

국내·외 동상방지층 설계기준에 대한 특성 분석

A special quality analysis about design standard of Anti-Frost layer
at the inside and outside of the country

최정호* · 권기철**

Choi, Junggho · Kweon, Kichul

1. 서 론

우리나라는 겨울철 시베리아 기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승한다. 또한 남해안지대 일부와 제주도를 제외한 지역에서는 도로가 겨울에는 동결되고 봄부터 가을까지는 동결되지 않는 계절적 동토지역으로 국내 도로분야에서는 이러한 환경적인 지배 요인들로부터 포장의 균열파손 및 해빙기 시 지반 강도 저하 현상 등과 같은 도로포장에 피해를 준다. 이러한 도로의 동상의 피해를 줄이기 위하여 도로포장구조를 설계할 때 노상이 동결하는 것을 방지하기 위하여 동상방지층을 설치하도록 설계되고 있다.

포장의 공용성과 포장구조 설계에 관련된 주요 인자는 환경인자로 그 나라의 온도와 강우의 영향을 반영하는 것이 중요하다. 이들은 노상토의 동결융해 및 배수효과에 영향을 주는 기상요소이므로 도로포장두께 설계시 동상으로 인한 포장의 손상을 방지하고 봄철에 발생할 수 있는 융해현상으로 인한 도로포장 하부 구조의 연약화 현상을 제거하기 위해서 고려해야 할 중요 요소이다.

그러나 현재, 우리나라 포장구조 설계는 미국의 '72AASHTO' 설계법과 미공병단의 완전방지법과 노상 동결 관입 허용 설계법을 함께 혼용하여 동상방지층을 노상의 일부로서 또는 노상 위에 사용하고 있는 것이 국내 도로설계 및 시공기준으로, 이에 대한 검증 없이 성토부, 절토부, 절성 경계부에 동일 두께의 동상방지층을 사용하는 과다 설계와 포장구조 두께 설계시 표층, 중간층 및 기층 두께가 거의 비슷하게 설계되고 있어 비경제적이라는 문제점을 가지고 있다.

선진국에서는 오래전부터 동상시험 등을 실시하여 자국의 지정학적인 위치와 기후대에 맞는 지방서를 가지고 있다. 미국의 주 도로국(DOT : Department of Transportation)에서는 포장 표준 단면이 교통, 토질, 환경조건에 따라 각각 다르게 설계되고 있으며, 북부지역인 오하이오(Ohio)주, 미네소타(Minnesota)주, 위스콘신(Wisconsin)주, 알래스카(Alaska)주 등의 DOT에서는 도로 포장 설계시 동상방지층을 사용하지 않고 있으며, 일부 주의 DOT에서 보조기층을 FDB(Free Drainage Base)층으로 설계에 적용하기 위하여 연구 중에 있다.

우리나라도 외국 포장 설계 사례를 검토 하여 국내에 동상방지층 설치 여부에 관한 새로운 기준 제시 및 현장에서의 저성토, 절토, 절성경계부 등을 구분하여 동상방지층이 필요한 곳과 불필요한 곳에 대한 적합한 기준을 정립하여 지역에 적합한 포장단면을 제시하면, 국가 예산 절감 효과를 기대할 수 있으며, 환경보호 측면에서도 동상방지층 재료의 절감으로 인한 환경적인 기여 및 환경 복구비용 또한 절감할 수 있을 것으로 전망된다.

* 동의대학교 토목공학과 석사과정 · 051-890-1968(E-mail : jf4879@nate.com)

** 동의대학교 토목공학과 정교수 · 051-890-1617(E-mail : gckweon@deu.ac.kr)

2. 국내·외 동상방지층 설계 기술 동향 및 사례

2.1 국내 동상방지층 설계 기술 동향 및 사례

국내 도로의 동결심도를 고려한 설계는 1970년대에 건설부 도로조사단의 외국기술자들에 의해서 동결지수 선도를 발표하였다. 이 자료를 기초로 일본의 데라다가 발표한 동결심도 계산식을 사용하여 동결심도를 사용하였다. 1980년대 후반에 IBRD차관 도로 건설시에 배운 미공병단교법의 동결심도 산정을 도로설계에 사용하기 시작하였다. 또한 동결심도 산정식을 국내 실측자료를 이용하여 초기에는 데라다 공식으로 수정했으며, 1990년에는 상관식을 발표하였지만, 많은 문제점을 가지고 있다.

