

콘크리트 휨부재 보강용 FRP의 부착성능 평가를 위한 실험방법 연구 Experimental Method for Evaluating Debonding Strength of FRPs Used for Retrofitting Concrete Structures

우투이 나디아 Utui, Nadia* · 김희선 Kim, Hee-Sun**†

(Received July 30, 2011 ; Revised September 6, 2011 ; Accepted September 18, 2011)

ABSTRACT

This study proposes a experimental method to evaluate bonding strength of FRPs used for retrofitting concrete structures. Specimens are designed so that debonding failure of FRPs can be induced from reinforced concrete beams retrofitted with two layers of carbon and glass FRPs. And three-point loading tests are performed to see if debonding failure with proper debonding strength is observed from the specimens. The test results show that the tested beams are failed due to debonding of FRPs, therefore, the proposed test method is capable of evaluating debonding strength of FRPs using relatively small normal strength concrete beams.

요 지

본 연구에서는 한국산업표준에서 제시하는 콘크리트 강도 시험용 공시체를 이용하여 콘크리트 보강용 FRP의 부착성능을 평가하기 위한 실험방법을 제안하고 이에 따라 FRP의 부착성능을 평가해 보도록 한다. 따라서 탄소섬유와 유리섬유로 이루어진 FRP를 두 겹으로 보강하여 양생한 철근 콘크리트 보에서 보강재의 탈락이 유도될 수 있도록 실험체를 설계하고, 3점 재하 시 적절한 파괴형상 및 부착강도가 나타나는 지를 실험을 통해 관찰하였다. 실험결과, 보강재의 탈락으로 인한 파괴가 유도되었으므로, 본 연구에서 제안된 실험방법을 통하여 크기가 작은 일반강도 콘크리트 실험체에서 FRP의 부착강도를 평가할 수 있는 것으로 사료된다.

Key Words: hybrid FRP, debonding test, FRP retrofitting, debonding strength

1. 서 론

FRP 보강은 형상이 자유롭고 고강도라는 점에서 기존 구조물에 적용하였을 때 기대되는 보강효과가 크다는 장점이 있으나 보강효과가 충분히 발휘되기 전에 보강재가 탈락하는 문제점이 있어 정확한 보강성능을 설계하고 파괴시점을 예측하기에 어려움이 있다. FRP로 보강된 부재의 구조 거동을 예측하기 위한 해석연구가 여러 방면으로 수행, 발표되어 왔으며, (최진우 등, 2010, 한택희 등, 2010), 특히 FRP의 부착강도를 예측하기 위한 다양한 해석기법은 그 원리에 따라 크게 전단성능 모델 (shear capacity based model), 콘크리트 치아 모델 (concrete tooth model), 계면응력 모델(interfacial stress based model)로 나눌 수 있다.(Smith and Teng, 2002). 특히 Teng and Yao (Teng and Yao, 2005)가 제안하는 해석모델은 FRP 보강재의 종류와 크기를 고려하여 부착강도를 예측할 수 있다는 장점이 있어 하이브리드 FRP로 보강된 철근 콘크리트 보에 적용된 바 있다. (우투이 등, 2011) 실험을 통하여 FRP로 보강된

철근 콘크리트 휨부재의 거동을 연구한 결과는 Shin and Lee (Shin and Lee, 2003), Wenwei and Guo (Wenwei and Guo, 2006) 등에서 찾아볼 수 있는데, full scale의 철근 콘크리트 보를 대상으로 하는 실험에서는 보강재 탈락 이외에도 콘크리트 압축파괴, 콘크리트 피복탈락 또는 보강재의 파괴 등 다양한 파괴현상이 관찰되어 보강재의 탈락 현상만을 유도하여 부착성능을 평가하기에는 어려움이 있었다. 따라서 보강재의 탈락을 유도, 부착강도를 측정하기 위하여 Ali-Ahmad et al. (Ali-Ahmad et al., 2006)은 콘크리트 구조물을 고정시킨 상태에서 구조물 밑면에 부착한 탄소섬유를 잡아당기는 형태의 실험을 수행하여 부착강도를 측정한다. 그러나 이러한 실험에서는 콘크리트 부재에서 편심 및 보강재 단부의 slip 현상이 발생한다는 단점이 있어, 이를 방지하기 위한 고정단을 설계해야 하는 어려움이 있다. 따라서 이러한 어려움을 해결하고 보다 간단한 시험방법을 제안하고자 Gartner et al. (Gartner et al. 2011)은 중앙에 노치 (notch)가 있는 콘크리트 보를 다양한 크기로 제작하고, 탄소섬유를 이

