



습식교반경화토포장의 온도특성

Temperature Characteristics of Wet-mixing Solidified Soil Pavement

유 지 형* 이 승 원** 김 대 성***
 Yoo, Ji Hyeung Lee, Seong Won Kim, Dae Sung

Abstract

The Construction policy of government ever since 1970s have brought the economical growth, but has been causing environmental problems. Most roads were paved either asphalt concrete or portland cement concrete. These types of pavements has caused to rise temperature by making local heat islands in urban during summer time. Recently the wet-mixing solidified soil pavement, a kind of soil-cement, has developed and has been applied to the environment-oriented pavement. The solidified soil wet-mixed is placed on the subgrade along with asphalt concrete and portland cement concrete. Thermistors are laid in these field test pavements. The temperature gradients of these pavements are automatically measured with time. As the results of this test, the equation estimating surface temperature of pavement is proposed by analyzing measured temperature data. It is shown that the temperature change within the surface layer due to the change of air temperature is the greatest in the asphalt mixture and the least in the solidified soil mixture. Since it is proven that this wet-mixing solidified soil pavement emit less radiant heat than other existed pavements. Therefore this type of pavement can be successfully applied to the roads, such as walks, parkways, and bikeways, which are required to be human-friendly and environment-oriented.

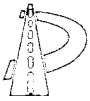
Keywords : *wet-mixing solidified soil, environment-oriented pavement, temperature characteristics*

요 지

1970년대 이후로 국내 건설 산업은 건설위주의 정책으로 지속적인 성장을 이루어 왔지만 이로 인한 환경문제가 심각하게 대두되고 있다. 아스팔트 및 시멘트 콘크리트포장으로 이루어진 도시지역은 열을 흡수하여 국지적인 열섬효과를 만들어 도시지역의 기온을 상승시키는 원인이 되고 있다. 이러한 문제점의 대안으로 최근에 기존 포장에 비해 흡수열량과 방출열량이 적은 흙을 주재료로 하여 특수한 경화재와의 혼합물을 사용한 도로 포장공법이 개발 사용되고 있다. 본 연구에서는 아스팔트콘크리트와 시멘트콘크리트 및 습식교반경화토를 대상으로 시험포장을 실시하고, 현장계측을 통하여 포장형식에 따른 포장체의 온도를 측정하여 온도특성을 규명하였다. 연구 결과, 시험포장에서 계측한 결과를 분석하여 대기온도에 따른 포장표면온도와 포장체 내부에서의 온도를 추정할 수 있는 관계식을 제시하였다. 대기온도 변화에 따른 포장체 내부온도 변화는 아스팔트콘크리트포장에서 가장 큰 변화를 나타내는 반면, 습식교반경화토포장에서는 큰 변화를 보이고 있지 않다. 따라서 기존 포장에 비해 흡수열량과 방출열량이 적은 습식교반경화토를 이용하여 공원 산책로, 농로, 관광지 도로, 자전거전용 도로 등과 같은 도로에 적용하게 되면 도시지역의 기온상승을 방지함과 동시에 인체에 무해하고 환경친화적인 도로를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 습식교반경화토, 환경친화적인 포장, 온도특성

* 정희원 · 경일대학교 토목공학과 교수
 ** 정희원 · 경북대학교 토목설계과 교수
 *** 정희원 · 경일대학교 토목공학과 석사과정



1. 서론

최근 산업이 발달하고 인구가 증가함에 따라 전세계적으로 도시화가 빠르게 진행되고 있으며, 도시의 규모도 점차 거대해져 가고 있다. 이러한 도시의 팽창은 녹지의 감소, 도로 포장율의 증가, 도시 하천의 복개 등 지표면의 피복상태를 변화시키고 도시 구조물을 증가시킨다. 이에 따른 대기 환경의 복합적인 작용으로 도시는 주변과는 다른 특유의 기후를 형성한다. 이처럼 도시 기온과 관련된 변화는 인공열의 방출과 더불어 기존의 토지피복이 도시적 토지이용으로 바뀌면서 발생한다. 대도시의 경우 토지이용이 집약적이기 때문에 고밀화·고층화된 시가지의 고온화 현상으로 형성된 열섬은 여름철 냉방비를 급증시키고, 노약자 사망률을 증가시키는 등 인간 생활에 많은 영향을 미치고 있으며, 이는 도시 기후의 문제점으로 지적되고 있다. 또한 지속적인 건설산업의 성장으로 인한 다량의 건설폐기물 양산으로 환경문제가 심각하게 대두되고 있다. 따라서 콘크리트와 아스팔트 같은 건설폐기물의 유해한 성분들이 환경에 미치는 영향이 제거되면서 인체에 무해하고 친환경적인 흙을 건설재료로 사용하는데 관심을 갖게 되었다. 특히 공원산책로, 농로, 관광지 도로, 자전거 전용 도로 등과 같이 중차량이 통과하지 않는 도로에서는 환경친화적인 포장이 요구되고 있다. 본 연구에서는 도시 온도상승의 원인 중 하나인 아스팔트콘크리트포장, 시멘트콘크리트포장과 환경친화적인 습식교반경화토포장의 온도특성을 비교 연구함으로써, 습식교반경화토포장의 특성을 검증하여 도시지역 온난화 현상을 조금이나마 완화시킴으로써 쾌적한 도시생활 환경조성에 기여 하는데 그 목적이 있다.

