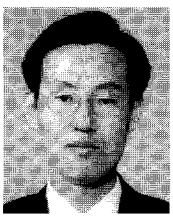
동상방지층 설계기준 개선



김 철 문 | 정회원 · 건설교통부 감사팀 토목사무관 · 도로및공항기술사
이 호 상 | 정회원 · 건설교통부 감사팀 시설주무관
이 경 하 | 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
진 정 훈 | 정회원 · 도화종합기술공사 수석연구원

1. 서 언

건설교통부 감사팀에서는 우리나라 건설공사의 설계·시공·유지관리가 불합리하게 이루어지거나 비효율적으로 시행되고 있는 분야에 대하여 매년 혁신과제를 발굴, 이를 개선·발전시키기 위한 노력을 경주하고 있다.

이에 따라 '02년에는 암발파 설계적용기준을 마련하였고, '03년에는 비탈면녹화설계기준을 마련하는가 하면, '04년에는 건설현장의 토석자원 실태파악 및 재활용 방안을 강구(일명:토석정보시스템(EIS) 개발 구축)하였고, '05년에는 하천 생태환경복원을 통한 하도정비 활성화 방안을 마련한 바 있다.

또한 '06년에는 최근의 엘리뇨 및 지구온난화에 의한 온도상승 등으로 국내 기후환경에 의한 도로포장 단면상의 노상토 동결·융해 특성평가와 합리적인 설계 동결 깊이의 결정, 지하수위의 영향, 동상에 민감한 노상토의 처리 등이 현재까지 국내에서는 정립되어 있지 않고 있다.

따라서 동상방지층의 설계기준이 절·성토부 등의 구분 없이 모두 설치하도록 되어 있는 부분들을 보다 효율적으로 설치하면 많은 도로건설 예산의 절감을 기대할 수 있어 건설교통부 감사팀이 주축이 되어 도로의 동상방지층 설치기준 개선방안을 혁신과제로 선정하고 민간(전문가), 학계(교수), 연구원(박사), 관련 전문공무원들이 참여하는 학습동아리를 결성하여 국내에서 기 연구된 시험자료와 R&D 연구용역 자료, 외국의 연구분석 자료 등을 분석·검토하여 성토구간의 "동상방지층 설계기준 개선" 과제를 마무리하였다.

이에 건설교통부에서 관계 전문가 자문을 거쳐 최종 확정되어 현재 각 지방청 및 한국도로공사 등에 시달된 동상방지층 설계기준 개선내용을 소개하고자 한다.

2. 배경 및 목적

최근 한반도 기후변화의 연구 보고서에 의하면, 지구온난화현상에 의해서 온대지역의 중부이남 지역이 아열대로, 중부산간 지역의 아한대 지역은 온대

지역으로 바뀌고 있으며, 멀지 않은 미래에는 산간지역을 제외한 전국이 아열대 지역으로 서서히 바뀌어 간다고 전망하고 있다. 이러한 기후적인 변화는 도로포장을 설계할 때 중요한 환경적인 요소로 작용하지만 아직까지 이를 반영하기에는 많은 변수들이 있다.

한반도의 지형적 조건과 기후적 조건으로 우리나라는 남해안지대 일부와 제주도를 제외한 지역에서는 도로가 겨울에는 동결되고 봄부터 가을까지는 동결되지 않는 계절적 동토지역으로 분류할 수 있다. 이러한 환경적인 지배 요인들로부터 도로의 동상의 피해를 줄이기 위하여 도로포장구조를 설계할 때 노상이 동결하는 것을 방지하기 위하여 동상방지층을 노상의 일부 또는 노상위에 별도로 설치토록 설계되고 있다. 우리나라에서 포장구조 설계는 미국의 '72 AASHTO 설계법과 미공병단의 완전방지법과 노상동결 관입허용설계법 또는 한국건설기술연구원의 동결심도식, 일본의 T_A설계법을 함께 혼용하여 동상방지층(선택재료층)을 노상의 일부로서 또는 노상 위에 사용하고 있는 것이 국내 도로설계 및 시공기준으로 되어 있다.

