

흙 종류에 따른 도로 동결심도의 이론적 분석 연구

A study of frost depth with the numerical model and the soil characteristics

임정용* · 김인태** · 전종명***

Im, Jeong Yong · KIm, In Tai · Jun, Jong Myong

1. 서 론

도로의 포장구조 설계 시 노상토의 보조기층 침입이나 노상의 동결을 방지하고, 환경에 따라 노상의 기능을 강화하거나 동결을 방지하기 위한 동상방지층이 설계되고 있다. 포장체의 동상 메커니즘은 대단히 많은 요소를 포함하고 있으며 도로 설계 시 이러한 다양한 요소를 고려하는 데 어려움이 많다.

현재 동상방지층 설계에 사용되는 산정방법들은 동결지수를 결정, 대입하여 결과를 얻는다. 동결지수의 경우 기국내 기상청의 측후소자료를 기초로 하여 결정되며 이는 기상청 측후소의 유무와 거리에 의존하고 있다. 때문에 현장의 환경특성에 관련된 요소를 반영할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 국내의 현장 4곳을 선정하여 각 현장의 흙 종류에 대해 분석하고, 흙 종류별 동결심도의 변화를 파악하기 위해 포장구조의 동상 해석 프로그램인 FROST를 활용하여 결과를 비교하였다. 각 현장은 가평, 수안보, 부여, 김천으로 지역적으로 차이가 있으나 동결지수가 유사한 값을 보이는 북부, 중부의 각각 두 지역을 선정하였다. 각 현장의 동결지수만 적용한 미공병단의 동결심도 예측 결과를 위 분석 값과 비교하고, 계측기를 통해 계측된 현장의 동결심도와 비교하였다. 이를 통해 현장의 여러 환경특성 요소 중 흙의 종류를 파악 및 분류하여 적용했을 때의 동결심도 변화 및 필요성에 대해 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 현장 분석 자료 수집

가평, 수안보, 부여, 김천 현장의 노상토 및 보조기층 시료를 채취하여 통일 분류법을 통해 흙의 종류를 분류하였다. 분류된 현장의 흙 종류 이외에 다른 종류의 흙에 대한 물성 자료를 또한 수집하여 분석에 사용하였으며, 도로공사(2003)에서 제시한 동결지수를 각 현장별로 파악하였다.

분류된 흙 종류에 따른 동결심도 분석을 위해 프로그램(FROST)에서 요구하는 자료를 취합하여 분석을 실시, 그 결과와 현장 계측한 실측값과 비교해 보고자 한다. 또한 해당하는 지역의 현장계측을 위해 계측기를 매설하였으며 이를 통해 동결기간 동안(2009.11월~2010.3월)의 온도변화를 수집하였다. 계측기가 매설된 현장의 측정 결과와 FROST 분석을 비교하기 위하여 가장 근접한 측후소의 기상청 기후자료를 수집·정리하였다.

2.2 문제점 파악 및 흙의 종류에 따른 동결심도 분석

수집된 현장 동결지수를 기존의 미공병단식에 적용하여 지역적인 차이를 파악하고, 단편적인 요소를 통해 판단하는 동결심도 결과 값에 대한 문제점을 파악한다. 미공병단에서 제시하는 FROST 프로그램은 수치해석을 통한 도로의 동상 시뮬레이션이며, 현장의 조건들을 포함한 분석이 가능하다. 이 분석을 위해서 요구되는 자료를 수집 및 취합하여 흙의 종류별로 분석을 실시, 그 결과와 현장 계측한 실측 값과 비교해 보고자 한

* 정희원 · 명지대학교 교통공학과 석사과정(E-mail:iiiiijyyy@naver.com)

** 정희원 · 명지대학교 교통공학과 교수(E-mail:kit1998@mju.ac.kr)

*** 정희원 · 경희대학교 토목공학과 박사과정(E-mail:rang-ne@hanmail.net)

다. 또한 분류된 현장의 흙 종류 이외에 각 보조기층과 노상을 다른 종류의 흙으로 바꾸어 분석을 실시하여 변화를 살펴본다. 파악된 문제점과 프로그램을 통해 분석한 동결심도 결과 값들을 종합하여 동결심도 산정 시에 흙을 분류하여 적용 하였을 시 발생하는 결과에 대해 분석하였다. 이를 통해 추후 동결심도 산정 방법에 있어 흙 종류에 따라 적용하는데 대한 판단 근거를 제시하고자 한다.