* 학생회원. 이화여자대학교 건축공학과 석사과정

**† 정회원. 이화여자대학교 건축공학과 교수, 교신저자(hskim3@ewha.ac.kr)

용하여 휨보강한 후 3점 재하 실험을 수행하는 방법을 제안하였다. 그러나 실험체 크기, 콘크리트 강도, 철근 보강의 유무, 보강 정도에 따라 보강재 탈락, 단부 전단파괴, 피복 탈락 등 다양한 파괴모드가 일어날 수 있어 실험계획 시 이에 대한 고려가 필요한 것으로 발표하였다.

따라서 본 연구에서는 한국산업표준이 제시하는 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법(KS F 2403)을 기본으로 하되 콘크리트 보 단부의 전단파괴 및 휨 균열을 방지하기 위하여 보 중앙에 노치(notch)와 철근 배근을 계획하고, 콘크리트 휨강도 시험방법 (KS F 2408)에 따라 3점 재하 시험을 수행하여 콘크리트 보 강용 FRP의 부착강도를 측정할 수 있는 시험방법을 제안하고, 실험변수별 적용성 및 부착성능을 평가하고자 한다.

2. FRP의 부착성능 평가를 위한 실험방법 제안 및 실험결과 분석

2.1 실험 계획

본 연구에서는 콘크리트에 부착된 FRP의 부착강도를 파악하기 위하여 일반강도 콘크리트 보에 FRP를 두 겹으로 부착하여 보강한 후, 가력실험을 수행하였다. 실험 변수는 Table 1과 같이 섬유 종류와 부착 순서이며, 각 변수별로 세 개의 실험체를 제작하여 가력 실험을 수행하였다. 탄소섬유와 유리섬유를 번갈아 부착하는 하이브리드 FRP 보강의 경우에는 부착 순서에 따라 보강성능에 차이가 있다는 기존 연구결과에 근거하여, FRP 종류에 따른 부착성능을 연구해 보고자 하였다(우투이 나디아, 김희선 2011).

보 실험체는 일반강도 콘크리트를 이용하여 제작하였으며, 28일 양생 후 보 밑면에 FRP를 부착하여 다시 일주일간 상온에서 양생하여 실험하였다. 일반강도 콘크리트의 배합비는 Table 2에 나타난 바와 같으며, 압축시험기로 측정한 콘크리트의 28일 압축강도는 25MPa이다. 콘크리트 보강에 사용된 FRP 보강판의 인장강도 및 탄성계수를 측정하기 위해 변수별로 폭 25mm, 길이 300mm 크기의 FRP 실험체를 제작하고 인장실험을 수행하여 Table 3과 같이 탄성계수 및 인장강도를 측정하였다.

Table 1 실험 변수 및 실험체 명

실험체 명	보강 상세
Control	보강 안함.
CC	탄소섬유 두 겹 보강
CG	탄소섬유-유리섬유 보강
GC	유리섬유-탄소섬유 보강
GG	유리섬유 두 겹 보강

Table 2 콘크리트 배합설계

28일 압축강도	W/C (%)	s/a (%)	Weight per unit volume (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AD
25MPa	43.1	46.9	169	392	825	952	1.9

