

## 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능 평가

### Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Beams using Hybrid Retrofitting with Groove and Embedding FRP Rod and CFRP Sheet

하 기 주<sup>1)</sup>  
Gee-Joo Ha

하 영 주<sup>2)\*</sup>  
Young-Joo Ha

#### Abstract

In this study, experimental research was carried out to evaluate the structural performance of the reinforced concrete beam using hybrid retrofitting with two materials (groove and embedding FRP rod, CFRP sheet) in existing reinforced concrete buildings. Seven reinforced concrete beams, retrofitted groove and embedding FRP rod (NER series) and groove and embedding FRP rod with CFRP sheet (NERL series), and standard specimen (NBS) were constructed and tested under monotonic loading. Design parameters of test specimens are the amount of groove and embedding FRP rod and lapping CFRP sheet.

Test results showed that the maximum load carrying capacity of specimens with groove and embedding FRP rod and groove and embedding FRP rod with CFRP sheet (NERL series) were increased the by 12~46% and 22~77% respectively in comparison with the standard specimen NBS. Test specimens NER series were failed with the adhesion slip and concrete cover separation. And test specimens NERL series were failed with the adhesion slip due to the confining effect of lapping CFRP sheet.

Keywords : R/C beam, Groove and embedding FRP rod, CFRP sheet, Structural performance, Hybrid retrofitting

#### 1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시간이 지남에 따라 사용기간 동안 발생하는 용도변경, 구조변경과 같은 하중증가 요인과 진동 등에 의한 균열, 변형 등이 발생하여 구조성능, 사용성, 내구성 등이 저하된다. 따라서 노후화되고 결함이 발생한 철근콘크리트 구조물의 안전성 확보 및 사용년한을 늘리기 위해서는 적절한 진단과 적정 보강재료 및 기술을 이용하여 기존 구조물을 보강하여야 한다 (Ha et al., 1997).

현재 철근콘크리트 구조물의 일반적인 보강공법은 강판 보강공법과 FRP계 연속섬유 보강공법으로 나눌 수 있다. 강판 보강공법은 보강 후 부재 단면 크기의 변화가 거의 없는 장점이 있지만, 무거운 중량으로 인하여 시공성이 떨어지고 내부식성 및 내화능력이 취약하며, 취성적인 보강판 탈락현상을 보인다. 그리고 FRP계 연속섬유 (탄소섬유시트, 탄소섬

유판 등) 보강공법은 강판보다 중량이 가벼워 시공이 용이하고, 재료적으로 내부식성, 내화학적 및 내피로성이 우수하여 보강 공사시 많이 사용되고 있다. 하지만 강판 보강공법과 같이 콘크리트 표면에 부착시키는 것으로 보강재의 부착성에 크게 영향을 받기 때문에 콘크리트로부터 탈락되기 쉬워 강판 만큼의 보강효과를 얻기 힘들고, 정확한 보강효과를 예측하기 힘든 단점이 있다 (Ha et al., 2008; Ha et al., 1997; Ha et al., 2002; Ryu et al., 2008; Kim et al., 2007).

최근에는 이와 같은 문제점을 개선하고자 FRP판, FRP봉 등을 표면에 매입하는 보강공법 (near surface mounted retrofitting)에 관한 연구가 진행되고 있다. 이 공법은 보강재를 표면에 매입함으로써 현장 시공성이 우수하며, 외부적인 환경에 민감하지 않고, 콘크리트 부착과괴의 영향이 적은 것으로 보고되고 있다. 그러나 표면매입공법은 기존공법과 같이 부착과괴가 존재하고 일정크기의 흠을 형성해야 하는 단점이 있다

1) 정회원, 경일대학교 건축학부 교수, 사)건설기술정책연구원 원장, 공학박사  
2) 정회원, 경일대학교 건축공학과 박사과정, 코리아이앤씨(주) 대표, 교신저자

\* Corresponding author : gns5121@naver.com

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

(Im et al., 2009; Kang et al., 2008; Kim et al., 2004).

따라서 본 연구에서는 기존 탄소섬유보강재와 재료역학적 인 성질은 동등하면서 내구성, 부착성능, 시공성 및 품질관 리가 우수한 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 적용한 공법을 개발하여, 이를 사용한 철근콘크리트 보의 구조성능 을 평가하고, 향후 철근콘크리트 구조물의 구조성능 개선을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능 평가 실험

### 2.1 표면요철 매입형 FRP봉

표면요철 매입형 FRP봉 보강공법은 Fig. 1과 같이 기존 철근콘크리트 구조물에 홈을 파서 보강재를 매입함으로써 보강재의 탈락현상을 방지하고 모재와의 충분한 부착성능 확보와 구조물과 보강재의 완전 일체화되는 효과가 우수하다. 따라서, 본 공법은 기존 보강공법에 비하여 구조성능의 개선은 물론이고 시공과 품질관리가 용이하고, 보강후 구조 물의 고내구성을 확보할 수 있으며, 또한 보강재의 국산화로 수입산 보강재를 이용한 기존 탄소섬유 보강공법보다 경제 성이 우수하므로 표면요철 매입형 FRP봉 보강공법은 기존 보강공법의 문제점을 개선한 매우 우수한 보강공법인 것으 로 사료된다.

