



## 배관 매설깊이가 극한지 융해침하 시 배관응력 및 변위에 주는 영향

김경일\* · 염규정\* · 오규환\* · †김우식\*\*

\*서울대학교 재료공학부, \*\*한국가스공사 연구개발원  
(2016년 5월 23일 접수, 2016년 10월 14일 수정, 2016년 10월 15일 채택)

### Effect of Depth on Pipeline Stress and Displacement in Cold Regions with Thaw settlement

Kyung Il Kim\* · Kyu Jung Yeom\* · Kyu Hwan Oh\* and †Woo Sik Kim\*\*

\*Dept. of Material Science and Engineering, Seoul 151-742, Korea

\*\*Korea Gas Corporation, KOGAS Research Institute, Gyeonggi-do 426-790, Korea

(Received May 23, 2016; Revised October 14, 2016; Accepted October 15, 2016)

#### 요약

산업의 발전을 위해 자원개발이 필수적인 현시대에 육상자원의 고갈로 인해 극한지에 관심이 몰리고 있다. 그러나 극한지 자원개발을 위해서는 극한지의 환경을 이해하고 이에 맞는 건설기술 확보가 우선되어야 한다. 극한지에서 자주 나타나는 외부환경 중 특히 융해침하하는 자원을 이송하는데 필수적인 배관에 치명적인 영향을 준다. 따라서 배관이 융해침하에 의해 어떤 영향을 받는지 예측하고 분석하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 융해침하 시 배관의 매설깊이에 따른 영향을 분석하기 위해 3차원 모델을 개발하여 유한요소해석을 진행하였다. 이러한 극한지의 환경과 배관해석을 참고하여 Elasto-plastic이 고려된 배관이 받는 응력 및 변위를 분석하고 경향성을 알아보았다.

**Abstract** - Resource development is needed in order to develop the industry. However, because resources are running out, there is a growing interest in the arctic regions. If you want to develop resources in cold regions, it is necessary to understand the environment there and it should be a priority to secure proper technology for construction. In particular, thaw settlement, which frequently occur in Arctic regions, have a fatal effect on essential pipeline needed to transport resources. Therefore, it is important to analyze how piping will be impacted by thaw settlement. In this study, we developed 3-D FEM model in order to analyze the influence of the buried depth of the pipe at the time of thaw settlement. We analyzed a displaced pipe which is subjected to stress and considered Elasto-plastic, using the finite element analysis according to these Arctic environments.

**Key words** : Finite Element Method, Thaw Settlement, Pipeline, Buried depth, Cold regions

#### 1. 서론

대한민국은 4계절이 존재하는 기후조건을 가지고 있어 영구동토지역이 존재하지 않기 때문에 동토 지역을 대상으로 하는 건설기술에 대한 수요가 없었

다. 그러나 최근 국내 업체들의 해외 공사 진출이 증가하고 있으며, 특히 에너지자원 확보를 위한 시베리아 및 극동지역 에너지 라인 개발 사업에 대한 관심증가로 극한지에 적합한 건설 기술의 수요가 증가하는 추세이다. 이러한 가운데 우리나라 뿐 아니라 국제적으로 기간산업의 화석연료의존도가 높아 화석연료를 확보하려 하고 있다. 그러나 비교적 에너지 및 자원 확보가 용이했던 육상의 화석연료가 고

†Corresponding author: wskim@kogas.or.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

갈됨에 따라 그 동안 크게 생각지 않았던 극한지로 관심이 이동하고 있다. 지속적이고 안정적인 에너지 자원의 확보는 국내 산업의 안정적 성장에 필수 요소이다. 그러므로 극한지 자원개발과 관련하여 기술력을 확보한다면 자원 확보에서 우위를 가질 수 있다[1-4].

강대국들은 이미 오래전부터 극한지에 대한 관심을 가지며 건설인력이 대규모 이동하고 있다. 그러나 이러한 기술은 독자적인 것이기 때문에 외부로 공개를 꺼리고 있는 것이 현실이다. 따라서 국내의 독자적인 기술을 개발해야만 향후 극한지역의 자원 개발에 동참할 수 있으며 동토지역 에너지 자원을 선점할 수 있을 것이다.

