

압축강도 및 단위중량에 따른 고강도 초경량 콘크리트의 부착-슬립 거동

The Bond Slip Behavior of High Strength and Ultra Lightweight Concrete According to Compressive Strength and Unit Weight

조동범¹ · 오준환¹ · 천주현² · 유성원^{3*}

Dong-Bum Jo¹ · Jun-Hwan Oh¹ · Ju-Hyun Cheon² · Sung-Won Yoo^{3*}

(Received July 1, 2024 / Revised July 11, 2024 / Accepted July 12, 2024)

The demand for high strength and ultra-lightweight materials to incorporate the advanced technology of nanomaterials into the lengthening of structures is continuously increasing. Therefore, based on existing research results and numerous mixing trials, we derived a mix of high strength and ultra-light concrete of a compressive strength of 100 MPa with a unit weight of 18 kN/m³ and a compressive strength of 80 MPa with a unit weight of 16 kN/m³ and evaluated their performance. In this paper, 108 specimens corresponding to high strength and ultra-lightweight concrete with a compressive strength of 100 MPa under a unit weight of 18 kN/m³, and a compressive strength of 80 MPa under a unit weight of 16 kN/m³ were manufactured, and the bond characteristics were identified by performing a directly tensile tests, and the bond characteristics were evaluated by comparing them with the experimental results and the current design criteria. It was judged that the bond strength calculation formula of ACI-408R and the experimental results were not accurately reflected, so an bond stress equation based on ACI-408R was proposed. The result of the proposed equation was that the deviation was somewhat reduced. In addition, the results of calculating the CEB-FIP model and the modified CMR model using statistical analysis showed slight differences from the experimental results, but considering that the bond behavior is a local behavior, the proposed model appears to explain the bond behavior of high strength and ultra-light concrete as a whole.

키워드 : 고강도, 초경량, 부착거동, 직접인발시험

Keywords : High strength, Ultra-Lightweight, Bond behavior, Direct pull-out test

1. 서론

나노 재료의 경우, 과거에는 경제성 및 제조기술의 부족으로 다양한 분야의 응용이 불가능하였지만 최근에는 나노기술의 급속한 발달 및 경제성 확보로 건설재료분야에 탄소나노튜브 등의 적용이 지속적으로 증가하고 있다(Sim and Yang 2011). 또한 구조물의 장대화로 인하여 지속적으로 초고강도 및 초경량 재료의 요구가 증가하고 있는 실정이다(Sim and Yang 2010).

이러한 고강도 및 초경량 콘크리트 구조물을 제작하기 위해서는 극단적인 고강도 초경량 콘크리트의 제조기술 확보가 필수적이

다. 일반적으로 압축강도 50 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 경량 콘크리트는 팽창혈암 등을 이용한 고급 초경량골재와 콘크리트 조직의 치밀화를 위해서 소량의 탄소나노튜브(Carbon Nano Tube : CNT)의 사용으로 제조가 가능한 것으로 알려져 있다(Balázs 1993). 그러나 Jung(2010)에 의하면 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 초경량 콘크리트는 제작할 수 있는 고강도 초경량 값의 한계치로 제시하고 있으며, 경량골재 외에도 슬리드 버블 등의 다양한 첨단 나노 재료 도입이 필수적인 것으로 제시하고 있다(Lee et al. 2022; Gu et al. 2023). 이러한 기존 연구 결과 등을 바탕으로 본 연구진들은 수많은 배합시도에

* Corresponding author E-mail: imysw@gachon.ac.kr

¹가천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 13120, Korea)

²한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 책임연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)

³가천대학교 토목환경공학과 교수 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 13120, Korea)

서 도출된 두 가지 형태의 콘크리트 즉, 압축강도 100 MPa, 단위중량 18 kN/m³ 및 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 초경량 콘크리트의 배합을 도출하고 그 성능을 평가하였다. 이러한 노력에도 불구하고 고강도 초경량 콘크리트를 구조재료로 사용하기 위해서는 철근의 사용이 필수적이며 콘크리트의 초경량화 및 고강도화에 따른 탄성계수 저하현상에 따른 부착특성에 대한 연구가 매우 중요하다고 할 수 있으나, 아직까지 압축강도 100 MPa, 단위중량 18 kN/m³ 및 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 초경량 콘크리트를 구조부재에 적용하기 위한 정확한 기준이나 콘크리트와 철근의 부착 특성에 관한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 압축강도 100 MPa, 단위중량 18 kN/m³ 및 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 초경량 콘크리트 108개의 시편을 제작하고 직접 인발 시험을 수행하여 고강도 초경량 콘크리트의 부착특성을 파악하고, 실험에서 얻어진 압축강도 100 MPa, 단위중량 18 kN/m³ 및 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 초경량 콘크리트의 부착강도와 현행 설계기준의 근간이 된 기존 연구결과를 비교하여 고강도 초경량 콘크리트의 부착특성을 평가하였다.

