

북부지역 도로의 포장 구조체 현장 계측시스템 구축 및 현장 DATA 분석

A Study on Development of The Field Monitoring System and Analysis of Field Data for Road Pavement System of Northern Region

조규태* · 신은철** · 이재식*** · 김동균****

Cho, Gyu Tae · Sin, Eun Cheol · Lee, Jae Sik · Kim, Dong Gyun

1. 서론

국내 도로포장두께 설계는 미국에서 개발된 AASHTO 설계법, 일본에서 사용하고 있는 T_A 설계법 등을 주로 사용하고 있다. 그러나 이들 설계법은 각국의 기준에 맞추어 개발되었기 때문에 우리나라 실정에 잘 맞지 않아 설계수명이 실제 도로수명과 차이를 보이고 있다. 특히, 동결깊이의 결정에 있어 기온자료를 분석하여 만든 동결지수를 근간으로 하여 동결지수와 동결깊이의 상관관계식으로부터 동결깊이를 산정하고 있다.

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승 한다. 동토지역의 지역적 기후 조건 특성으로 국내 도로분야에서는 동결융해(freezing and thawing)로 인한 피해를 줄이기 위하여 도로포장구조를 설계할 때 노상이 동결하는 것을 방지하기 위하여 동상방지층(anti-freezing layer)을 노상위에 별도로 설치하도록 하고 있다.

도로는 다양한 재료와 단면으로 구성된 구조물이기 때문에 계절 및 재료 물성 특성뿐만 아니라 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력 정도를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재, 기존 동상방지층 설계법에 따르면, 동상방지층은 포장체의 구조적 적정성과는 무관하게 온도조건에 따른 동결깊이에 따라 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용하다 보니 포장설계의 부실 내지는 과다설계의 우려가 있다.

이에 본 연구에서는 현장 계측기(온도, 함수비 등)를 설치하여 데이터를 수집하고 분석하여 동상방지층의 효용성을 검증하고, 수집된 자료들을 데이터베이스로 구축함으로써 도로 노상토의 동결융해 특성 평가와 합리적인 설계 동결깊이의 결정, 지하수위의 영향, 동상에 민감한 노상토의 처리 등 동상방지층에 관한 종합적인 기준 안을 제시하고자 한다.

2. 북부지역 도로의 포장 구조체 현장 계측시스템 개요

본 연구에서 현장 계측시스템은 도로 포장 구조체의 현장 환경 변수(함수비 및 온도)를 계측하는 시스템을 말하며, 현장 계측시스템의 운용 목적은 포장체의 함수비 및 온도를 자동적·연속적·객관적으로 계측하는데 있다. 이러한 현장 계측을 통하여 포장체의 동결여부 및 대기의 환경적 영향을 연구할 수 있는 자료를 구축하고자 함수비는 포장체 하부(보조기층 이하 노상토까지)에 대하여 계측하고 있으며, 온도는 대기와 포장체(아스팔트 콘크리트 층 및 포장하부구조) 전체에 대하여 계측하고 있다.

본 연구의 현장 계측시스템은 그림 2 (b)와 같이 동결지수 $650^{\circ}\text{C} \cdot \text{일}$ 이하의 북부지역에 대하여 구축되어 있으며, 표 1과 같이 계측 센서, 수집 장치, 무선 통신 장치, 전원 장치 그리고 저장 장치로 구성되어 있다.

* 정희원 · 인천대학교 공학기술연구소 연구교수 · 공학박사(E-mail : ichogt@yahoo.co.kr)

** 정희원 · 인천대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사(E-mail : ecshin@incheon.ac.kr)

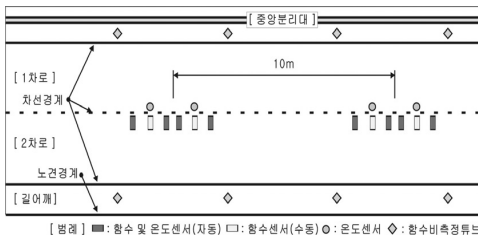
*** 정희원 · 인천대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사(E-mail : romeoz26@nate.com)

