

연성 FRP 보강시스템

- Ductile FRP Strengthening Systems -

(by Nabil F. Grace, Wael F. Ragheb, and George Abdel-Sayed)



송진규*
Jin-Gyu, Song

이 기사는 ACI Concrete International 2005년 1월호에 실린 논문을 번역한 것입니다

1. 머리말

FRP(Fiber Reinforced Polymer) 제품은 콘크리트 분야, 특히 기존 철근 콘크리트 구조부재의 휨이나 전단보강을 위한 구조 보강 재료로써 많이 사용되어오고 있다. 현재 사용하는 FRP 제품들은 유리, 아라미드(aramid), 또는 탄소섬유를 혼합하여 판, 섬유 그리고 시트 등의 많은 형태로 이용된다.

그러나 현재 철근 콘크리트 보의 휨이나 전단보강에 쓰이는 FRP 제품들은 박리현상이나 연성확보 등 몇 가지 단점들을 가지고 있다. 본 기사에서는 특히 이러한 단점들 중 FRP의 취성을 보완하기 위하여 설계된 유사연성(pseudo-ductile) FRP 보강 시스템들을 소개하고자 한다.^{1~4)}

2. FRP의 문제점

에폭시로 부착된 FRP가 철근 콘크리트 보의 휨강도나 전단강도를 증진시킬지라도, 이러한 방법은 여전히 몇 가지 단점들을 지니고 있다. 이 단점들은 현재 사용하고

있는 FRP 보강 시스템에서 그 원인을 찾아볼 수 있다. 비록 FRP는 고강도 재료이지만, 매우 취성적이다. 인장하중 재하 시, FRP는 항복상태나 파괴의 징후가 없다면 파괴 시까지 선형 응력-변형률(stress-strain) 거동을 할 것이다.

FRP의 변형률은 작은 변형률을 갖는 철근(Grade 60은 0.2%, Grade 40은 0.14%)과 다르다. FRP 재료는 파단 전까지 다소 큰 변형률의 탄성변형을 보인다. 그 결과 FRP가 철근 콘크리트 보의 휨 보강재로 사용되었을 때, 보의 성능을 증가시키기 전에 철근이 항복할 것이다. 그러므로 보의 항복강도나 강성의 증대에 기여하기는 어렵다^{5~8)}. 철근이 항복하기 전에 FRP가 보의 극한강도나 강성을 보강하기 위해서는 큰 단면을 가져야 하고, 그것은 일반적으로 보강비용을 증가시킨다. 또한 초고탄성 특성을 지닌(ultra-high-modulus) 탄소섬유처럼 저변형률의 섬유를 사용하는 것이 해결방안처럼 보일지라도, 그것들은 섬유의 파단으로 인하여 취성파괴를 야기한다.

철근 콘크리트 보의 휨 보강에 사용되는 FRP는 보강판의 탈락(debonding) 현상

때문에 그 사용이 제한되어 왔다.

FRP가 보의 전단보강재로 사용되어 보가 전단성능에 도달했을 때, FRP는 극한 변형률의 아주 작은 값을 갖는다^{9~11)}. 그러므로 FRP는 보의 전단보강재로 사용되어도 큰 효과를 보이지 않았다. 또한, 보의 전단보강에서는 섬유 방향이 길이방향 축에 수직 또는 45° 각도를 이루어야 한다^{11~12)}. 그러므로 보의 휨과 전단을 동시에 보강하기 위해서는 한 점 이상의 FRP를 사용해야 하며, 결국 일반적으로 사용하는 FRP 보강시스템인 탄소 FRP(Carbon FRP) 시스템은 상대적으로 비용이 많이 든다.

