특 집

구조용 경량콘크리트

경량콘크리트의 재료적 특성

Material Properties of Lightweight Concrete

서치호*

1. 서 론

경량콘크리트는 건축물의 주된 구조재료로 사용되는 보통콘크리트가 갖고 있는 단점을 개선함과 동시에 우수한 복합성능을 부여할 목적으로 제조된 콘크리트이며, 대한건축학회는 건축공사표준시방서 5.15.1에서 콘크리트의 기건단위 용적중량이 2.0t/m^3 이하인 콘크리트를 경량콘크리트로 정의하고 있다.

이러한 경량콘크리트에 대한 연구는 선진 각국에서 이미 19세기 말부터 시작되어 상당한 수준의 성과를 거두었으며, 비구조용 뿐만 아니라 구조용으로 폭 넓게 활용되고 있으나, 현재 국내에서는 대체적으로 구조용 경량골재의 부족과 경량콘크리트의 배합설계의 미숙, 경량콘크리트의 인식 부족 등으로 자중감소의 직접효과에 의한 구조용 콘크리트로써의 이용보다는 단열이나 방음 및 방수공사 보호용, 데크플레이트 바닥재료 등에 간접효과를 위한 비구조용 콘크리트로써 활용되고 있다. 그러나, 최근 적절한 혼화제의 사용과 경량콘크리트의 성능개선의 지속적인 연구와 새로운 구조용 경량골재의 등장으로 경량콘크리트의 사용이 건축생산에 활용되어질 가능성이 커져가고 있다.

2. 경량콘크리트의 종류

경량콘크리트는 그림 1과 같이 그 제조방법에 따라 일반적으로 비중이 낮은 다공질의 경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트, 콘크리트 내부에 무수한 기포를 골고루 형성시킨 경량기포 콘크리트, 그리고 골재사이에 공극을 형성시키기 위하여 잔골재의 사용을 배제한 무잔골재 콘크리트의 3가지로 대별된다.

* 정회원, 건국대학교 건축공학과 교수

2.1 경량골재 콘크리트

천연경량골재로 제조된 콘크리트는 강도가 약하고 모양도 나쁠 뿐만 아니라 천연자원의 고갈에 따른 자원의 효율적 이용 및 자연환경의 보존과 유지를 위하여 점차 그 사용이 감소되고 있으며 어느정도 강도를 요구하는 콘크리트 구조물에는 부적당하므로 혈암, 고로Slag, 점토, 규조토암, 플라이 애쉬, 절편암 등을 분쇄, 혹은 미분쇄하고 조립한 것을 1,000~1,300℃로 소성 발포시킨 인공경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트가 많이 사용되고 있다.

대한건축학회가 제정한 건축공사 표준시방서 5.1.4에서 경량골재를 사용한 콘크리트를 경량콘크리트라 정의하고 있으며, 인공경량골재콘크리트는 사용하는 골재의 종류에 따라 두가지로 분류하며, 경량콘크리트 1종의 기건단위 용적중량은 1.7~2.0t/m^3이고, 경량콘크리트 2종의 기건단위용적중량은 1.4~1.7t/m^3이다.

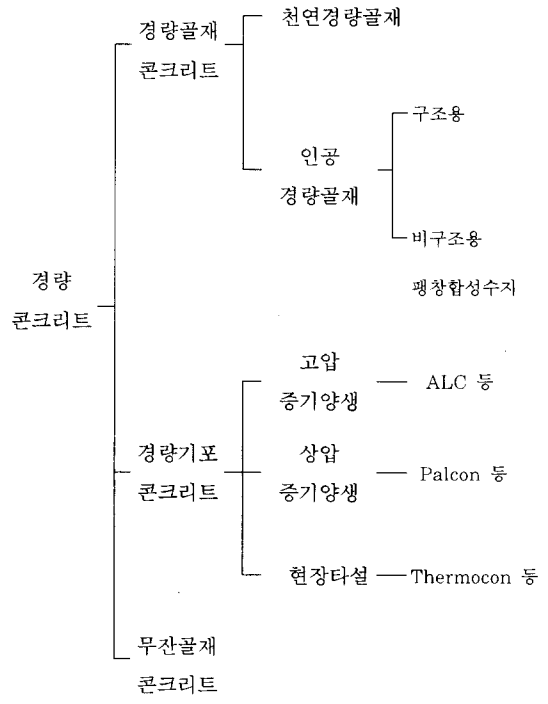

그림 1 경량콘크리트의 분류

일본건축학회에서도 2종으로 분류하고 있다.

2.2 경량기포 콘크리트

경량기포 콘크리트는 경량골재를 사용하지 않고 발포제에 의해 콘크리트 속에 무수한 독립기포를 고루 분산시켜 중량을 가볍게 한 콘크리트로, 19세기말의 한랭한 기후에 속하는 북유럽 건축에 요구되는 경량성, 단열성, 내화성 및 내구성을 만족하기 위해 개발되기 시작하였다

표 1 인공경량콘크리트의 종류
(대한건축학회 건축공사표준시방서)

사용골재에 따른 콘크리트 종류	사용골재		설계기준강도 (kgf/cm^2)	기건단위 용적중량 (t/m^3)
	굵은골재	잔 골 재		
경량 콘크리트 1종	인공 경량 골재	모 래, 부순 모래, 고로슬래그 잔골재	180 210 240	1.7~2.0
경량 콘크리트 2종	인공 경량 골재	인공경량골재 혹은 일부를 모래, 부순모래, 고로슬래그 잔골재로 대치한것	150 180 210	1.4~1.7

