



## 동토지반에서 종방향 및 횡방향 사면의 경사에 따른 트렌치 안전성 분석

김종욱 · 김정주 · Turab H. Jafri · †유한규

한양대학교 건설환경공학과

(2016년 6월 15일 접수, 2017년 1월 3일 수정, 2017년 1월 11일 채택)

### Analysis of Trench Slope Stability in Permafrost Regions According to the Vertical and Horizontal Angle of Slope

Jong-Uk Kim · Jung-Joo Kim · Turab H. Jafri · †Han-Kyu Yoo

Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Korea

(Received June 15, 2016; Revised January 3, 2017; Accepted January 11, 2017)

#### 요약

동토지역에서의 파이프라인 시공 시 계절변화와 그에 따른 지반의 강도변화가 트렌치의 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 영국, 러시아, 국내 파이프라인 기준들을 분석하여 직경 30in. 파이프의 트렌치 형상을 도출하였다. 러시아 야쿠츠크(Yakutsk) 지역의 계절별 지반조건에서 횡방향 사면경사(0°, 10°, 20°, 30°)와 종방향 사면경사(20°, 30°, 40°)에 따른 트렌치의 안정성을 분석하였다. 강도감소법을 이용하여 트렌치와 사면의 안정성 해석을 수행하였다. 그 결과, 사면의 경사가 높을수록 안전율이 낮게 나왔으며 여름철 지반조건에서는 횡방향 사면경사가 30°일 때 트렌치의 안정성을 확보하기 어려우며 지상으로부터 1m 아래에서 예상 파괴면을 확인하였다. 종방향 사면의 경사가 낮을 때에는 트렌치 부근의 파괴가 일어날 가능성이 높았지만 종방향 사면의 경사가 높을 때에는 트렌치 부근의 파괴 보다는 사면 전체의 파괴가 주를 이루는 것으로 분석되었다. 겨울철 지반조건에서는 지표면의 온도가 영하로 내려가서 지반 공극 내 얼음 발생으로 인하여 점착력이 발생하는 효과가 있어, 특수한 외부 하중이나 급격한 온도변화가 없을 경우에는 트렌치 사면 경사 0~40°에서 안전성의 문제는 없을 것으로 판단되었다.

**Abstract** - In this study, the stability of trench slope was analysed in summer and winter seasons for the construction of pipelines in permafrost regions. The construction standards of Korea, Russia and UK were compared for obtaining an optimum trench shape for a pipeline of 30 in. diameter. Using the geotechnical properties of soil in Yakutsk (Russia), the stability of trench slope was analysed using Strength Reduction Method (SRM) according to the horizontal slope angle values of 0°, 10°, 20° and 30° and vertical slope angle values of 20°, 30° and 40°. In both seasons, an increase in the slope angle results in a decrease in the factor of safety. The results show that horizontal slope angle of 30° was not safe in summer season. At the vertical slope angle of 20°, trench side failure was observed, whereas, ground slope failure was observed at the vertical slope angles of 30° and 40°. Due to the solidification of pore water at temperatures below 0°C, cementation of soil particles take place. Therefore, the trench slope was found to be stable in the winter season at all vertical and horizontal slope angles, except for special load cases and abrupt temperature changes.

**Key words** : pipeline, trench, slope stability, factor of safety, permafrost

†Corresponding author:hankyu@hanyang.ac.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

다양한 환경규제로 인하여 천연가스 자원에 대한 관심이 높아지고 있으며 천연가스 매장량의 상당부분은 동토지역에 매장되어 있다. 동토지역에서의 천연가스 이송을 위한 파이프라인 건설 시 계절변화 및 온도에 따른 지반의 강도변화로 인하여 트렌치의 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 국내의 경우 동토지반에서의 트렌치 시공 경험이 전무하기 때문에 시공 중 트렌치 안정성에 대한 기초연구가 필요하다.