현재 우리나라 도로포장구조설계에 사용하는 동결지수는 1980년 건설부 도로조사단에서 발표한 기준을 적용하다가, 2003년 한국도로공사와 한국건설기술연구원이 새로 작성한 동결 지수선도를 사용하고 있으나, 지역별로 성토부, 절토부, 도시부, 절성경계부 등에 대한 현장검증을 통한 도로포장 설계의 동상방지층 적용기준이 분명하지 않아 이에 대한 연구가 시급한 것으로 검토되었다.

따라서, 국내 동상방지층 설치 여부에 관한 새로운 기준을 제시하여 동일 현장에서도 성토부, 절토부, 도시부, 절성경계부 등을 구분하여 동상방지층이 불필요한 곳과 필요한 곳에 대한 적합한 기준 정립이 필요하고, 포장설계 지역에 적합한 포장단면 및 경제적 설계로 국가예산의 절감효과가 기대될 것으로 본다.

3. 동상방지층 조사결과

3.1 우리나라 포장설계 실태

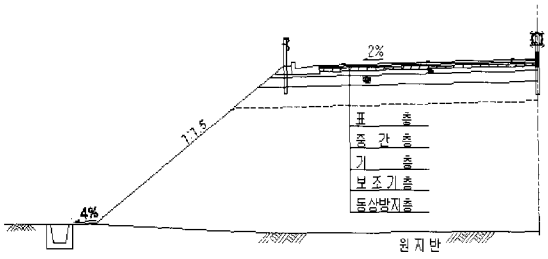
우리나라의 도로포장설계(동상방지층)는 '70년대 미국의 AASHTO 설계법과 일본의 T_A설계법을 혼용하여 적용하고 있고, 대부분 국내 도로설계에 동상방지층(15㎝ 이상)을 설치(쇄석 또는 자갈)하고 있으나 지구 온난화에 따른 기온상승 등으로 도로의 동상방지층을 우리나라 기후조건에 맞도록 조정할 필요성이 대두되었다.

이에, 부산지방국토청에서는 2001년도에 현장 시험시공 결과, 대전이남 지역의 도로 성토부중 5m이상은 동상방지층 설치가 불필요하다는 결론을 도출(2001년)한 바 있고, 또한 한국건설교통기술평가원에서 R&D 핵심과제(2002. 12~2005. 12)로 도로포장의 동상방지층에 대한 연구결과, "노상마무리면 기준 2m이상의 성토부는 동상방지층이 불필요"하다는 결과가 도출되었고, 미국·일본의 경우는 현재 자국 실정에 맞는 도로의 동상방지층 설계기준을 수십년 전에 정립하여 예산절감 및 환경훼손 방지에 기여하고 있다.

