



# 타설 직후 건조하는 콘크리트의 표면습도 모형

## A Surface Humidity Model of Drying Concrete Immediately after Placement

정진훈\*  
Jeong, Jin Hoon

### Abstract

Predicting distribution and variation of humidity inside concrete is essential to improve curing quality of concrete at field. The concrete humidity is predicted by numerical analysis using surface humidity as boundary condition. However, ambient humidity has been used instead of the surface humidity because the surface humidity could not be accurately measured. Because it is hard to accurately measure the surface humidity, however, the ambient humidity has been used instead of the surface humidity in the numerical analysis. In this paper, a methodology to accurately measure the surface humidity is suggested, and the ambient humidity and the humidity at the surface and inside the concrete measured by a series of laboratory tests are presented. The cause of low concrete humidity immediately after placement was investigated by a separately performed test. A surface humidity prediction model was developed using the measured humidity, and consequently validated through an additional test.

**Keywords : concrete, surface humidity, moisture, evaporation, curing, bleeding**

### 요 지

콘크리트 내부의 습도분포와 변화를 예측하는 것은 현장에서 콘크리트의 양생품질을 향상시키기 위하여 필수적이다. 콘크리트의 습도는 주로 표면습도를 경계조건을 사용하는 수치해석을 통하여 예측된다. 하지만, 표면습도를 정확히 측정하기 어려우므로 거의 모든 수치해석에 표면습도 대신 대기습도를 사용하여 왔다. 본 논문에서는 표면습도를 정확하게 측정할 수 있는 방법을 제시하고 일련의 실내실험을 통하여 측정된 대기습도와 콘크리트의 내부 및 표면습도를 보여준다. 이와는 별개의 실험을 통하여 타설 직후의 콘크리트가 낮은 습도를 나타내는 원인을 조사하였다. 측정된 습도를 이용하여 콘크리트의 표면습도를 예측할 수 있는 모형을 개발하였으며 추가적인 실험을 통하여 모형의 유효성을 검증하였다.

**핵심용어 : 콘크리트, 표면습도, 수분, 증발, 양생, 블리딩**

\* 정희원 · 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터 책임연구원, 공학박사



# 1. 서론

콘크리트 포장 표면에서의 증발로 인한 수분의 손실은 슬래브의 초기 및 장기거동에 큰 영향을 미친다(Jeong과 Zollinger, 2004; Jeong과 Zollinger, 2005). 수분의 손실로 인하여 콘크리트 표면의 습도가 감소할 뿐만 아니라 증발열을 대기로 빼앗기면서 표면온도가 내려간다. 콘크리트 표면에서의 증발로 인하여 콘크리트의 내부에는 습도와 온도의 구배가 형성되며, 이로 인하여 와핑(warping)이나 컬링(curling)으로 표현되는 슬래브의 변형이 발생한다. 슬래브의 자중이나 슬래브 하부와 보조기층 사이의 마찰은 슬래브의 자유변형을 구속하여 슬래브 내부에 불필요한 응력을 유발하며 교통하중에 의하여 발생한 응력과 중첩되면서 파손으로 이어지기도 한다. 양생 초기, 특히 콘크리트의 경화시간에 형성된 슬래브의 습도와 온도구배 때문에 슬래브는 평생동안 그 내부에 기본적인(built-in) 응력을 갖게 되어 콘크리트 포장의 장기적인 공용성에 영향을 주게 되므로 타설 직후 증발을 적절히 억제하는 작업은 매우 중요하다.

최근에 와서, 컴퓨터와 같은 도구가 발달하면서 수치해석을 이용하여 습도 또는 온도를 예측하고 그 결과를 포장건설 현장에서 콘크리트를 타설하고 양생하는 작업에 반영하려는 노력이 시도되고 있다(Jeong 등, 2001; Rasmussen 등, 2002). 콘크리트 습도의 분포와 변화를 정확하게 예측하기 위해서는 콘크리트의 물성이나 기상조건 외에도 초기조건과 경계조건을 실제와 거의 동일하게 모형화하여 수치해석에 사용해야 할 필요가 있다. 그 중에서도, 경계조건으로 사용되는 콘크리트의 표면습도는 측정하기 매우 어렵고 이에 영향을 미치는 다양한 변수들을 단순화하기 어렵기 때문에 대기습도와 동일하다고 가정되어 왔다(Parrott 1988; Parrott 1991).

