

격자형 탄소 보강재의 일방향 부착특성에 대한 실험 및 해석적 연구

노치훈¹, 장낙섭², 오홍섭^{3*}

A Experimental and Analytical Study on One directional Bond Behavior of Grid typed CFRP Reinforcement

Chi Hoon Noh¹, Nak Seop Jang², Hongseob Oh^{3*}

Abstract: In this study, authors attempted to determine the bond behavior characteristics to utilize Grid typed CFRP reinforcement as an alternative to steel rebar used as concrete reinforcement. Since it is difficult to understand the influence of the transverse grid length of the Grid typed CFRP reinforcement in the existing numerical analysis proposal for bond behavior, a nonlinear 3D model was created and finite element analysis was performed. To perform the analysis, the analysis was conducted by inputting a nonlinear material model and modeling the bond interface characteristics between the Grid typed CFRP reinforcement and concrete and comparing them with the actual direct pull-out test results. The bond behavior characteristics of the Grid typed CFRP reinforcement were found to be very dominated by the factors of the transverse grid, and showed a tendency to continuously increase load.

Keywords: Grid typed CFRP reinforcement, Bond behavior, Pull out test, Finite element analysis

1. 서 론

철근은 오래전부터 콘크리트 구조물의 보강재로 활용되었으나, 부식으로 인한 문제점으로 인하여 구조물에 각종 열화 및 내하력 저하 및 외적 미관에 악영향을 미치는 단점이 있다. 철근의 부식으로 인한 문제를 근본적으로 해결하고자 대체재로써 섬유보강복합재(Fiber Reinforced Polymer, FRP)를 활용한 설계 및 시공 방법들이 제시되고 있다(Cheon et al., 2021). 건설분야에서 주로 사용하는 FRP는 탄소섬유로 이루어진 CFRP, 아라미드섬유로 이루어진 AFRP, 유리섬유로 이루어진 GFRP 등과 같은 다양한 섬유로 이루어지며, 에폭시, 비닐 에스터, 폴리에스터 등과 같은 수지로 보강재의 형상을 규격화하게 된다. 또한, FRP와 수지는 밀도가 매우 낮아 강재에 비해 중량이 약 1/4~1/5 정도인 높은 경량성과 높은 인장강도 및 비부식성의 특징을 가지며, 제작방법은 인발성형 또는 적층형식 등으로 제작된다(ACI 440.1R, 2015).

기존에는 경제적인 GFRP 보강근이 많이 활용되었으나, 최

근 탄소섬유 제작 기술의 발달과 시장 규모의 확장으로 경제성이 높아진 CFRP의 활용도 역시 증진되고 있으며, 원형 보강근, 판, 쉬트, 그리드 등 다양한 형태로 제작되어 구조 부재의 내·외부에 매립 또는 부착을 통하여 응력을 전달할 수 있도록 사용되고 있다. 또한, 철근과 유사한 CFRP 보강근이 아닌 판구조와 벽체 구조 등에 활용도를 높인 격자 형태의 Grid typed CFRP reinforcement(격자형 탄소보강재)를 콘크리트 내에 매립하여 사용하고자 연구가 국내·외에서 진행되고 있다(Cheon et al., 2021; Kim et al., 2023; Min et al., 2023). 격자형 탄소보강재는 보강근과 달리 섬유의 배열이 격자형태로 이루어져 있으며, 별도의 이음없이 중·횡간의 보강이 가능하며, 이로 인해 시공 비용의 감소 및 시공 기간 단축 등의 이점이 있다(Choi., 2023).

그러나 격자 형태의 보강재는 부착강도를 높이기 위한 이형 철근 또는 표면 처리된 FRP 보강근과 달리 표면이 매끄러운 형태로 제작되는 것이 일반적이다. 따라서 콘크리트 내에서 격자의 간격, 단면의 크기 등에 따른 부착특성이 충분히 규명되지 않았기 때문에 격자형 보강재의 사용성능 설계 등을 위해서는 격자형 탄소보강재 보강 콘크리트의 부착거동을 실험과 해석을 통하여 평가할 필요가 있다. 격자형 탄소보강재의 장점과 사용사례가 많이 제시되고 있음에도 아직까지 격자형 보강재에 대한 명확한 실험기준 또는 설계도서 등은 제시되지 않은 실정이다. 격자형 탄소보강재의 부착거동을 확

¹정회원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 석사과정

²정회원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 박사과정

³중신회원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: opera69@chol.com

Department of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

인하기 위하여 직접인발시험을 진행할 경우, 기존의 막대형 보강재와는 다르게 격자로 인하여 콘크리트 내의 응력 전파 및 인발력이 작용할 시 격자형 탄소보강재의 뽑힘에 대하여 범용 유한요소해석 프로그램을 사용하여 직접인발시험 결과와의 분석 평가를 진행하였다.

격자형 탄소보강재의 직접인발시험을 유한요소해석 프로그램으로 모사하기 앞서 기존 FRP 보강근의 부착거동을 유한요소해석으로 모사한 문헌들에 대하여 조사하였다. 부착응력-슬립 관계의 해석시 초기연구에서는 콘크리트와 보강재 사이에 상대적인 슬립이 허용되지 않는 완전 부착을 고려한 경계면 요소를 모델링하였으나, 최근에는 보강재와 콘크리트 사이의 기계적 상호작용 및 마찰 메커니즘에 초점을 두며 별개의 결합 모델이 제시되고 있다(Khalfallah, 2008). Xin(2007)은 유한요소해석을 통해 부착강도-슬립 곡선을 Fig. 1(a)와 같은 스프링 요소(Spring Element)에 스프링 강성을 정의하여 콘크리트와 FRP 보강재의 리브 형상에 대한 기계적 부착 및 마찰거동을 모사하였으며, 기존의 수치해석 모델과 유사한 거동을 나타내었다.

Burdzinski and Niedostatkiewicz(2022)는 콘크리트와 FRP 보강근 사이의 마찰과 기계적 부착을 모사하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 두 재료사이에 Surface to Surface 요소를 활용하여 부착계면을 설정하였다. 콘크리트와 보강재 부착계면의 접촉 상호작용을 점착거동(Cohesive Behavior)과 손상이론(Damage Theory)를 사용하여 해석함으로써 실험에서는 쉽게 얻지 못하는 결과인 콘크리트의 응력 변화 특성을 분석하였다.

