

도로 포장체에서 동상에 대한 지하수위 영향 평가

Evaluation of Ground Water Level Effect on Frost Heaving in Road Pavements

권기철 Kweon, Gichul
이재환 Lee, Jaehoan

정회원 · 동의대학교 토목공학과 교수 (E-mail: gckweon@deu.ac.kr)
정회원 · 동의대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail: dkrehd072@nate.com)

ABSTRACT

PURPOSES : This study is to evaluate a ground water level effect on frost heaving in road pavements.

METHODS : The effects of water table on frost heaving in pavement systems were evaluated from the mechanical analysis using FROST program. The input parameters and boundary conditions were determined by considering climates, pavement sections, and material properties specially subgrade soil types in Korea.

RESULTS : When the water table located above the freezing depth, amount of frost heaving caused by freezing the water in pavement itself was big enough to damage in pavement system, although pavement system consists of fully non-frost-susceptible materials with sufficient thickness of anti-freezing layer. The amount of frost heaving was decreased rapidly with increasing the distance between the water table and freezing depth.

CONCLUSIONS : It was concluded that there is no engineering problems related with frost heaving in practical sense when the distance between freezing depth and water table is over 1.5m for having subgrade soils less than 50% of #200 sieve passing to meet specification on quality control in Korea.

Keywords

frost heaving, water table, FROST, pavement, SWCC

Main Author : Kweon, Gichul, Professor
Department of Civil Engineering, Dongeui University,
Busan, 614-714, Korea
Tel : +82.51.890.1617 Fax : +82.51.890.2633
email : gckweon@deu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

영하의 온도가 지속되면 일정 깊이까지 포장체는 동결된다. 포장체에서 노상토와 같이 수분을 함유하고 있는 재료는 수분의 동결에 의해서 부피팽창 즉 동상(frost heaving)이 발생한다. 과도한 동상(frost heaving)은 부동의 용기를 수반하여 포장체에 직접적인 손상을 유발함과 동시에 추가적인 응력 발생으로 교통하중에 의한 포장 손상을 가속화 시킨다(권기철, 2002; Berg 등, 1980; COE, 1985). 우리나라와 같이

계절적 동토지역에서는 동결 후 융해과정에서 강성도 감소(thaw weakening)를 수반하여 포장체의 손상을 더욱 가속화 한다(이재환 등, 2010; 권기철, 2002; 김영진 등, 2001).

최근의 연구에 의하면, 국내 노상토의 경우 동결과정에서 동상이 매우 작게 발생하는 경우에는 융해 시 강성도 감소 또한 거의 발생하지 않음이 밝혀지고 있다(이재환 등, 2010; 국토해양부, 2012). 즉 동결 과정에서 동상을 충분한 정도로 억제할 수 있다면 융해 시 강성도 감소

또한 자연스럽게 억제됨을 의미한다. 따라서 포장체에서 동결에 의한 공학적 문제는 동상(frost heaving)을 얼마나 효과적으로 억제하는가에 귀결된다.

포장체의 동상은 지속적인 영하의 온도조건에서, 동상에 민감한 재료가 동결깊이 이내에 존재하고, 동결층으로 수분의 지속적인 공급이 있는 경우에 크게 발생한다. 바꾸어 말하면, 위의 세 가지 조건 중 어느 하나만 제거되어도 동상은 억제되고 공학적 문제를 발생시키지 않는다. 따라서 동상에 대처하는 방법은 위의 동상 요인 중 하나를 제거하는 것으로 크게 세 가지 형태로 나누어진다. 첫째는 동일한 온도조건에서 동결깊이를 줄이기 위하여 열전도 특성이 작은 재료를 포장층에 설치하는 방법이다(전종명, 2012; 김영진 등, 2001; 김대하 등, 2001). 둘째는 동결깊이 이내에 존재하는 동상민감 재료를 동상에 민감하지 않은 재료, 즉 동상방지층 재료로 치환하는 방법이다(Konrad, 1999; 권기철, 2004; 한국도로공사, 2002). 마지막으로 수분의 지속적인 공급을 차단하기 위하여 지하수위를 낮추거나 배수시설을 보장하는 방법이다(진정훈 등, 2009; 조규태 등, 2002; 박성완 등, 2002, 이경하 등, 2002).

우리나라에서 일반적으로 적용해 온 동상 대처기법은 동상방지층을 사용하는 것이다. 최근에는 획일적인 동상방지층 설치기준의 문제점을 극복하고자, 성토고 2m 이상 구간, 암반 노상토 구간, 터널과 같은 특이 온도조건 구간 등에 대한 세부적인 규정을 도입하고 있다(김낙석 등, 2009; 김영진 등, 2001; 남영국 등, 2002; 이경하 등, 2002; 김대하 등, 2001). 그러나 아직까지도 수분영향 및 노상토 특성을 효과적으로 고려하지 못하여 과대설계의 우려가 있다(진정훈 등, 2009; 국토해양부 2012). 외국의 많은 기관에서는 지하수위가 충분히 낮아 수분의 지속적인 공급이 차단되거나, 노상토가 비동상민감 토사인 경우에는 동상방지층을 설치하지 않는다(Guy 등, 1999).

동결에 의한 부피팽창, 즉 동상(frost heaving)은 자체적으로 함유하고 있던 물이 얼음으로 상변화를 하면서 발생하는 부피팽창과 하부로부터 물이 유입되면서 지속적으로 발생하는 부피팽창으로 나누어진다. 도로 동상에서 주요하게 문제가 되는 것은 지속적인 수분공급에 의한 부피팽창이다.

포화상태에서 함유하고 있던 물의 상변화에 의한 부피팽창은 포장 재료의 특성과는 무관하게 발생한다. 만일 동결깊이보다 지하수위가 더 높은 곳에 존재하면, 포장층이 포화된 상태에서 동결이 발생하여 동상이 크게

발생한다. 그러나 극단적인 경우를 제외하고는 지하수위가 동결깊이보다 낮게 유지되므로, 함유하고 있던 물의 상변화에 의한 동상은 크게 발생하지 않는 것이 일반적이다.

지하수위가 동결깊이 이내에 존재하는 경우가 아니라면, 상부의 완전 동결영역(zone of fully freeze)에서 물의 상변화에 의한 부피팽창은 크게 발생하지 않는다. 그러나 이러한 지하수위 조건에서도 동결 진행영역(zone of freezing)에서는 하부 비동결 영역(unfrozen zone)으로부터 물의 공급에 의한 부피팽창이 지속적으로 발생한다(Guy 등, 1999).

