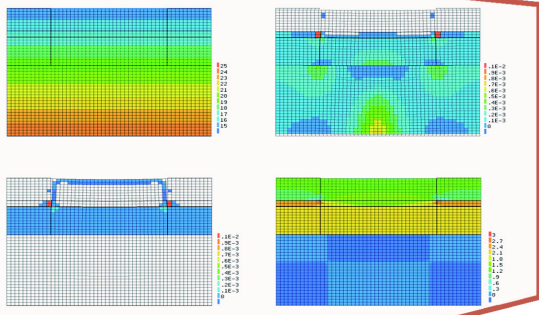


온도 및 수축에 의한 연속 철근 콘크리트 궤도의 균열 예측

Prediction of Cracking of Continuously Reinforced Concrete Track Induced by Temperature and Shrinkage



1. 머리말

경부고속철도는 2004년 서울-동대구를 연결하는 1단계가 부분 개통되었고, 2010년 동대구-부산을 연결하는 2단계의 개통으로 서울-부산을 연결하는 고속철도가 완전 개통되었다. 시속 300km/h의 운행속도를 구현하기 위해서 장대레일, 콘크리트 궤도 등의 최신공법이 적용되었으며, 특히 1단계에서는 5km이상의 터널을 제외하고 일반철도와 같이 선로에 궤도자갈을 채워서 선로구조물을 고정시켜 저항력을 확보하는 방법으로 열차 주행안정성을 확보 하였고, 2단계에서는 전 구간을 연속 철근 콘크리트 궤도(Continuously Reinforced Concrete Track : CRCT)로 부설하였다. 콘크리트 궤도는 독일과 일본을 중심으로 사용되어 왔으며, 자갈도상 궤도에 비해 승차감이 우수하고 선로 수명이 길며 궤도틀림이 거의 발생하지 않아 유지보수 작업과 비용을 대폭 줄일 수 있다. 경부고속철도 2단계 구간에 적용한 콘크리트 궤도는 독일의 Rheda공법을 발전적으로 개량한 한국형 콘크리트 궤도(Rheda KCT- II)이다.

CRCT는 도로에서 사용되고 있는 연속 철근 콘크리트 포장(Continuously Reinforced Concrete Pavement : CRCP)과 같이 조인트 없이 슬래브를 열차 진행 방향으로 연속적으로 타설하는 공법으로, 콘크리트 내부의 철근 역시 연속적으로 배근된다. CRCT는 수화열이나 공용중 온도변화, 콘크리트 수축 등에 의한 콘크리트의 체적변화가 레일 및 하부구조와의 마찰 등에 의해 구속되면서 상당한 수준의 인장응력을 유발하여 횡균열(transverse crack)이 발생한다(그림 1). 횡균열은 CRCT의 성능 및 수명에 영향을 미치므로 콘크리트 궤도 중심에 배근된 철근에 의해 제어되며, 균열폭을 0.5mm 이하로 제한하고 있다.

일반적으로 콘크리트 구조물의 균열은 외력 및 환경하중에 의한 균열로 나눌 수 있으며, 환경하중에 의해 발생하는 균열은 콘크리트 수축이나 온도변화 등에



배 성 근

울산대학교 건설환경공학부 박사후연구원



차 수 원

울산대학교 건설환경공학부 교수



그림 1 CRCT의 균열

이해 주로 발생하고, 균열빈도와 크기에 영향을 미치는 주요 인자로는 콘크리트 배합, 부재크기, 철근비, 구속도 등이 있다. 국내외 설계기준에서는 이러한 영향인자를 고려하여 균열간격과 균열폭을 예측하고, 적절한 철근량을 적용하도록 하고 있다. CRCT와 유사한 구조를 가진 CRCP의 경우 적절한 콘크리트 배합이나 골재 종류의 선정, 시공 중 품질 관리방안 등이 체계적으로 제시되어 있으며, 균열은 발생을 허용하되 무근 콘크리트 포장의 균열제어 방법인 줄눈이 없으므로 시멘트 콘크리트 슬래브 내에 일정량의 철근을(단면의 0.5%~0.8%) 연속적으로 설치하여 균열의 확장을 방지한다. 그러나 CRCT의 경우에는 PC침목이나 레일체결장치가 일정 간격으로 레일을 지지하고 있는 구조로 CRCP와는 다른 부분이 있기 때문에 균열 간격이나 균열 발생 위치 등 균열 발생 패턴이 콘크리트 포장과는 차이를 보일 것으로 예상되므로 규명이 필요하다. 내구성 및 하중 전달 능력을 유지하고 장기 공용성 확보를 위해 효율적인 균열 제어가 필요하며, 이를 위해 정확한 균열의 원인과 균열 발생에 미치는 영향인자를 분석할 필요가 있다.

본 기사에서는 CRCT에서 균열을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 균열의 원인과 균열 발생에 미치는 주요 영향인자를 살펴보고자 한다. 이를 위해 CRCT의 구조를 반영한 2차원 비선형 유한요소해석 모델을 구축하고, 이 모델을 이용하여 균열의 영향인자를 분석하였다. 그리고 계절에 따라 변화하는 외부 온도 및 습도를 고려하여 복합적인 체적변화를 받는 CRCT의 균열패턴 및 균열폭을 예측하고 현장조사 결과와 비교하였다.

