

압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 고강도 경량 콘크리트 부착-슬립 거동 평가

Evaluation of Bond-Slip Behavior of High Strength Lightweight Concrete with Compressive Strength 120 MPa and Unit Weight 20 kN/m³

구동길¹ · 오준환² · 유성원^{3*}Dong-Gil Gu¹ · Jun-Hwan Oh² · Sung-Won Yoo^{3*}

(Received January 9, 2023 / Revised January 26, 2023 / Accepted January 27, 2023)

The demand for lightweight and high-strength materials is increasing. However, studies on the bond of concrete and reinforcing bars for high-strength lightweight concrete with a compressive strength of 120 MPa and a unit weight of 20 kN/m³ to structural members are lacking. Therefore, in this paper, 108 specimens of high-strength lightweight concrete with a compressive strength of 120 MPa and a unit weight of about 20 kN/m³ were fabricated, a direct pull-out test was performed, and the bond characteristics were evaluated by comparing the test results with design code. Compared to the decrease in unit weight, the solid bubble shows relatively little reduction in compressive strength and modulus of elasticity. It was found to have larger slip and parameter values than concrete with low compressive strength and unit weight.

키워드 : 고강도, 경량, 부착거동, 직접인발시험**Keywords** : High strength, Lightweight, Bond behavior, Direct pull-out test

1. 서론

최근 구조물의 장대화로 인하여 고강도 재료의 경량화 요구가 빈번해지고 있는 실정이다(Sim and Yang 2010).

이러한 고강도 경량 구조물을 제작하기 위해서는 고강도 경량 콘크리트의 제조가 필수적이다. 기존 연구결과에 의하면 압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트는 팽창 점토 등을 이용한 고급 경량골재와 콘크리트 조직의 치밀화를 위해서 소량의 탄소나노튜브의 사용으로 제조가 가능한 것으로 알려져 있다(Balázs 1993). 그러나 Jung(2010) 등의 이론에 따르면 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트는 제작할 수 있는 고강도 경량골재의 한계치로 제시하고 있으며, 경량골재 외에도 솔리드 버블 등의 다량의 나노 재료 도입이 필수적인 것으로 제시하고 있다. 이러한 기존 연구 결과 등을 바탕으로 본 연구에서는 우선적으로 솔리드 버블로 제작이 가능한 압축강도 120 MPa,

단위중량 20 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트의 성능을 평가하고자 하였으며, 향후 추가 연구에서는 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트의 제조 및 성능평가를 계획 중이다. 하지만 고강도 경량 콘크리트를 구조재료로 사용하기 위해서는 철근의 사용이 필수적이며 콘크리트의 경량화 및 고강도화에 따른 그 부착특성에 대한 연구가 매우 중요하다고 할 수 있으나, 아직까지는 압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트를 구조부재에 적용하기 위한 정확한 기준이나 콘크리트와 철근의 부착 특성에 관한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 이 논문에서는 압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트 108개의 시편을 제작하고 직접 인발 시험을 수행하여 압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트의 부착특성을 파악하고, 고강도 경량 콘크리트의 부착강도와 현행 설계기준의 근간이 된 기존 연구결과를 비교하여 부착특성을 평가하였으며, 본 연구진이 선행연구로 진행

* Corresponding author E-mail: imysw@gachon.ac.kr¹가천대학교 토목환경공학과 박사과정 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 1312, Korea)²가천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 1312, Korea)³가천대학교 토목환경공학과 교수 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 1312, Korea)

한 압축강도 50 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트의 부착특성과 비교하였다.

2. 실험 계획

2.1 사용재료

본 연구에서는 결합재로 국내 S사에서 제조된 1종 보통포틀랜드 시멘트, KS 기준에 적합한 플라이 애쉬와 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 잔골재로는 밀도가 2.56 g/cm³인 강모래와 밀도가 0.75 g/cm³인 팽창점토 잔골재를 사용하였고 굵은 골재로는 밀도가 2.65 g/cm³인 채석과 밀도가 0.92 g/cm³인 팽창점토 굵은 골재를 사용하였으며, 팽창점토 골재의 비중은 약 1.0 수준이다. 한편 3M사에서 제조, 판매하는 솔리드버블의 내부는 진공상태이며, 유리 미소구체 (Microsphere)이다. 밀도가 0.46 g/cm³, 0.60 g/cm³인 솔리드버블을 사용하였다. 솔리드 버블의 콘크리트 중량저감 효과와 시멘트 미세 구조의 밀실화의 파악을 위하여 SB배합에 경량골재를 100 % 대체한 경우와 경량골재의 10 % 수준을 대체한 경우의 배합도 고려하였다.