표 2 기포콘크리트의 분류

총 칭	제조법에 의한 분류	양생법에 의한 분류
기포콘크리트 기공콘크리트 세포콘크리트 다공질콘크리트 Aerated concrete Celluar concrete Porous concrete	1.발포법 - 발포콘크리트 - gas concrete 2.기포법 · 믹스폼법 - mix-foaming - foam concrete · 프레폼법 - pre-foamed foam concrete	1. 오토클레이브 양생에 의함. · ALC 2. 현장습윤 양생에 의함. · CLC

2.3 무잔골재 콘크리트

무잔골재 콘크리트는 잔골재를 넣지 않고 10~20mm의 굵은골재와 시멘트, 물만으로 제조된 콘크리트이다. 보통콘크리트가 굵은골재와 모르터의 두가지 물질로 되어 있다고 할

때 무잔골재 콘크리트는 충진재의 역할을 하는 모래를 배합에서 제외시킴으로써 시멘트 페이스트가 피복된 굵은골재만으로 콘크리트를 성형한다. 따라서 무잔골재 콘크리트의 내부에는 다량의 큰 공극이 형성되게 되는데 이 공극이 무잔골재 콘크리트의 물리적 특성에 크게 영향을 미치므로 무잔골재 콘크리트의 압축강도는 50~150 kgf/cm^{2}정도로 보통콘크리트 보다 낮다. 또한 단위용적중량은 대개 1.50~2.0t/m^{3}정도이고, 경량골재를 사용할 때에는 0.64t/m^{3}까지 가능하여 배합에서 단위시멘트량을 절약할 수 있으며 열적성질, 수축률 그리고 시공성 등이 보통콘크리트 보다 우수하여 비교적 그 용도가 다양하다.

2.3.1 무잔골재 콘크리트의 제조

무잔골재 콘크리트의 제조에 적합한 골재로는 천연 강자갈을 비롯하여 각국에서 기준안을 마련해 놓고 있으므로 그 골재의 입도는 10~20mm 이내로 20mm이상은 최대 5% 이내이며, 10mm를 통과하는 것도 최대 10% 이내가 되면 적합하다. 그리고 길쭉하고 모난 골재는 워커빌리티를 저해하며, 다량의 시멘트 페이스트를 필요로 하므로, 될 수록 구형에 가까운 형상의 골재를 선택하여야 하며, 그 골재의 표면조직은 다소 거친것이 부착에 좋다.

또한 무잔골재 콘크리트를 타설할 때의 적당한 반죽질기란 골재가 시멘트 페이스트로 완전히 피복되어서 단일색이 될 정도이다. 그러나 단위수량이 많을 경우 시멘트 페이스트가 흘러내려 골재와 분리된다. 따라서 무잔골재 콘크리트의 만족할만한 점착력과 시멘트 페이스트의 손실을 줄인다는 견지에서 재료분리현상을 제거하여야 한다. 이와 같은 이유 때문에 무잔골재 콘크리트의 물시멘트비 결정은 반죽질기나 워커빌리티에 크게 좌우됨이 없이 단지 시멘트 페이스트의 골재피복 및 점착력 증진에 기인하여 보통콘크리트 또는 기타 경량콘크리트의 물시멘트비 범위보다 상당히 낮은 수준에서 그 범위가 한정되어져야 한다.

무잔골재 콘크리트의 배합에 있어서 단위시멘트량은 밀도가 큰 자갈이나 쇄석을 사용하고 시멘트:골재용적배합비가 1:8일때 약 180kg/m^{3}정도의 단위시멘트량이 소요되며, 경량골재인 경우에는 1:6배합비에 250kg/m^{3}정도의 단위시멘트량이 소요된다.

이와 같이 무잔골재 콘크리트는 배합에 있어서 단위시멘트량을 상당히 절약할 수 있는데 이는 잔골재를 혼합하지 않으므로 잔골재의 표면을 피복할 만큼의 시멘트량이 절약되기 때문이다. 따라서 단위시멘트량의 증감은 단지 굵은골재의 피복두께를 좌우하게 되어 같은 단위시멘트량에서는 시멘트 골재 용적배합비가 클수록 피복두께가 두꺼워져 강도가 높게 발현된다. 그리고 배합할 때 골재는 시멘트 페이스트와 혼합하기 전에 골재의 함수상태에 대한 세심한 주의를 기울이지 않으면 안된다. 이는 골재의 흡수율이나 함수상태가 유효물시멘트비에 영향을 끼치게 되며 이는 다시 콘크리트 강도에 영향을 끼치게 되기 때문이다.

3. 경량콘크리트용 골재

3.1 개 요

경량골재는 팽창성 혈암, 팽창성 점토, 플라이애쉬 등을 원료로하여 이를 인공적으로 약1,000~1,200℃의 고온에서 소성하여 얻은 구조용 경량콘크리트 골재(잔골재, 굵은골재)를 말한다.

골재의 내부에 공극을 보유하고 표면에는 밀실한 유리질로 된 골재로서 잔골재의 경우는 절건비중이 1.8미만, 굵은골재의 경우는 절건비중이 1.5미만의 것으로 되어있고 JIS A 5002(구조용 경량콘크리트골재)에 규정된 것에는 다음 4종류가 있다.