동결 진행영역으로 수분이 충분하고도 지속적으로 공급되면 빙편(ice lens)이 발생하고 매우 큰 동상이 수반된다(권기철, 2004). 동결 진행영역으로 수분이동 정도는 지하수위 위치, 그리고 동결 진행영역과 비동결 영역의 불포화 흐름특성(불포화 투수계수 및 함수특성곡선)에 따라 결정된다. 만일 동결 진행영역의 흙이 입상재료와 같이 불포화 수분 흐름이 극단적으로 억제된 경우라면 동상은 매우 작게 발생한다. 이러한 특성을 가진 토사를 비동상민감 토사라고 칭하며, 동상방지층 또는 입상보조기층 재료가 대표적이다.

동상민감 토사라 할지라도 동결 진행영역(zone of freezing)과 지하수위 사이에 충분한 거리가 있다면 동결 진행영역으로 수분 이동이 매우 작게 되고, 동상 또한 억제된다. 즉, 지하수위가 충분히 낮은 경우라면 동상이 억제되므로 동상방지층을 생략할 수 있는 것이다.

우리나라에서는 성토고 2m 이상인 경우 동상방지층을 생략할 수 있도록 하고 있다(국토해양부, 2012). 이는 우리나라의 기후조건에서 발생하는 최대 동결깊이에서 지하수위까지의 높이차가 성토고 2m 이상인 경우에는 동상을 충분히 억제할 수 있을 정도로 확보되고 있음을 반영한 것이다. 그러나 이러한 기준은 지하수위 높이를 직접적으로 규정한 것이 아니어서, 성토고 2m 이하이지만 지하수위가 충분히 낮은 경우에 대해서도 동상방지층을 설치하는 문제를 안고 있다.

본 연구에서는 수치해석적 기법을 적용하여 도로 동상에 대한 수분영향을 중점적으로 평가하였다. 동상 해석 프로그램으로는 미공병단 CRREL에서 개발한 FROST 프로그램을 사용하였다. 동상해석의 입력물성치는 국내의 기후조건(온도 및 강우), 국내의 포장재료 특성을 반영하여 결정하였다. 특히 수분영향 평가를 위한 중요 입력물성치인 함수특성곡선(SWCC)과 투수계수 등은 국내 포장재료에 대한 시험결과를 근거로 범위

를 설정하였다. 해석결과로부터 도로 동상을 억제할 수 있는 지하수위 조건을, 포장층의 단면특성, 기후조건, 포장재료의 수리흐름 특성 등을 고려하여 평가하였다.

2. 도로 동상 수치해석 모델 (FROST)

포장층의 동결·융해작용에 대한 FROST 프로그램은 미공병단 CRREL에서 개발된 다양한 환경조건에서 도로 포장체의 동상을 평가하기 위한 수학적 모델을 기본으로 하고 있다(Gary 등, 1993). FROST 모델은 열(heat)과 수분(moisture)의 1차원적 연직 유동(flux)에 대하여 수치해석을 수행한다.

본 모델은 계절적 동결·융해가 일어나는 흙을 대상으로 한다. 포장체의 상재하중은 별도로 고려하지 않아, 상재하중이 60kPa 미만으로 그 효과가 크지 않은 경우에 적용된다(Gary 등, 1993). 불포화 흐름 모델을 포함하고 있어서 최대동결관입깊이가 지하수위 상부와 포장체 사이의 입상보조기층 또는 노상토에서 발생하는 경우에 대하여 효과적으로 적용 가능하다. 지하수위는 다양하게 설정할 수 있고, 지하수위와 동결깊이 사이의 연직유동(flux)은 불포화토 물의 흐름모델로 고려한다.

동결이 진행되는 동안, 지층은 동결 영역, 동결 진행 영역, 비동결 영역으로 구분하여 적용하고 있다. 동결이 진행되는 동안, 동결 진행영역에서는 동결 영역이 확장되고 하부의 비동결 영역이 유입된다. 즉, 동결이 진행되면 동결 영역은 최상부 영역으로 구분되고, 최하부의 비동결토가 동결진행을 겪게된다. 융기(heaving)는 유출된 체적과 유입된 체적의 차이로 계산한다.

수치해석 절차는 '절점(node)'을 적절한 간격으로 배치하여 수평 '요소(element)'로 구분된 흙에서 이루어진다. 해석시간 간격동안 일정한 조건에서 동결이 진행되는 것으로 해석한다. 따라서 해석의 시간간격은 해의 정확성을 확보하도록 세분화 해야하고, 시간에 따른 온도 및 강우조건 또한 일정한 시간 간격으로 입력해야 한다. 특정 시간에서의 해석은 이전 시간에서 해석결과로 나타나는 조건을 초기조건으로 설정하므로, 초기치를 엄밀하게 설정하던가 또는 동결기간 이전에 충분한 해석 기간이 포함되도록 하여 동결기간에 합당한 초기치가 설정되도록 해야한다(Gary 등, 1993).

각각의 해석 시간 단계에서, 동결 진행 중인 요소들은 하부 경계로부터 상향 이동된 수분과 열의 변동이 발생한다. 요소의 열특성치, 초기 함수비, 초기 간극비가 주어지면, 경과 시간동안 변화된 에너지와 수분 변동량 및

최종 함빙비(ice content)를 구할 수 있다. 이때 최종 함빙비가 초기 간극의 체적을 초과하면, 요소는 팽창하여 상응하는 융기(heaving)가 일어난다. 동결 진행영역의 열 및 수분이동, 얼음발생은 경계 조건에 영향 받으므로, 경계조건의 영향을 최소화할 수 있도록 해석의 깊이를 충분히 크게 하고 합리적인 값으로 설정하여야 한다.

FROST 프로그램에서 적용하는 동상모델의 주요 가정은 다음과 같다(Gary 등, 1993).

