



천연모래 치환율과 경량 굵은 골재 최대 크기에 따른 경량 골재 콘크리트의 역학적 특성

심재일^{1)*} · 양근혁¹⁾

¹⁾경기대학교 건축공학전공

Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete according to the Substitution Rate of Natural Sand and Maximum Aggregate Size

Jae-Il Sim^{1)*} and Keun-Hyeok Yang¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

ABSTRACT The effect of the maximum aggregate size and substitution rate of natural sand on the mechanical properties of concrete is evaluated using 15 lightweight aggregate concrete mixes. For mechanical properties of concrete, compressive strength increase with respect to age, tensile resistance, elastic modulus, rupture modulus, and stress-strain relationship were measured. The experimental data were compared with the design equations specified in ACI 318-08, EC2, and/or CEB-FIP code provisions and empirical equations proposed by Slate et al., Yang et al., and Wang et al. The test results showed that compressive strength of lightweight concrete decreased with increase in maximum aggregate size and amount of lightweight fine aggregates. The parameters to predict the compressive strength development could be empirically formulated as a function of specific gravity of coarse aggregates and substitution rate of natural sand. The measured rupture modulus and tensile strength of concrete were commonly less than the prediction values obtained from code provisions or empirical equations, which can be attributed to the tensile resistance of lightweight aggregate concrete being significantly affected by its density as well as compressive strength.

Keywords : lightweight concrete, mechanical properties, maximum aggregate size, substitution rate of natural sand

1. 서 론

인공 경량 골재(artificial lightweight aggregate)는 점토, 혈암 및 산업부산물 등을 미분 상태로 가공하고 보조 재료를 넣어 성형·소성하여 만든다.¹⁾ 이로 인해 인공 경량 골재는 천연골재의 채취에 따른 환경파괴 방지와 산업폐기물의 재활용 측면에서 지속가능한 재료로 부각되고 있다. 그러나 인공 경량 골재의 높은 흡수율과 낮은 강도는 콘크리트의 강도 발현 및 내구성에 불리하게 작용할 뿐만 아니라 보통 중량 콘크리트 배합설계 방법과는 다른 배합모형을 필요로 하게 한다. 따라서 경량 골재 콘크리트(lightweight aggregate concrete)의 구조체 적용성을 향상시키기 위해서는 많은 기술적 보완이 요구되고 있다.²⁾

경량 골재 콘크리트의 구조체 적용에 대한 가장 큰 장점은 고정하중의 감소이다. 하지만 구조체 적용을 위한 대부분의 연구³⁻⁵⁾는 기건 단위 질량이 보통 중량 콘크리트의 80% 이상의 수준에 있는 모래 경량 콘크리트(sand

lightweight concrete, SLWC)에서 이루어지고 있어 부재의 자중 감소 효과 측면에서 효율성이 낮다. 이를 위해 전경량 콘크리트(all lightweight concrete, ALWC)에 대한 연구^{6,7)}가 점차 관심을 끌고 있지만 경량 잔골재의 입도 불량, 낮은 압축강도와 강성 및 수밀성의 저하 등으로 실용화에 어려움을 겪고 있다. 특히 전경량 콘크리트의 역학적 특성은 모래 경량 콘크리트에 비해 현저하게 떨어진다. 이에 따라 경량 골재 콘크리트의 강도 증가 및 입도 개선을 위해 전경량 콘크리트에서도 천연모래가 치환된 경량 골재 콘크리트 설계를 요구하고 있다.⁸⁾

일반적으로 콘크리트는 철근의 배근 간격, 구조 부재의 크기, 경제성, 시방서의 요구 조건 및 설계기준 강도에 의해 굵은 골재 최대 크기가 결정된다.⁹⁾ 이는 경량 골재 콘크리트에서도 동일하며 굵은 골재 최대 크기는 경량 골재 콘크리트의 배합설계 및 역학적 특성을 결정하는 중요한 변수이다. 특히 경량 굵은 골재는 원재료의 팽창에 의해 제조되기 때문에 직경이 큰 골재의 생산이 어려우며, 골재의 크기가 클수록 골재 자체의 강도 및 흡수율 등의 물리적 특성이 나빠지게 된다. 이에 ACI 211¹⁰⁾에 따른 경량 골재 콘크리트의 배합설계에서도 경량 굵은 골재 최대 크기를 반영하고 있다.

*Corresponding author E-mail: jisim@kgu.ac.kr

Received January 4, 2011, Revised June 21, 2011,

Accepted June 22, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

이 연구의 목적은 경량 골재 콘크리트의 역학적 특성에 대한 천연모래 치환율과 경량 굵은 골재 최대 크기의 영향을 평가하는 것이다. 이를 위해 콘크리트의 재령별 압축강도와 기건 단위 질량, 쪼갬 인장강도, 직접 인장강도, 파괴계수, 탄성계수 및 응력-변형을 관계를 측정하였다. 측정된 역학적 특성들은 설계기준¹¹⁻¹⁴⁾ 또는 제안 모델들^{4,5,15)}과 비교하였다. 또한 이미지분석기법(image analysis method)¹⁶⁾을 이용하여 콘크리트의 내부 공극률 및 공극 분포 특성을 평가하였다.

2. 실험

2.1 사용 재료

시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement)가 이용되었으며, 시멘트의 비중은 3.15이며 분말도는 3,800 cm²/g이었다. 골재는 혈암과 점토를 팽창시켜 만든 구형의 경량 골재와 천연모래를 이용하였다. 경량 굵은 골재 최대 크기는 8, 13 및 19 mm이며, 경량 잔골재와 천연모래의 최대 크기는 각각 4 mm와 5 mm이다.