한편 철근은 국내 H사에서 제조된 SD400 제품으로 KS 기준에 적합한 것을 선정하여 사용하였다.

2.2 콘크리트 및 철근

콘크리트의 목표 압축강도는 120 MPa, 목표 습윤단위중량은 20 kN/m³으로 정하였으며, 콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 PC계 고성능 감수제를 사용하였고, 배합비는 Table 1과 같다. 실험에 사용된 콘크리트의 28일 압축강도, 탄성계수 및 단위중량 실험 결과를 Table 2에 나타냈으며, 경량 골재와 솔리드버블을 첨가한 경우 콘크리트 압축강도 및 탄성계수가 20 %정도 감소하는 것으로 나타났고, 특히 솔리드버블은 단위중량 감소에 비해서 압축강도 및 탄성계수 감소효과는 상대적으로 적게 나타나, 초경량화를 위해서는 반드시 적용되어야 할 재료로 판단된다.

실험에 사용된 철근은 SD400으로 Pull-Out Test 결과, 평균 항복강도는 426.5 MPa이었다.

2.3 실험계획 및 부재 형상

압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 고강도 경량 콘크리트의 부착거동을 평가하기 위한 실험변수로는 콘크리트 배합 4수준 (경량 골재 및 솔리드 버블 사용 여부), 철근 직경 3수준(D13, D19, D25 mm) 및 철근의 묻힘길이 3수준(철근 직경의 2, 5, 8배)이다.

Table 1. Concrete mix proportion

ID	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)							SP	Air (%)
		W	C	Sp	SS	Solid bubble	LA			
CON	20	208	832	208	915.2	-	-	-	10	1
SB3				418	117	-	-			
LA				66	-	68	610			
SB+LA				140	-	15	59	528		

CON : normal concrete, LA : lightweight aggregate
SP : silica powder, W : water, C : cement, SS : silica sand,

Table 2. Concrete properties

ID	Compressive strength at 28 days (MPa)	Elasticity modulus (MPa)	Unit weight (kN/m ³)		
			moisture	saturate	dry
CON	150.7	44,687	22.2	22.3	22.1
SB3	124.3	37,657	20.9	21.6	20.5
LA	117.6	35,896	20.2	20.4	20.1
SB+LA	123.7	32,238	18.8	22.4	18.5

Table 3. Test variables

ID	Lightweight aggregate	Solid bouble	Reinforcement diameter	Embedded length (× diameter)
CON	-	-	D13, D19, D25	2, 5, 8
SB3	-	Use	D13, D19, D25	2, 5, 8
LA	Use	-	D13, D19, D25	2, 5, 8
SB+LA	Use	Use	D13, D19, D25	2, 5, 8

이러한 실험변수를 가진 실험시편은 총 108개(4×3×3=36개, 3회 반복)이며, 실험 변수들은 Table 3에 정리되어 있으며, 실험시편들의 형상은 Fig. 10에, 하중 재하장치 형상은 Fig. 20에 나타났다.

Fig. 20에 보인 것처럼 제작된 부착시험 시편은 2,000 kN 용량의 UTM을 사용하여 Pull-Out Test 을 수행하였으며, 이때 철근과 콘크리트에 LVDT를 설치하고 0.5 mm/min의 속도로 하중을 재하하면서 철근과 콘크리트 사이의 상대변위를 측정하고 데이터 로거를 이용하여 재하 하중과 변위를 저장하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 부착강도, 파괴 형상

제작된 실험시편에 대해 재령 28일에 Pull-Out Test 을 수행하여 부착거동 특성을 파악하였으며, Table 4에 나타냈다. Table 4에 나타난 부착강도는 실험을 통해 산정된 파괴하중 값으로부터 식 (1)을 사용하여 산정되었다.

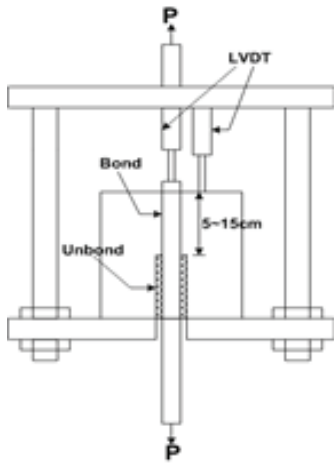


Fig. 1. Shape of specimen

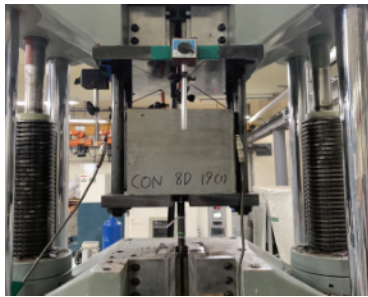


Fig. 2. Test setup

$$U = \frac{1}{l_d \pi} \frac{F_a}{d_b} \quad (1)$$

여기서 U는 부착강도, F_a 는 파괴하중, d_b 는 철근의 직경, l_d 는 철근의 묻힘길이이다.