2. 연속 철근 콘크리트 궤도

경부고속철도 2단계 구간은 연속 철근 콘크리트 궤도 Continuously Reinforced Concrete Track : CRCT) 구조인 Rheda

2000을 국내실정에 맞게 개선한 Rheda-KCT II가 적용되었으며 궤도시스템은 기본적으로 격자형철근 침목과 연속타설 콘크리트 도상으로 이루어져 있다. 토공구간 CRCT는 그림 2와 같이 강화노반(또는 동상방지층, Frost Protection Layer : FPL), 수경결합층(Hydraulically Stabilized Basecourse : HSB), 그 위에 연속철근이 배근되는 콘크리트 궤도(Track Concrete Layer : TCL)를 기본으로 구성하며 이 때 공칭두께는 각각 300mm 및 240mm를 적용하였다. 그리고 Bi-Block 침목과 타설 콘크리트가 매립되어 완전 결합한 형태로 침목의 역할은 궤간 유지 및 궤도부설이 용이하게 하는 역할을 한다.

선로 방향으로의 슬래브 신축 작용이 완전히 구속되어 콘크리트 내부의 인장응력 유발로 인한 균열이 발생되므로 TCL에서는 균열폭이 커지는 것을 막기 위해 슬래브 중심 위치에 약 0.8~0.9%의 철근을 배근하고, HSB는 균열 유도를 위해 약 5m 간격의 수축 줄눈(contraction joint 또는 saw-cut joint)을 둔다.

경부고속철도 2단계 구간의 토공구간에서는 침목 단부, 침목과 TCL 경계를 따라 발달한 횡균열(transverse crack)이 다수 발생하고 있다. 균열폭은 대부분 0.2~0.3mm, 균열 간격은 약 0.3~1.95m 범위로 나타나고 있다. 슬래브 전 폭에 걸쳐 균열이 발달한 경우도 있고, 침목 바깥쪽 또는 슬래브 중앙부에만 균열이 있는 경우도 다수 관찰된다.

3. 해석 모델

CRCT의 온도 및 수축 변화에 따른 균열 발생을 예측하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 DIANA를 이용하여 경부고속철도 2단계에 적용된 Rheda-KTX II의 형상과 치수를 참고하여 CRCT의 일부를 2716개의 요소와 7777개의 노드를 사용하여 2차원 모델링하였다(그림 3).

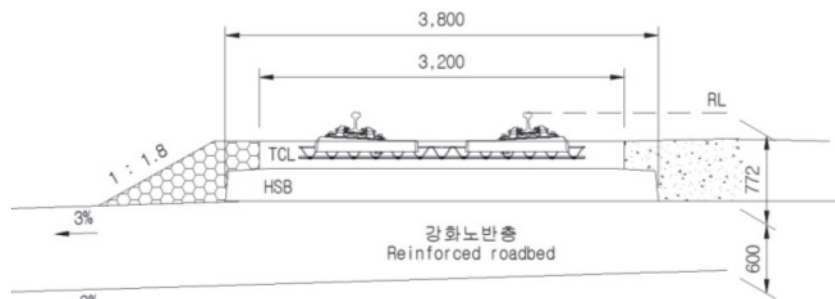


그림 2 경부고속철도(동대구~부산) 토공구간의 횡단면 - Rheda-KCT II

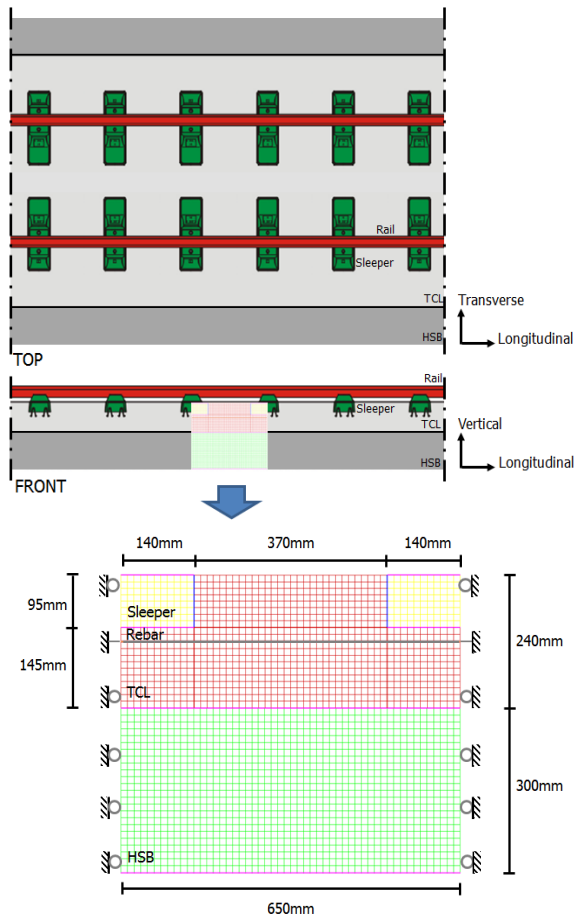


그림 3 CRCT의 유한요소 모델 (2D)

종방향으로 연속되어 있는 CRCT의 특성을 반영하여 TCL과 HSB의 양단은 종방향 고정지지 하였고, 수직방향의 자유도는 허용하였다. 철근은 종방향, 수직방향 고정지점으로 경계조건을 정의하였다.

