



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

초록

최근 비교적 에너지자원 확보가 용이했던 육상의 화석연료가 고갈됨에 따라 이를 확보하기 위한 장소가 육지에서 그 동안 관심을 두지 않았던 극한지로 이동하고 있으며, 극한지 자원확보를 위한 국가간의 경쟁이 치열하다.

이러한 극한지 에너지자원 개발 시장을 선점하기 위해서는 국내 환경과 상이한 극한지 대상 건설기술 개발이 필수적이다. 극한지 가스배관의 경우 영하 20℃에서 영상 20℃까지의 온도변화에 따라 국내에서 볼 수 없는 해동침하 등의 새로운 주변 환경의 영향을 많이 받기 때문에 이에 맞춰 새로운 해석모델개발이 필요하다. 이에 대한 실제 실험을 진행할 경우 엄청난 시간과 비용이 들지만 유한요소해석법을 활용한다면 배관에 미치는 응력을 빠른 시간에 적은 비용으로 분석할 수 있다.

본 연구에서는 유한요소해석을 활용하여 극한지 가스배관과 외부환경을 모델링화 시켰으며 극한지의 토양 및 배관의 물성을 적용하여 이때 발생하는 해동침하에 따른 배관이 받는 응력 및 변위에 대해 알아보고자 한다. 유한요소해석 툴로는 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.

주요어 : 유한요소해석, 극한지, 가스배관, 응력, 해동침하

목차

초록	i
목차	ii
Figure list	iv
Table list	v
1. 서론	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구의 방향	3
2. 이론적 배경	5
2.1 배관에 작용하는 응력	5
2.1.1 내압에 의한 응력	5
2.1.2 지반침하에 의한 응력	7
2.1.3 Mohr Coulomb 식	10
2.2 배관두께를 결정하는 식	12
2.3 극한지 토양 환경	13
3. 해동침하에 대한 유한요소법 적용	18
3.1 해석모델 구성	18
3.1.1 배관 모델 및 물성	20
3.1.2 토양 모델 및 물성	23
3.2 해석방법 및 경계조건	27

3.3 해석 시 가정사항	30
4. 해석결과	32
4.1 배관매설 깊이에 따른 영향	33
4.2 해동침하 길이에 따른 영향	37
4.3 해동침하 깊이에 따른 영향	44
5. 결론	49
참고문헌	51
Abstract	53

Figure list

- 그림 2.1 극한지 토양 환경
- 그림 2.2 깊이에 따른 극한지 토양 온도 변화
- 그림 2.3 해동침하 모식도
- 그림 3.1 배관 모델
- 그림 3.2 토양 모델
- 그림 3.4 토양 물성 구간 적용
- 그림 4.1 매설 깊이에 따른 모델
- 그림 4.2 매설 깊이에 따른 응력 변화
- 그림 4.3 해동침하 길이에 따른 모델
- 그림 4.4 해동침하 길이에 따른 배관 상단의 응력 변화
- 그림 4.5 해동침하 길이에 따른 배관 하단의 응력 변화
- 그림 4.6 해동침하 길이에 따른 배관 상단의 변위
- 그림 4.7 해동침하 깊이에 따른 배관 상단의 응력 변화
- 그림 4.8 해동침하 깊이에 따른 배관 상단의 응력 변화(확대)
- 그림 4.9 해동침하 깊이에 따른 배관의 변위 변화
- 그림 4.10 해동침하 깊이에 따른 배관의 변위 변화(확대)

Table list

표 3.1 X70 배관 물성

표 3.2 점토 토양 물성

1. 서론

1.1 연구의 필요성

극한지에서의 석유, 가스의 수송은 주로 파이프라인을 통하여 이루어지고 있다. 최근 러시아 북극지역의 최대 가스, 석유 매장지역으로 대형 매장지 개발과 함께 파이프라인 건설이 병행되고 있으며 우리나라 또한 이 지역의 가스를 수송해 오기 위해 많은 노력을 하고 있다. 그러나 국내 기술로는 아직까지 극한지에 대한 이해가 많이 부족하며 극한지에 적용될 파이프라인의 건설에 대한 기술력 또한 부족한 상황이다.

러시아에서 진행된 사할린, 하바로프스크, 블라디보스토크를 연결하는 S-K-V 파이프라인 프로젝트는 길이 1830Km에 총 공사비가 약230억달러에 달하는 막대한 비용이 들어갔다. 만약 러시아에서 대한민국으로 들어오는 파이프라인을 건설할 경우 최소 2000Km급이 예상되는데 S-K-V파이프라인 프로젝트보다 더 큰 비용이 들어갈 것이라 생각된다.[1]

이에 따라 수송인프라 건설비용의 최소화가 필요하며 파이프라인 건설에 필요한 재료 및 설계는 비용에 큰 비중을 차지하기 때문에 재료선정 및 설계에 대한 많은 연구가 필요하다. 또한 최소비용으로 파이프라인을 건설하되 극한지의 다양한 외부환경에 의해 배관이 파손되지 않도록 설계하는 것이 중요하다.

최근 안전에 대한 중요성이 이슈로 떠오른 만큼 안전은 절대적

으로 필수 조건이다. 만약 배관의 파손이 일어난다면 이를 복구하기 위해 엄청난 비용이 예상되기 때문에 최소 비용으로 가장 안전하고 효율적인 설계를 하는 것이 중요하며 이를 위해서는 특히 배관에 미치는 응력 및 변위해석에 대한 연구가 필요하다.

본 연구를 통해 향후 더 극한 환경에서의 배관설계 및 해석에 대한 연구에 많은 도움이 될 것으로 예상되며 이를 통해 독자적인 국내 기술만으로 극한지 환경에서의 파이프라인 건설기술을 확보할 수 있을 것이다.

1.2 연구의 방향

본 연구에서는 수치해석적인 방법을 통해 극한지 외부환경의 여러 가지 변수를 활용하여 그에 따른 배관의 응력 및 변위를 해석하였다.

극한지 배관을 이해하는데 있어서 수치해석적 방법을 사용하는 것은 실험적인 방법에 비하여 큰 이점을 가지고 있다. 실험적인 방법들은 대부분 간접적인 방식이기 때문에 주어진 실험 조건에서의 제한적인 자료를 얻는데 그칠 수밖에 없다. 또한 실험을 진행 할 경우 엄청난 비용이 들기 때문에 다양한 환경에서의 실험이 불가능하며 극한지환경인 극저온의 조업 환경으로 인하여 다양한 물성 변수들의 영향을 측정하는 것이 불가능하다.

하지만 수치해석적 방법을 사용할 경우 배관의 모든 지점에 대한 자료를 얻을 수 있으며 환경 조건(해동침하 길이, 해동침하 깊이, 매설깊이)의 변화에 따른 배관 응력 및 변위의 거동을 구할 수 있다. 이를 통하여 배관 취약부위에 대한 정량적인 접근을 가능케 하여 파괴 발생 부위를 해석하는데 큰 도움을 줄 수 있다.

수치 해석을 사용하는 것이 극한지 배관 응력해석에서 큰 이점을 가져오기는 하나 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 극한지 환경에서의 복잡한 조건과 해동침하 시 겪게 되는 물리현상에 대한 이해가 필요하다.

실제 극한지에서 토양의 동상 및 해동침하에 의한 응력은 토양의 점착력, 마찰력 등 과 함께 복합적으로 상호 영향을 끼치기 때문에 이를 모두 고려해야 하며 배관의 응력거동을 정확히 해석하기 위해서는 배관의 내압과 물성치를 잘 결정하여야 한다. 하지만 이러

한 환경에서의 배관에 미치는 응력에 대한 정확한 정보가 아직 밝혀져 있지 않기 때문에 이를 해석을 통해 배관물성을 설정하는 과정이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내 X70배관의 물성을 사용하여 극한 지 조건에서의 상황을 파악하고 경계조건을 확립한 후 각각의 환경 변수를 다르게 하여 토양과 배관에 대한 모델링을 통하여 응력분포에 대해 알아보았다.

