KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research
Vol. 42, No. 5: 607-616/ October, 2022
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2022.42.5.0607

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2799-9629 (Online)
www.kscejournal.or.kr

Concrete Engineering **콘크리트공학**

BFRP로 횡구속된 섬유 보강 콘크리트 압축부재의 성능평가

이경복* · 이상문** · 정우영***
Lee, Gyeong-Bok*, Lee, Sang-Moon**, Jung, Woo-Young***

Performance Evaluation of Fiber-Reinforced Concrete Compression Members Transversely Constrained by BFRP

ABSTRACT

Corrosion and degradation of reinforced structures due to abnormal climates and natural disasters further accelerate the aging of structures. Coping with the decrease in structure performance, many old structures are being repaired and reinforced with low-weight and high-strength materials such as glass fiber composite material (GFRP). To further contribute, this paper focus on a more economical and eco-friendly material, basalt fiber composite (BFRP), which provide a more effective lateral constraint effect for seismic reinforcement. The main variables considered in this study are the curing temperature during the manufacturing of BFRP and the material characteristics of the target concrete member. The lateral constraint reinforcement effect was investigated through the evaluation of the performance of normal concrete and those with improved durability through fiber reinforcement. The reinforcement effect was 3.15 times for normal concrete and 3.72 times for fiber reinforced concrete, and the difference in reinforcement effect due to the improvement of the durability characteristics of the compression member was not significant. Lastly, the performance of the BFRP was compared with the results of the GFRP reinforcement from the previous study. The effect of the BFRP reinforcement was 1.18 times better than that of the GFRP reinforcement.

Key words : Confined effect, Compression member, BFRP, Fiber-reinforced concrete, Freezing and thawing

초 록

전 세계적으로 이상 기후 및 자연재난 등으로 인하여 철근콘크리트 구조물의 부식 및 열화 현상이 빈번히 발생됨에 따라 구조물의 노후화가 가속화되고 있다. 건설 분야에서는 이러한 내하력 저하에 대응하기 위하여 최근 저 중량 고강도 재료 장점을 가진 유리섬유 복합재료(GFRP)를 활용하여 많은 노후 구조물에 대하여 보수·보강을 수행하고 있다. 본 연구에서는 유리섬유에 비하여 보다 경제적이고 친환경적인 바잘트 섬유 복합재료(BFRP)를 활용하여 콘크리트 압축부재의 내진보강을 위한 횡구속 효과를 더욱 효과적으로 제공할 수 있는 보강재를 개발하고 그 성능을 평가하였다. 실험 시 고려된 주요 변수로는 바잘트섬유 복합재료(BFRP) 시공 시 적용되는 함침 수지의 양생 온도와 대상 콘크리트 압축부재의 재료 특성을 고려하였다. 콘크리트 압축부재의 재료 특성에 따른 횡구속 보강효과를 조사하기 위하여 본 연구에서는 일반 콘크리트와 섬유 보강을 통하여 내구성능이 개선된 콘크리트 시험체를 각각 제작하여 성능을 평가하였다. 그 결과, 일반 콘크리트의 경우 3.15배, 섬유 보강 콘크리트의 경우 약 3.72배의 보강 효과가 나타났으며 압축부재 내구특성 개선에 따른 보강 효과의 차이는 크지 않음을 알 수 있었다. 마지막으로 GFRP 압축부재 보강재에 대한 선행연구 결과를 통하여 바잘트 보강 복합재료의 성능을 비교한 결과 BFRP 보강재의 횡구속 보강효과가 상대적으로 약 1.18배 GFRP 보강재에 비하여 성능이 우수한 것으로 나타났다.

검색어 : 횡구속, 압축부재, 바잘트섬유 복합재료, 섬유보강콘크리트, 동결융해

* 강릉원주대학교 토목공학과 석사 후 연구원 (Gangneung-Wonju National University · whiteblow1025@naver.com)
** 정회원 · 강릉원주대학교 방재연구소 연구교수 (Gangneung-Wonju National University · idealmoon@gwnu.ac.kr)
*** 정회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (**Corresponding Author** · Gangneung-Wonju National University · woojung@gwnu.ac.kr)

Received July 4, 2022/ **revised** July 26, 2022/ **accepted** August 26, 2022

Copyright ⓒ 2022 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

대부분의 철근콘크리트 구조물은 경제성 및 내구성을 장점으로 가지고 있으며, 주거시설과 일반 건축물, 터널, 교량, 항만, 공항 등의 각종 국가 주요 시설들에 필수 및 부가적인 요소로 오랫동안 적용되고 있다. 국내의 경우 약 1970~1980년에 이르러 경제 산업 발전과 함께 콘크리트를 활용한 국가시설 및 주요시설 등이 집중적으로 건설되기 시작했으며, 이는 현재 준공된 지 30년 이상 경과한 상태로서 2017년 기준으로 30년 미만의 시설물은 전체 구조물의 49.8 %에 이르는 비율을 가지고 있는 것으로 조사되었다(KICT, 2017). 이처럼 시설물의 고령화는 전 세계적으로 매우 중요한 문제로 주목받고 있으며 국내에서도 시설물 노후화에 대한 유지관리 및 보수에 관한 관심이 점차 증가하고 있다.

