

격자형 CFRP 보강재의 격자간격에 따른 콘크리트 부착거동에 대한 실험적 연구

노치훈¹, 장낙섭², 오홍섭^{3*}

An Experimental Study on Concrete Bond Behavior According to Grid Spacing of CFRP Grid Reinforcement

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

Abstract: Recently, as the service life of structures increased, the load-carrying capacity of deteriorated reinforced concrete, where corrosion of reinforcing bars occurs due to various causes, is frequently decreased. In order to address this problem, many studies on the bond characteristic of FRP (Fiber Reinforced Polymer) bars with corrosion resistance, light weight and high tensile strength have been conducted, however there are not many studies on the bond characteristic of grid-typed CFRP embedded in concrete. Therefore, in order to evaluate the bond characteristics of grid-typed CFRP and its usability as a substitute for steel rebar, a pull-out test is performed using the longitudinal bond length and transverse grid length of the grid-typed CFRP as variables. Through the pull-out test, the bond load-slip curve of the grid-typed CFRP is derived, and the bond behavior is analyzed. The total bond load equation is proposed as the sum of the bond force of the longitudinal bond length and the shear force of the grid in the transverse direction. Also, expressing the area of the bond load-slip curve as total work, the change in dissipated energy with respect to the slip is analyzed to examine the effect of the transverse grid on the bond force.

Keywords: Bond behavior, Bond length, Grid typed CFRP, Pull-out test

1. 서 론

철근과 콘크리트는 우수한 부착성능과 유사한 열팽창계수, 고정하중과 활하중에 대한 높은 저항력, 내구성, 시공성과 경제성 등의 이유로 토목 및 건축 구조물에 널리 사용되고 있다(Lee et al., 2008). 철근콘크리트 구조물의 대형화 및 고층화, 사용연한이 증가함에 따라 사용하중의 증가, 구조물의 노출 환경 및 각종 화학적 요인과 내·외부적 요인으로 인하여 철근이 부식될 수 있다(Ko, 2014).

이러한 철근의 부식 방지 및 구조물의 경량화를 위한 대체제로 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 보강근이 사용되고 있으며, 유리 섬유와 탄소섬유, 아라미드 등의 섬유와 에폭시, 비닐에스터, 폴리에스터 수지 등을 사용하여 제작된다(Cho et al., 2018). FRP 보강근의 경우 철근에 비해 매우 가볍고, 부식성이 낮으며, 높은 인장강도 등의 장점이 있다(Lee et al., 2008). 반면 FRP 보강근을 사

용한 콘크리트 구조물의 경우 철근콘크리트 구조물과 비교하여 재료의 낮은 탄성계수로 인하여 동일한 단면에서 과도한 균열과 처짐이 발생할 위험이 있다(Jang et al., 2021). 이처럼 FRP 보강근은 처짐과 균열에 취약할 수 있기 때문에 이를 예측하고 제어하기 위해 부착응력-슬립 특성에 관한 연구들이 수행되고 있다.

Belarbi et al.(2004)는 CFRP 보강근과 GFRP 보강근의 표면처리에 따른 부착성능 비교를 통하여 전혀 다른 부착 매커니즘을 도출하고 설계부착강도를 제시하여 ACI 440기준에서 제시한 강도와 일치하는 것을 증명하였다. Bischoff et al. (2004)는 FRP 보강비를 변수로 하여 콘크리트에 매립한 FRP 보강근에 대한 부착시험을 실시하였으며, 시험결과를 통해 FRP와 콘크리트의 부착에 따른 처짐 및 균열의 매커니즘을 도출하였다. Baena et al.(2009)는 CFRP 및 GFRP 보강근의 부착시험 시 콘크리트 강도에 대한 영향 및 보강근 직경과 표면처리가 부착강도에 미치는 영향에 관한 연구를 진행하고, 새로운 부착-슬립 해석 모델을 제시하였다.

Vilanova et al.(2015)는 지속하중을 받는 GFRP 보강근의 매립 깊이에 따른 부착-슬립의 단기거동과 장기거동을 분석하였다. 단기하중 하에서는 매립깊이가 짧은 시험체에서 부착응력이 더 크게 분포하는 것을 보였으며, 지속하중 하에서 부착깊이가 긴 시험체에서 부착응력의 손실이 더 적게 발생함을 나타내었다.

Wei et al.(2019)는 FRP 보강근의 부착시험 시 보강근의 종

¹정희원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 석사과정

²정희원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 박사과정

³중신희원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 교수

*Corresponding author: oh.hongseob@gnu.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2023년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

류와 형태에 의한 파괴모드와 수치해석모델과 실험결과와의 비교를 통하여 부착길이를 산정하는 식을 제안하였다.

이와 같이 FRP 보강근의 부착특성에 대한 실험 및 연구는 지속적으로 활발히 이루어지는 실정이나, 이방향 구조에 적합한 격자형 FRP를 콘크리트에 매입한 경우의 부착특성에 대한 연구사례는 국내·외에서도 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 최근에는 격자형 CFRP 보강재의 부착거동에 대한 해석적 관점과 격자형 CFRP 보강재의 부착력을 제안하는 방법 또한 연구자에 따라 다양하게 보고되고 있다.

Wang et al.(2019)은 인발시험을 통해 PCM을 분사한 콘크리트와 격자형 CFRP 보강재 사이의 응력전달에 따른 파괴 메커니즘을 조사하였으며, 파괴 메커니즘은 격자형 CFRP의 극한 인장응력과 콘크리트와 PCM사이의 부착력 및 정착능력 간의 차이를 기반으로 평가하였다. Guo et al.(2018)는 부착실험을 통해 격자형 CFRP 보강재와 콘크리트 사이의 보강 계면 접합 거동과 응력전달 메커니즘을 연구하였으며, 횡방향 부착구간의 개수와 격자형 CFRP 보강재 간격에 대한 응력전달과 균열의 범위를 평가하였다.