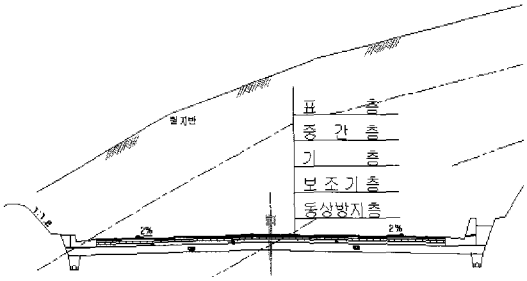
3.2 동상의 발생원인 및 문제점

3.2.1 발생원인

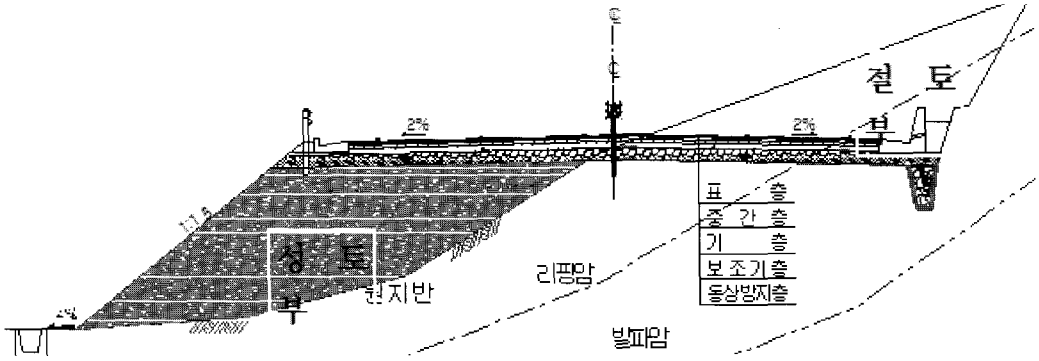
우리나라에서는 교통량 및 기후 등에 따라 포장두께를 80~100㎝로 결정하고 있으며, 성토부, 절토부 및 절성경계부 등의 구분 없이 동상방지층을 최소 15㎝이상 적용하고 있으며, 국내 기후 환경조건에 적합한 동상방지층 설계방법이 개발되어 있지 않아 외국의 시방서를 현장에서 검증없이 사용(미국의 AASHTO 설계법과 일본의 T_A설계법을 혼용)하고 있다.



〈성토부〉



〈절토부〉



〈절 · 성 경계부〉

그림 1. 토공부의 동상방지층 구성

3.2.2 동상발생 조건

지금까지 포장단면 설계시 동결심도보다 포장단면이 부족할 경우, 노상토에서 동상(凍上)이 발생한다고 가정하여 동상방지층을 설치하였다. 그러나 동상은 모관현상에 의하여 수분의 공급이 있어야 가능하나, 고성토 구간에서는 배수가 원활하므로 수분의 공급이 존재하지 않게 된다. 따라서, 성토구간에서 동상방지층의 유효성을 분석하여 동상방지층을 생략할 수 있는 노상토의 토질조건과 성토고를 제시하고자 한다.

그림 2와 같이 동상이 발생하는 요소는 수분의 공급, 영하의 온도, 동상에 민감한 토질의 세가지 요소가 갖추어질 때 동상이 발생되며 이러한 요소 중 한 개라도 만족하지 못하면 동상은 발생되지 않는 것으로 검토되었다.

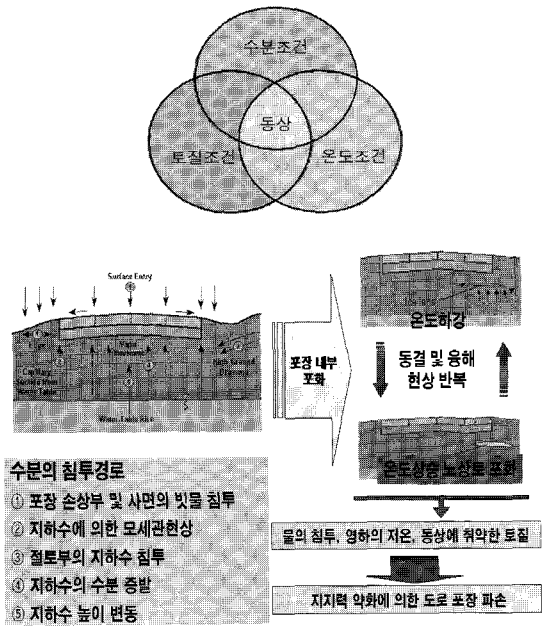


그림 2. 동상발생 조건

3.3 노상토의 동상시험

세립분 함유량에 따른 노상토의 동상특성에 대한 시험결과, 노상토에 포함된 0.08mm(No.200)체 통과량이 25%보다 크게 되면 그림 3과 그림 4와 같이 동상이 크게 발생하게 된다.