일반적인 노후 구조물의 성능을 향상시킬 수 있는 보강방법으로 대체로 주요 부재를 FRP 복합재료를 활용한 실험적 연구가 진행되고 있으며(Lee et al., 2009), 그 중 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 무보강 압축부재에 대하여 다양한 변수를 고려한 실험을 수행하였다. 압축부재에 대한 기본적인 보수 및 보강대책으로는 크게 외부부착공법, 단면증설공법, 외부프리스트레싱 공법 등이 제안되어 있으며 섬유강화복합재료(FRP)를 활용한 외부부착공법이 최근 기술로 제안되어 있다. 외부부착공법은 현재 강판보강재와 비교하여 많은 장점과 우수한 역학적 성질을 가지는 섬유강화복합재료(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP)를 활용하여 구조물 외부에 Sheet나 Plate 형태의 보강재로 제작하여 구조물에 작용상태를 변화시키는 보강재로 적용하고 있다(Cho, 2020; Kim, 2021). FRP는 제작공법, 수지, 섬유의 종류에 따라 다양한 형식의 FRP로 제작되며 형상의 제약이 적어 보강하고자 하는 부재의 형상에 맞춰 제작 가능하며 주로 유리 및 탄소, 아라미드 섬유를 활용한 FRP 복합재료를 보강재로써 적용중이다. 하지만 최근 연구결과에 따르면 탄소섬유의 경제성, 유리섬유의 환경문제 등 부정적인 문제가 제기되고 있으며 이에 따른 문제점을 개선 가능한 섬유 개발이 화두가 되고 있다(Ye et al., 2021). 현무암추출 섬유강화복합재료(Basalt Fiber Reinforced Polymer, 이하 BFRP)는 기존 섬유시장에 문제점을 개선할 수 있는 섬유로써 경제적이고 역학적 성질이 우수하며 기존 섬유강화복합재료와 비교하여 우수한 내열성과 제작 및 폐기 시 유해물질의 검출이 없다는 장점 등 친환경적으로 알려져 이에 따라 BFRP를 활용하여 성능을 검증하고자 하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

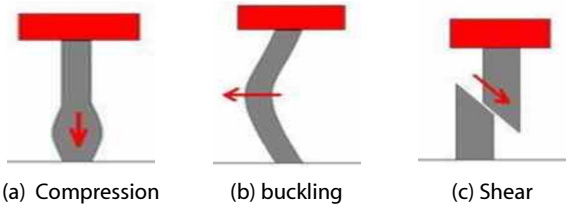


Fig. 1. Failure form of Column

본 연구는 앞선 문단에 기술된 연구 재료의 사용 배경을 바탕으로 기존 유리섬유 대신 바잘트 섬유로 대체하여 압축부재에 대한 다양한 조건을 고려한 실험적 연구를 수행하고 유리섬유와의 결과 비교를 통하여 성능을 검증하고자 한다(Jung et al., 2013). 콘크리트 압축부재의 BFRP를 활용한 횡구속 보강재에 대한 효율적인 성능 검증을 위하여 콘크리트 압축부재의 종류를 달리하여 BFRP 보강 시 실험 모체의 변화에 따른 FRP 구속 효과를 비교하였으며, 보강재의 제작 특성에 따른 성능 차이를 알아보기 위해 섬유와 수치의 함침 양생온도를 달리하여 보강 성능의 차이를 조사하였다. 또한, 최근 들어 국내외적으로 많은 이슈가 되고 있는 콘크리트의 노후화를 고려하기 위하여 콘크리트 모체에 동결 융해 실험을 수행하였으며, 이에 따른 횡구속 보강 성능을 측정하여 성능을 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용 재료

2.1.1 바잘트 복합재료

바잘트 섬유의 경우 1400 ℃이상의 고온에서 용융 후 방사하여 제작하며 유리섬유와 비교하여 강도가 우수하고 알칼리, 산성 및 염해에 대한 내성이 좋다고 알려져 있으며 탄소섬유 대비 적용 가능한 온도범위(-270 °C~+600 °C)가 높고 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 선진국을 중심으로 현무암섬유에 대한 연구가 진행되면서 국내에서 또한 현무암섬유를 활용한 연구가 활발하게 진행되었다. 러시아산 현무암섬유를 활용하여 역학적 특성 및 내구성을 확인하기 위해 밀도, 섬유의 직경, 탄성계수, 인장강도, 파단연신율 등이 측정되었고 내알칼리성, 내후성, 오토클레이브 안정성, 내열성 등의 실험적 연구가 진행되었다(Sim et al., 2004). 그 결과 현무암섬유의 인장강도는 탄소섬유 대비 30 %, 고기능성 유리섬유 대비 60 % 정도인 것으로 확인되었으며, 내구성의 경우 탄소섬유, 현무암섬유, 유리섬유 순으로 충분한 내구성이 확인되었다. 또한 내화성능의 경우 현무암섬유가 기존 유리 섬유대비 크게 우수함이 입증되었으며, 2겹 이상의 보강을 실시하여 15~27 %의 항복하중이 증가하게 되면 내하성능이 충분히 향상되는 것이 확인되었다.

한편, 현무암은 용암 방출활동에 의해 생성된 화산암의 일종이며 전 세계에서 발견되는 가장 큰형태의 광물이다. 현재 국내의 섬유시장을 장악하고 있는 유리섬유의 경우, 주 화학성분을 전량 수입에 의존하기 때문에 생간가격이 상승하게 되지만 현무암섬유의 주원료인 현무암은 국내 철원 등지에 충분한 매장량을 가지고 있어 원료추출과정을 수입에 의존하지 않고 국내자원을 활용한 제작

및 개발이 가능하다. 또한 유리섬유 및 탄소섬유 등 대부분의 섬유 생산에 고에너지를 소비하고 있으나 현무암섬유 생산은 상대적으로 낮은 에너지를 소비하므로 저렴하게 생산이 가능해 충분한 경제성을 가지고 있다고 판단된다.

