

열전도계수 경험식의 국내 적용성에 관한 평가

Estimation of Empirical Equation on Thermal Conductivity

김학승¹⁾, Hak-Seung Kim, 이장근²⁾, Jangguen Lee, 김영석²⁾, Young-Seok Kim, 강제모¹⁾, Jae-Mo Kang, 홍승서¹⁾, Seung-seo Hong

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 전임연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Frost depth is one of important factors to design roadway structure, and it can be estimated with numerical simulation on thermal distribution through subgrade soils. Thermal conductivity is a key parameter for accurate prediction on thermal distribution, but there are few studies on thermal conductivity of subgrade soils in Korea. Thermal conductivity can be affected by several factors such as dry density, moisture content, and saturation degree based on previous researches. Two empirical equations to estimate thermal conductivity are applied to access the accuracy of these equations with experimental data. Results indicate that the equation can be used to estimate thermal conductivity with proper quartz fraction.

Key words : thermal distribution, thermal conductivity, empirical equation, experiment

1. 서 론

국내에서 사용하는 포장두께 설계법에서 동결심도를 산정하기 위해 국외에서 개발된 경험식을 적용하고 있다. 이러한 경험식은 자국의 환경 조건을 반영하여 개발된 식으로 국내에서 직접적으로 사용하기에는 문제가 있다. 또한 경험식에 의한 해석은 축적된 데이터 분석을 통해 가능하며 짧은 연구 기간에 최적의 성과를 도출하는 것은 불가능하다. 하지만, 외부온도에 따른 직접적인 열전달 해석을 통한 지중온도분포에 관한 분석은 수치해석을 통해 비교적 정확한 예측이 가능하다. 그럼에도 불구하고 국내에서는 경험식에 의한 동결깊이 산정에만 초점을 맞추고 있어 외부온도에 따른 직접적인 열전달 해석에 관한 연구는 미미하다. 이러한 지중온도 분포 예측의 핵심은 열전도계수 산정에 있으며, 열전도계수는 흙의 포화도, 함수비, 단위중량, 온도와 함께 흙의 종류에 따라서도 영향을 받는다.

흙의 열전도계수를 보다 정확하게 예측하기 위하여, 본연구에서는 국내시료를 사용하여 열전도 실험을 실시한 자료를 바탕으로 Kersten(1949)과 Johansen(1975)이 제시한 식을 사용하여 계산한 결과값을 비교하였다. 위의 2가지 식을 이용하여 계산된 결과를 바탕으로 열전도실험을 실시하지 않아도 지중온도분포 예측에 필요한 열전도계수를 보다 정확하게 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 이렇게 구하여진 열전도계수를 바탕으로 보다 합리적인 도로노상토의 동상특성 및 동결깊이 추정에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

2 열전도계수

2.1 열전도

열의 전도란 물질의 이동을 수반하지 않고 고온부에서 저온부로 열이 전달되어 가는 현상을 말한다. 액체나 기체 내부에서의 열의 이동은 주로 대류에 의해 일어나지만, 고체 내부에서는 주로 전도에 의해서 열이 이동한다. 열전도에 의한 물체내부에서의 열의 전달속도는 물질 내부에서의 면적에 수직인 방향의 온도기울기에 비례하며, 물질의 종류에 따라 큰 차이가 있다. 이때의 면적에 대한 온도기울기의 비례상수를 열전도계수(thermal conductivity, k_u)라 한다. 열전도계수는 그림 1과 같이 열이 움직이는 열류방향(x)으로 단위온도경사 하에서 요소의 단위면적을 통해서 단위시간당 흐르는 열의 양으로 계산되며 식(1)로 나타낸다. 흙 전체의 열전도율에 미치는 인자에는 여러 가지가 복합적으로 작용하고 있으며, 이중에서도 주로 수분의 함량이나 공기, 광물성분 및 유기물의 체적율의 영향을 받으며, 충전율 또는 공극률 등 밀도와 입경, 또는 입자, 접촉 및 결합 효과, 구성성분의 종류 등이다(Farouki, 1981).