2. 연구사례

기존 포장에 대한 온도특성 연구사례는 다음과 같다. 아스팔트 콘크리트포장은 온도에 따라 물성의 변

화가 심하며 이를 설계에 반영하기 위해서는 아스팔트 콘크리트 층 내부의 온도변화를 정확히 예측할 수 있는 온도-탄성계수 관계모델이 필요하다. 아스팔트 콘크리트 층의 온도예측을 위해 1957년 Barber는 다양한 기상 자료를 이용하여 아스팔트 콘크리트 층 내부의 온도를 최초로 구하였다. 1968년 Straub 등은 계산시점에서의 온도구배와 24시간 기상자료를 입력자료로 하는 유한차분법을 이용한 아스팔트 콘크리트 층의 내부온도 예측법을 도입하였다. 1972년 Witzczak은 대기온도를 이용하여 아스팔트 콘크리트 층의 3분의 1지점에서의 온도를 대표온도로 설정하고 이를 이용하여 아스팔트 콘크리트 층의 탄성계수를 구하는 식을 제안하였다. 1982년 Shook 등은 Witzczak의 대표온도식을 이용하여 동탄성계수를 구하는 회귀분석 식을 제안했으며 이는 현재 미국 아스팔트협회의 설계법에 사용되고 있다. 1976년 Akiyama는 대기온도와 포장표면온도 및 포장표면과 내부온도와의 관계를 월별로 고찰한 후 아스팔트 콘크리트 층의 두께에 따라 적용할 수 있는 평형점 온도를 제안하였다. 1978년 Dickinson은 오스트레일리아의 태양복사열과 월평균 최고기온 및 일출·일몰 시간 등의 기상자료를 분석하고 이를 이용하여 유한차분법으로 포장체 내부온도를 예측하는 방법을 제안하였다. 1987년 Husain은 5일간의 기상과 현장자료를 이용하는 방법과 평균대기온도를 이용하는 경험적인 방법으로 포장체의 내부온도를 추정하였다. 1996년 Shao 등은 아스팔트 콘크리트 층의 내부온도를 표면의 온도변화를 고려하여 수치적으로 예측하고 층 중앙의 온도를 대표온도로 가정하여 FWD 시험의 역산결과에 반영하였다. 국내의 경우 1992년 이광호는 Barker와 Witzczak이 제안한 대기온도와 아스팔트 콘크리트 층 내부온도와의 관계식과 Franklin의 온도와 탄성계수와의 관계식을 이용하여 포장체 내부온도 변화에 따른 포장체의 월별 탄성계수 변화모델을 설정하였다. 또한 1996년 이경하는 국내에서 사용되고 있는 바인더 및 골재를 사용하여 M_R 시험을 실시한 후 회복탄성계수와 온도, 밀



도, 혼합물 형태에 대한 모델을 제안하였다. 이러한 기존 포장의 온도에 관한 연구는 포장체의 구조적 능력이나 포장수명을 늘리기 위한 방법을 도출하기 위하여 연구가 진행되고 있다. 반면에 흙을 주재료로 하는 습식교반경화토포장은 재료면에 있어서는 친환경적이지만, 온도특성에 대해서는 밝혀진 바가 전혀 없는 실정이다. 따라서 이러한 습식교반경화토포장의 대기온도에 따른 온도변화 특성을 규명하므로써 포장체의 거동과 환경에 미치는 영향을 살펴볼 필요가 있다.

3. 환경친화적인 습식교반경화토포장

흙을 이용한 건설산업은 국내를 비롯한 미국, 일본 등 세계 각국에서 이루어져 왔다. 특히 최근 환경문제가 대두되면서 흙의 이용은 더욱더 많아질 것이다. 이러한 환경친화적인 흙을 주재료로 하는 습식교반경화토를 이용한 도로포장이 최근에 성공적으로 시공되고 있다. 이는 도로 등의 원지반 흙이나 공사현장 주변의 흙을 가까운 레미콘 공장 등의 장소로 운반한 후, 흙에 일정 배합비의 시멘트와 산화철 그리고 경화제 수용액을 혼합기에서 혼합하여 함수율이 높은 습식교반경화토를 생산하고, 이를 시공장소로 운반, 포설 및 다짐과 표면정리를 행한 후, 습윤양생을 통하여 고화 처리하는 도로포장 공법이다. 이 공법은 모래, 자갈 등의 외부골재의 반입 없이 시공하고자 하는 도로의 원지반 흙 또는 부근의 흙을 포장재료로 활용함과 동시에 간단한 공정과 저렴한 시공비를 통하여 콘크리트 못지않은 상당한 강도를 유지하면서 견고하게 포장할 수 있는 장점이 있다. 또한 다양한 토질의 지반에도 적용할 수 있는 시공성의 향상과 공사 후 환경친화적인 면까지의 효과를 기대할 수 있다. 습식교반경화토에 사용되는 인체에 무해한 특수 경화제는 점성토를 함유한 흙을 경화시키는 것으로부터 기술개발이 시작되었다. 점토를 구성하는 미세토립자는 주로 전기적으로 음(-)대전을 일으켜