Table 3 FRP 보강판 실험결과

	CC	CG	GC	GG
탄성계수 (GPa)	0.9	0.5	0.4	0.3
인장강도 (GPa)	10.3	5.1	5.2	3.1

실험체는 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법 (KS F 2403)을 참고하여 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 단면 150mm×150mm에 길이 550mm로 제작하였으며, 하중 재하 시 휨모멘트로 인한 콘크리트 휨균열을 방지하고 계면응력을 작게 하여 탈락강도를 최대화하기 위하여 보 길이 중앙을 폭 5mm의 콘크리트 톱으로 절단하였다(Gartner et al. 2011) 절단한 깊이는 전체 보 깊이의 1/2로 하였다. 본 실험에서는 실험체 제작을 경제적이고 용이하게 하기 위하여 크기가 작은 휨시험용 실험체를 제작하였으나 스패의 길이가 짧아질수록 보강재의 탈락이 일어나기 이전에 콘크리트 보의 전단 파괴가 일어나는 현상이 관찰되었다는 연구보고가 있으므로(Gartner et al. 2011), 이를 방지하기 위하여 이형 철근 D10을 이용하여 보강하였으며 피복은 20mm를 유지하도록 하였다.

FRP 보강에 앞서 보의 밑면은 그라인더를 사용하여 평평하게 하였다. 보의 절단이나 그라인더 작업 모두 양생 28일 이후에 수행하여 절단 및 그라인더 작업 중 균열이 발생하는 것을 방지하였다. FRP 부착은 권장하는 시공방법에 따라 그라인더로 부착면을 고르게 하고, 프라이머를 도포하여 건조한 후, 에폭시를 도포하여 FRP를 부착하였다. 부착된 FRP의 크기는 폭 130mm, 길이 300mm이다. FRP 부착 시에는 공기가 들어가지 않도록 완전 밀착하였으며, 단부의 탈락을 방지하기 위하여 에폭시를 단부에 충분히 도포하여 함침하였다. 사용된 에폭시는 경화제와 주제를 2:3의 무게 비율로 혼합하여 제작하였다. Fig. 3과 같이 FRP를 부착한 후, 8일간 상온에서 양생하였고, 양생이 끝난 실험체에 대해서는 한국산업표준이 제시하는 콘크리트 휨강도 시험방법 (KS F 2408)에 따라 Fig. 2, 4와 같이 3점 재하 실험을 수행하였다. 하중 재하 시 재하속도는 모든 실험체에 대해 0.25mm/min으로 일정하게 유지하였다. 보의 밑면에 부착된 LVDT를 통해서 보의 처짐을 측정하고, FRP에 부착된 스트레인 게이지를 통해 FRP의 변형률을 측정하였으며 콘크리트의 압괴여부를 파악하기 위하여 보의 압축 측에 간격 20mm로 콘크리트 게이지를 부착하였다.

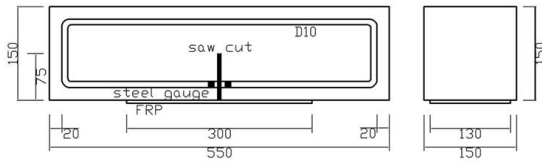


Fig. 1 실험체 상세

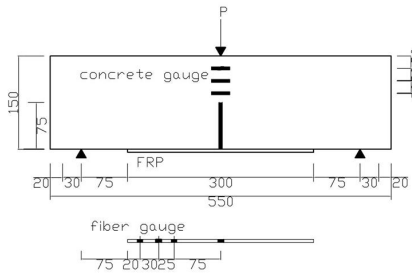


Fig. 2 게이지 위치 및 하중재하 실험 계획

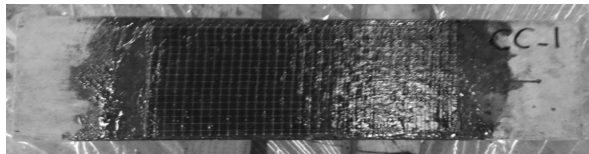


Fig. 3 FRP로 보강된 실험체



Fig. 4 실험체 배치

2.2 실험 결과

FRP를 부착하여 실험을 수행한 결과, FRP를 부착한 실험체 12개 중 전단파괴가 일어난 단 한 개의 실험체를 제외하고는 보강섬유의 종류에 관계없이 FRP보강재의 탈락으로 인한 파괴가 발생하여, 본 연구에서 제안하는 실험방법을 통해 보강재의 탈락이 잘 유도되는 것으로 나타났다.