함침용 수지는 에폭시 레진, 폴리에스테르 등의 다양한 종류가 있으며, 일반적으로 에폭시 계열의 수지를 사용했을 때 가장 높은 인장강도를 가지는 것으로 알려져 있다. 함침용 수지는 양생온도에 따라 크게 2종류로 나눌 수 있으며, 각 수지에 따른 재료 부착 및 특성은 매우 다르므로 실제 압축부재 보강 시 각각의 성능은 다르게 나타날 수 있다(Jung et al., 2013; Kwak, 2019; Lee et al., 2006). 본 연구에서 섬유와의 함침을 위해 사용된 수지로는 Table 1의 일반적으로 상온용(20 °C)에서 많이 사용되는 에폭시 수지중의 하나인 Resoltech-1050(주제)을 사용하였으며 1056S 경화제를 함께 사용하였다. 고온용(25 °C 이상) 에폭시 수지로는 선행연구를 참조하여 Table 2와 같이 KUKDO Epoxy Resin KFR-502 에폭시 수지를 사용하였으며 Table 3과 같은 고온 함침용 경화제인 KUKDO Hardener KFH-9590H를 사용하였다(Chhorn and Jung, 2020; Heon, 2016). Tables 1~3은 각각의 복합재료 제작 시 사용한 수지(상온 및 고온 양생용)의 상세 정보를 나타낸다. Table 4는 본 연구에 사용된 BFRP의 기본 물성치 연구에 대한 선행연구를 바탕으로 기존 GFRP의 물성치를 상온에서의 양생을 기준으로 비교하여 나타낸 것이다(Cho, 2020).

Table 1. Resoltech 1050 Epoxy Resin

Mixing Ratio (Resin : Hardener)	Density (g/mL)	Viscosity (mPa.s)	Geltime on 2 mm Thick file at 23 °C
100:35	1.10	462	3 h 10 m

Curing & Post Curing			
14day at 23 °C		16 h at 23 °C	
Tg (°C)	Shore D Hardness	Tg (°C)	Shore D Hardness
49.1	89	66.7	90

Table 2. KUKDO Epoxy Resin KFR-502

Item	Normative values	Test Method
EEW (g/eq)	180-190	KD-AS-001
Viscosity (cps* at 25 °C)	9000-11000	KD-AS-005
Hy-Cl (wt%)	0.05 max	KD-AS-010
Specific Gravity (20 °C)	1.174	KD-AS-040
Color (Gardner)	0.5 max	KD-AS-025

* Viscosity units according to the metric system. 1 centipoise is 1 gram per meter per second.

Table 3. KUKDO Hardener KFH-9590H

Item	Normative values
Acid Value (mgKOH/g)	650 Min
Color (Gardner)	1 Max
Viscosity (cps at 25 °C)	45-80

Table 4. Mechanical Properties according to Fibers

Classification	Tensile Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Strain	Modulus of Elasticity (GPa)
BFRP	785.59	71.52	0.0241	30.08
GFRP	485.58	53.32	0.0258	23.98

2.1.2 일반 및 섬유보강 콘크리트

본 연구에서는 압축부재 모체의 종류를 달리하여 BFRP 보강 시 실험 모체의 변화에 따른 보강 효과를 검토하고자 실험 변수로 일반 콘크리트 및 섬유가 함유된 섬유보강 콘크리트 시험체를 제작하였다. 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)는 보통 콘크리트의 역학적 성질을 개선하기 위해 단섬유상의 보강용 섬유를 시멘트 매트릭스 중에 균등하게 분산시킴으로서, 인장강도 및 휨강도, 인성 등을 대폭 개선시킨 복합재료이다. 구조적인 성능으로서의 섬유보강콘크리트의 사용 목적은 콘크리트의 미세균열은 콘크리트 성능에 있어서 많은 영향을 미친다. 콘크리트의 수밀성을 감소시키며, 동결 및 융해 작용으로 인한 열화현상, 대기 중의 강도저하의 원인이 되는 유해물질 등의 접촉으로 부식 등이 가속화되어 수명이 단축되는 현상이 일어난다. 이를 방지하기 위하여 콘크리트 내 섬유의 첨가를 통하여 콘크리트의 성능 저하를 막고자 함에 있다. 따라서 일반적인 콘크리트와 연성이 증대된 섬유보강 콘크리트와의 횡구속 보강 시 재료적 특성에 따른 성능차이를 검토하고자 Tables 5 and 6의 콘크리트 배합표에 따라 시편을 제작하였다. 일반 콘크리트 시편 제작 시 목표한 콘크리트 배합강도는 고속도로 설계 실무 자료집(Korea Expressway Corporation, 2005)에 제시된 국내 일반교량 하부구조의 설계기준강도(24~27 MPa)를 고려하였는데, 실제로 현장에서 일반적으로 가장 많이 보강되는 부재에 대한 보강 효과를 간접적으로 고려하기 위함이다. 섬유보강 콘크리트의 경우 최근 건설 분야에 적용중인 섬유보강 콘크리트의 강도를 고려하여 목표 설계기준강도를 40 MPa로 설정하여 배합을 수행하였다. 섬유보강 콘크리트 배합 시 혼입된 섬유의 종류는 BFRP로, Chopped strand의 섬유 형태를 사용하였으며, 섬유의 혼입률은 부피비로 역산하여 고려되는 선행연구를 참조하여 연성 증대의 효과가 나타나기 시작하는 1 %의 혼입률을 적용하였다. 사용된 단섬유의 제원은 두께 2 mm, 폭 3 mm, 길이 15 mm로 재단하여 배합 시 혼입하였다(Choi et al., 2015; Heon, 2016).