Table 1에는 사용된 골재들의 물리적 성능을 나타내었다. 천연모래의 비중은 2.42로써 일반적으로 사용하는 천연모래 비중⁹⁾보다 낮은 수준이었다. 경량 굵은 골재의 비중은 1.18~1.22 범위에 있으며, 경량 잔골재의 비중은 1.30이었다. 이는 2.5~2.6 범위에 있는 보통 중량 골재 비중⁹⁾의 약 50% 수준이었다. 경량 골재의 흡수율은 13.68~18.96% 범위에 있었으며, 경량 잔골재의 흡수율이 경량 굵은 골재의 흡수율보다 약 28% 정도 낮았다. 경량 골재의 흡수율은 일반적으로 0.5~1% 수준인 보통 중량 골재 흡수율⁹⁾의 약 4.5~38배 수준이었다. 경량 굵은 골재의 조립률은 5.86~6.56으로 일반적으로 5.45~6.6 범위에 있는 천연골재와 비슷한 수준에 있었으며, 경량 잔골재의 조립률은 4.35로 천연모래보다 1.73 배 높았다. 이는 경량 잔골재의 입도불량에 기인한 것으로 경량 잔골재는 1.2 mm 이하의 미분이 매우 부족하였다. 그러나 천연모래가 치환될 경우 천연모래 치환율이 50%를 넘으면 KS F 2534의 표준 입도분포곡선을 만족하였다.¹⁾

Table 1 Physical properties of aggregates used

Type	G_{max} (mm)	γ	W_{ab} (%)	FM	ρ (kg/m ³)	
Light weight aggregate	Coarse	8	1.22	18.77	5.86	759
		13	1.18	18.00	6.31	697
		19	1.21	18.96	6.56	729
		Fine	4	1.30	13.68	4.35
	Natural sand	5	2.42	1.85	2.51	1,380

Note) G_{max} , γ , W_{ab} , FM and ρ is maximum aggregate size, specific gravity, water absorption of aggregates, fineness modulus of aggregates, and unit volume weight of aggregates, respectively.

2.2 배합설계

이 연구의 주요변수는 경량 굵은 골재 최대 크기와 천연모래 치환율이며 주요변수의 역학적 특성을 평가하기 위해 Table 2와 같이 경량 골재 콘크리트 15배합의 실험이 진행되었다. 시험체 명은 두 부분으로 구성되며 첫 번째 부분의 문자와 숫자는 굵은 골재 최대 크기를, 두 번째 부분의 숫자는 천연모래 치환율을 각각 나타낸다. 경량 골재 콘크리트의 배합표는 ACI 211¹⁰⁾에 따라 작성되었다. 천연모래의 치환율은 0~100% 까지 25% 단위로 총 5 수준으로 나누었으며, 경량 굵은 골재 최대 크기는 8, 13 및 19 mm의 3 수준으로 설정하였다. 단위수량(W)과 물/시멘트비(W/C)는 각각 200 kg/m³과 40%로 고정되었다. ACI 211¹⁰⁾에서는 경량 골재 콘크리트 1 m³에 사용된 경량 굵은 골재의 양을 경량 굵은 골재의 단위 용적 중량의 비로써 결정하고 있다. 이에 이 연구에서도 ACI 211¹⁰⁾에 따라 경량 굵은 골재의 양을 경량 굵은 골재 단위 용적 중량의 55%로 고정하였다. 이를 잔골재율로 환산해 보면 경량 굵은 골재 최대 크기가 8, 13 및 19 mm 일때 각각 47, 49 및 48% 수준이었다. 배합된 경량 골재 콘크리트는 항온항습실에서 온도 20 ± 1°C, 상대습도 60 ± 5%로 양생하였다.

2.3 측정

경량 골재 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405¹⁷⁾의 기준

Table 2 Detail of lightweight concrete mixes

Specimen	G_{max} (mm)	R_s (%)	Unit volume weight (kg/m ³)								
			W	C	F_{LWC}	F_{sand}	G_{LWG}				
D8-0	8	0	200	500	389	0	417				
D8-25		25			292	181					
D8-50		50			194	362					
D8-75		75			97	543					
D8-100		100			0	724					
D13-0	13	0			200	500	411	0	383		
D13-25		25					308	191			
D13-50		50					206	383			
D13-75		75					103	574			
D13-100		100					0	766			
D19-0	19	0					200	500	403	0	401
D19-25		25							302	187	
D19-50		50							201	375	
D19-75		75							101	562	
D19-100		100							0	750	

Note) W , C , F_{LWC} , F_{sand} , and G_{LWG} refer to water, ordinary portland cement, lightweight fine aggregate, natural sand and lightweight coarse aggregate, respectively.

R_s is the substitution rate of natural sand to total fine aggregate by volume.

3. 실험 결과

3.1 경량 골재 콘크리트의 내부공극 구조

천연모래 치환율에 따른 경량 골재 콘크리트의 내부 형태를 Fig. 2에 나타내었다. 혈암과 점토를 팽창시켜 제조된 경량 골재는 내부의 많은 공극을 갖는 구형¹⁾으로 콘크리트 단면적의 대부분을 차지하고 있었다. 경량 골재 콘크리트 내부에는 경량 굵은 골재와 경량 잔골재가 적절히 혼합되어 있으며, 경량 굵은 골재 최대 크기가 클수록 Fig. 2와 같이 경량 골재의 직경이 커서 동일한 면적에서 강도가 낮은 경량 골재가 집중되어 있었다. 또한 경량 골재와 시멘트 페이스트 계면은 매끈한 경량 골재의 표면에도 불구하고 공극 없이 잘 부착되어 있었다.

