



경량골재 콘크리트의 압축강도에 대한 시험체 기하학적 특성의 영향

심재일^{1)*} · 양근혁¹⁾

¹⁾경기대학교 건축공학과

Influence of Specimen Geometries on the Compressive Strength of Lightweight Aggregate Concrete

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

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

ABSTRACT The current study prepared 9 laboratorial concrete mixes and 3 ready-mixed concrete batches to examine the size and shape effects in compression failure of lightweight aggregate concrete (LWC). The concrete mixes were classified into three groups: normal-weight, all-lightweight and sand-lightweight concrete groups. For each concrete mix, the aspect ratio of circular or square specimens was 1.0 and 2.0. The lateral dimension of specimens varied between 50 and 150 mm for each laboratorial concrete mix, whereas it ranged from 50 to 400 mm with an incremental variation of 50 mm for each ready-mixed concrete batch. Test observations revealed that the crack propagation and width of the localized failure zone developed in lightweight concrete specimens were considerably different than those of normal-weight concrete (NWC). In LWC specimens, the cracks mainly passed through the coarse aggregate particles and the crack distribution performance was very poor. As a result, a stronger size effect was developed in LWC than in NWC. Especially, this trend was more notable in specimens with aspect ratio of 2.0 than in specimens with that of 1.0. The prediction model derived by Kim et al. overestimated the size effect of LWC when lateral dimension of specimen is above 150 mm. On the other hand, the modification factors specified in ASTM and CEB-FIP provisions, which are used to compensate for the shape effect of specimen on compressive strength, were still conservative in LWC.

Keywords : size effect, compressive strength, lightweight aggregate concrete, shape of specimen

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 해석과 설계 시 반드시 필요한 정보 중의 하나가 콘크리트의 압축강도이다. 콘크리트의 압축강도는 공시체의 단면적을 파괴 시 하중으로 나누어 나타낸다. 그러나 콘크리트는 공시체의 단면적, 단면의 형상 및 형상비에 따라서 압축강도가 다르게 나타난다. 즉, 공시체의 단면크기가 증가함에 따라 강도가 감소하는 크기효과를 보인다.¹⁾ 이에 각국의 설계기준^{2,5)}에서는 압축강도의 기준이 되는 공시체의 크기와 형상을 결정하여 설계강도로 사용하고 있으며, 기준 공시체와 다른 크기 및 형상을 갖는 공시체에 대해서는 크기와 형상에 따라 보정계수를 제시하여 기준 공시체의 압축강도로 환산하여 사용하도록 제안하고 있다. 또한, 콘크리트 극한강도 설계에서는 장기강도 감소효과 및 공시체와 실제 구

조물의 크기차이를 고려하여 공시체로부터 얻은 28일 압축강도의 85%를 사용하고 있다.

콘크리트의 크기효과는 1925년 Gonnerman⁶⁾의 연구에 의해 최초로 논의되었다. Gonnerman⁶⁾은 크기, 형상 및 형상비를 달리한 공시체의 압축강도를 평가하여 크기가 증가함에 따라 압축강도가 감소함을 보였다. 1935년에 Blanks와 McNamara⁷⁾는 50~914 mm 크기의 원주형 공시체의 압축강도를 평가하여 600 mm 이상에서는 기준 공시체의 84% 수준으로 수렴하며 더 이상 압축강도의 감소효과는 나타나지 않음을 밝혔다. 이후 보통중량 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과에 대해서는 많은 연구들⁸⁻¹¹⁾이 진행되었다. 이 결과를 바탕으로 ASTM²⁾은 압축강도 14~42 MPa 범위에서 콘크리트 공시체의 형상비가 2.0 이하인 시험체의 압축강도 수정계수를 제시하였다. 또한 CEB-FIP³⁾에서는 150 mm의 정육면체 콘크리트의 압축강도에 대한 $\phi 150 \times 300$ mm의 원주형 공시체의 압축강도비를 제시하였다. 그러나 ASTM²⁾과 CEB-FIP³⁾는 보통중량 콘크리트에 기반하고 있어 경량골재 콘크리트에서의 형상비에 따른 압축강도 수정계수 및 정육면체에 대한 원주형

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

Received February 28, 2012, Revised April 10, 2012,

Accepted April 10, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

공시체의 압축강도의 비는 제시되어 있지 않다.

경량골재 콘크리트는 양근혁 등¹²⁾ 및 Neville¹³⁾이 지적한 바와 같이 보통중량 콘크리트에 비해 골재와 페이스트 사이의 계면에서 미세공극과 균열들이 더욱 많이 형성된다. 특히, 파괴면은 골재를 관통하여 형성되기 때문에 더욱 취약적이다. 재료강도에 대한 크기효과는 재료의 취성 특성과 내부 미세균열들의 진전속도에 의해 중요한 영향을 받기 때문에 경량골재 콘크리트에서의 크기효과는 보통중량 콘크리트에 비해 더욱 현저하게 나타날 수 있다.¹⁴⁾ 하지만 경량골재 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과를 평가하기 위한 유용한 실험적 증명은 없다. 뿐만 아니라 기존 제안모델¹¹⁾은 보통중량 콘크리트 실험 결과들에 기반하여 실험상수를 결정하고 있기 때문에 경량골재 콘크리트에서 그 적용의 안전성 평가도 필요하다.

이 연구의 목적은 시험체 기하학적 형상이 경량골재 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 평가하는 데 있다. 이를 위해 실내 9 배합과 레미콘 3 배합을 공시체의 단면형상, 단면크기 및 형상비에 따라 압축강도를 평가하였다. 실험 결과는 기존 연구자들의 연구 결과^{6,7,15-21)}와 함께 압축강도에 대한 시험체 형상의 영향을 보정하는 설계기준^{2,3)}의 수정계수 및 보통중량 콘크리트에 기반하여 제시된 김진근 등¹¹⁾의 크기효과 제안모델과 비교하였다.

