경량골재 콘크리트의 배합설계 및 시공성

Mix Proportioning and Constructability of Lightweight Aggregate Concrete

최재진*
Jae-Jin Choi

1. 서론

대부분의 암석은 밀도가 크게 변화하지 않기 때문에 경암으로 형성된 천연골재를 가지고 콘크리트를 만들면 단위용적질량의 변화범위가 크지 않다. 혼합물 중의 골재량은 콘크리트의 단위용적질량에 영향을 미치지만 실용상으로 볼 때 보통 콘크리트의 단위용적질량은 2,240～2,400 kg/m^{3}의 범위 내에 있다[1]. 그 결과 콘크리트 부재의 자중은 무겁고 구조물에 작용하는 하중 가운데 큰 비율을 차지하게 된다. 따라서 단위용적질량이 작은 콘크리트를 사용하면 내하부재의 단면적이 작게 되고 이에 따라 기초의 크기가 작아지는 잇점이 있어 오늘날 고층 건축구조물 또는 교량 상판과 기초 등에서는 콘크리트의 단위용적질량을 작게 하기 위하여 골재의 일부 또는 전부를 경량골재로 하여 제조하는 경량골재 콘크리트가 활용될 수 있다[2, 3]. 특히 장대 규모의 교량 형식이 요구되는 경우 그 효과가 더욱 기대되며 지진발생 시 관성력 경감에도 기여할 것으로 생각된다[4].

그밖에 단위용적질량이 작은 콘크리트를 사용하면 내하용량이 적은 지면에 건설하는 것이 가능한 경우도 있으며, 또한 콘크리트가 가벼우면 보통 콘크리트의 경우보다 거푸집에 걸리는 압력이 낮고 또 취급해야 할 재료의 무게가 작기 때문에 결과적으로 생산성도 향상된다.

단위용적질량이 작은 콘크리트는 보통 콘크리트와 비교하여 단열성이 우수하다. 반면 경량골재 콘크리트는 보통 콘크리트보다 단위시멘트량이 많고 경량골재가 고가이기 때문에 추가적인 경비가 소요된다. 따라서 경량골재 콘크리트를 사용하는데 따른 경제성은 경량골재 콘크리트를 사용한 구조물 전체의 설계에 기초하여 비교하는 것이 필요하다[5].

콘크리트 표준시방서[6] 제 6장에서는 경량골재 콘크리트에 대하여 규정하고 있다. 여기서 경량골재 콘크리트는 골재의 전부 또는 일부를 인공경량골재를 써서 만든 콘크리트로 기건 단위용적질량이 1,400～2,000 kg/m^{3}의 범위에 있으며, 콘크리트의 설계기준강도가 15 MPa 이상, 24 MPa 이하의 범위에 있는 것을 대상으로 한다. 또한 인공경량골재는 팽창성 혈암, 팽창성 점토, 플라이 애쉬 등을 주원료로 하여 인공적으로 소성한 인공경량골재와 팽창 슬래그, 석탄찌꺼기 등과 같은 산업부산물의 경량골재 및 그 가공품으로, 골재의 내부는 다공질이고 표면은 유리질의 피막으로 덮인 구조로 되어 있으며, 잔골재는 절건밀도가 1,800 kg/m^3 미만, 굵은 골재는 절건 밀도가 1,500 kg/m^3 미만인 것을 대상으로 한다.

경량골재 콘크리트는 보통 콘크리트와 비교할 때 일반적으로 흡수율이 높고 통상 펌프 압송에 의한 시공 시 골재의 압력흡수에 따른 관내 폐색이 발생할 우려가 있기 때문에 경량골재의 관리, 경량골재 콘크리트의 배합설계 및 시공에 있어서 주의가 필요하다. 경량골재는 미리 골재에 물을 뿌려 충분히 물을 흡수시킨 다음 사용하고, 경량골재 콘크리트의 배합설계에 있어서는 경량골재의 함수상태 등을 반영하며 시공 시 펌프 압송 중의 슬럼프 저하 및 공기량 저하에 따른 문제를 고려해야 한다.

소요의 성질을 가진 경량골재 콘크리트의 최초 시험비비기를 위한 가장 좋은 방법은 동일한 골재원의 골재를 사용한 기존의 배합을 활용하는 것이다. 그 배합은 골재 공급자로부터 구하거나 실험실 배합 및 현장사용배합으로부터 얻을 수 있다. 그러나 이러한 자료를 구할 수 없을 경우 미국콘크리트학회의 ACI211.2 「구조용 경량골재 콘크리트의 배합설계기준」[7] 및 일본건축학회의 「경량골재 콘크리트 배합설계・시공지침안」[8] 등이 경량골재 콘크리트의 초기시험배합의 산정을 위한 좋은 지침으로 활용될 수 있다.

현재 경량골재 콘크리트의 특성으로 모든 골재를 경량골재로 사용한 전 경량 콘크리트와 경량 굵은 골재와 보통질량의 천연모래가 사용된 모래경량 콘크리트의 특성에 관한 많은 연구 실적이 보고되고 있으며[9～11], 경량골재 콘크리트의 배합설계 과정을 수식화하거나 전산화하기 위한 시도도 진행되고 있다[12, 13].

* 정회원, 공주대학교 건설환경공학부 교수
jjchoi@kongju.ac.kr

이하에서는 경량골재 콘크리트 배합설계 시의 고려사항, 콘크리트 표준시방서의 규정 및 ACI211.2의 경량골재 콘크리트 배합설계 방법 등을 고찰하고 경량골재 콘크리트의 시공성에 대해서도 검토하고자 한다.

2. 경량골재 콘크리트의 배합에 영향을 미치는 요인

2.1 경량골재 콘크리트의 종류

경량골재 콘크리트는 경량골재와 보통골재와의 조합에 따라 다음 3종류가 있다.

