

이론적 해석(FROST.B)과 현장 DATA를 통한 최근 도로 동결심도 연구

A Study of Frost Depth with the numerical model FROST and the Field Monitoring DATA

임정용* · 김인태** · 전종명*** · 한용진**** · 백정길*****

Im, Jeong Yong · Kim, In Tai · Jeon, Jong Myung · Han, Yong Jin · Back, Jeong Gil

1. 서론

본 연구는 도로 동상방지층 효율성 검증 및 설치기준 연구의 기초연구로 실시하였다. 도로의 포장구조 설계시 노상도의 보조기층 침입이나 노상의 동결을 방지하고, 환경에 따라 노상의 기능을 강화하거나 동결을 방지하기 위한 동상방지층이 설계되고 있다. 최근의 기후연구에 따르면 도로 동상이 우려되는 한반도 중북부 지역은 아한대 지역에서 온대지역으로 바뀌고 있고, 이는 도로 포장을 설계할 때 중요한 환경적인 요소임에도 불구하고 아직 이를 반영하는데 어려움을 겪고 있다. 일차적으로 현장 검증을 통한 지역별 세분화된 적용기준에 대한 연구가 시급하다.

포장체의 동상 매커니즘은 대단히 많은 요소를 포함하며 이런 다양한 요소들을 고려하지 못하고 경험적 측면의 동결심도 산정이 이루어지고 있다. 따라서 온도, 노상도 특성, 지하수위 뿐만 아니라 지역의 환경특성, 포장 단면, 재료 등의 특정 조건의 동상을 분석하는 것은 매우 중요하다. 미공병단에서 제시하는 FROST 프로그램은 수치해석을 통한 동상 시뮬레이션이며, 위 조건들을 포함한 분석이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 국내 중북부 지역 3개 현장의 포장 온도 및 함수량 계측결과와 기상관측 데이터를 통한 FROST 시뮬레이션 결과를 비교 하였다. 이를 통해 최근 관측된 동결심도 및 FROST에서 제시하는 동상분석의 동결심도를 파악하여 국내 실정에 맞는 동상 특성분석 도구를 검증하고자 한다.

2. 연구방법

미공병단에서 개발한 FROST를 중심으로 국내의 주 동상발생 지역을 대상으로 하여 동결심도를 예측하고, 그 결과를 현장에 계측한 실측값과 비교하여 결과를 얻고자 한다.

국내의 주요 동상발생지역은 한반도 중북부 지역으로써, 현장계측을 위하여 하계기간동안 계측기를 매설하였다. 이에 현재(2009~2010) 동결기간 동안의 온도변화 및 함수비 변화를 수집하고 있다. 계측기가 매설된 현장 중에서 동결지수(C°·일)를 통해 350~450, 450~50, 55~650의 구간으로 구분하여 각 1개소의 동결심도 계측결과를 정리하고 가장 기온이 낮은 날의 포장 단면온도를 파악한다.

* 정희원 · 명지대학교 교통공학과 도로연구실 석사과정 · 031-330-6505(E-mail : iijjyy@naver.com)
** 정희원 · 명지대학교 교통공학과 교수 · 공학박사 · 031-330-6505(E-mail : kit1998@mju.ac.kr)
*** 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 · 공학박사 · 031-201-2923(E-mail : seongmin@khu.ac.k)
**** 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 도로연구실 석사과정 · 031-201-2923(E-mail : ssocom@khu.ac.k)
***** 정희원 · 명지대학교 교통공학과 도로연구실 석사과정 · 031-330-6505(E-mail : dragegil@naver.com)

이를 FROST의 예측값과 비교하기 위해서, 각 현장별 흙의 종류와 토질특성을 파악하고 그에 따른 입력계수를 결정한다. 또한 기온변화 및 강수량 자료를 입력해야 하므로, 현장 계측된 날과 동일한 기상청 기온자료와 강수량 자료를 수집하여 입력한다.

FROST를 통해 분석된 동결심도 값과 현장 계측을 통한 동결심도 값을 비교 분석하여 FROST의 분석에 대한 신뢰를 얻고자 한다.

3. 해석 모델 및 현장 계측

3.1 FROST PROGRAM

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 기본으로하며 포장토의 용기와 침하 등의 수직 변형을 예측한다. 분석을 위해서는 토질 특성에 따른 다양한 input 자료가 요구된다. : soil porosity(n_o), 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.1)을 설정하였다.

