

인공 경량골재의 개발현황과 특성

서 치 호
건국대학교 건축공학과 교수

1. 서언

각종 구조물의 주요재료로 사용되는 콘크리트에서 골재가 차지하는 비중은 약 70%정도이며, 최근의 급속한 경제 성장과 건설기술등의 발달로 건축물이 대형화, 고층화 되어감에 따라 콘크리트의 수요가 급격히 증대되어 양질의 콘크리트용 골재부족 현상을 초래하고 있어 골재의 재질적인 문제와 양적인 문제해결이 건설재료 분야의 큰 당면문제로 제기 되고 있다.

따라서 과거 천연골재인 강자갈, 강모래에만 의존하던 선진각국에서는 천연골재의 부족현상과 자연보호의 측면에서 인공골재를 개발하기에 이르렀고, 콘크리트의 결점중의 하나인 강도에 비해 자중이 큰 것을 경감하고자 인공경량골재의 개발과 연구에 박차를 가하여, 최근에 이르러서는 기술개발과 장기간의 연구성과를 토대로 구조용 경량콘크리트를 더욱 경량화할 목적으로 비중 1.0이하의 초경량골재를 개발하여 구조용 경량콘크리트로 실용화하고 있다. 이렇게 인공 경량골재의 개발과 생산이 급속히 진행되어 온 이유를 살펴보면 다음과 같다.

- 강자갈, 강모래와 같은 천연골재의 고갈.
- 자연환경의 보존과 유지.
- 구조물의 대형화, 초고층화.
- 각종부재의 경량화.
- 해상 구조물의 축조증가.
- 대형 콘크리트의 프리캐스트, 프리캐스트화.
- 시공의 간이화, 신속화.

2. 인공 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 있으며, 개발된 주요 인공 경량골재의 특징은 표 1 같다.

2-1. 팽창 고로 슬래그(Expanded Blast Furnace Slag)

고로 슬래그를 사용하여 인공 경량골재를 만드는 방법은 고로에 녹아있는 상태로 남아있는 슬래그를 꺼낼때 냉각과정을 거친다음 스팀을 가하여 제조하게 된다.이 공정은 냉각방법의 두가지로 나뉜다.

① Water-jet process

고로에서 슬래그를 꺼낼때 녹은상태의 슬래그에 스프레이로 일정량의 물을 고압분사하여 통기성이 큰 다공질의 골재를 만드는 방법이다.

② Machine process

녹아있는 상태의 슬래그에 일정량의 물을 넣어 빠르게 휘석음으로써 수증기가 흡입되어 발포 시키는 방법이다.

이상과 같은 냉각과정과 입자의 크기, 품질의 등급에 따라 300-1100kg/m³의 단위용적중량을 갖는 골재를 얻을 수 있다.

표1. 경량골재의 종류

분류	종류	주요 원료	제조 방법	형상	골재의 범위
인공 경량 骨料	비조립형	팽창현암, 팽창점토	분쇄-소성-분류	하진 모래형	굵은골재, 잔골재
	조립형	팽창현암, 팽창점토	비분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은 골재
	성형형	팽창현암, 팽창점토	분쇄-성형-건조-소성-분류	고지형	잔골재
	과쇄형	팽창현암, 팽창점토	분쇄-소길-분쇄-분류	쇄석형	굵은골재, 잔골재
호산 경량 骨料	소성플라이애쉬	플라이애쉬 점토	분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은 골재
	팽창 슬래그	제철 슬래그	수쇄-복기팽창-분류	쇄석형	굵은 골재
	팽창 석탄	석탄, 팽창점토	분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은 골재
	가공 석탄재	석탄재	분류-시멘트베이스트 피복가공	쇄석형	굵은 골재
자연 경량 骨料	화산력	화산력	분쇄-분쇄-분류	쇄석형	굵은 골재
	가공화산력	화산력	화산력-시멘트베이스트 피복가공	쇄석형	굵은 골재
비 구 조	팽창 진주암	진주암	분쇄-소성-분류	하진 모래형	잔골재
	팽창 질석	질석	분쇄-소성-분류	쇄석형	잔골재, 굵은골재
구 조	팽창 규조토	규조토	분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은 골재
	팽창 흑요석	흑요석	분쇄-소성-분류	쇄석형	잔골재, 굵은골재
용	발포 합성수지	합성수지	폴리스티렌을 증기팽창제조	구형	잔골재
	미네랄 울	슬래그울, 합성수지	합성수지로 동글게 제조		
	석탄재	석탄재	분류-수쇄		
	화산사	화산사	쇄골-수쇄-분류	쇄석형	굵은 골재
	생화식	생화식	쇄골-가공성형	분류형	