**** 비희원 · 인천대학교 공학기술연구소 연구원 · 석사과정(E-mail : eladamri@hanmail.net) - 발표자

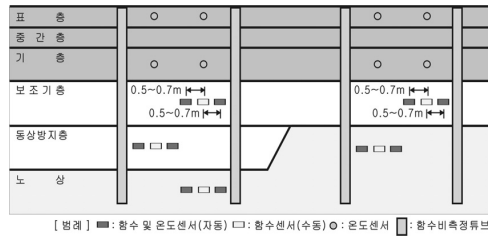
계측 센서는 현장의 함수비와 온도를 측정할 수 있도록 함수센서(CS616)와 온도센서(thermocouple)로 구성되어 있으며, 수집 장치는 채널확장기(multi-flexer)와 계측 데이터 수집 장치(data logger)로 구성되어 있다. 무선 통신 장치는 계측된 데이터의 전송을 담당하며, 계측 데이터는 컴퓨터에 저장된다. 그리고 현장의 계측시스템은 태양열 전지판과 축전지를 이용하여 독립 전원 시스템 형태로 운영하여 과학적이며 체계적인 현장 계측시스템을 구축하였다. 그림 1은 현장 계측센서 매설 위치의 평면도, 종단면도를 나타낸 것이고, 그림 2(a)와 같이 아스팔트 콘크리트 층인 표층과 기층에는 온도센서를 매설하고, 포장 하부층인 보조기층, 동상방지층 및 노상은 온도 센서와 함수 센서를 계측 센서간 상호 간섭을 피하기 위하여 그림 1(b)의 종단면도와 같이 지그재그로 배치하였다. 그림 2(b)는 현장 계측시스템을 구축한 대상 지역을 나타낸 것이다.

표 1. 현장 계측시스템의 구성

구 분	구 성
계측 장치	현장 온도 계측기(thermocouple), 현장 함수비 계측기(CS616)
수집 장치	채널확장기(muliflexer), 계측 자료 수집 장치(data logger)
통신 장치	무선통신 장치(계측결과를 계측서버로 전송 및 수신)
저장 장치	DB 컴퓨터(계측결과를 취합 및 결과 수집 장치 제어)

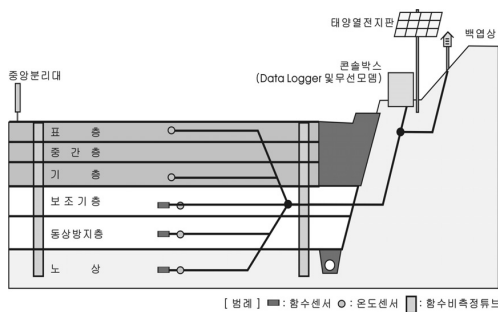


(a) 평면도

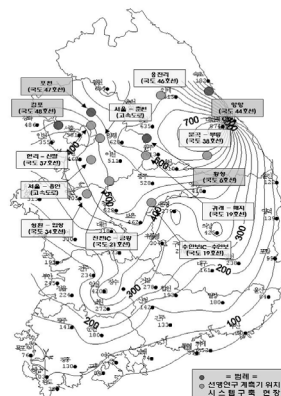


(b) 종단면도

그림 1. 현장 계측 센서의 구성



(a) 현장 계측시스템 구축 종단면도



(b) 북부지역 현장 계측 대상 지역(현장)

그림 2. 현장 계측시스템 구축 및 현장 계측 대상지역

2.1 도로의 포장 구조체 현장 계측시스템 계측 센서

현장 계측시스템에 적용된 계측센서는 포장 하부의 함수비와 온도를 측정하게 된다. 일반적으로 함수비를 측정하는 방식에는 유전율, 전기전도도(비저항의 역수) 및 탄성파속도 등을 이용하는 비파괴 방식이 있으며, 본 연구에서 적용된 CS616과 T3 Probe는 유전율의 비저항을 이용하는 TDR 방식의 계측센서이다. TDR 방식은 다른 방식에 비하여 정밀도면에서 훨씬 우수하며, 장기간 동안 수동 계측과 자동 계측이 가능하다. 국내의 경우 한국도로공사에서 운영하고 있는 시험도로와 한국건설기술연구원에서 운영하고 있는 LTPP 구간에 적용한 사례가 있으며, 하천분야에서도 토양수분 측정망을 구성하는데 적용한 사례가 있다.