천연모래 치환율에 따른 경량 골재 콘크리트의 이미지 분석 결과를 Table 3에 나타내었다. 경량 골재 콘크리트의 공극률(P_v)은 경량 굵은 골재 최대 크기에 관계없이

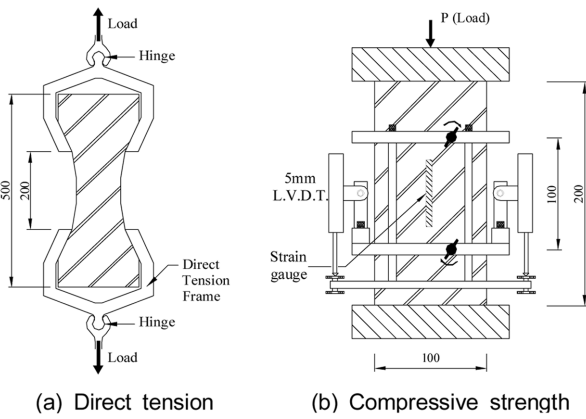


Fig. 1 Test set up (unit: mm)

에 따라 재령 1, 3, 7, 28, 56 및 91일에서 $\phi 100 \times 200$ mm 실린더를 이용하여 측정하였다. 압축강도 측정시 $\phi 100 \times 200$ mm 실린더의 부피와 무게를 측정하여 경화된 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량을 산정하였다. 또한 재령 28일에 조깅 인장강도, 직접 인장강도, 파괴계수 및 응력-변형률의 관계를 측정하였다. 경량 골재 콘크리트의 직접 인장강도는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 I 형상의 시험체를 제작하여 측정하였다. 직접인장 시험체의 단면은 100×90 mm이며 실험 구간은 200 mm로 제작되었으며, 가력은 만능재료시험기를 이용하여 재하속도 0.3 mm/min로 변위제어 하였다. 파괴계수는 KS F 2403¹⁷⁾에 만족하는 $150 \times 150 \times 550$ mm 크기의 직육면체 시험체를 이용하여 KS F 2408¹⁷⁾에 따라 경간을 450 mm로 설치하여 3등분점 휨 실험을 통해 측정하였다. 경량 골재 콘크리트의 응력-변형률의 관계 및 탄성계수는 컴프레소미터를 이용하여 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 측정되었다. 탄성계수는 측정된 응력-변형률 곡선에서 원점과 최대응력의 45%를 연결하는 기울기로 산정하였다.¹¹⁾

경량 골재 콘크리트의 내부 공극 구조를 평가하기 위해 이미지 분석 프로그램(i-Solution)을 이용하였다.¹⁶⁾ 이미지 분석 프로그램은 이미지의 밝기 또는 색상의 차이로 이미지의 원하는 객체를 이치화(threshoding)하여 면적, 모양 및 크기 등의 형상변수와 밝기, 색상 채널 및 광학 밀도 등의 광학변수를 측정하여 각각의 변수들의 기술통계를 나타낸다. 정확한 분석을 위해서는 이미지를 동일한 상태에서 측정하는 것이 중요하며 이 연구에서는 정확한 이미지 분석을 위해 암실에서 동일한 광원으로 이미지를 측정하였으며, $\phi 100$ 공시체를 길이 방향으로 3등분하여 각각의 단면에 대한 이미지를 측정하였다. 측정된 이미지는 이미지 분석 프로그램을 통해 내부 구조, 공극률 및 공극의 직경과 형태 등이 분석되었으며, $30 \mu\text{m}$ 이상의 모든 공극의 면적을 측정하여 전단면에서의 비율로 산정하였다. 이미지 분석 시 경량 골재 내부의 공극도 공극 면적에 포함하였다. 분석된 기술통계량은 각 시험체별로 평균하였으며, 분석 이미지 및 기술통계량은 컴퓨터를 통해 저장하였다.

R_s (%)	Size of lightweight aggregate (mm)		
	8	13	19
0			
25			
50			
75			
100			

Fig. 2 Meso scale structural surface of lightweight aggregate concrete

Table 3 The porosity and diameter of void measured from lightweight aggregate concrete specimens

R_s (%)	Size of light-weight aggregate (mm)					
	8		13		19	
	P_r (%)	P_d (mm)	P_r (%)	P_d (mm)	P_r (%)	P_d (mm)
0	6.76	0.234	6.72	0.282	6.25	0.246
25	6.15	0.251	6.15	0.246	5.95	0.256
50	5.50	0.241	5.62	0.262	6.09	0.251
75	5.19	0.260	5.21	0.258	5.49	0.262
100	3.80	0.270	4.36	0.271	4.49	0.260

Note) P_r refer to porosity and P_d is mean diameter of void.

3.8~6.76% 범위에 있었으며, 천연모래 치환율이 증가할수록 감소하였다. 또한 경량 골재 콘크리트의 공극률은 굳지 않는 경량 골재 콘크리트의 공기량과 비슷한 수준에 있었다.¹⁾ 경량 골재 콘크리트의 공극의 평균 직경(P_d)은 경량 굵은 골재 최대 크기와 천연모래 치환율에 관계없이 약 0.24~0.28 mm 범위에 있었다.

3.2 경화된 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량

경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량은 Table 4에 나타난 바와 같이 경량 굵은 골재 최대 크기에 관계없이 천연모래 치환율이 증가할수록 증가하였다. 재령 28일에서 천연모래가 100% 치환된 경량 골재 콘크리트(SLWC)의 기건 단위 질량은 1,857~1,885 kg/m³로 경량 굵은 골재의 단위 용적 중량이 클수록 크게 나타났다. 또한 재령 28일에서 천연모래가 치환되지 않은 경량 골재 콘크리트(ALWC)의 기건 단위 질량은 1,388~1,464 kg/m³로 모래경량 콘크리트의 약 76% 수준에 있었다. D13-0 시험체를 제외한 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량은 콘크리트표준시방서¹⁸⁾에서 요구하는 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량의 기준을 모두 만족하였다.