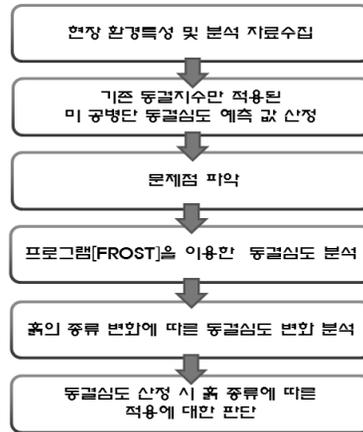


그림 1. 연구과정

3. 대상 지역 동결심도 분석

3.1 기존 동결심도 산정식(미공병단)을 이용한 분석

동상방지층 설계에 사용되는 산정방법들은 기본적으로 국내 기상청의 측후소자료를 이용한 동결지수를 결정, 대입하여 결과를 얻는다. 특히 기존의 미공병단식, 건설연구소식 등 동결지수를 이용한 동결심도 산정은 국지적인 환경조건 변화를 적용하지 못하는 단편적인 분석이라 할 수 있다. 동결지수 산정의 경우 국내 기상청 기후자료를 기초로 하여 실시하기 때문에 기상청 측후소의 유무와 그 거리에 따라 동결심도 분석의 정확성이 떨어진다.

동결심도 분석을 위하여 동결지수를 구분하여(그림 2)와 같이 4개 지역을 선정하였다. 2003년 도로공사의 동결지수에 따른 위 4개 지역의 동결지수 값과 동결지수를 이용한 미공병단식의 동결심도 분석 값은 다음과 같다.

$$\text{미공병단식: } Z = 4.69F^{0.53}$$

(여기서 Z:동결심도, F:동결지수)

표 1. 연구대상지역의 동결지수 및 동결심도

지역	동결지수 (2003 도로공사)	미공병단식 동결심도
가평	499.5 (℃·일)	125.6 cm
수안보	465.1 (℃·일)	121.6 cm
부여	319.8 (℃·일)	99.7 cm
김천	287.9 (℃·일)	94.3 cm

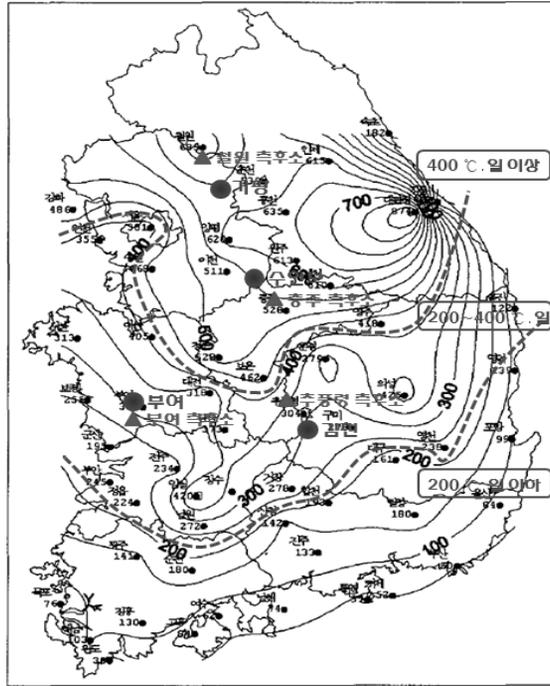


그림 2. 2003 도로공사 동결지수선도

대상지역인 가평-수안보, 부여-김천은 지역적인 거리가 있으나 평균기온의 변화를 적용·판단하는 동결심도 분석으로는 각 현장의 지역적 특성을 반영하지 못한다. 따라서 동결지수만을 통하여 분석된 미공병단식의 동결심도는 유사한 값을 보이게 된다. 동결지수 이외에 대상지역에 대한 자료를 수집하고, 현장의 흙 종류에 따른 물성 값을 대입·분석 했을 경우 동결심도 예측 결과가 어떻게 달라지는지 살펴보고자 한다.

