

동상민감성 판정 기준 신뢰성에 관한 연구

Evaluation on the Reliability of Frost Susceptibility Criteria

진 현 우¹⁾ · 유 병 현²⁾ · 이 장 근[†]

Hyunwoo Jin · Byunghyun Ryu · Janguen Lee

Received: October 18th, 2017; Revised: October 26th, 2017; Accepted: November 20th, 2017

ABSTRACT : Structural instability and damage are caused by frost heave during the winter when atmospheric temperature maintains below 0°C. Frost heave is the most representative engineering characteristics of frozen ground and there are various frost susceptibility criteria. Frost susceptibility criteria can be roughly divided into three categories. First, frost susceptibility is determined from particle size distribution, which is practically useful and many countries are adopting. In this paper, several particle size distributions (PSDs) are applied to the frost susceptibility criteria but PSD seems to be not enough to determine whether soils are frost susceptible. Second, it is judged from laboratory frost heave testing results. Laboratory frost heave tests were performed with newly developed thermal controlled triaxial cell and the reliability of frost susceptibility criteria is evaluated. New testing apparatus and method are suitable to meet the existing frost susceptibility criteria. Third, it is compositive frost susceptibility criteria envelope including the particle size distribution, soil classification, and frost heave test. The compositive frost susceptibility criteria envelope should be supplemented based on additional data on various soil types.

Keywords : Frozen ground, Frost heave, Frost susceptibility criteria, Frost heave test

요 지 : 구조물은 영하의 온도가 유지되는 겨울철에 동상으로 인해 크고 작은 피해가 발생한다. 동상은 동토지반의 가장 대표적인 공학적 특성으로 다양한 동상민감성 판정법이 존재한다. 동상민감성 판정법은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 동상민감성은 입도분포를 이용하여 결정된다. 많은 국가들이 지반의 입도분포를 이용해 비교적 간편한 동상민감성 판정법을 현장에 적용하고 있다. 그러나 본 논문에서 몇 가지 시료의 입도분포를 이용해 동상민감성 판정 기준에 적용한 결과에 따르면 입도분포로 토질의 동상민감성을 판정하기에는 다소 무리가 있다. 두 번째로는 동상시험에 의한 동상민감성 판정법이다. 새롭게 개발된 온도제어형 삼축셀을 이용한 동상 실내시험을 통해 동상민감성 기준 신뢰성을 분석하였다. 새롭게 개발된 장비와 시험방법은 기존에 제시하고 있는 동상민감성 판정 기준을 충족하는 것으로 판단되었다. 세 번째로는 복합적인 동상민감성 판정법으로 흙의 입도분포, 분류, 그리고 동상시험을 고려한 복합적인 동상민감성 판정 기준 그래프를 제시하고 있다. 본 논문에서 몇 가지 시료에 대해 복합적인 동상민감성 판정 기준에 적용한 결과 다양한 토질에 대한 추가적인 데이터를 바탕으로 복합적인 동상민감성 판정 그래프를 보완해야 할 것으로 판단되었다.

주요어 : 계절 동토, 동상, 동상민감성 판정 기준, 동상시험

1. 서 론

물은 분자의 양극성으로 인해 동결(freezing)될 때 9%의 부피팽창이 발생한다(Lackner et al., 2005). 영하의 온도가 지속될 때 흙 속에 존재하는 물이 얼음으로 변화하는 동결 현상이 발생하며 동결지역으로 물이 공급되며 아이스렌즈(ice lense)가 형성되고, 아이스렌즈 형성에 의해 지표면이 팽창하는 동상(Frost heave)현상이 발생한다(Cwiakala et al., 2016). 동상은 동토지반의 가장 대표적인 공학적 특성이다. 계절 동토지역(Seasonal frozen area)으로 분류되고 있는 우리나라에서도 영하의 온도가 지속되는 겨울철에 크고 작은

피해가 발생한다. 최근 들어 이상한파가 더욱 빈번하게 발생함에 따라 지반의 동상에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 이에 따라 Song & Kim(2004) 등은 동상에 따른 지중 매설 파이프라인의 피로수명에 대한 연구를 수행했으며, Shin et al.(2014) 등은 동결온도에 따른 상수도관의 거동에 관한 연구를 수행했다. Kang et al.(2013) 등은 불포화 지반의 동상 팽창률 예측을 위한 연구를 수행했으며, Choi(2011) 및 Shin et al.(2009, 2013) 등은 실내 동상실험장비 및 시스템 개발을 위한 연구를 수행했다. 하지만 국내에서는 아직까지 동상현상에 대한 실험적 연구가 부족할 뿐 아니라 표준화된 동상민감성 판정법도 존재하지 않는 실정이다.

1) Department of Smart City & Construction Engineering, Korea University of Science & Technology

2) Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Smart City & Construction Engineering, Korea University of Science & Technology (Corresponding Author : jlee@kict.re.kr)

국외의 경우 다양한 동상민감성을 판정 기준을 제시하고 있으며 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로는 입경에 의한 동상민감성 판정 기준이다. 대표적으로 Casagrande(1931)와 캐나다 교통부(Armstrong & Csathy, 1963)에서 제시하는 기준이다. 두 번째로는 표준화된 동상시험을 통한 동상민감성 판정 기준이 제시되어 있으며, 대표적으로 영국의 TRRL(Croney & Jacobs, 1967), 미국의 ASTM(ASTM D5918, 2013), 일본의 JGS(JGS0172, 2003)이 있다. 마지막으로 미국 육군 공병대 CRREL(Cold Regions Research and Engineering Laboratory)에서 제시하고 있는 복합적인 동상민감성 판정 기준으로 입도분포, 통일분류법(USCS, Unified Soil Classification System), 그리고 동상시험을 모두 고려한다(Kaplar, 1965; 1971; 1974; Chamberlain, 1981a; 1981b; 1987).