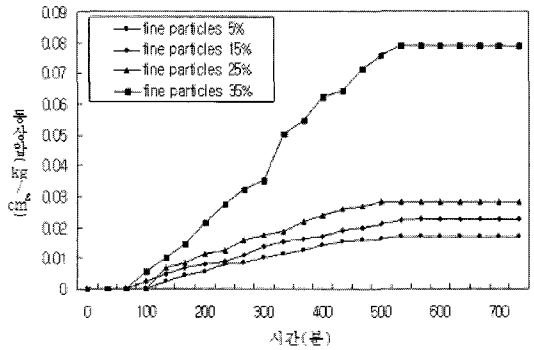


그림 3. 0.08mm체 통과량 비율에 따른 동상압

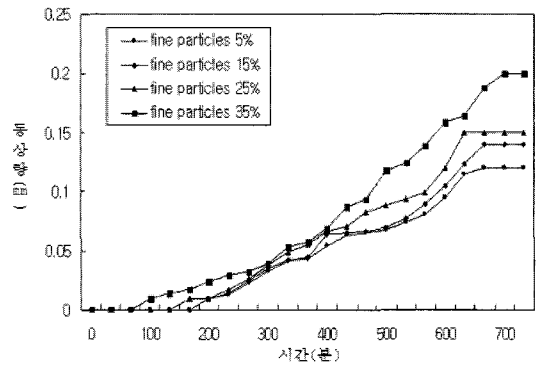


그림 4. 0.08mm체 통과량 비율에 따른 동상량

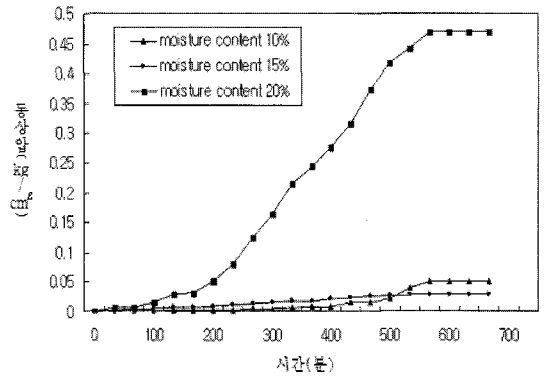


그림 5. 함수비에 따른 동상압

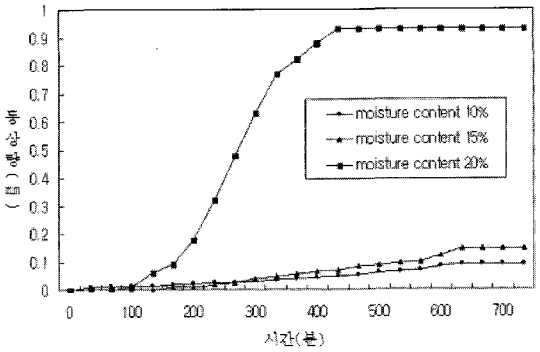


그림 6. 함수비에 따른 동상량

함수량 특성에 따른 노상토의 동상특성에 대한 시험결과, 노상토의 함수량이 15%를 넘을 경우 그림 5와 그림 6과 같이 동상이 크게 발생하게 된다.

미 공병단에 의하면 노상토가 표 1에 해당될 경우 동상에 민감하기 때문에 노상토 재료를 동결심도만큼 비동상성 재료로 치환하거나, 동상방지층을 사용하여야 한다.

표 1. 동상에 민감한 흙의 분류

분 류	흙의 종류	0.02mm 통과량 무게중량비 (%)	USC 분류
PFS **	(a) 자갈 쇄석 파쇄암	1.5~3	GW, GP
	(b) 모래	3~10	SW, SP
F3	(a) 자갈이 포함된 흙	20이상	GM, GC
	(b) 실트질 모래가 포함되지 않은 모래	15이상	SM, SC
	(c) 점토. PI 〉 12	-	CL, CH
F4	(a) 실트	-	ML, MH
	(b) 매우가는 모래	15이상	SM
	(c) 점토 PI 〉 12	-	CL, CL-ML
	(d) 다양한 점토질과 가는 모래가 섞인 점토	-	CL, CL-ML, CL & ML, CL, ML, & SM, CL, CH, & ML, CL,CH,ML& SM

** 동상에 민감할 수 있으므로 실험실 시험을 통하여 동상설계시 흙의 분류를 결정해야 함

3.4 성토구간의 동상특성

포장체에서 물의 침투경로는 다음과 같으며, 이러한 물의 침투조건에 의한 함수비의 변동을 확인하기 위하여 현장에서 계절별 노상의 함수비를 측정하였다.

