

도로포장재료의 열전도특성 분석

Characterization Thermal Property of Pavement Materials

이석근* · 김인태** · 허재민*** · 전종명**** · 한용진*****

Rhee, Suk Keun · Kim, In Tai · Heo, Jae Min · Jeon, Jong Myung · Han, Yong Jin

1. 서론

국내에서 동결깊이의 결정은 기온자료를 분석하여 만든 동결지수를 이용하여 동결지수와 동결깊이의 상관관계식으로부터 결정되고 있다. 그러나 이러한 온도자료만으로 산출된 동결깊이는 재료의 특성을 충분히 반영하지 못하는 단점을 갖고 있다. 또한 동상 즉, 동결융해(freezing and thawing)로 인한 피해를 줄이기 위하여 도로포장구조를 설계할 때 노상이 동결하는 것을 방지하기 위하여 동상방지층(anti-freezing layer)을 노상위에 별도로 설치하고 있는데, 흙은 동상을 제어하는데 재료로도 사용된다. 이에 따라 동상과 관련하여 흙의 주요한 특성인 열전도특성을 분석하고자 한다. 현재까지 지질 및 지반분야에선 흙의 열전도특성에 대한 연구가 진행되었다. 그러나 도로포장분야에서 포장재료의 열전도특성은 동상과 관련된 중요한 재료의 물성임에도 불구하고 연구가 미흡한 실정이다. 따라서, 이번 연구는 도로포장재료로써 흙이 동상에 어떠한 영향을 미치는지 열전도율을 중심으로 분석하고자 한다. 이에 따라 현재 진행 중인 “도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구” 과제의 일환으로 현장 계측기가 매설이 된 15개소 현장 중 서울지방국토관리청의 A현장, 대전지방국토관리청의 C,D,F현장, 원주지방국토관리청의 E현장, 부산지방국토관리청의 B,G현장의 7개소의 노상도와 보조기층 그리고 동상방지층에 사용되는 재료의 열전도율을 분석했다. 그러나 채취된 7개소의 보조기층과 동상방지층에서 사용된 재료가 동일하여 보조기층의 분석만 시행하였다. 먼저 함수비와 다짐도에 따른 열전도율을 분석하였다. 열전도율은 주로 함수비와 밀도 및 공극률 또는 다짐도에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Tarnawski et al.,2002), 또한 상온상태와 동결시 변화되는 열전도율도 측정 및 비교분석 하였다. 추가적으로 도로 표층의 포장재료인 아스팔트혼합물과 콘크리트시멘트의 열전도율을 분석하였다.

2. 시험시료 및 실험방법

2.1 시험시료의 기본 물성

7개소 현장의 노상도와 보조기층재료에 대해 기초 물성 시험을 실시하였다. 입도 시험을 통하여 #4통과율, #200통과율, 곡률계수(C_c), 균등계수(C_u)등을 측정하였다. 액성한계시험과 소성한계시험을 통하여 소성지수를 확인하였으며, 또한 각각의 비중을 알아보았다. 흙의 분류는 미육군공병단에서 제시한 통일분류법으로 흙을 분류하였다. 그리고 본 연구에서의 다짐시험은 시험시료의 기본 물성으로써의 의미 외에 함수비와 건조밀도에 따른 시료성형과 관련하여 매우 중요한 시험이기 때문에 실제 도로현장에서 많이 사용하고 있는 수정 D다짐 방법(KS F2313-91(96))을 사용하였다. 7개소 현장의 기초 물성 시험 결과는 다음 표 1과 같다.

아스팔트혼합물은 일반적인 밀입도 혼합물로서 입도 13mm, 19mm, 25mm별로 측정하였고, 시멘트 콘크리트의 경우에는 마찬가지로 일반적으로 사용되는 포틀랜드 시멘트를 사용하여 만든 실제 콘크리트 도로포장 재료를 측정하였다.