본 연구에서는 격자형 탄소보강재를 콘크리트에 매립하여 사용할 경우 중요 설계인자인 보강재의 단면적과 횡방향 부착길이를 변수로 하여 직접인발시험결과와 부착성능을 비교하였다. 또한, 직접인발시험 결과와 FRP 보강근으로 선행된 유한요소해석 기법 중 Cohesive Behavior과 Damage Theory를 활용하여 콘크리트와 격자형 탄소보강재 재료 모델을 구성하고, 부착계면의 정의를 통한 해석결과와 비교하였다.

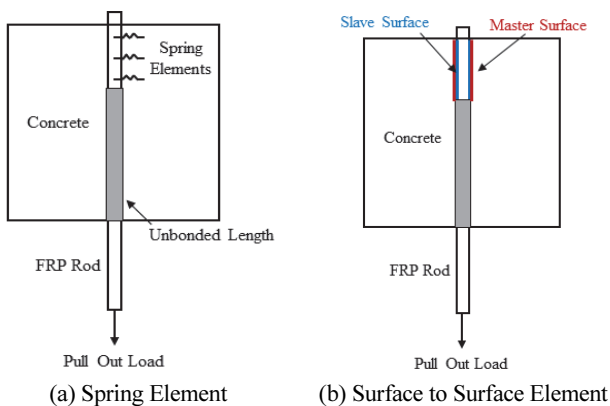


Fig. 1 Differences between Spring element and Surface to Surface Element

2. 일방향 부착 시험 결과

2.1 격자형 탄소보강재의 인장강도

격자형 탄소보강재의 직접인발시험을 통해 부착 특성을 파악하기 위하여 격자형 탄소보강재의 기본적인 인장시험을 진행하였다. 실험에 사용된 격자형 탄소보강재는 일본 N사의 제품을 사용하였다. 탄소섬유를 길이방향과 횡방향으로 일정 두께의 섬유가 직교하는 형식으로 적층하여 비닐에스터에 함침하여 제작되었으며, 직교하는 부분이 일체형으로 이루어져 있다. 또한, 격자형 탄소보강재의 시험기준이 미흡한 실정으로 FRP 보강근의 인장시험 기준인 ASTM D7205/7205M을 준용하여 실험을 진행하였으며, 실험체 중앙부 앞면과 뒷면에 두 개의 변형률 게이지를 부착하여 인장변형을 측정하였다. 시험기와 격자형 탄소보강재의 고정을 위하여 ASTM D3916/D3916M에 제시된 FRP 보강근 인장지그 기준을 준용하였으며, 알루미늄 합금 6061-T6을 사용하여 인장지그를 제작하였다. 볼트조임으로 고정하여 1,200 kN 용량의 피로시험기에 설치 후 2

Table 1 Specification and mechanical properties of grid typed CFRP reinforcement

Specimens	CR6	CR8	CR13
Fiber	High Strength Carbon Fiber		
Resin	Vinyl Ester		
Structures	Cross Laminate Structure		
Cross Section Area (mm ²)	17.5	26.4	65.0
Unit Weight (g/m ³)	540	810	2020
Tensile Force (kN)	19.44	29.38	66.66
Tensile Strength (MPa)	1110.86 (1400)	1156.53 (1400)	1025.54 (1400)
Elastic Modulus (GPa)	93.8 (100)	96.7 (100)	103 (100)

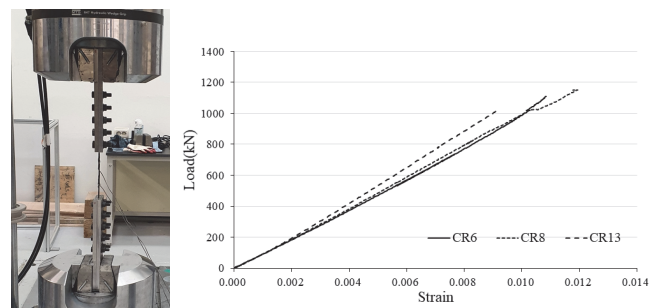


Fig. 2 Tensile test setup and test results of Grid typed CFRP reinforcement

mm/min의 속도로 변위제어방식으로 하중을 가력하였다.

Table 1에는 격자형 탄소보강재의 제원과 실험을 통해 얻어진 역학적 특성을 정리하여 나타내었으며, 인장강도와 탄성계수의 팔호안의 값은 제조사 측에서 제시하는 물성값을 의미한다. Fig. 2에는 격자형 탄소보강재의 직접인장시험 전경과 실험 결과를 도식화한 그림을 정리하여 나타내었다. 단면적을 달리하는 세가지 격자형 탄소보강재 시편의 인장시험을 진행한 결과는 인장강도와 탄성계수 모두 제조사 측에서 제시하는 값 보다 작은 값에 도달하였으며, 상대적으로 단면적이 큰 CR13 시편만 제시된 물성값 보다 큰 값에 도달하였다. 설계강도보다 낮은 이유는 격자형 탄소보강재의 격자부분에서 직교된 섬유와의 마찰등에 의해 강도가 저하된 것으로 판단된다.

2.2 콘크리트 강도

직접인발시험체에 활용된 콘크리트의 배합비는 Table 2에 나타내었으며, 압축강도와 할렬인장강도를 Table 3에 정리하여 나타내었다. 콘크리트 강도 측정 공시체는 모두 100 mm 지름에 높이 200 mm 규격을 사용하여 각각 5개씩 제작하여 3일, 7일, 28일의 강도를 측정하여 평균값으로 나타내었다.

2.3 격자형 탄소보강재 직접인발시험

직접인발시험에 사용할 실험 변수 선정을 위하여 격자형 탄소보강재의 단면적과 부착길이, 횡방향 격자길이를 선정하였다. 실험에 사용한 변수와 유한요소해석 변수를 동일하게 지정하였으며, 횡방향 격자의 영향을 고려하여 기존 ACI 440.3R-12 및 ASTM D7913/D7913M에서 제시하는 콘크리트 규격 및 부착길이를 수정할 필요가 있었으며, Fig. 3과 같이 간단하게 도식화 하여 나타내었다.

