

# 경량골재 콘크리트 배합 및 시공의 리뷰

## A Review on the Mixture and Construction for Lightweight Aggregate Concrete



이경호 Kyung-Ho Lee  
경기대학교 일반대학원  
건축공학과 박사과정  
E-mail : horang2@kgu.ac.kr



양근혁 Keun-Hyeok Yang  
경기대학교 플랜트·건축공학과  
교수  
E-mail : yangkh@kgu.ac.kr

### 1. 서론

보통중량 콘크리트대비 60~90% 수준의 기건 단위용적질량을 갖는 구조용 경량골재 콘크리트는 단위용적질량이 약 1,200 kg/m<sup>3</sup> 이하의 경량골재를 사용하는 콘크리트를 뜻한다. 경량골재는 환경적·경제적 문제로 주로 천연재 보다는 점토, 석탄회 및 준설토 등의 재활용을 통해서 생산되는 인공재가 사용되고 있다[1]. 인공 경량골재의 사용은 산업 폐기물의 재활용 및 천연자원 보존 측면에서 환경적 이점이 있다. 구조적 측면에서는 재료의 낮은 밀도로부터 부재의 고정하중을 절감시켜 단면 사이즈를 줄일 수 있으며, 구조물의 내진성능 향상 및 건축물의 증축과 리모델링 시 기초보강 최소 등의 장점이 있다[2]. 이에 따라 경량골재 콘크리트에 대한 관심과 그 구조적 적용성은 점차 확대되고 있다.

경량골재 콘크리트의 유동성 및 강도발현 특성은 경량골재의 낮은 밀도 및 높은 흡수율에 의해 중요한 영향을 받는다[3]. 특히 경량골재의 사용에 있어서 급격한 유동성 손실, 블리딩 및 재료분리 발생의 제어를 위해 배합 전 골재의 함수관리 공정이 요구되기도 한다[4]. 이에 미국과 일본의 경우 전문 시방서를 제정하고 경량콘크리트의 배합 및 품질을 관리하고 있다. 반면 국내의 경우 콘크리트표준시방서에서 경량골재 콘크리트에 대한 내용을 다루고 있지만, 그 범위가 제한적이며, 대부분 1990년대 일본의 규정을 준용하고 있다. 이에 따라 국내 시방서에서는 경량골재 콘크리트의 배합 절차 및 물-결합재비와 단위수량의 범위 제한 등의 상세한 시방내용이 부족하며, 특히 국내산 인공경량골재의 특성 및 이를 활용한 콘크리트 특성관리 등에 대한 내용에 대해서는 개정이 필요하다.

이 원고에서는 국내·외 기준에서 제시하는 경량골재 콘크리트의 정의, 사용되는 골재의 규격, 배합조건 및 배합설계 절차에 대해 고찰하였다. 특히 플라이애시를 재활용하여 생산한 국내산 경량골재를 사용한 콘크리트 실험결과를 기반으로 국내 콘크리트표준시방서에서 제시하는 내용의 개정방향을 간략하게 분석하였다.

## 2. 경량골재 콘크리트의 정의

구조용 경량골재 콘크리트는 일반적으로 기건 단위용적질량이 2,000 kg/m<sup>3</sup> 이하의 콘크리트를 의미하지만 각 시방서별로 정의하는 범위는 상이하다[표 1]. 국내 콘크리트표준시방서에서는 경량골재 콘크리트를 설계기준강도 15 MPa 이상, 24 MPa 이하로서, 기건 단위용적질량의 범위를 1,400 ~ 2,000 kg/m<sup>3</sup>로 규정하고 있다[5]. ACI에서는 사용되는 모든 골재가 경량골재인 전 경량 콘크리트와 잔골재는 모래, 굵은 골재는 경량골재를 사용하는 모래경량 콘크리트로 구분하고 있으며, 기건 단위용적질량의 범위에 따라 할렬 인장강도와 압축강도의 최저치를 규정하고 있다[6]. CEB-FIP에서는 경량골재 콘크리트를 기건 단위용적질량(밀도)에 따라 801 ~ 2,000 kg/m<sup>3</sup>의 범위에 해당하는 콘크리트를 경량골재 콘크리트로 정의하고 있다[7]. 콘크리트의 밀도에 따라 총 6단계로 나누어 구분하고 있지만, 강도에 대한 정의는 별도로 하지 않고 있다. 일본건축학회에서는 사용되는 골재, 설계기준강도 및 기건 단위