본 논문에서는 국내에서 개발한 온도제어형 삼축셀을 이용하여 동상시험을 수행하고 국외에서 제시하는 동상민감성 판정 기준에 대입해 신뢰성에 대해 판단한 후 한국형 동상민감성 판정 기준 정립 방향을 제시하고자 한다.

2. 국외 동상민감성 판정 기준

2.1 입도분포에 의한 동상민감성 판정 기준

지반에서 얼음분리(Ice segregation) 메커니즘에 관한 연구(Taber, 1930)가 발표된 이후로 동상민감성 판정을 위한 많은 방법들이 제안되고 있다(Chamberlain, 1981a). 그중 지금까지 가장 널리 사용되어왔고 가장 간단한 동상민감성 판정 기준은 입자크기에 기초한 판정법으로, 미립자를 함유한 지반이 동상에 민감하다고 알려져 있다(Johnson et al., 1975).

2.1.1 Casagrande's criterion (Casagrande, 1931)

Casagrande(1931)는 0.02mm 통과량 및 균등계수($C_u=d_{60}/d_{10}$)로 동상민감성을 판정한다. Casagrande가 제안한 기준을 적용하기 위해서는 No. 200체를 통과한 입자들의 입도분포곡선 및 0.02mm 통과량 백분율을 계산하기 위해 비중계시험을 수행해야 한다. Casagrande는 물 공급이 충분한 동결 조건에서 비균등 한 토질($C_u>5$, 0.02mm보다 작은 입자를 3% 이상 함유) 및 매우 균등한 토질($C_u<5$, 0.02mm보다 작은 입자를 10% 이상 함유)에서 얼음분리(Ice segregation)가 발생할 것이라고 예측했다. 그러나 0.02mm보다 작은 입자를 1% 미만 함유한 토질에서는 지하수위가 동결 깊이(Frost line)만큼 높아도 얼음분리(Ice segregation)가 발생하지 않을 것이라고 예측했다.

2.1.2 Canadian Department of Transport

캐나다는 주마다 입경에 의한 동상민감성 판정 기준을 제시하고 있으며 캐나다 교통부(Canadian Department of Transport)에서 최종적으로 Fig. 1과 같은 입도분포곡선을 제시하고 있다. Fig. 1에서는 동상민감성을 4단계(0%, 10%, 15%, 45%)로 분류하고 있다(Armstrong & Csathy, 1963).

2.2 동상시험에 의한 동상민감성 판정 기준

동상시험은 흙의 동상민감성을 판단할 수 있는 가장 직접적인 방법이며, 영국 TRRL(Transport and Road Research Laboratory), 미국 ASTM(American Society for Testing Methods), 일본 JGS(Japan Geotechnical Society) 등은 표준화된 동상시험 방법 및 동상시험 결과를 활용한 동상민감성 판정 기준을 제시하고 있다(Ryu et al., 2016). 동상률(Heaving rate, mm/hr, mm/day) 및 동상비(heave ratio, %)로 동상민감성을 판정하며 각각의 판정 기준은 Table 1에 정리된 바와 같다.

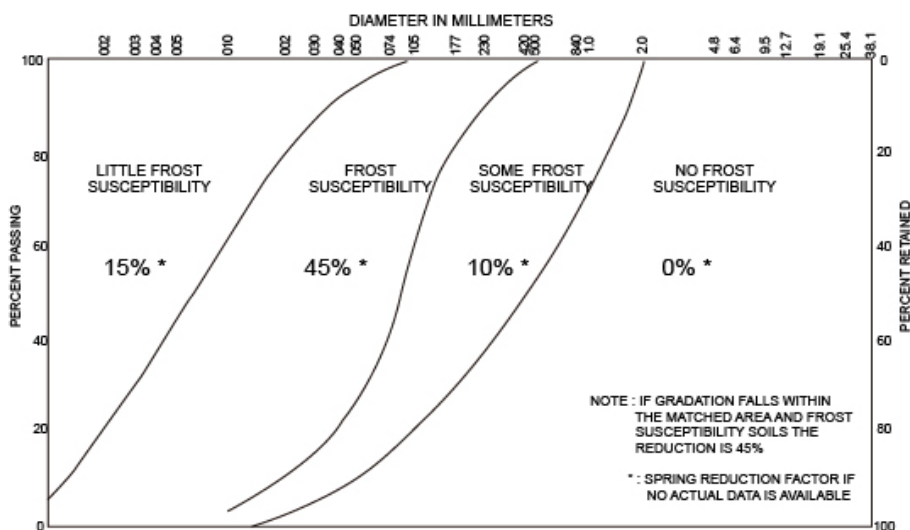


Fig. 1. Frost susceptibility criteria of Canadian Department of Transport (Armstrong & Csathy, 1963)

Table 1. Frost susceptibility criteria of TRRL, ASTM, and JGS

	TRRL	ASTM	JGS
Frost susceptibility criteria	Heaving rate (mm/hr) heaving amount (%)	Heaving rate (mm/day)	Heaving rate (mm/day)