현장 계측시스템에 적용된 온도센서는 포장체의 내부 온도를 측정하며, 앞에서 살펴본 그림 2와 같이 포장층인 표층과 기층, 포장 하부층인 보조기층, 동상방지층 그리고 노상에 설치하였다. 본 연구에서 적용된 온도센서는 써모커플(thermocouple) K-type이며, 이 센서의 경우 온도 측정범위가 -100℃에서 400℃로 측정 범위가 넓고 온도 계측을 위하여 많이 적용되고 있는 모델이다.

2.2 도로의 포장 구조체 현장 계측시스템 수집 장치 및 저장장치

수집 장치는 채널 확장기와 데이터 로거로 구성된다. 함수센서와 온도센서는 포장체의 온도와 함수비를 측정하게 되는데, 이때 함수비와 온도는 아날로그신호로 계측되며, 데이터로거는 아날로그신호 형태의 계측 결과를 디지털 신호로 전환하는 역할을 한다. 또한 디지털 신호로 전환된 계측결과를 온도와 함수비(체적함수비, Volumetric Moisture Content)로 연산하고, 내부메모리에 통계 처리된 결과를 저장하는 역할을 하게 된다. 그림 3은 본 연구에서 함수센서와 온도 센서로부터 계측 데이터를 수집하기 위하여 현장 계측시스템에 적용된 컨트롤 박스내 CR1000 데이터 로거를 배치한 내부 구조를 나타낸 것이다.

저장 장치는 저장용 데스크탑 컴퓨터를 운용중이다. CR1000 Data Logger를 컨트롤할 수 있는 소프트웨어는 LoggerNet 프로그램을 이용하였다. LoggerNet 프로그램과 무선 통신 장치를 통하여 현장 계측시스템에 설치된 Data Logger에 접속하여 프로그램 전송, 데이터 수집 및 실시간 모니터링 등을 수행할 수 있다.

2.3 도로의 포장 구조체 현장 계측시스템 무선 통신 장치 및 전원장치

현장 계측시스템을 이용한 현장 계측 Data는 무선통신을 통하여 연속적인 계측 데이터를 수집하게 되며, 자동 계측시스템의 무선통신망 구축 개요도는 그림 3과 같다. 이때 무선 통신은 CDMA 방식으로 기존에 운영하고 있는 이동통신사의 통신망을 이용 한다.

전원장치는 태양열 전지판을 통하여 컨트롤 박스 안에 설치된 축전지를 충전하여 외부 전력이 필요하지 않은 독립 전원 형태로 구성되어 있다. 이때 데이터 로거의 경우 10V 이상의 전원이 필요하며, 태양열 전지판으로 충전 할 경우 1회 충전으로 1주일간 충전이 필요하지 않는다.

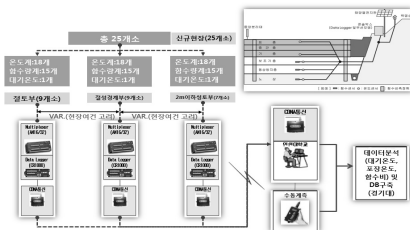


그림 3. 무선통신망 구축 개요도

3. 북부지역 도로의 포장 구조체 현장 계측시스템 구축

본 연구에서 북부 지역의 동결지수 350℃·일 - 450℃·일 3개 지역과 450℃·일 - 550℃·일 3개 지역, 550℃·일 - 650℃·일 3개 지역에 대하여 25 단면(절토부 9개 단면, 절성경계부 9개 단면 및 저성토부 7개 단면)을 구축하였다. 이때 현장 계측시스템을 설치할 수 있는 단면은 육안 조사뿐만 아니라 도로 설계도서와 현장 근무자등과의 협의를 통하여 조사하고 설치 위치를 선정하였다. 사전 조사 결과를 토대로 최종 현장 계측 센서 구축 결과는 표 2와 같으며, 그림 4는 현장 계측기 센서 매설 과정을 보여주고 있다.