인공경량잔골재	MA 317
인공경량잔골재	MA 417
인공경량굵은골재	MA 317
인공경량굵은골재	MA 417

M은 절건비중이 잔골재로서 1.3이상 1.8미만, 굵은골재로서 1.0이상 1.5미만을 가리키고, A는 실적율이 잔골재로서 50%이상, 굵은골재로서 60%이상을 가리킨다. 3은 콘크리트의 압축강도가 300kgf/cm^2 이상에서 400kgf/cm^{2}미만, 4는 400kgf/cm^{2}이상의 콘크리트를 사용한 것을 가리키고, 마지막의 17은 콘크리트의 단위용적중량이 1.6t/m3~1.8t/m^{3}이 되는 것을 가리키고 있다.

국내에는 KS F 2534에서 콘크리트의 경량성과 압축강도를 고려하여 구조용 경량콘크리트 골재에 대하여 규정하고 있다.

3.2 경량골재의 종류

경량골재의 종류에는 여러가지가 있으나 그 용도에 따라 구조용과 비구조용(단열, 방음이 목적)으로 분류할 수 있으며, 생산과정에 의해서는 인공 경량골재, 제철소 등에서 산출되는 부산 경량골재, 그리고 천연 경량골재 등으로 분류할 수 있다.

3.2.1 팽창고로 슬래그 (Expanded Blast Furnace Slag)

고로 슬래그를 사용하여 인공 경량골재를 만드는 방법은 고로에 녹은 상태로 남아 있는 슬래그를 꺼낼 때 냉각과정을 거친 다음 스팀을 가하여 제조하게 된다.

3.2.2 퍼라이트(Perlite)

퍼라이트는 진주암, 흑요석, 송지암, 또는 이에 준하는 석질을 분쇄하여 소성 팽창시켜 제조한다.

퍼라이트를 구성하는 앞의 세가지 암석이 함유하는 수분량은 진주암 2~5%정도, 흑요석 2%이하, 송지암 5%정도인데, 8~12mesh이하로 미분쇄하여 900~1,100℃의 최초 용해점까지 급속히 가열하면 암석의 껍질 부분이 수 많은 기밀한 소기포가 유리질의 피막에 둘러 쌓여서 경량백색의 진주상의 입상으로 10~20배 팽창한다. 이 결합수는 열에 의해서 연약해진 입자의 미세한 세포를 형성하도록 증기가 된다. 그 결과 냉각시키면 강도, 경량성, 수분침투의 저항성을 주는 많은 독립기공을 포함하는 벌꿀집과 같은 구조를 이룬다.

3.2.3 팽창질석(Expanded Vermiculite)

질석은 운모와 매우 유사한 광물로 매우 얇은 여러층으로 이루어졌으며 각 층에는 적은 수분이 있다. 이 광석을 일정한 규칙으로 분쇄하여 로에서 650~1,000℃로 가열하면 각 층의 수분이 변하면서 각 층을 분리시키고 원래 크기의 수배에서 30배까지 팽창하여 수 천개의 폐쇄된 독립기공을 가지며 이 재료가 보온효과를 가지는 것은 바로 이 때문이다. 단위용적중량은 60~130kg/m^3 정도로 단열성(열전도율 0.031~0.05kcal/m h℃), 경량성(비중0.15~0.25), 내화성(안전사용온도1,200℃), 흡음성, 절연성이 있는 장점이 있으나 질석자체의 흡수율이 90~100인 높은 결점과 역학적인 강도성능이 45kgf/cm^{2}이상의 발현이 어려운 점이 있으므로 흡수율 저하방안과 강도증진에 따른 특별한 조치가 필요하다.

3.2.4 소성 플라이애쉬(Fly-ash)

플라이애쉬는 화력 발전소에서 사용되는 가루석탄의 연소시 곱게 부서진 불연성의 작은 입자로써 플라이애쉬에 소량의 점토를 혼합하여 조립기 속에서 연속적으로 균일하게 플라이애쉬를 공급하며, 여기에 점토 Slurry를 적하시켜 회전 조립한다. 조립된 것을 로에 넣어 약 1,200℃에서 소성하면 고운것은 단위용적중량이 약 1,200kg/m^3, 굵은 것은 약 1,000kg/m^{3}의 인공 경량골재를 얻을 수 있다.

3.2.5 석탄회(Cinders Aggregate)

미국에서는 Cinders라고 불리우며 산업용 고온 용광로에서 석탄이나 코크스가 연소될 때 생성된다.

일반적으로 쉽게 구할 수 있는 원료이나 연소방법에 따라 품질이 일정하지 않고, 용해성 염류

등의 유해물질을 분리시키는 고난도의 공정이 필요하다.

Cinders를 분쇄하여 조립성을 구하고 약 1,300℃에서 소성하면 유리질로 변하며 발포한다. 그러나 이 자체에는 가소성이 없으므로 이를 조립하기 위해 내구성을 요하는 철근콘크리트에는 Cinders Aggregate의 유황성분이 철근을 부식시키는 위험이 있으므로 거의 사용되지 않고 있다.

3.2.6 팽창혈암, 팽창점토
(Expanded Shale, Expanded Clay)

이것은 거의 수평으로 누인 회전로에서 원료를 1,000~1,200℃로 가열하여 냉각시키므로써 그 과정에서 가스가 흡입하게 되고 이를 통해 팽창을 유도하여 얻는다. 보통 원료는 팽창시키기 전에 원하는 크기로 분쇄하지만, 제조과정에서 너무 크게 만들어진 골재는 따로 쇄석하여 플라이애쉬 등을 표면에 엷게 코팅(50~100μm)하기도 한다. 이렇게 표면을 처리한 반투수 유리질의 구형 골재는 코팅되지 않은 골재의 흡수력(약12~30%) 보다 낮은 흡수력을 갖고 관리가 용이하며 높은 시공연도의 콘크리트를 생산할 수 있으나 가격이 상대적으로 높다.

