온도변화에 따른 연속철근 콘크리트 궤도의 거동 특성 분석

Behavior of Continuously Reinforced Concrete Track Subjected to Temperature Changes

김진일* · 조영교** · 김정일*** · 김성민****

Kim, Jin Il · Cho, Young Kyo · Kim, Jeong Il · Kim, Seong-Min

Abstract

This study was conducted to investigate the behavior such as stress and crack width of continuously reinforced concrete track (CRCT) subjected to temperature changes. Three-dimensional finite element analysis models of CRCT were developed in this study. The effect of the existence of sleepers on the stress distribution in CRCT was investigated using the models. The effects of changes in the material properties such as elastic modulus, thermal expansion coefficient, and Poisson's ratio and in the crack spacing on the CRCT behavior were also analyzed. The analysis results showed that the CRCT model without considering the existence of sleepers was more appropriate to the prediction of cracking. The sensitivity analysis results showed that the thermal expansion coefficient affected the CRCT behavior the most and followed by elastic modulus and Poisson's ratio. In addition, there were slight differences in the effects of material properties on the CRCT behavior depending on the crack spacing.

Key words : Continuously reinforced concrete track, Temperature change, Crack, Stress, Finite element

요 지

본 연구는 온도변화가 연속철근 콘크리트 궤도(CRCT: Continuously Reinforced Concrete Track)의 응력과 균열폭 등의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다. 이러한 분석을 위하여 CRCT의 3차원 유한요소해석 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용하여 CRCT에서 침목이 응력 분포에 미치는 영향을 분석하였으며, 콘크리트의 탄성계수, 열팽창계수, 포아송비 등의 재료 성질과 균열간격의 변화에 따른 CRCT의 응력 및 균열폭의 변화 특성을 분석하였다. 연구 결과, 침목을 고려하지 않는 CRCT 모델이 균열 발생 예측에 적합한 것으로 분석되었으며, 재료 특성에 대한 민감도 분석 결과, 열팽창계수, 탄성계수, 포아송비의 순으로 CRCT의 거동에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 균열간격의 변화에 따라 재료 성질이 CRCT의 거동에 미치는 영향에 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 연속철근 콘크리트 궤도, 온도변화, 균열, 응력, 유한요소

1. 서 론

고속철도의 궤도 형식으로는 일반적으로 콘크리트 슬래브 궤도를 사용하고 있으며 열차 속도의 증가에 따른 궤도 시스템의 내구성 및 안전성을 확보하기 위하여 교량구간을 제외한 토공구간에서는 철근이 연속적으로 배근되어 있는 연속철근 콘크리트 궤도(CRCT: Continuously Reinforced Concrete Track)를 우리나라에서는 적용하고 있는 실정이다. 이러한 CRCT는 환경하중, 즉 온도 및 수분변화에 의해 콘크리트 슬래브가 수축팽창을 하려 하지만 연속적으로 배근되어 있는 철근과 슬래브 하부의 마찰저항에 의해 콘크리트 슬래브의

변위가 구속받게 되며 이에 따라 콘크리트 슬래브에는 인장응력이 발생하게 된다. 이와 같은 인장응력이 인장강도에 다 다르다면 균열이 발생하게 되며 이때 균열폭이 과도하게 벌어지지 않도록 설계 기준을 정하여 적용하고 있다. 현재 호남고속철도의 설계기준은 균열폭을 0.5 mm 이하로 규정하고 있다. 이러한 CRCT의 균열의 발생과 균열폭의 거동은 환경하중에 의해 결정되며, 궤도에 결함이 발생할 경우 철도사고의 위험을 초래하기 때문에 이에 대한 분석이 필요한 실정이다(임남형 등, 2008). 또한 열차의 설계속도를 400 km/h로 높이기 위한 연구가 진행 중에 있으며 이를 위한 철도 궤도를 적절히 설계하기 위해서는 균열의 거동을 파악하는 것이 필

*정회원 · (주)삼안 철도사업부(E-mail : jikim3@samaneng.com)

**경희대학교 토목공학과 박사과정

*** (주)삼안 철도사업부

****정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수(교신저자)

Fig. 1. Cracks at sleeper location

수직이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구는 CRCT가 환경하중인 온도변화를 받을 때 응력분포와 균열폭 등의 CRCT의 기본적인 거동을 이해할 수 있도록 구조해석 모델을 이용하여 분석하는 것을 목적으로 수행되었다.

