

동결융해에 의한 암반사면의 열화심도 산정

백 용¹⁾ · 서용석^{*2)} · 정자혜¹⁾ · 권오일¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 지반연구부

²⁾충북대학교 지구환경과학과·기초과학연구소

Estimation of Deterioration Depth of Rock Slope due to Freezing-thawing

Yong Baek¹⁾ · Yong-Seok Seo^{* 2)} · Ja-Hyea Jeong¹⁾ · O-Il Kwon¹⁾

¹⁾Korea Institute of Construction Technology, Dept. Geo-technical Engineering

²⁾Dept. of Earth & Environmental Sci. & Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University

일차원 열전도 방정식을 이용하여 동결융해작용에 의하여 발생하는 국내 암반사면의 열화심도를 산정하였다. 계산에 적용된 기온분포는 국내의 주요 5개 도시의 최근 2년간의 기온분포를 분석하여 사용하였으며, 국내에 많이 분포하는 암종인 사암, 화강암, 편마암을 대상으로 하였다. 본 연구에서 고려한 5개 지역 중 2년간의 최고기온과 최저기온의 편차가 큰 지역인 서울, 대전, 포항은 열전도계수(Coefficient of thermal conductivity)가 클수록 암반 열화심도(deterioration depth)가 깊어지는 경향을 보이는 것으로 계산되었다. 암종별로 분석한 결과 열전도계수가 55,200 cal/m×day×℃인 화강암이 분포할 때는 5개 지역 중 기온편차가 작은 광주와 강릉 지역의 열화심도가 기온편차가 큰 지역들보다 높게 예측되었다. 이 암석을 제외하면 기온 편차가 큰 지역에 분포하는 암석일수록 암반의 열화심도가 크다. 국내의 동결융해에 의한 열화심도는 약 8.4~10.7m 내외인 것으로 나타났다.

주요어 : 동결-융해, 암반사면, 열전도 방정식, 열화 심도

Deterioration depths of rock slope due to freezing-thawing were calculated using the 1-D heat conductivity equation. The temperature distribution analysis was carried out using temperature distribution data for last two years of the five major cities such as Seoul, Daejeon, Pohang, Gwangju and Gangneung. The analysis was performed based on three different types of rocks, sandstone, granite and gneiss. This study has found that the deterioration depths tend to be greater with the increase of the thermal conductivity coefficient in Seoul, Daejeon and Pohang where showing relatively greater temperature deviations. Regarding the influence of rock types, deterioration depths turned out to be greater in Gwangju and Gangneung, where show relatively smaller temperature deviations among the five cities, assuming these cities are on the granite with thermal conductivity of 55,200 cal/m×day×℃. In contrast, for the other rock types, cities of relatively greater temperature deviations show deeper deterioration depth than the others. Deterioration depths of rock slope in Korea due to freezing-thawing turned out to be around 8.4 m to 10.7 m.

Key words : Freezing-thawing, Rock slope, Heat conductivity equation, Deterioration depth

* Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

서 론

암반사면은 시공후 초기에는 안정한 상태를 유지하지만 자연상태에 노출된 환경하에서 시간이 경과함에 따라 풍화 침식작용을 받게 되고, 점차 암반의 강도가 약해지면서 열화되어가는 과정을 겪게 된다. 이러한 암반의 열화현상을 정량적으로 예측하는 것은 암반사면 안정성 해석을 수행함에 있어 중요하다. 암반사면의 열화현상을 발생시키는 주요한 요인 중 하나는 동결-융해 작용이다. 토사로 구성된 지반의 동결-융해후의 전단탄성계수나 감쇠비의 변화, 투수계수에 대한 영향 등은 많은 연구 결과가 발표된 바 있다. 동결융해 작용은 암반의 물성에만 영향을 주는 것이 아니라 토층에도 큰 영향을 미친다. Li et al.(2002)은 반복적 동결융해작용에 의하여 변화되는 토양의 공극률과 투수성에 대하여 연구한 바 있으며, 이재영(1996)은 폐기물 매립지의 복토층의 공학적 기능이 동결융해작용에 의하여 변화되는 양상을 연구한 바 있다. 동결융해심도와 암반사면의 안정성과의 관계를 직접적으로 연구한 사례로는 백용(2001)의 연구가 있다. 장현식 등(2004)은 동결융해에 의한 국내 백악기 세일의 열화현상을 실험을 통하여 밝힌바 있으며, Prick(1995)은 동결융해의 반복실험에 의한 다공질 석회질 암석의 이방적 변형특성과 동결시료내의 물의 이동에 대하여 연구한 바 있다. 다공질 암석을 대상으로 동결융해에 의한 열화현상을 해석적으로 연구한 사례도 있다(Hori, 1998; Neaupane, 1999; Mutluturk, 2004). Topal & Sozmen(2003)은 응회암으로 제작된 석조구조물의 열화현상을 연구하기 위하여 미시구조에 대한 전자현미경학적 연구와 현장시험을 실시하여 동결융해 작용이 석조물의 풍화에 미치는 정도를 연구한 바 있다.

본 연구에서는 일차원 열전도 방정식을 이용하여 동결융해작용에 의하여 발생하는 국내 암반사면의 열화현상의 영향심도를 산정하였다. 계산에 적용된 기온분포는 국내의 주요 5개 도시의 최근 2년간의 기온분포를 분석하여 해석에 이용하였으며, 국내에 많이 분포하는 암종인 사암, 화강암, 편마암을 대상으로 하였다.

