



## 극한지 활동층 변화에 따른 천연가스배관의 유한요소해석

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

\*한국가스공사 연구개발원, \*\*서울대학교 재료공학부

(2014년 9월 5일 접수, 2014년 10월 27일 수정, 2014년 10월 28일 채택)

### Finite Element Analysis of Gas Pipelines Depend on the Arctic of Active Region

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

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

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

(Received September 5, 2014; Revised October 27, 2014; Accepted October 28, 2014)

#### 요 약

우리나라는 영구 동토지역이 존재하지 않는 기후적 특성으로 인해 건설수요가 없었지만, 최근 지구 온난화 현상으로 인하여 화석연료의 사용보다 극한지 지역의 에너지 확보가 대두되고 있다. 이에 극한지 지역에서 사용하고 있지 못한 에너지 자원의 관심이 증가함에 따라 알래스카 및 시베리아의 천연가스의 개발이 필요성이 증대하고 있다. 이에 따라 극한지 지역에서 필요한 배관 설계 기술은 현재 국내에서 사용되고 있는 천연가스과 전혀 다른 환경에서 운용될 것이 예상되며, 이에 따른 설계 기초 자료가 필요하다. 그러므로 극한지 환경에서의 토양물성에 따라 배관에 미치는 영향 분석이 필요하다. 현재 배관의 설계는 응력 기반으로 설계되어있지만 추후 변위를 기초하는 설계법이 필요하며, 우선적으로 이를 위한 영구동토층 및 활동층에 대한 영향 분석이 필요하다. 본 연구에서는 유한요소해석을 이용한 Thermal elasto-plastic analysis를 통해 활동층의 영향에 따른 배관의 응력 및 변위 측정을 알아보고자 한다.

**Abstract** - It is known that there is no demand for building the arctic environment in Korea. However, it is important to use the different energy source instead of fuel source due to global warming. It is now demanded of using gas of Alaska and Siberia for long term developing the natural gas. The design of gas pipelines in Korea is very different from the arctic region. The operation of gas in arctic region have to consider of arctic region such as permafrost and active regions. It is needed to understand of gas pipeline design with different arctic soil properties. Nowadays, the pipelines is designed with stress-based and but there is demanded for strain based design with more deformed pipeline. We study of arctic environment with different active region using Finite Element Method of thermal elasto-plastic analysis.

**Key words** : finite element method, active layer, thermal elasto-plastic analysis, gas pipeline

†Corresponding author:wskim@kogas.or.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

우리나라는 영구 동토지역이 존재하지 않는 기후적 특성으로 인해 영구동토지역의 대상으로 하는 건설기술에 대한 수요가 없었지만, 최근 국내 업체들의 해외 공사 진출이 증가하고 있으며, 특히 에너지 자원 확보를 위한 시베리아 및 극동지역 에너지 라인 개발 사업에 대한 관심 증가로 인해 동토지역에 적합한 건설 기술의 수요가 증가하는 추세이다. 지구 온난화 방지를 위한 온실가스 배출 억제 및 각종 환경규제 강화에도 불구하고 기간산업의 화석연료 의존도가 높아 국제적으로 화석연료 확보하려 하고 있다. 그러나 비교적 에너지 및 자원 확보가 용이했던 육상의 화석연료가 고갈됨에 따라 그 동안 관심이 크지 않았던 극한지로 이동하고 있다. 지속적으로 안정적인 에너지 자원의 확보는 국내 산업의 안정적 성장을 이룰 수 있다. 그러므로 극한지 자원개발과 관련하여 기술력을 확보한다면 자원 확보 전에 서 우위를 가질 수 있다[1].

미국은 1970년대부터 시작된 알래스카 개발로 건설 인력이 대규모 이동하였으며, 또한 관광 산업 개발을 목적으로 주거지 건설을 실시했다. 이에 따라 실내의 온도 상승은 열전달 현상을 일으켜 지면의 온도 상승을 초래하였다. 이로 인한 동토지역의 융해로 많은 건물들의 부동침하 피해를 발생시켰다.