따라서 동토지역에서 파이프라인 시공 경험이 있는 해외 여러나라의 기준을 참조하여 직경 30 in. 관용 트렌치 형상을 도출하였다. 이를 바탕으로 러시아 야쿠츠크(Yakutsk) 지역의 계절별 지반조건과 횡·종방향 사면 경사에 따른 트렌치의 안정성을 분석하였다. 강도감소법을 이용하여 트렌치와 사면의 안정성 해석을 수행하였으며, 수치해석 프로그램은 Midas GTS NX를 사용하였다.

## II. 해외 문헌고찰

### 2.1. 트렌치 형상

우리나라의 파이프라인 시공관련 기준에는 동토지반의 특성이 반영되어 있지 않아 동토지반의 특성이 반영되어있는 해외 기준을 참조하여 트렌치 형상을 비교하였다. 그 중 매설깊이, 트렌치의 최소폭과 경사에 대해 고찰하였다.

#### (1) 매설깊이

한국가스안전공사의 가스도매사업 제조소 및 공급소 밖의 배관의 시설 기술 검사 정밀안전진단 기준(KGS FS451 2015)에는 지표면으로부터 배관 외면까지의 매설깊이는 산이나 들에서는 1m 이상 그 밖의 지역에서는 1.2m 이상으로 제시하고 있다. 그리고 배관은 지반 동결로 손상을 받지 아니하는 깊이로 매설하도록 되어있다[1].

BSi(영국표준협회)의 BS EN 15001-1(2009)에는 매설깊이가 최소 0.5m로 제시되어 있으며 압력이 5 bar보다 높을 경우는 더 깊은 매설깊이를 요구하고 있다[2].

#### (2) 트렌치의 최소 폭과 경사

SNiP-3.02.01-87과 SP 34-116-97 그리고 STO Gas-prom 2-2, 1-249-2008에 제시되어 있는 기준을 종합하여 Table 1에 나타내었다. 파이프 직경과 트렌치 경사(1:0.5를 기준), 기계굴착여부에 따라 바닥부 최소폭이 제시되어 있다[3-5].

### 2.2. 해석을 위한 트렌치 형상 도출

본 연구는 30 in.의 파이프직경을 기준으로 위 모든 기준을 만족하는 트렌치형상을 Fig. 1(a)와 같이 나타내었다. 또한 사면 경사에 따른 트렌치 안정성을 파악하기 위하여 경사를 10°, 20°, 30°로 설정하고 Fig. 1(b)-(d)와 같이 나타내었다.

### 2.3. Yakutsk 지역의 온도분포를 통한 지반 물성 산정

#### (1) 지반주상도

수치해석 입력 변수인 동토지반의 탄성계수를 구

Table 1. Trench bottom width according to trench construction type

트렌치 공사 Case	바닥부 최소폭
트렌치 경사의 경우 1:0.5로 경사지고 최소한의 폭은 직경이 0.7 m 파이프라인	D + 0.3 m
트렌치 경사의 경우 1:0.5로 경사지고 최소한의 폭은 직경이 0.7 m 이상	1.5 D
트렌치 굴착을 할 때, 트렌치 굴착 기계(직경 0.219 m기준)를 사용할 경우	D + 0.2 m
파이프 직경 0.5 m 일 경우	D + 0.5 m
파이프 직경 0.5~1.4 m	D + 0.8 m
트렌치 경사가 1:0.5보다 적고, 개별 파이프를 설치할 경우	D + 0.5 m
트렌치 경사가 1:0.5보다 적고, 파이프 묶음을 설치할 경우	D + 0.3 m