기온분포와 열전도 방정식

국내 5개 도시의 기온분포

본 연구는 기온 변화를 열화의 주요 요인으로 보고 암반노출부가 외부기온 및 암질에 따라 동결융해작용을

받는 심도를 산정하는 것이 목적이다. 연구대상지역은 위도의 분포, 내륙과 해안, 그리고 국내를 5개 권역으로 구분하여 그 권역을 대표할 수 있는 주요도시 등을 고려하여 선정하였으며, Fig. 1에 표시한 것과 같이 강릉, 서울, 대전, 포항, 광주를 선정하였다.

5개 지역의 기온의 변화를 살펴보기 위하여 기상청 홈페이지 자료실에 있는 기상정보 자료 중 최근 2년간의 일평균 기온을 분석하였다. 분석된 지역별 일평균 기온을 이용하여 근사곡선을 구하면 식(1)과 같은 함수로 나타난다. 식 (1)의 우변 제1항은 일 최저기온의 평균치, 제2항은 연간 최대변동을 나타내는 항, 제3항은 1일 동안의 온도변화를 나타내는 항이다. 연구도시의 온도변화방정식의 상수인 C_0 와 C_1 의 값을 정리하면 Table 1과

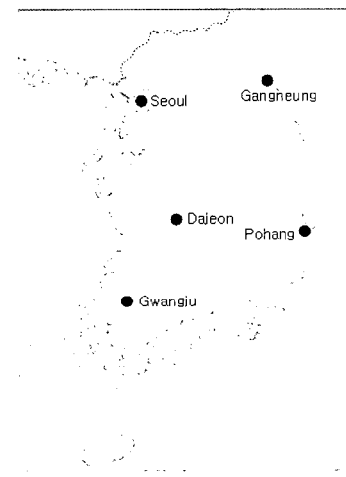
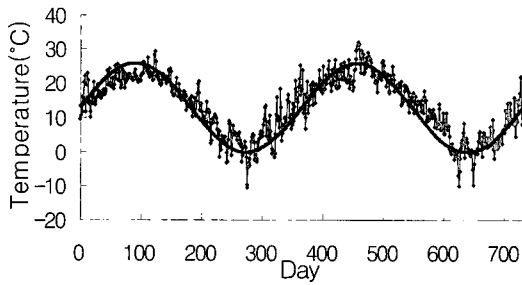


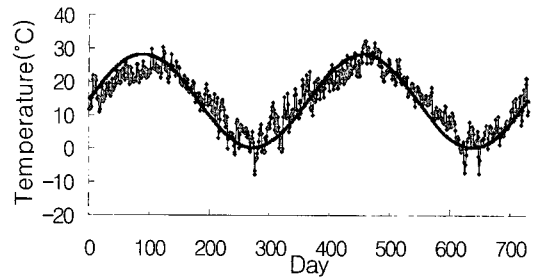
Fig. 1. Study areas selected to analyze the influence of freezing and thawing on rock.

Table 1. Constants of temperature distribution curves at the 5 study cities.

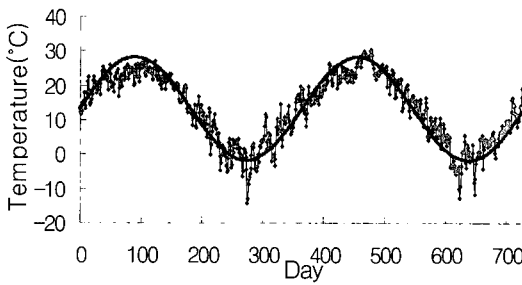
Constant Area	C_0	C_1
Gangneung	12.8	13
Seoul	13.2	15
Dajeon	13.6	14
Pohang	14.2	14
Gwangju	13.8	14



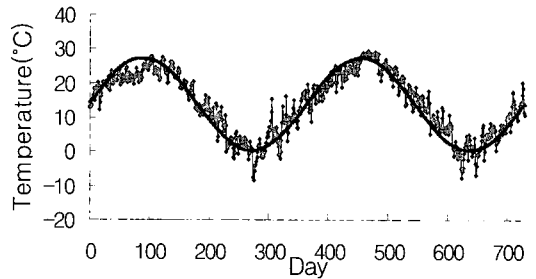
(a) Gangneung



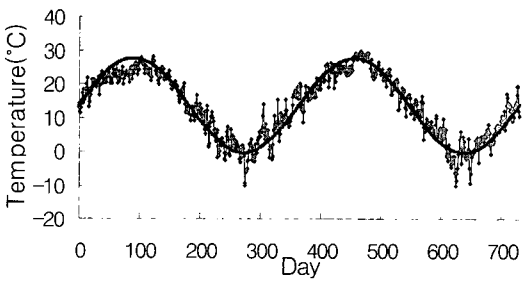
(d) Pohang



(b) Seoul



(e) Gwangju



(c) Dajeon

Fig. 2. Temperature variations during recent two years at the 5 cities.

