



재령 초기 콘크리트 슬래브의 컬링에 미치는 온도와 수분의 영향

Effect of temperature and moisture on curling of early age concrete slabs

썬 런쥘안* 남 영 국** 홍 승 호*** 정 진 훈****
 Sun, Ren Juan Nam, Young Kug Hong, Seung Ho Jeong, Jin Hoon

Abstract

It is known that the long-term behavior and performance of jointed concrete pavement due to slab curling are affected by the environmental factors such as temperature, moisture, and so on. However, any relationships between the curling and its factors have not been defined clearly yet because of insufficient detailed investigation. The temperature, relative humidity, strain, vertical displacement of a concrete slab, and horizontal movement of its transverse joints were investigated by various sensors and devices instrumented in the slab of a concrete pavement section constructed for this study. The constraint of the curling by joint stiffness was investigated in addition to effect of the temperature and moisture on the early aged concrete slab by analyzing the field data measured for approximately 4days from concrete placement. The curling of the concrete slab showed 24hour cycles mainly because of the temperature effect, and the upward curling gradually increased because of the long-term effect of drying shrinkage of the concrete. The magnitude and variation of the curling were significantly affected by the joint stiffness which is comprised of aggregate interlocking and other factors. The effect of the variation of the seasonal joint stiffness varying with the temperature and long-term drying shrinkage on the slab curling will be investigated as a further study.

Keywords : concrete pavement, slab curling, temperature, relative humidity, drying shrinkage, strain, vertical displacement, joint stiffness

요 지

온도 및 수분 등과 같은 환경적인 요인들은 슬래브의 컬링을 유발하여 줄눈 콘크리트 포장의 장기적인 거동과 공용성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 하지만, 콘크리트 슬래브의 컬링에 관한 상세한 조사가 부족한 실정이므로 컬링과 이에 미치는 요인들의 관계는 아직까지도 명확하게 정의되지 못하고 있다. 본 연구에서는 현장에 건설된 줄눈 콘크리트 포장의 한 슬래브에 각종 계측기를 매설하여 콘크리트 슬래브의 온도, 상대습도, 변형률, 연직변위, 그리고 슬래브 좌우측 줄눈부의 수평방향 움직임을 조사하였다. 콘크리트 타설 직후부터 약 4일간 측정된 현장자료를 분석하여 초기 재령 콘크리트 슬래브의 컬링에 미치는 온도와 수분의 영향과 줄눈강성의 크기에 따라 컬링이 구속되는 정도를 조사하였다. 콘크리트 슬래브의 컬링은 주로 온도의 영향때문에 24시간 주기의 사이클을 나타내었으며, 장기적인 건조수축의 영향으로 상향의 컬링이 점차 증가하는 경향을 보였다. 또한, 컬링의 크기와 변화량이 골재 맞물림 등에 기인하는 줄눈강성에 영향을 크게 받는 것으로 조사되었다. 향후 온도에 의한 계절별 줄눈강성의 변화와 장기적인 건조수축이 콘크리트 슬래브의 컬링에 미치는 영향을 추가로 조사할 예정이다.

핵심용어 : 콘크리트 포장, 슬래브 컬링, 온도, 상대습도, 건조수축, 변형률, 연직변위, 줄눈강성

* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사
 ** 정회원 · (주) 한맥기술 기술연구원장 · 공학박사
 *** 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 · 공학박사
 **** 정회원 · 교신저자 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사



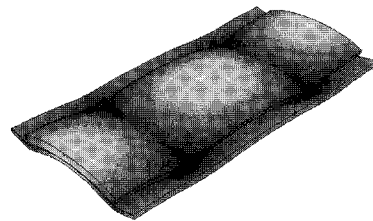
1. 서론

주로 낮에 타설되는 콘크리트 슬래브는 상대적으로 높은 대기온도와 콘크리트로부터 발생한 수화열의 영향으로 타설 당일 대체로 높은 온도를 유지하게 된다. 타설 당일의 높은 콘크리트의 온도는 대기온도가 낮아지는 이튿날 오전에 외부로 열을 빼앗겨 낮아졌다가 대기온도가 높아지는 오후에 온도가 다시 높아지는 24시간 주기의 사이클을 나타내게 된다. 타설 직후의 콘크리트는 완전히 젖어 있는 상태가 되어 이때 내부에 존재하는 수분의 영향으로 콘크리트 슬래브는 높은 상대습도를 나타내다가 슬래브 표면으로부터 수분이 점차 증발하면서 상대습도가 낮아지게 된다. 특히, 대기의 상대습도가 낮고 온도가 높은 오후에는 콘크리트의 상대습도가 낮아지고, 대기의 상대습도가 높고 온도가 낮아서 이슬이 맺히기 쉬운 새벽에는 콘크리트의 상대습도가 높아지므로 콘크리트의 상대습도도 24시간 주기의 사이클을 나타내게 된다.

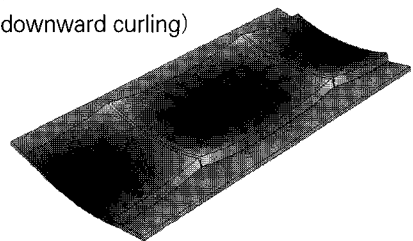
대기와 접하는 콘크리트 슬래브의 상부 표면에서는 온도와 상대습도의 변화가 심하므로 상대적으로 그 변화가 작은 슬래브 하부와의 사이에 온도 및 상대습도의 차이를 나타낸다. 콘크리트는 온도나 상대습도가 높으면 팽창하고 이와는 반대로 온도나 상대습도가 낮으면 수축하므로 슬래브 상부의 온도나 상대습도가 하부보다 높을 경우에는 슬래브의 중앙부를 기준으로 우각부가 하향으로 변위를 일으키는 하향의 컬링이 발생하고 반대로 슬래브 상부의 온도나 상대습도가 하부보다 낮을 경우에는 우각부가 상향으로 변위를 일으키는 상향의 컬링이 그림 1(유태석 외 2000)과 같이 발생한다. 이로 인하여 슬래브와 기층 사이의 접촉면적이 줄어들 수 있으며, 기층과 접촉이 되지 않은 슬래브의 모서리와 우각부에서는 지지력이 국부적으로 감소되어 반복적인 하중재하시 파손이 발생할 수 있으므로 컬링 거동은 장기공용성 저하에 영향을 줄 수 있다(Jeong 2003). 콘크리트 슬래브는 재령이 증가하면서 상향의 컬링이 커지는

경향을 갖게 되는데, 이는 기상과 관련된 여러 가지 요인들 중 수분과 관련된 콘크리트의 건조수축에 의하여 발생하는 것으로 보고되었다(Jeong 외 2005, Wells 2006).

