이방향에 따른 액적(물)의 volume fraction 분포 변화를 나타내었다. Phase 1인 천연가스가 저온으로 인해 수축하면서 천연가스의 volume

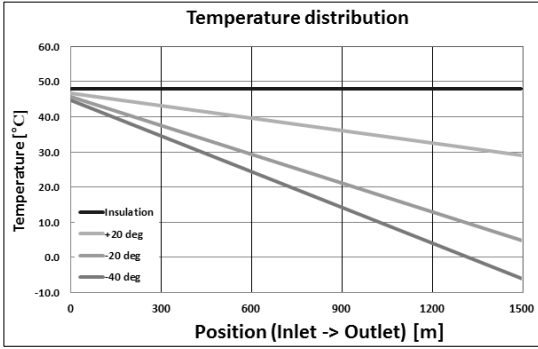


Fig. 5 Temperature Distribution

fraction이 감소하고 이에 따라 액적의 volume fraction이 증가한다. 증가된 volume fraction은 또다시 관 길이방향 압력저하에 기여하게 된다.

Fig. 5에 관 길이방향에 따른 온도분포를 나타내었다. 초기에는 모든 케이스에서 천연가스의 유입 온도인 49°C 근처에서 시작되지만 냉각된 관 내벽 온도 영향을 받아 점차 낮아지고 있음을 알 수 있다. -40°C 온도조건인 경우 약 1,300m 지점에서 내부 유체 온도가 영하로 떨어지기 시작한다. 이 지점부터 액적의 동결이 예상되므로 상변화 모델을 적용하거나 기존의 액체-기체 다상유동 해석이 아닌 고체-기체 다상유동 해석이 요구된다. 이는 곡관에서 치명적일 수 있는데, 곡관의 경우 얼음 입자가 곡관 벽에 충돌하여 침식을 발생시킬 여지가 있기 때문이다.

2.2 곡관

다성분-다상유동해석 사례와 직관 해석 기법을 바탕으로 곡관 해석을 바탕으로 곡관 해석을 수행하였다. 사용된 해석 모델과 온도조건은 직관과 동일하며, 곡관의 곡률을 3D, 5D, 7D로 변화시켜 가면서 유동해석을 진행하였다.

2.2.1 모델링 및 격자 생성

유동해석에 사용된 곡관의 직경은 1.219m (48inch)

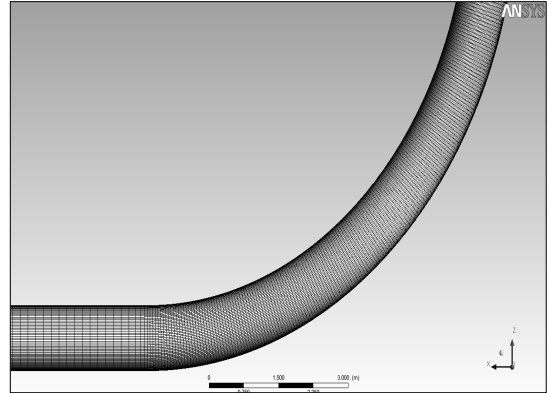


Fig. 6 Mesh (curved pipeline)

Table 3 Mesh information

Radius	Node	Elements	Max. y+	Mesh Type
3D	939,640	918,809	5.00 @wall	Structural
5D	1,108,640	1,084,659		
7D	1,345,240	1,316,849		

Table 4 Natural gas composition ratio (curved line)

Component	Overall Composition
CO ₂	0.015
N ₂	0.007
C ₁	0.899
C ₂	0.058
C ₃	0.017
i-C ₄	0.001
n-C ₄	0.002
C ₅₊	0.001

이고 배관 두께는 23.8mm (0.932inch)이다. 모델링에 Fig. 6에 생성된 곡관 격자를, Table 3에 격자 정보를 나타내었다. 입·출구방향으로 관 길이를 10D만큼 생성하였다.

경계조건 설정에는 Alaska pipeline project⁴⁾를 참조하였고 천연가스가 직관을 거쳐 오면서 충분히 냉각되었다는 가정 하에 내부 유체 온도는 -1°C로 설정하였다. 입구 압력은 17.2MPa, 출구속도는 6m/s로 입력하였다. 초기 액적은 직관과 동일한 5%이며, 곡관에서 사용된 천연가스 조성비를 Table 4에 나타내었다.

