



## 유한요소해석을 활용한 극한지 융해침하에 따른 천연가스배관의 응력해석

김경일\* · 염규정\*\*,\*\* · 김영표\*\* · 김우식\*\* · †오규환\*

\*서울대학교 재료공학부, \*\*한국가스공사 연구개발원  
(2014년 9월 15일 접수, 2014년 10월 27일 수정, 2014년 10월 28일 채택)

## Stress Analysis of Arctic Thaw Settlement with Gas Pipeline using Finite Element Method

Kyung Il Kim\* · Kyu Jung Yeom\*\*,\*\* · Young-Pyo Kim\*\*  
Woo Sik Kim\*\* · †Kyu Hwan Oh\*

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

\*\*Korea Gas Cooperation R&D Center, Gyeonggi-do 426-790, Korea

(Received September 15, 2014; Revised October 27, 2014; Accepted October 28, 2014)

### 요 약

최근 비교적 에너지자원 확보가 용이했던 육상의 화석연료가 고갈됨에 따라 이를 확보하기 위한 장소가 육지에서 그 동안 관심을 두지 않았던 극한지로 이동하고 있으며, 극한지 자원 확보를 위한 국가 간의 경쟁이 치열하다. 이러한 극한지 에너지자원 개발 시장을 선점하기 위해서는 국내환경과 상이한 극한지 건설기술 개발이 필수적이다. 극한지 가스배관의 경우 -40℃에서 20℃까지의 온도변화에 따라 국내에서 볼 수 없는 외부환경중 하나인 융해침하의 영향을 받게 되는데 이에 맞춰 새로운 해석모델개발이 필요하다. 본 연구에서는 유한요소해석을 활용하여 극한지 가스배관과 융해침하를 모델링하였다. 또한 이 모델에 극한지의 온도에 따른 토양 및 배관의 물성을 추가하고 mohr-coulomb이론을 적용하여 융해침하에 따른 배관이 받는 응력 및 변위에 대해 알아보려고 한다.

**Abstract** - It is important to secure the supply of gas in arctic region which is not developed recently due to depleting of fossil fuel. It is competing in order to secure the arctic region. The need for the occurring the pipeline design in arctic region is essential for development. In this study, we develop the model of thaw settlements for analysis the stress and displacement which applied with pipe in arctic region between -40℃ to 20℃. The soil was applied with Mohr-coulomb theory and pipe was elasto-plastic method.

**Key words** : finite element method, arctic, stress-based, pipeline, thaw settlement

### 1. 서 론

극한지에서의 석유, 가스의 수송은 주로 파이프라인을 통하여 이루어지고 있다. 최근 러시아 북극 지역의 최대 가스, 석유 매장지역으로 대형 매장지 개발과 함께 파이프라인 건설이 병행되고 있으며 우

리나라 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 상황으로 알려져 있다[1]. 러시아에서 진행된 사할린, 하바롭스크, 블라디보스토크를 연결하는 S-K-V 파이프라인 프로젝트는 길이 약1830Km에 총 공사비가 약230억 달러에 달하는 막대한 비용이 소요됐다. 만약 러시아에서 대한민국으로 들어오는 파이프

†Corresponding author:kyuhwan@snu.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

라인을 건설할 경우 최소 2000Km급이 예상되는데 S-K-V파이프라인 프로젝트보다 더 큰 비용이 들어갈 것이라 예상된다[2]. 이에 따라 파이프라인 건설 비용의 최소화가 필요하며 파이프라인 건설에 필요한 재료 및 설계는 비용에 큰 비중을 차지하기 때문에 재료선정 및 설계에 대한 많은 연구가 필요하다. 또한 최소비용으로 파이프라인을 건설하되 극한지 환경 중 중요한 요소인 용해침하에 의해 배관이 파손되지 않도록 설계 및 운용하는 것이 중요하다[3].