여기에 무기의 양이온을 첨가함으로써 안정된 가교체를 얻게 된다. 이 가교체에 시멘트를 혼합함으로써 보다 안정된 강도를 갖게 된다. 특수 경화제가 흙과 혼합하게 되면 흙 입자내의 무기질 성분이 조암작용에 필요한 성분을 얻어 수화반응으로 응결되며, 액성 이온 농도의 변화에 따라 이온전하가 수정되어 이에 따른 침전이 시작된다. 흙의 액상과 기상 그리고 유기질의 경화에 대한 장애가 없어지게 되고 시멘트 효과가 최대한으로 발휘되게 됨으로써 경화가 촉진되어 흙은 하나의 조암체로 형성되게 된다. 즉, 특수 경화제는 암석이 풍화되어 흙이 되는 과정을 고찰하여 그것의 성분조성을 연구함으로써 조암의 과정을 역추론하여 개발된 경화제라 할 수 있다. 최근에 일본에서는 하천에 퇴적된 오니를 준설하여 이를 특수 경화제와 혼합하여 통학로, 공원산책로 포장과 벽돌 등으로 재활용하고 있다. 우리나라에서도 흙-시멘트에 경화제 수용액을 혼합한 습식교반경화토를 사용하여 공원 산책로, 농로, 임도 등에 성공적으로 시공되어 사용되고 있다.

4. 기존포장의 온도특성

포장체내의 온도는 기상과 하부지반의 상태 등의 환경요인에 의한 일사량, 대기온도, 풍향, 풍속, 운량, 강우량, 노상토 함수량 등의 외부적인 조건과 포장체 자체의 물리적 특성 및 포장구조의 종류에 의한 내부적인 조건에 의하여 영향을 받는다. 최근까지 연구된 결과는 다음과 같다. 즉 아스팔트콘크리트포장의 온도분포는 대기온도와 비교하여 항상 높게 나타나며, 포장내부온도는 깊이가 깊어질수록 그 변화 폭이 작아진다. 그리고 시멘트콘크리트포장의 콘크리트 슬래브의 깊이별 온도변화 패턴은 일반적으로 표면온도가 슬래브 내부온도보다 높은 가운데 09시에서 17시 사이이고, 표면온도가 슬래브 내부온도보다 낮은 감온시간은 20시에서 익일 07시까지로 알려져 있다.



5. 시험포장 및 온도계측

포장체의 온도는 일사량, 대기온도, 풍향, 풍속, 운량, 강우량 등의 각종 환경요인에 영향을 받는다. 본 연구에서는 포장체 온도변화의 요인 중 하나인 대기온도에 따른 습식교반경화토포장의 온도특성을 도출하기 위해서 아스팔트콘크리트와 시멘트콘크리트, 습식교반경화토를 대상으로 포장형식에 따라 5개의 시험포장을 포설하였다. 습식교반경화토포장은 두께가 상이한 3개면을 포설하고 아스팔트콘크리트포장과 시멘트콘크리트포장은 온도특성을 비교하기 위하여 각각 1개면씩 포설하였다. 아스팔트콘크리트포장과 시멘트콘크리트포장은 노체를 잘 다지고 그 위에 각각 $3\text{m} \times 3\text{m} \times 20\text{cm}^2$ 크기와, $1\text{m} \times 1\text{m} \times 20\text{cm}$ 의 크기로 포설하였다. 시멘트콘크리트포장은 임도, 농로 등의 도로에 일반적으로 사용되는 압축강도 200kgf/cm^2 의 무근콘크리트를 사용하였으며, 아스팔트포장은 AP-3(침입도 85~100)를 사용하였다. 본 연구의 대상 포장형식인 습식교반경화토포장의 시험포장에 사용된 배합재료는 습식교반경화토 1m^2 당 화강풍화토 1400kgf , 시멘트 250kgf , 경화재 18l , 물 300l 를 사용하였다. 습식교반경화토 시험포장에 사용된 포장재료는 28일 습윤양생을 실시하였으며, 압축강도는 평균 106.7kgf/cm^2 이고 휨강도는 평균 25.95kgf/cm^2 의 강도를 가지고 있다. 습식교반경화토를 이용한 시험포장의 크기는 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 로 하고, 두께는 시공경험을 토대로 15cm 를 기준으로 10cm , 15cm^2 , 20cm 로 변화시켜 3개의 면을 타설하였다. 습식교반경화토포장의 온도특성을 규명하기 위하여 포장체내에 온도센서를 포장표면, 상부, 중간, 하부, 지면에 매설하여 온도를 자동 계측하였으며, 측정된 온도를 포장형식에 따라 비교분석하여 습식교반경화토포장의 온도특성을 규명하였다.

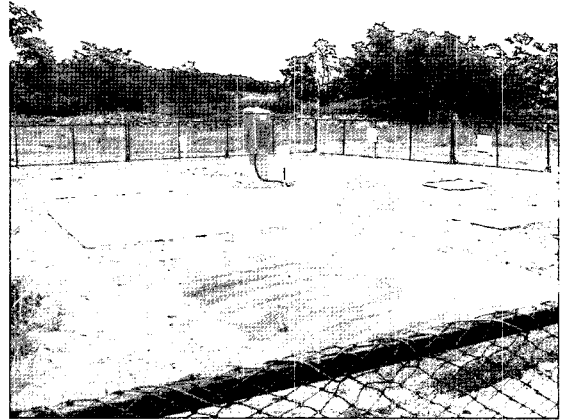


그림 1. 시험포장 전경

온도 측정을 위해 Thermistor YSI44005를 사용하여 측정하였으며, 깊이에 따른 포장내부온도 측정을 위해 온도센서를 사전에 제작한 고정거치대에 고정하여 매설하였으며, 다음 그림들은 이러한 온도센서의 설치 위치이다.