콘크리트 규격은 기존 200 mm 정육면체 콘크리트 블록에서 350 mm 정육면체 콘크리트 블록으로 제작하였으며, 격자형 탄소보강재의 횡방향 격자의 개수는 1열로 하여, 부착길이는 50 mm로 고정하였으며, 횡방향 격자가 없는 변수부터 50 mm 및 100 mm로 증가시키며 실험을 진행하였다.

실험은 Fig. 4와 같이 최대하중 300 Ton 용량의 UTM을 사용하였으며, 강철로 제작된 부착지그를 사용하여 콘크리트를 지지하고, 변위제어방식으로 2 mm/min 속도로 하중을 가력하여 진행하였다. 또한, 인발력으로 인하여 격자형 탄소보강재의 뺄힘으로 인한 슬립을 측정하기 위해 LVDT를 자유단(Free-End) 및 하중단(Load-End)에 고정시켰으며, 본 연구에서는 하중단의 슬립은 인발로 인한 격자형 탄소보강재의 변형이 포함된 결과값을 나타내므로 자유단의 슬립만을 결과값으로 나타내었다.

직접인발시험은 최대 부착강도 이후 자유단의 LVDT에서

Table 2 Mixed proportion of concrete specimens

G _{max} (mm)	W/C (%)	Slum p (mm)	S/a (%)	Unit of weight(kg/m ³)				
				C	W	S	G	AD
25	43.0	120	50.0	405	166	875	867	4.05

Table 3 Average strength of concrete for direct pull out test

Age	Average Compressive Strength (MPa)	Average Splitting Tensile Strength (MPa)
3 days	13.39	1.63
7 days	20.90	2.16
28 days	31.64	4.25

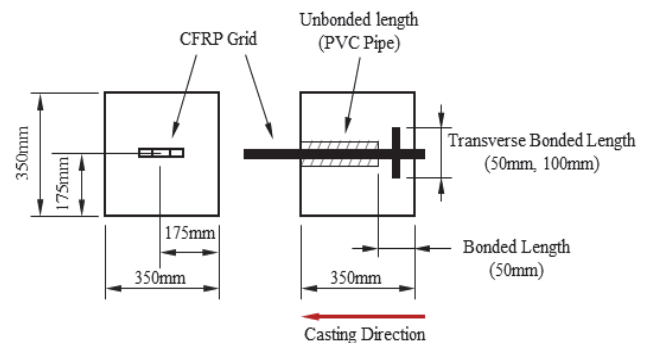


Fig. 3 Grid type CFRP reinforcement pull out test specimens

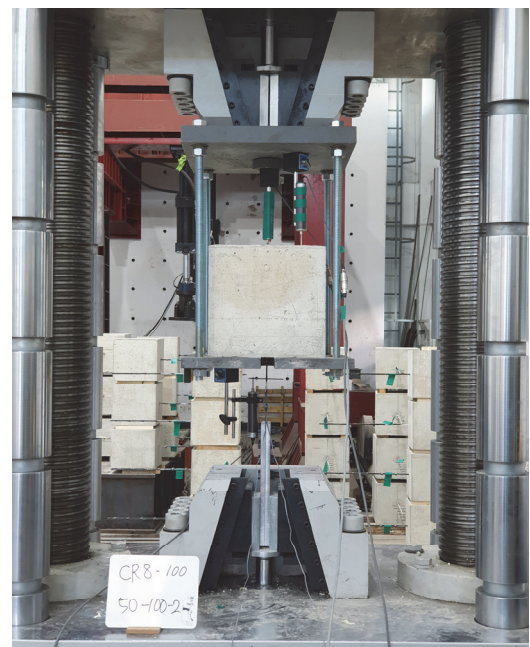


Fig. 4 Direct pull out test setup of grid type CFRP reinforcement

격자형 탄소보강재가 인발로 인해 뿔혀 슬립이 측정되지 않거나, 상부에 도출된 격자형 탄소보강재의 최대 15 mm 까지 측정을 진행하였다. 최대 부착강도 이후 파단이 발생하거나, 외부에서 육안으로 관찰할 수 있는 손상이 발생하지 않음에도 불구하고 지속적으로 하중이 줄어드는 경우 실험을 종료하였다.

Table 4에는 실험에 사용한 변수를 정리하여 나타내었으며, CRX-A-B에서 CRX는 격자형 탄소보강재 형상 번호를, A는 부착길이를, B는 횡방향 격자길이를 나타내며, 예시로 CR6-50-0 변수는 단면적 17.5 mm²를 갖는 부착길이 50 mm, 횡방향 격자길이 0 mm의 시험체를 의미한다.

기존의 Noh et al.(2022)의 실험적 연구에서 CR6과 CR8 변수 모두 종방향 부착길이가 증가할수록 부착강도가 증가하나 50 mm 이상에서는 그 차이가 크지 않았으며, 부착길이 50 mm 이상에서 보강재의 인장강도까지 부착성능을 발휘할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 최대 부착하중은 횡방향 격자의 유무와 길이에 따라 변화하나, 횡방향 부착길이가 일정 이상되면 강도 변화는 거의 없는 것으로 분석되었다. 또한 격자형 보강재의 부착과괴시 FRP 파단 변형률이 인장시험시의 파단 변형률보다 작아 FRP의 미끄러짐에 의한 뿔힘, 내부 횡방향 격자 파단으로 인하여 발생한 압축력에 의한 파괴로 판단되었다. 사용성 측면에서는 격자형 CFRP 보강재의 부착강도를 철근과 유사한 1 mm를 한계슬립으로 결정하는 것은 기존의 결과들과 비교하여 너무 보수적으로 해석한 것으로 판단되었다 (Noh et al., 2022).