- 1) 포화·불포화 시 간극수의 이동은 연속 방정식과 Darcy's law가 적용된다.
- 2) 기체의 유동은 무시하고 액체의 유동만 고려한다.
- 3) 동결층에서의 수분(moisture)유동은 무시하고, 동결 흙 표면에서 물의 유·출입은 없다.
- 4) 비동결층에서 흙의 변형은 무시한다.
- 5) 동결진행층에서 흙의 간극수압은 비동결 함수비에 관한 인자 (an unfrozen water content)에 의하여 지배된다.
- 6) 이력현상(hysteresis)이 일어나지 않는다.
- 7) 열 유동(heat transport)은 열 이류(advective) 성분을 포함한 간층열 유동(sensible heat transport)방정식에 의해 지배된다.
- 8) 비동결상태의 함수비는 온도에 무관하다.
- 9) 상변화(phase change)효과 및 수분효과는 분리절차(decoupled process)로 모델한다.
- 10) 동결·융해는 등열상변화 과정(isothermal phase change)으로 가정한다.
- 11) 융해과정에서는 융해영역에서 침하가 지배적이며, 압밀효과는 무시한다.
- 12) 상수는 시간에 따라 일정하다.

3. 도로동상 수치해석(FROST) 입력물성치

3.1. 포장단면

국내에서 사용하는 일반적인 층 구성의 아스팔트 포장과 시멘트콘크리트 포장을 해석단면으로 하였다. 해석단면의 층 구성 및 각층의 두께는 Fig. 1과 같다. 보다 다양한 상부 포장층 해석단면을 고려하지 않은 것은 본 연구가 동결깊이 보다는 동상(frost heaving)에 초점을 두고 있기 때문이다. 동결깊이는 상부 포장층의 특성(두께 및 물성)에 영향 받지만 동상량은 상부 포장층

단면특성보다는 동결깊이에 존재하는 토사(입상보조기층, 동상방지층 또는 노상토)의 특성 및 지하수위 경계 조건 등에 많은 영향을 받기 때문이다(권기철 등, 2003, 국토해양부, 2012).

입상보조기층 및 노상의 열해석 및 수리해석 관련 물성치는 다양하게 변화시켜 적용하였고, 3.2절에 상세하게 기술하였다. 동상방지층은 별도로 적용하지 않았다. 이것은 동상에 대한 지하수위 영향 분석을 통해, 동상방지층의 생략이 가능한 지하수위의 조건을 평가하기 위함이다. 다만 노상이 상부 입상보조기층과 동일한 물성치의 재료로 사용되는 극단적인 경우를 포함하여, 지하수위와 무관하게 동상 비민감 재료만으로 구성된 포장 단면에서의 허용 가능한 동상량을 결정하여 비교 기준으로 활용하였다.

해석깊이는 포장표면으로부터 5m로 하였다. 노상이 해석깊이까지 일정하게 존재하는 것으로 설정하였다. 주어진 해석조건에서 최대 동결깊이는 포장표면으로부터 1.2m 이내에 존재하는 것으로 나타나 해석깊이 5m는 충분한 깊이로 판단하였다.

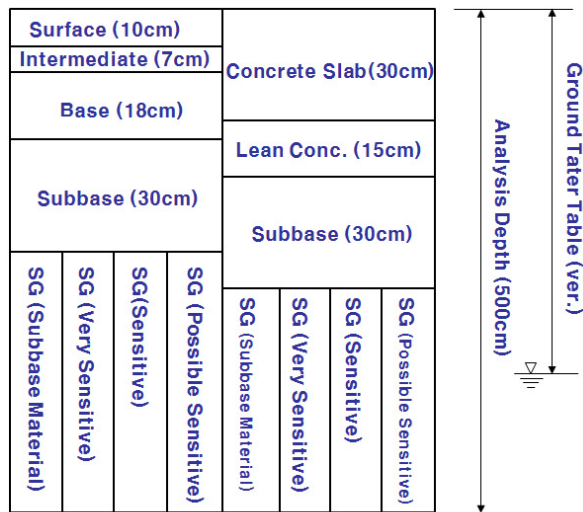


Fig. 1 Analysis Pavement Sections

3.2. 각층의 재료 물성치

3.2.1. 열전도 특성

FROST 프로그램에서는 동결·융해 상태에서 1차원 열전도 방정식(heat transfer equation)을 적용하고 있다. 동상해석에서 사용되는 열이동(heat transfer)과 관련된 주요 물성치는 열용량(heat capacity)과 열전도도(thermal conductivity)이다. 보조적으로 융해잠열(latent heat of fusion of water), 비동결 체적 함수비, 간극률, 흙-물-얼음 혼합물의 열전도도 등이 사

용된다. 열이동과 관련된 물성치는 동결깊이와 매우 밀접하게 관련되어 있으나, 동상량과는 직접적인 상관성이 작다(권기철 등, 2003).

국내의 포장재료에 대한 열해석과 관련된 물성치를 실험적으로 결정하여 보고된 사례는 매우 제한적이다(전종명, 2012). 따라서 국내 재료에 대한 실험적 자료를 최대한 활용하면서, 일부 물성치는 국외 포장 재료에 대한 물성치를 적용하였다(김영진 등, 2001; 전종명, 2012). 본 해석에서 적용된 열이동과 관련된 입력물성치 범위를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 물, 얼음, 공기의 열용량과 열전도도는 통상적인 값을 이용하였다(Susan 등, 1996).

Table 1. Input Parameters of Heat Capacity and Thermal Conductivity

Materials	heat capacity (cal/g·°C)	thermal conductivity (cal/cm·hour·°C)
Asphalt Concrete	0.22	11.8
Cement Conctete	0.20 (0.21~0.52)	15 (10~20)
Unbound Materials (Subbase and Anti-freezing layer)	0.20 (0.20~0.22)	20 (12~27)
Subgrade Soil	0.30 (0.19~0.44)	15 (13~18)
Water and Air	water	0.99619
	Ice	0.50119
	Air	0.23905

3.2.2. 수리흐름 특성

동상해석에서는 동결진행 영역에서 물의 흐름 특성이 매우 중요하고, 동상량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 동상문제에 있어서는 포화상태의 중력수의 흐름 보다는 동결 진행영역(zone of freezing) 또는 비동결 영역에서 불포화 흐름특성이 중요하다. 불포화 흐름 또한 Darcy 법칙을 적용하는 것이 일반적이며, 이때 투수계수는 불포화 상태의 투수계수를 적용한다(Gray 등, 1993; 이성진, 2004; 임유진, 2010).