Table 2. Frost susceptibility criteria of TRRL (Croney & Jacobs, 1967)

Judgment	Frost heave ratio(%)	Frost heave rate (mm/hr)
Negligible frost susceptibility (NFS)	Less than 12	Less than 0.375
Possibly frost susceptibility (PFS)	Higher than or equal to 12	Higher than or equal to 0.375

Table 3. Frost susceptibility criteria of ASTM (ASTM D5918, 2013)

Frost susceptibility classification	Symbol	8hr heave rate (mm/day)
Negligible	NFS	Less than or equal to 1
Very low	VL	Greater than 1 less than or equal to 2
Low	L	Greater than 2 less than or equal to 4
Medium	M	Greater than 4 less than or equal to 8
High	H	Greater than 8 less than or equal to 16
Very high	VH	Greater than 16

2.2.1 TRRL (Transport and Road Research Laboratory)

영국 TRRL의 동상민감성 판정은 동상비를 기준으로 할 경우 동상비가 12%보다 작을 경우 동상민감성을 무시할 수 있는 수준(Negligible frost susceptibility), 12% 이상일 경우 동상에 민감(Possible frost susceptibility)하다고 판정한다. 동상률을 기준으로 할 경우 동상률이 0.375mm/hr보다 작을 경우 동상민감성을 무시할 수 있는 수준(Negligible frost susceptibility), 0.375(mm/hr) 이상일 경우 동상에 민감(Possible frost susceptibility)하다고 판정한다(Table 2).

2.2.2 ASTM (American Society for Testing and Materials)

미국 ASTM에서는 2번의 동결융해를 수행하며 초기 8시간 동안의 동상률(mm/day)을 기준으로 동상민감성을 판정한다. 동결 시 2번의 동상률이 일정하지 않을 경우 현장 조건에 따라 둘 중 하나의 값을 선택한다. 만약 현장이 동결융해가 매우 빈번하게 일어나고 지하수위가 가까운 지역이라면, 동상률은 두 번째 동결에서의 값을 선택한다. 만약 현장이 겨울 동안 동결 침투가 더 연속적이고 지하수위에 도달하지 않는 심한 겨울 기후인 경우, 8시간 동안의 동상률은 첫 번째 동결에서의 값을 선택한다. 동상민감성 판정은 Table 3에 나타난 바와 같이 동상률이 1mm/day보다 작을 때 동상민감성을 무시할 수 있는 수준(NFS), 1-2mm/day일 때 매우 낮음(VL), 2-4mm/day일 때 낮음(L), 4-8mm/day일 때 보통(M), 8-16mm/day일 때 높음(H), 16mm/day 이상일 때 매우 높음(VH)으로 판정한다(ASTM D5918, 2013).

Table 4. Frost susceptibility criteria of JGS (JGS 0172, 2003)

Judgment	Frost heave rate (mm/hr)
Low	less than 0.1
Medium	0.1 - 0.3
High	over 0.3

2.2.3 JGS (Japan Geotechnical Society)

일본 JGS는 Table 4에 나타난 바와 같이 동상률(Frost heave rate, mm/hr)로 동상민감성을 판정한다. 동상률이 0.1mm/hr보다 작을 경우 낮음(Low), 0.1-0.3mm/hr일 때 보통(Medium), 0.3mm/hr 이상을 경우 높음(High)으로 동상민감성을 판정한다(JGS 0172, 2003).

2.3 미국 육군 공병대 CRREL의 복합적인 동상민감성 판정 기준

미국 육군 공병대(U.S. Army Corps of Engineers) CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory)의 동상민감성 판정법은 3단계를 거친다. 첫 번째는 0.02mm보다 작은 입경을 가진 흙 입자의 비율, 두 번째는 통일분류법(USCS, Unified Soil Classification System)에 의한 토질 분류, 그리고 세 번째는 동상시험이다. CRREL은 0.02mm보다 작은 입경을 가진 흙 입자의 비율과 통일분류법으로 동상그룹을 나눴다(Table 5). 4개의 그룹으로 나뉘었으며(F1, F2, F3, F4), 동상민감성은 F1이 가장 낮으며 F4로 갈수록 커진다. 동상민감성은 동상시험에 의해 분류한다. Table 6에 나타난 바와 같이 동상률이 0.0-0.5(mm/day)일 때 동상민감성

Table 5. U.S. Army Corps of Engineers frost design soil classification system (Chamberlain, 1981b)

Frost susceptibility classification*	Frost group	Kind of soil	Percentage finer than 0.02 mm by weight	Typical USCS soil types***
NFS	None	Gravels	0-1.5	GW, GP
		Sands	0-3	SW, SP
Possibly frost susceptible**	?	Gravels	1.5-3	GW, GP
		Sands	3-10	SW, SP
Very low to high	F1	Gravels	3-10	GW, GP, GW-GM, GP-GM
Medium to high	F2	Gravels	10-20	GM, GM-GC, GW-GM, GP-GM
Negligible to high		Sands	3-15	SW, SP, SM, SW-SM, SP-SM
Medium to high	F3	Gravels	>20	GM, GC
Low to high		Sands except very fine silty sands	>15	SM, SC
Very low to very high		Clays, PI>12	-	CL, CH
Low to very high	F4	All silts	-	ML, MH
Very low to high		Very fine silty sands	>15	CM
Low to very high		Clays, PI<12	-	CL, CM-ML
Very low to very high		Varved clays and other fine grained, banded sediments	-	CL and ML; CL, ML, and SM; CL, CH, and ML; CL, CH, HL, and SM