- 포장표면의 균열 또는 갈라진 틈으로 수분이 포장하부로 침투
- 지하수로부터 물을 공급받아서 노상이 포화
- 성토사면을 통하여 물이 침투

국내의 성토부 현장의 중분대에서 측정한 계절별 함수비 변동은 그림 7과 같이 최적함수비대에서 ±2%이내에 있는 것으로 나타났다.

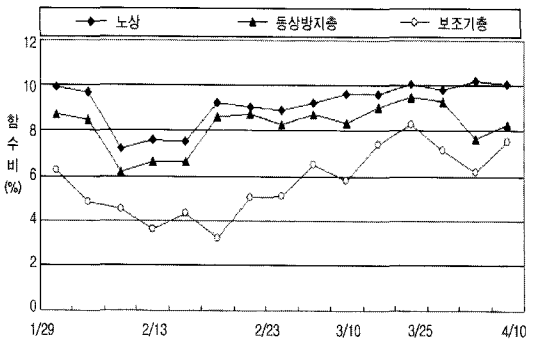


그림 7. 성토부 중분대 현장계측 계절별 함수비 변동

성토구간에서는 함수비의 변동폭이 크지 않으며, 노상토가 양호한 경우 함수비의 변동폭은 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 연중함수비의 변화 관측결과, 최적함수비대에서 ±2%범위로 변동하여 변동폭이 작은 것으로 나타나서 수분의 공급에 의한 동상의 가능성은 존재하지 않는 것으로 나타났다.

노상토가 표 2와 같이 동상성 재료인 경우에는 2m 이상까지 모세관 현상을 발생시켜서 동상에 의한 도로포장의 파손을 발생시킬 수 있다. 그러나 일반적인 토질의 경우 모관상승고가 2m이하로 성토고가 2m이상이면 도로포장의 파손을 발생시킬 우려가 매우 적다.

따라서 그림 8과 같이 노상최종면 기준으로 2m이내에 지하수위대가 위치한 경우에는 동상방지층을 사용한다. 그러나 그림 9와 같이 노상최종면 기준으로 2m이상인 경우에는 동상방지층을 설치할 필요가 없는 것으로 분석 되었다.

표 2. 동상에 민감한 흙의 분류

동상 유형	흙의 종류	소성지수 I_P, W_L	모세관상승 높이(m)	액성지수
동상성 흙	CL	$I_P \geq 7$; $W_L < 35$	>2.0	>0.5
	ML	$I_P \leq 4$; $W_L < 50$		
	OL	$I_P \geq 7$; $W_L = 35 \sim 50$		

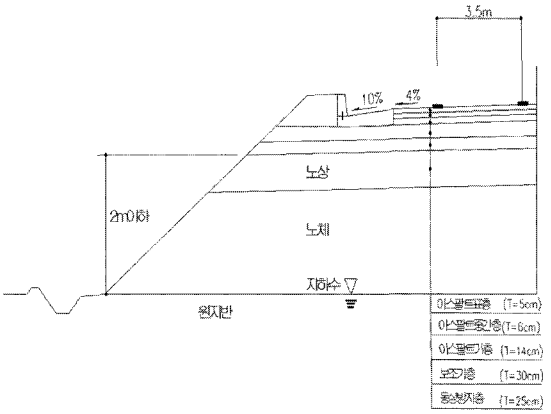


그림 8. 성토부 최종면 2m 이내 지하수위대

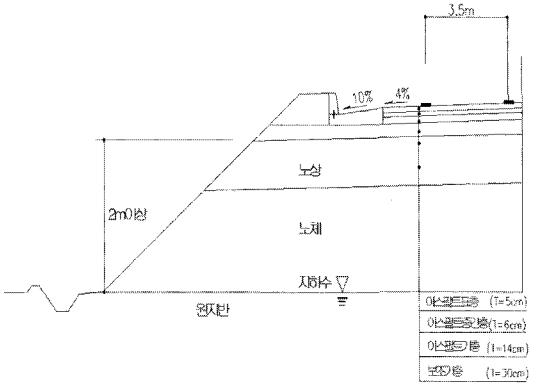


그림 9. 성토부 최종면 2m 이상 지하수위대

3.5 시험도로에서의 검토결과

연구결과에 의하면, 노상토의 함수비가 20%까지 증가하였을 경우 동상압과 동상량이 최적함수비대보다 10배정도 증가하는 경향을 나타냈다. 또한, 0.08mm체 통과량의 경우 20%이상 증가시키면 동상의 민감도가 큰 것으로 나타났다.