3. 새로운 연성 시스템의 개발

Lawrence Technological University 에서는 현재 상용되고 있는 CFRP 시스템과는 다른 두 가지 Hybrid-FRP(HFRP) 보강 시스템을 개발하였다^{1~4)}. 특히 이 보강재는 앞에서 언급했던 FRP의 단점들을 보완하면서 철근 콘크리트 보의 휨과 전단을 동시에 보강하도록 설계하였다. 또한, 재료의 혼합(hybridization)은 FRP 보강의 연성부족을 보완하기 위해 사용되어왔다.^{13~15)}

첫 번째 HFRP(H System)는 여러 형태의 탄소섬유와 유리 섬유로 짜인 일방향 섬유이다. 이 섬유는 항복 전에 선형 응력-

*정회원, 전남대학교 건축학부 부교수

변형을 관계를 보이는 인장축의 철근처럼 철근 콘크리트 보에서 주로 휨 보강에 사용된다. 비교적 낮은 등가항복 변형률(약 0.35%)을 갖기 때문에, 섬유는 철근이 항복하기 전에 보의 성능에 상당한 기여를 한다. 그러므로 보의 극한강도와 강성을 증진시킬 수 있다.

두 번째 HFRP 시스템(THD System)은 철근콘크리트 보의 휨이나 전단보강을 위해 세 방향으로 짜여진 섬유(그림 1, 2)이다. 서로 다른 종류의 탄소와 유리섬유를 이용하여 0°, +45°, -45°의 서로 다른 세 방향으로 짜여져 있다. 인장력이 가해졌을 경우, 섬유는 항복할 때까지 선형의 응력-변형을 거동을 한다. 축 방향인 0° 방향은 주로 휨 보강의 역할을 하는 반면에 대각방향인 +45°와 -45° 방향은 주로 전단보강을 하게 된다(그림 1, 2, 3) 내부 전단균열에 수직한 섬유는 보의 전단성능을 보강하는데 효과적이다. 또한, 대각방향의 요소는 섬유에 자기정착(self-anchor) 역할을 한다.


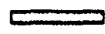

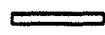

(그림 4)와 (표 1)은 개발된 HFRP 시스템과 상용되는 FRP 보강시스템의 인장 거동에 대한 실험결과를 비교한 것이다.

4. 문제 해결

Lawrence Technological University의 Structural Test Center에서 철근 콘크리트 보의 휨과 전단보강에 대한 HFRP 제품의 효율성을 평가하기 위한 실험이 수행되었다¹⁻⁴⁾. HFRP와 상용되는 탄소섬유 시스템을 사용하여 각각 보강한 보를 비교하였다.

4.1 항복하중 증가

HFRP 시스템들은 다소 낮은 등가항복 변형률(약 0.35%, 그림 4)을 갖기 때문에, 보의 철

-  High elongation axial yarns (E-glass fibers)
-  Medium elongation axial yarns (High modulus carbon fibers)
-  Low elongation axial yarns (Ultra-high modulus carbon fibers)
-  High elongation diagonal yarns (E-glass fibers)
-  Medium elongation diagonal yarns (High modulus carbon fibers)