특히 지금까지 연구되어온 지반침하에 대한 내용과 다르게 극한지라는 환경이 갖는 토양의 깊이에 따른 온도 차이를 해석에 적용시켜 다른 연구와의 차별성을 두었다.

2. 이론적 배경

2.1 배관에 작용하는 응력

2.1.1 내압에 의한 응력

배관을 설치할 때 가장 중요하고 민감한 부분이 내압이다. 그만큼 내압은 배관의 유량을 결정하기도 하지만 배관에 가장 큰 영향을 주는 변수이다. 이러한 내압 p 가 작용하는 배관에서 내압에 의한 원주방향응력($\sigma_{\theta p}$)은 배관의 지름방향으로 일정하게 발생하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$\sigma_{\theta p} = \frac{Pd}{2t} \text{-----} (2.1)$$

또한 내압 P 에 의해서 축방향으로 구속된 배관에 유기되는 축방향 응력(σ_{ap})은 내압에 의한 축방향 응력과 구속에 의한 팽창 혹은 수축 때문에 발생하는 푸아송의 효과를 고려한 응력을 중첩하면 다음과 같다.

$$\sigma_{ap} = (0.5 + \nu_p) \frac{Pd}{2t} \text{-----} (2.2)$$

여기서, ν_p 는 배관재료의 푸아송 비 이다. 용접이음된 매설배관의 길이가 매우 길면, 배관의 단면부가 축방향으로 구속되지 않더라도 토질마찰등에 의해서 구속되므로 내압 등에 의해서 응력이 발생하게 된다.

2.1.2 지반침하에 의한 응력

지금까지 연구되어온 일반적인 환경에서의 지반침하에 의하여 발생하는 배관의 변형과 응력은 배관을 보요소로 보고, 지반기력기반 모델로써 해석적으로 구하였다.[3]

Winkler에 의해 제시된 지반반력기반 모델에서는 배관주위의 지반을 탄성 기반(elastic foundation)으로 모델링한다.[4][5] 즉, 배관과 주위지반의 관계를 스프링의 관계로 설정하여 배관의 변형에 따른 지반 거동을 지반반력으로 모델링하였다. 지반이 받는 압력 p_g 는 배관의 수직 변위에 비례한다.

$$p_g = kw_p \text{ ----- (2.3)}$$

여기에서 k 는 지반반력계수(coefficient of subgrade reaction, dimension : FL^{-3})이고, w_p 는 배관의 수직변위이다. 지반반력계수 k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{0.65}{D} \left(\frac{E_g D^4}{E_p I_p} \right)^{\frac{1}{12}} \left(\frac{E_g}{1 - \nu_g} \right) \text{ ----- (2.4)}$$

여기서 E_g 는 배관의 탄성계수이며 I_p 는 배관의 극관성모멘트, E_g 는 지반의 탄성계수, ν_g 는 지반의 푸아송 비

이다.

탄성기반의 단위 길이당 강성 K (modulus of subgrade reaction, dimension : FL^{-2})는 $K=k \times D$ 로 나타낼 수 있다.

탄성 기반 위에 놓인 배관의 수직 변형에 관한 일반적인 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^4 w_p}{\partial y^4} + 4\eta^4 w_p = 4\eta^4 w_g = 4\eta^4 \frac{W}{K} \text{ ----- (2.5)}$$

여기서, w_p 와 w_g 는 각각 배관과 지반의 수직변위이며, K 는 탄성기반의 강성, W 는 배관에 작용되는 단위길이당 하중이다. η 는 다음과 같이 나타내어지며, $\frac{1}{\eta}$ 을 토양-배관 강성도(soil pipe stiffness)로 칭한다.

$$\eta = \sqrt[4]{\frac{K}{4E_p I_p}} \text{ ----- (2.6)}$$

지금까지의 연구는 대부분 식 (1.6)을 해석에 적용하였다.[6] 그러나 식 (1.6)의 경우 토양에 대한 마찰력과 점착력을 고려하지 않아 극한지에서 영구동토층과 활동층의 다른 토양에 대한 물성을 고려할 수 없었다. 또한 극한지에서는 토양의 깊이에 따라 온도의

차이가 큰데 온도에 따라 토양의 물성이 크게 달라져 이를 해석에 적용시키기 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 토양의 물성을 더 자세히 적용시킬 수 있는 Mohr Coulomb식을 사용하였다.

2.1.3. Mohr Coulomb식

어떤 면상의 전단응력과 전단강도가 같을 때 파괴가 일어나며, 전단응력은 그 응력이 생기는 면에 작용하는 수직응력의 함수라는 것이다.

$$\tau_f = S = f(\sigma) \text{ ----- (2.7)}$$

재료의 파괴상태를 Mohr의 파괴이론에 의해 설명하면, 파괴 때의 응력 상태를 표시하도록 여러 개의 Mohr의 원을 그리고, 이 원에 접하는 공통되는 선을 그을 수 있는데 이것을 Mohr의 파괴포락선(Mohr's failure envelope)이라 한다.(그림2.1) Mohr원이 파괴포락선과 교차한다면, 파괴상태를 넘는 것을 의미하므로 실제로는 그런 일이 있을 수 없으며, Mohr원이 파괴포락선 아래에 그려지면 흙이 파괴상태에 도달하지 않았음을 의미한다.

Mohr-Coulomb식은 Coulomb이 Mohr의 파괴이론을 쉽게 적용할 수 있도록 수정한 것으로 σ 와 τ 의 관계는 직선적이며, 흙의 파괴는 요소의 한 면에서 전단응력이 흙의 마찰저항과 점착저항을 초과할 때 일어난다는 것이다. 파괴 때 한 전단면에 작용하는 응력(흙의 전단강도)을 식(2.8)에 나타내었다.

$$\tau_f = C + \bar{\sigma} \cdot \tan \phi \text{ ----- (2.8)}$$

위 식에서 C 는 점착력이며 \emptyset 는 내부마찰각, $\bar{\sigma}$ 는 유효수직 응력을 의미한다.[7]

2.2. 배관두께를 결정하는 식

가스배관의 규격을 결정할 때 가장 먼저 내압이 결정되고 이에 따라 내압에 따른 두께를 결정하는 것이 일반적이다. 이를 결정하는 식은 다음과 같다.

$$P = \frac{2St}{D} FET \text{ ----- (2.9)}$$

위 식에서 D 는 배관의 외경이며 단위는 mm를 사용한다. E 는 세로연결인자로 1.0을 대입하였고 F 는 디자인인자로 0.6을 적용하였다. T 는 온도인자로 1.0으로 결정되었다.[8] 현재 일반적인 장거리 배관의 경우 다른 배관에 비해 비교적 높은 내압인 12~15MPa을 가지는데 본 연구에서는 향후 더 높아질 배관의 내압을 고려하여 내압 P 는 17MPa로 결정하였다. 이에 따라 배관의 두께인 t 의 경우 20mm 의 값이 나왔으며 이를 해석에 적용하여 진행하였다.

2.3. 극한지 토양 환경

미국 지질 조사국(USGS, United States Geological Survey, 2008)에 따르면 영구동토를 포함한 극한지에는 전 세계 미발견 석유, 가스 탐사 자원량의 22%가 매장되어 있다.

이러한 극한지의 토양환경은 크게 영구동토층(permafrost)와 활동층(active layer)로 나뉜다. 영구동토는 물의 어는 점인 0°C 이하로 2년이나 그 이상동안 유지된 토양을 일컫는다. 영구동토는 지구 물의 0.022%를 차지하며, 북반구에 노출된 토양의 24%에 존재한다.

활동층은 영구동토층의 표면에 여름에 녹고 겨울에 어는 것을 반복하는 층을 지칭하며 활동층의 두께는 위도에 따라 다르나, 대체로 1.5~6m이며 활동층이 융해하면, 그 밑의 영구동토층이 토양수의 배수를 막으므로 수분으로 포화된다.

영구동토층과 활동층의 일반적인 형태를 그림 2.1에 나타내었다.[9] 일반적으로 위도에 따라 연속적인 영구동토층과 불연속적인 영구동토층으로 나뉜다. 본 연구에서는 불연속적인 영구동토층을 모델링하여 해석하였다.