### 2.2 실험계획

철근콘크리트 보에서 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시 트의 복합 보강 효과를 규명하기 위하여 표준실험체에 대하여 매입형 FRP봉의 보강량과 CFRP시트 연속보강 유무를 실험변수로 적용하여 구조성능을 평가하였다. 실험체의 크기

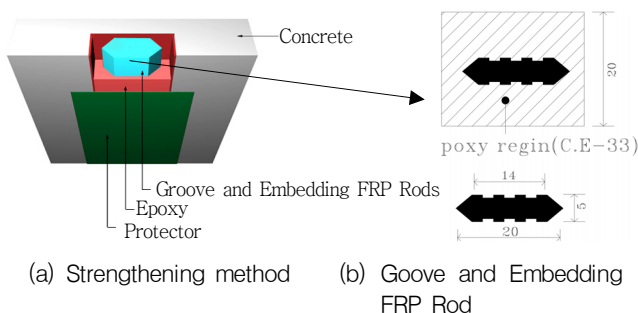


Fig. 1 Strengthening method of Groove and Embedding FRP Rod

는 폭 200mm, 춤 300mm, 유효춤 250mm, 스패 2,200mm, 순스패 2,000mm, 인장철근비 0.01이다. 설계강도는 24MPa이며, 인장축 철근은 2-HD16, 1-HD13, 압축축 철근은 2-HD13을 사용하였다. 매입형 FRP봉의 길이는 1800mm로 설계하였다.

### 2.3 실험체의 형태 및 변수

철근콘크리트 보의 설계는 ACI building code (318-11) 및 국토부 제정 콘크리트 구조설계기준에 따라 설계되었고 철근콘크리트 보 실험체의 형태 및 변수는 Table 1과 같고, 각 실험체의 상세는 Fig. 2에 나타나 있다 (ACI et al., 2011).

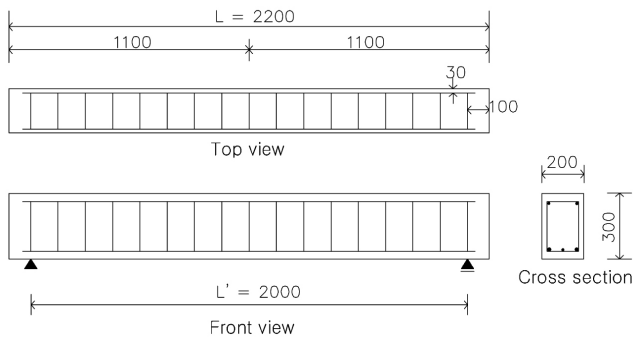
### 2.4 사용재료 특성

본 연구에 사용된 콘크리트는 보통포틀랜드 시멘트와 최대 골재크기가 25mm인 쇄석골재를 사용하였으며, 철근은 국내에서 생산된 SD400 철근이 사용되었으며, 철근의 재료 특성은 Table 2와 같다.

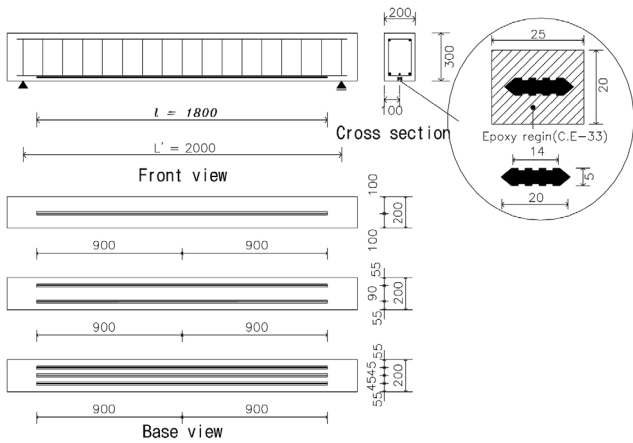
콘크리트의 배합표는 Table 3과 같다. 각 실험체는 콘크리트 타설과 함께 압축강도 실험용 원주형 공시체  $\phi 100 \times 200$ mm 몰드를 사용하여 KS F 2405에 따라 몰드를 3개 층으로 나누어 각 층을 25회씩 붓다짐하여 제작하였다. 그리고 재령 28일까지 수증양생을 실시하였으며, 압축강도 시험은 U.T.M을 사용하였다. 그리고 실험결과는 5개의 공시체의 실험결과에 대한 평균값으로 하였으며 Table 4와 같다.

Table 1 Design parameters of test specimens

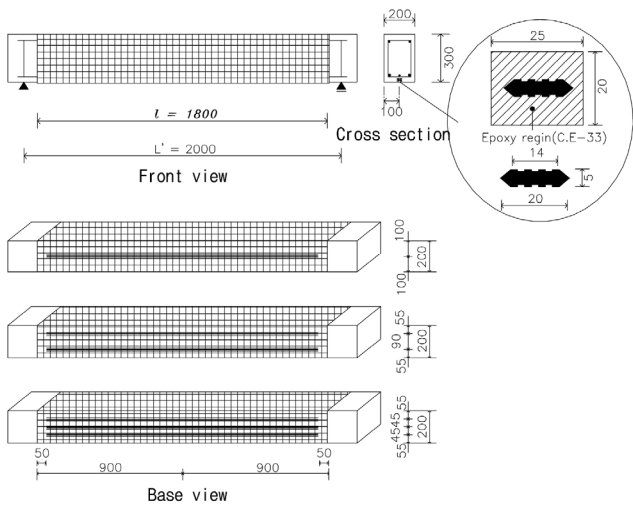
Specimen	Main objectives and design parameters
NBS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ACI building code 318-11</li> <li>• KBC 2011</li> </ul>
NER1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Groove and Embedding FRP rod 1EA (Spacing 100mm, Embedded depth 20mm)</li> </ul>
NER2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Groove and Embedding FRP rod 2EA (Spacing 70mm, Embedded depth 20mm)</li> </ul>
NER3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Groove and Embedding FRP rod 3EA (Spacing 50mm, Embedded depth 20mm)</li> </ul>
NER1L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Groove and Embedding FRP rod 1EA (Spacing 100mm, Embedded depth 20mm)</li> <li>• CFRP Sheet (Continuous lapping of a side and bottom : 1.8m)</li> </ul>
NER2L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Groove and Embedding FRP rod 2EA (Spacing 70mm, Embedded depth 20mm)</li> <li>• CFRP Sheet (Continuous lapping of a side and bottom : 1.8m)</li> </ul>
NER3L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Groove and Embedding FRP rod 3EA (Spacing 50mm, Embedded depth 20mm)</li> <li>• CFRP Sheet (Continuous lapping of a side and bottom : 1.8m)</li> </ul>



