실리카흄과 현장기계함침을 이용한 유리섬유 복합재(CAF)의 콘크리트 구조물 보수보강공법

Repair and Retrofit System of Concrete Structures using Fiber Glass and Epoxy Composite Sheets, Improved Through Utilization of Silica fume and Mechanical Saturator

유 용 하 * 권 성 준 **
Yoo, Young-Ha Kwon, Sung-Jun

Abstract

Repair and retrofit system of concrete structures has been developed from conventional reinforced concrete overlaying, steel plate bonding and recently to fiber composite systems. Research and study on carbon, aramid, and glass fiber composite system has been actively carried out from all over the world. Glass fiber composite is proved to be competitive technically and enconomically, among fiber composite system. CAF system is a system developed locally using all domestic materal, glass fabric and epoxy, and improved in shear bonding property by utilizing silica fume mixed with epoxy. All the tests on material properties, structural behavior, constructiveness at site and quality control procedure proved to be most appropriate system so far developed. Futher research work is and will be under progress for utilization of this system which will be applied to more adverse situation.

제 1 장 서론

1.1 연구배경

철근콘크리트 구조물은 시간이 지남에 따라 열화가 진행되거나 설계, 시공, 유지관리상의 결함 또는 사고나 재해에 의해 콘크리트의 균열발생과 철근부식에 의한 내력성능의 저하 및 사용성 등이 저하되는 경우가 많으므로 구조물의 내구성 및 부재 능력을 회복 혹은 향상시키기 위하여 적절한 시기에 보수 보강의 조치가 요구된다. 보수 보강은 구조물의 사용연한을 증가시키고 구조체로서의 안전성 확보를 위하여 필수적인 것으로 정확한 구조내력의 평가가 선행되고 그에 따른 보수 및 보강공법의 선택이 이루어져야 한다.

구조물에 대한 보수 및 보강공법으로 과거에는 강판접착공법이 주류를 이루어 왔으나 최근에는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유등을 에폭시 수지로 부착하는 복합섬유재료에 의한 보강공법에 많이 이용되고 있다. 그러나 이들 복합재료를 이용한 공법들은 구조성능의 확인없이 외국에서 수입되는 재료들에 대한 제품안내서만 의존하여 사용하는 경우가 많으므로 적절한 보강설계법과 보강부재의 구조적 성능에 대한 확인과정이 필요하다.

* 특별회원, (주)콘크리닉 대표이사
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

본연구에서는 기존에는 유리섬유 자재를 전량 수입에 의존하였는데 이를 국산화 시켜 제품의 성질을 동등 이상으로 생산하고 이를 이용한 유리섬유 부착공법의 타당성과 적용성을 해석적 및 실험적으로 분석하고자 한다. 이를 위하여는 재료적인 문제, 제조상의 문제, 구조해석 및 설계이론의 정립, 시공조건과 시공과정과의 문제, 내구성, 시공후 성능평가, 유지관리방법 등의 문제가 이론적 및 실험적으로 검증이 필요하다.

1.2 연구 목적

콘크리트 구조의 보수·보강 요구조건을 충족하는 유리섬유의 제조공정, 설계, 시공, 유지관리상의 요구조건 및 유리섬유 복합재 및 접착제의 역학적 기초물성 시험 및 특성치를 체계화한다.

유리섬유 복합재를 이용한 콘크리트 구조물의 보수 보강공법을 적용한 콘크리트 구조의 거동을 이론적으로 정립하고 보강된 콘크리트 구조체계의 구조해석기법과 설계기법을 개발하였다.

구조모형시험에 의해 성능 시험을 하고 시공 및 구조물 환경조건이 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 분석하며, 시공후 성능검사 기법 및 유지보수기법을 체계화 한다. 또 품질 및 시공시방서를 개발하고 유리섬유를 이용한 콘크리트 구조물의 보수·보강공법의 적용범위와 적용대상 구조물을 도출한다.

제 2 장 유리섬유 복합재(CAF)의 기초물성 시험

2.1 재료의 물성치 시험

CAF 복합재의 역학적 특성을 고찰하고 실험을 통하여 설계와 시공에 반영할 수 있는 재료정수를 확립하기 위하여 기초적인 물성시험을 수행하였다.

