

실란 커플링제 적용을 통한 CFRP Rebar의 부착 강도 개선 연구

염우성¹, 권도영², 추용식^{3*}

Study on Improving the Bond Strength of CFRP Rebar Through Application of Silane Coupling Agent

Woo-Sung Yum¹, Do-Young Kwon², Yong-Sik Chu^{3*}

Abstract: In this study, various types of silane coupling agents were applied to enhance the bond strength of the glass fiber, which functions as ribs on the surface of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rebars, and the resulting changes in physical properties were investigated. Using glass fiber composites, the optimal composition ratio of silane coupling agents was derived. Subsequently, CFRP rebars with a diameter of 10 mm were fabricated, and tensile strength, elastic modulus, and bond strength with concrete were tested. Initially, based on experimental results regarding the presence or absence of sizing on glass fibers and the type of silane coupling agent, the GS-3TPM sample exhibited the highest improvement rate, making it the optimal composition. The CFRP rebars manufactured with GS-3TPM showed approximately 5% higher tensile strength and elastic modulus compared to conventional CFRP rebars, and the bond strength with concrete improved by about 20%. This study confirmed that the application of silane coupling agents effectively enhances the bond strength between CFRP rebars and concrete.

Keywords: CFRP rebar, Tensile strength, Silane coupling agent, Bond strength, Glass fiber, Carbon fiber

1. 서론

최근 국내·외에서는 철근을 대체하기 위한 탄소섬유 보강근(Carbon Fiber Reinforced Plastic rebar) 개발 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Karataş, et al., 2018). CFRP rebar는 기존 철근에 비해 높은 인장강도, 경량성, 부식 저항성 등의 장점을 갖고 있지만 이형 철근(Deformed Rebar)과 다르게 표면에 별도의 형상이 존재하지 않아 콘크리트와 일체 거동이 다소 낮다는 단점이 존재한다(Krishnaveni et al., 2024). 따라서 일부 연구자들은 CFRP rebar와 콘크리트 간의 부착강도를 개선하기 위해 CFRP rebar 표면에 유리섬유를 이용하여 별도의 리브(Rib)를 형성하는 연구를 수행하고 있다(Sim et al., 2008). 하지만 리브 역할을 하는 유리섬유의 부착력이 낮을 경우 Fig. 1과 같이 리브가 탈락하는 현상이 발생하며, 이는 CFRP rebar와 콘크리트 사이의 부착력을 저하하는 요인이 된다. 따라서 유리섬유의 부착력을 개선하여 리브가 탈락하는 현상을 방지하고, 나아가 콘크리트와 CFRP rebar의 부착력을 개선하여 재료 간의

일체 거동을 유도 할 수 있는 방안이 제시되어야 한다.

한편, 일부 연구자들은 유리섬유의 부착력을 개선하기 위해 실란 커플링제(Silane Coupling Agent)를 적용하는 연구를 수행하고 있다(Rajak et al., 2021). 실란 커플링제는 Si-OH(실록산) 그룹과 유기 작용기를 갖는 일종의 첨가제인데, Si-OH 그룹은 금속, 유리, 세라믹 같은 무기 표면과 결합하고, 유기 작용기는 고분자 같은 유기 물질과 결합하여 결합력을 강화한다. 하지만, 실란 커플링제의 종류는 매우 다양하며, 사용하는 원재료(섬유 및 수지)의 종류에 따라 효과가 크게 달라진다(Ebrahimnezhad et al., 2021). 또한, 실란 커플링제의 종류 및 첨가량에 따라서 그 영향이 달라지며, 이 외에도 섬유 표면에 존재하는 코팅제인 사이징(Sizing) 존재 유·무 등에 따라 실란 커플링제의 영향이 달라지기 때문에 다양한 실험을 통해

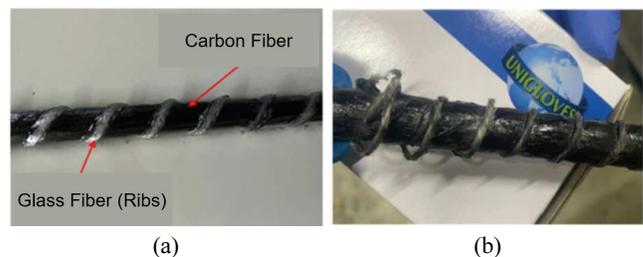


Fig. 1 CFRP rebar Photos: (a) Manufactured CFRP rebar and (b) Glass fiber (ribs) delamination due to insufficient adhesion