CRCT는 도로 포장에 이용되고 있는 연속철근 콘크리트 포장(CRPC: Continuously Reinforced Concrete Pavement)과 매우 유사한 형식의 슬래브 기반시설이라 할 수 있다. 따라서 환경하중에 의해 발생하는 균열 특성도 기본적으로는 서로 유사하다고 볼 수 있다. 하지만 CRCT는 침목(Sleeper)을 미리 제작하여 철근 배근 후 그 위에 거치하고 콘크리트를 타설하게 되므로 침목과 타설된 콘크리트 간의 완전부착을 보장하기 어려우며 따라서 콘크리트 슬래브는 사실 상 침목의 위치에서는 단면의 감소를 가져오게 된다. 이러한 단면의 감소는 이 부분에서의 인장응력의 증가를 야기하게 되며 결국 이곳에서 균열이 발생할 확률이 높아지게 된다. 실제로 CRCT에 발생한 균열은 대부분 Fig. 1과 같이 침목의 위치에서 발생하는 것을 알 수 있다.

현재 CRCP에서 균열폭의 기준은 1 mm이며 CRCT에서는 이미 언급한 바와 같이 0.5 mm의 기준을 적용하고 있다(한국도로공사, 2009; 국토해양부, 2009). 또한 CRCP의 균열간격 기준은 1~2.4 m이나 CRCT에서는 균열간격에 대한 기준은 따로 없으며 실제로는 많은 경우에 침목 설치 간격인 0.65 m 간격으로 균열이 발생하고 있다. CRCT와 CRCP에서 균열폭의 기준을 두고 있는 이유는 균열에서 하중의 전달이 적절히 될 수 있으며 균열사이로 이물질이 침투되지 않도록 하는 것이며, CRCP에서 균열간격 기준을 두고 있는 이유는 편치아웃 등의 파손의 발생을 방지하기 위함이다(Kim et al., 2003b). 이와 같이 CRCT와 CRCP는 유사한 시스템임에도 불구하고 서로 적용하고 있는 기준이 다르며 CRCP의 환경

하중에 의한 거동에 대한 연구는 많이 수행되었으나 CRCT에 대한 연구는 이에 비해 상당히 미비한 실정이다(Jonston and Surdahl, 2008; Kim et al., 1998, 2003a; Kohler and Roesler, 2005, 2006; Selezneva et al., 2003). 따라서 본 연구에서는 구조해석을 통해 침목의 존재, 재료 성질, 균열 간격 등이 CRCT의 응력과 균열폭에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. 구조해석 모델 개발

CRCT의 온도변화에 따른 거동 특성을 분석하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2007)를 사용하여 3차원 유한요소해석 모델을 개발하였다. 콘크리트 슬래브는 고체요소(Solid Element)를 사용하였으며, 철근은 보요소(Beam Element)를 사용하였다. 철근과 콘크리트는 완전부착으로 가정하여 모델링하였다. 콘크리트 슬래브 하부층의 지지력은 탄성지반으로 모델링하였으며, 슬래브와 하부층 간의 마찰저항은 수평스프링요소를 사용하여 모델링하였다. CRCT의 온도변화에 의한 거동은 종방향으로 중앙선을 따라 대칭이기 때문에 반쪽만을 모델링하는 대칭 모델을 사용하였다. 균열간격은 일정한 것으로 가정하여 하나의 균열간격을 슬래브의 길이로 가정하여 모델링하였다. 균열에서 콘크리트 슬래브는 구속이 없는 것으로 경계조건을 구성하였으며 철근은 종방향 변위, 횡방향 회전변위, 수직방향 회전변위를 구속하였다. 또한 슬래브의 대칭면에서는 횡방향 변위를 구속하였다. 이러한 해석 모형을 Fig. 2에 나타내었다.

3. 침목 영향 분석

CRCT의 균열은 Fig. 1에서 이미 언급한 바와 같이 침목 위치에서 발생하는 것이 일반적이다. 따라서 CRCT 모델링 시 침목과 현장타설 콘크리트 슬래브를 일체화된 동일한 콘크리트 슬래브로 가정하면 침목위치에서의 균열 발생 현상을 모사하기 어렵다. 침목의 영향을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 침목이 있는 경우와 없는 경우에 대한 유한요소 해석 모델을 개발하여 분석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 균열간격 2.6 m로 침목 위치에서 균열이 발생한 것으로 모델링하였다. 콘크리트 탄성계수는 침목 39.7 GPa, 슬래브 33.6 GPa로 서로 다르게 적용하였다. 침목을 고려한 모델의