표1. 재료의 물성치

유리섬유		에폭시	
등급(yard/pound)	250	압축강도(kg/cm²)	880
밀도(g/cm³)	2.54	휨강도(kg/cm²)	800
인장강도(kg/cm²)	31,000	인장탄성계수(kg/cm²)	28,000
파단변형율(%)	4.2	밀도(kg/cm³)	1.16
접착제(EPOS)		**유리섬유+에폭시**	
점도(CPS)	9,000	파단인장강도(kg/cm²)	6,200
Gel Time	3시간 전후	인장탄성계수(kg/cm²)	250,000
인장강도(kg/cm²)	560	파단변형율	2.0
압축강도(kg/cm²)	880	두께(mm)	1.0
부착강도(kg/cm²)	20	포아송비	0.25
휨강도(kg/cm²)	800	휨강도(kg/cm²)	6,600
파단변형율	2.0	열팽창 계수(1/℃)	4.9
Heat Deflection Degree(℃)	76		

2.2 내화학성 시험(무게/중량변화율) : 28일

복합재를 KS M 3007에 따라 실시하였다. 황산30%, 염산10%, 수산화나트륨 10%, 염화나트륨10%의 용액에 28일동안 각각 3개씩 담구어 5일마다 각 시편의 중량변화와 변질상태를 관찰하였다.

표2. 내화학성 시험결과

내화학성 시험		중성화 저항시험(질량증가율)	
황산 30%	4.59%	7일	0.1%
염산 10%	2.87%	14일	0.12%
수산화 나트륨 10%	0.24%	21일	0.13%
염화나트륨 10%	0.24%	28일	0.2%

2.3 하수도 모사시험

본 시험은 하수도내의 환경조건을 모사하여 하수도 내벽을 CAF 복합재로 보강하였을 경우의 화학적 저항성을 평가한 것이다.

표3. 하수도 모사시험결과

	존치기간(일)	증가율(%)
간접노출	0~28	0~0.44
직접노출	0~28	0~0.45

제 3 장 유리섬유 복합재(CAF)로 보강된 콘크리트 모형구조물의 시험 및 성능평가

3.1 보모형 시험

3.1.1 휨시험

무보강 보, 무보강의 초기균열 보, 보강한 보, 보강한보의 초기균열 보, 휨파괴후의 보강한보에 대하여 휨시험을 한결과이다.

표4. 보모형의 휨시험결과

	무보강	초기균열무보강	보강	초기균열보강	휨파괴후보강
시편수	6	5	5	3	3
평균파괴하중	1,980	1,444	8,768	8,247	13,200
무보강에 평균 파괴 하중비	1.00	0.73	4.43	4.17	5.61

3.1.2 Fiber Anchor 효과시험

(1) strip 폭에 대한 정착효과(수직보강)

휨에 의한 계면박리파괴의 진행이 중앙에서 단부로 진행되므로 보의 측면에 정착시킨 strip의 높이에 대한 효과에 비해 strip의 폭에 대한 효과가 더욱 지배적임을 알 수 있다. 시험한 보강보 시편의 파괴하중은 8768kg이었는데 접착성능을 개선시킨 후 같은 보강길이와 폭을 가진 시편에서는 파괴하중이 9880kg으로 나타났으므로 접착제의 성능은 어느정도 향상되었다고 할 수 있다.

(2) fiber와 strip에 대한 정착효과

가장 이상적인 경우는 strip과 파이버를 동시에 정착한 시편으로 나타났는데 이때의 파괴하중은 15,200kg으로 계면박리파괴가 일부 진행되었으나 같은 하중에서 파괴된 것으로 미루어 단순한 계면박리 파괴를 보이는 시편에 비해 54%의 강도증가를 보이고 있다.

3.2 슬래브 모형 시험

3.2.1 휨시험

무보강 보, 무보강의 초기균열 보, 보강한 보, 보강한보의 초기균열 보, 휨파괴후의 보강한보에 대하여 휨시험을 한결과이다.