콘크리트 슬래브의 컬링이 콘크리트 포장의 거동 및 장기공용성에 미치므로, 이를 유발하는 각종 환경적인 요인들의 영향을 컬링의 발생시점인 재령 초기부터 장기적으로 관찰 및 분석할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 콘크리트 포장을 시험시공하여 콘크리트 슬래브의 온도, 상대습도, 변형률, 연직 변위, 그리고 슬래브 좌우측 줄눈부의 수평방향 움직임을 콘크리트 타설 직후부터 장기간에 걸쳐 조사해 오고 있다. 본 논문에서는 재령 초기에 측정된 자료를 분석하여 콘크리트 슬래브의 컬링에 미치는 온도와 수분의 영향에 대하여 소개하고자 한다.



(a) 하향 컬링(downward curling)



(b) 상향 컬링(upward curling)

그림 1. 콘크리트 슬래브 컬링의 유형

2. 시험시공

충청남도 당진군 소재 (주)장현산업 부지에 린 콘크리트 기층을 타설하고 양생한 후 그림 2와 같은 152m 길이의 콘크리트 슬래브를 2007년 5월 29일과 6월 2일에 1차로와 2차로로 나누어 각각 타설하



였다. 콘크리트 슬래브의 컬링을 재령 초기부터 장기적으로 관찰하기 위하여 6월 2일에 타설된 2차로 중 한 개의 슬래브 내에 Thermocouple, I-Button, Vibrating Wire Strain Gauge, Moisture Sensor를 집중적으로 매설하였고, 슬래브의 종방향 모서리를 따라 Dial Gauge를 설치하고 슬래브의 좌우측 줄눈부에 Demac Point를 부착하였다. 2차로의 콘크리트 슬래브는 표 1의 배합비를 사용하여 제작되었으며, 높이는 300mm, 폭은 4m, 줄눈의 간격은 6m로서 높이 150mm의 린 콘크리트 위에 타설되었으며, 컬링을 관찰하기 위하여 센서가 매설된 슬래브는 약 12시경에 타설되었다.

표 1. 콘크리트 슬래브 배합비(kg/m³)

Cement	Fly ash	W	S1	S2	G1	AD1	W/C (%)	S/A (%)
310	55	161	350	350	1078	1.83	44.1	39.4

(S1: 바다모래, S2: 부순모래, AD1: 표준형 AE 감주제)

콘크리트 내 온도분포의 변화를 측정하기 위하여 슬래브의 25mm, 75mm, 175mm, 그리고 275mm 깊이에서 Thermocouple과 I-Button을 슬래브의 각기 다

른 위치에서 설치하였으며, 콘크리트 내 상대습도 분포의 변화를 측정하기 위하여 동일한 깊이에 습도센서(KIMO社 HD50)를 설치하였다. 습도센서는 매립형이 아니기 때문에 수분을 함유하고 있는 콘크리트와 접촉할 경우 고장이 발생할 우려가 크므로, 슬래브와 같은 높이를 갖는 직경 300mm PVC 실린더 측면의 상대습도측정 깊이마다 구멍을 뚫고 습도센서가 삽입될 정도의 작은 파이프를 연결한 후 이를 콘크리트 슬래브 내에 매립하여 측정시 습도센서가 콘크리트와 접촉하지 않도록 하였다(선린주안 외 2007). 습도센서의 측면은 탄력이 있는 테이프로 감아 삽입된 습도센서와 파이프 사이로 공기가 통과하지 않도록 하여 콘크리트의 상대습도를 정확하게 측정할 수 있도록 하였다. 슬래브의 위치별로 깊이에 따른 변형을 분포의 변화를 측정하기 위하여 슬래브 4개 위치(중앙, 종방향 모서리, 횡방향 모서리, 우각부)에서 50mm와 250mm 2개 깊이에 총 8개의 Vibrating Wire Strain Gauge(Geokon社 4200)를 설치하였다. 콘크리트 슬래브 타설 이튿날인 6월 3일 오후에 린 콘크리트 기층과 콘크리트 슬래브 간의 상대연직변위를 측정하기 위하여 슬래브의 종방향 모서리를 따라 1.5m간격으로 5개의 Dial Gage

