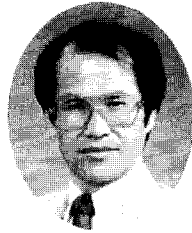


특집 II

건설산업에서의 FRP

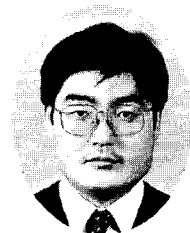
콘크리트 구조물 보강용 FRP 시스템의 재료 특성 - Characteristics of FRP System for Strengthening Concrete Structures -



최완철*



홍영균**



홍기섭**

1. 개요

복합 신소재가 건설 분야에 활용되기 시작한 이래, 최근 십 여 년 동안 가장 많이 연구되어 온 분야가 콘크리트 구조물의 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 쉬트/판 부착 보강 공법이다. 그동안 강판 접착 공법이 우리나라를 위시하여 일본·유럽에서 적용되어 오다가, 복합 신소재가 소개되어 FRP의 장점과 시공의 용이성으로 적용실적이 많아지고 있다.

건설 구조물은 수명에 따른 노후화와 사용 환경의 변화에 따라 내력 증가를 위해 보수·보강이 필요하다. 우리나라에서도 1970년대 이후 건설된 콘크리트 구조물의 보수·보강이 이루어지고 있으며, 그 시공 실적이 증가되고 있다. 그동안 국내에서도 몇몇 업체에 의해 FRP가 공급되고, 현장에서 그 적용이 늘어나고 있다.^{1), 2), 3)}

FRP는 섬유 복합체와 폴리머 수지의 복합체이다.

* 정희원, 숭실대학교 건축공학과 교수

** 정희원, 홍익대학교 건축공학과 교수

콘크리트 구조물에 외부 접착에 의한 보강용으로 사용되는 복합체 FRP 재료에 대한 사양이 최근의 연구 결과로부터 제시되기 시작되고 있다. 본고에서는 미국 ACI 440 위원회에서 준비되고 있는 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures⁵⁾ 중에서 재료 부분을 발췌하여 게재한다. 자료를 보내주시고, 번역 게재를 허락하여 주신 미주 리대학의 Anthony Nanni 교수에게 감사드리고 아직 보고서가 출간되지 않은 상태임으로 자료 인용에 대해서 유보임을 밝힌다.

2. 보강용 FRP 재료의 요구 사항

2.1 보강 강도 범위

FRP로 보강된 부재의 내력 증가는 대체로 제한적으로 보강 강도 범위로 정한다. 하중이 증가하여 FRP 보강재가 부재에서 박리되는 최악의 경우로 보고 이때 구조물은 최소한 사용 하중을 지지해야 한다고 본다.

2.2 내화 성능

FRP 보강된 구조물은 모든 건축 법규와 화재 관련 법규를 따라야 한다. 도막은 연기와 화염의 확산을 감소시킬 수 있다. 구조물은 화재시 FRP가 박리되어도 최소한 고정 하중과 활 하중을 지지해야 한다.

2.3 최대 허용 온도

FRP 시스템에서 수지 성분의 물리적·역학적 특성은 온도에 크게 영향을 받고, 시스템의 유리 전이 온도(glass transition temperature, T_g) 이상에서 성능이 저하된다. 유리 전이 온도는 제품에 따라 서로 다르며, 대체로 60~82℃의 범위이다. FRP 시스템의 최대 허용 온도는 시스템의 T_g 를 초과하지 않아야 된다. 각 FRP 시스템의 T_g 는 공급자가 제공하여야 한다.

2.4 콘크리트 모재 강도

FRP 시스템은 양질의 콘크리트에서 작업성이 우수하며, 최소한 철근 부식의 우려가 있을 경우 사용할 수 없으며, 손상된 콘크리트는 보강 전에 보수 시공되어야 한다. 즉, 콘크리트의 불량, 성능 저하, 철근의 부식은 FRP 시스템의 시공 전에 대책이 강구되어야

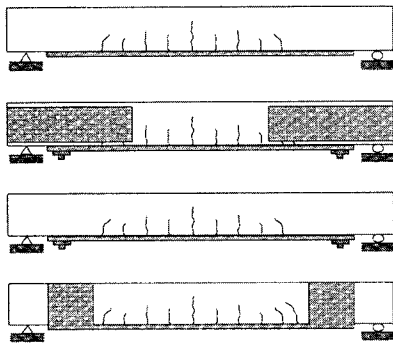
한다.