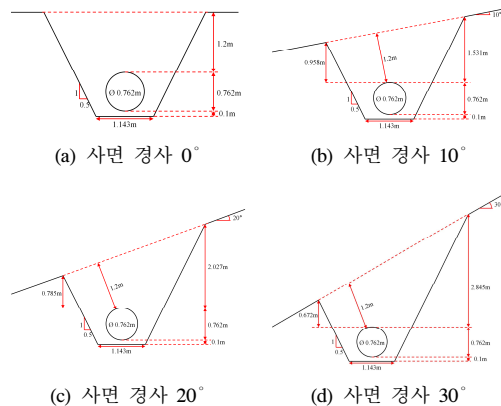


Fig. 1. Trench shape according to slope angle

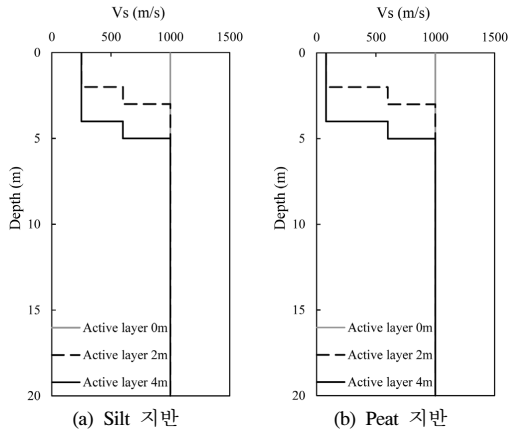


Fig. 2. Shear wave velocity versus depth at Yakutsk site(Russia)

하기 위하여 Yakutsk 지역의 여러 지질보고서를 바탕으로 전단파속도를 가정한 Park et al.(2014)의 논문을 인용하였다(Fig. 2)[6].

Yakutia 지역 지반의 상층은 유기질 성분의 실트, 실트질 사질토, 또는 토탄으로 이루어져있으며 깊이는 2 m 내외이다. 따라서 Park et al.(2014)은 Yakutsk 지역의 지반을 Silt와 Peat인 두 경우로 나누어 전단파속도를 분석하였다. 이 값을 바탕으로 전단파속도와 탄성계수의 관계를 이용하여 Yakutsk 지역의 지반 탄성계수를 구하였다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$$E = G_{max} 2(1 + \nu) \quad (2)$$

여기서,  $V_s$  = shear wave velocity,

$\nu$  = poisson's ratio = 0.33,

$\rho$  = density = 1,418(kg/m<sup>3</sup>)

(2) 온도분포

흙의 지반강도 정수 중 내부마찰각( $\phi'$ )은 다음 두 식으로 산정할 수 있다(Nater, P. et al., (2008))[7].

$$w_i = \left(-\frac{1}{5} \cdot T\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\phi' = \phi'_{initial} - \phi'_{initial} \cdot w_i^{2.6} \quad (4)$$

여기서  $w_i$ 는 용적얼음함량을 의미하고 온도

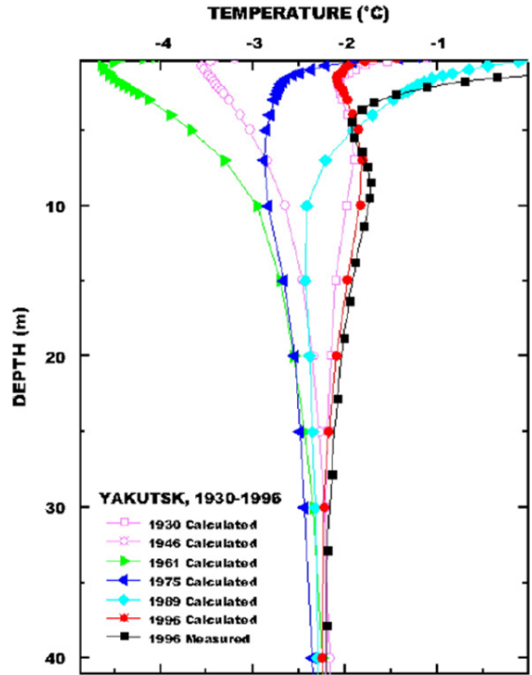


Fig. 3. Temperature versus depth at Yakutsk site (V.E. Romanovsky, 2007)