지금까지는 국내환경에서의 지반침하에 대한 연구만이 진행되어왔다. 김형식[4]은 매설천연가스배관의 세 가지 지반침하 형태에 대한 응력해석을 보여주었으며 이억섭[5]은 지반침하가 매설배관의 건전성에 미치는 영향에 대한 연구를 하였다. 그러나 지금까지 진행되어온 연구는 모두 국내환경만을 고려하였으며 Winkler foundation이론을 적용하였다. 또한 배관의 elasto-plastic을 적용하지 않고 Beam 요소를 적용하였기 때문에 특히 극한지 환경에서의 배관위치에 따른 구체적인 응력 및 변위 측정에 어려움이 있다. 국내환경에서는 토양의 온도가 큰 변화가 없지만 극한지의 경우 온도차이가 있으며 토양의 온도가 크게 떨어질수록 지반의 물성이 현저히 달라지기 때문에 이에 맞는 모델 및 해석방법이 필요하다.

본 연구에서는 이를 고려하여 Mohr-Coulomb이론을 적용하였으며 배관뿐만이 아닌 토양에 대한 거동을 자세히 해석하였다. 용해침하가 발생하였을 때 배관이 받는 영향을 알아보기 위해 독자적인 유한요소해석모델을 제시하였으며, 지반의 깊이에 따른 토양물성을 해석에 적용하여 배관에 미치는 응력 및 변위를 분석하였다.

## II. 유한요소법 적용

### 2.1. 지반과 배관 연계 해석 조건

지반과 배관의 마찰력과 점착력을 고려하여 유한요소법을 적용하였다. 어떤 면상의 전단응력과 전단강도가 같을 때 파괴가 일어나며, 전단응력은 그 응력이 생기는 면에 작용하는 수직응력의 함수이다. 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. Mohr원이 파괴포락선과 교차한다면, 파괴상태를 넘는 것을 의미하므로 실제로는 그런 일이 있을 수 없으며, Mohr원이 파괴포락선 아래에 그려지면 흙이 파괴상태에 도달하지 않았음을

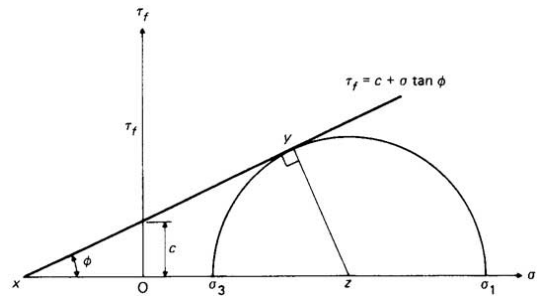


Fig. 1. Mohr's failure envelope.

의미한다.

Mohr-Coulomb식은 Coulomb이 Mohr의 파괴이론을 쉽게 적용할 수 있도록 수정한 것으로  $\sigma$ 와  $\tau$ 의 관계는 직선적이며, 흙의 파괴는 요소의 한 면에서 전단응력이 흙의 마찰저항과 점착 저항을 초과할 때 일어난다는 것이다. 파괴 때 한 전단면에 작용하는 응력(흙의 전단강도)을 식(1)에 나타내었다.

$$\tau_f = C + \bar{\sigma} \cdot \tan \phi \quad (1)$$

위 식에서 C는 점착력이며  $\phi$ 는 내부마찰각,  $\bar{\sigma}$ 는 유효수직 응력을 의미한다. 이를 Fig. 1에 나타내었다[6].

### 2.2. 배관 압력 설정 조건

가스배관의 규격을 결정할 때는 가장 먼저 유량을 생각하여 내압을 결정하고 이에 따라 내압에 따른 두께를 결정하는 것이 일반적이다. 이를 결정하는 식은 다음과 같다.

$$P = \frac{2St}{D} FET \quad (2)$$

식(2)에서 D[mm]는 배관의 외경이며, E는 longitudinal joint factor, F는 design factor, T는 temperature derating factor로 각각 1.0, 0.6, 1.0의 값을 사용하였다[7]. 내압 P의 경우 현재 알래스카 장거리 배관에 적용 중인 최대값과 근사한 17MPa로 가정하였다[8]. 이에 따라 배관의 두께인 t의 경우 20mm의 값을 산출하여 해석에 적용하였다.

### 2.3. 배관의 유한요소해석 모델 및 물성

해석한 배관의 모델은 응력분포를 고려하기 위해서 1/2 스케일로 Fig. 2와 같이 모델링하였으며, 축방향 길이는 30m, 직경은 762mm, 배관두께는 식(2)을

**Table 1.** Material properties of API 5L X70 pipe

Classification	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.** API 5L X70 pipe model.