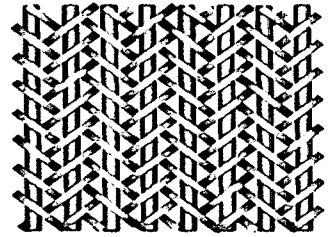


그림 1. 세 방향으로 짜여진 HFRP 섬유의 사진

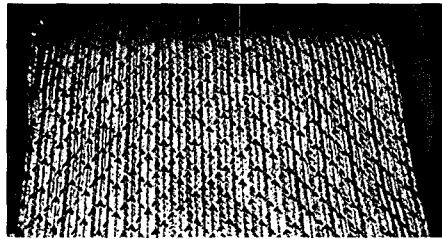


그림 2. 세 방향으로 짜여진 HFRP 섬유의 사진

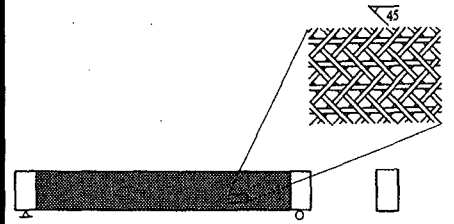


그림 3. HFRP의 제조방법

표 1. 새로운 시스템과 상용되는 FRP 시스템의 인장거동 비교

재료	등가항복하중 kN/mm(kips/in)	등가항복 변형률(%)	극한하중		두께 mm(in.)
			kN/mm(kips/in)	변형률(%)	
THD System	0°방향	0.19(1.08)	0.33(1.89)	2.10	1.0(0.039)
	45°방향	0.115(0.66)	0.20(1.15)	2.05	
H System	0.23(1.30)	0.35	0.39(2.24)	1.74	1.0(0.039)
Carbon fiber sheet	-	-	0.34(1.95)	1.2	0.13(0.005)
Glass fiber fabric	-	-	0.42(2.4)	2.00	1.0(1.39)

근이 항복할 때 그 시스템들의 강도가 보의 극한강도를 현저하게 증가시킨다(그림 5). 실험결과¹⁻³⁾를 살펴보면, 동일한 강성을 가진 탄소섬유와 HFRP로 각각 보강된 보의 극한강도는 유사하게 증가한다. 그러나 극한변형률의 경우 HFRP 시스템으로 보강된 보가 CFRP로 보강된 보보다 몇 배 더 큰 값을 갖는다.

4.2 연성 손실과 취성파괴

실험 결과 HFRP 시스템으로 휨 보강

된 철근콘크리트 보의 탄소섬유로 보강된 동일한 단면의 보와 비교했을 때 연성이 현저하게 감소하지 않았다. (표 2)는 보의 연성과 파괴 모드를 비교한 것이다.

THD를 사용하여 보강된 보의 탄소섬유 시트로 보강된 경우보다 95% 이상 더 큰 연성값을 갖는다. HFRP 시스템들은 인장축에서 철근처럼 거동하기 때문에, 다음과 같은 각기 두 가지 역할을 하고 있다. 첫 번째, HFRP 시스템은 등가항복점 이후 강성감소로 인해 그 내력이 정착한계(anchorable limit)를 초과하지 못하므로