1) 잔골재와 굵은 골재를 모두 경량골재로 사용하는 방법
2) 잔골재의 일부 또는 전부를 보통골재로 사용하는 방법
3) 굵은 골재의 일부 또는 전부를 보통골재로 사용하는 방법

경량골재 콘크리트의 단위용적질량은 설계에서의 기준값보다 커서는 안된다. 단위용적질량시험은 일반적으로 굳지 않은 콘크리트에 대하여 시험하며, KS F 2534(구조용 경량골재)에는 단위용적질량에 대응하는 강도가 <표 1>과 같이 제시되어 있다.

콘크리트 표준시방서에서는 경량골재 콘크리트를 경량골재 콘크리트 1종 및 경량골재 콘크리트 2종으로 분류하며, 설계기준강도 및 기건 단위용적질량의 범위를 <표 2>와 같이 정하고 있다. 또한 슬럼프값은 180 mm 이하이며, 단위시멘트량의 최소값은 300 kg, 물-시멘트비의 최대값은 60%로, 공기연행 콘크리트로 하는 것을 원칙으로 한다. 한편 KS F 4009(레디믹스트 콘크리트)에서는 <표 3>과 같은 경량골재 콘크리트의 배합을 제시하고 있으며, 이때의 표준공기량은 5.5%이다.

2.2 골재의 흡수율과 함수량

표 1. 단위용적질량에 대응하는 강도(KS F 2534)

단위용적질량 (kg/m^3)	기준재령 인장강도 (MPa)	기준재령 압축강도 (MPa)
1680 이하	2 이상	17 이상
1760 이하	2 이상	21 이상
1840 이하	2 이상	28 이상

표 3. 경량 레디믹스트 콘크리트의 종류(KS F 4009)

굵은 골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (mm)	호칭강도(MPa)						
		18	21	24	27	30	35	40
15, 20	80, 120, 150, 180, 210	○	○	○	○	○	○	○

보통 콘크리트와 비교할 때 경량골재 콘크리트의 배합선정 및 수정에 필요한 요인 중 중요한 것은 경량골재가 흡수율이 높고 흡수속도가 빠르다는 점이다. 골재의 함수량을 알고 있어서 배합에 동일한 시멘트량, 공기량, 반죽질기 및 잔골재와 굵은 골재가 각각 동일한 건조용적을 가지도록 수정된 경우 혼합시의 골재 함수량은 콘크리트의 압축강도에 거의 영향을 미치지 않는다고 한다[14].

건조된 상태의 경량골재를 사용한 콘크리트는 초기에 습윤상태의 경량골재를 사용한 콘크리트와 비교하여 혼합직후의 단위용적질량은 작지만 시간이 지남에 따라 통상의 건조 상태로 되면 같게 된다. 그러나 골재는 혼합 시에 습윤 상태로 사용하는 것이 건조 상태로 사용하는 것보다 바람직하다. 습윤 상태의 골재는 저장중에 분리가 적게 일어나며 습윤 상태의 골재는 혼합중에 흡수가 적게 일어나기 때문에 콘크리트를 운반하거나 치기 작업 중에 슬럼프 손실이 적게 일어난다[7].

콘크리트에 사용하는 경량골재가 초기 함수량 8～10% 이하로 작고 비교적 흡수속도가 빠른 경우 시멘트 및 공기연행제를 투입하기 전에 먼저 혼합수의 1/2～2/3 정도와 함께 짧은 시간 동안 혼합을 실시함으로써 슬럼프 손실을 작게 하는 것이 필요하다[7].

물로 포화된 경량골재를 사용한 콘크리트는 그 콘크리트가 양생 후 동결융해를 받기까지의 사이에 과잉의 수분이 방출되지 않으면 습윤 또는 건조 상태의 경량골재를 사용한 경우보다도 동결융해의 피해를 받기 쉽다고 한다[15].

2.3 골재의 입도

잔골재와 굵은 골재의 입도분포 및 그 사용비율은 콘크리트의 물성에 큰 영향을 미친다. 입도분포가 적절하면 공극량이 최소

표 2. 경량골재 콘크리트의 설계기준강도 및 기건 단위용적질량의 범위(콘크리트 표준시방서)

사용한 골재에 의한 콘크리트의 종류	사용골재		설계기준강도(MPa)	기건 단위 용적질량(kg/m^3)
	굵은 골재	잔골재		
경량골재 콘크리트 1종	경량골재	모래, 부순 잔골재, 고로슬래그 잔골재	15 21 24	1,700～2,000
경량골재 콘크리트 2종	경량골재	경량골재나 혹은 경량골재의 일부를 모래, 부순 잔골재, 고로슬래그 잔골재로 대치한 것	15 18 21	1,400～1,700

가 되어 그 공극을 충전시키기 위한 페이스트량이 최소가 되기 때문에 시멘트의 사용량이 적은 경제적인 배합이 된다. 동시에 강도는 최대가 되며 건조수축과 온도변화에 의한 용적변화가 최소로 된다.

보통골재는 입경에 관계없이 밀도가 거의 같으나 경량골재는 입경을 구분하였을 때 입경이 작게 되어 밀도가 증가한다. 어떤 굵은 골재는 물에 뜨며 0.15 mm의 체를 통과한 재료는 그 밀도가 천연골재와 근접하게 될 수 있다. 공극량에 따라 페이스트량이 결정되며, 콘크리트의 워커빌리티에 영향을 미치는 것은 각체에 남는 재료의 질량이 아니라 용적이다. 따라서 경량골재에서는 용적기준에 의해 가는 체에 잔류하는 입자의 양을 조정할 필요가 있다.

경량골재의 입도표준, 최대 단위용적질량, 유해물 함유량의 한도 등에 대해서는 KS F 2534(구조용 경량골재)에 자세히 규정되어 있다.

