

국내 주요 암종별 사면의 동결-융해에 의한 열화심도 계산

권오일¹ · 백 용¹ · 임성빈² · 서용석^{2*}

¹한국건설기술연구원 지하구조물연구실, ²충북대학교 지구환경과학과

Calculation of Deterioration Depth of Major Rock Type Slopes caused by Freezing-Thawing in Korea

O-Il Kwon¹, Yong Baek¹, Sung-Bin Yim², and Yong-Seok Seo^{2*}

¹Korea Institute of Construction Technology, Underground Structure Research Division

²Chungbuk National University, Dept. of Earth & Environ. Sci. & Inst. Basic Sci. Res.

암석의 동결과 융해 작용의 반복적인 과정은 암반의 기계적인 풍화작용의 중요한 인자 중에 하나이다. 이러한 자연 상태의 과정은 암반 물질의 파쇄에 의해서 풍화를 가속시키고 암반 사면의 표층부에 토양이나 풍화암을 생산한다. 또한 사면의 전단강도 감소를 일으키므로 사면 안정성 분석을 위하여 동결-융해에 의해 유발되는 열화 심도를 계산하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 동결-융해에 의한 암반 사면의 열화 심도를 1차원 열전도방정식을 이용하여 계산하였다. 국내 주요 도시의 지난 5년간 기온 자료를 수집하여 기온 분포를 분석하였다. 기온 분포 분석은 국내 암종 분포를 고려하여 수행되었다. 아울러 연구 대상 지역에 분포하는 암석의 열전도율, 비열, 밀도 등에 대한 실내 시험을 수행하였다. 이들 암석의 열적 특성은 열화심도 계산을 위한 입력 인자로서 활용되었다. 본 논문은 암석의 열적 특성의 차이를 의미하는 암종, 외부 기온 등의 영향 인자들과 열화심도 간의 상관관계에 대하여 검토하였다. 최종적으로 계산에 의한 국내 주요 도시의 암반 사면 열화심도 추정 값을 소개하고자 한다.

주요어 : 동결-융해, 열화심도, 열전도율, 비열, 기온분포

Freezing and thawing cycle is one of the major weathering-induced factors in the mechanical weathering of the rock mass. This natural process accelerates rock weathering process by breaking down the parent rock materials and makes soil or weathered rock formation in a rock slope surface zone. It can also cause reduction of the shear strength in slopes. It is important to calculate the deterioration depth caused by freezing-thawing for a slope stability analysis. In this study, deterioration depths of rock slope due to freezing-thawing were calculated using the 1-D heat conductivity equation. The temperature distribution analysis was also carried out using collected temperature distribution data for last five years of several major cities in Korea. The analysis was performed based on the distributed rock types in study areas. Thermal conductivities, specific heats and densities of the calculation rocks are tested in the laboratory. They are thermal properties of rocks as input parameters for calculating deterioration depths. Finally, the paper is showing the calculated deterioration depths of each rock type slopes in several major cities of Korea.

Key words : freezing-thawing, deterioration depth, thermal conductivity, specific heat, temperature distribution

서 론

암반사면은 시공당시 매우 안정한 상태이나 시간이 경과함에 따라 점차 암반의 강도가 약해지는 열화 과정

을 겪는다. 이러한 암반의 열화현상을 정량적으로 예측하는 것은 사면안정성 해석을 수행함에 있어 매우 중요하다. 이는 해석시 열화현상을 받는 심도 내의 암반과 심부의 신선한 암반의 역학적, 물리적 성질을 다르게 적

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

용해야 하기 때문이다. 지반을 대상으로 동결융해가 구성물질 특성에 미치는 영향에 대한 연구로는 다음과 같은 것들이 있다. Graham et al.(2001)은 동결융해가 소성점토 지반의 수리전도도에 미치는 영향을 연구하였고, 윤여원 등(2003)은 화강풍화토 지반의 동결융해 전후의 동적 거동을 비교연구 하였다. Li et al.(2002)은 반복적인 동결융해 작용에 의한 토양의 공극률과 투수성의 변화에 대하여 연구하였다. 백 용(2001)은 사면에서 동결융해에 의해 영향을 받는 심도와 암반사면의 안정성해석에 대하여 연구한 바 있다. 또한 백용 등(2005)은 국내 5개 도시의 암반사면을 대상으로 동결융해에 의한 암반사면의 열화심도를 산정한 바 있다.

