

GFRP 보강근을 적용한 교량용 콘크리트 도상슬래브의 균열 및 휨강도 변수 해석

최형배¹·이상열^{2†}

¹안동대학교 대학원 지진방재공학과 박사과정, ²안동대학교 토목공학과 교수

Parametric Crack and Flexural Strength Analyses of Concrete Slab For Railway Structures Using GFRP Rebar

Hyeong-Bae Choe¹ and Sang-Youl Lee^{2†}

¹Graduate Student, Department of Earthquake Disaster Prevention Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea

Abstract

In this paper, we presented an optimized crack and flexural strength analysis of a glass-fiber reinforced polymer (GFRP) rebar, used as reinforcements for in-site railway concrete slabs. The insulation performance of a GFRP rebar has the advantage of avoiding the loss of signal current in an audio frequency (AF) track circuit. A full-scale experiment, and three-dimensional finite element simulation results were compared to validate our approaches. Parametric numerical results revealed that the diameters and arrangements of the GFRP rebar had a significant effect on the flexural strength and crack control performances of the concrete track slabs. The results of this study could serve as a benchmark for future guidelines in designing more efficient, and economical concrete slabs using the GFRP rebar.

Keywords : GFRP, flexural strength analysis, concrete slab, crack width analysis

1. 서론

콘크리트 도상 슬래브는 자갈 도상을 대체하여 사용이 점차 증대되고 있으며, 콘크리트의 균열 방지 및 내구성을 증대시키기 위하여 철근을 사용하는 것이 일반적이다. 이러한 콘크리트 도상 슬래브에서 AF(Audio Frequency) 궤도회로를 사용하는 고속 열차의 사용이 증대되고 있다. 하지만 콘크리트 도상 슬래브의 내장된 철근은 레일에 흐르는 전류에 의하여 형성된 자기장과 결합하여 AF 궤도회로에 흐르는 신호전류의 손실을 증대시킨다(Hong *et al.*, 2010). 신호전류의 손실은 열차 신호 오류로 인한 사고를 일으킬 수 있다. 철근으로 인한 신호전류의 손실을 막기 위해 철근을 전기적으로 절연하여 전기적인 루프를 제거함으로써 철근의 유도전류를 방지할 수 있다(Kim *et al.*, 2008). 하지만 이러한 방법은 시간과 비용이 추가

되는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 모두 보완하여 전류가 통하지 않은 절연성을 보유한 유리 섬유 강화 플라스틱(GFRP; Glass Fiber Reinforced Polymer) 보강근을 철근을 대체하여 사용하여 문제점을 해결할 수 있다. 그러나 GFRP 보강근은 전기적 절연성 이외에 기존철근을 대체할 수 있는 구조적 성능을 만족하여야 한다.

한편, 기존 연구는 콘크리트 도상 슬래브에서의 열차 하중은 1차적으로 침목이 하중을 분산시켜 지지하며 침목 부근에서의 파괴 후 콘크리트 도상 슬래브로의 균열과 파괴가 전파되며 철근 및 GFRP 보강근을 적용한 슬래브 모두 기준 강도를 크게 만족하는 것으로 보고되었다(Korea National Railway, 2021). 이 연구에서는 GFRP 보강근을 적용한 콘크리트 도상 슬래브의 휨 강도 성능은 철근을 적용한 경우에 비하여 최대하중이 약 92%로 나타났으며, 300만 회 반복하중을 적용한 장기

[†]Corresponding author:

Tel: +82-54-820-5665; E-mail: lsy@anu.ac.kr

Received September 23 2021; Revised October 6 2021;

Accepted October 6 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

피로시험 성능 또한 만족하는 것으로 보고되었다. 높은 인장 강도를 갖는 GFRP 보강근은 내진성능 향상에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 현재의 도상 슬래브는 하중을 직접 받는 침목이 지지하는 역할에 비하여 침목 하부의 과다 배근으로 인하여 비효율적 측면이 있다. 또한, 기존 철근과 동일한 배근으로 GFRP 보강근을 배근하는 경우 경제적 측면에서도 불리할 수 있다. 그러나 이와 관계된 상세 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국가철도공단에서 수행한 기존 연구를 확장하여 콘크리트 도상슬래브에 적용하는 GFRP 보강근의 직경 및 배근 개수가 전체 도상슬래브의 비선형 휨강도 및 균열 성능에 미치는 상호작용 거동에 대하여 3차원 유한요소 모델링 및 해석을 수행하여 상세 분석하고자 한다.

2. 콘크리트 균열 및 유한요소 모델링

2.1 콘크리트 균열 모델

본 연구에서 수행한 콘크리트 균열해석은 Maekawa-Fukuura 콘크리트 모델에 기반한다(Hauke and Maekawa, 1999). Maekawa-Fukuura 콘크리트 모델은 Maekawa 콘크리트 균열 모델과 결합된 전체 변형률 균열모델과 탄소성 파괴모델(Elasto-Plastic Fracture Model)의 조합으로 설명할 수 있다. 전체 변형률 균열 모델과는 반대로 Maekawa-Fukuura 콘크리트 모델은 비직교 균열 정의를 사용한다.

Maekawa 콘크리트 균열 곡선은 각각 인장 및 압축 변형 영역에서 하중, 하역 및 재하 중 조건에 대한 단축 응력-변형 관계이다. 활성 균열과 관련된 좌표계의 주요 방향에서 응력은 등가 단축 변형을 사용하여 이러한 방정식으로 계산하게 된다. Fig. 1은 콘크리트 균열 곡선에 의해 정의된 단축 응력-변형을 보여준다. 그림으로부터 각 하중(압축 및 인장)의 재하, 하중 제거, 그리고 재부하의 과정을 반복함을 나타낸다.