극한지에서의 일반적인 토양깊이에 따른 온도변화를 그림 2.2에 나타내었다. 활동층의 경우 연평균 최대 온도와 최저 온도가 차이가 큰 편이며 깊이 내려갈수록 그 차이가 작아진다. 여름에는 활동층과 영구동토층의 온도가 상승하여 영구동토층의 일부 토양이 녹아 다량의 수분을 함유하고 있던 얼어있던 토양이 녹으면서 토양이 무너져 내리는 현상이 발생한다. 이를 해동침하(thaw settlement)라

고 일컫는다. 해동침하가 일어나는 모식도를 그림2.3에 나타내었다.[10]

해동침하는 극한지 환경에서 나타나는 배관에 영향을 줄 수 있는 가장 큰 영향 중 하나이다. 해동침하가 일어났을 때 배관이 매설되어 있으면 그림에 보이는 것과 같이 침하가 일어나지 않은 지역의 지지반력으로 배관이 버티게 된다. 이때 배관이 얼마의 응력을 받는지 또한 얼마나 변형이 일어나는지에 대한 본 연구에서 진행하였다.

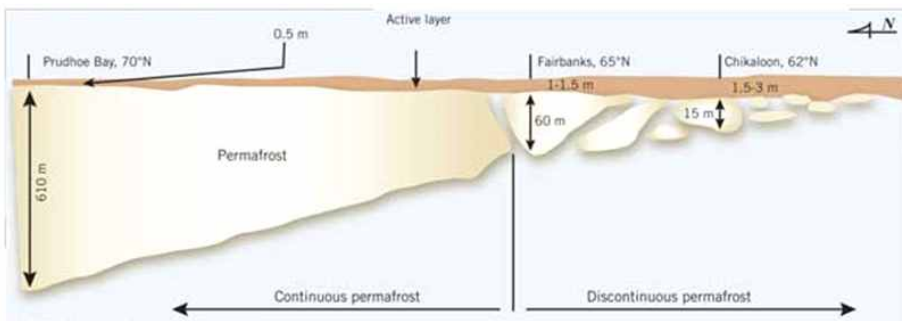


그림 2.1 극한지 토양 환경

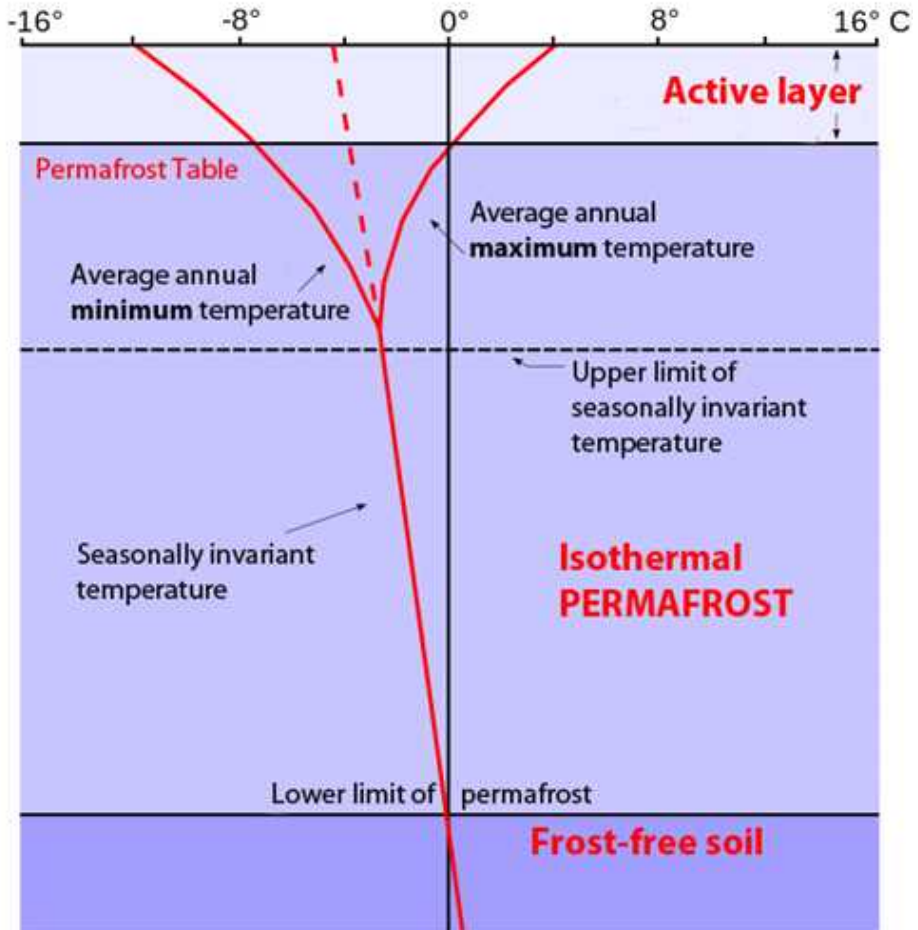


그림 2.2 깊이에 따른 극한지 토양 온도변화

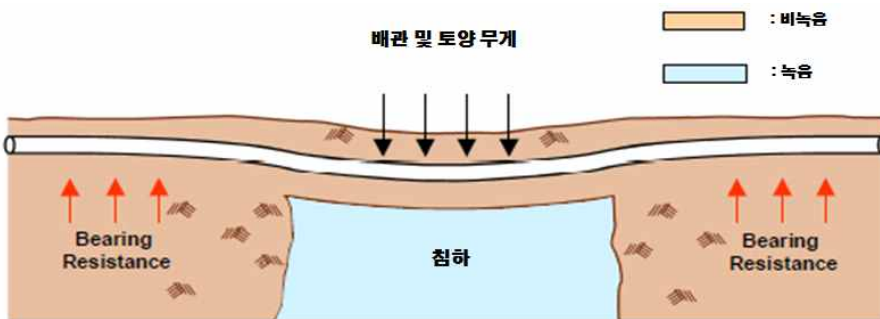


그림 2.3 해동침하 모식도

3. 해동침하에 대한 유한 요소법 적용

3.1 해석모델 구성

극한지 환경의 경우 조건에 따라 다양하고 실험적으로 변형 및 응력분포를 분석하기에는 어려움이 따른다. 이를 보완하기 위해 이론적 모델을 통한 계산을 수행하였고, 그 방법으로 유한요소법을 사용하였다.

유한요소법(Finite Element Method)이란 공학문제를 해결하는 수치 계산의 한 방법으로 주어진 방정식(미·적분형태)과 초기조건, 경계조건을 만족하는 해에 대한 근사해를 유한개의 요소분할을 이용하여 행렬식으로 계산하여 각 요소내의 근사해를 구하는 방법이다. 구조해석의 분야에서 발전하였고 열전달, 유체해석, 질량수송, 전자기 포텐셜 등 다양한 범위에서 적용된다.[11,12]

요소의 모양은 1차원인 선이나 2차원인 삼각형 또는 사각형, 3차원인 육면체 등 모든 모양이 가능하다. 각 요소(Element)는 절점(Node)으로 구성되어 서로 연결되어 있다.(그림) 유한요소법은 복잡한 문제를 다윈 1차 연립 방정식으로 치환하여 풀 수 있다는 장점이 있다. 또한 기하학적 형상, 하중 및 경계조건등에 제한이 없고 여러 가지 복합재료로 이루어진 연속체에도 적용이 가능하다. 그러나 국부 응력 해석 시에는 일반적으로 모델링이 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 해동침하 시 배관이 겪는 변형과 응력 거동을

해석하기 위해 3-D모델을 이용하였다. 2-D slice 모델을 많이 사용하는 편이지만 해동침하가 일어나지 않은 부분과 일어난 부분 경계의 분석이 중요한데 그에 따른 배관 및 토양의 위치별 변형과 응력의 분포를 분석하기 위해 3-D모델을 구상하였다. 또한 계산 시간 절감을 위해 대칭면을 이용하여 모델의 1/2 만을 해석의 대상으로 삼았다.