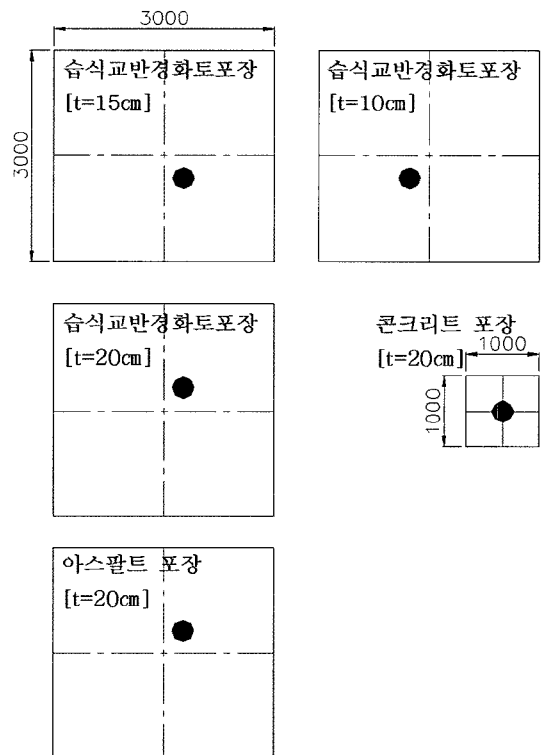


그림 2. 온도센서 설치 평면도

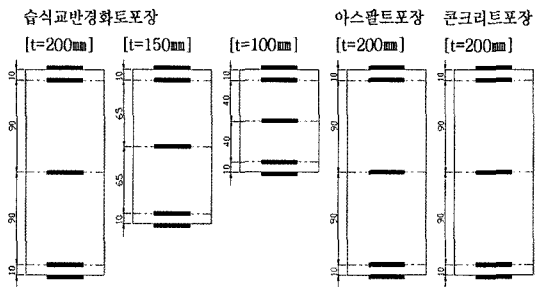


그림 3. 온도센서 설치 단면도

포장의 계측 시스템은 계측방법, 계측규모 및 경제성을 충분히 고려하여 데이터의 수집 및 해석에 필요한 작업이 중단없이 이루어질 수 있도록 구축되어야 하는데, 본 연구에서는 보다 정확한 계측 및 안정적인 데이터 수집을 위하여 자동화 계측 시스템을 구축하였다. 자동화 계측 시스템 구성을 위하여 본 연구에서는 센서의 계측 값을 자동 측정할 수 있는 DataTaker사의 Geologger DT515와 함께 DTwin(DeTerminal for Windows) 프로그램을 사용하였다.

6. 계측결과 및 분석

본 연구에서는 습식교반경화토포장의 온도특성과 기존 포장형식인 아스팔트콘크리트포장과 시멘트콘크리트포장에 대한 비교를 위하여 2004년 7월 10일부터 8월 9일까지 10분 단위로 온도를 자동 계측하였다. 시험포장에서 계측된 온도자료 중 대기온도가 높으며 안정적으로 계측된 7월 11일, 7월 31일, 8월 8일의 온도 계측자료로부터 습식교반경화토포장의 온도특성을 분석하였다.

그림 4~6은 온도 계측자료 중 포장두께 20cm인 습식교반경화토포장, 아스팔트콘크리트포장, 시멘트콘크리트포장에서 시간별로 측정된 깊이별 온도를 각각 나타낸 것으로 보는 바와 같이 대기온도는 하루 중 12시에서 오후 2시에 가장 높으며, 포장형식에 관

계없이 포장표면온도 또한 대기온도와 같은 시간대별 온도변화를 보여주고 있음을 알 수 있었다. 포장체 내부온도는 깊어질수록 최고온도 시간대가 12시부터 늦어져 포장층 하부에서는 오후 4시에서 오후 6시 사이에 가장 높은 것으로 나타났으며, 내부온도 변화는 아스팔트콘크리트포장이 가장 크고, 습식교반경화토포장에서는 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이는 습식교반경화토포장이 온도특성면에서 기후 환경에 미치는 영향에 유리한 것을 보여주고 있는 것이다. 여기서, SS는 습식교반경화토포장, PC는 시멘트