2. 실험

2.1 배합 설계

콘크리트 배합설계는 경량골재 콘크리트의 배합설계 지침인 ACI 211²²⁾에 따라 작성되었으며, 그 배합상세를 Table 1에 나타내었다. 굵은골재 최대크기는 공시체의 크기를 고려하여 ACI 211²²⁾에 제시된 최대크기인 19 mm

로 고정하였다. 단위수량(W)은 슬럼프와 굵은골재 최대 크기를 고려하여 ACI 211²²⁾에서 제시하는 200 kg/m^3 으로 고정하였다. 모든 배합에서 단위굵은골재량은 굵은골재 단위용적중량의 55%로 고정되었으며, 천연모래 치환율은 전체 잔골재용적에 대한 비율로 치환하였다. Table 1에 나타낸 시험체 명은 세 부분으로 구성되며, 첫 번째 문자는 콘크리트의 종류로써 “L”은 경량골재 콘크리트를, “N”은 보통중량 콘크리트를 나타낸다. 두 번째와 세 번째 숫자는 각각 물-시멘트비와 천연모래 치환율을 나타낸다. 예를 들어 “A30-0”은 천연모래 치환율이 0%이며 물-시멘트 비가 30%인 경량골재 콘크리트를 의미한다. 콘크리트의 종류는 기건단위질량(ρ_c)을 기준으로 ACI 213에 따라 다음과 같이 구별되었다.

- 전경량 콘크리트(all-lightweight concrete, ALWC)
: $\rho_c > 1,700 \text{ kg/m}^3$
- 모래경량 콘크리트(sand-lightweight concrete, SLWC)
: $1,700 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_c < 2,000 \text{ kg/m}^3$
- 보통중량 콘크리트(normal-weight concrete, NWC)
: $2,240 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_c < 2,480 \text{ kg/m}^3$

콘크리트 배합은 Table 1에 나타낸 바와 같이 실내배합(part 1)과 현장배합(part 2)으로 나누어 진행되었다. Part 1은 실험실에서 300 l 용량의 강제식 믹서기(forced mixing type mixer)를 이용하여 배합되었다. Part 1에서는 압축강도와 경량골재 콘크리트의 종류에 따른 주요변수의 영향을 평가하기 위해 물-시멘트비(W/C)와 천연모래 치환율(R_s)을 조절하여 9 배합의 실험이 진행되었다. Part 2는 레미콘 배합현장에서 배치플랜트(batch plant)를 이용하여 진행되었다. Part 2에서는 콘크리트 종류에 따른 주요변수의 영향을 평가하기 위해 전경량 및 모래경량 콘크리트와 보통중량 콘크리트가 배합되었다. 실내배합에서는 혼화제를 투입하지 않았지만, 현장배합에서는 시험체에

Table 1 Detail of concrete mixes

Part	Specimen	W/C (%)	R_s (%)	Unit volume weight (kg/m^3)						f_{cu} (MPa)	ρ_c (kg/m^3)		
				W	C	F_l	F_s	G_l	G_g				
1	L30-0	30	0	200	667	334	-	401	-	46.2	1,691		
	L30-50		50			167	311			43.7	1,768		
	L30-100		100			-	622			40.4	1,850		
	L35-0	35	0		571	373	-			401	-	40.5	1,578
	L35-50		50			187	348					37.3	1,684
	L35-100		100			-	695					34.2	1,783
	L40-0	40	0		500	403	-			401	-	35.6	1,552
	L40-50		50			201	375					33.5	1,662
	L40-100		100			-	750					30.4	1,716
2	L43-0	43	0	200	465	417	-	401	-	39.4	1,661		
	L47-100	47	100		426	-	866			37.8	1,920		
	N55-100	55	100		364	-	862			-	935	35.5	2,314

Note) W, C, F_l , F_s , G_l and G_g refer to water, ordinary portland cement, light-weight fine aggregate, natural sand and lightweight coarse aggregate, and crushed gravel respectively. R_s is the replacement level of natural sand to total fine aggregate by volume. f_{cu} is concrete compressive strength measured from a cylinder with 150 mm diameter and 300 mm height, and ρ_c is unit weight of hardened concrete.

부어넣는 작업성을 고려하여 0.5~1%의 폴리카르본산계 고성능 감수제가 첨가되었다. 배합된 콘크리트는 대기에서 2일 후에 거푸집을 제거하고 28일간 대기에서 양생하였다.

2.2 시험체 설계

Table 2에는 각 콘크리트 배합에서 이용된 시험체의 형상, 단면크기 및 형상비를 나타내었다. 시험체의 형상은 각국의 기준 시험체를 고려하여 원주형(cylinder), 정육면체(cube) 및 직육면체(prism)로 결정하였다. 시험체의 형상비는 시험기의 높이를 고려하여 1.0과 2.0으로 고정하였다. 시험체 단면크기는 Part 1에서는 50~150 mm로 비교적 작은 범위에서, Part 2에서는 현장 적용성을 고려하여 50~400 mm까지 넓은 범위로 결정하였다.