본 연구에서는 격자형 CFRP 보강재를 철근 대체제로 활용하고자 직접인발시험을 통해 부착특성 평가를 수행하고자 하였다. 단면적을 달리하는 격자형 CFRP 보강재를 일정 간격으로 절단하여 콘크리트에 내부 매립하여 종방향 부착길이 및 횡방향 격자길이에 따른 부착하중-슬립 곡선을 도출하고 이에 따른 부착거동을 분석하였다. 또한 부착력에 대해 횡방향 격자의 전단저항을 예측식을 실험값에 적용하여 적절성을 판단하였으며, 횡방향 정착길이 변화에 대한 파괴시의 에너지 소산량 변화를 비교, 분석하였다.

2. 부착시험 계획

2.1 재료

2.1.1 콘크리트

격자형 CFRP 보강재의 부착거동 평가를 위하여 국내 A레 미콘 회사의 설계압축강도 30 MPa인 콘크리트를 사용하였으

Table 1 Mixed proportion of concrete specimen

G _{max} (mm)	W/C (%)	Slump (mm)	S/a (%)	unit of weight(kg/m ³)				
				C	W	S	G	AD
25	43.0	120	50.0	405	466	875	867	4.05

Table 2 Average compressive strength of concrete for bond test

3day (MPa)	7day (MPa)	28day (MPa)
13.4	20.95	31.6

며, 배합표는 Table 1에 정리하였다. 콘크리트 압축강도는 KS F 2403에 따라 직경 100 mm, 높이 200 mm의 압축강도 공시체를 제작하여 3일, 7일, 28일 평균 압축강도를 측정하여 Table 2에 정리하였다. 28일 평균 압축강도는 31.6 MPa로 설계압축강도를 만족하고 있다.

2.1.2 격자형 CFRP 보강재

시험에 사용한 B사의 격자형 CFRP 보강재는 탄소섬유와 에폭시 수지를 합성한 복합재료로 탄소섬유 레이어를 적층하여 제작되었다. 적층된 격자형 CFRP 보강재의 단면적이 균질하지 않은 상태이기 때문에 평균단면적을 사용하여 분석에 활용하였다. 전체 형상과 격자형 CFRP 보강재의 제원 및 물리적 특성은 각각 Fig. 1과 Table 3과 같다. 직접인발시험에 사용할 격자형 CFRP 보강재의 마디길이는 100 mm, 종방향 부착길이는 25 mm, 50 mm, 100 mm로 설정하였으며, 횡방향 격자길이 또한 0 mm, 25 mm, 50 mm, 100 mm로 설정함으로써 총 24개 변수를 정하였다.

격자형 CFRP 보강재의 인장강도는 ASTM D3916(2016)에서 제안된 압착형 지그를 제작하여 보강재의 인장특성을 평가하였다. 격자형 CFRP 보강재의 중앙부에 변형률 게이지를 부착하고, 적정 설계인장강도 발현을 위하여 ASTM 방식 지그의 재질은 알루미늄 합금 6061-T6을 사용하였다. 압착 지그는 볼

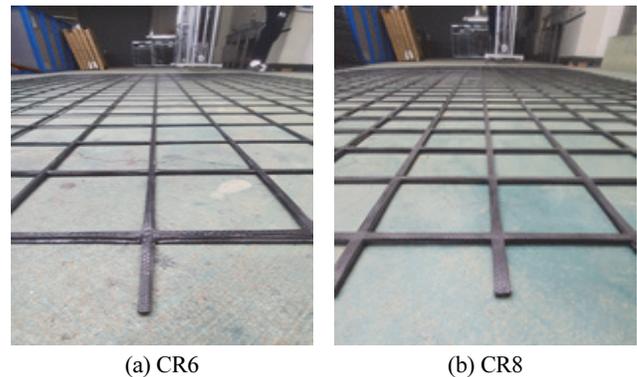


Fig. 1 Type of grid type CFRP reinforcement

Table 3 Mechanical properties of CFRP grid

Specimens	CR6	CR8
Reinforced Polymer	High Strength Carbon Polymer	
Cross section Area (mm ²)	17.5	26.4
Space Distance (mm)	100×100	
width (mm)	6.9	8.3
thickness (mm)	4.2	4.5
Tensile strength (MPa)	1121.14	1121.82
Elastic Modulus (GPa)	103.31	104.48

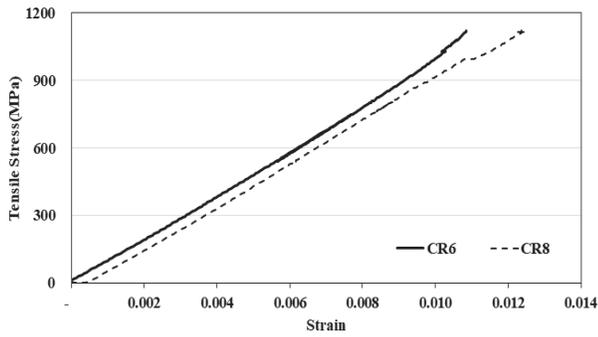


Fig. 2 Tensile stress and strain relationship of CFRP grid

트조임에 의해 고정된 뒤 300 ton 용량의 액츄레이터에 설치한 후 2 mm/min의 속도로 하중을 재하하였다. 격자형 CFRP 보강재의 인장강도는 Fig. 2에 정리하였다. 제조사의 설계인장강도인 1,400 MPa보다 낮은 1,000~1,200 MPa에서 파단되었으며, 탄성계수는 CR6 변수의 경우 103.3 GPa로, CR8 변수의 경우 104.5 GPa로 측정되었다. 또한 모든 격자형 CFRP 보강재의 시험편 중앙부에서 파단이 발생하는 것으로 나타났다.