Table 5. Mix Design of the Normal Concrete

Classification	W/C (%)	S/a (%)	Coarse Aggregate Maximum Dimension (mm)	Unit Weight (kg/m^3)			
				Water	Cement	Sand	Gravel
Normal Strength	50	45	19	180	375	762	981
High Strength	40	42	25	170	425	721	985

Table 6. Mix Design of the Fiber Reinforced Concrete

Classification	W/C (%)	S/a (%)	Coarse Aggregate Maximum Dimension (mm)	Unit Weight (kg/m^3)			
				Water	Cement	Sand	Gravel
Fiber Reinforced	60	39	25	200	330	767	967

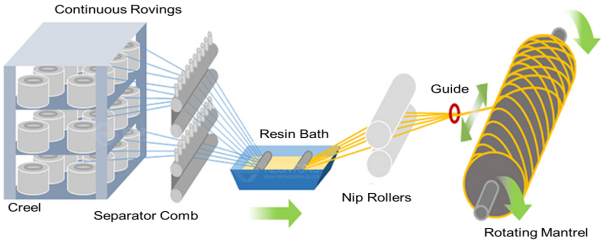
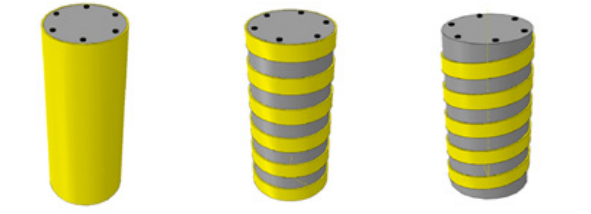
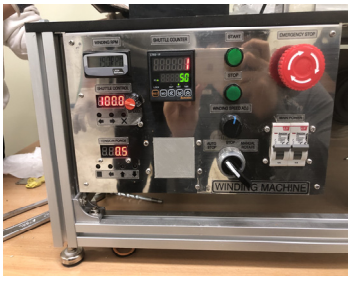


Fig. 2. Filament Winding Process Schematic Diagram

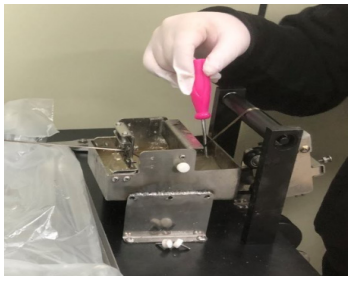


(a) Full Wrapping (b) Ring Partial Wrapping (c) Spiral strip Partial Wrapping

Fig. 3. Types of Wrapping Reinforcement Techniques

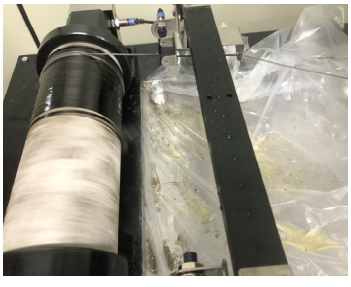


(a) Reinforced Thickness Setting



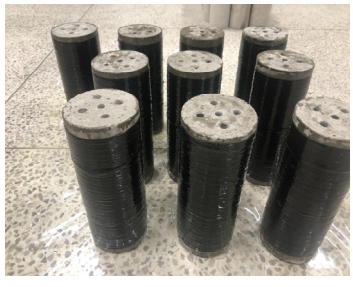
(b) Epoxy Resin Filling

(c) Concrete Placement and Fiber Fixation



(d) Concrete Restraint Reinforcement

(e) Reinforced Concrete Curing (High Temperature)



(f) Reinforced Concrete Curing (Normal Temperature)

Fig. 4. Specimen Production Process

2.2 시험체 제작 및 실험 방법

KS F 2405(2017) 규격에 따라 섬유보강 콘크리트 및 일반 콘크리트 공시체를 선 제작 후 Fig. 2와 같은 필라멘트 와인딩 기법을 통하여 Fig. 3에 나타낸 일반적인 기둥 보강 방법 중 Full-Wrapping 공법을 적용하여 압축부재에 대한 횡구속을 진행하였다(Dawei, 2016). 횡구속 보강 시 함침수지 특성에 따라 고온 양생의 경우 오븐에서 3시간 양생하였으며, 상온 양생은 실험실 내에서 24시간 양생하였다(Yoon et al., 2019). 콘크리트 동결 융해 실험의 경우,

KS F 2456(2018)에 따라 급속 동결 융해 실험을 진행하였으며 기중에서 급속 동결 후 융해하는 실험 방법을 채택하였다. Fig. 4는 본 연구의 전반적인 시험체 제작 과정을 순서대로 나열한 것이다.

Table 7은 실험 변수에 따라 수행되는 시험체의 종류 및 개수를 나타낸 것으로서, 동결 융해 실험을 제외한 나머지 실험의 경우 KS F 2403(2019) 기준에 따라 실험 결과의 신뢰성을 위해 5개의 시편을 제작, 최대/최소를 제외한 나머지를 평균하여 결과를 도출하였다. 동결 융해 실험을 위한 시편 개수의 경우, Fig. 5와 같이 동일한 조건에서의 환경 제공을 위한 기기 내 시편의 효율적 배치를 위하여 3개의 시편으로 제한하였으며, 선행연구를 참고하여 동결융해 횟수를 100, 200, 300으로 결정하였다(Lee and Eo, 2020).