팽창은 또한 Sinter Strand를 사용하여 할 수도 있다. 이것은 수분을 함유한 원료를 체에 담아 연소기 밑을 통과시키므로써 원료의 바닥 깊숙히 연소를 진행시켜 가스를 흡입시키는 방법이다.

Sinter Strand에 의해 생성된 팽창혈암, 팽창점토는 단위용적중량이 650~900kg/m^{3}이며 회전로에서 생성된 것은 300~650kg/m^{3}이다. 팽창된 혈암과 점토골재로 만들어진 콘크리트는 보통 다른 인공 경량골재를 사용한 콘크리트 보다 더 높은 압축강도를 나타낸다.

3.2.7 발포폴리스틸렌 골재
(Expanded Polystyrene Bead)

직경 4~16mm정도의 구형 발포 플라스틱을 심재로 쓰고 표면에 강력 접착제를 도포한 후 그 위에 시멘트 모르터를 피복하여 양생시킨 구조용 경량골재와 진공상태의 플라스틱 심재에 연화점이 낮은 무기질 세립의 점토층을 접착하여 600~1,000℃로 소성하므로써 일정한 기공을 형성시킨 경량골재 등이 있다.

또한 직접 사용되는 초경량골재는 폴리스틸렌에 수증기의 열을 가해 팽창시켜 만든 것으로 단위용적중량이 약 12kg/m^{3}정도인 초경량 입자로, 팽창된 입자는 얇은 막으로 나누어진 약 100만개의 세포로 구성되어 있으며, 이 세포는 독립기공을 가지게 되므로 흡수성은 없고, 단열성이 우수하나 압축력에 대한 저항이 적으므로, 압축강도 형성에 직접적인 기여는 하지 못한다.

3.3 경량골재의 제조

3.3.1 천연경량골재

천연에서 얻을 수 있는 경량골재로는 거의가 화산암재로써 입형이 불안정하고 흡수율이 크다. 경량콘크리트에 사용하는 굵은골재는 퇴적 화산력을 채굴해서 체가름해 사용하고 필요에 따라서 입도가 굵은 것을 분쇄한 후 입도조정하여 사용한다. 잔골재는 대부분 화산력 생산과정에서 부수적으로 생산되는 것이고 특별히 분쇄 생산하는 경우도 있다.

천연 경량골재의 생산방식은 우선 표토를 제거하고 퇴적층을 채굴해 생산하지만 채취한 원석은 일반적으로 체를 통과시켜 크기별로 저장한다.

천연 경량골재의 개량방법은 원석을 체가름한 다음 피복기에 넣어서 그 표면에 적당한 두께의 특수 혼합물질의 피복을 만드는 것이다.

피복기는 회전드럼형으로 내부에 분산장치 및 분무장치가 각각 2개씩 구성되어 있으며 미리 습윤상태로 된 골재는 피복기 안에서 분산-분무-분산-분무의 공정을 거쳐서 표면에 피복이 만들어지고 드럼내를 굴러가는 사이 피복이 압착된다.

피복골재에 부착된 여분의 피복재는 피복기의 출구에 설치된 스크린에 의하여 털려 떨어진 다

음 양생실로 보내게 된다.

3.3.2 인공경량골재

가. 인공경량골재의 발포이론

경량골재의 원료는 가열함에 따라 부분적으로 용융을 시작하고 가스를 발생하며 광물입자의 일부분은 이것에 둘러 쌓이고 온도의 상승에 따라 더욱 높아지나 용액의 점성은 어느 정도까지 저하하고 이때부터 팽창이 시작하는 것이나, 골재내의 가스압이 높아지면 분해온도는 상승 하고, 또 가스가 용액 중에 용해하여 고온도까지 가스의 발생이 지연된다고 볼 수 있다.

골재가 팽창할 때 발생하는 가스는 O_2, CO_2이며 또 유황분이 존재할 경우는 SO_2가스가 생성된다. 또한 원료가 풍화하거나 소성온도가 지연되어 탄소분이나 유황분이 상실되면 발포능력은 저하되고, 또 점토질 광물이나 화산유리 등에 함유된 결합수의 분해에 따라 생기는 수증기도 다소 발포에 도움을 줄 가능성이 있다.

점토질원료를 가열하면 우선 함유수분의 증발이 시작되고 또 점토광물의 대부분은 500~600℃에서 결합수를 방출하고 반응성이 높은 상태로 변함과 동시에 소결이 시작된다.