그림에서 ε 은 총 변형률이고, ε_{cmax} 는 현재까지 도달한 최대 압축 변형률이다. ε_{tmax} 은 현재까지 도달한 최대 인장 변형률

이고, ε_p 는 소성 변형률을 각각 의미한다. ε_0 는 각 단계에서 시작 변형률, σ 는 Cauchy 응력, σ_{cmax} 는 ε_{cmax} 에서 Cauchy 응력이다. σ_{tmax} 는 ε_{tmax} 에서 Cauchy 응력, σ_0 는 각 단계에서 시작 Cauchy 응력을 의미한다. K 는 파괴 손상 매개변수이고, E 는 탄성 계수이다. f_t 은 콘크리트의 인장강도이고 ε_0 은 최대 압축 강도에서의 변형률을 각각 의미한다. $f_{TSC}(\varepsilon)$ 은 인장 응력 영역에서 back-bone 응력-변형률 함수를 정의한다. 그림으로부터 Maekawa 콘크리트 균열 곡선은 다음과 같이 정의된다.

$$1) \text{ 압축재하 } (\varepsilon \leq \varepsilon_{cmax}) \begin{cases} \sigma = KE(\varepsilon - \varepsilon_p) \\ K = \exp(-0.73 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} (1 - \exp(-1.25 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{oc}}))) \\ \varepsilon_p = (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - \frac{20}{7} (1 - \exp(-0.35 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}))) \varepsilon_c \end{cases} \quad (1)$$

$$2) \text{ 압축 하중제거 } (\varepsilon > \varepsilon_{cmax}, \varepsilon > \varepsilon_0, \varepsilon < 0) \begin{cases} \sigma = KE(\varepsilon - \varepsilon_p)\alpha \\ \alpha = K^2 + (\frac{\sigma_0}{KE(\varepsilon_0 - \varepsilon_p)} - K^2) (\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_0 - \varepsilon_p})^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$3) \text{ 압축 재부하 } (\varepsilon > \varepsilon_{cmax}, \varepsilon < \varepsilon_0, \varepsilon < 0) \sigma = \sigma_{cmax} - (\sigma_{cmax} - \sigma_0) \frac{\varepsilon_{cmax} - \varepsilon}{\varepsilon_{cmax} - \varepsilon_p} \quad (3)$$

$$4) \text{ 인장 재하(Tensile loading) } (\varepsilon > \varepsilon_{tmax}) \sigma = Kf_{TSC}(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (4)$$

$$5) \text{ 인장 하중제거 } (\varepsilon < \varepsilon_{tmax}, \varepsilon < \varepsilon_0, \varepsilon > 0) \begin{cases} \sigma = E_{t0}(\varepsilon - \varepsilon_p)\alpha + \sigma_b \\ \sigma_b = -f_t (0.05 + 0.15 \frac{(\varepsilon_{tmax} - \varepsilon_p)E}{5f_t}) > -0.2f_t \\ \alpha = (\frac{\sigma_0}{E_{t0}(\varepsilon - \varepsilon_p)}) (\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_0 - \varepsilon_p})^3 \\ E_{t0} = \frac{\sigma_{tmax} - \sigma_b}{\varepsilon_{tmax} - \varepsilon_p} \end{cases} \quad (5)$$

$$6) \text{ 인장 재부하 } (\varepsilon < \varepsilon_{tmax}, \varepsilon > \varepsilon_0, \varepsilon > 0) \sigma = \sigma_{tmax} - (\sigma_{tmax} - \sigma_0) \frac{\varepsilon_{tmax} - \varepsilon + \varepsilon_p}{\varepsilon_{tmax} - \varepsilon_0 + \varepsilon_p} \quad (6)$$

인장 영역에서 back-bone 응력-변형률 함수 f_{TSC} 의 경우, 일본 토목학회에서 정의한 anisotropic tension stiffening에 기반한 표준 곡선을 사용한다(JSCE Standard Specifications for Concrete Structures, 2012). 다음 식으로 각 국부 요소 방향에 대한 표준화된 에너지 방출 G_f^0 을 계산하여 해당 방향에 대한 power c 매개변수를 결정한다.

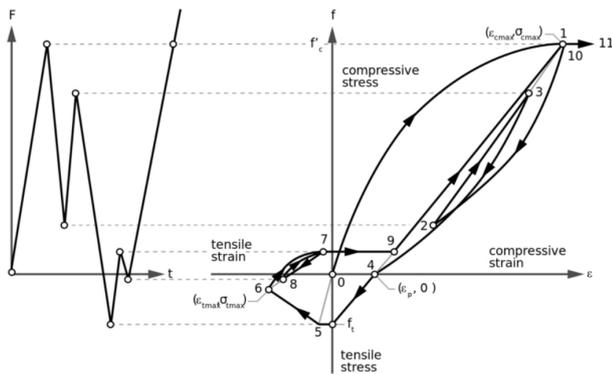


Fig. 1 Hysteresis of maekawa cracked concrete curves

$$G_f^0 = \frac{\epsilon_{tu}}{c-1} \left[1 - \left(\frac{0.025}{\epsilon_{tu}} \right)^{1-c} \right] + 0.25\epsilon_{tu} \quad (7)$$

여기서, 재료 매개변수 ϵ_{tu} 가 plateau strain의 끝이고 각 요소 방향의 power c 이다.