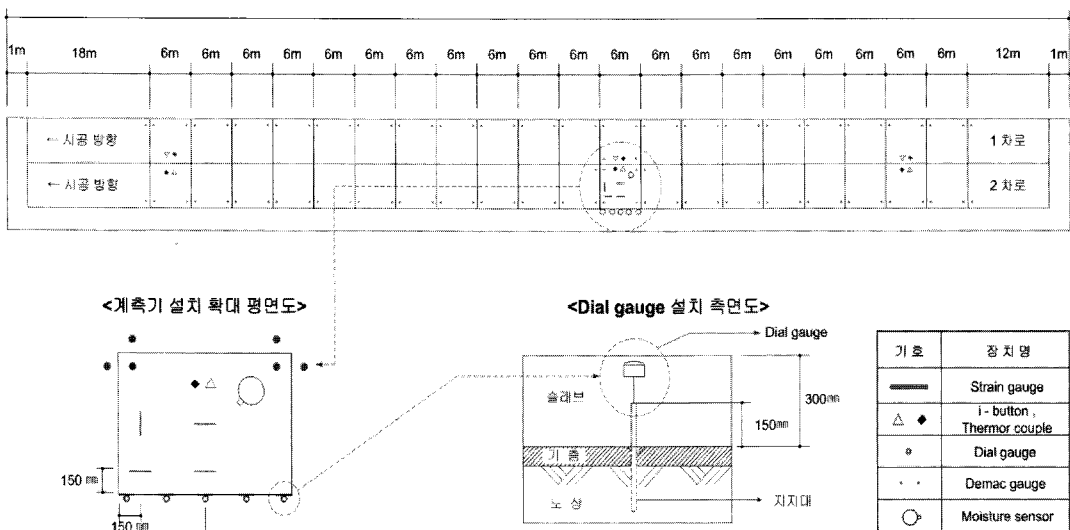


그림 2. 센서 설치위치



를 설치하였다. 이외에도 슬래브 좌우측 줄눈부의 움직임 측정하기 위하여 줄눈 근처의 슬래브 상부표면에 드릴로 뚫은 얇은 구멍에 예폭사로 Demac Point를 부착시켰다.

3. 콘크리트 슬래브의 온도와 상대습도

콘크리트 슬래브의 컬링은 대기온도 및 수화열에 의한 슬래브 내 온도의 분포변화와 대기상대습도에 의한 슬래브 내 상대습도 분포의 변화에 좌우된다. 따라서, 재령 초기 대기 및 콘크리트 슬래브의 온도와 상대습도를 측정하여 환경요인들과 컬링의 발생 및 변화의 상관관계를 추정하였다.

3.1 콘크리트 슬래브 내 온도분포의 변화

콘크리트 슬래브의 온도는 콘크리트를 타설한 후 약 28시간이 지난 6월 3일 16시경에 그림 3(a)와 같이 최고값을 나타내었는데, 이는 수화열의 발생량이 대기온도가 높을수록 많아지므로(Schindler 2004) 콘크리트 타설 당일 정오 이후에는 대기온도가 크게 하강하여 수화열의 발생량이 적었으며, 대기온도가 다시 높아진 타설 이튿날 오후에서야 수화열의 발생량이 많아졌기 때문에 판단된다. 슬래브의 깊이별 온도를 측정한 결과, 슬래브의 상부표면과 가까운 25mm와 75mm 깊이에서 슬래브 하부인 175mm와 275mm에서보다 온도의 변화가 더 큰 것으로 측정되었는데, 슬래브 상부표면은 콘크리트 내부와 대기의 열이 서로 전달되는 경계면이므로 온도의 변화가 컸으나 슬래브 하부는 대기와 멀리 떨어져 열의 이동이 적었기 때문에 판단된다. 또한, 대기와 가까운 슬래브 상부에서는 대기온도와 거의 동일한 크기와 시간의 온도 사이클을 나타내었으나 슬래브 하부에서는 대기와의 열전달에 걸리는 시간이 길기 때문에 일중 최저 및 최고 대기온도가 나타난 후 시간 후에야 일중 최저 및 최고온도를 나타내었고 온

도의 변화도 작았다. 타설직후 콘크리트 내에 발생했던 수화열을 대기 및 린 콘크리트 기층으로 빼앗기면서 높았던 콘크리트 슬래브의 초기온도는 점차 낮아져서 대기온도에 가까워졌다.

콘크리트 슬래브 상부의 온도가 하부보다 높을 경우에는 슬래브가 하향의 컬링을 일으키고 반대로 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮을 경우에는 상향의 컬링을 일으킨다. 따라서, 콘크리트 슬래브의 컬링 거동을 분석하기 위해서는 슬래브의 상부와 하부간의 온도차이를 조사할 필요가 있다. 콘크리트 슬래브의 온도는 깊이에 따라 비선형으로 분포하지만(Jeong 2003, 썬 런쥔안 외 2007) 이를 직접 구조 해석 등에 적용하기 곤란하므로 비선형 온도분포에 의하여 슬래브에 발생하는 응력과 동일한 응력을 유발하는 선형의 온도분포를 이론적으로 구하여 슬래브 상부와 하부간의 온도차이를 계산하고 이를 유효 선형 온도차이(Mohamed 외 1996)라고 부른다. 유효 선형 온도차이를 계산하기 위한 첫 번째 절차로서 슬래브의 깊이에 따라 측정된 비선형 온도분포를 식 (1)의 3차 포물선 형태로 표현한다.

$$\Delta T(z) = A + Bz + C_z^2 + D_z^3 \quad (1)$$

여기서,

$\Delta T(z)$ = 슬래브 특정 깊이에서의 슬래브 하단과의 온도차이

z = 슬래브 중간 깊이로부터의 거리, 상향은 음(-), 하향은 양(+)

A, B, C, D = 회귀계수

콘크리트 슬래브 상부와 하부간의 비선형 온도분포에 의한 컬링에 의하여 슬래브에는 곡률이 발생하며, 이로 인하여 슬래브 내부에는 변형률과 응력이 발생하는데 이와 동일한 응력을 유발하는 유효 선형 온도차이를 식 (2)와 식 (3)에 의하여 계산할 수 있다.

$$\Delta T_{eq} = -\frac{12M^*}{\alpha h^2} \quad (2)$$



여기서,

ΔT_{eq} = 등가선형 온도차이

$$M^* = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \alpha \Delta T(z) z dz = \alpha \left(B \frac{h^3}{12} + D \frac{h^5}{80} \right)$$