표 3 경량골재의 종류

분 류		종 류	주요 원료	제 법	형상	골재의 범위
구조용	인공경량골재	비구조용	팽창혈암 팽창점토	분쇄-소성-분류	하천 모래형	굵은골재 잔골재
		조립형	팽창혈암 팽창점토	미분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은골재
		성형형	팽창혈암 팽창점토	분쇄-성형-건조-소성-분류	고치형	잔골재
		파쇄형	팽창혈암 팽창점토	분쇄-소결-분쇄-분류	쇄석형	굵은골재 잔골재
	부산경량골재	소성 플라이애쉬	플라이애쉬 점토	분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은골재
		팽창슬래그	제철슬래그	수쇄- 폭기팽창-분류	쇄석형	굵은골재
		팽창석탄	석탄 팽창점토	분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은골재
		가공석탄재	석탄재	분류-시멘트페이스트 피복가공	쇄석형	굵은골재
	천연경량골재	화산력	화산력	굴삭-분쇄-분류	쇄석형	굵은골재
		가공화산력	화산력	화산력-시멘트페이스트피복가공	쇄석형	굵은골재
비구조용		팽창진주암	진주암	분쇄-소성-분류	하천 모래형	잔골재
		팽창 질석	질 석	분쇄-소성-분류	쇄사형	잔골재 굵은골재
		팽창규조토	규조토	분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은골재
		팽창흑요석	흑요석	분쇄-소성-분류	쇄사형	잔골재 굵은골재
		발포합성수지	합성수지	폴리스틸렌을 증기팽창제조	구형	잔골재
		미네랄 울	슬래그울 합성수지	합성수지로 둥글게제조		
		석탄재	석탄계	분류-수세		
		화산사	화산계	채굴-수세-분류	쇄사형	굵은골재
		갱화석	갱화석	채굴-가공성형	블록형	

또한 팽창혈암을 소성하면, 겉보기비중이 800℃정도의 가열로 비중의 극소치 1.1~1.6에 달한 후 소결, 수축하고 1,000℃정도에서는 비중이 2.2~2.3이 되며, 1,000~1,100℃사이에서 발포하여 겉보기 비중이 저하된다. 수축율은 800~1,050℃사이에서 가장 저하된 상태를 나타낸다.

나. 인공경량골재 제조방법

인공경량골재의 소성에는 일반적으로 회전로가 사용되며 제조된 인공경량골재는 비조립형, 조립형과 분쇄형으로 나누어 진다.

1) 비조립형

비조립형 인공경량골재는 원석을 소정의 크기로 분잡하여, 체가름 한 다음 입경별로 회전로에 넣어서 1,150~1,200℃의 고온도로 소성한다. 이 때에 팽창혈암에 포함되어 있는 기화물질의 작용에 의하여 내부에는 미세한 독립기포를 다수 포함하는 다공체가 되고 표면은 긴밀하고 경고한 피막으로 고르게 덮이게 된다. 분잡한 입자가 잡석형태이나 회전로에서 Rolling작용에 의하여 소성 후에는 강자갈과 같은 형상을 나타내는 특징이 있다.

2) 조립형

원석을 미분쇄하여 조립기에 이하여 각종의 치수로 조립한 것과 압출성형기에서 가공한 것을 건조한 다음 약 1,000℃로 소성하는 것을 원칙으로 하나 혈암을 원료로 한 인공경량골재는 고온소성(1,250℃)에서 유리하며 소성시간은 5~15분이 가장 적당한 것으로 밝히고 있다.

3) 분쇄형

가연성분을 가진 점토, 플라이애쉬 등을 소성하여 인공 경량골재로 만든다. 이 경우 소성 후 분쇄하므로 입도조정을 해도 형상이 나쁜 경우가 많다.

골재의 소재 원료가 불균질하거나 함수율이 많은 경우에는 균열이 발생하기 쉽고 소성시에 탈수에 의해서 폭열하기 쉬우므로 사전에 건조기로 충분히 건조시켜서 소성해야만 한다. 또한 원료의 화학적 조성과 소성의 정도에 따라 제품의 품질이 변하므로 원료제조시에 주의 할 필요가 있다.

3.4 경량골재의 성질

경량골재를 사용한 경량콘크리트에 대하여는 대한건축학회에서 제정한 건축공사표준시방서 5.15.1에서 콘크리트의 기건단위 용적중량이 2.0t/m^3이하인 콘크리트의 총칭이라 정의하고 있다. 또한 이에 사용되는 경량골재의 품질은 표 4와 같다.

표 4 경량골재의 품질

재료관련 시방등급	재료에 의한 구분*	콘크리트 압축강도에 의한 구분*	안정성* (%)	조립율의 변동 허용범위		부립율 (%)
				굵은 골재	잔골재	굵은 골재
1 급	인공	400 300	-	±0.30	±0.15	10이하
2 급	인공* 천연* 부산	400 300 200	12** 이하 인공은 제외	±0.30	±0.15**	10이하
3 급	인공· 천연· 부산	400 300 200	20이하 .인공은 제외	인공 ±0.30	인공 ±0.15	-

(주) * KS F 2534(구조용 경량골재)에 따른다.

** 천연·부산(부산)경량골재로서 설계기준강도 또는 지정강도가 180kgf/cm^2 미만의 경우, 안정성은 20%이하, 잔골재의 조립율의 변동허용 범위는 ±0.25로 한다.

3.4.1 입도 및 최대칫수

인공경량골재는 입도의 조정이 가능하여 경량골재의 입도 및 균등성은 강자갈, 강모래 보다 더 정확히 할 수 있으나, 경량골재는 입경에 따라서 비중과 흡수량 뿐만 아니라, 골재의 강도가 다르므로 입도의 균질성에 대하여 주의 하여야 하며, 인공경량골재를 사용한 경량콘크리트는 보통콘크리트 보다 일반적으로 시공연도가 좋지 않으므로 좋은 입도분포를 지녀야 한다. 경량골재의 적당한 입도범위에 대하여는 ASTM C 330 「Lightweight Aggregate for Structural Concrete」에 규정이 있고 일본에는 JIS A 5002에 규정되어 있으나 우리나라 KS F 2534에서는 콘크리트의 경량성과 압축강도를 고려하여야 하는 구조용 경량콘크리트 골재에 대하여 규정되어 있다.