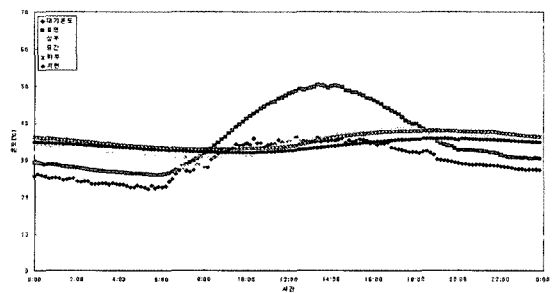


그림 4. 습식교반경화토포장의 시간에 따른 깊이별 온도

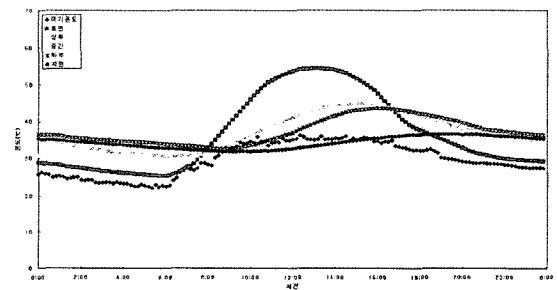


그림 5. 시멘트콘크리트포장의 시간에 따른 깊이별 온도

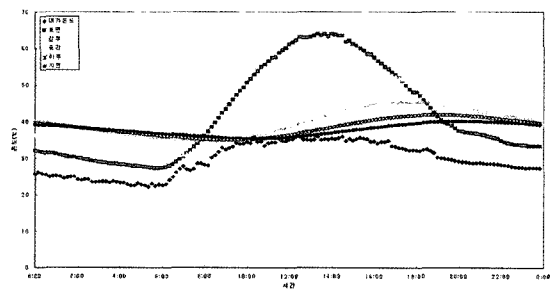


그림 6. 아스팔트콘크리트포장의 시간에 따른 깊이별 온도

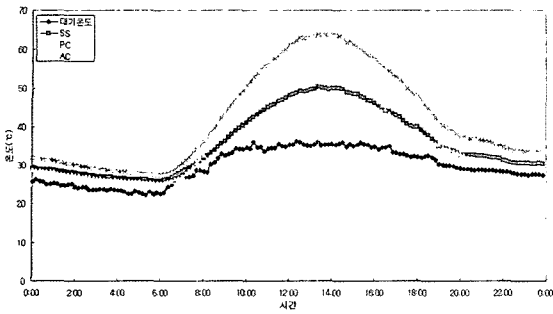


그림 7. 포장형식에 따른 시간대별 포장표면온도

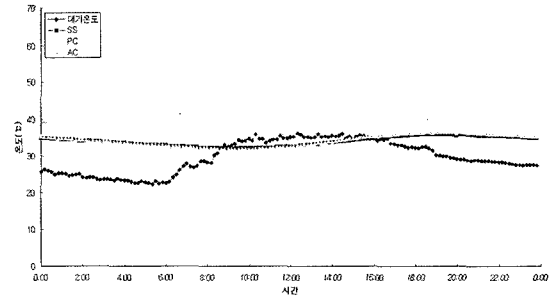


그림 11. 포장형식에 따른 시간대별 노상상부면 온도

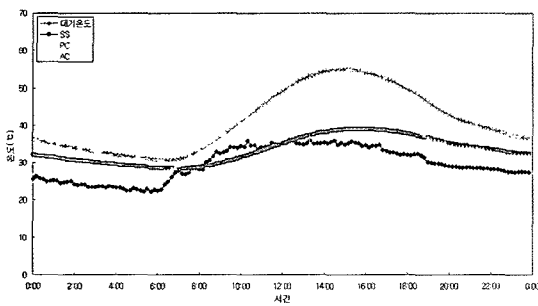


그림 8. 포장형식에 따른 시간대별 포장체 상부온도

콘크리트포장, AC는 아스팔트콘크리트포장이다.

포장표면온도는 대기온도에 따라 변할 뿐만 아니라 포장재료에 따라 다르게 될 것이다. 본 연구에서는 습식교반경화토포장, 아스팔트콘크리트포장, 시멘트콘크리트포장의 포장표면온도와 대기온도를 시간대별로 동시에 측정하였다. 그림 12~14는 습식교반경화토포장, 시멘트콘크리트포장, 아스팔트콘크리트포장의 대기온도와 포장표면온도의 관계를 도시한 것이다.