불포화 흐름해석을 위해서는 특정한 불포화 함수비 상태에서의 모관흡수력(metric suction)과 불포화투수계수가 필요하다. 흙이 포화상태에서 함수비가 감소하여 불포화 상태가 되면 음(negative)의 간극수압이 발생하게 된다. 이 간극수압을 모관흡수력(metric suction)이라 하고, FROST 프로그램에서는 간극압력수두로 표현하고 있다.

모관흡수력과 체적함수비와의 관계 또는 모관흡수력과 포화도의 관계를 나타낸 것을 함수특성곡선(SWCC, soil-water characteristics curve)이라 한다. 함수특성곡선은 불포화토의 흐름을 결정하는 가장 기본적인 특성이다. 함수특성곡선을 모사하는 다양한 모델이 개발되어 있고(김상규 등, 1999; 임성운 등, 2008). 본 연구에서 사용한 FROST 프로그램에서는 Eq. (1)과 같은 Gardner 방정식을 적용하여 함수특성곡선을 모델하고 있다.

$$\theta_u = \frac{\theta_o}{A_w |h_p|^\alpha + 1} \quad (1)$$

여기서, θ_u : 비동결영역의 체적함수비

θ_o : 흙의 공극률

h_p : 간극압력수두

A_w : 모델계수

α : 모델계수

불포화토의 투수계수는 건조상태로 갈수록 투수계수가 감소하는 특성을 가지고 있다. 불포화투수계수는 포화상태의 투수계수(k_{sat})와 불포화상태에 따른 투수계수 변화 정도를 결합하여 모델한다(이성진 등, 2008; 이해지, 2004; 왕창수 등, 2004). 포화도에 따른 투수계수의 변화양상은 함수특성곡선과 유사한 형태로 나타나기 때문에, 일반적으로 함수특성곡선의 모델과 동일한 형태의 함수식을 사용한다. 본 연구에서 사용한 FROST 프로그램에서는 불포화토의 투수계수를 Eq. (2)와 같이 Gardner 방정식을 적용하여 모델하고 있다.

$$K_H = \frac{k_{sat}}{A_K |h_p|^\beta + 1} \quad (2)$$

여기서, K_H : 불포화토의 투수계수

k_{sat} : 포화토의 투수계수

h_p : 압력수두

A_K : 투수특성에 대한 Gardner 계수

β : 투수특성에 대한 Gardner 계수

신뢰성 있는 해석을 위해서는, 국내에서 사용되는 노상토 및 입상보조기층 재료에 합당한 모델계수를 결정하는 것이 중요하다. 국내 지반에 대한 함수특성곡선 실험 자료는 비교적 많이 보고되어 있으나, 포장체에서 사용하는 노상토 및 입상보조기층 재료에 대한 실험 자료는 매우 제한적이다(임유진, 2010; 국토해양부, 2012).

국내 지반 재료에 대한 함수특성곡선 실험결과 중, 비교적 상세한 실험결과가 보고된 28종의 함수특성곡선에 대한 자료구축을 하였다(국토해양부, 2012; 김상규 등, 1999; 류지협, 2000; 송창섭 등, 2003; 신은철 등, 2002; 왕창수 등, 2002; 이성진 등, 2008; 임성운 등, 2002; 임유진, 2010). 이러한 기초자료에 대하여 Gardner 모델을 적용하여 모델계수를 결정하였다. 노상토의 종류는 미공병단(COE)의 동상민감성 판단기준인 세립분 함유량을 적용하여 분류하였다. 동상에 매우 민감하고, 현행의 노상토 품질기준에 부적합한 극단적인 동상민감 토사 (#200 통과량 > 50%), 동상민감 노상토 (12% < #200 통과량 < 50%), 그리고, 동상 가능성이 있는 노상토 (#200 통과량 < 12%)로 구분하였다. 입상보조기층재료는 #200 통과량이 5% 이하인 동상 비민감 토사의 함수특성곡선의 범위에서 세 종류로 구분하여 적용하였다. 국내 포장재료의 특성을 고려하여 결정된 수리흐름 특성 관련 입력물성치를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Input Parameters of SWCC and Coefficient of Permeability

Materials	SWCC		Permeability			
	A_w	α	k_{sat} (cm/sec)	A_K	β	
AC (Surface and Base) PCC (Slab and Lean Base)	0.309	0.32	1×10^{-12}	0.035	2.65	
Unbound Materials (Subbase and Anti-freezing layer)	Upper Bound	0.024	0.65	5×10^{-4}	0.001	1.70
	Medium	0.050	0.60	1×10^{-4}	0.030	1.85
	Lower Bound	0.001	1.70	5×10^{-5}	0.045	1.90
Subgrade Soil	Very Sensitive	0.004	0.57	1×10^{-5}	0.030	1.15
	Sensitive	0.008	0.58	1×10^{-6}	0.120	1.50
	Possible Sensitive	0.013	0.58	1×10^{-7}	0.300	1.45

포화투수계수는 국내 노상토 및 입상보조기층 재료에 대한 실내시험결과를 바탕으로 범위를 설정하여 적용하였다(건설교통부, 2002; 국토해양부, 2012; 박성완 등, 2011; 임유진, 2010). 입상보조기층 및 노상토의 투수계수는 각각 세 단계로 나누어 적용하였다(Table 2).

FROST 프로그램에서는 아스팔트 콘크리트 층 및 시

멘트 콘크리트에서의 흐름특성에 대한 입력변수를 또한 요구한다. 그러나 콘크리트 층에서의 흐름 정도는 입상 보조기층 또는 노상토에서 흐름에 비하여 매우 작기 때문에 동상특성에 실질적인 영향을 미치지 못한다. 또한 표층, 기층에 발생하는 균열의 진행에 따른 흐름특성의 변화를 고려한다 할지라도 포장 하부에서의 흐름에 비하여 매우 작은 흐름을 나타내게 된다(Susan 등, 1996; Berg, 1996). 따라서 아스팔트 콘크리트 표층, 중간층, 기층 그리고 시멘트 콘크리트의 함수특성곡선과 불포화 투수계수는 대표적인 하나의 값을 적용하였다.