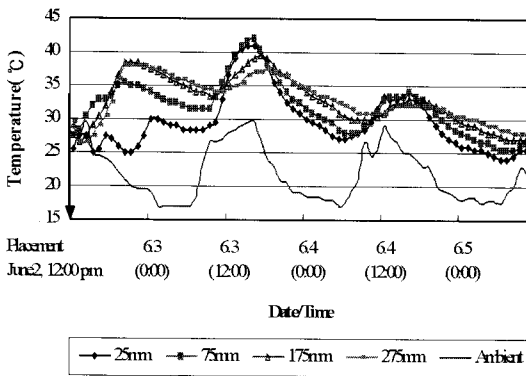
α = 콘크리트의 열팽창계수

h = 슬래브 두께

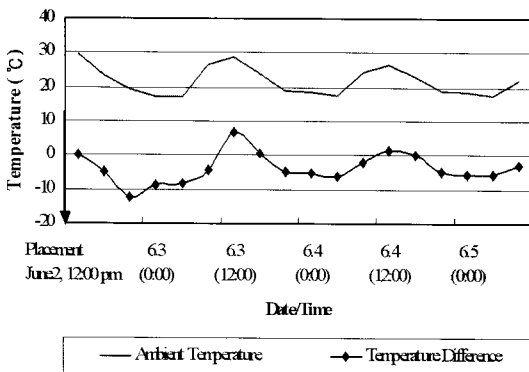
따라서,

$$\Delta T_{eq} = -12 \left(\frac{Bh}{12} + \frac{Dh^3}{80} \right) \quad (3)$$

식(3)을 이용하여 계산된 시간에 따른 슬래브 상하부간 등가선형 온도차이는 그림 3(b)와 같으며, 등가선형 온도차이에 콘크리트의 열팽창계수를 곱하여 콘크리트 슬래브 상부와 하부간의 부등열변형률



(a) 시간에 따른 슬래브 깊이별 온도 변화



(b) 슬래브 상하부간 온도차이의 변화

그림 3. 콘크리트 슬래브의 온도

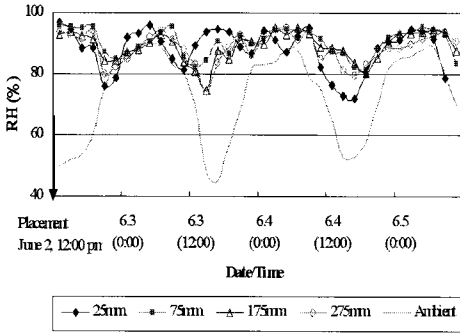
을 계산할 수 있다. 계산된 등가선형 온도차이의 변화는 대기온도의 변화와 유사한 경향을 나타내었는데, 이는 대기온도가 콘크리트 슬래브의 온도에 매우 크게 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다.

3.2 콘크리트 슬래브 내 상대습도 분포의 변화

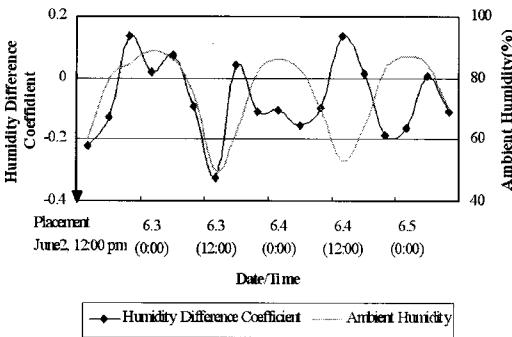
타설직후 수분을 많이 포함한 콘크리트 슬래브의 상대습도는 그림 4(a)와 같이 깊이에 상관없이 95% 내외의 일정한 값을 약 13시간 동안 나타내었다. 하지만, 타설당일 오후에 콘크리트 슬래브 상부표면에서의 수분증발로 인하여 슬래브의 상부에서 약 75%, 하부에서 약 85%까지 상대습도가 하강하였으며, 대기상대습도가 높아진 타설 이튿날 아침에 다시 상대습도가 상승하였다. 또한, 대기상대습도와 마찬가지로 아침에는 높은 상대습도를 나타내었고 오후에는 낮은 상대습도를 나타내어 24시간 주기의 사이클을 나타내었는데, 대기와 가까운 슬래브 상부에서의 상대습도의 변화가 대기에서 먼 슬래브 하부에서의 변화보다 큰 것으로 나타났다. 온도의 경우와 마찬가지로 대기와 가까운 슬래브 상부에서 대기상대습도와 거의 동일한 상대습도 사이클을 나타낸 반면, 대기와 먼 슬래브 하부에서는 일중 최저 및 최고 대기상대습도가 발생하고 수 시간이 지난 후에야 일중 최저 및 최고 콘크리트 상대습도를 나타내었다. 콘크리트 슬래브의 4군데 깊이에서 측정된 상대습도를 이용하여 식(1)에서 식(3)까지와 동일한 방법으로 계산된 유효선형 습도차이 계수 $\Delta \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right]_{eq}$ 는 슬래브 상부와 하부간 상대습도의 차이를 나타내기 위한 계수로서 콘크리트의 최종건조수축을 곱해주어 콘크리트 슬래브 상하부간의 부등건조수축을 계산하는데 사용할 수 있다(Jeong 2003). 여기서, RH는 백분율로 나타난 콘크리트의 상대습도이다. 콘크리트의 상대습도가 대기상대습도의 영향을 많이 받기 때문에 콘크리트의 상대습도로 계산된 슬래브의 유효선형 습도차이 계수는 그림 4(b)와 같이 대기상대습도와 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 그



림 4(b)에서 보듯이, 초기에는 합리적인 경향의 유효선형 습도차이 계수를 보이지 않았으나 콘크리트 타설 이틀 후인 6월 4일부터는 오전에 최소값과 오후에 최대값을 보였으며, 대기상대습도 및 콘크리트의 상대습도와 마찬가지로 24시간 주기의 사이클을 나타내었다. 슬래브 상부의 상대습도가 하부보다 낮아서 양의 값으로 계산된 유효선형 습도차이 계수는 상대적으로 더 큰 슬래브 상부의 건조수축으로 인한 상향의 컬링을 유발하며, 반대로 음의 값으로 계산된 유효선형 습도차이 계수는 하향의 컬링을 유발한다. 콘크리트는 장기적으로 증발하므로 상대습도가 꾸준히 하강하면서 건조수축이 증가하는데, 증발이 발생하기 쉬운 조건인 슬래브의 상부는 하부보다 건조수축이 크고 그 차이도 시간에 따라 점점 커지므로 장기적으로는 양의 유효선형 습도차이 계수가 증가되고 상향의 컬링이 커지는 것으로 판단되었다.