표.1 CRREL의 Test Input DATA

input parameter	실트	사질토	점토	자갈	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/m ³
k_u	2.0	17.6	1.5	17.6	17.6	w/m·C°
C_u	0.19	0.2	0.2	0.2	0.2	cal/C°
E	0.000446					
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		

3.2 현장 계측 시스템

도로 동상방지층 효율성 검증 및 설치기준 연구의 기초 데이터 수집을 위해 2009년 하절기동안 국내 중북부 지역을 대상으로 현장 계측 시스템을 구축하였고 그 현장은 다음(표.2)과 같다.

표.2 현장 계측 시스템 구축지역

동결지수선도 구분(C°·일)	절토부	절성 경계부	저성도부	계	
550~650	양구	1개소	1개소	1개소	25개소
	정선	1개소	1개소	1개소	
	원주	1개소	1개소	1개소	
450~550	가평	1개소	1개소	1개소	
	용인	1개소	1개소	1개소	
	남양주	1개소	1개소	-	
350~450	수안보	1개소	1개소	1개소	
	진천	1개소	1개소	-	
	천안	1개소	1개소	1개소	
계	9개소	9개소	7개소		

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.3과 같다.

표.3 통일분류법에 의한 현장 흙 분류

현장		통과율(%)		R ₄ /R ₂₀₀	SF	분류
		no.4	no.200			
양구	보조기층	36.4	5.1	0.671	31.3	GW
	노상	95	18.3	0.06119	76.7	SW
가평	보조기층	53.8	3.1	0.477	50.7	SW
	노상	99.9	2.7	0.00102	97.2	SW
수안보	보조기층	39.2	2.9	0.627	36.3	GW
	노상	99.7	1.1	0.00303	98.6	SW

총 9개의 현장 중에서 동결지수 별로 구분하여 양구, 가평, 수안보 현장을 대상으로 분석하였다. 각 현장별 평균 기온 및 강수량 데이터는 시뮬레이션 입력을 위해 현재까지 수집된 현장 데이터의 일수와 같은 기간을 수집 정리하였다. 이는 현장과 가장 인접한 관측소의 기후자료를 기준으로 하여, 양구 현장-철원관측소, 가평 현장-인제관측소, 수안보 현장-충주관측소의 관측결과(그림.1)를 대상으로 하였다.

측후소 자료를 수집한 결과 기온변화는 유사한 흐름을 보이며, 강수량은 계절적 특성상 비교적 적은 양을 보이고 있다.