석유, 가스를 이송하는 가장 저렴하고 효율적인 방법은 배관을 통한 것이다. 극한지에서도 마찬가지로 배관을 통한 자원이송이 가장 효율적이다. 그런데 극한지의 경우 국내와 상이한 다양한 자연현상이 일어나기 때문에 이를 고려해야한다. 배관의 건설뿐 아니라 유지관리에도 건설비용에 준하는 막대한 비용이 드는데 특히 배관이 큰 손상을 입을 경우 그 손실은 더 많은 노력과 비용을 요구하기 때문에 이를 예방하기 위해 관련 연구가 절실하다.

국내에서는 지반침하에 대해 선행된 연구가 많은 편이다. 최고니는 2차원 탄소성 유한요소해석을 통하여 지반침하의 변화경향을 분석하였고 김형식은 매설 천연가스배관의 지반침하에 대한 응력을 분석하였다[5,6]. 그러나 극한지에 대한 이해는 부족하여 극한지 환경과 온도에 대한 점을 고려하지 못하였다. 본 연구에서는 선행된 연구를 바탕으로 Elasto-plastic을 고려한 새로운 3차원 유한요소해석모델을 활용하여 극한지에서 융해침하가 일어날 때 배관 매설 깊이에 따라 배관이 어떤 영향을 받는지에 대한 분석을 진행하였다.

## II. 유한요소해석 모델 및 물성

### 2.1 극한지 토양 환경 정의

극한지의 토양환경은 일반적인 환경과 달리 크게 영구동토층(Permafrost)과 활동층(Active layer)으로 구분할 수 있다. 영구동토란 0°C이하로 2년이나 그 이상동안 유지된 토양을 말하며 지구상의 물 중 0.022%를 차지하고 있다. 북반구로만 따지면 노출된 토양의 24%에 존재한다. 활동층은 영구동토층의 표면에서 여름에는 녹고 겨울에는 어는 것을 반복하는 층을 말하며 활동층의 두께는 위도에 따라 다르나, 대체로 1.5~3m이며 활동층이 융해하면 그 밑의 영구동토층이 토양수의 배수를 막으므로 수분으로 포화

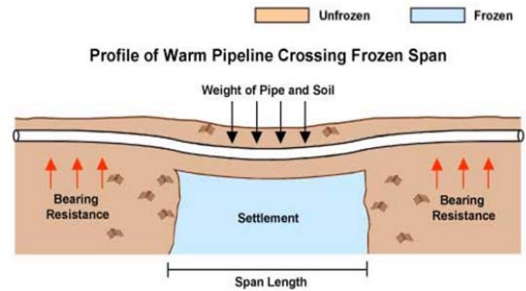


Fig. 1. Schematic illustration of thaw settlement[9].

된다[7,8].

이러한 지형적 특성 때문에 극한지에서는 융해침하(Thaw settlement)라는 현상이 일어난다. 융해침하란 흙속에 포함된 수분이 온도차에 의해 얼었다 풀리면서 녹아 지반이 약해지며 무너져 내리는 현상을 의미한다. 융해침하의 모식도를 Fig. 1에 간단히 나타내었다. 이러한 현상은 활동층에서 주로 나타나며 영구동토층에서도 배관의 온도에 영향을 받아 발생할 수 있다. 이는 배관뿐 아니라 극한지의 구조물에는 막대한 타격을 줄 수 있다.

이러한 현상이 발생하는 것을 가정하여 배관이 받는 응력 및 변위를 분석하고 사전에 예방하는 것이 필요하기 때문에 본 연구에서는 활동층의 배관 및 지반을 모사하여 배관 매설깊이에 따라 다른 모델을 만들어 해석을 진행하였다.