3.3. 환경특성 및 경계조건

환경특성 입력자료는 크게 대기온도와 강수량으로 나누어진다. 두 입력변수 모두 국내 기상 특성을 고려하여 결정하였다. 대기온도 입력자료는 2009년~2010년 겨울 기간의 기상자료를 활용하였다. 국내의 동결지수 범위를 고려하여 동결지수가 서로 다른 세 지역(대관령, 인제, 대전)의 자료를 활용하였다. 적용된 동결지수 범위는 $188^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}\sim 655^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 이다. 강수조건은 온도조건이 적용된 동일한 지역의 자료를 적용하였으며, 해석 기간 동안 누적 강수량은 216.3mm~606.5mm 범위였다.

해석의 시간 간격은 일별로 하였고, 입력자료 또한 일 평균온도와 일평균강수량을 적용하였다. 해석기간은 영하의 온도가 발생하기 이전인 10월 1일부터 융해가 완료되고 추가적인 동결이 발생하지 않는 4월 30일까지로 하였다. 해석기간의 영향을 대기온도가 나타나기 한 달 이상의 이전 자료까지 포함한 것은 동결이 발생하는 동안 초기치의 영향을 최소화하기 위함이다.

경계조건으로 지하수위 위치, 해석단면 최하부의 온도를 설정해야 하고, 초기치로는 해석단면에서 온도 및 수분 분포를 설정해야 한다. 지하수위 위치는 포장표면에 존재하는 극단적인 경우부터 5m 아래 최하부에 존재하는 것까지 다양하게 설정하였다. 지하수위는 동결깊이 근처에서는 20cm 간격으로 엄밀하게 변화를 주었고, 지하수위 영향이 상대적으로 작은 깊이에서는 1m 간격으로 경계조건을 변화시켰으며, 총 10개의 지하수위 조건에 대한 해석을 수행하였다. 해석기간 동안 지하수위는 변동하지 않는 것으로 모델하였다.

해석단면 최하부의 온도는 15°C 로 가정하였다. 이는 동결기간 동안 국내 지반의 지중온도를 고려한 것이다(기상청 홈페이지 자료). 초기 포장표면의 온도는 초기 입력 대기온도와 동일하게 하였고, 포장체 내부에서 온도분포는 포장표면과 포장 최하부 사이에서 선형으로

변화하는 것으로 가정하여 초기치를 설정하였다. 해석단면에서 수분 분포는 지하수위 아래 부분은 완전포화된 상태로 가정하였고, 포장 표면은 완전건조 상태로 가정하였다. 포장체 내부에서 수분분포는, 온도분포와 동일하게, 포장표면과 포장 최하부 사이에서 선형으로 변화하는 것으로 가정하여 초기치를 설정하였다.

해석기간은 앞에서 언급한 바와 같이 영하의 온도가 초기치로부터 최소한 30일 이후에 발생하도록 설정되어 있다. 따라서 동결이 시작되는 시점에서 포장체의 온도 및 수분 분포는 초기치의 영향이 충분히 제거된 실제적인 상황이 되도록 하였다.

4. 도로 동상특성에 대한 지하수위 영향 평가

4.1. 노상토가 입상보조기층 재료로 적용된 경우의 동상특성

다양한 포장단면 및 동결지수 조건에서 노상토가 입상보조기층 재료와 같이 비동상성 재료로 구성되어 있는 경우, 지하수위에 따른 동상량 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 지하수위의 위치는 포장표면으로부터의 깊이가 아니라, 최대동결깊이와 지하수위 높이 차이로 나타내었다. 동상에 있어서 지하수위 위치는 동결진행 영역과 지하수위 사이의 높이 차이가 중요하기 때문이다.

Fig. 2에 결과로 나타낸 포장단면은 현재까지 우리나라에 적용되었던 동상방지층의 개념이 적용된 포장단면에 해당하는 것으로, 동결깊이까지 비동상성 재료인 동상방지층으로 노상을 충분히 치환한 경우에 해당한다.

지하수위가 동결깊이보다 더 위에 존재하면, 즉 Fig. 2에서 동결깊이로부터 지하수위 위치가 음(-)의 값을 가지면, 전체 포장층이 비동상성 재료로 구성된 경우라 할지라도 상당한 정도의 동상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 포장재료가 비동상성이라는 의미는 자체 함유하고 있는 수분의 팽창에 의한 동상을 억제하는 것이 아니라 하부로부터 지속적인 수분 공급에 의한 동상을 억제하는 것을 나타낸다. 부연하면, 동결깊이 이내에 포함된 수분 자체의 동결에 의한 동상은, 포장층 전체가 동상비민감 재료가 사용된 경우라 할지라도 억제할 수 없음을 의미한다.

이에 반하여, 지하수위가 동결깊이보다 아래에 존재하는 경우에는 지속적인 수분 공급에 의한 동상이 급격하게 억제된다. 지하수위가 아래로 내려갈수록 동상량이 급격히 감소하여, 최대동결깊이로부터 50cm 이상

지하수위가 낮아지면 동상은 거의 발생하지 않는다. 즉, 비동상민감 재료는 지속적인 수분 공급에 의한 동상에 잘 대처하고 있음을 나타낸다.

실제 포장에서는 다양한 배수시설을 적용하고 있고, 입상보조기층 또는 동상방지층이 배수층 역할을 하므로, 극단적인 경우를 제외하고는 지하수위가 동상방지층 상부로 상승하는 경우는 발생하지 않는다. 그러나 별도의 배수시설이 설치되지 않은 습지지역의 포장, 또는 중력수의 흐름이 고립되어 국부적인 지하수위 상승 우려가 있는 구조물과 토공 접속부분에서 동상방지층을 적용한다 할지라도 동상에 의한 피해가 발생하기도 하였다. 바꾸어 말하면, 극단적인 경우를 제외하고는 현행의 동상방지층 재료를 사용하는 경우에 발생하는 일부 동상량은 공학적 문제를 야기하지 않는 것을 의미한다.

Fig. 2에 나타낸 해석결과와 같이, 동상방지층을 적용하고 지하수위가 동결깊이까지 상승해 있는 경우 최대 동상량은 0.5cm로 평가되었다. 따라서, FROST 프로그램을 적용하여 동상을 평가하는 경우, 공학적인 문제 발생 여부를 판단하는 상대적인 기준으로 0.5cm 동상량을 적용하고자 한다. 이러한 기준은 본 연구와 같이 FROST 프로그램을 이용한 해석적 평가에 대한 것이 국한된 것으로, 실제 포장체에서 0.5cm 동상량이 공학적 문제를 발생시키지 않는 기준이 되는 것은 아니다.