2.2 시험체 제작

격자형 CFRP 보강재를 부착길이와 날개길이를 변수로 Table 4와 같이 24개 변수에 대하여 총 48개의 시험체를 제작하였으며, 시험체의 형상은 Fig. 3과 같다.

콘크리트 타설을 위해 알루미늄 거치대와 철판을 이용하여 거푸집을 제작하였으며, 기존의 설계기준 또는 시험기준에서 격자형 CFRP 보강재의 부착시험 기준은 규정되어 있지 않은 실정으로 ACI 440.3R-04와 ASTM D7913/D7913M-14의 FRP 보강근의 부착시험을 준용하여 시험을 진행하였다. 200 mm 정육면체의 콘크리트 블록을 사용하려 했으나 부착구간에 매립된 격자형 CFRP 보강재의 횡방향 격자길이를 고려하여 150 mm 증가시킨 350 mm 정육면체 콘크리트 블록을 사용하기로 하였다.

격자형 CFRP 보강재의 정확한 부착하중 측정을 위해 종방향 부착구간을 제외한 나머지 단면에는 콘크리트와의 부착방지를 위하여 발포 폴리에틸렌관을 사용하여 비부착 구간을 형성하였다. 격자형 CFRP 보강재는 콘크리트 블록의 정중앙에 위치하도록 고정 후 콘크리트를 타설하였으며, 28일 상온 양생 후에 탈형을 실시하였다. Table 4는 변수번호와 변수명, 시험결과를 요약하여 나타내었다.

변수명은 CRA-BB-CC로써 A는 격자형 보강재의 형상 번호, BB는 종방향 부착길이, CC는 횡방향 격자길이를 나타내며, 그 예시로 종방향 부착길이 25 mm, 횡방향 격자길이 50 mm의 경우 CR6-25-50 등과 같이 나타낸다.

Table 4 Pull-out test variables of CFRP grid

Specimens	Bond length (mm)	Transverse Bonded length (mm)
CR6-25-0	25	0
CR6-25-25		25
CR6-25-50		50
CR6-25-100		100
CR6-50-0	50	0
CR6-50-25		25
CR6-50-50		50
CR6-50-100		100
CR6-100-0	100	0
CR6-100-25		25
CR6-100-50		50
CR6-100-100		100
CR8-25-0	25	0
CR8-25-25		25
CR8-25-50		50
CR8-25-100		100
CR8-50-0	50	0
CR8-50-25		25
CR8-50-50		50
CR8-50-100		100
CR8-100-0	100	0
CR8-100-25		25
CR8-100-50		50
CR8-100-100		100

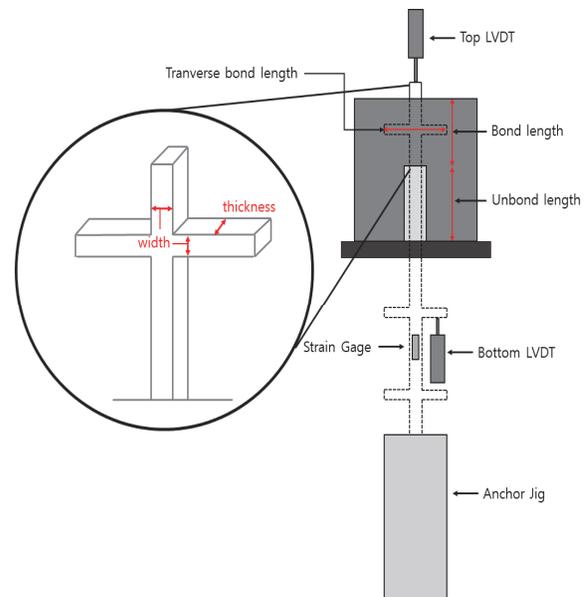


Fig. 3 Grid typed CFRP and concrete block



Fig. 4 Direct pull-out test setup of grid typed CFRP

2.3 부착시험(Pull-Out Test)

부착시험체를 Fig. 4에 나타난 것과 같이 콘크리트에 격자형 CFRP 보강재를 매립하여 직접인발시험(Pull-out test)을 진행하였다. 최대 하중 300 ton 용량의 UTM을 사용하였으며, UTM에 시험체를 설치하기 위해서 인장 시험 시에 사용한 압착형 지그를 볼트조임으로 압착시켜 고정하였다.

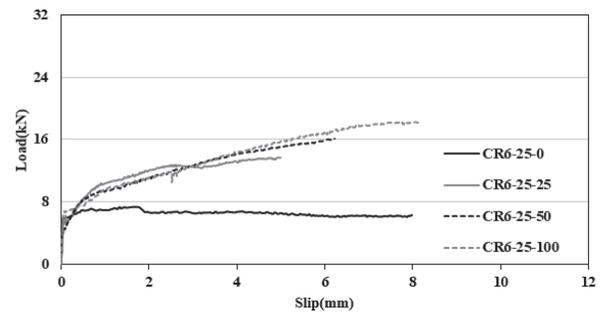
시험체의 인장 변형률을 측정하기 위하여 변형률 게이지를 격자형 CFRP 보강재의 중앙부에 부착하였다. 또한 슬립량을 측정하기 위하여 상부 격자형 CFRP 보강재의 돌출부에 LVDT와 하부의 횡방향 격자에 LVDT를 설치하여 상부와 하부의 변위를 측정하였다. 이때 하중의 속도는 2 mm/min로 변위제어방식으로 최대 부착하중이후 최대 슬립량 12 mm 구간까지 측정하였다. 또한 부착시험 전 과정을 촬영하여 영상기록을 남겨 후에 분석에 활용하였다.