TCL, HSB, 침목을 모델링하였고 각 부재의 특성에 맞는 재료특성을 입력하였다(표 1). 온도 및 수축 하중에 의한 균열을 예측하기 위해 콘크리트의 인장모델은 선형 인장연화 모델(linear tension softening model)을 적용하여 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석기법은 Newton-Raphson 법을 사용하였고, 해석의 반복횟수를 조정하여 수렴되도록 하였다. 각 구조간의 경계면 특성은 인터페이스요소를 사용하여 구현하였다. TCL중심에 배치된 철근을 모델링하고 철근과 콘크리트의 부착특성을 인터페이스요소를 사용하였다.

본 해석에서는 CRCT의 균열을 두 가지 방법으로 평가하였다. 첫 번째 시공이음부인 Sleeper-TCL은 인장응력이 부착강도에 도달하면 취성적으로 균열이 발생하도록 모델링하였고, 이 폭을 Sleeper-TCL 수직경계 표면의 균열폭으로 하였다. 두 번째 침목, TCL, HSB는 인장응력이 인장강도에 도달하면 균열이 분산되어 있는 연속체로 가정하는 분산 균열 모델을 적용하였고 균열발생 이후의 인장거동은 선형 인장 연화 모델을 사용하여 균열 변형률에 의한 균열 패턴을 예측하였다(그림 4).

표 1 CRCT의 요소모델 및 재료특성

Element type	Sleeper concrete	TCL		HSB concrete
		Concrete	Steel rebar (D19)	
Compressive strength f_{ck} (MPa)	55	30	400 [†]	15
Tensile strength f_t (MPa)	4.2 [*]	2.9 [*]	400 [†]	1.8 [*]
Fracture energy G_F (Nmm/mm ²)	0.154 [*]	0.140 [*]	-	0.128 [*]
Crack band width h (mm)	12.2 [#]	3.5 and 12.2 [#]	-	12.2 [#]
Ultimate crack strain	0.0060 [#]	0.0079 and 0.0276 [#]	-	0.0117 [#]
modulus of Elasticity (MPa)	3.97×10^4 [*]	3.36×10^4 [*]	2.00×10^5	2.84×10^4 [*]
Poisson's ratio	0.2 [*]	0.2 [*]	0.3	0.2 [*]

Note: † for steel rebar, yield strength of steel (f_y)
 *calculated based on CEB-FIP Model Code 2010
 #DIANA user manual and Rots

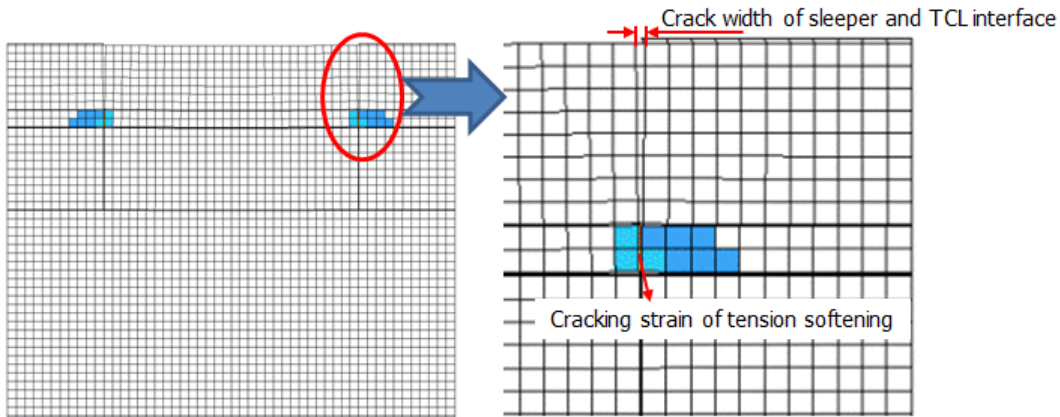


그림 4 Sleeper-TCL 표면 균열폭 및 인장 연화 모델에 의한 균열패턴

4. CRCT의 온도변화에 의한 균열

특정한 경로 또는 구조물의 특정 단면에서 온도변화를 온도경사라 정의한다. 온도경사는 구조물 내부의 특정한 경로에 대한 온도의 시간에 따른 변화를 파악하여 결정할 수 있다. 장기적인 온도의 발생과 소산에 의해 체적의 증감을 유발하는 온도 변화량에 의해 콘크리트 구조물이 전체적으로 온도가 상승하였다가 하강하는 온도 차이가 발생할 수 있다. 콘크리트 구조물의 역학적 특성, 외부 구속체, 구조물 형상에 따른 콘크리트 구조물과 외부 구속체 사이의 부착 성능 등의 조건에 따라 콘크리트 구조물에서의 균열 발생 여부가 결정된다. 콘크리트 구조물 내부의 온도는 상대적으로 천천히 변화하는 반면, 외부 대기에 노출되어 있는 표면은 온도변화가 매우 빠르다. 따라서 단기간에 한 단면 내에서 내부와 표면의 온도차이가 발생되며, 표면의 온도가 빠르게 감소하게 되면 인장응력이 유발되고 표면부에 균열이 발생하게 된다.