2. 실험 계획

2.1 사용재료

본 연구에서는 결합재로 국내 S사에서 제조된 1종 보통포틀랜드 시멘트, 실리카흄, 실리카 파우더, 솔리드 버블을 사용하였다. 잔골재로는 실리카샌드, 밀도가 2.56 g/cm³인 강모래와 밀도가 0.75 g/cm³인 팽창점토 잔골재를 사용하였고 굵은 골재로는 밀도가 2.65 g/cm³인 쇄석을 사용하였으며, 팽창점토 잔골재의 비중은 약 1.0 수준이다.

한편 일부 배합에서는 3M사에서 제조, 판매하는 솔리드버블을 적용하였으며, 솔리드버블의 내부는 진공상태이며, 유리 미소구체

Table 1. Density of the materials used

Density (g/cm ³)						
Silica fume	Silica powder	Silica sand	Solid bubble	River sand	Expanded clay fine aggregate	Gravel
2.26	2.50	2.20	0.46/ 0.60	2.56	0.75	2.65

(Microsphere)이다. 밀도가 0.46 g/cm³, 0.60 g/cm³인 솔리드버블을 사용하였다. 솔리드 버블의 콘크리트 중량저감 효과와 시멘트 미세구조의 밀실화의 파악을 위하여 실리카샌드와 솔리드버블을 사용한 경우와 경량골재와 솔리드버블을 사용한 경우의 배합을 고려하였으며, 사용된 경량 골재 등에 대한 비중은 Table 1에 나타내었다.

탄소나노튜브(CNT)의 효과를 파악을 위하여 수용액 형태를 일부 배합에 결합재 중량의 0.115 % 첨가하였다. 한편 철근은 국내 H사에서 제조된 SD400 제품으로 KS 기준에 적합한 것을 선정하여 사용하였다.

2.2 콘크리트 및 철근

콘크리트의 목표 압축강도는 80, 100 MPa이며, 목표 단위중량은 16, 20 kN/m³으로 정하였으며, 콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 PC계 고성능 감수제를 사용하였고, 배합비는 Table 2와 같다. 실험에 사용된 콘크리트의 28일 압축강도, 탄성계수 및 단위중량 실험 결과를 Table 3에 나타냈으며, 단위중량이 작고 압축강도도 작을수록 콘크리트의 탄성계수도 감소하는 것으로 나타났으며, 단위중량 감소에 따른 탄성계수의 저하현상이 더 큰 것으로 나타났다.

실험에 사용된 철근은 SD400으로 직접인장시험 결과 평균 항복강도는 426.5 MPa이었다.

Table 2. Concrete mix proportion

Label	W/B	Unit weight (kg/m ³)											
		W	C	Silica fume	Silica powder	Silica sand	Solid bubble	S	G	LWA	CNT	SP	Air
Step2	0.25	212.5	739.1	110.9	208.0	352.0	170.0	-	-	-	-	7.9	1 %
Step3					208.0	-	211.0	-	-	111.0	0.4		
N80		153.0	542.0	83.0	-	-	-	661.0	920.0	-	-	10.3	
N100			710.0	100.0	-	-	-	650.0	850.0	-	-	13	

Table 3. Concrete properties

ID	Compressive strength at 28 days (MPa)	Elasticity modulus (MPa)	Unit weight (kN/m ³)		
			Mosture	Saturate	Dry
Step2	118	25,748	17.8	17.7	17.7
Step3	88	17,722	15.2	15.2	15.2
N80	83	38,586	24.5	24.2	24.2
N100	95	41,846	24.5	24.5	24.5

Table 4. Test variables

ID	Lightweight aggregate	Solid bouble	Reinforcement diameter	Embedded length (× diameter)
Step2	Use	Use	D13, D19, D25	2, 5, 8
Step3	Use	Use	D13, D19, D25	2, 5, 8
N80	-	-	D13, D19, D25	2, 5, 8
N100	-	-	D13, D19, D25	2, 5, 8