표5. 슬래브 모형의 휨시험결과

	무보강	초기균열 무보강	보강	초기균열 보수보강
시편수	6	5	5	3
평균파괴하중	1,286	1,090	5,696	6,373
무보강평균파괴하중비	1.00	0.85	4.43	4.96

3.2.2 Fiber Anchor 효과시험

(1) strip 폭에 대한 정착효과(수평보강)

strip의 폭이 클수록 파괴하중이 증가하며 이는 보의 경우와 마찬가지로 strip의 높이보다는 폭의 영향이 지배적임을 알 수 있다.

(2) fiber와 strip에 대한 정착효과

fiber anchor와 병용할 경우 가장 이상적인 파괴를 유도할 수 있다고 할 수 있다.

3.3 기둥모형의 압축시험

기둥에 대한 보강효과를 알아보기 위해 무보강 시편을 기준으로 3겹 보강까지 각각 2개의 시편을 기준으로 시험하였으며 강도의 보강효과보다는 기둥의 변형제어효과에 매우 큰효과를 지니고 있음을 알 수 있었다.

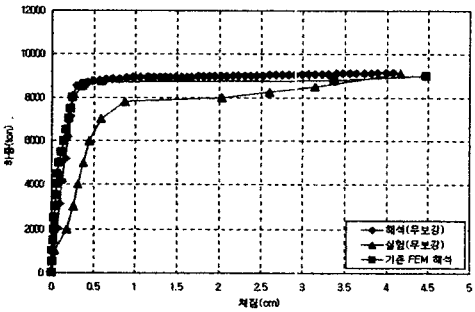
표6. 슬래브 모형의 휨시험결과

시편	단면적 (cm^2)	길이 (cm)	최대하중 (tonf)	압축강도 (kg/cm^2)	강도비	평균최대 변형율	변형비	구분
CC-1	223.10	55.10	76	326.5	1.00	0.00361	1.00	무보강
CC-2	224.18	55.18	70					
CP1-1	196.27	55.20	82	397.5	1.22	0.01249	3.46	1겹보강
CP1-2	217.27	55.40	82					
CP2-1	217.02	55.40	92	442.5	1.36	0.02568	7.11	2겹보강
CP2-2	218.88	55.40	101					
CP3-1	217.27	55.20	122	587.5	1.80	0.03973	11.01	3겹보강
CP3-2	200.53	55.30	123					

3.4 RC보의 휨시험

3.4.1 무보강 RC보의 휨시험

7.8tonf에서 철근의 항복에 이르렀고 전형적인 휨파괴의 양상을 보여주면서 콘크리트 하중 재하점 사이의 압축파괴로 진전되었다. 파괴하중은 9.1tonf으로 이때의 처짐은 4.163cm로 나타났다. 이때 비선형 FEM 해석 결과와 프로그램의 해석결과 그리고 실험결과의 비교를 나타내고 있는데 초기 강성의 차이를가지고 있으나 최종 처짐량과 파괴하중을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.



3.4.2 1겹 보강 콘크리트시편의 휨시험결과

1겹 단순보강과 계면박리를 방지하기 위하여 저면에 전면보강후 폭40cm의 U strip을 설치한 시편에 대해 휨시험을 실시하였다.

표7. 1겹 보강 콘크리트시편의 휨시험결과

	최대하중(ton)	최대처짐(cm)	하중증가율	처짐제어율	연성비
무보강	9.1	4.163	1	1	-
RC1스트립이 없는 경우	13.5	2.124	1.48	0.51	-
RC3스트립이 있는 경우	19.5	2.580	2.14	0.62	2.78

3.4.3 2겹 보강 콘크리트시편의 휨시험결과

2겹 단순보강과 계면박리를 방지하기 위하여 저면에 전면보강후 폭40cm의 U strip을 설치한 시편에 대해 휨시험을 실시하였다.