CRCT는 넓은 표면적을 가지고 있으므로 외부환경과 온도의 교환이 쉽게 이루어진다. 일변화에 의한 표면과 하부의 온도차, 계절에 따른 온도변화에 의해서 전체적인 온도변화가 발생할 가능성이 크다. 따라서 온도변화에 의한 균열패턴 예측 해석을 수행하였다.

CRCT의 상하부 온도차는 조사결과에 따르면 낮과 밤의 CRCT단면 상하부 온도차는 반대의 경향을 보이고 있다. 상부는 낮과 밤의 외기온도 및 태양복사의 영향으로 하부의 온도보다 높거나 낮은 경향을 보이고 있으며, 하부는 온도의 변화폭이 적고 일평균 온도와 유사한 것으로 판단된다(그림 5).

콘크리트 깊이에 따른 온도경사는 비선형으로 나타나며 실제 HSB층에서 온도경사는 거의 무시할 수 있지만 이를 단순화하여 선형 온도경사를 적용하고, 하부보다 상부의 온도가 낮아 표면에 균열이 발생할 가능성이 있는 여름철 밤의 온도차를 보수적으로 적용하여 상하부 온도차를 0°C

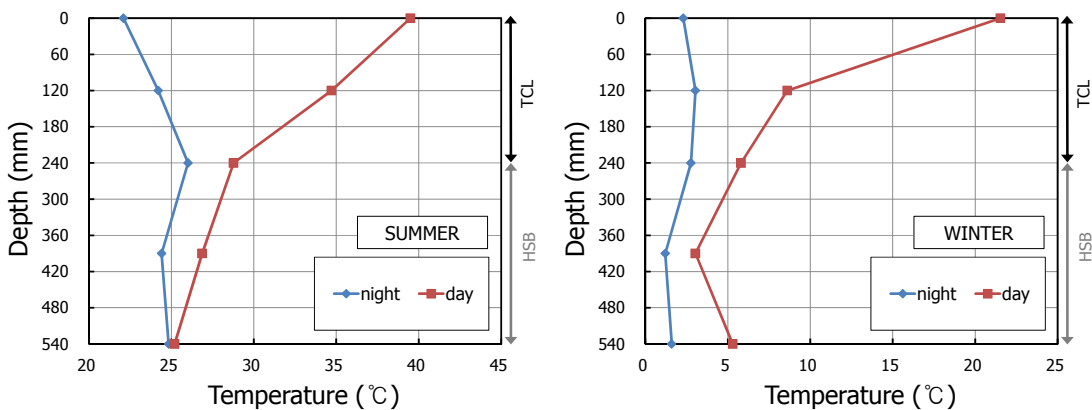


그림 5 CRCT의 계절별 상하부 온도차

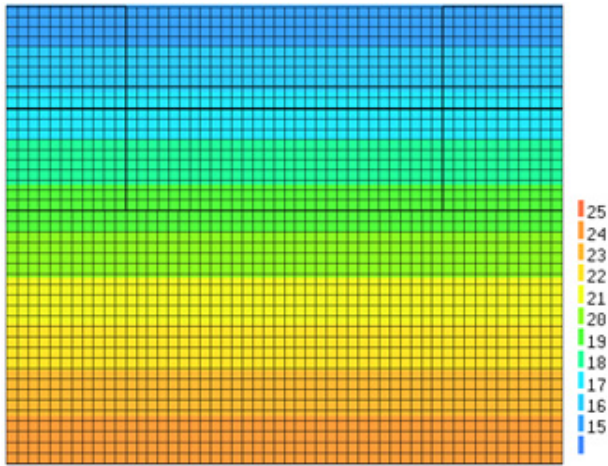


그림 6 온도분포 - 상하부 온도차 -10℃

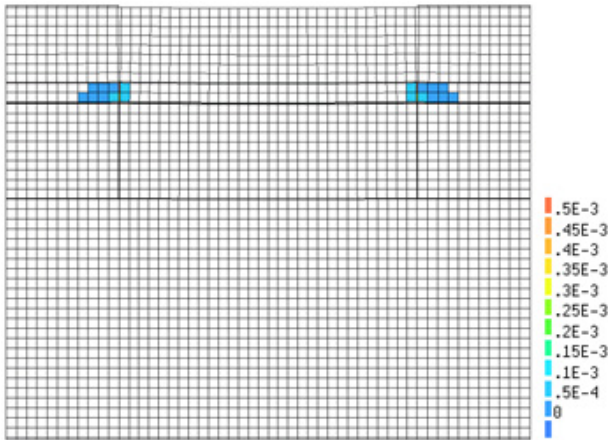


그림 7 균열변형률 분포 - 상하부 온도차 -10℃

부터 -10℃까지 변화시켜 온도분포 해석을 수행하였다. 상하부 온도차가 발생하는 경우 표면부 온도저하에 의한 CRCT의 표면부가 수축되고 인장응력이 유발된다. -4.1℃의 온도차에서 Sleeper-TCL 수직 경계면에서 0.014mm의 균열폭이 발생하고 온도차가 증가될수록 표면의 균열폭도 증가한다. -4.1℃의 온도차는 보통의 일변화에서 충분히 발생할 수 있으며 토공구간 CRCT의 균열은 불가피할 것으로 판단된다. 상하부 온도차 -10℃인 경우 균열폭은 0.035mm이며 아래방향으로 균열폭은 감소하고 철근위치에서 철근의 제어효과로 균열은 더 이상 진전하지 못한다(그림 7). 