본 연구에서는 일차원 열전도 방정식을 이용하여 암반이 동결융해에 의해 영향을 받는 심도를 예측하였다. 국내 암반의 열화특성을 규명하기 위하여 변성암, 화성암, 퇴적암 중에서 주요 대표암종 8개를 연구대상으로 선정하였다. 또한 국내 지역별 최대 기온차의 경향을 분석하기 위하여 기상청 홈페이지 자료실에 있는 기상정보 자료 중 근대 관측 이래 각 지역별 최고기온, 최저기온 값을 활용하였다. 분석된 기온차 결과와 선정된 대표암종의 국내 주요 분포지역 등을 고려하여 4개 지역을 연구지역으로 선정하고 시료를 채취하였다(Fig. 1).

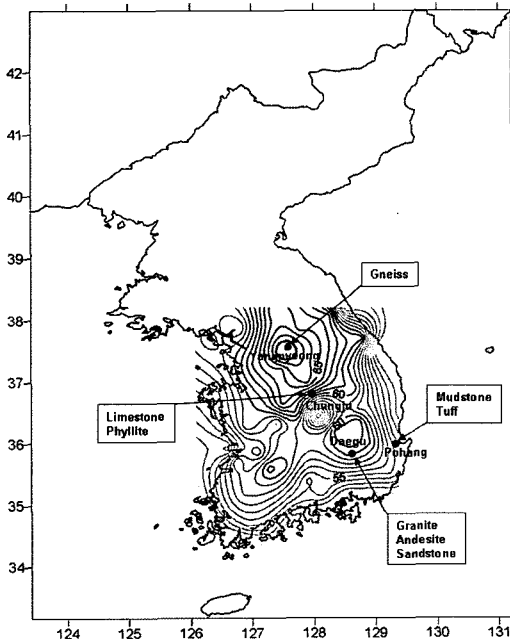


Fig. 1. A contour map of annual max. variation of air temperature and sampling locations with rock types.

그리고 선정된 4개 지역의 최근 5년간의 기온분포를 분석하고 기온변화 함수를 도출하였으며 그 특징을 분석하였다. 연구지역 암석의 열적 및 물리적 특성은 실내시험을 수행하여 얻었으며, 최종적으로 4개 지역 8개암종의 지역별 열화심도를 계산하였다.

1차원 열전도 방정식

암반의 온도는 표면에서 외부기온과 동일하다고 가정하고, 수심 m 이상의 특정 깊이에서는 온도가 일정하다고 가정한다. 암반의 심도를 L이라 하면 열전도방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \alpha^2 = \frac{K}{\rho c} \quad (0 \leq x \leq L)$$

$$\begin{cases} u(0, t) = \phi(t) & (0 < t < \infty) \\ u(L, t) = u_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\{u(x, 0) = f(x) \quad (0 \leq x < L)$$

여기서, c는 비열, K는 열전도계수, ρ는 밀도, φ(t)는 외부기온, u₀는 L에서 일정하게 유지되는 온도를 나타낸다. 우선 동차경계조건이 되도록

$$u(x, t) = A(t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) + B(t) \frac{x}{L} + v(x, t) \quad (2)$$

와 변수변환을 행하면 원래의 편미분방정식과 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \Psi(x, t)$$

$$\Psi(x, t) = \frac{d\phi}{dt} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (3)$$

$$v(0, t) = v(L, t) = 0$$

$$v(x, 0) = f(x) - s(x, 0) = F(x)$$

이상의 식을 전개하여 풀이한 방정식의 해를 암반의 열화심도 계산에 이용하였으며, 자세한 풀이과정은 이전의 연구에서 제시한 바 있다(백 용 등, 2005).