3.2 이론적 해석 모델(FROST)을 통한 분석

FROST는 다양한 환경조건에서의 동결 융해 약화(frost heave & thaw weakning)를 분석하기 위해 미공병단의 CRREL에서 개발(1997)한 수치 해석 모델이다. 열과 수분의 흐름(heat & moisture flow)을 기본으로 하며 포장토의 용기와 침하 등의 수직 변형을 예측한다. 분석을 위해서는 토질 특성에 따른 다양한 input 자료가 요구된다. ∴ soil porosity(n_0), density(γ_d), saturated permeability(k_s), water content(θ_n), thermal conductivity(k_u), heat capacity(C_u), (표 1)

위 입력치 이외에 투수특성과 관련된 계수(A_w , A_k , α , β) 등이 있으며 이는 경험적 데이터를 통해 설정할 수 있도록 하고 있다. 또한 층을 구성하고 있는 물, 얼음, 흙의 체적 열용량과 열전도율은 각 현장 데이터의 입도분포 분석을 통하여 CRREL의 테스트 데이터(Guyman et al, 1993)를 참고로 통상적 값(표.2)을 설정하였다.



표 2. CRREL의 Test Input DATA

input parameter	실트	SW	점토	GW	아스팔트	단위	
k_s	0.018	1	0.000478	1	2.1	cm/s	
n_o	0.05	0.4	0.2	0.3	0.5	%	
θ_o	0.09	0.039	0.26	0.039	0.039	cm ³ /cm ³	
γ_d	1.76	1.76	1.73	1.98	2.3	g/cm ³	
k_u	17.2	17.6	12.9	17.6	17.6	cal/hr·cm· °C	
C_u	0.19	0.2	0.2	0.2	0.2	cal/Co	
E	0.000446					투수특성과 관련된 입력 계수	
A_w	max	1.03e-1	1	9.3e-2	0.1		0.309
	min	3.4e-11	0.3	1.5e-9	0.001		
α	max	3.44	0.5	3.04	0.35		0.319
	min	0.24		0.27			
A_k	max	4.47e+1	1.0e-3	1.04	0.1		0.0349
	min	2.1e-12	1.0e-5	1.0e-7	0.001		
β	max	5.84	3	3.28	2		2.645
	min	0.92		0.31			

3.3 현장 흙 분류 및 동결심도 계측 결과

각 현장의 노상 및 보조기층의 시료를 채취하여 기본 물성실험을 실시하였으며, 그 중 체가름 시험 결과를 참고로 입도분포를 파악하였다. 통일분류법(USCS)에 의해 각 현장의 기층 및 보조기층 흙의 종류를 분류한 결과는(표 4)와 같다.

표 3. 현장 흙 분류

현장		통과율(%)		분류
		no.4	no.200	
가평	보조기층	53.8	3.1	SW
	노상	99.9	2.7	SW
수안보	보조기층	75.0	23.6	GW
	노상	99.7	1.1	SW
부여	보조기층	74.7	4.8	SW
	노상	36.5	3.7	SW
김천	보조기층	92.5	4.2	GW
	노상	87.8	16.2	SW

실제 각 지역의 동결심도 분석을 위해 대상지역의 동결기 포장온도를 계측 하였다. 2009년 11월부터 2010년 3월까지 온도변화를 파악하여 기온이 가장 낮았던 날의 가평, 수안보, 부여, 김천 현장의 포장 단면 온도를 분석하였다. 계측된 각 현장의 온도 분포를 다음(그림 3)과 같이 정리하여 동결심도의 범위를 파악하였다.

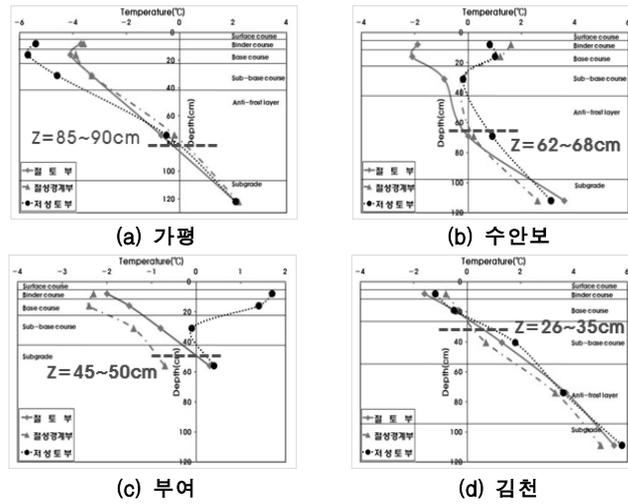


그림 3. 현장 포장온도 계측 결과

가평과 수안보의 현장계측 결과를 보면 두 지역의 동결지수가 거의 같은 450~500(℃·일)에 속하여, 유사하나 계측결과는 20cm 이상 크게 나타나고 있다. 부여와 김천 현장 역시 같은 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