연중 1월과 8월의 평균온도차는 약 25℃ 이상으로 발생하며 계절에 따른 온도차는 구속도가 큰 CRCT에서 단면의 응력을 유발시킬 가능성이 있다. 또한 콘크리트는 경화시 외기온도에 따라 초기의 온도특성을 유지하고 있으며 이후 온도의 증감에 따라 응력의 증감이 발생한다.

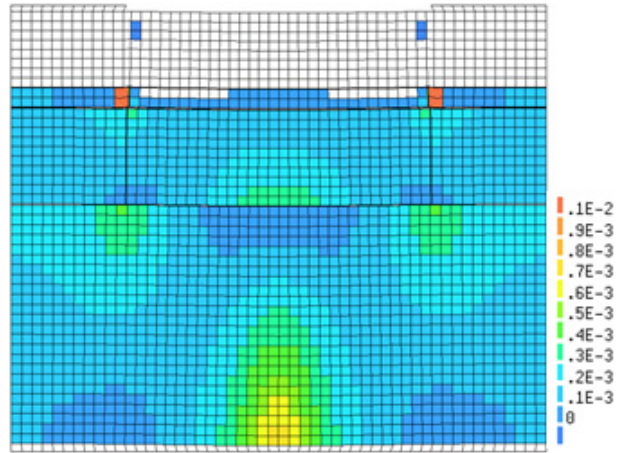


그림 8 균열변형률 분포 - 여름타설

여름에 타설되는 CRCT는 경화 후 겨울까지 단면전체에 25℃이상의 온도저감이 발생한다. 25℃의 온도저하에 의해 Sleeper-TCL 수직 경계면에 균열이 발생하고 표면에서의 균열폭은 0.089mm이다. Sleeper-TCL 수직 경계면에서 시작된 균열은 TCL로 연결되지만 철근위치에서 철근에 의해 제어된다(그림 8).

콘크리트 구조물의 온도 제어방법은 한계가 있다. 하지만 콘크리트의 타설 시기를 조정하는 것으로 구조물의 경화시 초기 온도를 낮출 수 있고 계획을 통하여 CRCT의 균열발생을 제어하는 역할을 할 수 있다. 따라서 CRCT중 외부에 노출되어 균열발생에 민감한 TCL의 시공시 콘크리트의 타설을 외기온도가 높은 시기는 자제하며 부득이 하게 시공할 때에는 타설온도 및 양생온도는 되도록 낮추어 주는 것이 균열 방지에 좋을 것이라 판단된다.

5. 콘크리트 수축에 의한 균열

콘크리트는 내부의 수분분포에 관련되어 습윤상태에서는 팽창하고 건조상태에서는 수축한다. ‘건조수축’은 일반적으로 굳은 콘크리트에서 사용되는 용어이며, 경화된 재료에서 수분 손실로 인해 발생하는 변형률을 의미한다. 콘크리트에서 수화 반응이 진행될 때 자기건조로 인해 발생하는 자기수축은 건조수축의 특별한 경우에 해당된다.

외부의 대기습도를 국내 평균습도인 70%로 고정하여 수분분포 해석을 실시하였다. 또한 프리캐스트 제품인 콘크리트 침목과 기 타설된 HSB는 충분히 건조수축이 이루어진 상태로 생각하고 새로 타설하는 TCL에서만 건조수축이 발생하는 것으로 가정하였다.