각국 전부 굵은골재의 최대치수를 25mm로 제

한하였으며, 이는 경량콘크리트의 강도구성과 그 시공연도에 기인된 것으로 사료된다. 그리고 미세립 잔골재의 증가는 콘크리트의 단위수량을 증가시키는 원인이 되고, 또한 미세립량의 변동은 콘크리트의 반죽질기와 공기량에 현저한 영향을 미치고 콘크리트의 품질관리를 곤란하게 한다 잔골재 입도의 변동에 대하여서는 공사중에 허용되는 조립율의 변화를 ±0.20이하로 하고 있다. 그러나 경량잔골재의 조립율 변화는 비중, 표면수 등의 측정에 기초가 되는 표면건조내부포화상태의 판정에도 영향을 미치므로 콘크리트의 품질관리가 어렵게 된다.

따라서 배합 중 허용되는 경량잔골재조립율의 변화는 ±0.15% 정도 이하로 하는 것이 바람직하며, ASTM C 330에서는 「경량 잔골재의 조립율이 7%이상 틀리는 경우에는 소요의 품질의 콘크리트가 만들어지는 것이 확인되지 않으므로 새로운 배합설계를 하여야 한다」고 규정되어 있다. 또한 골재입도의 크기에 따라 골재비중이 변화하며, 일반적으로 골재의 입경이 클 수록 비중이 작아지는 경향을 나타내고 있다.

3.4.2 단위용적중량

표 5 ASTM C 330의 경량골재 입도표준

체눈(mm)			25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.3	0.15
통과백분율	굵은골재	25	95								
		~10			25		0				
		~5			~60		~10				
		20	0	90		20	0				
		~5	100	~10		~6	~10				
		15		0	90	40	0	0			
		~5		100	~10	~8	~20	~10			
		10			0	80	5	0			
		~2.5			100	100	~40	~20			
	잔골재						85		40	10	5
						100	~10		~80	~35	~25
							0				

인공경량골재의 단위용적중량은 골재의 겉보기비중, 형상 및 입자의 조성, 함수율, 계량방법 등에 따라 달라지며 동일한 등급과 입자의 형태에서 골재의 단위용적중량은 비중에 비례한다. 그러나 동일한 비중이라도 단위용적중량이 다르게 나타나는 것은 서로의 공극율이 다르기 때문이다. 즉 그 입형이 구형일 수록 무겁고, 부정형 또는 모가 나 있을 수록 가볍다.

RILEM은 경량골재의 단위용적중량을 굵은골재는 0.98t/m^{3}이하 잔골재는 1.2t/m^{3}로 정의하고 있다.

3.4.3 비 중

경량골재는 특유의 다공성 내부구조로 인해 보통골재에 비해 비중이 낮다. 이러한 비중은 골재의 입경에 따라 변하는데 골재의 입경이 클 수록 작아지는 경향이 있다.

경량골재의 석질의 진비중은 보통골재와 큰 차이가 없으나 겉보기비중은 진비중 보다 적은 값을 가진다. 골재 중에 다수의 공극을 내포하고 있기 때문에 공극이 증대될 수록 겉보기비중값은 적어진다. 경량골재의 습윤상태는 4가지의 상태로 나뉘어 진다. 즉 절건상태, 기건상태, 표면건조상태, 습윤상태로 나타내지며, 경량골재의 비중은 이 상태에 대응하여 절건비중, 기건비중, 표건비중으로 나뉘어 불리운다.

표건비중은 콘크리트의 배합설계 등에 쓰이는 실용상 중요한 값이나, 흡수시간에 의하여 변화하고, 또 흡수속도는 골재의 종류에 의하여 상당히 다르므로 표건비중은 골재의 품질을 표시하는데 적당하지 않다. 절건비중은 각 골재에 대하여 일정치를 나타내므로 골재의 품질을 표시하는 기준으로 한다.

또한 골재의 비중은 생산되는 경량콘크리트의 중량에 직접 영향이 있으므로 적절한 경량콘크리트를 만들려면 골재의 비중을 적당한 값 이하로 하지 않으면 안된다. 그러나 인공경량골재의 비중은 작을 수록 좋은 것만은 아니며 비중이 지나치게 작으면 일반적으로 골재의 강도가 약하고 콘

크리트의 강도, 강성, 내구성도 저하하는 경향을 나타내며 재료분리 및 Bleeding현상이 생겨 콘크리트의 균질성을 잃게 되기 쉽다.

표 6 KS F 2534의 구조용 경량골재 입도표준

구분	각체를 통과하는 백분율 (%)								
	25mm	19mm	13mm	10mm	No.4	No.8	No.16	No.50	No.100
잔골재									
No.4 ~ 0	-	-	-	100	85~100	-	40~80	10~35	5~25
굵은 골재									
25 ~ 13mm	95~100	-	0~10	-	-	-	-	-	-
25mm ~ No.4	100	-	25~60	-	0~10	-	-	-	-
19mm ~ No.4	100	80~100	-	20~60	0~10	-	-	-	-
13mm ~ No.4	-	100	80~100	40~80	0~10	0~10	-	-	-
10mm ~ No.8	-	-	100	80~100	5~40	0~20	-	-	-
잔골재 굵은 골재의 혼합물									
1mm ~ No.4	-	100	85~100	-	50~80	-	-	5~20	2~15
10mm ~ No.4	-	-	100	80~100	65~90	35~65	-	10~25	2~15

3.4.4 흡수율

경량골재의 흡수율은 보통골재에 비하여 일반적으로 대단히 큰 것은 골재속의 다공의 공극이 있기 때문이다. 잠재적으로 공극 만큼 흡수가 가능하나, 실재에 있어서는 그 만큼 흡수되지 않는다. 이것은 공극중에 미세한 독립기포가 함유되어 있기 때문이나, 이에 반하여 연속된 기포의 경우에는 하나의 Cell이 차례로 흡수되어 흡수량이 커진다. 이와 같이 독립기포와 연속기포의 양적분포상태에 따라 흡수량이 변화되므로 골재표면조직의 상태가 대단히 중요하다. 인공경량골재의 표면은 소성시에 용융할 슬래그질의 층이 형성되어 있어, 이층의 수밀성으로 내부의 약간의 연속기포가 있어도 흡수율은 적다.