(a) NBS



(b) NER series



(c) NERL series

Fig. 2 Detail and retrofitting method of each specimen

그리고 사용된 CFRP시트, 표면요철이 있는 매입형 FRP Rod와 접착용 수지의 재료 특성 및 역학적 성질을 Table 5~Table 8과 같다.

Table 2 Material properties of Reinforcing Bar

Bar Size	Yield strength		Maximum Strength		Ec (Mpa)	Extensibility (%)
	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_{max}$		
D10	478.8	0.00237	605.7	0.198	$2.1 \times 10^5$	29.3
D16	464.7	0.00236	600.4	0.283	$2.0 \times 10^5$	29.6
D19	473.8	0.00229	614.9	0.279	$2.0 \times 10^5$	29.6

Table 3 Mix Proportion of Concrete

Compressive strength (MPa)	W/C (%)	S/A (%)	Unit Weight ( $\text{kg/m}^3$ )				Slump (cm)
			Cement	Water	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	
25.9	52	49.1	363	172	643	906	150

Table 4 Test result of concrete strength

Age (day)	Slump (mm)	$f_{ck}$ (MPa)	$E_c$ ( $\times 10^4$ MPa)
28	150	25.9	2.0

Table 5 Material Properties of CFRP Sheet

Index	Weight ( $\text{g/m}^2$ )	Specific Gravity ( $\text{g/cm}^3$ )	Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)	Tensile Elastic Ratio (MPa)	Damage Strain Ratio (%)
Average	200	1.82	0.11	2,286	198,869	1.11

Table 6 Material Properties of CFRP Rod

Index	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Damage Strain Ratio (%)
Average	2,296	198,785	0.32	1.11

Table 7 Material Properties of Resin of CFRP Sheet

Index	Available Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Available Time (min)	Drying Time (hours)	Curing Time (day)	Base Resin : Hardener	Viscosity	Spec
Primer	15~25	60	9	-	10 : 5	1200 less	solvent free
Impregnation Resin	15~25	60	-	7	10 : 5	3000 ~ 5000	solvent free

Table 8 Material Properties of Resin of CFRP Rod

Index	Available Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Available Time (min)	Drying Time (hours)
Epoxy	5~25	40 ( $35^{\circ}\text{C}$ )	30 ( $35^{\circ}\text{C}$ )

## 2.5 실험방법 및 장치

### 2.5.1 실험방법

본 연구에서는 철근콘크리트 보의 구조성능 개선을 위하여 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강하여 평가하였다. 이를 위하여 구조실험용 프레임을 제작하여 설치하였으며, 실험체의 설치상태 및 가력장치는 Fig. 3과 같다. 실험체에 작용하는 하중제어를 위하여 2점 가력하였다. 하중은 인장철근이 항복할 때까지는 하중제어로 재하를 하였고, 인장철근이 항복한 이후에는 보 중앙부의 처짐으로 변위제어를 하여 실험체가 최종 파괴시까지 재하하였다.

### 2.5.2 측정장치의 부착위치

각 실험체에 작용하는 하중에 따라 표준 철근콘크리트 보 및 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트로 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하기 위하여 스트레인게이지를 Fig. 4와 같이 부착하였고, 하중작용점에 작용하는 하중과 보의 중앙부 처짐을 측정하기 위하여 변위계 (L.V.D.T)를 Fig. 3과 같이 설치하였다.

## 3. 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능 평가 및 개선

### 3.1 하중-변위 특성

#### 3.1.1 표준실험체

표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 효과를 규명하기 위하여 표준 철근콘크리트 보 실험체 NBS가 최종 파괴될 때까지 재하하였으며, 표준실험체의 하중-변위

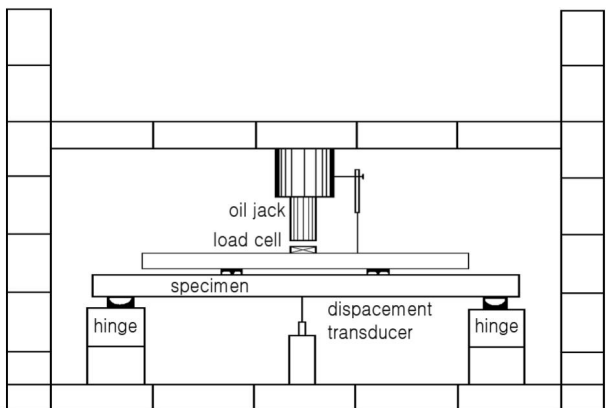


Fig. 3 Test setup of test specimen

곡선은 Fig. 5와 같다. 초기균열은 하중 43kN, 처짐 0.81mm에서 보 중앙부에 발생하였으며, 이후 순수 휨 구간에서 다수 발생되었다. 그리고 하중 103.1kN, 처짐 3.3mm에서 인장철근이 항복하였고, 전단균열은 135kN에서 발생하였다. 최대하중 241.8kN에서 콘크리트 탈락이 진행되면서 변형이 크