한 예로 1996년 2월, 일본 북해도의 토요하마터널에서 천장 윗부분의 집채만 한 바위가 얼었다 녹기를 반복하는 과정에서 붕괴되어 터널 내부로 떨어지는 사고가 있었다. 이 사고로 마침 터널을 지나가던 버스가 크게 부서지고 20여 명의 승객이 사망하였다. 아울러 눈이 많이 내리는 샷포로 같은 지역에서는 여름철에 비가 내릴 때만 산사태가 발생하는 게 아니다. 해빙기에 눈이 녹으면서 발생하는 산사태도 흔하고 그 피해 또한 적지 않다[2].

극한지 에너지자원 개발 시장을 선점하기 위해서는 국내환경과 상이한 극한지 대상 배관기술 개발이 필수적이다. 이런 피해를 예상하고 방지하는 연구가 선행되었으며, 동토지역에 대한 설계 시 고려해야 할 사항으로 배관에 미치는 영향을 분석하기 위해 배관의 인장응력과 탄성응력을 사용하여 동토융해에 대한 배관의 미치는 영향을 분석하였으며[3,4], Winker foundation을 이용하여 동상현상에 따라 배관에 미치는 영향을 분석하였다[5-7]. 이 연구의 경우 배관의 Elasto-plastic을 적용하지 않아 소성변형에 대해 정확히 예측하기 어려우며, Beam 요소를 시 때문에 배관의 위치에 따른 응력 및 변위를 측정하기 어렵다고 판단된다.

따라서 본 연구는 유한요소해석을 통해 Thermal elasto-plastic을 이용하여 배관이 소성변형 고려 및 C3D8R 요소를 사용하여 배관의 위치에 따른 응력 및 변위를 측정하여 극한지 환경에 배관 설치 시 고려해야 하는 활동층의 영향에 따라 배관에 미치는 영향을 본 연구를 진행하고자 한다.

## II. 극한지 환경에서의 토양

### 2.1. 극한지 환경의 토양 정의

미국 지질 조사국[8]에 따르면 영구동토를 포함한 극한지에는 전 세계 미발견 석유, 가스 탐사 자원량의 22%가 매장되어 있다.

이러한 극한지의 토양환경은 Fig. 1와 같이 크게 영구동토층(permafrost)과 활동층(active layer)로 나뉜다. 영구동토는 물의 어는점인 0℃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[9].

동토지반에서 나타나는 전형적인 지중 온도분포도를 살펴보면 동토는 계절의 변화에 관계없이 일년 내내 동결상태를 유지하고 있는 영구 동토층과 계절에 따라 동결과 융해가 반복되는 활동층으로 구성되어 있다는 사실을 확인할 수 있다[11]. 동결토의 종류, 분포 및 동결토의 특성을 파악하는 것이 배관의 설계를 위해서 굉장히 중요하다. 동결지반의 복잡한 성질로 인하여 건설비용의 증가나, 예기치 않는 현상들이 구조물 및 배관에 발생할 수 있기 때문에 동결지반에서는 특별한 주의가 요구된다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 불연속적인 영구동토층을 모

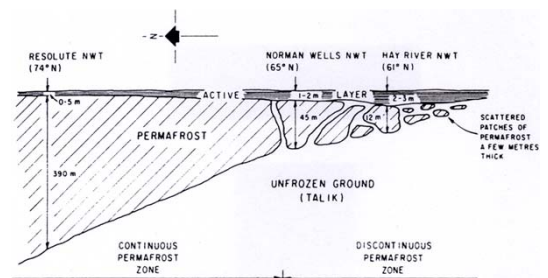


Fig. 1. Environment of arctic region[10].

**Table 1.** Material properties of soil

Type of soil	Materials	-20°C	-10°C	-5°C	-2°C	0°C	20°C
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	0	20	18	18

델링하여 해석하였다.

### 2.2. 극한지 토양 모델 적용

융해침하의 정의는 영구 동토지역의 불안정 해빙 구간에서 대량의 얼음이 융해되면서 구조물이 침하할 수 있으며 이와 같은 융해는 자연적인 온도조건 변화나 구조물로부터 열유입에 의해 발생한다.

