

콘크리트 강도에 따른 탄소섬유시트의 보강효과에 관한 실험적 연구

박미소, 노영숙*

서울과학기술대학교 건축과 건축공학전공

An Experimental Study on the Reinforcement Effect of Carbon Fiber Sheet according to Concrete Strength

Mi So Bak, Young Sook Roh*

Architecture Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약 콘크리트 구조물은 시간의 흐름에 따라 외부적인 요인과 내부적인 요인에 의해 내구성이 저하되는 열화 현상이 발생된다. 이에 따라 노화되는 콘크리트 구조물에는 상황에 따른 적절한 보수 보강이 요구된다. 구조물을 보강하는 다양한 공법 중 부재에 탄소섬유시트(Carbon Fiber Reinforced Plastic)를 부착하여 보강하는 공법은 건축물, 교량 등 다양하게 활용되고 있다. 이에 본 연구는 구조물의 노후화로 인해 강도가 저하된 콘크리트에서 탄소섬유 시트를 부착하여 보강한 실험체를 제작하여 콘크리트 강도에 따른 탄소섬유시트의 보강 효과에 관한 연구를 진행하였다. 탄소섬유시트를 부착한 부재의 3점가력 휨 실험을 진행하여 연성능력과 거동을 파악함으로써 부재의 성능 향상 정도를 파악하였다. 콘크리트 강도를 고려한 탄소섬유시트의 부착 강도를 통해 부재의 파괴 모드를 예측될 수 있다고 판단된다. 실제 실험 데이터를 분석한 결과 콘크리트의 강도는 보강된 부재의 균열 및 파괴양상에 영향을 미칠 수 있다고 사료된다. 또한, 콘크리트 강도에 따라 부착 강도와 파괴양상이 달라지며, 이러한 결과를 분석한 결과 콘크리트 강도는 탄소섬유시트의 보강 시 휨 능력, 부착 강도, 파괴양상의 여러 결과와 연관성이 있다고 판단된다.

Abstract The durability of a concrete structure decreases over time due to external and internal factors. Therefore, appropriate reinforcement is required depending on the situation. One reinforcement method is attaching carbon-fiber-reinforced plastic to a structure. This construction method is used in various applications, such as buildings and bridges. In this study, an experiment was conducted on the reinforcement effect of carbon fiber sheets on concrete that has decreased strength due to the aging of the structure. A flexibility test was performed on a member to which carbon fiber sheet was attached to determine the degree of improvement in the performance based on the ductility and behavior. The experimental data show that the strength of concrete can affect the cracking and destruction patterns of the reinforced member. In addition, the adhesive strength and destruction pattern vary depending on the strength of concrete. The analysis shows that the concrete strength is related to various results such as the bending capacity, adhesion strength, and destruction pattern when reinforcing it with carbon fiber sheets.

Keywords : Aging Concrete, Attachment Strength, Carbon Fiber Reinforced Plastic, Concrete Strength, Failure Mode, Reinforced Effect

본 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Young Sook Roh(Seoul National University of science and technology)

email: rohys@seoultech.ac.kr

Received December 27, 2021

Accepted April 1, 2022

Revised March 3, 2022

Published April 30, 2022

1. 서론

1.1 연구의 목적

철근콘크리트는 준공 후 적절한 유지관리를 통해 반영구적으로 사용할 수 있는 재료이지만, 시간이 지남에 따라 여러 화학적, 물리적 반응이 발생하면서 구조 내력이 부족하거나 사용성, 안전성이 저하되는 콘크리트 성능 저하가 발생한다. 이러한 열화현상은 철근 부식, 중성화, 알칼리골재반응, 동해, 화학적 부식, 피로 등이 대표적이다. 구조용 콘크리트에서 강도와 내마모성, 화학작용 저항성, 풍화 저항성에 대해 높은 내구성이 요구되는데, 구조물이 노화되면서 상황에 맞는 보수, 보강공법 등을 결정하여 대책 방안을 마련해야 한다.

대표적인 보수 보강공법이 탄소섬유를 활용하는 것으로서 탄소섬유는 폴리아크릴로니트릴(polyacrylonitrile) 또는 석유정제 부산물인 피치(Pitch)를 1,000~2,500℃의 고온에서 탄화시킨 탄소 결정의 섬유를 구성하는 탄소 원자의 결정구조 때문에 기존의 콘크리트나 금속재료에 비하여 높은 무게비 강도 및 탄성계수, 매우 강한 인장 및 피로 강도를 갖는다.

본 연구에서는 이러한 탄소섬유 시트를 활용하여 시간이 지나 노화되어 내구성이 저하된 콘크리트 보의 탄소섬유 시트 보강 효과를 확인하기 위한 실험을 진행하였다.