연구대상 지역의 기온분포 분석

암반의 동결-융해작용은 기온의 연중 변화에 영향을 받는다. 기온은 각 지방의 고유한 특성으로서 지방마다

서로 다른 변화를 보인다. 본 연구에서는 일본 센다이시와 삿포르시의 기온변화를 분석하여 얻어진 곡선의 함수를 활용하였다(Baek and Takashi, 1999). 두 지방의 연중 기온분포는 절대치는 다를지라도 곡선의 형태가 국내와 유사할 것으로 판단되어 인용하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$\varphi(t) = C_0 + C_1 \sin\left(2\pi \times \frac{t}{365}\right) + 0.1 \sin(2\pi \times 24t) \quad (4)$$

여기서, C_0 와 C_1 은 상수이다. 식의 우변 제1항은 일 최저기온의 평균치, 제2항은 연간 최대변동을 나타내는 항, 제3항은 1일 동안의 온도변화를 나타내는 항이다. 암반의 열화심도 계산을 위한 입력치로 상수 C_0 와 C_1 값을 구하여야 한다. 암석 시료를 채취한 4개 연구지역에 위치하는 기상청 자료 중 최근 5년간의 일평균 기온을 분석하였다(Fig. 2).

암석 시료를 채취한 지역의 최근 5년간 일평균 기온의 분포곡선과 식(4)의 그래프가 가장 근접하도록 상수 C_0 와 C_1 값을 결정하였다. 이 값은 열화심도 계산의 입력값으로 사용되며, 그 결과를 정리하면 다음의 Table 1과 같다.

실내시험에 의한 물성값 산정

열화현상의 영향을 받는 심도를 계산하기 위해서는 암석의 고유 물성치 중 열적특성과 관련된 열전도율과 비열, 그리고 기본 물성치인 밀도 값이 필요하다. 현장에서 채취해온 암석 시료를 이용하여 열전도율과 밀도를 측정하는 실내 시험을 수행하였으며, 비열은 기존의 문헌자료를 활용하였다.

열전도율(Thermal conductivity)

본 연구에서는 열선법을 개량 발전시킨 QTM식 Probe 법을 활용하여 열전도율을 측정하였다(Fig. 3). 측정에 사용한 장치는 일본의 KYOTO ELECTRONICS사에서 개발한 Kemtherm QTM-D3(신속 열전도율계)이다. 본 기기의 측정 장치부인 Probe에는 이미 알고 있는 열전도율을 가진 물질의 표면에 가열선과 열전대가 배치되어 있다. 이 물질은 단열성이 좋으며 탄성이 있고 시료면과 잘 밀착되게끔 만들어 졌다. 또한 QTM-D3은 마이크로 컴퓨터를 응용한 전용 연산 표시회로 등의 방법으로 측정결과를 직접 열전도율 단위로 표시하

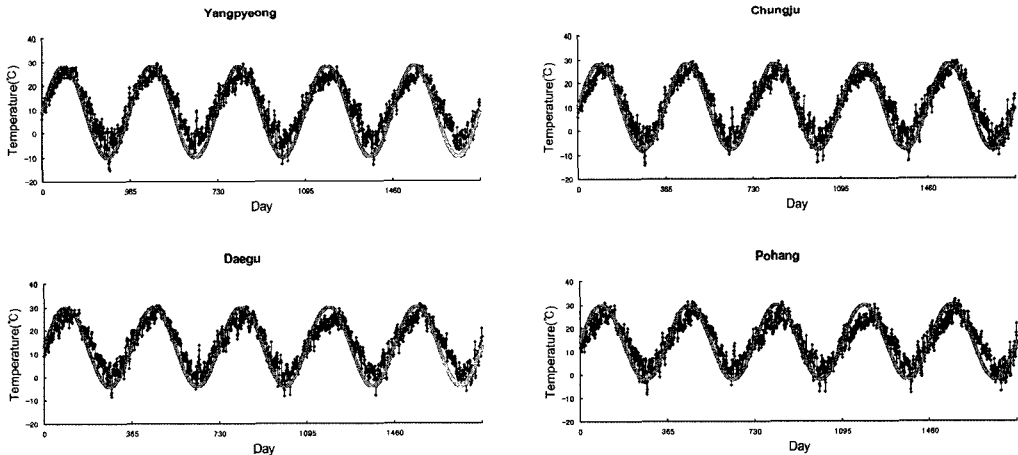


Fig. 2. Temperature variations during recent five years at the 4 study areas.