Table 4 Specification and mechanical properties of grid typed CFRP reinforcement

Specimens	Cross Section Area (mm ²)	Circumference (mm)	Bond Length (mm)	Transverse Bonded Length (mm)
CR6-50-0				0
CR6-50-50	17.5	19.36	50	50
CR6-50-100				100
CR8-50-0				0
CR8-50-50	26.4	24.60	50	50
CR8-50-100				100
CR13-50-0				0
CR13-50-50	65	41.76	50	50
CR13-50-100				100

3. 격자형 탄소보강재 직접인발시험 비선형 재료 모델과 부착계면 모델링

3.1 비선형 콘크리트 재료모델

직접인발시험 모사에 사용된 콘크리트 재료 모델은 Concrete Damaged Plasticity(이하, CDP) 모델을 사용하였다. CDP 모델은 콘크리트 재료가 연속적, 등방성 및 균일한 재료이며, 콘크리트가 비탄성 거동을 취할 때 손상이 진전됨에 따라 콘크리트의 탄성계수가 손실된다는 가정을 기반으로 한다. Table 5와 Table 6에는 콘크리트 재료모델의 역학적 특성과 CDP 모델의 소성 매개변수(Plasticity Parameter)를 나타내었다. 콘크리트 재료모델의 역학적 특성은 보수적으로 해석하기 위하여 설계압축강도 30 MPa로 입력하였으며, CDP 모델의 소성 매개변수는 콘크리트의 항복면을 이용한 복잡한 수학적 유도과 가정을 기반으로 정의되며, 실제 실험을 통해 도출하기에 어려움이 있어 본 연구에서는 선행 연구자들이 제안한 값들을 사용하였다(Kmieciak and Kaminski 2011; Vilanova et al., 2016).

Table 5의 팽창각(Dilation angle)은 소성전단에 의해 발생하는 소성상태의 체적변형을 제어하는 변수로 소성항복중에 일정한 것으로 가정하며, 일반적으로 0°~40° 사이의 값으로 나타나며, 본 연구에서는 31°를 사용하였다.

편심률(Eccentricity)은 값이 증가함에 따라 구속응력이 감소하는 동안 팽창각이 더 빠르게 증가하는 특징을 나타내는 매개변수로써 0.1을 적용하였으며, 이는 콘크리트 재료에 광범위한 구속응력이 작용하는 동안 거의 동일한 팽창각도를 가지는 것을 의미한다.

일축압축응력(Uniaxial Compressive Stress)에 대한 이축압축응력(Biaxial Compressive Stress)의 비 (f_{b0}/f_{c0})는 재료의 상태를 나타내는 매개변수 중 하나로, 1.16을 적용하였다.

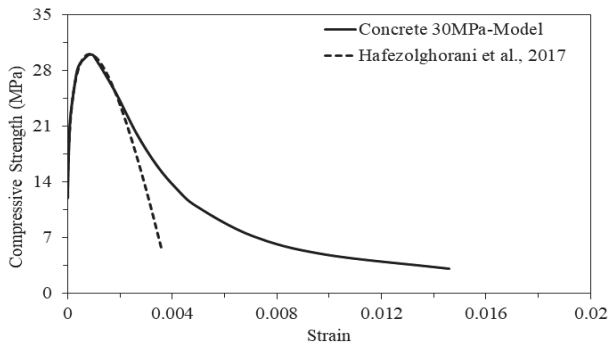
일축자오선과 인장자오선의 편차응력 2차 불변량의 비율 (K)는 항복평면의 볼록함을 결정하는 값으로, 연구에서는 일반적인 0.667을 사용하였다.

Table 5 Mechanical properties of concrete in Abaqus

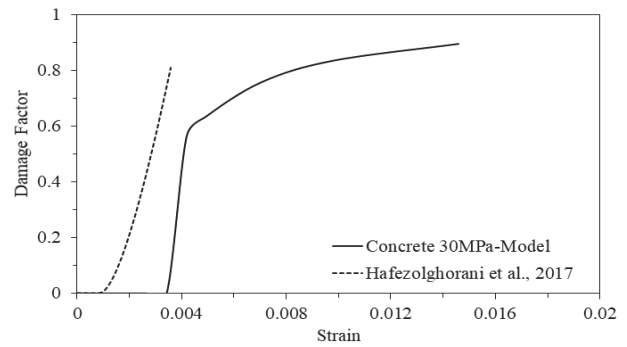
Mass Density (ton/mm ³)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
2.3E-009	26.6	0.2	30	3

Table 6 Plasticity parameter of CDP model

Dilation angle	Eccentricity	f_{b0}/f_{c0}	K	μ
31°	0.1	1.16	0.667	0



(a) Compressive strength and strain relationship



(b) Damage factor under compressive stress

Fig. 5 Simplified concrete damages model by Hafezolzghorani et al.(2017)

또한, CDP 모델에서는 인장균열과 압축파괴를 모사하는 손상(Damage)이론을 사용하며, 콘크리트의 압축 거동뿐만 아니라, 인장에 대한 응력-변형을 곡선과 탄성계수 등을 손상 진화(Damage Evolution)의 개념을 사용하여 모사하였다. Fig. 5는 Hafezolzghorani et al.(2017)에 의해 제안된 콘크리트의 압축 및 인장거동 모델의 직관적인 단순화 모델을 바탕으로 변형률의 차이를 두어 콘크리트 압축강도 30MPa의 손상모델을 구성하였다. 콘크리트 재료 모델은 3차원 연속체 솔리드 요소인 C3D8R (Continuum, 3-D, 8-Node, Reduced integration)으로 구성하였다.

3.2 격자형 탄소보강재 재료모델

격자형 탄소보강재는 직교이방성 재료이기 때문에 재료 내 방향에 따라 그 값들이 변화하는 성질을 갖는다. 이러한 성질을 나타내기 위해 식 (1)의 구성방정식으로 표현되는 Engineering Constants를 사용하여 역학적 특성을 정의하였다. 공학적 상수에서는 3개의 탄성계수와(E_{ij}), 3개의 포와송비(ν_{ij}), 3개의 전단탄성계수(G_{ij})를 활용하여 직교이방성 재료의 구성방정식을 통해 선형탄성을 나타낸다. 아래 첨자 i 와 j 는 상수 1, 2, 3으로 표현되며, 이는 각각 x, y, z 방향을 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{23} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Table 7에는 유한요소해석에 사용한 격자형 탄소보강재의 역학적 특성을 정리하여 나타내었다. FRP 보강재는 1축과 2축의 강도와 강성이 전혀 다른 직교이방성 재료이기 때문에 격자형 탄소보강재의 수치 매트릭스 내 섬유 방향성을 따로 정의하기 위하여 Fig. 6과 같이 격자의 교차되는 부분에 국부좌표계(Local Coordinate)를 지정하였다. 격자형 탄소보강