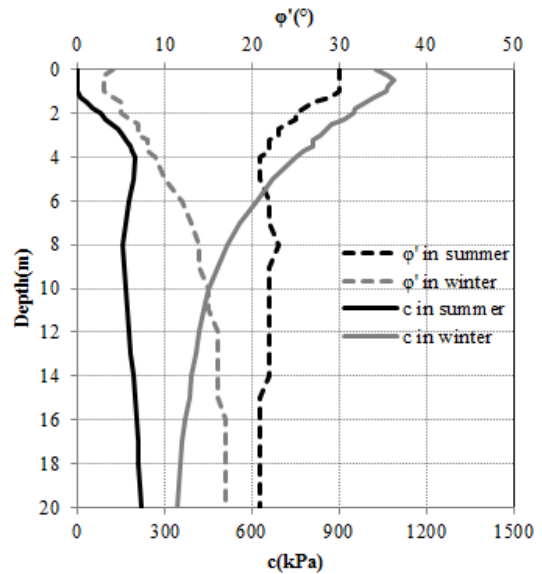
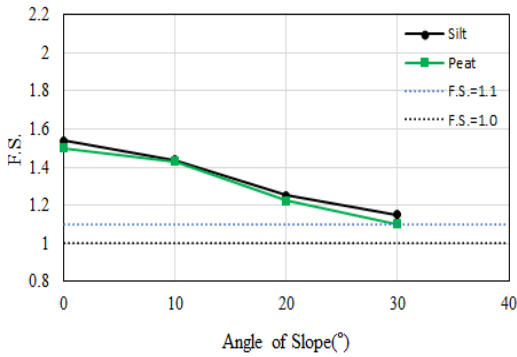


Fig. 4. Ground properties according to depth in summer and winter seasons at Yakutsk site(Russia)



**Fig. 5.** Factor of safety according to horizontal angle of slope.

( $T(^{\circ}C)$ )에 대한 함수로 표현된다. 용적얼음함량( $w_i$ )의 증가는 내부마찰각( $\phi'$ )을  $\phi' = \phi'_{initial}$ 에서  $\phi' = 0$ 까지 감소시킨다.  $\phi'_{initial}$ 은 동결되지 않은 일반적인 실트질 사질토의 내부마찰각인  $30^{\circ}$ 로 가정하였다.

본 논문에서는 특정 연도의 가장 따뜻했을 때와 가장 추웠을 때의 온도 분포를 대상으로 트렌치 안정성에 대한 연구를 하기 보다는 대상 기한을 넓게 하여 현재까지 기록된 최고 연평균 기록과 최저 연평균 기록을 조사해서 트렌치의 안정성을 분석하고자 하였다. 이에 1930년부터 1996년의 기온 데이터를 기준으로 작성된 Yakutsk 지역의 지반 기온 분포도(Fig. 3)를 참고하여, 최저 온도인 1961년의 평균기온과 최고기온인 1996년의 평균기온을 트렌치가 경험할 수 있는 겨울과 여름 기온으로 가정하고, 용적얼음함량( $w_i$ )을 구하였다[8].

점착력( $c$ )은 용적얼음함량( $w_i$ )과 비례한다. 다음 식을 이용하여 용적얼음함량( $w_i$ )으로 기준 온도(-2.1 $^{\circ}C$ )에 대한 점착력을 계산하여 온도별 점착력을 계산할 수 있다(Nater, P. et al., (2008))[7].

$$c_{(T=-2.1^{\circ}C)} = 534.93kPa \cdot w_i^{1.91} \tag{5}$$

$$c = -\frac{c_{(T=-2.1^{\circ}C)}}{2.1} \cdot T \tag{6}$$

식 (3)~(6)을 이용하여 계산한 Yakutsk 지역의 지반 물성은 Fig. 4.와 같다.

### III. 수치해석

#### 3.1. 개요

수치해석을 이용한 사면의 해석 방법은 크게 한계 평형법(Limit Equilibrium Method)과 유한요소해석(Finite Element Method)으로 구분되며 유한요소해석 방법 중에는 강도감소법(Strength Reduction Method)과 응력해석법(Stress Analysis Method)이 있다.