* 정회원 · 경희대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 031-201-2900(E-mail : skrhee@khu.ac.kr)
** 정회원 · 명지대학교 교통공학과 조교수·공학박사 · 031-330-6505(E-mail : kit1998@mju.ac.kr)
*** 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 · 석사과정 · 031-201-2923(E-mail : highway_jm@naver.com)
**** 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 · 박사과정 · 031-201-2923(E-mail : rang-ne@hanmail.net)
***** 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 · 석사과정 · 031-201-2923(E-mail : ssocom@nate.com)



표 1. 시험시료 기초물성 결과

재료	입도특성				PI(%)	Soil Type	비중	다짐특성(D다짐)		
	#4 통과 (%)	#200 통과 (%)	균등 계수 (C _u)	곡률 계수 (C _c)		USCS		γ _{dmax} (t/m ³)	OMC (%)	
노상토	A현장	99.9	2.7	2.9	1.76	5.8	SP	2.700	1.93	10.5
	B현장	81.2	12.1	27.0	2.10	N.P	SM	2.702	1.95	7.7
	C현장	98.0	18.4	26.7	1.40	N.P	SM	2.675	1.85	10.5
	D현장	99.7	1.1	4.29	0.46	7.8	SP	2.730	1.86	10.7
	E현장	99.9	2.9	3.8	1.78	N.P	SW	2.680	1.87	10.0
	F현장	99.8	1.8	3.5	0.73	N.P	SP	2.680	1.87	9.0
	G현장	65.8	21.8	94.8	0.80	N.P	SM	2.687	1.98	8.2
보조기층	A현장	/	/	/	/	/	/	/	2.31	5.5
	B현장	44.1	5.1	66.4	1.70	N.P	GW	2.670	2.15	4.5
	C현장	47.3	3.8	60.0	2.50	N.P	GW	2.670	2.27	6.0
	D현장	39.2	2.9	/	/	N.P	/	2.720	2.25	6.0
	E현장	36.4	5.1	/	/	N.P	/	2.660	2.25	6.5
	F현장	53.8	3.1	/	/	N.P	/	2.656	2.29	6.5
	G현장	44.3	4.2	26.2	0.60	N.P	GP	2.660	2.60	5.0

2.2 열전도 실험

2.2.1 열전도 특성 측정 장비

열전도를 측정 장비는 Anter corporation사에서 만든 QuickLing-30을 사용하였다. 이 측정장비는 기존의 아날로그 형태의 실험 방법에 수식을 적용하여 사용자가 바로 열전도 측정값을 디스플레이를 통해 읽을 수 있게 디지털화하였다. 열전도를 측정은 시험시료에 일정 시간동안 히팅파워(Q)를 가한 후 초기 시료의 온도와 최종 시료의 온도를 측정한 후 그 온도차를 측정하여 구한다.

$$\lambda = \frac{2.30Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \text{Log}_{10}(t_2/t_1) = \frac{Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln(t_2/t_1) \quad \text{식(1)}$$

여기서, λ = 열전도율 (W/(m · k)), Q = 히터의 전력(W/(m · k))

T₁ = 초기 측정 온도 (k), T₂ = 최종 측정 온도 (k)

t₁ = 초기 측정 시간 (s), t₂ = 최종 측정 시간 (s)

식(1)을 이용하여 열전도율(λ)을 산정한다. 기존의 장비와 이용된 식은 1차원적인 분석이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 ASTM D5334-92 표준을 따른 장비인 니들형태의 프로브를 통해 온도를 니들의 열선부와 선단부에서 동시에 측정하여 그 차이를 시간과 거리, 소모된 전력량을 통해 열전도율을 측정하게 된다. 그러나 본 연구에서는 니들 프로브 타입이 아닌 서페이스 프로브타입(그림 2-1)으로 진행 되었다. 직경 5cm 가량의 표면 부착형으로 니들 프로브와 동일한 계산식의 형태를 가지고 있지만 열의 가열이 2차원으로 진행되어 온도 측정하는 지점을 상대적으로 많아져 보다 정밀한 값을 갖는다.