Table 1. Constants of temperature distribution curves at the 4 study areas.

Constant Area	C_0	C_1
Yangpyeong	9	19
Chungju	10	18
Daegu	13	17
Pohang	14	16

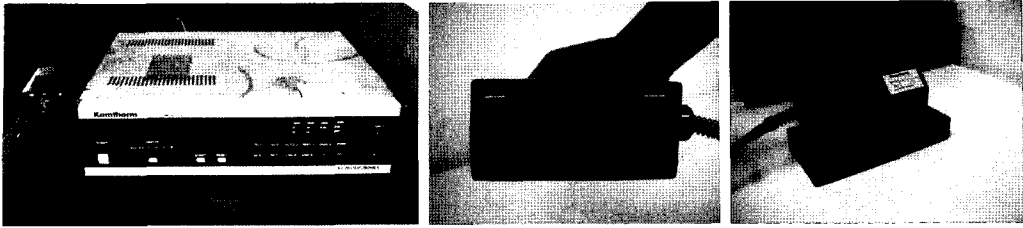


Fig. 3. A measurement of thermal conductivity using Kemtherm QTM-D3.

며 측정시간은 약 60초에서 120초가 소요된다.

열전도를 측정을 위하여 현장에서 채취한 시료를 암종별로 1개에서 최대 4개의 직육면체 시료로 성형하였다. 총 22개의 시료마다 3번씩 측정을 하고, 그 평균값을 구하여 각 암종을 대표하는 열전도율 값으로 이용하였다. Table 2는 시료 및 암종별 시험값과 그 결과치를 정리한 것이다.

비열(Specific heat)

비열은 단위질량 즉, 1 kg을 1°C 온도 증가시키는데 필요한 열에너지이다. 물체가 열을 흡수하여 온도를 상승시키는 능력을 의미하며 단위질량당 열용량이다. 본

연구에서는 기존 문헌(이부경, 1998)에 기록되어 있는 암석의 비열값을 인용하여 사용하였으며, 그 값을 정리하면 Table 3과 같다.

밀도(Density)

밀도는 단위체적당 질량을 의미한다. 암석의 밀도를 산정하기 위해서는 체적과 질량을 측정하여야 한다. 본 연구에서는 시험을 위해 준비된 시료가 직육면체로 성형되어 있으므로 가장 간편한 Calipers 법(Nonius 법)을 적용하여 체적을 구하였다. 각각 측정된 결과를 이용하여 계산한 암종별 밀도값을 정리하면 다음의 Table 4와 같다.

Table 2. Results of measurement of thermal conductivity. unit : kcal/m · h · °C.