2-2. 퍼라이트(Perlite)

퍼라이트는 상품명이지 않고 광학상의 명칭으로 진주암, 흑요석, 송지암 또는 이에 준하는 석질을 분쇄하여 소성 팽창시켜 제조한다.

퍼라이트를 구성하는 앞의 세가지 암석이 함유하는 수분량은 진주암 2-5%정도, 흑요석은 2%이하, 송지암은 5%정도인데, 8-12mesh이하로 미분쇄하여 900-1100℃의 최종 용해점까지 급속히 가열하면 암석의 겉질부분이 수많은 기밀한 소기포가 유리질의 피막에 둘러싸여서 경량백색의 진주상의 입상으로 10-20배 팽창한다. 이 결합수는 열에 의해서 연약해진 입자의 미세한 세포를 형성하도록 증가가 된다. 그 결과 냉각시키면 강도, 경량성, 수분침투의 저항성을 주는 많은 독립기공을 포함하는 벌꿀집과 같은 구조를 이룬다.

2-3. 팽창질석(Expanded Vermiculite)

질석은 운모와 매우 유사한 광물로 얇은 여러층으로

이루어졌으며 각층에는 적은 수분이 있다. 이 광석을 일정한 규칙으로 분쇄하여 로에서 650-1000℃로 가열하면 각 층의 수분이 변하면서 각 층을 분리시키고 원래 크기의 수배에서 30배까지 팽창하여 수 천개의 패쇄된 독립기공을 지니게 되며 이 재료가 보온효과를 가지는 것은 바로 이 때문이다. 단위용적중량은 60-130kg/m³ 정도로 주요 특성으로 단열성(열전도율 0.031-0.05 Kcal/mh℃), 경량성(비중 0.15-0.25), 내화성(안정사용온도 1,200℃), 흡음성, 절연성이 있는 장점이 있으나 질석 자체의 흡수율이 90-100%인 높은 결점과 압축강도가 45kg/cm² 이상 발휘되기 어려운 점이 있으므로 흡수율 저하 방안과 강도증진에 따른 특별한 조치가 필요하다.

2-4. 소성 플라이애쉬(Fly-ash)

플라이 애쉬는 화력 발전소에서 사용되는 가루석탄의 연소시 급격 부식된 불연성의 작은 입자로서, 조립기의 속에서 연속적으로 균일하게 플라이애쉬를 공급하며,

여기에 점토 Slurry를 적하시켜 회전 조립한다. 조립된 것을 로에 넣어 약 1,200℃에서 소성하면 고온 것은 단위용적중량이 약 1,200kg/m³, 굵은 것은 약 1,000kg/m³의 인공 경량골재를 얻을 수 있다.

2-5. 석 탄 회(Cinders Aggregate)

미국에서는 Cinders라고 불리우며 산업용 고온 용광로에서 석탄이나 코크스가 연소될때 생성된다.

일반적으로 쉽게 구할 수 있는 원료이나 연소방법에 따라 품질이 일정하지 않고, 용해성 염류등의 유해물질을 분리시키는 고난도의 공정이 필요하다. Cinders를 분쇄하여 조립성을 구하고 약 1300℃에서 소성하면 유리질로 변하며 발포한다. 그러나 이자재에는 가소성이 없으므로 이를 조립하기 위해 내구성을 요하는 철근콘크리트에는 Cinders Aggregate의 유황성분이 철근을 부식시키는 위험이 있으므로 거의 사용되지 않고 있다.