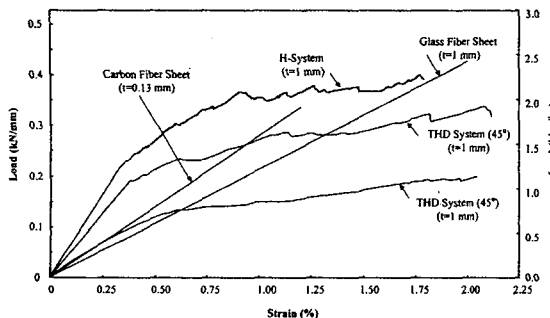


그림 4. 새로운 시스템과 기존 FRP 시스템의 인장거동 비교

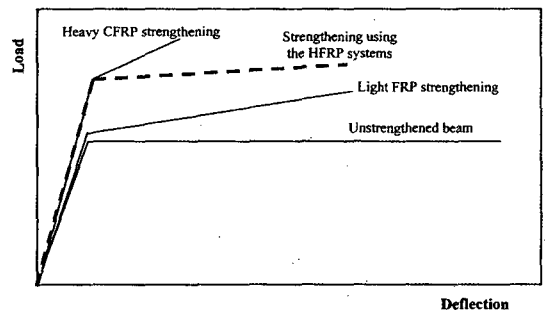


그림 5. 보의 하중-변형 관계

표 2. 휨 보강된 단순보의 연성과 파괴모드 비교

그룹	보 번호	보강 시스템*	연성지표**	최종 파괴 모드
1***	F-B-2	THD System	1.95	콘크리트 파괴에 따른 강재와 섬유와의 항복
	F-CB-1	Carbon fiber sheet	1.61	시트의 탈락에 의한 강재의 항복
2***	F-U-2	THD System	2.18	콘크리트 파괴에 따른 강재와 섬유와의 항복
	F-CU-1	Carbon fiber sheet	1.61	시트의 탈락에 의한 강재의 항복
3***	F3-B-1	THD System	2.92	콘크리트 파괴에 따른 강재와 섬유와의 항복
	F3-CB-1	Carbon fiber sheet	1.5	시트의 탈락에 의한 강재의 항복
4***	F3-U-1	THD System	3.75	콘크리트 파괴에 따른 강재와 섬유와의 항복
	F3-CU-1	Carbon fiber sheet	2.27	시트의 탈락에 의한 강재의 항복
5	F-U65-1	THD System	1.95	콘크리트 파괴에 따른 강재와 섬유와의 항복
	F-CU65	Carbon fiber sheet	1.33	시트의 탈락에 의한 강재의 항복

* 각 그룹에서 보강시스템은 동일한 강성을 갖는다.
 ** 파괴시의 변형과 첫 번째 항복시의 변형 비
 *** Grace, Ragheb, and Abdel-Sayed

콘크리트 구조로부터 보강판의 탈락을 방지하여 파괴를 지연시킨다. 두 번째, 이러한 강성 감소는 결국 보의 강성을 감소시켜 파괴되기 전까지 좀 더 큰 변형에 견디며 연성을 증가시킨다.

HFRP 시스템들은 매우 제한된 영구 변형률을 나타낸다. 그러나 철근과 달리, 등가 항복점 이후 반복하중(unloading and/or reloading)시 강성은 완전히 감소한다. 철근은 이러한 경우 강성이 감소하지 않고 영구 변형률을 보인다. 이런 차이 점에도 불구하고, HFRP 시스템으로 보강된 보에 반복 하중을 작용하면 여전히 강성의 영구 손실과 더불어 상당한 영구변형을 보인다. 이것은 보강되기 전 보의 철근 때문이다. 등가 항복점을 지난 HFRP 시스템의 강성감소로 인해 철근의 변형률은 증가하고, 보의 하중을 제거하면 철근은 보의 영구 변형을 유지한다.

보 F-U65-1의 실험결과(그림 6)로부터 반복하중 후 보의 영구 변형이 발생했음을 알 수 있다. 보는 152×254 mm²의 단면적과 2,740 mm의 길이를 갖고, 2개의 No.5(16 mm) 인장철근(하부)과 2개의 No.3(10 mm) 압축철근(상부)을 가지고 있다. 이 때 사용된 콘크리트의 압축강도는 41.5 MPa(6,000 psi)이고, 철근의 항복강도는 490 MPa(71 ksi)이다. 보 F-U65-1은 1,594 mm(62 in.) 길이의 THD 시스템 한 겹으로 보강되었다. THD 시스템은 보 경간의 중앙에 놓이고 바닥면을 U자형으로 덮어졌으며, 양

쪽 끝에서 152 mm(6 in.)를 연장하였다. 보의 전단 스패ンは 833 mm(33 in.)이며 4개의 지점을 갖는 단순보로서, 파괴 시까지 실험되었다. 또한 THD 시스템은 인장면과 보 길이방향의 수직면과 부착할 때 ±45° 방향의 섬유다발을 포함한다. 그러므로 이것은 일반적으로 탈락(debonding) 또는 전단-인장파괴에 대해서 덜 취약하다(그림 7)의 보 F-CU65). 이것은 Bencardino, Spadea 그리고 Swamy의 이축(biaxial)섬유와 일치한다.⁸⁾

연성은 연속보처럼 부정정 구조물에서 소성힌지의 회전을 통한 모멘트 재분배 때문에 더 중요하다. 위와 같이 휨 보강된 2-경간 연속보의 보강에서 THD 시스템의 효과는 실험적으로 밝혀졌다³⁾. THD 시스템으로 보강된 F-CT와 상용되는 탄소섬유 시트로 보강된 보 F-CTC의 실험결과를 비교하였다. THD 시스템은 정모멘트와 부모멘트 영역에서 교대로 모멘트 재분배를 한 보 F-CT의 소성 힌지에서 적당히 연성 거동한다. 또한 보 F-CT는 보강되지 않은 보의 하중-변형 응답과 유사한 하중-변형 응답을 보였고, 적당한 연성을 보인 후 파괴되었다.