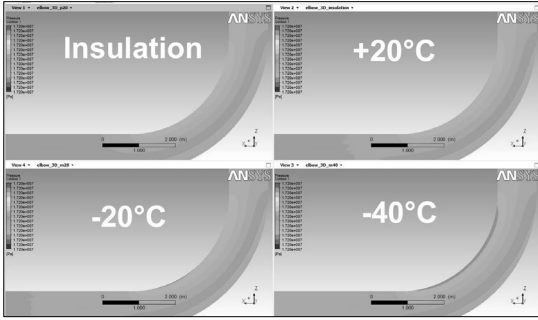


Fig. 7 Pressure contour (3D)

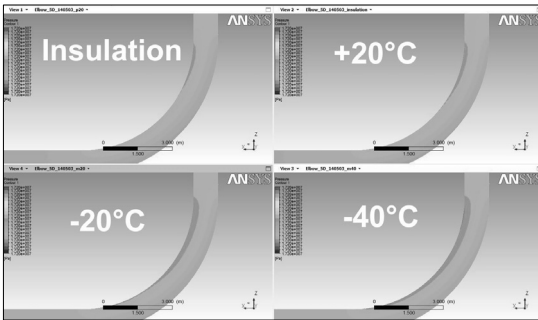


Fig. 8 Pressure contour (5D)

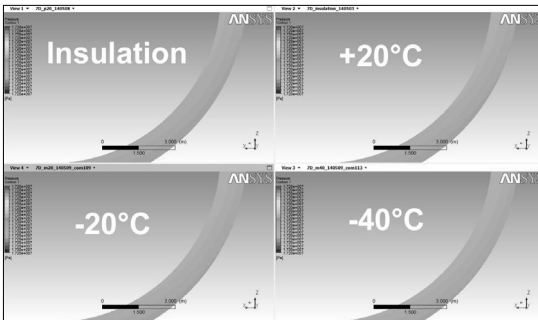


Fig. 9 Pressure contour (7D)

2.2.2 해석 결과

Fig. 7~Fig. 9에 곡관 형상별 압력 컨투어를 각각 나타내었다. 단열조건과 비교하였을 때 Fig. 7의 3D 곡관의 -40°C 외기온도 조건에서 곡관부 정체 현상이 발생한다. 이러한 경향은 Fig. 8의 5D 곡관에서도 발생하지만 상대적으로 곡률이 큰 7D 곡관에서는 발생하지 않는다. 이를 통해 곡관의 곡률이 클수록 극한온도조건으로 인한 영향이 적음을 알 수 있다.

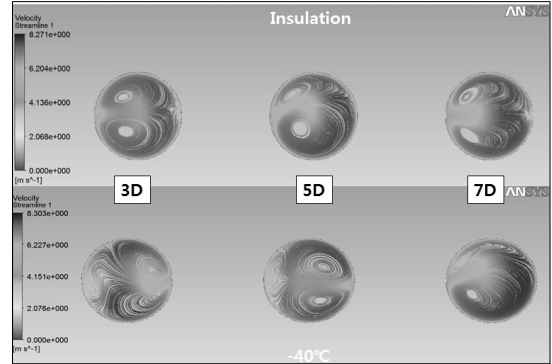


Fig. 10 Velocity streamline

Fig. 10에 곡관부가 끝나는 관 단면의 속도 스트림 라인을 나타내었다. 단열조건과 -40°C조건에서 곡관 형상 별 속도 스트림라인을 비교 해 보았을 때, 압력 컨투어 분석 결과와 마찬가지로 7D 곡관에서는 온도에 의한 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 3D와 5D 곡관과 같이 상대적으로 곡률이 작은 곡관의 경우 단열조건에 비해 -40°C조건에서 전체적인 유동이 관 바깥(우측)으로 치우쳐 형성되어 있는데 이는 극한온도조건으로 인해 관 곡관부 내측에 액적이 집중되어 발생하는 현상으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 극한지 천연가스 이송용 파이프라인 주변 온도 변화에 따른 다상-다성분 유동해석이 수행되었다.

- 1) 상용코드인 ANSYS Fluent v.13을 이용하여 온도 조건을 고려한 다성분-다상유동 해석기법을 정립 하였다.
- 2) 기존 파이프라인 내부 유동해석에 사용되는 단열 조건 해석에서는 극한온도조건에서의 압력저하를 잘 예측하지 못함을 확인하였다.
- 3) 관 길이가 길어질 경우 내부 유동장 온도가 영하로 떨어짐에 따라 유체 내부의 액적 동결이 예상

되고 동결된 입자가 곡관 내부에 충돌침식을 일으킬 가능성을 확인하였다.

- 4) 극한 온도조건이 곡관에 미치는 영향을 곡관의 형상을 달리하여 해석하였다. 7D 곡관에서는 내부 유동이 외기온도의 영향을 거의 받지 않으나 3D와 5D 곡관에서는 곡관 내측에서의 압력 정체 현상과 속도저하 현상이 발생하였다.

후 기

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

References

1. TSNE, “ANSYS CFD Fluent Basic”, 2012.
2. Trans Canada and Exxon Mobil, “Alaska Pipeline Project: Draft-Resource Report 1 - Rev0, General Project Description”, 2011.