Fig. 2. Test setup

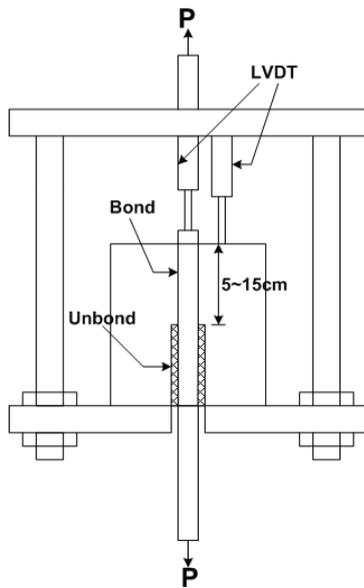


Fig. 1. Shpae of specimen

2.3 실험계획 및 부재 형상

압축강도 100 MPa, 단위중량 18 kN/m³ 및 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 고강도 초경량 콘크리트의 부착거동을 평가하기 위한 실험변수로는 콘크리트 배합 4수준(고강도 경량 콘크리트 및 일반 콘크리트), 철근 직경 3수준(13, 19, 25 mm) 및 철근의 문힘길이 3수준(철근 직경의 2, 5, 8배)이다. 이러한 실험변수를 가진 실험시편은 총 108개(4×3×3=36개, 3회 반복)이며, 실험 변수들은 Table 4에 정리되어 있으며, 실험시편들의 형상은 Fig. 1에, 하중 재하장치 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

제작된 시편은 2,000 kN 용량의 UTM을 이용하여 직접인발시험을 수행하였으며, 이때 0.5 mm/min의 속도로 하중을 재하하면서 LVDT를 이용하여 철근과 콘크리트간의 상대변위를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 부착강도, 파괴 형상

제작된 실험시편에 대해 재령 28일에 직접 인발시험을 수행하여 부착특성을 파악하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타냈다. Table 5에 나타난 부착강도는 실험을 통해 얻은 파괴하중 값으로

Table 5. Results of ultimate loadand failure pattern (unit : MPa)

ID	Embedded length (× diameter)									Remark
	2 d _b			5 d _b			8 d _b			
	D13	D19	D25	D13	D19	D25	D13	D19	D25	
Step2	39.47	37.65	29.38	29.82	*19.56	*11.21	*18.39	*14.93	*9.84	* Concrete failure and the others are reinforcement slip failure
Step3	34.33	28.57	*12.28	28.23	14.84	*12.47	17.73	*12.97	*11.75	
N80	47.15	41.83	37.20	30.41	29.91	*29.89	19.11	18.66	17.32	
N100	59.51	30.16	44.23	30.00	30.16	29.68	18.20	18.87	18.40	

부터 식 (1)을 사용하여 산정되었다.

$$U = \frac{1}{l_d \pi} \frac{F_a}{d_b} \tag{1}$$

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

대부분의 실험 시편에서는 철근 직경, 콘크리트 압축강도 수준의 차이와 상관없이 철근뿔힘 파괴현상이 일어났다. 다만 부착길이 $5d_b, 8d_b$ 이상 및 철근두께 D19이상에서 Fig. 3과 같은 콘크리트 파괴가 발생하였다.

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).



Fig. 3. Failure pattern of specimen

3.2 압축강도, 단위중량, 탄성계수-부착강도 관계

Fig. 4~6은 압축강도, 단위중량, 탄성계수-부착강도 관계를 나타낸 결과들이다. Fig. 4~6에서 알 수 있듯이 고강도 초경량 콘크리트의 압축강도에 따른 28일 재령에서의 부착강도는 압축강도에 비례하여 증가하였으며, 단위중량이 작을수록 부착강도는 더 크게 낮아지는 경향을 확인할 수 있었고 그 결과 철근콘크리트의 부착강도에 단위중량이 상당히 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

step 3 시험체에서 부착강도의 저하하는 경향과, step 2 시험체에서 부착강도의 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 step 3 시험체에 silica sand를 넣지 않고 경량 골재를 상대적으로 많이 첨가한 시편이라서 발생한 것으로 보인다. step 2 시험체의 결과는 콘크리트의 압축강도가 목표치에 비해서 다소 과하게 나타