본 논문에서는, 표면습도를 합리적이고 정확하게 측정할 수 있는 실험방법을 제시하고 실내실험을 통하여 측정된 대기습도와 콘크리트의 내부 및 표면습

도를 이용하여 표면습도를 모형화한다. 또한, 콘크리트 습도의 초기 경향을 설명하고 별도의 실험을 통하여 증발에 의한 수분확산의 변화가 콘크리트의 습도에 미치는 영향을 조사한다.

## 2. 실내실험

콘크리트의 표면습도를 정확히 예측할 수 있는 적절한 형태의 모형을 개발하기 위하여 0, 2.08, 2.83, 그리고 5.33m/s의 4가지 다른 풍속 하에서 일련의 실내실험이 수행되었다.

### 2.1. 콘크리트 배합

내부직경 30.5cm와 높이 15.2cm를 갖는 두께 1.3cm의 실린더형 몰드의 아래쪽 입구를 두께 0.6cm의 플라스틱 평판으로 막아 실린더에 내에 타설된 콘크리트의 수분이 대기와 접하는 상부표면으로만 이동하도록 하였다. 많은 수분증발을 발생시키는 기상조건을 모사하기 위하여 40℃의 높은 온도와 15%의 낮은 상대습도를 갖는 양생실 안에서 ASTM 192(ASTM, 1999)의 절차에 따라 실린더형 몰드에 콘크리트를 붓고 다졌다. 실험에 사용된 콘크리트는 표 1과 같이 부순 석회석의 굵은골재와 천연모래의 잔골재로 구성되었다. 물-시멘트 비는 0.46이었으며 ASTM C 29(ASTM, 1999)에 의해 결정된 단위중량은 2422kg/m<sup>3</sup>이었다.

표 1. 실내실험에 사용된 콘크리트의 1m<sup>3</sup> 체적당 배합비

재 료	배 합 비
굵은골재 (석회석)	1143kg
잔골재 (천연모래)	753kg
시멘트 (1종 보통)	360kg
물	166kg
물-시멘트 비	0.46
콘크리트 단위중량	2,422kg/m <sup>3</sup>



## 2.2. 실험장비

실린더형 몰드 안에 콘크리트를 타설한 후 양생의 품질을 관찰하기 위하여 미국 Texas의 Arlington에 위치한 계측장비 생산업체인 A-TEK에서 제조한 양생관찰장비를 그림 1과 같이 설치하였다(Jeong과 Zollinger, 2003). 그림 2와 같이 양생관찰장비에 부착된 세 개의 습도계를 사용하여 대기습도와 콘크리트의 내부(1.9cm 깊이) 및 표면의 습도를 측정하였다. 이 외에도, 실린더형 시편을 0.1g의 정확도를 갖는 저울 위에 올려놓고 콘크리트의 증발률을 측정하였으며 이와 관련된 내용은 다른 논문에서 소개하기로 한다.