유한요소법은 ABAQUS를 사용하였고 Implicit, Static으로 계산하였다. 요소는 모델을 제작하는데 오차가 적고 편리하기 위해 8개의 절점으로 구성되는 육면체 모양으로 구성하여 작성하였다. 이를 이용하면 복잡한 구조를 구성하는데 제한이 따르지만 요소에서의 계산이 정확해지기 때문에 결과의 정확성을 확보하기 위하여 적용하였다.

3.1.1 배관 모델 및 물성

해석한 배관의 모델은 다음과 같다. 속이 비어있는 원통의 1/2인 반원통 모양에 총 길이 30000mm로 모델링 하였고 직경 780mm, 두께는 20mm로 모델링 하였다. 모델링한 구조를 그림3.1에 나타내었다. 앞서 말한 바와 같이 계산의 시간을 줄이기 위해 1/2로 모델링 하였고 길이 방향으로 더 많은 mesh를 할당하여 계산의 정확도를 높여 변형 및 응력분포를 더욱 자세히 보려고 하였다.

배관의 물성은 X70의 실제 인장실험을 통한 물성을 적용하였다. 이때 사용한 배관의 물성치인 밀도와 탄성응력 항복응력을 표3.1에 나타내었다.



그림 3.1 배관 모델

배관종류 \ 배관물성	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio	Elastic modulus (MPa)	Yield strength (Mpa)	UTS (Mpa)
X70	7850	0.3	207	545	673

표3.1 X70 배관 물성

3.1.2 토양 모델 및 물성

극한지 환경에서 토양의 깊이에 따라 온도가 다른 것을 적용하여 모델링을 하였다. 토양의 크기는 길이 방향으로 30000mm로 배관의 길이와 같고 폭은 3000mm, 높이는 6000mm에서 10000mm로 모델링 하였다. 그 중에서도 높이의 경우 밑의 5000mm는 영구동토층으로 구분하였고 위의 활동층을 1000mm에서 5000mm까지 각각 다르게 모델링 하였다. 이중 활동층의 높이가 3000mm인 모델을 그림3.2에 나타내었는데 이는 reference모델을 보여주는 그림이다.

해동침하가 일어나게 될 경우는 침하의 깊이와 길이에 따라 모델링하여 해석을 진행하였다. 침하 길이의 경우 4000mm부터 4000mm간격으로 8000, 12000, 16000mm 총 4가지의 길이에 대해서 해석을 하였고 깊이의 경우 침하깊이가 10000mm일 때 1000mm부터 5000mm까지 1000mm간격으로 모델링하여 해석을 진행하였다.

배관과 접촉하는 토양 부분을 상대적으로 더 많은 mesh를 할당하여 배관의 변형 및 응력 분포를 더 자세히 해석할 수 있게 모델링 하였다. 다른 토양 부분은 mesh를 비교적 적게 할당하여 계산시간이 길어지지 않게 하였다.

토양 물성의 경우 극한지라는 범위가 크기 때문에 어느 특정 지역마다 토양의 물성이 상이하어 다양한 물성 값이 존재한다. 본 연구에서는 특정 지역의 점토(clay) 물성을 적용하였다. 영하 20℃에서 영상 20℃까지 활동층과 영구동토에서의 밀도(density), 탄성계수(Elastic modulus), 푸아송 비(poisson' s ratio), 점착력

(Cohesion), 마찰각(friction angle)까지 고려하였다. 온도에 따라 밀도는 변하지 않으나 탄성계수의 경우 크게 다른 값을 보이며 푸아송 비, 점착력, 마찰각의 경우도 조금씩 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 표3.2에 나타내었다.[13,14]

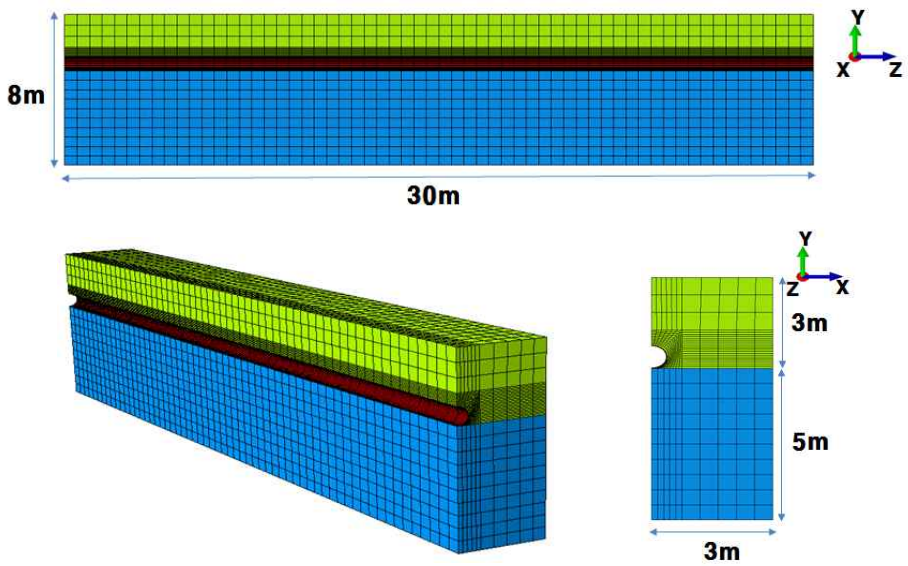


그림 3.2 토양 모델

토양 종류	물성치	-20℃	-10℃	-5℃	-2℃	0℃	20℃
Clay in active layer	Density (kg/m ³)	1920					
	Elastic modulus (MPa)	200	100	50	23.4	6	6
	Poisson's ratio	0.32				0.35	
	Cohesion (MPa)	0.6			0.57	0.15	0.15
	Inter friction angle (°)	26				24	
Clay in permafrost layer	Density (kg/m ³)	1834					
	Elastic modulus (MPa)	500	300	100	70	3	3
	Poisson's ratio	0.15				0.2	0.2
	Cohesion (Mpa)	1.3				0.1	0.2
	Inter friction angle (°)	20				18	

표3.2 점토 토양 물성

3.2 해석방법 및 경계조건

배관 모델과 토양 모델을 합쳐서 해석을 진행하였다. 해석 과정은 처음에 중력을 부가하고 다음으로 토압을 부가하였다. 마지막으로 내압을 부가하여 해석을 진행하였다. ABAQUS에 중력(gravity)을 부가하는 기능을 사용하여 $9.8m/s^2$ 의 중력을 모델 전체에 부가하였으며 표3.2에 있는 점토의 물성을 적용하여 토압을 부가하였다.

토양물성을 적용할 때 그림3.3에 보이는 것 과 같이 활동층과 영구동토층으로 나누어 토양 물성을 부가하였으며 활동층의 경우 위에 1800mm의 경우 $5^{\circ}C$ 에서의 점토물성을 주고 밑의 1200mm의 경우 $0^{\circ}C$ 에서의 물성을 적용하였다. 영구동토층의 경우 영하 $2^{\circ}C$ 에서의 영구동토층 물성값을 적용하였다. 온도별 토양의 물성이 다르기 때문에 3개의 구간으로 나누어 물성을 부여하였다.

배관의 경우 대칭면이 되는 부분에 경계조건을 X대칭을 주어 1/2모델이지만 전체가 계산되게 설정하였다. 또한 토양도 배관과 마찬가지로 경계조건을 X대칭을 사용하여 1/2만 모델링 하였다.