2.3 사용 재료

사용골재의 물리적 특성을 Table 3에 나타내었다. 시멘트는 밀도가 3.15 g/m³이고, 분말도가 3,800 cm²/g인 보통포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement)가 사용되었다. 인공경량골재는 팽창점토와 혈암을 주요성분으로 하여 팽창소성한 것으로 미끈한 구형이었다. 경량 굵은골재의 비중은 1.21이며, 단위용적중량은 729 kg/m³이었다. 이는 부순골재 비중과 단위용적중량의 각각 46%와 43% 수준이었다. 경량 굵은골재는 내부에 0.2~2 μm 크기의 많은 공극을 포함하고 있었다. 그 흡수율은 18.96%로 부순골재보다 30.5배 컸다. 또한 경량 잔골재의 비중은 1.30이며, 단위용적중량은 800 kg/m³이었다. 이는 천연모래 비중과 단위용적중량의 각각 50%와 46% 수준이었다. 경량 잔골재의 흡수율은 13.68%로 천연모래보다 약 7.4배 컸다. 모든 골재는 KS 기준의 표준입도분포 곡선을 만족하였다.²⁴⁾

Table 2 The range of specimen geometries

Section	<i>n</i> ₁ (<i>h</i> / <i>d</i>)	Lateral dimension of specimen, <i>d</i> (mm)
Circle	1.0	Part 1 : 100, 150
	2.0	Part 2 : 50, 100, 150, 250, 300, 335, 380
Square	1.0	Part 1 : 50, 100, 150
	2.0	Part 2 : 50, 100, 150, 250, 300, 350, 400

Note) *n*₁ is aspect ratio of specimen

Table 3 Physical properties of aggregates used

Type		<i>G</i> _{max} (mm)	Density	λ (%)	FM	υ _p (%)	ω _g (kg/m ³)
Light-weight aggregate	Coarse	19	1.21	18.96	6.6	28	729
	Fine	4	1.30	13.68	4.3	38	800
Normal-weight aggregate	Crushed gravel	19	2.65	0.62	6.6	46	1,700
	Natural sand	5	2.6	1.85	3.3	43	1,750

Note) *G*_{max} is maximum size of aggregate, λ is water absorption of aggregate, FM is fineness modulus of aggregate, υ_p is porosity and ω_g is unit weight of aggregate

2.4 측정 방법

콘크리트의 압축강도는 재령 28일에 KS F 2405²⁴⁾에 따라 평가되었다. 측정은 시험체의 파괴하중을 고려하여 200, 500, 3,000 및 5,000 kN 용량의 만능재료시험기(universal testing machine)를 이용하였다. 만능재료시험기는 압축강도를 평가하기 전에 동일한 로드셀(load cell)에 의해 교정(correction)되었다. 모든 시험체는 편심의 영향을 최소화하기 위해 양단부를 연마하였으며, 시험체 양면에 설치된 LVDT를 이용하여 균열 전까지 동일한 변위에서 실험을 진행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 파괴 모드 및 균열 진전

대표적인 콘크리트의 파괴 모드 및 균열 진전을 Fig. 1에 나타내었다. 형상비가 2.0인 경량골재 콘크리트는 최대내력의 약 50~60% 수준에서 시험체 중앙에서 초기 균열이 발생하였다. 이후 균열은 시험체의 양단부를 향해 진전하였으며, 최종적으로 수직균열의 폭이 증가하면서 파괴되었다. 동일한 형상비의 보통중량 콘크리트는 최대내력의 약 60~80% 수준에서 시험체 중앙에서 초기 균열이 발생하였으며, 이후 초기 균열은 양단부를 향하여 진전하였다. 초기 균열 이후 수직균열의 폭이 증가하기 보다는 넓은 영역에 다수의 수직균열이 형성되었으며 최종