Table 7 Mechanical properties of grid typed CFRP reinforcement in engineering constants

Decription	Symbol	Unit	Vaule
Density	-	g/m ³	1.5E-005
Tensile Strength	-	MPa	1100
Elastic Modulus	E_1	GPa	110
	E_2	GPa	16
	E_3	GPa	16
Poisson's Ratio	ν_{12}	-	0.21
	ν_{13}	-	0.21
	ν_{23}	-	0.3
Shear Modulus	G_{12}	GPa	5.6
	G_{13}	GPa	5.6
	G_{23}	GPa	5.6

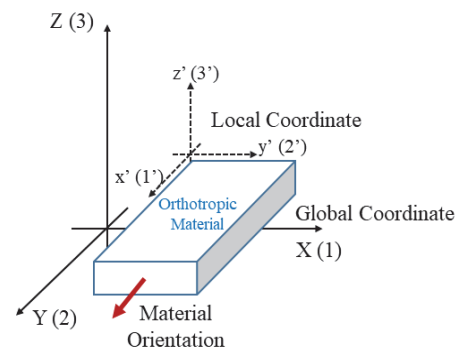


Fig. 6 Application of local coordinate system to grid typed CFRP reinforcement

재의 수치 매트릭스 내 섬유의 길이방향으로 $x'(1)$ 방향, 섬유의 수직 방향(횡방향 격자)으로 $y'(2)$ 방향, 섬유의 두께 방향으로 $z'(3)$ 방향으로 나타내었다.

격자형 탄소보강재 재료 모델도 콘크리트와 마찬가지로 3차원 솔리드 요소인 C3D8R으로 모델링하였으며, 부착구간

의 횡방향 격자와 교차하는 구간의 절점 수는 콘크리트와의 접촉조건을 고려하여 동일한 메쉬 크기를 갖도록 설정하였다. 비부착구간의 길이방향 격자 요소 역시 동일하게 증가시켜 구간별 응력 변화양상을 확인할 수 있도록 모델링하였다.

3.3 격자형 탄소보강재 직접인발시험 부착계면

격자형 탄소보강재에 변위제어 방식을 통해 하중이 가력될 경우, 콘크리트와 격자형 탄소보강재 사이의 부착계면에서 화학적 부착, 기계적 요인 및 마찰력으로 인하여 응력이 발생하게 된다. 인발력이 작용하면서 콘크리트와 격자형 탄소보강재 사이의 부착계면에 발생하는 손상과 거동을 비교적 정확하게 예측하기 위하여 격자형 탄소보강재와 콘크리트는 슬립이 허용되지 않는 완전 부착(fully bonded)이 아닌 상대적 슬립이 발생하는 두 재료가 결합된 형태로 구성하여야 한다. 따라서, 두 재료간의 표면에서 발생하는 부착거동을 정의하기 위하여 Surface to Surface 접촉 모델을 사용하였으며, 접촉 상호작용에 대하여 Cohesive Behavior 및 Damage Theory를 적용하였다.

Cohesive Behavior은 주로 두 재료가 접촉되는 부위에서 사용되며, 접착력과 강도를 설명하는데에 사용된다. Cohesive Behavior은 격자형 탄소보강재가 콘크리트로부터 분리되며 발생하는 응력과 상대 변위에 대한 상호작용을 Traction- Separation 손상 모델을 통해 나타내며, Traction은 부착응력을, Separation은 슬립으로 표현되어 부착 계면간의 상호작용을 정의할 수 있다. 또한 Damage Theory를 통해 손상의 발생지점과 손상이 진전되는 지점을 통하여 강성차이를 표현할 수 있다. Fig. 7의 일반적인 Traction-Separation 손상 모델에서 부착계면의 거동을 크게 두 개의 구간으로 구분할 수 있다. 첫 번째로, 손상 발생지점에 도달하기까지 부착응력은 지정된 인터페이스 변위의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 특징을 보인다. 두 번째는 부착응력이 최대 부착응력에 도달 이후 점차적으로 감소하고 상대적 변위가 계속 증가하며 부착응력은 0에 수렴하는 개념이다. 감소구간의 손상진화(Damage Evolution)는 선형(Linear), 지수형(Exponential), 임의 값을 통하여 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 임의 값을 적용하였다. Traction- Separation 모델

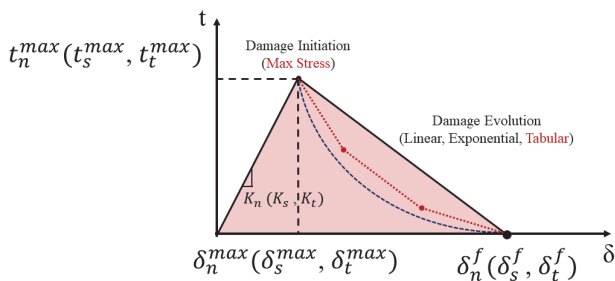


Fig. 7 Typical traction-separation model

의 첫 번째와 두 번째 단계만을 정의하였으며, 결합되지 않은 두 재료의 강성에 관한 관계식은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, K는 강성을 나타내며, 아래첨자 n, s, t로 강성의 방향성이 결정된다. 강성의 방향은 전체좌표계 (Global Coordinate)에 따라 정의하였다. Keuser et al.(1983)의 선행된 연구에 의하면, 일반적으로 FRP 보강근의 직접인발시험 모델의 경우, 강성 K는 식 (3)과 같이 평면(수평)방향의 강성 K_{ss} 와 K_{tt} 으로 나타낼 수 있으며, 수직방향의 강성 K_{nn} 을 식 (4)로 나타내었다.

$$K = K_{ss} = K_{tt} = \frac{\tau_{b, \max}}{s_{\max}} \quad (3)$$

$$K_{nn} = 100 K \quad (4)$$

여기서, $\tau_{b, \max}$ 는 최대 부착응력, s_{\max} 는 최대 부착응력일 때 슬립량을 나타내며, 본 연구에서는 기준 변수의 실험값을 기준으로 산정하여 적용하였다.