보강재의 탈락이 일어난 시점에서 콘크리트의 압괴나 철근의 항복 등은 관찰되지 않았으며, 보 하부가 절단되었으므로 절단된 부분을 제외하고는 휨에 의한 균열도 발생하지 않았다. FRP의 탈락은 Fig. 5, 6의 사진에서 나타나는 바와 같이 FRP 끝단으로부터 발생하였으며, 보강재의 탈락 시 콘크리트 피복은 떨어져 나

가지 않고 에폭시와 함께 FRP만 탈락된 것이 확인되었다. 또한 FRP의 탈락과 동시에 콘크리트 보의 절단된 부분으로부터 균열이 발생하면서 더 이상 하중을 받지 못하고 보가 파괴되었다.

그러나 탄소섬유를 두 겹으로 보강한 CC 실험체 세 개 중 한 개에서는 보강재 끝단에서부터 가력점에 이르는 큰 균열이 발생하면서 실험체가 파괴되는 전단파괴 현상이 나타났다. 크기가 작은 휨 실험체를 사용하여 FRP의 부착성능을 평가하는 실험방법에서 전단파괴가 일어나는 현상은 기존 문헌(Gartner et al. 2011)에서도 발표된 바 있으며, 이러한 현상은 고강도 콘크리트 보다는 일반강도에서 잘 나타나며, 보강 겹 수가 많아질수록 쉽게 나타나는 것으로 알려져 있어 추후 전단파괴를 방지할 수 있는 실험 연구 방법이 보완되어야 할 것으로 사료된다.

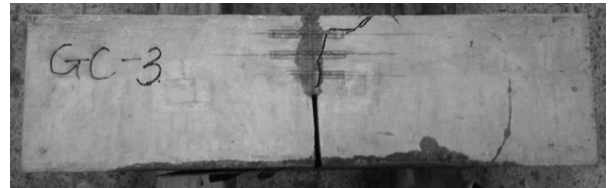


Fig. 5 FRP 탈락으로 인한 파괴양상

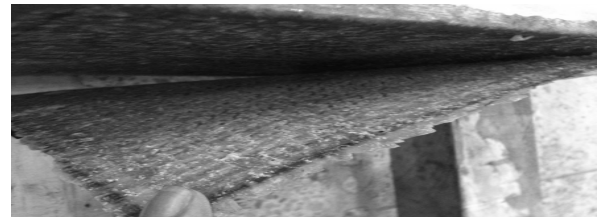


Fig. 6 FRP 탈락 양상

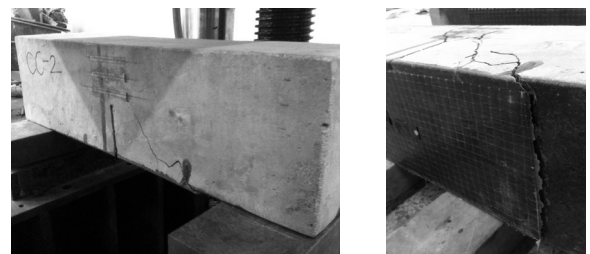


Fig. 7 전단파괴 양상

2.3 분석 및 고찰

이 절에서는 하중재하 실험을 통해 측정된 보의 처짐과 하중 관계를 살펴보고, 보강판에 부착된 게이지에서 측정된 보강판의 변형률 데이터를 이용하여 탈락시 보강판에 가해지는 응력을 분석하여 변수별로 나타나는 보강성능을 비교해 보도록 하였다.

먼저, 보의 밑면에 설치된 LVDT를 이용하여 측정된 처짐과 하중의 관계를 변수별로 나타내면 Fig. 8과 같

다. FRP로 보강되지 않은 보는 최대하중 19.6kN에 도달한 이후 소성구간이 계속되면서 처짐이 약 10.5mm가 되었을 때 파괴되었다. 반면에 FRP 두 겹으로 보강한 보에서는 하중-처짐 곡선의 기울기가 급격히 증가하여 최대 하중은 약 25-35kN까지 도달하나 최대처짐은 보강하지 않은 보에 비하여 약 10%정도 밖에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 실험체 변수별로 살펴보면, 탄소섬유 두 겹으로 보강한 CC 실험체의 최대하중이 34.1kN으로 가장 크게 나타나 부착성능이 우수한 것으로 나타났으며, 이에 비해 유리섬유 두 겹으로 보강한 GG 실험체의 최대하중이 24.0kN으로 가장 낮게 나타났다. 유리섬유와 탄소섬유의 부착 순서를 다르게 한 CG 실험체와 GC 실험체를 비교하면, 탄소섬유가 먼저 부착된 CG 실험체의 최대하중이 GC 실험체보다 높게 나타나, 탄소섬유가 먼저 보에 부착될수록 부착 강도는 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