¹정희원, 한국세라믹기술원 선임연구원

²정희원, 한국세라믹기술원 학생연구원

³정희원, 한국세라믹기술원 수석연구원, 교신저자

*Corresponding author: yschu@kicet.re.kr

101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2025년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2025년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

실란 커플링제가 재료에 미치는 영향을 확인하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 1차 실험으로 CFRP rebar의 리브 부분에 사용되는 유리섬유의 부착력을 개선하기 위해 다양한 종류의 실란 커플링제를 적용한 뒤 그에 따른 부착강도 및 인장강도 변화를 확인하였다. 또한, 유리섬유 표면에 존재하는 코팅제인 사이징 존재 유·무를 실험 변수로 추가하여 그에 따른 변화를 확인하였다. 이어 2차 실험에서는 1차 실험을 통해 도출된 최적 배합비를 CFRP rebar에 적용한 뒤 그에 따른 인장강도, 탄성계수, 그리고 CFRP rebar와 콘크리트 간의 부착강도 변화를 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 원재료

본 연구에서는 국내 H사의 24K 탄소섬유 및 중국 C사의 4,400TEX 유리섬유가 사용되었다. C사에서 제조된 유리섬유 표면에는 사이징이 존재하지만, 사이징 존재 유무에 따라 실란 커플링제가 미치는 영향이 상이하다고 알려져 있어, 전

Table 1 The silane coupling agent used in this study

Abbreviation	Types of Silane Coupling Agent
3GT	3-(Glycidyloxypropyl)trimethoxysilane
3TPM	3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate
3AT	(3-Aminopropyl)triethoxysilane
3T	Trimethoxymethylsilane
B3TP	Bis-[3-(trimethoxysilyl)propyl]amine

Table 2 The Silane Coupling Agent used in this study

Group	Sample label	Ratio of Resin to Silane Coupling Agent (wt%)			
		Epoxy	Hardener	Silane Coupling Agent	Sum
Sizing Group	GS-Control	47.62	52.38	0	100
	GS-3GT				
	GS-3TPM				
	GS-3AT	47.14	51.86	1	
	GS-3T				
Non-Sizing Group	GS-B3TP				
	NGS-Control	47.62	52.38	0	
	NGS-3GT				
	NGS-3TPM				
	NGS-3AT	47.14	51.86	1	
	NGS-3T				
	NGS-B3TP				

처리를 통해 사이징이 제거된 유리섬유도 연구에 사용하였다. 참고로 사이징은 다수의 가닥으로 구성되어 있는 유리섬유 간의 정전기 발생 등을 방지하기 위해 존재하는 일종의 표면 코팅제이다. 사이징을 제거는 유리섬유를 아세톤에 24시간 동안 침지 한 뒤 60°C의 오븐에서 30분간 건조하여 제거하였다.

수지는 국내 K사의 에폭시 수지를 사용하였으며, 사전 연구를 통해 도출된 주제와 경화제의 비율(1:1.1)을 사용하였다 (Kim et al., 2023). 또한, 실란 커플링제는 미국 S사에서 구매하였으며, 문헌 조사를 통해 Table 1과 같이 5가지 종류를 선정하였다.

2.2 유리섬유 복합체 배합비 및 시편 제작

실란 커플링제 종류 및 유리섬유 사이징 존재 유무에 따른 유리섬유의 부착강도 및 인장강도 변화를 확인하기 위해 배합비를 Table 2와 같이 설계하였다. 배합비는 총 두 개의 그룹으로 구성되어 있으며, Sizing group은 유리섬유에 사이징이 존재하는 그룹이며, Non-sizing group은 전처리를 통해 유리섬유의 사이징이 제거된 그룹이다. 샘플명은 유리섬유의 사이징 제거 유무, 실란 커플링제 종류를 기반으로 명명하였으며, 예를 들어 NGS-3AT는 사이징에 제거되지 않은 유리섬유에 3AT의 실란 커플링제가 적용된 것을 의미한다. 또한, 실란 커플링제는 수지 중량 대비 1% 치환하여 적용하였다.