대부분의 실험 시편에서는 철근 직경, 콘크리트 배합과 관계없이 철근뿔힘 파괴현상이 일어났다. 다만 묻힘길이 $5d_b$, $8d_b$ 그리고 철근직경 D19 이상에서, Fig. 3과 같이 콘크리트의 파괴가 발생했다. 그리고 $8d_b$ 이며 D13 시험체에선 철근의 파단이 발생하였다.



Fig. 3. Failure pattern of specimen

즉, 직경이 작은 철근의 경우 콘크리트의 압축강도에 상관없이 부착파괴에 의한 뿔힘 파괴가 발생하였다. 철근의 직경이 크고 부착길이가 큰 경우에는 철근과 콘크리트의 부착이 유지되며, 콘크리트 구체 파괴가 발생하였다. 이러한 현상은 기존 연구결과에서도 유사하게 나타났다(Orangun et al. 1977).

3.2 압축강도, 단위중량, 탄성계수-부착강도 관계

고강도 경량 콘크리트의 압축강도에 따른 28일 재령에서의 부착강도는 압축강도에 비례하여 증가하지만, Fig. 4에 보인 것처럼 LA 시험체에서 부착강도가 저하하는 경향을 보이며 Con 시험체에서 부착강도의 폭이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 5, 6은 앞의 Fig 4에 나타난 것처럼 LA에서 저하하는 경향과, Con 시험체의 폭이 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 LA 시험체에서 Solid bubbles, Silica sand를 넣지 않고 경량 골재만을 이용하여 시료를 만들어서 발생한 것으로 보인다. Con 시험체의 결과는 콘크리트의 압축강도가 목표치에 비해서 다소 과하게 나타났고, 변동폭도 크게 나타났다. 탄성계수 및 단위중량 역시 압축강도 만큼은 아니지만 부착강도와 비례한다는 사실을 확인할 수 있었다.

Table 4. Results of ultimate load and failure pattern

(Unit : MPa)

ID	Embedded length (× diameter)									Remark
	2 d_b			5 d_b			8 d_b			
	Reinforcement			Reinforcement			Reinforcement			
	D13	D19	D25	D13	D19	D25	D13	D19	D25	
CON	5.93	51.58	55.19	11.05	30.32	22.12	15.54	*17.72	*15.65	* Concrete failure and the others are reinforcement slip failure
SB3	19.74	40.46	29.96	27.23	*25.03	*13.59	8.20	*15.94	*14.82	
LA	46.88	41.33	49.08	28.40	*23.25	*12.45	17.11	*15.13	*10.85	
SB + LA	48.6	46.02	*38.59	29.01	*24.73	*45.57	*14.02	*14.67	*15.64	