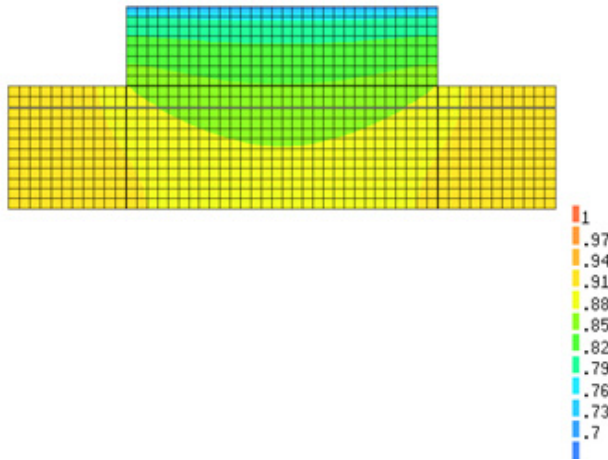


그림 9 습도분포 - 1000day

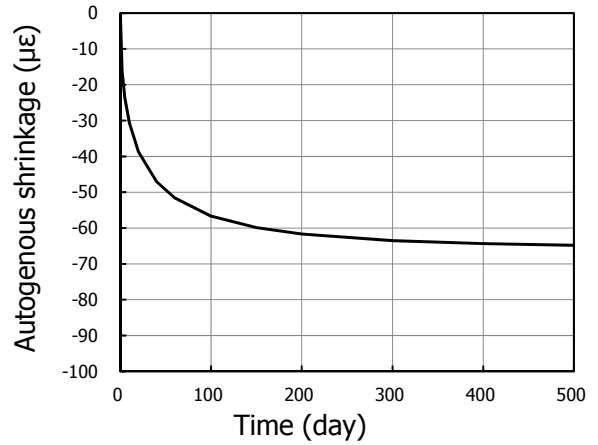


그림 11 TCL 콘크리트의 자기수축량

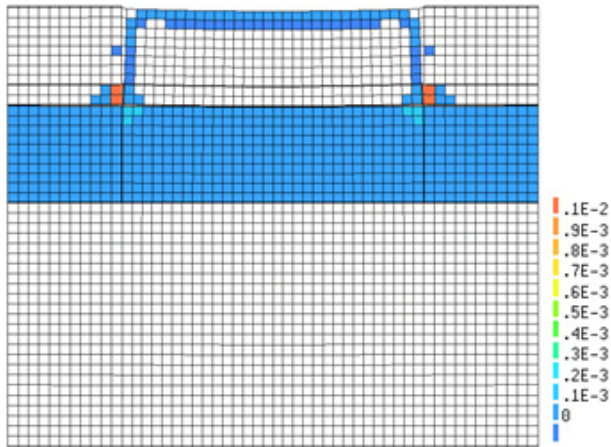


그림 10 균열변형률 분포 - 부등건조수축

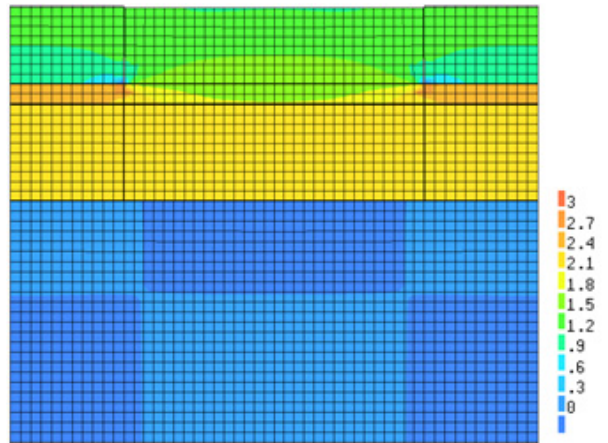


그림 12 종방향 응력분포 - 자기수축

TCL 내부의 수분분포는 1000일 경과시 표면부에서 깊이에 따라 비선형의 특성을 보이고 있다(그림 9). 건조수축이 시작되면 TCL 표면의 수분감소에 의한 수축이 발생하고 부등건조로 인한 인장응력이 유발된다. 따라서 Sleeper-TCL 수직 경계면에서 균열이 발생하고 1000일 경과시 균열폭은 0.06mm이다. Sleeper-TCL 수직 경계면에서 시작된 균열은 TCL로 연결되지만 철근위치에서 철근에 의해 제어된다(그림 10).

비선형의 내부 습도경사가 발생하기 때문에 표면에서는 균열이 초기에 발생하고 장기적으로 균열은 하부로 진전될 것으로 생각된다. CRCT의 표면부는 건조가 반복되는 환경에 노출되어 있어 부등건조수축은 장기적으로 진행되지만 내부가 외부습도에 수렴하게 되면 균열의 증가도 일정한 값에 수렴될 것으로 판단된다. TCL의 내부습도의 유출로 인하여 TCL과 침목 경계면에서의 균열은 충분히 발생할

수 있으며 토공구간의 CRCT의 균열은 불가피할 것으로 생각된다.

HSB는 W/B가 높은 15MPa의 저강도 콘크리트로 TCL보다 상대적으로 작은 자기수축량이며, 침목은 프리캐스트 제품으로 충분히 자기수축이 이루어진 것으로 생각하여 TCL만 자기수축이 발생하는 것으로 가정하였다. CEB-FIP MC 2010에 의한 TCL 콘크리트(30MPa)의 최종 자기수축량은 66με으로 타설 후 약 500일에 최종 자기수축량에 도달한다(그림 11). 자기수축은 콘크리트 체적전체가 동일하게 감소하므로 깊이에 따른 수축량의 변화가 발생하지 않고 동일한 수축이 작용한다. 자기수축에 의해 발생하는 응력이 침목과 TCL의 부착강도를 상회하지 못하므로 CRCT에서는 자기수축의 발생만으로 균열이 발생하지 않는다(그림 12). 하지만 건조수축 등 다른 균열발생 인자와 중첩되면 균열폭을 증가시키는 하나의 요인이 될 수 있을 것이다.