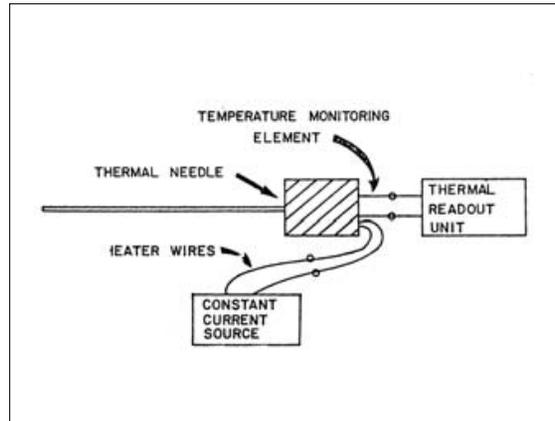


그림 1. 열전도율 측정 프로브의 시험용의 셋업



그림 2-1. 서페이스 프로브

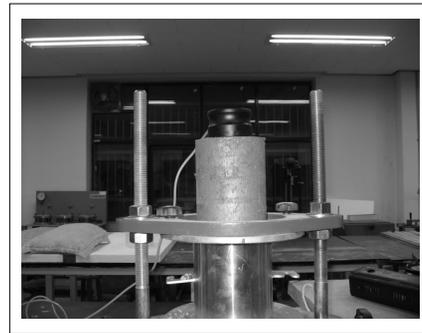


그림 2-2. 열전도율 측정

2.2.2 시료의 성형과 실험 방법

다짐시험을 통해 얻어진 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도(γ_{dmax})를 기준으로 하여 D다짐 방법으로 시료를 성형하였다. 각각의 시료에 고정된 함수비를 조건에서 다짐도를 90%, 95% 100%로 변화시켜 다짐도에 따른 열전도율의 변화추이를 분석해 봤으며, 또한 고정된 건조밀도 조건에서 함수비를 조절하여 OMC-3%, OMC, OMC+3% 세 개의 시료를 제작하여 열전도율의 양상을 시험해 보았다. 동결상태 비교실험 시에는 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도(γ_{dmax})의 시료를 온도(-10°C)로 동결하여 비교하였다.

아스팔트는 입도를 변화하여 측정하였고, 시멘트 콘크리트는 일반적으로 도로포장에 사용되는 시료 1개를 성형하여 실험을 진행하였다. 표층재료도 -10°C에서 동결상태를 비교하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 노상토 및 보조기층의 열전도율 실험

3.1.1 다짐도와 함수비에 따른 열전도율 실험

일반적으로 다짐도에 따른 열전도율을 보면 다짐도가 증가할 때 열전도율 또한 점차적으로 증가하는 양상을 알 수 있었다(그림 3-1, 3-3). 즉 다짐도는 흙의 전체 밀도와 건조밀도에 직결된다. 이에 따라 각각 그래프에서는 각각 현장 다짐도를 비교할 수 있도록 X축을 건조밀도로 표기하였다. 다짐도에 따른 열전도율 분

석에서 함수비를 고정하여 함수비에 영향을 받지 않는, 다짐도만의 추이를 측정할 수 있었다.

마찬가지로 함수비에 따른 열전도율 값도 대체적으로 함수비가 클수록 증가하는 정의 상관성을 갖고 각각의 현장의 비교를 위하여 X축을 실제 함수비로 표기하였다. 그리고 함수비의 영향만 관찰하기 위해 다짐도는 100%로 고정하였다(그림 3-2, 3-4).