모재의 상태와 강도는 FRP로 보강된 부재의 강도 확보에 영향을 준다. 모재와 보수재 사이의 부착에 대해서는 ICRI Guideline이나 ACI 503R에 요구 사항이 제시되고 있다. FRP 시스템에서 모재는 적절한 인장 강도와 전단 강도가 전달되어야 한다. 인장 강도는 ACI 503R 또는 ASTM D4541에서와 같은 인발형 부착 실험에서 알 수 있듯이 적어도 14 kg/cm² 이상이어야 한다. FRP 시스템은 모재의 콘크리트 압축 강도(f_{ck})가 140 kg/cm² 이하일 때는 사용할 수 없다.

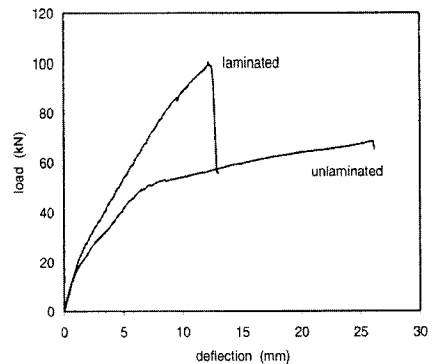
FRP 시스템으로 보강하더라도 철근 부식의 우려를 없앨 수 없다. 만약 철근 부식이 분명하거나 콘크리트 모재의 성능을 저하시킨다면, 완전히 보수되기 전에는 FRP로 보강할 수 없다.

2.5 FRP 보강 시스템의 사용 제한

섬유와 수지를 특정한 방식으로 혼합한 FRP 보강 시스템으로 몇몇 소재가 상용화되고 있다. 이 시스템은 재료 시험과 구조 실험을 통하여 개발되어 왔다. 실험되지 않은 섬유와 수지의 합성은 재료적 적합성을 확인할 수 없을 뿐만 아니라, 예상 밖의 특성을 보일 수 있다. 따라서 모든 FRP 시스템은 성능 확인을 위한 실험 외에 시공 성능 실험이 선행되어야 하며, 실험되지 않은 FRP 시스템의 사용은 제한되어야 한다.



(a) Flexural and shear retrofit schemes, after



(b) Increases in stiffness and strength

그림 6. 보강된 콘크리트 보의 거동

3. 구성 재료

콘크리트 구조물에서의 사용에 영향을 미치는 FRP 재료의 물리적·역학적 특성에 대하여 기술한다. 더 나아가 재하 이력과 기간, 온도와 습기와 같은 요소들이 FRP의 특성에 미치는 영향에 대하여 거론한다.

FRP 보강 시스템의 다양한 공법으로는 함침 적층식 공법(wet lay-up), 수지침투법(pre-preg), 사전양생법(pre-cured)이 있다. 섬유유체의 체적, 섬유유체의 종류, 수지의 종류, 섬유유체의 방향, 치수의 효과, 품질 관리와 같은 요소들이 FRP 재료의 특성에 영향을 미치므로 재료적 특성은 종합적으로 고려되어야 한다. 표준시험법은 일부 FRP 제품에만 적용되며, 모든 제품에 적용될 수 없다. 따라서 기술자 또는 설계자는 특정 제품에 관련된 특성을 얻기 위해 사전에 FRP 시스템 제조업자와 계속 협의하여 정확한 자료를 확보하여야 한다. 수지(프라이머, 퍼티, 함침제, 접착제)와 섬유유체를 포함하는 구성 재료들은 재료 실험과 구조 실험을 통하여 성능이 시험된다.

3.1 수지

프라이머, 퍼티, 함침제, 접착제를 포함하는 넓은 범위의 폴리머계 수지가 FRP 보강 시스템에 사용된다. 대체로 수지 유형은 에폭시, 비닐에스테르, 폴리에스테르 등이다. 최근 다양한 환경 조건에서 유용한 수지들의 여러 가지 특성이 밝혀졌으며, FRP 시스템에서 요구 특성은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 모재와의 적합성과 부착 강도
- 보강 부재의 노출과 관련된 습기, 염수, 외기 온도, 화학약품과 같은 환경에서의 저항성
- 도포성
- FRP 보강재와의 적합성과 접착력
- 합성을 위한 적절한 역학적 특성
- FRP 합성 시스템과의 적합성과 접착력

① 프라이머

프라이머는 콘크리트 표면에 침투하여 함침 수지 또는 접착제의 접착성을 향상시키는 데 사용된다.