같다. Fig. 2는 지역별 최근 2년간의 온도분포와 근사곡선을 나타낸 것이다.

$$\Psi(t) = C_0 + C_1 \sin(2\pi \times \frac{t}{365}) + 0.1 \sin(2\pi \times 24t) \quad (1)$$

한국건설기술연구원(2004)의 보고서에 의하면 최고

기온과 최저기온의 기온편차값이 큰 지역일수록 상대적으로 암반의 열화 작용이 심한 것으로 나타났으며, 이 지역에 분포하는 터널 갱구사면의 안정성 평가시 기온 변화에 대한 고려가 필요한 것으로 나타났다. 따라서 5개 연구지역의 최근 2년간의 월평균 기온 중 최고기온, 최저기온 및 그 기온 편차값을 Table 2에 나타내었다. 5개 지역 중 기온편차가 가장 큰 지역은 서울로 2004년 8월에 기록된 최고평균기온은 26.1°C이며, 2003년 1월에 기록된 최저평균기온은 -2.5°C로서 이들의 기온편차는 28.6°C이다. 그 외에 포항, 대전, 광주, 강릉 순으로 기온 편차가 큰 것으로 나타났다.

일차원 열전도 방정식의 해

암반은 표면에서 외부온도와 동일하다고 가정하고, 일정깊이(수십m이상)이상에서는 온도가 일정하다고 알려져 있으므로 일정한 온도로 가정한다. 암반의 심도를 L이라 하면 열전도방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. The maximum and minimum temperatures and the temperature deviations in the 5 cities during last two years.

Area	Maximum ave. temperature(°C)	Year & month recorded	Minimum ave. temperature(°C)	Year & month recorded	Temperature deviation(°C)
Gangneung	24.5	2004. 7	-0.4	2003. 1	24.9
Seoul	26.1	2004. 8	-2.5	2003. 1	28.6
Dajeon	26.1	2004. 7	-1.7	2003. 1	27.8
Pohang	26.7	2004. 7	1.2	2003. 1	27.9
Gwangju	26.3	2004. 8	-0.5	2003. 1	26.8

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

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

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

여기서, c 는 비열, K 는 열전도계수, ρ 는 밀도, $\varphi(t)$ 는 외부기온, u_0 는 L 에서 일정하게 유지되는 온도를 나타낸다. 우선 동차경계조건이 되도록

$$u(x, t) = A(t)\left(1 - \frac{x}{L}\right) + B(t)\frac{x}{L} + v(x, t) \quad (3)$$

와 변수변환을 행하면 원래의 편미분방정식과 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= \alpha^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \Psi(x, t) \\ \Psi(x, t) &= \frac{d\varphi}{dt} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \\ v(0, t) &= v(L, t) = 0 \\ v(x, 0) &= f(x) - s(x, 0) = F(x) \end{aligned} \quad (4)$$

이 비동차방정식, 동차경계치문제는 고유함수 전개법에 의하여 해를 구할 수 있다.

우선 대응하는 동차방정식

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (5)$$

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

$U(x, 0) = F(x)$ 를 풀어 고유함수를 구한다. 여기서 $U(x, t) = X(x)T(t)$ 를 대입하고 $X(x)$ 를 x 의 함수, $T(t)$ 를 t 의 함수로 두어 변수를 분리하면

$$\begin{cases} T' - \lambda^2 \alpha^2 T = 0 \\ X'' - \lambda^2 X = 0 \end{cases} \quad (6)$$

를 얻는다. 위의 식으로부터 고유함수 $X_n(x)$ 은

$$X_n(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad \left(\lambda = \frac{n\pi}{L}, \quad n = 1, 2, \dots, \Lambda\right) \quad (7)$$

가 된다. 이것을 위의 식(4)의 우변 2항의 함수에 대하여 급수전개를 실시한다. 즉,

$$\begin{aligned} \Psi(x, t) &= \sum_{k=1}^n \hat{\Psi}_k(t) X_k(x) = \sum_{k=1}^n \hat{\Psi}_k(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{2}{k\pi} \varphi'(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

이다.

다음은 미지함수 $v(x, t)$ 에 대하여도 같은 방식으로 정리를 하면 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^n \left\{ T'_k(t) + \left(\frac{\alpha k \pi}{L}\right)^2 T_k(t) + \hat{\Psi}(t) \right\} X_k(x) = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^n T_k(0)X_k(x) = F(x) \quad (10)$$

각 $T_k(t)$ 는 초기치 문제

$$T_k'(t) + \left(\frac{\alpha k \pi}{L}\right)^2 T_k(t) = -\frac{2}{k\pi} \varphi'(t) \quad (11)$$

$$T_k(0) = \frac{2}{L} \int_0^L F(x) \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) dx \quad (12)$$

를 구하는 것으로

$$T_k(t) = C(t)e^{-\beta^2 t}, \beta = \frac{\alpha k \pi}{L} \quad (13)$$

를 구하고 이것을 식(11)에 대입을 하면

$$C(t) = -\frac{2}{k\pi} \int_0^t e^{-\beta^2 s} \varphi'(s) ds + d \quad (14)$$

가 결정되고 결국 $T_k(t)$ 의 일반해는

$$T_k(t) = C(t)e^{-\beta^2 t} = de^{-\beta^2 t} - \frac{2}{k\pi} \int_0^t e^{-\beta^2(t-s)} \varphi'(s) ds \quad (15)$$