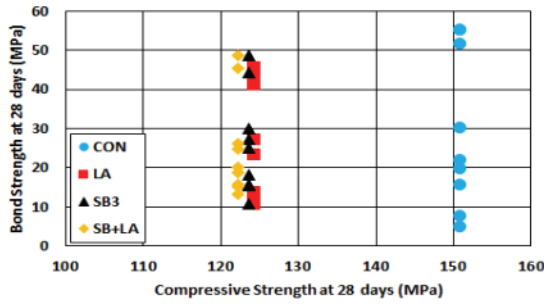


Fig. 4. Compressive strength-bond strength relationship

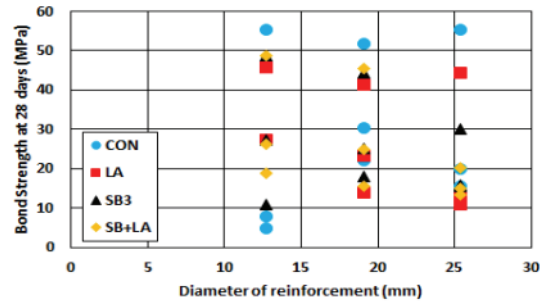


Fig. 7. Reinforcement diameter-bond strength relationship

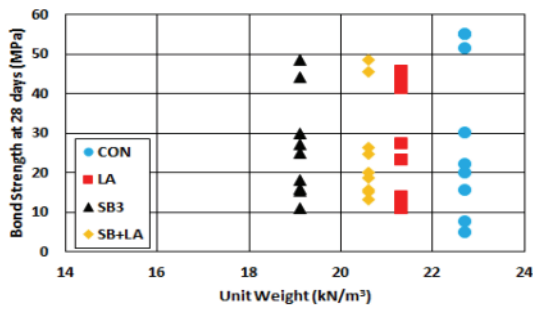


Fig. 5. Unit weight-bond strength relationship

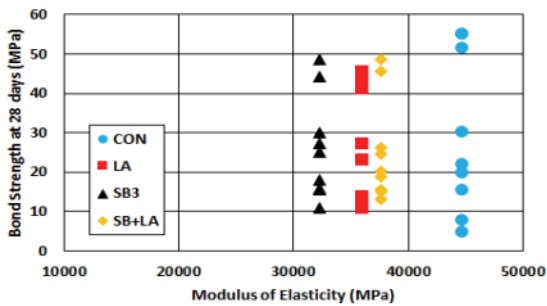


Fig. 6. Modulus of Elasticity-bond strength relationship

3.3 철근 직경-부착강도 관계

고강도 경량 콘크리트의 철근 직경에 따른 부착강도는 Fig. 7과 같다. 철근 직경이 13 mm일 때 평균 30.6 MPa의 부착강도가 나타나며 철근 직경이 19 mm일 때 29.6 MPa, 철근 직경이 25 mm의 부착강도의 평균은 22.3 MPa이다.

따라서 철근 직경이 증가함에 따라 부착강도는 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

3.4 매입길이-부착강도 관계

철근과 콘크리트의 묻힘길이에 따른 부착강도는 Fig. 8에 나타내었다. 변수에 상관없이 기존 연구(Park et al. 2021)와 유사하게 묻힘길이가 증가할수록 부착강도가 감소하는 경향이 있으며, 이는 묻힘길이가 길어짐에 따라 철근의 부착면적이 커지게 되어, 파괴 하중이 증가하는 양에 비해 부착면적의 증가량이 더 커서 발생한 것으로 확인된다.

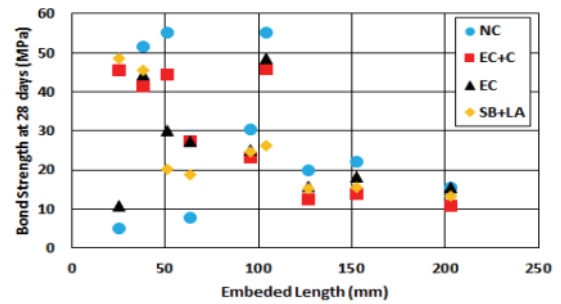
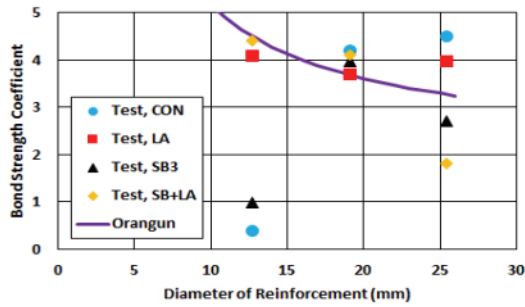


Fig. 8. Embedded length-bond strength relationship

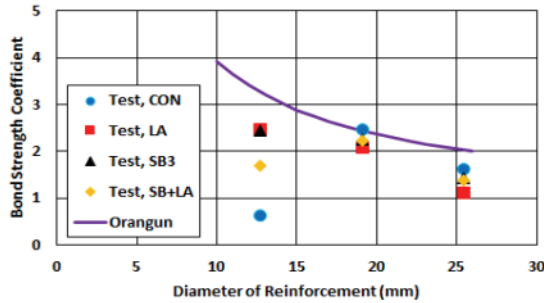
4. 설계기준과의 비교

4.1 ACI-408R (2003)

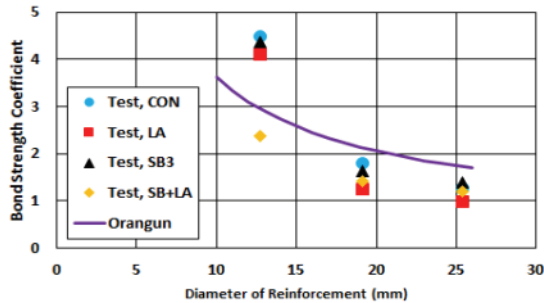
Orangun et al.(1977)은 현재 설계기준으로 사용되고 있는 ACI-408R(2003)의 콘크리트의 부착강도 산정식의 근간이 되는 연구자로 부착강도에 영향을 미치는 콘크리트의 압축강도, 피복두께, 철근의 직경, 부착 길이 등을 고려한 인발 실험을 통해서 식 (2)와 같은 부착강도 산정식을 제안하였다.