② 퍼티

퍼티는 표면의 작은 구멍을 채우고, FRP가 접착되도록 매끄러운 표면을 만드는 데 사용된다. 채워진 표

면의 구멍은 또한 함침 수지가 경화하는 동안 기포의 생성을 방지한다.

③ 함침 수지

함침 수지는 보강 섬유유체를 고정·밀착시키고, 섬유유체 사이의 하중이 효과적으로 전달되도록 전단력 전달 경로를 제공한다. 함침 수지는 또한 함침 적층식 공법에서 사전에 부착된 콘크리트 모재와 FRP 시스템 사이의 전단력 전달 경로를 제공하는 역할을 한다.

④ 접착제

접착제는 사전 양생 FRP 판재를 콘크리트 모재에 접착하는 데 사용된다. 접착제는 콘크리트 모재와 보강 섬유 판재 사이의 전단력 전달 경로를 제공한다. 또한 접착제는 사전 양생 FRP 판재의 여러 층을 접착하는 데 사용하기도 한다.

⑤ 보호도막

보호도막은 환경의 영향에서 오는 손상으로부터 접착된 FRP 보강판을 보호하는 데 사용된다. 도막은 양생된 FRP 시스템의 외표면에 일반적으로 도포된다.

3.2 보강 섬유

유리, 아라미드, 탄소와 같은 연속체 섬유유체가 FRP 보강 시스템에 일반적으로 사용된다. 보강 섬유유체는 FRP 시스템에 강도와 강성을 부여한다. 보강 섬유유체의 일반적인 인장 특성의 범위는 <표 1>과 같으며, FRP 시스템의 특성은 <표 2>와 같다.

표 1. 섬유유체의 인장 특성

섬유 종류	탄성 계수 (ton/cm ²)	인장 강도 (ton/cm ²)	과단시 변형률 (%)
탄소 섬유			
· 일반용	2200 - 2400	< 38.7	>1.2
· 고강도	2200 - 2400	38.7 - 49.2	>1.4
· 초고강도	2200 - 2400	49.2 - 63.2	>1.5
· 고탄성	3500 - 5300	> 31.6	>0.5
· 초고탄성	5300 - 7000	> 24.6	>0.2
유리 섬유			
· E-glass	700 - 740	19.0 - 27.4	>4.5
· S-glass	880 - 910	35.1 - 49.2	>5.4
아라미드 섬유			
· 일반용	700 - 800	35.1 - 42.2	>2.5
· 고성능	1100 - 1300	35.1 - 42.2	>1.6

주 : SACMA(Suppliers of Advanced Composite Material Associations) 시험법 16-90에 의함

표 2. FRP 시스템의 특성

보강 섬유 종류 (배향 각도)	인장 탄성 계수 (ton/cm ²)	인장 강도 (ton/cm ²)	파단시 변형률 (%)	열 팽창 계수 (10 ⁻⁶ /°C)
탄소 섬유/에폭시 (고강도)				
· 0°	1190 - 1480	14.1 - 21.1	1.0 - 1.5	≈0
· 0° /90°	560 - 780	7.0 - 10.6	1.0 - 1.5	1.7
· 45° /-45°	140 - 290	1.8 - 2.8	1.5 - 2.5	5.5 - 8.3
E-glass/에폭시				
· 0°	350 - 490	7.0 - 14.1	2.0 - 3.0	1.6
· 0° /90°	140 - 350	5.3 - 10.5	2.0 - 3.0	3.3
· 45° /-45°	140 - 210	1.8 - 2.8	2.5 - 3.5	5.5 - 8.3
아라미드 섬유/에폭시 (고성능)				
· 0°	560 - 690	10.6 - 17.6	2.0 - 3.0	≈-1.7
· 0° /90°	290 - 350	2.8 - 19.3	2.0 - 3.0	0 - 0.5
· 45° /-45°	70 - 140	1.4 - 2.1	2.0 - 3.0	0 - 0.5

4. FRP 재료의 물리적 특성

4.1 밀도

FRP 재료는 1.25 ~ 2.1 g/cm³ 범위의 밀도를 가지며, 이것은 철의 1/4 ~ 1/6 수준이다(표 3). 감소된 하중은 운송 비용을 낮추고, 현장에서의 취급을 용이하게 한다.