4.3 파괴 전 경고음

HFRP 시스템의 항복은 항상 소리를 동반한다. 이 제품에서 연성은 섬유의 연속적인 파괴에 기초하여 발생하고, 섬유

파괴시 큰 소리를 발생한다. 섬유파괴의 소리를 들을 수 있기 때문에, 이것은 잠재적인 파괴의 지표로써 사용될 수 있다. 이것은 과도한 변형률과 변형의 증가를 보이는 보의 연성거동에서 파괴의 시각적 신호와 더불어 파괴 경고신호를 주기 때문에 아주 중요하다.

4.4 비용과 재료 개발

HFRP의 고강도, 연성 그리고 경고신호 외에 또 다른 장점은 CFRP 시스템과 비교했을 때 다소 저렴한 비용으로 이용할 수 있다는 것이다. 그 이유는 사용되는 섬유의 75% 이상이 다소 저렴한 유리섬유이기 때문이다. 게다가, 새로운 시스템들은 가장 비싼 탄소섬유들의 파괴와 함께 연속적으로 파괴되도록 설계되었고, 탄소섬유들은 등가 항복 변형률을 초과한 후에 파괴되기 시작한다. 따라서 HFRP는 사용되었던 재료 중 가장 비싼 재료를 충분히 활용할 수 있다. HFRP로 보강된 보가 파괴되기 전의 최대 변형률이 등가항복 변형률보다 더 크고, 모든 탄소섬유 실(yarns)의 파괴 변형률보다 더 크다는 것은 실험결과로 입증되었다¹⁻⁴⁾ 대조적으로, 동일한 보의 보강에 사용된 탄소섬유 제품의 최대 변형률은 극한변형률보다 현저하게 작았고, 이것은 강도가 비효율적이라는 것을 말한다.

전단거동에서 살펴보면, 45° 방향을 가진 THD 섬유는 전단보강에 효과적이다. 즉, 섬유의 등가항복강도는 보의 최대 전단강도와 동일하게 설계된다⁴⁾. 또한, THD 섬유는 보의 전단강도를 증가시키기 위해 보의 길이방향축의 45° 방향으로 실을 배치한다. 동시에, 대각선 방향의 실(yarns)과 같은 층(layer)에 있는 축 방향 실(yarns)은 보의 휨과 전단을 동시에 보강한다.