### 2.2 배관 모델 및 물성 적용

실제 배관의 사이즈를 고려하여 배관의 길이는 30m로 설정하였으며 실제 배관규격인 API 5L X70 배관으로 가정하여 직경 762mm, 배관두께는 20mm로 모델링 하였다. 해석한 배관의 모델은 경계조건 및 응력을 고려하기 위해 1/2스케일로 Fig. 2와 같이 모델링하였다. 배관에 걸리는 응력 및 변위를 자세히 확인하기 위해 배관의 길이방향인 X방향으로 다른 방향에 비해 많은 0.5m당 하나의 메쉬를 할당하였다.

배관의 물성은 한국가스공사 연구개발원에서 수행한 실제 실험을 통해 얻은 공칭응력-변형률 곡선(Engineering stress-strain curve)을 진응력-변형률 곡선(True stress-strain curve)으로 변환하여 적용하였는데 이 그래프를 Fig.3에 나타내었다. 이는 배관의 항복응력 뿐 아니라 소성변형까지 고려하여 배관의 파괴를 실제와 유사하게 모사할 수 있게 설정하였다[10]. 배관의 물성은 국내에서도 쓰이는 X70배관의 물성을 그대로 사용하였으며 밀도, 포아송 비,

Table 1. Material properties of API 5L X70 pipe

Property	Value
Density(kg/m <sup>3</sup> )	7850
Poisson's ratio	0.3
Elastic modulus (GPa)	207
Yield Strength (MPa)	530
Ultimate Tensile Strength (MPa)	626

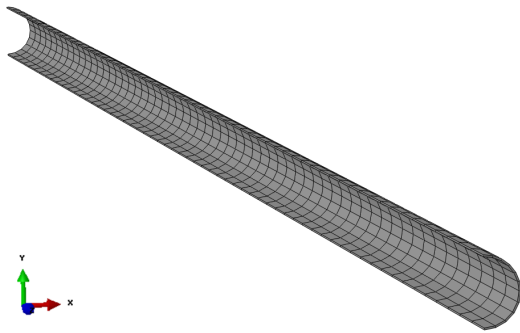


Fig. 2. Pipe model with mesh.

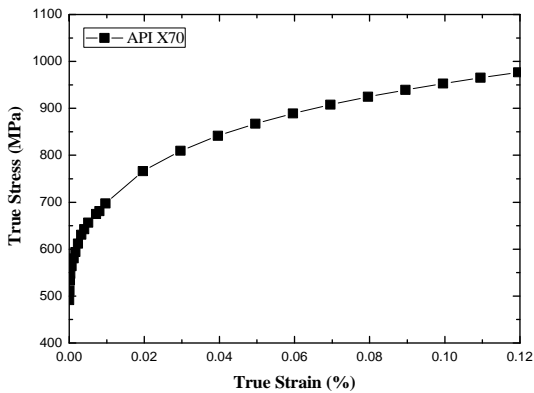


Fig. 3. Stress-strain curve of API 5L X70 pipe.

탄성계수 등을 활용하였다. 정리된 물성 값을 Table 1에 표기 하였다.

### 2.3 극한지의 토양모델 및 물성 적용

토양의 모델은 배관과 마찬가지로 길이는 30m로 설정하여 장거리 배관에 맞게 설정하였고 폭은 5m 높이는 8m로 설정하였다. 이때 활동층은 3m, 영구

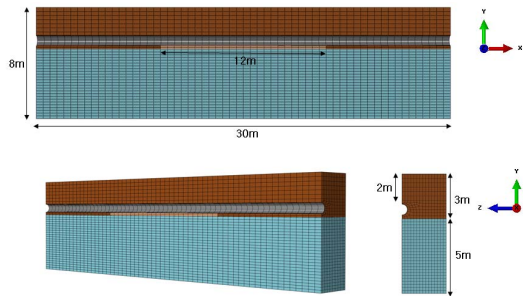


Fig. 4. Soil model with mesh.

동토층은 5m로 설정하여 실제 극한지의 토양환경과 유사하게 모델을 설정하였다. Fig. 4에 매설깊이가 2m인 모델을 대표로 나타내었다.