1.2 선행연구

준공 후 30년이 지난 노후 아파트에서 비파괴실험 및 코어 채취하여 압축강도 시험을 비교하는 방법으로 구조물의 강도를 측정된 결과 시간의 경과에 따른 노후된 철근콘크리트 구조물의 강도는 평균 27.3% 낮은 값이 측정[1]되었다. 노후 구조물의 압축강도 시험체의 구조부재의 외측과 내측의 내력 데이터를 비교한 결과 외측 콘크리트의 강도가 내측 대비 5~7% 높은 감소율을 보이며 외기에 노출된 벽체나 부재의 강도 저하가 더 심각하게 진행되었다.

산성비, 습윤 및 건조, 동결현상, 온도 변화 등이 발생하는 외부공간에 철근콘크리트 구조물을 노출시킨 뒤 6년간 구조물의 강도 및 내구성 변화를 관찰한 결과 압축강도가 32.1MPa에서 23.3MPa로 점차 저하되어 최대 압축강도 37.6%의 강도손실이 발생[2]하였다. 콘크리트 구조물이 노화되면서 내구성이 저하될 경우 강도 저하로 이어지며, 외부에 노출된 부분의 내구성 저하가 더 현저하게 진행되었다.

앞선 연구들에서 노후화된 콘크리트의 압축강도 감소

는 구조체의 내부보다 외부의 콘크리트에서 강도 감소가 심각하며, 중성화 깊이가 10년마다 평균 1.2mm 정도 증가한다. 보통 노후 건축물이라 부르는 준공 30년 이후 25~30%의 강도 저하가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

구조물의 다양한 보강 방법 중 FRP를 활용한 보강기술이 경제성, 시공성이 유리하여 여러 현장에 적용되고 있다. FRP 재질을 활용해 보강한 구조물의 지진해석과 지진 취약도 분석을 수행한 연구[3] 결과 보강을 실시한 경우 항복 변위 50%, 극한 변위 65%의 증가율을 보였다. 비선형 해석 결과, FRP가 보강된 노후 교각은 노후되지 않은 일반 교각 이상의 성능을 발휘하여 FRP를 활용하여 보강하는 경우 노화된 부재가 보강 후 노후되지 않은 부재만큼 성능을 발휘한다는 것을 확인하였다.

반복하중을 받는 노후된 원형 콘크리트 교각 구조물에 대한 보강 후 내진 성능 향상도를 유한요소 분석한 결과 비교한 결과[4] 연성도 78%로 취성파괴 구조물이었던 미보강 콘크리트 교각에 비해 외부에 강판, GFRP, CFRP 보강한 교각보강 구조물의 연성도가 91%, 91.8%, 92%로 향상하였으며 그중에서 강도, 연성도, 손상도 모두에 있어서 CFRP로 보강한 구조물이 92%의 연성도를 보이며 다른 시트에 비해 큰 증진 효과를 나타내었다.

이에 본연구에서는 콘크리트 노후화가 부재의 표면에서 주로 발생되기 시작하며 콘크리트 노화로 인해 콘크리트 강도의 저하가 발생한 노후 콘크리트의 CFRP시트(이하 FRP시트)를 활용하여 시트의 보강 효과를 분석하고자 한다.

특히 압축에 비해 인장 능력이 현저히 부족한 콘크리트 부재에서 내구성이 저하되는 경우 인장 부재가 구조물의 사용성능을 만족하는지 검증될 필요성이 있다. 구조물에 적용되는 응력은 축 방향 인장보다는 휨 인장을 주로 받기 때문에 콘크리트 공시체의 할렬시험보다 휨시험을 통해서 얻은 인장강도가 실제 콘크리트의 재료적 성질을 더 잘 나타내며, 설계 기준강도와 콘크리트 품질 결정 및 관리 등에 콘크리트 압축강도와 더불어 휨 인장강도가 주로 사용[5]되고 있다. 무근콘크리트 보 시험체를 사용하여 부재의 일방향 휨 인장 상태를 확인하기 위해서 3등분점 재하 휨 강도 시험을 실시하여 콘크리트의 휨 인장 응력에 대한 저항성을 확인하였다.

콘크리트 강도 저하에 따른 FRP 시트 보강 부재의 실제 응력 상태를 고려한 구조적 성능평가를 위해서는 강도별 시험체의 휨 인장 강도와 FRP 시트 보강 시 부재에 대한 실험과 그 결과에 대한 고찰이 요구된다. FRP 시트를 활용한 보강에 대해서는 많은 실험 및 연구가 진행되

어왔으나 강도 저하된 콘크리트 부재에 대한 FRP 시트 보강 효과에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 콘크리트 강도에 따른 FRP 시트의 휨 인장 강도의 보강 효과 규명하기 위해 내구성이 저하된 무근콘크리트 시험체를 제작하여 FRP 시트를 보강한 부재의 휨 성능을 확인하고 연성능력 분석하는 실험적 연구를 수행하였다. 실험결과를 분석하여 콘크리트 강도 특성에 따른 CFRP 시트 보강 효과, 부착 강도, 연성능력을 파악하고 휨 인장 능력과의 상관관계를 유추하여 콘크리트 강도가 CFRP 시트 보강 구조물의 거동 및 보강 효과에 대한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 본론