표 3. FRP 재료의 밀도(g/cm³)

Steel	GFRP	CFRP	AFRP
7.9	1.25 ~ 2.1	1.5 ~ 1.6	1.25 ~ 1.4

4.2 열팽창 계수

FRP 재료의 열팽창 계수는 보강 섬유와 수지의 유형과 보강 섬유의 체적비에 따라, 또 가로·세로 방향에 따라 차이가 있다.

표 4. FRP 재료의 열팽창 계수

방향	열팽창 계수(×10 ⁻⁶ /°C)		
	GFRP	CFRP	AFRP
세로, α _L	6 ~ 10	-1 ~ 0	-6 ~ -2
가로, α _T	21 ~ 23	22 ~ 23	60 ~ 80

* 혼입률이 0.5 ~ 0.7인 보강 섬유에 대한 값

〈표 4〉는 전형적인 일방향 FRP 재료에 대한 가로·세로 방향의 열팽창 계수이다. 음의 열팽창 계수는 온도 상승시 재료가 축소되고, 온도 하락시 재료가 팽창되는 것을 의미한다. 참고로 콘크리트는 10×10⁻⁶에서 13×10⁻⁶/°C까지 열팽창 계수를 가지고, 일반적으로 등방성이라고 가정된다. 철은 12×10⁻⁶/°C의 등방성의 열팽창 계수를 갖는다.

4.3 고온의 영향

고체 폴리머가 액상화하여 물리되기 시작하는 온도를 유리전이온도(Tg)라 한다. 폴리머는 유리전이온도 이상에서는 분자 구조의 변화로 인하여 탄성 계수가 감소한다. Tg의 값은 수지의 종류에 따라 달라지지만, 일반적으로 90 ~ 150 °C의 범위이다.

FRP 합성재에서 보강 섬유는 수치보다 더 우수한 열 성능을 나타낼 수 있으므로 섬유의 저항 온도까지 세로방향으로 계속해서 하중을 지지할 수 있다. 유리 섬유의 경우 980 °C이고, 아라미드 섬유의 경우 180 °C, 탄소 섬유는 1,650 °C 이상의 저항 능력이 있다. 그러나, 수지에 접촉되어 있어 섬유 사이의 힘 전달 능력이 감소하므로 전체 합성체의 인장 특성은 저하된다. 실험 결과는 유리전이온도보다 훨씬 높은 250 °C에서 GFRP와 CFRP의 인장 강도는 20% 이상 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그러나, 수지를 통한 전단력 전달에 더 직접적으로 영향 받는 휨 특성들은 쉽게 저하된다. 접착판 공법을 통하여 섬유-콘크리트 계면에서의 폴리머의 특성은 FRP와 콘크리트 사이의 접착을 유지하는 데 중요하다. 그러나, Tg에 근접되는 온도에서는 폴리머의 역학적 특성이 저하되고, 폴리머는 콘크리트로부터 보강 섬유에 응력을 전달하는 능력이 쉽게 상실된다.

5. 역학적 특성

5.1 인장 특성

FRP 재료는 인장력 작용시 파단 전에 소성 거동

(항복)을 보이지 않는 특성을 가지고 있다. FRP 재료의 인장 거동은 파단될 때까지 선형 탄성 응력-변형률 관계를 갖는다.

FRP 재료 중 보강 섬유가 주 하중 전달 모재이기 때문에, 보강 섬유의 종류·배향·혼입량이 FRP 재료의 인장 특성을 좌우한다. 보강 섬유가 역할하기 때문에 FRP 시스템의 특성은 때때로 순섬유 단면적에 근거하며, 경우에 따라 섬유판 전체 단면적에 근거하기도 한다. 섬유판 전체 단면적과 순섬유 단면적 사이의 차이는 다음과 같다.

- 섬유판 전체 단면적 : FRP 시스템의 섬유판 전체 단면적은 양생된 FRP 시스템의 전체 두께를 사용하여 구한다. 이때 전체 두께는 보강 섬유와 모든 수지를 포함한다. 섬유판 전체 단면적은 사전 양생된 섬유판 특성을 나타내는 데 일반적으로 사용되며, 양생 두께가 일정한 반면, 보강 섬유와 수지의 상대적 비율이 조절된다.