토양과 배관이 결합된 해석을 진행 할 때 온도에 대한 영향 분석이 필요하다 이를 위해 Elasto-plastic analysis를 수행하여 지반깊이에 따라 온도가 다른 토양을 고려하였다. 모델은 배관과 마찬가지로 응력 분포 및 기하학적 형상 고려를 위해서 1/2 스케일로 모델링하였으며, C3D8(8-node linear brick element)의 요소를 사용하였다.

토양의 물성은 Table 2에 나타난 것처럼 동토지역의 토양 중 Clay를 해석에 사용하였으며 온도에 따라 다르게 나타나는 활동층과 영구동토층의 물성을 사용하였다. 해석에 적용시킨 물성은 밀도(Density), 탄성계수(Elastic modulus), 포아송 비(Poisson's ratio)와 토양의 해석을 자세히 고려하기 위해 Mohr-coulomb식에 활용되는 점착력(Cohesion)과 마찰각(Friction angle)도 고려되었다[10]. 전체 모델은 상용프로그램인 ABAQUS CAE 6.10를 사용하여 모델링하였으며, ABAQUS/Standard를 이용하여 유한요소해석을 진행하였다[11].

### 2.4 극한지 토양 온도 및 해석 적용 조건

일반적인 극한지에서 상온의 온도는 겨울철에는 평균적으로 영하 30℃까지 내려가며 여름철에는 영상 10℃ 정도로 큰 차이를 보인다. 그러나 지반은 상온에 비해 큰 온도 차이를 보이지 않는다. Fig. 5에 보여 지는 것처럼 깊이에 따라 다르지만 지반의 1m에서 3m 깊이까지의 활동층 온도는 1년 중 최고 5℃에서 최저 -10℃ 정도의 차이밖에 보이지 않는다. 따라서 본 연구에서는 온도가 상승했을 때 일어있던 지반이 약해지는 점에 초점을 맞춰 연평균 온도가 높을 때의 지반의 깊이별 구간을 나누어 각 구간의 온도에 맞는 토양물성을 부가하여 해석을 진행하였다. 모델에 적용한 물성 값을 Fig. 6에 자세히 나타내었다.

Table 2. Material properties of clay[12]

Type of soil	Property	-20°C	-10°C	-5°C	-2°C	0°C	20°C
Clay in active layer	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1920	1920	1920	1920	1920	1920
	Elastic modulus (MPa)	200	100	50	23.4	6	6
	Poisson's ratio	0.32	0.32	0.32	0.32	0.35	0.35
	Cohesion (MPa)	0.6	0.6	0.6	0.57	0.15	0.15
	Angle of internal friction (degree)	26	26	26	26	24	24
Clay in permafrost	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1834	1834	1834	1834	1834	1834
	Elastic modulus (MPa)	500	300	100	70	3	3
	Poisson's ratio	0.15	0.15	0.15	0.15	0.2	0.2
	Cohesion (MPa)	1.3	1.3	1.3	1.3	0.1	0.2
	Angle of internal friction (degree)	20	20	20	20	18	18

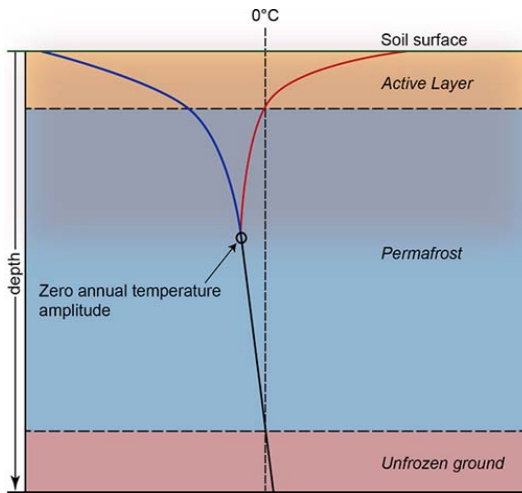


Fig. 5. Temperature change of arctic soil [13].

