

온도특성분석을 위한 습식교반경화토포장의 계측연구

A Measurement Study on Temperature Property of Wet-Mixing Solidified Soil Pavement

유지형* · 이승원** · 서동혁*** · 김대성****

Yoo, Ji Hyeung · Lee, Seung Won · Shu, Dong Hyuk · Kim, Dae Sung

1. 서론

산업이 발전함에 따라 전세계적으로 도시화가 빠르게 진행되고 있다. 이러한 도시화는 녹지의 감소, 도로 포장율의 증가, 도시 하천의 복개 등 지표면의 피복상태를 변화시키고 도시 구조물을 증가시킨다. 따라서 대기 환경의 복합적인 작용으로 인하여 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 냉방비와 노약자 사망률을 증가시키는 등 인간 생활에 많은 영향을 미치고 있으며, 이는 도시 기후의 문제점으로 지적되고 있다. 또한 지속적인 건설 산업의 성장으로 다량의 건설폐기물을 양산하게 되었고, 이로 인한 환경문제가 심각하게 대두되고 있다. 콘크리트와 아스팔트 같은 건설폐기물의 유해한 성분들이 환경에 미치는 영향이 제기되면서 최근에 인체에 무해하고 친환경적인 흙을 건설재료로 사용하는데 관심을 갖게 되었다. 특히 공원 산책로, 농로, 관광지 도로, 자전거 전용도로 등과 같이 사람들이 도보로 이용하는 도로에서는 환경친화적인 포장에 요구되고 있다.

본 연구에서는 도시 온도 상승의 원인 중 하나인 아스팔트 콘크리트포장, 시멘트 콘크리트포장과 환경친화적인 습식교반경화토포장의 온도특성을 비교 연구하여 습식교반경화토포장의 온도특성을 검증함으로써, 도시지역 온난화 현상을 조금이나마 완화시켜 쾌적한 도시생활 환경을 만들 수 있게 하는데 그 목적이 있다.

2. 시험포장 및 온도계측

2.1 시험포장

본 연구에서는 대기온도에 따른 습식교반경화토포장의 온도특성을 도출하기 위해서 아스팔트 콘크리트와 시멘트 콘크리트, 습식교반경화토를 이용하여 포장형식에 따라 5개의 포장면을 포설하였다. 습식교반경화토포장은 두께가 상이한 3개면을 포설하고, 아스팔트 콘크리트포장과 시멘트 콘크리트포장은 온도특성을 비교하기 위하여 각각 1개면씩 포설하였다. 아스팔트 콘크리트포장과 시멘트 콘크리트포장은 노체를 잘 다지고 그 위에 각각 3m×3m×20cm 크기와, 1m×1m×20cm의 크기로 포설하였다. 시멘트 콘크리트포장은 입도, 농도 등의 도로에 일반적으로 사용되는 압축강도 19.61MPa(200 kgf/cm²)의 무근콘크리트를 사용하였으며, 아스팔트 콘크리트포장은 AP-3(침입도 80~100)를 사용하였다. 본 연구의 대상 포장형식인 습식교반경화토포장의 크기는 3m×3m로 하고, 두께는 시공경험을 토대로 15cm를 기준으로 10cm, 15cm, 20cm로 변화시켜 3개의 면을 포설하였다.

* 정희원 · 경일대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 053-850-7227(E-mail:jhyoo@kiu.ac.kr)

** 정희원 · 경북대학 토목설계과 교수 · 공학박사 · 031-539-5360(E-mail:swlee@kyungbok.ac.kr)

*** (주)학성건설엔지니어링 대표이사 · 공학박사 · 053-475-4080(E-mail:haksung01@hanmail.net)

**** 경일대학교토목공학과 석사과정 · 공학사 · 053-850-7235(E-mail:kimds@kiu.ac.kr)



2.2 온도계측

온도측정을 위해서는 미국 YSI Incorporated에서 만든 온도센서(Thermistor YSI44005)를 사용하여 포장체 온도를 측정하였으며, 깊이에 따른 포장내부온도 측정을 위해 온도센서를 사전에 제작한 고정거치대에 고정하여 매설하였다. 그리고 본 시험포장의 계측시스템으로 보다 정확한 계측 및 안정적인 데이터 수집을 위하여 자동화계측 시스템을 구축하여, 습식교반경화토포장의 온도특성과 기존 포장형식인 아스팔트 콘크리트포장과 시멘트 콘크리트포장에 대한 비교를 위하여 2004년 7월 10일부터 8월 9일까지 10분 단위로 온도를 자동 계측하였다. 시험포장에서 계측된 온도자료 중 대기온도가 높으며 안정적으로 계측된 2004년 7월 11일, 7월 31일, 8월 8일의 온도 계측자료로부터 습식교반경화토포장의 온도특성을 분석하였다.