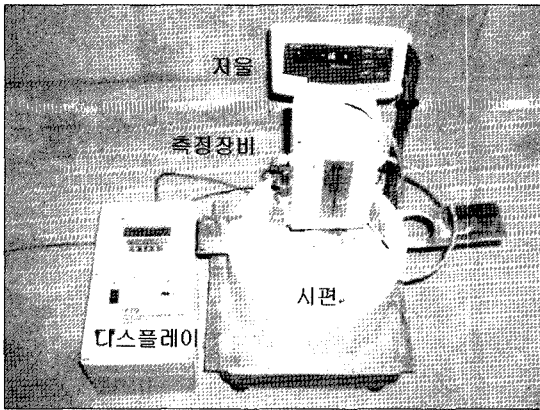


그림 1. 콘크리트 시편에 양생관찰장비를 설치한 모습

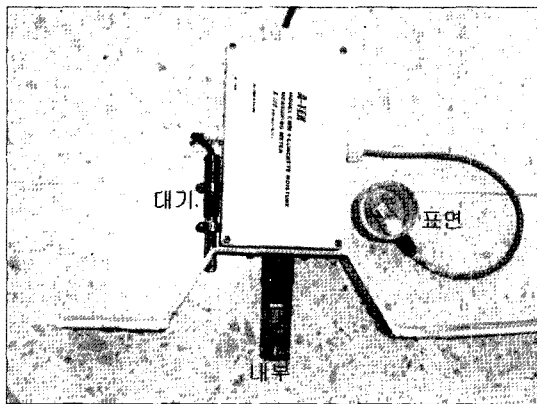


그림 2. 대기와 콘크리트 내부 및 표면습도의 측정을 위한 습도계

## 2.3. 실험방법

콘크리트를 타설하기 직전 또는 직후에 습도계를 콘크리트 내에 직접 설치하게 되면 습도계가 콘크리트 또는 수분과 접촉하게 되어 손상을 입을 뿐만 아니라 정확한 습도를 측정하기 어렵다. 따라서, 콘크리트 내부에 설치되는 습도계를 보호하고 정확한 습도를 측정하기 위하여 그림 3과 같이 플라스틱으로 만든 덮개를 미리 콘크리트에 삽입하고 초기에 매우 활발했던 콘크리트 내부의 수분이동이 어느 정도 줄어든 시점에 플라스틱 덮개 내부의 수분을 마른 헝겊 등으로 제거한 후 습도계를 삽입하여 그림 1과 같은 형태로 습도 자료를 수집하였다. 콘크리트 내부에서 수분의 이동이 크게 적어지는 시점은 콘크리트의 물-시멘트 비와 기상조건 등에 영향을 받으며, 본 실험에서는 타설 약 1시간 후부터 플라스틱 덮개 내부에 물기가 고이지 않는 것으로 관찰되었다. 특정한 깊이에서 콘크리트의 습도를 측정하기 위하여 플라스틱 덮개의 측면에는 4개의 구멍이 동일한 높이로 미리 설치되었고 경화되기 전의 콘크리트가 플라스틱 덮개 내부로 침투하는 것을 방지하기 위하여 물에 잘 젖지 않는 성질의 망사로 구멍을 덮었다.