국내에서는 도로포장두께를 설계할 때 공사구간에 대한 동결지수를 구하고 도로의 계획고에 의한 수정동결지수를 산정하고 있으며, 또한 설계 교통량에 의한 포장의 소요 구조 두께를 산정하고 있다. 포장의 소요 구조 두께가 동결심도 내에 위치하면 동결심도만큼 동상방지층을 사용한다.

이러한 방법으로 결정되어진 포장두께는 성토부, 절토부, 절성경계부의 구분 없이 동일한 두께의 동상방지층으로 설계 및 시공되고 있어 현장의 노상토가 동상에 민감하지 않는 비동상성 재료이지만 무조건 동상방지층을 사용하는 것이 국내의 동상방지층 설계 및 시공 동향이다.

동결지수(frost index)는 포장내의 동결관입 깊이를 산정하기 위한 대표적인 척도로서 포장구조가 노상토를 동결시키는 대기온도의 강도 지속 시간의 누가 영향(cumulative effect)으로 표시되며, 단위는 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{일}$ ($^{\circ}\text{F} \cdot \text{일}$)로 표시되고, 이는 동결 계절 동안 누가 온도·일에 대한 시간곡선상의 최고점과 최저점의 차이를 나타낸다.

설계노선의 설계 동결지수는 대상지역 인근의 측후소에 관측한 월 평균 대기온도의 크기와 지속시간에 대한 30년간의 기상자료에서 추위가 가장 심한 3년간(최대 동결 지수 3년치)의 평균 동결 지수로 정한다. 30년간 기상 자료가 없으면 최고 10년간의 최대 동결 지수를 설계 동결 지수로 산정한다. 이를 기초로 미 공병단 TM 5-818-2 Air Force AFM 88-6 Chap. 4(Pavement Design For Seasonal Frost Condition, January 1985)에서 제시된 절차에 의해서 작성되는 누가 온도·일 곡선에 의해서 결정하거나, 자료가 부실한 경우에는 건설교통부에서 작성한 『동결 심도 조사 보고서 No. 498(1989.12)』에 수록한 전국 동결지수도를 적용하였고, 2003년 동결지수도에 대한 수정을 실시하여 건교부에서 동상방지층 두께 산출(예)에서 수정동결지수를 제시하였다.

도로 포장설계에서 동결 깊이(frost penetration depth)를 산정할 때 두 가지 개념으로 나눌 수 있다. 한 가지 방법은 지반의 유해한 동결작용을 예방하기 위해서 표층과 비동결성 지층을 합한 두께를 동결깊이보다 크게 하여 동결 융해가 포장체에 미치는 영향을 감소시키거나 억제하는 것이다. 다른 방법은 지반의 동결을 허용하는 것으로서 동결 및 해빙기간 중에 감소되는 지반의 강도를 예상하여 이를 보강할 수 있도록 지층의 두께를 증가시키는 방법이다. 동결 관입 깊이는 0°C 온도선이 포장표면으로부터 포장층 하부로 관입되는 깊이로서 이것의 주요인자는 영하의 대기온도 크기와 지속시간, 노상토의 재료성질, 노상토 내부에 포함된 함수비의 영향을 받는다.

국내에서는 최대동결 깊이 산정을 미공병단의 TM 5-852-6에 제시된 절차에 의하여 적용하여 대상 설계 노선 지역의 토질 및 기상조건을 고려하여 결정하고 있다.

동결작용에 의한 도로 포장의 손상을 억제하기 위한 설계법은 아래와 같이 크게 3가지로 나눌 수 있다.

첫 번째는 완전 방지법(Complete Protection Method)은 동결작용에 의한 표면 변위량을 제거하기 위하여 충분한 두께의 동상방지층을 설치하여 포장의 용기와 지지력 약화 현상을 예방하지만, 비용이 많이 소요되기 때문에 비경제적이다. 따라서 특수한 경우에만 이러한 방법을 적용하고 있다.

두 번째는 감소 노상 강도법(Reduced Subgrade Strength Method)은 해빙기간 중에 일어나는 노상강도 감소를 근거로 하여 동결에 대비한 포장두께를 결정하는 것으로 동결지수가 직접함수로 적용되지 않기 때문에 사용빈도가 적다.