잔골재로써 천연모래를 사용하는 경량골재 콘크리트는 어느 정도 강도와 탄성계수가 증가되는데 이 증가는 질량의 증가에 따른 것이다. 따라서 배합선정은 이들의 성상 및 구조물 전체로서의 경제성 등을 함께 고려하여 정해야 한다[7].

2.4 물-시멘트비

물-시멘트비는 콘크리트의 압축강도, 내동해성 및 수밀성을 기준으로 정하며, 현장에서는 골재의 함수량 변화, 재료계량의 오차 등을 고려하여 일반적으로 소정의 값보다 2～3% 정도 작은 값을 목표로 하는 것이 좋다[16].

ACI211.2에서 경량골재 콘크리트의 배합설계방법으로 질량법과 용적법을 제시하고 있다.

1) 질량법 : 경량골재 콘크리트는 ACI211.2의 부록A(구조용 경량골재의 밀도계수 측정)에 설명된 방법으로 골재의 함수량을 결정한 후 물-결합재비 관계에 기초한 질량법으로 배합을 정할 수 있다. 이 방법은 배합에서 모든 재료의 단위용적당의 질량 합계가 그 배합의 전체질량과 같다는 사실을 이용한다. 어떤 특정 골재를 사용한 콘크리트의 단위용적질량이 골재의 밀도계수로부터 추정될 수 있고 단위용적중의 시멘트와 물의 질량을 알고 있거나 추정할 수 있으면 그 용적중의 경량골재의 질량은 계산에 의해 구할 수 있게 된다.
2) 용적법 : 시험배합이 질량법과 다른 절차로 정해질 때 대부분의 경량골재 콘크리트에서의 순(純)물-시멘트비는 배합선정의 기준으로 사용할 수 있을 정도로 충분히 정밀하게 정할 수 없다. 그 이유는 전체 수량 중 어느 정도가 골재에 흡수되고 따라서 콘크리트가 플라스틱한 상태에 있는 동안에 시멘트와 반응하지 않게 되는지를 결정하기 곤란하기 때문이다. 따라서 경량골재 콘크리트의 배합은 질량법을 사용하지 않을 때 물-시멘트비와 강도의 관계보다는 통상 소요의 반죽질기에서 시멘트량과 공기량을 기준으로 시험비비기를 실시하여 결정하게 된다.

2.5 공기량

연행공기는 워커빌리티를 증가시키고 동결융해에 대한 저항성 및 제빙화학제에 대한 저항성을 증가시킨다. 또한 블리딩을 억제하며 잔입자가 부족한 경우 이를 보완하는 역할을 한다. 경량골재 콘크리트의 공기량은 보통골재를 사용한 콘크리트보다 1% 정도 크게 해야 하며, 동결융해작용이나 제빙화학제의 작용을 받는 경량골재 콘크리트는 경량골재의 최대치수가 20 mm인 경우 공기량 4～6%, 10 mm인 경우 4.5～7.5%가 바람직하다[7]. 공기연행 콘크리트의 공기량시험은 KS F 2449의 방법이 추천된다.

3. ACI211.2-98에 의한 경량골재 콘크리트의 배합설계

3.1 개요

ACI211.2-98에서는 구조용 경량골재 콘크리트의 배합설계 방법을 질량법과 용적법으로 나타내고 있는데 그 설계 흐름도를 보면 <그림 1>과 같다. 여기서 질량법은 경량 굵은 골재와 일반 잔골재(강모래 등)를 사용하였을 때 적용되며, 용적법은 모든 골재를 경량골재로 사용하거나 경량골재와 보통골재를 조합하여 사용한 경우에 적용되는 배합설계방법이다.

이하에서는 질량법으로 제시된 보통의 잔골재와 구조용 경량굵은 골재를 사용하였을 때의 초기시험배합을 결정하는 과정을 중심으로 설명하기로 한다. 이때 경량골재의 밀도는 사용에 앞서 예상되는 수분함량을 기준으로 한다.

3.2 질량법에 의한 초기시험배합 산정

3.2.1 Step 1 : 슬럼프 선정

슬럼프가 규정되어 있지 않고 다짐작업에 진동기를 사용하는 경우 슬럼프는 <표 3>의 값으로 정할 수 있다.

한편 콘크리트 표준시방서에서 콘크리트의 슬럼프는 작업에 알맞은 범위에서 가능한 한 작은 것이어야 하며, 일반적인 경우

그림 1. 경량골재 콘크리트의 배합설계 흐름도[13]

대체로 50 ~ 180 mm를 표준으로 한다고 규정하고 있다.

3.2.2 Step 2 : 경량골재 최대치수 선정

콘크리트를 경제적으로 제조한다는 관점에서 볼 때 최대치수가 큰 굵은 골재를 사용하는 것이 일반적으로 유리하다. 그러나 굵은 골재의 최대 치수는 부재 최소치수의 1/5, 슬래브 두께의 1/3 및 철근의 최소 순간격의 3/4을 초과해서는 안된다. 또한 고강도 콘크리트를 위해서는 일반적인 경우보다 골재의 최대치수를 작게 정하는 경우 주어진 물-시멘트비 또는 물-결합재비에서 보다 높은 강도를 얻게 될 수 있다.

콘크리트 표준시방서에서 굵은 골재의 최대 치수는 공사시방에 따르되 여기에서 정한 바가 없을 때에는 20 mm로 한다고 규정하고 있다.