가 된다. 여기서 정수 d 는 다음과 같이 정할 수 있다.

$$d = \{\varphi(0) - u_0\} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{x}{L} \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) dx + \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) dx - \varphi(0) \frac{2}{L} \int_0^L \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) dx \quad (16)$$

따라서 $v(x, t)$ 는

$$v(x, t) = \sum_{k=1}^n T_k(t) \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) dx = \sum_{k=1}^n \left[\begin{aligned} & f(x) e^{-\beta_k^2 t} \\ & + \frac{2}{k\pi} \{(-1)^k u_0 - \varphi(0)\} e^{-\beta_k^2 t} \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \\ & - \frac{2}{k\pi} \left\{ \int_0^t e^{-\beta_k^2(t-s)} \varphi'(s) ds \right\} \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \end{aligned} \right] \quad (17)$$

이기 때문에 구하고자 하는 해 $u(x, t)$ 는 $v(x, t)$ 을 이용하여 다음과 같은 식에 의하여 구할 수 있다.

$$u(x, t) = \varphi(t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) + u_0 \frac{x}{L} + v(x, t) \quad (18)$$

위의 식 (17)을 일반적인 프로그램으로 계산하기 위하여 적분과정을 풀이하면 다음과 같다. 먼저

$$\varphi(t) = c_0 + c_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + \frac{1}{10} \cdot \sin(2\pi \cdot 24 t) \quad (19)$$

인 경우,

$$\varphi'(t) = \frac{2\pi}{365} \cdot c_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + \frac{1}{10} \cdot (48\pi) \cdot \cos(48\pi t) \quad (20)$$

이 된다. 적분계산의 편의를 위해 상수 d_1, d_2, e_1, e_2 와 b_1 을

$$d_1 = \frac{2\pi}{365}, d_2 = 48\pi, e_1 = c_1 \cdot d_1, e_2 = d_2/10, b_1 = \beta_k$$

으로 두면, 피적분함수는 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} f(s) &= \varphi'(s) \cdot e^{-\beta_k^2(t-s)} \\ &= [e_1 \cdot \cos(d_1 \cdot s) + e_2 \cdot \cos(d_2 \cdot s)] \cdot e^{-b_1^2(t-s)} \\ &= e^{-b_1^2 t} \cdot [e_1 \cdot \cos(d_1 \cdot s) e^{b_1^2 s} + e_2 \cos(d_2 \cdot s) e^{b_1^2 s}] \end{aligned} \quad (21)$$

따라서 구하는 적분식은

$$\begin{aligned} \int_0^t f(s) ds &= e^{-b_1^2 t} \left[e_1 \cdot \int_0^t \cos(d_1 \cdot s) e^{b_1^2 s} ds + e_2 \int_0^t \cos(d_2 \cdot s) e^{b_1^2 s} ds \right] \\ &\equiv e^{-b_1^2 t} [e_1 \cdot (A) + e_2 \cdot (B)] \end{aligned} \quad (22)$$

이 되고, 위 식에서 적분 (A)와 (B)는 구체적으로 다

음과 같이 계산된다. 먼저 식 (A)는

$$\begin{aligned}
 (A) &= \left[\cos(d_1 \cdot s) \cdot \frac{1}{b_1^2} e^{b_1^2 \cdot s} \right]^{t_0} \\
 &+ \frac{d_1}{b_1^2} \int_0^t \sin(d_1 \cdot s) \cdot e^{b_1^2 \cdot s} ds \\
 &= \frac{d_1}{b_1^2} \left\{ \left[\sin(d_1 \cdot s) \frac{1}{b_1^2} e^{b_1^2 \cdot s} \right]^{t_0} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{d_1}{b_1^2} \int_0^t \cos(d_1 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot s} ds \right\} \\
 &= \left[\frac{1}{b_1^2} \cos(d_1^2 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot t} - \frac{1}{b_1^2} \right] \\
 &\quad + \frac{d_1}{b_1^4} \left[\sin(d_1 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot t} \right] - \frac{d_1^2}{b_1^4} \cdot (A)
 \end{aligned}$$

으로부터

$$\begin{aligned}
 (A) &= \left\{ \left[\frac{1}{b_1^2} \cos(d_1^2 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot t} - \frac{1}{b_1^2} \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{d_1}{b_1^4} \left[\sin(d_1 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot t} \right] \right\} / \left(1 + \frac{d_1^2}{b_1^4} \right) \quad (23)
 \end{aligned}$$

이 되고, 같은 방법으로 식 (B)는

$$\begin{aligned}
 (B) &= \left[\cos(d_2 \cdot s) \cdot \frac{1}{b_1^2} e^{b_1^2 \cdot s} \right]^{t_0} \\
 &+ \frac{d_2}{b_1^2} \int_0^t \sin(d_2 \cdot s) \cdot e^{b_1^2 \cdot s} ds \\
 &= \frac{d_2}{b_1^2} \left\{ \left[\sin(d_2 \cdot s) \frac{1}{b_1^2} e^{b_1^2 \cdot s} \right]^{t_0} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{d_2}{b_1^2} \int_0^t \cos(d_2 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot s} ds \right\} \\
 &= \left[\frac{1}{b_1^2} \cos(d_2^2 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot t} - \frac{1}{b_1^2} \right] \\
 &\quad + \frac{d_2}{b_1^4} \left[\sin(d_2 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot t} \right] - \frac{d_2^2}{b_1^4} \cdot (B)
 \end{aligned}$$