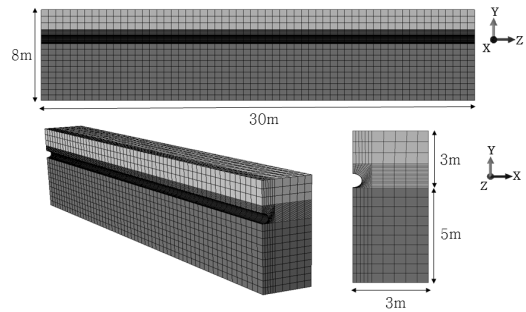
이용하여 결정된 20mm로 모델링 하였다. 또한 축 방향 길이로 더 많은 mesh를 할당하여 계산의 정확도를 높여 변형 및 응력분포를 분석하였다. 배관의 물성은 API 5L X70의 실제 인장실험을 통한 물성을 적용하였다. 이때 사용한 배관의 물성값은 Table 1에 나타내었다.

유한요소해석의 모델링은 상용 프로그램인 ABAQUS CAE를 이용하였고 이에 대한 해석은 ABAQUS/Standard를 활용하였으며 배관의 해석은 요소를 C3D8R로 사용하여 elasto-plastic거동을 구현하였다.

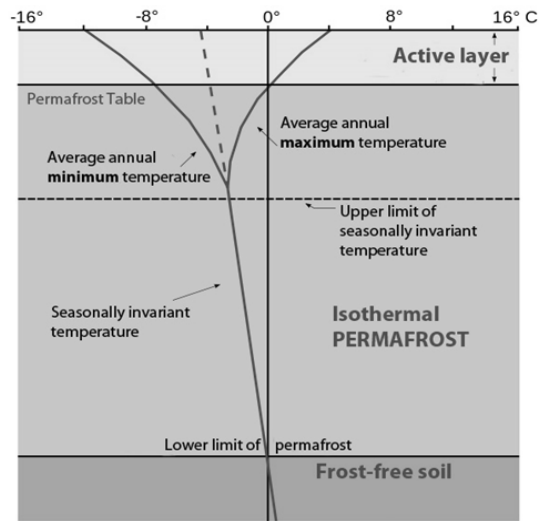
#### 2.4. 토양의 유한요소해석 모델 및 물성

일반적인 극한지 환경에서는 지반의 깊이에 따라 온도 변화가 있으며 특히 극저온에서는 토양의 물성값이 크게 달라지는데 이를 새로운 모델에 적용하였다. 토양지반의 크기는 축 방향 길이는 30m로 배관의 길이와 같고 폭은 3m, 높이는 6m에서 10m로 모델링 하였다. 그 중에서도 높이의 경우 밑의 5m는 영구동토층으로 구분하였고 위의 활동층을 1m에서 5m까지 각각 다르게 모델링 하였다. 이중 기본이 되는 모델로써 활동층의 높이가 3m인 모델을 Fig. 3에 나타내었다.

융해침하의 경우 침하의 길이와 깊이를 변화시켜



**Fig. 3.** Soil model of arctic region.



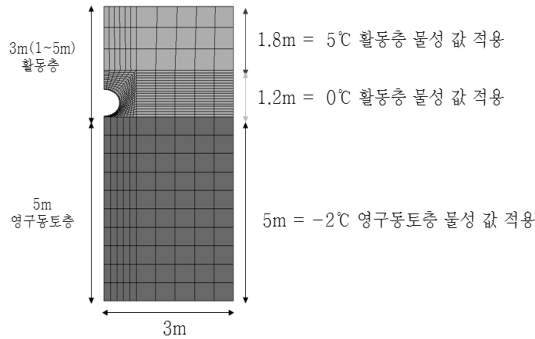
**Fig. 4.** Temperature change due to soil depth.

각각을 모델링하여 해석을 수행하였다. 침하 길이의 경우 4m간격으로 4m, 8m, 12m, 16m로 총 4가지의 모델을 설정하여 해석을 수행하였고 이때 고정변수로 침하깊이는 3m로 고정하였다. 깊이에 대한 영향을 해석하는 경우 융해침하 깊이를 1m부터 5m까지 간격1m의 5가지 모델로 설정하여 해석을 수행하였다. 이때 고정 변수로 침하깊이는 10m로 고정하였다. 배관과 접촉하는 토양의 모델을 상대적으로 더 많은 mesh를 할당하여 배관의 변형 및 응력 분포를 더 자세히 해석할 수 있게 모델링 하였다.

