

特輯

FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보수·보강 공법

황금식*, 박찬기**, 원종필***

Repair and Strengthening Method Using Near Surface Mounted FRP Rods and Overlay

Gum-sic Hwang* and Chan-ki Park** and Jong-pil Won***

Abstract

This paper reports new repair and strengthening method using improved material. This method have two type according to covering thickness of reinforcement. One type is near surface mounted FRP rod. Another type is overlay. Fiber Reinforced Plastic (FRP) materials has become very popular in recent years. FRP material used to rehabilitate many types of structures with superior characteristics such as high strength and stiffness and corrosion resistance. This strengthening method were used FRP rod which have better bond and shear strength than current FRP rod. Development of FRP rod due to 3-D winding system. In addition, Ductile hybrid FRP has a certain plastic deformation and an elongation greater than 3% at maximum load is usually required for steel reinforcement in concrete structures. Moreover this method can be effective repair of base concrete by sprayed polymer mortar.

Key Words: FRP rod, 보수보강, 폴리머 모르타르

1. 서론

최근 반영구적인 구조물이라고 여겨졌던 토목·건축의 콘크리트 구조물들이 설계시의 여건과는 다른 과하중을 받거나 콘크리트에 유해한 환경 등에 노출됨으로 인하여 내하력 및 내구성이 저하되어 콘크리트 구조물의 건전성 및 안전성 측면에서 크게 낙후되고 있다. 예방 유지관리 차원에서 콘크리트구조물의 열화손상이 예측되거나 안전진단 및 점검에 의한 분석결과로부터 안전성에 이상이 있다고 판정을 받은 경우, 적절한 보수·보강대책을 수립하여 구조물의 성능을 향상시켜야 공용연수의 증가에 따른 사용성이 확보된다.

국내의 경우, 1960년대부터 시작된 근대화에 따라 각종 사회간접자본시설 및 주택들이 건설되기 시작하였다. 이후 근 40년이 지난 현 시점에서 당시 건설된 각종 토목,

건축용 콘크리트 구조물이 노후, 파손되어 본래의 기능을 다하지 못하는 경우가 많이 있다. 또한 1990년대의 신도시 개발의 여파에 따라 다량의 건축물이 시공됨으로 인하여 부적절한 재료의 사용과 부실시공이 속출하였다. 그 결과, 교량이나 건축물의 대형 붕괴사고가 발생하였다. 이와 같이 노후화 되거나 부실 시공된 토목, 건축용 철근콘크리트 구조물을 철거하고 새롭게 시공하는 것은 경제적인 측면에서 바람직하지 않으므로 적절한 보수, 보강 공법을 적용하여 원래 구조물이 갖는 기능을 회복시키는 것이 적절하다고 할 수 있다. 보강에 대한 개념은 오래 전부터 있어 왔으나 그 재료나 공법의 선정에서 신중하여야 한다. 즉, 손상의 원인과 그 실태를 정확히 파악하여 적절한 재료를 선정하고 적절한 공법을 적용하여야 그 효과를 거둘 수 있다. 보강공법은 그 재료의 개발과 함께 꾸준히 개발되어 왔다. 특히 휨재의 보강재로서 기존에 사용하던

* 동원건설(주) 기술개발부 대리

** 건국대학교 전임연구원

*** 건국대학교 사회환경시스템공학부 부교수

강판 대신 FRP Sheet, FRP Plate, FRP Rod 등과 같은 외부 환경에 부식이 발생하지 않은 신소재가 개발되면서부터 이를 휨재 밑면에 보강하여 휨 강도를 증진시키거나 전단재에 재축의 직각으로 보강하여 전단강도를 증진시키고자 하는 노력이 국, 내외적으로 활발히 진행되어 왔다. 가장 일반적인 보강방법으로서 강판 또는 FRP Sheet를 에폭시로 접착하는 접착공법이 현장에서 적용되기 시작한 시점은 외국의 경우에는 1970년 중반부터, 국내의 경우에는 1980년대 후반부터 적용되어 왔으나 1990년대에 이르러 본격적으로 국내에서 적용되었다고 볼 수 있다. 일반적으로 FRP 복합소재들은 기존의 강판에 대하여 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 내 부식성 및 내구성이 좋다.
- 동일한 규격의 철근과 비교하여 인장강도/중량이 크다.
- 밀도가 $1.4-2.5 \text{ g/cm}^3$ 으로 철근(7.8 g/cm^3)에 비교하여 매우 경량이고 포장, 설치, 작업, 운반, 저장이 편리하다.
- 콘크리트 구조물이 요구하는 용도에 맞게 특성을 변화시킬 수 있어 보강철근과 비교하여 많은 분야에 응용이 가능하다.

그러나 FRP 복합소재가 상기에서 언급한 다양한 장점을 갖고 있는 것은 사실이나 한편 다음 같은 재료적 단점도 있다.