으로부터

$$\begin{aligned}
 (B) &= \left\{ \left[\frac{1}{b_1^2} \cos(d_2^2 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot t} - \frac{1}{b_1^2} \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{d_2}{b_1^4} \left[\sin(d_2 \cdot s) e^{b_1^2 \cdot t} \right] \right\} / \left(1 + \frac{d_2^2}{b_1^4} \right) \quad (24)
 \end{aligned}$$

이 된다. 따라서 식 (23)과 (24)를 식 (22)에 대입하여, 다음의 적분 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \int_0^t f(s) ds &= e_1 \cdot e^{-b_1^2 \cdot t} \cdot A + e_2 \cdot e^{-b_1^2 \cdot t} \cdot B \\
 &= \frac{e_1}{\left(1 + \frac{d_1^2}{b_1^4} \right)} \times \left\{ \left[\frac{1}{b_1^2} \cos(d_1 \cdot t) - \frac{1}{b_1^2} e^{-b_1^2 \cdot t} \right] + \frac{d_1}{b_1^4} \sin(d_1 \cdot t) \right\} \\
 &\quad + \frac{e_2}{\left(1 + \frac{d_2^2}{b_1^4} \right)} \times \left\{ \left[\frac{1}{b_1^2} \cos(d_2 \cdot t) - \frac{1}{b_1^2} e^{-b_1^2 \cdot t} \right] + \frac{d_2}{b_1^4} \sin(d_2 \cdot t) \right\} \\
 &= \frac{e_1}{\left(1 + \frac{d_1^2}{b_1^4} \right)} \times \left\{ \frac{1}{b_1^2} \left[\cos(d_1 \cdot t) - e^{-b_1^2 \cdot t} \right] + \frac{d_1}{b_1^4} \sin(d_1 \cdot t) \right\} \\
 &\quad + \frac{e_2}{\left(1 + \frac{d_2^2}{b_1^4} \right)} \times \left\{ \frac{1}{b_1^2} \left[\cos(d_2 \cdot t) - e^{-b_1^2 \cdot t} \right] + \frac{d_2}{b_1^4} \sin(d_2 \cdot t) \right\} \quad (25)
 \end{aligned}$$

계산 결과

암석의 열적 특성

기온변화에 따른 암석의 열화현상 영향 심도를 계산함에 있어 본 연구에서는 사암, 화강암, 편마암에 대하여 분석을 실시하였다. 이를 위해 이용한 암석의 물성치는 Table 3(이부경, 1999)과 같으며 비열은 동일하게 설정하였다. 이들 값 중 사암과 화강암의 열전도계수는 인용문헌에 나타난 최소값과 최대값 2개의 값을 적용하여 모두 계산하였다.

일반적으로 임의의 단면적 A를 통과하는 열량 Q는 단면적 A, 온도차 T₁-T₂와 시간 t에 비례하며 두께(길이) x에 반비례한다. 일반적으로 공극율이 작으면 암석의 열전도율은 증가된다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Q &= KA(T_1 - T_2)/x \quad (26) \\
 K &: \text{열전도 계수}
 \end{aligned}$$

동결응해의 영향을 받는 심도 계산

암반의 표면은 외기와 접촉하고 있기 때문에 외부 기온과 같다고 할 수 있다. 또한 암반은 충분한 깊이(약

수십m)에서는 그 온도가 일정하다고 알려져 있다. 이러한 가정하에 도출된 일차원열전도 방정식의 해 식(18)을 이용하여 국내 암반사면이 동결융해를 받는 영역을 계산하였다. 본 계산시 적용할 암반의 초기온도 분포는 알 수 없으므로 초기조건을 설정함에 있어 충분한 시간이 경과하여 암반내부의 온도분포가 정상상태에 도달했을 때부터의 일정시간동안의 온도분포를 계산하였다. 백용(1999)의 연구결과에 의하면 1000년 경과후의 암반 내 온도 분포는 정상상태에 도달하는 것으로 나타나 본 연구에서도 이러한 초기조건을 설정하였다.

계산에 적용된 지역별 기온분포는 식(1)과 Table 1과 같으며, 계산에는 0개월, 1개월, 5개월 및 9개월 후의 온도분포곡선을 계산하여 모든 곡선이 일치되는 심도를 외부기온의 영향 암반심도로 하였다. 이를 정리하면 Table 4와 같으며, 강릉지역의 계산결과를 Fig. 3에 나타낸다. 계산결과에 의하면 우리나라의 외부 기온에 의한 열화한계심도는 약 8.4 ~ 10.7m 내외인 것으로 나타났다.