2.1 실험 개요 및 방법

본 연구에서는 콘크리트의 내구성 저하 정도에 따라 CFRP 시트 보강 효과를 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 선행연구를 통해 노화로 인해 내구성이 저하 현상으로 인해 부재의 콘크리트 강도가 저하되는 것을 확인하였으며, 콘크리트 강도 별 CFRP 시트의 보강 효과에 대한 구조적 분석을 진행하기 위해 콘크리트의 강도를 변수로 하여 노화 정도를 나타내었다. 실험을 수행하였다. 이를 위해 무근콘크리트 시험체를 이용하여 휨 인장응력을 비교하기 위해 ASTM C 78에 규정된 3등분점 재하 휨강도 시험을 적용하였다.

2.1.1 시험체 제작

강도에 따른 효과를 분석하기 위해 21MPa, 15MPa, 10MPa의 강도를 지닌 100x100x400mm³의 크기의 시험체를 제작하였다. 노후 건축물에서의 중성화, 열화현상, 내구성 저하 등에 의해 강도가 25~30% 저하된 콘크리트의 거동을 확인하기 위하여 기준 압축강도 21MPa에서 25~30% 저하된[1, 2] 15MPa를 목표 강도로 설계하였다. 또한, 1970년대 이전 콘크리트 구조물의 거동을 분석하고자 리모델링 해설집[6]의 1970년대 이전 구조물의 재료 기준값 하한값인 13MPa에 미치지 않는 10MPa 강도의 콘크리트 시험체를 타설하여 심하게 노후화된 콘크리트에서 CFRP 시트의 보강 효과를 확인하고자 시험체의 목표 강도를 설정하였다. 콘크리트 배합은 Table 1과 같이 진행되었으며, 제작된 각 시험체의 콘크리트 압축강도는 실험 강도의 최댓값과 최솟값을 제한

평균값을 사용하여 각각 10.6MPa, 11.6MPa, 18.1MPa로 측정되었다.

무근 콘크리트 시험체를 제작한 뒤 Table 2와 같은 물성을 지닌 국내업체에서 제작한 NR72 시트를 사용하였다. 시험체 표면에 FRP 시트를 부착하는 방법은 실제 현장에서 사용하는 방식을 고려하여 Fig. 1과 같이 보 표면을 그라인딩 한 뒤 분진을 제거하고, 프라이머와 레진을 도포하여 24시간을 양생한 뒤 탄소섬유시트를 실험체 하단에 부착하여 보강하였다.

Table 1. Concrete Mixture

Target strength (MPa)	W/C (%)	S/a	Unit material requirements [kgf/m ³]				Admixture (%)	
			W	C	S	G	SP	AE
21	65	50	202	312	842	836	1.6	0.02
15	72	50	188	264	842	849	1.6	0.02
10	79	51	190	239	873	831	1.7	0.0004

Table 2. CFRP Sheet NR-72 Properties

Weight (g)	Gravity (g/cm ³)	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
200	1.8	0.11	578	200

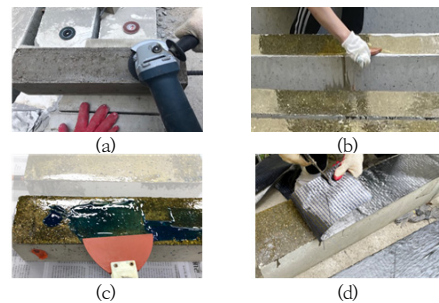


Fig. 1. The process of making experiments
(a) Grinding Surface (b) Applying Primer
(c) Applying Resin (d) Attaching FRP

실험체 명은 시트의 보강 여부에 따라 FRP O와 FRP X로 시작되며 바로 이어지는 숫자는 예상 콘크리트 압축 강도이다. FRP가 부착된 실험은 같은 조건으로 2개의 실험체를 제작해 실험이 진행되었으며 이는 실험체 명 마지막에 1, 2로 구분하였다.

Table 3. Specimen variable details

Specimen	FRP Reinforced	Concrete strength (MPa)	Specimen number
FRPX-21	X	21	1
FRPX-15	X	15	1
FRPX-10	X	10	1
FRPO-21-1	O	21	1
FRPO-21-2	O	21	2
FRPO-15-1	O	15	1
FRPO-15-2	O	15	2
FRPO-10-1	O	10	1
FRPO-10-2	O	10	2

O, X : FRP Reinforced or Unreinforced
 21, 15, 10 : Specimen concrete strength
 1, 2 : Specimen number