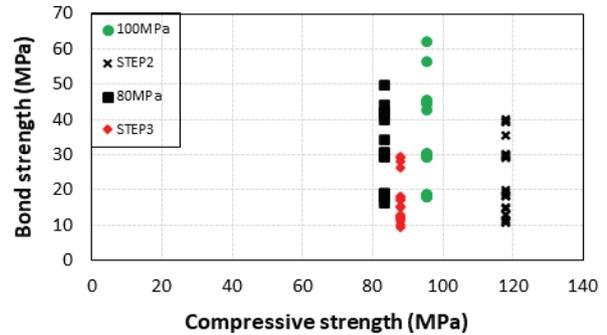


Fig. 4. Compressive strength-bond strength relationship

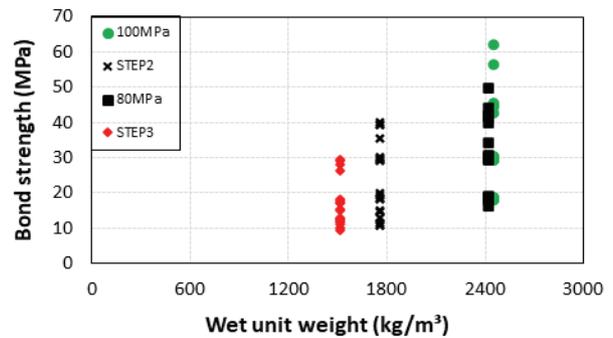


Fig. 5. Unit weight-bond strength relationship

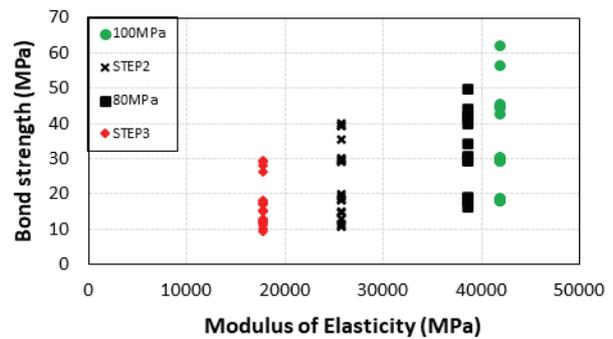


Fig. 6. Modulus of elasticity-bond strength relationship

났고, 변동폭도 크게 나타났다. 탄성계수 및 단위중량 역시 압축강도만큼 높은 수준은 아니지만 영향이 각 성분들과 부착강도는 비례한다는 사실을 확인할 수 있었다.

3.3 철근 직경-부착강도 관계

고강도 초경량 콘크리트의 철근 직경에 따른 부착강도는 Fig. 7과 같다. 이형철근의 직경이 증가함에 따라 부착강도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

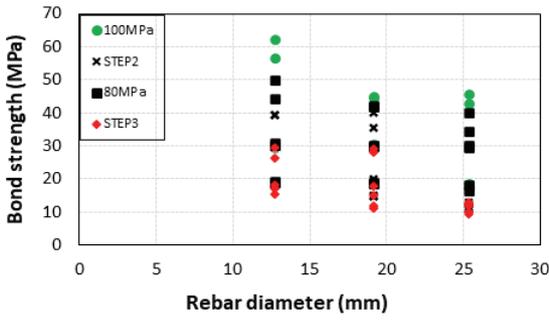


Fig. 7. Reinforcement diameter-bond strength relationship

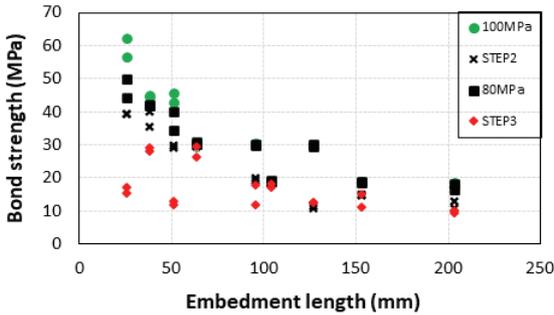


Fig. 8. Embedded length-bond strength relationship

3.4 매입길이-부착강도 관계

고강도 초경량 콘크리트의 철근 부착길이에 따른 부착강도는 Fig. 8에 나타내었다. 변수에 상관없이 매입길이가 증가할수록 부착강도가 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

이는 묻힘길이가 길어짐에 따라 철근의 부착면적이 커지게 되어, 부착면적과 반비례하는 부착강도 특성상 감소효과가 적용된 것으로 확인된다.

4. 설계기준과의 비교 및 제안

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.

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

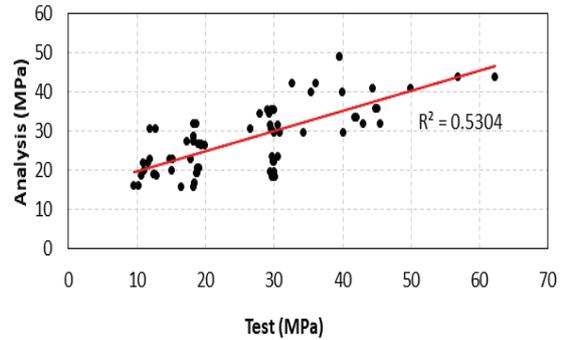


Fig. 9. Comparison between the interpretation results and experimental results by equation (2)

Table 6. Analysis model coefficients for concrete mixtures

ID	Orangun model coefficients				
	α	β	δ	ϵ	R^2
ACI	0	0.10	0.25	4.15	0.53
2-a	0.74	0.10	0.25	4.15	0.78
2-b	1.15	0.12	0.20	6.94	0.85
2-c	1.04	0.48	0.25	4.15	0.78

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 묻힘길이(mm)이다.

Fig. 9와 Table 6에서 나타낸 바와 같이 ACI-408R(2003)에 의한 예측식과 실험결과의 상관계수는 약 0.5304정도로 다소 낮게 나타나, ACI-408R(2003)식은 실험결과를 정확하게 반영하지 못하는 것으로 평가된다.

