

콘크리트 포장의 습도 측정 방법 개발을 위한 기초 실험

Pilot Experiments for Development of Relative Humidity Measurement Methodologies in Concrete Pavements

김성민* 박희범** 권순민*** 조병휘****
Kim, Seong-Min Park, Hee Beom Kwon, Soon Min Cho, Byoung Hooi

1. 서론

콘크리트 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. 표면건조수축균열 등의 대부분의 초기 파손은 환경하중에 의해 발생되며 그 외의 스폴링, 펀치아웃, 내부수팽윤열 등의 파손도 건설 초기의 환경하중에 의한 손상이 차량하중에 의한 영향과 혼합되어 발생하는 경우가 대부분이다(Kim and Won, 2004). 환경하중 중에 온도는 측정이 대체로 용이 하기 때문에 온도하중에 의한 포장의 거동에 대해서는 연구가 활발히 진행중에 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). 본 연구의 목적은 콘크리트 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 시편에 대한 습도를 측정하여 다양한 측정법을 파악하고 초기 수분 변화 및 수분의 투수성 등을 측정하여 이러한 습도 측정 방법의 다당성 및 적용성을 확인하였다.

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 대기중의 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.

본 연구에서는 4개 회사의 제품을 선정하여 대기의 습도 변화를 측정하여 비교하였다. 각 제품들은 그림 1에서 보여주고 있다. 가장 왼쪽의 장비가 Springfield 사의 센서이고



그림 1. 습도 측정용 센서

* 정희원, 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 조교수

** 경희대학교 토목공학과 석사과정

*** 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터 전임연구원

**** 경희대학교 토목공학과 석사과정

그 옆의 뒤와 앞에 있는 장비가 Acurite의 본체와 무선용 센서를 각각 보여주며, 그 옆이 Vaisala의 HM-44 장비이며, 가장 오른쪽의 수은전지처럼 보이는 것이 Hygrochron이다.

실내 실험으로써 먼저 실내에서 물을 끓여서 습도를 점차 높인 후 문을 열어 환기를 급격히 시키고 난 후 다시 문을 닫아서 실내의 습도를 유지하는 과정을 위에서 언급한 습도 측정 센서를 이용하여 측정하여 비교 분석하였다. 그림 2는 이러한 실험의 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 센서가 측정된 습도 변화는 유사한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 하지만 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 측정하는 데에도 적합한 것을 알 수 있다. 또한 그림 3에 나타난 바와 같이 Hygrochron 간의 습도 측정값은 매우 근사한 것을 알 수 있다. 따라서 센서 서로 간의 오차가 크지 않으며 습도 변화에도 민감한 측정값을 보여 주는 Hygrochron을 이용하여 대기 및 도로포장 재료의 습도를 측정하는 것이 가장 적합하다는 판단을 하였으며 이러한 센서를 이용하여 구한 습도 측정값의 검증은 위하여 Vaisala의 HM-44도 사용하기로 하였다. 검증을 위해 센서의 측정값을 보정 과정을 통하여 수정함으로써 더욱 정확한 습도 측정값을 얻는 것이 필요하였다.

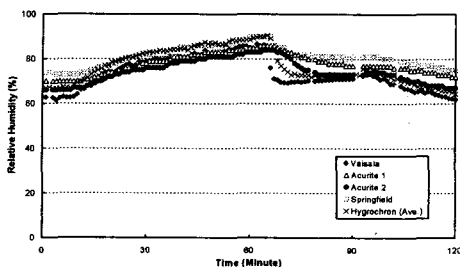


그림 2. 센서별 대기 습도 측정값 비교

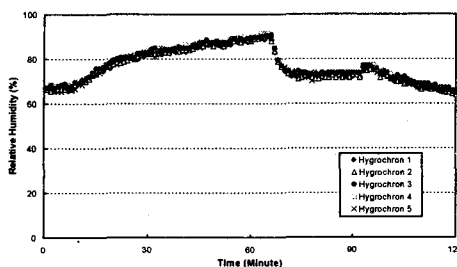
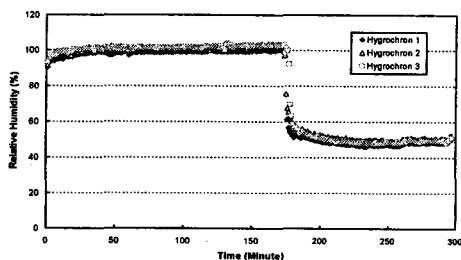
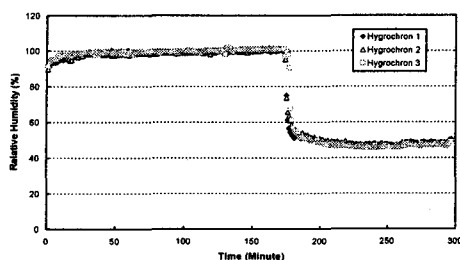


그림 3. Hygrochron 간의 습도 측정값 비교

Hygrochron의 습도 측정값을 보정하는 과정을 그림 4에서 보여준다. 그림 4(a)는 3개의 Hygrochron을 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. 보정을 한 결과는 그림 4(b)에서 보여 준다. Hygrochron은 습도 측정 오차가 센서 간에 그리 크지는 않지만 보정을 하면 센서 간에 거의 일치하는 습도 측정값을 얻을 수가 있다. Vaisala 센서의 측정값도 같은 방법으로 보정을 하면 Hygrochron의 습도 측정값과 거의 같은 값을 보이게 된다.