용적질량에 따라 경량콘크리트를 5종으로 세분화 하였으며, 설계기준강도의 범위는 9 ~ 22.5 MPa, 기건 단위용적질량은 1,200 ~ 2,000 kg/m<sup>3</sup>의 범위로 정의하고 있다[8].

## 3. 골재 품질

### 3.1 골재의 물리적 특성 및 유해물 함량

콘크리트표준시방서에서 경량골재의 품질은 적당한 입도 및 최소 단위질량에 대해 규정하고 있다. 경량골재의 표준입도는 ACI를 준용하고 있으며, 잔골재의 경우 0 ~ 5 mm, 굵은 골재의 경우 2.5 ~ 25 mm, 잔골재와 굵은 골재의 혼합물의 경우 0 ~ 13 mm의 범위에서 표준체의 통과율로 규정하고 있다. 또한 경량콘크리트의 소요 품질 확보를 위해 경량골재의 건조 시 최대 단위용적질량을 잔골재의 경우 1,100 kg/m<sup>3</sup>, 굵은 골재의 경우 900 kg/m<sup>3</sup>, 잔골재와 굵은 골재의 혼합물의 경우 1,050 kg/m<sup>3</sup>으로 제한하고 있다[표 2].

[표 1] 각 시방서별 구조용 경량골재 콘크리트의 범위

시방서		단위용적질량(kg/m <sup>3</sup> )	설계기준강도 압축강도(MPa)	인장강도(MPa)
국내 (콘크리트표준시방서)	1종(모래경량)	1,700~2,000	18~24	2
	2종(전 경량)	1,400~1,700	15~21	2
	단위용적 질량에 대응하는 강도	1,680 이하	17 이상	-
		1,760 이하	21 이상	-
	1,840 이하	28 이상	-	
미국 (ACI 211.2 & 213.R)	전 경량	1,600~1,760	17~28	2.0~2.2
	모래경량	1,680~1,840	17~28	2.1~2.3
유럽(CEB-FIP)		801~2,000(6단계로 구분)	8~80	-
일본		1,200 ~ 2,000(5종으로 구분)	9~22.5	-

[표 2] 경량골재의 재료적 요구 조건

시방서	입도분포	단위용적질량(kg/m <sup>3</sup> )	유해물 함량
국내 (콘크리트 표준시방서)	골재 종류 및 골재최대 사이즈에 따라 입도분포 범위 제시	잔골재 : 1,100 굵은골재 : 900 혼합골재 : 1,050	• 점토 : 2 % 이하 • 열록 : Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 함량 1.5 mg 이하 • 유기불순물 : 표준색 이하 • 부립율 : 10 % 이하 • 강열감량 : 5 % 이하
미국 (ACI 211.2 & 213.R)	ASTM C330에 만족하는 골재	잔골재 : 1,120 굵은골재 : 880 혼합골재 : 1,040	• 점토 : 2 % 이하 • 열록 : 60 이하, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1.5 mg/200 mg 이하 • 강열감량 : 5 % 이하
유럽(CEB-FIP)			규정 없음