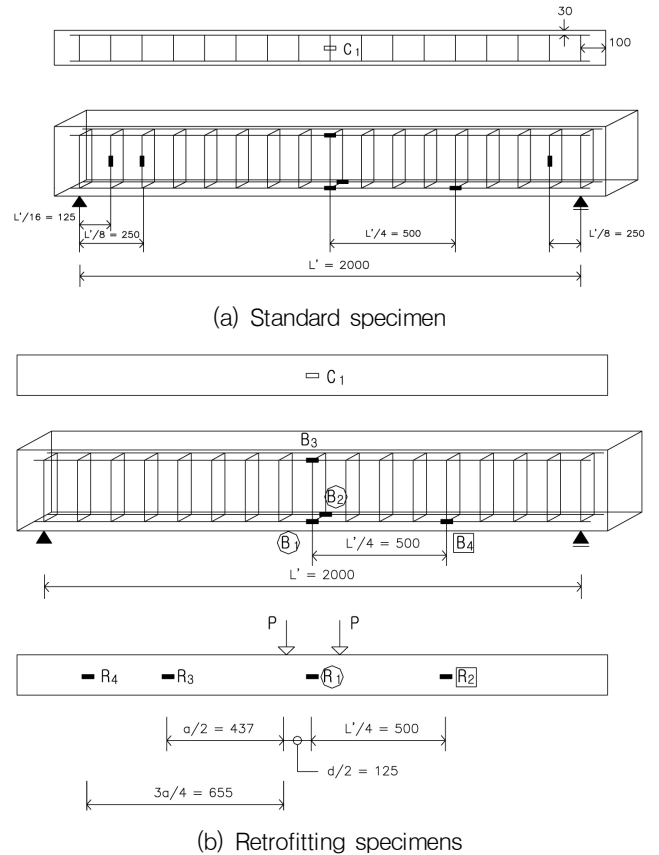


Fig. 4 Location of strain gauges

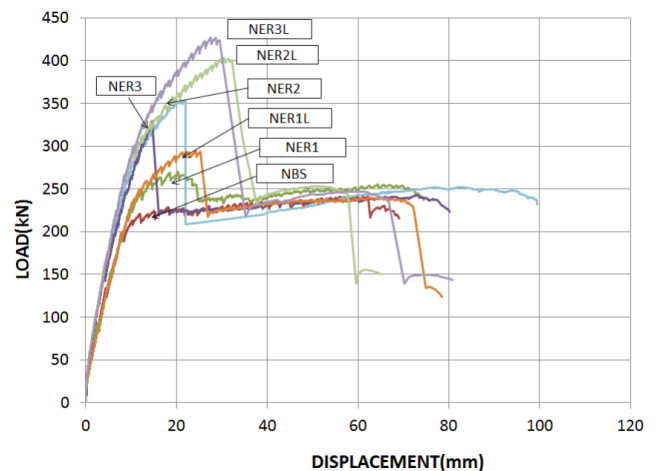


Fig. 5 Load-displacement relationship of each specimen

게 증가하였고, 균열폭이 확장됨에 따라서 실험체는 전형적인 휨과괴 거동을 하며 최종 파괴되었다.

### 3.1.2 표면요철 매입형 FRP봉 보강 실험체 (NER 시리즈)

표면요철 매입형 FRP봉의 보강량 (봉의 분수)에 따른 실험체의 하중-변위 곡선은 Fig. 6과 같으며, 실험 결과는 다음과 같다.

부착효과를 증가시키기 위해 표면요철 매입형 FRP봉을 보강한 실험체 NER 시리즈의 최대내력은 매입형 FRP봉 2분을 보강한 실험체 NER2가 가장 높았고, 매입형 FRP봉 3분, 1분을 보강한 실험체 NER3, NER1의 순으로 나타났다. 매입형 FRP봉 2분을 보강한 실험체 NER2와 매입형 FRP봉 3분을 보강한 실험체 NER3는 매입형 FRP봉 1분을 보강한 실험체 NER1과 표준실험체 NBS에 비하여 내력이 큰 폭으로 증가하였다. 이는 매입형 FRP봉의 표면요철로 인하여 모재와의 부착능력이 증가한 것으로 판단된다. 그러나 매입형 FRP봉 3분을 보강한 실험체 NER3는 매입형 FRP봉 2분을 보강한 실험체 NER2에 비하여 내력이 감소하였다. 이는 매입형 FRP봉 3분을 보강한 실험체 NER3의 경우, 매입형 FRP봉 사이의 순간격이 좁아 피복 콘크리트가 매입형 FRP봉을 충분히 구속하지 못하고, 매입으로 인한 피복 콘크리트의 단면결손이 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6과 같이 매입형 FRP봉 1분을 보강한 실험체 NER1이 가장 연성적으로 거동하였으며, 매입형 FRP봉 3분을 보강한 실험체 NER3이 취성적으로 거동하였다. 특히, 매입형 FRP봉 1분을 보강한 실험체 NER1의 경우, 봉을 둘러싼 피복이 충분하여 피복 콘크리트에 집중되는 응력이 상대적으로 낮으며, 중앙부에 휨균열로 계면 탈락이 일어나며 파괴가

발생하였다.

### 3.1.3 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 (NERL시리즈)

표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체의 하중-변위의 특성은 Fig. 7과 같이 나타났으며, 분석한 결과는 다음과 같다.