Specimen	Rock type	Test 1		Test 2		Test 3		Mean	thermal conductivity
		value	°C	value	°C	value	°C		
GR-1	Granite	2.00	20	2.15	25	2.10	26	2.08	2.26
GR-2		2.29	25	2.76	26	2.52	26	2.52	
GR-3		2.14	25	2.37	25	2.34	25	2.28	
GR-4		2.08	25	2.16	25	2.20	26	2.15	
AND-1	Andesite	1.45	25	1.55	26	1.57	26	1.52	1.92
AND-2		2.04	25	1.96	25	2.32	26	2.10	
AND-3		1.99	25	2.08	25	2.09	26	2.05	
AND-4		1.94	25	2.02	25	2.06	25	2.01	
LS-1	Limestone	2.04	25	2.21	25	2.18	25	2.14	2.27
LS-2		2.49	25	2.73	25	2.73	25	2.65	
LS-3		1.91	25	2.08	25	2.08	25	2.03	
PH-1	Phyllite	1.85	24	1.94	25	1.96	26	1.91	2.29
PH-2		2.47	24	2.64	24	2.88	25	2.66	
GN-1	Gneiss	1.65	25	1.74	26	1.77	26	1.72	2.33
GN-2		2.29	25	2.47	25	2.77	25	2.51	
GN-3		2.46	24	2.56	25	2.59	25	2.54	
GN-4		2.39	24	2.57	25	2.67	25	2.54	
SS-1	Sandstone	2.75	24	2.92	24	2.90	25	2.86	2.86
MS-1	Mudstone	0.72	26	0.77	27	0.79	27	0.76	0.76
MS-2		0.72	26	0.77	27	0.79	27	0.76	
TF-1	Tuff	1.63	25	1.72	25	1.74	26	1.70	1.72
TF-2		1.64	25	1.74	26	1.81	26	1.73	

Table 3. Specific heat values of each rock type (Lee, 1998).

Rock type	Granite	Andesite	Limestone	Phyllite	Gneiss	Sandstone	Mudstone	Tuff
Specific heat (cal/kg · °C)	192	170	216	195	196	220	140	160

Table 4. Results of calculation of density.

Specimen	Rock type	Volume (V) (a cm * b cm * c cm)			Mass (M) (g)	Calculated (g/cm ³)	Density (kg/m ³)
GR-1	Granite	15.93	5.12	2.31	484.01	2.57	2,570
GR-2		15.15	6.23	2.07	508.39	2.60	
GR-3		15.17	7.47	2.26	644.26	2.52	
GR-4		15.4	6.14	2.36	578.48	2.59	
AND-1	Andesite	15.32	6.53	2.55	696.50	2.73	2,736
AND-2		15.47	7.14	1.73	520.78	2.73	
AND-3		15.28	7.1	3.15	940.89	2.75	
AND-4		17.05	5.9	2.38	647.87	2.71	
LS-1	Limestone	14.69	6.52	2.06	579.99	2.94	2,649
LS-2		15.96	6.73	2.79	785.79	2.62	
LS-3		15.15	5.01	2.42	491.41	2.68	
PH-1	Phyllite	15.71	6.79	2.46	639.60	2.44	2,437
PH-2		15.11	6.2	2.88	730.32	2.71	
GN-1	Gneiss	15.3	6.03	2.22	541.50	2.64	2,656
GN-2		16.15	6.61	2.98	834.08	2.62	
GN-3		15.14	6.58	2.22	597.52	2.70	
GN-4		16.01	6.67	1.8	474.07	2.47	
SS-1	Sandstone	15.05	6.68	2.3	602.99	2.61	2,608
MS-1	Mudstone	15.34	6.03	2.86	455.60	1.72	1,722
MS-2		15.2	5.36	3.12	425.39	1.67	
TF-1	Tuff	15.42	7.33	1.91	521.10	2.41	2,436
TF-2		14.91	6.44	2.24	528.61	2.46	

Table 5. Deterioration depths influenced by freezing-thawing in Korea.

Rock type	Area	C ₀	C ₁	Thermal conductivity K (cal/m · day · °C)	Specific heat c (cal/kg · °C)	Density (kg/m ³)	Deterioration depth (m)
Granite	Daegu	13	17	54,226	192	2,570	8.8
Andesite	Daegu	13	17	46,124	170	2,736	8.6
Limestone	Chungju	10	18	54,524	216	2,649	8.6
Phyllite	Chungju	10	18	54,945	195	2,437	9.2
Gneiss	Yangpyeong	9	19	55,854	196	2,656	9.0
Sandstone	Daegu	13	17	68,591	220	2,608	9.2
Mudstone	Pohang	14	16	18,197	140	1,722	7.8
Tuff	Pohang	14	16	41,172	160	2,436	8.6

동결융해에 영향을 받는 열화심도 계산

일차원 열전도 방정식의 해를 이용하여 국내 암반사면의 동결융해를 받는 영역을 계산하였다. 계산에 적용된 입력 데이터는 지역별 온도분포 분석을 통하여 산정된 상수값 C₀와 C₁, 암반의 열적 특성과 관련된 열전도

율과 비열, 그리고 기본 물성값 중에 하나인 밀도 등이다(Table 5).