유리섬유 복합체 제작에는 10 cm x 10 cm 및 30 cm x 30 cm 크기의 유리섬유가 사용되었으며, 총 6장의 유리섬유 시트에 혼합 수지를 핸드레이(Hand Lay-up) 방법으로 도포하며 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 오토클레이브 양생기에 5 Bar의 압력으로 제작되었으며, 총 양생 시간은 3시간이었다. 양생 온도는 초기 30분간 상온에서 150°C로 승온하였으며, 2시간 동안은 150°C의 온도를 유지한 뒤 마지막 30분은 상온으로 온도를 낮추었다. 경화된 유리섬유 복합체는 ASTM D790 및 ASTM D3039에서 제시하는 크기로 절단한 뒤 제시된 절차에 의해 Fig. 2와 같이 부착강도 및 인장강도를 측정하였다.

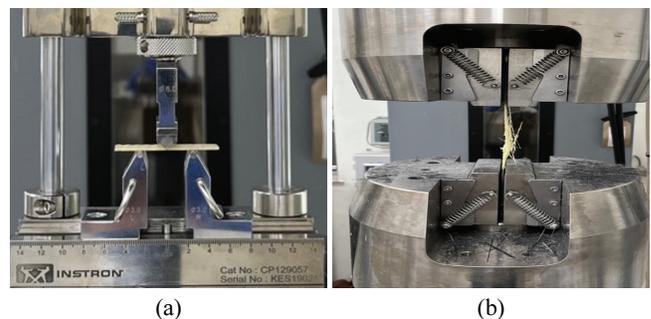


Fig. 2 Photos of glass fiber composite experiment: (a) bond strength and (b) tensile strength

2.3 CFRP rebar 시편 제작 및 부착강도 실험

1차 실험에서 도출된 최적 배합비를 토대로 실란 커플링제가 적용된 CFRP rebar를 제작하였으며, 실란 커플링제가 적용되지 않은 CFRP rebar를 비교군으로 설정한 뒤 그에 따른 인장강도, 탄성계수, 그리고 콘크리트와의 부착강도 실험을 수행하였다. 제작된 CFRP rebar는 직경 10 mm로 제작되었으며, 세부 제조 조건은 Table 3과 같다. CFRP rebar는 인발 성형기를 이용하여 제작되었으며, 제조 조건은 선행 연구를 통해 도출된 최적 제조 공정을 적용하였다. 수지 함침부의 온도는 45°C, 경화 온도는 총 6구간으로 최소 120°C에서 최대 180°C로 구성되어 있으며, 시편 제작 시간(경화시간)은 30분이다. 제작된 CFRP rebar는 Mts사의 1.2MN 피로시험기(Servo Hydraulic Fatigue Testing System)를 이용하여 인장강도 및 탄성계수를 측정하였다. 또한, 콘크리트와 CFRP rebar의 부착강도를 측정하기 위해 KS F ISO 10406-1에서 제시하는 방법에 따라 실험을 수행하였다. 또한, 콘크리트와의 부착강도를 측정하기 위해 사용된 콘크리트의 압축강도는 30 MPa이었다.

3. 실험 결과

3.1 유리섬유 복합체의 물리적 특성 측정 결과

배합비에 따라 제작된 유리섬유 복합체를 이용하여 부착강도 및 인장강도를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 또한, 실험 결과를 Sizing 제거 유무에 따라 구분하여 나타내었다. 먼저 부착강도의 경우 사이징 제거 유무 및 실란 커플링제 종류에 따라 강도 경향이 상이하게 측정되었다(Wu et al., 1997). 사이징 그룹의 경우, GS-3TPM이 기준군 시편에 비해 약 20% 높은 부착강도가 측정되었으나 그 외의 샘플들은 비슷하거나 오히려 부착강도가 감소하는 경향이 확인되었다. 하지만 사이징을 제거한 그룹에서는 모든 시편이 기준군 시편(NGS-Control)과 비슷하거나 높은 부착강도가 측정되었으며, 특히 NGS-3TPM 및 NGS-3AT의 부착강도 상승률은 각각 약 15% 및 60%이었다(Fan et al., 2023). 이를 통해 사이징 제거 유무 및 실란 커플링제 종류에 따라 부착강도 개선 정도가 다르게 측정되는 것을 확인할 수 있었으며, 사이징 제거 유무에 관계 없이 3TPM 실란 커플링제를 적용할 경우 부착강도 증진에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3 CFRP rebar manufacturing conditions

Ratio of Resin and Hardner	Resin Bath Temp. (°C)	Hardening Temp. (°C)						Prouction Rate (cm/min)	Hardening Time (Mins)
		120	180	120	130	170	180		
1 : 1.1	45	120	180	120	130	170	180	3	30