(a) 시간에 따른 슬래브 깊이별 상대습도 변화



(b) 슬래브 상하부간 습도차이 계수의 변화

그림 4. 콘크리트 슬래브의 상대습도

4. 콘크리트 슬래브의 변형률

콘크리트 슬래브 내부의 온도와 습도분포의 변화는 슬래브의 컬링거동에 영향을 미친다. 따라서, 슬래브의 각 위치 및 깊이에서 변형률의 변화를 측정하여 온도 및 상대습도 등의 환경적 요인에 의한 콘크리트 슬래브 컬링거동의 변화를 조사하였다.

4.1 콘크리트 슬래브의 경화시간

콘크리트 슬래브는 초기경화시간에 어느 정도의 압축강도를 갖게 되어 환경하중에 의한 변형을 나타내기 시작하며, 인장강도를 어느 정도 갖게 된 최종경화시간부터는 연직방향 변위인 컬링거동을 나타내기 시작한다(Jeong 2003). 따라서, 본 연구에서는 ASTM C 403(1999)에서 정하고 있는 관입저항실험을 수행하여 콘크리트 슬래브의 초기 및 최종경화시간을 찾아내었다. 모르타르 시편의 관입저항치가 3.5MPa와 27.6MPa가 되었을 때의 성숙도가 초기 및 최종경화시의 성숙도로 제안되고 있으므로, 콘크리트 슬래브가 이와 동일한 성숙도를 나타내는 시간은 각각 콘크리트 슬래브의 초기 및 최종경화시간은 결정하게 된다. 콘크리트의 매시간 평균온도를 시간에 따라 누적하여 계산되는 성숙도는 특정한 배합을 갖는 콘크리트의 고유한 성질로서 배합이 동일할 경우 성숙도에 따라 동일한 강도발현을 나타내므로, 실내에서 측정된 성숙도와 관입저항치를 현장에 타설된 콘크리트 슬래브의 성숙도와 비교하여 강도발현을 추정할 수 있게 된다. 실험 결과, 모르타르 시편에 대한 관입저항실험으로 측정된 초기 및 최종경화시의 성숙도는 그림 5와 같이 각각 155 $^{\circ}$ C/hours와 198 $^{\circ}$ C/hours였고, 이를 콘크리트 슬래브의 성숙도와 비교한 결과 타설한지 약 4시간과 5시간 후에 각각 초기 및 최종경화시간에 도달한 것으로 나타났다. 초기 및 최종경화시간에 측정된 콘크리트 슬래브의 상하부간 유효선형 온도차이는 각각 -1.4 $^{\circ}$ C와 -1.9 $^{\circ}$ C였고, 유효선형 습도차이 계수는 각각 -0.074와 0.111이었다.

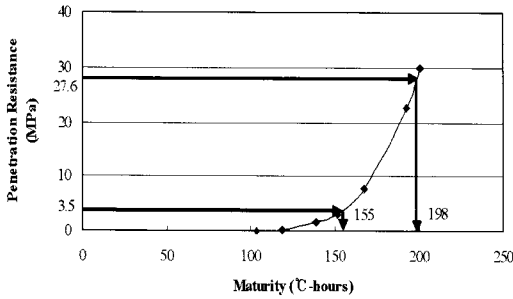


그림 5. 콘크리트의 초기경화 및 최종경화

4.2 콘크리트 슬래브 변형률의 변화

콘크리트 슬래브의 횡방향 모서리, 종방향 모서리, 우각부, 중앙부의 4곳에서 50mm와 250mm의 2개 깊이에 총 8개의 Vibrating Wire Strain Gauge를 설치하여 변형률과 온도를 측정하였다. 콘크리트 슬래브는 초기경화시간부터 일정한 경향을 나타내기 시작하므로 초기경화시간에 측정된 변형률을 영점으로 정하였으며(Jeong 2003), 식 (4)를 사용하여 Gauge로부터 읽은 값을 실제 변형률로 바꾸어 주었다.

$$\mu = (R_1 - R_0)B + (T_1 - T_0)C_1 \quad (4)$$

여기서,

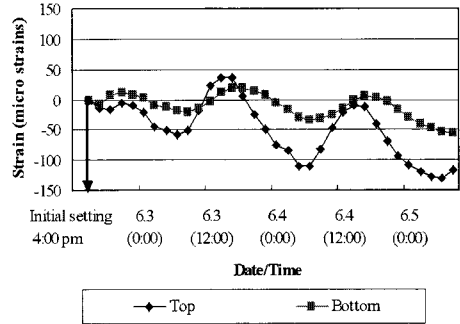
R_0, R_1 = 초기경화시간과 매 측정 시 변형률 센서로부터 읽은 값

B = Gauge 상수 (= 0.96)

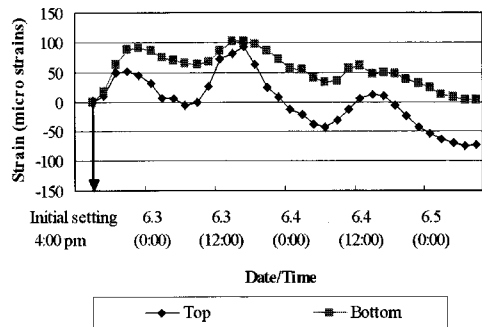
T_0, T_1 = 초기경화 시간과 매 측정시의 온도

C_1 = Gauge의 열팽창계수(12.2micro strains/°C)