또한 경량콘크리트를 혼합하는 중에 수분의 일부가 골재중에 흡수되어, 경량콘크리트의 콘시스턴시가 변화한다.

따라서 흡수율에 의하여 슬럼프치가 작게되면 잔골재율의 증가, 또는 분말도가 높은 시멘트를 사용하여 경량콘크리트의 워커빌리티를 조절하여야 한다.

보통 포틀랜드 시멘트와 기건상태의 골재를 사용한 경우, 반죽하여 혼합시킨 초기에 현저하게 골재중에서 흡수가 일어난다. 흡수량 20%의 골재에서는 약간의 물을 유출하는 경향이 있으나, 10%의 흡수의 골재에서는 시간의 경과와 함께 물을 흡수하기 시작한다.

경량골재의 흡수율이 크면 콘크리트의 배합관리가 어려우며, 콘크리트의 제조시공시에 있어서 불안정한 흡수의 발생을 방지하기위해 pre-wetting하여야 한다.

24시간 침수시험에 의하면 인공경량골재는 기건상태 골재중량의 5~20%정도를 흡수하는 반면 보통골재는 2%이하를 흡수한다. 그러나 야적상태시의 흡수량은 경량골재가 3~13%, 보통골재가 5~10% 혹은 그 이상이다. 이와같이 경량골재와 보통골재의 24시간 침수시험과 야적상태시의 흡수량 결과가 서로 반대로 나타나는 것은 경량골재의 수분은 골재내부로 흡수되지만 보통골재는 유동수량의 대부분이 골재표면상에 있기 때문이다. 이러한 차이점은 배합의 설계단계에서 부터 관리에 이르기 까지의 전과정에 걸쳐 유의해야 한다.

또한 사전 흡수된 경량골재의 잔존수량에 대하여 小阪義夫는 재령이 6년 경과한 경량콘크리트내의 경량골재에 수분이 잔존하고 있다고 밝혔으며, 이는 자연건조에 의해 증발된 수량 이외의 수량을 나타내며, 이는 사용하는 골재, 시험체의 크기, 비중변화상황에 따라 크게 달라진다. 따라서 西岡思郎은 콘크리트 비빔중에 생기는 골재의 수분이동에 대한 실험결과로 보통포틀랜드 시멘트

를 사용할 경우 최적경량골재 흡수량을 18%, 조강포틀랜드 시멘트를 사용할 경우 약 10%로 하여야 된다고 보고하고 있으며 초고강도 경량콘크리트를 만들기 위하여 높고 빠른 흡수력을 지닌 인공경량골재에 대하여 특별한 제조과정이나 피복에 의하여 흡수율의 저하방안이 강구되어져야 한다.

3.4.5 유해물 함유량

경량골재의 유기불순물 시험은 KS F 2510(콘크리트용 모래에 포함되어 있는 유기불순물 시험방법)에 따르며, 유해물 함유량의 한도를 나타내면 표 7과 같다.

3.4.6 내구성

가. 안정성

골재의 안정성은 화학적 안정성과 물리적 안정성으로 분류하여 생각할 수 있다. 화학적 안정성은 경량골재의 제조과정이 1,200℃에 가까운 고온에서 소성하기 때문에 자연조건에서 화학작용에 대하여는 거의 영향을 받지 않는다고 생각할 수 있다. 또 물리적 안정성은 동결융해 작용에 대한 저항성의 지표까지 고려할 경우 시험방법으로써 JIS A 1122(유산나트륨에 의한 골재의 안정성 시험)이 있다

표 7 유해물 함유량의 한도(중량백분율)

종 류	최 대 값	품 질
강열감량	1.0	0.3이하
무수유산(SiO_2)	0.5	0.5이하
염화물(NaCl)	0.01	흔적
유기불순물	표준색보다 진하지 않은 것	-
점토덩어리	1.0	0.5이하
굵은골재중의 부립율	10.0	10.0이하

경량콘크리트에 있어서는 JIS A 1122의 시험결과와 실제의 동결융해에 대한 저항성과의 사이에 관련이 인정되지 않기 때문에 다른 방법에 의함이 바람직하다. 따라서 동결융해작용에 대한 저항성이 필요한 장소에 경량골재를 사용하였을 경우는 신뢰할 수 있는 자료에 의하며, 시험방법으로서 ASTM C 6667(A 또는 B법)에 의해 확인할 필요가 있다. 동결융해의 염려가 있는 경우에는 골재의 흡수율을 5%이하로 버킷타설하고 굵은골재의 일부에 보통골재를 사용한다면 내동결융해성이 좋게 된다.

경량골재의 종류로서는 조립형 경량골재가 비조립형에 비하여 약간 동결융해성에 유리하다.