3. 실험결과 및 분석

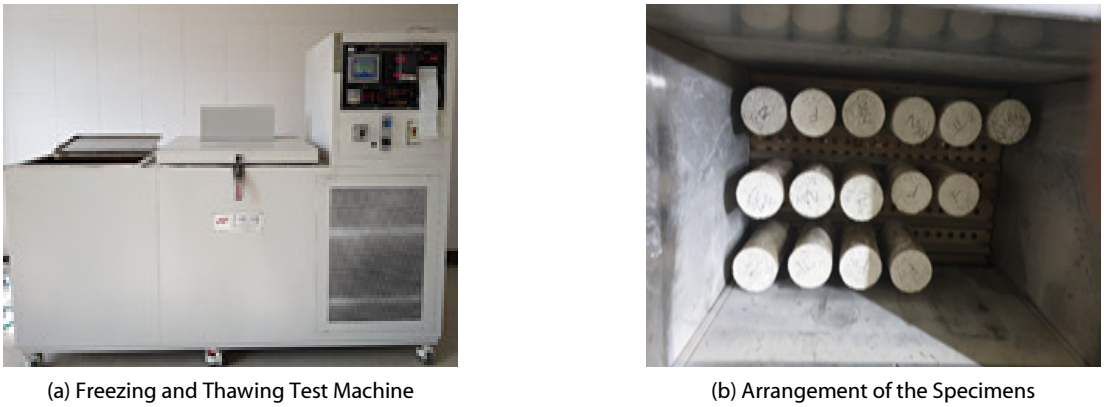
3.1 콘크리트 종류에 따른 BFRP 횡구속 성능 평가

콘크리트의 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성을 높이고 인성 및 내충격성을 개선할 목적으로 각종 섬유를 콘크리트 속에 균일하게 분산시키는 것이 일반적인 콘크리트와 섬유보강 콘크리트와의 차이점이다. 이에 따라 콘크리트를 구성하는 재료의 물성에 따라 보강효과의 차이가 있는지 여부를 알아보고자 Table 8과 같이 일반 및 섬유보강 콘크리트 종류로 실험군을 분류하고, BFRP를 이용하여 횡구속에 따른 보강 전후의 결과를 비교하였다.

실험 결과, BFRP 횡구속 보강 시 일반 콘크리트는 보강 전

Table 7. List of Specimen Types and Descriptions

Experimental Condition	Name	EA	Description	Concrete Strength (MPa)
Concrete type	O.P.C	5	Ordinary Portland Concrete	24
	H.S.C	5	High Strength Concrete	40
	F.R.C	5	Fiber-Reinforced Concrete	
Restraint Reinforced and Resin Curing	N.T.C	5	Normal Temperature Concrete	24
	H.T.C	5	High Temperature Concrete	
Freezing and Thawing Test	H.S.C.100	3	100 Cycle to H.S.C	40
	H.S.C.200	3	200 Cycle to H.S.C	
	H.S.C.300	3	300 Cycle to H.S.C	
	F.R.C.100	3	100 Cycle to F.R.C	
	F.R.C.200	3	200 Cycle to F.R.C	
	F.R.C.300	3	300 Cycle to F.R.C	
	W.H.S.C.100	3	100 Cycle to H.S.C wrapped with BFRP	
	W.H.S.C.200	3	200 Cycle to H.S.C wrapped with BFRP	
	W.H.S.C.300	3	300 Cycle to H.S.C wrapped with BFRP	
	W.F.R.C.100	3	100 Cycle to F.R.C wrapped with BFRP	
	W.F.R.C.200	3	200 Cycle to F.R.C wrapped with BFRP	
	W.F.R.C.300	3	300 Cycle to F.R.C wrapped with BFRP	



(a) Freezing and Thawing Test Machine (b) Arrangement of the Specimens

Fig. 5. Freezing and Thawing Test Machine and Arrangement of the Specimens

Table 8. Results of Compressive Strength According to Concrete Types

Classification	No	Maximum Compressive Strength (MPa)	Average Maximum Compressive Strength (MPa)	Reinforcement Efficiency (%)
H.S.C	1	35.15	39.77	-
	2	39.42		
	3	41.38		
W.H.S.C	1	78.57	77.34	202.56
	2	71.90		
	3	80.56		
F.R.C	1	35.71	38.67	-
	2	41.65		
	3	38.66		
W.F.R.C	1	81.30	80.15	207.25
	2	84.41		
	3	74.74		

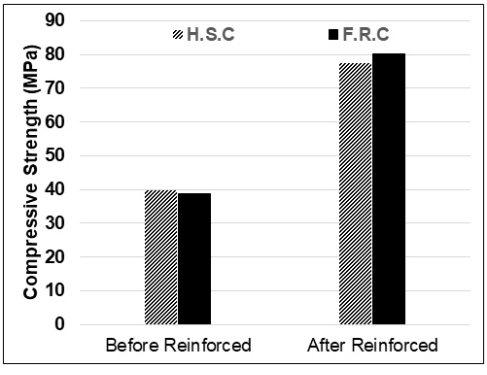


Fig. 6. Comparison of Compressive Strength Results before and after BFRP Reinforcement

대비 약 2.02배, 섬유보강 콘크리트는 약 2.07배의 압축강도가 증가되는 것을 확인하였다. 하지만, 섬유보강 콘크리트에 횡구속 보강 시 일반 콘크리트 대비 보강 성능이 약 6.6 % 상승하는 것에 그쳤다. 이 같은 결과에 따라 콘크리트 모체의 재료적 성능에 따른 횡구속 보강의 영향은 크지 않는 것으로 판단된다. 실험 종료 후 보강된 시험체의 파괴 형상은 모두 중앙부의 팽창에 의한 파괴가 발생하였다. Fig. 6은 콘크리트 종류에 따른 BFRP 횡구속 보강 전/후의 압축강도를 비교한 그래프이다.

3.2 함침수지 양생에 따른 BFRP 횡구속 성능 평가

함침용 에폭시 수지의 양생 온도 변화에 따른 BFRP 횡구속 보강재의 성능 효과를 비교하기 위하여 설계 강도가 24 MPa인 O.P.C를 기준으로 바잘트 복합재료 보강재의 함침용 수지의 양생

Table 9. Results of Compressive Strength according to Resin Curing

Classification	No	Maximum Compressive Strength (MPa)	Average Maximum Compressive Strength (MPa)	Reinforcement Efficiency (%)
O.P.C	1	24.28	26.26	-
	2	28.13		
	3	26.36		
N.T.C	1	78.07	77.07	293
	2	73.81		
	3	79.32		
H.T.C	1	105.08	97.76	372
	2	92.02		
	3	96.17		