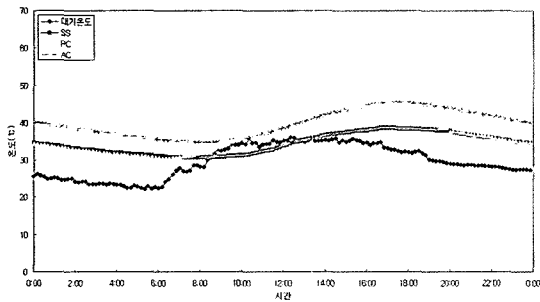


그림 9. 포장형식에 따른 시간대별 포장체 중간온도

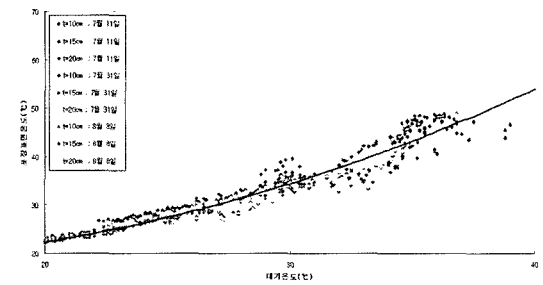


그림 12. 습식교반경화토포장의 대기온도와 포장표면온도의 관계

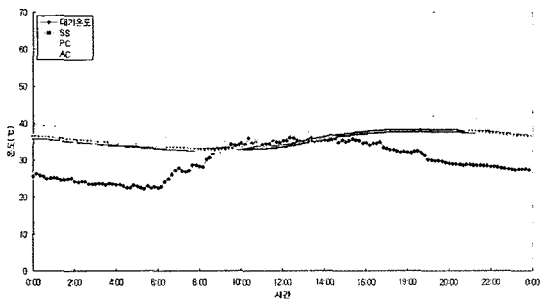


그림 10. 포장형식에 따른 시간대별 포장체 하부온도

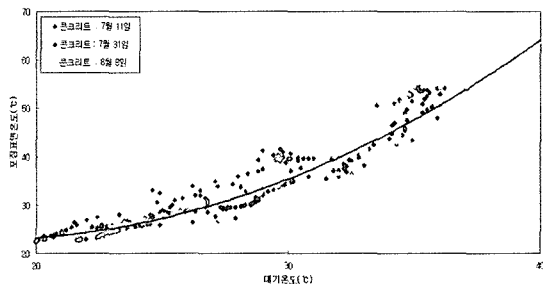


그림 13. 시멘트콘크리트포장의 대기온도와 포장표면온도의 관계

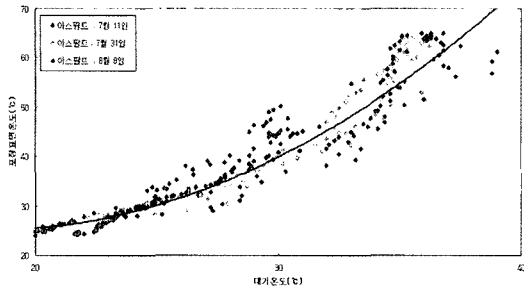


그림 14. 아스팔트콘크리트포장의 대기온도와 포장표면온도의 관계

그림에서 보는 바와 같이 대기온도가 증가함에 따라 포장표면온도가 상승하고 있으며, 2차 함수관계로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 따라서 대기온도 (T_a , $20^{\circ}\text{C} \sim 39^{\circ}\text{C}$)와 포장표면온도 (T_{SS}, T_{PC}, T_{AC})에 대한 예측된 자료들을 회귀분석하여 다음 식들을 얻었다.

$$T_{SS} = 0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4 \quad (R^2 = 0.97) \quad (1)$$

$$T_{PC} = 0.0827T_a^2 - 2.917T_a + 48.5 \quad (R^2 = 0.89) \quad (2)$$

$$T_{AC} = 0.1022T_a^2 - 3.6729T_a + 58.1 \quad (R^2 = 0.91) \quad (3)$$

여기서, T_{SS} 는 습식교반경화토포장의 표면온도이고, T_{PC} 는 시멘트콘크리트포장의 표면온도, T_{AC} 는 아스팔트콘크리트포장의 표면온도이며, T_a 는 대기온도이다.

시간에 따른 포장형식별 내부온도 변화는 그림 15~17에서 보는 바와 같이 포장형식에 따라 하루 동안의 온도변화 폭이 다르게 나타나는데, 아스팔트 콘크리트 포장이 온도의 변화폭이 가장 크게 나타났다. 반면에 습식 교반경화토 포장은 포장체의 표면 아래 2cm 밑으로는 지면의 온도와 큰 차이를 보이지 않는 것을 볼 때, 포장체 자체가 흡수하는 열량이 상당히 작다는 것을 알 수 있다.

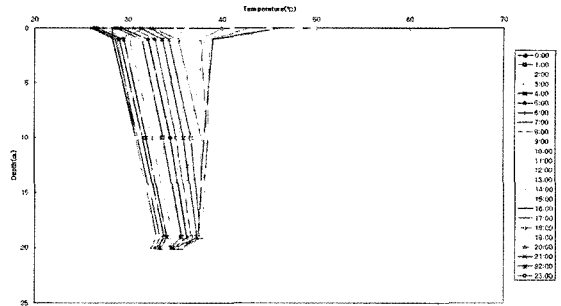


그림 15. 습식교반경화토 포장 시간 - 포장온도 - 깊이 (t=20cm ; 7월 31일)

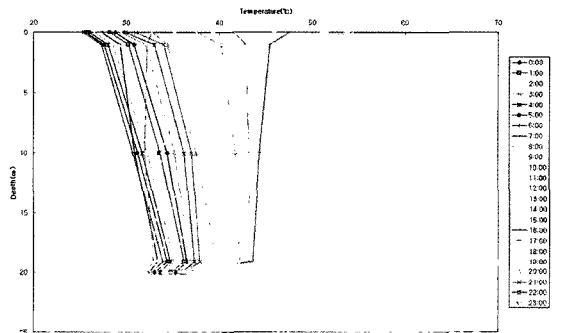


그림 16. 시멘트콘크리트포장 시간 - 포장온도 - 깊이 (t=20cm ; 7월 31일)

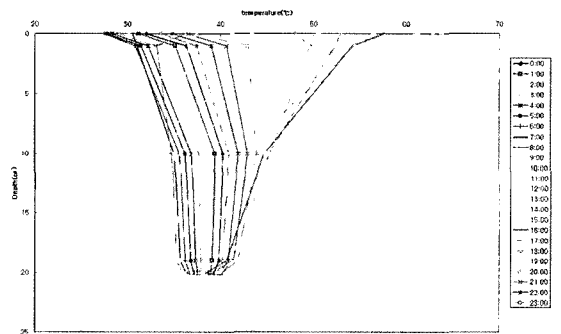


그림 17. 아스팔트콘크리트포장 시간 - 포장온도 - 깊이 (t=20cm ; 7월 31일)



포장체 깊이에 따른 내부온도 변화는 포장 재료의 열전도 특성에 의존하게 되는데, 대기온도에 따른 포장체 깊이별 온도특성을 살펴보기 위하여 본 연구의 시험포장에서 측정된 온도자료 중 대표적인 것으로서 대기온도가 최고인 시점에서 포장체 깊이별 온도를 도시한 것이 그림 18~20이다. 그림에서 포장의 깊이는 포장두께, t 로 정규화한 z/t 로 나타내었다.