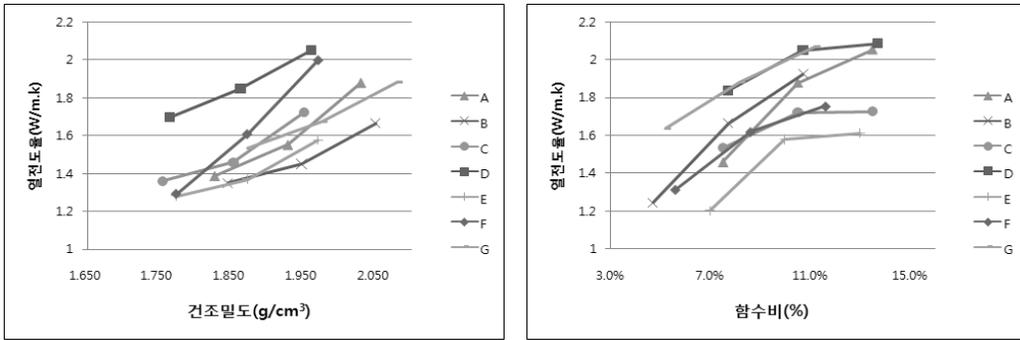


그림 3-1, 2. 노상토의 다짐도(건조밀도)와 함수비에 따른 열전도율

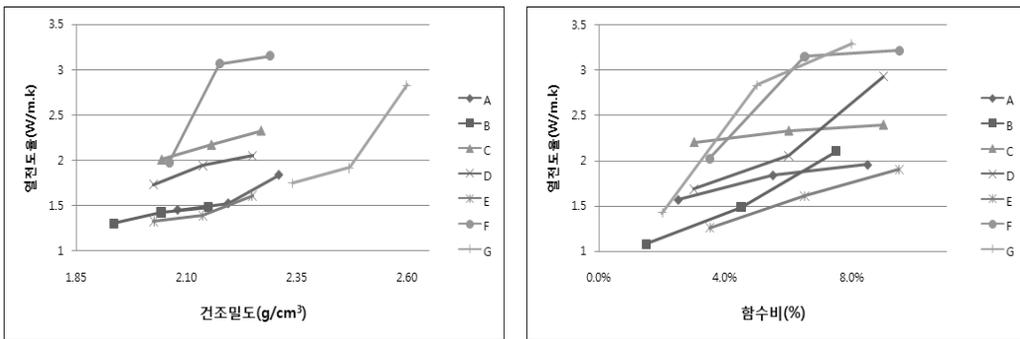


그림 3-3, 4. 보조기층의 다짐도(건조밀도)와 함수비에 따른 열전도율

전체적으로 함수비와 다짐도가 클수록 열전도율이 증가하는 정의 상관관계에 있었다. 다짐도에 따른 열전도율의 변화는 서서히 증가하다가 증가폭이 커지는 반면에, 함수비에 따른 열전도율의 변화는 함수비 증가에 따라 점차 증가폭이 줄어들었다.

노상토와 보조기층을 비교하면 건조밀도가 높은 즉 상대적으로 다짐도가 높은 보조기층이 전체적으로 높은 열전도율값을 보였다. 낮은 함수비에서도 높은 다짐도를 갖는 보조기층이 비록 함수비가 노상토보다 낮더라도 보다 큰 열전도율을 보였다. 또한 기본 물성 실험을 통하여 얻어진 입도, 비중 등의 기본 물성과 열전도율을 비교해 보았지만 큰 상관관계를 보이지 않았다.

3.1.2 상온상태와 동결상태 비교실험

임의의 동결온도(-10℃)와 상온상태에서의 열전도율을 비교하였다. A,D,E,F 현장의 노상토와 보조기층을 -10℃온도에서 18시간 동결하여 진행하였다. 함수비는 OMC로 고정하고, 다짐도는 최대건조밀도(γ_{dmax})로 고정하여 각각 열전도 변화를 측정하였다.