3. 부착시험 결과

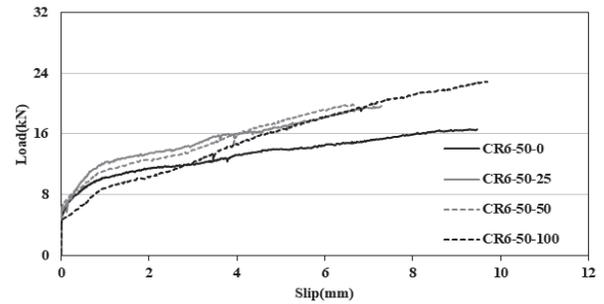
3.1 Pull-out 하중-슬립 관계

총 48개의 시험체 중 변수별로 2개의 시험체를 비교하여 실험시 계측 오류가 발생하지 않고, 부착거동인 안정적으로 나타난 실험체의 결과를 제시하였다. 실험체는 각각의 부착길이와 횡방향 격자길이를 변수로 총 24개의 시험체에 대한 부착하중-슬립 관계를 Fig. 5와 Fig. 6에 정리하였다.

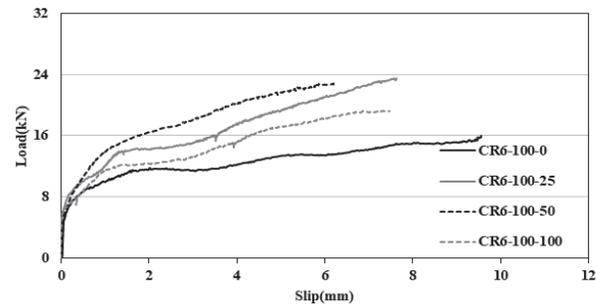
부착하중-슬립 관계를 고려하기 위하여 하부 LVDT 데이터의 경우 미끄러짐으로 인한 뽀힘 발생 시 횡방향 격자의 간



(a) CR6-25



(b) CR6-50

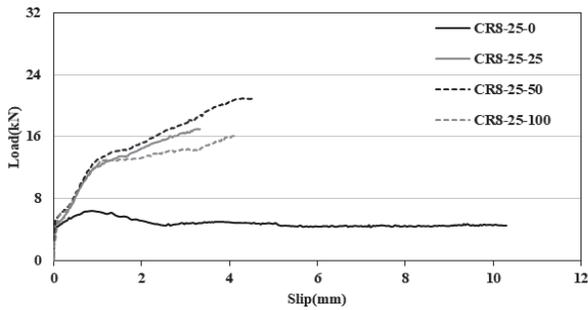


(c) CR6-100

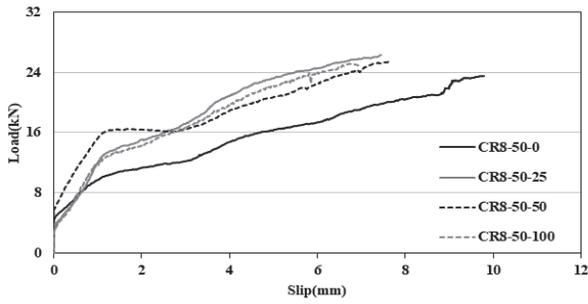
Fig. 5 CR6 bond loads and slip relationships

격 내에서 벗어나거나 손상이 발생하는 등의 오류가 발생하여 정확한 측정이 어려웠기 때문에 상부 LVDT 데이터만을 고려하였다.

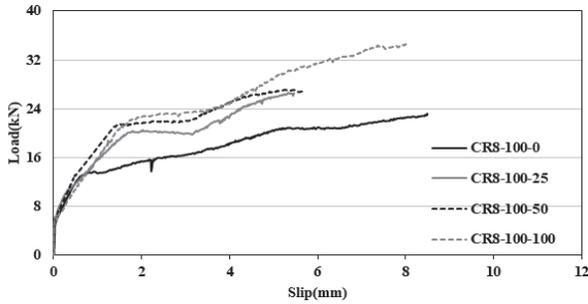
Fig. 5(a)는 CFRP 평균 단면적이 17.5 mm^2 인 CR6변수의 부착거동 특성을 나타내었다. 부착길이 25 mm 변수의 부착하중-슬립 관계이며, 횡방향 격자길이가 0 mm인 시험체(CR6-25-0)의 경우에는 약 6.5 kN의 하중에서 부착과파가 발생하기 시작하여 최종단계까지 완만하게 하중 지연 현상을 보이며, 변위가 증가함에 따라 완만하게 하중이 미소하게 감소하는 경향을 나타내었다. 횡방향 격자길이가 25 mm인 변수(CR6-25-25)의 경우는 부착과파가 진전됨에도 하중이 증가하여 최대 14 kN까지 증가한 후 하중이 완만하게 감소하는 것으로 나타나 횡방향 격자의 부착기여도가 상당히 반영되는 것으로 판단된다. 그러나 횡방향 격자 50 mm와 100 mm 시험체는 최대하중까지 완만하게 증가하였으며, CR6-25-100



(a) CR8-25



(b) CR8-50



(c) CR8-100

Fig. 6 CR8 bond loads and slip relationships

변수는 보강재가 파단되면서 최종파괴되었다. CR6-25-50과 CR6-25-100 변수의 경우, 슬립량이 0.1 mm 까지의 하중은 CR6-25-25과 거의 유사한 6.5 kN~7.0 kN 정도로 나타났으며, 횡방향 격자가 없는 시험체의 경우도 파괴시까지 하중이 완만하게 증가하는 것으로 분석되었다.