표 3. 구조물의 종류에 따른 슬럼프 추천값

구조물의 종류	슬럼프(mm)	
	최대	최소
보와 철근 콘크리트 벽	100	25
기둥	75	25
바닥 슬래브	75	25

3.2.3 Step 3 : 단위수량과 공기량 추정

소요의 슬럼프를 얻기 위해 필요한 단위수량은 굵은 골재의 최대치수, 골재의 입도와 입형, 혼화재료의 종류, 콘크리트 공기량 등에 따라 다르다. ACI211.2-98에서는 공기연행 콘크리트와 Non 공기연행 콘크리트에서 슬럼프 범위 및 굵은 골재 최대 치수에 따른 단위수량의 추정치를 <표 4>와 같이 제시하고 있는데 이를 <그림 2, 3>으로 나타내었다. 또한 공기연행 콘크리트의 공기량 추천값과 Non-공기연행 콘크리트의 갇힌 공기량의 추정값을 나타낸 것이 <표 5>이며, 이를 그림으로 나타낸 것이 <그림 4>이다.

3.2.4 Step 4 : 물-시멘트비의 개략값 선정

물-시멘트비 또는 물-결합재비는 소요강도뿐만 아니라 내구성과 마감특성 등을 고려하여 결정해야 한다. 사용하는 골재와 시멘트가 다를 경우 일반적으로 물-시멘트비 또는 물-결합재비가 같아도 강도가 다르게 나타나기 때문에 사용하는 재료로써 이들의 관계를 시험에 의해 정하는 것이 중요하다. 그러나 보통포틀랜드시멘트를 사용하는 경우 이러한 데이터가 없으면 <표 6>를 이용하여 물-시멘트비의 개략값을 선정할 수 있으며, 이는 <그림 5>로 나타낼 수 있다. 또한 물-시멘트비 x와 압축강도 y(MPa)의 관계는 공기연행 콘크리트와 Non-공기연행 콘크리트의 경우 각각 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다.

공기연행 콘크리트의 물-시멘트비

$$y = a + bx + c/x\,(a = 5.96, b = -14.61, c = 13.95) \quad (1)$$

Non-공기연행 콘크리트의 물-시멘트비

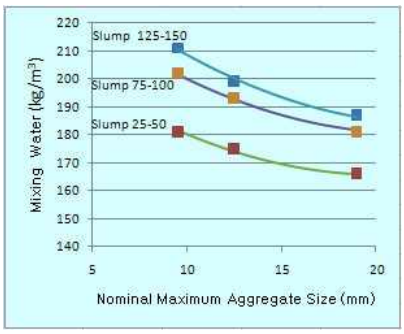


그림 2. 공기연행 콘크리트의 단위수량

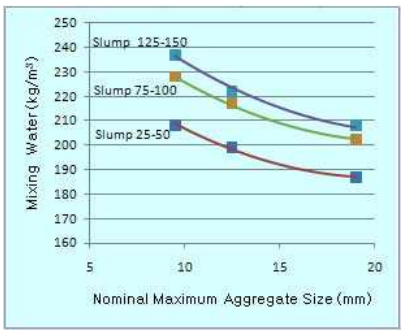


그림 3. Non-공기연행 콘크리트의 단위수량

표 4. 굵은 골재 최대치수와 슬럼프에 따른 단위수량의 추정값(kg/m³)

굵은 골재 최대치수(mm)	슬럼프 범위(mm)		
	25 ~ 50	75 ~ 100	125 ~ 150
공기연행 콘크리트			
9.5	181	202	211
12.5	175	193	199
19	166	181	187
Non-공기연행 콘크리트			
9.5	208	228	237
12.5	199	217	222
19	187	202	208

표 5. 굵은 골재 최대치수와 노출된 환경에 따른 공기량(%)

굵은 골재 최대치수 (mm)	노출 조건		
	가벼운 노출 (mild exposure)	보통의 노출 (moderate exposure)	가혹한 노출 (extreme exposure)
공기연행 콘크리트			
9.5	4.5	6	7.5
12.5	4	5.5	7
19	4	5	6
Non-공기연행 콘크리트			
9.5	3		
12.5	2.5		
19	2		

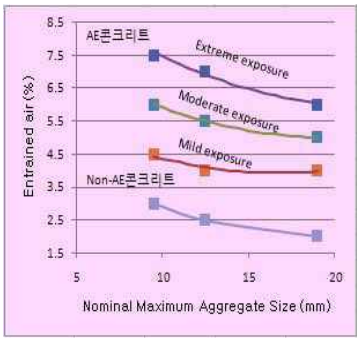


그림 4. 콘크리트의 공기량

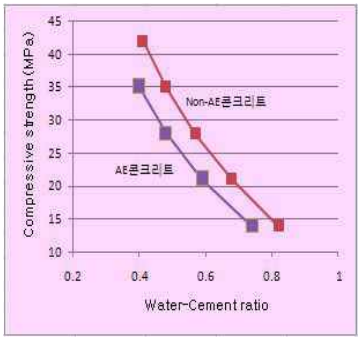


그림 5. 물-시멘트비와 압축강도의 관계

표 6. 콘크리트의 압축강도에 따른 물-시멘트비

압축강도(MPa)	Non-공기연행 콘크리트	공기연행 콘크리트
42	0.41	-
35	0.48	0.40
28	0.57	0.48
21	0.68	0.59
14	0.82	0.74

$$y = a + bx + c/x\,(a = 15.12, b = -23.77, c = 14.99) \quad (2)$$

콘크리트의 내동해성을 기준으로 하여 물-시멘트비를 정할 때 보통포틀랜드 시멘트를 사용할 경우 <표 7>의 값 이하여야 한다고 규정하고 있다.

한편 콘크리트 표준시방서에서 콘크리트의 내동해성을 기준으로 하여 물-시멘트비를 정할 때 보통 포틀랜드 시멘트를 사용할 경우 <표 8>의 값 이하여야 한다고 규정하고 있다. 또한 현장에서는 골재의 함수량의 변화, 재료계량의 오차 등을 고려하여 물-시멘트비를 정할 경우 일반적으로 소정의 값보다 2～3% 정도 작은 값을 목표로 하는 것이 좋다고 하며, 콘크리트의 수밀성을 기준으로 물-시멘트비를 정할 경우에는 55% 이하를 표준으로 하고 있다.