* Based on laboratory frost heave tests

** Requires laboratory frost heave test to determine frost susceptibility

*** USCS Soil type

GW : well-graded gravels, GP : poorly graded gravels, GM : silty gravels, GC : clayey gravels

SW : well-graded sands, SP : poorly graded sands, SM : silty sands, SC : clayey sand

ML : inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity

CL : inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays

OL : organic silts and organic silty clays of low plasticity

MH : inorganic silt, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts

CH : inorganic clays of high plasticity, fat clays

Table 6. Frost susceptibility criteria of the U.S. Army Corps of Engineers (Johnson et al., 1975)

Average rate of heave (mm/day)	Frost susceptibility classification
0.0 - 0.5	Negligible
0.5 - 1.0	Very low
1.0 - 2.0	Low
2.0 - 4.0	Medium
4.0 - 8.0	High
> 8.0	Very high

을 무시할 수 있는 수준(Negligible), 0.5-1.0(mm/day)일 때 매우 낮음(Very low), 1.0-2.0(mm/day)일 때 낮음(Low), 2.0-4.0 (mm/day)일 때 중간(Medium), 4.0-8.0(mm/day)일 때 높음 (High), 8.0(mm/day) 이상일 때 매우 높음(Very high)으로 판정한다. 이를 바탕으로 복합적인 동상민감성 판정 기준 곡선은 Fig. 2와 같다.

3. 입경에 의한 동상민감성 판정 기준 적용

3.1 시료물성

주문진표준사(Joomunjin sand), 화강풍화토(Weathered granite

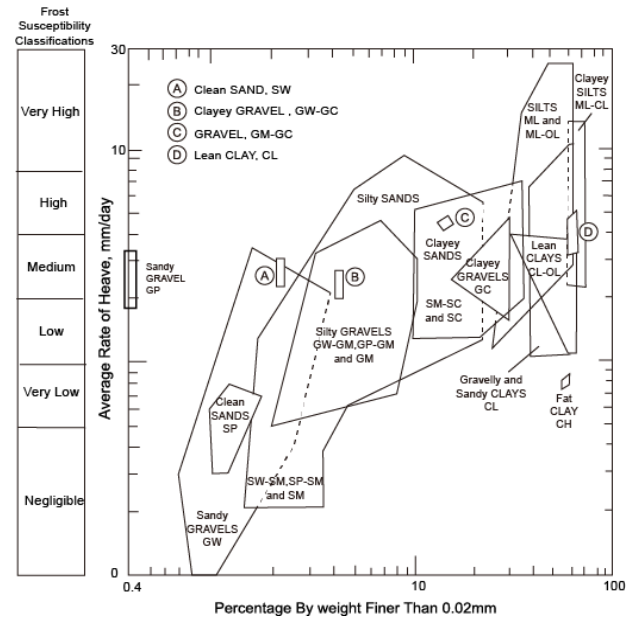


Fig. 2. Composite frost susceptibility envelope (Johnson et al., 1975)

soil), 인공토양(Artificial soil) 1, 2의 입도분포곡선은 Fig. 3과 같다. Table 7에 나타낸 바와 같이 주문진표준사의 비중은 2.65이며 통일분류법(USCS)에 의해 입도분포가 균일한 모래(SP)로 분류되며, 화강풍화토의 비중은 2.56이며 점토질

Table 7. Engineering properties of soil samples

Soil	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	Uniformity coefficient, C _u	Coefficient of curvature, C _c	Specific gravity, G _s	USCS
Joomunjin sand	0.36	0.44	0.48	1.33	1.12	2.65	SP
Weathered granite soil	0.047	0.11	0.046	9.79	0.46	2.56	SC
Artificial soil 1	0.27	0.41	0.49	1.81	1.27	2.63	SP
Artificial soil 2	0.25	0.39	0.48	1.92	1.27	2.62	SM

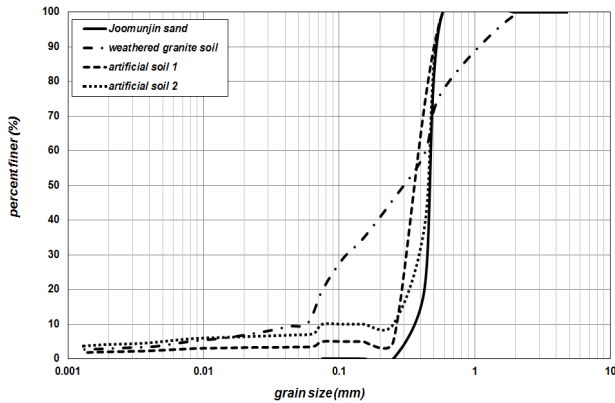


Fig. 3. Particle size distribution of soil samples

모래(SC)로 분류된다. 인공토양 1은 중량비를 기준으로 주문진표준사 95%와 카올리나이트 5%, 인공토양 2는 주문진표준사 90%와 카올리나이트 10%를 혼합해 만들었다. 인공토양 1, 2의 비중은 각각 2.63, 2.62이고 통일분류법(USCS)에 의해 각각 입도분포가 균일한 모래(SP), 실트질모래(SM)로 분류된다.