경화된 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량은 재령 1일에 재령 28일의 약 104~110% 수준에 있었으며, 재령이 증가함에 따라 기건 단위 질량은 감소하였다. 그러나 재령 28일 이후에는 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량의 변화가 거의 없었다. 이는 재령이 증가함에 따라 경량 골재 콘크리트 내부에 존재하는 수분이 시멘트와의 수화반응 및 양생 과정에서 손실되기 때문으로 판단된다.

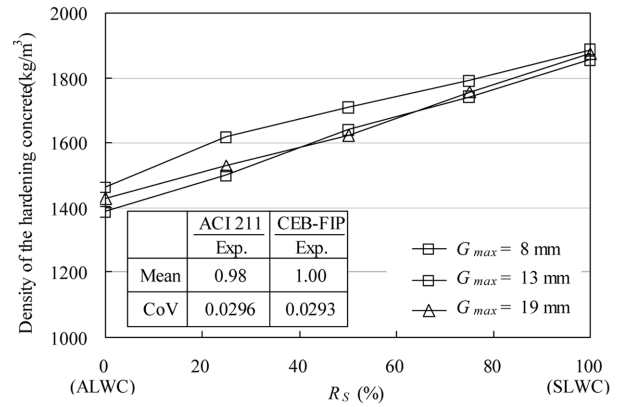


Fig. 3 Effect of R_s on density of the hardening concrete

천연모래 치환율과 재령 28일의 경화된 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량을 Fig. 3에 나타내었다. 동일한 그림에 ACI 318-08¹¹⁾과 CEB-FIP¹²⁾기준에 따른 예측값을 실험값으로 나누어 그 평균과 변동계수를 함께 나타내었다. ACI 318-08¹¹⁾과 CEB-FIP¹²⁾기준에 따른 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량 예측값은 평균 0.98 및 1.00, 변동계수 0.0296 및 0.0293으로 경화된 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량을 잘 예측하고 있다.

3.3 재령 28일 압축강도

천연모래 치환율과 재령 28일 압축강도를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 경량 골재 콘크리트에서 경량 골재를 관통하는 균열로 인해 파괴가 발생하였다. 경량 골재 콘크

Table 4 Summary of test results

Specimen	Density of the hardening concrete, ρ_c (kg/m ³)						Compressive strength, f_{ck} (MPa)						Modulus of rupture, f_r (MPa)	Splitting tensile strength, f_{sp} (MPa)	Direct tensile strength, f_t (MPa)	Modulus of elasticity, E_c (MPa)	The strain at peak Stress, ϵ_0
	1 day	3 days	7 days	28 days	56 days	91 days	1 day	3 days	7 days	28 days	56 days	91 days					
D8-0	1,563	1,531	1,497	1,464	1,463	1,461	12.1	22.7	26.6	26.4	33.5	32.6	1.34	1.74	0.34	15,306	0.00225
D8-25	1,687	1,626	1,628	1,619	1,600	1,599	14.3	24.4	29.7	33.9	38.8	38.3	1.56	2.11	0.63	16,925	0.00221
D8-50	1,771	1,740	1,737	1,708	1,707	1,702	14.0	25.4	29.6	33.9	42.8	42.5	1.53	2.38	0.98	18,475	0.00240
D8-75	1,862	1,830	1,831	1,790	1,796	1,791	14.8	25.5	32.7	33.8	42.3	43.2	1.04	2.66	1.19	20,304	0.00205
D8-100	1,961	1,961	1,910	1,885	1,885	1,881	12.8	24.9	31.3	32.5	43.1	43.4	1.33	2.70	1.54	22,493	0.00180
D13-0	1,526	1,451	1,459	1,388	1,419	1,389	15.6	19.0	24.4	25.4	28.8	28.8	1.16	1.66	0.53	13,187	0.00245
D13-25	1,563	1,531	1,522	1,500	1,505	1,503	14.6	19.9	24.3	25.9	30.0	29.7	1.27	1.83	0.59	13,433	0.00265
D13-50	1,716	1,694	1,649	1,640	1,661	1,659	16.8	22.5	25.7	30.1	33.0	32.4	2.04	2.09	1.07	16,237	0.00230
D13-75	1,812	1,743	1,753	1,740	1,753	1,744	17.2	21.4	27.9	30.0	35.1	35.1	2.37	2.54	1.26	17,217	0.00205
D13-100	1,946	1,906	1,880	1,857	1,901	1,856	17.4	23.9	29.7	33.9	40.9	40.7	1.91	2.31	1.36	23,466	0.00225
D19-0	1,531	1,472	1,439	1,428	1,413	1,412	10.9	18.6	22.1	23.3	25.4	26.0	0.94	1.24	0.66	14,659	0.00220
D19-25	1,639	1,564	1,528	1,521	1,540	1,521	12.8	21.4	23.5	25.1	30.3	30.5	1.23	1.99	0.60	14,674	0.00230
D19-50	1,716	1,657	1,621	1,620	1,653	1,620	13.8	21.8	24.3	27.6	35.3	35.6	1.57	2.28	1.06	14,944	0.00220
D19-75	1,844	1,768	1,755	1,755	1,760	1,755	15.2	21.9	26.8	31.0	36.3	37.6	1.95	2.18	1.19	17,072	0.00205
D19-100	1,938	1,909	1,872	1,877	1,892	1,877	15.6	24.6	29.5	33.0	39.8	39.9	1.33	2.68	1.40	21,189	0.00210