- 취성적이다.
- 전단에 취약하다.
- 탄성계수는 보강철근보다 일반적으로 적다.
- 수지의 용해로 인한 내화성이 약하다
- 길이방향의 인장력에는 강하나 횡 방향 압축 및 전단강도는 인장강도에 비하여 약하다.
- 철근에 비하여 가격이 비싸다.

기존의 FRP 복합소재가 갖는 상기의 단점 중 콘크리트 구조재의 보강재로서 최대 단점은 그 취성적인 파괴성향에 있다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 기존의 FRP Sheet 또는 FRP Plate를 사용한 표면접착공법의 경우, 파괴 메커니즘 측면에서 최대 기대하중에 이르기 전에 보강판 또는 보강 슈트와 모재 콘크리트 사이의 계면에서의 박리, 단부에서의 탈락 등의 문제를 안고 있다. 이러한 선행파괴(Premature Failure)는 취성적인 파괴성향을 나타냄으로 매우 바람직하지 않으며 현재까지 이를 규명하기 위한 연구 및 실험이 국·내외적으로 광범위하게 진행되고 있다. 표면접착공법은 상기에서 언급한 주요 단점 이외에도 아래와 같은 단점을 갖고 있다. 사용자의 기술 수준에 따라 재료특성치의 분포가 크게 되어 시공성의 확보가 어려울 수 있으며 작업 시 일일이 요철부위를 깨끗하게 정리하여야

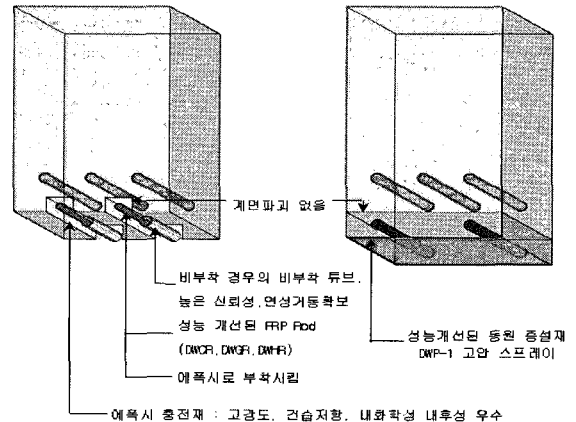


Fig. 1 FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강공법의 개요.

하므로 결정적으로 보강 효율이 타 공법들에 비하여 뒤떨어진다. 부모멘트가 작용하는 곳에는 마감을 들어내어야 하는 등, 시공적인 측면과 관련하여 이에 대한 보강에 적용하기 어렵다; 보강 전에 균열의 크기 및 분포, 열화의 정도, 철근 노출의 정도 등을 조사하여 접착공법의 적용성에 대한 사전 조사가 필요하며 경우에 따라 방청처리, 불량부분 제거, 부분적 교체, 균열 보수 등의 보강 전 사전작업이 선행되어야 하는 단점이 있다.

따라서 상기와 같은 재료적, 보강역학적인 측면에서의 단점을 갖는 기존의 FRP 슈트보강법을 극복하고 재료물성 자체의 우수성을 확보함과 동시에 보강체의 안정적인 파괴양상을 확보할 수 있는 신공법을 개발하고자 노력이 국내외적으로 활발하게 이루어지고 있다.

본 고에서는 Rod 형태의 FRP 신보강재료 개발과 함께 개발된 재료의 우수성을 극대화 할 수 있는 효율적인 보강에 초점을 맞추어 국내외의 전문 연구진에 의해서 개발된 우수한 보수보강 신공법인 신기술 제 404호 FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보수보강 공법의 재료 및 공법의 특성과 정적 및 동적 실험을 통한 공법 검증, 및 설계 과정 및 현장 적용 사례 등을 소개하고자 한다.

2. FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보수·보강공법

2.1 공법의 개요

FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보수보강 공법은 기존 강판 및 FRP 슈트 접착공법의 단점을 해결하기 위하여 개발된 공법으로 크게 두가지 공법으로