표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NERL 시리즈는 표준실험체 NBS와 비교한 결과, 최대내력이 큰 폭으로 증가하였다. 그리고 1차파괴 시점까지의 변형능력과 1차 슬립 이후의 보강효과도 훨씬 증가함을 알 수 있다. 매입형 FRP봉 2분과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NER2L는 CFRP시트의 유무에 따른 내력이 증가하였고, 최종파괴될 때까지 변형능력이 향상되었다. 또한, CFRP시트를 연속보강에 따른 피복 콘크리트 구속효과로 피복분리 현상을 감소시키고 연성능력을 증가시켰다. 표면요철매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 공법은 표면요철로 증대된 부착성과 피복 콘크리트를 충분하게 구속하고 파괴메카니즘을 부착슬립으로 유도하기 때문에 연성능력 및 내력이 증대된 것으로 판단된다.

## 3.2 파괴형태

기존의 연구결과에 의하면, 부착공법으로 인해 보강된 보의 파괴양상에는 보강재의 파괴, 과다 보강으로 인한 압축축 콘크리트의 압축파괴 및 전단내력 부족으로 인한 전단파괴 등이 있다. 일반적으로 보의 내력 및 강성을 증진시키기 위하여 인장부에 보강된 외부 보강재의 파괴형태는 1) 보강재 파

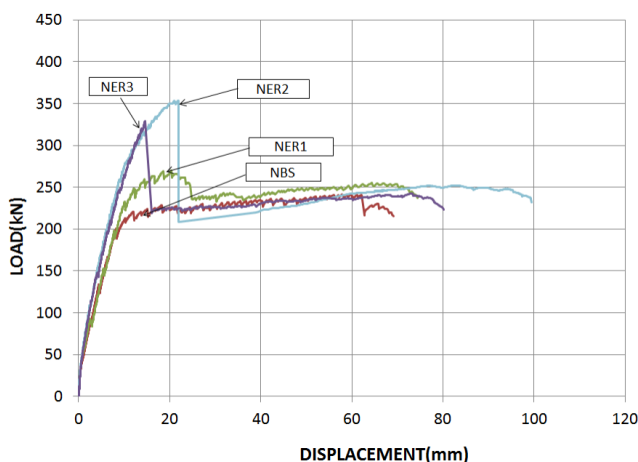


Fig. 6 Load-displacement relationship of specimen (NER series)

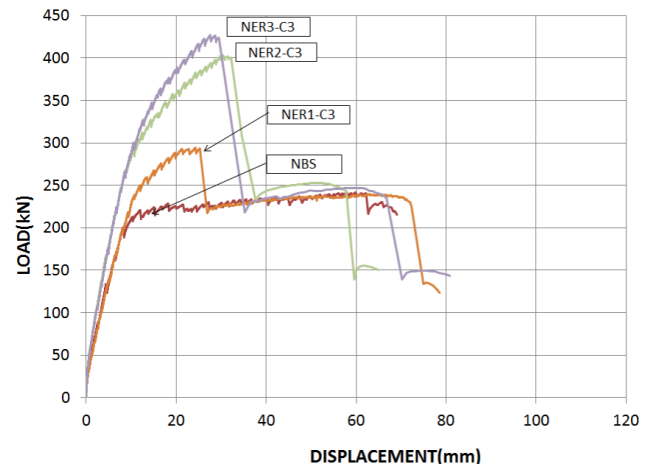


Fig. 7 Load-displacement relationship of specimen (NERL series)

단, 2) 계면파괴 (interface debonding), 3) 피복분리 (rip-off), 4) 단부박리 + 피복분리로 대별할 수 있다.

보강재를 보 인장부에 매입하는 FRP봉 보강공법의 경우, 매입효과로 인해 계면파괴 및 단부박리+피복분리의 파괴형태는 발생하기 어려울 것으로 판단되며, 탄소섬유봉과 에폭시의 부착형태는 유지된채 보가 파괴되는 부착슬립이 발생하였다. 즉, 표면요철 매입형 FRP봉보강공법의 파괴형태는 1) 보강재 파단, 2) 피복분리 (rip-off), 3) 부착슬립으로 나눌 수 있다

본 연구의 범위에서 실험된 각 실험체의 균열진전 양상 및 최종 파괴형태를 Fig. 8에서 보여주고 있다.