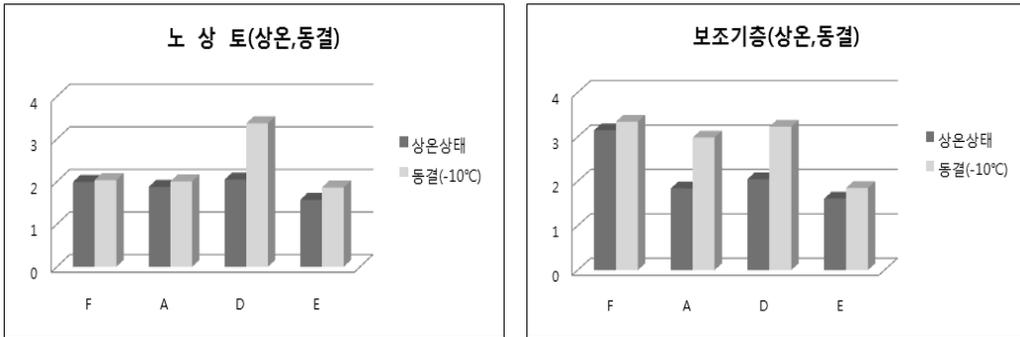


그림 4. 노상토와 보조기층의 상온상태와 동결상태 비교(단위:W/m·k)

표 2. 물질의 열전도율(미 공병단 자료-CRREL Report 93-2, 1993)

물질	열전도율 K(W/m·k)
공기	0.0250
물	0.5815~0.6048
얼음	2.0934~2.2097

실험이 진행된 모든 시료에서 동결상태의 열전도율이 상온상태의 열전도율보다 큰 값을 보였다. 이는 표 2에서와 같이 물이 얼음으로 상변화가 일어나면 큰 폭의 열전도율의 변화 생긴다. 이 때 얼음이 전체 시험 시료의 열전도율에 영향을 미친다. 특히 D현장의 노상토는 동결시 열전도율의 큰 변화가 있었는데 함수비가 10.7%로 매우 높았다. 또한 상온에서와 마찬가지로 동결상태에서도 최대건조밀도(γ_{dmax})가 상대적으로 큰 값을 갖는 보조기층의 열전도율이 전반적으로 큰 값을 보였다.

3.2 아스팔트 및 콘크리트의 열전도율 실험

3.2.1 상온상태와 동결상태 비교실험

아스팔트 혼합물은 동결시 열전도율이 증가하였다(그림 5-1). 자연 건조 상태의 아스팔트 혼합물은 미량의 수분을 포함하고 있다. 동결과정에서 수분의 상변화가 열전도율의 변화를 일으켰다. 추가적으로 아스팔트 혼합물은 입도가 커짐에 따라 열전도율이 증가하였다. 골재의 치수가 증가하면 골재 사이에 아스팔트 바인더 양이 상대적으로 적어지는데 열전도율이 낮은 바인더의 비율이 줄어 큰 열전도값을 증가를 보였다.(그림 5-2).

콘크리트의 경우도 마찬가지로 동결상태의 열전도율이 상온상태의 열전도율보다 높다(그림 6). 또한 진행된 연구에서와 같이 콘크리트의 열전도율은 전반적인 아스팔트보다 높았다.