2-6. 팽창혈암, 팽창점토(Expanded Shale, Expanded Clay)

이것은 거의 수평으로 놓인 회전로에서 원료를 1000-1200℃로 가열하여 냉각시킴으로써 그 과정에서 가스가 흡입하게 되고 이를 통해 팽창을 유도하여 얻는다. 보통 원료는 팽창시키기 전에 원하는 크기로 분쇄하지만, 제조 과정에서 너무 크게 만들어진 골재는 따로 채석하여 사용하며 플라이에쉬 등을 표면에 얇게 코팅(50-100μm)하기도 한다. 이렇게 표면을 처리한 반투수 유리질의 구형골재는 코팅되지않은 골재의 흡수력(약 12-30%)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 연소가 밀을 통과시킴으로써 원료의 바닥 깊숙이 까지 연소를 진행시켜 가스를 흡입시키는 방법이다.

Sinter Strand에 의해 생성된 팽창혈암, 팽창점토는 단위용적중량이 650-900kg/m³이며 회전로에서 생성된 것은 300-650kg/m³이다. 팽창된 혈암과 점토골재를 만들어진 콘크리트는 보통 다른 인공 경량골재를 사용한 콘크

리트보다 더 높은 압축강도를 나타낸다.

2-7. 발포 폴리스티렌 골재(Expanded Polystyrene Bead)

직경 4-16mm정도의 구형 발포 플라스틱을 심재로 쓰고 표면에 강력 접착제를 도포한 후 그위에 시멘트 몰탈을 피복하여 양생시킨 구조용 경량골재와 진공상태의 플라스틱 심재에 연화점이 낮은 무기질 세립의 점토층을 접착하여 600-1000℃로 소성함으로써 일정한 기공을 형성시킨 경량골재등이 있다. 또한 직접 사용되는 초경량골재는 폴리스티렌에 수증기의 열을 가해 팽창시켜 만든 것으로 단위용적중량이 약 12kg/m³정도인 초경량 입자로, 팽창된 입자로 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. 인공 경량골재의 특성

3-1. 입도

경량골재의 입도에 관해서는 ASTM C 300 「Lightweight Aggregate for Structural Concrete」에 상세히 기술되어 있으며 우리나라에서는 KS F 2534에 규정되어 있다.

인공 경량골재는 입도의 조정이 가능해 경량골재의 입도 및 균등성은 강자갈, 강모래보다 더 정확히 할 수 있다. 그러나 경량골재는 입경에 따라서 비중과 흡수량 뿐만 아니라 골재의 강도가 다르므로 입도의 균질성에 대하여 주의하여야 하며 인공 경량골재를 사용한 콘크리트는 일반적으로 시공연도가 좋지 않으므로 인공 경량골재는 좋은 입도분포를 가져야 한다.

3-2. 입형 표면구조

경량골재의 입형과 표면구조는 원료와 공정에 따라 매우 다르며 그 입형은 정육면체에서 부터 상당히 둥근

모양까지, 또한 표면구조는 대단히 매끄러운 정도부터 거의 울퉁불퉁한 정도까지 다양하다.

이처럼 다양한 입형과 표면구조는 콘크리트 배합시 시공연도, 잔골재와 굵은골재의 비, 단위 시멘트량, 필요수량 등의 요소에 영향을 주며 천연 경량골재는 입형이 불량하므로 소요의 시공연도를 얻기위하여 단위수량의 증가 또는 혼화제의 사용을 필요로 한다.

3-3. 비중

인공 경량골재는 특유의 다공성 내부구조로 인해 보통 골재에 비해 비중이 낮다. 이러한 비중은 골재의 입경에 따라 변하는데 골재의 입경이 클수록 작아지는 경향이 있다.

인공 경량골재의 비중은 작을수록 좋은 것만은 아니며 비중이 지나치게 작으면 일반적으로 골재의 강도가 약하고 콘크리트의 강도, 강성, 내구성도 저하하는 경향을 나타내며 재료분리 및 Bleeding 현상이 생겨 콘크리트의 균질성을 잃게되기 쉽다.

3-4. 흡수율

인공 경량골재는 다공성 구조이기 때문에 보통골재보다 높고 빠른 흡수력을 가지고 있으나 특별한 과정이나 피복에 의해 흡수성의 저하가 가능하다.

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

3-5. 강도

인공 경량골재의 강도는 골재 내부 공극의 영향으로

보통골재보다 적은 것이 일반적이다. 인공 경량골재의 경우에는 표면의 견고한 피막층에 의하여 강도가 크다. 인공 경량골재의 강도를 직접 측정하는 방법은 극히 어려우므로 파쇄시험에 의한 강도를 기준으로 하여 추정하고 있다.