표 2. 현장 계측시스템 구축지역

동결지수 구분	원주청	서울청	대전청	기존현장
550℃·일 - 650℃·일	부릉-사북 귀래-매지 웅진리	-	-	김포청 황양양 (4개소)
450℃·일 - 550℃·일	-	용인-서울 서울-춘천 현리-신팔	-	
350℃·일 - 450℃·일	-	-	수안보IC 진천IC 성환-입장	

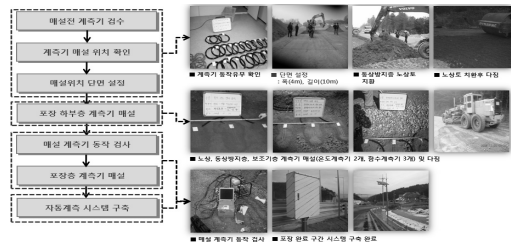


그림 4. 현장 계측시스템 구축 절차

4. 북부지역 도로의 포장 구조체 현장 계측 결과 분석

4.1 현장시료의 물리적 특성

본 연구는 국토해양부의 연구과제인 “현장계측을 통한 도로 동상 평가 및 실내 모사 시험 연구”의 북부지역의 현장 노상토 재료를 이용하였으며, 동상특성을 규명하기 위하여 노상토 시료를 No.4체를 모두 통과한 시료를 노건조 시킨 후 수분으로 인해서 뭉쳐진 흩어리들을 고무망치로 부수고, 표준체 (#10, #20, #40, #60, #100, #200)를 사용하여 입자 크기 별로 각각 분류하였다. 각각 시료의 물리적 성질을 파악하기 위한 실내 실험은 KS F에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다. 시험으로는 자연함수비시험, 액성한계시험, 소성한계시험, 흙의 비중시험, 입도분포시험, 변수위투수시험, 삼축압축시험, 수정CBR시험, D-다짐시험을 실시하여 시료에 대한 물리적 성질을 파악하였다. 아래 표 3은 재료의 물리적인 성질에 대한 결과를 나타내고 있다.

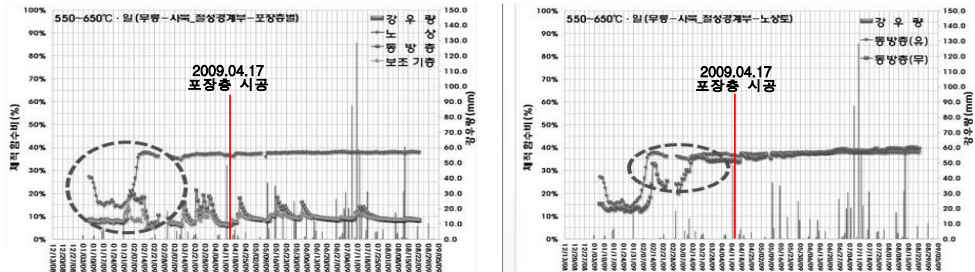
표 3. 북부지역 현장 노상토의 물리적 성질

구분	550~650℃·일			450~550℃·일			350~450℃·일		
	웅진리	귀래-매지	문곡-부릉	서울-용인	서울-춘천	현리-신팔	수안보IC	진천-금왕	성환-입장
자연함수비 (%)	11.4	7.91	8.41	10.34	9.8	10.55	14.12	12.34	9.59
비중	2.72	2.68	2.72	2.64	2.76	2.70	2.73	2.68	2.64
#200체 통과율	3.2	2.9	5.9	4.8	5.5	2.7	11.1	1.8	1.9
액성한계(LL (%))	N.P	N.P	24.95	30.64	28.19	27.31	28.39	28.69	23.27
소성지수(PI)	N.P	N.P	6.18	N.P	8.30	8.70	7.8	N.P	N.P
D-다짐	$Y_{dmax}(t/m^3)$	1.95	2.04	2.00	1.95	2.04	2.03	1.96	1.97
	OMC(%)	12.2	9.8	10.98	11.08	8.56	9.12	10.70	11.2
통일분류법(USCS)	SW	SW	SW	SP	SP	SP	SP	SP	SP
균등계수(Cu)	6.25	3.8	7.25	5.0	4.07	2.94	4.29	3.50	3.48
곡률계수(Cg)	1.45	1.78	1.11	0.8	1.28	1.76	0.46	0.73	1.49