(a) Bonded length = 2d



(b) Bonded length = 5d



(c) Bonded length = 8d

Fig. 9. Comparison between tests and results by Orangun

$$\frac{U}{\sqrt{f_c}} = 0.1 + 0.25 \frac{C_{\min}}{d_b} + 4.15 \frac{d_b}{l_d} \quad (2)$$

여기서, $U/\sqrt{f_c}$ 는 부착강도계수, U는 부착강도(MPa), f_c 는 콘크리트의 측정된 압축강도(MPa), C_{\min} 은 최소 피복두께(mm), d_b 는 철근의 직경(mm) 및 l_d 는 묻힘길이가(mm)이다.

Fig. 9와 Table 5에서 나타난 바와 같이 묻힘길이가 작을수록 실험결과가 식(2)에 의한 예측값과 차이가 크게 나타났다.

4.2 CEB-FIP Model Code(2010)

콘크리트 내 배근된 철근의 부착거동을 묘사하기 위해 CEB-FIP Model Code 2010에서는 철근의 부착응력과 슬립의 관계를 식 (3) 및 Fig. 10으로 제안하고 있다.

$$\tau_b = \tau_{b, \max} \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha \quad \text{for } 0 \leq s \leq s_1 \quad (3-a)$$

$$\tau_b = \tau_{b, \max} \quad \text{for } s_1 \leq s \leq s_2 \quad (3-b)$$

$$\tau_b = \tau_{b, \max} - (\tau_{b, \max} - \tau_{b, f}) \frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \quad \text{for } s_2 \leq s \leq s_3 \quad (3-c)$$

$$\tau_b = \tau_{b, f} \quad \text{for } s_3 \leq s \quad (3-d)$$

여기서, τ_{bf} 는 마찰에 의한 부착응력이고, s_1 은 최대부착강도 도달시점에서의 미끌림값, s_2 은 유지기간 동안의 미끌림, s_3 는 하락구간에 대한 미끌림 값이며, α 는 실험결과를 이용한 SPSS 분석을 통해 산출한 매개변수 값이다.

4.3 Modified CMR

기존의 모델들과 다르게, Modified CMR Model에서는 부착 응력 구간을 최대 부착 응력까지만을 고려하여 부착응력과 슬립의 관계를 식(4)로 제안하였다.

Table 5. Comparison between tests and existing research results by Orangun et al.

(Unit : MPa)

ID	Embedded length (mm)																	
	2d						5d						8d					
	D13		D19		D25		D13		D19		D25		D13		D19		D25	
	D13	Eq (2)	D19	Eq (2)	D25	Eq (2)	D13	Eq (2)	D19	Eq (2)	D25	Eq (2)	D13	Eq (2)	D19	Eq (2)	D25	Eq (2)
CON	4.90	55.37	51.60	45.25	55.20	40.27	7.80	40.09	30.30	29.97	19.90	24.99	55.2	36.12	22.10	26.15	15.60	21.17
SB3	10.90	51.16	44.30	40.90	30.00	36.48	27.20	36.31	25.00	27.15	15.80	22.63	48.6	32.72	18.10	23.68	15.50	19.17
LA	45.60	50.27	41.30	41.08	44.3	36.56	27.40	36.39	23.30	27.21	12.50	22.68	45.7	32.79	13.90	23.74	10.90	19.21
SB+LA	48.60	49.87	45.50	40.76	20.1	36.27	18.70	36.11	24.70	26.99	15.00	22.5	26.3	32.53	15.60	23.55	13.20	19.06

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = [1 - \exp(-\beta s/s_1)]^\alpha \quad (4)$$

여기서, s_1 은 최대 부착 응력 도달 시점에서의 미끌림 값, α 및 β 는 실험을 통해 얻은 매개변수 값이다.

앞서 말했듯이 문힘길이가, 철근직경이 증가할수록 부착강도는 감소하는 경향이 나타났으며, Fig. 10의 CEB-FIP Model Code 2010에서 나타난 그래프와 같이 문힘길이와 철근직경이 증가하면 최대 부착응력을 받기 전 스플리팅 파괴가 발생하여 최대 부착응력을 받지 못하고 파괴되는 것으로 보인다. 따라서 문힘길이와 철근직경은 부착강도와 반비례 관계가 성립하는 것을 알 수 있다.