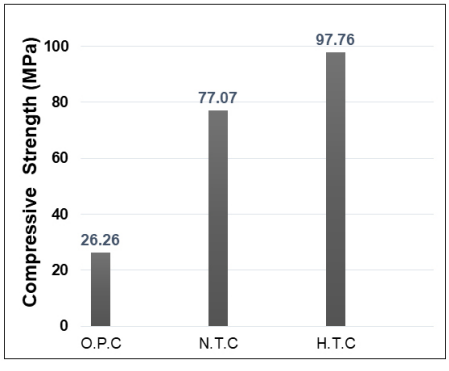


Fig. 7. Comparison of Compressive Strength Results according to Resin Curing

온도를 각각 다르게 적용한 횡구속 보강 시험체에 대하여 성능을 평가하고 무보강 시험체와 비교하였다. 고온 및 상온용 수지로 각각 함침된 횡구속 보강 시험체의 경우, Table 9와 같이 무보강 시험체 대비 상온 양생 조건의 최대 압축강도는 2.93배, 고온 양생 조건의 최대 압축강도는 3.72배의 보강효과가 나타났다. 또한, 수지 함침 시 고온으로 양생한 시험체가 상온에서 양생한 시험체 대비 약 1.26배의 보강효과가 나타난 것을 알 수 있는데, 이는 BFRP 보강재 제작 후 양생 시 주변 온도의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. Fig. 7은 수지 양생 온도에 따른 BFRP 횡구속 보강 전/후의 압축 강도를 비교한 그래프이다.

3.3 동결 융해에 따른 BFRP 횡구속 성능 평가

본 연구에서는 대표적인 콘크리트의 노후화를 고려하는 방법 중의 하나인 동결 융해 실험 방법을 채택하였으며, 선행연구를 참조하여 100, 200, 300 cycle로 횟수를 결정 후 실험을 수행하였다. 동결 융해에 의한 횡구속 보강효과에 대한 성능평가 시 일반 고강도

콘크리트 및 섬유보강 콘크리트를 대상으로 실험을 수행하였으며, 콘크리트의 종류에 따른 노후화를 고려한 BFRP 횡구속 보강 효과를 비교하고자 하였다.

실험 결과, BFRP로 보강되지 않은 일반 및 섬유보강 콘크리트 모두 동결 융해가 진행됨에 따라 압축 강도가 약 10 % 감소가 되는 것으로 나타났으며, BFRP 횡구속 보강 시 약 6 %의 감소 추세가 나타나 무보강 대비 보강효과가 나타난 것을 알 수 있었다. 하지만, 무보강 대비 BFRP로 횡구속된 시편의 경우 동결 융해 Cycle의 횟수가 증가함에 따른 일정한 감소 추세가 나타나지 않아 제작상의 오차로 인한 실험적 오류가 나타난 것으로 판단된다. Tables 10 and 11은 BFRP로 보강이 되지 않은 일반 고강도 콘크리트 및 섬유보강 콘크리트의 동결 융해에 따른 최대 압축강도 및 동결 융해 Cycle의 횟수에 따른 강도 감소율을 나타낸 것이며, Tables 12 and 13은 BFRP로 횡구속이 된 일반 고강도 콘크리트 및 섬유보강 콘크리트의 동결 융해에 따른 최대 압축강도 및 동결 융해 Cycle의 횟수에 따른 강도 감소율을 나타낸 것이다. Fig. 8은 동결 융행에 따른 BFRP 횡구속 보강 전/후의 압축 강도를 비교한 그래프이다.

3.4 파괴모드 분석 및 성능 검증

전반적으로 BFRP로 횡구속 보강된 압축 부재의 경우 무보강 압축 부재 대비 항복 하중을 초과한 시점 이후에도 잔류 강도가 지속적으로 남아 있는 것을 알 수 있었으며, 이에 따라 본 연구의 횡구속 보강 방법은 효과적인 방법인 것으로 판단된다. 한편, 횡구속

Table 10. Results of Compressive Strength of H.S.C according to Freezing and Thawing

Classification	H.S.C			H.S.C.100			H.S.C.200			H.S.C.300		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
Maximum Compressive Strength (MPa)	35.2	39.4	41.4	32.2	43.9	34.7	37.8	34.1	35.1	33.0	33.7	35.2
Strength Reduction Rate (%)	100			92.8			89.7			85.4		
Average Maximum Compressive Strength (MPa)	39.8			36.9			35.7			34.0		

Table 11. Results of Compressive Strength of F.R.C according to Freezing and Thawing

Classification	F.R.C			F.R.C.100			F.R.C.200			F.R.C.300		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
Maximum Compressive Strength (MPa)	35.7	41.7	38.7	37.6	38.4	35.1	36.2	35.7	36.0	34.7	33.6	35.6
Strength Reduction Rate (%)	100			95.7			93.0			89.5		
Average Maximum Compressive Strength (MPa)	38.7			37.0			36.0			34.6		

Table 12. Results of Compressive Strength of W.H.S.C according to Freezing and Thawing

Classification	W.H.S.C			W.H.S.C.100			W.H.S.C.200			W.H.S.C.300		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
Maximum Compressive Strength (MPa)	78.6	71.9	80.6	74.1	88.9	82.3	69.1	74.4	74.6	76.9	73.2	73.3
Strength Reduction Rate (%)	100			104.5			94.0			96.4		
Average Maximum Compressive Strength (MPa)	77.3			80.8			72.7			74.5		

Table 13. Results of Compressive Strength of W.F.S.C according to Freezing and Thawing

Classification	W.F.R.C			W.F.R.C.100			W.F.R.C.200			W.F.R.C.300		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
Maximum Compressive Strength (MPa)	81.3	84.4	74.7	79.0	89.8	76.8	76.4	73.6	81.4	85.6	84.5	78.6
Strength Reduction Rate (%)	100			102.1			96.5			103.4		
Average Maximum Compressive Strength (MPa)	80.2			81.9			77.4			82.9		