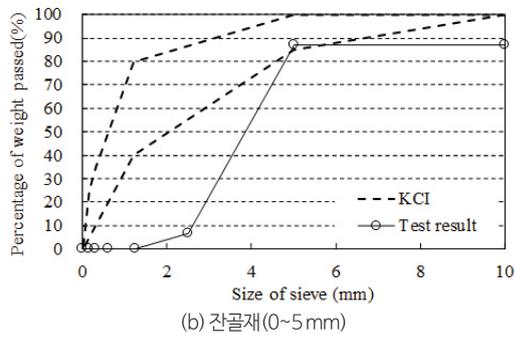
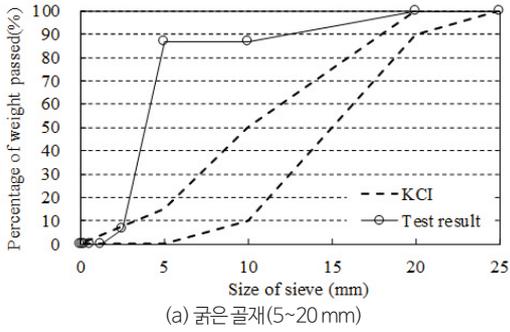


그림 1. 국내산 경량골재의 입도분포

현재 생산되고 있는 국내산 경량골재의 경우 건조 시 단위용적질량은 굵은 골재가  $880 \text{ kg/m}^3$ , 잔골재가  $1,081 \text{ kg/m}^3$ 로 콘크리트표준시방서에서 제시하는 범위 내에 있었으며, 강열감량, 점토 등의 유해물 함량 또한 시방서의 제시조건을 일반적으로 만족한다. 반면 입도분포의 경우에는 <그림 1>에 나타난 바와 같이 매우 불규칙하게 분포되어 있었다. 골재의 불규칙한 입도분포는 <그림 2>와 같이 콘크리트의 타설 시 채움불량을 발생시키게 되며, 이는 결과적으로 콘크리트의 강도에



그림 2. 경량골재의 불균질한 입도 분포에 따른 채움 불량

악영향을 미친다. 따라서 국내산 경량골재를 사용할 경우 적절한 입도분포를 위하여 천연모래 치환에 대한 상세(최대 직경 및 치환율)에 대해 시방서에서 제시될 필요가 있다.

ACI에서는 ASTM C330에 따라 구조용 경량골재의 물리적 특성을 제한하고 있다[표 2 참조] [6]. 경량골재의 단위용적질량의 경우 잔골재가  $1,120 \text{ kg/m}^3$ , 굵은 골재가  $880 \text{ kg/m}^3$ , 잔골재와 굵은 골재 혼합물이  $1,040 \text{ kg/m}^3$ 으로 국내 기준과 대동소이 하다. 또한 국내 기준과는 달리 유해물 함량의 경우 강열감량, 열록 및 점토에 대해서만 제한을 두고 있으며, 골재 부립에 대한 별다른 제한은 없다.

### 3.2 경량골재 함수율 관리

경량골재는 다공성 재료로 일반골재 대비 함수율이 크며, 초기 함수율이 매우 높아 침수 시 초기 30분 내에 약 최대 함수율의 60%, 1일에 약 75% 이상의 수분을 흡수한다(그림