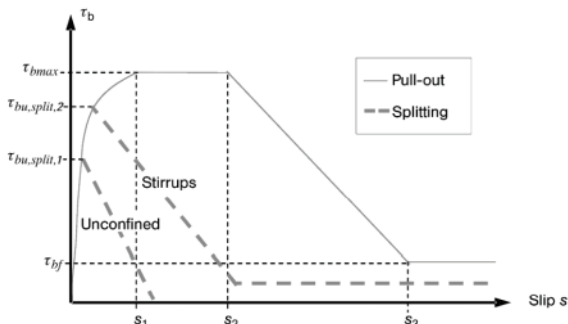
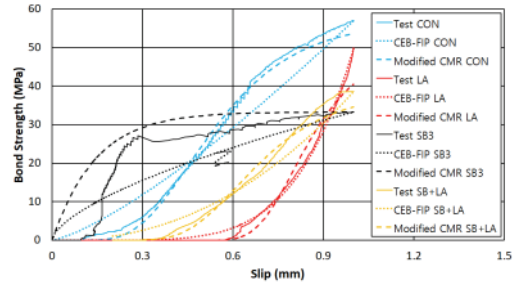


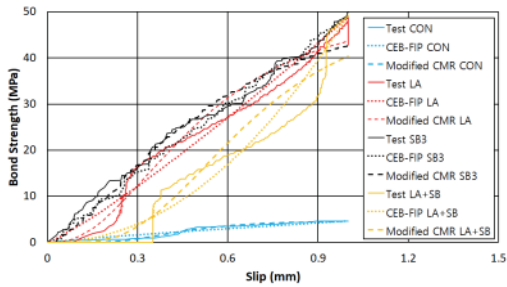
Fig. 10. Analytical bond stress-slip relationship

Fig. 11과 Table 6에서 나타낸 바와 같이 산출된 매개변수 및 실험 결과와 각 부착강도-슬립 모델을 비교하면, 상승 부분에서는 CEB-FIP Model Code 2010 보다 Modified CMR Model이 실험 결과와 더 유사한 것을 확인할 수 있었다. 산출된 매개변수 및 실험 결과와 각 부착강도-슬립 모델을 비교하면, Modified CMR Model은 상승 부분만을 고려하기 때문에 Modified CMR Model의 상관계수의 값이 더 크게 나타났다.

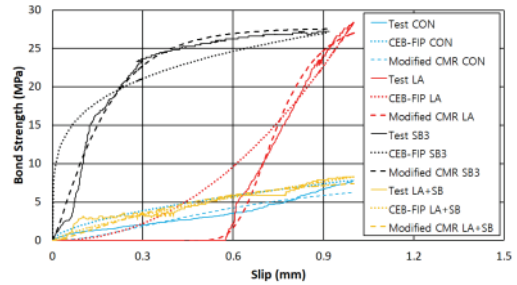
본 연구진의 압축강도 50 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 고강도 경량 콘크리트의 부착특성에 대한 선행연구결과(Lee et al. 2022)와 비교하면 금번 콘크리트의 경우, 더 큰 최대 슬립값 및 매개변수 값을 가지는 것으로 나타났는데 이는 압축강도와 단위중량도 더 커서 나타나는 현상으로 추정된다.