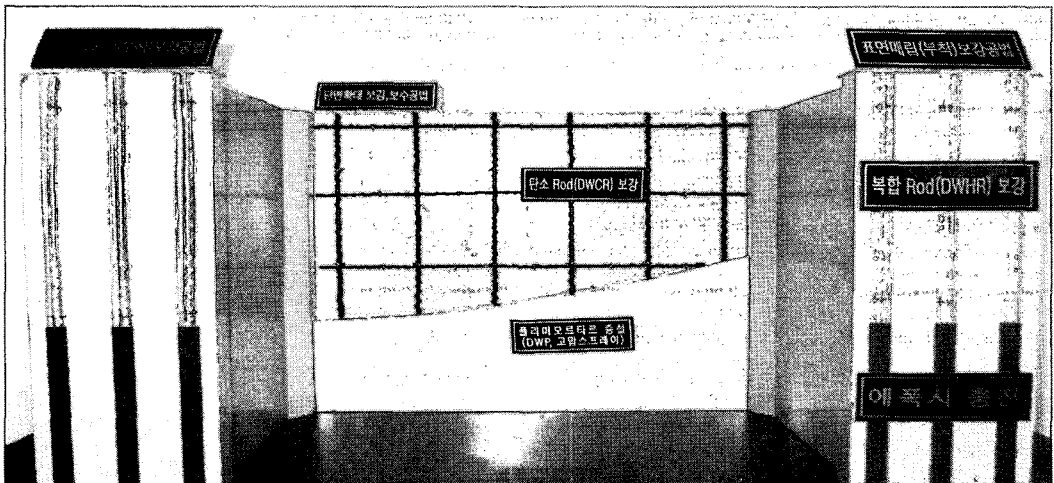
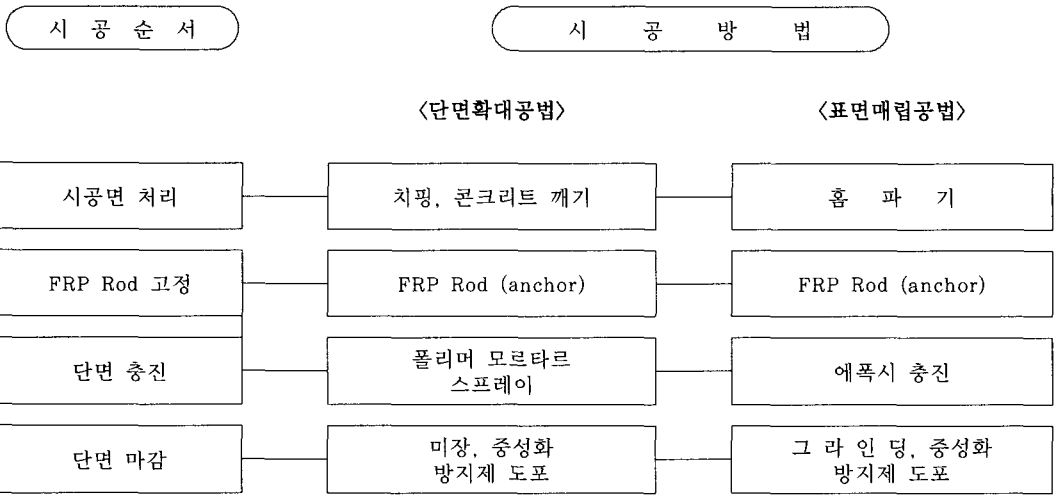


Fig. 2 FRP를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보수보강공법의 시공흐름.

나눌 수 있다. 첫 번째는 철근의 배근량 부족으로 내력 저하시 적용할 수 있는 표면 매립 보수·보강공법과 열화 등에 의한 단면결손과 배근 부족시 적용 할 수 있는 단면 확대 복합 보강 공법이다<Fig. 1>.

2.2 시공흐름

FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보수·보강공법의 적용 순서는 <Fig. 2>와 같다. 첫 번째로 열화된 단면을 치핑 및 흡파기를 실시하고, 두 번째로 고압수 세척 및 시공면 처리를 실시하며, 세 번째로 FRP Rod를 삽입 고정하고, 네 번째로 에폭시 주입기를 이용하여 에폭시를 주입하며, 마지막으로 고압스프레이식 공법을 이

용하여 폴리머 모르타르로 단면을 확대한다.

3. FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보수·보강공법의 성능평가

3.1 FRP Rod

본 공법에서 보강재로 사용되는 FRP Rod는 취성적인 FRP복합재 대신에 연성을 갖는 FRP를 적용하며(DWHR), 기존의 FRP 복합재료의 재료적인 단점 중에 하나인 전단 저항성과 부착성능을 향상시킨 우수한 FRP Rod(DWCR, DWGR)를 사용하였다<Fig. 3>.

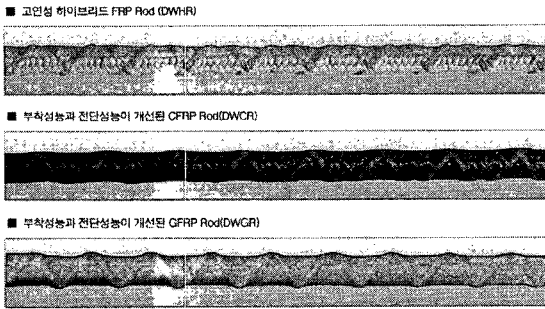


Fig. 3 동원 FRP Rod의 형상.

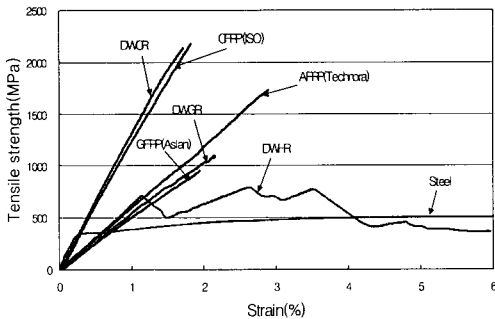


Fig. 4 인장강도-변형률 거동.