3.2 Casagrande 기준

Casagrande(1931)는 0.02mm 통과량 및 균등계수(C_u)로 동상민감성을 판정한다. 물 공급이 충분한 조건에서 비균등토질(C_u>5, 0.02mm보다 작은 입자 3% 이상 함유) 또는 매우 균등한 토질(C_u<5, 0.02mm보다 작은 입자 10% 이상 함유)인 경우를 동상에 민감하다고 판정하는데 유일하게 화강풍화토만이 비균등한 토질로 동상에 민감한 것으로 분석된다. 또한 동상이 전혀 발생하지 않는 조건인 0.02mm 통과백분율이 1% 미만인 경우는 주문진표준사가 해당되고 인공토양 1과 2는 판정이 불가한 것으로 분석된다(Table 8).

3.3 Canadian Department of Transport 기준

캐나다 교통부(Canadian Department of Transport)에서 제시하는 기준에 의한 주문진표준사, 화강풍화토, 인공토양 1, 2의 입계에 의한 동상민감성은 Fig. 4와 같이 분류된다. 화강풍화토의 경우 동상에 다소 민감(Some frost susceptibility,

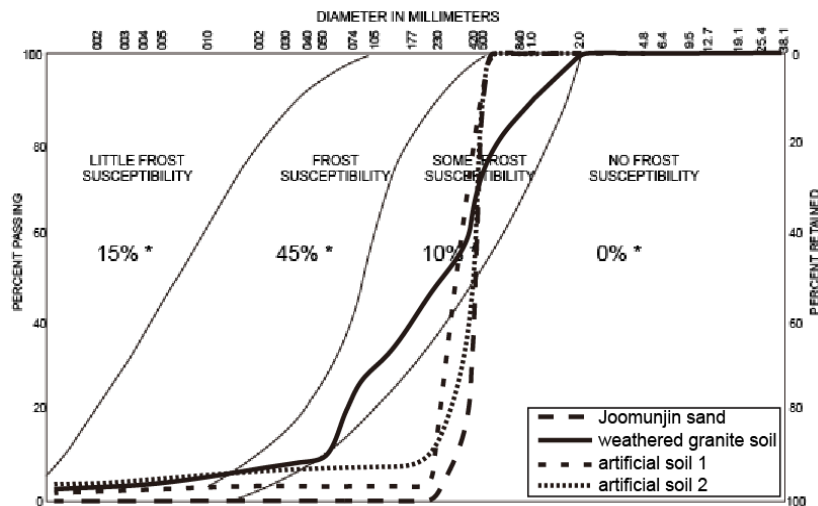


Fig. 4. Frost susceptibility judgement by Canadian Department of Transport's criteria

Table 8. Frost susceptibility based on Casagrande's criteria

	Joomunjin sand	Weathered granite soil	Artificial soil 1	Artificial soil 2
C _u	1.33 (<5)	9.79 (>5)	1.81 (<5)	1.92 (<5)
Passing 0.02 mm (%)	0 (<10)	6.75 (>3)	3.25 (<10)	6.4 (<10)
Frost susceptibility	x	o	-	-

10%)한 토질로 분류된다. 주문진표준사, 인공토양 1, 2의 경우 동상에 민감하지 않음(No frost susceptibility, 0%)과 동상에 다소 민감(Some frost susceptibility, 10%)한 토질 범위에 걸쳐있다.

4. 동상시험에 의한 동상민감성 판정 기준 적용

동상시험은 Ryu(2016) 등이 정립한 동상실험방법을 토대로 동결방향을 하부에서 상부로 설정하고 주변온도에 의한 영향을 최소화하기 위해 주변부 온도를 1°C로 설정한다. 또한 상부 플레이트의 O-ring과 몰드 내벽과의 마찰력을 방지하기 위해 O-ring을 제거하고 상부 플레이트에 물을 채워 수분을 공급해준다.

4.1 시험조건

Table 9와 같이 주문진표준사, 화강풍화토, 인공토양 1, 2를 직경 100mm, 높이 100mm로 준비하였다. 건조단위중량은 각각 15.79kN/m³, 16.72kN/m³, 15.94kN/m³, 16.15kN/m³이며 공극비는 각각 0.65, 0.50, 0.62, 0.59다. 상부배수 조건으로 실험을 수행하였으며 동결방향은 하부(-10°C)에서 상부(3°C)로 설정하고 시료 주변부 온도는 1°C로 설정하였다. 각 시료에 실제로 전달된 온도는 주문진표준사의 경우 상부 2.9°C, 하부 -8.9°C, 화강풍화토의 경우 상부 2.9°C, 하부 -9.1°C, 인공토양 1의 경우 상부 2.8°C, 하부 -8.7°C, 인공토양 2의 경우 상부 2.8°C, 하부 -9.0°C로 나타났다.

4.2 시험결과

각 시료의 시간에 따른 동상량은 Fig. 5와 같은 모양으로

나타났다. 최종 동상량은 주문진표준사는 1.27mm, 화강풍화토는 31.18mm, 인공토양 1은 16.02mm, 인공토양 2는 18.88mm 발생했다. ASTM에서 사용하고 있는 동상민감성 판정 기준인 동결 초기 8시간을 기준으로 동상률(Heaving rate) 및 동상비(Heaving ratio)를 계산했다(Table 10). 주문진표준사의 경우 동상률은 0.03mm/hr(0.76mm/day)로 동상률은 1.27%로 계산된다. 화강풍화토의 경우 동상률은 1.66mm/hr(39.79mm/day)로 동상률은 31.18%로 계산된다. 인공토양 1의 경우 동상률은 1.37mm/hr(32.78mm/day)로 동상률은 16.02%로 계산된다. 인공토양 2의 경우 동상률은 1.57mm/hr(37.65mm/day)로 동상률은 18.88%로 계산된다.