세 번째는 노상 동결 관입 허용법(Limited Subgrade Frost Penetration Method)은 노상 상태가 수평 방향으로 심하게 변하지 않거나 흙이 균질한 경우에는 동결 깊이가 노상으로 어느 정도 관입되더라도 동상으로 인한 용기향이 포장을 파손할 정도까지 영향을 미치지 않기 때문에 노상의 동결을 일부 허용하는 것이 경제적이므로 제안된 방법으로 국내에서 사용하는 방법이다.



국내에서 동상방지층의 재료는 동결융해 작용에 의한 포장층 파손을 방지하기 위하여 빙막 형성을 방지할 수 있는 품질의 재료를 사용한다. 동결 영향과 지하 배수를 동시에 고려해야 할 지역인 경우 지배적인 영향을 기준으로 차단층과 동상방지층 기능을 동시에 가지는 선택층(selected material layer)으로 설계한다. 동상방지층의 최대 입경은 100mm를 초과할 수 없으며, 세립토 함유량은 동상 방지층에 사용될 재료는 직경 0.02mm 이하로 세립토 함유량이 3% 이하여야 하며, 0.075mm(No.200)체를 통과한 재료의 함유량이 15% 이하야 한다. 모래 당량 시험값은 20% 이상이어야 한다.

국내 노상토와 동상방지층 재료간의 비교는 다음과 같다. 도로공사표준시방서의 상부 노상재료나 동상방지층 재료의 기준이 표 1과 같이 큰 차이가 별로 없기 때문에 동상방지층의 재료 기준과 비슷한 노상재료의 동결·융해의 특성 평가가 필요하다고 판단된다.

상부 노상재료의 경우에는 최대골재의 입경을 100mm 이하로 규정하고 있으며, #4체 통과량 25~100%, #200체 통과량 0~25%로 제한하고 있으며, 소성지수(PI)는 10이하, 다짐의 경우 CBR 10%이상으로 하고 있다.

동상방지층 재료(SB-1)의 경우에는 최대 골재의 입경을 100mm이하로 제한하고 있으며, #4체 통과량은 30~70%, #200체 통과량은 15%이하로 제한하고 있다. 소성지수는 10이하, 현장 다짐의 경우 CBR 10% 이상으로 하고 있으며, 단지 모래 당량 20% 이상의 규정이 포함되고 있다.

보조기층 재료 (SB-2)를 동상방지층 재료로 사용하는 경우는 동상방지층의 두께가 15cm 미만일 경우나 동상방지층의 생산이나 수급이 어려울 경우에 동상방지층의 두께만큼을 보조기층 재료로 사용하고 있다. 그러나 우리나라의 대부분의 도로 현장은 시방규정에 맞는 양질의 노상재료를 사용함에도 일률적으로 SB-2를 사용하여 값비싼 동상방지층으로 설계시공하고 있다. 성토구간에서의 동상방지층의 설계 및 시공은 실효성이 없으며 불필요한 예산낭비 등의 문제가 제기 되고 있다. 동상방지층 재료의 시방기준은 표 2와 같고, 노상에 대한 기준은 표 3과 같다. 보조기층재료에 대한 시방기준은 표4와 같다.

표 1. 도로재료의 입경 규격

호칭 지수 (mm)	공칭 입경에 대한 체 통과중량 백분율(%)								
	100	75	50	40	20	5	2	0.4	0.08
노상	100					25-100			0-25
동상방지층(SB-1)		100	-	70-100	50-90	30-65	20-55	5-25	2-10
보조기층(SB-2)			100	80-100	55-100	30-70	20-55	5-30	2-10

표 2. 동상방지층 재료의 시방기준

구 분	시 험 방 법	기 준
소 성 지 수	KS F 2304	10 이하
모 래 당 량 (%)	KS F 2340	25 이상
수 정 CBR 값 (%)	KS F 2320	10 이상

표 3. 노상재료에 대한 시방 기준

규격기준	공 종	노 상	비 고
	수 정 CBR		10 이상
소 성 지 수		10 이하	KS F 2303

표 4. 보조기층 재료의 시방기준

구 분	시 험 방 법	기 준
액 성 한 계 (%)	KS F 2303	25 이하
마 모 감 량 (%)	KS F 2508	50 이하
소 성 지 수 (%)	KS F 2304	6 이하
수 정 C B R (%)	KS F 2320	30 이상
모 래 담 량	KS F 2340	25 이상