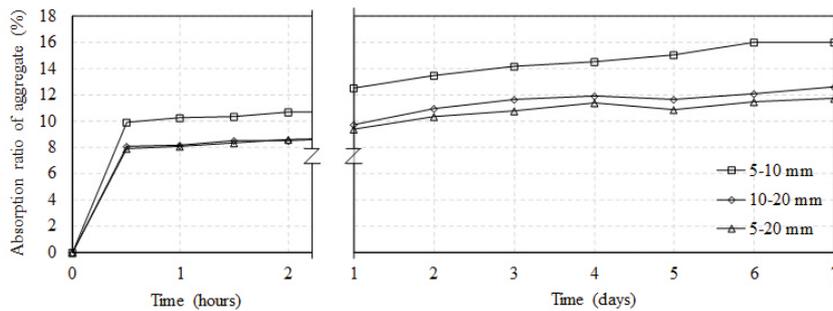


그림 3. 경량골재의 함수율 변화

3>[1]. 경량골재의 함수율은 콘크리트 유동성 및 압축강도에 중요한 영향을 미치며, 콘크리트의 비비기, 운반 및 타설 중 품질변화의 원인이 된다[3]. 하지만 국내·외 시방서에서는 경량골재의 함수율 관리에 대해 침수 시간 또는 최저 함수율 등에 대한 구체적인 함수율 관리법을 제시하지 않고 있다. 콘크리트표준시방서의 경우 골재의 함수율 관리에 대해 충분히 물을 흡수시킨 상태라 명시하고 있으며, ACI에서도 골재의 함수율 관리를 위한 습윤법에 대해서만 다루고 있다. 콘크리트의 소요 품질확보를 위해서 배합 전 경량골재의 함수율은 중요하게 다뤄져야하며, 함수율에 대한 실험결과를 배합 시 최소 함수율에 대한 명확한 제시가 필요하다.

## 4. 배합

### 4.1 물-결합재비

콘크리트표준시방서에서는 경량골재 콘크리트의 물-결합재비를 최대 60%로 제한하고 있지만 내동해성을 고려 시 기상 조건 및 단면과 구조물의 노출상태에 따라 물-결합재비의 최댓값을 45~60%로 조절하여 사용하도록 제한하고 있다[표 3][5]. 하지만 국내산 경량골재를 사용한 콘크리트의 경우 물-결합재비가 50% 이상일 때<그림 3>와 같이 블리딩이 발생할 수 있으며, 이는 콘크리트 침강 균열 발생, 부착강도 저하 등의 추가적인 문제 발생의 원인이 된다[9]. 또한 높은 물-결합재비는<그림 4 및 5>와 같이 골재의 부립 및 재료분리를 발생시키게 된다. 따라서 소요 슬럼프, 품질 및 수밀성

향상을 위해서는 물-결합재비의 최댓값에 대한 시방서 내용을 배합조건을 고려하여 적절하게 보완될 필요가 있다.

ACI의 경우 압축강도, 노출환경, 적용부재 및 골재특성에 따라 배합 비의 결정에 대한 참고 값 및 기준 값을 제시하고 있는데 특히 모든 조건에서 공기연행을 고려한 물-결합재비의 참고 값을 추가적으로 제시하고 있다[표 3][6]. 소요압축강도에 따라서 2,000~6,000 psi(13.8~41.4MPa)의 범위에서 1,000 psi(6.9 MPa) 단위마다 물-결합재 비를 41%에서 최대 82%(공기연행 고려 시 40~74%)까지 구분하여 사용하도록 권장 하고 있으며, 동결융해를 고려 시 물-결합재 비는 45~50%(공기연행 고려 시 40~50%)의 범위에서 사용하도록 제한하고 있다.

### 4.2 최소 단위시멘트양 (최대 단위수량)

콘크리트표준시방서에서는 배합 시 단위 시멘트양의 최솟값(300 kg/m<sup>3</sup>)만을 정량적인 수치로 제한하고 있는 반면, 단위수량에 대한 별다른 제시는 없다[5]. 물-시멘트 60%인 경우 최소 단위시멘트양에 대한 단위수량은 180 kg/m<sup>3</sup>이 되는데, 이는 배합 시 재료분리 및 건조수축 증가의 원인이 될 수 있음. 국내산 경량골재의 경우<그림 1>의 (b)에서 나타낸 바와 같이 2mm 이하의 미립분이 다소 부족한 분포형태를 나타내고 있는데 이는 충분한 페이스트가 없을 시 그림 2와 같은 채움불량을 발생시킬 수 있게 된다. 또한 이처럼 현재 국내산 경량골재의 사용에 따른 품질 확보를 위해 국내 기준의 범위는 다소 수정될 필요가 있으며, 품질저하 발생을 방지하기