3.2.5 Step 5 : 단위 시멘트량 계산

단위 시멘트량은 Step 3과 Step 4에서 구한 단위 수량과 물-시멘트비의 관계로부터 계산한다. 그러나 강도와 내구성 이외에 최소 시멘트량에 대하여 추가적으로 규정된 경우는 이를 고려하여 모든 조건이 만족하도록 단위 시멘트량을 결정하여야 한다.

3.2.6 Step 6 : 경량 굵은 골재량 추정

<표 9>는 굵은 골재 최대치수와 잔골재 조립률에 따른 콘크리트 단위용적당 건조 상태의 굵은 골재 용적비를 나타낸 것이다. 펌프 압송에 의한 타설 등으로 보다 워커블한 콘크리트가 필

표 7. 가혹한 노출(severe exposure) 조건에서 콘크리트의 최대 물-시멘트비

구조물의 종류	계속해서 또는 종종 물로 포화되며, 동결융해에 노출되는 구조물	바닷물 또는 황산염에 노출되는 구조물
얇은 단면 및 피복두께 25 mm 이하의 단면	0.45	0.40
기타 구조물	0.50	0.45

표 8. 경량골재 콘크리트의 내동해성을 기준으로 하여 물-시멘트비를 정하는 경우 공기연행 콘크리트의 최대 물-시멘트비(%)(콘크리트 표준시방서)

구조물의 노출상태 \ 기상조건 단면	기상작용이 심한 경우 또는 동결융해가 종종 반복되는 경우		기상작용이 심하지 않은 경우, 빙점 이하의 기온으로 되는 일이 드문 경우	
	얇은 경우[2]	보통의 경우 두꺼운 경우	얇은 경우[2]	보통의 경우 두꺼운 경우
① 계속해서 또는 종종 물로 포화되는 부분[1]	45	50	50	55
② 보통의 노출상태에 있으며 ①에 해당하지 않는 경우	50	55	55	60

주 1) 수로, 수조, 교대, 교각, 옹벽, 터널의 라이닝 등으로서 수면에 가까워 물로 포화되는 부분 및 이들 구조물 외에 보, 슬래브 등에서 수면으로부터 떨어져 있기는 하나 융설, 유수 등 때문에 물로 포화되는 부분
2) 단면두께가 약 200 mm 이하인 구조물

요한 경우 이 값에서 약 10%까지 그 값을 줄일 수 있다. 굵은 골재의 용적비에 굵은 골재의 건조 상태에서의 단위용적질량을 곱하여 단위굵은골재량을 얻는다. <그림 6>은 <표 9>를 그림으로 나타낸 것이다.

3.2.7 Step 7 : 단위 잔골재량 추정

Step 6까지의 완료로 잔골재를 제외한 모든 재료량이 추정된다. 단위용적당의 콘크리트 질량을 경험에 의해 추정할 수 있다면 단위 잔골재량은 굳지 않은 콘크리트의 질량에서 다른 재료의 전체 질량을 제함으로써 계산된다. 콘크리트의 질량은 그 재료들을 사용한 이전의 실적으로부터 정하는 것이 좋다. 그러나 그러한 정보가 없는 경우 경량 굵은 골재와 보통 잔골재로 이루어진 굳지 않은 경량골재 콘크리트의 단위용적질량은 <표 10>으로부터 경량 굵은 골재 밀도계수와 콘크리트 공기량에 따라 그 값을 추정할 수 있다. <그림 7>은 <표 10>을 그림으로 나타낸 것이다. 경량 굵은 골재 밀도계수의 측정방법은 ACI211.2 부록 A에 설명되어 있다.

이와 같이 계산된 배합은 시험비비기에 의해 확인하여 수정되어야 한다. 만약 시험배합의 슬럼프값이 기준값과 다르게 되면 슬럼프 10 mm의 증감에 따라 단위수량을 2.3 kg/m^3 증감한다. 공기연행 콘크리트에서 소정의 공기량이 얻어지지 않으면 혼화제의 사용량을 다시 결정하고 공기량 1% 변화에 따라 단위수량을 1.2 kg/m^3 증감한다. 또한 전체 골재량에 대한 잔골재 비를

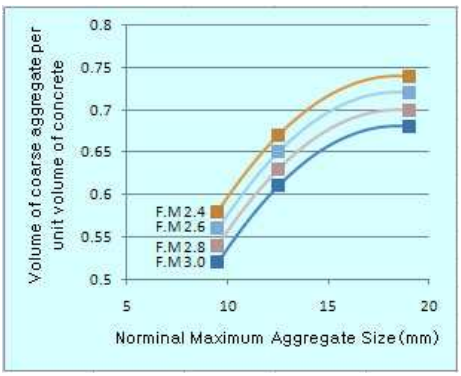


그림 6. 콘크리트 단위용적당 굵은 골재의 용적비

표 9. 콘크리트의 단위용적당 굵은 골재의 용적비

골재 최대치수(mm)	잔골재의 조립률			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5	0.58	0.56	0.54	0.52
12.5	0.67	0.65	0.63	0.61
19	0.74	0.72	0.70	0.68

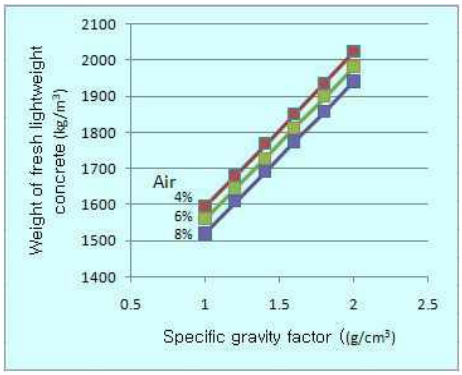


그림 7. 굳지 않은 콘크리트의 단위용적질량

표 10. 굵은 골재 밀도계수와 콘크리트 공기량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 단위용적질량 추정값(kg/m^3)

굵은 골재 밀도계수(g/cm^3)	공기량(%)		
	4	6	8
1	1,596	1,560	1,519
1.2	1,679	1,643	1,608
1.4	1,768	1,727	1,691
1.6	1,851	1,810	1,774
1.8	1,934	1,899	1,857
2	2,023	1,982	1,940

증가시킬 필요가 있는 경우 단위수량을 증가시켜야 하며, 이때 잔골재량 1% 증가에 따라 단위수량을 약 1.8 kg/m^3 증가시킨다[7].