인공경량골재의 강도가 시멘트 페이스트의 강도보다 작은 경우 콘크리트의 강도는 시멘트 페이스트의 강도, 물시멘트 비 및 골재의 공극율, 골재의 사용량 등의 영향을 받는다. 또한 골재의 강도를 추정하기 위하여 콘크리트의 압축강도에서 골재의 강도를 간접적으로 추정할 수 있다. 이에 대하여는 Bache, Ramos and Shah 등이 각기 추정식을 제안하고 있다.

○ Bache의 식: $(F_{ca}/F_{cm})^n = F_{cc}/F_{cm}$ 다만, $2 < F_{cm}/F_{ca} < 15$

○ Ramos · Shah의 식: $F_{ca} = nF_{cc}(1 - (F_{cc}/F_{cm})(1 - n))$

다만, F_{ca} : 골재의 압축강도

F_{cm} : 모르타의 압축강도

F_{cc} : 콘크리트의 압축강도

n: 골재의 용적비

상기식에서 Bache의 식은 천연 경량골재와 같이 골재의 강도가 작은 경우를 대상으로 하였으며, Ramos · Shah의 식은 골재와 모르타간의 부착력이 콘크리트의 파괴에 이르기까지 충분하다는 가정 아래 적용된다.

3-6. 단위용적중량

인공 경량골재의 단위용적중량은 골재의 길보기 비중, 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 구형일수록 무겁고, 부정형 또는 모가 나있을수록 가볍다. RILEM은 경량골재의 단위용적중량을 굵은골재는 0.98 t/m³ 이하 산 골재는 1.2 t/m³로 정의하고 있다.

3-7. 동결융해 저항성

인공 경량골재의 동결융해에 대한 저항성은 골재중의 흡수율과 관계가 있다. 골재 중에 함유되어 있는 수분의 동결에 의한 팽창으로 강도가 약한 골재의 조직이 파괴되므로 동결융해에 대한 저항성은 보통골재보다 현저히 낮으나 골재의 흡수율이 적거나 골재내부에 독립기포가 다수 분포되어 있는 골재는 자체의 동결융해에 대항하는 저항성은 일반적으로 크다.

3-8. 열전도율

일반적으로 공극을 다량 함유한 골재의 열전도율은 작다. 이는 골재내부 공극의 열전도율이 작으므로 골재내부에 포함되어 있는 독립기공이 많을수록 대류 및 복사에 의한 열이동이 적어 그 열전도율이 낮아지기 때문이다. 또한 인공 경량골재의 열전도율은 비중에 의하여 좌우된다. 이는 다공질의 독립기포에 기인되기 때문이다. 인공 경량골재의 공극이 흡수된 상태에 있으면 단열효과가 떨어지므로 흡수를 방지하여야 한다.

3-9. 화학성분

부기질 인공 경량골재의 화학조성은 서로 유사하고

공통적으로 SiO_2 가 주성분이며 Al_2O_3 10~25%, Fe_2O_3 2~10%, CaO 2~5%, MgO 1~2%, Na_2O 및 K_2O 3~6%, SO_3 1~4%, C 1~2% 범위의 부성분을 지니고 있다.

4. 결론

경량골재는 구조물의 자중을 줄일 수 있는 경량성과 높은 단열성 등의 장점은 물론 천연골재의 부족현상과 자연보호의 관점에서, 그리고 최근의 건축구조물의 초고층화, 대형PC화 등의 추세에 따라 세계각국에서 많은 연구와 개발에 힘을 경주하여 현재에는 더욱 경량화되고 고강도화된 콘크리트를 제조할 수 있는 인공 경량골재의 개발에까지 이르고 있으며, 이를 이용한 구조용 고강도 경량콘크리트를 제조하여 해양 및 지상 구조물에의 폭넓은 활용이 기대되고 있다.

따라서 이들 인공 경량골재를 이용한 구조용 고강도 경량콘크리트의 역학적 특성 등 기술적인 면에서 많은 연구와 개발이 이루어진다면, 인공 경량골재의 이용도는 더욱더 늘어날 것으로 기대 되어진다. 또한 인공 경량골재의 대량 생산 방안이 강구되어 수요증대에 따른 합리적인 공급체계가 확립되어 국내 건축생산에 크게 기여될 것으로 믿어진다.