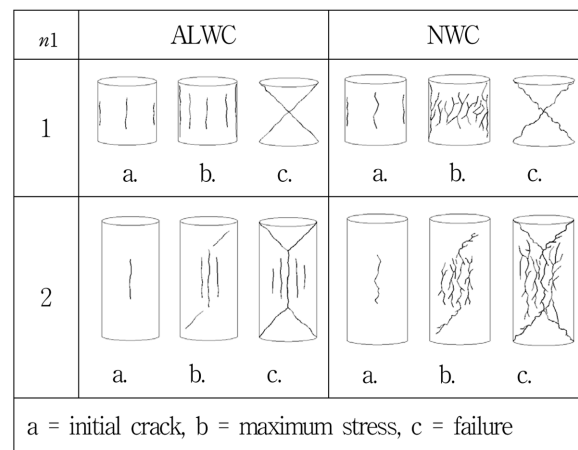


Fig. 1 Typical crack propagation and failure modes of specimens

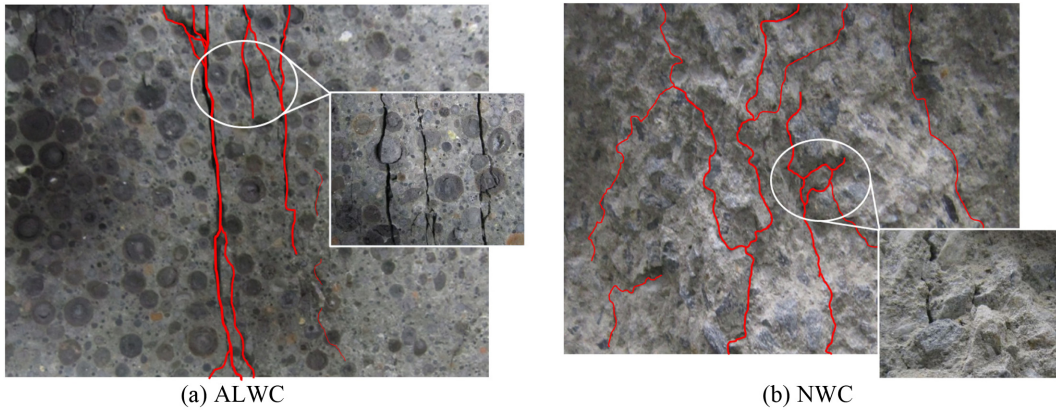


Fig. 2 Crack profiles around aggregate particles along failure plane

파괴되었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 일반적으로 보통 중량 콘크리트의 균열은 골재와 페이스트 계면을 따라 진행하여 다수의 분산된 미세균열들을 야기하였지만, 경량 골재 콘크리트에서는 골재를 관통하는 소수의 큰 균열들이 발생하였다. 이는 내부에 다량의 공극을 포함하고 있는 경량골재의 낮은 강도 때문으로 판단된다.¹⁴⁾ 형상비가 1.0인 경량골재 콘크리트는 최대내력의 약 60~70% 수준에서 시험체 표면에 초기균열이 발생하였으며, 표면 균열의 수가 증가하면서 최종적으로 표면 콘크리트의 탈락에 의해 썩기모양으로 파괴되었다. 이는 보통중량 콘크리트에서도 비슷한 경향을 보였다. 형상비 1.0인 콘크리트에서의 균열은 표면에서 시작되어 하중이 증가함에 따라 콘크리트의 내부로 진전된다. 그러나 콘크리트의 양단부가 가압판에 의해 구속되어 있기 때문에 표면의 균열은 시험체의 높이만큼의 길이로 발생하였지만, 내부의 균열은

구속되지 않은 부분에서만 발생하게 된다. 결국 형상비 1.0인 콘크리트는 계단식의 파괴면을 형성하며 파괴된다.²⁵⁾

3.2 시험체 직경의 영향

Table 4에는 실험 결과를 나타내었으며, 콘크리트 시험체의 단면크기(d)와 표준형 공시체의 압축강도에 대한 압축강도의 비를 Fig. 3에 나타내었다. 동일한 그림에 실험 결과의 추세선을 함께 나타내었다. f_{cu} 는 직경 150 mm, 높이 300 mm의 원주형 표준 공시체의 압축강도를, $f_{cu}(d)$ 는 단면크기가 d 인 공시체의 압축강도를 의미한다. 콘크리트의 압축강도는 시험체의 단면크기가 증가할수록 감소하였으며, 그 감소기율은 시험체의 단면크기가 증가할수록 감소하였다. 또한 압축강도의 감소기율은 보통 중량 콘크리트보다 경량골재 콘크리트에서, 형상비 1.0

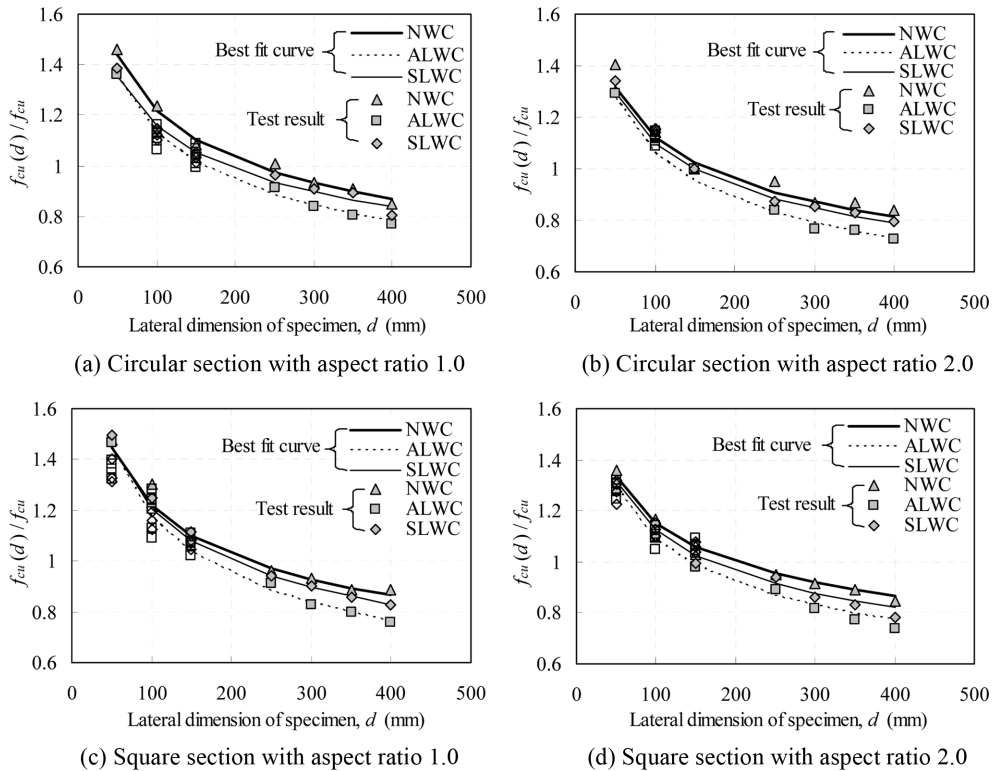


Fig. 3 Effect of lateral dimension on $f_{ck}(d)/f_{ck}$ (white and bold symbols indicate part 1 and part 2, respectively)

Table 4 Summary of test results

Part	Specimen	Section	Aspect ratio, A_r					
			1			2		
			Lateral dimension, d (mm)			Lateral dimension, d (mm)		
			50	100	150	50	100	150
I	L30-0	Circular	-	1.09	1.05	-	1.05	1.00
		Square	1.29	0.97	0.99	1.19	0.96	1.00
	L30-50	Circular	-	1.03	0.99	-	1.02	1.00
		Square	1.34	1.00	1.02	1.24	1.01	1.00
	L30-100	Circular	-	1.06	1.04	-	1.01	1.00
		Square	1.30	1.03	1.01	1.23	0.98	1.00
	L35-0	Circular	-	1.11	1.01	-	1.04	1.00
		Square	1.20	0.92	0.94	1.15	0.96	1.00
	L35-50	Circular	-	1.10	1.01	-	1.05	1.00
		Square	1.20	0.90	0.96	1.18	0.99	1.00
	L35-100	Circular	-	1.10	1.07	-	1.02	1.00
		Square	1.24	1.06	0.93	1.19	0.91	1.00
	L40-0	Circular	-	1.07	1.03	-	1.05	1.00
		Square	1.23	1.01	1.00	1.14	0.98	1.00
	L40-50	Circular	-	1.13	1.09	-	1.03	1.00
		Square	1.24	0.91	0.98	1.17	0.97	1.00
	L40-100	Circular	-	1.08	1.07	-	0.99	1.00
		Square	1.27	1.05	1.03	1.16	0.99	1.00