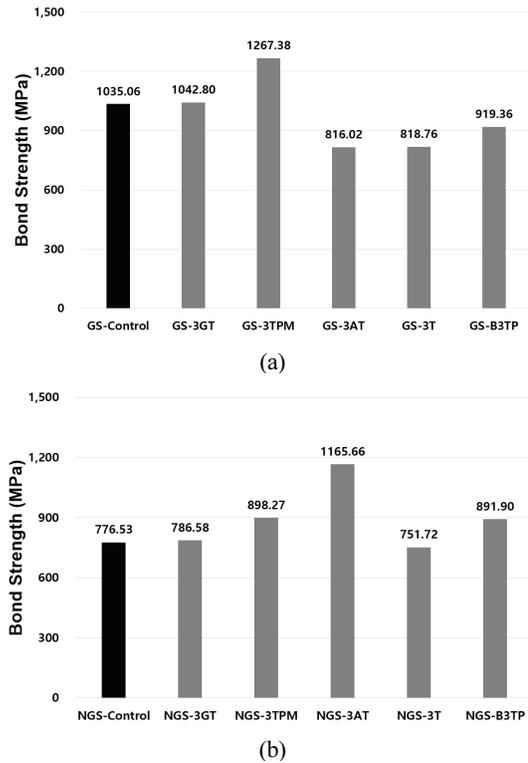


Fig. 3 Results of Bond Strength tests : (a) Sizing Group and (b) Non-Sizing Group

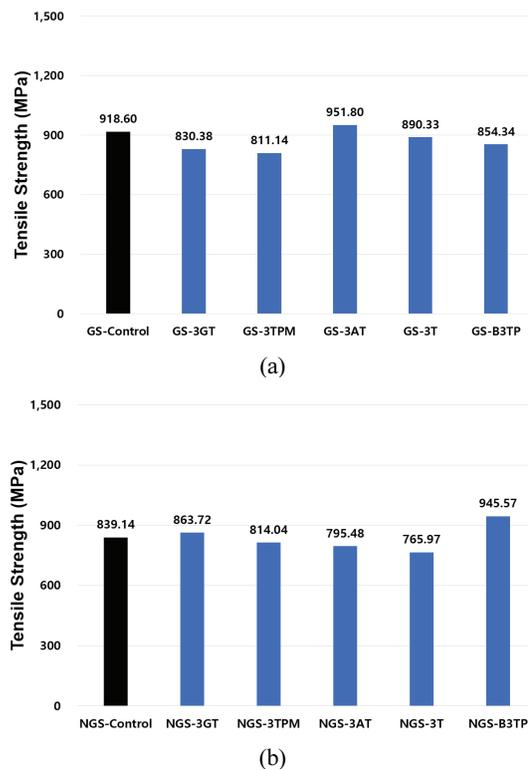


Fig. 4 Results of Tensile Strength tests : (a) Sizing Group and (b) Non-Sizing Group

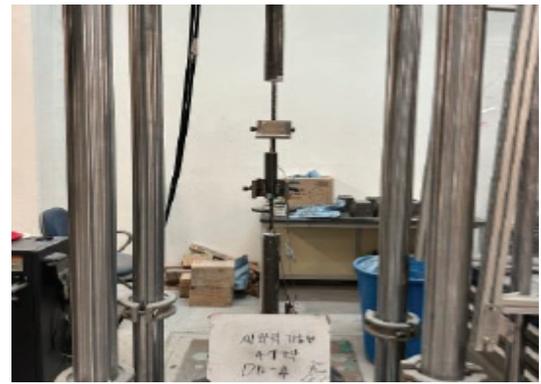
실란 커플링제 적용에 따른 인장강도 측정 결과는 부착강도 경향과는 일치하지 않았으며, 이는 실란 커플링제가 수지 및 유리섬유에 미치는 영향이 달랐기 때문이라고 판단된다 (Arslan et al., 2018). 먼저, 사이징이 존재하는 그룹의 경우 GS-3AT를 제외한 모든 시편에서 미미한 강도 저하 현상이 관측되었으며, 사이징이 제거된 경우에도 NGS-3GT 및 NGS-B3TP를 제외한 모든 시편에서 강도 저하가 확인되었다. 실란 커플링제 종류 및 사이징 유무에 따른 인장강도 및 부착강도의 경향이 다른 이유는, 적용된 실란 커플링제가 원재료나 실험 방법과 같은 조건에 따라 그 효과가 달라지기 때문이라고 판단되었다.