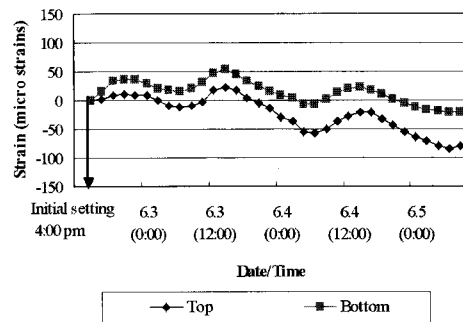
그림 6에서 보듯이 초기경화 직후 슬래브의 상부와 하부 모두에서 인장변형률이 수 시간 동안 증가한 후에야 압축변형률로 변화하였는데, 초기에 발생한 인장변형률은 수화열 및 오후의 높은 대기온도에 의한 콘크리트 슬래브의 온도상승 때문이며, 압축변형률은 오전에 내려간 대기온도와 콘크리트의 꾸준한



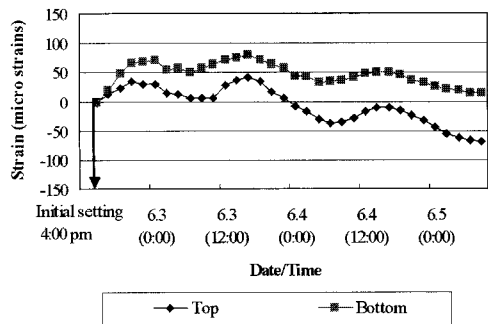
(a) 우각부



(b) 횡방향 모서리



(c) 종방향 모서리



(d) 중앙

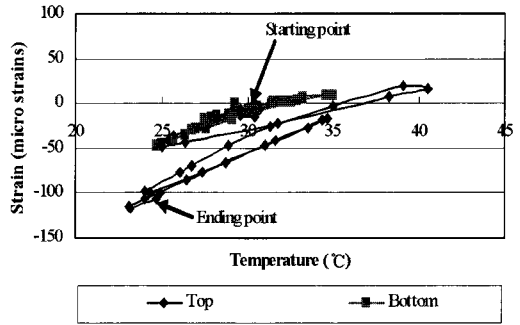
그림 6. 시간에 따른 콘크리트 슬래브의 변형률 변화



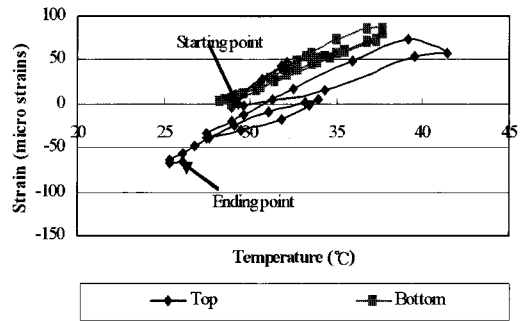
건조수축 때문에 발생한 것으로 판단되었다. 측정기간 동안 슬래브 상부의 변형률이 하부의 변형률보다 변화가 더 큰 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 대기에 접한 슬래브의 상부가 하부에 비하여 기상변화에 더 많은 영향을 받았기 때문으로 판단된다. 콘크리트 슬래브의 온도가 대기온도에 영향을 받으면서 변화하기 때문에 열변형률을 포함하는 콘크리트 슬래브의 변형률도 온도와 마찬가지로 24시간 주기의 사이클을 나타내었다. 시간에 따라 압축변형률이 점점 커졌으며, 콘크리트의 증발과 이로 인한 건조수축이 더 큰 슬래브 상부의 압축변형률 증가율이 하부의 압축변형률 증가율보다 더 크게 나타났다. 콘크리트 슬래브의 각 위치마다 서로 다른 압축변형률의 증가율을 나타내었는데, 대기에 접하기 쉬운 우각부, 모서리, 중앙부의 순서로 증가율이 큰 것으로 나타났다.

4.3 건조수축에 의한 변형률의 변화

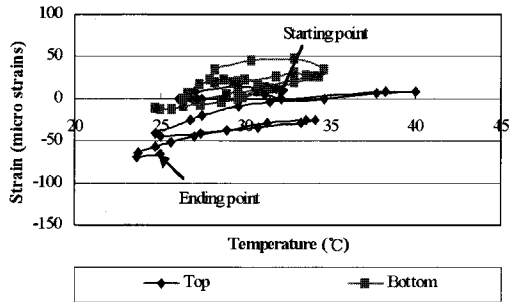
콘크리트 슬래브의 온도와 변형률은 대체로 선형의 관계를 갖지만 그림 7에서 보듯이 완전한 선형의 관계가 아님을 알 수 있는데, 이는 콘크리트 슬래브의 총변형률이 열변형률뿐만 아니라 건조수축 변형률까지 포함하고 있기 때문에 나타나는 현상이다. 콘크리트 슬래브는 온도가 상승하는 오후에 팽창하여 최대인장변형률을 나타내고 온도가 하강하는 오전에 수축하여 최대압축변형률을 나타내면서 24시간 주기의 사이클을 반복하는데, 상대적으로 건조수축이 작은 슬래브 하부에서는 오랜 시간이 경과해도 변형률의 절대값에 큰 변화가 없이 거의 동일한 위치에서 사이클이 반복된 반면, 건조수축이 더 큰 슬래브 상부에서는 시간이 지남에 따라 압축변형률이 점차 증가하는 방향으로 사이클이 반복된 것을 관찰할 수 있었다. 그림에 보인 화살표는 건조수축의 영향으로 시간이 지남에 따라 압축변형률이 점차 증가한 콘크리트 슬래브 상부에서 변형률의 측정이 시작된 점과 종료된 점을 각각 나타낸다. 콘크리트 슬래브의 각 위치마다 대기에 노출된 정도가 다르고 기층과의 마찰