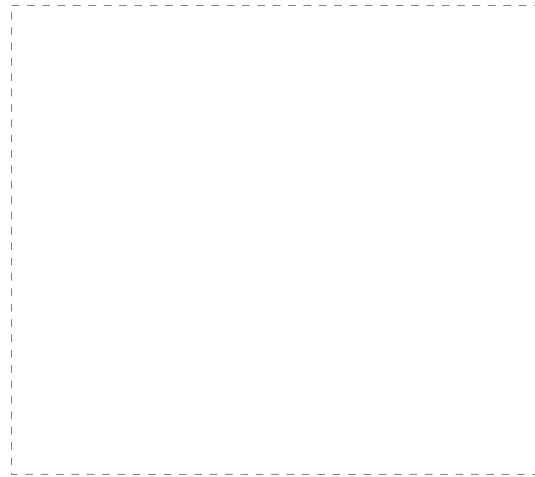


그림 1. 흙 요소를 통한 열 흐름(Andersland and Ladanyi, 2003)

$$q = \frac{Q}{A} = -k_u \frac{dT}{dx} = k_u i \quad (1)$$

여기서, q 는 단위면적당 열흐름 비율($J/m^2 s$), k_u 는 열전도계수($W/m \cdot K$), Q 는 열류, A 는 면적(m^2), $i = (dT/dx)$ 는 온도기울기($^{\circ}C/m$), T 는 온도이다.

2.2 Kersten의 열전도계수

Kersten(1949)은 함수비와 건조단위중량을 이용하여 열전도계수를 구하였다. 식 (2)는 조립토(실트와 점토 성분이 20%이하)의 열전도계수를, 식(3)은 세립토(실트와 점토 성분이 50%이상)에 적용하여 열전도계수를 구할 수 있다.

$$k_u (W/m \cdot K) = 0.1442(0.7 \log w + 0.4)(10)^{0.6243\rho_d} \quad (2)$$

$$k_u (W/m \cdot K) = 0.1442(0.9 \log w - 0.2)(10)^{0.6243\rho_d} \quad (3)$$

여기서, w 는 함수비(%), ρ_d 는 건조단위중량(g/cm^3)이다.

2.3 Johansen의 열전도계수

Johansen(1975)은 동일 건조밀도인 경우 건조토의 열전도계수(k_{dry})와 포화토의 열전도계수(k_{sat}) 및 무차원의 Kersten상수(K_e)를 사용하여 열전도계수를 계산하였다. Johansen(1975)의 식을 살펴보면 다음과 같다.

$$k_u = (k_{sat} - k_{dry})K_e + k_{dry} \quad (4)$$

식(4)에서 사용된 K_e , k_{dry} , k_{sat} , 및 k_s 는 아래의 식을 이용하여 계산한다.

$$K_e = \log S_r + 1.0 \quad (5)$$

$$k_{dry} (W/m \cdot K) = \frac{0.137\rho_d + 64.7}{2700 - 0.947\rho_d} \pm 20\% \quad (6)$$

$$k_{sat} = k_s^{1-n} k_w^n \quad (7)$$

$$k_s = k_q^f k_0^{1-f} \quad (8)$$

여기서, S_r 은 포화도, ρ_d 는 건조단위중량(kg/m^3), n 은 공극율, k_w 는 물의 열전도계수(= $0.57 W/m \cdot K$), k_q 는 quartz의 열전도계수(= $7.7 W/m \cdot K$), f 는 quartz fraction, k_0 는 기타 미네랄의 열전도계수(= $2.0 W/m \cdot K$)이다. Kersten(1949)식과 비교하여 Johansen(1975)은 quartz fraction이라는 상수를 더하여 흙의 구성성분에 따른 열전도 계수의 변화를 적극적으로 반영하였다.

3 열전도계수 비교 및 고찰

위에서 언급한 Kersten(1949)과 Johansen(1975)의 식을 이용하여 구한 값과 국내에서 발표된 허재민(2010), 백성권 외 1인(2003)의 실험결과와 비교하였다. Kersten(1949)의 식은 함수비와 건조단위중량만을 고려하여 열전도계수를 계산하였고, Johansen(1975)의 식은 quartz fraction을 고려하여 열전도계수를 구한다는 차이점이 있다. 각 식을 이용한 계산된 열전도계수($k_{estimated}$)와 실측 값($k_{measured}$)의 차이를 식(9)를 이용하여 나타냈다.