그리고 그림 3.4에서 볼 수 있듯이 모델의 바닥부분은 Z방향, X방향, Y방향을 모두 구속하였으며 모델의 옆부분은 X방향은 대칭을 주고 Z방향은 구속하여 장거리 배관조건에 맞게 경계조건을 주었다. 또한 모델의 바닥을 제외한 모든 부분을 Y방향(중력방향)을 자유롭게 움직일 수 있도록 경계조건을 설정하여 토양에 따라 배관이 받는 응력을 해석할 수 있도록 하였다.[15]

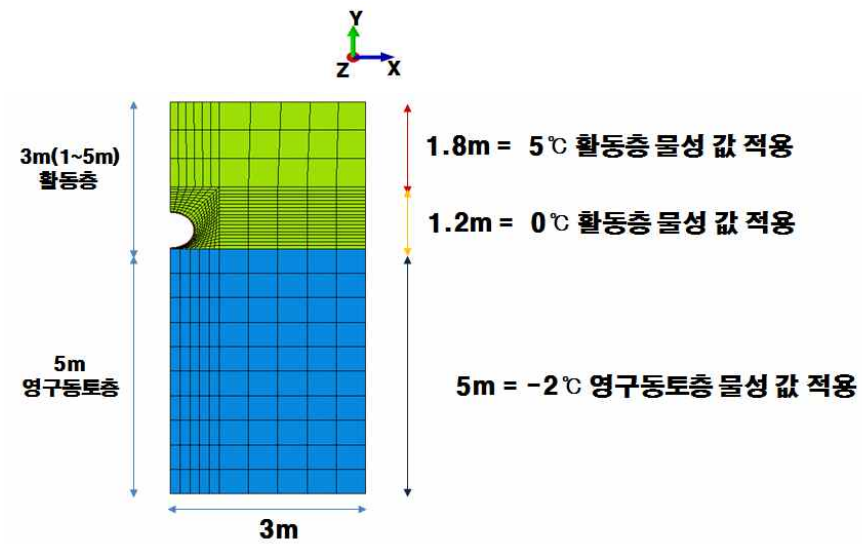


그림3.3 토양 물성 구간 적용

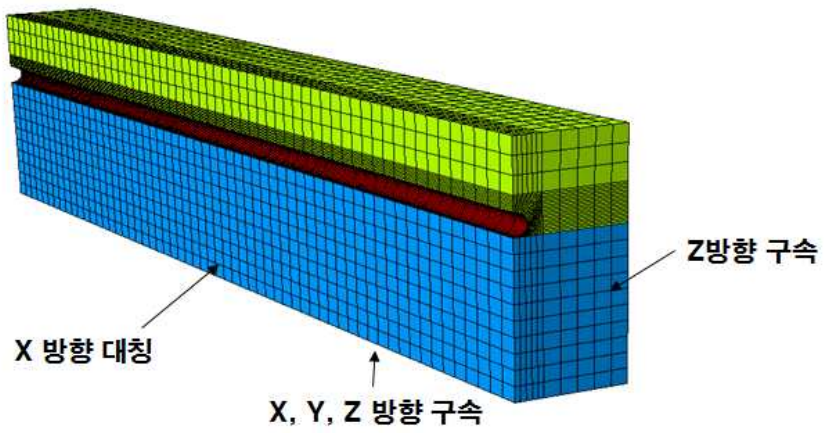


그림 3.4 토양 경계조건 설정

3.3 해석 시 가정사항

본 연구에서는 배관과 토양의 유하요소해석 모델은 ABAQUS CAE를 통하여 만들어 졌으며 밑의 3가지 가정을 하였다.

1) 배관의 용접부는 고려되지 않는다.

배관의 용접부까지 고려될 경우 너무 많은 경우의 수가 따르기 때문에 이를 무시하도록 하였다.

2) 토양의 해석에서 Mohr Coulomb 이론을 따르며 배관은 등방성이며 탄성-완전소성 성질을 가진다.

2장에서 설명한 것과 같이 Mohr Coulomb 이론을 활용하여 토양을 더 깊이 있게 해석하여 배관이 받는 응력분포를 해석하였다.

3) 배관과 토양은 완전히 붙어있으며 배관과 토양사이에는 하나의 결함도 없다.

4) 배관을 매설하는 곳은 영구동토층 바로 위의 활동층으로 고정하였다.

영구동토층에 배관을 매설하는 경우 활동층에 배관을 매설하는 것 보다 3~4배의 비용이 들기 때문에 영구동토층 보다는 활동층에 배관매설을 많이 하므로 본 연구에서도 활동층에 배관을 매설하는 것으로 가정하였다.

위의 3가지 가정은 실제 배관 및 토양의 모델과 조금 다를 수 있으나 배관의 변형 및 응력분포를 해석하는 과정에는 거의

영향을 주지 않기 때문에 충분히 믿을만한 결과를 도출 할 수 있다.

4. 해석 결과

본 연구에서는 3가지 변수를 사용하여 배관이 받는 변형과 응력분포에 대해 확인해 보았다. 첫째로 배관의 매설 깊이에 따른 영향을 알아보았고 두 번째로 해동침하 길이의 변화에 따른 영향을 알아보았다. 마지막으로 해동침하의 깊이변화에 따른 영향을 유한요소해석을 통해 확인해 보았다.

하나의 변수를 바꿔줄 때 나머지 변수들은 임의의 설정한 값으로 고정하였다. 그리고 배관이 받는 모든 응력분포는 경향성을 확인하기 위해 von Mises stress로 확인하였고 한 가지 모델에 대하여 hoop stress값을 구하여 비교해 보았다.

4.1 배관매설 깊이에 따른 영향

일반적으로 배관을 매설하는 깊이가 깊을수록 배관을 누르는 토양의 하중이 커져 배관이 받는 응력 또한 클 것으로 생각할 수 있다. 이러한 영향을 알아보기 위해 배관을 매설하는 깊이를 다르게 하여 해석을 진행하였다.

배관을 매설하는 깊이를 1000mm, 3000mm, 5000mm로 나누어 해석을 진행 하였다. 해동침하 길이는 임의로 10000mm로 고정하고 해동침하 깊이도 임의로 1000mm로 고정하였다. 그림4.1에 각각의 토양과 배관의 모델을 나타내었다. 그림4.1은 위에서부터 각각 깊이가 5000mm, 3000mm, 1000mm의 모델을 나타내었다.

해동침하가 일어났을 때 배관의 상단이 받는 응력에 대해 그림4.2에 나타내었다. 침하가 일어난 부분의 중앙에서 가장 큰 응력을 받았으며 해동침하의 양 끝부분에서 배관의 응력이 가장 적게 받는 것을 확인할 수 있다. 그리고 다시 배관의 끝으로 갈수록 배관이 받는 응력이 조금씩 커지다가 다시 일정해 지는 것을 확인하였다.

배관의 매설깊이가 1000mm에서 5000mm까지 깊어질수록 배관의 중앙에서 배관이 최대로 받는 응력이 293MPa에서 285MPa로 조금 줄어들었는데 이는 배관의 내압과 토양의 하중이 서로 상쇄되면서 줄어드는 것이라고 생각된다. 배관의 끝에서도 매설깊이가 깊어질수록 280MPa에서 277MPa로 배관이 받는 응력이 줄어드는 것을 확인하였다. 상대적으로 배관의 중앙보다는 큰 차이가 나지 않는 경향을 보였다.

그러나 그림 4.2에서 볼 수 있듯이 약 8MPa의 차이밖에 나지 않기 때문에 해동침하가 일어날 경우 배관의 매설깊이는 배관에 큰 영향을 준다고 보기 어렵다고 판단된다.