토양 물성의 경우 극한지라는 범위가 크기 때문에 특정 지역마다 토양지반의 물성이 상이하며 토양의 종류 또한 다양하다. 본 연구에서는 극한지에서 실제로 조사된 점토(clay)의 물성을 적용하여 연구를 수행하였다[9]. -40°C에서 20°C까지 활동층과 영구동

**Table 2.** Material properties of soil

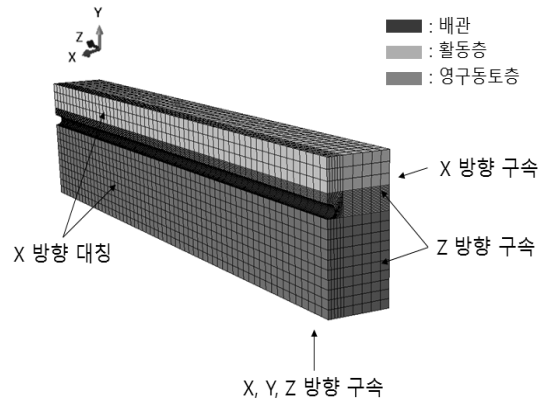
Type of soil	Materials	-20℃	-10℃	-5℃	-2℃	0℃	20℃
Clay in active layer	Density (kg/m <sup>3</sup> )	1920	1920	1920	1920	1920	1920
	Elastic modulus (MPa)	200	100	50	23.4	6	6
	Poisson's ratio	0.32	0.32	0.32	0.32	0.35	0.35
	Cohesion (MPa)	0.6	0.6	0.6	0.57	0.15	0.15
	Angle of internal friction (degree)	26	26	26	26	24	24
Clay in permafrost layer	Density (kg/m <sup>3</sup> )	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	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.** Different property of soil depth.

토층에서의 밀도(density), 탄성계수(Elastic modulus), 푸아송 비(poisson's ratio), 점착력(Cohesion), 마찰각(friction angle) 등을 고려하였다. 점토의 물성값은 온도에 따라 밀도는 변하지 않으나 탄성계수의 경우 크게 다른 값을 보이며 푸아송 비, 점착력, 마찰각의 경우도 조금 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 Table 2에 나타내었다[10].

본 연구에서는 지반 및 배관에 대한 기본의 연구에서 사용한 모델과 차별화를 두었다. 극한지 토양 환경의 특징인 활동층과 영구동토층으로 나누어진 구간에 대한 영향을 해석에 적용하였으며 각기 다른 물성값을 다르게 적용하였다. 또한 활동층의 경우 Fig. 4와 같이 지반의 깊이가 깊어질수록 온도가 다



**Fig. 6.** Boundary condition of soil model.

르게 나타나며 Table 2와 같이 온도에 따라 극한지의 물성값은 큰 차이를 보인다. 특히 Elastic modulus와 cohesion은 값이 크게 다른데 이를 해석에 적용하기 위해 Fig. 5와 같이 해석모델에서 영역을 나누어 각각의 토양에 맞는 물성값을 적용하였다.

장거리 배관의 조건에 맞게 경계조건을 부여하기 위해 배관과 토양의 경계조건은 Fig. 6과 같이 적용하였다. 모델의 바닥부분은 Z방향, X방향, Y방향을 모두 구속하였으며 모델의 옆 부분인 X방향은 대칭 조건을 주고 Z방향은 구속조건을 적용하였다. 또한 모델의 바닥을 제외한 모든 부분을 Y방향(중력방향)

을 자유롭게 움직일 수 있도록 경계조건을 설정하여 토양에 따라 배관이 받는 응력 및 변위를 해석할 수 있도록 하였다[11].

### III. 유한요소해석 결과

본 연구에서는 융해침하길이와 융해침하깊이라는 2가지 변수를 사용하여 배관이 받는 변형과 응력 분포에 대해 분석하였다. 하나의 변수를 바꿔줄 때 나머지 변수들은 임의의 설정한 값으로 고정하였다. 그리고 배관에 미치는 응력분포를 경향성을 확인하기 위해 von Mises stress로 확인하였다.