4. 경량골재 콘크리트의 시공성

4.1 운반 및 펌프 압송

경량골재 콘크리트의 운반방법은 구조물의 종류, 규모, 타설장소, 타설 속도, 시공조건 및 콘크리트의 배합에 따라 재료분리와 품질변화가 적으며, 또 신속히 경제적으로 운반할 수 있는 방법을 선택해야 한다. 애지테이터 차로 운반할 경우 드럼에서 배출된 최초 부분의 콘크리트는 굵은 골재가 많은 상태로 될 수 있기 때문에 짐을 내리기 전 반드시 고속으로 교반하여 균일하게 한 다음 배출시켜야 한다. 콘크리트 표준시방서에 따르면 경량골재 콘크리트의 운반에 콘크리트 펌프를 사용할 경우 원칙적으로 유동화 콘크리트로 하며, 슬럼프가 80 ~ 120 mm인 베이스 콘크리트를 유동화시켜 슬럼프를 180 mm 정도로 하면 콘크리트 펌프에 의한 운반이 용이해진다고 한다.

경량골재 콘크리트의 펌프 압송에 의한 시공상의 주의점은 다음과 같다[17].

1) 배관은 가능한 5인치 관(125A) 이상을 사용한다.
2) 곡 관(bent 관)을 다수 사용하면 관내압력이 증가하여 슬럼프 저하가 커지며 폐색의 위험이 증가하기 때문에 배관 계획을 잘 세워 이를 가능한 적게 한다.
3) 테이퍼 관이 짧으면 압송저항이 증가하므로 폐색방지를 위해 테이퍼 관은 가능한 긴 것을 사용한다.
4) 재료분리의 가능성이 높은 슬럼프 250 mm 이상의 진 반죽의 콘크리트는 사용하지 않는다.
5) 여름철의 압송중단은 최단 시간이 되도록 조처를 신속히 취한다.
6) 붐 관은 사용하지 않는다.
7) 펌프압송 초기단계부터 고속압송을 실시하면 폐색이 발생할 우려가 있기 때문에 타설 초기는 상태를 관찰하면서 천천히 압송하도록 한다.

4.2 펌프 압송에 의한 슬럼프 변화

경량골재 콘크리트는 압송에 의한 슬럼프 저하가 비교적 크다. <그림 8>은 39층의 사무실 건물 시공에서 2～39층의 바닥에 경량골재 콘크리트 1종을 타설하였을 때의 슬럼프 측정결과로서 압송 후 20～50 mm의 슬럼프 저하가 발생하였음을 보여준다.

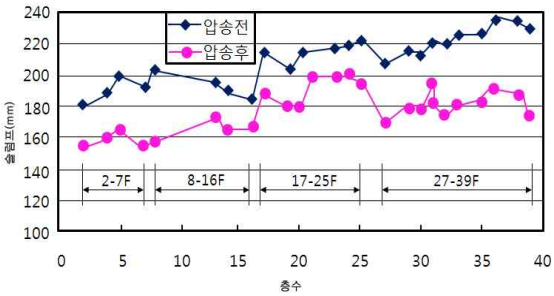


그림 8. 경량골재 콘크리트의 압송전후의 슬럼프 측정 예[18]

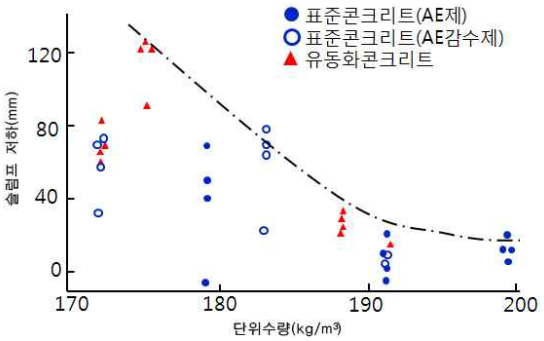


그림 9. 경량골재 콘크리트의 단위수량과 압송에 의한 슬럼프 저하의 관계[19]

경량골재 콘크리트의 압송에 따른 슬럼프 저하는 단위수량과도 관계가 있다고 보고되고 있다. <그림 9>는 경량골재 콘크리트의 단위수량과 압송에 의한 슬럼프 저하의 관계를 나타낸 것으로 단위수량이 185 kg/m^3 이하인 경우에 슬럼프 저하가 크게 되는 경향을 볼 수 있다. 이와 같이 경량골재 콘크리트의 경우 골재의 압력흡수의 영향에 의해 특히 단위수량이 적은 콘크리트에서는 압송이 곤란해지며 펌프 폐색이 일어나기 쉽기 때문에 사전에 압송방법에 대하여 충분히 검토할 필요가 있다.