다음으로 3차원 방향에서 정규화된 에너지 해제 값 $G_{fx}^0, G_{fy}^0, G_{fz}^0$ 과 $n = \{nx, ny, nz\}$ 로 정의된 국부 요소 좌표계의 균열에 대한 정규화된 방향을 사용하여 각 방향에서 정규화된 에너지 해제 G_f^* 는 다음과 같이 정의된다.

$$G_f^* = \frac{nx^2 G_{fx}^0 + ny^2 G_{fy}^0 + nz^2 G_{fz}^0}{nx^2 + ny^2 + nz^2} \quad (8)$$

각 요소방향의 power c 값은 식 (7)의 역순으로 계산할 수 있다.

한편, 본 연구에서는 균열이 발생한 이후, 다시 닫히는 현상 (Crack re-closing)을 고려하였으며, 이것은 압축 재하와 인장 하중제거 모드와 관련이 있다(Fig. 2참조). 인장 하중제거 모드에서는 지금까지 최대 인장 변형률인 ϵ_t 에서 압축 소성 변형률인 ϵ_p 로 변형률이 감소한다. 압축 재부하 모드 중에 변형은 압축 소성 변형률인 ϵ_p 에서 최대 압축 변형률인 ϵ_c 로 감소한다. 균열 닫힘을 고려하지 않는다면, crack bond 응력 σ_{cb} 이 소성 응력 ϵ_p 와 같을 때까지 응력은 3차 함수에 따라 인장 하중제거 모드에서 발생한다. 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_{cb} = -f_t \left(0.05 + 0.15 \frac{\epsilon_t - \epsilon_p}{5f_t} E \right) \quad (9)$$

여기서, f_t 는 인장 강도, E 는 탄성 계수이다. 다음으로 압축 재부하 모드에서 최대 압축 응력 σ_c , 최대 압축 변형률 ϵ_c 까지 선형 함수에 따라 응력이 발생한다. 한편, 균열 닫힘을 고려하는

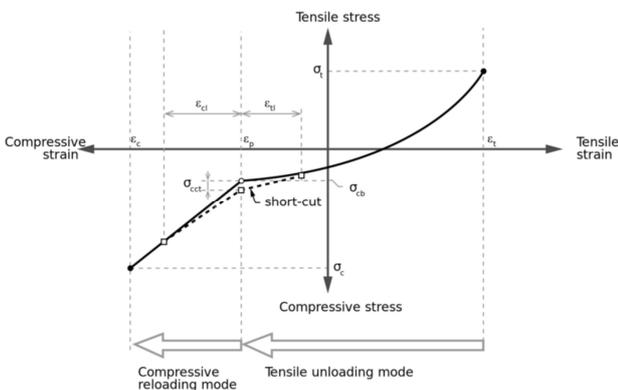


Fig. 2 Crack re-closing curve in the maekawa model

경우는 인장 재하 모드에서 압축 재부하 모드로 전환할 때 발생하는 응력이 다르므로 균열해석 시 균열닫힘 현상을 고려하는 것이 타당하다.

2.2 콘크리트 도상슬래브 유한요소 모델링

전술한 콘크리트 균열이론을 적용하여 교량용 도상슬래브에 대하여 3차원 정밀 유한요소해석 프로그램인 DIANA FEA를 사용하여 모델링을 수행하였다(Denise and Jonna, 2019). 바이블릭(침목)을 포함하여 철근 및 GFRP 보강근이 적용된 콘크리트 도상 슬래브를 모델링하였으며, 콘크리트 도상 슬래브의 종방향 시험체의 경우 제원은 1,900mm×2,800mm×351mm이며, 횡방향 시험체의 제원은 2,800mm×700mm×351mm이다. Fig. 3은 침목 상세 모델링을 보여주며, Fig. 4는 침목 상세 모델링이 적용된 종방향 및 횡방향 도상슬래브의 전체 모델링

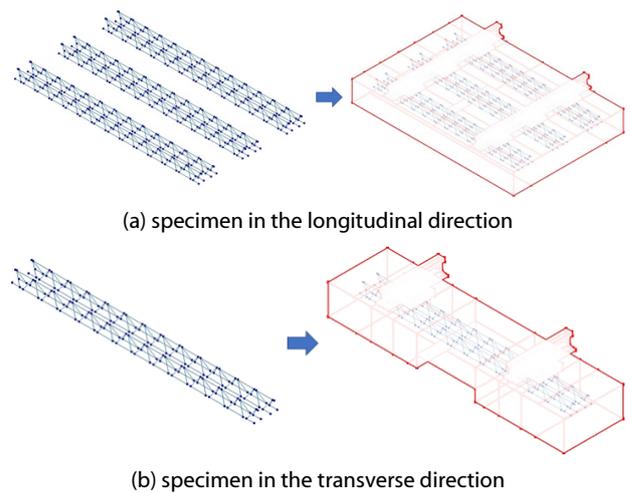


Fig. 3 3D dimensional modeling of sleeper(Bi-block)

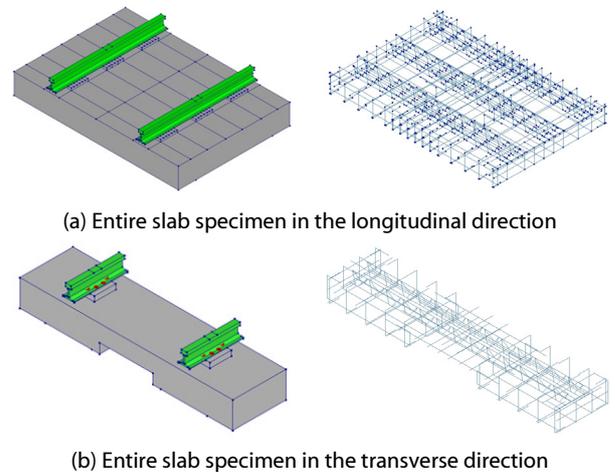


Fig. 4 Concrete slab models for a flexural analysis

을 보여준다. 적용된 하중은 변위 제어로 0.5mm씩 가력하여 해석을 수행하였다.