콘크리트의 표면습도를 합리적이고 정확하게 측정할 수 있는 방법을 찾아내기 위하여 타설 직후의 콘크리트 표면에 다양한 방법으로 습도계를 설치한 후

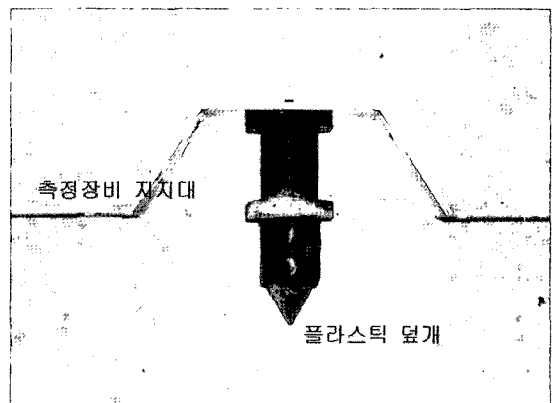


그림 3. 콘크리트 내부에 설치되는 습도계의 보호를 위한 플라스틱 덮개



습도를 측정하였다. 그 결과, 그림 2와 같이 상대적으로 작은 크기(내부직경 6.4cm와 높이 5.1cm)를 갖는 PVC 실린더 측면의 외부에서 내부로 습도계를 삽입하고 실린더 상부의 입구를 물에 잘 젖지 않는 성질의 망사로 덮은 후 실린더의 하부를 콘크리트의 상부표면과 밀착시키는 것이 가장 합리이고 정확하게 콘크리트 표면습도의 변화를 모사할 수 있는 방법으로 판단되었다. 실제로 현장에 타설된 콘크리트는 넓은 표면적을 갖기 때문에 콘크리트의 표면 바로 위에 위치한 증기는 주로 대기의 상부와 하부 사이의 압력차이에 의하여 이동한다. 그러므로, 정확한 표면 습도를 측정하기 위하여 콘크리트 표면에 PVC 실린더를 놓아 상대적으로 좁은 면적을 갖는 콘크리트 시편 바로 위의 증기가 횡방향으로 확산되는 것을 방지하고 물에 잘 젖지 않는 성질의 망사를 실린더 상부에 씌움으로써 외부에 의하여 실린더 내부의 증기가 상부의 대기와 순식간에 섞이는 것을 적절히 방지하여 최대한 합리적이고 정확하게 콘크리트의 표면습도를 측정할 수 있도록 하였다.

### 3. 실험결과

상기의 실내실험을 통하여 0, 2.08, 2.83, 그리고 5.33m/s의 4가지 다른 풍속 하에서 대기와 콘크리트 내부 및 표면의 습도가 측정되었으며 유효양생두께(Bazant와 Najjar 1972)가 계산되었다.

#### 3.1. 콘크리트의 습도

그림 4에서 보듯이, 콘크리트 내부, 표면, 그리고 대기 순으로 높은 습도를 나타내었다. 또한, 타설 직후의 콘크리트는 내부와 표면 모두에서 매우 낮은 습도를 나타내었는데, 이러한 낮은 습도는 이후 몇 시간 동안 서서히 상승하였고 최고점에 이른 후 다시 하강하는 추이를 보였다. 타설 직후의 콘크리트의 낮은 습도는 콘크리트 내부의 큰 증기압과 대기의 낮은

증기압 사이에 평형이 이루어지는 과정에서 매우 높은 수분확산도가 발생하여 나타난 현상으로 판단된다(Jeong과 Zollinger, 2003). 초기의 매우 높았던 수분확산도가 점차 감소하면서 콘크리트의 습도는 점차 증가하여 어느 시점에 이르러서는 최고점에 도달하였다. 하지만, 수분확산도는 여전히 높은 수준이었으며 많은 양의 수분이 증발되었다. 콘크리트 표면에서 증발이 계속되면서 블리딩에 사용될 수 있는 콘크리트 내부의 수분이 점차 감소하였으며, 이로 인하여 콘크리트의 습도, 특히, 표면의 습도는 대기습도와 평형을 이루어 갔다.

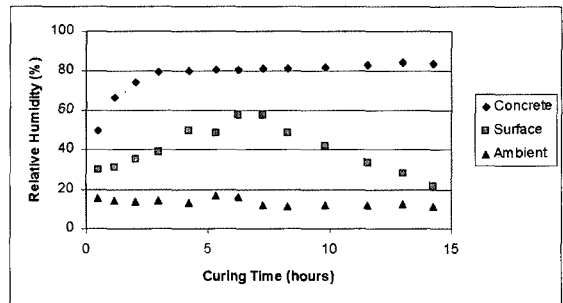


그림 4. 각 위치에서의 양생시간에 따른 습도의 변화 (바람이 없는 경우)

위에서 언급한 타설 직후의 콘크리트 습도의 추이가 일련의 실내실험을 통하여 검증되었다. 세 개의 습도계를 준비한 후 이 중 두 개를 젖은 수건으로 싸서 타설 직후의 콘크리트 내부와 동일한 환경을 만들어 주었다. 이 두 개의 습도계 중 하나를 젖은 수건과 함께 비닐봉지 안에 밀봉하여 젖은 수건으로부터 증발이 일어나지 않도록 하였으며, 나머지 하나의 습도계에는 수건에 끊임없이 물을 뿌려 주어 실험을 하는 동안 수건이 축축한 상태를 유지하면서 증발이 계속하여 일어나도록 하였다. 약 20에서 30% 사이의 상대습도를 갖는 실험실에서 이 두 개의 습도계로부터 약 3시간 동안 습도를 측정하였으며, 이와 비교하기 위하여 수건이나 비닐로 전혀 싸지 않은 나머지 하나의 습도계는 약 100%의 상대습도를 갖는 양생실에 넣고 습도를 측정하였다. 그림 5에서 보듯이 젖은 수