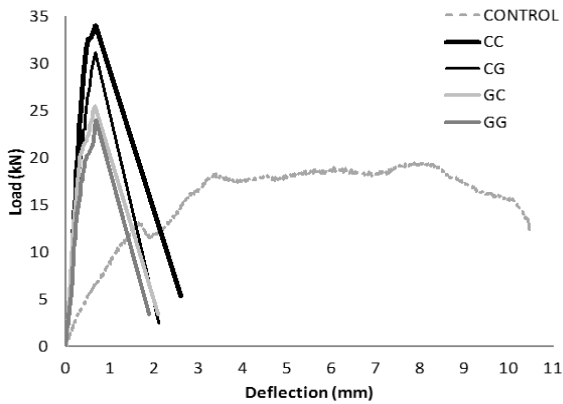


Fig. 8 하중-처짐 곡선

가력실험에서 측정된 변형률과 하중의 관계는 Fig. 9-12에 나타난 바와 같다. 일반적으로 보강재 길이 중앙의 변형률이 가장 크고, 보강재 끝단의 변형률이 가장 작게 나타났다. 실험변수 별로 살펴보면, 최대하중이 가장 크게 나타난 CC 실험체에서의 최대 변형률이 보강재 중앙에서 0.004로 가장 크며, 보 끝단으로 갈수록 변형률이 줄어드는 현상을 나타냈다. CG 실험체와 GC 실험체의 최대 변형률 역시 보강재 중앙에서 탈락과 함께 발생하였으며 각각 0.0024와 0.0015로 측정되었다. 그러나 Fig. 12에서 보이는 바와 같이, GG 실험체에서는 보강재 중앙에서 변형률이 0.0009에 도달한 후, 보 중앙과 보 중앙에서 75mm 떨어진 위치에서의 변형률은 더 이상 증가하지 않는 현상이 나타났다. 반면에 보 중앙에서 멀리 떨어질수록 하중에 따라 변형률은 계속 증가하여, 보 중앙에서 100mm 떨어진 위치에서 측정된 변형률이 탈락시 최대 변형률로 측정되었다. 이는 보강재 중앙에서 일찍 탈락이 발생하고, 그 이후에도 부분적으로 부착되어 있는 보강재가 계속해서 하중을 받고 있기 때문인 것으로 유추할 수 있다.

따라서 보의 파괴 시 최대변형률은 보 중앙에서 100mm 떨어진 F2 위치에서 0.0013인 것으로 측정되었으며, 일반적으로 사용되는 유리섬유와 탄소섬유의 최대 연신율이 각각 0.003와 0.0012인 것과 비교(Bank, 2006)하여 본 실험에서 측정된 변형률과 유사한 범위 내에 있는 것을 확인할 수 있다.