4.3 동상민감성 판정

주문진표준사, 화강풍화토, 인공토양 1, 2의 동상시험 결과를 동상민감성 판정 기준(TRRL, ASTM, JGS)에 적용했다(Table 11). TRRL 동상률(Frost heave rate, mm/hr) 기준을 적용할 경우 주문진표준사만 동상민감성을 무시할 수 있는 수준(NFS)으로 판단되었으며 그 외 나머지 시료(화강풍화

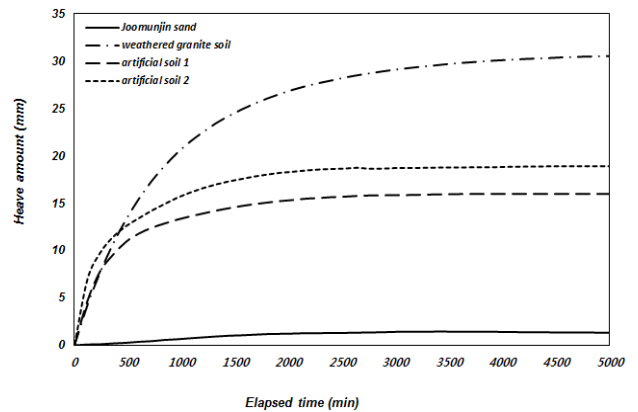


Fig. 5. Frost heave amount of soil samples

Table 9. Conditions for frost heave test

Soil	Dry unit weight, γ_d (kN/m ³)	Specific gravity, G_s	Void ratio, e	Drainage condition	Freezing direction	Temperature (°C)	
						Top	Bottom
Joomunjin sand	15.79	2.65	0.65	Top drained	Bottom to top	2.9	-8.9
Weathered granite soil	16.72	2.56	0.50			2.9	-9.1
Artificial soil 1	15.94	2.63	0.62			2.8	-8.7
Artificial soil 2	16.15	2.62	0.59			2.8	-9.0

Table 10. Test results under top drained condition

	Joomunjin sand	Weathered granite soil	Artificial soil 1	Artificial soil 2
Heaving rate (mm/hr)	0.03	1.66	1.37	1.57
Heaving rate (mm/day)	0.76	39.79	32.78	37.65
Heaving ratio (%)	1.27	31.18	16.02	18.88

Table 11. Frost susceptibility judgement by frost heave test

		Joomunjin sand	Weathered granite soil	Artificial soil 1	Artificial soil 2
TRRL	Frost heave rate (mm/hr)	NFS	PFS	PFS	PFS
	Frost heave ratio (%)	NFS	PFS	PFS	PFS
ASTM (frost heave rate, mm/day)		NFS	VH	VH	VH
JGS (frost heave rate, mm/hr)		Low	High	High	High

토, 인공토양 1, 2)는 동상이 발생할 수 있는(PFS) 토질로 판단되었다. TRRL 동상비(Frost heave ratio, %) 기준을 적용할 경우 주문진표준사만 동상민감성을 무시할 수 있는 수준(NFS)으로 판단되었으며 그 외 나머지 시료(화강풍화토, 인공토양 1, 2)는 동상이 발생할 수 있는(PFS) 토질로 판단되었다. ASTM 동상률(Frost heave rate, mm/day) 기준을 적용할 경우 동상에 민감한 정도가 주문진표준사만 NFS(Negligible Frost Susceptibility)로 판단되었으며, 그 외 나머지 시료(화강풍화토, 인공토양 1, 2)는 VH(Very High)로 판단되었다. JGS 판정기준(동상률, mm/hr)을 적용할 경우 동상에 민감한 정도가 주문진표준사의 경우 Low로, 그 외 나머지 시료(화강풍화토, 인공토양 1, 2)는 High로 판단되었다.

5. 복합적인 동상민감성 판정 기준 적용

미국 육군 공병대(U.S. Army Corps of Engineers) CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory)의 동상민감성 판정 기준을 적용한 결과는 Table 12와 같다. 주문진표준사, 화강풍화토, 인공토양 1, 2의 0.02mm 통과백분율은 각각 0%, 6.75%, 3.25%, 6.4%고, 통일분류법에 의해 각각 입도분포가 균일한 모래(SP), 점토질 모래(SC), 입도분포가 균일한 모래(SP), 실트질 모래(SM)로 분류된다. 동상 실험결과를 CRREL기준에 적용한 결과 동상민감성이 주문진표준사만 Very Low로 판단되고, 그 외 나머지 시료(화강풍화토, 인공토양 1, 2)는 모두 Very high로 판단되었다. 세 가지 기준 중 2개 이상 충족시킨 것을 토대로 동상그룹(Frost group)을 나뉘었을 때 주문진표준사, 화강풍화토, 인공토양 1, 2는 각각 None, F3, F2, F2로 분류된다. 이 결과를 활용해 통과백분율(x축)과 동상팽창률(y축)로 동상민감성 판정 기준 그래프에 표기하면 Fig. 6과 같다.