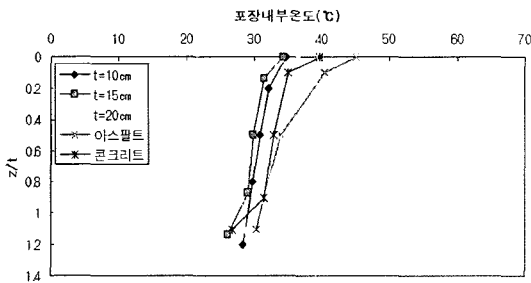


그림 18. 포장내부온도 분포
(대기온도 31°C, 2004년 7월 11일 측정)

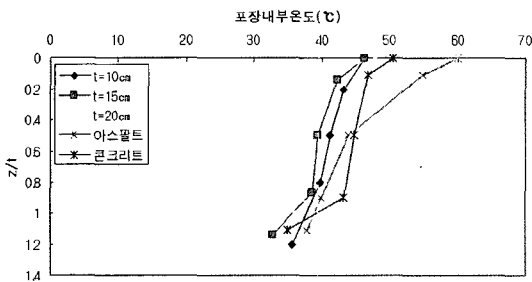


그림 19. 포장내부온도 분포
(대기온도 35.7°C, 2004년 7월 31일 측정)

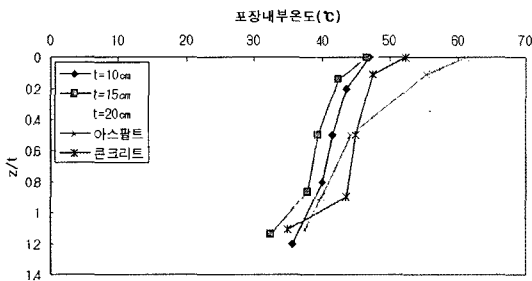


그림 20. 포장내부온도 분포
(대기온도 39°C, 2004년 8월 8일 측정)

그림에서 보는 바와 같이 온도경사는 아스팔트콘

크리트포장이 가장 완만하며 시멘트콘크리트포장과 습식교반경화토포장은 비슷한 기울기를 가지는 것을 알 수 있다. 시멘트콘크리트포장의 경우 온도경사는 급한 반면에 습식교반경화토포장에 비해 내부온도가 전반적으로 높아 흡수된 열량이 습식교반경화토포장에 비해 많다는 것을 알 수 있다. 또한 포장의 두께가 두꺼울수록 흡수하는 열량이 더욱 작아짐을 알 수 있다. 이는 습식교반경화토포장이 온도특성이 우수하며 자연친화적인 포장형식이라는 것을 나타내는 것이다. 또한 포장체 깊이에 따라 포장체 내부온도가 감소하는 온도경사를 보여주고 있으며, 포장체 임의 깊이에서의 온도는 다음 식 (2)와 같이 포장두께로 정규화된 깊이(z/t)의 2차 함수로 나타낼 수 있다.

$$T = d\left(\frac{z}{t}\right)^2 + e\left(\frac{z}{t}\right) + f \quad (4)$$

여기서 d, e, f 는 회귀분석에서 얻어지는 상수이다.

위의 식에서 포장깊이 $z=0$ 에서는 포장체의 표면온도가 되므로 상수 f 는 대기온도에 따른 포장표면온도인 식 (1)의 T_{SS} 가 된다. 상수 d, e 는 측정 시간대별로 계측된 모든 자료를 회귀분석함으로써 얻을 수 있는데, 회귀분석하여 얻은 상수 d, e 를 각각 대기온도에 따라 도시하면 각각 그림 21~22와 같다.

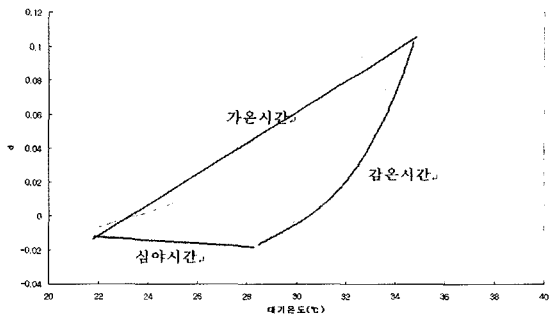


그림 21. 회귀상수 d 와 대기온도의 상관관계

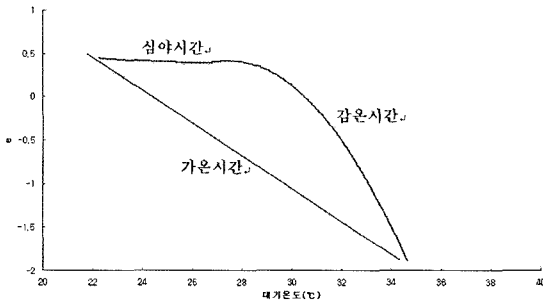


그림 22. 회귀상수 e 와 대기온도의 상관관계

그림 21~22에서 보는 바와 같이 3개 유형의 관계를 보여 주고 있다. 이를 시간대별로 분석하면 7시부터 12시까지의 대기온도가 상승하는 가온시간대, 12시부터 19시까지는 대기온도가 감소하는 감온시간대, 19시부터 익일 7시까지는 대기온도 변화가 적은 심야시간대로 나누어지게 된다. 따라서 상수 d 와 e 를 가온시간대, 감온시간대, 심야시간대의 3개의 시간대로 나누어 대기온도에 따른 관계식을 얻기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석하여 얻은 회귀상수 d , e 와 습식교반경화토포장의 표면온도식인 식 (1)을 식 (4)에 대입하면 습식교반경화토포장의 시간대별 포장체 임의의 깊이에서의 내부온도 추정식을 다음 식과 같이 제안할 수 있다.