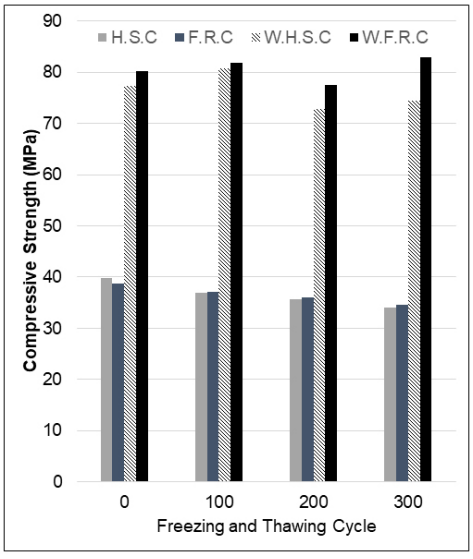


Fig. 8. Comparison of Compressive Strength Results according to Freezing and Thawing

(a) Ordinary Portland Concrete

(b) Transverse Constraint Reinforced Concrete with O.P.C

(c) Fiber-Reinforced Concrete

(d) Transverse Constraint Reinforced Concrete with F.R.C

Fig. 9. Concrete Failure Form

보강 콘크리트 시편의 경우 최종 파괴 시 무보강 콘크리트 시편에 비하여 작게 부스러지는 형태로 나타났는데, 보강 효과로 인하여 콘크리트의 한계 상태에 오래 머무르고 있음으로서 보다 많은 응력이 집중되어 작게 부스러지는 형태로 나타난 것이라 판단된다. Fig. 9는 각 실험 조건 별 보강 전/후의 파괴 모드를 보여준다.

한편, 기존 보강재에 많이 사용되는 유리섬유의 환경적인 문제가 제기되고 있으며 이에 따른 문제점을 대체 가능한 섬유 개발이 화두가 되고 있다. 이에 본 연구의 바잘트 섬유가 기존의 유리섬유를 합리적으로 대체 가능한지의 여부를 검증하고자 선행연구(Jung et al., 2013)에서 도출한 GFRP 보강 횡구속 실험 연구와의 비교

Table 14. Comparison of Performance of GFRP and BFRP at Ordinary Temperature

Classification	GFRP	BFRP
Normal Concrete Strength (MPa)	21.90	26.26
Reinforced Concrete Strength (MPa)	68.88	77.07
Reinforcement Ratio (%)	3.15	3.72
	1.18 (BFRP▲)	
Temperature (°C)	20 °C	
Disign Strength (MPa)	21	24

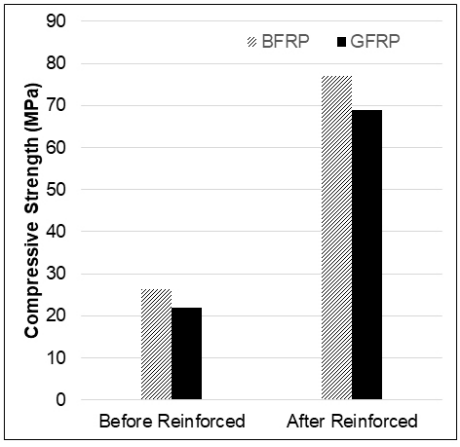


Fig. 10. Comparison of Compressive Strength Results between GFRP and BFRP

및 분석을 수행하였다. 동일한 설계 강도의 콘크리트 압축부재에 대하여 상온에서 양생한 GFRP 및 BFRP를 횡구속 보강재로 적용한 경우, 보강 효과는 각각 3.15배, 3.72배로 GFRP 보강재 대비 BFRP를 사용하여 보강한 콘크리트에서 보다 높은 보강 효과가 나타났다. 각 비교 결과는 Table 14와 같으며, Fig. 10에 결과를 비교한 그래프로 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 일반적인 콘크리트와 BFRP Chopped strand를 사용한 섬유 보강 콘크리트에 BFRP를 이용하여 횡구속 조건으로 보강한 시험체에 대하여 압축 성능 평가를 진행하였다. 실험 변수로는 콘크리트 압축부재의 종류 및 보강재의 제작 특성, 콘크리트의 노후화를 고려하기 위한 콘크리트 모체의 동결 융해 실험을 고려하였으며, 이에 따른 BFRP 횡구속 보강 성능을 측정하여 기존 유리섬유 보강재의 대체제로 활용하기 위한 기초 연구를 수행하였다.

(1) 콘크리트를 구성하는 재료의 물성에 따라 보강 효과의 차이가 나타나는지 확인하기 위하여 일반 및 섬유보강 콘크리트 종류

로 실험군을 분류하고, BFRP를 이용하여 횡구속에 따른 보강 전후의 결과를 비교하였다. 비교 결과, BFRP 횡구속 보강 시 일반 콘크리트는 보강 전 대비 약 2.02배, 섬유보강 콘크리트는 약 2.07배의 압축강도가 증가되는 것을 확인하였지만 보강 성능만을 놓고 비교할 경우 약 6.6 %의 미미한 효과만이 나타났다. 이 같은 결과에 따라 콘크리트 모체의 재료적 성능에 따른 횡구속 보강의 영향은 크지 않는 것으로 판단된다.

(2) BFRP 횡구속 보강재의 함침수지의 온도 양생에 따른 압축부재 보강 성능을 평가한 결과, 고온 및 상온용 수지로 각각 함침된 횡구속 보강 시험체의 경우 무보강 시험체 대비 상온 양생 조건의 최대 압축강도는 2.93배, 고온 양생 조건의 최대 압축강도는 3.72배의 보강효과가 나타났다. 또한, 수지 함침 시 고온으로 양생한 시험체가 상온에서 양생한 시험체 대비 약 1.26배의 보강효과가 나타난 것을 알 수 있는데, 이에 따라 BFRP 보강재 제작에 따른 양생 시 주변 온도의 영향에 각별한 주의가 필요할 것으로 사료된다.