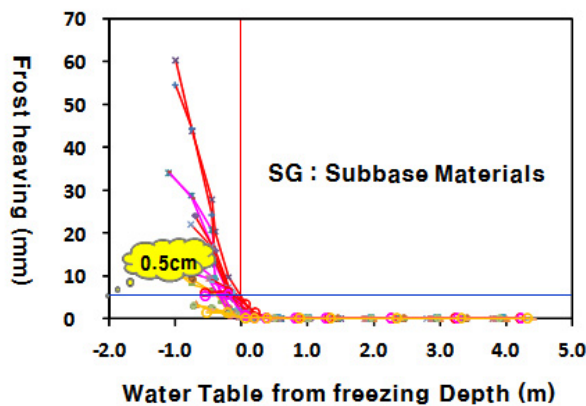


Fig. 2 Amount of Frost Heaving with Water Table Locations in Pavements Consisting of Fully Non-Frost-Susceptible Materials

4.2. 노상토 함수특성과 지하수위에 대한 해석결과 분석

다양한 노상토에 대하여 지하수위 위치에 따른 최대 동상량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 노상토의 특성에 따라 동상량의 차이가 크게 발생하고, 최대동결깊이로부터 지하수위 위치가 멀어질수록 동상량은 급격하게

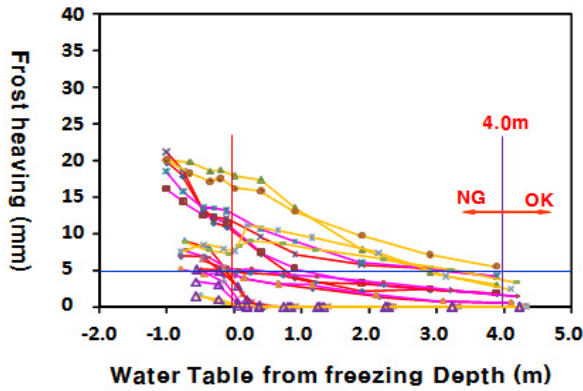
줄어들고 있음을 알 수 있다.

모든 노상토에 대한 결과를 포함한 Fig. 3(a)을 살펴보면, 노상토가 동상에 대단히 민감한 재료라 할지라도 최대동결깊이로부터 지하수위 위치가 4m 이상 차이가 나면 동상량은 0.5cm 이하로 급격하게 줄어듦을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 노상토의 동상민감성에 무관하게 모든 종류의 노상토에 대하여 공학적으로 동상문제를 야기하지 않는 수준의 동상량을 유지하기 위해서는 최대동결깊이로부터 지하수위가 4m 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

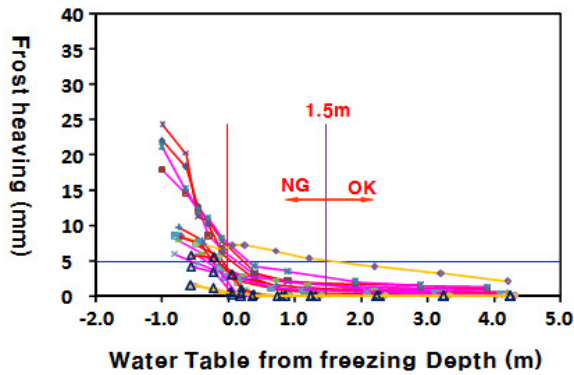
Fig. 3(a)의 결과는 #200체 통과량이 50% 이상인 세립분의 노상토를 포함한 결과로, 현재 우리나라에서 적용하고 있는 노상토 품질기준에 부적합한 노상토 조건을 포함하고 있는 것이다. Fig. 3(b), Fig. 3(c), Fig. 3(d)는 #200체 통과량이 50% 이하로 우리나라에서 적용하는 세립분 함유량 품질기준을 만족시키는 노상토에 대한 결과를 나타낸 것이다. 노상토의 세립분함량이 줄어들수록, 즉 노상토의 동상민감성이 줄어들수록 동상량은 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 허용동상량 0.5cm를 기준으로 평가하면, 동결깊이로부터 지하수위까지의 높이 차이가 1.5m 이상이면 공학적인 동상문제를 발생시키지 않음을 알 수 있다. 즉, 현행 품질기준을 만족하는 노상토를 사용하고, 동결깊이로부터 지하수위까지의 높이 차이가 1.5m 이상인 경우에는 동상방지층을 별도로 설치할 필요가 없음을 나타낸다.

노상토의 세립분 함량이 줄어들수록 공학적 동상문제의 발생을 억제하기 위해 요구되는 동결깊이로부터 지하수위까지의 높이 차이는 줄어들고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(d)와 같이 #200체 통과율이 5% 이하로 세립분 함량이 매우 적어, 입상보조기층과 유사한 노상토 재료에 대해서는 지하수위 높이차가 0.5m 이상만 되어도 동상문제를 발생시키지 않을 것으로 예상된다. Fig. 3(d)의 결과가 Fig. 2의 결과와 약간의 차이가 있는 것은 노상토의 불포화투수계수 모형 및 초기간극비가 입상보조기층 재료와 상이하게 사용되었기 때문이다.

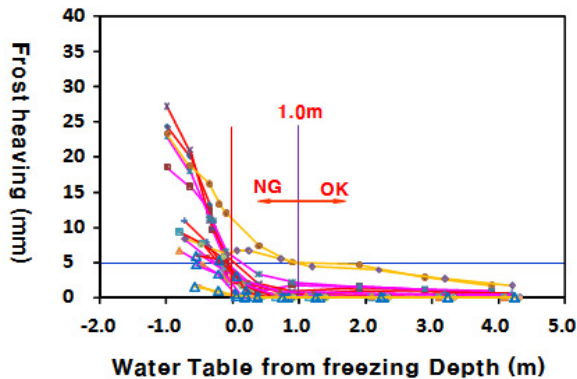
우리나라의 도로포장 동상설계에 대한 기준에서는 노상면 상단을 기준으로 성토고 2m 이상인 경우 동상방지층을 생략하도록 하고 있다(국토해양부, 2012; 남영국 등, 2002). 성토구간에서 지하수위가 극단적으로 지표면에 있고 성토에 의해서 포장체 내부에서 일부 지하수위 상승이 있는 경우라 할지라도 노상토 상단으로부터 지하수위는 1.5m 이상 위치에 존재하게 된다. 즉, 이러한 성토고 2m 이상인 경우 동상방지층을 생략하는