Table 1 동원 FRP Rod의 인장강도

구 분	DWCR (CFRP)	DWGR (GFRP)	DWHR (복합)
항복강도 (MPa)	-	-	870.3
극한강도 (MPa)	1,857.0	1,207.0	1,224.4
항복변형률 (%)	-	-	1.35
극한변형률 (%)	1.79	3.00	3.5
탄성계수 (MPa)	121,000.0	40,233.3	66,300.0

<Fig. 4>에서 볼 수 있듯이 동원 FRP Rod는 제품 특성과 사용재료의 종류에 따라 세 가지로 구분할 수 있다. DWHR은 기존 FRP Rod가 가지고 있는 취성적 성질을 보완하여 고연성을 갖도록 하는 제품이며, DWCR과 DWGR은 각각 탄소섬유와 유리섬유를 이용하여 개발된 제품이고 FRP Rod의 표면형상을 변화시켜 콘크리트와 전단성능 및 부착성능을 획기적으로 향상시켰다. 동원 FRP Rod의 재료 특성 및 성능을 살펴보면 다음과 같다.

3.1.1 인장특성

미국 ACI440 기준에 따라 250KN 용량의 UTM으로 인장

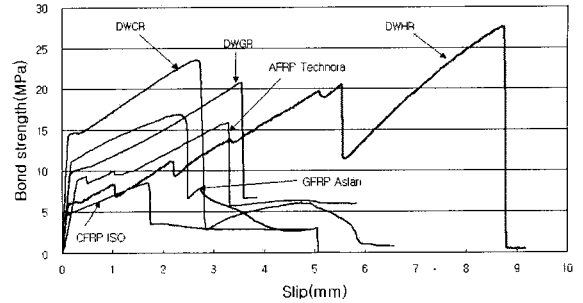


Fig. 5 동원 FRP Rod의 부착강도-slip 거동.

Table 2 동원 FRP Rod의 부착강도

종 류	부 착 강 도
DWCR(탄 소)	21MPa
DWGR(유 리)	23MPa
DWHR(복 합)	28MPa

실험을 실시하였으며 인장성능 결과를 살펴보면 <Fig. 4> 및 <Table 1>과 같이 외국에서 사용되고 있는 FRP Rod보다 동등, 또는 그 이상의 인장특성을 나타내며 특히 고연성 복합 FRP Rod(DWHR)의 경우 국내 최초로 연성을 확보하였음을 알 수 있다.

3.2 부착특성

ACI-440 기준에 따라 직접부착실험을 실시하였으며, 부착강도는 $T_b = \frac{P}{Ab}$ 로 계산하였으며 이때 P는 하중, $Ab = \pi \cdot db \cdot Lb$ 이며 여기서, db=유효직경, Lb = 정착길이 이다. 동원 FRP Rod의 부착특성은 <Fig. 5> 및 <Table 2>와 같으며 부착성능이 기존 FRP Rod에 비하여 매우 우수함을 알 수 있다.

3.2 폴리머 모르타르(DWP-101, 102)

본 공법의 단면증설을 위한 폴리머 모르타르(DWP) 품질관리가 용이한 기계시공으로 고압의 스프레이식 공법에 용이하게 개발된 재료로 DWP-1의 장점은 다음과 같다.

- 현장에서 물만 혼합하면 되므로 재료의 균질성 확보가 용이하다.
- 기공이 적다.
- 압축강도, 휨강도, 정착강도가 우수하여 증설보강재로서의 조건을 갖추고 있다.

Table 3 동원 폴리머 모르타르 (DWP 101, 102)의 특성

종 류	결과치
압축강도(MPa)	59.3
휨강도(MPa)	13.2
부착강도(MPa)	3.3
열팽창계수($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	13.23
염소이온침투성(Coulomb)	486(very low)

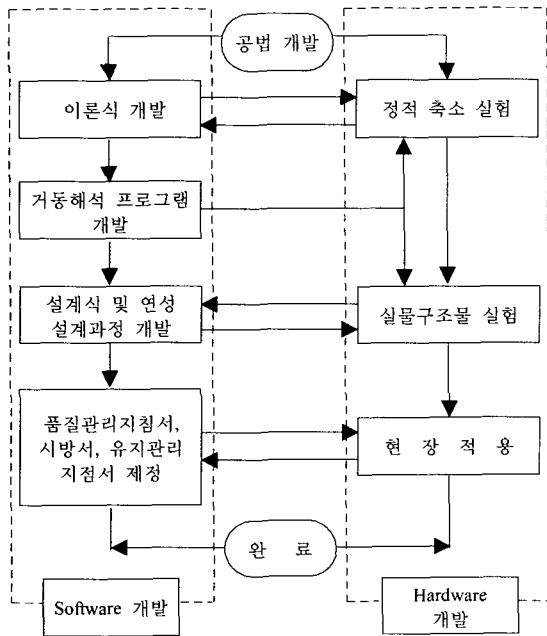


Fig. 6 FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강 공법의 개발 과정.