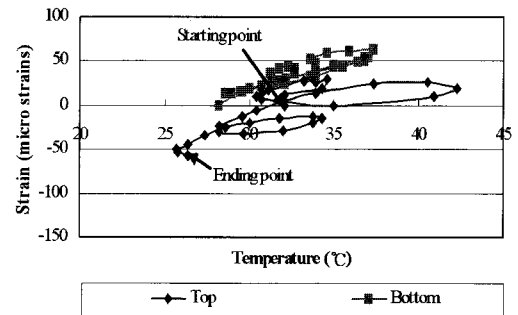
(a) 우각부



(b) 횡방향 모서리



(c) 종방향 모서리



(d) 중앙

그림 7. 건조수축에 의한 콘크리트 슬래브 변형률 사이클의 변화

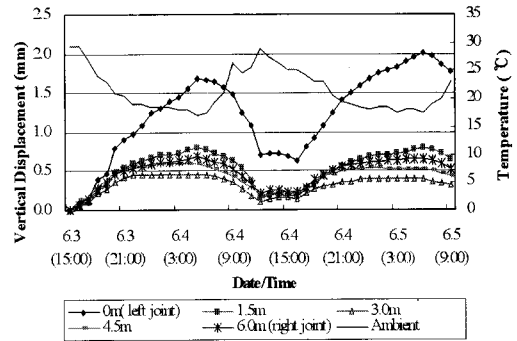


등 구속조건이 다르므로 온도에 따른 변형률의 변화율이나 건조수축에 의한 압축변형률의 증가율도 슬래브의 각 위치에서 다르게 나타났다. 대기에 많이 노출되어 건조수축이 발생하기 유리한 위치인 우각 부로부터 모서리와 중앙부의 순으로 압축변형률의 증가율이 큰 것으로 나타났다.

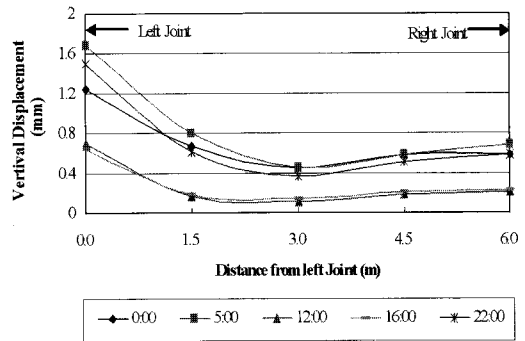
5. 콘크리트 슬래브의 연직변위

그림 2에서 보인 것과 같이 6m의 길이를 갖는 콘크리트 슬래브의 종방향 모서리를 따라 1.5m 간격으로 5곳에 설치된 Dial Gauge를 사용하여 측정된 콘크리트 기층과 슬래브 간의 연직방향 상대변위를 분석하여 슬래브의 켈링을 조사하였다. Gauge 설치상의 문제로 인하여 콘크리트 슬래브가 타설되고 하루가 지난 6월 3일 15시부터 슬래브 연직변위의 측정을 시작하였으며, 이때 측정된 값을 영점으로 정하였다.

측정된 슬래브의 연직변위는 그림 8(a)와 같이 대기온도에 따라 변화하였는데, 대기온도가 크게 내려간 이른 아침에는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮아지면서 Dial Gauge가 설치된 종방향 모서리는 상향의 연직변위를 나타내었으며, 대기온도가 올라간 오후에는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 높아지면서 종방향 모서리는 하향의 연직변위를 나타내었다. 콘크리트 슬래브의 자중이나 린 콘크리트 기층과의 마찰 등 켈링거동에 대한 구속정도가 작은 우각부에서 연직변위의 변화가 더 크게 나타났으며, 종방향 모서리의 중간지점에서는 상대적으로 작은 연직변위의 변화를 나타내었다. 수분이 증발하는 위치인 콘크리트 슬래브 상부의 건조수축은 하부보다 크고 그 차이가 시간에 따라 증가하므로 이로 인한 상향의 켈링도 시간에 따라 증가하는 경향을 보이게 된다. 따라서, 그림 8(a)에서 6월 3일부터 6월 5일까지 대기온도가 유사한 사이클을 보였음에도 불구하고 콘크리트 슬래브의 연직변위는 점점 커져서 건조수축에 의



(a) 시간에 따른 위치별 연직변위



(b) 시간별 종방향 모서리의 켈링형상

그림 8. 슬래브 종방향 모서리의 연직변위

한 상향의 켈링이 증가하였음을 확인할 수 있었으며, 이러한 경향은 슬래브 좌측 우각부에서 가장 크게 나타났다. 그림 8(b)는 연직변위에 의하여 6월 4일 하루동안 시간별로 발생한 슬래브 종방향 모서리 형상의 변화로서, X축은 좌측 줄눈으로부터 측정지점까지의 거리이고 Y축은 측정지점에서의 연직변위이다. 대기온도의 하강으로 슬래브 상부의 온도가 많이 내려간 오전에 상향의 켈링이 최대였으며, 대기온도의 상승으로 슬래브 상부의 온도가 많이 올라간 오후에 상향의 켈링이 최소인 것을 확인할 수 있었다.

콘크리트 슬래브의 우측 줄눈보다 좌측 줄눈에서 시간에 따른 상향 연직변위의 증가가 더 컸는데, 이는 줄눈부에 발생한 균열폭의 증가와 관련이 있을 것으로 추정되었다. 따라서, 슬래브 좌우측 줄눈부에서 균열의 발생시간을 육안으로 관찰하고 줄눈부에 설



치한 Demac point를 이용하여 6월 3일 19시부터 균열의 수평방향 움직임을 측정하였다. 콘크리트 타설 당일인 6월 2일 16시에서 18시 사이에 슬래브 좌측의 줄눈부에 균열이 발생되었으나 우측 줄눈부에서는 조사기간 동안 균열이 발생되지 않았다. 콘크리트 슬래브 좌측 줄눈에 발생한 균열의 폭은 그림 9에서 보듯이 대기온도가 내려가 슬래브가 수축한 오전에 가장 컸으며, 대기온도가 올라가 슬래브가 팽창한 오후에 가장 작았다. 또한, 균열이 발생되지 않은 슬래브 우측의 줄눈부는 수평방향으로 거의 움직이지 않았음을 확인할 수 있었다. 그림 8에 보인 콘크리트 슬래브의 연직변위와 그림 9에 보인 줄눈부의 수평방향 움직임을 비교한 결과, 연직변위가 더 큰 슬래브 좌측 줄눈부의 수평방향 움직임이 우측 줄눈부보다 더 큰 것을 확인할 수 있었는데, 이는 균열이 발생하여 시간에 따라 균열폭이 증가한 슬래브 좌측 줄눈의 경우 골재의 맞물림이 감소하고 줄눈의 강성이 작아져서 균열이 발생하지 않은 우측 줄눈부보다 킬링 거동에 대한 구속이 훨씬 작아졌기 때문으로 판단된다.