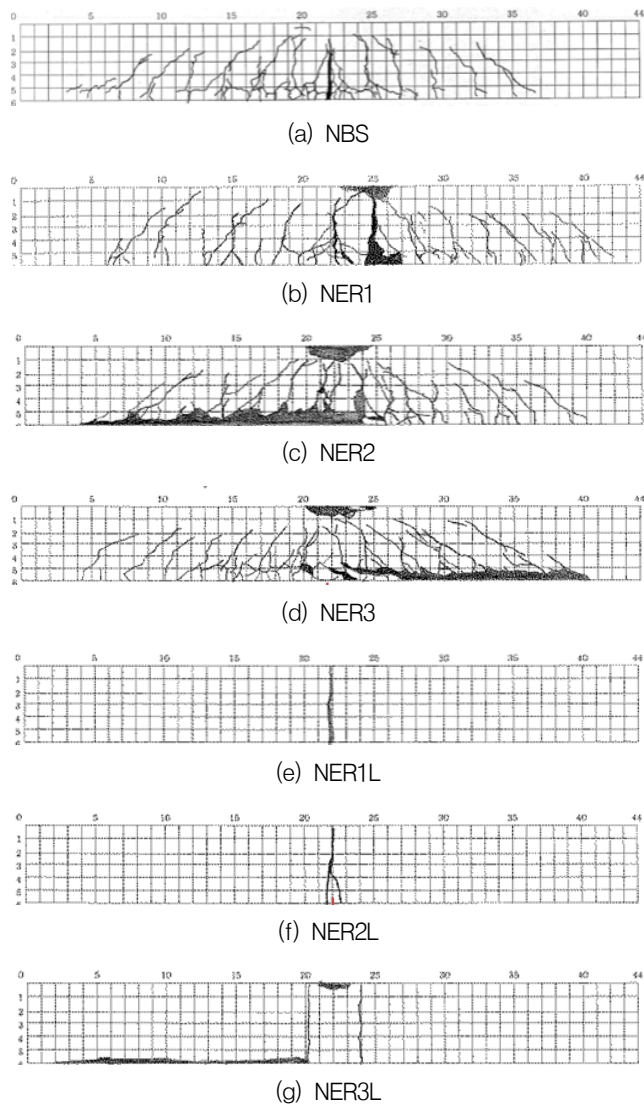


Fig. 8 Crack pattern and failure mode of each specimen

### 3.2.1 표준실험체

보강에 따른 각 실험체의 파괴형태를 파악하기 위하여 표준실험체 NBS를 최종 파괴시까지 가력하여 각 하중 단계에 따른 균열 진전상황을 고찰한 결과, 순수 휨 구간에서 휨 균열이 먼저 발생하였고 하중이 증가함에 따라 전단스팬 구간에 휨 균열 및 휨전단 균열이 발생하여 진전된 다음 변형이 상당히 증가한 후 압축부 콘크리트가 파괴되는 전형적인 휨 인장파괴가 발생하였다.

### 3.2.2 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 (NER, NERL 시리즈)

표면요철 매입형 FRP봉의 보강효과를 규명하기 위하여, 표면요철 매입형 FRP봉을 보강한 실험체 NER 시리즈의 파괴형태는 보강재와 접착재의 계면에서 부착균열이 발생하였으나, 최대하중은 표면요철로 부착력이 증가되었다. 매입형 FRP봉 1본을 보강한 실험체 NER1은 부착성능의 증진으로 접착재와 콘크리트의 탈락 현상은 발생하지 않았다. 그리고 매입형 FRP봉 2본을 보강한 실험체 NER2 경우, 재하시 매입형 FRP봉의 내력이 충분히 발휘된 이후 최종파괴시 피복분리와 함께 파괴되었다. 매입형 FRP봉 3본을 보강한 실험체 NER3는 재하시 순간격이 좁아 피복분리가 선행되고 최종 파괴가 일어났다.

표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NERL 시리즈는 모두 CFRP시트를 보 측면 및 하부에 연속보강을 하여 모재와 표면요철 매입형 FRP봉의 부착균열과 부착슬립을 충분히 구속함으로써 최대내력이 증가하고 실험체의 1차 파괴 후 2차 보강효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

### 3.3 최대내력

각 실험체의 최대내력 및 표준실험체에 대한 각 보강 실험체의 최대하중 증가량 및 증가비율을 Table 9와 Fig. 9에 나타내고 있다.

#### 3.3.1 표면요철 매입형 FRP봉 보강 실험체 (NER 시리즈)

표면요철 매입형 FRP봉을 보강한 실험체 NER 시리즈는 표준실험체 NBS 최대내력과 비교하면, 매입형 FRP봉 1본을 보강한 실험체 NER1은 12%, 매입형 FRP봉 2본을 보강한 실험체 NER2는 46%, 매입형 FRP봉 3본을 보강한 실험체 NER3는 36%의 내력증진을 보여주었다.

그리고 표면요철 매입형 FRP봉 보강량 2본까지는 매입형

Table 9 Load carrying capacity of each specimen

Specimen	$P_{max}$ (kN)	$\Delta P$ (kN)	$\frac{P_{max} [Retrofitting]}{P_{max} [Standard]}$
NBS	241.8	-	-
NER1	270.1	28.2	1.12
NER2	353.6	111.8	1.46
NER3	328.8	87	1.36
NER1L	294.2	52.4	1.22
NER2L	402.9	161.1	1.67
NER3L	427.0	185.2	1.77

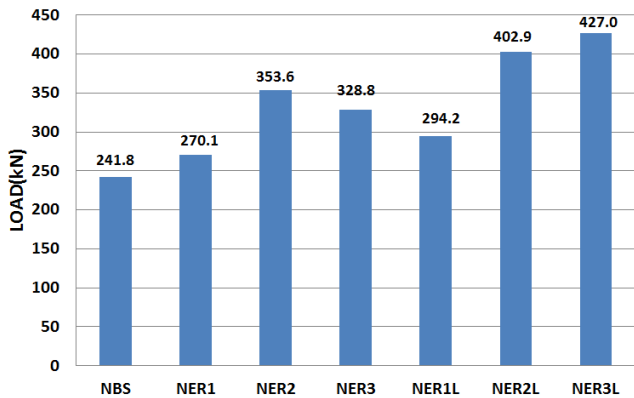


Fig. 9 Load carrying capacity of each specimen

FRP봉 보강 본수가 증가함에 따라 내력이 선형적으로 증가하였으나, 매입형 FRP봉 3본을 보강한 실험체 NER3는 실험체 매입형 FRP봉 2본을 보강한 NER2보다 최대내력이 7% 감소하는 현상이 나타났다. 그 이유는 앞서 3.1.2에서 언급한 바와 같이 표면요철 매입형 FRP봉사이의 순간격이 너무 좁아 하중 증가시 매입형 FRP봉 사이의 콘크리트가 탈락하면서 매입형 FRP봉의 내력이 충분히 발휘되지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 표면요철 매입형 FRP봉의 적정 순간격을 유지하도록 하여야 효과적인 보강을 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.3.2 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트 복합 보강한 실험체 (NERL 시리즈)