- 열화원인에 따른 동일 계열의 다양한 재료의 적용이 가능하다.
- 고압의 스프레이식 공법을 이용하여 품질관리가 용이하다.

이와 같은 스프레이용 폴리머 모르타르의 물리·역학적 특성은 <Table 3>과 같으며, 매우 우수한 역학적 특성을 나타냄을 알 수 있다.

3.3. 보강공법의 성능 평가

철근 콘크리트 구조물의 보수 및 보강을 위한 FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보강공법을 개발하기 위한 과정은 Fig. 7과 같다. FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보강 공법은 두 가지 측면을

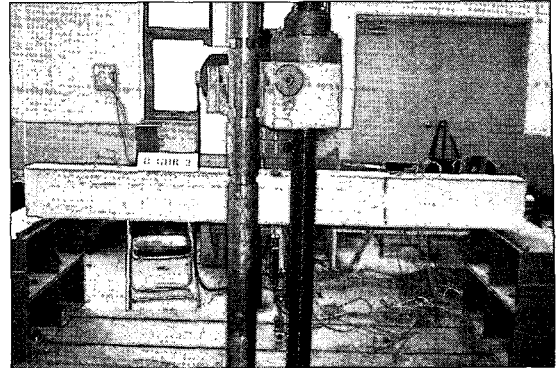


Fig. 7 정적 축소 실험 모습.

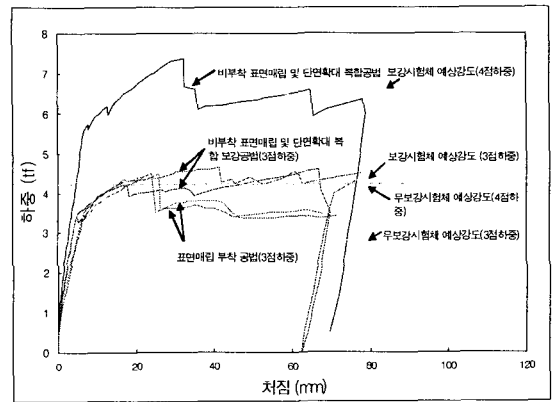


Fig. 8 하중-처짐 결과.

병행하여 개발되었다. 첫 번째는 Software의 측면은 설계 과정 개발 및 품질관리지침, 시방서, 유지관리 지침의 제정이고 두 번째는 Hardware 측면으로 FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면 확대 복합 보강 공법의 실험적 검증하는 과정이다. 설계 이론식 및 거동 프로그램을 개발하기 위하여 정적 축소 실험을 실시하였으며, 정적 실험 결과를 기본으로 설계식 및 연성 설계과정을 개발하였고 이를 이용하여 실물 구조물 실험을 실시하였다. 실험결과를 기본으로 하여 품질관리 지침 및 시방서, 유지관리 지침서를 제정 한 후 현장에 적용하여 그 성능을 평가하였다.

3.3.1 정적축소실험

FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강공법의 이론식 및 거동 해석 프로그램을 개발하기 위하여 정적 축소 실험을 실시하였다(Fig. 7).

실험결과 <Fig. 8>와 같이 표면매립 보강공법 및 단면확대 복합공법 모두 예상강도를 만족하였으며 단부탈락, 계면파괴, 등과 같은 선행파괴(premature failure)가 발생하지

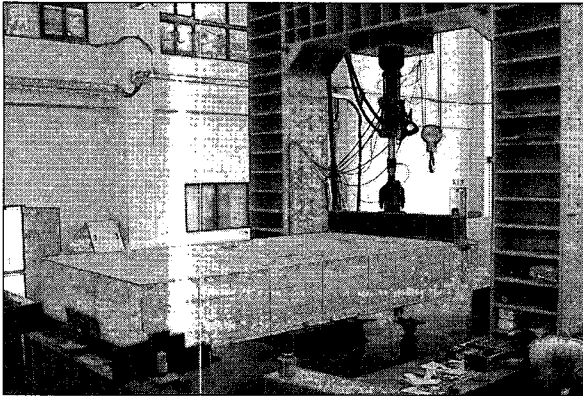


Fig. 9 실물 구조물의 정적/동적 실험 모습.

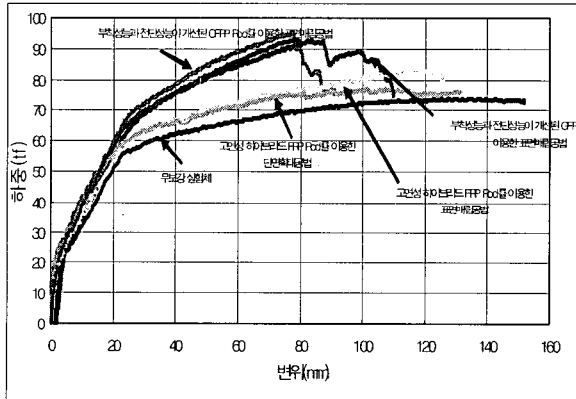


Fig. 10 실물 구조물의 정적 하중-처짐 곡선.