3. 수치해석 및 결과분석

3.1 수치해석 검증

전술한 3차원 수치해석 모델링에 기반하여 보강근의 직경 및 배치변화 등을 적용하여 상세 변수해석을 수행하였다. 본 해석에 적용하는 비교용 철근, GFRP 보강근 및 콘크리트 재료 물성은 Table 1~Table 3과 같다. 본 해석 모델링을 검증하기 위하여 기존 문헌의 결과를 비교하였다. Fig. 5는 종방향 시험체에 대하여 기존철근 및 GFRP 보강근을 적용한 정적가력 실험을 수행한 결과를 각각 도시한 것이며 하중-변위 곡선을 기존 결과와 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 수치해석 결과와 실험의 결과는 선형 탄성영역에서 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 최대하중 이후의 거동에서 약간의 차이는 보이고 있으나 대체적인 경향은 유사한 것으로 분석되었다.

Table 1 Material properties of steel(SD400) rebar

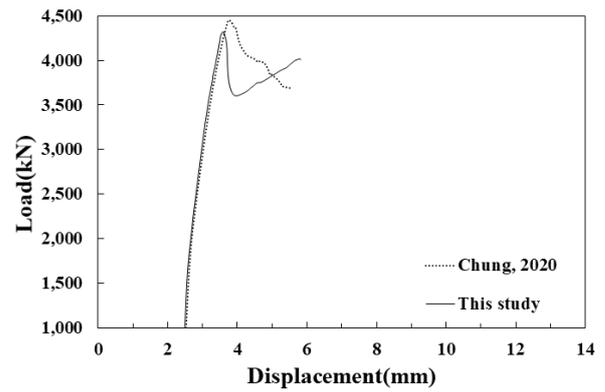
Mass Density, kg/m^3	7,850
Young's modulus, MPa	200,000
Yield stress, MPa	400
Tensile strength, MPa	560

Table 2 Material properties of GFRP rebar

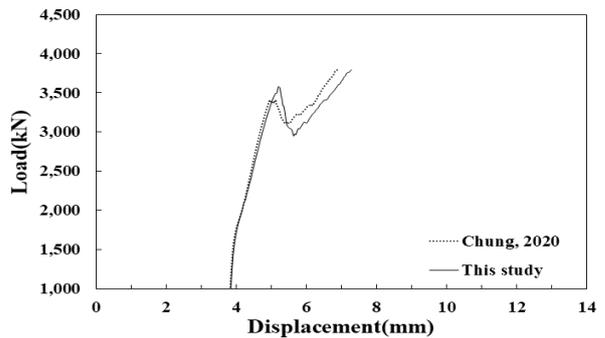
Nominal Diameter (mm)	Mass Density (kg/m^3)	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)
10	2,230	46,000	827
13	2,230	46,000	758
16	2,230	46,000	724
19	2,230	46,000	690

Table 3 Material properties of concretes

Mass Density,	2.4×10^{-9}
Threshold angle between cracks	22.5°
Tensile strength, MPa	3
Plateau end strain	0.0002
Power C	0.4
Uniaxial compressive strength, MPa	30
Ultimate shear strain	0.004
Power C for shear retention	0.4
Minimum value shear retention factor	0.01



(a) Steel rebars

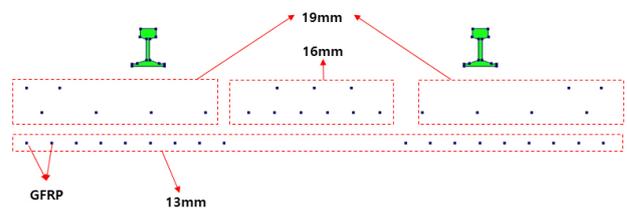


(b) GFRP rebars

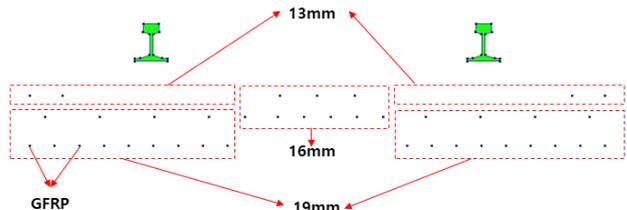
Fig. 5 Verification of specimen in the longitudinal direction

3.2 GFRP 보강근의 직경 변화에 따른 해석

이 절에서는 휨강도 성능에 영향을 많이 줄 것으로 예상되는 슬래브 종방향에 대하여 GFRP 보강근을 적용하였으며, 적용된 종방향에 대한 GFRP 보강근의 기본 배치 형상은 Fig. 6과 같다. 기본 배치 보강근에 대하여 19mm, 16mm, 13mm 및 10mm의



(a) specimen in the longitudinal direction



(b) specimen in the transverse direction

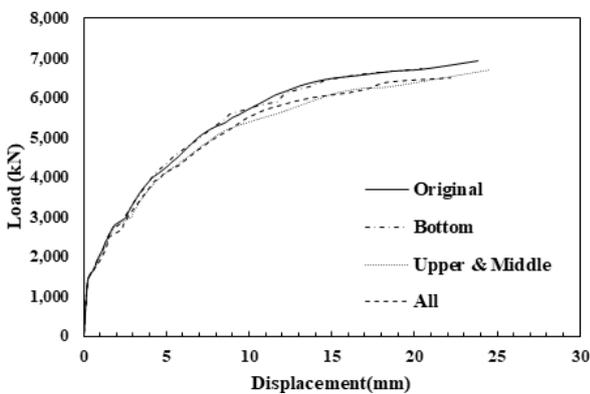
Fig. 6 Longitudinal GFRP rebar arrangements for analysis by different diameters