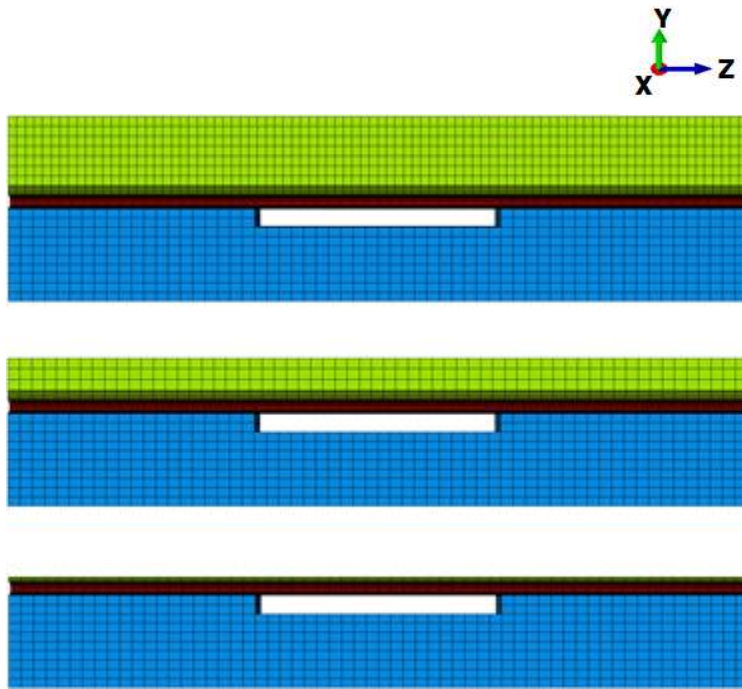


그림4.1 매설 깊이에 따른 모델

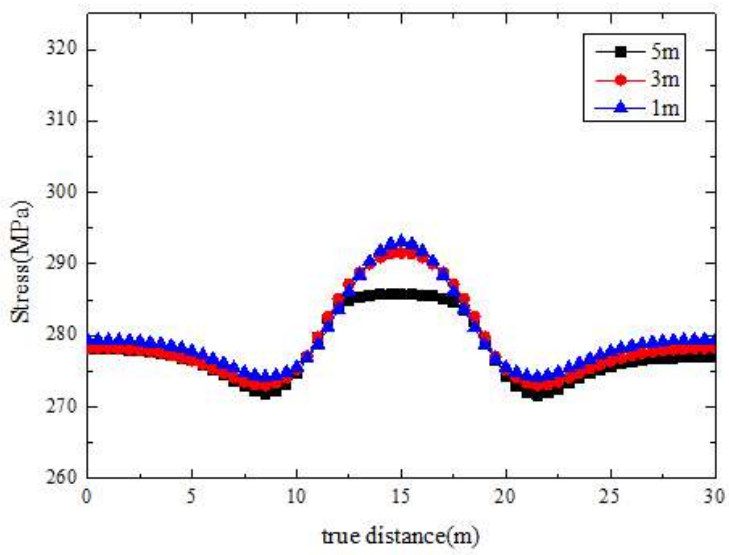


그림 4.2 매설 깊이에 따른 응력 변화

4.2 해동침하 길이에 따른 영향

침하가 일어나지 않은 모델과 침하가 일어났을 때 길이에 따른 영향을 살펴보았다. 침하길이는 총 4개로 설정하였는데 4000mm, 8000mm, 12000mm, 16000mm로 같은 간격으로 모델링 하여 해석을 진행하였으며 이때 배관의 매설깊이는 3000mm로 고정하였고 해동침하 깊이는 1000mm로 고정하여 변수에 대한 영향을 살펴보았다. 해동침하 길이가 각기 다른 모델을 그림4.3에 나타내었다. 그림4.3은 위에서부터 해동침하 길이가 4000mm, 8000mm, 12000mm, 16000mm인 모델을 나타낸다.

해동침하가 일어났을 때 배관 상단이 받는 응력을 침하길이에 따라 그림4.3에 나타내었다. 그림4.3에 나타낸 응력은 von Mises stress를 나타낸 것이다. 배관의 중앙에서 가장 큰 응력을 받았으며 침하 끝으로 갈수록 배관전체에서 응력을 가장 작게 받는 것을 알 수 있다. 또한 배관의 양끝으로 갈수록 다시 응력이 해동침하가 일어나지 않았을 때의 응력과 같아지는 것을 확인하였다.

침하가 일어나지 않았을 때부터 침하길이가 16000mm까지 길어질수록 일정하게 더 큰 응력을 받는 것으로 확인되었다. 16000mm의 침하길이에서는 최대 298MPa의 응력을 받는 것으로 나타났다. 이는 침하길이가 길어질수록 배관이 지탱할 수 있는 힘이 약해지고 위의 토압의 영향을 많이 받아서 그런 것으로 예상된다.

배관의 상단 뿐 아니라 하단의 응력분포도 확인하였는데 그림 4.4에 나타내었다. 배관 하단의 경우에는 해동침하 길이의 영향에

따라 다른 응력분포를 보였다. 해동침하의 양 끝에서 가장 큰 응력이 작용하였고 배관의 중앙에서 배관상단과 달리 더 작은 응력이 작용하였다. 위 결과에서 알 수 있듯이 해동침하의 길이는 배관이 받는 응력에 큰 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 길이가 길어질수록 더 큰 응력이 작용한다는 결과가 나왔다.

해동침하 길이에 따라 응력뿐 아니라 배관이 어떻게 변형되는지 배관의 변위를 파악해 보았다. 그림4.5를 보면 확인할 수 있듯이 해동침하의 길이가 길어질수록 배관의 중앙이 처지는 현상이 발생하였다. 해동침하의 길이가 8000mm까지는 큰 변형을 보이지 않았지만 16000mm일때는 약 50mm가 밑으로 처지는 변형을 보였다. 이는 배관 상단을 해석하였다.

von Mises stress와 hoop stress의 차이를 알아보기 위해 해동침하길이 16000mm, 해동침하깊이 1000mm, 매설깊이 3000mm모델의 hoop stress값을 구하였다. hoop stress를 구하는 식을 식4.1에 나타내었다.

$$\sigma_c = \left(\frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \right) - \left[\frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \right] \text{-----} (4.1)$$

위 식에서 σ_c 는 hoop stress이며 P_i 와 P_o 는 각각 배관내부에서 작용하는 압력과 배관 외부에서 작용하는 압력이다. 또한 r_i 와 r_o 는 배관의 내경과 외경을 나타낸다. 마지막으로 r 의 경우 hoop stress를 계산하고자 하는 위치이다.

식 4.1을 사용하여 hoop stress값을 구한 결과 배관상단에서 545MPa의 최대응력이 작용하였다. 이는 von Mises stress에 비해 높은 응력이며 국내배관의 X70사양을 사용하면 배관이 위험할 수 있는 수치이다. 이렇듯 모델링을 통해 전체에 작용하는 hoop-stress를 확인할 경우 배관의 위험성을 더 크게 인지할 수 있다.

김형식[2], 이억섭[3]의 매설 천연가스배관의 지반침하에 의한 응력을 분석하는 Winkler foundation관련 식(2.4), 식(2.5), 식(2.6)에 위의 조건을 대입하여 계산을 하면 hoop stress의 값은 330.16MPa의 값이 나오는 것을 확인할 수 있다. 본 연구의 모델과 비교하였을 때 큰 차이가 나는데 이를 통해 국내의 지반침하에 의한 배관이 받는 응력을 구하는 식은 온도차이가 큰 극한지에서는 적용시키기 어렵다는 것을 확인하였다.