횡방향 격자길이 50mm의 경우 최대부착하중 도달시까지 하중이 지속적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 내부 횡방향 격자에서 전단 파단이 발생한 것으로 판단된다. 횡방향 격자길이 100 mm의 경우는 최대부착하중 도달 이후 하중이 급격하게 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 내부 횡방향 격자의 전단 파단으로 미끄러짐으로 인한 뽀뽀 발생으로 하단의 격자형 CFRP 보강재의 중앙부에서 압축력이 발생하였고 이로 인한 파단으로 판단된다. 횡방향 격자길이 50 mm와 100 mm 시험체의 경우 중앙부 변형률 게이지의 변형률이 인장시험 당시 파단변형률 보다 작게 측정되었으며, 이로 인해 내부

횡방향 격자의 파단으로 인하여 뽀뽀 발생하여 파단이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)는 부착길이 50 mm의 변수들의 실험결과를 나타내고 있으며, 횡방향 격자길이가 0 mm, 25 mm, 50 mm, 100 mm일 때 모두 안정적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 횡방향 격자길이 100 mm의 경우 콘크리트 외부의 보강재가 뽀뽀에 의해 발생한 압축력에 의하여 파단되었다.

Fig. 5(c)는 부착길이 100 mm 변수에 대한 나타내었으며, 모두 하중이 안정적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 횡방향 격자길이 25 mm의 경우 슬립 7.64 mm에서 최대부착하중 23.52 kN 도달 직후 보강재가 완전 파단되었다. CR6-100 시험체는 횡방향 격자의 전단강도에 의해 전체 부착강도가 증가한 것으로 판단되며, 횡방향 격자길이 길수록 전단강도 기여분이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6(a)에는 CFRP의 평균단면적이 26.4 mm^2 인 CR8 변수의 부착거동 특성을 나타내었다. 부착길이가 작고 횡방향 격자가 없는 CR8-25-0 시험체는 초기 슬립 이후 최대강도까지 완만하게 증가한 후 최대강도에 도달하고 하중이 안정적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 약 5 kN 내외의 잔류 하중을 갖는 것으로 분석되었다. 이에 반하여 횡방향 격자가 있는 변수들의 경우에는 0.1 mm 내외의 1차 슬립 이후 1 mm 내외의 슬립량이 발생할 때까지 하중이 일정하게 증가하였으며, 횡방향 격자의 길이가 증가할수록 강도가 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 CR8-25-100 변수는 내부 횡방향 격자의 전단 파단으로 인하여 콘크리트 부분파괴가 발생하여 실험이 조기 종료되었다.

Fig. 6(b)와 (c)에는 CR8의 부착길이 50 mm과 100 mm 변수의 부착하중-슬립관계를 정리하였으며, 횡방향 격자길이가 증가함에 따라 부착강도 또한 증가하는 것을 확인하였다. CR8-50-25는 최대부착하중 26.31 kN에서 콘크리트 하단 격자형 보강재 중앙부의 완전 파단이 발생하였으며, 취성적으로 파괴되었다. 부착길이 50 mm의 다른 변수들의 경우에는 최대부착하중 이후 급격하게 하중이 감소하는 것으로 나타나 콘크리트 내부에서 횡방향 격자의 전단파괴가 발생한 것으로 판단된다.

부착길이 100 mm의 변수에서도 다른 변수들과 매우 유사한 거동을 보이며 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 두 번째 하중의 변화지점에서 하중 지연 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. CR8-100-50는 하중 21 kN에서 슬립이 0.5 mm에서 1.37 mm로 급격하게 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 내부 횡방향 격자의 뽀뽀 또는 부분파단에 기인한 것으로 판단된다.

이는 CR6과 CR8 변수 모두 횡방향 격자의 부착길이가 증가할수록 부착강도가 증가하나 50 mm 이상에서는 그 차이가 크지 않은 것으로 판단되며, 횡방향 격자의 뽀뽀 또는 전단 파

파괴에 의하여 하중지연 현상이 발생하는 것으로 판단된다.

앞서 인장실험에 사용한 CR6, CR8 시험체의 인장변형률은 각각 0.0108, 0.0107으로 나타났다. 부착시험의 CR6, CR8 시험체의 파괴양상은 격자형 CFRP 보강재 중앙부의 변형률 게이지의 변형률이 인장시험에서 파단이 발생한 시점의 변형률에 미치지 못한 결과, 대부분의 보강재 중앙부의 파단은 내부 횡방향 격자의 전단파괴로 인하여 뽑힘에 의한 압축력이 발생하여 파단이 발생한 것으로 사료되며, 인장 파단은 아닌 것으로 판단된다.