(a)



(b)

그림 4. Hygrochron의 습도 측정 보정: (a) 보정 전, (b) 보정 후



이러한 습도 측정 보정 방법을 이용하여 그림 2에서 보여 준 Hygrochron과 Vaisala 센서의 습도 측정 결과를 보정하면 결과는 그림 5에 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 실험 결과를 얻을 수 있다.

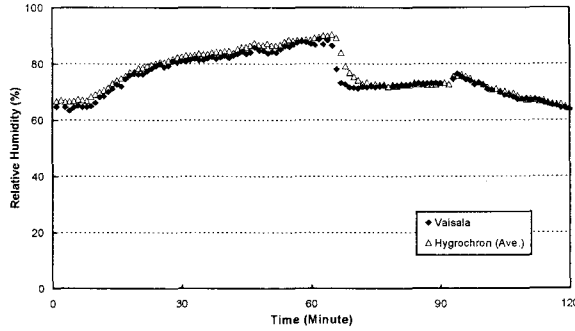
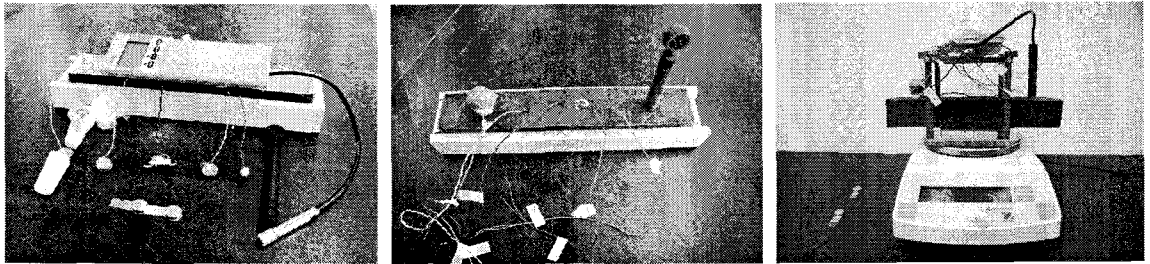


그림 5. 보정된 대기 습도 변화 계측값

3. 시멘트 몰탈 시편 습도 측정

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.

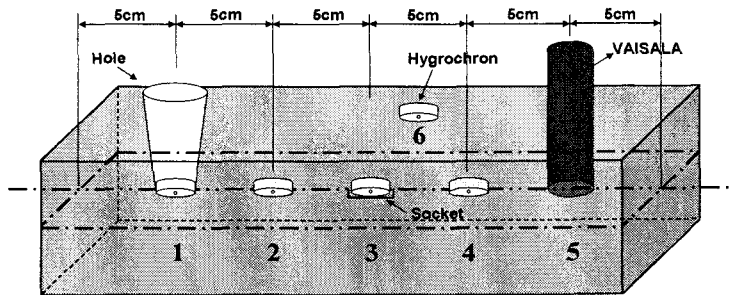


제작전

제작후

습도 및 수분 증발량 측정

그림 6. 시멘트 몰탈을 이용한 실험



- 1 : Hygrochron의 재사용을 위해 파이프를 심은후 방수재로 채움. (12bit)
- 2 : Hygrochron 직접 설치. (8bit) 3 : Hygrochron 을 소켓에 끼워 설치. (12bit)
- 4 : Hygrochron 직접 설치. (12bit) 5 : VAISALA 6 : 표면 습도 측정 (12bit)

그림 7. 시멘트 몰탈 시편 습도 측정을 위한 실험 셋업

시멘트 몰탈의 타설 초기의 습도를 측정하고 신뢰성 있는 측정법을 파악하기 위하여 직육면체의 시편을 제작하였다. 먼저 그림 6의 처음에 보인 사진과 같이 높이와 폭이 5cm이고 길이가 30cm인 몰드를 제작하였다. 센서는 그림 7에서와 같이 각기 다른 방식으로 Hygrochron 4개와 Vaisala 센서를 중간 깊이인 2.5cm 지점에 묻기로 하였다. 다른 하나의 Hygrochron은 시편의 표면에 살짝 묻도록 하였다. 또 다른 2개의 Hygrochron은 대기의 습도를 측정하는데 이용하였다.

대기 중에서 습도를 측정하여 보정하였을 때와 마찬가지로 도로포장 재료에서 습도를 측정하였을 때 측정값의 보정이 필요하다. Hygrochron과 Vaisala 센서를 이용하여 습도를 측정한 후 그림 4에서 보정한 방법을 이용하여 보정된 습도를 그림 8에 나타내었다. 측정값을 보정한 후 그림 8에 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.