Part	Specimen	Section	Aspect ratio, A_r													
			1							2						
			Lateral dimension, d (mm)							Lateral dimension, d (mm)						
			50	100	150	250	300	350	400	50	100	150	250	300	350	400
II	L43-0	Circular	1.36	1.09	1.03	0.91	0.84	0.80	0.77	1.29	1.01	1.00	0.84	0.77	0.76	0.73
		Square	1.45	1.11	1.06	0.90	0.82	0.79	0.75	1.28	1.05	1.00	0.88	0.88	0.77	0.73
	L47-100	Circular	1.38	1.11	1.04	0.96	0.90	0.89	0.80	1.34	1.04	1.00	0.87	0.85	0.83	0.79
		Square	1.46	1.11	1.09	0.92	0.84	0.84	0.84	1.29	1.07	1.00	0.92	0.91	0.81	0.76
	N55-100	Circular	1.46	1.20	1.08	1.01	0.93	0.91	0.85	1.41	1.04	1.00	0.89	0.87	0.87	0.84
		Square	1.39	1.11	1.04	0.90	0.88	0.83	0.83	1.28	1.05	1.00	0.90	0.90	0.84	0.80

보다는 형상비 2.0에서 더 증가하였다. 그리고 시험체의 단면크기가 300 mm 이상에서는 압축강도의 감소기울기가 확연히 감소하였다.

형상비가 2.0인 직경 400 mm의 원주형 공시체의 평균 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 는 전경량, 모래경량 및 보통중량 콘크리트에서 각각 0.747, 0.820 및 0.864로써 콘크리트 단위용적질량이 감소할수록 압축강도의 크기효과가 더 확연하였다. 이는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 경량골재 콘크리트의 균열저항능력이 보통중량 콘크리트보다 낮으며, 경량골재 콘크리트의 파괴영역이 보통중량 콘크리트보다 국부적이기 때문이다. 보통중량 콘크리트에 기반한 크기효과 실험 결과의 회귀 분석을 통해 김진근 등¹¹⁾은 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 의 최소값을 형상비에 관계없이 0.8로 제시하였다. 이 연구를 통해서도 보통중량 콘크리트에서는 시험체의 단면크기 및 형상에 관계없이

$f_{cu}(d)/f_{cu}$ 의 최소값은 0.8 이상을 보였다. 그러나 기건단위 질량이 낮은 전경량 및 모래경량 콘크리트에서는 시험체의 형상비가 증가할수록 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 는 감소하였다. 특히 크기가 400 mm인 원주형 전경량 콘크리트의 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 는 형상비가 1.0과 2.0일 때 각각 0.768과 0.756이었다.

3.3 공시체 형상비의 영향

시험체 단면크기와 직경 150 mm의 원주형 시험체에서 형상비 2.0에 대한 형상비 1.0의 압축강도 비($(f_{cu})_{n1=2.0}/(f_{cu})_{n1=1.0}$)를 Fig. 4에 나타내었다. 형상비가 낮으면 높은 압축강도를 보이므로 α 는 1.0 이하가 일반적이다. α 는 단면크기와 콘크리트의 종류에 영향을 받았으며, 단면형상에 따라 그 영향은 달랐다. 일반적으로 α 는 콘크리트

의 종류에 관계없이 시험체 단면크기가 150 mm 이하에서는 각형단면이 원형단면보다 더 높은 값을 보였지만 150 mm 이상에서는 원형단면이 각형단면보다 높았다. 또한 전경량 콘크리트의 α 는 시험체 단면크기에 관계없이 0.91~1.01 범위에 있었다. 이는 경량골재 콘크리트에서 균열이 골재를 관통하여 형성되기 때문이다. 반면에 보통중량 콘크리트의 α 는 시험체의 단면크기가 150 mm 이상에서는 시험체의 단면형상에 관계없이 시험체의 단면크기가 증가할수록 증가하였다. 결과적으로 시험체의 단면크기가 150 mm를 초과하면 콘크리트의 압축강도에 대한 단면의 형상과 형상비의 효과가 나타난다고 판단된다.

3.4 콘크리트 종류의 영향

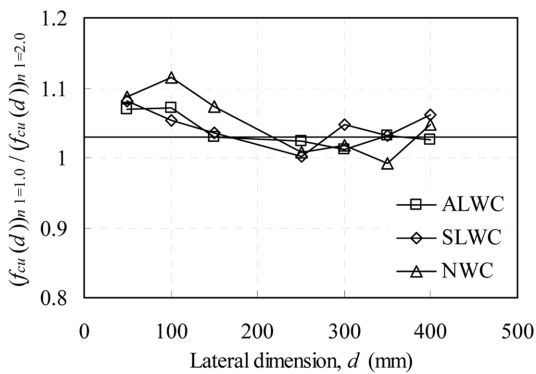
콘크리트의 기건 단위질량과 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 는 시험체의 단면크기와 형상비가 동일할 때 콘크리트의 기건단위질량이 증가할수록 약간 증가하였다. 단면크기가 350 mm인 원주형 시험체의 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 는 전경량 콘크리트와 보통중량 콘크리트에서 각각 0.761과 0.870이었다. 그러나 단면크기가 50 mm인 원주형 시험체에서는 전경량 콘크리트와 보통중량 콘크리트에서 각각 1.291과 1.407를 보였다. 콘크리트의 기건단위질량에 따른 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 의 증가비는 시험체의 단면크기가 증가할수록 증가하였다. 이로 보아 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 전경량 콘크리트가 보통중량 콘크리트보다 압축강도에 대한 크기효과의 영향이 뚜렷함을 알 수 있었다. 반면에

콘크리트의 기건단위질량에 따른 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 의 증가비에 대한 시험체 단면형상의 영향은 매우 미미하였다.