3.2 격자형 CFRP 보강재의 부착강도 분석

격자형 CFRP 보강재의 변수별 부착하중을 Table 5에 정리하였다. 보강재의 1차 뽑힘은 슬립 0.1 mm에서 발생하는 것으로 분석되었으며, 하중 크기는 부착길이에 관계없이 5~7 kN 내외에 존재하는 것으로 나타났다. 최대 부착하중은 횡방향 격자의 유무와 길이에 따라 변화하였으나, 횡방향 격자길이 일정이상되면 하중의 변화는 거의 없는 것으로 분석되

었다. 따라서 격자형 격자형 CFRP 보강재의 부착하중은 Fig. 7 과 같이 종방향 부착력과 횡방향 격자의 전단력의 합으로 구분할 수 있으며, 정리하면 식 (1)과 같다.

$$P = P_b + 2V_{FRP} \quad (1)$$

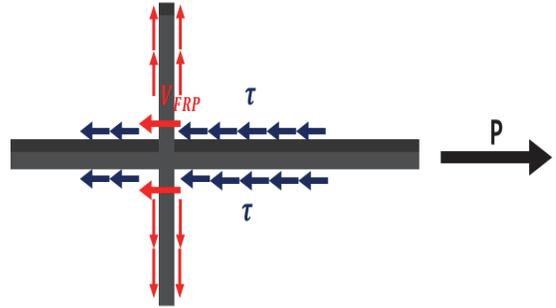


Fig. 7 Bond mechanism of grid typed CFRP reinforcement

Table 5 Test results of grid typed CFRP reinforcement on pull-out bond test

Specimens	Loads (kN)			slip at peak (mm)	Failure
	at Slip 0.1 mm	at Slip 1.0 mm	Peak loads		
CR6-25-0	6.06	7.02	7.41	1.77	
CR6-25-25	5.55	10.41	13.74	4.99	
CR6-25-50	4.68	9.30	16.11	6.22	
CR6-25-100	6.66	9.60	18.36	8.17	Grid rupture
CR6-50-0	6.6	10.29	16.68	9.48	
CR6-50-25	6.54	12.30	19.62	7.29	
CR6-50-50	7.20	11.19	19.98	6.68	
CR6-50-100	5.04	8.85	22.83	9.70	Grid rupture
CR6-100-0	5.97	10.02	16.05	9.56	
CR6-100-25	7.05	12.09	23.52	7.64	Grid rupture
CR6-100-50	6.15	13.80	22.83	6.21	
CR6-100-100	6.54	11.49	19.23	7.23	
CR8-25-0	4.56	6.45	6.51	0.89	
CR8-25-25	4.92	12.12	16.98	3.32	
CR8-25-50	5.73	13.11	20.94	4.51	
CR8-25-100	5.7	12.24	16.05	4.11	Con'c failure
CR8-50-0	5.19	9.72	23.49	9.79	
CR8-50-25	4.14	11.94	26.28	7.46	Grid rupture
CR8-50-50	6.75	15.15	25.41	7.65	
CR8-50-100	4.17	11.88	25.14	6.99	
CR8-100-0	6.39	13.44	23.25	8.51	
CR8-100-25	5.64	15.12	25.59	7.31	
CR8-100-50	7.14	21.00	27.06	5.26	slip
CR8-100-100	6.54	15.90	34.56	8.05	

여기서, P 는 총 하중(N)이고, P_b 는 보강재의 종방향 보강재의 부착력(N), V_{FRP} 는 횡방향 격자의 전단력(N)이다.

종방향 부착력은 식 (2)와 같이 정리할 수 있으며, 횡방향 격자의 전단력은 보강재의 전단강도로부터 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$P_b = \tau_b \pi d_b l_d \quad (2)$$

여기서 τ_b 는 평균부착응력(MPa), P_b 는 인장하중(N), d_b 는 FRP 격자형 보강재 직경(mm), l_d 는 FRP 격자형 보강재의 부착길이(mm)를 나타낸다.

이때 횡방향 격자에 발생하는 인발력은 인발력의 법선방향이기 때문에 현단계에서는 고려하지 않았다.

$$V_{FRP} = \tau_f A_f \quad (3)$$

식 (3)의 τ_f 는 횡방향 격자의 전단강도(N/mm²), A_f 는 격자의 평균단면적(mm²)을 적용하였다.

격자형 CFRP 보강재는 인발이 아닌 적층형태로 제작되었으며, 기존의 연구들에서 CFRP 보강재의 직접전단강도는 수

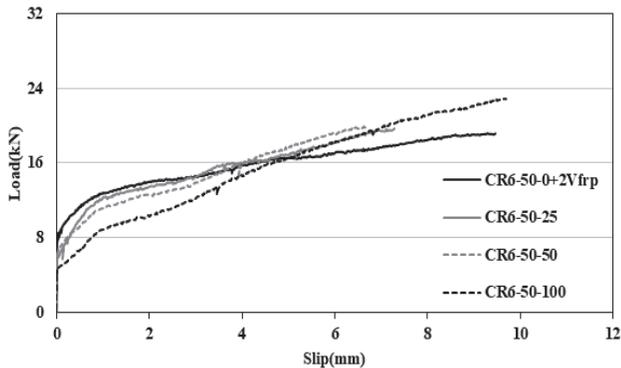
지 강도에 주로 지배되기 때문에 70 MPa~80 MPa의 범위에 있는 것으로 보고되고 있다(Kumar et al., 2017). 본 연구에서는 전단강도 기여분을 산정하기 위하여 식(3)의 전단강도를 70 MPa로 가정하고 횡방향 격자가 없는 시험체(CR6-50-0과 CR8-50-0)의 부착하중에 전단력을 추가하여 Fig. 8로 정리하였다.