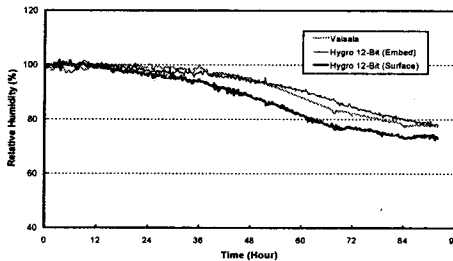


그림 8. 몰탈 시편 초기 습도 변화

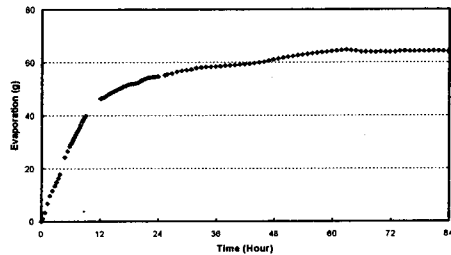
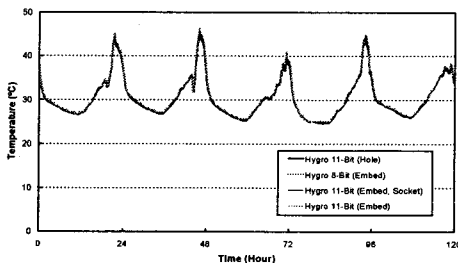


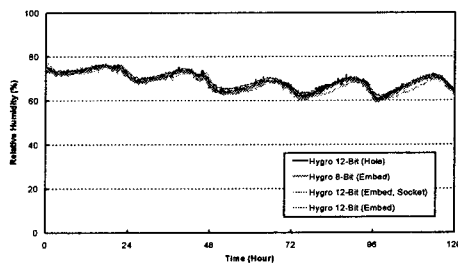
그림 9. 몰탈 시편 초기 수분 증발량

그림 9는 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 8에서 볼 수 있듯이 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 측정된 후에 시편을 실외의 대기 중에 방치하며 습도의 변화를 측정하였다. 먼저 서로 다른 장착방법을 사용한 Hygrochron의 측정 결과를 살펴보면 그림 10과 같다. 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 습도도 대체적으로는 거의 일치하나 부분적으로는 약간의 차이를 보이기도 한다는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 10. 실외에서 몰탈 시편 온습도 변화 측정 방법 비교: (a) 온도, (b) 습도



대기의 온습도 변화와 몰탈 시편의 표면과 중앙부에서의 온습도 변화를 비교하여 그림 11에 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.

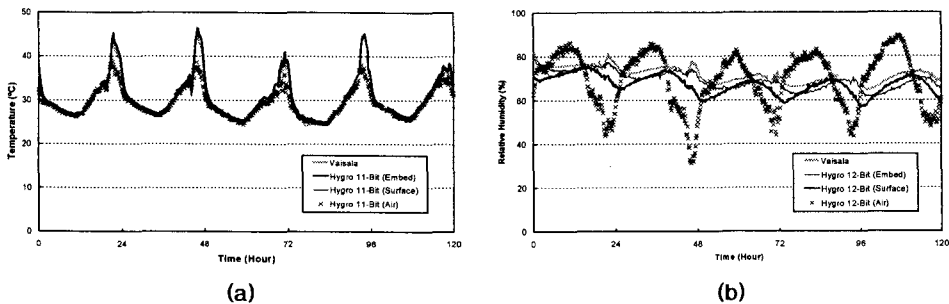


그림 11. 대기 온습도 변화에 따른 몰탈 시편 온습도 변화: (a) 온도, (b) 습도

또한, 시편의 표면과 내부의 온도가 같은 시간에서는 거의 일치하나 습도의 값이 서로 다르다는 것은 수분의 함량이 서로 다르다는 것을 의미한다. 따라서 그림 11에서 알 수 있듯이 낮에 온도가 높아서 대기의 습도가 낮을 때는 시편의 표면에서의 습도가 내부의 습도 보다 낮는데 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.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 포장의 습도를 신뢰있게 측정할 수 있는 방법을 개발하기 위한 기초 연구로 대기와 모르타르 시편을 이용하여 습도를 측정하고 이러한 측정값의 분석을 신뢰있게 할 수 있는 방법을 구축하였으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 습도 측정용 센서는 대기의 습도 변화 경향은 센서 종류에 관계없이 대체적으로 근사하게 측정하나 측정값은 센서에 따라 상당한 차이를 보인다.
- 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 확인한 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.

참 고 문 헌

1. Jeong, J. H. and Zollinger, D. G. (2003). "Development o 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.
2. 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.
3. 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).
4. 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," *Proceedings of the 85th Annual Meeting of Transportation Research Board*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (CD-ROM).
5. Schindler, A. K. (2002). "Concrete hydration, temperature development, and setting at early-ages," *Ph.D. Dissertation*, The University of Texas at Austin.