표8. 2겹 보강 콘크리트시편의 휨시험결과

	최대하중(ton)	최대처짐(cm)	하중증가율	처짐제어율	연성비
무보강	9.1	4.163	1	1	-
스트립이 없는 경우	22.0	1.976	2.41	0.47	2.42
스트립이 있는 경우	24.0	2.177	2.64	0.522	2.80

제 4 장 시공 및 환경조건이 보강성능에 미치는 영향평가

4.1 수중구조물의 보수 및 보강효과

휨파괴후 보강특성을 보통의 시공상태에서 휨파괴후 보강한 시편의 파괴하중과 비교하면 수중포화 후 보강한 시편들의 파괴하중이 전반적으로 낮게 평가됨을 알 수 있는데 특히 슬래브의 경우는 파괴하중 감소가 35%정도 되므로 수중시공에 있어서 엄격한 품질관리가 필요함을 알 수 있다.

4.2 습윤상태의 시공

보모형의 경우 같은 휨박리 파괴형태를 지니더라도 접착면을 완전 건조시킨 보강시편의 파괴하중인 8,768kg와 비교하면 A인 경우 56.3%, 접착제(EPOS)의 경우는 60%밖에 효과를 기대할 수 없다.
슬래브의 경우 역시 접착면을 완전 건조시킨 보강시편(SP)의 파괴하중인 5696kg와 비교하면 A인 경우 88%, 접착제(EPOS)의 경우는 89% 정도의 효과밖에 보이지 못하므로 습윤면을 처리할 경우는 건조후 작업하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 한편 EPOS 사용시 파괴하중이 접착제 A를 사용한 경우 보다 파괴하중이 증가한 것으로 미루어 접착성능이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

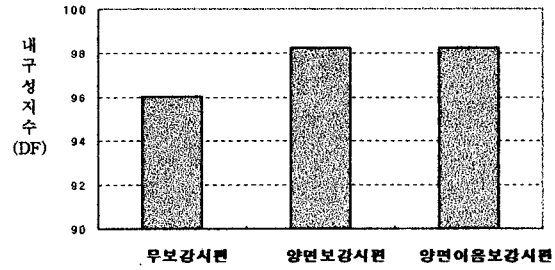
4.3 시공온도의 영향

시공온도에 따른 보강 보모형의 거동을 알아보기 위해 접착후 1주 양생을 거친 뒤 -5℃, 20℃, 35℃, 50℃에서 7일간 보관된 모형에 대해 각각 3개씩 보모형을 시험하였다.

표9. 시공온도의 영향시험결과

온도	각 온도에 해당하는 3개 시편의 파괴하중			평균파괴하중(kg)
-5℃	1,800	1,940	2,100	1,946
20℃	2,120	2,340	2,040	2,166
35℃	1,980	2,160	1,960	2,033
50℃	2,040	2,000	1,900	1,980

4.4 내구성(동결융해시험)



4.5 내후성시험

CAF복합재로 보강한 콘크리트 구조물의 시간경과에 따른 기온이나 습도등과 같은 환경조건에 대한 영향을 알아보기 위하여 인장시편, 휨시편과 보강된 콘크리트 보모형의 내후성 시험을 실시하였다.

4.5.1 외부노출에 대한 인장시험(4개월)

표10. 외부노출에 대한 인장시험결과

시편	인장시험		휨시험	
	최대하중(kg)	인장강도(kg/cm²)	최대하중(kg)	인장강도(kg/cm²)
1개월	1,181	6,044	72.9	7,143
2개월	726	3,696	74.9	7,011
3개월	702	3,402	75.9	6,600
4개월	822	3,408	72.6	6,560

4.5.2 수중보관에 대한 인장시험(4개월)

표11. 수중보관에 대한 인장시험결과

시편	인장시험		휨시험	
	최대하중(kg)	인장강도(kg/cm²)	최대하중(kg)	인장강도(kg/cm²)
1개월	708	2,977	77.4	6,893
2개월	609	2,572	71.1	6,214
3개월	597	2,486	70.8	6,560
4개월	647	2,486	69.6	6,210

4.5.3 보의 휨시험(5개월)

표12. 보의 휨시험결과

시편	외부노출		수중보관	
	최대하중(kg)	인장강도(kg/cm²)	최대하중(kg)	인장강도(kg/cm²)
1개월	8,437	63,275	7,073	53,050
2개월	7,626	57,175	7,293	54,700
3개월	7,316	54,888	7,479	56,100
4개월	8,013	60,100	7,879	59,100
5개월	8,566	64,350	8,159	61,200

제 5 장 내구적 저항성 평가

5.1 1,000시간 내구성 시험결과

동일한 시편을 4등분 하였으며 모든 시편을 5일간 양생시켜 시험을 실시하였다.