#### 3.1. 융해침하 길이에 따른 영향

침하가 일어나지 않은 모델과 침하가 일어났을 때 길이에 따른 영향을 살펴보았는데 침하길이를 총 4개로 모델링하였다. 이때 배관의 매설깊이는 2.238m로 고정하였고 융해침하 깊이는 1m로 고정하여 변수에 대한 영향 확인하였다. 융해침하 길이가 각기 다른 모델을 Fig. 7과 같다.

융해침하가 일어났을 때 배관 상단이 받는 응력 von Mises stress로 나타냈으며 침하길이에 따른 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 배관의 중앙에서 가장 큰 응력을 받았으며 융해침하의 끝으로 갈수록 배관 전체에서 응력을 가장 작게 받는 것을 알 수 있다. 또한 배관의 양끝으로 갈수록 다시 응력이 융해침하가 일어나지 않는 0m 모델의 von Mises stress와 같아

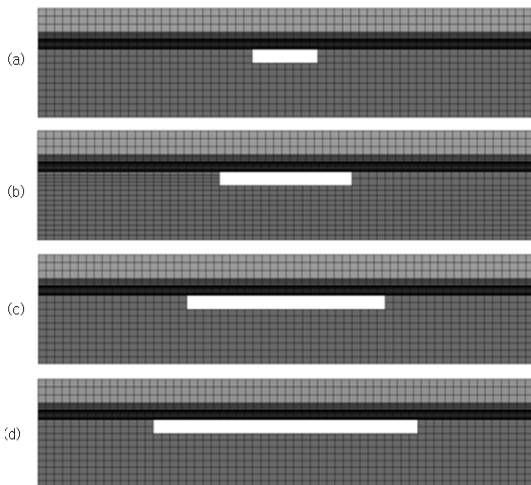


Fig. 7. Soil model of different thaw settlement lengths.  
(a) 4m, (b) 8m, (c) 12m and (d) 16m

지는 것을 확인하였다. 침하가 일어나지 않았을 때부터 침하길이가 16m까지 길어질수록 일정하게 더 큰 응력을 받는 것으로 확인되었다. 16m의 침하길이에서는 배관 상단부분에 최대 298MPa의 응력을 받는 것으로 나타났다.

이러한 이유는 침하길이가 길어질수록 배관이 지탱할 수 있는 힘이 약해지고 토압의 영향을 미치지기 때문인 것으로 판단된다.

또한 배관의 상단 뿐 아니라 하단의 응력분포도 Fig. 9과 같이 확인하였다. 배관 하단의 경우에는 융해침하 길이의 영향에 따라 다른 응력분포를 보였다. 융해침하의 양 끝에서 가장 큰 응력이 작용하였고 배관의 중앙에서 배관상단과 달리 더 작은 응력이 작용하였다. 위 결과에서 알 수 있듯이 융해침하

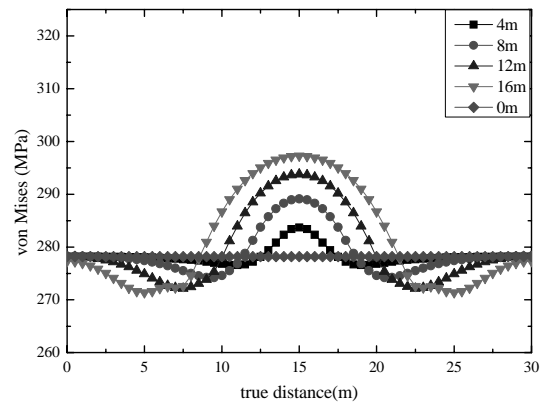


Fig. 8. Stress distribution of upper pipe depend on thaw settlement lengths.

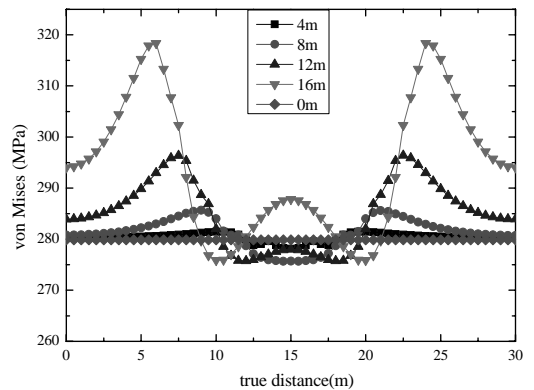


Fig. 9. Stress distribution of bottom pipe depend on thaw settlement lengths.