4.2 ACI-408R을 기초로 한 부착응력 식의 제안

본 논문에서 고려된 콘크리트 배합의 재료 특성을 고려하기 위해, ACI-408R의 근간이 되는 Orangun et al.(1977)에서 제시된 부착 응력 모델 산정 식을 준용하여, 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{U}{\sqrt{f_c}} = \left(0.1 + 0.25 \frac{C_{min}}{d_b} + 4.15 \frac{d_b}{l_d} \right) \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right)^\alpha \quad (2-a)$$

$$\frac{U}{\sqrt{f_c}} = \left(\beta + \delta \frac{C_{min}}{d_b} + \epsilon \frac{d_b}{l_d} \right) \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right)^\alpha \quad (2-b)$$

$$\frac{U}{\sqrt{f_c}} = \left(\beta + 0.25 \frac{C_{min}}{d_b} + 4.15 \frac{d_b}{l_d} \right) \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right)^\alpha \quad (2-c)$$

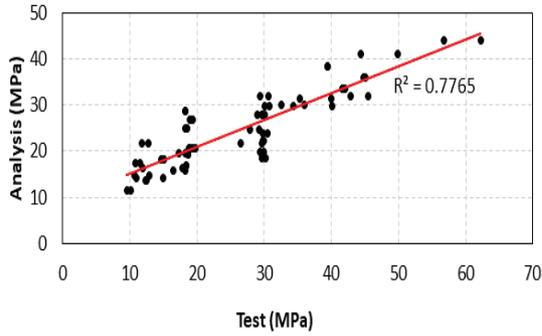


Fig. 10. Comparison between the interpretation results and experimental results by equation(2-a)

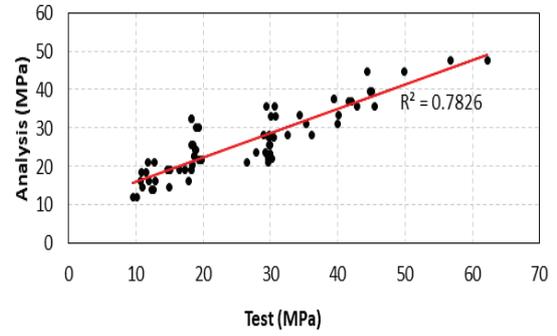


Fig. 12. Comparison between the interpretation results and experimental results by equation (2-c)

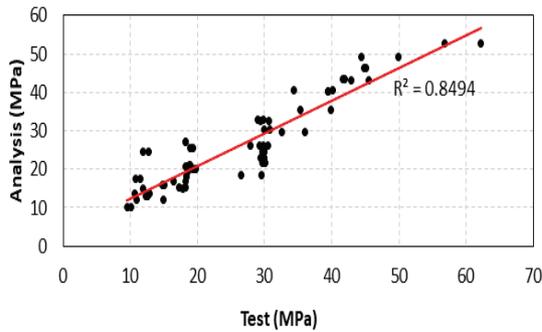


Fig. 11. Comparison between the interpretation results and experimental results by equation(2-b)

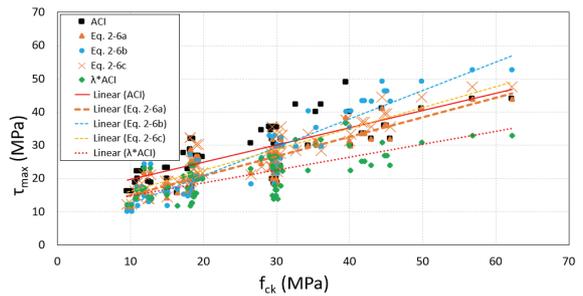


Fig. 13. Comparison with current design standards

여기서, γ_l 는 경량 콘크리트의 단위중량, γ_g 는 일반 콘크리트의 단위중량, α 는 콘크리트 배합에 따른 부착 거동을 묘사하기 위한 지수이다. ACI-408R의 부착강도 산정식은 일반 콘크리트에서 실험값을 과소평가하는 경향이 나타났으며, 경량 콘크리트에선 반대로 과대평가하는 경향을 보였다. 이는 같은 목표의 압축강도를 갖더라도 단위중량이 낮을수록 부착강도는 저하되는 경향을 보이는 데, 그 결과 ACI-408R을 사용하여 결과분석을 진행하면 초경량 콘크리트와 일반 콘크리트의 산정값이 정반대의 결과가 나오게 된다. 이를 보완하고자 기존 Orangun et al.(1977)의 식에 단위중량 산정식을 추가하여 제안하였다. 실험값과 비교한 결과를 Fig. 10~12에 나타내었으며 그 결과, 모든 식의 상관성이 향상되었고 특히, 식 (2-b)의 상관성이 가장 좋은 것으로 나타났다.