표13. 1,000시간 내구성 시험결과

시험조건	인장강도 변화		파단변형율	
	no post cure unexposed	no post cure exposed	no post cure unexposed	no post cure exposed
60℃	-	-	-	-
오존(1ppm, 60도)	5,793	6,000	2.3	2.4
알칼리(pH 8.5-10.5)	5,862	5,517	2.3	2.3
해수침지실험	5,862	5,655	2.3	2.2
민물침지실험	5,931	5,931	2.4	2.3

5.2 시간에 따른 역학적 특성의 변화(10,000시간)

환경조건의 변화를 고려하기 위해 온도38℃, RH100%인 경우, 해수, pH9.5의 $CaCO_3$ 용액, 건조열 60℃, 20회의 동결융해시험, 디젤유에 4시간 존치시킨후 등 총 6가지 경우에 대해 시간의 변화에 따라 검토하였다.

표14. 10,000시간 내구성 시험결과

환경조건	탄성계수 (msi)	인장강도 (ksi)	파단 변형률(%)	Hardness shore D	질량변화율 (%)
기준값	3.96±0.13	80.5±5.1	2.10±0.18	83±3	
RH 100%, 38℃					
1000시간	4.04±0.13	71.6±2.8	1.82±0.08	83±3	0.56
3000시간	3.94±0.10	67.9±1.9	1.77±0.05	83±2	0.82
10,000시간	3.93±0.18	51.4±2.1	1.31±0.08	84±2	1.09
해수					
1000시간	4.03±0.09	80.8±2.2	2.07±0.06	85±2	0.46
3000시간	4.02±0.04	81.7±1.2	2.09±0.03	84±3	0.57
10,000시간	4.09±0.07	66.0±1.9	1.64±0.04	82±2	0.91
pH9.5 $CaCO_3$, 용액					
1000시간	3.85±0.03	83.2±2.8	2.25±0.11	83±2	0.36
3000시간	4.00±0.13	80.8±4.1	2.11±0.11	85±2	0.53
10,000시간	3.88±0.06	62.4±2.5	1.63±0.08	84±2	0.88
건조열 60℃					
1000시간	3.89±0.06	82.0±1.7	2.17±0.08	85±2	-0.33
3000시간	4.05±0.06	84.8±2.4	2.16±0.09	85±2	-0.44
20회의 동결융해	4.02±0.06	78.0±2.1	2.00±0.06	82±3	0.59
디젤유, 4시간	4.10±0.06	83.4±2.6	2.16±0.06	81±2	

제 6 장 국내외 건설공사 활용전망

6.1 적용대상 시설물

6.1.1 보수공사에의 적용

각종 콘크리트 구조물의 균열부위, 열화된 콘크리트, 결함, 손상, 염해, 해수, 하수, 동결융해, 화학적 작용을 받는 콘크리트 구조물의 표면보호, 내구성 증진, 사용수명의 연장이 필요한 콘크리트, 방수 및 방식이 요구되는 구조물의 보수, 문화재 등의 원형보전이 요구되는 구조물의 보수등에 적용할 수 있다.