천연가스 이송용 배관을 극한지에 설치하는 방법으로는 배관이 지나는 토양조건에 따라 달라지는데, 지상에 흙을 덮어 설치하는 방법, 지하에 매설하는 방법, 지상의 가설대 위에 설치하는 방법이다. 일반적으로 토양과 배관이 결합된 해석을 진행 할 때 온도에 대한 영향 분석이 필요하다 이를 위해 Thermal elasto-plastic analysis를 수행하여 온도가 다른 토양을 고려하였다. 응력 분포 및 기하학적 형상 고려를 위해서 1/2 스케일로 모델링하였으며, C3D8R (8-node linear brick element)의 요소를 사용하였다. 해석에 사용된 요소의 개수는 배관의 경우 4800개, 토양의 경우 24000개이다. 일반적으로 토양을 해석할 때 사용하는 Beam 요소를 적용하지 않고[5-7] 위에 언급한 Elastic-plastic 해석을 진행하였다. 토양의 마찰력과 점착력을 고려하기 위해서 Mohr-columb 식을 고려하였다[3,4]. 상용프로그램인 ABAQUS CAE 6.12를 사용하여 모델링하였으며, ABAQUS/Standard를 이용하여 유한요소해석을 진행하였다[12].

**Table 2.** Material properties of API 5L X70 pipe

Material	API 5L X70
Young's modulus (MPa)	207000
Poisson's ratio	0.3
Yield strength (MPa)	530.2
Tensile strength (MPa)	626.8

### 2.3. 배관 모델 조건

배관의 모델은 API 5L X70 pipe, 직경은 762mm, 두께는 20mm, 길이는 3000mm, 내압은 17MPa로 적용하였으며, 배관의 물성은 Table 2와 같다. 또한 한국가스공사 연구개발원에서 수행한 인장 실험을 통해 얻은 engineering stress-strain curve를 이용하여 true stress-strain curve로 변환하여 유한요소해석에 적용하였으며 이는 Fig. 2와 같다. 이는 배관의 항복응력에서만 고려된 것이 아니라 소성 변형까지 고려된 것이기 때문에 이 배관 물성을 이용할 경우 배관의 파괴를 가장 유사하게 모사할 수 있는 것으로 알려져 있다[13].

### 2.3. 토양의 유한요소해석 적용

토양의 물성을 적용하여 평가하기 위해서는 환경에 맞는 적용이 필요하다. 유한요소해석에 배관 환경을 적용하기 위해서 일반적으로 동토지역에서 구

분하고 있는 활동층과 영구동토층에 따른 영향 분석을 적용하였다. 일반적으로 사용하는 Winkler foundation 모델의 경우 Discrete multi-linear soil spring을 적용하였고[5] Beam의 요소를 사용하였기 때문에 배관의 소성을 예측이 정확하지 않다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 Mohr-coulomb 모델을 적용하여 토양의 접착력 및 마찰각을 고려할 수 있도록 하였다[3-4].

일반적으로 배관을 활동층에 매설하여 운용하는 것으로 알려져 있으며, 이는 영구동토층의 매설 할 경우 타설하는데 활동층 보다 강도가 높기 때문에 많은 비용이 소요될 것이라 예상되기 때문이다.

그에 따라 본 연구에서는 극한지 환경에 따른 활동층 및 영구동토층에 대한 분석을 위해 활동층을 지상에서부터 3m의 변수를 지정하여 분석하였으며, 배관의 위치는 영구동토층에 닿아 있을 때와 배관이 영구동토층 위로 0.8m로 고정하여 해석을 진행하였다. 또한 Fig. 3와 같이 활동층 및 영구동토층의 모델링은 길이방향으로 30m 및 영구동토층은 5m로 모델링하였다.