4.3 펌프 압송에 의한 공기량 변화 및 내구성

경량골재 콘크리트는 펌프 압송에 의해 공기량이 저하한다. <그림 10>은 펌프 압송 전의 콘크리트 공기량과 압송 15분 후의 콘크리트 공기량을 측정하여 나타낸 예로서 압송에 의해 0～4%의 공기량 저하가 나타났음을 보여준다. 또한 <그림 11>은 압송전의 골재 흡수율이 다른 경우, 골재 흡수율에 따른 펌프 압송 전후의 콘크리트 공기량 차를 나타낸 것이다. 이 그림에서 압송 후의 공기량은 압송전 골재의 흡수율이 낮을수록 공기량 저하의 폭이 큼을 알 수 있는데, 공기량 저하의 원인은 콘크리트 내부의 공기가 압력에 의해 경량골재 내로 압입되며, 배

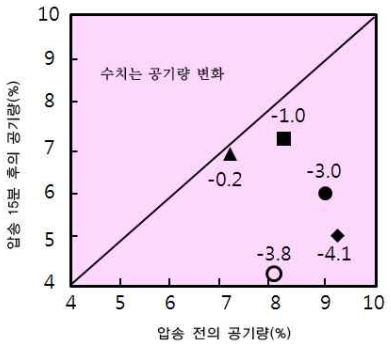


그림 10. 압송 전과 압송 15분 후의 공기량의 관계 예[4]

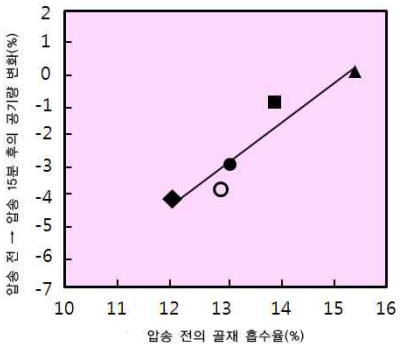


그림 11. 압송 전 골재 흡수율과 압송 15분 후의 공기량 변화의 관계 예[4]

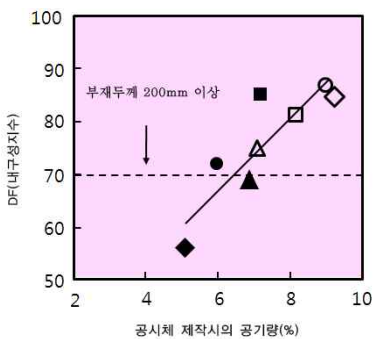


그림 12. 공기량과 내구성지수의 관계[4]

출구에서 압력이 완화될 때 일부 공기가 빠져나가 소실되었을 가능성 등을 생각해 볼 수 있다[4].

<그림 12>는 펌프 압송 후의 공기량과 내구성지수(DF)와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 안에서 공기량은 흰색 기호로 나타낸 것이 압송전의 값이며, 검은색 기호로 나타낸 것은 펌프 압송 15분 후의 값이다. 일본의 콘크리트 표준시방서 시공편[20]에 의하면 두께 200 mm 이상인 부재의 노출면이 물로 포화상태에 있으며, 동결융해가 반복되는 지역에 노출된 경우 내구성지수 DF는 70 이상을 요구하고 있다. 그러나 압송전의 콘크리트 시험체는 모두 DF 70 이상이었으나 압송후의 콘크리트 시험체는 DF 70 이하인 경우가 있음을 보여주고 있어서 압송후의 공기량의 확보는 경량골재 콘크리트의 내구성 향상을 위해 반드시 필요한 일이라고 생각된다.

4.4 경량골재 콘크리트의 타설

경량골재 콘크리트를 내부진동기로 다질 때 그 유효범위는 보통골재 콘크리트에 비해서 작고, 자중에 의해서 거푸집의 구석구석이나 철근의 둘레에 잘 돌지 않으므로 진동기를 찔러 넣는 간격을 작게 하거나 진동시간을 약간 길게 해 충분히 다져야 한다. 그러나 너무 진동을 많이 주면 굵은 골재가 위로 떠오르는 경우도 있으므로 주의가 필요하다. 내부진동기로 다지는 경우 표준적인 찔러 넣기 간격, 진동시간은 <표 11>에 나타낸 바와 같다. 진동기에 의한 콘크리트의 횡류나 높은 장소로부터의 투입은 굵은 골재의 과도한 떠오름 현상과 재료분리에 의해 시공불량의 원인이 되기 때문에 피하여야 한다.

한편 표면 마무리 작업과 관련하여 표면에 떠오른 인공경량골재는 블리딩 수가 사라진 직후에 <그림 13>과 같은 표면마감도구(jitterbug)에 의한 탬핑을 실시하거나 나무흙손으로 굵은 골재를 눌러 넣어 표면을 마무리하여야 한다.

표면을 평평하게 마무리할 때는 적당한 시간 간격을 두고 다시 마무리하여야 하며, 경량골재 콘크리트를 바닥판에 사용한 경우 마무리한 지 30분 내지 1시간 후에 거북이 등 모양으로 미세한 균열이 생기는 경우가 있으므로 표면을 마무리한지 1시간 정도 경과한 후에 다짐기 등으로 표면을 가볍게 두들겨서 재 마무리하여 균열을 없애는 것이 좋다.

표 11. 찔러넣기 간격 및 진동시간의 표준(콘크리트 표준시방서)

콘크리트의 종류	찔러 넣기 간격(m)	진동시간(초)
유동화되지 않은 것	0.3	30
유동화된 것	0.4	10

그림 13. 콘크리트 표면마감도구

5. 맺는 말

경량골재 콘크리트는 콘크리트 펌프 시공 시 폐색문제가 발생하는 경우가 있어 이에 대한 대책이 요구되며, 피로내구성 등 장기거동 등에 대한 연구가 불충분하다는 점 때문에 사용상의 제약 요인이 되어 왔다. 그러나 최근 펌프시공기술의 발전과 경량골재 콘크리트의 장기거동에 관한 연구의 진행으로 많은 기술적 과제에 대한 진전을 이루었다. 또한 고단열화, 초경량화, 고강도 경량화가 진행됨으로써 경량골재 콘크리트의 새로운 용도로의 확대를 위한 기술개발도 활발히 이루어지고 있다.