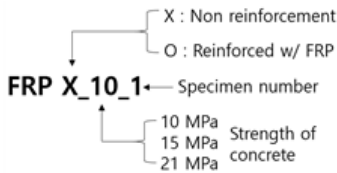


Fig. 2. Specimen name notation

2.1.2 예상 내력

압축이 지배적인 무근콘크리트 시험체의 파괴 강도를 예측하기 위해 콘크리트 구조설계 기준(2012) [7]의 콘크리트 구조기준에 따라 전단 강도, 휨모멘트를 계산하였다. 보강 전 무근콘크리트의 전단 강도를 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$V_n = 0.11 \lambda \sqrt{f_{ck}} bh \quad (1)$$

Where, V_n shear strength, f_{ck} Concrete compressive strength, b width of specimen, h height of specimen

휨모멘트를 받는 무근콘크리트 시험체의 설계는 인장이 지배적인 경우 식(2)에 따라 계산되며, 압축이 지배적인 상황에서는 식 (3)을 활용하여 계산된다는 콘크리트 구조기준 19장을 만족하도록 계획하였다. 본 실험에서는 무근콘크리트 시험체를 사용하여 압축이 지배적인 시험체를 사용하였으므로, 식 (3)을 활용하였다.

$$M_n = 0.42 \lambda \sqrt{f_{ck}} S_m \quad (2)$$

$$M_n = 0.85 \sqrt{f_{ck}} S_m \quad (3)$$

Where, M_n Bending moment, f_{ck} Concrete compressive strength, S_m section shear coefficient, λ modification factor for lightweight concrete.

FRP 시트를 부착하지 않은 무근 콘크리트 시험체는 압축이 지배적이며 전단에 대한 보강이 이루어지지 않았다. FRP를 보강하지 않은 무근 콘크리트 시험체의 강도 별 전단력은 18MPa인 경우 4.74kN, 11MPa인 경우 3.70kN, 10MPa인 시험체는 3.53kN으로 예측되었으나, 인장에 취약한 콘크리트는 시험체에 하중이 가해지는 경우 인장부를 잡아주는 재료가 없어 가력 시험 응력에 의해 취성적인 파괴가 발생할 것으로 예측된다.

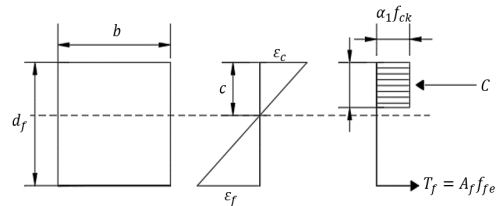


Fig. 3. Specimen stress distribution and strain

FRP로 외부 보강된 무근콘크리트 시험체의 응력분포와 변형률은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있는데, 부재의 휨 내력은 ACI 440.2R의 기준[8]에 따라 시트와 콘크리트의 유효 변형률과 FRP 시트의 유효 변형률 및 응력을 고려하여 중립축을 산정한 뒤 식(4)와 같이 계산[8, 9]한다.

FRP 보강된 부재의 휨 강도 계산 시 FRP에 대한 강도 저감 계수 ψ 가 적용되는데, 이 값은 실험적인 보정 값인 0.85를 사용하도록 권장된다.

$$M_{nf} = \psi A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (4)$$

Where, ψ FRP strength reduction factor, A_f FRP sheet space, f_{fe} effective stress of the FRP sheet when it's destroyed, d_f distance from the compressed platform to the FRP sheet

여러 연구에서 FRP 시트와 콘크리트의 부착 강도의 정확한 수치 모델을 얻기 위해 여러 변수에 관한 실험과 해석 연구가 진행되어왔다. 본 연구에서는 현재까지 제안된 23개의 모델 중 JCI(일본콘크리트학회)에서 추천되었으며, FRP 시트와 콘크리트 표면 사이의 부착 강도 식

들 가운데 콘크리트 강도를 고려하여 실용성이 높은 Iso의 제안식(3)을 활용하여 콘크리트 강도별 부착 강도를 계산[10]하였다.

$$P_u = \tau_u L_e b_f \tag{5}$$

$$\tau_u = 0.96 (f_c) 0.44 \tag{6}$$

$$L_e = 0.125 (E_f t_f)^{0.57} \tag{7}$$

($L_e > L$ 인 경우, $L_e = L$)

Where, τ_u bond stress, L_e effective bond length, b_f width of FRP, f_c concrete compressive strength (MPa), E_f elastic modulus of FRP, t_f thickness of FRP

본 연구의 실험체의 부착 길이는 Iso 식(5)을 통해 얻은 유효 부착 길이 $L_e(37.4\text{mm})$ 를 만족하여 유효 부착 길이를 활용하여 부착 강도를 계산하였다. 시험체의 부착 강도는 콘크리트 강도에 따라 건전한 콘크리트에서 26.97kN, 노후화가 진행될수록 16.48kN, 14.98kN으로 낮게 예측되었다. 부재의 휨 내력에 비해 부착 강도가 높은 경우 콘크리트 부재의 파괴가 발생할 것으로 예측되며, 부착 강도가 강한 경우 시험체에서 FRP 시트가 탈락할 것으로 예측된다. 예측 내력과 예상 파괴양상은 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Predicted of specimen