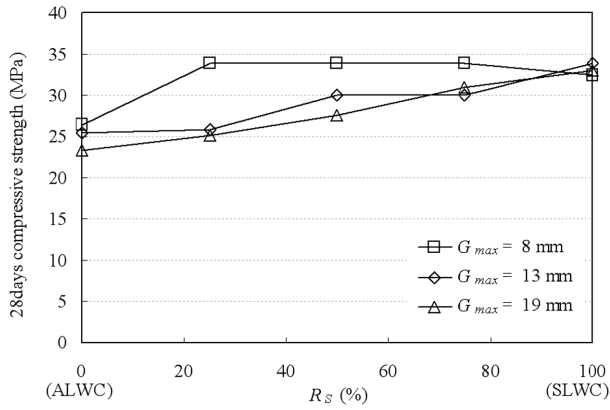


Fig. 4 28-day compressive strength of lightweight aggregate concrete tested

리트의 재령 28일 압축강도는 천연모래 치환율이 감소할수록, 경량 굵은 골재 최대 크기가 클수록 감소하였다. 전경량 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 모래 경량 콘크리트의 70~80% 수준에 있었으며, 그 수준은 경량 굵은 골재 최대 크기가 클수록 작았다. 이는 Table 3에 나타난 바와 같이 동일한 천연모래 치환율에서 경량굵은 골재 최대 크기가 클수록 내부 공극률이 증가하기 때문으로 판단된다.³⁾

3.4 압축강도 발현율

경량 굵은 골재 최대 크기에 따른 대표적인 재령별 압축강도 발현율을 Fig. 5에 나타내었다. 재령별 압축강도 발현율은 재령 28일 압축강도를 기준으로 나타내었다. 경량 골재 콘크리트의 초기 압축강도 발현율은 재령 1일에 39~62%, 재령 7일에 85~101% 수준이었다. 또한 재령 91일에는 108~133%로 장기재령에서도 높은 강도 증진을 보였다. 이는 Table 4에 나타난 바와 같이 경량 골재 콘크리트 내의 경량 골재는 재령 초기에 함수된 수분을 방출하여 미수화 시멘트와 수화반응을 유도하여 초기 및 장기 강도 발현을 증가시키는 것으로 판단된다.

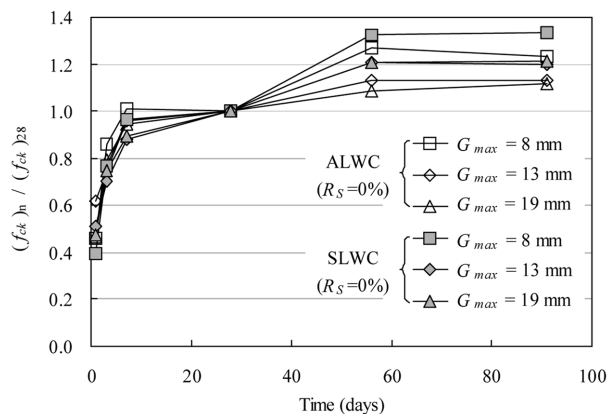


Fig. 5 Typical compressive strength development of concrete specimens

보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 대한 재령별 압축강도를 ACI 209¹³⁾에서는 식 (1)과 같이 포물선 형태의 방정식으로 제시하고 있다.

$$f_{ck}(t) = \frac{t}{A_1 + B_1 t} f_{ck} \quad (1)$$

여기서, $f_{ck}(t)$ 는 재령 t 에서의 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. A_1 과 B_1 은 각각 초기재령과 장기재령에서 압축강도 발현에 관계되는 상수로써 ACI 209¹³⁾에서는 보통 포틀랜드 시멘트 사용시 각각 4와 0.85로 제시하고 있다.

천연모래 치환율과 식 (1)에서 제시된 상수 A_1 과 B_1 의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 식 (1)에서 제시된 상수 A_1 과 B_1 은 실험 결과를 비선형 회귀분석하여 결정하였다. 상수 A_1 은 천연모래 치환율이 증가할수록, 경량 굵은 골재의 비중(ρ_G)이 증가할수록 증가하였다. 그러나 B_1 은 천연모래 치환율 및 경량 굵은 골재 특성과 관계없이 0.776~0.906 범위에 있으며 그 평균은 0.85로 ACI 209¹³⁾의 제안모델과 같았다. 이로부터 천연모래가 치환된 경량 골재 콘크리트에서 압축강도 발현에 관계되는 상수 A_1 은 경량 굵은 골재 비중과 천연모래 치환율의 함수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, B_1 은 ACI 209¹³⁾의 제안값인 0.85로 나타낼 수 있었다.

$$A_1 = 1.98 \rho_G \cdot e^{0.0038 R_s} \quad (2)$$

3.5 파괴계수

천연모래 치환율과 $f_r / \sqrt{f_{ck}}$ 의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 일반적으로 콘크리트의 파괴계수는 압축강도의 제곱근에 비례한다고 보고되어 있다.⁸⁾ 동일한 그래프에 경량 골재 콘크리트의 파괴계수에 대한 ACI 318-08¹¹⁾기준과 Slate 등⁴⁾의 제안모델을 같이 나타내었다. 경량 골재 콘크리트의 $f_r / \sqrt{f_{ck}}$ 는 천연모래 치환율이 증가할수록 증가하였으며 그 증가 기울기는 경량 굵은 골재 최대 크기

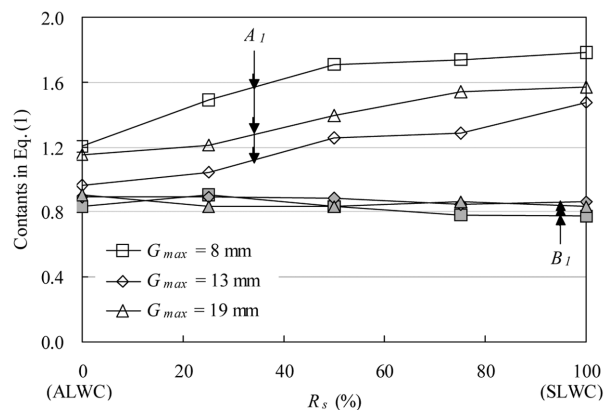


Fig. 6 Comparisons of both constants in Eq. (1) determined from concrete tested and specified in ACI 209

