



도로 포장 구조체의 함수비와 온도 계측시스템 구축방안 연구

A Study on Development of Moisture and Temperature Monitoring System for Road Pavement System

김홍만*	조규태**	조명환***	이재식****
Kim, Hong-man	Cho, Gyu Tae	Cho, Myung-hwan	Lee, Jae Sik

1. 서 론

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 남북의 기온차가 매우 크며, 봄철에는 시베리아기단의 영향이 약해져 기온이 상승하게 된다. 이러한 지역적 기후 조건은 포장체의 동결융해를 발생시키며, 동결융해로 인한 피해를 줄이기 위하여 도로포장을 설계할 때 노상이 동결하는 것을 방지하기 위한 동상방지층을 노상의 일부 또는 노상위에 별도로 설치하도록 하고 있다. 건설교통부의 ‘국도건설공사 설계실무 요령’ 에 따르면 동상방지층의 설계는 ‘72 AASHTO 잠정설계법을 권고하고 있으며, 국내 적용을 위하여 1.5, 2.0, 2.5의 지역계수를 연성 포장 설계에 적용하도록 하고 있다. 또한 동결작용에 대한 포장 두께 산정시 노상동결 관입허용법에 의하여 동결심도를 산정하며, 이때 동결심도는 수정 Berggren식을 적용하고 있다. 그러나 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용하게 되면, 지역계수와 동결심도를 동시에 사용하여 포장의 과다설계 가능성이 최근 제기되고 있으며, 국내 고성토 부에 대한 현장 계측결과 동상방지층의 효용성에 대한 연구결과 동상방지층의 설계 기준 개선 방안이 수립되었다. 따라서 본 연구에서는 고성토부를 제외한 구간에 대하여 도로 동상방지층의 효용성을 검증하기 위하여 도로 현장에 온도와 함수비 등을 측정할 수 있는 계측기를 설치하고 장기적인 계측 및 모니터링을 통하여 자료를 축적할 수 있도록 포장의 자동계측시스템 구축 방안 연구를 수행하고자 한다.

2. 문헌연구

2.1 동상방지층의 설계 방법

연성포장에서 동결작용은 흙 중에 포화되어 있는 수분의 성질이 변화하여 일어나는 현상으로 비교적 입자가 작은 실트질 흙에서 일어나기 쉽다. 동결지역에서 포장을 설계할 때에는 동결작용에 의한 과도한 노면의 변위발생을 방지하고 동결해빙기간중 적절한 지지력이 확보되어야 하며, 건설교통부의 ‘국도건설공사 설계실무 요령’ 에서는 1.5, 2.0, 2.5의 지역계수와 노상동결 관입허용법을 사용하여 동결작용에 대하여 설계하도록 하고 있다(건설교통부, 2005). 노상동결 관입허용법을 사용할 경우 동결심도를 산정해야하며, 동결심도를 산정할 수 있는 방법으로 지금까지 사용되고

* 정회원 · (주)도화종합기술공사 기술개발연구원 연구원장 · 공학박사(E-mail : hmkim42@hanmail.net)
 ** 정회원 · 인천대학교 공학기술연구소 연구교수 · 공학박사(E-mail : ichogi@yahoo.co.kr)
 *** 정회원 · (주)도화종합기술공사 기술개발연구원 선임연구원 · 공학박사 · 02-2050-6226(E-mail : dragonjo@dohwa.co.kr)
 **** 정회원 · 인천대학교 ITS연구센터 선임연구원 · 공학석사(E-mail : romeoz26@nate.com)



있는 방법은 열전도론에 의거한 방법과 경험식에 의한 방법이 있다. 이중 열전도론에 의거한 이론적인 접근 방법은 Stefan식과 Berrgren식이 대표적이며, Stefan식은 동결심도를 산정하는데 있어서, 지표면에서 동결선까지의 온도변화가 선형이고 동결선 아래의 온도는 일정하다는 가정을 두어 동결심도를 동결지수 F(℃·일), 열전도율 K_f (Btu/hr/ft /°F) 및 융해잠열 L (Btu/ft³)의 함수로 식 (1)과 같이 표시하였다(홍원표와 김명환, 1988).