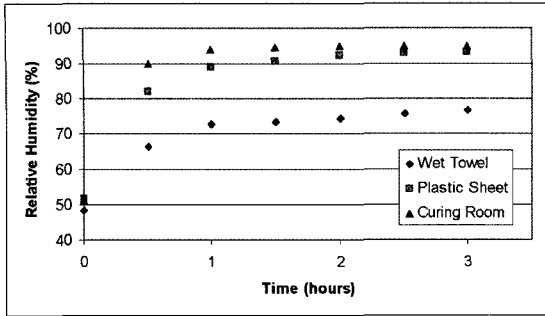


그림 5. 타설 직후 콘크리트 내부의 수분 이동을 모사하기 위한 실내실험 결과

건으로 쌓인 습도계는 실험을 하는 내내 수건이 젖어 있었음에도 불구하고 약 50%에서부터 80%까지의 비교적 낮은 상대습도를 나타내었으며 서서히 상승하였다 이와는 대조적으로 비닐로 싸인 습도계와 약 100% 상대습도의 양생실에 놓인 습도계의 상대습도는 빠른 속도로 상승하여 약 1시간 후에 90% 이상에서 안정되어 비교적 높은 상대습도를 나타내었다. 이상의 관찰을 통하여, 타설 직후의 콘크리트가 비록 젖어 있었지만 빠른 속도의 증발로 인하여 수분 확산도가 증가하면서 콘크리트 내부의 증기압이 크게 감소하였으며 이로 인하여 비교적 낮은 상대습도를 나타낸 것을 확인할 수 있었다.

콘크리트의 표면습도에 미치는 풍속의 영향은 그림 6과 같다. 콘크리트 표면습도의 최고값과 블리딩이 발생한 시간은 풍속이 증가함에 따라 감소하였다. 최고 상대습도는 0, 2.08, 2.83, 그리고 5.33m/s의 풍속에서 콘크리트 타설 6.3, 4.7, 3.3, 그리고 2.2 시간 후에 각각 나타났으며, 그 크기는 각각 57.6, 47.8, 35.9, 그리고 28.8%였다. 흥미로운 사실은 풍속에 따라 콘크리트 표면습도의 최고값과 그 발생 시간이 제각기 달랐지만, 표면습도의 상승과 하강률, 즉 곡선의 기울기는 거의 동일했다는 것이다.

### 3.2 유효양생두께

타설 직후, 콘크리트의 깊이에 따른 습도의 변화율 즉 습도구배는 거의 영(zero)이지만, 콘크리트 표면

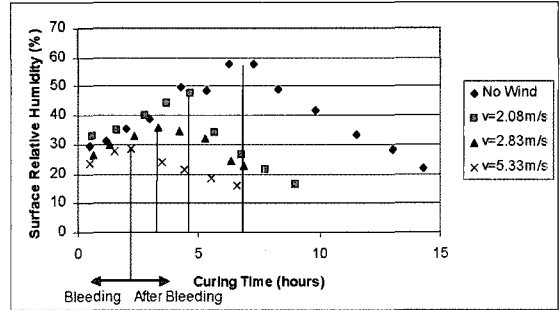


그림 6. 블리딩 중과 블리딩 후의 풍속별 콘크리트 표면습도

의 수분이 증발하여 표면습도가 감소하게 되면 표면 근처에서 큰 습도구배가 형성된다. 콘크리트 표면 근처에서의 큰 습도구배는 깊이에 따라 점차 감소하여 10cm 내외의 깊이에서 0에 가까워진다(Jeong과 Zollinger, 2003). 깊이에 따라 콘크리트의 습도구배가 점차 감소하는 점으로 미루어 볼 때, 표면 근처의 콘크리트 층이 그보다 하부에 존재하는 콘크리트의 수분이 상부로 이동하는 것을 감소시켜 일정 깊이 아래에서는 습도구배가 거의 0에 가까워지는 것으로 볼 수 있다. 또한, 콘크리트 내 수분의 이동은 콘크리트의 수분증발을 억제하기 위하여 사용되는 양생제의 효율에 영향을 받기 때문에, 원래의 콘크리트 위에 더해지는 가상의 콘크리트 층의 두께인 유효양생두께(Bazant와 Najjar 1972)로 양생효과를 정량화할 수 있다.