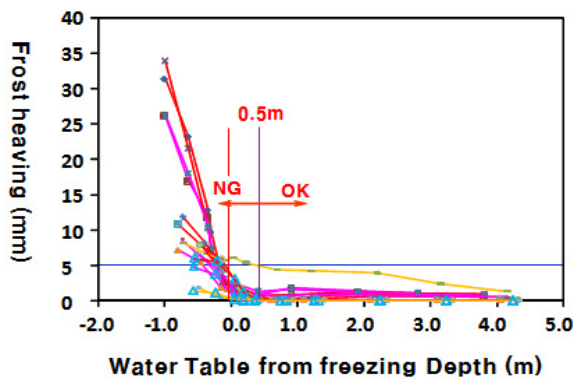
(a) All Subgrade Soils



(b) 12% < #200 passing ≤ 50%



(c) 12% < #200 passing < 5%



(d) #200 passing ≤ 5%

Fig. 3 Amount of Frost Heaving with water Table Locations

기준은 이와 같은 지하수위 조건을 반영한 것이고, 본 연구에서 결정된 최대동결깊이로부터 지하수위까지의 높이차 1.5m는 이러한 기준의 연구성과와 잘 부합되는 결과이다. 본 연구의 지하수위에 대한 기준은 성토고와는 무관하게 지하수위를 직접적으로 고려한 것으로, 성토·절토와는 무관하게 모든 도로포장 단면에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

5. 결론

본 연구는 포장체에서 동상 특성을 FROST 프로그램을 이용하여 해석적으로 평가하였다. 동상에 대한 다양한 영향요소 중 지하수위를 중심으로 분석을 실시하였다. 해석을 위한 포장단면, 기후조건, 경계조건, 포장층의 재료적 성질 등, 다양한 입력물성치는 우리나라 포장체의 특성을 고려하여 결정하였다. 해석결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동결깊이로부터 지하수위까지의 높이차가 증가하면 동상량은 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 세립토의 노상에 대한 투수계수와 함수특성곡선을 적용하면 동상량이 증가하는 것으로 나타나, 세립분 함량이 증가할수록 동상민감도는 증가하는 것을 확인하였다.
2. 동결깊이까지 충분한 동상방지층을 적용하여 포장층 전체가 동상 비민감 재료로 구성된 경우라 할지라도, 지하수위가 동결깊이보다 위에 존재하는 경우에는 자체 함유하고 있는 수분의 동결에 의한 매우 큰 동상이 발생하여 공학적 문제를 야기할 수 있음을 확인하였다.
3. 동상에 대단히 민감한 #200체 통과율 50% 이상의 세립토가 노상토로 적용되는 경우에도 동결깊이로부터 지하수위까지의 높이차가 4m 이상 확보되면 공학적으로 허용 가능한 수준 이하로 동상량이 억제될 것으로 예상된다.
4. 노상토의 #200체 통과율이 50% 이하로 현재 적용하고 있는 품질기준에 합당한 노상토가 사용되는 경우에는 동결깊이로부터 지하수위까지의 높이차가 1.5m 이상 확보되면 동상에 대한 공학적 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 동의대학교 교내연구비(2011AA149)의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