[표 3] 경량골재 콘크리트의 배합 시 요구 조건

기준	물-결합재비 (%)	단위시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	슬럼프 (mm)	공기량 (%)
국내 (콘크리트 표준시방서)	60% 이하 *동결융해를 고려할 경우 45~55	최소 300 이상	-	50~180	보통콘크리트 대비 1% 높게 사용 권장
미국 (ACI 211.2 & 213.R)	소요 압축강도에 따라 40~82(공기연행 시 40~74) *동결융해를 고려할 경우 45~50(공기연행 시 40~45)	-	골재 크기 및 슬럼프를 고려하여 166~237 권장	25~150 권장	2~7.5% *동결융해고려 시 4~6%
유럽(CEB-FIP)			규정 없음		



그림 3. 블리딩



그림 4. 골재 부립



그림 5. 골재 부립에 의한 재료분리

위해 현재 규정하고 있는 단위 시멘트의 최솟값과 함께 페이스트 총량을 고려하여 단위 수량 및 물-결합재비에 대한 제한이 필요 할 것으로 보인다.

ACI에서는 단위 결합재에 대한 별다른 규정은 없지만 표 4에 나타낸 바와 같이 단위수량에 대해서 굵은 골재 최대크기, 슬럼프 및 공기연행여부를 고려하여 166 ~ 237 kg/m<sup>3</sup>의 범위에서 사용할 것을 제안하고 있다.

#### 4.3 슬럼프 및 공기량

콘크리트표준시방서는 경량골재 콘크리트 배합 시 슬럼프 값은 일반적으로 50 ~ 180 mm을 표준으로 하고 있으며, 공기량은 내동해성을 고려하여 일반골재 콘크리트 대비 1% 이상 크게 할 것을 권장하고 있다[5]. 콘크리트에서 공기량은 골재의 입도분포에 큰 영향을 받으며, 콘크리트의 유동성에

영향을 미치게 된다. 따라서 경량골재 콘크리트의 공기량은 내동해성 뿐만 아니라 유동성 및 단위수량 등을 고려하여 제시할 필요가 있다.

ACI에서는 경량골재 콘크리트의 슬럼프를 25 ~ 150 mm의 범위로 사용할 것을 제안하고 있으며, 구조 부재에 적용할 경우 25 ~ 100 mm 범위에서 사용하도록 권장 하고 있다[6]. 공기량의 경우에는 [표 4]에 나타낸 바와 같이 골재 크기, 노출환경 및 공기연행 여부에 따라 2 ~ 7.5% 범위 내에서 구체적으로 제시하고 있다.

#### 4.4 배합절차

경량골재 콘크리트는 경량골재의 높은 함수율로 인해 배합 시 골재의 함수상태에 따라 유동성 및 강도 등의 특성에 큰 영향을 받게 되며, 이에 대한 고려가 필요하다. ACI에서는

[표 4] ACI에서 제시하는 경량골재 콘크리트의 단위수량 및 공기량

골재 크기	9.5 mm	12.7 mm	19 mm	골재 크기	9.5 mm	12.7 mm	19 mm
공기연행 시				공기연행 하지 않을 시			
슬럼프(mm)	단위수량(kg/m <sup>3</sup> )			슬럼프(mm)	단위수량(kg/m <sup>3</sup> )		
25~50	181	175	166	25~50	208	199	187
75~100	202	193	181	75~100	228	217	202
125~150	211	199	187	125~150	237	222	208
노출환경	추천 공기량(%)			노출환경	공기량 근삿값(%)		
온화한 환경	4.5	4	4	온화한 환경	3	2.5	2
보통의 환경	6	5.5	5				
극한 환경	7.5	7	6				

이를 고려하여, 모래경량 콘크리트에서는 골재의 함수량을 알거나 이미 결정되었을 때 배합비를 결정할 수 있는 비중법에 의한 배합설계절차를 사용하도록 하고 있으며, 전경량 콘크리트에서는 충분히 함수된 골재의 체적을 통해 배합중량을 환산하여 배합비를 결정하는 부피법에 의한 배합설계 절차를 따르도록 하고 있다[6].