(3) 일반 고강도 콘크리트와 상대적으로 연성을 증대시킨 섬유보강 콘크리트를 대상으로 동결 융해를 진행한 결과 고강도 콘크리트의 내구성능은 300 사이클에 대하여 약 10 %, 섬유보강콘크리트는 약 6 %가 감소되었다. 이후 BFRP 복합재료로 횡구속 후 수행된 압축보강 실험에서는 고강도 콘크리트 시험체는 무보강에 비하여 약 2.03배의 횡구속 보강 효율을 보였으며 섬유보강 콘크리트는 약 2.07배의 보강 증진을 보였다. 이를 토대로 동결융해 후 콘크리트 자체의 내구성능 저하는 발생할 수 있으나 노화 후 횡구속 보강 시 상대적으로 강도 개선 효과는 있을 것으로 판단된다.

(4) 본 연구의 바잘트 섬유가 기존의 유리섬유를 합리적으로 대체 가능한지의 여부를 검증하고자 GFRP로 압축부재를 횡구속 보강한 선행 연구와의 비교 및 분석을 수행하였다. 그 결과, 동일한 조건에서의 콘크리트 압축부재에 대하여 BFRP 횡구속 보강 시 GFRP 횡구속 보강재 대비 약 18 % 우수한 보강 효과가 나타났다.

(5) 본 논문의 연구 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 추가적인 연구 수행을 통하여 보다 다양하고 정밀한 콘크리트의 재료 특성이 반영된 시험체 제작이 필요하며, 다양한 종류의 섬유와 수지와의 함침율 등이 고려된 보강재 제작 기법 개발 및 수치해석을 통한 실험의 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 2022년 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(No. 22CFRP-C163381-02)으로 수행되었음.

References

Chhorn, B. and Jung, W. Y. (2020). “Evaluation of buckling resistance of basalt fiber reinforced polymer plate.” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, Vol. 44, No. 1, pp. 229-240.

Cho, D. W. (2020). *Bending test of concrete beam reinforced with BFRP plate and soft coating agent*, Master’s Thesis, Gangneung Wonju University, Gangneung, Korea (in Korean).

Choi, H. K., Bae, B. I. and Koo, H. S. (2015). “Correlation between mix proportion and mechanical characteristics of steel fiber reinforced concrete.” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 27, No. 4, pp. 331-341. DOI: https://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.4.331 (in Korean).

Dawei, Z. (2016). “Effect of PET wrapping on shear performance of corroded reinforced concrete columns.” *5th International Conference on Durability of Concrete Structures 2016*, Shenzhen, Guangdong Province, China, pp. 141-146. DOI: 10.5703/1288284316123.

Heon, Y. J. (2016). *A study on the mechanical property of fiber reinforced high strength concrete*, Ph.D. Thesis, Joongbu University, Geumsan, Korea (in Korean).

Jung, W. Y., Kim, J. S. and Kwon, M. H. (2013). “Evaluation of tensile material properties and confined performance of GFRP composite due to temperature elevation.” *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 7, pp. 3562-3569. DOI: https://dx.doi.org/10.5762/KAIS2013.14.7.3562 (in Korean).

Kim, G. R. (2021). “Structural evaluation of masonry wall reinforced by built-up T-joint BFRP plates.” *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 12, No. 5, pp. 25-36. DOI: 10.11004/kosacs.2021.12.5.025.

Korea Expressway Corporation (2005). *2005 Highway design practical handbook*, Korea Expressway Corporation (in Korean).

Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2017). *Structural performance improvement of infrastructures using FRP composites*, Final Report, Korea Institute of Construction Technology. DOI: https://doi.org/10.23000/TRKO201800042659 (in Korean).

KS F 2403 (2019). *Standard test method for making and curing concrete specimens*, Korea Construction Living Environment Testing Institute (in Korean).

KS F 2405 (2017). *Standard test method for compressive strength of concrete*, Korea Construction Living Environment Testing Institute (in Korean).

KS F 2456 (2018). *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*, Korea Construction Living Environment Testing Institute (in Korean).

Kwak, Y. J. (2019). *Evaluation of proto-BFRP border attachment strength according to freezing, temperature, and crack repair*, Master’s Thesis, Gangneung Wonju University, Gangneung (in Korean).

Lee, C. H. and Eo, S. H. (2020). “Compressive strength and durability evaluation by freezing and thawing test of repaired reinforced

concrete columns." *International Journal of Contents*, Vol. 20, No. 12, pp. 529-536. DOI: https://doi.org/10.5392/JKCA.2020.20.12.529 (in Korean).

Lee, D. H., Kim, Y. S. and Chung, Y. S. (2006). "Stress-strain behavior characteristics of concrete cylinders confined with FRP wrap." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, pp. 135-144. DOI: https://doi.org/10.4334/jkci.2007.19.2.135 (in Korean).

Lee, S. K., Min, K. H., Kook, K. H., Shin, H. O. and Yoon, Y. S. (2009). "An experimental study on unidirectional compressive behaviors of the FRP sheet confined concrete." *Proceedings of the 2009 regular symposium of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 2009, No. 10, pp. 1343-1346 (in Korean).

Sim, J. S., Park, S. G., Mun, D. Y. and Park, S. J. (2004). "A study on the durability and flexural strengthening capacity of continuous basalt reinforcing fibers." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No. 4, pp. 673-681 (in Korean).

Ye, Y. Y., Liang, S. D., Feng, P. and Zeng, J. J. (2021). "Recyclable LRS FRP composites for engineering structures: current status and future opportunities." *Composite Part B: Engineering*. China, Vol. 212, pp. 1-22. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108689.

Yoon, Y. S., Cho, S. J. and Kwon, S. J. (2019). "Prediction equation for chloride diffusion in concrete containing GGBFS based on 2-year cured results." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 23, No. 2, pp. 1-9. DOI: https://doi.org/10.11112/ksmi.2019.23.2.1 (in Korean).