4.2 현장 계측시스템 데이터 분석

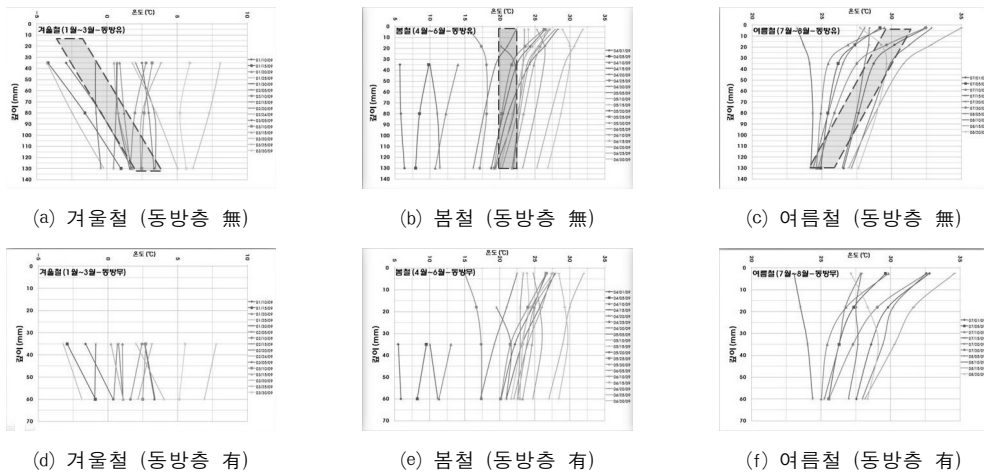
북부지역 동결지수별로 강원도, 충청도, 경기도 지역으로 저성토부, 절성경계부, 절토부의 구간에 대하여 25개 단면의 현장 계측시스템을 구축하였으며, 대표적으로 강원도 정선현장의 함수비와 온도를 분석하였다.

그림 5는 포장층 내부의 함수비 변화를 나타낸 것이다. 동결기에 대기온도가 영하로 내려감에 따라 포장의 하부층의 노상토 동결로 인하여 함수비가 계속 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 보조기층 및 동상방지층은 측정이전부터 동결되어 있었다. 2월 이후 노상토의 융해로 함수비가 크게 증가된 후 일정한 경향을 나타내고 있다. 또한 강우에 따른 함수비 변동을 살펴보면, 포장표면의 갈라진 틈 또는 사면의 경계부를 통하여 수분이 보조기층 및 동상방지층에 침투하여 함수비가 민감한 반응을 보이고 있다. 노상층의 경우 함수비의 변화가 작은 것을 그림 5 (b)에서 확인할 수 있으며, 이는 강우로 인한 수분침투가 노상층에는 미치지 않음을 알 수 있다.



(a) 포장층별 함수비 변화 (b) 동방층 유무별 함수비 변화
그림 5. 동결지수선도 550~650℃ · 일, 정선군 현장 함수비 분포 특성

온도의 분포는 그림 6과 같이 계절별 포장 내부 온도를 측정 비교하였다. 겨울철(1~3월)의 경우 포장층 온도가 내부 온도보다 낮았으며, 봄철(4~6월) 포장층 온도와 내부온도가 비슷한 경향을 나타냈으며, 여름철의 경우 포장층 온도가 내부온도보다 높음을 알 수 있다.



(a) 겨울철 (동방층 無) (b) 봄철 (동방층 無) (c) 여름철 (동방층 無)
 (d) 겨울철 (동방층 有) (e) 봄철 (동방층 有) (f) 여름철 (동방층 有)
그림 6. 동결지수선도 550~650℃ · 일, 정선군 현장 계절별 온도 분포 특성

5. WCR(Water Content Reflectometer) 함수량계의 실내보정시험

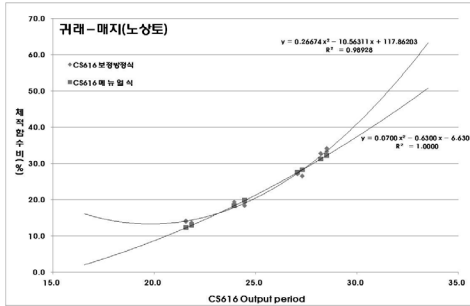
북부지역 현장시스템 함수비 계측장비로 미국의 Campbell 사의 CS616 모델을 선정하였다. CS616 함수량계는 WCR(Water Content Reflectometer) 방식을 적용하고 있다. WCR 방식은 다른 방식에 비하여 정밀도면에서 훨씬 우수하며, 장기간동안 수동계측 및 자동계측이 가능하다. 그러나 WCR측정결과는 흙의 재료, 입도, 온도, 등에 의해 오차가 생길 수 있기 때문에 현장의 재료를 사용하여 실내보정시험(Calibration Test)을 반드시 실시하여야 한다.