토양 및 배관의 응력 및 경계조건은 Fig. 4와 같다. 배관 내경에 내압이 적용되었으며, 모델 아래쪽

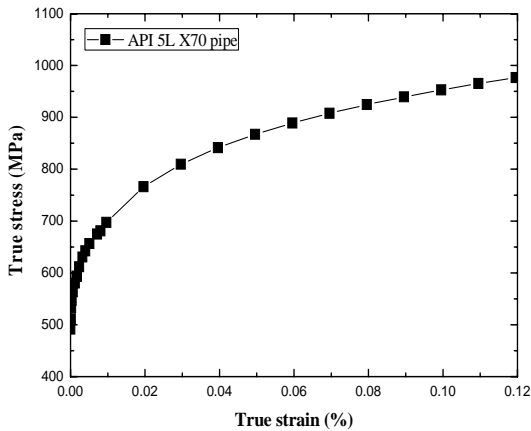


Fig. 2. True stress-strain curves of API 5L X70 pipe.

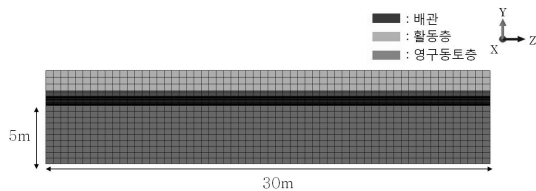


Fig. 3. Modeling of active and permafrost.

의 경우 X, Y, Z축의 방향을 고정하였으며, 모델 왼쪽은 X 방향의 대칭조건이며, 그 반대편인 오른쪽은 X방향 구속, 모델 앞 뒤 방향에는 Z방향 구속 조건으로 적용하였다. 반면 모델의 위쪽은 중력과 배관 및 토양의 자중을 적용하기 위하여 아무런 조건을 적용하지 않았다.

본 연구에서는 Table 1과 같이 활동층 및 동토지역의 Clay 물성을 사용해서 -20℃에서 20℃까지 토양 물성을 사용하여서 유한요소해석을 통한 배관에 미치는 배관의 응력 및 변위를 비교 및 분석하였다.

### III. 유한요소해석 결과

본 연구에선 극한지 환경에서 활동층에 매설된 배관에 미치는 응력 및 변위에 대해 분석하였다. 활동층이 영구동토층에서 0m, 0.8m를 각각 떨어질 때의 영향을 확인하였으며, 토양의 물성은 온도가 극대화가 된 -20℃와 20℃를 각각 변수로 하여 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 응력 분포의 경우는 von Mises effective stress를 통해 분석하였으며, 변위는 모델의 Z 방향의 변화되는 양을 측정하였다.

#### 3.1. 활동층이 영구동토층에 벗어났을 경우

활동층의 깊이가 3m, 1.438m의 경우의 영향을 분석하였다. 온도는 극한의 온도인 -20℃과 20℃를 적용하였다. 또한 어느 부분의 배관의 응력이 가장 영향을 받는지 확인하기 위해서 배관의 위쪽 부분과 아래쪽 부분의 응력 및 변위를 측정하였다. 이때의 응력 분포는 Fig. 5와 같다. 이때의 True distance의 경우 Fig. 4의 모델에서의 Z방향으로 있을 때 거리를 의미하며, 모델을 기준으로 뒤에서 부터 앞까지의 거리다. Fig. 5와 같이 배관의 위쪽 부분에 가장 많

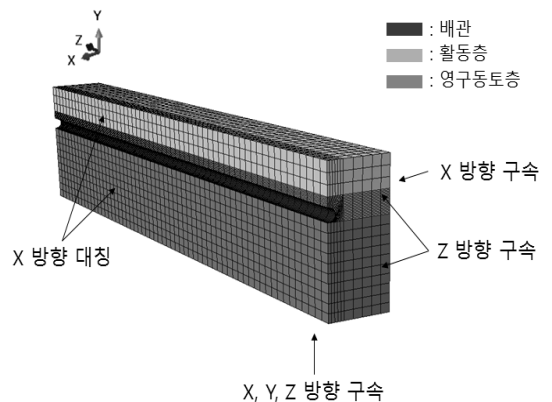


Fig. 4. Boundary condition of soil model.