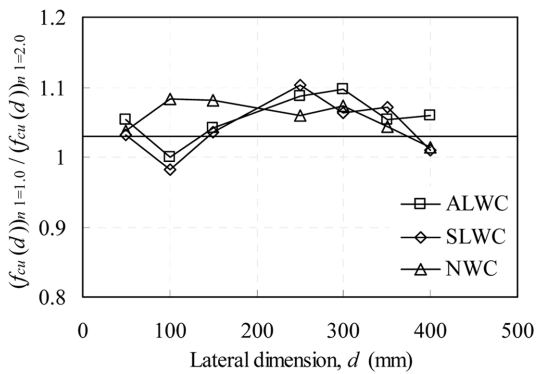
3.5 보통중량 콘크리트의 제안모델과의 비교

시험체의 형상비와 $(f_{cu}(d))_{n=2.0}/(f_{cu}(d))_{n=1.0}$ 의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 동일한 그림에 보통중량 콘크리트에 대한 Chung 등¹⁸⁾의 연구 결과와 ASTM의 설계기준²⁾을 함께 나타내었다. ASTM의 설계기준²⁾에서는 직경이 150 mm이며 형상비가 2.0인 표준형 공시체를 기준으로 콘크리트 시험체의 형상비가 2.0에서 1.0로 감소함에 따라 압축강도 수정계수를 제시하고 있다. 즉, 형상비가 2.0 미만인 시험체를 이용하여 압축강도를 측정하였다고 하더라도 압축강도 수정계수를 통해 표준형 공시체의 압축강도를 예측할 수 있도록 제시하고 있다. 보통중량 콘크리트에 기반한 실험 결과는 ASTM²⁾과 유사한 곡선을 보였다. 또한 경량골재 콘크리트의 압축강도 수정계수는 ASTM²⁾과 보통중량 콘크리트의 데이터베이스에 기반한 실험결과보다 높았다. 이로보아 기건단위질량이 1,600 kg/m³ 이상인 경량골재 콘크리트에서도 ASTM²⁾에서 제시하는 기준은 안전측에 있었다. 그러나 콘크리트의 기건단위질량에 따른 압축강도 수정계수의 안전성과 신뢰도를 높이기 위해서는 더 많은 실험적인 자료를 수집할 필요가 있다.

표준형 공시체의 압축강도와 각형 시험체의 압축강도에 대한 원주형 시험체의 압축강도 비($(f_{cu})_{cylinder}/(f_{cu})_{cube}$)

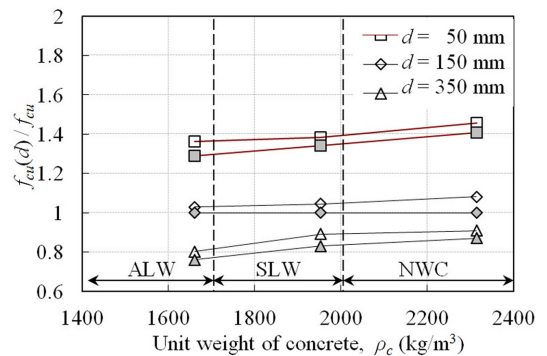


(a) Square section

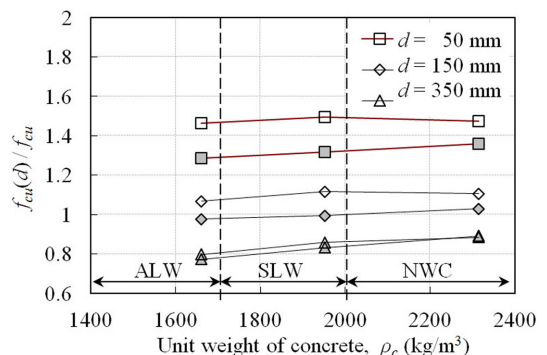


(b) Circular section

Fig. 4 Effect of d on $(f_{cu}(d))_{n=2.0}/(f_{cu}(d))_{n=1.0}$



(a) Circular section



(b) Square section

Fig. 5 Effect of ρ_c on $f_{cu}(d)/f_{cu}$ (white and bold symbols indicate part 1 and part 2, respectively)