4. 분석 결과 비교

4.1 FROST 분석결과

4개 현장에 대한 FROST 분석을 실시하였다. 노상과 보조기층의 흙 분류는 SW와 GW 두 가지이며, 이에 따른 투수특성 계수는 평균값으로 결정하였다. 나머지 물성에 대한 입력 값들은(표 2)에서 제시한 값을 사용하였다. FROST의 해석 결과 데이터를 통해서 대상 기간의 동결심도 변화를 알 수 있다. 각 구간의 최대 동결심도를 보면 동결지수 450~550(℃·일)구간에 있는 가평과 수안보는 각각 96cm, 68cm의 동결깊이를, 200~350(℃·일)구간의 부여와 김천은 각각 60cm, 54cm의 동결심도(그림 4)를 예측하고 있다.

표 4. FROST 동결심도 예측 결과

지역	가평	수안보	부여	김천
보조기층	SW	SW	SW	GW
노상	SW	SW	SW	SW
FROST예측 동결심도	96cm	68cm	60cm	54cm

4.2 흙 종류별 분석

노상 및 보조기층의 흙 종류 변화 따른 동결심도 변화를 분석하기 위하여 분류된 현장의 흙의 종류 이외에(표 2)의 흙 종류별 입력 값을 활용하여 FROST의 흙 종류별 동결심도 변화를 분석하였다. 보조기층은 GW와 SW, 노상은 GW, SW, CLAY, SILT로 변화를 주어 같은 기후 조건에서의 흙 종류별 동결심도 예측 결과 비교가 가능하도록 하였다.

표 5. (FROST) 흙 종류별 동결심도 예측

(a) 노상 - SW			(b) 노상 - GW		
지역	보조기층		지역	보조기층	
	GW	SW		GW	SW
가평	102	96	가평	78	75
수안보	70	68	수안보	42	46
부여	66	60	부여	63	60
김천	54	52	김천	50	50

(c) 노상 - CLAY			(d) 노상 - SILT		
지역	보조기층		지역	보조기층	
	GW	SW		GW	SW
가평	105	100	가평	110	105
수안보	85	80	수안보	80	78
부여	80	70	부여	78	75
김천	65	60	김천	66	64

노상토가 GW일 경우가 가장 작은 동결심도를 보였으며, SILT의 경우가 가장 크게 나타났다. FROST 분석 시 노상 흙 종류의 변화에 따라 동결심도 예측 값이 5~20cm의 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

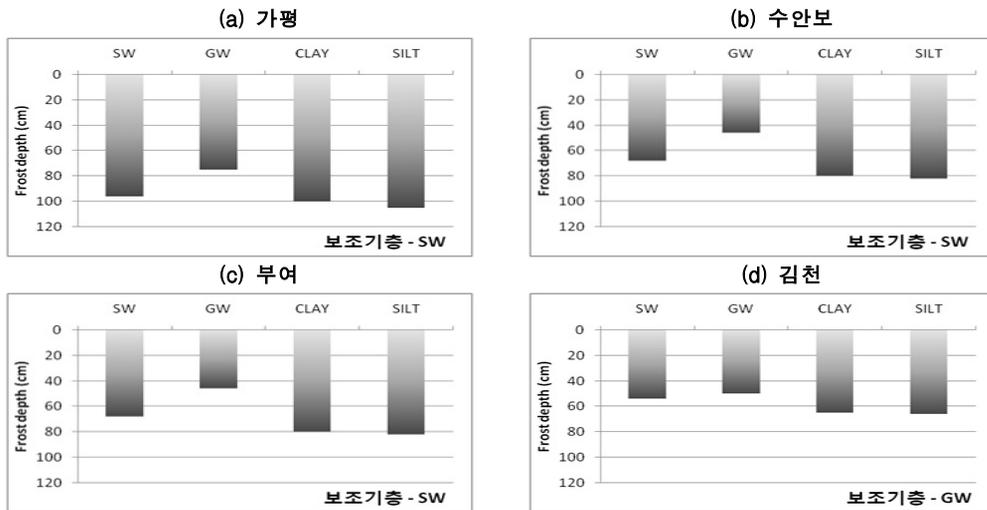


그림 4. 현장 노상토 변화에 따른 동결심도

4.3 결과 종합

동결지수만을 사용한 미공병단 식의 동결심도 예측 값과 FROST가 흙의 종류에 따라 분석한 결과를 비교해 보고, 현장 계측 값과의 차이를 평가하였다. 동결심도 예측에 있어서 흙의 종류를 분류하여 분석하였을 때의 동결심도 값의 변화를 파악하고, 그 오차를 볼 수 있다.