나. 내마모성

경량골재는 보통골재에 비하여 내마모성이 떨어진다고 생각하고 있지만 콘크리트 중의 골재상호간의 마모는 재료의 반죽혼합시험의 결과로부터 인정할 수 없다.

3.4.7 강 도

인공경량골재의 강도는 골재 내부 공극의 영향으로 보통골재 보다 적은 것이 일반적이다. 인공경량골재의 경우에는 표면의 견고한 피막층에 의하여 강도가 크다. 인공경량골재의 강도를 직접 측정하는 방법은 극히 어려우므로 파쇄시험에 의한 강도를 기준으로 하여 추정하고 있으며, 이 방법에 따라 자갈, 잡석, 인공경량골재, 화산력의 강도를 상대적으로 비교한 결과는 다음과 같다.

경량골재의 강도가 시멘트 페이스트의 강도에 비하여 상대적으로 적은 경우 콘크리트의 강도는 골재의 강도에 지배당하므로, 시멘트 페이스트의 강도, 물시멘트비 이외에도 골재의 강도 및 골재의 공극율, 골재의 사용량의 영향을 받는다.

표 8 파쇄시험 결과 예

굵은골재의 종류	파쇄값(%)	10% 파쇄하중 (t)
강 자 갈	11~20	36 ~ 20
쇄 석	17~23	25 ~ 18
인공 경량 골재	33~45	14 ~ 8
화 산 력	-	5 ~ 3

3.4.8 동결융해저항성

경량골재의 동결융해에 대한 저항성은 골재중에 흡수되는 수량과 관계가 있다. 골재중에 함유되어 있는 수분의 동결에 의한 팽창으로 강도가 약한 골재의 조직이 파괴되므로 동결융해에 대항하는 저항성은 보통골재 보다 현저히 적다.

그러나 골재중에 흡수성향이 적은 경우와 골재내부에 독립기포가 다수 분포되어 있는 경우에는 골재 자신의 단열성이 증가되며, 동결융해에 대항하는 저항성이 크다.

3.4.9 열전도율

일반적으로 공극을 많이 함유한 재료의 열전도율, 선팽창율은 작다. 이는 공기의 열전도율은 보통 재료중의 최소(λ=0.022kcal/mh℃상온)이므로 재료중에 있는 기포의 상태에는 대류 및 복사에 의한 열이동이 적기 때문이다.

또한 비중이 적은 것일 수록 열전도율이 작아진다. 경량골재의 열전도율은 비중에 의해서 결정되며, 다른 요인에 대하여는 크게 영향을 받지 않는다.

경량골재는 다공극의 독립기포로 되어 있어 흡습과 흡수를 방지하여야 하나, 이 공극이 수증기 상태나 물의 상태에 있으면 단열효과가 떨어진다.

3.5 골재의 품질관리

경량골재의 사용시 흡수율은 일반 펌프시공의 경우 굵은골재 25%이상, 잔골재 16%이상으로 하는 것이 필요하며, 골재의 포화도는 콘크리트의 펌프압송성에 영향을 미친다. 골재의 흡수포화도 정도는 펌프압송에 있어서 콘크리트의 제성질(콘시스턴시, 단위용적중량 등)의 변화를 좌우, 콘크리트의 품질관리상 중요한 요소가 된다. 골재의 흡수포화도가 큰 것은 펌프압송시의 콘크리트의 물리적성질의 변화가 적게되고, 펌프압송으로 하는 콘크리트 타설경우에 유리하다.

통상 최대흡수율은 잔골재 20%, 굵은골재 35%로 한다. 경량골재의 소요 흡수율은 각 메이커의 제조공장에 의해 확보하는 것이 필요하고 소정의 품질증명서에 명시하고 생콘크리트공장에서 제품과 함께 송부하며, 그 기재사항을 확인하는 것이 필요하다. 또 생콘크리트 공장에서의 경량골재의 흡수율은 골재의 방책안에 저장하는 경우에는 제조공장 출하시의 흡수율을 확보할 수 있는 저장설비로 스프링쿨러 등의 물을 분사하는 설비를 필요로 한다.

4. 결 론

건물이 고층화·대형화 함에따라 높은 압축강도를 지니면서 자체 단위용적중량은 작은, 고강도 경량골재콘크리트의 개발을 위한 연구들이 진행되어져 왔으며, 이미 선진국에서는 경량골재콘크리트의 경량화와 고강도화에 대한 연구와 응용이 활발히 진행되어 이미 해양구조물 및 지상구조물 등 많은 분야에 적용이 되기 시작하고 있다.

경량골재의 비중과 흡수율은 콘크리트의 밀도 증가와 열절연값은 물론 내구성을 떨어뜨리는 원인이 되므로 경량골재의 흡수율 저하를 위한 특별한 제조과정이나 피복에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료되며, 흡수율이 낮은 경량골재로 제조된 경량골재콘크리트는 경량화와 동해에 대한 저항성, 시공연도의 개선과 강도증진 등의 유리한 효과를 얻을 수 있으므로 비강도가 크고 흡수율이 낮은 새로운 경량골재를 사용한 경량골재콘크리트의 개발 및 활용이 기대되어진다.

따라서 경량콘크리트는 자중의 감소에 따른 구조부재 단면의 축소가 가능하고, 단열, 방음 등의 효과와 더불어 건축구조물 전체의 효용성이 증대되며, 고층구조물의 구조, 프리스트레스트 콘크리트 및 프리케스트 제품에 이르기까지 광범위하게 사용되어질 것으로 믿어진다.