유효양생두께를 계산할 때에는 그림 7의 (a)와 같이 양생이 전혀 안 되어 증발이 최대로 일어나는 이상적인 경우에 콘크리트의 습도구배가 0이 되는 깊이인  $a$ 를 기준으로 한다. 만일, 그림 7의 (b)와 같이 높은 양생품질에 의해 수분의 증발이 적게 일어나 습도구배가 0이 되는 깊이가 얇을 때에는 그 깊이의 차이인  $a-b$ 만큼 두꺼운 가상의 콘크리트 층이 원래 콘크리트 위에 더하여진다고 가정하는 것이다. 그리고 그림 7의 (c)와 같이 낮은 양생품질에 의해 많은 수분증발이 일어날 때에는 습도구배가 0인 위치가 깊어지므로  $a-c$ 만큼의 상대적으로 얇은 가상의 콘크리트 층이 원래 콘크리트 위에 더하여진다고 가정하는

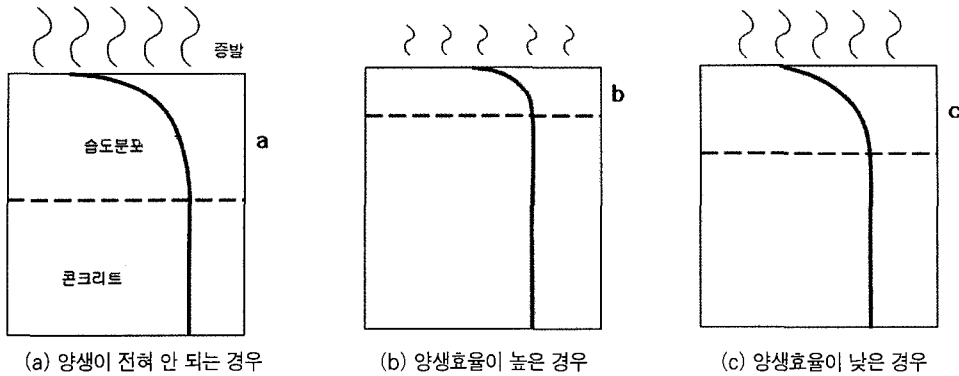
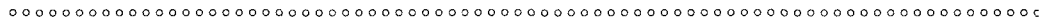


그림 7. 양생효율별 콘크리트의 깊이에 따른 습도 변화

것이다. 식 (1)(Bazant와 Najjar 1972)에 의해 계산되는 유효양생두께는 주로 콘크리트의 표면습도에 지배되므로 그림 8에 보인 유효양생두께의 변화추이는 그림 6의 표면습도 변화의 경향과 유사하다. 따라서, 유효양생두께도 표면습도와 마찬가지로 블리딩 중에 증가하다가 블리딩이 끝나면서 감소하였다. 풍속이 커짐에 따라 콘크리트 표면에서의 증발이 많아지고 양생효율이 낮아져 유효양생두께가 얇아졌으며, 풍속이 작아짐에 따라 양생효율이 높아져 유효양생두께가 두꺼워졌다.