가온시간대:

$$T_s = (0.0092T_a - 0.214)\left(\frac{z}{t}\right)^2 - (0.1889T_a + 4.61)\left(\frac{z}{t}\right) + (0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4) \quad (R^2 = 0.96)$$

감온시간대:

$$T_s = (0.0027T_a^2 - 0.153T_a + 2.15)\left(\frac{z}{t}\right)^2 - (-0.0454T_a^2 + 2.4962T_a - 33.93)\left(\frac{z}{t}\right) + (0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4) \quad (R^2 = 0.95)$$

심야시간대:

$$T_s = (-0.0009T_a + 0.008)\left(\frac{z}{t}\right)^2 - (0.0034T_a^2$$

$$-0.1797T_a + 2.74)\left(\frac{z}{t}\right) + (0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4) \quad (R^2 = 0.50)$$

7. 결론

본 연구에서는 시험포장에서 측정한 온도 자료를 이용하여 기존 포장형식과 습식교반경화토포장의 온도변화를 비교분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대기온도 변화에 따른 포장체 내부온도 변화는 아스팔트콘크리트포장에서 가장 큰 변화를 나타내는 반면, 습식교반경화토포장에서는 큰 변화를 보이고 있지 않으며, 포장내부의 온도경사는 아스팔트콘크리트포장이 가장 완만하며 시멘트콘크리트포장과 습식교반경화토포장은 비슷한 기울기를 가지는 것을 알 수 있었다. 시멘트콘크리트포장의 경우 온도경사는 급한 반면에 내부온도가 습식교반경화토포장에 비해 높은 것을 볼 때 흡수된 열량이 습식교반경화토포장에 비해 많다는 것을 알 수 있었다. 또한 습식교반경화토포장의 두께가 두꺼워질수록 흡수하는 열량이 더욱 작아짐을 알 수 있었다. 이는 습식교반경화토포장이 온도특성이 우수하며 자연친화적 포장형식이라는 것을 나타내는 것이다.
- (2) 대기온도(T_a , 20℃~39℃)에 따른 각 포장의 표면온도(T_{SS}, T_{PC}, T_{AC})는 다음과 같은 2차 함수관계가 있음을 알 수 있다.

$$T_{SS} = 0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4 \quad (R^2 = 0.97)$$

$$T_{PC} = 0.0827T_a^2 - 2.917T_a + 48.5 \quad (R^2 = 0.89)$$

$$T_{AC} = 0.1022T_a^2 - 3.6729T_a + 58.1 \quad (R^2 = 0.91)$$
- (3) 습식교반경화토포장의 내부온도는 대기온도에 따라 3개의 시간대인 가온시간대, 감온시간대,



심야시간대에서 깊이별 온도변화 특성이 다르게 나타나고 있으며, 각 시간대별 대기온도에 따른 포장두께로 정규화된 깊이(z/t)에서의 온도가 다음 식과 같음을 알 수 있다.

가을시간대:

$$T_s = (0.0092T_a - 0.214)\left(\frac{z}{t}\right)^2 - (0.1889T_a + 4.61)\left(\frac{z}{t}\right) + (0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4) \quad (R^2 = 0.96)$$

잠운시간대:

$$T_s = (0.0027T_a^2 - 0.153T_a + 2.15)\left(\frac{z}{t}\right)^2 - (-0.0454T_a^2 + 2.4962T_a - 33.93)\left(\frac{z}{t}\right) + (0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4) \quad (R^2 = 0.95)$$

심야시간대:

$$T_s = (-0.0009T_a + 0.008)\left(\frac{z}{t}\right)^2 - (0.0034T_a^2 - 0.1797T_a + 2.74)\left(\frac{z}{t}\right) + (0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4) \quad (R^2 = 0.50)$$

참고문헌

1. Akiyama, M., Investigations of Temperature in Bituminuos Pavement, 246호, 일본토목학회 논문집
2. Barber, E. S., 1957, Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports, No. 168, *HRB Bull*
3. Dickinson, E. J., 1978, A Method for Calculating the Temperature Gradients in Asphalt Concrete Pavement Structures Based on Climatic Data, Vol. 8 No. 4, *ARR*
4. Jamshid M. Armaghani, Torbjorn J. Larsen, and Lawrence L. Smith, 1987, Temperature Response of Concrete Pavements, *TRB, Transportation Research Record 1121*
5. Shao, L., Park, S. W., and Kim, Y. R., A Simplified Procedure for Prediction of Asphalt Pavement Subsurface Temperatures Based on Heat Transfer Theories, *76th Annual Meeting of the TRB Washington D. C.*
6. Stock, A. F., Brown, S. F. and Brunton. J. M., 1988, Traffic and Temperature Considerations for Structural Computations on Asphalt Pavements, *Proceedings 14th ARRB Conference Part 8*
7. Straub, A. L., Schenck, J. R. H. N., and Przybycien, F. E., 1968, Bituminous Pavement Temperature Related to Climate, *HRB256*
8. 이광호, 김수일, 1992, "남한의 아스팔트 콘크리트 설계온도 추정에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제 12권, 제2호, pp.77-85
9. 이경하, 1996, "아스팔트 혼합물의 회복탄성계수 추정모델 개발", 성균관대학교 박사학위 논문

〈접수 : 2005. 10. 6〉