Table 12. Frost susceptibility judgement according to the CRREL of U.S. Army Corps of Engineers

	Joomunjin sand	Weathered granite soil	Artificial soil 1	Artificial soil 2
Passing 0.02 mm (%)	0	6.75	3.25	6.4
USCS	SP	SC	SP	SM
Frost susceptibility	Very low	Very high	Very high	Very high
Frost group	None	F3	F2	F2

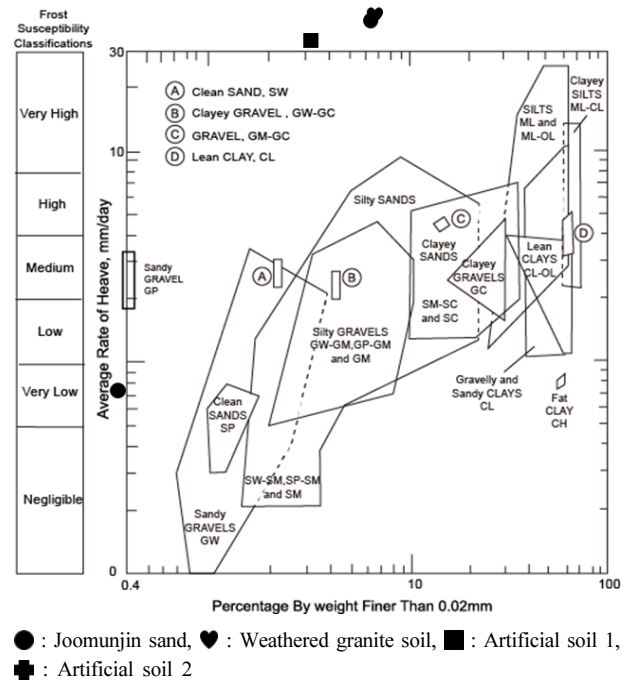


Fig. 6. Composite frost susceptibility envelope

6. 결 론

본 논문에서는 국외에서 제시하고 있는 동상민감성 판정 기준의 신뢰성에 관한 연구를 수행했다. 국외에서 제시하고 있는 동상민감성 3가지 판정 기준에 대해 4가지 흙(주문진표준사, 화강풍화토, 인공토양 1, 2)을 활용해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) Casagrande가 제시하는 입경에 의한 동상민감성 판정 기준은 흙을 동상에 민감한 흙과 그렇지 않은 흙으로 분류한다. 이 기준에 따르면 화강풍화토가 유일하게 동상에 민감한 흙으로 분류되며, 주문진표준사는 동상이

전혀 발생하지 않는 흙으로 분류된다. 그러나 인공토양 1, 2의 경우 동상에 민감한 흙으로는 분류되지 않지만 동상이 전혀 발생하지 않는 흙에도 해당하지 않는다. 캐나다 교통부(Canadian Department of Transport)의 기준을 적용할 경우, 화강풍화토를 유일하게 동상에 다소 민감(10%)한 토질로 분류할 수 있다. 주문진표준사와 인공토양의 경우 동상에 민감하지 않음(0%)과 동상에 다소 민감(10%)한 토질 범위에 걸쳐있어 하나의 특성으로 규명할 수 없다. 이처럼 입도분포에 따른 동상민감성 판정 기준은 흙의 입경이 특정 범위 내에 있을 때만 동상민감성을 판정할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 추후 다양한 토질에 대한 데이터 확보를 통해 수정 및 보완되어야 할 것으로 판단된다.

- (2) 새롭게 개발된 “투명 온도제어형 삼축셀”을 이용하여 4가지 흙을 대상으로 동상시험을 수행하였다. 동상실험 결과를 토대로 영국 TRRL, 미국 ASTM, 일본 JGS에서 제시하고 있는 동상민감성 판정 기준에 적용한 결과에 따르면, 주문진표준사는 영국과 미국 기준에서 동상민감성을 무시할 수 있는 수준(NFS), 일본 기준에서 동상민감성이 낮음(Low)으로 판단되었다. 화강풍화토 및 인공토양 1과 2의 경우에는 영국과 미국 기준에서 동상이 발생할 수 있는 흙(PFS), 일본 기준에서 동상민감성이 높음(High)으로 판단되었다. 결론적으로 동상이 거의 없는(1.27%) 주문진표준사를 동상민감성을 무시할 수 있는 수준(NFS) 및 동상민감성 낮음(Low)로 판단하고 동상이 상당한(16.02~31.18%) 화강풍화토 및 인공토양 1, 2를 동상이 발생할 수 있는 흙(PFS) 또는 동상민감성 높음(High)으로 판단한 것으로 미루어 보아 동상시험에 의한 동상민감성 판정 기준은 흙의 동상민감성을 올바르게 판정한 것으로 판단된다. 또한 “투명 온도제어형 삼축셀”을 활용한 동상시험이 다른 국가에서 제시하고 있는 동상시험방법을 대체할 수 있는 것으로 판단되나 향후 다양한 흙으로 추가적인 시험을 수행해야 할 것으로 판단된다.
- (3) 4가지 흙에 대해 미국 육군 공병대 CRREL에서 제시하고 있는 복합적인 동상민감성 판정법을 적용한 결과에 따르면 4가지 흙 모두 제시하고 있는 동상민감성 판정 기준에 해당되지 않았다. 주문진표준사의 경우 0.02mm 통과백분율(0%) 및 통일분류법(SP)에 의해 어떤 무시할 수 있는 동상그룹(None)에 해당되지만, 해당 동상그룹에서는 주문진표준사의 동상시험결과(Very low)를 포함하지 않고 있다. 화강풍화토의 경우 통일분류법(SC) 및 동상시험(Very high)에 의해 F3로 분류할 수 있지만 해

당 동상그룹에서는 화강풍화토의 0.02mm 통과백분율(6.75%)을 포함하지 않고 있다. 인공토양 1, 2의 경우 0.02mm 통과백분율(각각 3.25%, 6.4%) 및 통일분류법(각각 SP, SM)에 의해 F2로 분류되지만 해당 동상그룹은 인공토양 1, 2의 동상시험(Very high)결과를 포함하지 않고 있다.