표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NERL 시리즈는 표준실험체 NBS 최대내력을 비교하면, 매입형 FRP봉 1본과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NER1L의 내력 증가량은 52.4kN으로 매입형 FRP봉 1본을 보강한 실험체 NER1보다 24.2kN, 매입형 FRP봉 2본과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NER2L의 내력 증가량은 161.1kN으로 매입형 FRP봉 2본을 보강한 실험체 NER2보다 49.3kN, 매

입형 FRP봉 3본과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NER3L의 내력 증가량은 185.2kN으로 매입형 FRP봉 3본을 보강한 실험체 NER3보다 98.2kN으로 각각 9~58%의 내력증가량을 보였고, 최대내력은 매입형 FRP봉을 보강한 실험체 NER 시리즈보다 9~30%, 표준실험체 NBS보다 22~77% 내력이 증가되었다. 이는 표면요철로 인한 부착성능의 증진과 CFRP시트를 보강함으로써 피복콘크리트가 구속되어 내력이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

따라서, 표면요철 매입형 FRP봉의 순간격이 좁아 피복 콘크리트의 조기 탈락이 예상되는 경우는 CFRP시트를 복합 보강하면 피복 콘크리트 부분을 구속하여 피복 콘크리트가 조기 탈락하는 현상을 막아주고, 표면요철의 마찰력에 의한 부착력이 충분히 발휘되어 내력증진 효과를 크게 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.4 연성능력

표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체의 변형능력을 평가하기 위하여 각 실험체의 연성비를 Table 10에 나타냈다. 표준실험체의 연성비는 최대하중 시점의 변위 ( $\delta_f$ )와 항복시점 변위 ( $\delta_y$ )의 비로 정의하였으며, 보강 실험체의 연성비는 보강재가 모재로부터 박리되거나 슬립이 발생한 이후의 변위 ( $\delta_f$ )로 연성비를 평가하였다.

표면요철 매입형 FRP봉을 보강한 실험체 NER 시리즈에서 매입형 FRP봉 1본을 보강한 실험체 NER1은 연성비는 4.49, 매입형 FRP봉 2본을 보강한 실험체 NER2의 연성비는 3.54로 매입형 FRP봉 1본을 보강한 실험체 NER1에 대비하여 77%, 매입형 FRP봉 3본을 보강한 실험체 NER3의 연성비는 2.82로 매입형 FRP봉 1본을 보강한 실험체 NER1에 대비하여 63% 수준으로 나타났다. 이는 일반적으로 보강재 단위면적당 보강효과가 동일한 경우라도 보강재량이 증

Table 10 Comparison of displacement ductility for each specimen

Specimen	$\delta_y$ (mm)	$\delta_f$ (mm)	Ductility ( $\delta_y / \delta_f$ )
NBS	4.4	18.26	4.15
NER1	5.45	24.49	4.49
NER2	6.36	21.92	3.45
NER3	5.19	14.63	2.82
NER1L	4.5	26.87	5.97
NER2L	5.38	32.23	5.99
NER3L	6.09	29.56	4.85

가하면 연성비는 감소하는 것으로 판단된다.

표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NERL 시리즈의 경우, 매입형 FRP봉 1본과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NER1L는 매입형 FRP봉 1본을 보강한 실험체 NER1보다 약 33%, 매입형 FRP봉 2본과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NER2L는 매입형 FRP봉 2본을 보강한 실험체 NER2보다 약 74%, 매입형 FRP봉 3본과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NER3L는 매입형 FRP봉 3본을 보강한 실험체 NER3보다 약 72% 연성능력이 증가하였다. 또한, 표준실험체 NBS와 비교하여도 1.17~1.44배 증가하는 것으로 나타났다.

따라서, 표면요철 매입형 FRP봉을 3본 보강한 경우, 보강간격이 좁고 부착슬립으로 파괴되기에 연성비가 감소하는 것으로 나타났다. 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 경우에는 3본일 때 보강효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 CFRP시트를 연속 보강함으로써 피복콘크리트를 구속하는 효과가 크게 작용하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 철근콘크리트 구조물의 구조성능을 개선하기 위하여 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 사용한 복합 보강공법을 적용하여 매입형 FRP봉의 사용량, CFRP시트 보강 유무에 따른 철근콘크리트 보의 구조성능에 관한 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면요철 매입형 FRP봉 보강 실험체의 파괴메카니즘은 부착슬립 또는 피복분리 형태로 나타났는데, 보강된 매입형 FRP봉의 순간격이 충분히 넓거나 CFRP시트를 복합 보강한 경우에는 부착슬립, 그렇지 못한 경우에는 피복분리 형태로 나타났다. 보의 내력 및 연성 확보 측면에서 보강시 매입형 FRP봉의 파괴메카니즘은 부착슬립 파괴가 피복분리 파괴에 비하여 더욱 바람직한 형태이다. 따라서, 표면요철 매입형 FRP봉의 매입간격이 좁을 경우 (7cm 이하), 구조물의 구조성능을 개선시키기 위하여 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강을 하여야 할 것으로 판단된다.
- (2) 표면요철 매입형 FRP봉 보강 실험체 NER 시리즈는 표준실험체 NBS와 최대내력을 비교하면 12~46% 증가하였다. 그리고 표면요철 매입형 FRP봉보강량 2본까지는 표면요철 매입형 FRP봉 보강 본수가 증가함에

따라 내력이 선형적으로 증가하였으나, 표면요철 매입형 FRP봉 3본을 보강한 실험체 NER3는 실험체 NER2보다 최대내력이 7% 감소하는 현상이 나타났다. 그 이유는 표면요철 매입형 FRP봉사이의 순간격이 너무 좁아 하중 증가시 매입형 FRP봉 사이의 콘크리트가 탈락 하면서 매입형 FRP봉의 내력이 충분히 발휘되지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 표면요철 매입형 FRP봉의 적정 순간격을 유지하도록 하여야 효과적인 성능을 발휘 할 수 있을 것으로 사료된다.