직경을 갖는 보강근에 대하여 Table 4에서와 같이 직경을 감소시킨 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

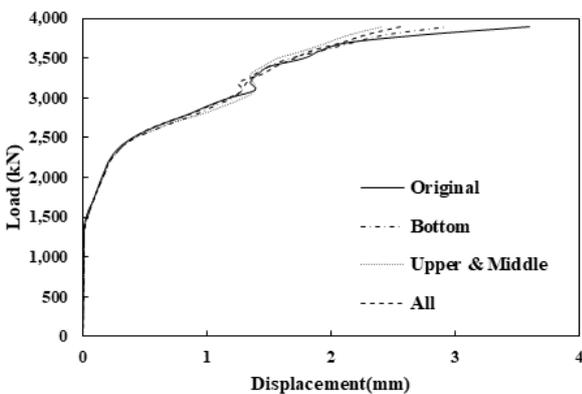
해석 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 최대하중이 모든 Case에 대하여 기준 강도(중방향 시험체 최대하중 2,500kN, 횡방향 시험체 최대하중 605kN)를 모두 만족하였다(Chung, 2020). 또한 기준 강도 이하에서의 하중-변위 값의 차이는 미미하였

Table 4 Case of flexural tensile strength analysis by different diameter

	Case	Diameter
Specimen in the longitudinal direction	Bottom	13mm → 10mm
	Upper, middle	19mm → 16mm 16mm → 13mm
	All	13mm → 10mm 19mm → 16mm 16mm → 13mm
Specimen in the transverse direction	Bottom	19mm → 16mm
	Upper, middle	19mm → 16mm 16mm → 13mm
	All	19mm → 16mm 16mm → 13mm 13mm → 10mm



(a) Specimen in the longitudinal direction



(b) Specimen in the transverse direction

Fig. 7 Displacement results of flexural tensile strength analysis by different diameter

다. 따라서 콘크리트 도상 슬래브의 GFRP 보강근의 직경을 감소시킨 경우에도 최대하중 기준을 만족하였으며, GFRP 보강근을 적용하는 경우 기존의 철근 배근보다 경제적인 설계가 가능할 수 있을 것으로 분석된다.

3.3 GFRP 보강근의 개수 변화에 따른 균열 해석

3.2절에서는 GFRP 보강근의 직경만을 감소시킨 경우에 대한 비선형 휨강도 해석을 수행하였다. 보강근의 직경을 감소시킨 경우 휨강도 성능은 만족할 수 있으나, 직경 감소로 인하여 콘크리트 슬래브의 균열에 대하여 취약할 수 있다. 따라서 이 절에서는 콘크리트 도상 슬래브의 GFRP 보강근의 단면적을 줄이는 대신 배근 개수를 증가시키는 변수를 설정하여 하중에 따른 균열 발생 및 진전 특성을 비교 분석하였다.

Fig. 8은 보강근의 직경을 감소시킨 대신 개수를 증가시켜 전체적으로는 배근량을 기존 철근의 경우와 동일하게 한 경우를 보여준다. 여기서, 중방향 시험체의 경우 하부 13mm→10mm, 중앙부 19mm→17mm와 같이 수정하였으며, 횡방향 시험체의 경우 하부 19mm→16mm, 중앙부 19mm→17mm와 같이 수정하였다. Fig. 9는 하중 증가에 따른 최대 균열폭 크기를 비교한 것이다. 해석 결과, 0.03mm 균열폭에 대한 중방향 시험체의 하중 값은, 수정된 경우 약 1,620kN으로 기존 결과 약 1,500kN에 비하여 7% 증가하였다. 0.03mm 균열폭에 대한 횡방향 시험체의 하중 값은, 수정된 경우 약 1,340kN으로 기존 결과 약 1,420kN에 비하여 약 6% 증가하였다. 따라서, 동일한 배근량을 기준으로 직경을 감소시킨 대신 보강근의 개수를 일정 증가시키는 것이 균열 제어에 유리할 것으로 판단된다.

다음으로 콘크리트 도상 슬래브의 휨 강도 성능 및 균열 제어에 많은 영향을 줄 것으로 판단되는 하부 GFRP 보강근의 개

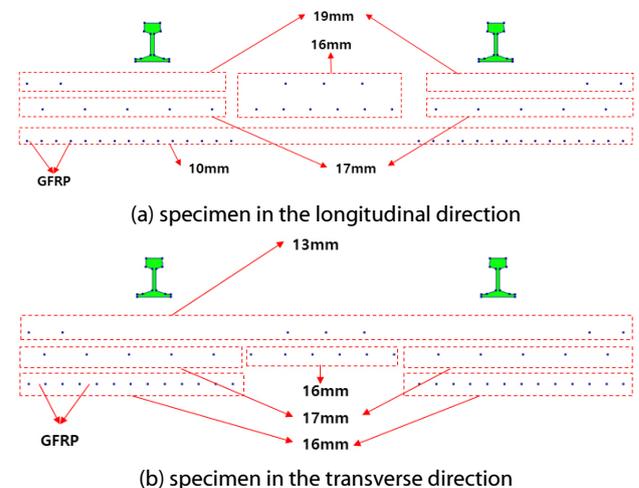
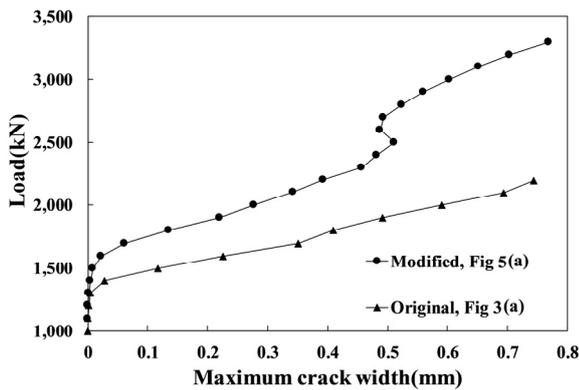
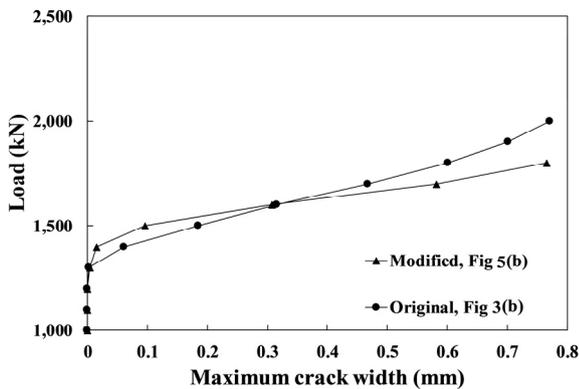