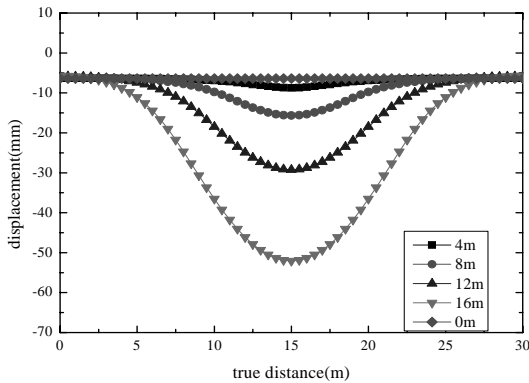


Fig. 10. Displacement of upper pipe depend on thaw settlement lengths.

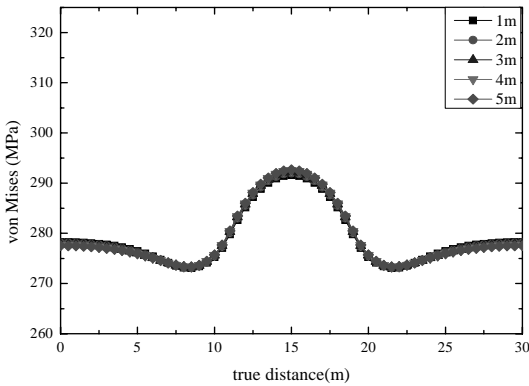


Fig. 11. Stress distribution of upper pipe depend on thaw settlement depths.

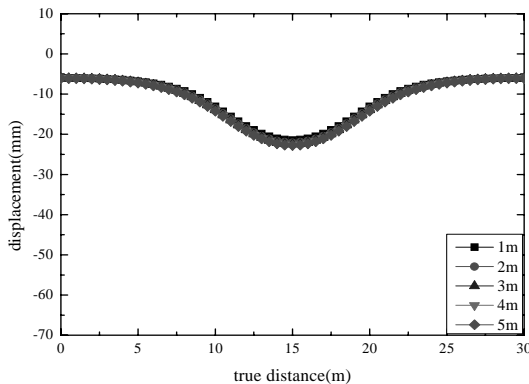


Fig. 12. Displacement of upper pipe depend on thaw settlement depths.

의 길이는 배관이 받는 응력에 큰 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 길이가 길어질수록 더 큰 응력이 작용한다는 결과를 도출하였다.

융해침하 길이에 배관의 변위를 Fig. 10과 같이 확인하였다. 융해침하의 길이가 길어질수록 배관의 중앙이 처짐이 발생하였다. 융해침하의 길이가 8m까지는 큰 변형을 보이지 않았지만 16m일 때는 약 50mm가 밑으로 처지는 변형을 보였다. 이는 극히 적은 변형을 받는 것으로 판단된다.

### 3.2. 융해침하 깊이에 따른 영향

융해침하 깊이에 따른 영향을 알아보기 위해 융해침하의 깊이를 10m로 고정하고 배관매설깊이를 2.238m로 고정한 후 융해침하깊이를 1m부터 5m까지 1m간격으로 총 5가지의 모델을 만들어 해석을 진행하였다.

융해침하 깊이변화에 따른 배관에 미치는 von Mises stress 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 침하깊이에 따라 약간의 차이는 있었지만 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 침하깊이가 깊을수록 배관중앙에서는 2MPa정도의 차이밖에 나지 않아 변화가 없다고 판단하여도 무방하다.