References

- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2002, *Korea Pavement Research Program*, KPRP-E-02.
- (건설교통부, 2002, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구:포장 하부구조 다짐관리 기준정립(동결심도연구), KPRP-E-02)
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012, *Evaluation of validity for frost protection layer and development of its construction criteria*.
- (국토해양부, 2012, 도로동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구)
- Korea Meteorological Administration, 2012, Website <http://www.kma.go.kr>
- Korea Expressway Corporation, 2002, *Development of Pavement Foundation Design Procedure Considering Frost Depth*.
- (한국도로공사, 2002, 동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선 방안 연구)
- Kweon, G. C., 2004, Freezing and Thawing Characteristics of Subgrade Soils in Korea, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 24, 2-D, 213-219.
- Kweon, Gi Chul · Oh, Seboong · Kim, Hyung Bae · Choi, Chang Gyu, 2003, A Numerical Analysis on the Characteristics of Frost Heaving at Road Pavement in Korea, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 3. no. 2, 37-47.
- Kim, N. S. and Lee, J. I., 2009, Case Study on Design of Anti-Freezing Layer for Effective Pavement Design, *Kyonggi University, Research Institute of industrial Technology*, Vol 35, 59-74
- (김낙석, 이정일, 2009, 효율적 도로설계를 위한 동상방지층 설계준 사례연구, 경기대학교 산업기술종합연구소논문집, 제35권, 59-74)
- Kim, D. H. and Kwon, K. J., 2001, Pavement Design on Tunnel Section : Determination of Freezing Depth and Thickness of Pavement on Tunnel Section Considering Temperature, *Korean Society of Road Engineers*, Technical Note 3-3, 50-55.
- (김대하, 권기진, 2001, "터널내 포장설계 개선방안 고찰: 동결기 터널내 온도변화 조사를 통한 동결심도 및 포장두께 선정" 한국도로포장공학회, 3-3, 기술기사, 50-55)
- Kim, S. K., Ryu, J. H., Song, J. K., 1999, Measurement of Soil Water Characteristics Curve of Unsaturated Soils, *Journal of the Korean Society of Geotechnical Engineers*, 1-19.
- (김상규, 류지협, 송진규, 1999, 불포화토의 함수특성 측정, 한국지반공학회지, 1-19)
- Kim, Y. J. and Hong, S. S., 2001, A study on Anti-Freezing Effects of EPS and Cement Treated Soils, in Proc. of 2001 Conference of The Korean Society of Civil Engineers.
- (김영진, 홍승서, 2001, ESP 조각 및 시멘트 혼합토의 동상방지 효과에 대한 기본 연구, 대한토목학회 학술발표회)
- Nam, Y. K., Park, C. B., Jo, K. T., Jin, J. H., 2002, Field Measurement on Behavior of Anti-Freezing Layer, *Korean Society of Road Engineers*, Technical Note 4-1, 19-23
- (남영국, 박찬범, 조규태, 진정훈, 2002, "동상방지층의 거동특성에 대한 현장계측", 도로포장공학회, 4-1, 19-23)
- Ryu, J. H., 2002, Measurement of Characteristics of Permeability of Unsaturated Weathered Granite Soils, *Journal of Korean Water Resource Association*, 133-141.
- (류지협, 2000, 불포화 풍화토의 투수특성 측정, 한국수자원공학회지, 133-141)
- Park, S. W. and Seong, Y. J., 2011, Evaluating Unsaturated Hydraulic Properties of Compacted Geomaterials in Road Foundations (I) : Laboratory Test, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 31-1, 73-82.
- (박성완, 성열정, 2011, 다져진 도로기초 재료의 불포화투수특성 평가, 실내실험, 대한토목학회논문집, 제31권 제1호, 73-82)
- Park, S. W. and Oh, J. W., 2002, Pavement Design and Data of Frost Depth in Korea, *Korean Society of Road Engineers*, Technical Note 4-1, 24-32
- (박성완, 오재원, 2002, 국내 동결심도 자료와 포장설계에 관한 고찰, 도로포장공학회 기술기사, 4-1, 24-32)
- Song, C. S. and Kim, Y. H., 2003, Experimental Study on Soil Water Characteristics Curve on Unsaturated Soils, *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, vol 45(1), 153-151.
- (송창섭, 김명환, 2003, 불포화토의 흡-수분 특성곡선에 관한 실험적 고찰, 한국농공학회지, 45(1), 153-151)
- Shin, E. C., Lee, H. J. and Oh, M. I., 2004, Prediction of Soil-water Characteristic Curve and Unsaturated Permeability Coefficient of Reclaimed Ground, *Journal of the Korean Society of Geotechnical Engineers*, vol. 20(1), 109-120.
- (신은철, 이학주, 오명인, 2004, 불포화 준설패립 지반의 흡-수분 특성곡선 및 불포화 투수계수 예측, 한국지반공학회논문집, 20(1), 109-120)
- Hwang, C. S. and Kim, T. H., 2004, Determination of the Unsaturated Hydraulic Conductivity Function, *Journal of the Korean Society of Geotechnical Engineers*, vol. 20-3, 47-51.
- (왕창수, 김태형, 2004, 불포화 투수계수함수에 대한 연구, 한국지반공학회논문집, 20(3), 47-51)
- Lee, K. H. and Kim, H. B., 2002, Characteristics of Frost and Freezing Depth in Road Pavement, *Korean Society of Road Engineers*, Technical Note 4-1, 6-18.
- (이경하, 김형배, 2002, 도로포장의 동상특성 및 동결심도, 도로포장공학회 기술기사, 4-1, 6-18)
- Lee, S. J., 2004, *Evaluation of Shear Strength and Soil-Water Characteristics Curve of Unsaturated Weathered Granite Soils*, Ph.D Dissertation, KAIST.
- (이성진, 2004, 화강풍화토의 불포화 전단강도 및 함수특성곡선 산정에 관한 연구, 공학박사학위논문, 한국과학기술원)
- Lee, J. and Kweon, G. C., 2010, Evaluation of Freeze-Thaw Effect

- on the Modulus of Subgrade Soils from Impact Resonance Test, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 12. no. 3, 71-77.
- Lee, H. J., 2004, *Prediction of Soil-Water Characteristics Curve of Unsaturated Weathered Granite Soils Using the Soil Structure Characteristic*, Master's Thesis, Kyunghee University.
- (이혜지, 2004, 흙의 구조적 특성을 이용한 화강풍화토의 함수 특성곡선 유추에 관한 연구, 공학석사학위논문, 한국과학기술원)
- Yim, S. Y. and Ryu, T. J., 2008, The Analysis of Permeability Coefficient and the Evaluation of Equations of Permeability Coefficient for an Unsaturated Soils, *Journal of the Korean Society of Geotechnical Engineers*, 139-151.
- (임성윤, 류태진, 2008, 불포화토의 투수계수분석 및 투수계수 방정식의 적용성 평가, 한국지반공학회지, 139-151)
- Yim, Y. J., 2010, *Development of Design and Construction Manual for Drainage in Road Pavement*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, j1-53 ~ j1-63
- (임유진, 2010, 도로포장 배수설계 및 시공지침 개발 연구, 국토해양부, j1-53 ~ j1-63)
- Jeon Jong-Myung, 2012, *Development of Prediction Model for Freezing Depth in Road Pavement Considering Thermal Properties*, Ph.D Dissertation, Kyunghee University.
- (전종명, 2012, 포장재료의 열역학적 특성을 고려한 도로포장의 동결깊이 예측모델 개발, 공학박사학위논문, 경희대학교)
- Jo, K. T, Jin J. H. and Nam Y. K, 2002, Anti-Frost Layer of Road Pavement for Effectiveness Verification by Site Measure and Laboratory Testes, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 22, 5-D, 913-921.
- (조규태, 진정훈, 남영국, 2002, 도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구, 대한토목학회논문집, 제2권, 5-D, 913-921)
- Jin, J. H. and Nam, Y. K., 2006, Improvement of Anti Frost Layer by Introduce the Green Drainage System, *Korean Society of Road Engineers*, vol. 8-2, 6-18.
- (진정훈, 남영국, 2006, 친환경적인 배수시스템 도입을 통한 동상방지층 개선, 한국도로학회지 제8권 제2호, 35-44)
- Berg, RL., G.L. Guymon and T.C. Johnson, 1980, Mathematical model to correlate frost heave of pavements with laboratory predictions, *USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, CRREL Report, 80-10.
- COE, 1985, Pavement Design For Seasonal Frost Conditions, *The U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory*.
- Gary L. Guymon, Richard L. Berg and Theodore V. Hromadka, 1993, Mathematical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavements, *CRREL Report*. 93-2.
- Guy O., Jean-Marie K. and Marius R., 1999, Deterioration Model for Pavements in Frost Conditions, Transportation Research Record 1655, *TRB*, National Research Council, 110-117.
- Konrad J. M., 1999, Frost Susceptibility related to Soil index properties, *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 403-417.
- Susan R. B and Richard L. B., 1996, Modeling of Mn/ROAD Test sections with the CRREL Mechanistic Pavement Design Procedure, *Special Report*. 96-21.
- (접수일 : 2012. 11. 16 / 심사일 : 2012. 11. 20 / 심사완료일 : 2012. 12. 17)