지역별 열화특성

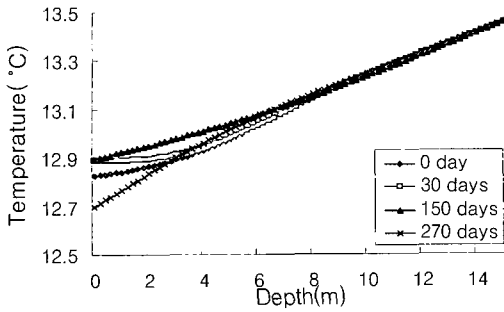
지역별로 암종에 따른 열화심도를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 서울, 대전, 포항 지역은 암종에 관계없이 열전도계수가 클수록 외부 기온에 의해 암반 열화의 영향을 받는 심도가 깊은 것으로 나타났다. 전체 암석 중 열전도계수가 가장 큰 값은 60,000 cal/m×day×°C인 사암이다. 서울에 이 암석이 분포 할 경우 10.7m까지, 대전은 10.1m, 포항은 9.9m까지 외부 온도에 의해 동결-융해작용의 영향을 받는 것으로 계산되었다. 이와 같이 암종에 관계없이 열전도계수와 암반열화의 영향을 받는 암반의 심도가 비례하는 서울, 대전, 포항은 본 연구에서 고려한 5개 지역 중 2년간의 최고기온과 최저기온의 편차가 큰 지역에 해당된다. 이들 3지역에서 암반의 영향 심도가 가장 낮은 암석은 열전도 계수가 36,000 cal/m×day×°C인 화강암으로서 서울은 9.1m, 대전은 8.6m, 포항은 8.4m로 예측되었다.

Table 3. Thermal properties of the rocks used in this study.

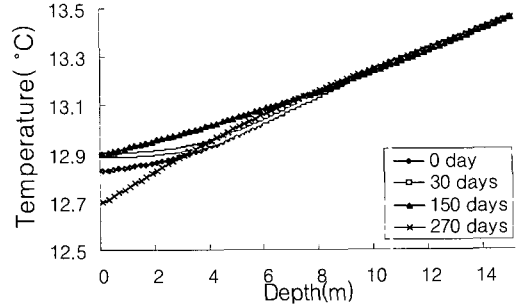
Rock type	Coefficient of thermal conductivity, K (cal/m×day×°C)		Specific heat (cal/kg×°C)	Density (kg/m ³)
	Max.	Min.		
Sandstone	43,200	60,000	180	2,670
Granite	36,000	55,200	180	2,650
Gneiss	45,600		180	2,700

Table 4. Deterioration depths influenced by temperature in the 5 cities.

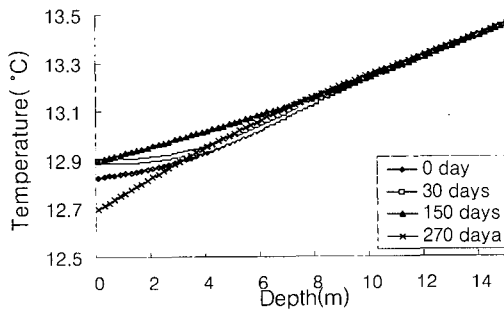
Rock type	Sandstone		Granite		Gneiss	
Coefficient of thermal conductivity(cal/m×day×°C)	43,200	60,000	36,000	55,200	45,600	
Deterioration depth (m)	Gangneung	8.5	9.6	8.4	9.9	9.1
	Seoul	9.0	10.7	9.1	9.9	9.1
	Daejeon	9.3	10.1	8.6	9.5	9.2
	Pohang	8.8	9.9	8.4	9.7	9.2
	Gwangju	9.0	9.5	8.6	10.0	8.8



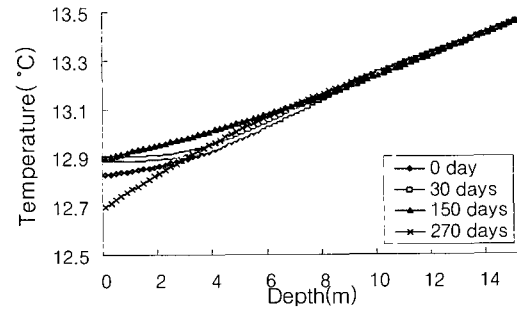
(a) $K=43,200 \text{ cal/m} \times \text{day} \times ^\circ\text{C}$, sandstone



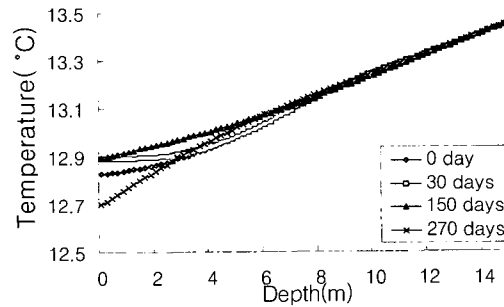
(d) $K=55,200 \text{ cal/m} \times \text{day} \times ^\circ\text{C}$, granite



(b) $K=60,000 \text{ cal/m} \times \text{day} \times ^\circ\text{C}$, sandstone



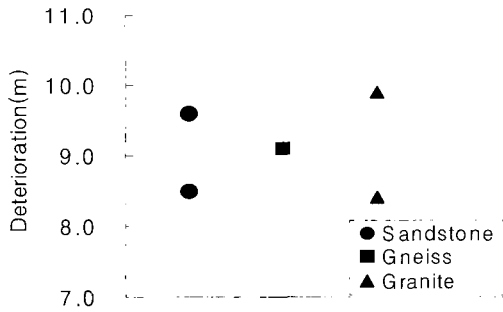
(e) $K=45,600 \text{ cal/m} \times \text{day} \times ^\circ\text{C}$, gneiss