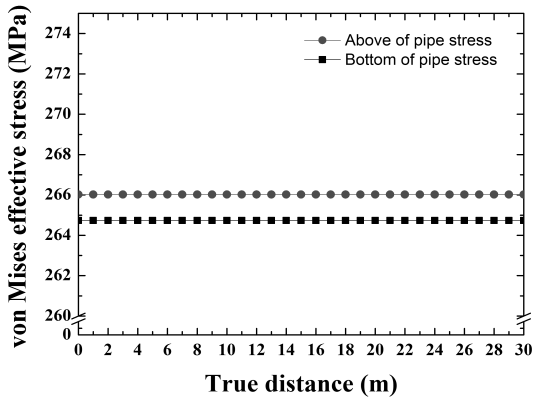


Fig. 5. Stress distribution of above and bottom pipe with 3.0m active layer depth at -20°C.

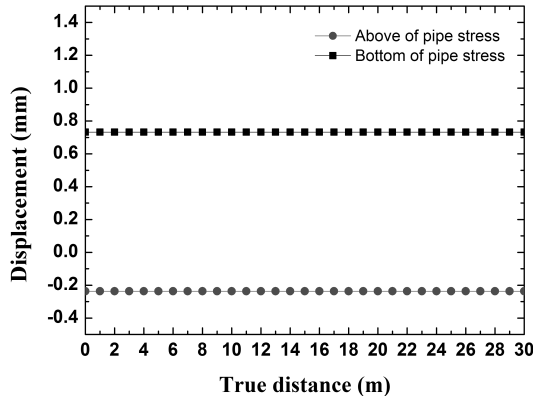


Fig. 6. Displacement of above and bottom pipe with 3.0m active layer depth at -20°C.

은 응력이 받는 것을 알 수 있었으며, 배관의 아래쪽 부분의 경우 약 2MPa가 차이 나는 것을 알 수 있다.

또한 배관의 위쪽 및 아래쪽 부분의 배관 변위 측정을 Fig. 6과 같이 분석하였다. 해석 조건은 Fig. 5와 동일한 조건이다. 이를 통해 배관의 위쪽 부분에 오히려 변위가 증가하는 것을 알 수 있었으며, 반면에 배관 아래쪽 부분의 경우 기준점인 0mm보다 약간 작은 약 0.2mm의 내려가는 영향을 받았음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 활동층과 영구동토층과의 사이에 배관을 설치 할 때 변위의 영향을 거의 없는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.2 활동층 변화에 따른 응력 및 변위 변화

활동층이 총 깊이가 3m일 때 밑에서 활동층과 영

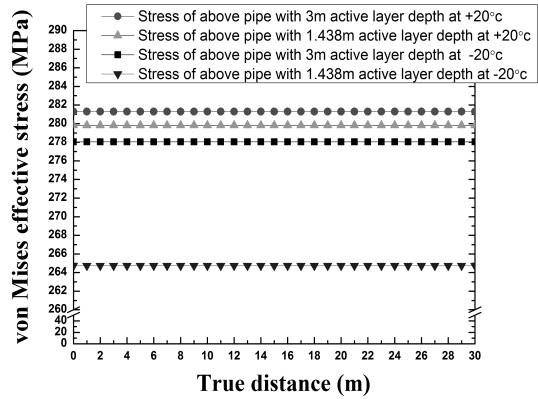


Fig. 7. Stress distribution of soil model depend on temperatures and active layers.

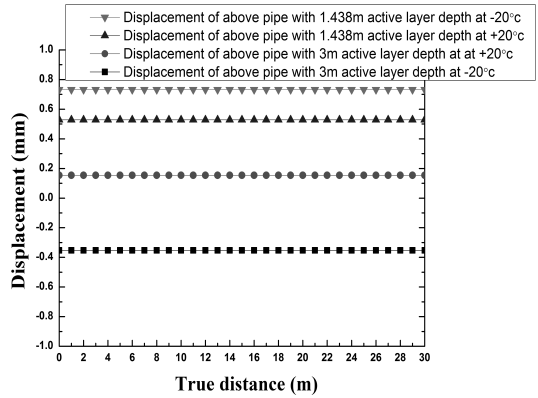


Fig. 8. Displacement of soil model depend on temperatures and active layers.