3. 습식교반경화토포장의 온도특성

다음 그림 1은 온도 계측자료 중 대표적인 것으로 7월 31일 포장두께 20cm인 습식교반경화토포장에서 시간대별로 측정된 깊이별 온도를 각각 나타낸 것이다.

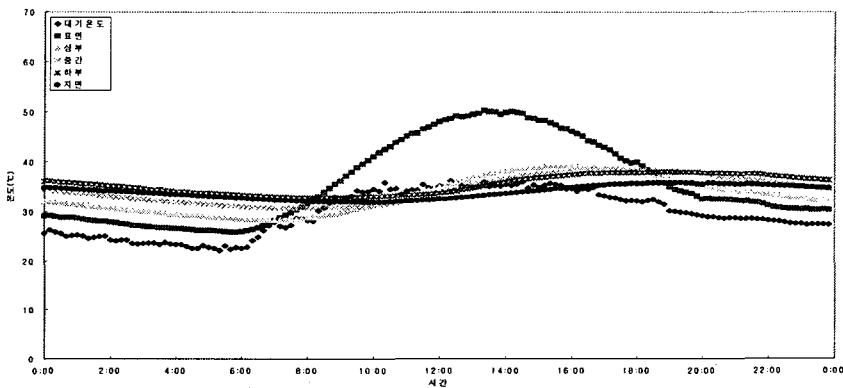


그림 1. 습식교반경화토포장의 시간에 따른 깊이별 온도
(t=20cm ; 2004년 7월 31일 계측)

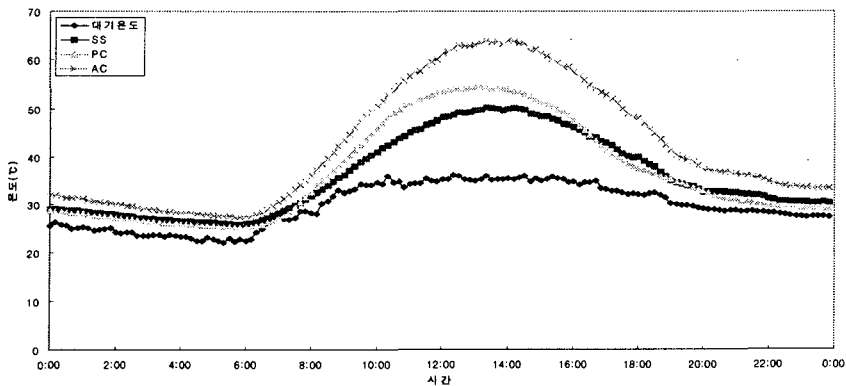


그림 2. 포장형식에 따른 시간대별 포장표면온도

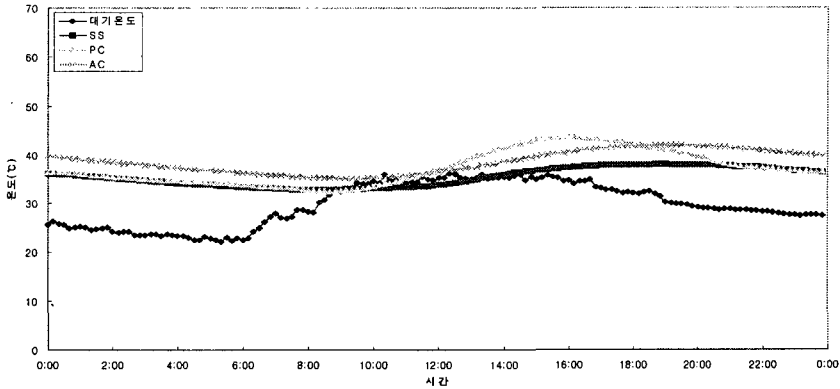


그림 3. 포장형식에 따른 시간대별 포장체 하부온도

또한 그림 2에서 보는 바와 같이 대기온도는 하루 중 12시에서 오후 2시에 가장 높으며, 포장형식에 관계 없이 포장표면온도 또한 대기온도와 같은 시간대별 온도변화를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 그림 3에서 보는바와 같이 포장체 내부온도는 깊어질수록 최고온도 시간대가 12시에서부터 늦어져 포장층 하부에서는 오후 4시에서 오후 6시 사이에 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 포장체 내부온도 변화는 아스팔트콘크리트포장이 가장 크고, 습식교반경화토포장에서는 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이는 습식교반경화토포장 온도특성면에서 기후환경에 미치는 영향에 유리한 것을 보여주고 있는 것이다.

그리고 다음 그림 4는 습식교반경화토포장의 대기온도와 포장표면온도의 관계를 도시한 것인데, 그림에서 보는 바와 같이 대기온도가 증가함에 따라 포장표면온도가 상승하고 있으며, 2차 함수관계로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

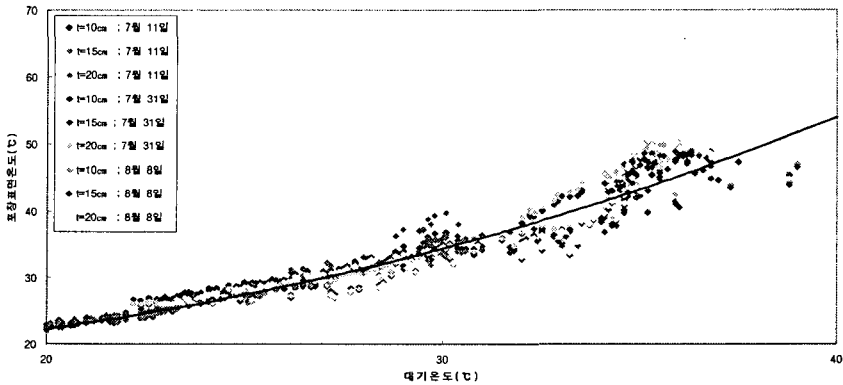


그림 4. 습식교반경화토포장의 대기온도와 포장표면온도의 관계

따라서 습식교반경화토포장의 대기온도와 포장표면온도 계측 자료를 회귀분석하여 결정계수가 90%이상인 다음 식을 얻었다.

$$T_{SS} = 0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4$$

여기서, T_{SS} 는 습식교반경화토포장의 표면온도이고, T_a 는 대기온도이다.

다음 그림 5는 시간에 따른 습식교반경화토포장의 내부온도중 대표적인 것이다. 포장형식에 따라 하루 동안의 온도변화 폭이 다르게 나타나는데, 아스팔트 콘크리트포장이 온도의 변화폭이 가장 크게 나타났다. 반면에 습식교반경화토포장은 포장체의 표면 아래 2cm 밑으로는 지면의 온도와 큰 차이를 보이지 않는 것을 볼 때, 포장체 자체가 흡수하는 열량이 상당히 작다는 것을 알 수 있다.

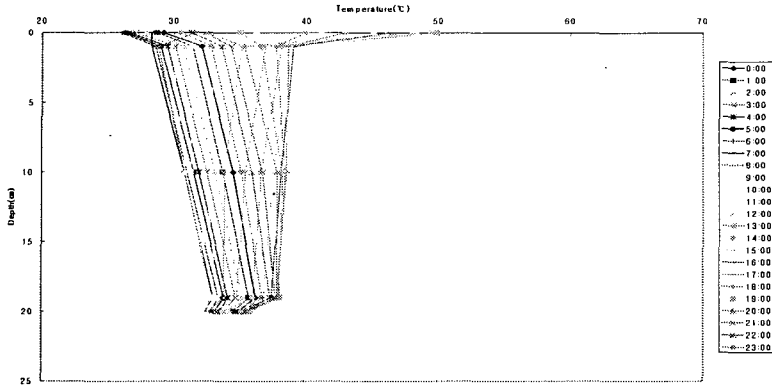


그림 5. 습식교반경화토포장 시간-포장온도-깊이(t=20cm ; 7월 31일)

포장체의 내부온도 변화는 포장 재료의 열전도 특성에 의존하게 될 것이다. 대기온도에 따른 포장체 깊이 별 온도특성을 살펴보기 위하여 본 연구의 시험포장에서 측정된 온도자료 중 대표적인 것으로서 대기온도가 최고인 시점에서 포장체 깊이별 온도 계측결과중 중 대표적인 것을 도시한 것이 다음 그림 6이다. 그림에서 포장의 깊이는 포장두께, l 로 정규화한 z/l 로 나타내었다.