본 연구의 북부지역에 선정된 9개 현장의 노상토에 대하여 실내보정시험을 실시하였으며, 이 결과를 통해 표 4와 같이 현장에서 적용할 수 있는 보정

표 4. CS616 WCR 함수량계 보정방정식 제안(노상토)

현 장 명	보 정 방 정 식
CS 616 매뉴얼식	$Y = 0.0007X^2 - 0.0063X - 0.0663$
귀래-매지(원주시)	$Y = 0.0026X^2 - 0.1056X + 1.1786$
웅진리(양구군)	$Y = 0.0033X^2 - 0.1433X + 1.7036$
서울-용인(용인)	$Y = -0.00007X^2 + 0.0382X - 0.6533$
서울-춘천(남양주)	$Y = 0.0019X^2 - 0.0649X + 0.6228$
현리-신팔(가평군)	$Y = 0.0006X^2 + 0.0026X - 0.1881$
수안보IC(충주시)	$Y = 0.0002X^2 + 0.0242X - 0.4853$
진천-금왕(진천군)	$Y = 0.0015X^2 - 0.0473X + 0.4423$
성환-입장(천안시)	$Y = -0.0001X^2 + 0.0214X - 0.2780$

방정식을 제안하였다. 아래의 그림 7 (a)은 Campbell사에서 제시한 매뉴얼식과 실내보정방정식과의 상관관계를 나타냈으며, 그림 7 (b)는 실내보정방정식을 귀래-매지 현장시료(노상토)에 적용시켜 보았다. 함수비가 낮은 경우 CS616 매뉴얼 식이 보정식보다 작게 나타났으며, 그 반대의 경우엔 보정식보다 큰 함수비값을 나타내고 있다. 그리고 실내보정식은 함수비의 변동폭이 현장 측정값 보다 적게 나타난다는 것을 알 수 있다. 향후 보조기층 및 동상방지층 재료에 대한 실내보정시험도 실시할 계획이다.



(a) CS616 보정방정식과 매뉴얼식의 관계(노상재료)



(b) CS616 함수량계의 보정방정식 적용

그림 7. CS616 함수량계의 보정방정식 산정 및 적용

6. 결론

본 연구는 북부지역 동결지수선도별로 현장 계측시스템을 구축하였으며, 2009년 1월부터 7월까지 측정된 데이터를 이용하여 포장 구조체의 함수비 변화와 온도분포를 분석하였다. 함수비의 경우 강원도 및 경기도에서는 동절기의 노상층 결빙 현상이 나타났으며, 충청도 지역에는 발생되지 않았다. 온도의 경우 겨울철과 여름철에는 대기온도가 포장층에 영향을 미쳐 노상층과 포장층의 온도변화가 심하게 나타났으며, 봄철의 경우 노상층과 포장층의 온도가 동일한 범위 내에 형성되고 있으며, 향후 지속적인 모니터링을 통하여 북부지역의 동상방지층 효율성을 검토와 현장계측자료의 분석을 통하여 동상방지층 설계 기준(안)을 제시하는데 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설교통기술혁신 R&D 과제인 “현장계측을 통한 도로 동상 평가 및 실내모사시험 연구”의 연구결과의 일부이며, 본 연구를 위하여 도움을 주신 것에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2003), “동상방지층 두께 산출(예)-개정 동결지수선도 이용”, 한국건설기술연구원, 한국도로공사, pp. 1~16.
2. 건설교통부(2006), “현장시험을 통한 동상방지층 설치 기준 연구” 건설교통부 한국건설교통기술 평가원 최종보고서
3. 김영진, 유 준, 김현민(1999), “동결심도 및 포장체 온도분포조사”, 한국건설기술연구원, pp. 5~25.
4. 남영국, 박찬범, 조규태, 진정훈(2002), “동상방지층의 거동에 대한 현장계측”, 한국도로학회지 제4권 1호, pp. 19~23.
5. 한국건설교통기술평가원(2008), “도로 동상방지층의 효율성 검증(성토부 2m 이상 제외) 기획연구”, 최종보고서, 국토해양부 한국건설교통기술평가원