- (3) 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NERL 시리즈는 표준실험체 NBS와 최대내력을 비교하면 22~77%, 실험체 NER 시리즈보다는 9~30% 증가하였다. 이는 표면요철 매입형 FRP봉의 순간격이 좁아 피복 콘크리트의 조기 탈락이 예상되는 경우는 CFRP시트를 복합 보강하면 피복 콘크리트 부분을 구속하여 피복 콘크리트가 조기 탈락하는 현상을 막아주고, 표면요철의 마찰력에 의한 부착력이 충분히 발휘되어 내력증진 효과를 크게 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 표면요철 매입형 FRP봉을 이용한 철근콘크리트 구조물 복합보강 기술은 철근콘크리트 구조물내에 표면요철이 있는 FRP보강재를 매입함으로써 표면요철로 인한 보강재의 충분한 부착성능이 확보된 것으로 사료된다. 그리고 CFRP시트를 복합 보강함으로써 구조물과 보강재와의 완전 일체화를 구현할 수 있었다. 이는 기존 보강공법에 비하여 구조성능이 매우 우수하고 시공 및 품질관리가 용이하므로 보강후 구조물 및 보강부내구성 확보 측면에서도 대단히 유리하여 구조물 보강시 매우 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : 2013-035205).

#### References

1. ACI 318-11 (2011) Building Code Requirements for Structural Concrete) and Commentary (ACI 318-11), American Concrete Institute, Farmington Hills Michigan.
2. Ha, G. J., Kim, Y. Y., Cho, C. G. (2008), Groove and embedding techniques using CFRP trapezoidal bars for



- stengthening of concrete structures, *Engineering Structures*, Elsevier, 30(4), 1067-107.
3. Ha, G. J., Shin, J. H., Ha, J. W., Jun, C. M., Ch, W. K. (1997), Structural Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beams Strengthened by the Repair and Reinforcement Materials, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 13(4), 327-339 (in Korean).
  4. Ha, G. J., Shin, J. H., Ha, J. W., Jun, C. M., Joo, J. J., Ch, W. K. (1997), Improvement and Evaluation of Flexural Performance in Damaged Reinforced Concrete Beam, *Proceeding of Conference in Architectural Institute of Korea*, 17(2), 1057-1064 (in Korean).
  5. Ha, G. J., Shin, J. H., Park, Y. D., Jun, C. M., Lee, Y. B., Kim, K. T. (2002), Development of New Technology for Reinforced Concrete Structure with High-Performance Carbon Fiber Plate and Strengthening Metal Fittings, *Proceeding of Conference in Architectural Institute of Korea*, 22(1), 87-90 (in Korean).
  6. Im, D. H., Kwon, Y. S. (2009), An Experimental Study on the Shear Behavior of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted and Externally Bonded CFRP Strips, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 337-345 (in Korean).
  7. Kang, D. E., Woo, H. S., Choi, K. S., You, Y. C., Yi, W. H. (2008), Evaluation of Shear Capacity of RC Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymers, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 24(10), 3-10 (in Korean).
  8. Kim, J. W., Kim, K. S., Park, S. K., Lee, Y. J. (2007), Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 19(2), 225-231 (in Korean).
  9. Kim, N. J., Lee, E. J., Shin, Y. S., Hong, G. H. (2004), Effect of Interface Treatment on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP), *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 20(1), 75-82 (in Korean).
  10. Ryu, D. W. (2008), Flexural and Shear Design of RC Members Strengthened by FRP Jacket, Theses for Master's Degree, Kyungpook National University, 1-38 (in Korean).

Received : 03/20/2014  
 Revised : 05/07/2014  
 Accepted : 05/12/2014

## 요 지

본 연구에서는 기존 철근콘크리트 건축물의 구조성능 개선을 위하여 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 사용한 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하기 위하여 실험을 수행하였다. 표면요철 매입형 FRP봉의 사용량, CFRP시트 보강 유무에 따라 총 7개의 실험체를 제작하고 실험을 수행하여 구조성능을 평가하였으며, 본 연구의 실험결과를 근거로 다음과 같은 결론을 얻었다.

표면요철 매입형 FRP봉 보강 실험체 NER 시리즈의 경우, 표준실험체 NBS와 비교하여 12~46% 내력이 증가하였고, 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NERL 시리즈는 표준실험체 NBS보다 최대내력이 22~77% 증가하였다. 그리고 표면요철 매입형 FRP봉으로 보강된 실험체 NER 시리즈는 부착슬립, 피복분리 형태로 파괴되었으나, 표면요철 매입형 FRP봉과 CFRP시트를 복합 보강한 실험체 NERL 시리즈는 CFRP시트의 연속보강에 따른 콘크리트 구속효과 및 모재와 표면요철 매입형 FRP봉의 부착강도 증가로 인하여 부착슬립의 형태로 파괴되었다.

**핵심 용어** : 철근콘크리트 보, 표면요철 매입형 FRP봉, CFRP 시트, 구조성능, 복합 보강