Fig. 2. Finite element model of CRCT

Fig. 3. CRCT models: (a) with sleepers, (b) without sleepers

Table 1 해석 입력값

콘크리트 슬래브		침목	
탄성계수(GPa)	33.6	탄성계수(GPa)	39.7
열팽창계수($^{\circ}\text{C}$)	0.00001	열팽창계수($^{\circ}\text{C}$)	0.00001
포아송비	0.15	포아송비	0.15
길이, 폭, 두께(m)	2.6, 2.8, 0.24	길이, 폭, 두께(m)	0.26, 0.9, 0.095
철근		하중 및 기타	
탄성계수(GPa)	200	온도하강($^{\circ}\text{C}$)	20
철근비(%)	0.8	수직온도경사($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)	0.8
직경(mm)	19	하부층 수직강성(MPa/m)	210
배근깊이(m)	0.115	하부층 마찰지력(MPa/m)	4180

Fig. 4. Effect of sleepers on stress distribution

경우 침목과 슬래브는 완전부착 상태로 모사하였다. 해석에 사용된 입력값은 Table 1과 같다.

Fig. 4는 침목 유무 별 슬래브 상부에서 종방향을 따라 종방향 인장응력을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 침목의 존재 유무에 관계없이 침목의 양단 위치에서 인장응력이 증가하게 된다. 따라서 이곳에서 균열이 발생하게 되며 이는 Fig. 1에서와 같이 실제 균열이 발생하는 위치임을 알 수 있다. 침목을 고려한 모델에서 침목과 슬래브 간의 부착이 떨어지면 이곳에서의 슬래브 단면이 감소하게 되며 따라서 침목을 고려하지 않는 모델에서와 같이 이곳에서의 인장응력이 크게 증가하게 된다. 실제로 침목과 슬래브는 종방향으로 타 이바 등을 이용하여 부착강도를 증가시키지 않기 때문에 사실상 서로간의 부착력이 매우 작다고 볼 수 있다. 따라서 CRCT의 환경하중에 의한 균열과 응력 등의 거동을 예측하기 위해서는 침목과 슬래브는 부착이 없다고 가정하고 침목을

고려하지 않는 모델을 사용하는 것이 보다 적절하다고 할 수 있다.

4. 궤도 거동 분석

4.1 응력분포 분석

온도변화에 따라 CRCT에 발생하는 응력 분포를 분석하기 위하여 균열간격 2.6와 침목간격 0.65 m의 슬래브를 이용하였으며 이미 언급한 바와 같이 침목 부분이 파여져 있는 형태의 모델을 사용하였다. CRCT에 발생하는 횡방향균열은 종방향 인장응력에 의해 발생하기 때문에 종방향 응력 분포를 분석하는 것이 필요하다. Fig. 5는 온도변화 시 종방향 응력 분포 형태를 나타낸 것으로 슬래브의 침목 부근에서 최대 인장응력이 발생하는 것을 뚜렷이 알 수 있다.

응력분포를 보다 더 세밀하게 파악하기 위하여 Fig. 6과 같이 여러 위치와 방향을 따라 횡방향응력 분포를 살펴보았다. 최대 인장응력이 발생하는 곳을 기준으로 종방향(1번선)

Fig. 5. Longitudinal stress distribution

과 횡방향(3번선)을 따라 종방향 응력분포를 분석하였으며, 침목부위의 최대응력이 발생하는 곳을 기준으로 종방향(2번선)과 횡방향(4번선)을 따라 종방향 응력분포를 분석하였다.

Fig. 7은 Fig. 6의 1번과 2번 선을 따라 종방향응력을 나타낸 것으로 1번, 2번 방향 모두 침목과 슬래브의 경계 부근에서 최대응력이 발생하며, 1번 방향의 최대응력이 2번 방향의 최대응력보다 다소 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6의 3번과 4번 선을 따라 종방향응력을 나타낸 것이며, 3번, 4번 방향의 응력 모두 침목과 슬래브 경계에서 최대 응력이 발생하며, 3번 방향의 최대응력이 4번 방향의 최대응력보다 다소 큰 것을 알 수 있다. 또한 슬래브 내의 침목이 위치하는 네 개의 모서리 중에 슬래브 안쪽의 모서리에서 최대 인장응력이 발생하며, 결국 CRCT에서의 균열은 이곳에서부터 발생하여 진전된다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 6. Paths for stress distribution investigation

Fig. 7. Longitudinal stress distribution along Paths 1 and 2

Fig. 8. Longitudinal stress distribution along Paths 3 and 4

4.2 재료 성질 영향 분석

환경하중에 의한 CRCT 콘크리트 슬래브의 재료 성질에 따른 영향을 분석하기 위하여 탄성계수, 열팽창계수 그리고 포아송비를 변화시켜가며 해석을 수행하여 이러한 재료 성질에 대한 민감도 분석을 수행하였다. Table 2는 민감도 분석을 위한 해석에 사용한 수치로써 각 변수의 가장 일반적인 값을 100%로 가정한 후 이러한 값에서 각각 10%와 20%씩 증감할 때의 값을 고려하여 해석을 수행하였다.