표 8. 동결심도 분석 결과 비교

대상지역	동결지수 (2003 도로공사)	미공병단식 동결심도	현장계측 동결심도	FROST 예측 동결심도
가 평	499.5	125.6cm	90cm	96cm
수안보	465.1	121.6cm	68cm	68cm
부 여	319.8	99.7cm	50cm	60cm
김 천	287.9	94.3cm	35cm	54cm
비 고	30년(1971~2002) 동결기 기준 단위:(℃·일)	$Z = 4.69F^{0.53}$ F=동결지수	현장에 매설된 계측기 측정 자료(09~10동결기)	현장 흙 종류에 따른 데이터 적용

동결지수를 적용한 미공병단 식은 기후 조건만을 고려하여 동결지수 크기가 유사할 경우 동결심도 예측 값 또한 유사하게 나타날 수밖에 없다. 하지만 노상 및 보조기층의 흙에 대한 분석을 실시하고 그에 맞는 동결심도 분석을 실시 한 결과를 실측값과 비교해 보면, 오차가 약 15% 이상 줄어든 것을 알 수 있다.

5. 결 론

변화하는 국내의 환경조건에 대처하고, 국내의 도로 건설에 적용되는 도로 동결심도의 효율성 제고를 위하여 연구를 실시하였다. 동결심도 산정에 있어 기존의 동결지수에만 의존하는 것이 아닌 현장의 흙을 분류하여 그에 맞는 분석을 시행하는 것에 대한 근거를 제시하고자 도로 동결의 수치 해석 프로그램인 FROST를 활용 하였다. 현장 흙의 종류를 분류하여 그에 맞는 FROST 분석을 실시하였고, 분류된 종류 이외의 흙에 대한 물성 값도 적용하여 노상 및 보조기층의 흙이 달라지면 동결심도 또한 적지 않은 차이가 있음을 보였다. 또한 현장계측 을 통해 수집된 데이터를 종합하여 2009~2010 동결기의 동결심도를 파악 하였다.

분석된 동결심도 예측 값들 중 기존 동결지수만을 적용하는 예측 방법에 대한 문제점을 파악하기 위하여 동결지수가 유사한 지역을 묶어 흙 종류별로 분석하였고, 그에 따른 결과는 다음과 같다.

1. 기존의 동결지수만을 이용한 미공병단식 동결심도를 산정하면, 가평(499.5℃·일)-수안보(465.1℃·일)와 부여(319.8℃·일)-김천(287.9℃·일)의 동결지수는 각각 유사한 지역으로 분류되어 동결심도 예측 값의 차가 거의 없게 나타낸다.
2. 현장의 흙을 분류한 입력 값을 적용한 FROST의 분석 결과 가평-96cm, 수안보-68cm, 부여-60cm, 김천-54cm이며, 각 현장의 계측 값 보다 약10cm 크게 예측 되었다. 특히 현장 노상과 보조기층의 흙 종류에 변화를 준 경우, 흙의 종류에 따라 30cm 이상 동결심도 예측 차이를 보였다.
3. 국내의 흙 종류에 대한 물성 값을 DATA-BASE 화하여 동결심도 산정 시에 흙의 종류를 구분하여 적용 한다면, 정확하고 효율적인 동결심도 예측 및 도로 동상 대비가 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 도로 동상방지층 효율성 검증 및 설치기준 연구단 연구 결과의 일부입니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 권기철 외, 국내 도로포장의 동상 특성에 대한 수치 해석적 연구, 한국도로포장공학회 논문집, 2003
2. 한국도로공사 도로교통기술원, 시험도로 자료를 이용한 포장의 동결특성 연구, 한국도로학회 논문집, 2005
3. 인천대학교, 현장시험을 통한 동상방지층 설치 기준 연구, 건설교통부, 2004



4. 박성완, 오재원, 국내 동결심도 자료와 포장설계에 대한 고찰, 도로포장공학회지, 2002
5. Dan Yang and Deborah J. Goodings, Predicting Frost heave Using FROST MODEL with Centrifuge Models, Journal of Cold Region Engineering, 1998G
6. Gary L. Guymon, Richard L. Berg and Theodore V. Hromadka, Mathematical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavement, CRREL Report, 1993