종방향 부착길이 50 mm 변수에 대하여 횡방향 격자가 없는 변수들을 대표로 분석하였으며, 0.1 mm 초기 슬립 이후 최대 하중 까지 횡방향 격자가 있는 다른 변수들과 유사한 거동을 하는 것으로 예측되어 식 (1)이 적절하게 부착력을 가정하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 0.1 mm의 초기슬립까지는 횡방향 격자의 영향은 거의 없는 것으로 판단되며, 0.1 mm내외에서 발생하는 1차 뿔힘이후부터 최대부착강도 발현시 까지 횡방향 격자의 전단강도가 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

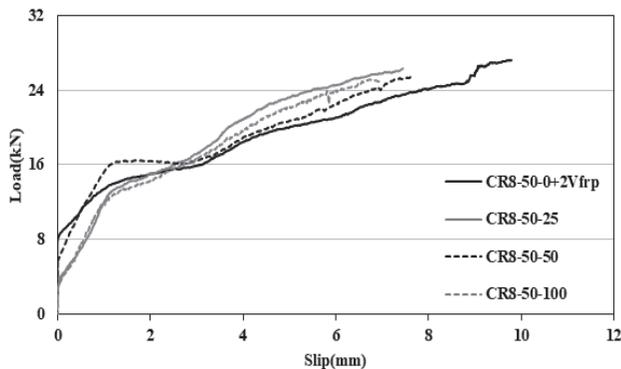
3.3 에너지 소산량

부착하중-슬립곡선의 면적은 외력에 의한 전체 일로 표현할 수 있으며, 이중 원점과 파괴시 까지의 슬립량과 하중으로 생기는 삼각형의 면적은 탄성에너지로 정의할 수 있다. 여기에서 전체 일에너지에서 탄성 에너지를 제외하면 파괴시까지의 소산에너지로 정의할 수 있다.

Fig. 9에는 각 변수별 파괴시까지의 소산 에너지를 정리하였으며, 파괴 기준을 평균적인 2차 슬립량 1.0 mm의 4배인 슬립량 4 mm일때와 시험종료 시 까지의 에너지로 구분하여 제시하였다. 슬립량 4 mm일때까지의 에너지 소산은 횡방향 격자의 조기파괴가 발생하지 않은 변수에서는 전체적으로 에너지 소산량이 증가하는 것으로 나타났으나, 조기 파괴된 변수에서는 소산량이 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 시험종료시 까지를 기준으로 분석한 경우에서도 CR6의 변수에서는 횡방향 격자의 존재 유무가 에너지 소산능력에 변화가 크지 않았으며, CR8 변수에서는 횡방향 격자길이의 증가에 따라 전체적으로 소산 에너지량이 증가하는 것으로 분석되었다.



(a) CR6-50



(b) CR8-50

Fig. 8 Modified bond loads and slip relationships

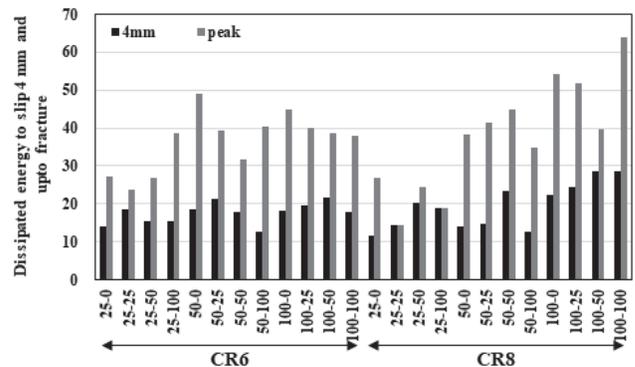


Fig. 9 Dissipated energy at slip 4mm and fracture state

4. 결론

본 연구에서는 격자형 CFRP 보강재를 철근의 대체재로 활용하기 위해 직접인발시험을 수행하였다. 격자형 보강재의 종방향 부착길이 및 횡방향 격자길이를 변수로 한 부착시험 결과를 분석하면 다음과 같다.

1. CR6과 CR8 변수 모두 종방향 부착길이가 증가 할수록 부착강도가 증가하나 50 mm 이상에서는 그 차이가 크지 않은 것으로 판단되며, 부착길이 50 mm 이상에서 보강재의 인장강도까지 부착성능을 발휘할 수 있는 것으로 분석되었다.
2. 최대 부착하중은 횡방향 격자의 유무와 길이에 따라 변화하였으나, 횡방향 부착길이가 일정 이상되면 강도의 변화는 거의 없는 것으로 분석되었다. 따라서 총 부착하중의 경우 종방향 부착길이의 부착력과 횡방향 격자의 전단력으로 구분하여 식을 제안하였다. 종방향 부착길이 50 mm의 횡방향 격자가 없는 변수에 적용하여 총 부착하중을 예측해 본 결과 횡방향 격자를 가진 변수들과 유사한 거동을 하는 것으로 확인하였다.
3. 격자형 보강재의 부착파괴양상을 분석한 결과, 부착시험 당시 파단이 발생했을때의 변형률이 인장시험 당시 인장파단이 발생한 시점의 변형률보다 작게 나타났다. 이는 격자형 보강재의 중앙부에서 발생한 파단이 단순 인장파단이 아닌 미끄러짐에 의한 뽑힘, 내부 횡방향 격자의 파단으로 인하여 발생한 압축력에 의한 파단으로 사료된다.
4. 부착하중-슬립곡선의 면적을 외력에 의한 전체 일 에너지량으로 표현하여 파괴시까지의 에너지 소산량을 산출한 결과, 횡방향 격자의 파괴가 발생하지 않은 변수에 대해 슬립량 4 mm를 기준으로 지속적으로 에너지 소산량이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 조기 파괴가 발생한 변수에 대해서는 에너지 소산량이 감소하였다. 시험 종료시 까지를 기준으로 하였을 때, CR6 변수에 대해서는 횡방향 부착길이에 대한 에너지 소산량의 변화가 적은 반면, CR8 변수에 대해서는 부착길이가 증가함에 따라 에너지 소산량의 변화가 큰 것을 확인하였다. 사용성 측면에서 격자형 CFRP 보강재의 부착강도를 철근과 유사한 1 mm를 한계슬립으로 결정하는 것은 기존의 결과들과 비교하여 너무 보수적으로 해석한 것으로 판단되며, 추가적인 연구를 통하여 기준을 제시하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