4. 실험 결과와 유한요소해석 결과 비교

4.1 직접인발시험 결과 및 분석

직접인발시험의 실험 결과로 얻어진 부착강도-슬립 곡선을 유한요소해석 결과와 비교를 통해 분석을 진행하였다. Table 8에는 직접인발시험 결과와 유한요소해석 결과를 정리하여 나타낸 것으로, 해석결과 옆에는 변수명 뒤에 A(Analysis)를 추가해 구분하여 나타내었다. 또한, 실험적 결과에서 얻어진 경향으로 보아 격자형 탄소보강재의 횡방향 격자의 전단 저항으로 인하여 부착응력의 매커니즘이 기계적 부착에 의한 지압응력으로 바뀌는 지점을 슬립 1.0mm로 판단하여 실험결과와 해석결과를 비교 하였다.

Fig. 8은 CR8 변수의 콘크리트와 보강재의 응력 contour을 나타내었다. 격자가 없는 시험체의 경우 부착구간에서 콘크리트 응력이 집중되고, 인장단층의 응력범위가 넓게 분포하고 있으며, 보강재 인장단 응력이 높은 것을 확인할 수 있다. 이에 반하여 격자가 있는 변수에서는 콘크리트 응력은 CR8-100-0과 유사하나 격자위치에서 국부집중응력이 발생하고, FRP는 횡방향 격자에서 미소한 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 FRP의 수직전단응력과 뺨힘응력의 조합에 의해

Table 8 Specification and mechanical properties of grid typed CFRP reinforcement

Specimens	Bond Strength (MPa)		Slip at Peak (mm)	Comparison(%)		
	Peak Strength	at Slip 1.0mm		P.E Peak ^a	P.E 1.0mm ^b	P.E Slip ^c
CR6-50-0	17.2	10.7	9.29	2.78	6.48	0.17
CR6-50-0-A	17.7	10.0	9.27			
CR6-50-50	20.6	11.5	6.67	9.21	7.47	0.10
CR6-50-50-A	18.7	10.7	6.66			
CR6-50-100	23.5	9.1	9.61	9.91	7.10	0.54
CR6-50-100-A	21.2	9.8	9.66			
CR8-50-0	19.0	7.9	11.25	2.02	0.92	14.16
CR8-50-0-A	19.4	8.0	9.66			
CR8-50-50	20.6	12.4	7.64	1.76	3.99	0.41
CR8-50-50-A	21.0	11.9	7.67			
CR8-50-100	20.4	9.6	6.99	4.49	7.59	3.82
CR8-50-100-A	21.3	10.3	7.25			
CR13-50-0	10.3	8.1	6.72	9.02	2.78	15.65
CR13-50-0-A	11.2	8.4	5.66			
CR13-50-50	20.6	9.0	5.48	5.40	40.23	1.19
CR13-50-50-A	19.5	12.6	5.54			
CR13-50-100	24.8	12.8	4.58	2.00	7.16	3.62
CR13-50-100-A	24.3	13.7	4.75			

^a : P.E Peak = Error of peak bond strength

^b : P.E 1.0mm = Error of bond strength at slip 1.0mm

^c : P.E Slip = Error of slip at peak bond strength

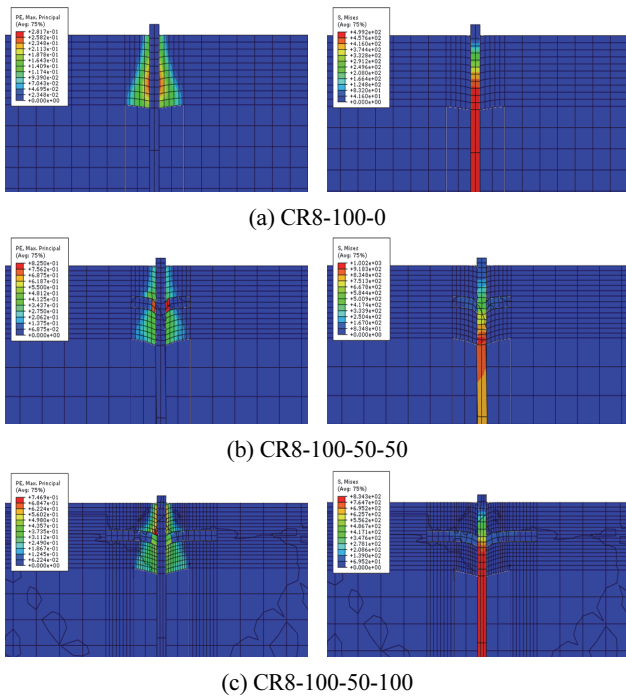
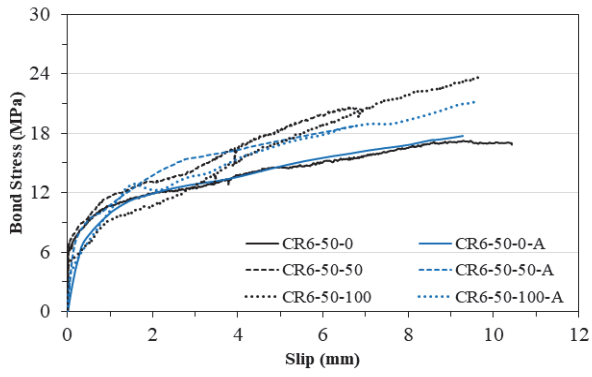