### 2.5 침하량 물성 및 해석 조건

이전에 연구된 해석[14]은 침하부위를 비워둬 실제와는 상이한 모델을 사용하였었다. 이 경우 영구동토층과 활동층과 침하부위사이의 연결조건이 다르게 나타나 해석에 어려움을 주었다. 그러나 이를 보완하고자 본 연구에서는 융해침하구간을 별개로 모델링하여 다른 연결된 지반과의 접촉조건을 부드럽게 하여 해석을 더 사실적으로 구현하였다. 침하구간의 경우 실제로 침하되지 않은 구간에 비해 연약하기 때문에 임의로 탄성계수(elastic modulus)와

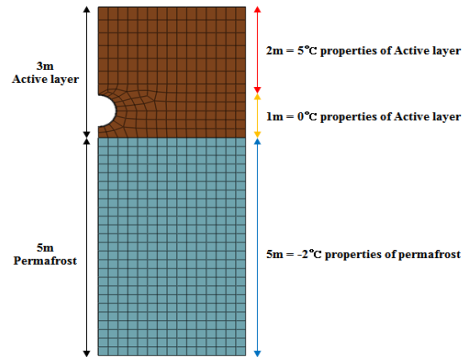


Fig. 6. Difference of Mechanical properties in soil model.

밀도를 주변 토양 물성의 1/10로 설정하였다.

### 2.6 하중부가 및 경계 조건

본 유한요소해석모델에서는 재료의 물성을 부가할 뿐 아니라 실제와 같은 조건으로 해석을 진행하기 위해 중력을 부가하였다. 중력은 모델전체에 Y방향(중력방향)으로  $9.8\text{N/m}^2$ 을 부가하였다. 또한 앞에서 설명한 것처럼 배관의 내압도 부가하였다. 내압은 일반적으로 미국과 러시아에서 사용하는 장거리 배관의 내압기준을 참고하여 장거리 배관에 맞게 17MPa의 내압을 부가하였다[15].

장거리 배관의 조건에 맞게 경계조건을 부여하기 위해 배관과 토양의 경계조건은 Fig. 7과 같이 적용

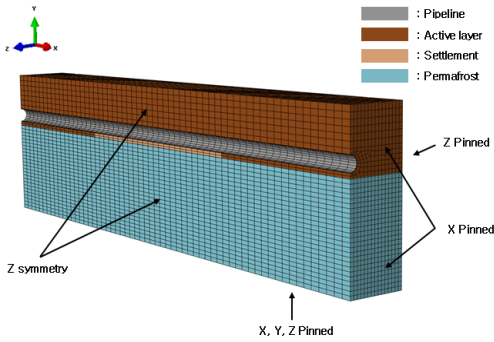


Fig. 7. Boundary condition of FEM model.

하였다. 모델의 바닥부분은 Z방향, X방향, Y방향을 모두 구속하였으며 모델의 옆 부분 중 배관부분은 1/2스케일이기 때문에 X방향 대칭조건을 주고 반대쪽은 X방향으로 구속을 하였다. 그리고 Z방향의 경우 X, Y방향으로는 자유롭게 하였으며 Z방향으로 구속하였다. 이는 융해침하의 영향을 분석하기 위해 실제와 비슷하게 모델의 끝부분은 1년 내내 완전히 얼어 고정되어있는 영구동토층을 가정하여 배관 또한 움직이지 않고 고정되어있는 것으로 모사하여 경계조건을 설정하였다. 또한 모델의 바닥을 제외한 모든 부분을 Y방향(중력방향)을 자유롭게 움직일 수 있도록 경계조건을 설정하여 동상응기에 따라 배관과 토양이 받는 응력 및 변위를 해석할 수 있도록 하였다.