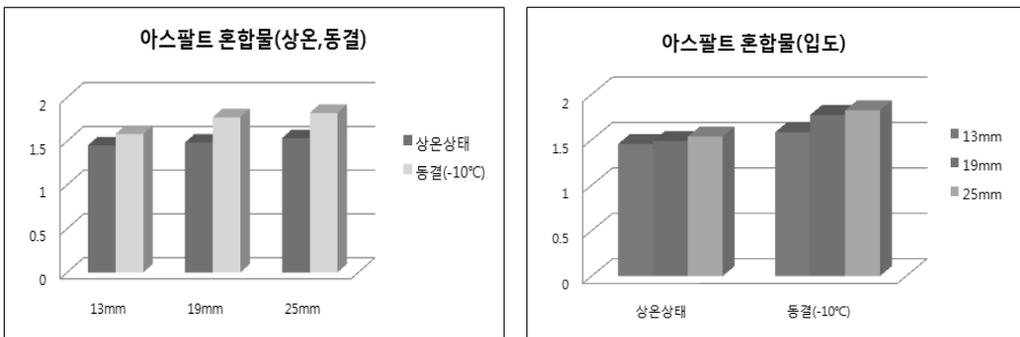


그림 5-1, 2. 아스팔트의 상온상태와 동결상태 비교(단위:W/m·k)

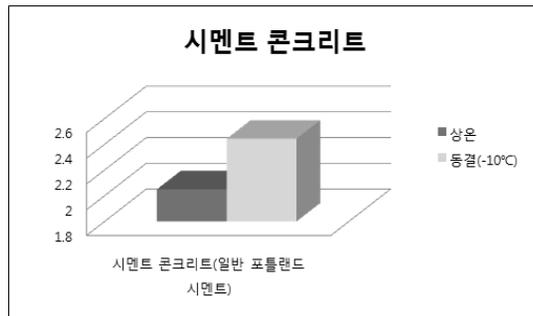


그림 6. 시멘트 콘크리트의 상온상태와 동결상태 비교(단위:W/m·k)

4. 결 론

본 논문에서는 “도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치기준 연구”에서 계측기가 매설된 지역 7개소의 시료를 채취하여 함수비와 다짐도에 따른 열전도율을 측정하였다. 또한 동결상태의 열전도율과 비교분석하였다. 추가적으로 아스팔트와 콘크리트의 열전도율 측정도 상온과 동결상태에서 각각 실시하였다. 지금까지의 시험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 열전도율은 다짐도와 함수비에 큰 영향을 받는다. 도로포장재료로써의 토양은 크게 흙과 물과 공기로 이루어져있다. 각각의 구성 성분이 차지하는 비율에 따라 열전도율은 영향을 받는다.

① 다짐도가 클수록 열전도율은 증가한다. 함수비가 고정되었을 때의 다짐도의 증가는 시료내부의 공극이 줄어들어 가는 것을 의미한다. 상대적으로 열전도율이 낮은 공기의 비율이 줄어들어 열전도율이 증가한다.

② 함수비가 증가할수록 열전도율도 증가한다. 다짐도를 고정하고 함수비를 증가시키면 공극을 물이 차지하는데, 이는 공기보다 열전도율이 큰 물이 증가를 의미하며 열전도율은 증가한다.

3) 동결상태에서 열전도율은 증가한다. 시료에 존재하는 물의 상변화로 인하여 열전도율의 영향을 미친다.

4) 아스팔트 혼합물에 입도가 증가함에 따라 열전도율은 증가한다. 골재최대치수가 커지면 열전도율이 낮은 바인더의 비율이 줄어 열전도율이 증가하게 된다.

5) 다짐도와 함수비 그리고 온도등의 변수 이외에도 열전도율에 영향을 미치는 다른 요인에 대한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원 “도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치기준 연구”의 과제 일환으로 작성되었습니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 백성권, 안형준(2004), “고소성 점토의 열전도 특성에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 24(5), 267-272
- 차장환 외 5명(2008), “토양의 공극률 및 함수비가 열전도도에 미치는 영향”, 한국지하수토양환경학회지vol.13,no.3,27-36
- ASTM (1992) Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, American Society for Testing and Materials, D5334-92
- Kersten, M.S.(1949) Thermal Properties of Soil, Bulletin of the University of Minnesota, Institute of Technology, 52,1-225
- Tarnawski, V.R., Leong, W.H., Gori, F.,Buchan, G.D., and Sundberg, J., 2002, Inter-particle contact heat transfer in soil system at moderate temperatures, Int. J.Energy Res., 26, 1324-1358