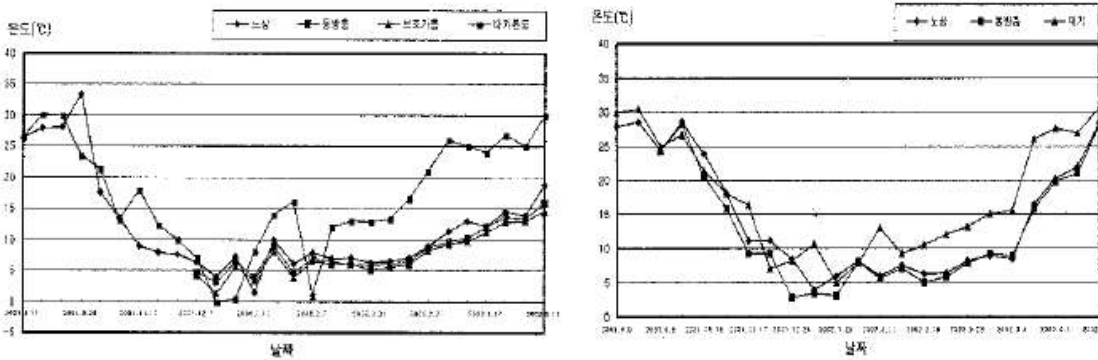
$$Z = \sqrt{\frac{48 \cdot K_f \cdot F}{L}} \tag{1}$$

식 (1)에서 열전도율은 함수비와 건조밀도로부터 구하도록 제시하였다. 그러나 Stefan식은 동결토 및 비동결토의 체적당 열량이 무시되어 있기 때문에 실제의 동결심도보다 과다 산정되는 경향이 있다. 여기에 Berrgren은 지층의 온도변화에 미분방정식을 이용함으로써 보다 나은 동결심도 산정식을 식 (2)와 같이 얻을 수 있었으며, Berrgren식에서 K_e 는 평균열전도계수이며, λ 의 함수비와 건조밀도로부터 구하도록 하고 있다(홍원표 등, 1988). 그리고 ‘국도건설공사 설계실무 요령’에서도 Berrgren식을 사용하도록 하고 있다(건설교통부, 2005).

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{48 \cdot K_e \cdot F}{L}} \tag{2}$$

2.2 동상방지층에 대한 문헌 연구

연성포장의 동상방지층을 설치하기 위해서는 동결심도가 필요하며, 국내의 경우 기상 자료를 활용하여 1967년도에 국립건설시험소에서 설계동결지수를 발표하였으며, 1974년과 1980년도에는 도로조사단이 도로 포장설계를 위한 전국 동결지수 선도와 설계동결지수선도를 작성하여 실용화 단계에 도달하였다. 그리고 한국동력자원연구소에서는 전국설계동결지수분포도를 작성하여 이론적인 동결심도를 구할 수 있도록 제시한 바 있으며, 1989년도에 국립건설시험소는 동결심도 추정식을 제안하였다. 그러나 동결심도에 관련된 연구는 대부분 노상토를 중심으로 진행되었기 때문에 도로포장에 대한 열적특성이 고려된 동결심도를 산정해온 경우는 극히 미미하였다. 따라서 한국건설기술연구원은 도로포장에서의 동결심도를 1992년부터 실측하여 동결지수와 동결심도와의 상관관계를 분석하고 있으며, 동결심도 측정기를 지속적으로 매설하고 있다(김상호 등, 1999).