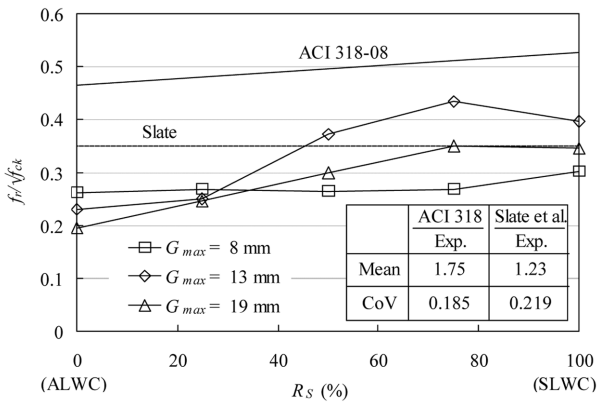


Fig. 7 Effect of R_S on $f_r/\sqrt{f_{ck}}$

가 클수록 크게 나타냈다. 또한 ACI 318-08¹¹⁾의 설계기준은 경량 골재 콘크리트의 파괴계수를 평균 75% 과대평가하고 있었으며, 모래 경량 콘크리트의 기반한 Slate 등⁴⁾의 제안모델은 모래경량 콘크리트에서는 비슷한 범위에 있었지만 전경량 콘크리트의 파괴계수를 과대평가하였다.

3.6 인장강도

천연모래 치환율과 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$ 의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에는 EC 2¹⁴⁾ 기준과 Slate 등⁴⁾의 제안모델 예측값 평균과 변동계수를 함께 나타내었다. EC 2¹⁴⁾는 압축강도가 50 MPa 이하인 경량 골재 콘크리트의 쪼갠인장강도를 $0.3(f_{ck})^{2/3}(0.4 + 0.6\rho_c/2200)$ 로 제시하고 있으며, Slate 등⁴⁾은 모래 경량 콘크리트의 회귀분석을 통해 대기양생 한 경량 골재 콘크리트의 쪼갠인장강도를 $0.41\sqrt{f_{ck}}$ 로 제시하고 있다. 경량 골재 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$ 는 경량 굵은 골재 최대 크기에 관계없이 천연모래 치환율이 증가할수록 증가하였다. $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$ 는 전경량 콘크리트에서 0.256~0.338 수준으로 모래 경량 콘크리트의 평균 70% 수준에 있었다.

한편 EC 2¹⁴⁾의 예측값은 콘크리트의 단위 기건 질량(ρ_c)을 이용하여 천연모래 치환율을 고려하였지만 실험 결과

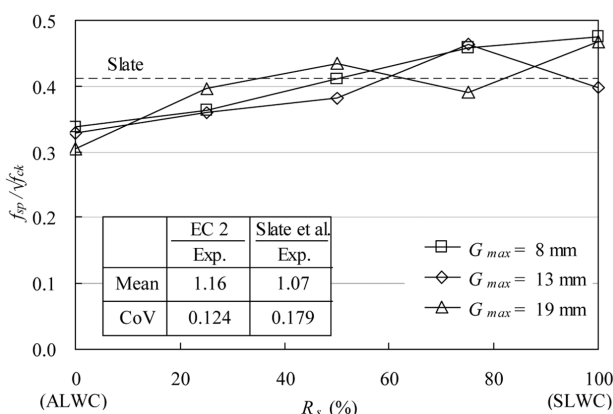


Fig. 8 Effect of R_S on $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$

를 다소 과대평가하였으며, 모래경량 콘크리트에 기반한 Slate 등⁴⁾의 예측값은 천연모래 치환율의 영향을 고려하지 않아 전경량 콘크리트에서 실험 결과를 과대평가하였다.

콘크리트의 인장강도 시험법은 직접법과 간접법으로 나누어져 있지만 일반적으로 직접법은 실험이 어려워 간접법을 이용하여 측정하고 있다. 그러나 콘크리트 부재에는 직접적인 인장력이 작용하기 때문에 직접법에 의한 인장강도 평가는 매우 중요하다. 특히 경량 골재 콘크리트에서는 동일한 압축강도에서 보통 중량 콘크리트보다 더 취성적이기 때문에 직접인장강도가 쪼갠인장강도보다 더 낮을 수 있다.¹⁹⁾

천연모래 치환율과 f_i/f_{sp} 의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 보통 중량 콘크리트의 f_i/f_{sp} 는 약 0.8 수준으로 나타났다.¹⁹⁾ 경량 골재 콘크리트의 f_i/f_{sp} 는 천연모래 치환율이 증가할수록 증가하였다. 모래 경량 콘크리트의 f_i/f_{sp} 는 평균 0.56으로써 보통 중량 콘크리트¹⁹⁾의 69% 수준에 있었다. 전경량 콘크리트의 f_i/f_{sp} 는 모래 경량 콘크리트의 약 57% 수준에 있었다. 경량 골재 콘크리트는 Table 3에 나타낸 바와 같이 인장에 저항하는 단면 내에 약 3~6%의 공극이 포함되어 있으며, 인공경량 골재의 낮은 강도 및 경량 골재와 페이스트 사이의 낮은 접착강도로 인해 동일강도의 보통 중량 콘크리트보다 더 취성적인 파괴모드를 보였다고 판단된다.

3.7 탄성계수

경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량과 탄성계수의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 동일한 그림에 이 연구의 압축강도 범위에 따라 ACI 318-08,¹¹⁾ EC 2¹⁴⁾ 및 Slate 등⁴⁾의 제안모델을 함께 나타내었다. 경량 골재 콘크리트의 탄성계수는 경량 굵은 골재 최대 크기에 관계없이 경량잔골재 치환율이 증가할수록 증가하였다. ACI 318-08¹¹⁾과 Slate 등⁴⁾의 예측모델은 경량 골재 콘크리트의 탄성계수를 안전측에서 잘 평가하고 있었지만 EC 2¹⁴⁾기준은 천연모래가 치환된 경량 골재 콘크리트의 탄성계수를 약 10% 과대평가 하였다.