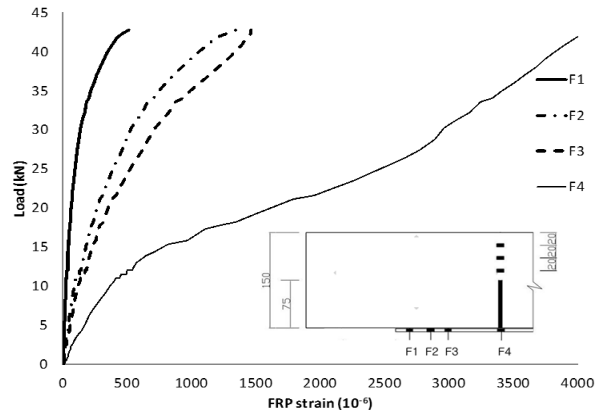


Fig. 9 CC 실험체의 하중-FRP 변형률 곡선

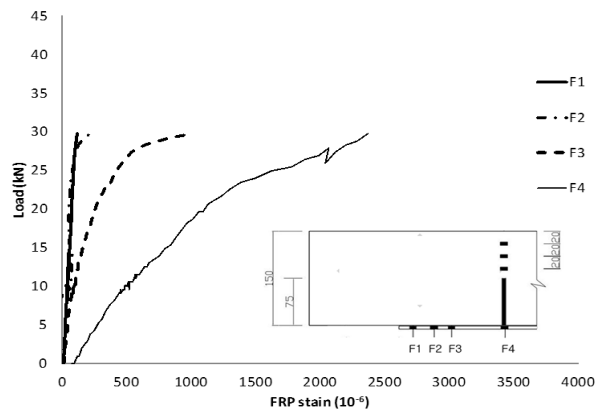


Fig. 10 CG 실험체의 하중-FRP 변형률 곡선

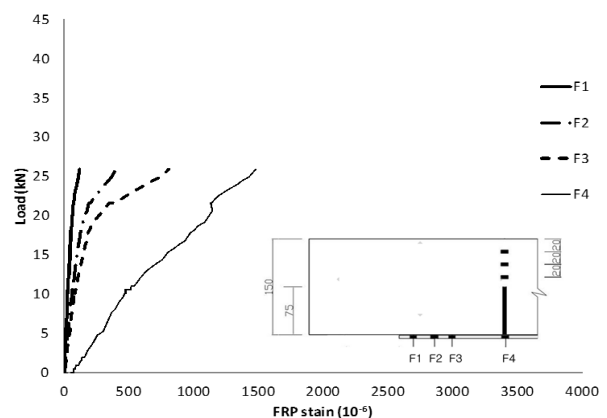


Fig. 11 GC 실험체의 하중-FRP 변형률 곡선

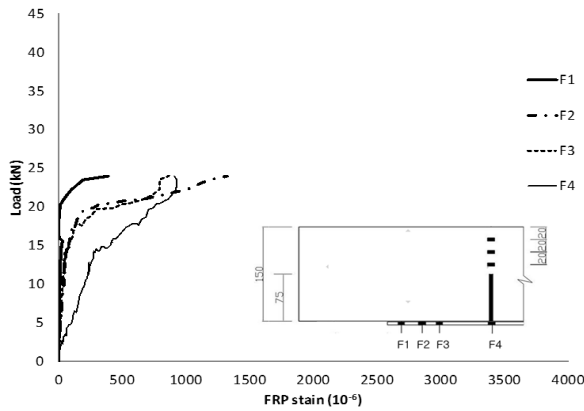


Fig. 12 GG 실험체의 하중-FRP 변형률 곡선

Fig. 13은 보강재 중앙의 변형률을 실험체 별로 비교하여 나타낸 것으로, 최대변형률은 CC-CG-GC-GG의 순서로 나타났다. 하중-변형률 곡선의 기울기를 살펴보면 GG 실험체 곡선의 기울기가 가장 높고 CC 실험체 곡선의 기울기가 가장 낮으며 CG와 GC의 기울기의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 따라서 유리섬유 두 겹으로 보강된 경우, 보강재의 부착성능이 가장 떨어지는 것으로 나타났으며, 특히 유리섬유가 콘크리트 보에 먼저 부착되어 있을수록 그 부착성능은 더 떨어지는 것으로 판단할 수 있다.