이 중 강도감소법은 사면의 파괴활동에 대한 가정 없이 파괴과정을 모사할 수 있는 방법이며 3차원 문제에도 적용할 수 있어 본 연구에서는 강도감소법을 이용하여 트렌치의 안정성을 분석하였다.

강도감소법은 비선형 유한요소법과 연동된 강도감소법으로, 본 해석에서는 Newton-Raphson법을 이용하여 비선형 해석의 해를 계산하였다. 또한 사면안정해석의 정확도를 위하여 안전율의 정확도는 0.005로 설정하였으며 안전율의 최대값은 6으로 설정하였다.

트렌치 해석을 위한 경계조건 설정 시 터널 해석시의 경계조건 범위를 참조하여 수평방향으로 최소 3D, 수직방향으로 최소 2H의 거리를 두어 경계조건을 설정하였다. 종방향 사면의 경우 트렌치의 길이는 최소 6.2 D(20 m) 이상 거리를 두어 안정성 해석을 수행하였다.

#### 3.2. 해석 Case

지반 물성은 Fig. 2와 Fig. 4를 이용하여 Silt와 Peat, 여름과 겨울로 구분하였으며 횡방향 사면의 경사를  $0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}, 30^{\circ}$ 로, 종방향 사면의 경사를  $20^{\circ}, 30^{\circ}, 40^{\circ}$ 로 설정하였다. 이때 종방향 사면 해석에서는 트렌치 모사 유무에 따른 사면의 안전율을 비교하기 위하여 트렌치를 모사하지 않았을 경우도 분석하였다.

#### 3.3. 해석 결과

본 연구는 시공중 트렌치의 안정성 평가를 목적으로 하므로 건설공사 비탈면 설계기준(2011)에 명시되어 있는 단기시의 안전율인 1.1을 기준으로 하였다[9].

**Table 2.** Factor of safety according to horizontal angle of slope

Angle of Slope	Factor of Safety	
	Silt	Peat
$0^{\circ}$	1.538	1.500
$10^{\circ}$	1.438	1.431
$20^{\circ}$	1.250	1.225
$30^{\circ}$	1.150	1.100

(1) 여름

수치해석 결과 횡방향 사면의 경사가 높아질수록 사면의 안전율은 낮아지는 것을 확인하였으며 사면의 경사가 30°를 초과할 경우에는 사면의 안정성 확보가 다소 어려울 것으로 판단되었다. Silt 지반과 Peat 지반의 해석 결과는 큰 차이가 나지 않았다.

사면 내부의 전단응력과 사면 토질의 전단강도가 같은 안전율 1과 시공시 사면의 안전율 기준인 1.1을 가로 점선으로 표시하였다(Fig. 5).

수치해석 결과의 최대전단변형률을 통하여 예상 파괴면을 예측해보면, 모든 Case에서 깊이 1 m부근을 경계로 사면의 예상 파괴면이 나타났다(Fig. 6). 이는 Yakutsk 지역이 여름일 때 지표면의 온도는 영상이고 깊이 1 m부근 이하에서는 지반의 온도가 영하로 떨어져(Fig. 3) 지반 내 용적얼음함량이 존재하게 되어 토

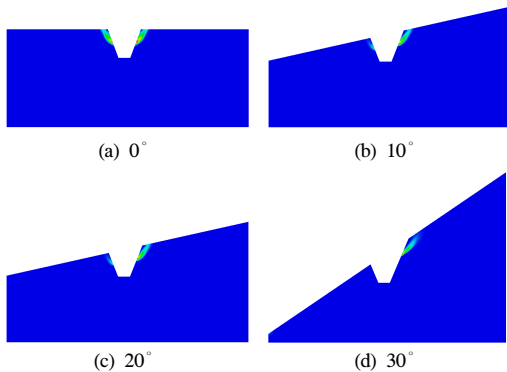


Fig. 6. The expected failure surface according to lateral slope angle (E-max. shear strains)

질의 접착력이 생기는 것과 같은 효과가 생기기 때문에 그 부근을 기점으로 원호 파괴가 나는 것으로 분석되었다(Fig. 6).