콘크리트 구조설계기준에서 경량콘크리트 사용에 따른 영향을 반영하기 위하여 경량콘크리트계수 λ 를 사용하며, λ 는 0.75이다. 콘크리트 구조설계기준에서 제시하는 경량콘크리트의 계수를 반영하여 ACI-408R에 경량콘크리트계수 λ 를 곱하였고 식 2-(a)~(c)와 비교를 진행하였다. 그 결과 식 2-(a)이 범위 내에 분포되어 있는 것을 Fig. 13에서 확인할 수 있었다.

4.3 CEB-FIP Model Code (2010)

콘크리트 내 배근된 철근의 부착거동을 묘사하기 위해 CEB-FIP Model Code 2010에서는 철근의 부착응력과 슬립의 관계를 Fig. 14 및 식 (3)과 같이 제안하였다.

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

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

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

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

여기서, $\tau_{b,f}$ 는 마찰에 의한 부착응력이고, s_1 은 최대부착응력 도달시점에서의 미끌림값, s_2 및 s_3 는 부착특성에 대한 각각의 미끌림 값, α 는 실험을 통해 얻은 매개변수 값이다.

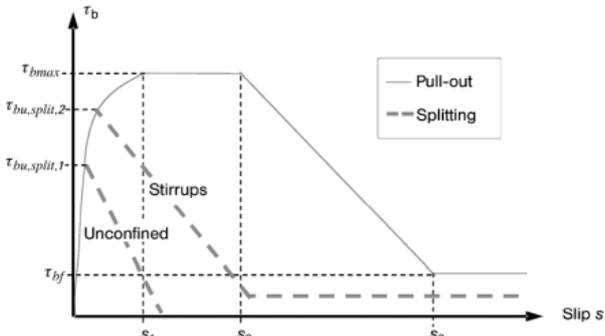


Fig. 14. Analytical bond stress-slip relationship(CEB-FIP)

4.4 Modified CMR

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

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

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

4.5 부착-슬립 거동의 실험결과와 설계기준 비교

실험을 통해 산출된 부착 응력 및 슬립 결과를 상업용 통계 패키지(Statistical Package for the Social Sciences : SPSS)의 비선형 회귀분석 수행을 통해 CEB-FIP Model Code 2010과 Modified CMR Model이 제안한 식 (3-a)와 식 (4)에 제시된 매개변수를 산출하였다.

Fig. 15~20과 Table 7에 나타난 바와 같이 산출된 매개변수 및 실험결과와 각 부착강도-슬립 모델을 비교하면, Modified CMR Model은 상승 부분만을 고려하였기 때문에 분석 시 상승 구간만을 사용하였고 그 결과, 대부분 CEB-FIP Model Code 2010보다

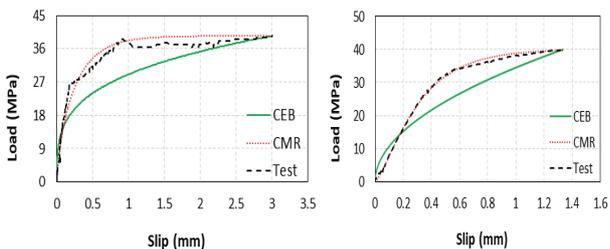


Fig. 15. Comparison between the proposed bond model and experimental results by STEP2 2d

Modified CMR Model의 결과가 더 유사한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 실험결과와 제안된 모델과의 편차가 존재하여도, 부착거동이 국부적인 거동임을 감안할 때, 고강도 초경량 콘크리트의 부착거동을 제안 모델이 전반적으로 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

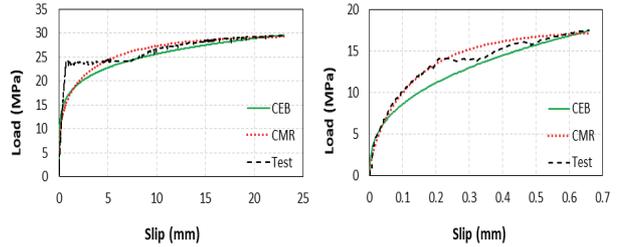


Fig. 16. Comparison between the proposed bond model and experimental results by STEP2 5d

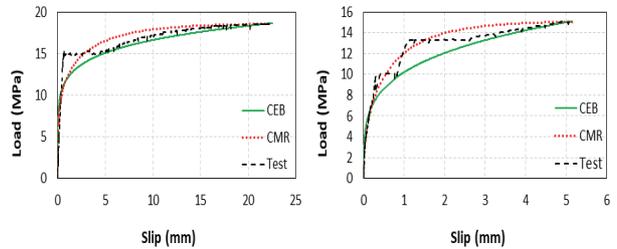


Fig. 17. Comparison between the proposed bond model and experimental results by STEP2 8d