<a> 국도 5호선 국도 20호선
(그림 1) 현장 노상토의 온도계측 결과(조규태 등, 2002)

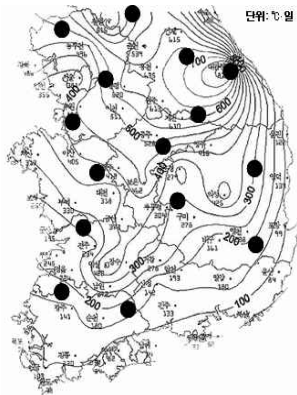
그러나 조규태 등(2002)은 남부지방에 위치한 국도 5호선과 국도 20호선 현장의 성토구간에 대하여 현장의 함수비와 온도를 장기간 계측한 결과 <그림 1>과 같이 현장의 노상토는 영하온도에 노출되지 않고, 지하수위의 영향도 없었으며,



최적함수비로 다져진 도로성토부의 노상토는 동상이 방지하지 않는다는 결론을 얻었다. 또한 건설기술평가원(2006)의 ‘현장시험을 통한 동상방지층 설치 기준 연구’ 결과 보고서에서는 노상 최종면 기준으로 성토부 2m 이상 동상방지층이 불필요하다는 결론을 도출하였으며, 건설기술평가원의 연구결과를 바탕으로 건설교통부에서는 2006년도에 ‘도로 동상방지층 설계 기준 개선을 통한 예산 절감 및 환경훼손 저감 방안’을 마련하여 전국적으로 시행하고 있다(한국건설교통기술평가원, 2008).

3. 현장계측 대상 현장

건설교통부에서 2005년도에 발간한 “국도건설공사 설계실무 요령”에 따르면 포장도로의 동결지수는 <그림 2>와 같이 1970년-2001년 자료로부터 만들어진 전국동결지수선도를 이용하여 가장 가까운 좌표의 동결지수를 구하고, 동결기간은 가까운 측후소 3개의 평균값 또는 가장 가까운 측후소의 동결기간을 도표에서 찾고, 수정동결지수를 구하도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 전국동결지수선도를 기준으로 <표 1>과 같이 동결지수를 5개 영역으로 구분하고 구분된 동결지수마다 <그림 2>와 같이 3개 지역을 선택하여 현장계측시스템을 구축하고자 한다. 이때, 1개 지역은 다시 절토부, 저성토부 그리고 절성 경계부로 구분하며, 실제 현장계측시스템 구축개소수는 <표 1>과 같이 45개소가 된다.



<그림 2>. 현장 계측 대상 현장

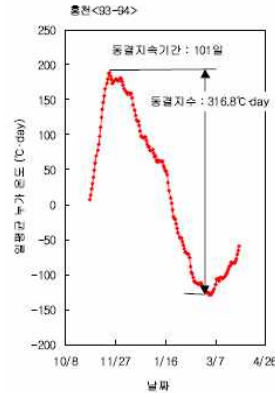
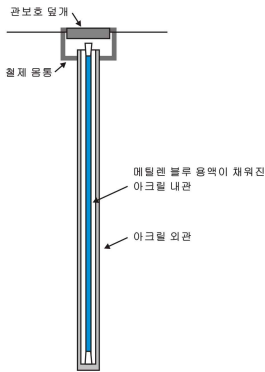
<표 1> 현장 계측 대상 현장

동결지수 따른 구분	설치 현장	비고
650°C·일 이상	3개 현장	- 1개 현장을 절토부, 저성토부, 절성경계 부로 구분
500°C·일 - 650°C·일	3개 현장	
350°C·일 - 500°C·일	3개 현장	
200°C·일 - 350°C·일	3개 현장	
200°C·일 이하	3개 현장	
합 계	15개 현장	45 개소