종방향 사면의 경사에 따른 해석결과에서도 횡방향 사면의 결과와 동일하게 사면의 경사가 높아질수록 사면의 안전율은 낮아지는 것을 확인하였다(Table 3, Fig. 7).

트렌치가 없는 경우의 사면에서는 트렌치 횡방향의 전단변형률이나 변위가 거의 생기지 않는다. 따라서 종방향 사면의 경사가 트렌치에 미치는 영향을 분석해 보기위하여 종방향 사면에서 트렌치가 있을 경우와 트렌치가 없을 경우를 비교분석하였다. 그 결과 사면의 안전율은 사면의 경사에 따라 다르게 나타났다(Table 3, Fig. 7). 사면의 경사가 낮을 때에는 트렌치 부근의 파괴가 일어나서 트렌치가 있는 경우에 안전율이 더 낮게 나온 것으로 판단되었으며, 사면의 경사

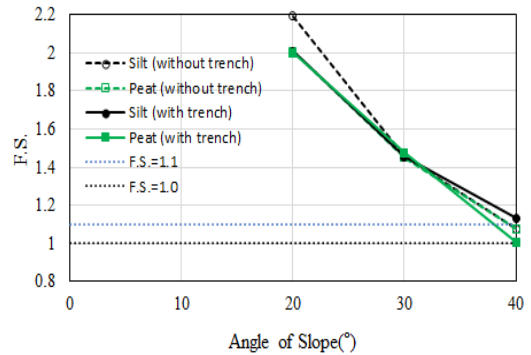


Fig. 7. Factor of safety according to vertical angle of slope.

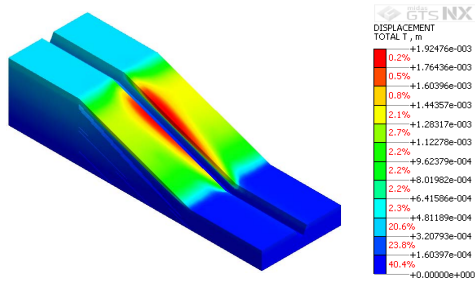
Table 3. Factor of safety according to vertical angle of slope

Angle of Slope	Factor of Safety			
	Silt		Peat	
	without trench	with trench	without trench	with trench
20°	2.192	2.006	2.007	2.000
30°	1.454	1.453	1.450	1.475
40°	1.075	1.125	1.078	1.006

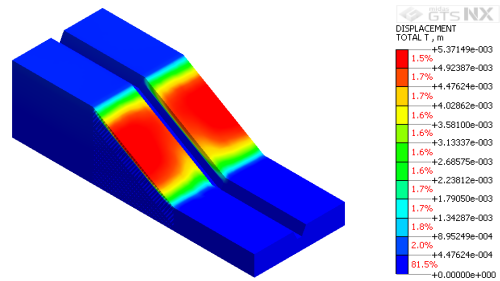
가 높을 때에는 트렌치 부근의 파괴보다는 사면 전체의 원호파괴가 주를 이루어 트렌치 부피만큼의 흙에 대한 중력이 더 작은 '트렌치가 있는 경우'의 안전율이 더 높은 것으로 판단되었다.

Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)를 비교해보면 사면의 경사가 낮을 때에는 트렌치 방향으로 변위가 일어나지만 사면의 경사가 높을 때에는 트렌치 방향이 아닌 사면의 경사방향으로 변위가 발생하는 것을 볼 수 있다.