6. 온도 및 수축의 복합 조건에 의한 균열

외부환경에 의해 CRCT 내부 온도 및 습도의 변화는 동시에 발생하며 체적변화 또한 두 요인의 복합 영향에 의해 발생한다. CRCT의 시공시점을 여름으로 가정하여 각 월별 평균 온도 및 습도를 적용하고 복합요인에 의한 균열발생

을 검토하였다. 수축은 앞서 해석과 같이 TCL에서만 발생하는 것으로 하였다.

여름철에 타설된 CRCT를 대상으로 3년 동안의 온도증감 및 건조반복(그림 13)에 의한 균열발생을 해석하였다. 외부 온도 및 습도는 월평균 값으로 적용되었고 자기수축(그림 11)은 타설시점부터의 영향을 고려하였다.

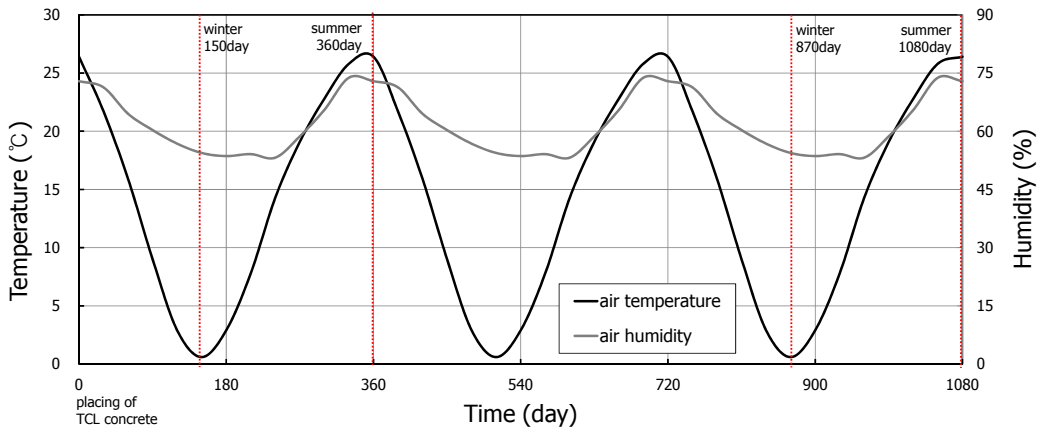


그림 13 온도 및 습도 복합요인에 의한 해석조건

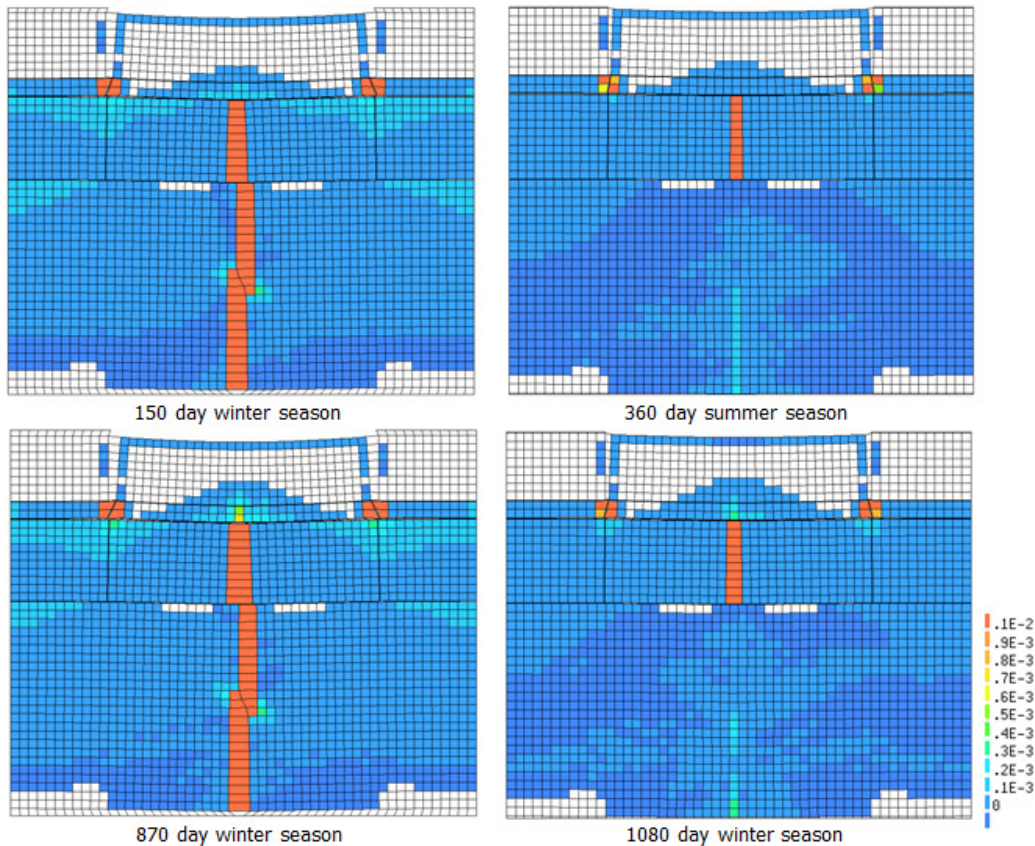


그림 14 계절별 균열 변형률

해석결과 표면의 균열폭은 현장계측의 값인 0.2~0.3mm와 유사하게 870일의 최대 균열폭이 0.174mm으로 해석되었다(그림 14). 또한 균열폭의 여름과 겨울의 차이는 약 0.1mm이며, 이것은 계절에 따른 외부 온도 및 습도 변화의 영향에 의한 것이다. 전체적으로 겨울철의 균열폭이 크고 TCL과 HSB의 균열이 연결되며, 여름철에는 균열이 감소된다. 균열폭은 계절변화에 의한 단면전체의 온도변화, 부등 건조수축, 자기수축의 순으로 영향이 크다. 철근을 기준으로 상부는 Sleeper-TCL 수직 경계면에서 균열이 발달하고 하부는 침목사이의 중심에서 균열이 발달한다. 본 해석에서는 30년 월평균온도를 적용하였으며 평균이상의 온도변화가 발생할 경우 각 균열이 철근을 통과하여 상하부로 발달할 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 해석에서는 HSB의 수축줄눈의 영향이 반영되어 있지 않기 때문에 실제 CRCT의 HSB에서 발생하는 균열패턴과는 다를 것으로 예상된다.

7. 맺음말

본 기사에서는 연속 철근 콘크리트 궤도(CRCT)에서 균열을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 균열 발생에 미치는 주요 영향인자를 분석하였다.

CRCT의 온도변화는 침목과 콘크리트 궤도(TCL) 수직 경계면에 균열이 발생하고 철근위치에서 제어된다. 온도변화에 의해 발생하는 균열은 상하부 온도차에 의한 내부 온도경사 보다는 계절영향으로 인한 단면전체의 온도가 하강하는 경우의 균열폭이 더 크고 깊은 것으로 판단된다.

TCL 내부에 부등건조수축이 발생하면 침목과 TCL 수직 경계면에서 균열이 발생하고 철근위치에서 제어된다. CRCT의 표면부는 건습이 반복되는 환경에 노출되어 있어 부등 건조수축은 장기적으로 진행되지만 내부가 외부습도에 수렴하게 되면 균열의 증가도 일정한 값에 수렴될 것으로 판단된다.

외부환경에 의해 CRCT 내부의 온도 및 습도 변화가 동시에 발생하며 복합요인에 의한 체적변화 발생시 침목과 TCL 수직 경계면에서 최대 0.174mm의 균열폭이 발생하는 것으로 해석되었으며, 이는 현장계측 값인 0.2~0.3mm와 유사하다. 균열폭은 계절변화에 의한 단면전체의 온도변화, 부등건조수축, 자기수축의 순으로 영향이 크다.