Specimen	Shear Strength V_n (kN)	Bending moment M_n (N·m)	Bond strength P_u (kN)	Failure mode
FRPX-21-1	4.74	0.15	-	Bending fracture
FRPX-15-1	3.70	0.12	-	Bending fracture
FRPX-10-1	3.53	0.11	-	Bending fracture
FRPO-21-1,2	26.97	23.08	26.97	FRP rupture
FRPO-15-1,2	16.48	17.09	16.48	Concrete failure
FRPO-10-1,2	14.98	16.11	14.98	Concrete failure

2.1.3 실험 방법

본 연구에서는 콘크리트 강도에 따른 FRP 시트의 휨 인장 보강 효과를 검토하고 그 적용성 여부를 평가하고자 국가표준 기준 (KS F 2408)을 준수하여 3점 가력 휨

실험을 진행하였다. 실험체 설치 모습은 Fig. 4와 같으며 만능 하중 가력기(UTM)로 하중 제어방식으로 실험을 진행했다. 하중 제어방식은 최대하중을 몇 단계로 분류한 뒤, 단계별로 일정한 시간의 간격을 두고 하중을 가하는 방식인 정하중법을 적용하였다.

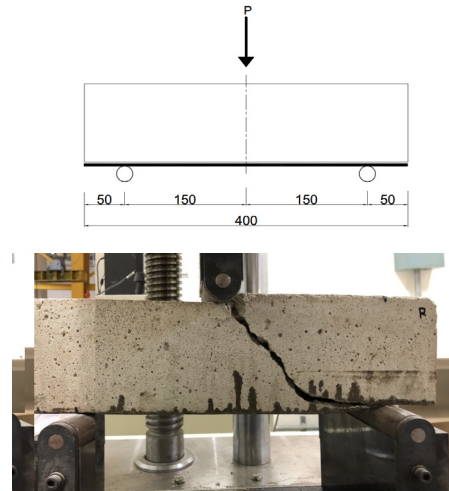


Fig. 4. Test setting

2.2 실험 결과

실험 결과 보강되지 않은 무근 콘크리트 보 시험체는 콘크리트 강도가 저하됨에 따라 휨모멘트도 0.88kN·m, 0.52kN·m, 0.28kN·m로 저하되는 양상을 보이며 파괴되었다. 강도가 저하된 콘크리트일수록 예측한 내력과 비슷한 결과를 확인할 수 있었다.

FRP 시트로 보강된 시험체 역시 콘크리트 강도가 저하됨에 따라 콘크리트 강도별 평균 휨 인장 능력이 2.55kN·m, 1.82kN·m, 1.77kN·m로 점차 낮아지며 예상 하중과 비슷한 최대 내력을 보이며 파괴되었다. 무근

Table 5. Test Results

Specimen	Predicted		Test result	
	V_n (kN)	M_n (kN·m)	P_n (Kn)	M_n (kN·m)
FRP X-21-1	4.67	0.30	11.76	0.88
FRP X-15-1	3.65	0.23	6.91	0.52
FRP X-10-1	3.48	0.22	3.68	0.28
FRP O-21-1	4.67	1.73	34.81	2.61
FRP O-21-2			33.05	2.48
FRP O-15-1	3.65	1.28	24.31	1.82
FRP O-15-2			0	-
FRP O-10-1	3.48	1.21	26.11	1.96
FRP O-10-2			21.11	1.58

콘크리트 실험체의 휨 최대강도로 콘크리트의 인장 강도를 확인하였다. 실험 결과는 Table 5에서 확인할 수 있다. 실험데이터 수집 중 FRP O-15-2 실험체는 UTM 조작 중 기계 오류로 인해 데이터가 기록되지 않았다.

2.2.1 콘크리트 강도별 시험체 파괴양상

보강되지 않은 무근 콘크리트 시험체에서는 하중 가력 지점에서 수직 균열이 발생하며 취성적인 휨 파괴가 발생하였다. 보강되지 않은 시험체의 파괴양상은 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

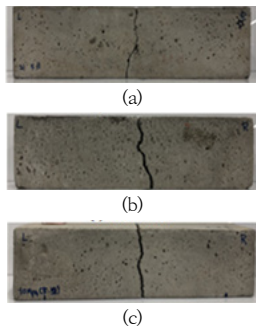


Fig. 5. Cracks of the unreinforced specimen
(a) FRP X-21-1 (b) FRP X-15-1 (c) FRP X-10-1