6.1.2 보강공사에의 적용(열화, 결함, 손상이 있는 콘크리트 구조의 휨내하력 복원)

- 열화, 결함, 손상이 있는 콘크리트 구조의 휨내하력 복원 및 증진
- 열화, 결함, 손상이 있는 콘크리트 압축부재의 내하력 증진
- 적용대상구조
  - (i) 교량 상부구조의 정모멘트 구간의 휨부재 내하력 보강
  - (ii) 지하철 및 공동구 등의 지하 box 구조의 슬래브, 보, 벽체 및 기둥 보강
  - (iii) 항만구조 및 터널라이닝의 보강
  - (iv) 상하수도 처리시설의 슬래브 및 벽체의 보강
  - (v) 콘크리트 파일, 탱크, silo 등의 보강
  - (vi) 블록.벽돌 구조물, 플랜트 및 건축 콘크리트 구조물의 보강

6.2 경제적 파급효과

CAF 보강공법은 탄소섬유 보강공법 대비 38.6%의 공사비 절감효과를 가짐.(단위 :원/m²)

표15. 경제성 비교검토 결과

공법 구분	금 액	비 고
CAF 복합재 공법	101,754	성균관대 한국산업연구소 (재경부 원가계산용역 등록기관)
탄소섬유 보강공법	164,444	
강판압착 보강공법	254,680	

6.3 외국기술의 수입대체효과와 해외진출

CAF 복합재를 이용한 콘크리트 구조물의 보수 보강공법은 유사공법의 단점을 대부분 보완하였으며 콘크리트 구조물의 보수에 사용되는 각종 표면보수공법, 표면보호공법, 보강공법의 대체공법으로 사용될 수 있기 때문에, 기술료의 절약, 재료 수입의 감소효과, 국내 보수보강 기술의 발전에 기여할 것임. 한편 외국의 유리섬유 기술에 대해 본 신기술은 막대한 기술개발비를 투자하지 않고도 국산 자재를 이용하여 적용이 가능하며 외국의 수준을 앞지르는 공법으로 자리잡게 될 것이다.

■ 참고문헌

1. R. I. Gilbert(1988), **Time Effects in Conctere Structures**
2. H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani(1990), **Fiber Composite Plates Can Strengthen Beams**, Concrete International
3. 일본콘크리트공학협회(1992), **콘크리트의 균열조사, 보수・보강지침**
4. 장동일, 고재원 (1993), "유리섬유 강화 플라스틱관의 휨거동에 관한 연구", **한국콘크리트학회 논문집**. 제5권, 3호 pp187~194
5. 한국콘크리트학회(1994), **포스코내 철근콘크리트 구조물의 안전진단 및 보수・보강지침서(안)**
6. P. H. Emmons(1994), **Concrete Repair and Maintenance Illustrated**, R.S. MEANS COMPANY
7. T.S BOND 건설공업(1994), **탄소섬유 쉬트 보강공법 기술자료**
8. A. Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch, and B. N. Ghaleb(1994), "Strengthening of Initially Loaded Reinfored Concrete Beams Using FRP Plates", **ACI Structural Journal, Vol. 91**, No. 2
9. Mallett, G. P.(1994), **State-of-the-Art Repair of Concrete Bridges**, Thomas Telford
10. 숭실대학교 생산기술연구소(1994), **에폭시접착 강판보강 철근콘크리트보의 역학적 거동에 관한 연구** - 에폭시의 성능실험, pp. 90~100
11. 이장화, 김도겸 외 (1994), "에폭시계 보수재료의 재료특성 및 내구성능분석", **한국콘크리트 학회 학술발표회**, pp 659~664
12. 전의진, 이우일 외 (1995), 최신복합재료, (주) 교학사
13. 심종성(1995), "콘크리트구조물의 보수・보강기법의 최근연구 동향", **콘크리트학회지**, Vol. 7, No.6, pp.64~73
14. 최완철, 연규석, 홍영균(1995), "철근콘크리트 보수・보강 재료 및 공법", **콘크리트학회지**, Vol. 7, No.6, pp.4~13
15. 최롱, 권영진(1996), "내구성 향상을 고려한 철근콘크리트 구조물의 보수기술", **콘크리트구조물의 보수・보강 기술세미나 발표집**, 구조보강연구회, pp.31~69
16. ACI international(1996), **Repair and Strengthening of Concrete Members with Adhesive Bonded Plates**
17. Geboren te Voorhout(1997), **Stengthening of Reinforced Concrete Members in Bending by Externally Bonded Steel Plates**