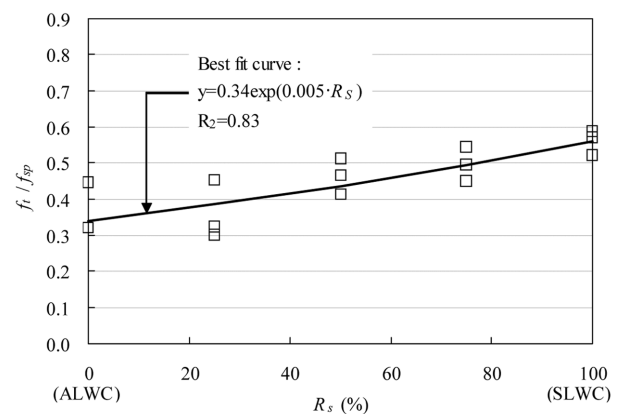


Fig. 9 Effect of R_S on f_i/f_{sp}

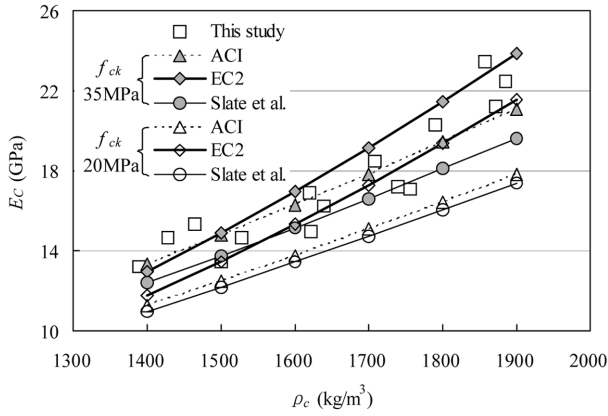


Fig. 10 Effect of ρ_c on E_c

3.8 응력-변형률 관계

경량 골재 콘크리트의 대표적인 응력-변형률 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 경량 골재 콘크리트의 응력-변형률의 관계는 취성과 파괴 특성으로 인해 최대응력 시까지만 측정되었다. 경량 골재 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 초기 접선탄성계수는 천연모래 치환율이 증가할수록 크게 나타났다. 또한 경량 골재 콘크리트의 최대응력시 변형률(ϵ_0)는 경량 골재 최대 크기와 관계없이 천연모래 치환율이 증가할수록 감소하였다. 전경량 콘크리트의 ϵ_0 는 0.0022~0.00245 범위로 천연모래 치환율 50%까지는 비슷한 수준을 보였다. 그러나 모래경량 콘크리트보다는 약 5~25%크게 나타났다. 천연모래 치환율의 증가는 강성이 낮은 경량 골재의 함유량을 줄이게 되며 이는 결과적으로 콘크리트의 ϵ_0 를 감소시켰다.

천연모래 치환율과 $(\epsilon_0)_{pre.} / (\epsilon_0)_{Exp.}$ 의 관계를 Fig. 12에 나타내었다. 여기서 $(\epsilon_0)_{pre.}$ 는 최대하중 시 변형률 예측값을, $(\epsilon_0)_{pre.}$ 는 최대하중시 변형률 실험값을 각각 나타낸다. Fig. 12에는 Yang 등¹⁵⁾ 및 Wang 등⁵⁾이 제안한 경량 골재 콘크리트의 ϵ_0 에 대한 예측모델을 함께 나타내었다. Yang 등¹⁵⁾의 제안모델은 경량 골재 콘크리트의 기건 단위 질량, 압축강도 및 탄성계수의 함수로써 경량 골재 콘크리트의 ϵ_0 를 잘 예측하였지만, Wang 등⁵⁾의 예측모델