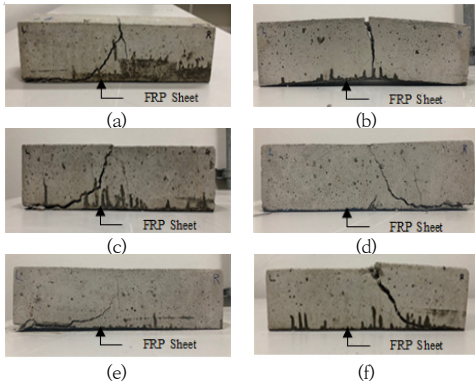


Fig. 6. Cracks of the reinforced specimen
(a) FRP O-21-1 (b) FRP O-21-2 (c) FRP O-15-1
(d) FRP O-15-2 (e) FRP O-10-1 (f) FRP O-10-2

FRP 시트 보강이 이루어진 시험체 가운데 비교적 콘크리트 압축강도가 낮은(10MPa, 15MPa) 실험체에서 경사균열이 발생하다가 FRP 시트 부착 면을 따라 수평 방향으로 균열이 연장되며 콘크리트 강도별로 최대 26.11kN, 24.31kN의 하중에서 콘크리트의 탈락이 일

어나면서 실험체가 파괴되었다. 노화가 진행되지 않아 콘크리트 강도가 상대적으로 높은 시험체에서는 복부 전단균열이 미세하게 발생하다가 미부착 실험체와 같이 가력점 근처의 콘크리트에서 균열 발생 및 파괴된 뒤 FRP 시트는 부착면에서 박리, 탈락하는 형상을 보였다. FRP 시트로 보강된 시험체의 파괴양상은 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

Table 6에서는 부착 강도와 휨강도 예측 내력을 비교하여 나타내었다. 상대적으로 높은 강도인 21MPa 강도의 콘크리트에서는 FRP시트와 접착제 사이의 계면파괴로 인한 FRP 탈락 현상이 발생하였다. 반면 비교적 약한 강도의 콘크리트 시험체에서는 FRP 부착면과 인접한 무근의 콘크리트 파괴 현상이 발생하였다. 실험체의 부착 응력이 실험체의 최대 휨 응력보다 큰 시험체에서는 콘크리트의 손상없이 FRP가 박리되는 파괴 양상을 확인할 수 있었다. 이는 FRP 접착면의 콘크리트 강도가 FRP 부착력보다 작아 구조체에 손상이 가해지는 경우로서 모체의 강도에 따른 FRP 보강 한계량이 존재함을 시사한다고 할 수 있다.

3점 가력 실험 결과의 최대 휨 응력 및 예측 내력의 크기가 부착 강도보다 큰 경우 콘크리트 부재의 파괴가 발생하며, Table 6에서 파괴양상과 콘크리트 탈락 형상이 예측한 바와 같이 도출되었다.

이는 콘크리트 파괴양상은 콘크리트 강도가 부착강도에 미치는 영향과 연관이 있으며, 예측 내력과 예상 부착 강도를 비교하여 FRP 시트 보강 시 모체의 구조성능을 파악하여 보강된 부재의 파괴양상을 예측할 수 있다고 사료된다.

Table 6. Comparison of predicted & Test results

Specimen	Predicted			Test result	
	Flexural Strength (kN)	Bond strength (kN)	Failure mode	Flexural Strength (kN)	Failure mode
FRPO-21-1	23.08	26.97	FRP rupture	33.93	FRP rupture
FRPO-21-2					
FRPO-15-1	17.09	16.48	Concrete failure	24.31	Concrete failure
FRPO-15-2					
FRPO-10-1	16.11	14.98	Concrete failure	23.61	Concrete failure
FRPO-10-2					

2.2.2 콘크리트 강도별 FRP 시트 보강효과

FRP 시트가 보강된 시험체에서는 초기 항복 시점에서는 미세균열이 발생하였으며, 콘크리트 강도가 약해질수

록 최대 처짐이 감소하는 경향을 보이며 파괴되었다. Fig. 7, 8, 9는 각 실험체의 하중 변형 곡선으로 FRP 시트가 보강되지 않은 무근 콘크리트 보 시험체에 하중 가력 시 3.64~12kN의 최대하중과 최대 처짐 0.5~1.6mm 사이에서 취성파괴가 발생하였다.