### III. 유한요소해석 결과

극한지의 매설배관이 있는 환경에 배관매설 깊이에 따른 융해침하 현상을 모델링하여 나온 유한요소해석결과를 배관이 받게 되는 응력분포에 대한 해석과 배관 및 토양의 변위변화로 크게 두 가지로 분류하였다. 배관 응력분포의 경우 경향성을 확인하기 위해 von Mises stress를 확인하였다. 이를 통해 임의의 상황에서 배관이 매설되었을 때 융해침하가 일어났을 때 안전한지 위험한지 여부를 알 수 있다. 해석결과는 다음과 같다.

#### 3.1 융해침하 시 매설깊이에 따른 배관 응력 해석

융해침하 시 매설깊이에 따른 배관의 상단과 하단이 받는 응력을 배관 위치별로 분석하였다. 먼저 배관의 상단이 받는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 매설깊이가 깊어질수록 전체적으로 응력이 더 크게 작용하는 것을 확인할 수 있다. 이는 위에서 누르는 토압의 양이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 배관

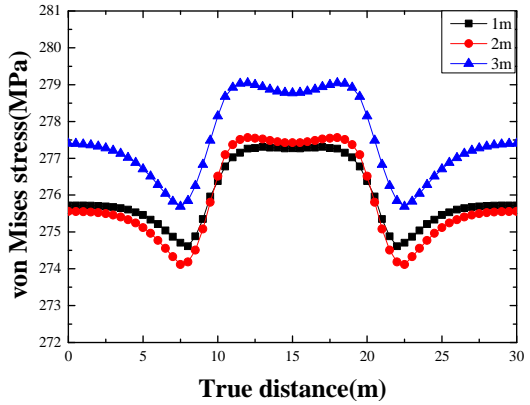


Fig. 8. Stress distribution of upper pipe.

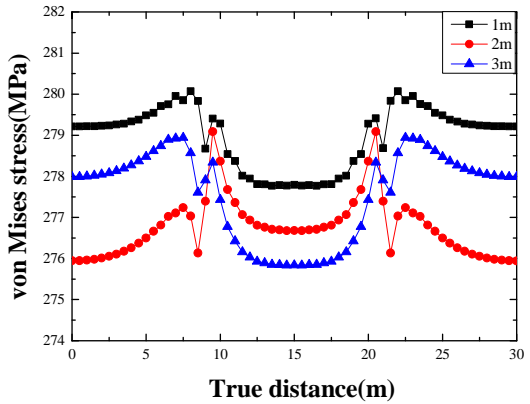


Fig. 9. Stress distribution of lower pipe.

의 위치별 응력은 침하의 중앙에서 크게 나타나는 편이지만 중앙에서 조금 벗어난 곳에서 더 큰 응력을 받는 것을 확인할 수 있었다. 2차원으로 해석을 진행할 경우 이러한 영향을 확인하기 힘들지만 3차원으로 모델링하여 위치별 배관응력을 확인할 수 있었다. 최대 응력 값에서 조금 더 바깥쪽으로 갈수록 응력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

또한 배관상단 뿐 아니라 하단에 대한 응력해석도 진행하였다. 배관 하단의 경우 Fig. 9과 같이 상단과 다른 형태를 보였다. 배관의 하단에서는 매설 깊이가 1m일 때 가장 높은 응력을 나타냈다. 침하의 중앙에서 응력을 적게 받았으며 침하의 끝으로 갈수록 최대응력을 받았다. 매설깊이가 2, 3m인 경우 오히려 1m보다 적은 응력을 받았는데 이는 매설깊이가 깊을 때 활동층에 비해 단단한 영구동토층이 배

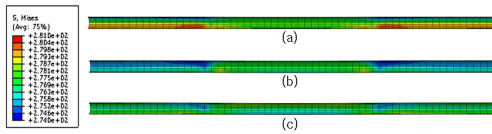


Fig. 10. Stress distribution of pipe model of buried depth (a)1m (b)2m (c)3m

관을 받치는 힘이 작용한 것으로 예상된다. 또한 여기서 주목할 점은 배관이 고정되어 있다고 가정한 배관 양 끝단의 응력과 배관 중앙부위의 최대하중을 받는 응력의 차이이다. 매설깊이가 1m인 경우 그 차이가 겨우 1MPa정도로 크지 않았으나 2, 3m인 경우 약 3MPa정도의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 배관변위 해석에서 다시 설명되어진다.