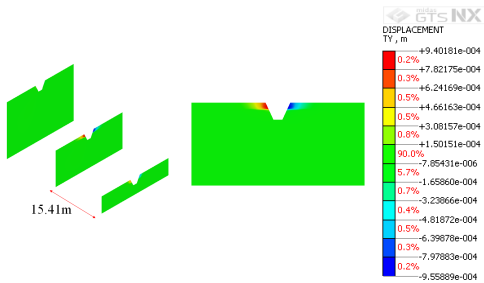
사면의 경사가 낮은 경우에는 트렌치 횡방향의 수평 변위 및 수평 전단변형률의 최대 값이 사면아래 시작점으로부터 비교적 멀리 형성되고 사면의 경사가 높은 경우에는 비교적 가까이 형성됨을 알 수 있다(Fig. 8(b)-(c), Fig. 9(b)-(c)). 트렌치 시공중 지반의 융해나 기타 여건에 의하여 트렌치의 안정성이 확보되지 못할 경우에는 사면의 경사가 높을수록 취약부의 위치가 사면 시작점에 가까워 질 것임을 알 수 있다.



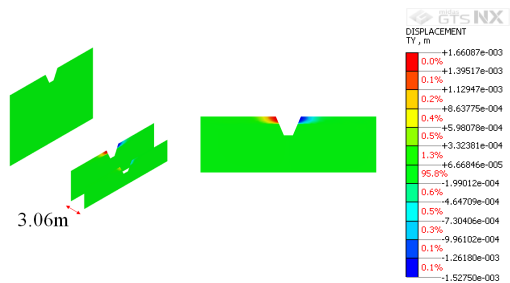
(a) Total displacement



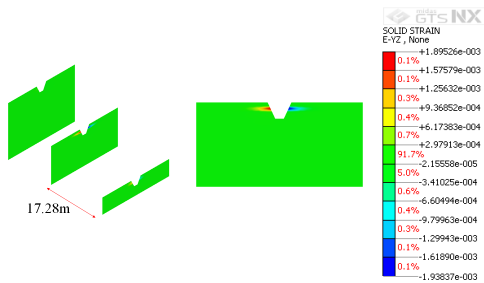
(a) Total displacement



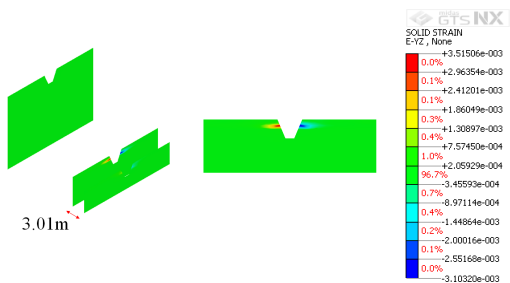
(b) Horizontal displacement



(b) Horizontal displacement



(c) Y-Z shear strain



(c) Y-Z shear strain

**Fig. 8.** Results of slope stability analysis in summer(Silt, 20°)

**Fig. 9.** Results of slope stability analysis in summer(Silt, 30°)

(2) 겨울

Yakutsk 지역의 지반 온도 분포(Fig. 3)를 이용하여 Yakutsk 지역의 겨울 기온 분포에 따른 지반의 점착력과 내부마찰각(Fig. 4)을 계산하여 해석을 수행하였다. 강도감소법의 안전율 해석 범위는 너무 클 경우 해석이 무의미하므로 최대 값을 6으로 설정하였으며, 겨울에 해당되는 모든 Case의 해석결과 안전율이 모두 6이상으로 나타났다.

대표적으로 중방향사면(30°)을 따라 굴착하는 Silt

지반에서의 트렌치 해석결과를 보면, 변위는 사면의 파괴를 일으키는 슬라이딩이나 원호파괴의 형태가 아니라 중력으로 인한 변위만 나타났으며, 최대전단변형률은 여름과 같이 깊이 1 m부근에 분포하였지만 그 값은 여름의 1/100 정도로 매우 안정함을 확인하였다(Fig. 10).

따라서 겨울철의 트렌치 안정성은 특수한 외부 하중이나 급격한 온도변화가 없을 경우에는 사면 경사에 따라 안전성의 문제는 없을 것으로 판단되었다.