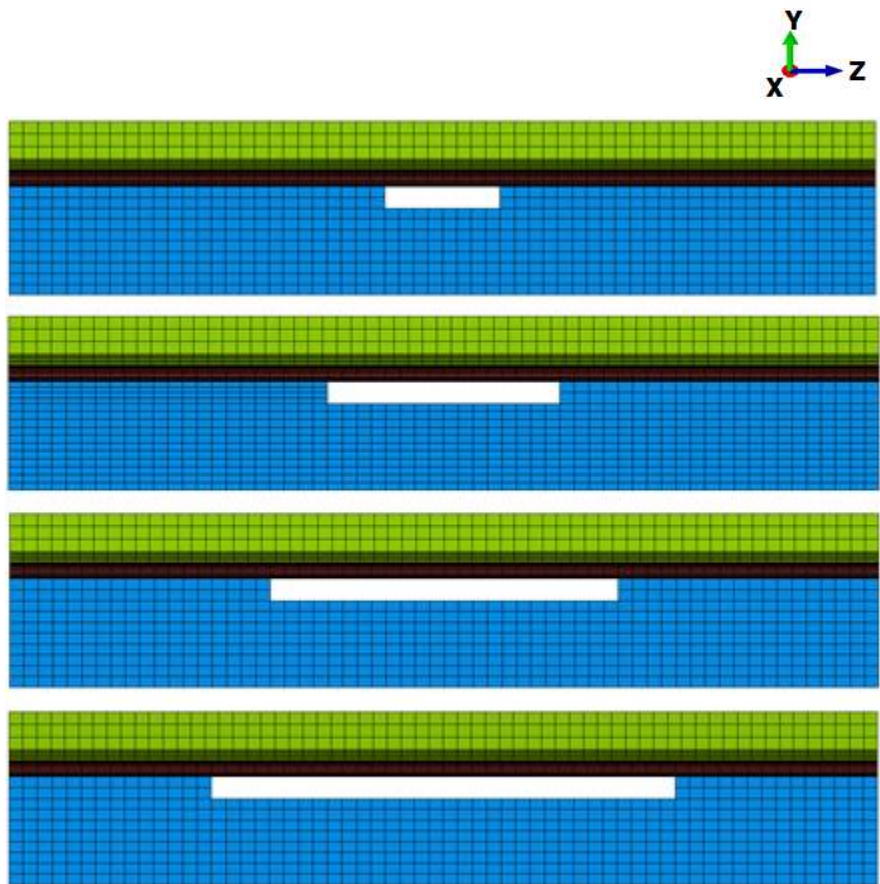


그림 4.3 해동침하 길이에 따른 모델

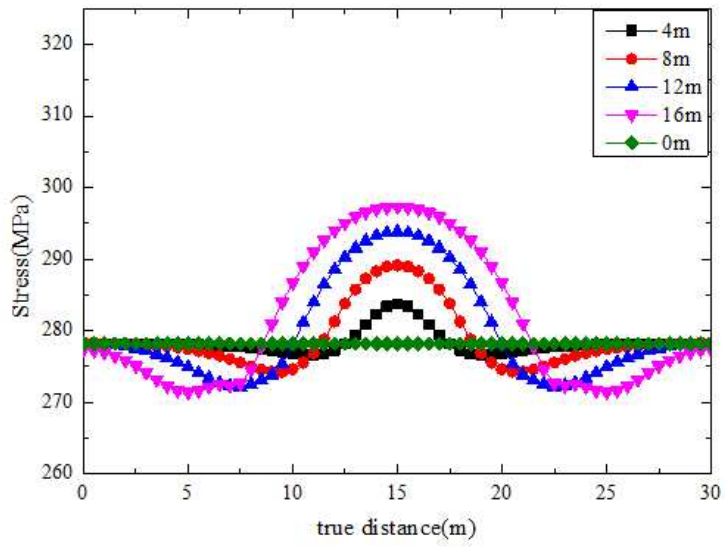


그림 4.4 해동침하 길이에 따른 배관 상단의 응력 변화

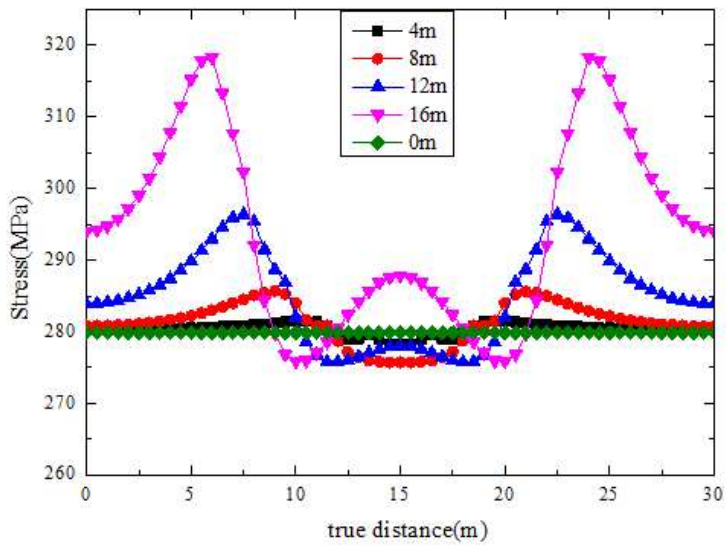


그림 4.5 해동침하 길이에 따른 배관 하단의 응력 변화

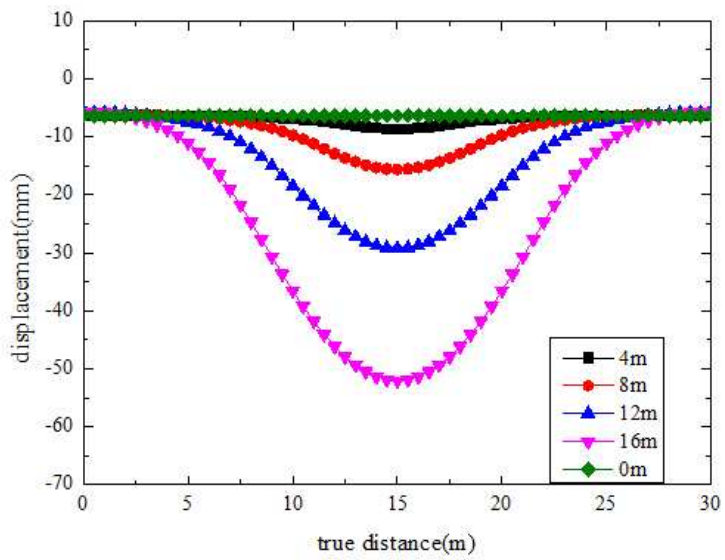


그림 4.6 해동침하 길이에 따른 배관 상단의 변위 변화

4.3 해동침하 깊이에 따른 영향

해동침하깊이에 따른 영향을 알아보기 위해 해동침하의 깊이를 1000mm로 고정하고 배관매설깊이를 3000mm로 고정하고 해동침하깊이를 1000mm부터 5000mm까지 1000mm간격으로 총 5가지의 모델을 만들어 해석을 진행하였다.

해동침하 깊이변화에 따른 배관의 응력분포를 그림4.6에 나타내었다. von Mises stress를 나타낸 그래프이다. 침하깊이에 따라 약간의 차이는 있었지만 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 범위를 좁혀 확대한 그래프를 그림4.7에 나타내었다. 확대해서 봐도 침하깊이가 깊을수록 배관중앙에서 조금더 큰 응력을 받았지만 약 2MPa정도의 차이밖에 나지 않아 변화가 없다고 해석하여도 무방하다.

침하깊이에 따른 배관의 변형 또한 큰 차이가 없는 것으로 나타났다는데 이를 그림4.8에 나타내었다. 배관의 중앙에서 배관이 처지는 현상이 일어났지만 깊이의 변화에 따라서 거의 같은 위치를 보였다. 이를 확대하여 보여준 그래프를 그림4.9에 나타내었다. 이는 배관 상단을 해석한 것이다.

위에서 확인한 것 과 같이 해동침하의 깊이의 변화에 의해서는 배관이 받는 응력 및 변형이 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 침하깊이는 배관에 큰 영향을 주지 않는 것으로 생각할 수 있다.

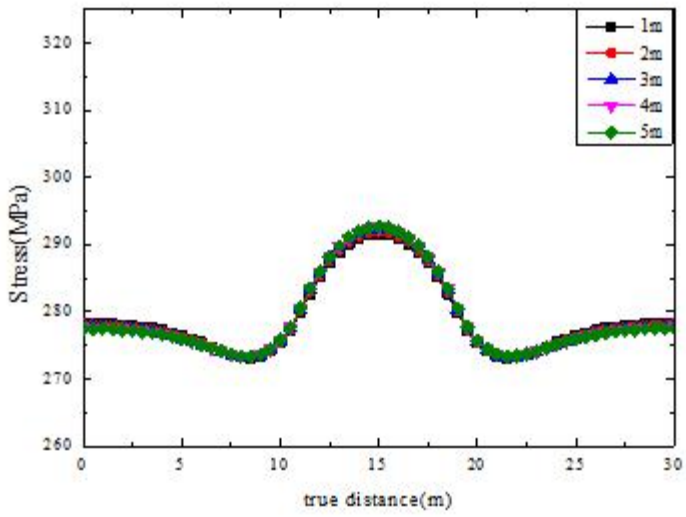


그림 4.7 해동침하 깊이에 따른 배관 상단의 응력 변화

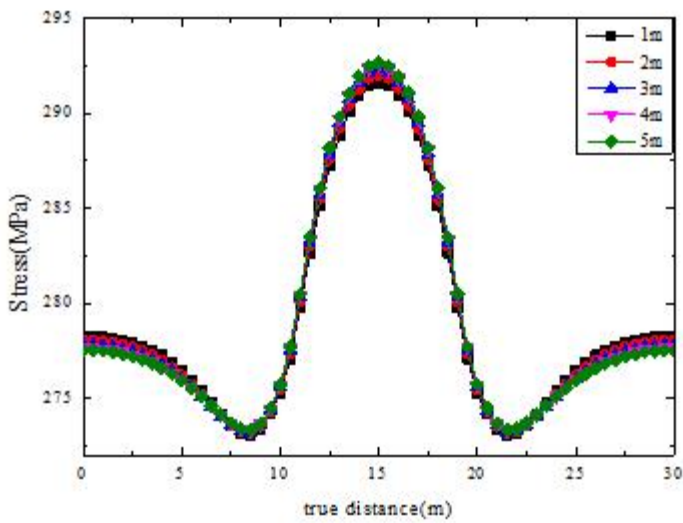


그림 4.8 해동침하 깊이에 따른 배관 상단의 응력 변화(확대)