5. 이 용

HFRP 제품을 이용하여 보를 보강할 때에는 특별한 기술이 필요하지 않다. HFRP 제품들은 'wet lay-up'이라는 기술

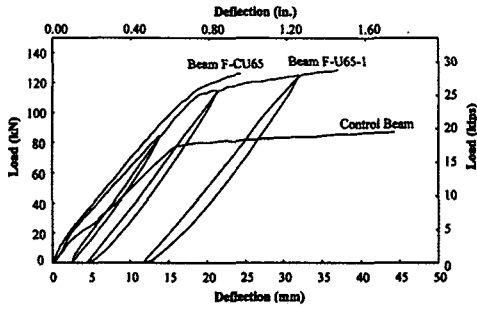


그림 6. F-U65-1(HFRP보강)와 F-CU65(CFRP보강)의 하중-변형관계

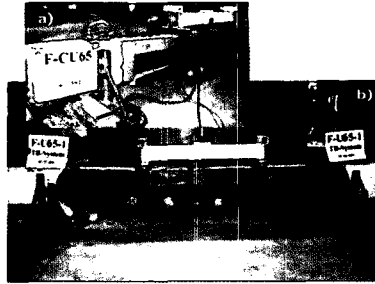


그림 7. F-U65-1(HFRP보강)와 F-CU65(CFRP보강)의 파괴

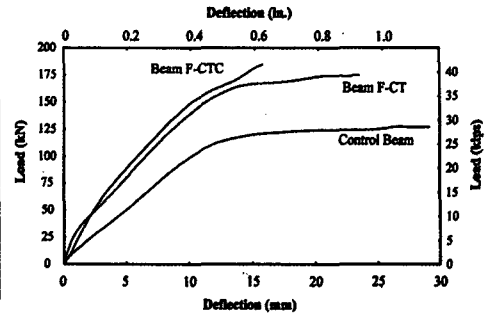


그림 8. 2-경간 연속보에서 하중-변형곡선

을 사용하여 보강할 수 있고, 통용되고 있는 FRP 제품을 설치하는데 사용되는 방법과 동일하다.

두 가지 유사연성(pseudo-ductile) FRP 보강 제품들은 일반적인 FRP 보강제품들이 가지고 있는 단점을 보완할 수 있는 보강 제품으로 활용될 것이다. ■

참고문헌

- Grace, N. F., Abdel-Sayed, G., and Ragheb, W. F., "Strengthening of Concrete Beams Using Innovative Fiber-Reinforced Polymer Fabric," *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.5, Sep.~Oct. 2002, pp.692~700.
- Grace, N. F., Ragheb, W. F., and Abdel-Sayed, G., "Flexural and Shear Strengthening of Concrete Beams Using New Triaxially Braided Ductile Fabric," *ACI Structural Journal*, Vol.100, No.6, Nov.~Dec. 2003, pp.804~814.
- Grace, N. F., Ragheb, W. F., and Abdel-Sayed, G., "Strengthening of Cantilever and Continuous Beams Using New Triaxially Braided Ductile Fabric," *ACI Structural Journal*, Vol.101, No.2, Mar.~Apr. 2004, pp.237~244.
- Grace, N. F., Ragheb, W. F., and Abdel-Sayed, G., "Development and Application of Innovative Triaxially Braided Ductile FRP Fabric for Strengthening Concrete Beams," *Journal of Composite Structures*, Vol.64, No.3~4, 2004, pp.521~530.
- Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., "RC Beams Strengthening with GFRP Plates I: Experimental Study," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.117, No.11, 1991, pp. 3417~3433.
- Triantafillou, T. C., and Plevris, N., "Strengthening of RC Beams with Epoxy-Bonded-Fiber-Composite Materials," *Materials and Structures*, Vol.25, 1992, pp.201~211.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., "Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.7, 1997, pp.903~911.
- Bencardino, F., Spadea, G., and Swamy, N., "Strength and Ductility of Reinforced Concrete Beams Externally Reinforced with Carbon Fiber Fabric," *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.2, Mar.~Apr. 2002, pp.163~171.
- Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A., and Finch, W. W., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabric," *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.3, May-June 1995, pp.163~171.
- Taerwe, L., Khalil, H., and Matthyss, S., "Behavior of RC Beams Strengthened in Shear by External CFRP Sheets," *Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Japan Concrete Institute, Vol.1, 1997, pp.483~490.
- Triantafillou, T. C., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites," *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.2, Mar-Apr. 1998, pp.107~115.
- Chaallal, O., Nollet, M. J., and Perration, D., "Shear Strengthening of RC Beams by Externally Bonded Side CFRP Strips," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.2, No.2, 1998, pp.111~113.
- Nanni, A., Henneke, M. J., and Okamoto, T., "Tensile Properties of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement," *Construction and Building Materials*, Vol.8, No.1, 1994, pp.27~34.
- Harris, H. G., Somboonsong, W., and Frank, K. K., "New Ductile Hybrid FRP Reinforcement Bar for Concrete Structures," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.2, No.1, 1998, pp.28~37.
- Belarbi, K., Chandrasshekhara, K., Watkins, S. E., "Performance Evaluation of Fiber Reinforced Polymer Reinforcing Bar Featuring Ductility and Health Monitoring Capability," *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, SP-188, C. W. Dolan, S. H. Rizkalla, A. Nanni, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1999, pp.1~12.