Fig. 9는 Fig. 6의 1번 방향을 따라 탄성계수에 따른 CRCT 슬래브의 응력 분포를 나타낸 것으로써 탄성계수가 높을수록 응력이 크게 발생하며, 탄성계수가 변하더라도 응력 분포는 유사한 것을 알 수 있다. 콘크리트의 탄성계수는 일반적으로 강도가 증가하면 함께 증가하기 때문에 고강도 콘크리트를 사용하면 이에 따라 탄성계수가 증가하게 되며 이는 환경하중에 의한 인장응력을 증가시키기 때문에 고강도 콘크리트를 사용할 때는 반드시 인장강도 또한 충분히 증가가 되는지 확인하여 균열의 발생이 더욱 잦아지지 않도록 하여야 한다.

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 분석을 열팽창계수와 포아송비 등에 대해서도 수행하여 인자의 값이 100%일 때의 응력 및 균열폭을 1로 가정하여 비교한 그림이다. 종방향 최대 인장응력의 경우 세 인자 모두 인자의 값과 발생응력1 선형관계인 것을 알 수 있다. 탄성계수와 열팽창계수는 값이 증가할수록 슬래브에 발생하는 응력이 커지며, 포아송비는 영향이 적으나 값이 증가할수록 미소하게나마 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 균열폭에서도 응력과 마찬가지로 열팽창계수의 변화가 균열폭에 가장 민감한 영향을 보이는 것을 알 수 있으나, 포아송비는 응력에서와는 반대로 값이 증가함에 따라 미소하게 균열폭이 증가하는 것을 알 수 있다. 열팽창계수는 응력과 균열폭에서 민감도가 매우 유사한 것을 알 수 있으나,

Table 2 민감도 분석 변수값

	80%	90%	100%	110%	120%
탄성계수 (GPa)	26.88	30.24	33.60	36.96	40.32
열팽창계수 ($^{\circ}\text{C}$)	0.000008	0.000009	0.00001	0.000011	0.000012
포아송비	0.12	0.135	0.15	0.165	0.18

Fig. 9. Stress distribution depending on concrete elastic modulus

Fig. 10. Sensitivity of variables to: (a) longitudinal stress, (b) crack width

탄성계수는 균열폭에 대한 민감도가 응력에 대한 민감도에 비해 확연히 작은 것을 알 수 있다. 포아송비는 사실상 응력 및 균열폭에 미치는 영향이 매우 작아 무시할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 균열간격 영향 분석

균열간격에 따른 슬래브의 종방향응력과 균열폭을 비교하기 위하여 Fig. 11과 같은 균열간격 1.3 m의 CRCT 모델을 추가로 구성하여 2.6 m 길이의 CRCT 모델과 해석 결과를 비교 분석하였다.

Fig. 12는 1.3 m와 2.6 m 균열간격 모델에 대하여 Fig. 6의 1번 선을 따라 종방향응력을 나타낸 것으로써 균열부와 침목부의 응력분포 양상은 비슷한 것을 알 수 있다. 하지만 균열간격이 2.6 m인 모델에서의 최대 인장응력은 9.05 MPa로 1.3 m 모델에서의 최대 인장응력 4.61 MPa의 약 2배 정도 큰 것을 알 수 있다. 따라서 균열간격이 크면 인장응력의 크

Fig. 11. CRCT model with 1.3 m crack spacing

Fig. 12. Stress distribution depending on crack spacing

Fig. 13. Sensitivity ratio of: (a) elastic modulus, (b) Thermal expansion coefficient, (c) Poisson's ratio

기가 증가하게 되며 이러한 인장응력의 크기가 모든 위치에서 인장강도보다 작아질 때까지 균열이 계속 발생한다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 13은 균열간격이 2.6 m인 모델에서의 응력과 균열폭의