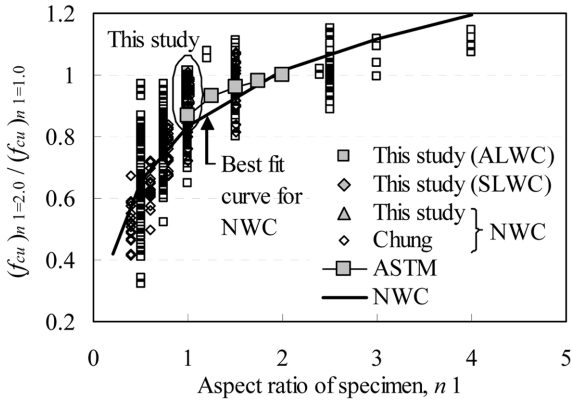


Fig. 6 Comparisons of correction factors specified in ASTM with test results

를 Fig. 7에 나타내었다. 동일한 그림에 Yi 등¹⁷⁾의 보통중량 콘크리트의 실험 결과와 CEB-FIP의 설계기준³⁾을 함께 나타내었다. 일반적으로 표준형 공시체의 형상비는 2.0이지만 각형 시험체의 형상비는 1.0이다. 이에 $(f_{cu})_{cylinder} / (f_{cu})_{cube}$ 는 1.0 이하가 일반적이다. 경량골재 콘크리트의 $(f_{cu})_{cylinder} / (f_{cu})_{cube}$ 는 압축강도 30과 50 MPa 사이에서 보통중량 콘크리트와 유사한 수준에 있었다. 이는 $(f_{cu})_{cylinder} / (f_{cu})_{cube}$ 가 콘크리트의 기건단위질량의 영향보다는 시험체의 형상에 영향을 받기 때문이다. 경량골재 콘크리트와 보통중량 콘크리트 모두에서 CEB-FIP 설계기준³⁾은 안전측에서 예측하고 있었다.

콘크리트의 크기효과를 규명하기 위해 김진근 등¹¹⁾은 Bažant¹⁾의 크기효과법칙(size effect law)을 수정하여 실험결과들의 회귀분석을 통해 형상비가 1.0 이상인 비표준형 원주형 공시체의 크기효과모델을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$\sigma_c = \frac{0.4 \cdot f_{cu}}{\sqrt{1 + 0.2 \cdot d(A_r - 1)}} + 0.8 \cdot f_{cu} \quad (1)$$

시험체 단면크기와 $f_{cu}(d)_{Exp.} / f_{cu}(d)_{Pre.}$ 을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 실험 결과는 기존 연구자들에 의해 발표된 1,014개(보통중량 콘크리트 888개, 경량골재 콘크리트 126개)와 이 연구를 통해 얻은 271개(보통중량 콘크리트 42개, 경량골재 콘크리트 229개)를 사용하였다. 보통중량 콘크리트에 대한 김진근 등¹¹⁾의 제안모델은 일반적으로 안전측에서 실험 결과를 잘 예측하고 있었다. 그러나 경량골재 콘크리트에 대한 김진근 등¹¹⁾의 제안모델은 시험체 단면크기가 150 mm 이상에서 실험 결과를 과대평가하였다. 특히 형상비가 2.0 이하일때 그 경향이 더욱 뚜렷하였다. 이는 경량골재 콘크리트가 보통중량 콘크리트보다 뚜렷한 크기효과를 보이기 때문이다. 따라서 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과 예측모델에서 콘크리트 단위용적질량의 영향이 고려될 필요가 있다고 판단된다.

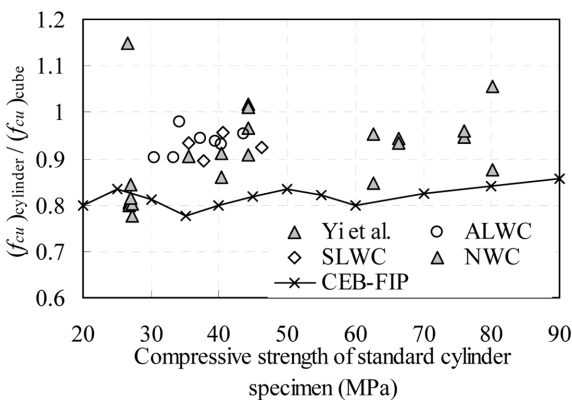


Fig. 7 Comparisons of cylinder-cube strength ratios in CEB-FIP with test results

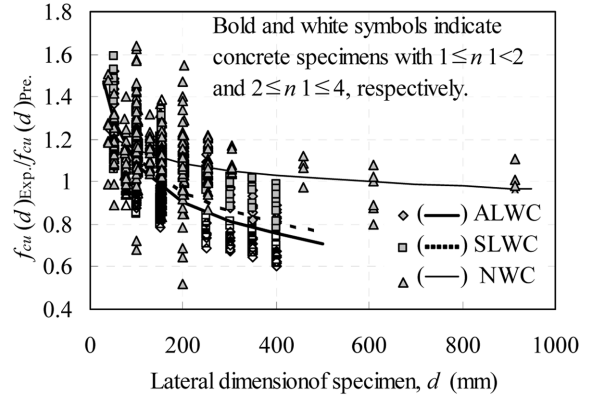


Fig. 8 Comparisons of test results and predicted compressive strength of concrete specimens with different sizes and shapes

4. 결 론

경량골재 콘크리트의 압축강도에 대한 시험체 형상 및 크기 영향의 평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보통중량 콘크리트는 골재와 페이스트 계면을 따라 분산된 미세균열들의 성장으로 파괴되었지만, 경량골재 콘크리트는 강도가 낮은 경량골재를 관통하는 소수의 큰 균열들로 인해 파괴되었다.
- 2) 경량골재 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과는 보통중량 콘크리트에 비해 크게 나타났으며, 그 경향은 형상비 1.0보다는 형상비 2.0에서 뚜렷했다.
- 3) 각형 시험체의 $(f_{cu}(d))_{n1=2.0} / (f_{cu}(d))_{n1=1.0}$ 는 단면크기가 150 mm 이하에서는 원형 시험체보다 높지만, 그 이상에서는 원형단면이 각형단면보다 높았다.
- 4) 전경량 콘크리트가 보통중량 콘크리트보다 압축강도에 대한 크기효과의 영향이 더 뚜렷하지만, 콘크리트의 기건단위질량에 따른 $(f_{cu}(d)) / f_{cu}$ 의 증가비에 대한 시험체 단면형상의 영향은 매우 미미하였다.
- 5) 콘크리트 압축강도에 대한 시험체 형상을 고려하는 ASTM 및 CEB-FIP의 수정계수는 경량골재 콘크리트에서도 안전측에 있었다.
- 6) 경량골재 콘크리트의 각형 시험체의 압축강도에 대한 원주형 시험체의 압축강도 비는 압축강도 30과 50 MPa 사이에서 보통중량 콘크리트와 유사한 수준

에 있었다.