4. 현장 계측 시스템 구축 방안

4.1 메틸렌 블루 동결심도계를 이용한 계측 시스템

메틸렌 블루 동결심도계는 1963년 스웨덴의 Gandahl이 개발한 동결심도계이며, 한국건설기술연구원에서는 동결심도계를 자체 제작하여 전국 국도상에 매설하여 동결심도를 1991년 이후 측정하고 있다. KICT 메틸렌 블루 동결심도계는 <그림 3>과 같이 직경 24mm의 플라스틱 외관 안에 직경 16mm와 직경 10mm의 이중관으로 된 특수 아크릴 파이프가 들어가 있다. 이 케이싱과 튜브는 예상되는 동결기피를 초과하는 깊이(150cm로 제작)까지 연속하게 관입한 보오링공속에 삽입되며, 안쪽에 있는 아크릴 관에는 청색의 메틸렌 블루 용액을 채우게 된다. 이 용액은 상온에서는 청색을 유지하지만 기온이 0°C 이하가 되면 색이 무색으로 변한다. 따라서 동결깊이는 케이싱에서 내부의 아크릴 관을 외부로 꺼내어 용액이 얼어서 무색으로 변한 곳과 얼지 않은 곳의 청색의 경계선까지 측정하여 동결심도를 측정하게 된다(김영진과 홍승서, 2004).



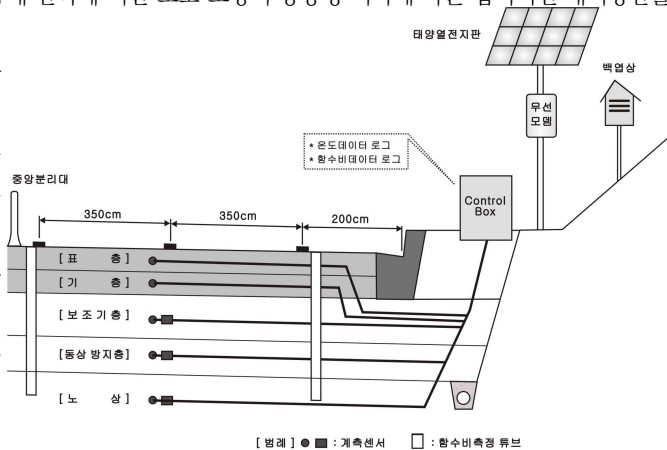
〈a〉 KICT 메틸렌 블루 동결 심도계

〈b〉 동결지수 산정 예(강원도 홍천)

〈그림 3〉 KICT 메틸렌 블루 동결심도계 및 계측 산정 예(김영진과 홍승서, 2004)

4.2 자동화 계측시스템 구축 방안

메틸렌 블루 동결심도계를 이용한 측정시 낮은 온도의 포장체 관입은 표면에서 수직방향으로 내려가야 하지만 그림 3과 같이 차단되어 있고, 수평적 온도 전달이 된다. 또한 매일, 매시간 관측할 수 없으며 포장온도를 위치별로 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 자동계측시스템을 통하여 포장구조체의 온도는 물론 함수비까지도 원격자동계측을 수행가능하고, 국내기후 환경을 고려한 도로의 동결융해 특성 평가와 합리적인 동결깊이의 결정, 동상에 민감한 노상토의 처리 등 동상방지층에 관한 종합적인 설계 기준을 제시할 수 있는 데이터를 수집하고자 한다. 이때, 연구 대상 범위를 저성토부(2m이하 성토부), 절토부, 절성경계부로 구분하고, 동결융해 반복에 의한 도로 노상의 공용성 저하에 따른 합리적인 대처방안을 연구하기 위하여 포장재료별 동결깊이 예측모델 개발 및 동상저감기법개발에 대한 연구결과를 도출할 수 있는 자동계측시스템을 구축하여 시간-일-계절별 함수비 변동, 현장 대기온도 및 도로 포장의 온도를 원격지에서 계측하여 자료추적 및 분석을 실시할 수 있도록 안정적이고 효율적인 계측시스템을 〈그림 4〉와 같이 구축하고자 한다. 〈그림 4〉를 살펴보면 계측 시스템은 Data Logger 및 Power Supply 설치를 위한 Control Box, 대기 온도와 포장체의 온도측정용 계측기, 보조기층과 동상방지층 및 노상의 함수비 측정용 계측기 그리고 수동계측을 위한 함수비 측정 튜브로 구성되어 있는 것을 알 수 있다.