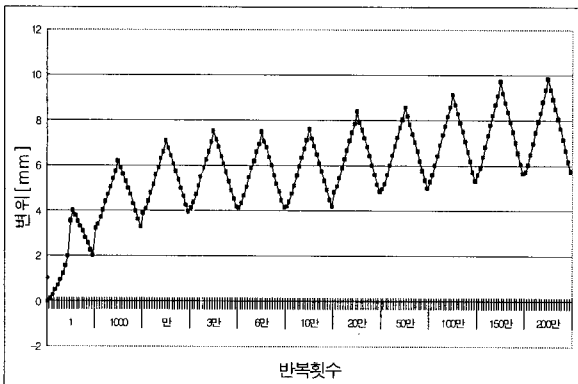


Fig. 11 FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강 슬래브 실험체의 반복하중 횟수 별 처짐곡선도.

않아 그 신뢰성이 입증되었다. 특히 표면매립 보강공법의 경우 연성이 확보되었다.

3.3.2 실물 구조물의 정적·동적 실물실험

안전성 확보를 위한 연성설계 및 설계식을 개발하기 위하여 한국건설기술연구소에서 실물구조물 시험을 실시하였다<Fig. 9>. 시험결과는 <Fig. 10> 및 <Fig. 11>에서와 같이 모두 정적/동적 예상강도를 만족하였고 안정성, 사용성, 연성도 측면에서 모든 기준 조건을 만족하였다.

3.3.3 현장 적용

FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강 공법의 현장 적용성을 평가하고자 실제 교량을 대상으로 하여 설계 및 적용성 실험을 실시하였으며 보강 후 재하 실험을 실시하였다. <Fig. 12>은 FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강 공법의 현장 적용성 시험을 위한 시공 과정을 나타낸다.

현장 재하실험결과는 <Table 4>와 같다. 시험결과 FRP Rod를 용한 표면 매립 및 단면 확대 보강 공법은 내하력의 저하된 구조물 및 보수가 필요한 구조물에 적용되어 그 성능이 매우 우수함을 알 수 있었다.

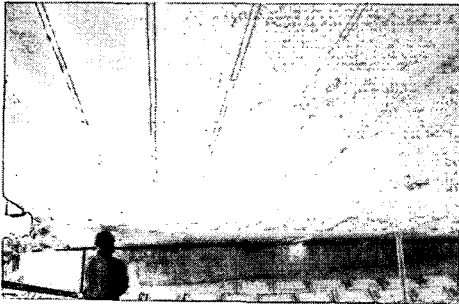
Table 4 내하력 산정 결과.

부재	보강 전			보강 후		
	기본 내하력 (Po)	처짐 보정 계수 (Ks)	공용 내하력 (Po')	기본 내하력 (Po)	처짐 보정 계수 (Ks)	공용 내하력 (Po')
S ₁ 경간	DB-20	1.43	DB-28	DB-25	1.48	DB-37
S ₂ 경간	DB-20	1.43	DB-28	DB-26	1.48	DB-38

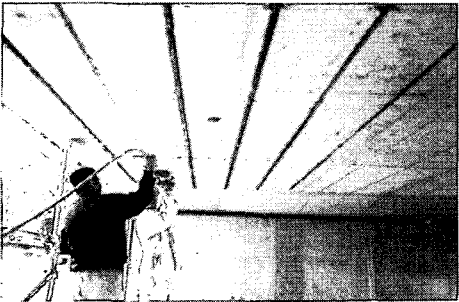
4. FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강공법의 장점

FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보수·보강 공법은 철근콘크리트 구조물의 보수 및 보강을 위하여 개발된 공법으로 표면매립 및 단면확대로 최대 강도 후 연성이 확보되고, 전단저항성 및 부착성능이 우수하여 성능향상도 도모할 수 있으며 신뢰성에 따른 높은 안전율을 확보할 수 있다. 또한 FRP Rod를 정착하기 위한 예폭시 주입 시 기존 구조물의 균열이 봉합되므로 구조물의 유지관리가 용이하다.