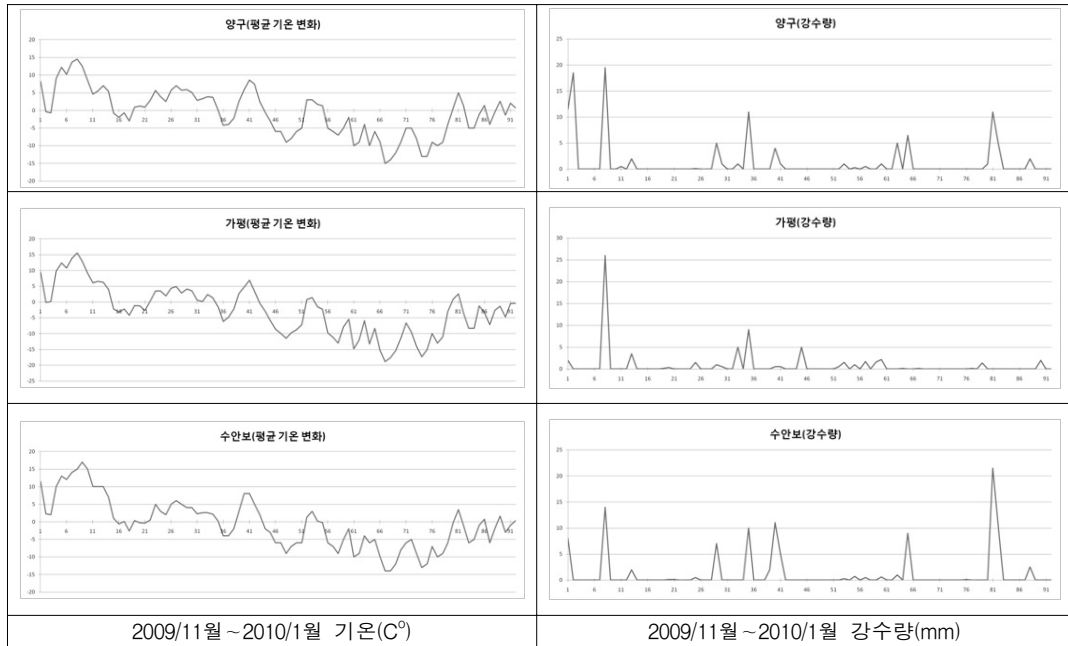


그림.1 분석 대상 기후 DATA

4. 동결심도 분석

4.1 FROST를 통한 분석

노상과 보조기층의 흙 분류는 SW와 GW 두 가지의 결과가 도출 되었고, 이에 따라 투수특성과 관련된 계수들을 평균값으로 결정하였다. 도로의 단면은 각 현장에 건설된 도로의 단면과 일치하도록 입력하였다. 각 경우에 대하여 지하수위는 포장 표면으로부터 2.5m~4m깊이에 위치한 경우를 고려하였다.

표.4 투수계수 입력값 결정

분류	A_w	α	A_k	β
SW	0.05	0.5	1.0e-4	3
GW	0.5	0.35	0.01	2

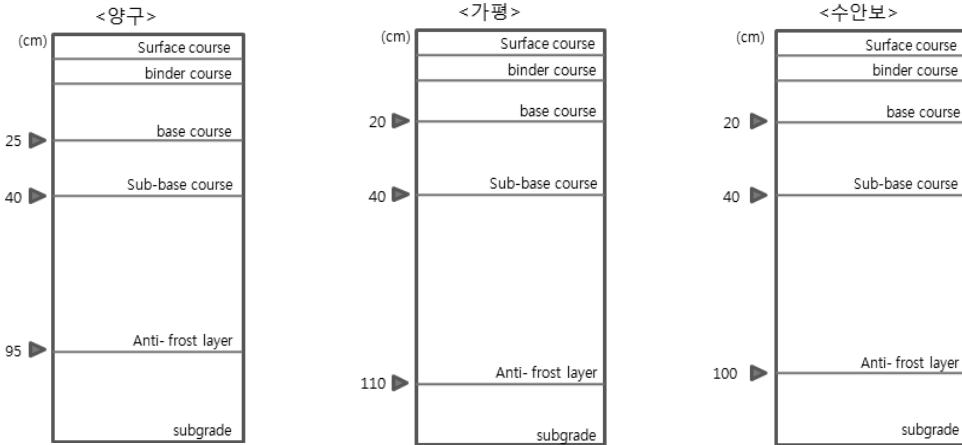


그림.2 현장별 단면

FROST 분석은 주어진 기간에 대한 기온 및 지하수위, 강수량 등의 누가영향으로 이루어진다. 따라서 동절기의 시작(11월 1일)부터 가장 기온이 많이 떨어진 날까지를 분석하였다. 이는 동절기간 전체를 대상으로 하여 분석하는 경우와는 그 결과에서 크게 차이가 없으나 분석의 정확성을 높이기 위해 현장 관측된 데이터와 분석 일수를 동일하게 설정하였다.

2009~2010년의 동계기간동안 일평균 기온이 가장 낮은 날과 그에 따른 분석 기간과 각 현장별 초기 온도 입력 값은 위 그림.1에서 다음(표.5)과 같이 도출하였다.

표.5 현장별 분석기간 및 초기온도

현장	분석기간(일)	초기온도(C°)
양구	67	8
가평	67	10
수안보	68	12

4.2 현장 DATA 분석

2009.11.19~2010.1.30 까지 75일 동안 계측된 현장의 대기온도 측정결과는 위 그림.2.1과 같은 흐름을 보이며, 이는 매설된 계측기의 측정값이 정확함을 의미한다. 또한 중북부 지역의 기온변화가 거의 유사하게 진행이 되고 있음을 알 수 있다.

측정된 DATA중 대기온도가 가장 낮은 시점의 포장체 동결깊이 자료를 분석해보면, 동결지수가 큰 지역일 수록 동결심도가 증가하고 있으며, 현재까지 가장 낮은 대기온도를 보인 시점의 동결심도가 가평 80cm, 수안보 30cm를 나타냄으로써 동결심도가 노상까지 영향을 주지 못하고 있다. 하지만 양구 현장의 경우 기온이 가장 많이 하강한 시기 절토부의 동결깊이가 노상까지 도달하였다. 동결지수가 550이상인 지역의 절토부 도로 단면 설계 시 동상에 대해 신중히 고려해야 할 것이다. 반대로 수안보의 측정결과를 보면 동결심도가 보조기층까지 도달하였으며, 이에 따라 동결지수가 350~450인 지역의 도로 단면은 과잉설계를 의심해 볼 수 있다.