시험도로에서는 동상방지층의 유효성을 검토하기 위하여 다음과 같이 동상방지층을 생략하여 시험시공을 실시하였다. 아스팔트포장 3개 단면(A1, A3, A9)과 콘크리트포장 3개 단면(J4, J5, J6)에 대하여 동결심도의 측정을 위하여 노상하부까지 함수량계와 온도계를 매설하였다.

공용 3년이 지난 시점에서 깊이별 함수비를 측정하였다. 시험도로의 각 단면은 다음과 같으며, 표 3의 A10과 표 4의 J1은 비교단면으로 동상방지층을 설치한 단면이다.

표 3. 아스팔트포장의 단면번호

층 구 분	A1	A3	A9	A10
표 층	5	5	5	5
중간층	7	7	7	7
기 층	8	8	28	8
보조기층	30	40	40	30
동상방지층	-	-	-	40

표 4. 콘크리트포장의 단면번호

층 구 분	J1	J4	J5	J6
표 층	30	30	30	30
린콘크리트 기층	15	12	15	18
동상방지층	45	-	-	-

그림 10은 깊이 65cm 지점에서 연중 함수량변화를 살펴본 것이며, 그림 11은 깊이 95cm와 깊이 105cm지점에서 연중 함수량변화를 살펴본 것이다. 그림 10과 그림 11에서 강우량이 가장 크고 하절기인 시간대와 강우량이 가장 적고 동절기인 시간대

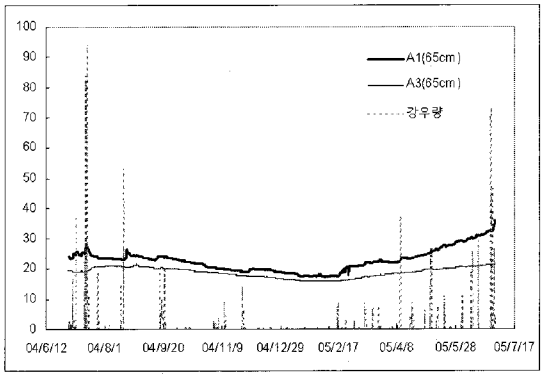


그림 10. 연중 함수량변화(A1, A3단면)

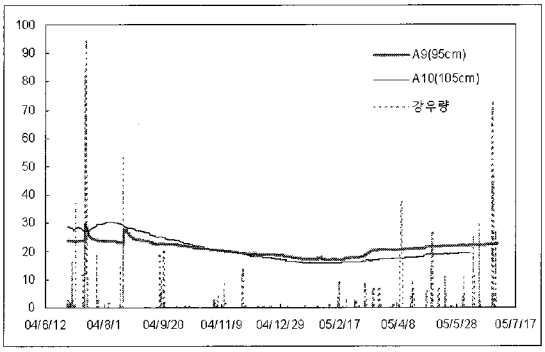


그림 11. 연중 함수량변화(A9, A10단면)

에 대하여 노상 하부층인 2m 깊이까지 깊이별 함수비를 측정하였다.