부착강도 및 인장강도 측정 결과와 실제 섬유 보강근을 제작하는 과정을 고려하였을 때 GS-3TPM의 적용이 적절할 것으로 판단되었다. 먼저 제작 과정을 고려하면 사이징을 제거한 섬유를 사용하게 될 경우, 별도의 전처리 공정이 추가되기 때문에 생산성이 저하될 것으로 판단되었으며 그 외에도 사이징이 제거될 경우 섬유 간의 엉킴 현상이 발생할 수 있어 문제가 될 수 있다고 판단되었다. 그 외에도 강도 결과를 고려하였을 때, GS-3TPM을 적용하였을 때 가장 높은 부착강도 개선 효과를 보였기 때문에 최적 배합비는 GS-3TPM이라고 판단되었다.

3.2 CFRP rebar의 물리적 특성 측정 결과

실란 커플링제 적용 유무에 따라 제작된 CFRP rebar의 인장강도, 탄성계수, 그리고 콘크리트와의 부착강도 측정 결과는 Table 4와 같다. 먼저, 실란 커플링제가 적용된 시편(D10 with SC)은 실란 커플링제가 적용되지 않은 시편(D10 without SC)보다 더 높은 물리적 특성이 측정되었다(Antonietta et al., 2007). 인장강도 및 탄성계수의 경우 실란 커플링제가 적용됨에 따라 특성이 개선되는 현상이 확인되었으나, 그 효과는 약 5% 이내 수준이라 유의미한 차이는 아니라고 판단되었다. 실란 커플링제 적용에 따라 인장강도 및 탄성계수의 큰 변화가 없는 이유는 실란 커플링제는 리브 역할을 하는 유리섬유의 부착력을 개선하는 역할에만 기여하고 섬유 보강근의 몸체 부분을 담당하는 탄소섬유의 부착력 등에는 영향을 미치지 못하기 때문이라고 판단되었다.

한편, 실란 커플링제 적용 유무에 따른 CFRP rebar와 콘크리트와의 부착강도 측정 결과, 실란 커플링제가 적용된 시편(D10 with SC)이 실란 커플링제가 적용되지 않은 시편(D10 without SC)에 비해 약 25% 높은 부착강도가 측정되었다. 이러한 경향은 유리섬유 복합체 실험 결과와 유사하였으며, 이를 통해 실란 커플링제의 적용이 리브 역할을 하는 유리섬유의 부착력이 증가하여 콘크리트와의 부착력을 개선하였다고 판단되었다.



(a)



(b)

Fig. 5 Measurement of Mechanical Properties of FRPP rebars : (a) Tensile Strength and Elastic modulus tests (b) Concrete Bond Strength Tests

Table 4 Results of Mechanical properties of FRPP rebars varying with Mixture proportions

Sample label	Tensile Strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Concrete Bond Strength (MPa)
D10 without SC	2,465	151.7	16.55
D10 with SC	2,570	155.9	20.99

4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유 보강근의 리브 역할을 하는 유리섬유의 부착력을 강화하여 콘크리트와 부착 강도를 증진시키는 방안에 대해 연구하였다. 유리섬유의 부착력을 개선하기 위해 5가지 종류의 실란 커플링제가 사용되었으며, 유리섬유의 사이징 제거 유무 등을 변수로 실험을 수행하였다. 본 연구에서 설정한 실험 변수에 따른 실험 결과 및 그에 따른 결론은 다음과 같다.

- 1) 사이징 유무 및 실란 커플링제 종류에 따라 유리섬유 복합체의 부착강도 및 인장강도 결과는 상이하였으며, 이는 실란 커플링제가 기존의 수지에 미치는 영향과 실험

하는 조건이 상이하였기 때문이라고 판단된다.