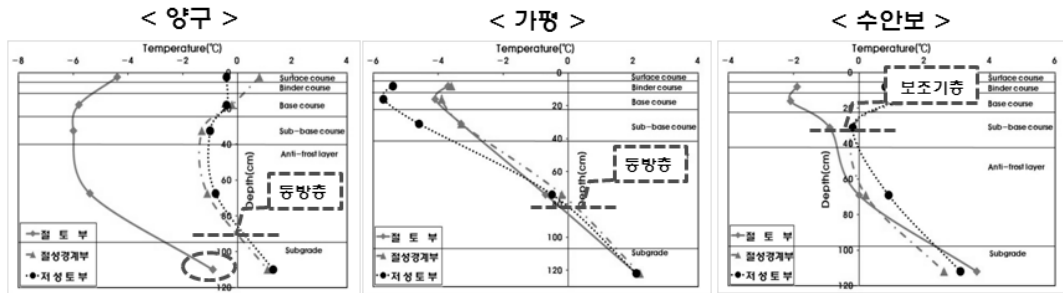


그림.3 포장체 동결깊이 현장측정 결과

5. 분석 결과

FROST의 해석 결과 데이터를 통해서, 동상량과 동결깊이의 변화를 얻을 수 있다. 분석 대상으로 한 중북부 지역의 기온변화는 고저차는 있으나 유사한 흐름의 변동 폭을 보이고 있어 동결심도의 변화 흐름 또한 유사한 결과를 보이고 있다. 각 구간의 최대 동결심도를 보면 동결지수 550~650의 구간에 있는 양구는 120cm 이상 동결되며, 450~550구간의 가평은 약 65cm의 동결깊이를 350~450 구간의 수안보는 43cm의 동결깊이(그림.4)를 보이고 있다.

이 결과를 현장 계측 데이터와 비교한 결과 또한 유사하다. 일평균 기온이 가장 낮은 시기의 현장 계측결과를 보면, 양구는 절토부에서 최대 120cm까지 0°C의 온도를 보였으며, 가평 현장은 80cm, 수안보의 경우는 약 30cm의 깊이까지 동결되는 결과(그림.3)를 나타내고 있다.