구동토층과의 사이 길이가 0m, 0.8m일 때 배관에 미치는 응력 및 변위를 측정하였다. Fig. 7의 경우 활동층 변수에 따른 온도에 대한 von Mises effective stress 영향을 분석하였다. 가장 높은 응력의 경우 영구동토층에서 0m 떨어졌으며 지반 온도가 +20°C일 때 약 281MPa이며, 이는 배관에 가장 많은 영향을 받을 것을 알 수 있다. 가장 낮은 응력의 경우 약 265 MPa로 영구동토층에서 0.8m이며, 지반 온도가 -20°C일 때 가장 적은 von Mises effective stress를 확인할 수 있었으며 이를 통해 가장 안전한 형태로 제안될 수 있다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 토양의 온도가 증가함에 따라 Elastic modulus가 가장 많은 변화를 확인할 수 있고, 이는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 가장 많은 영향

을 미치는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

Fig. 8의 경우는 Fig. 7의 해석 조건과 동일하게 배관의 변위를 측정하였다. 실제 변위의 경우모델의 끝단 면으로 기준으로 하여 모델 중간인 15m에 약간의 변화를 보이지만 모델의 넓은 길이로 인하여 변화된 모습은 보이지 않는다. 이 결과를 통해 배관의 변위가 영구동토층에서 0m, 지반 온도가 -20℃일 때 가장 많은 변위가 측정된 것을 확인 할 수 있다. 응력과 반대로 변위의 경우의 현상이 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 극한지 환경에 나타나는 활동층과 영구동토층에 따른 배관에 미치는 응력 및 변위를 Thermal elasto-plastic analysis를 이용한 유한요소 해석 결과는 다음과 같다.

가장 큰 변화를 보이는 모델은 토양온도가 -20℃이며 활동층 깊이가 3.0m일 때 -0.4mm의 변위가 발생하였으며, 토양온도가 -20℃이며 활동층 깊이가 1.438m인 모델의 배관 응력이 264MPa임을 확인하였다. 이를 통해 배관에 배관의 내압으로 인한 값이 가장 크게 작용되는 것으로 판단된다.

추후 융해침하, 동상현상에 따른 영향을 고려하여 배관의 미치는 영향 및 변형량 분석하여 배관의 설계 및 설치 시 고려해야할 사항의 분석이 필요 할 것이라 판단된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

- [1] Kim, Woo Sik, "Technology trend of energy pipe", *KSME*, 54(1), 53-57, (2014)
- [2] Kim Young jin, Kang Jae Mo, Kim Young Suk and Hong Seung Seo, "Anlysis of Environmental and Geographic Characteristic and Respu- rece Development Condition", *Civil Expo*, 4331-4334, (2007)
- [3] Yaping Wu, Yu Sheng, Yong Wang, Huijun Jin and Wu Chen, "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)
- [4] Zhi Wen, Yu Sheng, Huijin Jin, Shuangyang Li, Guoyu Li, and Yonghong Niu, "Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground", *Cold Regions Science and Technology*, 64, 248-255, (2010)
- [5] Qishi Chen, "A Simplified Pipelines Strain Demand Model for Frost Heave", *ISOPE*, 451-458, (2014)
- [6] A. G. Razaqpur and Daiyu Wang, "Frost-induced deformations and stresses in pipelines", *International journal of pressure vessels and piping*, 69, 105-118, (1996)
- [7] Haydar Arslan, Jed Hamilton, Suvrat Lele, Karel Minnaar, Bob Albrecht, Mike F. Cook and Patrick Wong, "Strain demand estimation for pipelines in challenging arctic and seismically active regions", *Proceedings of the 8th International Pipeline Conference* (2010)
- [8] United States Geological Survey, "USGS Vival Identity System", (2008)
- [9] Kim Young jin, "Technique sampling of artificial frozen soil", *KSCE*, 48(5), (2000)
- [10] Orlando B, Andersland and Branko Ladanyi, *Frozen Ground Engineering*, John Wiley & Sons, (2004)
- [11] U.S. Army Corps of Engineering, *Economic and Envoinrmental Principles and Guidelines for Water and realted Land Resources Implementation Studies*, (1983)
- [12] ABAQUS, *ABAQUS/Standard Doumentation Version 6.12*, (2012)
- [13] *Advances in Structures, Proceedings of the International Conference on Advances in Structures*, CRC Press, (2003)