Baek and Takashi(1999)의 연구결과에 따르면 1000년 경과후의 암반 내 온도분포는 정상상태에 도달하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서도 이러한 초기조건을 설정하였다. 계산에는 초기조건에 해당하는 1000년

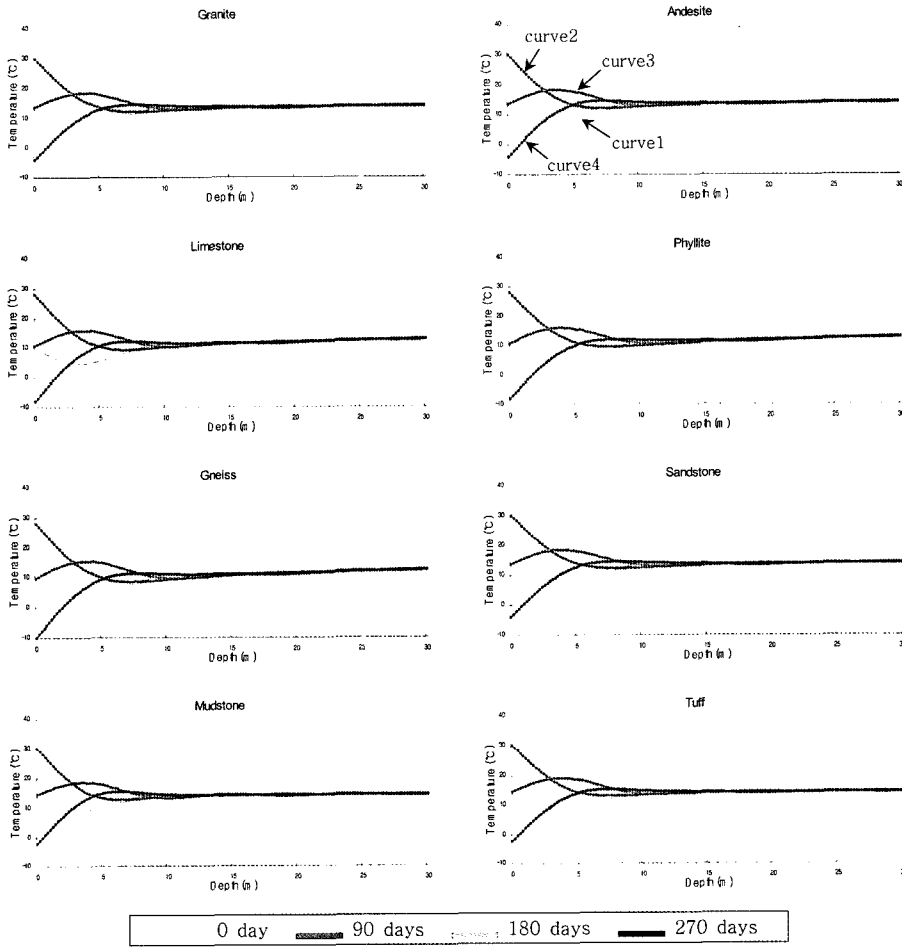


Fig. 4. Temperature distribution curves of each rock type according to depth.

후를 기준으로 0일(곡선1), 90일(곡선2), 180일(곡선3), 270일(곡선4) 등 4가지 경과시간을 적용하여 심도별 온도분포를 계산하였고, 그 결과를 그래프로 나타내었다 (Fig. 4).