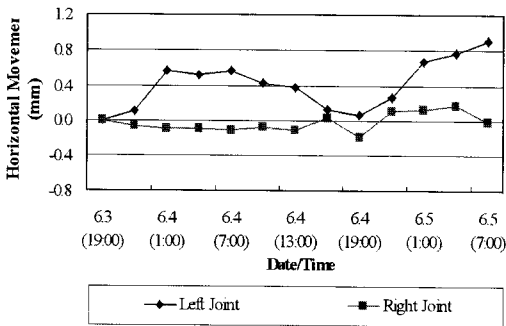


그림 9. 줄눈부의 수평변위

6. 결론

본 연구에서는 줄눈 콘크리트 포장의 파손과 공용성에 영향을 미치는 중요한 요인인 슬래브의 킬링 거

동을 상세히 조사하기 위하여 현장에 타설된 콘크리트 슬래브의 온도, 상대습도, 변형률, 연직변위, 그리고 줄눈부의 수평방향 움직임 등에 대한 측정과 분석을 수행하였으며, 이를 통하여 도출된 주요결과는 다음과 같다.

1. 수화열과 대기환경의 영향을 받아 콘크리트 슬래브의 온도는 타설 28시간 후인 오후에 최고값을 나타내었으며, 24시간 주기의 사이클을 보이면서 변화하였다. 콘크리트 슬래브의 깊이별로 측정된 온도를 사용하여 계산된 유효선형 온도차이 역시 24시간 주기의 사이클을 나타내면서 변화하였다.
2. 콘크리트 슬래브의 상대습도는 타설직후 일정시간동안 높게 유지되었으며, 타설직후의 큰 증발이 줄어들면서 대기상대습도의 영향을 점차 크게 받아 오후에 낮아졌다가 오전에 다시 높아지는 24시간 주기의 사이클을 나타내었다. 콘크리트 슬래브의 깊이별로 측정된 상대습도를 사용하여 계산된 유효선형 습도차이 계수도 24시간 주기의 사이클을 나타내면서 변화하였다.
3. 타설당일 오후의 높은 대기온도와 수화열 때문에 콘크리트의 온도가 상승하여 타설직후부터 일정시간동안 콘크리트 슬래브에는 열팽창으로 인한 인장변형률이 발생하였으며, 수화열 감소로 콘크리트의 온도가 하강하고 건조수축이 증가하면서 점차 압축변형률로 변화하였다. 대기온도의 영향으로 인하여 변형률도 24시간 주기의 사이클을 나타내었으며, 대기온도의 영향을 더 많이 받는 슬래브 상부에서 변형률 사이클의 변화가 더 크게 나타났다. 장기적으로는 건조수축의 영향으로 압축변형률이 시간에 따라 증가하였으며, 대기에 접하여 증발이 일어나기 쉬운 조건을 갖춘 우각부에서 압축변형률의 증가율이 가장 큰 것으로 나타났다.
4. 종방향 모서리를 따라 5군데에서 측정된 콘크리트 슬래브의 연직변위도 대기온도의 영향으로 오전에 최대값과 오후에 최소값을 갖는 24시간 주기의 사이클을 나타내면서 변화하였고, 건조수축



의 영향으로 그 크기가 점차 커지면서 상향의 컬링이 증가하는 경향을 나타내었다. 균열이 발생한 슬래브의 좌측 줄눈부의 연직변위가 균열이 발생하지 않은 우측 줄눈부보다 훨씬 큰 것으로 나타나 컬링거동의 크기가 골재 맞물림 등에 기인한 줄눈강성에 영향을 받는 것으로 판단되었다.

5. 계절에 따른 대기온도의 변화로 줄눈균열의 폭과 함께 줄눈강성도 변화할 것으로 예상되었고, 슬래브 상하부 간 건조수축의 차이가 점차 커져 상향의 컬링도 장기적으로 증가할 것으로 기대되었다. 따라서, 추가적인 측정 및 분석을 통하여 콘크리트 슬래브의 컬링에 미치는 계절별 줄눈강성의 변화와 장기적인 건조수축의 영향을 조사할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(과제번호 : 06건설핵심C20)의 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 선 런유안, 최기효, 정진훈, 권수안 (2007). 성능기준 확립을 위한 공항 줄눈 콘크리트포장의 초기거동 조사. 토목학회논문집 제 27권 제 3D호, pp.333-339.
- 유태석, 한승환, 서진원, 우정원 (2000). 비파괴시험을 통한 콘크리트포장 하부 평가기법 개발. 도로연 00-23, 한국도로공사 도로교통기술원.

ASTM (1999). C 403: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Jeong, J. H. (2003). Characterization of Slab Behavior and Related Material Properties Due to Temperature and Moisture Effects. Ph.D.Dissertation, Texas A&M University.

Jeong, J. H. and Zollinger, D. G. (2005). Environmental Effects on the Behavior of Jointed Plain Concrete Pavement. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No. 2, pp. 140-148.

Mohamed, A. R. and Hansen, W. (1996). Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Curling Stress in Concrete Pavement. *Transportation Research Record*, 1568, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 65-71.

Schindler, A. K. (2004). Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials. *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 1, pp. 72-81.

Wells, S. A. (2006). Quantifying Built-in Construction Gradients and Early-age Slab Deformation Caused by Environmental Loads in a Jointed Plain Concrete Pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 275-289.

접 수 일 : 2007. 11. 28

심 사 일 : 2007. 12. 10

심사완료일 : 2008. 2. 19