- 순섬유 단면적 : FRP 시스템의 순섬유 단면적은 보강 섬유의 면적을 사용하여 구하며, 수지를 포함하는 양생 시스템의 전체 두께는 무시한다. 순섬유 단면적은 제조된 섬유 시트로부터 현장에서 수지를 시공하는 함침 적층식 공법에 일반적으로 사용된다. 함침 적층식 공법 과정에서는 섬유량과 수지량을 조정하여 다루기가 용이하다.

섬유판 전체 단면적을 사용할 경우, 상대적으로 두께는 커지고, 강도와 탄성 계수는 작아진다. 순섬유 단면적을 사용할 경우, 상대적으로 두께는 작아지고, 강도와 탄성 계수는 커진다. 그러나, 이들 값들에 상관없이 내하력과 강성은 동일하다. 여기서 순섬유 단면적에 근거하여 나타난 특성은 단순히 보강 섬유의 특성만이 아니라 보강 섬유-수지 시스템과 섬유 조직에 의해 결정된다. 모든 FRP 시스템의 역학적 특성은 이들 형태에 상관없이 섬유 특성과 더불어 섬유판 실험에 근거하여야 한다.

미국에서 현재 사용되고 있는 FRP 보강 시스템의 인장 강도는 <표 5>와 같다. 그러나 특정한 FRP 시스템의 인장 강도는 시스템 생산자로부터 공급되어야 한다.

표 5. 상용화된 FRP 보강 시스템의 인장 강도

FRP 재료	섬유중량 (g/m ²)	섬유판의 인장 강도 (ton/m)
고강도 일방향 탄소 섬유 시트	300	71
일방향 탄소 섬유 시트	300	51
고탄성 일방향 탄소 섬유 시트	300	61
일방향 E-glass 섬유	900	73
일방향 아라미드 섬유	300	50
고강도 일방향 탄소 섬유 스트립 (사전 양생)	2,390 (섬유판 중량)	337
일방향 E-glass 헬 (사전 양생)	1,700 (섬유판 중량)	161

5.2 압축 특성

일반적으로 접착판 공법에서 FRP는 압축 응력을 받는 경우로 사용되지는 않는다. FRP 재료의 압축 강도는 인장 강도보다 낮다. 길이 방향으로 압축을 받는 FRP의 파괴 양상에는 종 방향 인장 파괴, 섬유 국부 좌굴, 전단 파괴가 있고, 파괴 형태는 섬유 형태와 혼입량, 수지의 종류에 따라 다르다. GFRP, CFRP, AFRP의 압축 강도는 각각 인장 강도의 55%, 78%, 20%에 해당한다. 일반적으로 압축 강도는 인장 강도가 높아질수록 또한 높아진다. 단, 상대적으로 낮은 응력에서 압축 거동이 비선형을 보이는 아라미드의 경우는 예외이다.

압축 탄성 계수는 FRP 재료에 있어서 인장 탄성 계수보다 더 작게 나타난다. GFRP, CFRP, AFRP의 압축 탄성 계수는 대략적으로 인장 탄성 계수의 각각 80%, 85%, 100%에 해당한다. 압축 하중 아래 섬유 내부의 국부 좌굴을 초래하여 조기 파단이 나타날 수 있어 탄성 계수 값이 작아진다.

6. 장기 특성

6.1 크리이프 파단

FRP 재료는 일정한 응력을 받는 상태에서 시간이 지나면 갑자기 파단되며, 이 시간을 지구 시간

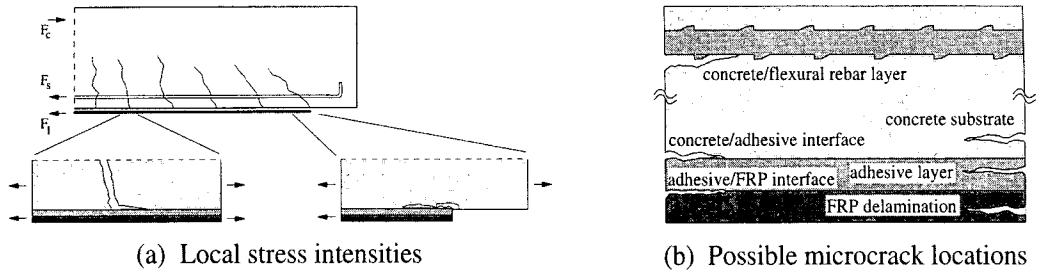


그림 2 국부 응력 집중과 미세 균열 발생 시나리오⁴⁾

(endurance time)이라고 부른다. 이러한 현상을 크리이프 파단(creep rupture)이라고 하며, 금속 소재에서 피로 특성(fatigue)과 유사하다. FRP 단기 강도에 대한 지속 하중의 비가 높을수록 지구 시간은 줄어든다. 이 지구 시간은 환경 조건에 상관되어 고온 상태, 자외선 노출이 심한 조건, 알칼리가 높은 조건, 건습 또는 동결의 반복이 심한 조건에서 감소한다.