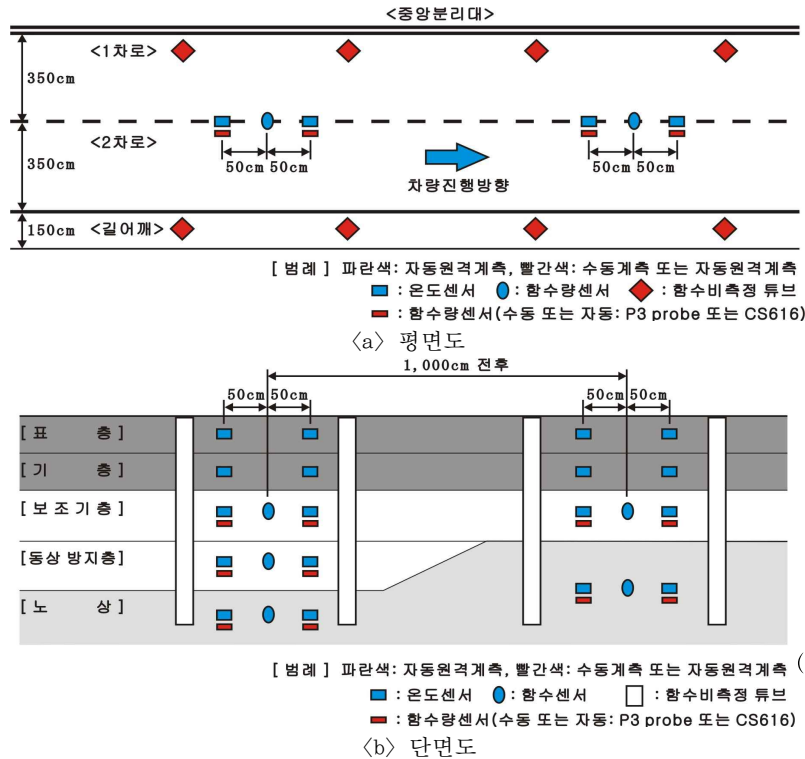
〈그림 4〉 자동화 계측 시스템 구축 방안

4.3 계측시스템 운용 방안

절토부, 저성토부 그리고 절성 경계부의 동상방지층 효용성을 검토하기 위한 현장 계측시스템은 〈그림 5〉와 같이 동상방지층이 설치된 구간과 설치되지 않은 구간에 대하여 함수비계와 온도계를 설치하고자 하며, 매설 계획인 계측기는 〈표 2〉와 같다. 〈그림 5〉-(a)를 살펴보면 계측시스템은 구축 대상 도로의 한 쪽 방향에 대하여 설치할 계획이며,



한 쪽 방향 차도의 중앙 부분에 자동 원격계측 장비와 수동 계측 장비를 설치하고, 중앙분리대와 길어깨 부분에 함수비 측정 튜브를 설치하여 수동 계측이 가능하도록 계획되어 있는 것을 알 수 있다. 특히 <그림 5>-(b)를 살펴보면 중앙부분에 설치된 계측기는 온도센서와 함수비계를 쌍으로 설치하여 함수비측정 센서와 함께 자동계측 결과의 검토와 계측장비에 문제가 발생할 경우 여유 장비로 활용 할 수 있도록 계획되어 있는 것을 알 수 있다.



<그림 5> 현장 계측 시스템 구축 방안

<표 2> 매설 계획 계측기

구 분	계측기기 모델명	계측 목적
함수비계	CS616	TDR방식, 함수비 측정 (수동 및 자동측정용)
	TRIME-T3 PROBE	TDR방식, 함수비 측정 (수동측정용)
온도센서	Thermocouple	포장층 온도 변화 측정