Fig. 8 Different numbers and arrangements of GFRP rebars



(a) Specimen in the longitudinal direction



(b) Specimen in the transverse direction

Fig. 9 Maximum crack width results of crack analysis by number of GFRP

수에 따른 해석을 수행하였다. 보강근의 직경은 10mm로 적용하였으며, 보강근의 배근 개수는 종방향 시험체의 경우 총 24, 26, 28, 30 및 32개, 횡방향 시험체의 경우 20, 22, 24, 26 및 28개로 변수설정을 하였다. Fig. 10은 종방향 시험체에 대한 배근 변수를 보여주며, Table 5는 슬래브의 종방향 및 횡방향 하부에 대한 보강근의 직경 변화 및 배근량에 대한 변수를 요약한 것이다. 하중에 따른 최대 변위 결과는 Fig. 11와 같으며, 균열 분포 형상에 대한 결과는 Fig. 12와 같다.

해석결과, 그림에서 보는 바와 같이 종방향의 경우 1,400kN의 하중까지는 보강근의 직경 및 개수변화는 전체 슬래브 최대 균열폭의 크기에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 반면, 하중이 계속 증가할수록 직경 및 개수 변화가 균열이 미치는 영향이 증가하게 되며, 10mm 직경을 26개 또는 28개 사용하는 경우가 가장 유리한 결과로 나타났다. 이러한 경우 사용 보강근량은 기존 대비 85~92% 감소시키면서 최대 균열 크기도 감소시키는 효과를 보인다.

횡방향의 경우 Fig. 11 및 Fig. 13에서 보는 바와 같이 1,200kN의 하중까지는 보강근의 직경 및 개수변화는 전체 슬래브 최대 균열폭의 크기에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그러

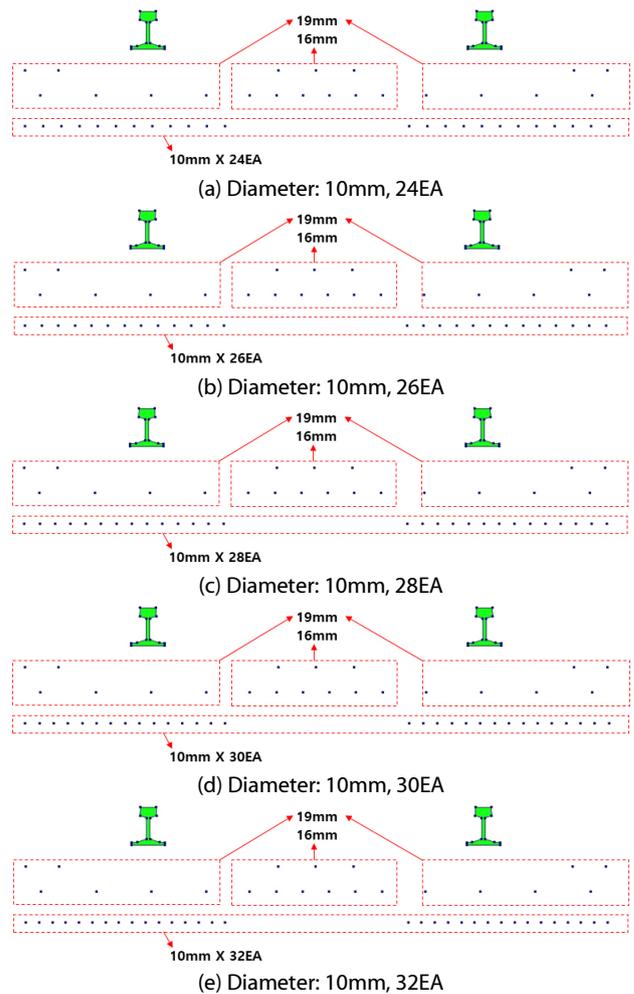


Fig. 10 Modified GFRP position(specimen in the longitudinal direction)

Table 5 Case of crack analysis by number of GFRP

Diameter(mm)		Number of GFRP rebar (EA)	Sectional area ratio (%)
Specimen in the longitudinal direction	Original	13	100
		10	79
	Reduced	10	85
		10	92
		10	105
Specimen in the transverse direction	Original	19	100
		16	79
	Reduced	16	87
		16	95
		16	102
		16	110

나 그이후 하중 증가에 대하여 종방향의 경우와는 달리 직경을 감소시킨 경우는 보강근 개수와 관계없이 균열제어 효과가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 이유는 슬래브의 횡방향으로 배치되는 기존 주철근 19mm는 전체 구조적 거동을 제어하고