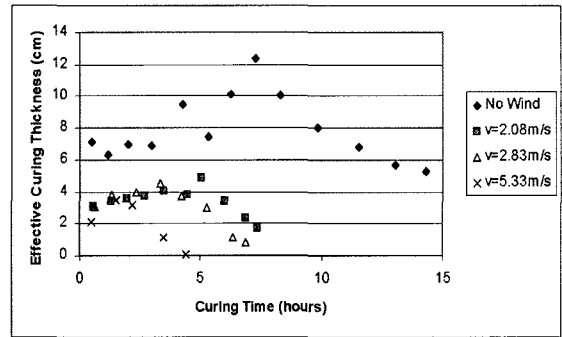


그림 8. 풍속별 콘크리트의 유효양생두께

$$L = -\frac{\ln\left(\frac{H_s}{H_a}\right)}{\frac{\partial H_s}{\partial x}} \quad (1)$$

#### 4. 모형개발과 검증

특정한 기상조건과 특정한 재료특성에 대하여 콘크리트의 내부와 표면은 각각 특정한 범위의 습도를 나타내므로 실내실험에서 측정된 습도자료를 이용하여 콘크리트의 표면습도 예측모형을 개발하고 이를 이용하여 다양한 조건 하에 있는 콘크리트의 표면습도를 예측하는 것은 중요한 의미를 갖는다. 상기의 실내실험에서 얻어진 대기습도, 콘크리트의 내부와 표면습도, 그리고 유효양생두께 자료를 모두 이용하여 그림 9의 관계를 유도하였으며, 이로부터 콘크리트의 표면습도를 예측할 수 있는 모형을 식 (2)와 같이 개발하였다.

여기서,

- $L$  = 유효양생두께 (mm)
- $H_a$  = 대기습도 (소수점 단위)
- $H_s$  = 콘크리트 표면습도 (소수점 단위)
- $x$  = 콘크리트 깊이 (mm)
- $\frac{\partial H_s}{\partial x}$  = 표면 근처에서 깊이에 따른 콘크리트의 습도 변화 ( $\text{mm}^{-1}$ )

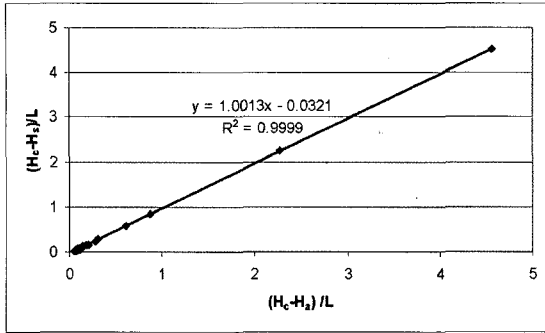


그림 9. 표면습도 모형 개발을 위한 측정자료 사이의 관계

$$H_s = 1.0013H_a - 0.0013H_c + 0.0321L \quad (2)$$

개발된 모형의 검증을 목적으로 표 2의 배합비를 갖는 콘크리트 시편에 대하여 바람이 없는 상대습도 25%의 양생실에서 동일한 방법의 실험이 수행되었다. 그림 10에서 보듯이, 측정된 콘크리트 표면의 습

표 1. 모형검증에 사용된 콘크리트의 1m<sup>3</sup> 체적당 배합비

재 료	배 합 비
굵은골재 (석회석)	1076kg
잔골재 (천연모래)	749kg
시멘트 (1종 보통)	397kg
물	127g
물-시멘트비	0.32
콘크리트 단위중량	2353kg/m <sup>3</sup>