$$E(\%) = \frac{|k_{measured} - k_{estimated}|}{k_{measured}} \quad (9)$$

조립질 흙(Sandy soils)에서 Kersten(1949)식을 이용하여 계산한 결과와 실측한 열전도계수의 차이는 평균 57.9%, Johansen(1975)의 식을 이용하여 계산하였을 경우에는 20.2%($f = 0.5$), 92.9%($f = 1$)의 열전도계수 차이를 보여준다. 또한 세립질 흙(Clayey soils)의 경우에는 Kersten(1949)식을 이용하여 계산한 결과는 평균 59.2%의 열전도계수 차이값을, Johansen(1975)의 식을 이용하여 계산하였을 경우에는 57.6%($f = 0$), 44.4%($f = 0.5$)의 열전도계수 차이를 보여준다.

표 1. 조립토 실험결과 (허재민 2010)와 Johansen, Kersten의 식을 이용한 계산 결과 비교

통일분류법	함수비 (%)	건조단위 중량(t/m^3)	포화도 (%)	비중	열전도계수, $k(W/m \cdot k)$	Johansen(1975)				Kersten (1949)	
						$f=0.5$		$f=1$		k_u	$E(\%)$
						k_u	$E(\%)$	k_u	$E(\%)$		
SM	7.7	1.85	44.86	2.70	1.350	1.510	11.8	2.327	72.4	2.103	55.7
SM	7.7	1.95	53.81	2.70	1.450	1.774	22.3	2.815	94.2	2.428	67.4
SM	7.7	2.05	65.57	2.70	1.665	2.091	25.6	3.429	105.9	2.803	68.3
SM	4.7	2.05	40.05	2.70	1.251	1.662	32.8	2.648	111.7	2.391	91.1
SM	7.7	2.05	65.57	2.70	1.666	2.091	25.5	3.429	105.8	2.803	68.2
SM	10.7	2.05	91.11	2.70	1.923	2.377	23.6	3.949	105.4	3.078	60.0
SM	10.5	1.76	53.39	2.68	1.360	1.544	13.5	2.354	73.1	2.018	48.4
SM	10.5	1.85	63.00	2.68	1.457	1.791	22.9	2.811	92.9	2.297	57.6
SM	10.5	1.95	75.17	2.68	1.720	2.090	21.5	3.388	97.0	2.652	54.2
SM	7.5	1.95	53.69	2.68	1.525	1.806	7.4	2.887	48.1	2.409	23.5
SM	10.5	1.95	75.17	2.68	1.720	2.090	21.5	3.388	97.0	2.652	54.2
SM	13.5	1.95	96.65	2.68	1.732	2.302	32.9	3.761	117.2	2.834	63.6
SM	8.2	1.87	50.48	2.69	1.535	1.633	6.4	2.546	65.9	2.204	43.6
SM	8.2	1.98	61.05	2.69	1.675	1.937	15.7	3.124	86.5	2.582	54.2
SM	8.2	2.08	75.21	2.69	1.880	2.288	21.7	3.817	103.0	2.981	58.6
SM	5.2	2.08	47.70	2.69	1.637	1.880	14.8	3.064	87.2	2.584	57.9
SM	8.2	2.08	75.21	2.69	1.887	2.288	21.2	3.817	102.3	2.981	58.0
SM	11.2	2.08	100	2.69	2.067	2.543	23.0	4.289	107.5	3.253	57.4