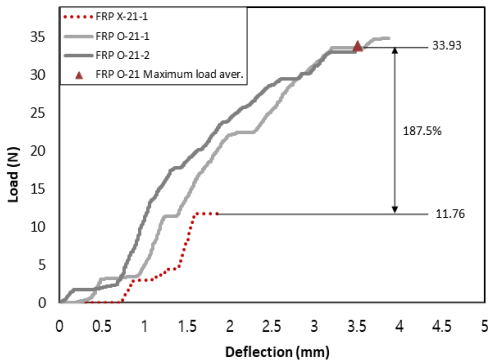


Fig. 7. 21MPa Experiments Load-deflection Graph

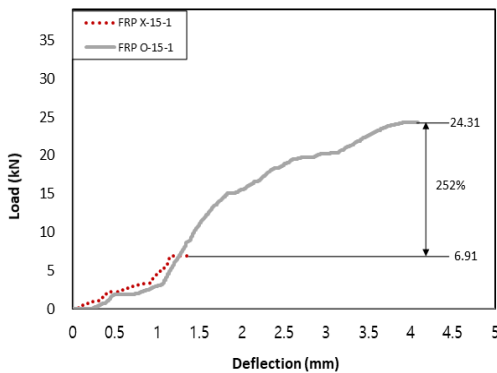


Fig. 8. 15MPa Experiments Load-deflection Graph

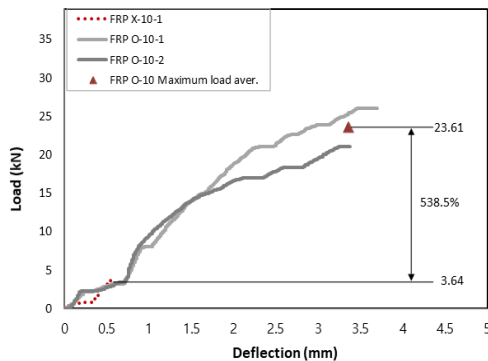


Fig. 9. 10MPa Experiments Load-deflection Graph

휨하중에 의한 최대 처짐을 비교하였을 때 콘크리트 강도별로 최대 처짐이 달랐던 미보강 실험체에 비해 FRP 부착 실험체에서는 최대 처짐 값이 실험체 길이의 10%로 유사한 처짐 효과를 보였다. 이는 콘크리트 구조물에 내구성이 저하되어 구조체의 강도가 낮은 경우에도 FRP 시트에 의한 보강 효과가 충분히 발현된다는 것으로 판단할 수 있다.

FRP 시트를 부착 보강하는 경우 부재의 취성적인 파괴가 발생[11,12]되는 특징이 있다. 본 실험의 시험체 역시 FRP 시트의 탈락과 함께 취성적인 파괴형태를 보이며 파괴되어 시험체의 연성적인 성능을 비교하였다. 연성지수는 식(5)와 같이 계산하여 Table 7에서 강도별 시험체의 3점 가력 시험에 의한 휨강도 증가율과 연성능력을 분석하였다.

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (5)$$

Where, Δ_u displacement at maximum load, Δ_y displacement at yield load

FRP로 보강된 실험체의 휨 강도는 콘크리트 부재의 강도가 저하될수록 시험체의 최대 내력은 낮아지나 FRP 시트 보강 후 휨 내력 증가율은 콘크리트 압축강도가 낮을수록 높은 증가율을 보이는 것을 확인하였다. 반면, 시험체의 연성능력은 비교적 강도가 높은 시험체에서 평균 3.1, 노후화가 심하게 진행되어 강도가 매우 낮은 시험체에서 2.97의 연성능력을 보이며 강도별 연성능력은 유사한 것으로 나타났다. 시험체의 콘크리트 강도별 FRP시트 보강 시 휨강도 분포를 도시화하여 Fig. 10에 나타내었다.

FRP 시트 미보강 시험체 대비 보강 시험체의 휨성능을 비교한 휨강도 증가율은 상대적으로 실험체의 콘크리트 강도가 낮아질수록 높은 증가율 및 FRP 시트의 보강 성능을 확인할 수 있다. 건전한 콘크리트의 FRP 시트에 의한 휨 보강 효과는 188%로 나타났으며 일부 노후화가 진행된 시험체의 보강 효과는 252% 정도로 나타났으며, 노후화가 심하게 진행된 콘크리트의 보강효과 541%가 확인되었다. FRP시트 보강 시의 휨 강도 증가율은 시편의 강도가 낮을수록 보강 효과가 증가하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 노후화가 미개시되어 상대적으로 휨 강도가 우수한 건전한 콘크리트 구조체의 경우에서 내구성이 낮은 구조체보다 그 보강 효과가 매우 떨어짐을 알 수 있다.

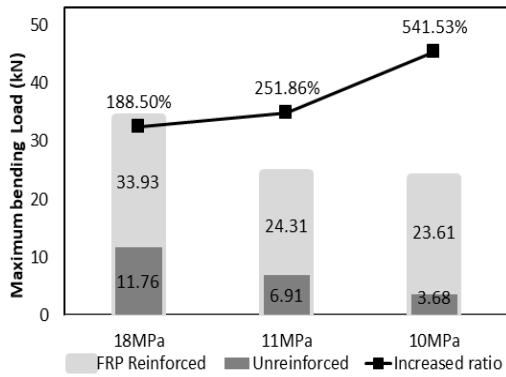


Fig. 10. FRP Reinforced beam Bending strength increase Ratio

Table 7. Flexural strength increase ratio & Ductility Index

Specimen	P_u (kN)	Δ_u (mm)	Strength Increase Ratio* (%)	Ductility Index (μ)
FRP X-21-1	11.76	1.51	-	-
FRP O-21-1	34.81	4.00	196	2.66
FRP O-21-2	33.05	4.02	181	3.53
FRP X-15-1	6.91	1.23	-	-
FRP O-15-1	24.31	3.89	252	3.16
FRP O-15-2	-	-	-	-
FRP X-10-1	3.68	0.58	-	-
FRP O-10-1	21.11	3.28	474	2.53
FRP O-10-2	25.93	3.45	605	3.4