• 표면매립보강



< 콘크리트 절단 >



< FRP Rod 보강 >



< 에폭시 주입구 설치 >

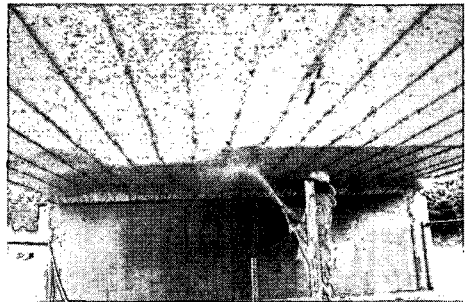


< 완 공 >

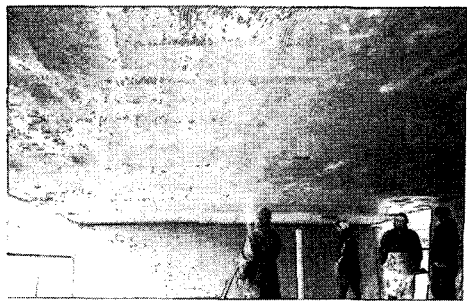
• 단면확대 복합 보강공법



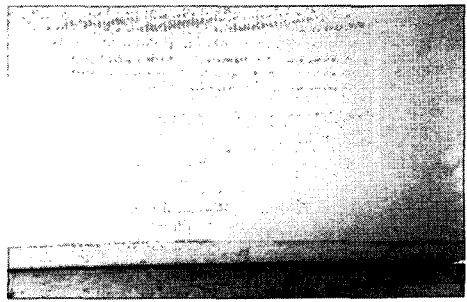
< 콘크리트 치핑 >



< FRP Rod 보강 및 고압수 세척 >



< 단면확대(폴리머 모르타르) >



< 완 공 >

Fig. 12 FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강 공법의 현장 시공.

5. 기술의 파급효과

고연성 하이브리드 FRP Rod를 이용한 비부착 표면매립 및 단면확대 휨 보강공법은 세계 최초로 개발된 공법으로 기존의 국내외에서 널리 사용되고 있는 FRP 보강재료(Rod, 슈트, 판 등)를 이용한 보강공법들이 보강 후 구조물의 취성 거동으로 안전성 및 신뢰성에 문제점을 가지고 있는데 비하여 본 신기술공법은 연성거동을 하는 고연성 하이브리드 FRP Rod를 이용하고 이를 구조물에 적절한 공법으로 보강 후 구조물의 연성거동을 확보함으로써 안전성 및 신뢰성을 확보할 수 있는 우수한 공법이므로 관련업체와 비교하여 충분한 기술경쟁력을 갖추게 되어 수입에 따른 기술사용료의 절약 및 국내 보수보강기술의 발전에 기여할 것이다.

또한 건국대학교를 비롯한 학계의 연구위원들과 협력하여 재료의 단점을 보완하고 사용영역을 확대할 수 있도록 연구개발을 지속적으로 하여 종래에는 신설구조물에 철근을 대체하여 적용할 수 있는 설계식과 기준을 확립할 것이다.

Table 5 FRP Rod를 표면매립 및 단면 확대 복합 보수보강공법의 활용분야

분류	구조물명	세부 적용 대상
토 목	교 량	슬래브, 교대, 교각, 보, 주탑
	농업용수리시설	수로, 양수장, 도수터널, 배수문,
	하수시설	암거, 하수처리장
	상수시설	취수탑, 배수지, 정수장, 도수터널
	발전시설	댐, 도수터널, 공동교
	항만시설	부두(안벽)
	철도시설	교량, 터널
플랜트시설	각종 탱크, 굴뚝	
건축	건축	슬래브, 보, 기둥

6. 활용 분야

FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강공법의 활용분야는 대부분의 열화된 콘크리트 구조물의 보수 보강 및 내하력이 저하된 콘크리트 구조물의 보강에 적용되어 우수한 성능을 발휘하며 구체적인 적용분야는 <Table 5> 과 같다.