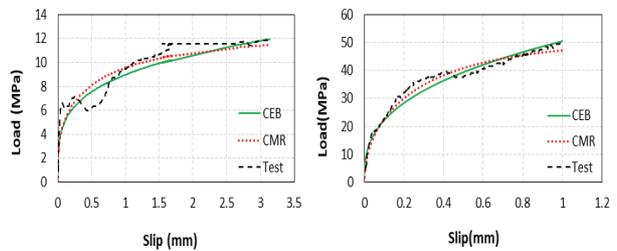


Fig. 18. Comparison between the proposed bond model and experimental results by STEP3 2d

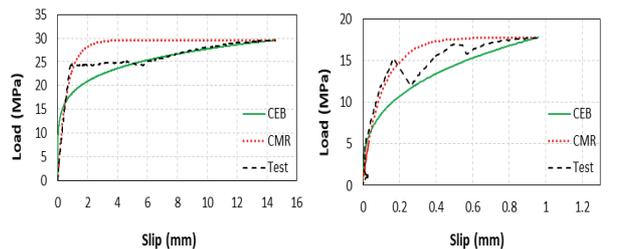


Fig. 19. Comparison between the proposed bond model and experimental results by STEP3 5d

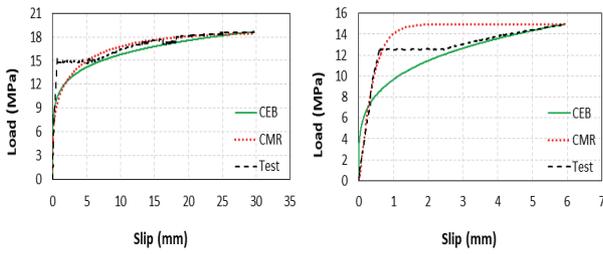


Fig. 20. Comparison between the proposed bond model and experimental results by STEP3 8d

Table 7. 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		Modified CMR model					
			α	R^2	α	β	R^2	τ		
Step2	2d	D13	39.47	0.65	0.52	0.95	0.96	3.12	0.99	37.80
		D19	35.36	1.21	0.41	0.88	1.07	5.55	0.99	35.21
		D25	29.23	0.29	0.68	0.97	1.35	3.02	0.99	27.32
	5d	D13	29.62	23.06	0.17	0.87	0.28	3.19	0.93	29.27
		D19	19.82	0.37	0.80	0.98	1.31	2.46	0.97	17.63
		D25	17.41	0.66	0.37	0.93	0.64	3.62	0.99	17.11
	8d	D13	18.64	22.52	0.14	0.77	0.24	4.18	0.82	18.57
		D19	15.11	5.15	0.24	0.93	0.42	4.54	0.99	15.04
		D25	12.93	0.84	0.39	0.96	0.67	2.95	0.99	12.48
Step3	2d	D13	36.06	1.48	0.43	0.92	0.84	3.84	0.97	35.41
		D19	27.91	0.41	0.83	0.98	1.49	2.66	0.99	25.05
		D25	12.82	0.59	0.35	0.80	1.13	7.32	0.97	12.81
	5d	D13	29.60	14.56	0.17	0.78	0.90	21.81	0.89	29.60
		D19	17.81	0.96	0.32	0.80	0.85	8.12	0.91	17.81
		D25	12.63	0.72	0.53	0.98	0.82	2.53	0.99	11.8
	8d	D13	18.64	29.69	0.15	0.88	0.25	3.2	0.93	18.45
		D19	14.97	5.95	0.25	0.82	1.41	18.51	0.96	14.97
		D25	9.61	0.50	0.43	0.87	1.61	6.52	0.99	9.58
N80	2d	D13	44.42	1.77	0.41	0.93	0.80	3.87	0.99	43.69
		D19	42.00	0.98	0.55	0.92	1.27	4.02	0.99	41.05
		D25	40.42	1.24	0.55	0.94	1.31	3.77	0.99	39.2
	5d	D13	30.80	25.70	0.16	0.85	0.27	3.58	0.92	30.57
		D19	30.00	30.38	0.18	0.85	0.25	2.68	0.87	29.46
		D25	30.39	52.82	0.14	0.81	0.29	5.93	0.93	30.36
	8d	D13	19.75	23.28	0.17	0.86	0.29	3.22	0.92	19.52
		D19	18.60	31.63	0.15	0.83	0.23	3.17	0.87	18.42
		D25	18.37	26.34	0.14	0.88	0.25	4.81	0.94	18.34
N100	2d	D13	56.78	5.66	0.31	0.94	0.48	2.96	0.98	55.35
		D19	45.09	1.29	0.60	0.93	1.44	3.80	0.99	43.64
		D25	43.27	2.78	0.29	0.89	0.83	7.60	0.99	43.25
	5d	D13	30.58	25.80	0.13	0.76	0.22	3.95	0.81	30.46
		D19	29.76	27.31	0.16	0.91	0.23	2.73	0.93	29.30
		D25	28.48	17.99	0.15	0.95	0.20	2.41	0.96	27.96
	8d	D13	18.63	19.24	0.13	0.81	0.20	2.96	0.85	18.43
		D19	18.65	23.76	0.17	0.84	0.27	3.35	0.88	18.47
		D25	17.97	32.07	0.13	0.73	0.31	8.20	0.89	17.96