- 7) 압축강도 크기효과에 대한 김진근 등의 제안모델은 보통중량 콘크리트에서는 실험결과를 안전측에서 평가하고 있었지만 경량골재 콘크리트에서는 시험체 단면 크기가 150 mm 이상에서 실험 결과를 과대평가하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Bažant, Z. P. and Planas, J., Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, 1998, 616 pp.
2. ASTM Standards, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," Annual Book of ASTM Standards (ASTM C 39-01), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2001, 5 pp.
3. Comit Euro-International du Beton (CEB-FIP), *Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance*, International Federation for Structural Concrete (Fib), 1999, 224 pp.
4. 국토해양부, 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2003, 328 pp.
5. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08)*, American Concrete Institute, 2008, 473 pp.
6. Gonnerman, H. F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete," *ASTM Proceedings*, Vol. 25, No. 2, 1925, pp. 237~255.
7. Blanks, R. F. and McNamara, C. C., "Mass Concrete Tests in Large Cylinder," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 31, No. 1, 1935, pp. 280~303.
8. Neville, A. M., "A General Relation for Strength of Concrete Specimens of Different Shape and Size," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 63, No. 10, 1966, pp. 1095~1110.
9. Bažant, Z. P., "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, No. 4, 1984, pp. 518~535.
10. Kim, J. K., Yi, S. T., Park, C. K., and Eo, S. H., "Size Effect on Compressive Strength of Plain and Spirally Reinforced

- Concrete Cylinders," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 1, 1999, pp. 88~94.
11. 김진근, 어석홍, 이성태, "비표준형 실린더 공시체에 대한 콘크리트 압축강도의 크기효과," 콘크리트학회지, 9권, 1호, 1997, pp. 105~113.
12. 양근혁, 오승진, 송진규, "경량골재를 사용한 알칼리활성 슬래그 콘크리트의 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 20권, 3호, 2008, pp. 405~412.
13. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Longman, UK, 1995.
14. 심재일, 양근혁, "천연모래 치환율과 경량 굵은 골재 최대 크기에 따른 경량골재 콘크리트의 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 23권, 5호, 2011, pp. 551~558.
15. Kesler, C. E., "Effect of Length to Diameter Ratio on Compressive Strength-An ASTM Cooperative Investigation," *Proceeding, ASTM*, Vol. 59, 1959, pp. 1216~1229.
16. Kang, S. C. and Eun, H. C., "A Study on Size Effects of Square Cross-Section Specimens on Compressive Strength of Concrete," *Journal of Research Institute of Advanced Technology*, Vol. 11, No. 1, 2000, pp. 177~182.
17. Yi, S. T., Yang, E. I., and Choi, J. C., "Effect of Specimen Sizes, Specimen Shapes, and Placement Directions on Compressive Strength of Concrete," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, No. 2, 2006, pp. 115~127.
18. Chung, H. W., "On Testing of Very Short Concrete Specimens," *Cement, Concrete, and Aggregate, ASTM*, Vol. 11, No. 1, 1989, pp. 40~44.
19. Aitcin, P. C., Miao, B., Cook, W. D., and Mitchell, D., "Effect of Size and Curing on Cylinder Compressive Strength of Normal and High-Strength Concretes," *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 349~354.
20. Sener, S., "Size Effect Tests of High Strength Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 9, No. 1, 1997, pp. 46~48.
21. Yang, K. H., "Modelling of the Mechanical Properties of Structural Lightweight Concrete Based on Size Effects," *Technical Report*, Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, 2011, 89 pp.
22. ACI Committee 211, "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.
23. ACI 213R-03, *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, ACI Committee 213, American Concrete Institute, 2003, 38 pp.
24. 한국공업표준협회, KS 기준안, 한국공업표준협회, 2006.
25. 길본창, 강창구, 콘크리트 변형과 파괴, 원기술, 2004, 295 pp.

요 약 경량골재 콘크리트의 압축강도에 대한 크기 및 형상효과를 평가하기 위하여 9 배합의 실내 실험과 3 배합의 레미콘 배합을 수행하였다. 콘크리트 배합은 보통중량, 전경량 및 모래경량의 3그룹으로 분류되었다. 각 콘크리트 배합에서 원형 또는 사각형 단면을 갖는 시험체의 형상비는 1.0과 2.0이었다. 시험체의 단면 크기는 각 실내배합에서는 50~150 mm, 각 레미콘 배합에서는 50~400 mm 범위에 있었다. 실험 결과 경량골재 콘크리트의 균열진전과 국부 파괴영역은 보통중량 콘크리트와 상당히 달랐다. 경량골재 콘크리트에서 균열은 골재를 관통하였으며, 균열의 분포영역은 매우 국부적이었다. 이로 인해, 경량골재 콘크리트의 크기효과는 보통중량 콘크리트에 비해 더 크게 나타났으며, 이 현상은 형상비 1.0보다는 2.0인 시험체에서 더 뚜렷하게 나타났다. 김진근 등의 크기효과 예측모델은 경량골재 콘크리트에서 시험체 단면크기가 150 mm 이상일 때 과대평가하였다. 반면, 압축강도에 대한 시험체 형상의 영향을 보정하기 위해 ASTM 및 CEB-FIP에서 제시한 수정계수는 경량골재 콘크리트에서도 안전측에 있었다.

핵심용어 : 크기효과, 압축강도, 경량골재 콘크리트, 시험체 형상