민감도를 균열간격 1.3 m인 모델에서의 응력과 균열폭의 민감도로 나눈 비율을 나타내었다. Fig. 13(a)는 탄성계수에 대한 영향을 나타낸 것으로 종방향응력과 균열폭 모두 탄성계수 값이 증가할수록 민감도 비율이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 균열간격이 커질수록 종방향응력과 균열폭의 민감도율이 커진다는 것을 의미하며 균열폭보다 종방향응력의 민감도율이 조금 더 큰 것으로 나타났다. Fig. 13(b)는 열팽창계수의 민감도 비율을 나타낸 것으로써 균열간격이 달라지더라도 종방향응력과 균열폭에 대한 민감도는 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. Fig. 13(c)는 포아송비에 대한 영향을 나타내며 종방향응력은 균열간격에 의한 영향이 미소하나 균열폭은 균열간격이 커지면 민감도율이 다소 작아지는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 온도변화에 따른 CRCT의 응력분포 및 균열폭 등의 거동을 분석하기 위하여 CRCT의 3차원 유한요소 해석 모델을 개발하였으며 이를 이용하여 침목의 존재 여부, 재료의 성질, 균열간격 등이 CRCT의 거동에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하였으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 온도변화에 따른 CRCT의 종방향응력에 침목이 미치는 영향을 분석한 결과 침목과 슬래브 간의 종방향 부착력이 작기 때문에 침목을 고려하지 않고 침목의 위치가 파악되어 있는 형태의 슬래브 모델을 사용하는 것이 CRCT의 응력과 균열 예측에 보다 적합한 것으로 파악되었다.
- 2) CRCT에 발생하는 응력분포를 분석한 결과 종방향 최대 인장응력은 콘크리트 슬래브의 침목이 위치하는 모서리 부분에서 발생하는 것으로 나타났으며 이는 실제 CRCT에서의 균열 발생 위치와 일치하는 것을 알 수 있었다.
- 3) 재료 성질이 변화할 때 CRCT의 응력 및 균열폭의 변화를 분석한 결과 콘크리트 탄성계수와 열팽창계수에 대해서는 인자값이 증가함에 따라 인장응력 및 균열폭이 거의 선형으로 증가하며 열팽창계수의 민감도가 가장 큰 것을 알 수 있었다. 포아송비는 매우 미소하게 CRCT의 거동에 영향을 미치는 것은 하지만 거의 무시할 정도인 것을 알 수 있었다.
- 4) 균열간격에 따라 재료 성질이 종방향응력과 균열폭에 미치는 민감도율을 분석한 결과, 탄성계수는 균열간격이 커질수록 종방향응력과 균열폭의 민감도율이 커지는 것을 알 수 있었다. 열팽창계수는 균열간격이 변하더라도

종방향응력과 균열폭에 미치는 민감도는 변화가 없는 것으로 나타났으며, 포아송비는 균열간격의 변화에 대해 종방향응력의 민감도는 거의 변화가 없으나 균열폭은 균열간격이 커질수록 민감도율이 미소하게나마 작아지는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부에서 지원한 “400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발” 과제에 의해 수행 되었습니다.

참고문헌

- 임남형, 이우철, 최진유 (2008) 궤도 결합에 기인한 국외의 철도 사고 분석, **한국방재학회 논문집**, 제8권 1호, pp.23-29.
- 한국도로공사 (2009) **도로설계요령-포장편**, 한국도로공사.
- 국토해양부 (2009) **도시철도시설 표준규격**, 국토해양부.
- ABAQUS (2007) *User's Manual Version 6.7*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R. I.
- Jonston, D. P. and Surdahl, R. W. (2008) Effects of design and material modifications on early cracking of continuously reinforced concrete pavements in South Dakota, *Transportation Research Record*, No. 2081, pp. 103-109.
- Kim, S.M., Nelson, P.K., Ruiz, M., Rasmussen, R.O. and Turner, D. (2003a) “Early-age behavior of concrete overlays on continuously reinforced concrete pavements”, *Transportation Research Record*, No. 1823, pp. 80-92.
- Kim, S.M., Won, M.C. and McCullough, B.F. (1998) “Numerical modeling of continuously reinforced concrete pavement subjected to environmental loads”, *Transportation Research Record*, No. 1629, pp. 76-89.
- Kim, S.M., Won, M.C. and McCullough, B.F. (2003b) “Mechanistic modeling of continuously reinforced concrete pavement”, *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 5, pp. 674-682.
- Kohler, E.R. and Roesler, J.R. (2005) “Crack width measurements in continuously reinforced concrete pavements”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 645-652.
- Kohler, E. and Roesler, J. (2006) “Nondestructive testing for crack width and variability on continuously reinforced concrete pavements”, *Transportation Research Record*, No. 1974, pp. 89-96.
- Selezneva, O., Darter, M., Zollinger, D. and Shoukry, S. (2003) “Characterization of transverse cracking spatial variability - Use of long-term pavement performance data for continuously reinforced concrete pavement design”, *Transportation Research Record*, No. 1849, pp. 147-155.

◎ 논문접수일 : 2012년 07월 16일
 ◎ 심사회의일 : 2012년 07월 17일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 08월 14일