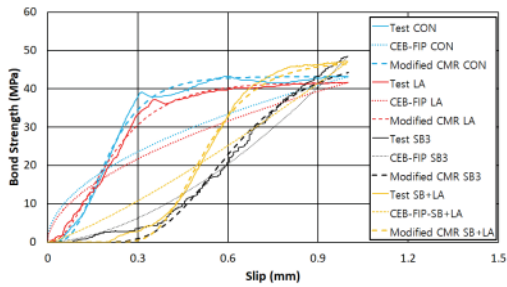
(c) D25 Bonded length = 2d



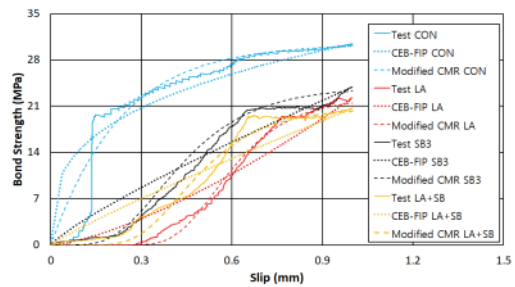
(a) D13 Bonded length = 2d



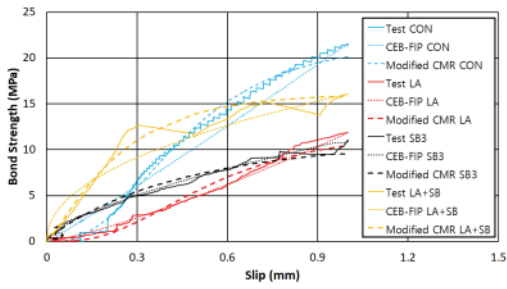
(d) D13 Bonded length = 5d



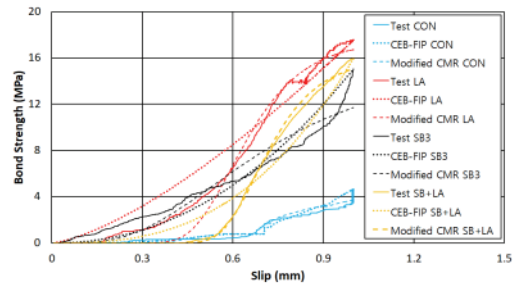
(b) D19 Bonded length = 2d



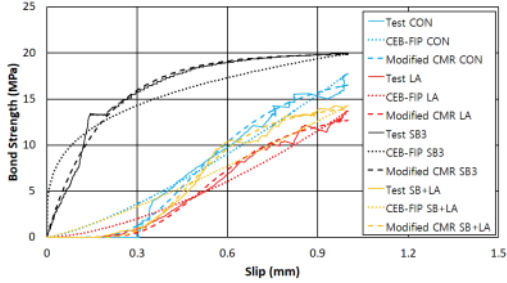
(e) D19 Bonded length = 5d



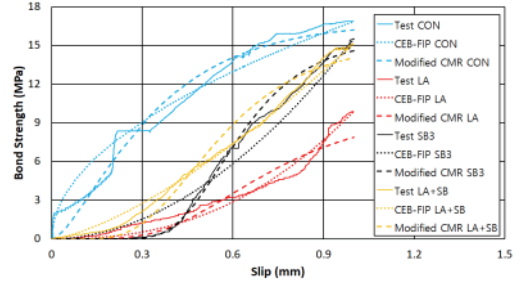
(f) D25 Bonded length = 5d



(g) D13 Bonded length = 8d



(h) D19 Bonded length = 8d



(i) D25 Bonded length = 8d

Fig. 11. Comparison of tests with design code

Table 6. Comparison between tests and existing research results by CEB-FIP model code 2010 & Modified CMR model

ID	Test τ (MPa)	s_1 (mm)	CEB-FIP model code 2010			Modified CMR model					
			α	R^2	τ	α	β	R^2	τ		
CON	2d	D13	4.64	1.13	0.86	0.87	4.64	10.94	6.31	0.96	4.55
		D19	43.18	2.56	0.50	0.77	43.18	5.15	10.53	0.99	43.17
		D25	56.98	2.00	1.31	0.94	56.98	10.66	5.18	0.99	53.65
	5d	D13	7.85	0.59	1.33	0.95	7.85	2.02	2.23	0.91	6.24
		D19	30.45	1.22	0.32	0.81	30.45	1.02	4.43	0.89	30.08
		D25	21.55	0.59	1.05	0.95	21.55	3.63	3.99	0.99	20.14
	8d	D13	4.65	1.00	3.15	0.83	4.65	21.06	4.51	0.93	3.68
		D19	17.78	0.52	1.32	0.93	17.78	10.34	4.95	0.99	16.52
		D25	16.86	1.91	0.51	0.97	16.86	1.63	3.75	0.99	16.22
LA	2d	D13	48.84	0.22	1.15	0.97	48.84	2.93	3.27	0.97	43.61
		D19	41.66	1.18	0.54	0.81	41.66	2.62	7.30	0.99	41.59
		D25	48.33	0.42	0.26	0.60	48.33	1.68	40.40	0.94	48.33
	5d	D13	28.4	0.26	2.10	0.83	28.4	15.13	5.15	0.91	27.00
		D19	22.25	0.71	1.43	0.90	22.25	53.97	7.34	0.99	21.48
		D25	11.84	0.24	1.26	0.99	11.84	3.96	3.48	0.97	10.46
	8d	D13	17.76	0.96	1.70	0.98	17.76	24.88	5.83	0.92	16.51
		D19	13.69	1.48	1.17	0.95	13.69	7.81	5.26	0.99	13.15
		D25	9.89	0.74	2.42	0.97	9.89	8.81	3.67	0.91	7.83
SB3	2d	D13	50.00	0.05	0.94	0.99	50.00	1.59	2.37	0.97	42.76
		D19	48.43	1.34	1.69	0.97	48.43	17.23	5.25	0.99	44.24
		D25	33.29	2.16	0.63	0.67	33.29	1.04	7.16	0.98	33.26