- (4) 주문진표준사의 경우 3가지 동상민감성 판정 기준에 의해 대개 동상을 무시할 수 있는 수준 혹은 동상민감성 낮음 수준으로 분류되었다. 하지만 주문진표준사에 카올리나이트 5%, 10%를 혼합한 인공토양 1, 2의 경우 3가지 동상민감성 판정 기준에 의해 동상이 발생할 수 있는 수준, 동상민감성 높음 혹은 매우 높음 수준으로 분류되었다. 이를 통해 #200체 통과백분율이 전체 질량의 5%만 차지해도 동상에 민감한 흙이 될 수 있다는 사실을 발견하였다. 결론적으로 입도분포와 토질의 분류를 토대로 동상민감성을 판정하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 세립분 함유량의 미세한 변화만으로도 동상에 민감한 토질로 분류될 수 있기에 가급적 실내시험을 통한 동상판정이 가장 유효하다고 판단된다.

겨울철 동상으로 인한 크고 작은 피해가 발생하는 우리나라는 동상민감성을 가장 잘 판단할 수 있는 동상시험을 추가적으로 수행하여 한국형 동상민감성 판정 기준을 정립할 것을 제안하는 바이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “극한지 자원이송망-기반구조물 설계 및 평가기술 개발(20170309-002)” 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

1. Armstrong, M. D. and Csathy, T. I. (1963), Frost design practice in Canada, Highway Research Record, No. 33, pp. 170~201.
2. ASTM D5918 (2013), Standard test methods for frost heave and thaw weakening susceptibility of soils, American Society for Testing Materials, pp. 1~13.
3. Casagrande, A. (1931), Discussion of frost heaving, Highway Research Board, Proceedings, Vol. 11, pp. 163~172.
4. Chamberlain, E. J. (1981a), Comparative evaluation of frost-susceptibility test, Frost Action and Risk Assessment in Soil Mechanics, Transportation Research Record, No. 809, pp. 42~52.
5. Chamberlain, E. J. (1981b), Frost susceptibility of soil, Cold

- Regions Research and Engineering Laboratory, Monograph 81-2.
6. Chamberlain, E. J. (1987), A freeze-thaw test to determine the frost susceptibility of soils, United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 87-1.
 7. Choi, C. H. (2011), Development and verification of high efficiency experimental apparatus to evaluate freezing phenomenon of soils, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 10, No. 4, pp. 93~103.
 8. Croney, D. and Jacobs, J. C. (1967), The frost susceptibility of soils and road materials, No. Lr 90, Transport and Road Research Laboratory report, pp. 68~72.
 9. Cwiakala, M., Gajewska, B. and Kraszewski, C. (2016), Laboratory investigations of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses, *Transport Research Procedia*, Vol. 14, pp. 3476~3484.
 10. JGS 0172 (2003), Test method for frost susceptibility of soils, Japan Geotechnical Society, pp. 1~6.
 11. Johnson, T. C., Berg, R. L., Carey, K. L. and Kaplar, C. W. (1975), Roadway design in seasonal frost areas, Transportation Research Board and Cold Regions and Engineering Laboratory, Technical report 259, pp. 18.
 12. Kang, J. M., Kim, Y. S. and Lee, J. G. (2013), Evaluation method of frost heave for unsaturated soil, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 12, No. 1, pp. 93~100.
 13. Kaplar, C. W. (1965), A laboratory freezing test to determine the relative frost susceptibility of soils, technical note, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, pp. 17~21.
 14. Kaplar, C. W. (1971), Experiments to simplify frost susceptibility testing of soils, technical report 223, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, pp. 7~21.
 15. Kaplar, C. W. (1974), Freezing test for evaluating relative frost susceptibility of various soils, CRREL, Technical report 250, pp. 40.
 16. Lackner, R., Amon, A. and Lager, H. (2005), Artificial ground freezing of fully saturated soil, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 131, No. 2, pp. 211~220.
 17. Ryu, B. H., Jin, H. W. and Lee, J. G. (2016), Experimental study of frost heaving using temperature controlled triaxial cell, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 6, pp. 23~31.
 18. Shin, E. C., Ryu, B. H., Kang, H. H. and Hwang, S. G. (2014), Behavior characteristics of water supply pipeline due to freezing temperature, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 1~10.
 19. Shin, E. C., Ryu, B. H. and Park, J. J. (2009), Geotechnical characteristics of frost-susceptibility soil using modified freeze-thaw apparatus, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 8, No. 1, pp. 53~59.
 20. Shin, E. C., Ryu, B. H. and Park, J. J. (2013), The frost heaving susceptibility evaluation of subgrade soils using laboratory freezing system, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 13~23.
 21. Song, W. K. and Kim, M. K. (2004), An assesment of fatigue life cycle for buried pipelines in consideration for corrosion and frost heave of a geotechnical medium, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 2004, pp. 267~275.
 22. Taber, S. (1930), The mechanics of frost heaving, *Journal of Geology*, Vol. 38, pp. 303~317.