5. 결론

본 논문에서는 직접인발시험을 수행하여 고강도 초경량 콘크리트와 일반 콘크리트의 부착거동을 비교 및 분석하였고, 부착특성을 설계기준과 비교하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 고강도 초경량 콘크리트의 직접 인발 시험 결과, 압축강도와 부착강도간의 비례관계, 이형철근의 직경, 문힘길이와 부착강도간의 반비례관계 등을 확인할 수 있었다.
2. 실험 변수와 목표 강도가 일치하여도 단위중량이 가벼울수록 부착강도는 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 그 결과 철근콘크리트의 부착강도에는 단위중량이 중요한 영향을 끼치는 것으로 판단된다.
3. ACI-408R을 수정하여 제안한 모델과 실제 실험결과와의 비교를 통해 문힘길이가 클수록 예측값과 차이가 작게 나타났으며, 예측값을 잘 묘사하는 것으로 판단된다.
4. 통계분석을 통해 각 시험체의 부착거동 모델을 산정하였다. 실험결과와 제안 모델간의 편차가 존재하기는 하지만, 평균적으로 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 TBM 굴진향상을 위한 연속굴착 기술개발 사업(과제번호: RS-2022-00144188)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

ACI Committee 408. (2003). Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension(ACI 408R-03), 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.

- Fib Model Code for Concrete Structures (2010). Lausanne, Switzerland: The International Federation for Structural Concrete (fib), 244.
- Gu, D.G., Oh, J.H., Yoo, S.W. (2023). Evaluation of bond-slip behavior of high strength lightweight concrete with compressive strength 120 MPa and unit weight 20 kN/m³, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **11(1)**, 39–47 [in Korean].
- Jung, S.W. (2010). Standardization Technology for The Environmental-Friendly Utilization of Pond Ash Technical Report, R-2007-2-151, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 2010, 1–15 [in Korean].
- KCI (2012). Concrete Design Code and Commentary. Seoul, Korea: Korea Concrete Institute (KCI), 168–175 [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, Journal Proceedings, **74(3)**, 114–122.
- Sim, J.I., Yang, K.H. (2010). Air content, workability and bleeding characteristics of fresh lightweight aggregate concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **22(4)**, 559–566 [in Korean].
- Sim, J.I., Yang, K.H. (2011). Mechanical properties of lightweight aggregate concrete according to the substitution rate of natural sand and maximum aggregate size, Journal of the Korea Concrete Institute, **23(5)**, 551–558 [in Korean].

압축강도 및 단위중량에 따른 고강도 초경량 콘크리트의 부착-슬립 거동

나노 재료의 발달된 기술을 구조물의 장대화에 접목시키기 위한 고강도 및 초경량 재료의 요구가 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 그래서 기존 연구 결과와 수많은 배합시도를 바탕으로 압축강도 100 MPa, 단위중량 18 kN/m³ 및 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 및 초경량 콘크리트의 배합을 도출하고 그 성능을 평가하였다. 본 논문에서는 압축강도 100 MPa, 단위중량 18 kN/m³ 및 압축강도 80 MPa, 단위중량 16 kN/m³ 정도의 고강도 및 초경량 콘크리트에 해당하는 108개의 시편을 제작하여 직접 인발 부착실험을 수행하여 부착특성을 파악하고, 실험결과와 현행 설계기준과 비교하여 부착특성을 평가하였다. ACI-408R의 부착강도 산정식에 대해 실험결과가 정확하게 반영되지 않은 것으로 판단되어, ACI-408R을 기반으로 한 부착응력 식을 제안하였다. 제안 식을 통해 편차가 어느 정도 줄어든 결과를 도출하였다. 그리고 통계분석을 이용한 CEB-FIP모델과 수정된 CMR 모델을 산정한 결과는 실험결과와 약간의 차이를 보였지만 부착거동이 국부적인 거동임을 감안하면, 고강도 및 초경량 콘크리트의 부착거동의 제안 모델이 전반적으로 잘 묘사하는 것으로 판단된다.