Fig. 8 Stress contour of concrete and FRP on CR8 series

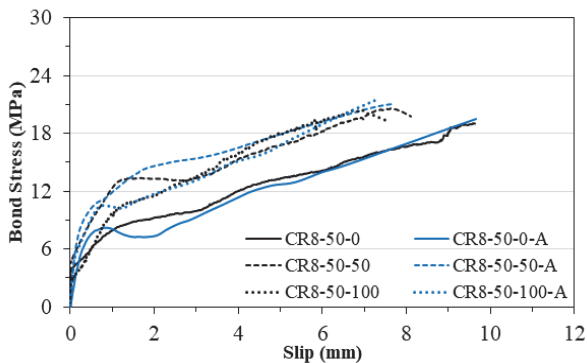
격자부위의 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 횡방향 격자길이가 증가함에 따라 콘크리트와 FRP의 응력장의 크기가 증가하고, 변형량이 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9(a)의 CR6 변수의 횡방향 부착길이 0mm 변수의 유한요소해석 결과는 실험 결과에 대하여 높은 수렴성을 보였으며, 최대 부착강도에 대한 오차는 2.78%로 나타났다. 횡방향 격자길이가 50mm 변수의 결과는 초기 화학적 부착 거동은 유사하게 묘사되었으나, 이후 인발력의 작용에 의해 기계적 부착에 의해 저항하는 구간에서는 강성의 차이가 발생하는 경향이 나타났다. 횡방향 격자길이가 100 mm 변수의 결과는 횡방향 격자의 길이가 증가함에 따라 횡방향 격자의 전단저항과 서로 다른 축의 계면정으로 인하여 수렴성이 떨어져 부착거동을 묘사하는데 어려움이 있었으나, 최대부착강도와 슬립양 1.0 mm에서의 부착강도 오차는 각각 9.91 %와 7.10 %로 나타났으며 적절하게 묘사한 것으로 판단되었다.

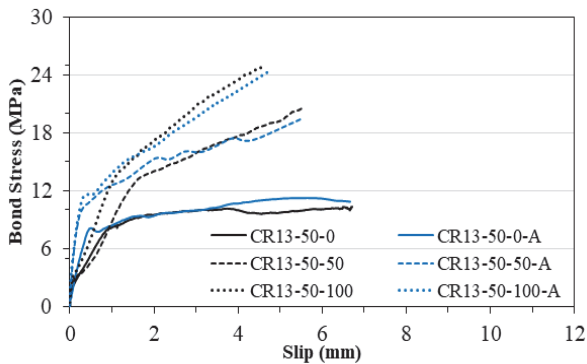
Fig. 9(b)의 CR8 변수의 횡방향 격자길이가 0 mm의 변수의 실험 결과로 최대 부착강도 19.0 kN, 유한요소해석의 최대 부착강도는 19.4 kN으로 2.02 %의 오차를 보였다. 그러나 최종 단계의 부착강도는 유사하게 묘사되었으나, 인발력으로 인한



(a) CR6



(b) CR8



(c) CR13

Fig. 9 Comparison of bond behavior with Exp. and FE analysis results

슬립 1.0 mm 발생 이후의 부착거동에서 하중이 감소하다 다시 실험 값과 유사한 강성을 보이는 경향이 나타났다. 횡방향 격자길이 50 mm의 변수에의 실험결과는 초기 하중의 증가 직후 슬립의 발생으로 인하여 뽕힘은 발생하되 하중이 증가하지 않는 하중지연 현상이 발생하였다. 그러나 유한요소해석 결과에서는 초기 부착강성 발현 이후 2차 뽕힘에서 최대 부착강도 도달까지 비선형적으로 하중 증가 현상이 나타났으며, 인발로 인하여 횡방향 격자의 파단이 발생하였다. 섬유 중심의 전체 파단이 아닌 일부 섬유 표면의 파단으로 인하여 발생하는 슬립 현상으로 보이며, 일정 뽕힘 이후 중심부의 저항으

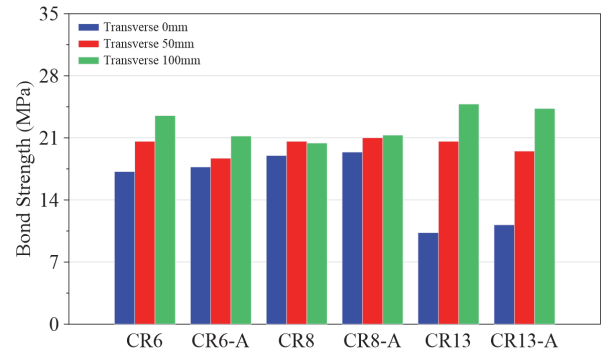


Fig. 10 Comparison of peak bond strength with Exp. and FE analysis results

로 인해 다시 하중 증가 현상을 보인 것으로 판단된다. 횡방향 격자길이 100 mm 변수에서는 유한요소해석 모델의 초기 강성이 과다하게 도출되었으나, 실험결과는 화학적 부착 이후 1차 뽕힘에서 슬립이 비교적 크게 발생하였다. 이후 2차 뽕힘에서는 기울기는 확연히 줄어들었으나 실험결과와 해석결과 모두 지속적인 하중 증가 경향을 나타내었으며, 슬립 7.6 mm 정도 도달 직후 최대 부착강도 발현 이후 뽕힘으로 파괴되었다.

Fig. 9(c)의 CR13 변수의 실험 및 해석결과는 단면적이 비교적 작은 변수에 비해 강성의 차이가 크게 발생하는 특징을 보였다. 화학적 부착구간이 끝나고 1차 뽕힘시의 기울기 또한 횡방향 격자의 유무 및 길이에 따라 확연히 차이나는 것을 보이며 다른 변수와 마찬가지로 증가 경향이 나타났다.

횡방향 격자가 없는 0 mm 변수에서는 1차 뽕힘시의 기울기 차이는 약간 발생하였으나, 슬립 1.0 mm 에서 실험에 의한 부착강도는 8.1 MPa, 해석결과에 의한 부착강도는 8.4 MPa로써 약 2.78 %의 오차를 나타내었으며, 최대 부착강도는 각각 10.3MPa, 11.2 MPa로 약 9.02%의 오차가 발생하였다. 횡방향 격자길이 50 mm와 100 mm 변수는 초기 강성의 차이가 크게 발생하였고, 횡방향 격자가 있음에도 불구하고 없는 변수와 마찬가지로 1차 뽕힘시 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 이후 2차 뽕힘에서도 지속적으로 하중이 증가하는 경향을 나타내었다. 단면적이 큰 CR13 변수의 부착거동 특성은 주로 횡방향 격자의 전단 저항이 지배적인 것으로 보이며, 해석결과에서도 초기 강성의 발현 시 횡방향 격자와 길이방향 격자가 직교하는 부분에서의 변형이 크게 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 10에는 실험과 유한요소해석에 의한 최대 부착강도를 비교하여 나타내었다. 횡방향 격자가 추가된 시편의 유한요소해석 결과로 도출된 최대부착강도가 약간 낮은 경향을 보였으나 큰 차이를 보이지 않았으며, 두 값의 백분율 오차도 크게 발생하지 않는 것으로 보아 유한요소해석을 통한 격자형 탄소보강재의 부착강도-슬립 곡선의 모사는 적절하게 이루어졌다고 판단된다.