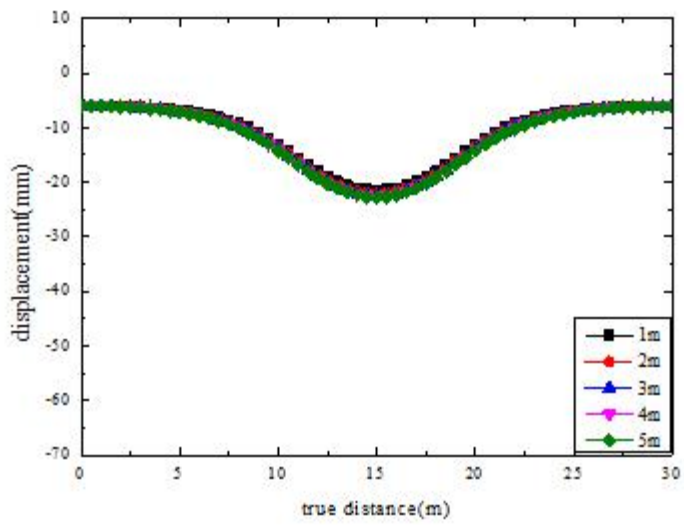


그림 4.9 해동침하 깊이에 따른 배관의 변위 변화

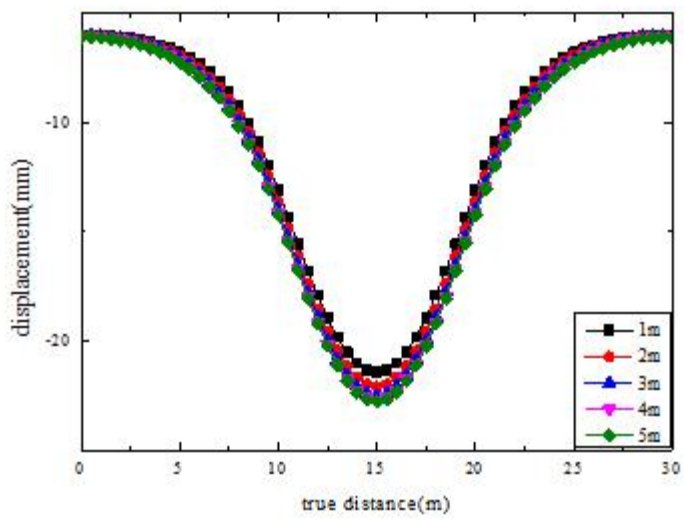


그림 4.10 해동침하 깊이에 따른 배관의 변위 변화(확대)

5. 결론

본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 극한지 외부환경의 변화에 따라 매설된 배관의 변형과 응력분포가 어떻게 달라지는지 알아보았고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 배관 매설깊이의 영향

해동침하가 일어났다는 가정 하에 배관의 매설 깊이가 깊어질수록 배관이 받는 응력은 작게 나타났다. 큰 차이는 없었지만 매설깊이가 1000mm에서 5000mm로 깊어짐에 따라 최대 약 7MPa의 차이가 나는 것을 확인하였다. 따라서 배관매설깊이는 극한지에서 배관을 매설할 때 고려되어야 된다.

- 해동침하 길이의 영향

해동침하의 길이가 길어질수록 배관이 받는 응력은 증가하였다. 다른 변수에 비해 해동침하의 길이가 배관에 가장 큰 영향을 주었다. 30000mm 길이의 배관 및 토양모델에서 침하길이가 최대 16000mm 일 때 침하가 일어나지 않았을 때 보다 약 40MPa이 높은 응력이 작용하는 것을 보였다. 해동침하의 길이가 길어질수록 배관의 변형 또한 커졌는데 배관의 재료로 강도가 높을 뿐 아니라

연성도 고려되는 재료를 사용해야 할 것이다. 이렇듯 해동침하의 깊이에 따라 배관이 받는 응력이 영향을 크게 받으므로 침하깊이를 예상하여 그에 맞는 배관의 설계가 필요하다. 또한 국내에서 쓰이는 X70 배관의 경우 16000mm의 침하깊이로 모델링 하였을 때 배관의 UTS 보다 더 큰 응력(hoop stress)을 받는 것을 확인하였다. 이처럼 침하깊이가 배관에 주는 영향이 크기 때문에 모델을 통해 배관이 받는 응력을 예상하여 배관물성을 결정하고 설계를 하는 것이 필요하다.

- 해동침하 깊이의 영향

해동침하 깊이를 1000mm에서 5000mm까지 변화시키며 해석을 진행하였지만 배관이 받는 응력 및 변위는 차이가 없었다. 따라서 해동침하의 깊이는 배관에 영향을 주지 않았다. 해동침하의 발생 유무는 배관에 큰 영향을 미치지만 침하가 일어났을 때 얼마나 깊게 침하가 발생하는지는 배관에 영향을 미치지 못하기 때문에 설계 시에도 고려하지 않아도 될 사항이다.

참고 문헌

- [1] Michael Bradshaw : Eurasian Geography and Economics, (2010) 51, No.3, pp.330-359
- [2] H.S. Kim : 한국산업안전학회지 13권 2호 (1998)
- [3] Lee Ouk Sub : 한국정밀공학회지 21권 1호 (2004)
- [4] Vesic, A.S., Jou. Eng. Mech. Division, ASCE, Vol.87, EM2, pp.35-53 (1961)
- [5] Hetenyi. M., : Beams on Elastic Foundation, University of Michigan Press, An Arbor (1946)
- [6] Bang I.W. : Development of the Computer program Calculating the Stress Induced by Various Loads for Buried Natural Gas Pipeline, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol.02 (1998)
- [7] Arnold Verruijt : Soil Mechanics (2004)
- [8] AN AMERICA NATIONAL STANDARD : ASME B31.8 (2010)
- [9] 김우식 : 에너지배관 기술개발 동향, Journal of the KSME
- [10] Basel Abdalla, J P Kenny : ARCTIC ENGINEERING
- [11] K.Bathe : Finite Element Procedures, Prentice Hall (1996)
- [12] B.Eric, F.Graham : Finite Elements An Introduction, Vol 1, Prentice Hall (1982)
- [13] Zhi Wen, Yu Sheng : Cold Regions Science and

Technology 64 (2010) 248-255

[14] Yaping Wu, Yu Sheng : Cold Regions Science and
Technology 64 (2010) 256-261

[15] Hyuk Lee : Finite element analysis of buried
pipeline (2010)

Abstract

Recently fuels terrestrial securing energy resources were relatively depleted, the location to ensure it is the land, it is moved to the extreme locations not previously interested, frigid competition between nations for securing resources of the land is fierce.

In order to anticipate the development of energy resources in the severe cold place, development of construction technology of cold land destination is different from the environment in the country is essential. The temperature conditions in the cold land of 20 degree above zero from 20 degrees below zero, since it is strongly affected by the new surroundings, such as a thaw subsidence that are not found in Korea, the development of a new model is required to conform.

In this study, define the shape of the external environment in the cold land thereof, through finite element analysis and stress-based change in the transmission pipeline of the energy corresponding to the external load characteristic and to predict the behavior of the pipeline was analyzed. This study use ABAQUS.

Keywords

Finite element method, arctic, stress-based, pipeline, thaw settlement, Mohr Coulomb