부착하중-슬립 곡선을 분석하여 격자형 CFRP 보강재의 총 부착하중을 결정하는 요인과 예측식을 통하여 결과에 접목시켜 본 결과 적절한 것으로 판단되며, 향후 철근 대체재로 사용

하기 위해 부착강도 산정식의 제안과 정착길이 산정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. American Concrete Institute. Committee 440. (2006), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1 R-06. American Concrete Institute.
2. ACI, A. (2004), 440.3 R-04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. *American Concrete Institute, Farmington Hills, USA*.
3. Rizkalla, S., and Mufti, A. (2001), *Reinforcing Concrete with Fibre Reinforced Polymers*. ISIS.
4. ASTM D3916-16. (2016), Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod. ASTM D3916-16.
5. ASTM standard D7913/D7913M. (2014), Standard test method for bond strength of fiber-reinforced polymer matrix composite bars to concrete by pullout testing.
6. Lee, Y. H., Choi, J. H., Kim, H. C., Kim, D. H., and Na, S. J. (2008), Experimental study on bond strength of CFRP rebar in concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 24(11), 53-60.
7. Ko, S.-H. (2014), Experimental study for GFRP reinforced concrete beams without stirrups, *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(2), 21-29.
8. Lee, J. Y., Yi, C. K., Kim, T. Y., Park, J. S., and Park, Y. H. (2008), Bond failure surface of glass fiber reinforced polymer bars, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(3), 383-391.
9. Jang, N. S., Kim, Y. H., and Oh, H. S. (2021). Analysis of failure behavior of FRP rebar reinforced concrete slab based on FRP reinforced ratio, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(5), 173-181.
10. Kim, T. Y., Park, J. S., Lee, J. Y., and Kim, K. H. (2005), Effect of compressive strength of concrete on the bond strength of glass fiber reinforcement plastic bars, *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structural Division*, 21(12), 69-76.
11. Belarbi, A., and Wang, H. (2004, January), Bond-slip response of FRP reinforcing bars in fiber reinforced concrete under direct pullout. In *Proceedings of ICFRC-international conference on fiber composites, high performance concretes and smart materials, Chennai, India* (pp. 409-19).
12. Bischoff, P. H., and Paixao, R. (2004), Tension stiffening and cracking of concrete reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars, *Canadian Journal of Civil Engineering*,

31(4), 579-588.

13. Wei, W., Liu, F., Xiong, Z., Lu, Z., and Li, L. (2019). Bond performance between fibre-reinforced polymer bars and concrete under pull-out tests, *Construction and Building Materials*, 227, 116803.
14. Baena, M., Torres, L., Turon, A., and Barris, C. (2009), Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test, *Composites Part B: Engineering*, 40(8), 784-797.
15. Vilanova, I., Baena, M., Torres, L., and Barris, C. (2015), Experimental study of bond-slip of GFRP bars in concrete under sustained loadsm *Composites Part B: Engineering*, 74, 42-52.
16. Wang, B., Uji, K., Wu, T., Dai, H., Yan, D., and Guo, R. (2019), Experimental investigation of stress transfer and failure mechanism between existing concrete and CFRP grid-sprayed PCM, *Construction and Building Materials*, 215, 43-58.
17. Guo, R., Pan, Y., Cai, L., and Hino, S. (2018), Bonding behavior of CFRP grid-concrete with PCM shotcrete. *Engineering Structures*, 168, 333-345.
18. Jung, K. S., Park, K. T., You, Y. J., Kim B. C., and Park, J. S. (2018), Comparisons of bond characteristics between FRP hybrid bars and deformed steel bars. *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 9(2), 37-42.
19. Kumar, K. V., Safiulla, M., and Ahmed, A. K., Experimental Characterization of ILSS of CFRP Laminates.

Received : 09/29/2022

Revised : 10/31/2022

Accepted : 11/09/2022

요 지 : 최근 구조물의 사용연한이 증가함에 따라 다양한 요인에 의해 철근이 부식되어 구조물의 내하력이 감소하는 문제들이 발생하고 있다. 이를 해결하기 위하여 내식성, 경량성, 고인장강도를 갖는 FRP 보강근의 부착특성에 대한 연구가 활발히 진행중이나, 콘크리트에 매립된 격자형 CFRP 보강재의 부착특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 격자형 CFRP 보강재를 철근의 대체재로 사용하고 사용성 측면에서 부착특성을 평가하기 위해, 격자형 CFRP 보강재의 종방향 부착길이와 횡방향 격자길이를 변수로 하여 직접인발시험을 수행하였다. 이를 통해 격자형 CFRP 보강재의 부착하중-슬립 곡선을 도출하였으며, 부착거동을 분석하였다. 총 부착하중 식은 종방향 부착길이의 부착력과 횡방향 격자의 전단력의 합으로 제안하였으며, 부착하중-슬립곡선의 면적을 전체 일로 표현하여 슬립량에 대한 에너지 소산량의 변화를 분석하여 횡방향 격자가 부착력에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

핵심용어 : 격자형 CFRP 보강재, 부착거동, 부착길이, 뽐힘시험