함수비를 측정한 결과가 그림 12에 나타나 있으며, 성토 노상의 깊이별 함수비가 2m까지는 함수비는 15%이내에 존재하므로써 동상에 영향을 미치지 않는 함수비 범위내에 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서, 성토고가 2m이상인 고성토 구간에서는 지하수에 의한 모관상승의 영향을 받지 않으며, 강우시 침투수가 신속하게 배수되는 관계로 동상의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3.6 도출된 결과

이상의 동상방지층의 설치기준에 대한 검토결과, 성토고가 2m이상인 성토 구간에서는 토질조건이 표

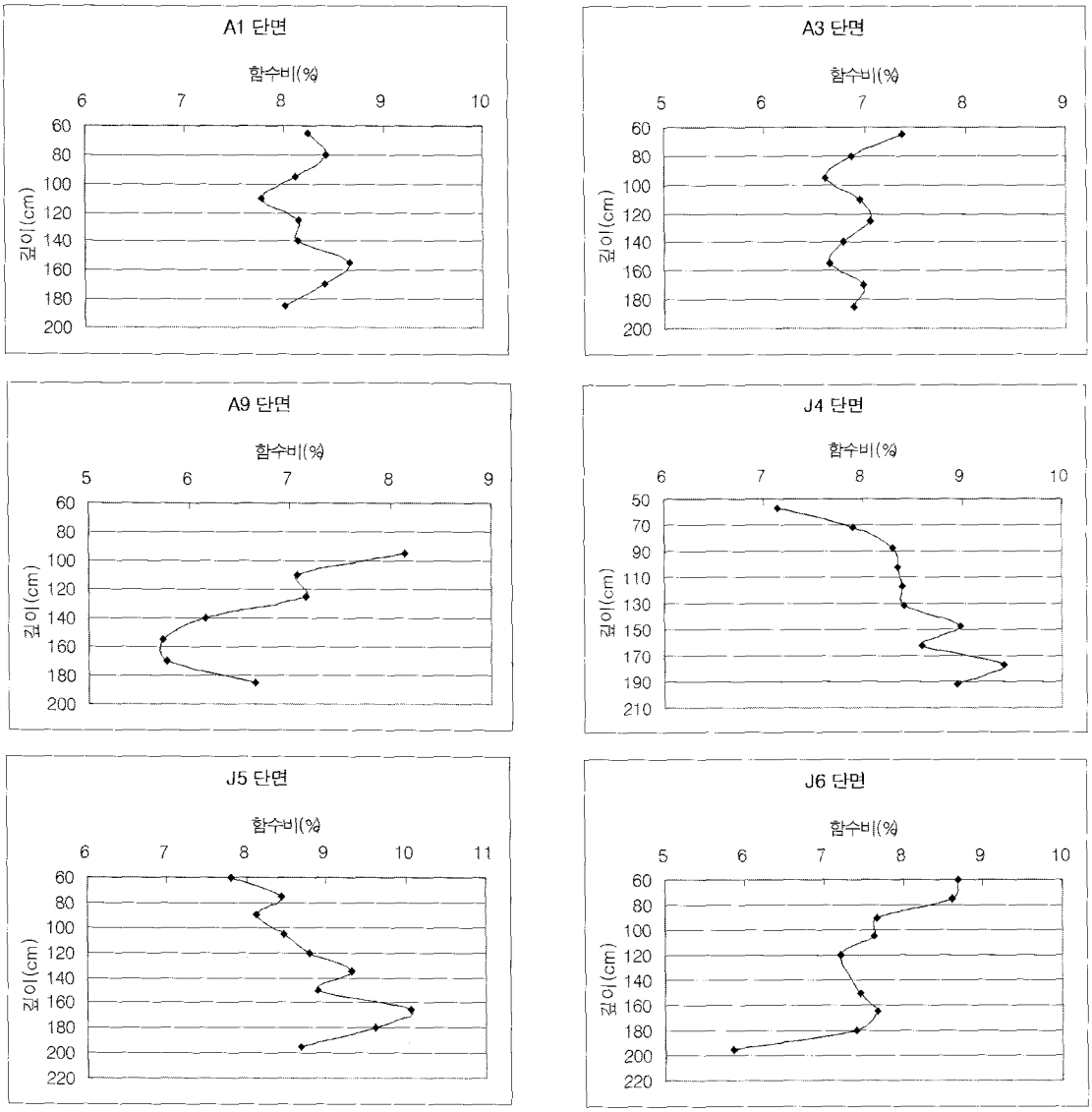


그림 12. 함수비 계측결과(동절기)

5와 같이 양호할 경우 원활한 배수로 인하여 수분의 공급이 불가능하기 때문에 동상발생이 일어나지 않으므로, 동상방지층의 설치를 생략할 수 있었다.