5. 기대효과

본 연구에서 제안하는 자동계측시스템을 이용한 현장 계측 방법은 기존 수동계측과 같이 시간 변화에 따른 함수비계와 온도계를 통한 연속적인 데이터를 확보할 수 없기 때문에 데이터 분석 등과 같은 연구를 수행하는데 있어서 애로사항이 많았으나 자동계측을 실시하게 되면 수동 계측시 발생한 문제점을 모두 해결될 수 있어 각 현장별 토양특성에 다른 동결시기 등을 알 수가 있다. 그리고 신뢰할 수 있는 데이터를 원격지에서 측정주기를 자유자재로 변경하면서 연구결과에 절대적으로 중요한 기초자료의 확보를 할 수 있는 현장계측시스템을 구축하여 연구 성과의 질적인 향상을 크게 기대할



수 있다. 향후 이러한 현장계측시스템 구축을 통해 도로포장기술의 선진화와 평가기술의 과학화를 이룩할 수 있는 기회가 될 수 있다. 또한 장기 계측데이터에 대한 평가기법을 토대로 동상방지층의 효율적인 설계에 대한 기준마련을 위한 기초 데이터를 제공하게 되어 도로포장 시공의 효율화와 유지관리비용의 최소화를 도모할 수 있으며, 도로 포장 구조체의 효율적인 설계, 시공 및 유지관리를 위한 기초자료로서 유사 도로포장관련 연구개발등에 있어 자동계측 및 원격관리가 가능한 현장계측시스템의 파급으로 이 분야의 기술수준을 한 단계 상승시킬 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

동결작용으로 인한 연성 포장의 파손을 방지하기 위하여 동상방지층을 사용하고 있지만, 지역계수와 동결심도를 모두 고려하여 과다설계 우려가 있으며, 성토구간에 대한 동상방지층의 효율성 검토결과를 바탕으로 도로 동상방지층의 설계기준 개선된 것을 문헌연구 결과 확인하였다. 따라서 고성토구간 외에 절토부, 저성토부 그리고 절성 경계부의 동상방지층 효율성을 검토하기 위한 포장구조체의 현장계측 시스템 구축방안을 수립하여 충분한 현장데이터를 활용함으로써 다음과 같은 기대효과가 있을 것으로 사료된다.

1. 수동계측시 발생한 문제점을 모두 해결될 수 있어 각 현장 및 층별 토양특성에 따른 동결영향 등을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.
2. 장기 계측데이터에 의한 도로포장 및 노상토의 재료별 열전도 특성과 동결응해에 따른 포장 하부지지력 뿐만 아니라 동상방지층의 효율적인 설계 기준마련을 위한 기초 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.
3. 동상방지층의 효율적인 설계 기준마련에 따라 경제적인 도로건설과 지향하는 목표가 달성될 수 있을것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설교통R&D 정책 인프라사업의 일환인 “남부지역 도로의 포장구조체 현장계측 시스템 구축 및 계측결과 분석(08-기술혁신-C01)” 연구결과의 일부입니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부(2005), “국도건설공사 설계실무요령”, 건설교통부.

김상호, 김수삼(1999), “도로포장에서의 동결심도 실측치와 포장재료의 열적정수를 고려한 심도비교-포장구성재료의 열적정수를 중심으로”, 대한토목학회논문집, Vol. 19, No. Ⅲ-1, 대한토목학회.

김영진, 홍승서(2004), “Methylene Blue 동결심도계에 의한 전국 동결심도 조사”, 대한토목학회학술발표회, 대한토목학회.

도로교통기술연구원(2002), “시험도로의 건설과 운영에 관한 연구”, 2002년도 연구보고서, 한국도로공사 도로교통기술연구원

한국건설교통기술평가원, “현장시험을 통한 동상방지층 설치 기준 연구”, 최종보고서, 건설교통부 한국건설교통기술평가원.

홍원표, 김명환(1988), “우리나라의 동결심도에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, Vol.8 No.2, 대한토목학회.

조규태, 진정훈, 남영국(2002), “도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구”, 대한토목학회논문집, Vol.22, No.5-D, 대한토목학회.

한국건설교통기술평가원(2008), “도로 동상방지층의 효율성 검증(성토부 2m 이상 제외) 기획연구” 최종보고서, 국토해양부 한국건설교통기술평가원