- 2) 사이징 그룹의 경우 GS-3TPM이 기준군 시편 대비 약 20% 높은 부착강도가 확인되었으며, 그 외의 경우에는 비슷하거나 낮은 수준의 강도가 측정되었다.
- 2) 사이징이 제거된 그룹의 경우 모든 시편이 기준군 대비 비슷하거나 높은 부착 강도가 측정되었으나, 절대값은 GS-3TPM에 비해 낮은 수준으로 판단되었다.
- 3) 유리섬유 복합체의 인장강도는 사이징 유무 여부 및 실란 커플링제 종류에 관계 없이 기준군 대비 비슷하거나 낮은 수준으로 측정되었으며 이를 통해 실란 커플링제가 인장강도에는 크게 영향을 미치지 않는다고 판단되었다.
- 4) 유리섬유 복합체 실험을 통해 도출된 최적 배합비(GS-3TPM)을 이용하여 직경 10 mm의 탄소섬유 보강근을 제작하여 인장강도, 탄성계수를 측정한 결과 기준군 대비 약 5%의 강도 개선이 확인되었다.
- 5) 탄소섬유 보강근과 콘크리트 간의 부착강도 실험 결과, 실란 커플링제가 적용될 경우 약 30% 강도 개선 효과가 확인되었으며, 이는 유리섬유 복합체의 결과와 유사하다고 판단되었다. 따라서, 실란 커플링제의 적용은 유리섬유의 부착력을 강화하여 콘크리트와의 부착력을 강화시키는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 탄소 고분자 부식 제로 철근대체재 기술개발 사업 연구비 지원(Grant 22CFRP-C163381-02)을 통해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

1. Karataş, M. A., and Gökkaya, H. (2018), A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, *Defence Technology*, 14(4), 318-326.
2. Krishnaveni, S., and Rajendran, S. (2024), Experimental studies on bond behaviour of steel rebar with different rib patterns in concrete, *Journal of Building Engineering*, 95, 110157.
3. Sim, J., Oh, H. S., and Benmokrane, B. (2008), An exploratory study of GFRP rebar with ribs containing milled glass fibers, *Composites Part B: Engineering*, 39(5), 882-890.
4. Rajak, D. K., Wagh, P. H., and Linul, E. (2021), Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review, *Polymers*, 13(21), 3721.
5. Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., Eslami-Farsani, R., Khosravi, H., and Shahrabi-Farahani, A. (2020), Improving the flexural properties of E-glass fibers/epoxy isogrid stiffened composites through addition of 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane functionalized nanoclay, *Silicon*, 12(11), 2515-2523.
6. Kim, N. I., Kwon, D. Y., Burenkhangai, D., Lee, K. M., Bae, S. Y., and Chu, Y. S. (2023), A study on manufacturing CFRP rebar with a high tensile strength. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 60(3), 488-495 (in Korean).
7. Wu, H. F., Dwight, D. W., and Huff, N. T. (1997), Effects of silane coupling agents on the interphase and performance of glass-fiber-reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, 57(8), 975-983.
8. Fan, Z., Gao, J., Wu, Y., Yin, D., Chen, S., Tu, H., ... and Jin, H. (2023), Highly enhanced mechanical, thermal, and crystallization performance of PLA/PBS composite by glass fiber coupling agent modification, *Polymers*, 15(15), 3164.
9. Arslan, C., and Dogan, M. (2018), The effects of silane coupling agents on the mechanical properties of basalt fiber reinforced poly (butylene terephthalate) composites. *Composites Part B: Engineering*, 146, 145-154.
10. Antonietta Aiello, M., Leone, M., and Pecce, M. (2007), Bond performances of FRP rebars-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(3), 205-213.

Received : 10/28/2024

Revised : 11/07/2024

Accepted : 11/11/2024

요 지 : 본 연구에서는 탄소 섬유 보강근 표면의 리브 역할을 하는 유리섬유의 부착강도를 증진시키기 위해 다양한 종류의 실란 커플링제를 적용한 뒤 그에 따른 물리적 특성 변화를 확인하였다. 유리섬유 복합체를 이용하여 실란 커플링제가 적용된 최적 배합비를 도출하였으며, 이를 이용하여 직경 10mm 탄소 섬유 보강근을 제작한 뒤 인장강도, 탄성계수, 콘크리트와의 부착강도 실험을 수행하였다. 먼저, 유리 섬유의 사이징 제거 유무 및 실란 커플링제 종류에 따른 실험 결과 GS-3TPM 시편이 가장 높은 강도 개선율을 보여 최적 배합비로 선정되었다. GS-3TPM을 적용하여 제작된 탄소 섬유 보강근은 기존 탄소 섬유 보강근 대비 인장강도 및 탄성계수는 약 5% 높은 강도를 가졌으며, 콘크리트와의 부착강도는 약 20%의 개선율을 보였다. 이를 통해 실란 커플링제의 적용은 탄소 섬유 보강근과 콘크리트 간의 부착 강도를 개선시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 탄소 섬유 보강근, 인장 강도, 실란 커플링제, 부착 강도, 유리섬유, 탄소섬유