배관의 상단과 하단의 응력을 비교하였을 때 같은 침하깊이이면 하단에서 상단보다 더 큰 응력을 받음을 알 수 있다. 이러한 영향을 잘 고려하여 배관을 매설한다면 융해침하에 의한 영향을 최소화시킬 수 있을 것으로 생각된다. 위에서 분석한 모든 응력은 경향성을 보기 위한 von Mises stress로 나타낸 값이다. 배관매설 깊이에 따른 배관전체의 응력분포를 보기 쉽게 Fig. 10에 나타내었다.

### 3.2 융해침하 시 매설깊이에 따른 배관 변위 해석

매설깊이에 따른 융해침하 시 배관의 변위를 Fig. 11에 나타내었다. 매설깊이가 3m일 때 융해침하가 일어나는 지점의 중앙인 15m부분에서 배관의 변위가 최대로 나타났으며 약 3.5mm하강하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 매설깊이가 1m인 경우에는 배관의 변위는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 앞의 배관 응력 해석에서 언급했듯이 배관의 위치별 응력의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 배관의 위치에 따라 응력이 차이가 커지면 그만큼 위치별 응력 상태가 달라 배관의 변형도 크게 나타나는 것으로 판단된다.

30m길이에서 약 3.5mm는 지극히 작은 값일지 모르지만 본 모델에서는 융해침하깊이를 편의상 0.5m로 설정하였지만 침하량이 커질수록 더 큰 영향을 받게 되기 때문에 잘 고려해야 한다. 또한 극한지의 지반은 매년 얼고 녹는 것을 반복하기 때문에 배관이 변형된 상태에서 계속하여 중첩되어 변위변화를 가져오므로 시간이 지날수록 배관에 큰 손상을 입힐 수 있다.

위 결과들로 미루어 보았을 때 극한지에서는 배관의 매설깊이에 따라 배관이 받는 영향이 다르게

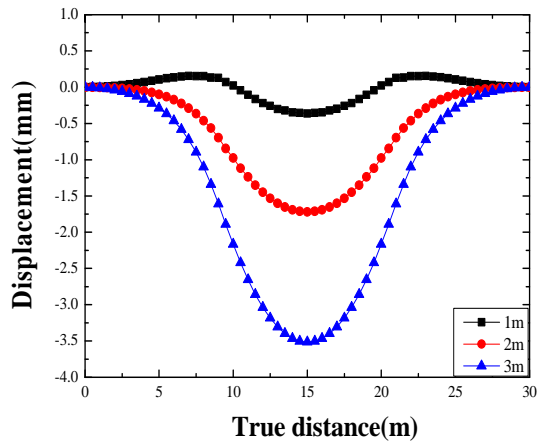


Fig. 11. Displacement distribution of pipe

나타나며 배관 설치 시 매설깊이에 따른 영향을 고려되어야 한다고 판단된다. 또한 매설깊이에 대한 규정이 국내에는 있지만 극한지에 대한 건설로 이어질 때 일반적인 건설 환경과는 다른 새로운 규정이 만들어져야 할 것 같다.

## IV. 결론

본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 배관 매설깊이에 따른 극한지 융해침하 시 매설된 배관이 받는 응력과 변위변화를 알아보는 연구로 융해침하에 대한 실제 환경을 이해하고 이를 배관과 함께 모사하여 길이방향 30m, 세로5m, 높이8m의 1/2스케일의 3차원 유한요소해석모델을 통하여 응력 및 변위해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

### (1) 배관의 응력 해석

융해침하에 의해 배관이 받는 영향을 매설깊이에 따라 분석하였더니 배관 상단에서는 깊이가 3m일 때 최대로 나타났고 배관 하단에서는 깊이가 1m일 때 최대로 나타났다. 배관의 상단과 하단에서 모두 중앙이 아닌 중앙에서 떨어진 지점에서 최대응력이 발생하였고 이는 침하의 끝부분으로 확인된다. 따라서 융해침하가 발생할 때 침하의 중앙보다 끝부분에서 더 큰 응력을 받는다고 알 수 있다.