ID		Test τ (MPa)	s_1 (mm)	CEB-FIP model code 2010			Modified CMR model					
				α	R^2	τ	α	β	R^2	τ		
SB+LA	5d	D13	27.62	0.33	0.22	0.75	27.62	1.30	6.58	0.98	27.57	
		D19	23.89	1.09	0.84	0.85	23.89	7.89	5.78	0.99	23.32	
		D25	11.10	0.43	0.66	0.99	11.1	0.87	1.92	0.98	9.68	
	8d	D13	15.05	0.461	2.15	0.94	15.05	4.96	3.01	0.94	11.71	
		D19	19.95	0.71	0.28	0.85	19.95	0.97	5.263	0.99	19.85	
		D25	15.52	2.87	1.92	0.97	15.52	33.34	6.29	0.99	14.59	
	SB+LA	2d	D13	49.32	0.33	2.09	0.97	49.32	5.98	3.41	0.96	40.35
			D19	47.11	1.93	1.23	0.86	47.11	55.11	8.35	0.99	46.50
			D25	33.29	0.59	0.80	0.98	33.29	1.04	1.96	0.98	28.42
5d		D13	8.3	0.61	0.76	0.95	8.30	1.39	2.54	0.89	7.40	
		D19	20.68	0.78	0.90	0.82	20.68	16.88	6.64	0.95	20.23	
		D25	16.08	0.84	0.47	0.92	16.08	1.26	4.50	0.98	15.85	
8d		D13	15.54	0.03	0.72	0.43	15.54	1.00	2.48	0.38	14.24	
		D19	14.34	2.09	1.21	0.91	14.34	19.65	6.49	0.99	13.92	
		D25	15.14	1.92	1.41	0.99	15.14	9.47	4.84	0.97	14.04	

5. 결론

본 논문에서는 직접인발시험을 수행하여 20 kN/m³, 120 MPa 급 고강도 경량 콘크리트의 부착거동을 확인하였으며, 부착특성을 설계기준과 비교하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 솔리드버블은 단위중량 감소에 비해서 압축강도 및 탄성계수 감소효과는 상대적으로 적게 나타나, 초경량화를 위해서는 반드시 적용되어야 할 재료로 판단된다.
2. CEB-FIP Model Code 2010를 통하여 철근직경과 문힘길이가 증가함에 최대 부착강도는 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
3. ACI-408R의 부착강도 산정식과 실제 실험결과와의 비교를 통해 매입깊이가 클수록 예측값과 차이가 작게 나타났으며, 상관 계수값도 대부분 0.75이상으로 나타났다.
4. 본 연구진의 선행연구결과인 압축강도 50 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 고강도 경량 콘크리트보다 더 큰 최대 슬립값 및 매개변수 값을 가지는 것으로 나타났다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 RS-2020-KA156177)으로 수행되었음.

References

- ACI 408R-03 (2003). Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension, ACI Committee 408, 49.
- Balázs, G.L. (1993). Cracking analysis based on slip and bond stresses, *ACI Materials Journal*, **90(4)**, 340-348.
- Cosenza, E., Manfredi, G., Realfonzo, R. (1995). Analytical modelling of bond between FRP reinforcing bars and concrete. Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, *Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2)*, University of Naples, Naples, Italy, 165-171.
- Jung, S.W. (2010). Standardization Technology for The Environmental-Friendly Utilization of Pond Ash Technical Report, R-2007-2-151, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 1-15 [in Korean].
- Lee, D.K., Lee, D.K., Oh, J.H., Yoo, S.W. (2022). Comparison of bond-slip behavior and design criteria of high strength lightweight concrete with compressive strength 50 MPa and unit weight 16 kN/m³, *Journal of the Korean Recycled Construction*

- Resources Institute, **10(2)**, 168–175 [in Korean].
- Orangun, C., Jirsa, J., Breen, J. (1977). A reevaluation of test data on development length and splices, *ACI Structural Journal*, **74(3)**, 122–144.
- Park, J.R., Yang, K.H., Kim, S.H., Oh, N.K. (2021). Experimental evaluation of pullout strength of long-rawlplug screw anchor according to the compressive strength of concrete and embedded length, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **25(6)**, 84–89 [in Korean].
- Sim, J., Yang, K. (2010). Air content, workability and bleeding characteristics of fresh lightweight aggregate concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **22(4)**, 559–566 [in Korean].
- Taerwe, L., Matthys, S. (2013). *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*, The International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 244.

압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 고강도 경량 콘크리트 부착-슬립 거동 평가

최근 구조물의 장대화로 인하여 고강도 재료의 경량화 요구가 빈번해지고 있는 실정이다. 하지만 현재까지는 압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트를 구조부재에 적용하기 위한 콘크리트와 철근의 부착 특성에 관한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 압축강도 120 MPa, 단위중량 20 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트 108개의 시편을 제작하여 직접 인발 부착실험을 수행하였고, 실험결과와 현행 설계기준과 비교하여 부착특성을 평가하였다. 슬리드버블은 단위중량 감소에 비해서 압축강도 및 탄성계수 감소효과는 상대적으로 적게 나타나, 초경량화를 위해서는 반드시 적용되어야 할 재료로 판단되며, ACI-408R의 부착강도 산정식과 실험결과는 비교적 유사한 것으로 판단되며, 더 낮은 압축강도, 단위중량의 콘크리트보다 더 큰 슬립 및 매개변수 값을 가지는 것으로 나타났다.