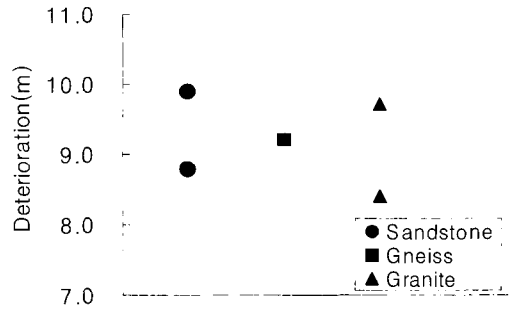
(c) $K=36,000 \text{ cal/m} \times \text{day} \times ^\circ\text{C}$, granite

5개 지역 중 기온 편차가 크지 않은 광주와 강릉지역은 앞에서 언급한 세 지역과 다른 결과를 보인다. 광주 지역에서 영향 심도가 가장 크게 나타난 암석은 전체 열전도율 중 두 번째로 큰 값인 $55,200 \text{ cal/m} \times \text{day} \times ^\circ\text{C}$ 의 화강암이다. 이 때의 영향심도는 10.0m로서 열전도 계수가 가장 큰 사암의 영향심도와 비교하면 약 0.5m 정도 더 깊게 예측되었다. 5개 지역 중 기온 편차가 24.9 $^\circ\text{C}$ 로 가장 작은 강릉 지역은 광주와 마찬가지로 열전도 계수가 $55,200 \text{ cal/m} \times \text{day} \times ^\circ\text{C}$ 인 화강암이 분포할 때 영향심도가 가장 큰 것으로 예측되었고, 그 값은 9.9m이다. 이는 열전도 계수가 가장 큰 사암과 비교했을 때 약 0.3m 더 깊은 심도까지 암반열화 현상이 영향을 미치는 것으로 나타났다.

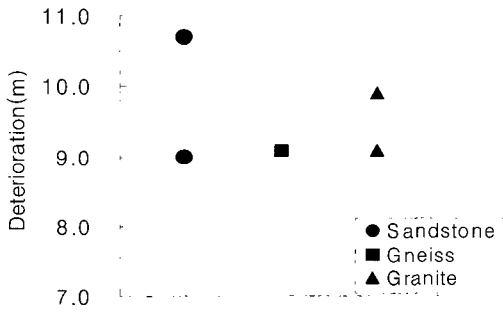
Fig. 3. Temperature vs. depth with the elapsed time at Gangneung area.



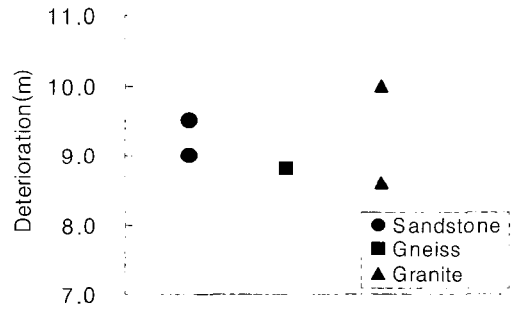
(a) Gangneung



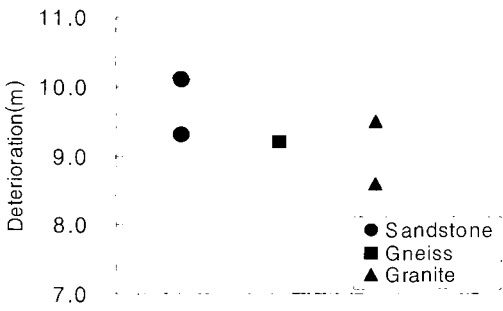
(d) Pohang



(b) Seoul



(e) Gwangju



(c) Daejeon

암종별 열화특성

암종별 열화심도를 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. K값이 43,200 cal/m×day×℃인 사암이 분포할 때 대전지역의 영향범위가 가장 크고, 강릉지역이 가장 낮은 값으로 예측되었으며, 그 심도는 각각 9.3m, 8.5m이다. 열전도계수가 모든 암석들 중 가장 큰 값인 60,000 cal/m×day×℃의 사암은 영향범위가 가장 큰 지역이 서울로서 영향심도는 10.7m이고 가장 작은 지역은 광주이며 서울과의 심도 차는 약 1.2m이다. 편마암의 경우 대전과 포항의 영향범위가 최대로서 9.2m이고, 광주가 최소심도인 8.8m로 나타났다. 열전도계수가 36,000 cal/m×day×℃인 화강암의 경우 서울지역의 암반 열화에 의한 영향심도가 9.1m로 가장 깊었고, 가장 영향심도가 낮은 강릉과 포항지역과는 0.7m 차이로 예측되었

Fig. 4. Deterioration depths at the 5 cities.