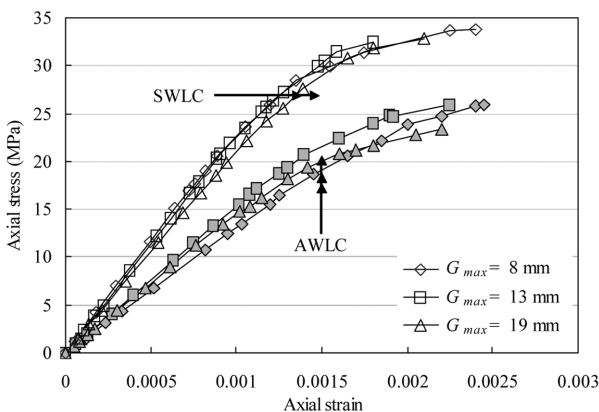


Fig. 11 Typical stress-strain curve of lightweight aggregate concrete tested

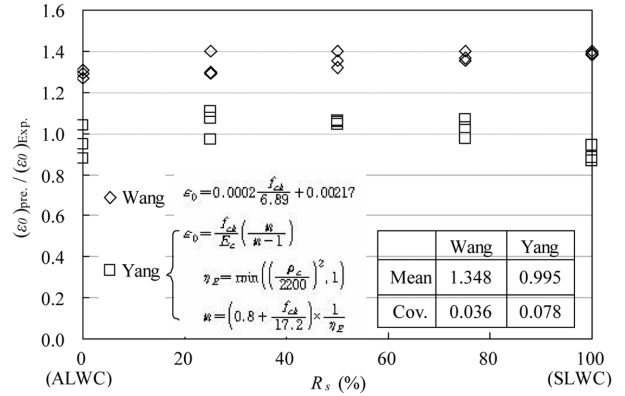


Fig. 12 Comparisons of predicted and measured strains at peak stress

은 경량 골재 콘크리트의 압축강도에 함수로써 실험 결과를 과대평가하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 천연모래 치환율과 경량 굵은 골재 최대 크기가 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 경량 골재 콘크리트 단면에는 약 3.8~6.76%의 공극률이 측정되었는데 이는 천연모래 치환율이 증가할수록 감소하였다.
- 2) 경량 골재 콘크리트의 기건 단위질량은 경량 굵은 골재 최대 크기에 관계없이 천연모래 치환율이 증가할수록 증가하였으며, ACI 318 및 CEB-FIP 설계 기준들에 의한 예측값과 잘 일치하였다.
- 3) 경량 골재 콘크리트의 압축강도는 천연모래 치환율이 감소할수록, 굵은 골재 최대 크기가 클수록 감소하였다. 한편 경량 골재 콘크리트의 압축강도 발현을 예측하기 위한 상수들은 굵은 골재의 비중과 천연모래 치환율의 함수로서 제시될 수 있었다.
- 4) 측정된 경량 골재 콘크리트의 파괴계수는 ACI 기준, Slate 등의 제안모델에 의한 예측값보다 낮았다.
- 5) 경량 골재 콘크리트의 인장강도는 천연모래 치환율이 증가할수록 증가하였으며, EC 2와 Slate 등의 예측값은 실험 결과를 과대평가하였다. 한편 경량 골재 콘크리트의 직접인장강도는 쪼갬인장강도의 약 30~60% 수준이었다.
- 6) 측정된 경량 골재 콘크리트의 탄성계수는 ACI 318의 예측값과 잘 일치하였지만 EC 2의 예측값보다는 평균 10% 낮았다.
- 7) 경량 골재 콘크리트의 응력-변형률 곡선에서 최대응력시 변형률은 천연모래 치환율이 증가할수록 감소하였다.

감사의 글

이 논문은 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업

및 2009년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구이다(2009-0067189).

참고문헌

1. 심재일, 양근혁, “굳지 않은 경량 골재 콘크리트의 공기량, 유동성 및 블리딩 특성,” 콘크리트학회 논문집, 22권, 4호, 2010, pp. 559~566.
2. 문종욱, 원종필, 전현규, “경량 콘크리트의 적용 및 사례,” 한국콘크리트학회 경량콘크리트위원회, 2006, pp. 224~239.
3. Zhang, M. H. and Gjrv, O. E., “Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 3, 1991, pp. 240~247.
4. Slate, F. O., Nilson, A. H., and Martinez, S., “Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete,” *ACI Journal*, Vol. 83, No. 4, 1986, pp. 606~613.
5. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E., “Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression,” *ACI Journal*, Vol. 75, No. 11, 1978, pp. 603~611.
6. Caldarone, M. A. and Burg, R. G., “Development of Very Low Density Structural Lightweight Concrete,” *High-Performance Structural Lightweight Concrete*, SP-218, American Concrete Institute, Detroit, 2004, pp. 177~188.
7. Guo, Y. S., Kimura, K., Li, M. W., Ding, J. T., and Huang, M. J., “Properties of High Performance Lightweight Aggregate Concrete,” *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, No. 2, 2000, pp. 548~561.
8. Yang, K. H., Song, J. K., and Lee, J. S., “Properties of Alkali-Activated Mortar and Concrete Using Lightweight Aggregates,” *Materials and Structures*, Vol. 43, No. 3, 2010, pp. 403~416.
9. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, 기문당, 2001, 689 pp.
10. ACI 211.2-98, *Standard Practice for Selection Proportion for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98)*, *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1983, 20 pp.
11. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08)*, American Concrete Institute, 2008, 473 pp.
12. Comite Euro-International Du Beton, *CEB-FIP Model Code 1990*, Thomas Telford, 1999, 224 pp.
13. ACI 209R-92, “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures,” *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete*, Detroit, Michigan, 2008, 47 pp.
14. The European Standard EN 1992-1-1:2004, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures*, British Standards Institution, 2004, 225 pp.
15. Yang, K. H., Sim, J. I., and Ashour, A., “Shear Capacity of Monolithic Concrete Joints without Transverse Reinforcement,” *Engineering Structures*, Submitted, 2010.
16. www.IMT-Solution.com.
17. 한국표준협회, KS 기준안, 한국공업표준협회, 2006.
18. 한국콘크리트학회, 국토해양부 제정 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 2009, 300 pp.
19. 홍건호, “콘크리트 직접인장강도의 세장비 효과,” 콘크리트학회 논문집, 22권, 2호, 2010, pp. 246~253.

요약 경량 골재 콘크리트의 역학적 특성에 대한 천연모래 치환율과 경량 굵은 골재 최대 크기의 영향을 평가하기 위해 15배합의 실험이 진행되었다. 경화된 경량 골재 콘크리트의 공극률 및 기건 단위 질량, 재령에 따른 압축강도 발현, 인장저항성능, 탄성계수, 파괴계수 및 응력-변형률 관계를 측정하였다. 측정된 역학적 특성들은 ACI 318-08, EC2 및 CEB-FIP 기준 또는 Slate 등, Yang 등 및 Wang 등의 제안모델들과 비교하였다. 실험 결과 경량 골재 콘크리트의 압축강도는 굵은 골재 최대 크기가 클수록 그리고 경량 잔골재 양이 증가할수록 감소하였다. 경량 골재 콘크리트의 압축강도 발현에 대한 상수는 굵은 골재의 비중과 천연모래 치환율의 함수로서 제시될 수 있었다. 한편, 측정된 경량 콘크리트의 파괴계수 및 인장강도는 설계기준 및 제안모델들에 비해 일반적으로 낮았는데, 이는 경량 콘크리트의 인장저항성은 압축강도뿐만 아니라 기건 단위 질량에 의해서도 영향을 받기 때문이다.

핵심용어 : 경량 골재 콘크리트, 역학적 특성, 굵은 골재 최대 크기, 천연모래 치환율