2.2 국외 동상방지층 설계 기술 동향 및 사례

국외의 경우에는 각국에서는 자국의 연구를 진행하여 만들어진 시방서를 가지고 있었다. 미국은 경험적인 방법과 역학적인 개념을 도입한 AASHTO 시방서를 가지고 있으며, 2002년 AASHTO 시방서의 개발이 완료되어서 2003년 하반기에 각주의 도로국으로 이관되어서 각주의 도로국의 검토를 거치게 되면 2004년 하반기 또는 2005년도부터 실용화 되어서 사용될 예정이다, 또한 동상에 대한 연구는 극지 연구소에서 수행하고 있으며, 많은 연구자들이 이곳에서 종사하고 있다. 미래의 자원은 극지지역에서 채취해야하기 때문에 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

일본의 경우에는 2002년도에 포장 설계법에 대한 시방서를 새로이 정립하여서 사용하고 있다. 일본의 경우에는 기존의 것들을 보완한 시방서로써 많은 부분에 대한 수정을 가하지 않고 기준에 협회 또는 공단에서 사용되어 오던 시방서를 한 개의 시방서로 정립하였다. 또한 동상과 관련한 연구는 북해도 연구소에서 수행하고 있으며, 1조5000억원의 연구시설을 보유하고 있고 이를 이용한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

유럽의 경우에는 각국마다 고유의 설계법 시방서를 가지고 있으며, 대부분 카다로그 방식의 시방서를 사용하고 있다. 또한, 각국의 토질조건에 맞는 노상도에 대한 분류를 하여서 사용하고 있다. 북유럽의 경우에는 동상과 관련된 기술이 상당 수준에 올라와 있으며, 북유럽 각국에서 연구비를 함께 출연하여 공동 설립한 연구소에서 동상에 대한 연구를 공동으로 진행하고 있다.

위와 같이 선진국에서는 일찍부터 각국의 도로 포장 설계법에 대한 연구 및 기준 정립이 끝나서 이에 대한 자국의 시방서를 가지고 있다. 미국의 경우에는 동상방지층을 사용하지 않고 있으며, 일본의 경우에는 북해도에서만 동상방지층을 사용하고 있었다. 유럽의 경우에는 토질에 대한 등급을 기준으로 포장 하부층의 지지력에 중점을 두고 설계를 하고 있었다. 선진국의 설계법들을 요약하면 표 5와 같이 정리할 수 있다.

중국의 경우 5종 7형축의 도로를 건설하면서 도로의 연장 및 건설에 비중을 두고 있지만, 동결심도 또는 동상방지층에 대한 연구가 부족하여 중국의 동북 3성지역의 경우에는 겨울철 동상 및 해빙기에 도로하부구조의 지지력 상실로 인한 파손이 많이 보고되고 있다.

표 5. 선진각국의 동상방지층 관련 설계법 요약

구분	동상방지층 설계동향
스위스	<ul style="list-style-type: none"> • 카다로그 포장설계법 • 보조기층의 경우 지지력에 따라서 4등급으로 분류, S₁-S₄ • 자연지반의 동상 민감도에 따라서 4등급으로 G₁- G₄로 분류
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> • 카다로그 포장설계법 • 노상지지력은 3개의 노상등급분류, PF₁-PF₃ • 노상재료의 역학적 성질(함수비, 포화도, 변형계수등)으로 분류, S₀-S₄ • 노상의 동상 민감도로 3등급으로 분류, SG_n, SG_p, SG_t
독일	<ul style="list-style-type: none"> • 카다로그 포장설계법



	<ul style="list-style-type: none"> • 노상토의 동상민감도는 F1에서 F3까지 3등급 분류 • 지라학적 개념으로 Zone I - Zone III 구분 • 자연지반에 대한 포장 위치, 수문지질학적 상태, 노면시공 및 배수 고려
노르웨이	<ul style="list-style-type: none"> • 동결융해 작용으로 인한 주요 표면분괴가 예상되는 지역, 도로에 대해서만 실제 동상 설계가 수행. • 교통량과 지지력에 의해서 결정된 포장 두께는 단열의 첨가 또는 포장두께의 증가에 의해서 수정. • 추운 겨울철이 주기적으로 발생한다는 개념을 사용, 여러 개의 동결지수가 일정지역에 사용.
미국	<ul style="list-style-type: none"> • 동상의 용해의 영향은 내구성 계산시 고려해야 하는데 이를 수량화하려면 공식에 의하거나 4개의 chart를 이용, 좀 더 실제적인 방법으로 구함. • 내구연도 계산 또는 기간 분석, 동상속도는 하층 노반 흙에 대한 평균 동상량, 하층 노반 흙의 종류와 동상 가능성, 세립토(직경 0.02mm 이하) 함유율 등을 토대로 한 설계 chart로부터 구함. • 배수등급은 Excellent(1/2일), Good(1일), Fair(1주일), Poor(1개월), Very poor(제거불능)으로 나누고 있다. • 미국에서 도로의 동상방지는 지하수위를 낮추는 방법과 더불어 노상토의 포화를 방지하기 위한 배수시설의 설치로 수분의 제거가 주된 요소.
일본	<ul style="list-style-type: none"> • 북해도에서만 동상방지층에 대한 설계가 이루어지고 있음. • 동결심도에 맞게끔 동상 방지층에 대한 두께를 산정하여 설계하고 있음.