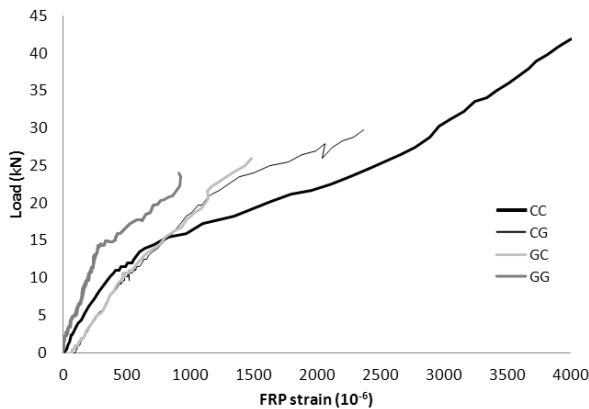


Fig. 13 실험체별 하중-FRP 변형률 곡선 비교

3. 결론

본 연구에서는 FRP로 보강한 철근 콘크리트 보에서 부착강도를 측정하기 위한 실험방법을 제시하고 이에 따른 부착성능을 보강재 종류 및 보강재에 따라 평가해 보았다. 실험을 위하여 한국산업표준에서 제시하는 단면 150×150mm에 길이 550mm의 휨 시험용 공시체에 피복 20mm로 이형 철근인 D10 주철근을 배근하고, FRP로 두 겹 보강한 후, 3점 재하 실험을 수행하였다.

실험 결과, 12개의 실험체 중 전단파괴 양상을 나타

낸 한 개의 실험체를 제외하고 모두 보강재의 끝단으로부터 탈락이 일어나면서 보의 파괴가 일어나는 것이 관찰되었다. 따라서 본 실험방법은 FRP 두 겹으로 보강된 일반강도 콘크리트 보에서 보강재의 부착성능을 평가하기에 적절한 방법인 것으로 사료된다. 또한 제안된 실험방법을 통하여 보강재의 종류와 부착순서를 다르게 한 실험체의 부착성능을 비교한 결과, 유리섬유 두 겹으로 보강된 경우 부착성능이 가장 떨어지는 것으로 나타났으며, 유리섬유와 탄소섬유 각각 한 겹씩 총 두 겹으로 보강된 실험체에서도 유리섬유가 콘크리트 보 밀면에 먼저 부착되어 있는 실험체에서 부착성능이 낮게 나타나는 것을 관찰하였다.

따라서 본 연구에서 제안하는 실험방법을 통해 콘크리트에 보강된 보강재의 부착성능을 측정할 수 있으며, 보강재 종류 뿐 아니라 보강재 부착 순서에 따라 서로 부착성능에 차이가 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음.(NRF-2011-0008824)

참고 문헌

1. 우투이 나디아, 김희선 (2011), 하이브리드 FRP로 보강된 콘크리트 보의 거동 예측을 위한 해석연구, 한국복합신소재구조학회 논문집, 제 2권, 제 2호, pp. 1-6.
2. 최진우, 주형중, 남정훈, 윤순중 (2010) FRP-콘크리트 합성말뚝의 개발, 한국복합신소재구조학회 논문집, 제 1권, 제 2호, pp. 20-28.
3. 한택희, 김효산, 장영두, 박윤호, 강영중 (2010), 지중매설 GFRP 관로 및 플랜지의 거동 분석, 한국복합신소재구조학회 논문집, 제 1권, 제 1호, pp. 27-33.
4. Ali-Ahmad, M., Subramaniam, K., Ghosn, M., (2006), *Experimental investigation and fracture analysis of debonding between concrete and FRP sheets*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 132(9), pp. 914-923.
5. Bank, L.C., (2006), *Composites for Construction*, Wiley & Sons, New Jersey, pp. 42, 44, 51.
6. Gartner, A., Douglas, E.P., Dolan, C.W., Hamilton, H.R., (2011), *Small beam bond test method for CFRP composites applied to concrete*, Journal of Composites for Construction, Vol.15(1), pp. 52-61.
7. Qu, Z., Lu, X.Z., Ye, L.P, (2005), *Eixe effect of shear contribution of externally bonded FRP U-jackets for RC beams*, Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures, International Institute for FRP in Construction, pp. 363-372.
8. Shin, Y.S., Lee, C.D, (2003) *Flexural behavior of*

- reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load*, ACI Structural Journal, Vol. 100(2), pp. 231-239.
9. Smith, S.T., Teng, J.G.(2002) *FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models*, Engineering Structures, Vol. 24(2002), pp. 385-395.
 10. Smith, S.T., Teng, J.G.(2002) *FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models*, Engineering Structures, Vol. 24(2002), pp. 397-417.
 11. Teng, J.G., Yao, J., (2006) *Plate end Debonding failures of FRP-or Steel Plated RC Beams: A new Strength Model*, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, pp. 283-290.
 12. Wenwei, G., Guo, L., (2006) *Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 43(2006), pp. 1372-1387.