경량골재 콘크리트 구조물은 상부구조의 경량화, 내진하중의 감소, 기초부담의 감소 및 기초의 경량화 등에 의한 건설비 및 에너지 절감에 크게 기여할 것으로 기대되며, 콘크리트 요구성능의 다양화와 시공의 합리화에 의한 원가절감 측면에서도 한층 경량골재 콘크리트의 수요처가 증가할 것으로 전망된다. 또한 국내에서도 곧 플라이 애쉬를 활용한 인공경량골재가 본격적으로 생산될 예정이어서 경량골재 콘크리트 구조물이 활발히 건설되는 계기가 될 것으로 기대된다.

앞으로 국내산 경량골재 콘크리트의 배합설계 및 역학적 특성에 관한 연구가 필요할 것이며, 현재 개발되고 있는 고강도 경량골재 콘크리트나 초경량 콘크리트 등의 경우 새로운 배합설계지침의 마련을 위한 추가적인 연구검토가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

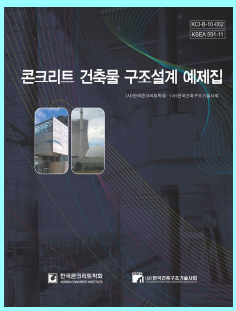
1. National Ready Mixed Concrete Association, CIP 36-Structural Light Weight Concrete, NRMCA, U.S.A, 2003.
2. 土木学会, 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, コンクリートライブラリー56, 1985, pp. 18～23.
3. 三田村浩, 池田憲二, 坂田昇, 信田佳延, “軽量骨材コンクリートの適用を想定したプレストレストコンクリートの試設計”, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 2000, pp. 149～152.

4. 遠藤裕丈, 田口史雄, 竹本伸一, 松井敏二, “耐凍害性を考慮した軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する研究”, 北海道開発土木研究所月報, No. 621, 2005, pp. 16 ~ 23.
5. Neville, A. M., Properties of Concrete(4th Edition), 1995, pp. 688 ~ 708.
6. 국토해양부, 콘크리트 표준시방서 제 6장 경량골재 콘크리트, 2009.
7. ACI211.2, Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete, Detroit, American Concrete Institute, 1998.
8. 日本建築學會, 輕量コンクリート調合設計·施工指針案·同解說, 技報堂, 1978.
9. 심재일, 양근혁, ‘굳지 않은 경량골재 콘크리트의 공기량, 유동성 및 블리딩 특성’, 콘크리트학회 논문집, Vol. 22, No. 4, 2010, pp. 559 ~ 566.
10. Lo, T. Y., Tang, W. C. and Cui, H. Z., “The Effects of Aggregate Properties on Lightweight Concrete”, Building and Environment, Vol. 42, Issue 8, 2007, pp. 3,025 ~ 3,029.
11. 전현규, 홍순조, 서치호, ‘고유동 경량골재콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구’, 대한건축학회 논문집, Vol. 17, No. 4, 2001, pp. 71 ~ 78.
12. 최재진, 송진우, ‘구조용 경량콘크리트의 배합설계를 위한 ACI 211.2-98의 수식화’, 콘크리트학회지, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 65 ~ 70.
13. Abdullahi, M., Al-Mattarneh, H.M.A., Mohammed, B.S., Sadiku, S., Mustapha, K.N. and Norhisham, S., “A Script File for Mix Design of Structural Lightweight Concrete”, *Journal of Applied Sciences Research*, 6(8), 2010, pp. 1,132 ~ 1,141.
14. Landgren, R., Hanson, J. A. and Pfeifer, D. W., “An Improved Procedure for Proportioning Mixes of Structural Lightweight Concrete”, *PCA Journal*, PCA Research and Development Laboratories, Vol. 7, No. 2, 1965, pp. 47 ~ 65.
15. Kluge, R.W., “Structural Lightweight Aggregate Concrete”, *ACI Journal*, Proceedings Vol. 53, No. 4, 1956, pp. 383 ~ 402.
16. 한국콘크리트학회, 「콘크리트 표준시방서 해설(제 6장 경량골재 콘크리트)」, 기문당, 2010.
17. 일본 인공경량골재협회 홈페이지, http://suites.is-assoc.co.jp/~ala/, 2011.
18. 神代泰道, 植松俊幸, 一瀬賢一, “施工性を考慮した軽量コンクリートの配合條件に関する考察”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, 2009.
19. 日本建築学会, コンクリートポンプ工法施工指針·同解說, 2009.
20. 土木学会, コンクリート標準示方書施工編, 2002, pp. 29.

담당 편집위원 :
양근혁(경기대학교) *yangkh@kyonggi.ac.kr*

▶ 학회 홈페이지(www.kci.or.kr)에서도 구매가 가능합니다.

BOOK NOTICE



콘크리트 건축물 구조설계 예제집

| 한국콘크리트학회 편 | 306쪽 | ISBN 978-89-8225-842-8 |
| 비회원 22,000원, 회원 17,500원| 출판사 구미서관 | 2011. 1. 3 발행 |

▣ 소 개

최근 건축분야는 4년제 건축공학과와 5년제 건축학과로 분리되어 전공심화가 이루어지고 있다. 이에 건축공학의 경우 국제적 추세에 맞추어 공학인증제(ABEEK)를 도입하고 있다. 공학인증제는 이론뿐만 아니라 설계과목을 요구하고 있어 각 대학에서는 구조설계와 관련된 다양한 설계과목들을 학생들이 수강하도록 교과과정을 재조정 하였다. 한편, 학부나 대학원 과정을 졸업하고 실무에 처음 접하는 구조엔지니어의 경우, 학교에서 습득한 기본 지식과 실무에서 이루어지는 설계 현실과의 괴리감으로 인하여 대부분 당혹스러울 때가 많이 있어 학부 고학년, 대학원생, 그리고 초보 구조엔지니어를 위한 기초적이고도 체계적인 교재가 필요함에 따라 전공 교수들과 기술사들이 함께 이번 도서를 발간하게 되었다.