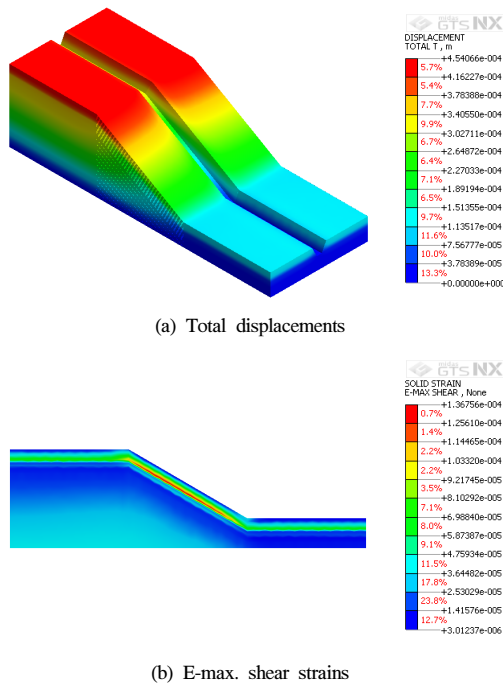


Fig. 10. Results of slope stability analysis in winter

#### IV. 결론

Yakutsk 지역의 깊이별 지반 온도 분포와 지반주상도를 이용하여 파이프라인 시공 시 트렌치의 안전성을 사면의 경사에 따라 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 횡방향 또는 중방향 사면의 경사가 높아질수록 사면의 안전율은 낮아지는 것을 확인하였다.
- (2) 지반 깊이별 기온 온도 분포 중 영하의 온도가 시작되는 깊이에서 사면의 예상파괴면이 존재할 것으로 예상할 수 있다.
- (3) 사면의 경사가 낮을 때에는 트렌치 방향으로 변위가 일어나지만 사면의 경사가 높을 때에는 트렌치 방향이 아닌 사면의 경사방향으로 변위가 발생하는 것을 볼 수 있다.
- (4) 중방향 사면의 경사가 트렌치에 미치는 영향을 분석해 보면, 중방향 사면의 경사가 낮을 때(20°)에는 트렌치 부근의 파괴가 일어날 가능성이 높지만 중방향 사면의 경사가 높을 때(30°, 40°)에는 트렌치 부근의 파괴 보다는 사면 전체의 원호파괴가 주를 이루는

것으로 분석되었다.

(5) 겨울철 지반은 영하의 온도에서 지반 공극 내 얼음 발생으로 인하여 점착력이 발생하는 효과가 있어, 특수한 외부 하중이나 급격한 온도변화가 없을 경우에는 사면 경사 0~40° 에서 안전성의 문제는 없을 것으로 판단되었다.

향후 트렌치의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 시공 변수를 추가적으로 검토하여 동토 파이프라인 매설을 위한 개착식 트렌치 공사 중 트렌치의 안정성에 대한 연구를 지속하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(16FIP-B067108-04)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- [1] 산업통상자원부, KGS FS451, (2015)
- [2] BSi, BS EN 15001-1, (2009)
- [3] ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМИТЕТ СССР, СНиП3.02.01-87, (1987)
- [4] The Ministry of Fuel and Power Industry of the Russian Federation, SP 34-116 - 97, (1997)
- [5] Technormativ Ltd, STO Gasprom 2-2.1-249-2008, (2009)
- [6] Park, D. H., Kwak, H. J., Kang, J. M., and Lee, Y. G., "Seismic Amplification Characteristics of Eastern Siberia", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 30(10), 67-80, (2014)
- [7] Nater, P., Arenson, L. U., Springman, S. M., "Choosing Geotechnical Parameters for Slope Stability Assessments in Alpine Permafrost Soils", *the Ninth International Conference on Permafrost*, 1, pp.1261-1266, (2008)
- [8] Romanovsky, V. E., Sazonova, T. S., Balobaev, V. T., Shender, N. I., and Sergueev, D. O., "Past and recent changes in air and permafrost temperatures in eastern Siberia", *Global and Planetary Change*, 56(3), 399-413, (2007)
- [9] 국토해양부, 건설공사 비탈면 설계기준, (2011)