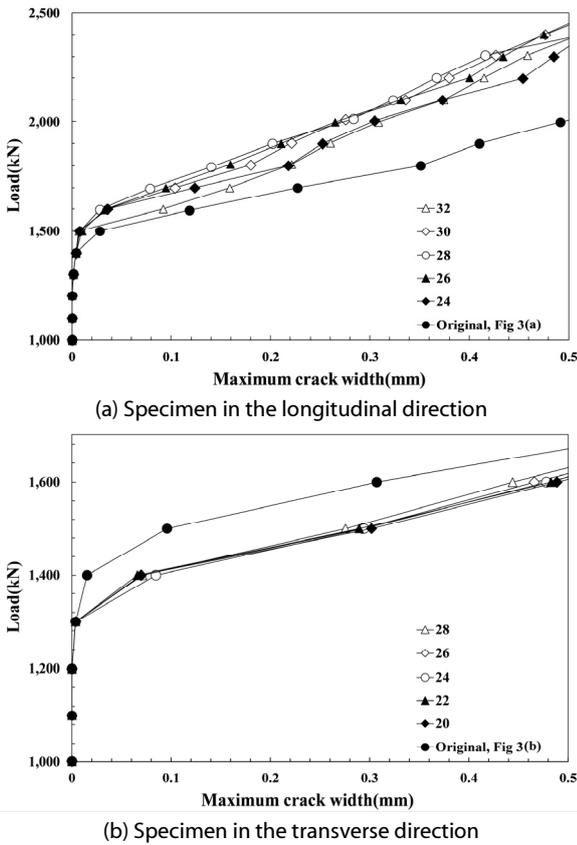


Fig. 11 Load-maximum crack width curves of crack analysis by numbers of GFRP rebars

횡방향으로의 균열에 거의 영향을 안주기 때문에 분석된다. 따라서, 횡방향에 대하여 16mm 직경으로 감소시키는 것은 균열폭 제어에 영향을 주지 않으며, 오히려 불리한 효과를 가져 오므로 유의해야 한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 철도 교량용 콘크리트 도상 슬래브(TCL층)에 대하여 철근 대비 GFRP 보강근의 적용에 대한 휨강도 및 균열 성능 효과에 대하여 3차원 유한요소 변수해석을 수행하여 상세 분석하였다. Maekawa-Fukuura 콘크리트 모델에 기반한 본 연구의 해석 모델링은 기존 슬래브 실험 결과와 비교 검증하였으며, 도상 슬래브에 적용하는 GFRP 보강근의 직경 및 개수변화가 전체슬래브의 휨강도 및 균열 거동에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 본 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) GFRP 보강근의 전체 사용개수를 기존과 동일하게 하고, 직경을 감소시켰을 경우, 최대하중 기준 강도를 모두 만족하였으며, 기준 강도 이하에서의 하중·변위 값의 차이는

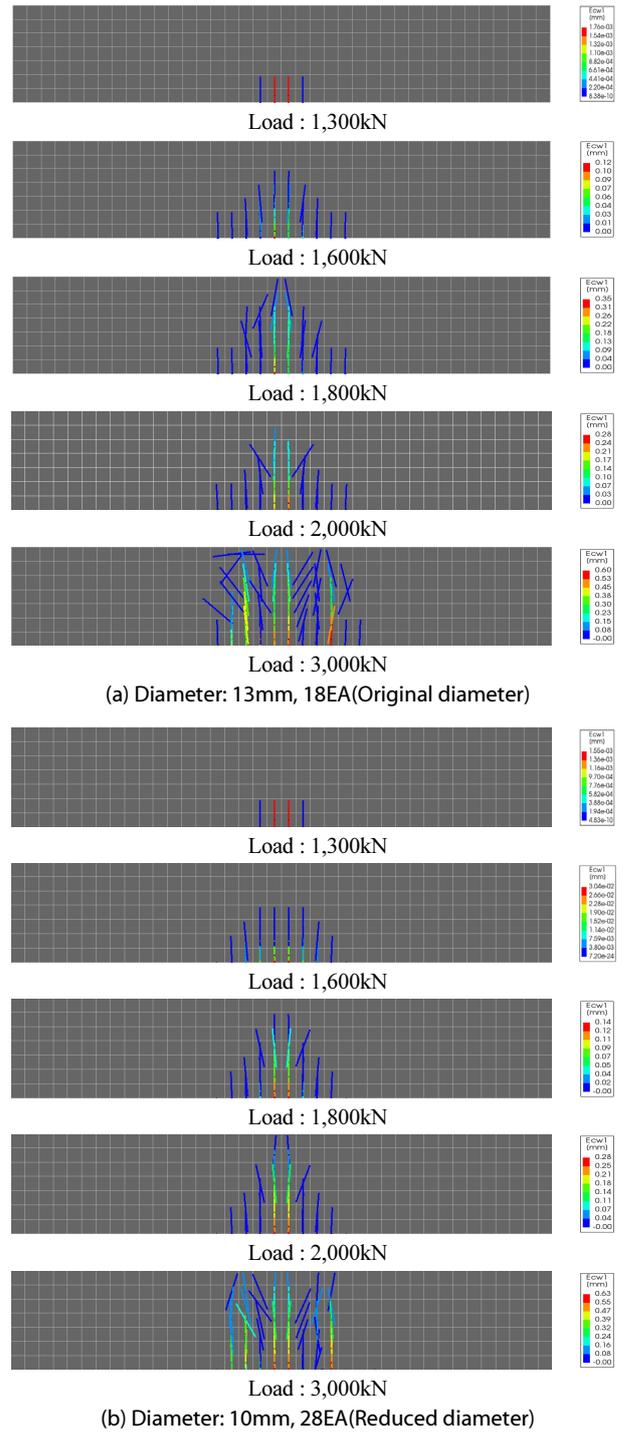


Fig. 12 Crack shape results of crack analysis by number of GFRP(specimen in the longitudinal direction)

미미하였다. 따라서, 강도성능 관점에서 GFRP 보강근을 적용하는 경우 기존보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

2) 슬래브 하부에 대하여 직경을 감소시킨 대신 보강근의 개수를 증가시켜 전체 배근량을 기존과 동일하게 한 경우, 균열제어 성능이 향상되어 유리하다.