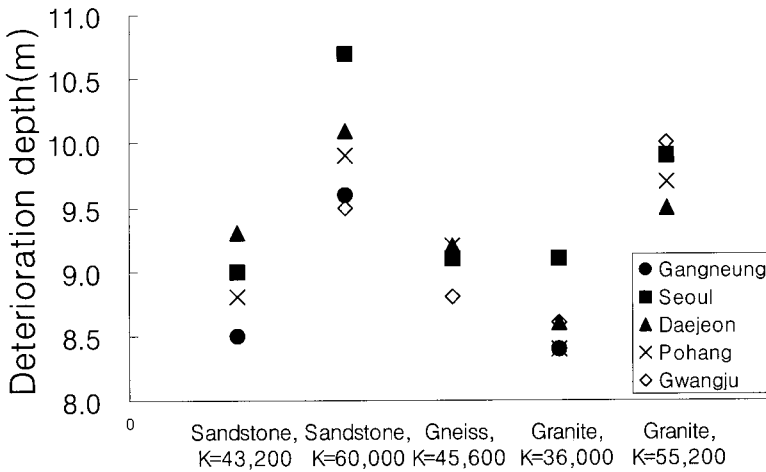


Fig. 5. Deterioration depths of each rock type.

다. K의 값이 55,200 cal/m×day×°C인 화강암이 분포할 때는 광주지역의 동결-융해 작용이 암반에 영향을 미치는 심도가 가장 높았으며, 대전지역이 가장 낮은 값으로 예측되었고, 심도는 각각 10m와 9.5m이다.

전체 암석 중 영향심도가 가장 큰 암석은 열전도계수가 60,000 cal/m×day×°C인 사암이며 그때의 심도는 10.7m이다. 이때의 지역은 최고기온과 최저기온의 편차가 가장 큰 서울이다.

열전도계수가 55,200 cal/m×day×°C인 화강암을 제외하고 암석별로 분석한 결과, 모든 암석에서 기온 편차가 큰 지역에 분포하는 암석일수록 암반의 열화 현상의 영향을 받는 심도가 깊은 경향을 보인다. 하지만 열전도계수가 55,200 cal/m×day×°C인 화강암이 분포할 때는 5개 지역 중 기온편차가 작은 광주와 강릉 지역의 영향심도가 오히려 기온편차가 큰 지역보다 높게 계산되었다.

결론

국내의 주요 5개 도시의 최근 2년간의 기온분포를 이용하여 국내에 많이 분포하는 암종인 사암, 화강암, 편마암을 대상으로 암반열화의 영향심도를 계산하였다. 국내의 동결-융해작용에 의한 열화심도는 약 8.4~10.7m 내외인 것으로 나타났다.

지역에 따라 분석한 결과 2년간의 최고기온과 최저기온의 편차가 큰 지역인 서울, 대전, 포항은 열전도계

수와 암반 열화심도가 비례하는 경향을 보이는 것으로 계산되었다. 5개 지역 중 기온 편차가 크지 않은 광주와 강릉지역은 앞에서 언급한 세 지역과 다른 결과를 보이는데, 광주와 강릉지역에서 영향 심도가 가장 크게 나타난 암석은 전체 열전도율 중 두 번째로 큰 값을 가지는 화강암이다.

암종별로 분석한 결과 열전도계수가 55,200 cal/m×day×°C인 화강암이 분포할 때는 5개 지역 중 기온편차가 작은 광주와 강릉 지역의 영향심도가 기온 편차가 큰 지역들보다 깊게 계산되었다. 이 암석을 제외하고, 암석에서 기온 편차가 큰 지역에 분포하는 암석일수록 암반의 열화 현상의 영향을 받는 심도가 깊은 경향을 보인다.

사사

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힌다.

참고문헌

- 백용, 1999, 凍結融解を受ける岩盤の安定性評価法に関する研究, 충북대학교 박사논문.
- 백용, 2001, 동결융해 심도를 고려한 암반사면의 안정성해석에 관한 연구, 지질공학, 11, 1, 13-23.

- 이부경, 1999, 암석역학의 원리, 도서출판 대운.
- 이재영, 1996, 동결/융해에 따른 폐기물 매립지 복토층 연구, 한국토양환경학회지, 1, 1, 103-109.
- 장현식, 장보안, 이준성, 2004, 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 세일의 동결-융해에 따른 지질공학적 특성 변화, 지질공학, 14, 4, 401-416.
- 한국건설기술연구원, 2004, "시간 열화 특성을 고려한 터널 갱구사면 안정성 기법 및 상시 계측 시스템 개발" 연구보고서, 건설교통부
- Hori, M., 1998, Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials, Int. J. Engng. Sci., 36, 4, 511-522.
- Li, D., Christians, N., Volterrani, M. & Minner, D., 2002, Freeze-thaw cycles and soil amendments, Techwell, 103, 117, 110-113.
- Mutluturk, M., Altindag, R. & Turk, G., 2004, A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41, 237-244.
- Neaupane, K.M., Yamabe, T. & Yoshinaka, R., 1999, Simulation of a fully coupled thermo-hydro-mechanical system in freezing and thawing rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 36, 563-580.
- Prick, A., 1995, Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles, Catena, 25, 7-20.
- Topal, T. & Sozmen, B., 2003, Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument, Engineering geology, 68, 201-223.

투 고 일 2005년 7월 14일
 심 사 일 2005년 7월 18일
 심사완료일 2005년 8월 30일

백용

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

서용석

충북대학교 지구환경과학과
 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
 Tel: 043-261-2765
 Fax: 043-276-9645
 E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

정자혜

한국건설기술연구원 지반연구부
 411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311
 Tel: 031-910-0228
 Fax: 031-910-0561
 E-mail: jhjung@kict.re.kr

권오일

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