본 해석은 CRCT의 환경하중에 의해 발생하는 균열 매커니즘을 유한요소해석을 통해 분석하였고 현장 실측 균열 폭과 유사한 결과값을 도출하였다. 따라서 재료특성 등의

해석에 기초가 되는 값들의 정확한 자료가 뒷받침 된다면 더욱 정밀한 해석이 가능하며, CRCT 설계에서 균열의 영향인자에 대한 변수해석을 통해 CRCT의 균열폭을 제어하기 위한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 국토해양부 (2009) 시멘트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침, 국토해양부.
2. 국토해양부 (2011) 도로포장 구조 설계 요령, 국토해양부.
3. 배성근(2015) 체적변화에 의한 변형률과 응력 예측; 연속 철근 콘크리트 궤도와 MgO 콘크리트 댐, 박사학위논문, 울산대학교.
4. 최완철 (2014) 콘크리트공학, 동화기술.
5. 한국철도시설공단 (2011) 경부고속철도 건설사(III-1), 한국철도시설공단.
6. 한국철도시설공단 (2012) 고속철도 콘크리트궤도 유지보수기준 정립방안 연구 평가 보고서 [침하 및 균열 분야].
7. 한국철도학회 (2012) 알기 쉬운 철도과학기술, 화남.
8. KCI (2012) 콘크리트 구조기준, 한국콘크리트학회(KCI).
9. KCI (2014) 매스콘크리트 온도균열제어, 한국콘크리트학회(KCI).
10. KRTC (2006) 경부고속철도 2단계 구간 궤도 실시설계 보고서.
11. CEB-FIP (1999) Structural Concrete Textbook on Behaviour, Design and Performance Updated Knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990. The International Federation for Structural Concrete (Fib).
12. CEN (2002) Eurocode 2: Design of concrete structure, Part 1-1: General rules and rules for building, European Committee for Standardization.
13. Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. (2002) Concrete, Pearson Education, New Jersey.
14. Neville, A. M. (1996) Properties of Concrete, WILEY, London.
15. Rots, J.G. (1988) Computation modeling of concrete fracture, Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
16. TNO DIANA (2003) DIANA-Finite Element Analysis user's manual, TNO DIANA, The Netherlands. 