일반적으로 탄소 섬유는 크리이프 파단에 비교적 강하며, 아라미드 섬유는 보통 정도이고, 유리 섬유는 약하다. 크리이프 파단 시험은 0.25 in 직경의 섬유봉으로 시행한다. 상온 조건에서 여러 가지 응력 상태에서 실험 결과로 시간로그 축에 대하여 크리이프 파단 강도는 대체로 선형으로 나타난다. 50만 시간(약 50년) 경과시, 초기 강도에 대한 응력은 유리 섬유판, 아라미드 섬유판, 탄소 섬유판이 각각 0.3, 0.47, 0.91로 나타나고 있다. 이러한 크리이프 파단이 발생되지 않도록 지속 하중 수준에 대한 검토가 설계시에 수행되어야 한다.

6.2 피로

FRP 재료의 피로 특성은 시험에 있어서 여러 가지 환경 조건에 따라 달라진다. 특히 온도와 FRP재의 함수율 정도에 따라 피로 특성이 달라진다. 여러 가지 FRP 재료 중에서 탄소 섬유판이 피로 특성에 상대적으로 우수하다. 탄소 섬유판은 초기 내력의 60~70% 범위에서 지구 시간까지 견딘다. 100만 사이클 회수에서 피로 내력은 초기 내력의 60~70%이며 습윤 또는 외기 온도 조건에 비교적 영향을 받지 않는다. E-glass, S-glass와 같은 유리 섬유 또한 피로 하중에 대하여 저항력이 높다.

6.3 내구성

FRP 재료는 특정 환경 조건에서 사용 시간에 따라 역학적 성능이 떨어진다. 환경 조건으로 온도, 습도, 화학특성 등을 들 수 있으며, 노출 시간, 수지 종류 및 배합, 섬유 형태, 양생 공법 등이 성능 저하에 영향 요인이 된다. 문제는 재료 공급자에 의해 제공된 시험성적표는 실험실 조건으로 실제 환경 조건이 아니다. 내구성은 설계시에 사용 조건을 고려하여 조정된 값으로 계산에 반영하여야 한다.

7. 맺음말

FRP재는 신소재로서 몇몇 우수한 재료 특성으로 장래 사용이 기대된다. 동시에 아직까지 불확실한 특성이 많고, 또 접착판 공법에 설계 변수가 많으므로 연구되어야 할 부분이 많이 남아 있다. FRP 소재가 보강으로 사용되기 위해서는 반드시 구조 실험과 더불어 여러 가지 재료 성능 시험이 수반되어야 한다.

본고에서 FRP재가 시험되어야 할 재료 특성을 알아보았다. 이들에 대한 재료 시험 방법에 대해서도 미국 등지에서는 표준시험법으로 제시되고 있으나, 국내에서는 아직 미약하다. 빠른 시일 내에 체계화되어야 할 것이다. □

[※ 본고는 2000년 8월 30일에 21세기 건설용 복합 재료 세미나에서 기 발표된 내용임을 밝힙니다.]

참고문헌

1. 최완철 외 3인, "탄소섬유쉬트르 형 보강된 콘크리트의 강

- 도 특성”, 대한건축학회논문집, 1995.10, pp.323~328.
2. 최완철 외 3인, “탄소섬유쉬트로 밀면 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동”, 대한건축학회논문집, 1995.8, pp.249~257.
3. 최완철, 김병국, “복합신소재 FRP에 의한 보수·보강 기법의 문제점과 전망”, 제2회 콘크리트 구조물의 보수·보강 기술 세미나, 1999.8.
4. Buyukozturk, O., and Hearing, B. (1998a) Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP, *ASCE Journal of Composites and Construction*, Vol. 2, No. 3, pp. 138-144.
5. ACI 440 Committee, “Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures” Draft.