3. 결 론

우리나라 포장구조 설계는 미구의 '72AASHTO' 설계법과 미공병단의 완전방지법과 노상 동결 관입 허용 설계법을 함께 혼용하여 동상방지층을 노상의 일부로서 또는 노상 위에 사용하고 있는 것이 국내 도로설계 및 시공기준으로, 이에 대한 검증 없이 성토부, 절토부, 절성 경계부에 동일 두께의 동상방지층을 사용하는 과다 설계와 포장구조 두께 설계시 표층, 중간층 및 기층 두께가 거의 비슷하게 설계되고 있어 비경제적이라는 문제점을 가지고 있다.

또한, 현재 사용되고 있는 국내도로의 동상방지층에 대한 시방서는 2003년 11월에 지침으로 채택되어 있는데, 국내의 기후의 변화를 보면 1970년대 초에는 저온의 날씨와 영하의 강도가 지속 되고 지나 나타났지만, 1990년 이후에는 빈도수 및 영하 이하의 하강온도가 강도가 약해지는 현상이 전국적으로 나타나고 있으며, 국내에서 2003년에 사용한 동결지수도의 경우 1971년부터 2000년까지의 누적치를 기초로 작성되어서 따스해지는 국내기후의 변화를 반영하지 못하고 있다. 따라서 지구 온난화로 따른 동결지수선도 및 동결지수의 개정이 불가피 하다고 판단되어진다.

현재 사용하고 있는 시방서에 의한 설계 및 시공 시 현장에서는 어떠한 현상이 벌어지고 있는지가 중요하며 동상방지층의 배제 시 과연 국내의 현장조건에서 올바른 선택인지에 대한 현장 검증도 필요한 시점으로 판단되어 진다.

향후 우리나라 포장 설계법은 외국의 포장구조 설계법을 무조건 따라가는 것 보단 우리나라의 환경을 충분히 검토 하여 국내에 동상방지층 설치 여부와 포장 두께 선정 및 동결지수선도 및 동결지수의 개정하여야 하며, 이에 적절한 새로운 기준 제시 하여 동상방지층이 필요한 곳과 불필요한 곳에 대한 적합한 기준을 정립하고, 지역에 적합한 포장단면을 제시하면, 국가 예산 절감 효과를 기대할 수 있으며, 환경보호 측면에서도

동상방지층 재료의 절감으로 인한 환경적인 기여 및 환경 복구비용 또한 절감할 수 있을 것으로 전망되어진다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 건설교통부 (2006), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, KPRP-G-06.
2. 한국건설기술연구원(1999), “동결심도 및 포장체 온도분포조사”
3. 건설교통부(2003), “동상방지층 두께 산출(예)-개정 동결지수선도 이용-”, 한국건설기술 연구원, 한국도로공사
5. 건설교통부(2000), “도로설계편람” II 권
6. 권기철(2002), “노상토의 종류에 따른 동결-융해 특성”, 한국도로포장공학회지
7. 김영진, 유 준, 김현민(1999), “동결심도 및 포장체 온도분포조사”
8. 홍원표, 김명환(1988), “우리나라 동결심도 관한 연구”
9. Lambe, T. W., Kaplar, C. W(1971), “Additives for modifying the frost susceptibility of soils”,
10. Konrad, J. M. and Mogenstern, N. R(1892), “Effects of applied pressure on freezing soils”
11. PAtterson, D. E. and Smith, M. W.(1980), “The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry”
12. Andersland, O. B. and Ladanyi, B.(1994), “An Introduction to Frozen Ground Engineering”, Chapman & Hall
13. Department of The Army and The Air Force(1985), “Pavement Design for Seasonal Frost Conditions”