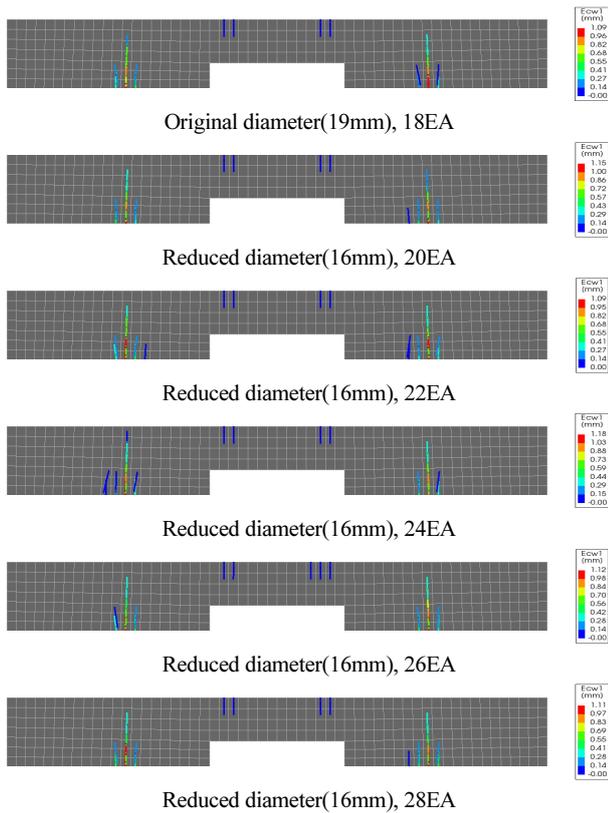


Fig. 13 Crack shape results by number of GFRP(specimen in the transverse direction, Load: 2,000kN)

- 3) 변수해석 결과, 슬래브 종방향의 경우 10mm 직경을 26개 또는 28개 사용하는 경우가 가장 유리하다. 이러한 경우 사용 보강근량은 기존 대비 85~92% 감소시키면서 최대 균열 크기도 감소시키는 효과를 보이므로 최적설계를 위하여 추천된다.
- 4) 횡방향의 경우는 배치되는 기존 주철근 19mm이 전체 구조적 거동을 제어하고 횡방향으로의 균열 발생 및 진전에 거의 영향을 안주므로 보강근 직경으로 감소하는 것은 균열폭 제어에 영향을 주지 않으며, 오히려 불리한 효과를 가져오므로 유의해야 한다.

본 연구로부터 도출된 결과는 향후 GFRP 보강근을 적용하여 도상슬래브를 설계하는 경우 보다 합리적이고 경제적인 단면을 산정할 수 있는 가이드라인이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구(No.2018R1D1A1B07050080)임.

References

Chung, S.B. (2020) Structural Performance Investigation of In-site Concrete Railway Slabs for Bridge Applications Using Glass-fiber Composite Rebars, Ph.D. Thesis, Andong National University, pp.121~124.

Denise, F., Jonna, M. (2019) DIANA-Finite Element Analysis, DIANA Documentation release 10.3, DIANA FEA bv.

Hauke, B., Maekwaa, K. (1999) Three-dimensional Modelling of Reinforced Concrete with Multi-directional Cracking, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements*, JSCE, 45(634), pp.349~368.

Hong, H.S., Yoo, K.K., Rho, S.C. (2010) A Study on the Method of preventing from Reduction of AF Track Circuit Signal Current on a Ferroconcrete Roadbed, *J. Korean Soc. Railw.*, 13(5), pp.500~503.

JSCE Standard Specifications for Concrete Structures (2012) Design, Technical Report Japan Society of Civil Engineers.

Kim, M.S., Lee, J.W., Ko, J.S. (2008) The Influence of Frequency on Wayside Transmitter of ATP System upon Reinforcing Bars in Concrete Slab Track, *Proceedings of the KSR Conference, Korean Society for Railway*, pp.685~700.

Korea National Railway (2021) Development of Railway Slabs Reinforced by the GFRP Rebar Instead of the Steel Rebar, Korea National Railway Research Report (No.2021-30502-003).

요 지

본 연구는 이러한 단점을 보완하기 위해 철근을 대체하여 내산화성과 전기저항이 높은 GFRP 보강근을 적용한 도상슬래브의 최적 변수해석을 수행하였다. 철도 궤도슬래브에 적용되는 철근은 열차 운행 중 신호전류의 손실을 일으켜 열차의 안정성을 저해하며, 철근의 부식으로 내구성이 저하될 수 있다. GFRP 보강근의 직경 및 배근 개수 변화가 전체 콘크리트 도상슬래브의 휨강도 및 균열제어에 미치는 영향을 유한요소 변수해석을 통하여 상세분석하였다. 해석 결과, GFRP 보강근의 직경 및 배근을 합리화하여 제안하였으며 이러한 경우 기존 배근보다 더욱 경제적인 단면을 도출할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구로부터 도출된 결과는 향후 GFRP 보강근을 적용하여 도상슬래브를 설계하는 경우 보다 합리적이고 경제적인 단면을 산정할 수 있는 가이드라인이 될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 유리섬유보강근, 휨 강도 해석, 콘크리트 도상슬래브, 균열 해석