### (2) 배관의 변위 해석

배관매설깊이에 따른 융해침하 발생시 배관의 변위해석에서는 배관을 3m에 매설하였을 때와 침하

중앙에서 가장 변형을 크게 받는 것으로 나타났다. 이는 응력해석과 연관지어 보았을 때 모델에서 양 끝부분과 최대 또는 최소응력과의 차이에 기인한 것으로 보인다. 만약 침하가 일어나더라도 1m와 같이 얇게 매설하면 큰 변형은 일어나지 않는 것으로 보인다. 그러나 얇게 배관을 배설할 경우 다른 외부요인에 의해 손상될 가능성이 높기 때문에 이 부분도 고려되어야 할 것이다.

위 결과들을 통해 배관의 매설깊이가 극한지 배관에 주는 영향을 분석하였다. 본 모델을 바탕으로 다른 수치의 모델을 만들어 유한요소해석을 진행한다면 추후 극한지 자원개발에 도움이 될 것으로 생각된다.

### 감사의 글

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

### REFERENCES

- [1] Kim, Y. J., Kang, J. M., Kim, Y. S., and Hong, S. S., "Anlysis of Environmental and Geographic Characteristic and Respurece Development Condition", *Civil Expo*, 4331-4334, (2007)
- [2] Bradshaw M., "A New Energy Age in Pacific Russia: Lessons from the Sakhalin Oil and Gas Projects", *Eurasian Geography and Economics*, 51(3), 330-359, (2010)
- [3] Kim, W. S., "Technology trend of energy pipe", *KSME*, 54(1), 53-57, (2014)
- [4] O'hashi, K., "Study on the unique design, construction and operation of gas pipelines in the permafrost of east siberia", Kyoto university, (1997)
- [5] Yoo, C. S., Choi, G. N., "Urban Excavation - Induced Ground Movement in Water Bearing Ground Using Stress-pore Pressure Coupled Analysis", *Korean Geotechnical society* (2011)
- [6] Kim, H. S., Kim, W. S., Bang, I. H., Oh, K. H., and Hong, S. H., "Analysis of Stresses on Buried Natural Gas Pipeline Subjected to Ground Subsidence", *KOSOS*, 13(2), 54-64, (1998)
- [7] Wen, Z. Sheng, Y., Jin, H. Li, S. Li, G. Niu, Y., "Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground", *Cold Regions Science and Technology*, 64, 248-255, (2010)
- [8] Kim Y. J., "Technique sampling of artificial frozen soil", *KSCE*, 48(5), (2000)
- [9] Mackenzie Valley Pipeline, "Arctic Engineering", (2004)
- [10] Advances in Structures, Proceedings of the International Conference on Advances in Structures, *CRC Press*, (2003)
- [10] Arnold Verruijt., "Soil Mechanics", (2004)
- [11] ABAQUS, ABAQUS/Standard Doumentation Version 6.12, (2012)
- [12] Wu, Y., Sheng, Y., Wang, Y., Jin, H., Chen. W., "Stresses and deformations in a buried oil pipeline subject to differential frost heave in permafrost regions", *Cold Regions Science and Technology*, 64, 256-261, (2010)
- [13] Zhang, T., Barry, R. G., Knowles, K., Ling, F., &Armstrong, R. L., "Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere", *Swets & Zeitlinger*, Lisse, (2003)
- [14] Kim, K. I., Yeom, K. J., Kim, Y. P., Kim, W. S., Oh, K. H., "Stress analysis of Arctic thaw settlement with gas pipeline using finite element method", *KSME*, 18(5), 78-84(2014)
- [15] ASME B31.8 (2010)