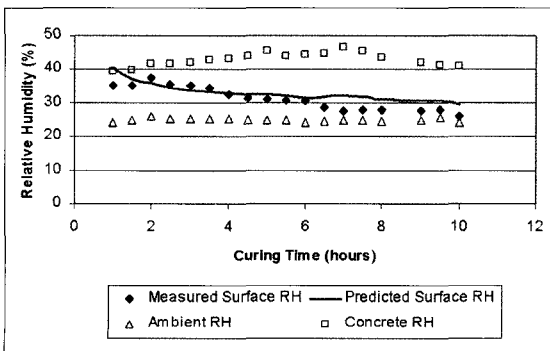


그림 10. 모형검증을 위한 실내실험 결과

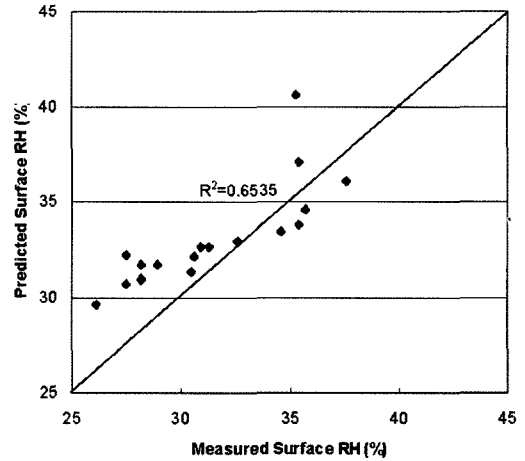


그림 11. 측정된 표면습도와 예측된 표면습도의 비교

도는 콘크리트 내부의 습도와 대기습도 사이에 분포 하였으며 콘크리트의 내부습도보다 빠른 속도로 그 크기가 감소하여 합리적인 경향을 보였다. 또한, 측정된 콘크리트 표면의 습도는 식 (2)의 모형에 의하여 예측된 습도와 그림 11과 같이 대체로 일치하여 모형이 합리적으로 개발된 것으로 판단되었다.

## 5. 결론

증발이 일어나고 있는 콘크리트 표면의 습도를 정확하게 측정할 수 있는 방법을 조사하고 이를 예측할 수 있는 모형을 개발하기 위하여 일련의 실내실험이 수행되었다. 실내실험은 40℃의 온도와 15%의 상대습도를 갖는 양생실에서 수행되었으며, 4가지의 다른 풍속 하에서 대기습도와 콘크리트의 내부 및 표면 습도가 측정되었다. 타설 직후의 콘크리트는 내부와 표면 모두에서 낮은 습도를 나타내었으며, 이는 증발이 일어나고 있는 콘크리트의 내부에서 수분이 빠른 속도로 이동하고 있기 때문인 것으로 나타났다. 실내 실험을 통하여 측정된 대기습도와 콘크리트 내부 및 표면의 습도를 사용하여 콘크리트의 양생품질을 정량적으로 나타낼 수 있는 유효양생두께가 계산되었다. 그리고, 이상의 자료를 이용하여 콘크리트의 표



면습도를 예측할 수 있는 모형이 개발되었으며 추가적인 실험을 통하여 모형의 유효성이 검증되었다. 개발된 모형을 경계조건으로 하는 수치해석 모형을 사용하여 콘크리트 내부의 습도분포와 변화를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. ASTM. (1999). *ASTM C 29: Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
2. ASTM. (1999). *ASTM C 192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
3. Bazant, Z. P. and Najjar, L. J. (1972) Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete. *Materials and Structures (RILEM)*, Vol. 5, No. 25, pp.3-20.
4. Jeong, J. H., Wang, L., and Zollinger, D. G. (2001). A Temperature and Moisture Module for Hydrating Portland Cement Concrete Pavements. *Proceedings, 7th International Conference on Concrete Pavements*, Vol. 1, Orlando, Florida, September, pp. 9-22.
5. 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 1861: Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, pp. 17-25.
6. Jeong, J. H. and Zollinger D. G. (2004). Early-Age Curling and Warping Behavior: Insights from a Fully Instrumented Test-Slab System. *Transportation Research Record 1896: Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, 2004, pp. 66-74.
7. Jeong, J. H. and Zollinger, D. G. (2005). Environmental Effects on the Behavior of Jointed Plain Concrete Pavements. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 2, February, pp. 140-148.
8. Parrott, L. J. (1988). Moisture Profiles in Drying Concrete. *Advances in Concrete Research*, Vol. 1, No. 3, pp. 164-170.
9. Parrott, L. J. (1991). Factors Influencing Relative Humidity in Concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 43, No. 154, pp. 45-52.
10. Rasmussen, R. O., Ruiz, J. M., Rozycki, D. K., and McCullough, B. F. (2002). Constructing High-Performance Concrete Pavements with FHWA HIPERPAVE Systems Analysis Software. *Transportation Research Record 1813: Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, pp. 11-20.

〈접수 : 2005. 3. 21〉