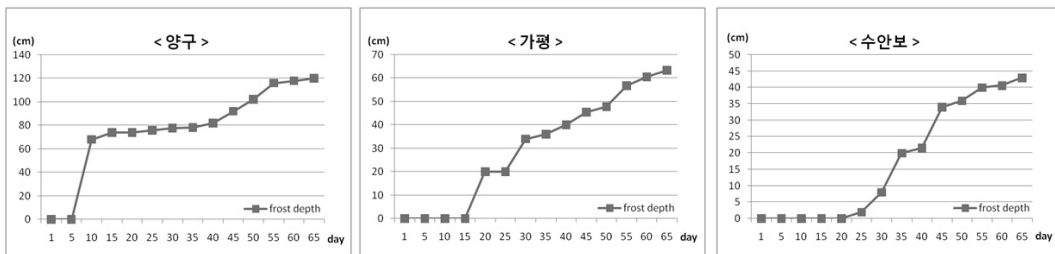


그림.4 FROST 동결심도 분석 결과

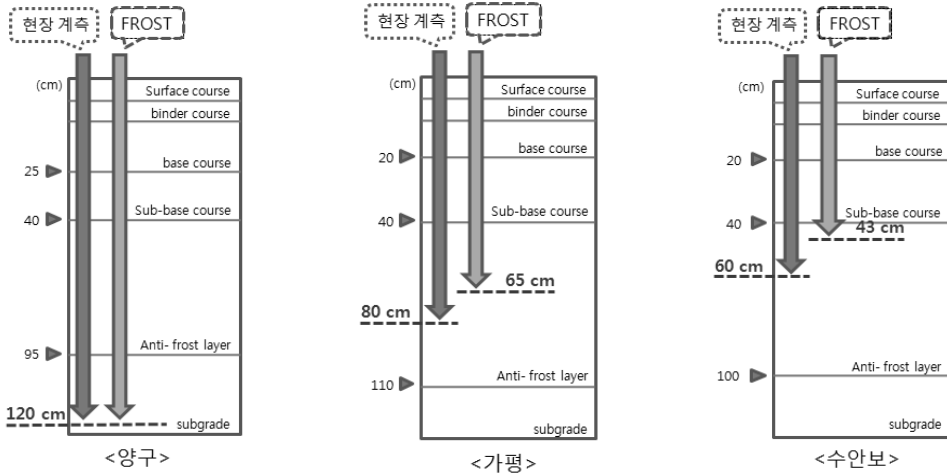


그림.5 현장 계측과 FROST 분석 결과 비교

각 구간별 동결심도 분석결과를 비교해 보면, 양구의 경우 계측치와 FROST 분석 값이 120cm 전후로 거의 같은 동결깊이를 보였다. 가평과 수안보 현장은 15cm 정도의 오차를 보이며, FROST 분석값이 작게 나타났다. FROST 실행시에 초기 입력 계수들은 일률적으로 평균값을 대입했기 때문에 이는 대기온도 변화와 강수량 변화에 반응한 결과임을 알 수 있다. 대기 기온변화의 폭은 크지 않으나, 기온이 영하로 떨어지는 시간의 차이와 초기 강수량 등이 동결깊이에 영향을 준 것으로 보인다.

FROST 실행 과정을 통해 동일한 종류의 흙이라 하여도 입력변수의 특성에 따라서 동상 특성이 크게 달라짐을 알 수 있었기 때문에, 가평과 수안보 구간의 경우 실제 계측 값과 차이를 보이는 것은 대상 구간에 대한 투수특성관련 입력치에 대한 차이와 실제 현장토의 토질특성 값들과 관련한 차이 때문에 발생한 것으로 예상된다.

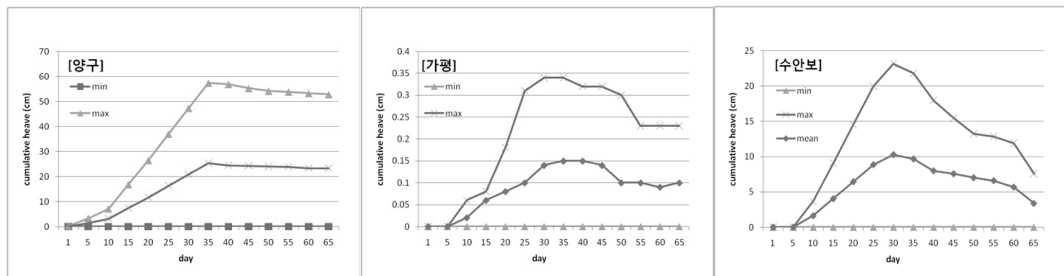


그림.6 FROST 동상량 분석 결과

그림.6은 앞의 입력 값들을 통해 분석된 FROST의 동상량 예측 결과이다. 이는 일정한 흐름 없이 각 현장 별로 상이하게 나타나고 있다. 분석 시작 30~35일 사이에 가장 많은 동상량을 보이는 것은 유사하나 그 평균적인 값을 관찰해보면 실제적인 동상량 예측 값이라 평가하기 어렵다. 따라서 위 현장 이외에 다양한 현장의 기온자료와 실제 계측값, 자세한 물성자료 및 토질특성 관련 계수를 수집하여 동결과 관련한 FROST 분석의 신뢰성 및 국내 동상과 관련된 실측치를 구축할 필요가 있다.

6. 결론 및 고찰

국내 중북부 3개(양구, 가평, 수안보) 도로 건설 현장에 대한 FROST 분석 결과와 실제 계측 값을 비교하였다. FROST 분석시 요구되는 입력 자료들은 대기 온도의 경우 기상청의 관측 결과를 정리하였고, 기타 입력 계수들은 CRREL의 테스트 데이터를 사용하여 평균값을 적용하였다. 동결지수로 구분하여 350~450, 450~550, 550~650(C°·일)에 각각 1개소씩 3개의 현장에 설치된 계측기를 통해 2009/11월~2010/1월 중 가장 낮은 기온을 보인 날의 포장 단면온도를 수집하여 비교 분석하였다.

FROST가 제시한 동결심도 예측값과 계측된 현장 동결심도를 비교한 결과 양구의 경우 유사하게 나타났고, 가평과 수안보의 경우 FROST가 15cm 정도 작게 분석하였다. 이는 FROST 실행에 필요한 강수량 및 온도 변화 값을 적절히 입력되었으나, 기타 토질 및 투수특성 계수들의 설정에서 오차가 발생된 것으로 생각된다. 따라서 실질적이고 세부적인 현장 시료의 물성을 정확하게 파악하고, 그에 따른 투수계수들을 적절히 설정한다면 좀더 신뢰성 있는 분석이 가능할 것이다.

지속적인 자료수집과 분석 실행을 통하여 국내의 환경에 맞는 도로의 동상특성을 파악하도록 해야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 도로 동상방지층 효용성 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, Recharad L berg and Theodore V. Hromadka, Mathmatical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavement, CRREL Report, 1993