7. 맺음말

토목·건축의 콘크리트 구조물들은 설계시의 여건과는 다른 과하중을 받거나 콘크리트에 유해한 환경 등에 노출됨으로써 내하력 및 내구성이 저하되어 구조물의 건전성 및 안전성 측면에서 문제가 발생하고 있다. 예방 유지관리 차원에서 콘크리트구조물의 열화손상이 예측되거나 안전진단 및 점검을 실시하여 안전성에 이상이 있다고 판정될 경우 적절한 보수 및 보강 대책이 요구된다. FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강공법은 내하력 및 내구성이 저하된 모든 구조물에 적용하기 위하여 개발된 공법으로 상기의 내용을 기본으로 하여 그 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 기존의 FRP 재료에 의한 보강공법은 기본적으로 (1) 원하는 최종파괴에 이르기 전에 선행파괴의 위험이 있으며 (2) 취성적인 파괴양상을 항상 보인다. 또한 기존의 FRP Rod의 경우, (1) 재료 자체가 취약한 전단강도를 가지며 (2) 콘크리트 모재와의 부착강도도 약한 것이 일반적이다.
- FRP Rod를 이용한 표면매립 및 단면확대 복합 보강공법은 상기와 같은 재료적, 공법적 단점을 갖는 FRP 재료로 보강되는 구조물의 성능을 개선하고자 (1) 새로운 개념의 FRP Rod 개발과 (2) 이를 적용한 새로운 공법을 개발하고자 하였다.
- Composite 이론 및 Pultrusion/브레이딩/필라멘트 와인딩 기법에 근거하여 3차원 제직으로 본 기술에서 개발된 FRP Rod는 기존의 FRP Rod 보다 (1) 우수한 전단강도를 확보하고, (2) 부착강도가 증진되었으며, (3) 고연성 복합 FRP Rod의 경우, 국내 최초로 연성을 확보할 수 있는 FRP 복합재로서 새로운 개념의 FRP Rod라 할 수 있다.
- 개발된 FRP Rod의 효율적인 보강재로서의 적용을 위하여 보강기법으로 표면매립공법 및 단면확대 복합공법이 개발되었다. 이 공법은 현재 광범위하게 토목, 건축 철근콘크리트 휨보강에 적용되고 있는 FRP 슈트 표면접착 보강공법에 비하여 (1) 선행파괴가 없고, (2) FRP Rod의 보강갯수 증가에 따른 강도저감이 나타나지 않는 매우 우수한 공법이다. 또한 본 기술개발에서는 세계 최초로 개발된 고연성 복합 FRP Rod를 적용하여 취성을 극복하고 연성을 확보할 수 있는 새로운 개념의 보강법을 실험적, 이론적으로 제시하였다.
- 개발된 신기술은 기존의 재료 및 공법과 비교하여 기술성, 현장 적용성, 경제성, 환경성에서 뛰어나며 추후 토목, 건축의 다양한 철근콘크리트 구조물의 보수보강 공법으로 적용성 우수하다.

참고문헌

- 1) 박찬기, 원종필, 유정길, “화학적 환경에 노출된 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 장기 효과,” 콘크리트학회 논문집, 제 15권, 제 6호, 2003.12, pp. 811-819.
- 2) 원종필, 박찬기, “콘크리트 보강용 FRP 보강근의 수분 민감성 및 열화 특성,” 대한토목학회논문집, 제 24권, 제 2A호, 2004년 3월, pp 381-390.
- 3) 원종필, 박찬기, 고연성 “하이브리드 FRP 보강근 및 인장 거동 예측 모델 개발,” 대한토목학회 논문집, 제 24권, 제 3A호, 2004년 5월, pp 491-500.
- 4) 원종필, 박찬기, 강주원, “콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 설계를 위한 환경영향계수의 제안,” 한국콘크리트학회논문집, 제 16권, 제 4호, 2004년 8월, pp. 529-539.
- 5) 원종필, 박찬기, “축진 열화 환경에 노출된 콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 부착 특성,” 대한토목학회논문집, 제 24권, 제 5A호, 2004년 9월, pp. 969-979.
- 6) 동원건설(주), “FRP Rod를 이용한 비부착 표면매립 및 단면 확대 휨보강 공법,” 건설신기술, 제 404호 보고서.
- 7) 동원건설(주), “고연성 하이브리드 FRP Rod를 이용한 비부착 표면매립 및 단면확대 복합 보강 공법,” 2003년도 한국구조물학회 기술상 보고서.
- 8) 동원건설(주), “콘크리트 구조물 보수·보강 공법,” 2004년도 한국콘크리트학회 기술상 보고서.
- 9) Shahawy, M., Chaallal, O., Beitelman, T.E. and Adna, E.S., “Flexural Strengthening with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites of Preloaded Full-Scale Girders,” *ACI Structural Journal*, Vol.98, No.5, September-October 2001, pp.735-742.
- 10) Plevris, N., Triantafillou, T.C., and Veneziano, D., “Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 11, No.7, 1995, pp.1037-1044.
- 11) Arockiasamy, M., Sowrirajan, R., Shahawy, M. and Beitelman, T.E., “Repair of Damaged Pretensioned Solid Slab Using CFRP Laminates,” *Non-metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Edited by Taerwe,L., Rilem, 1995, pp. 492-500.
- 12) Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R., “RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 11, November 1991, pp.3417-3433.
- 13) Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R., “RC Beams Strengthened with FRP Plates. II: Analysis and Parametric Study,” *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 11, November 1991, pp. 3434-3455.
- 14) Grace, N.F., “Continuous CFRP Prestressed Concrete bridges,” *Concrete International*, Oct. 1999, pp. 42-47.
- 15) Alkhrdaji, T., Nanni, A., Chen, G. and Barker, M., “Solid RC Decks Strengthened with FRP,” *Concrete International*, Oct. 1999, pp. 31-41.
- 16) Lorenzis, L.D, and Nanni, A., “Strengthening of RC Structures with Near Surface Mounted FRP Rods,” *Report of Center for Infrastructure Engineering Studies*, University of Missouri-Rolla, CIES 99-10, pp. 123
- 17) Khalifa, A., Alkhrdaji, T., Nanni, A. and Lansburg, S., “Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement,” *Concrete International*, Oct. 1999, pp. 49-54.