Fig. 4에서 4개의 곡선은 봄, 여름, 가을, 겨울에 해당하는 것으로 외부온도가 계절적 특성을 반영할 때 지반의 심도별 온도 변화를 분석하기 위함이다. 4가지의 경과시간에 의한 각각의 온도분포 곡선이 서로 수렴하여 일치되는 심도를 동결융해에 의해서 영향을 받는 열화심도로 결정하였다. 수렴하는 심도의 결정은 각 심도별 4개 온도값의 표준편차가 1이하가 되는 지점으로 정하였다. 각각의 암종별로 그래프의 수렴 지점을 분석하여 열화심도를 추정한 결과 최소 7.8m에서 최대 9.2m의 심도까지 동결융해의 영향을 받는 것으로 나타났다. 암종 및 지역

별로 분석된 열화심도의 결과값은 Table 5와 같다.

국내의 경우 지역별 기온분포 특성에 의한 열화심도의 영향은 미약한 것으로 분석되었다. 암종별로는 열전도율과 비열이 큰 값을 보이는 사암, 편마암, 천매암 등이 열화심도가 깊은 것으로 분석되었다. 다른 암종에 비하여 열적 특성값이 가장 낮은 이암의 경우 가장 얇은 열화심도로 분석되었다. 따라서 국내의 경우 동결융해에 영향을 받는 열화심도는 지역별 기온분포 특성 보다는 암석의 열적 특성에 의하여 차이를 보이는 것으로 분석된다.

결론

본 연구에서는 기온 변화에 따라서 암종별로 동결융해에 의해 영향을 받는 열화심도를 계산하였다. 4개 지역

의 총 8개 암종에 대하여 열화심도 계산을 수행한 결과, 국내 암반의 열화심도는 7.8~9.2m 범위로 분석되었다.

우리나라의 경우 국토의 남북간 위도 차이가 크지 않아 지역별 기온분포에 의한 열화심도의 영향은 크지 않다. 암종별로는 열전도를 및 비열 값과 열화심도가 대체로 비례하는 것으로 분석되었다. 다른 암종에 비하여 열전도율의 값이 현저히 낮은 이암의 경우 열화심도가 가장 낮게 분석되었다. 향후 보다 다양한 지역과 암종에 따른 열화심도를 예측하고, 사면 안정성 해석에 이를 반영하는 연구를 수행할 예정이다.

사 사

본 논문은 건설교통부 2005년도 지역기술혁신사업(강원권) 연구과제인 “낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발(05지역특성B02-01)의” 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 백 용, 2001, 동결융해 심도를 고려한 암반사면의 안정성 해석에 관한 연구, 대한지질공학회지, Vol. 11, No. 1, pp. 13~23.
- 백 용, 서용석, 정자혜, 권오일, 2005, 동결융해에 의한 암반사면의 열화심도 산정, 대한지질공학회지, Vol. 15, No. 3, pp. 325~335.
- 윤여원, 김세은, 강병희, 강대성, 2003, 화강풍화토의 동결-융해 후의 동적거동, 한국지반공학회지, Vol. 19, No. 5, pp. 69~78.
- 이부경, 1998, 암석역학의 원리, 도서출판 대운, 206~208.
- Back, Y., Takashi, K., 1999, Experimental study in deterioration property of porous rock under freezing-thawing cycle, Japanese Society of Rock Mechanics, No. 1, pp. 303~310
- Graham, J., Yuen, K., Goh, T. B., Janzen, P. & Sivakumar, V., 2001, Hydraulic conductivity and pore fluid chemistry in artificially weathered plastic clay, Engineering Geology, 60(1-4), pp. 69~81
- Li, D., Christians, N., Volterrani, M. & Minner, D., 2002, Freeze-thaw cycles and soil amendments, Techwell, pp. 103, 117, 110~113.

권오일

한국건설기술연구원 지하구조물연구실
411-712, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0526
Fax: 031-910-0561
E-mail: kwonoil@kict.re.kr

백 용

한국건설기술연구원 지하구조물연구실
411-712, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0228
Fax: 031-910-0561
E-mail: baek44@kict.re.kr

임성빈

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: bins123@hanmail.net

서용석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr