



# 도로포장 재료의 상대습도 측정에 의한 수분변화 특성 분석 기초 연구

## Pilot Investigation on Moisture Variation Aspects in Pavement Materials Based on Relative Humidity Measurements

김 성 민\*      박 희 범\*\*      조 병 휘\*\*  
Kim, Seong Min      Park, Hee Beam      Cho, Byoung Hooi

### Abstract

This study was conducted to investigate whether the moisture variation aspects in pavement materials can be analyzed based on the convenient and reliable relative humidity (RH) measurement techniques. First, the ambient RH was measured using various sensors and the accuracies and calibration methods of the sensors were examined. Then, the RH of a cement mortar specimen was measured using the reliable sensors and the data was analyzed. In addition, the feasibility of using the RH measurement sensors to analyze the permeability of pavement materials was investigated. From this study, it was found that the Hygrochron was the most appropriate sensor to measure the RH of pavement materials, and the proper installation and calibration methods were developed. The RH of the cement mortar specimen tended to approach the ambient RH and was not much affected by the variation of the ambient RH. The specimen's RH variations at the surface and at the center showed a clear time lag. The RH measurement sensor was also found to be an appropriate tool for water permeability tests, and the methodologies to evaluate the permeability of pavement materials were proposed.

**Keywords:** pavement materials, relative humidity, permeability, calibration, cement mortar, asphalt, concrete

### 요 지

본 연구는 도로포장 재료의 상대습도를 편리하고 신뢰성 있게 측정할 수 있는 방법을 파악하여 도로포장 재료의 수분 변화 특성을 분석할 수 있는 가능성을 연구하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 먼저 대기의 습도를 여러 가지의 센서를 이용하여 측정한 후 비교 분석하여 센서의 정확성 및 측정치의 보정 방법에 대한 연구를 수행하였으며 신뢰성이 확인된 센서를 이용하여 시멘트 몰탈 시편의 초기 경화 과정 및 실외 상태에서의 습도를 측정하여 분석하였다. 또한 습도 측정용 센서를 이용하여 도로포장 재료의 투수성을 분석할 수 있는 몇 가지 방법에 대한 기초 실험도 수행하여 습도 측정을 통해 재료의 투수 특성 분석 가능성도 시험하였다. 연구 결과 Hygrochron을 이용하여 도로포장 재료의 습도를 측정하는 것이 여러 측면에서 유리한 것으로 판단되었으며 이러한 센서를 장착하는 방법 및 측정값을 보정하는 방법을 파악하였다. 몰탈 시편은 시편의 습도가 대기 습도의 증가 또는 감소하는 추세에 따라 변화하기 보다는 대기 습도에 접근하는 방향으로 변화한다는 것을 알았으며, 시편의 표면과 내부에서의 습도변화에는 확연한 지연이 생기는 것도 발견하였다. 또한 습도 측정용 센서는 도로포장 재료의 투수성을 측정하기에도 매우 적합하며 습도 측정값을 이용하여 재료의 투수 속도를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

**핵심용어:** 도로포장 재료, 상대습도, 투수성, 보정, 시멘트 몰탈, 아스팔트, 콘크리트

\* 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수 · 공학박사  
\*\* 정희원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정



## 1. 서론

도로포장의 파손 형태는 차량하중과 함께 온도 및 습도 변화 등의 환경하중에 대하여 도로포장이 어떻게 거동하는지에 따라 좌우 된다. 일반적으로 차량하중이 파손의 대부분을 야기 하리라 생각하기 쉽지만 상당히 많은 종류의 파손은 환경하중에 의해 야기되고 있다. 콘크리트포장의 경우, 표면건조수축균열 등의 대부분의 초기 파손은 환경하중에 의해 발생되며 그 외의 스폴링, 편치아웃, 내부수평균열 등의 파손도 건설 초기의 환경하중에 의한 손상이 차량하중에 의한 영향과 혼합되어 발생하는 경우가 대부분이다 (Kim and Won, 2004). 아스팔트포장의 경우도 환경하중에 의한 손상이 심각한 경우를 흔히 볼 수 있다. 특히, 동결-융해에 의한 아스팔트 혼합물의 수분 손상은 아스팔트포장의 주요 파손 중의 하나인 포트홀을 발생시키는 원인이 된다 (황성도, 2006). 이러한 여러 종류의 파손은 도로포장의 수명을 설계수명보다 크게 단축시킬 수 있다. 예를 들어 30년의 수명을 예상으로 설계하고 시공한 콘크리트 도로가 잦은 균열 및 스폴링 때문에 10년쯤 후에 대규모 보수공사를 하게 되는 경우이다. 이러한 보수공사는 엄청나게 많은 비용의 낭비를 야기한다. 공사비용 뿐 만 아니라 공사기간 중에 사용자가 겪는 불편함을 더하면 전체 손실은 매우 커지게 된다 (Trevino, 1996; Trevino et al., 2005).

환경하중 중에 온도는 측정이 대체로 용이 하기 때문에 온도하중에 의한 포장의 거동에 대해서는 연구가 활발히 진행 중에 있으나 (Schindler, 2002; Kim et al., 2005; Nam et al., 2006) 수분변화 또는 습도는 중요성을 인식하면서도 적절한 측정 및 적용방법에 어려움이 있어서 매우 초보적인 연구가 진행되고 있는 실정이다 (Jeong and Zollinger, 2003; Kim et al., 2005). 특히, 콘크리트포장은 콘크리트 타설 후 며칠 동안의 최적의 양생 조건을 만족해 주어야 양생의 문제에서 비롯될 수 있는 많은 파손을 방지할 수 있다. 양생이 잘못되어 수분의 손실이 생기면

건조수축이 급격하게 발생하여 표면에 생기는 초기 균열 뿐 만 아니라 추후에 매우 깊은 깊이의 스폴링 등을 야기하게 된다. 따라서 도로포장의 장기 공용성을 확보하기 위해서는 수분변화를 적절하게 측정함으로써 온도와 더불어 습도가 포장의 거동에 미치는 영향을 분석하는 연구가 매우 필요시 되고 있다.

본 연구의 목적은 시멘트 및 아스팔트 등의 도로포장에 쓰이는 재료의 수분변화 또는 습도를 측정하여 도로포장의 거동 및 수분과 연관된 특성을 파악하기 위한 연구의 기초 과정으로 습도를 편리하며 신뢰 있게 측정하는 방법을 연구하여 도로포장 재료에 적용할 수 있는 가능성을 파악하는데 있다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 여러 가지의 습도 측정용 센서를 이용하여 대기 및 시멘트 몰탈, 아스팔트, 콘크리트, 점토 등의 시편에 대한 습도를 측정하여 타당한 측정법을 파악하고 초기 수분 변화 및 수분의 투수성 등을 측정하여 이러한 습도 측정 방법의 타당성 및 적용성을 확인하였다. 본 논문에서 이러한 과정을 자세히 설명하였다.

## 2. 대기 습도 측정

콘크리트 또는 아스팔트 등의 도로포장 재료의 습도를 측정하기 전에 습도 측정용 센서의 대기 중 습도 측정의 정확성을 파악하는 것이 중요한 과정이라고 할 수 있다. 왜냐하면 대부분의 습도 측정용 센서는 대기 중의 공기에 포함된 습도를 측정하기 위하여 개발된 것이며 이를 수정 및 보완하여 도로포장 재료의 습도를 측정하는데 사용할 것이기 때문이다. 만약에 대기 중의 습도의 값을 다른 종류의 센서가 비슷하게 측정한다면 이러한 센서는 도로포장 재료의 습도 측정에도 이용할 수 있다고 할 수 있다.

대기의 습도를 가장 정확히 측정할 수 있는 방법은 Chilled Mirror 센서를 이용하는 것이다. 이러한 장비는 작은 거울을 포함하는 센서의 온도를 점진적으로 낮추면서 거울에 이슬이 생기는 온도를 파악하여

습도를 찾아내는 방식을 사용하기 때문에 습도 측정이 매우 정확하다고 할 수 있다. 하지만 이러한 센서는 소형이 아니며 한 개의 세트 당 가격이 약 일천만원 정도로 매우 비싸기 때문에 광범위한 연구에 사용하기에는 그리 쉽지가 않다. 따라서 일상적으로 많이 쓰이는 소형 콘덴서 형태의 습도 측정 센서를 이용하는 것이 보다 경제적이며 타당한 것으로 판단된다. 이러한 콘덴서 형태의 센서도 판매 전에 Chilled Mirror 센서와의 조율을 통해 오차의 범위가 그리 크지 않도록 하고 있다. 물론 오차의 범위가 작을수록 가격도 상승하는 것이 일반적이다. 대체적으로 허용오차는 5% 이내가 대부분이지만 정확성을 요구하는 곳에 사용되는 센서는 오차의 범위를 1 내지 2% 이내로 제한하여 판매하는 것도 있다.

본 연구에서는 4개 회사의 제품을 선정하여 대기의 습도 변화를 측정하여 비교하였다. 4개의 회사 제품은 Springfield 사의 센서, Acurite 사의 센서, Vaisala 사의 HM-44 센서, 그리고 Dallas Semiconductor 사의 Hygrochron이다. Springfield 사의 센서는 일상적으로 습도를 측정하여 시계처럼 보여주는 제품에 흔히 사용되는 센서이다. Acurite 사의 센서도 일상적으로 쓰이는 센서이며 본 연구에서는 본체에 부착되어 있는 센서 한 개와 무선으로 본체에 데이터를 송신하는 센서 한 개 등 모두 두 개의 Acurite 센서를 사용하였다. Vaisala 사의 HM-44는 대기 및 콘크리트의 습도를 측정할 수 있도록 고안된 센서이다. Dallas Semiconductor 사의 Hygrochron은 다른 센서에 비해 가장 큰 특징은 소형이면서도 자체에 메모리와 전지를 포함하고 있어서 특별한 입출력 장비가 따로 없이 자체적으로 데이터를 측정하여 보관하고 있다는 것이다. 데이터를 내려 받거나 측정에 대한 명령은 컴퓨터를 연결하여 통제할 수 있다. 본 실험에서는 5개의 Hygrochron을 사용하여 대기의 습도를 측정하였다. 그림 1은 본 연구에 사용된 습도 측정용 센서를 보여준다. 가장 왼쪽의 장비가 Springfield 사의 센서이고 그 옆의 뒤와 앞에 있는 장비가 Acurite의 본체와 무선용 센서

를 각각 보여주며, 그 옆이 Vaisala의 HM-44 장비이며, 가장 오른쪽의 수은전지처럼 보이는 것이 Hygrochron 이다.



그림 1. 습도 측정용 센서

실내 실험으로써 먼저 실내에서 물을 끓여서 습도를 점차 높인 후 문을 열어 환기를 급격히 시키고 난 후 다시 문을 닫아서 실내의 습도를 유지하는 과정 위에서 언급한 습도 측정 센서를 이용하여 측정하여 비교 분석하였다. 그림 2는 이러한 실험의 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 센서가 측정한 습도 변화는 유사한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 하지만 습도의 측정값은 서로 간에 어느 정도 차이가 있는 것을 알 수 있다. Acurite의 경우는 두 개의 센서의 측정값이 5% 이상 서로 차이가 나는 것을 알 수 있다. Hygrochron으로 측정한 결과는 5개의 Hygrochron을 이용하여 구한 측정값의 평균을 보여주며, 그림 3에 나타난 바와 같이 Hygrochron 간의 습도 측정값은 매우 근사한 것을 알 수 있다. 또한 Springfield와 Acurite 센서는 실험 후 약 60분 후에 발생한 급격한 습도의 변화를 민감하게 측정하지 못하는 것을 쉽게 알 수 있다. Hygrochron과 Vaisala의 센서는 급격한 습도의 변화를 측정하는데도 적합한 것을 알 수 있다. 따라서 센서 서로 간의 오차가 크지 않으며 습도 변화에도 민감한 측정값을 보여 주며 위에서 이미 언급한 바와 같이 소형이며 메모리와 전지를 내장하고 있는 Hygrochron을



이용하여 대기 및 도로포장 재료의 습도를 측정하는 것이 가장 적합하다는 판단을 하였으며 이러한 센서를 이용하여 구한 습도 측정값의 검증을 위하여 Vaisala의 HM-44도 사용하기로 하였다.

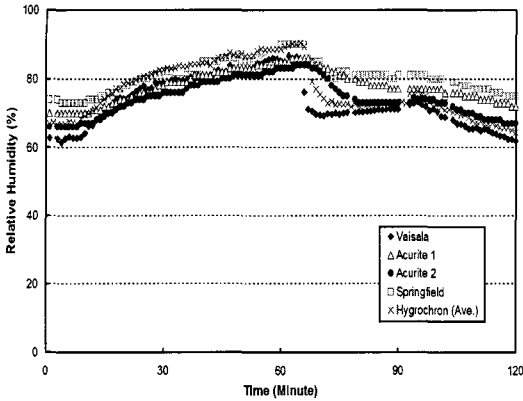


그림 2. 센서별 대기 습도 측정값 비교

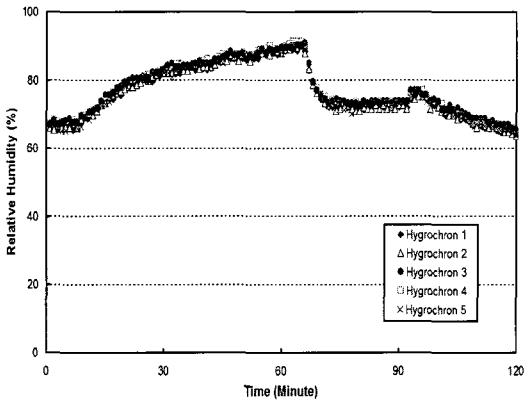


그림 3. Hygrochron 간의 습도 측정값 비교

실내에서 습도를 변화시키며 실험을 수행한 후에 Hygrochron과 Vaisala 센서를 실외에 두고 실외의 대기 습도를 측정하여 비교하였으며 그림 4에 결과를 나타내었다. Hygrochron은 습도 측정 시에 두 가지의 다른 정밀도인 8bit와 12bit를 선택할 수 있도록 되어있기 때문에 이러한 정밀도가 습도 측정값에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 두 개의 Hygrochron을 이용하여 다른 정밀도로 측정을 수행하였다. 8bit로 측정을 하면 0.6%의 정밀도로 측정을 하도록 되어있으며 12bit는 0.04%의 정밀도로

측정을 하게 된다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Hygrochron의 정밀도는 습도 측정값에 영향을 거의 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이번 결과에서도 실내 실험 결과와 마찬가지로 Hygrochron과 Vaisala 센서 간의 습도 측정값의 절대값은 약간의 차이가 있지만 습도가 변화하는 추세는 거의 동일하게 측정하는 것을 알 수 있다. 따라서 센서의 측정값을 보정 과정을 통하여 수정함으로써 더욱 정확한 습도 측정값을 얻는 것이 필요하다.

습도 측정 센서의 측정값을 보정하는 방법으로는 물론 Chilled Mirror 센서를 이용하여 여러 다른 습도에서의 콘덴서 형태의 습도 측정용 센서의 오차를 파악하여 이를 보정해 주는 것이 가장 정확한 보정이라고 할 수 있지만 이를 위해서는 많은 시간과 비용을 할애해야 하기 때문에 좀 더 편리하며 실용적인 방법을 본 연구에서 사용하였다.

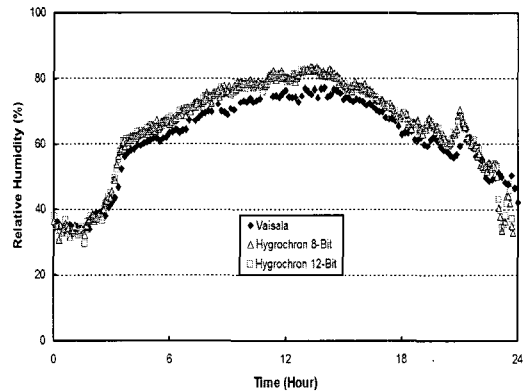


그림 4. Hygrochron 과 Vaisala 간의 대기습도 측정값 비교

우선 습도 측정 시에 가장 확실한 상황은 물속이나 증기로 가득 찬 밀폐된 공간은 습도가 100% 이라는 것이다. 따라서 그림 5에 보인 바와 같이 물통에 물을 어느 정도 담고 여기에 습도 측정 센서를 넣은 후에 물통 입구를 막아서 물의 외부로의 증발을 억제한다. 그러면 물통 내부의 습도는 결국 100%가 되어야 한다. 만약에 센서의 측정값이 100%를 넘어서 수렴하면 100%를 초과한 습도의 값만큼을 측정값에서 빼줌으로써 보정된 측정값을 얻을 수 있다. 만



약에 습도의 수렴값이 100%가 되지 않으면 100%에 모자란 습도를 측정값에 더해줌으로써 보정된 측정값을 얻을 수 있다. 예를 들어, 습도의 수렴값이 103%이면 이러한 센서를 이용하여 측정된 습도는 3%를 빼준 값을 보정된 습도값으로 한다. 즉, 이 센서의 습도 측정값이 80%이면 3%를 뺀 77%를 보정된 습도값으로 한다. 물론 이러한 방법에서의 가정은 어느 한 센서가 측정된 습도는 100%에서의 오차가 다른 습도 범위에서도 항상 일정한 오차로 적용된다는 것이다.

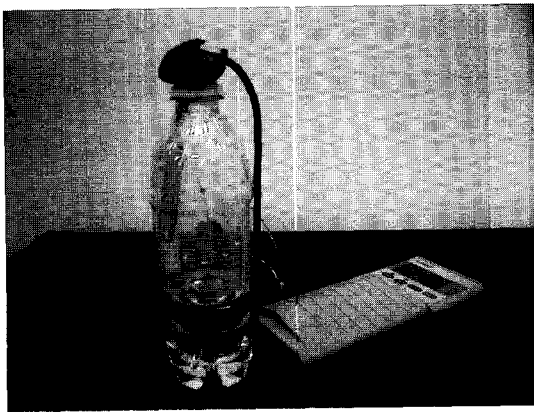
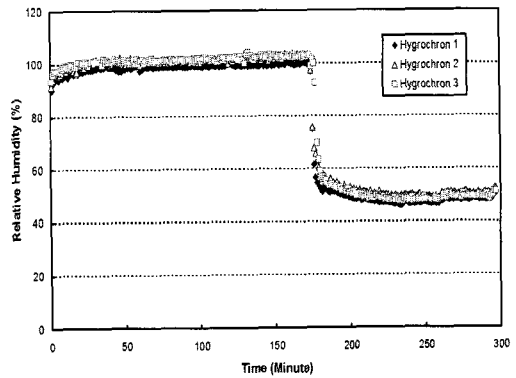


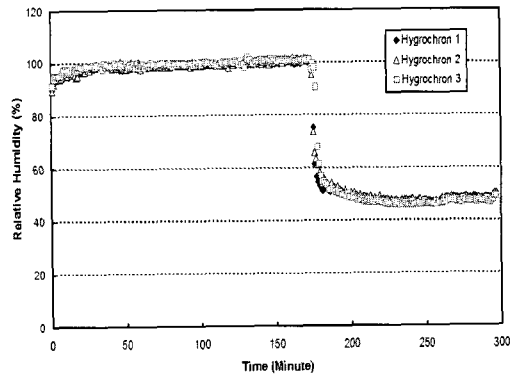
그림 5. 조율을 위한 실험

Hygrochron과 Vaisala 센서의 습도 측정값을 위에서 설명한 방법을 이용하여 보정하는 과정을 그림 6과 7에서 보여준다. 그림 6(a)는 3개의 Hygrochron을 위에서 설명한 방법으로 물통에 넣어서 습도를 측정한 결과를 보여 준다. 습도가 100% 근처에서 수렴한 후에는 물통에서 센서를 꺼내서 실내에 놓아두어 잠시 실내의 습도를 측정하도록 한다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 센서 간의 습도 측정값이 크게 차이가 나지는 않지만 센서 2번과 3번에서는 약 102%의 습도에서 수렴하는 것을 알 수 있으며 센서 1번은 100%에 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 오차는 실내 습도인 약 50% 정도에서도 거의 같이 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 센서 1번은 보정할 필요가 없으며 센서 2번과 3번은 2%의 습도를 측정값에서 빼주어 보정을 한다. 보정

을 한 결과는 그림 6(b)에서 보여 준다. Hygrochron은 습도 측정 오차가 센서 간에 그리 크지는 않지만 보정을 하면 센서 간에 거의 일치하는 습도 측정값을 얻을 수가 있다.



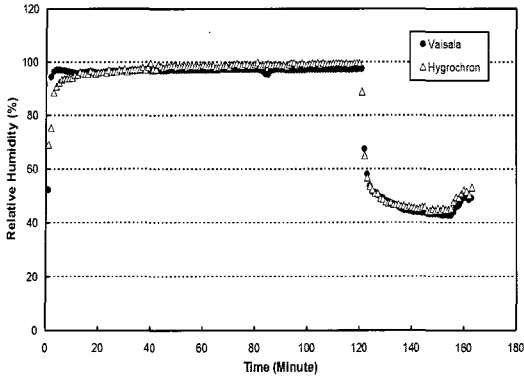
(a) 보정 전



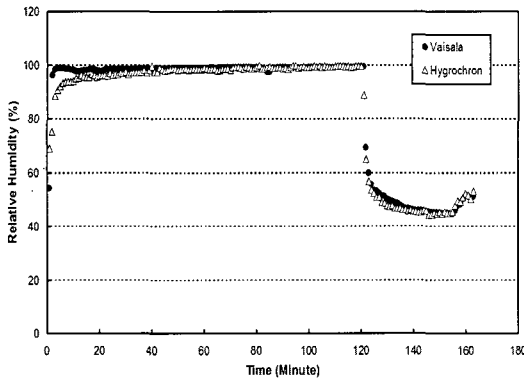
(b) 보정 후

그림 6. Hygrochron의 습도 측정 보정

Vaisala 센서의 측정값도 같은 방법으로 보정을 하여 Hygrochron의 습도 측정값과 비교를 하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)는 보정을 하지 않은 Vaisala의 습도 측정값을 보여 준다. 습도의 수렴값이 98%로 측정되며 100%에는 2%가 모자라는 것을 알 수 있다. 따라서 이 경우에는 Vaisala의 습도 측정값은 2%를 더해서 보정을 한다. 보정을 한 결과는 그림 7(b)에서 보여주며 Hygrochron의 습도 측정값과도 거의 일치하는 것을 알 수 있다.



(a) 보정 전



(b) 보정 후

그림 7. Vaisala 센서의 습도 측정 보정

이러한 습도 측정 보정 방법을 이용하여 그림 2에서 보여 준 Hygrochron과 Vaisala 센서의 습도 측정 결과를 보정하면 결과는 그림 8에 보인 바와 같이 된다. 즉, Hygrochron과 Vaisala 센서의 습도 측정값은 보정을 하면 거의 같은 측정값을 보인다는 것을 알 수 있다. 따라서 센서를 이용하여 습도 측정을 하기 전에 이러한 보정을 위한 실험을 수행한 후 센서 각각의 오차를 찾아내어 실험 후에 보정을 하면 매우 정확한 실험결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 일정 값을 빼거나 더함으로써 보정을 하였는데 다른 보정 방법으로는 100%에서의 오차를 곱하여 사용하는 것도 있을 것이며 이에 대한 연구도 추후에 수행되어야 할 것이다.

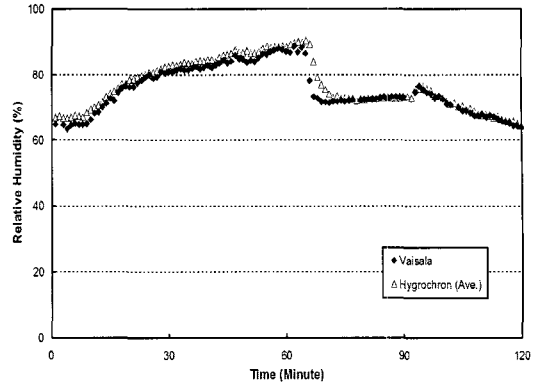


그림 8. 보정된 대기 습도 변화 계측값

### 3. 시멘트 몰탈 시편 습도 측정

도로포장 재료로는 크게 시멘트와 아스팔트를 포함하는 재료로 구분할 수 있다. 이중에 시멘트를 포함하는 재료는 타설 또는 제작 초기의 수분 변화 또는 수분 함량이 장기적인 성능에 크게 영향을 미칠 수 있다. 반면에 아스팔트를 포함하는 재료는 초기의 수분 변화 보다는 저온에서 동결 시의 수분 함량에 성능에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 물론 시멘트와 아스팔트를 포함한 재료 모두 수분의 함량에 따라 변형이 발생할 수도 있다. 본 연구에서는 도로포장 재료의 습도 변화를 측정하는 기초 실험으로 먼저 시멘트 몰탈의 습도 측정을 선택하였다. 이러한 이유는 도로포장 재료의 습도를 신뢰성 있게 측정할 수 있는 방법을 개발하기 위해서는 비균질성이 큰 시멘트 콘크리트의 습도를 처음부터 측정하기 보다는 콘크리트의 특성을 대부분 포함하며 콘크리트 보다는 균질한 몰탈을 이용하는 것이 타당하기 때문이다.

시멘트 몰탈의 타설 초기의 습도를 측정하고 신뢰성 있는 측정법을 파악하기 위하여 직육면체의 시편을 제작하였다. 먼저 그림 9의 처음에 보인 사진과 같이 높이와 폭이 5cm이고 길이가 30cm인 몰드를 제작하였다. 센서는 Hygrochron 4개와 Vaisala 센서를 중간 깊이인 2.5cm 지점에 묻기로 하였다. 다

큰 하나의 Hygrochron은 시편의 표면에 살짝 묻도록 하였다. 또 다른 2개의 Hygrochron은 대기의 습도를 측정하는데 이용하였다. 몰탈을 몰드에 타설한 후 센서를 장착한 모습은 그림 9의 두 번째 사진에서 보여 진다. 몰탈 시편이 어느 정도 경화한 후에 몰드를 제거하고 그림의 세 번째 사진에 보인 바와 같이 저울에 올려놓고 습도 뿐 만 아니라 수분 증발량도 측정한다.

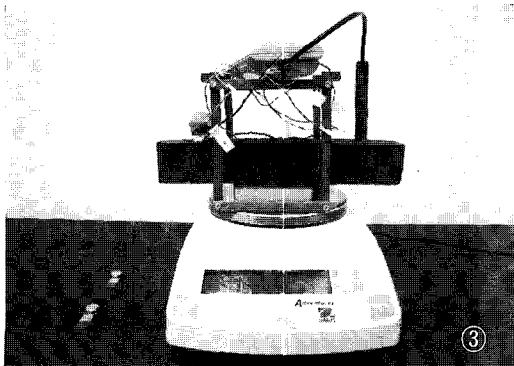
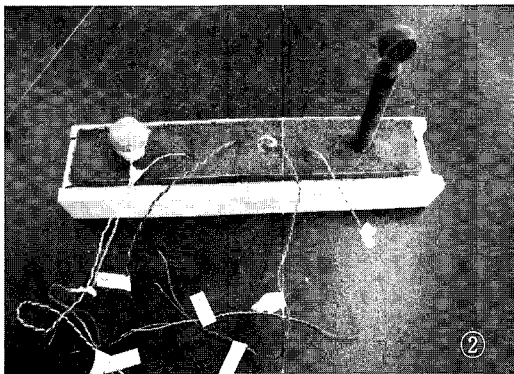
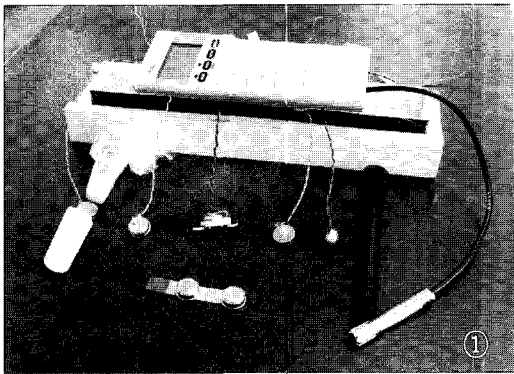
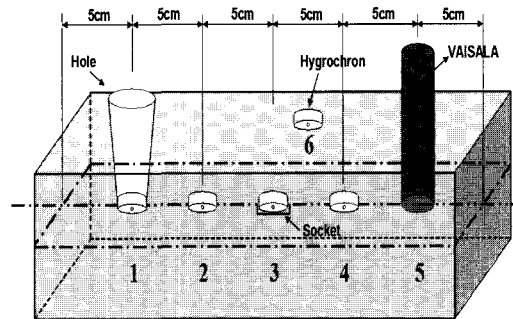


그림 9. 시멘트 몰탈을 이용한 실험

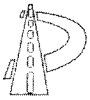
중간에 장착한 4개의 Hygrochron은 서로 다른 방법을 사용하여 장착하였다. 그림 10에 나타난 바와 같이 하나의 Hygrochron은 Vaisala를 장착할 때와 같이 파이프를 심은 후 이곳을 통해서 센서를 장착한 후 남은 위의 공간을 방수재로 채워서 실험 후에 쉽게 센서를 제거하여 재사용 할 수 있도록 하였다. 다른 하나의 Hygrochron은 전용 소켓에 끼운 후에 장착을 하였다. 일반적으로 Hygrochron을 장착할 때는 센서에 명령을 주고 언제든지 데이터를 내려 받기 위하여 Hygrochron의 양면에 전선을 붙여서 사용한다. 이러한 때는 Hygrochron에 납땜을 하여야 하기 때문에 소켓을 이용하면 좀 더 편리할 수가 있다. 하지만 전용 소켓은 사실 크기가 똑같은 온도 측정 센서인 ThermoChron용이기 때문에 이러한 소켓을 사용하였을 때 Hygrochron에 뚫려 있는 습도 측정용 구멍을 차단하는 현상이 생기는 것을 발견하였다. 또 다른 두 개의 Hygrochron은 직접 몰탈에 장착하였으며 정밀도를 12 bit와 8 bit로 다르게 하였다.



- 1: Hygrochron의 재사용을 위해 파이프를 심은 후 방수재로 채움(12bit)
- 2: Hygrochron 직접설치(8bit) 3: Hygrochron을 소켓에 끼워 설치(12bit)
- 4: Hygrochron 직접설치(12bit) 5: VAISALA 6: 표면 습도 측정(12bit)

그림 10. 시멘트 몰탈 시편 습도 측정을 위한 실험 셋업

Hygrochron의 장착 방법에 따른 습도 측정의 결과를 그림 11에 나타내었다. 타설 초기에는 거의 100%의 습도를 보이다가 시간이 지남에 따라 습도가 점점 떨어지는 것을 볼 수 있다. 구멍을 뚫어서 파이프를 장착한 후 이곳에 센서를 집어넣어 측정 한 것과 8 bit와 12 bit의 정밀도로 몰탈에 직접 장착한



것은 매우 근사한 습도 측정값을 보인다. 소켓을 이용한 센서는 처음에는 100% 보다 낮은 습도를 측정하지만 시간이 지남에 따라 다른 센서의 측정값과 비슷한 측정값을 보인다. 이는 소켓이 센서의 구멍을 막고 있어서 센서의 수분 감지를 둔하게 만든 결과로 보여진다.

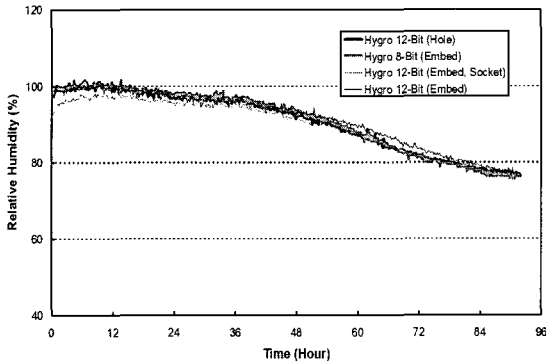
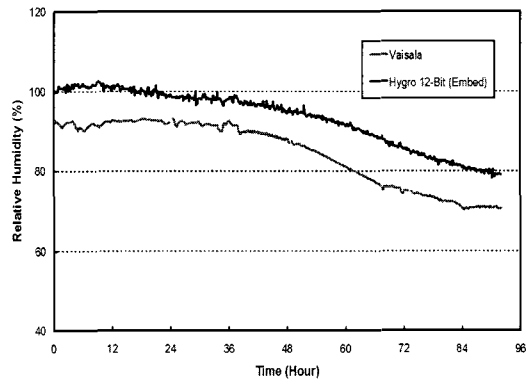


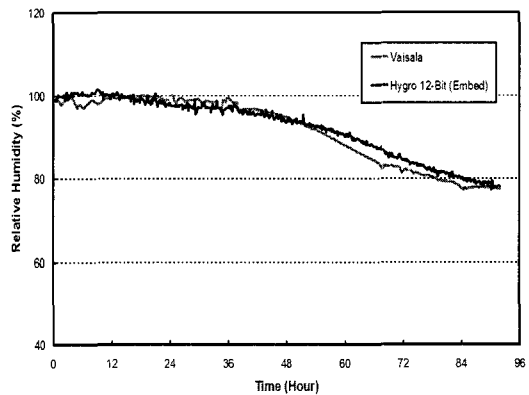
그림 11. Hygrochron 장착 방법 간의 습도 측정 비교

대기중에서 습도를 측정하여 보정하였을 때와 마찬가지로 도로포장 재료에서 습도를 측정하였을 때 측정값의 보정이 필요하다. Hygrochron은 앞에서 설명한 물통을 이용한 보정 방법을 이용하여도 되고 또는 타설 초기의 습도 측정값을 100%에 맞추는 보정 방법을 사용하여도 된다. 왜냐하면 시멘트 몰탈이나 콘크리트는 타설 초기에는 수화반응을 위한 물이 충분히 있어서 습도가 100%를 보여야 하기 때문이다. 어느 방법을 사용하더라도 Hygrochron은 같은 결과를 가져온다. 하지만 그림 12(a)에 보인 바와 같이 Vaisala 센서의 경우는 조금 다른 현상을 보였다. 몰탈의 타설 초기 습도가 100%에 훨씬 모자라는 것이다. 그러나 습도의 변화 추세를 Hygrochron을 이용하여 측정할 것과 매우 유사함을 알 수 있다. 이러한 이유는 Vaisala 센서를 몰탈에 장착할 때 그림 9에서 보여 주는 바와 같이 센서가 완전히 삽입될 수 있는 상당히 긴 파이프를 먼저 묻은 후 이곳에 센서를 집어넣기 때문에 파이프와 몰탈 사이에 틈이 생기든지 또는 파이프의 끝부분의 봉합

부분에서 틈이 생겨서 습기가 새는 것으로 판단된다. 하지만 이러한 측정값도 확실한 기준이 있으면 충분히 보정할 수 있다. 여기서 사용할 기준은 대기에서 물통을 이용하여 보정할 때와 마찬가지로 타설 초기에는 습도가 100%라는 것이다. 이렇게 하여 측정값을 보정하면 결과는 그림 12(b)에 보인 것과 같이 된다. 즉, Hygrochron과 Vaisala 센서를 이용하여 측정할 후 보정한 습도는 매우 근사한 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.



(a) 실측 데이터



(b) 보정된 데이터

그림 12. 몰탈 습도 측정 보정

측정값을 보정한 후 그림 13에 나타낸 것과 같이 몰탈 타설 초기의 습도 변화 추세를 살펴본다. 몰탈의 습도는 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 본 실험은 온도가 25도이며 습도가





60% 정도인 실내에서 수행하였기 때문에 시편의 습도 감소를 계속 관찰하면 결국 실내 습도에 가까워질 것으로 판단된다. 또한 시편의 표면과 중간부에서의 습도 변화가 뚜렷이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 표면에서의 습도 감소가 중간부에서의 습도 감소 보다 빠르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 수분의 증발이 표면에서 더 빨리 일어나서 표면이 먼저 건조해지기 때문인 것으로 판단된다.

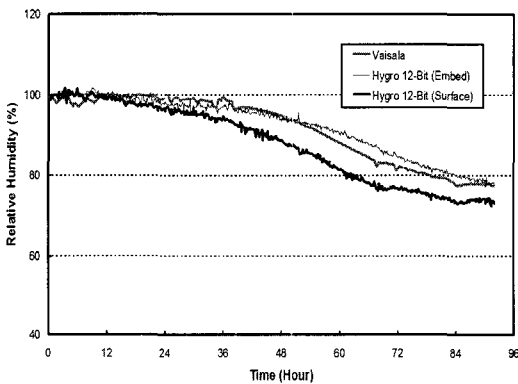


그림 13. 몰탈 시편 초기 습도 변화

그림 14는 몰탈 시편의 습도를 측정하며 수분의 증발량을 저울로 측정한 결과를 보여준다. 타설 초기에는 수분의 증발이 급격하게 늘어나며 시간이 지남에 따라 차츰 줄어들어서 결국 수렴하는 것을 알 수 있다. 수분 증발이 수렴하는 시점인 60에서 72시간 정도에서 시편의 습도도 그림 13에서 볼 수 있듯이

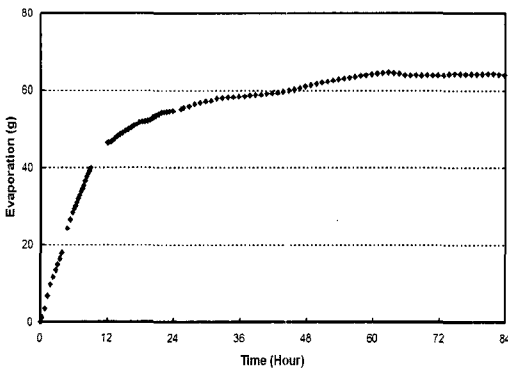
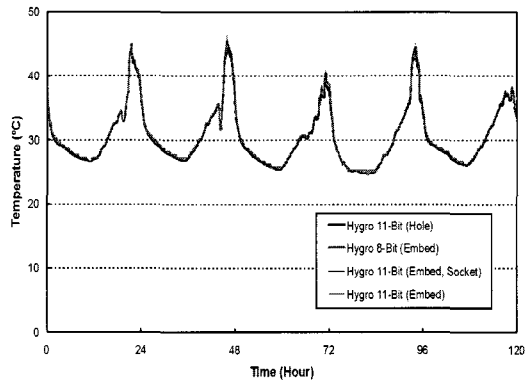


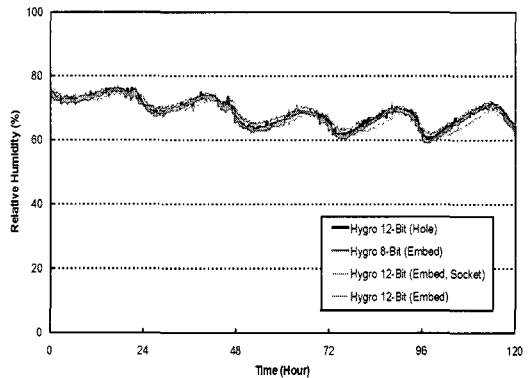
그림 14. 몰탈 시편 초기 수분 증발량

감소량이 확연히 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉, 습도 감소 곡선의 변곡점이 수분증발량이 수렴하는 시점에서 나타나는 것을 알 수 있다.

몰탈 시편의 실내에서의 초기 경화 과정을 약 4일간 측정 한 후에 시편을 실외의 대기 중에 방치하며 습도의 변화를 측정하였다. 먼저 서로 다른 장착방법을 사용한 Hygrochron의 측정 결과를 살펴보면 그림 15와 같다. Hygrochron은 습도 뿐만 아니라 온도도 측정하며 온도 측정의 정밀도는 8bit (0.5℃)과 11bit (0.0625℃)으로 선택할 수 있게 되어있다. 그림에서 보여 주는 바와 같이 앞에서 설명한 서로 다른 4가지의 장착 방법에서 온도와 습도의 측정값이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 특히 온도는 완전히 일치한다고 해도 될 정도로 서로 간의 차이가 없으며



(a) 온도



(b) 습도

그림 15. 실외에서 몰탈 시편 온습도 변화 측정 방법 비교

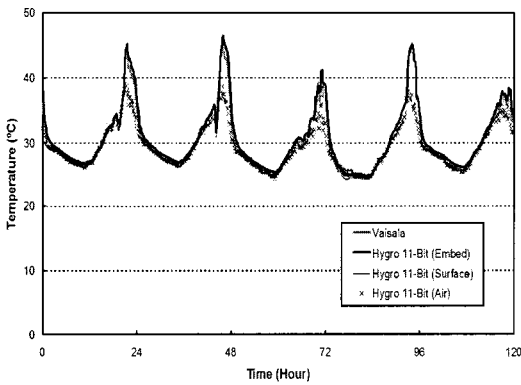


습도도 대체적으로는 거의 일치하나 부분적으로는 약간의 차이를 보이기도 한다는 것을 알 수 있다.

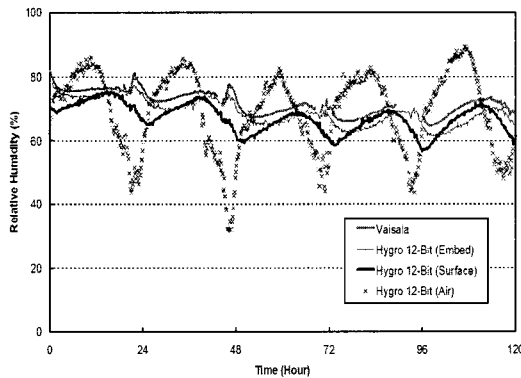
다음은 대기의 온습도 변화와 몰탈 시편의 표면과 중앙부에서의 온습도 변화를 비교하여 그림 16에 나타내었다. 온도의 변화는 대기 온도 변화의 경향을 몰탈 시편도 같이 따르는 것을 알 수 있다. 몰탈 시편의 온도는 표면과 중앙부에서 거의 항상 일치하며 낮 시간대에는 대기의 온도보다 몰탈 시편의 온도가 높은 것을 알 수 있다. 이는 몰탈 시편이 낮에는 태양열을 많이 흡수하여 생기는 현상이다. 습도의 변화는 온도와는 어느 정도 다른 결과를 보여준다. 몰탈의 습도 변화는 대기의 습도 변화의 경향을 따르기는 하지만 뚜렷한 지연 효과가 관측된다. 즉, 대기의 습도 변화가 생기고 어느 정도 지난 후에 그러한 경향을

몰탈 시편의 표면에서 감지할 수 있고 다시 어느 정도 시간 후에 같은 경향을 몰탈 시편의 중앙부에서 관찰할 수 있다. 또한 몰탈 시편 표면의 습도 변화는 대기의 습도와 교차하는 시점에서 변곡한다는 것을 알 수 있다. 즉, 대기의 습도가 몰탈의 표면 습도보다 높으면 대기의 습도가 감소하는 추세라도 몰탈의 표면 습도는 계속적으로 증가하는 추세를 보이며 결국 대기와 몰탈 표면의 습도가 거의 일치한 후 대기의 습도가 몰탈 표면 습도보다 낮아지면 몰탈 시편의 표면 습도도 감소하기 시작하는 것이다. 이러한 몰탈 시편의 습도 변화 측정 결과를 바탕으로 시멘트를 포함하는 재료는 습도의 전달이 온도의 전달 보다 훨씬 늦게 일어난다는 것을 추측할 수 있다.

또한, 시편의 표면과 내부의 온도가 같은 시간에서는 거의 일치하나 습도의 값이 서로 다르다는 것은 수분의 함량이 서로 다르다는 것을 의미한다. 따라서 그림 16에서 알 수 있듯이 낮에 온도가 높아져서 대기의 습도가 낮을 때는 시편의 표면에서의 습도가 내부의 습도 보다 낮았는데 이는 표면의 수분 함량이 내부의 수분 함량 보다 작다는 것을 의미한다. 반대로 온도가 낮아져서 대기의 습도가 높을 때인 새벽에는 시편 표면의 수분 함량이 내부의 수분 함량 보다 커진다는 것을 알 수 있다.



(a) 온도



(b) 습도

그림 16. 대기 온습도 변화에 따른 몰탈 시편 온습도 변화

#### 4. 포장재료 투수성 측정

도로포장 재료는 수분이 얼마나 잘 흡수되는지가 거동 및 성능에 영향을 미치는 경우가 많다. 따라서 이러한 재료의 투수성을 살펴보는 연구도 매우 중요하다 할 수 있다. 본 연구에서는 Hygrochron을 이용하여 투수성을 측정할 수 있는지에 대한 기초 연구를 수행하였다. 본 연구에서 고려한 재료는 아스팔트, 콘크리트 그리고 점토이다. 서로 다른 재료의 투수성을 비교하기 위해서는 같은 크기의 시편을 제작하여야 하지만 실험의 가능성을 확인하는 기초 연구로 우선 아스팔트와 콘크리트는 기존에 제작해 놓은



10cm 지름의 시편을 각각 3.5cm와 5cm의 높이로 잘라서 사용하였으며 점토는 시편되는 5.5cm 높이의 점토 블록을 사용하였다. 실험을 위하여 그림 17에 보인 바와 같이 컵의 아래쪽에 구멍을 낸 후 시편의 위부분에 실리콘으로 물이 새지 않도록 붙이고 Hygrochron을 시편의 아래쪽에 방수 테이프로 붙인 후 컵에 물을 담아 놓아 물이 시편을 통과하며 시편의 습도를 증가시키는 것을 측정한다.

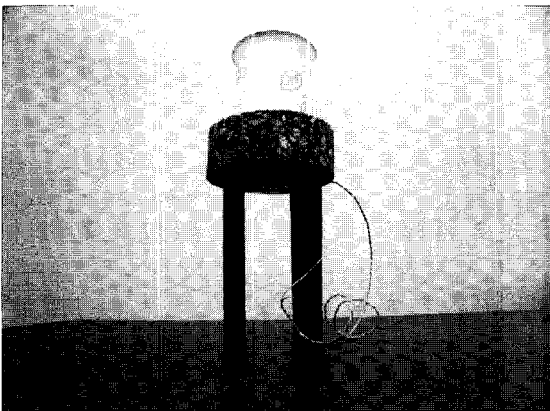


그림 17. 투수성 측정 실험

투수성 실험의 결과는 그림 18에 보인 바와 같다. 점토 블록은 매우 빠르게 습도가 증가하여 결국 수분이 완전히 시편을 통과하는 시간에 100%의 습도 측정치를 보였다. 아스팔트 시편도 확연히 습도의 증가가 측정되었으며 시간이 지남에 따라 역시 100%의 습도에 수렴하였다. 콘크리트 시편도 습도의 증가는 뚜렷이 보였으나 결국 100%에는 미치지 못하는 결과를 볼 수 있었다. 이는 실험에 사용한 두께의 콘크리트 시편은 수분이 완전히 관통하기는 어려운 두께인 것으로 판단되며 이보다 얇은 두께를 사용하면 수분의 관통을 측정할 수 있으리라 본다. 본 기초 실험의 결과를 통해 습도 측정을 이용하여 재료의 투수성을 측정하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

서로 다른 재료의 투수성을 비교하는 실험을 위해서는 시편의 크기를 표준화하는 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 두께에 따라 수분의 투수 속도가 일정하지도 파악하여야 한다. 만약에 투수 속도가 두

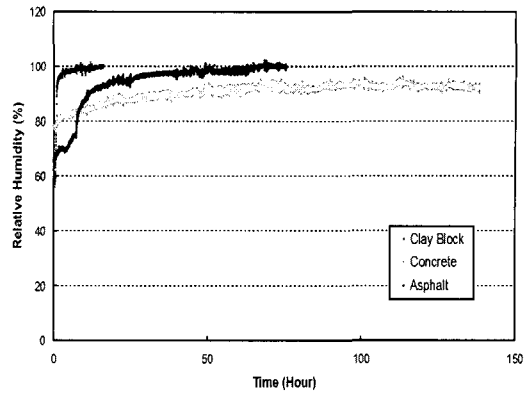


그림 18. 습도측정에 의한 재료의 투수성 비교

께에 따라 거의 일정하다고 가정하고 습도가 80%에서 85%로 될 때까지의 시간을 기준으로 투수성을 계산한다면 그림 18의 결과는 표 1에 나타낸 바와 같은 각 재료 별 특정 습도 도달 시간을 이용하여 구할 수 있다. 점토 블록은 습도가 80%에서 85%가 될 때까지 걸린 시간이 0.02hour이며 시편의 두께가 0.055m (5.5cm) 이므로 투수 속도는 2.75m/h라고 할 수 있다. 같은 방법으로 아스팔트와 콘크리트의 투수 속도를 계산하면 각각 0.036m/h와 0.0046m/h가 된다. 따라서 투수성은 점토 블록이 가장 높고 콘크리트가 가장 낮은 것으로 판단된다. 이러한 방법을 더욱 발전시키면 매우 합리적인 도로포장 재료의 투수성을 구할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서 실내 및 실외에서의 습도 변화 측정에 사용하였던 시멘트 몰탈 시편을 이용하여서도 투수성 측정 실험을 수행하였다. 몰탈 시편에는 이미 설명한 바와 같이 표면과 중앙부에 센서가 있기 때문에 이러한 시편을 수조에 담가서 표면과 중앙부의 습도의 변화를 측정하여 그림 19에 결과를 나타내었다. 예상했던 바와 같이 표면에서의 습도 증가가 먼저 관측되었으며 어느 정도 시간 차이를 두고 중앙부의 습도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 만약에 습도가 80%가 되는 시점의 시간 차이를 기준으로 투수 속도를 결정한다면 80% 습도에서의 표면과 중앙부의 시간차가 약 0.33hour (20분)이고 표면과 중앙부의



거리가 0.025m이므로 투수 속도는 0.076m/h가 된다. 이와 같이 습도 측정 센서를 이용하여 재료의 투수 속도를 구할 수 있는 여러 가지의 방법을 더욱 깊이 연구하여 체계화할 필요가 있다.

표 1. 재료 간의 투수시간 비교

RH(%) \ Material	Clay Block	Asphalt	Concrete
60%	0.45	-	-
70%	0.64	2.11	-
80%	0.76	7.56	1.3
85%	0.78	8.53	12.1
90%	0.83	11.45	33.15
95%	1.23	20.5	112.26
100%	11.33	49.3	-

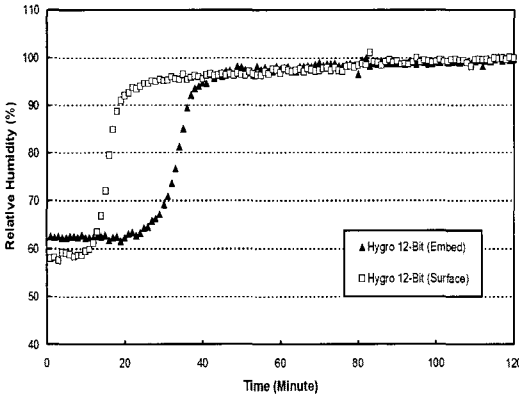


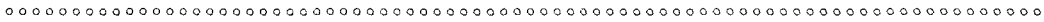
그림 19. 몰탈 시편 투수성 실험

## 5. 결론

본 연구는 도로포장 재료의 습도를 편리하고 신뢰성 있게 측정할 수 있는 방법을 파악하여 도로포장의 수분변화에 의한 거동 및 특성을 분석할 수 있는 적용성을 시험하기 위하여 수행되었다. 먼저 대기의 습

도를 여러 가지의 센서를 이용하여 측정 후 비교 분석하여 센서의 정확성 및 측정치의 보정 방법에 대한 연구를 수행하였다. 그 후 대기의 습도 측정에서 신뢰성이 확인된 센서인 Hygrochron과 Vaisala의 센서를 이용하여 시멘트 몰탈의 초기 경화 과정에서의 습도를 측정하여 분석하였으며 대기의 습도 변화에 의한 몰탈 시편의 습도 변화 특성도 분석하였다. 또한 몰탈 시편에서의 습도 측정시에 측정값 보정 방법에 대하여도 연구를 수행하였다. 습도 측정용 센서를 이용하여 재료의 습도 변화 뿐 만 아니라 투수성을 분석할 수 있는 몇 가지 방법에 대한 기초 실험도 수행하여 습도 측정을 통해 재료의 투수 특성 분석 가능성을 발견하였다. 따라서 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 유출할 수 있었다.

- 습도 측정용 센서는 대기의 습도 변화 경향은 센서 종류에 관계없이 대체적으로 근사하게 측정하나 측정값은 센서에 따라 상당한 차이를 보인다.
- 급격한 습도 변화에 대해 민감하게 습도를 측정할 수 있는 센서는 본 연구에 쓰인 센서 중에서는 Hygrochron과 Vaisala의 HM-44 센서이다.
- 센서의 대기 습도 측정값은 보정을 통하여 신뢰성을 높일 수 있으며 간편한 보정 방법으로는 습도가 100%인 물통에서 센서의 오차를 파악함으로써 이를 측정치에 반영하는 것이다.
- 시멘트 몰탈의 초기 경화 과정에서의 습도 변화 및 경화 후의 실외에서의 습도 변화도 Hygrochron과 Vaisala의 센서를 이용하여 측정이 가능하며 측정값의 보정도 가능하다.
- 몰탈 시편의 초기 경화 과정에서의 습도 감소는 표면에서의 수분 건조가 먼저 발생하기 때문에 표면이 중앙부보다 빠르게 일어난다.
- 몰탈 시편의 온도는 표면과 중앙부에서 거의 같으며 대기 온도의 변화를 거의 그대로 반영하나, 몰탈 시편의 습도 변화는 표면과 중앙부에서 확연한 지연이 생기는 것을 알 수 있다.
- 몰탈 시편 표면의 습도는 대기의 습도가 증가 또는



감소하는 추세인지에 따라 변하는 것이 아니라 대기 습도에 접근하는 방향으로 변화한다. 즉, 몰탈 시편의 습도가 대기 습도보다 높을 때는 대기 습도의 변화에 관계없이 계속 감소하며 반대로 시편의 습도가 대기 습도보다 낮을 때는 증가하게 된다.

- 몰탈 시편의 표면과 내부의 온도가 같은 시간에서 일치하나 습도의 값은 서로 다르다는 것으로 미루어 보아 수분의 함량이 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 대기 온도가 높아서 대기의 습도가 낮을 때는 시편 표면의 수분 함량이 내부 수분 함량 보다 작으며 대기 온도가 낮고 대기 습도가 높을 때는 반대 현상이 일어난다는 것을 알 수 있다.
- 도로포장 재료의 투수성을 습도 측정 센서를 이용하여 측정할 수 있으며 측정 방법으로는 한쪽 방향으로 물을 흘리며 습도의 증가를 측정하여 분석하는 방법과 센서를 시편의 몇 가지 다른 깊이에 장착하여 물속에 침하를 시켜 측정하여 분석하는 방법이 모두 가능한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2006년도 경희대학교 연구비지원(KHU-20060572)에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 황성도 (2006). "아스팔트 혼합물의 수분손상이 재료 물성과 피로균열 저항성에 미치는 영향," 박사학위논문, 경희대학교.
2. Jeong, J. H. and Zollinger, D. G. (2003). "Development of test methodology and model for evaluation of curing effectiveness in concrete pavement construction," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No. 1861, National Research Council, pp. 17-25.
3. Kim, S. M. and Won, M. C. (2004). "Horizontal cracking in continuously reinforced concrete pavements," *ACI Structural Journal*, Vol. 101,

- No. 6, American Concrete Institute, pp. 784-791.
4. Kim, S. M., Nam, J. H., Dossey, T., Suh, Y. C., Claros, G., and McCullough, B. F. (2005). "A new methodology for concrete pavement quality control using temperature and moisture measurement techniques," *Proceedings of the 84th Annual Meeting of Transportation Research Board*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (CD-ROM).
5. Nam, J. H., Kim, S. M., and Won, M. (2006). "Measurement and analysis of early-age concrete strains and stresses in continuously reinforced concrete pavement under environmental loading," *Transportation Research Record*, No. 1947, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 79-90.
6. Schindler, A. K. (2002). "Concrete hydration, temperature development, and setting at early-ages," *Ph.D. Dissertation*, The University of Texas at Austin.
7. Trevino, M. (1996). "Rehabilitation of Beltway 8 pavement spalling with concrete overlays," *Master's Thesis*, The University of Texas at Austin.
8. Trevino, M., Kim, S. M., Smit, A. and McCullough, B. F. (2005). "Asphalt concrete overlays on CRCP: Decision criteria, tack coat evaluation, asphalt concrete mixture evaluation," *Report 4398-3*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin

접 수 일: 2006. 9. 5  
 심사 일: 2006. 9. 26  
 심사완료일: 2006. 12. 5