표 5. 노상의 비동상성 토질 기준

구 분	기 준
0.08mm(No.200)체 통과량(%)	25이하
소성지수(%)	10이하

편절편성 구간은 절토부에 대한 검토가 남았으므로 기존의 설계방법대로 동상방지층을 설치하여야 한다. 통로박스와 수로박스 등 구조물이 설치된 구간에서 토피고는 성토고와 의미가 다르며, 박스 구조물 내부의 한기로 인하여 구조물 상단에서 동상이 발생할 수 있는 점을 감안하여 별도의 추가 연구가 필요한 것으로 분석되었다.

4. 기대효과

이상에서 검토한 바와 같이 현재 시공중인 사업의 경우 공사중 노상마무리면 2m이상 성토부에 대한 동상방지층을 삭제할 경우 약 1,471억원 우선절감이 가능할 뿐 아니라, 향후 2020년까지 건설되는 전국도로의 2m 이상 성토부에 대한 동상방지층을 흙으로 대체할 경우 약 2조 9천억원의 예산절감을 가져올 수 있는 쾌거를 이룰 수 있다.

또한 동상방지층의 재료인 자갈 또는 쇄골 생산을 위한 석산 미개발로 인한 환경훼손 방지는 물론 생태복구비용(1조 6천억원/㎢)을 절감할 수 있다.

5. 마무리 글

본 연구는 수십년동안 설계기준의 변경 없이 적용되어 오던 것을 소수 전문가 그룹에서 변화를 시도하는 데에는 다소 부정적인 반응도 있었으나 혁신적인 방안으로 결론을 얻을 수 있게 된 것은 기술자들의 성과라고 생각된다. 앞으로 추가검증을 통하여 배수시스템에 대한 개선방안이 제시되어 우리나라 기후조건과 비슷한 일본이나 미국과 같이 동상방지층을 흙으로 설계할 경우에는 2020년까지 약 3조 3천억원이란 막대한 예산을 추가 절감할 수 있을 것으로 추정되고, 또한 골재생산 감축에 따른 환경훼손 저감에도 크게 기여할 것으로 분석된다. 그 동안 학습동아리에 적극적으로 참여하여 격렬한 토론과 자문, 자료수집 등에 도움을 주신 민간 용역업계, 학계, 연구원, 감사자문위원회 위원님들과 관련 자료 제출에 협조하여 주신 지방청 및 관련부서 관계공무원들의 노고를 이 자리를 빌어 감사의 말씀을 드리고 싶다.

앞으로도 우리 건설교통부에서는 건설현장에서 발생되고 있는 불합리한 제도나 문제점을 꾸준히 분석·발굴하여 국민들의 삶의 질을 향상시킬 수 있도록 적극 노력할 것이다.

마지막으로 우리 기술자들은 작은 물방울이 모이고 모여 물줄기를 만들고 큰 강을 이루듯, 기술자로서의 "올바른 의식을 가진 한걸음 한걸음의 발걸음이 쌓이고 쌓여 의미있는 기술축적을 이룬다"는 사실을 깊이 인식하고 기술자로서의 장인정신(engineering mind)으로 기술분야 발전에 노력해야 할 것이다. 특히, 엔지니어링 분야에 종사하는 기술자들은 detail engineer로서 자기 특성을 축적시키는데 노력을 게을리 하지 말아야 하며, 판에 박힌 구태의연한 기술에 안주해 버리는 어리석음을 범하지 않는 투철한 직업의식을 지속적으로 추구해야 할 것이다. 또한 이러한 과정속에서 기술자로서의 자부심과 전문성을 높이는 보람을 찾아야 한다고 생각한다.

참고문헌

1. Departments of the Army and the Air Force(1985), "Pavement Design for Seasonal Frost Conditions", Army TM 5-818-2, Air Force AFM 88-6.
2. 남영국, 조규태, 진정훈(2002), "도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구", 대한토목학회 논문집 제22권 제5호.