콘크리트표준시방서의 경우 콘크리트의 품질 및 골재 특성을 고려한 배합절차에 대한 제시는 없으며, 단순히 골재의 함수상태 및 입도분포의 보정을 통해 시방배합과 현장배합을 구분하여 표시하도록 하고 있다[5]. 경량골재 콘크리트의 소요 품질 확보를 위해서는 체계적인 골재 품질 관리와 함께, 물-결합재비, 압축강도 및 단위용적질량에 대한 역학적 상관관계의 정립이 필요하며, 이를 기반으로 소요 슬럼프, 단위용적질량, 공기량 및 압축강도 선정을 위한 참고 값의 제시가 필요하다.

#### 4.5 비비기

콘크리트표준시방서에서는 경량골재의 표준비비기 시간에 대해 믹서의 종류에 따라 강제식은 1분 이상, 가경식은 2분 이상하도록 제한하고 있다[5]. 경량골재의 경우 골재강도가

가 약해 장시간 비비기를 할 경우 믹서날의 마찰에 의해 골재의 파쇄가 발생할 수 있다. 골재의 파쇄는 소요 슬럼프 및 강도에 악영향을 미치게 되며, 재료분리의 원인이 될 수 있다. 따라서 표준비비기 시간의 최소값과 함께 골재의 파손을 고려하여 최댓값에 대한 제시가 필요하다.

ACI에서는 경량골재 콘크리트의 비비기는 ASTM C 94에 따라 보통중량 콘크리트와 동일하게 할 것을 권장하고 있으며, 다만 골재의 함수율을 고려하여 취급 하도록 제시하고 있다[6].

#### 5. 맺음말

현재 국내에서 경량콘크리트 관련 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한 앞서 본문에서 설명한 바와 같이 국내 경량골재 콘크리트 관련 기준의 경우 국내산 경량골재의 특성을 고려하지 않고 대부분 1990년대 미국 및 일본의 기준을 준용하고 있다. 따라서 국내산 경량골재를 사용한 콘크리트의 품질관리 및 하자발생의 사전에 최소화 하기 위해서는 국내산 경량골재를 활용한 실험결과에 기반하여 합리적인 콘크리트의 배합설계 기술 및 시방 가이드라인이 제시될 필요가 있다. 특히 프리캐스트 경량콘크리트 부재로 확대를 위해서는 현실적인 재료 관리, 배합 및 양생 등에 대한 절차와 실무메뉴얼이 요구된다.

담당 편집위원 : 고경택(한국건설기술연구원)

#### 참고문헌

1. 심재일, 양근혁, "굳지 않는 경량골재 콘크리트의 공기량, 유동성 및 블리딩 특성," 콘크리트학회 논문집, 22권, 4호, 2010, pp. 559~566.
2. 심재일, 양근혁, "천연모래 친환율과 경량 굵은 골재 최대 크기에 따른 경량 골재 콘크리트의 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 23권, 5호, 2011, pp. 551~558.
3. 권대순, 김세환, 전현규, 김상현, 서치호, "경량골재의 함수상태에 따른 가압 전후 경량골재 콘크리트의 특성에 관한 연구," 대한건축학회논문집, 28권, 8호, 2012, pp.121~128.
4. 심재일, 양근혁, "굳지 않는 경량골재 콘크리트의 공기량, 유동성 및 블리딩 특성," 콘크리트학회 논문집, 22권, 4호, 2010, pp. 559~566.
5. 국토교통부, 콘크리트표준시방서, 2016.
6. ACI Committee 213, Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.
7. Comité Euro-International du Béton. CEP-FIP Model Code 1990 for Concrete Structures, Bulletin d'Information No. 213-214, CEB-FIP 90, Lausanne, 1993.
8. 日本建築學會, 建設工事標準示方書·同解説, JASS 5 鐵筋コンクリート 工事, 1997.
9. 한국콘크리트학회, 콘크리트공학, 기문당, 2011.
10. 심재일, 양근혁, "경량콘크리트의 유동성 및 역학적 특성에 대한 굵은골재 최대크기의 영향," 대한건축학회논문집(구조계), 28권, 5호, 2012. pp. 61~68.