표 2. 세립토 실험결과 (백성권의 1인, 2003)와 Johansen, Kersten의 식을 이용한 계산 결과 비교

통일분류법	함수비 (%)	건조단위 중량(t/m^3)	포화도 (%)	열전도계수, $k_u(W/m \cdot k)$	Johansen(1975)				Kersten (1949)	
					$f=0$		$f=0.5$		k_u	$E(\%)$
					k_u	$E(\%)$	k_u	$E(\%)$		
CH	87.95	0.8	100	1.48	0.84	43.3	1.03	30.2	0.71	52.3
CH	82.34	0.82	96.54	1.62	0.84	48.0	1.05	35.4	0.71	55.9
CH	80.59	0.83	90.41	1.22	0.83	32.3	1.03	15.7	0.72	40.9
CH	79.09	0.84	92.05	1.65	0.84	49.3	1.05	36.7	0.73	55.9
MC	34.63	1.34	88.01	4.61	1.06	77.0	1.51	67.3	1.17	74.5
MH	51.22	1.05	84.78	1.8	0.92	48.9	1.23	31.7	0.87	51.5
CH	59.67	1.01	94.7	2.51	0.92	63.4	1.20	52.2	0.86	65.7
CH	56.44	1.06	97.86	1.9	0.95	50.2	1.25	34.4	0.91	52.1
CH	55.02	1.06	93.36	2.04	0.94	54.1	1.24	39.3	0.90	55.7
CH	50.52	1.16	100	1.95	0.99	49.4	1.32	32.1	1.02	47.8
CH	50	1.17	100	2.12	0.99	53.3	1.33	37.2	1.03	51.4
CH	47.58	1.18	99.71	2.69	1.00	62.7	1.36	49.4	1.03	61.7
CH	56.71	1.06	95.31	1.57	0.93	40.4	1.23	21.6	0.91	41.9
CH	56.88	1.05	97.07	1.74	0.94	45.9	1.24	28.9	0.90	48.3
CH	59.82	1.03	96.64	2.28	0.92	59.4	1.21	47.1	0.89	61.1
CH	50.95	1.13	95.94	2.38	0.97	59.3	1.30	45.5	0.98	58.9
CH	50.1	1.13	92.75	1.97	0.96	51.2	1.29	34.5	0.97	50.6
CH	78.4	0.86	96.27	2.39	0.85	64.3	1.07	55.3	0.75	68.7
CH	56.17	1.06	97.3	2.62	0.95	63.9	1.25	52.4	0.91	65.3
CH	47.65	1.19	98.52	2.9	1.00	65.6	1.35	53.3	1.05	64.0
CH	37.34	1.29	87.51	3.92	1.03	73.7	1.45	63.0	1.12	71.5
CH	64.69	0.98	97.09	3.25	0.91	72.1	1.17	64.1	0.84	74.0
CH	65.67	0.97	96.2	2.6	0.90	65.5	1.15	55.6	0.83	67.9
CH	70.76	0.95	100	2.67	0.89	66.6	1.13	57.5	0.83	69.0
CH	34.98	1.38	100	3.47	1.11	68.1	1.58	54.5	1.25	64.1
CH	44.67	1.22	100	3.46	1.03	70.4	1.40	59.4	1.07	69.1

4 결론

국내시료를 실측한 자료와 Kersten(1949)과 Johansen(1975)의 식을 이용하여 계산한 열전도계수의 값을 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 조립질 흙에서 열전도계수를 실측값과 비교해 보면 Kersten(1949)식을 이용하여 계산하면 평균 57.9%, Johansen(1975)의 식을 이용하면 20.2%($f = 0.5$), 92.9%($f = 1$)의 차이가 나타났다.
- (2) 세립질 흙의 경우 열전도계수의 차이는 Kersten(1949)식을 이용하여 계산한 결과는 평균 59.2%, Johansen(1975)의 식을 이용하여 계산하였을 경우에는 57.6%($f = 0$), 44.4%($f = 0.5$)의 차이를 보여 준다.
- (3) 조립질, 세립질 흙에서 모두 Kersten(1949)을 이용하여 열전도계수를 계산한 값보다, Johansen(1975)의 식에서 $f = 0.5$ 일 경우의 결과값이 비교적 정확하게 나타났다.
- (4) 열전도계수는 함수비와 건조단위중량의 영향을 받지만, 흙을 구성하고 있는 성분의 영향도 받는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 기관고유사업의 일환으로 진행되었습니다.

참고문헌

1. 백성권, 안형준(2003), “불교란 점성토의 열전도 특성에 관한 연구”, **대한토목학회 정기학술대회**, pp.4112~4117.
2. 허재민(2010), “동결깊이 산정을 위한 도로포장 재료의 열전도 특성 분석”, **경희대학교 대학원**.
3. Andersland, O. B. and Ladanyi, B.(2003), *Frozen Ground Engineering(Second Edition)*, John Wiley and Sons, New York, pp.45~47.
4. Farouki, O. T.(1981), *Thermal Properties of Soils*, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Monograph 81-1.
5. Johansen, O.(1975), *Thermal Conductivity of Soils*, Ph. D. Thesis, Trondheim University, Norway.
6. Kersten, M. S.(1949), *Thermal Properties of Soils*, University of Minnesota Engineering Experiment Station Bulletin No. 28.