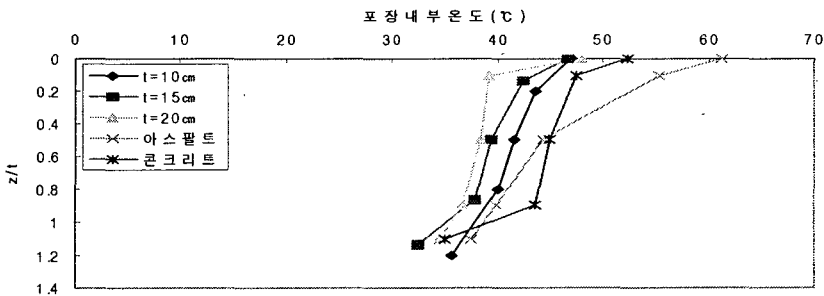


그림 6. 포장내부온도 분포(대기온도 39℃, 2004년 8월 8일 측정)

그림 6에서 보는 바와 같이 온도경사는 아스팔트 콘크리트포장이 가장 완만하며 시멘트 콘크리트포장과 습식교반경화토포장은 비슷한 기울기를 가지는 것을 알 수 있다. 시멘트 콘크리트포장의 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. 그리고 포장체 깊이에 따라 포장체 내부온도가 감소하는 온도경사를 보여주고 있으며, 포장체 임의 깊이에서의 온도



는 다음 식과 같이 포장두께로 정규화된 깊이($\frac{z}{t}$)의 2차 함수로 나타낼 수 있을 것이다.

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

여기서, d , e , f 는 회귀분석에서 얻어지는 상수이다.

식에서 포장깊이 $z=0$ 에서는 포장체의 표면온도가 되므로 상수 f 는 대기온도에 따른 포장표면온도가 된다. 상수 d , e 는 측정시간대별로 계측된 모든 자료를 회귀분석함으로써 얻을 수 있다. 이를 시간대별로 분석 즉, 대기온도가 상승하는 가온시간대, 대기온도가 감소하는 감온시간대, 대기온도 변화가 적은 심야시간대의 3개의 시간대로 나누어 대기온도에 따른 관계식을 얻기 위하여 회귀분석을 실시하여 습식교반경화토포장의 시간대별 포장내부온도 추정식을 다음과 같이 얻었다.

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

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

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

4. 결론

본 연구에서는 기존 포장형식인 아스팔트 콘크리트포장과 시멘트 콘크리트포장, 습식교반경화토포장의 시험포장을 실시하여 각 포장체에 포장표면, 상부, 중간, 하부, 지면에 온도센서를 매설하여 자동계측을 수행함으로써 기존 포장형식과 습식교반경화토포장의 온도변화를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

대기온도 변화에 따른 포장체 내부온도 변화는 아스팔트 콘크리트포장에서 가장 큰 변화를 나타내는 반면, 습식교반경화토포장에서는 큰 변화를 보이지 않았으며, 포장내부의 온도경사는 아스팔트 콘크리트포장이 가장 완만하며 시멘트콘크리트포장과 습식교반경화토포장은 비슷한 기울기를 가지는 것을 알 수 있었다. 시멘트 콘크리트포장의 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.

대기온도(T_a)에 따른 습식교반경화토포장 포장의 표면온도(T_{ss})는 다음 식과 같은 2차 함수관계가 있음을 알 수 있었다.

$$\text{습식교반경화토포장 ; } T_{ss} = 0.0373T_a^2 - 0.6525T_a + 20.4$$

습식교반경화토포장의 내부온도는 대기온도에 따라 3개의 시간대인 가온시간대, 감온시간대, 심야시간대에서 깊이별 온도변화 특성이 다르게 나타나고 있으며, 각 시간대별 대기온도에 따른 포장두께로 정규화된



깊이($\frac{z}{t}$)에서의 온도가 다음 식과 같음을 알 수 있었다.

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

$$\begin{aligned} \text{감온시간대 ; } T_s = & (0.0027 T_a^2 - 0.153 T_a + 2.15) \left(\frac{z}{t}\right)^2 - (-0.0454 T_a^2 + 2.4962 T_a - 33.93) \left(\frac{z}{t}\right) \\ & + (0.0373 T_a^2 - 0.6525 T_a + 20.4) \end{aligned}$$

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

참고문헌

1. 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.
2. Jamshid M. Armaghani, Torbjorn J. Larsen, and Lawrence L. Smith(1987). "Temperature Response of Concrete Pavements.", TRB, Transportation Research Record 1121.
3. 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.
4. 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.
5. Straub, A. L., Schenck, J. R. H. N., and Przybycien, F. E.(1968). "Bituminous Pavement Temperature Related to Climate.", HRB256.