5. 결론

실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 유한요소해석의 정확성을 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

격자형 탄소보강재와 콘크리트 사이의 결합거동은 횡방향 격자의 전단저항 요인에 의해 크게 지배되나, Cohesive Behavior과 Damage Theory를 통해 길이방향의 지압응력과 마찰거동을 모사하여 격자형 탄소보강재의 부착거동을 충분히 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 이는 지압응력과 마찰거동에 국한하여 부착거동만을 모사한 것으로 정확한 격자의 전단저항 요인을 파악하기 위해서는 별도의 실험 및 해석을 통하여 추가적으로 검증이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

실험 결과로는 기존 FRP 보강근과는 다르게 지속적인 하중 증가경향이 나타났다. 콘크리트 내부에서 횡방향 격자의 파단에 의한 소음이 확인되었음에도 불구하고 격자의 직교부분에서의 섬유 일부분이 남아 인발력에 저항하는 것으로 판단되며, 유한요소해석에서는 섬유의 일부가닥을 모사하기엔 어려움이 있어 Cohesive Behavior의 부착강성을 정의하여 나타내었다. 이는 재료의 본질적인 특성에 의한 거동으로 해석 프로그램으로 모사하기에 어려움이 있어 해석기법의 활용에 따라 약간의 오차를 보일 것으로 판단된다.

실험결과와 유한요소해석 결과의 초기강성에 대한 크기 차이가 크게 발생하였으나 적절하게 모사됨을 알 수 있었으며, 유한요소해석으로 얻은 부착거동의 예측 결과는 향후 매개변수의 분석을 통해 인발력에 대한 저항 뿐만 아니라 부재 및 구조체 단위에서도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교통과학기술진흥원의 탄소 고분자 부식ZERO 철근대체재 기술개발 연구사업(21CFRP-C163399-01)의 지원에 수행되었습니다.

References

1. American Concrete Institute. (2012), Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing and Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3 R-12). Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
2. American Concrete Institute. (2015), Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars.(ACI 440.1 R-15). Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
3. ASTM American Society of Testing Materials. D3916-16 (2016), Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-

- Fiber-Reinforced Plastic Rod. ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. ASTM American Society of Testing Materials. D7205/D7205M-06 (2016), Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. ASTM American Society of Testing Materials. D7913/D7913M-14. (2014), Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
6. Burdziński, M., and Niedostatkiewicz, M. (2022), Experimental-Numerical Analysis of the Effect of Bar Diameter on Bond in Pull-Out Test, *Buildings*, 12(9), 1392.
7. Cheon, J. H., Kim, K. M., and Shin, H. M. (2021), Analytical Approach to Evaluate the Nonlinear Behaviors of One-way Concrete Slab Reinforced with CFRP Grid Reinforcements, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(6), 218-225 (in Korean).
8. Dassault, S. (2014), ABAQUS 6.14 analysis User's Manual. Dassault Systems: Providence, RI, USA.
9. Hafezolzghorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M. S. B., and Karimzade, K. (2017), Simplified damage plasticity model for concrete, *Structural Engineering International*, 27(1), 68-78.
10. Keuser, M., Kepp, B., Mehlhorn, G., and Rostasy, F. (1983), Nonlinear static analysis of end-fittings for GFRP-prestressing rods, *Computers & Structures*, 17(5-6), 719-730.
11. Khalfallah, S. (2008), Modeling of bond for pull-out tests, *Building Research Journal*, 56, 37-48.
12. Kim, K. M., and Cheon, J. H. (2022), Flexural Behavior of One-Way Slab Reinforced with Grid-Type Carbon Fiber Reinforced Plastics of Various Geometric and Physical Properties, *Applied Sciences*, 12(23), 12491.
13. Kmiecik, P. A., and Kamiński, M. (2011), Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(3), 623-636.
14. Li, X. (2007), Finite element modeling of skewed reinforced concrete bridges and the bond-slip relationship between concrete and reinforcement (Doctoral dissertation).
15. Min, K.-J., Kim, K.-M., Song, B.-K., and Park, S.-W. (2023), Flexural Behavior of Slabs Reinforced with Grid-Type CFRP Reinforcement Manufactured Using Adhesion, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 35(2), 197-206 (in Korean).
16. Noh, C. H., Jang, N.-S., and Oh, H. (2022), An Experimental Study on Concrete Bond Behavior According to Grid Spacing of CFRP Grid Reinforcement, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 26(6), 73-81 (in Korean).
17. Vilanova, I., Torres, L., Baena, M., & Llorens, M. (2016), Numerical simulation of bond-slip interface and tension stiffening in GFRP RC tensile elements, *Composite Structures*, 153, 504-513.

Received : 03/04/2024

Revised : 04/08/2024

Accepted : 04/09/2024

요 지 : 본 연구에서는 콘크리트 보강재로 사용되는 철근의 대체재로써, 격자형 탄소보강재를 활용하기 위해 부착거동 특성을 파악하고자 하였다. 기존의 부착거동에 관한 수치해석 제안식에서는 격자형 탄소보강재의 횡방향 격자의 영향을 이해하기 어려운 실정으로, 비선형 3D 모델을 제작하여 유한요소해석을 진행하였다. 해석 수행을 위하여 비선형 재료 모델의 입력과 격자형 탄소보강재와 콘크리트 사이의 부착계면 특성을 모델링하여 실제 직접인발시험 결과와 비교를 통하여 분석을 진행하였다. 격자형 탄소보강재의 부착거동 특성은 횡방향 격자의 요인에 매우 지배적인 것으로 나타났으며, 지속적인 하중 증가 경향을 보였다.

핵심용어 : 격자형 탄소보강재, 부착거동, 직접인발시험, 유한요소해석