침하깊이에 따른 배관의 변형 또한 큰 차이가 없는 것으로 나타났는데 이를 Fig. 12에 나타내었다. 배관의 중앙에서 배관이 처지는 현상이 일어났지만 깊이의 변화에 따라서 거의 같은 위치를 보였다. 위 해석결과를 바탕으로 분석하였을 때 융해침하의 깊이의 변화에 의해서는 배관이 받는 응력 및 변형이 차이가 많이 없는 것으로 나타났다. 따라서 침하깊이는 배관에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

## IV. 결론

본 연구에서는 elasto-plastic거동을 활용하여 극한지 환경에 맞는 새로운 유한요소모델을 제시하였다. 이를 이용하여 극한지 외부환경중 하나인 융해침하에 따른 매설된 배관이 받는 변형과 응력분포의 영향에 대해서 알아보았으며 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

#### (1) 융해침하 길이의 영향

융해침하의 길이가 길어질수록 배관이 받는 응력은 증가하였다. 본 연구에서 가정한 변수는 융해침하의 길이가 배관에 가장 큰 영향을 주었다. 30m길이의 배관 및 토양모델에서 침하깊이가 최대 16m일 때 침하가 일어나지 않았을 때 보다 약 40MPa이 높은 응력이 작용하는 것을 확인하였다. 또한 배관상

단과 하단에서 작용하는 응력분포가 다르게 나타나  
는 것을 확인하였다. 이렇듯 융해침하의 깊이가 길  
어질수록 배관이 받는 응력은 영향을 크게 받으므로  
침하깊이를 예상하여 혹은 최악의 상황을 가정하여  
그에 맞는 배관재료의 결정과 배관설계가 필요할 것  
이다.

(2) 융해침하 깊이의 영향

융해침하 깊이를 1m에서 5m까지 모델링하여 해  
석을 진행하였고 배관이 받는 응력 및 변위는 큰 차  
이가 없었다. 이 결과를 통해 융해침하의 깊이는 배  
관에 큰 영향을 주지 않는다고 판단된다.

위 결과들을 통해 알 수 있듯이 융해침하가 일어  
날 경우 융해침하의 깊이보다는 융해침하의 길이에  
초점을 맞출 필요가 있을 것이라 판단된다. 또한 본  
연구에서 제시한 새로운 유한요소모델을 통해 특정  
지역의 토양물성을 적용하여 배관이 받는 영향을 예  
측하면 실제로 배관설계를 할 경우 큰 도움이 될 것  
으로 예상된다.

**감사의 글**

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

**참고문헌**

[1] Kim, Young jin, Kang, Jae Mo, Kim, Young  
Suk and Hong, Seung Seo., "Anlysis of Envi-  
ronmental and Geographic Characteristic and  
Respurece Development Condition", *Civil Expo*,

4331-4334, (2007)  
[2] Michael Bradshaw., "A New Energy Age in  
Pacific Russia: Lessons from the Sakhalin Oil  
and Gas Projects", *Eurasian Geography and Eco-  
nomics*, 51(3), 330-359, (2010)  
[3] Kim, Woo Sik, "Technology trend of energy  
pipe", *KSME*, 54(1), 53-57, (2014)  
[4] Kim, Hyung sik, Kim, Woo Sik, Bang, In Hwan,  
Oh, Kyuhwan and Hong, Sung Ho., "Analysis  
of Stresses on Buried Natural Gas Pipeline Sub-  
jected to Ground Subsidence", *KOSOS*, 13(2),  
54-64, (1998)  
[5] Lee, Ouk Sub and Kim, Dong Hyeok., "Effect  
of Ground Subsidence on Reliability of Buried  
Pipelines", *KSPE*, 21(1), 173-180, (2004)  
[6] Arnold Verruijt., "Soil Mechanics", (2004)  
[7] ASME B31.8, (2010)  
[8] Alaska Pipeline Project, Draft Resource Report  
1 - Rev 0, (2011)  
[9] Yaping Wu, Yu Sheng, Yong Wang, Huijun  
Jin, Wu Chen., "Stresses and deformations in  
a buried oil pipeline subject to differential frost  
heave in permafrost regions", *Cold Regions Sci-  
ence and Technology*, 64, 256-261, (2010)  
[10] Zhi Wen, Yu Sheng, Huijin Jin, Shuangyang  
Li, Guoyu Li, Yonghong Niu., "Thermal elas-  
to-plastic computation model for a buried oil  
pipeline in frozen ground", *Cold Regions Science  
and Technology*, 64, 248-255, (2010)  
[11] Lee Hyuk., "Finite element analysis of buried  
pipeline", Manchester United University, (2010)