*Specimen increase strength/Unreinforced P_u

3. 결론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 열화현상으로 인해 노화되어 내구성이 저하된 콘크리트 부재에 FRP 시트 보강 효과를 분석하고자 강도가 저하된 무근콘크리트 보를 제작하여 3등분점 재하 휨 강도 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) FRP 시트 부착 부재의 파괴형상과 콘크리트 강도 별 부착 강도를 대조하여 분석한 결과 FRP 시트의 부착 강도가 부재의 휨 보강 성능 및 부재의 파괴 양상은 부착 강도와 일정한 관계가 있으며, 파괴형상을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 실험 결과 탄소섬유시트 보강 후 부재의 최대 휨 강도 증가율은 콘크리트 강도가 낮을수록 보강 효과가 증가하는 경향을 보였다.

- 3) 콘크리트 강도별 부재의 연성능력을 분석한 결과 FRP 시트 부착 후 시험체의 연성지수는 3~3.16로 비슷한 수준을 나타내었다. FRP 시트를 활용한 노후 콘크리트의 파괴양상과 최대 휨 내력은 콘크리트의 강도에 따라 달라질 수 있으나 보강 효과는 사용하는 보강 시트의 물성에 따라 한계점이 발생되며, 부착 강도와 더 큰 연관이 있는 것으로 사료된다. 노후화에 따른 강도가 변화된 콘크리트에 대한 탄소섬유시트의 보강 효과 관련 연구가 진행될 필요성이 있으며, 본 연구를 차후 연구의 자료로 활용하고자 한다.

References

- [1] KD. Lee, HC. Im, BH. Lim, "Concrete Compressive Strength Prediction from Deteriorating Apartment Site" *Journal of the Korea Institute of Building*, Vol. 6, No.1, pp.155-158, 2006.
- [2] Mohammad Ismail, Bala Muhammad, Mohamed ElGelany Ismail, "Compressive strength loss and reinforcement degradations of reinforced concrete structure due to long-term exposure" *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 6, Pages 898-902, 2010.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.003>
- [3] An H, Lee J. A "Study on Seismic Fragility of PSC Bridge Considering Aging and Retrofit Effects", *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, Vol. 24, No. 6, pp. 34-41, 2020.
DOI : <https://doi.org/10.11112/ksmi.2020.24.6.34>
- [4] M. Catuira, MJ. Lee, JS. Park, "Numerical Study on Seismic Performance Evaluation of Concrete Pier Externally Confined by CFRP, GFRP, and Steel", *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 12 No. 2. pp 1-11, April, 2021.
DOI : <https://doi.org/10.11004/kosacs.2021.12.2.001>
- [5] GS. Zi, JH. Kim, "An Experimental Study on Strength Properties, Size Effect, and Fatigue Behaviour of Concrete under Biaxial Flexural Stress State", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33 Issue 3, pp. 901-907, 2013. 5.
DOI : <https://doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.3.901>
- [6] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. Criteria for evaluating seismic performance of existing facilities (buildings). Law, Manual, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea, pp.25-26
- [7] Korean Concrete Institute. 2012.
- [8] American Concrete Institute. ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17), 2018.

- [9] H. Ka, JW. Choi, YH. Kim, JM. Park, "Analytical Study of the Flexural Capacity of Preflex Girders Reinforced by FRP Sheets", *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 12 No. 3, pp. 1 - 8, 2021.
DOI : <https://doi.org/10.11004/kosacs.2021.12.3.001>
- [10] HB, Ko. "Verification of Parameters Influencing Bond Strength between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 9, pp. 414-423, 2020.
DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.9.414>
- [11] DS, Yang, SK, Park, YH, Lee. "Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Steel Strand and Carbon Fiber Sheet". *Journal of the Korea Concrete Institut*, Vol.14, No.2, pp. 216-222, April. 2002.
DOI : <https://doi.org/10.4334/JKCI.2002.14.2.216>
- [12] SS. Ha, "Flexural Strengthening Effects of RC Beams using Hybrid FRP Sheets". *Journal of the Architectural Institute*, Vol. 14, No. 1, pp. 221-228, 2012.

박 미 소(Mi So Bak)

[준회원]



- 2020년 9월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 일반대학원 건축과 (석사과정)

<관심분야>

건축구조, 철근콘크리트구조

노 영 숙(Young Sook Roh)

[정회원]



- 1991년 2월 : 단국대학교 건축공학과 졸업
- 2000년 8월 : 미국 콜로라도 대학교 건축공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 공과대학 건축학부 교수

<관심분야>

철근콘크리트구조 노후화, 보수보강 기술, 3D 프린팅 기술, 비파괴 진단