

광미를 이용한 인공경량골재의 제조와 물리화학적 특성

이종석¹⁾ · 이현구¹⁾ · 박영훈¹⁾ · 김상중²⁾

1. 서론

최근 환경문제가 대두됨에 따라 산업폐기물의 처리문제에 많은 관심과 연구가 진행되고 있다. 또한 현대의 콘크리트 구조물은 거대화, 고층화되어 그 중량이 계속 커지고 있으므로 구조물을 경량화 하려는 노력과 개발이 계속 진행되어 왔다. 구조물의 주재료로 사용되고 있는 콘크리트는 강도 및 내구성에 비해 비중이 크다는 결점을 가지고 있으므로 강하고 가벼운 고강도의 경량골재 콘크리트 개발이 행해져 왔다. 주된 방법으로는 콘크리트 중량의 주체를 차지하는 골재를 가볍고 강한 골재로 바꾸는 인공경량골재의 개발이 오래 전부터 개발되어 활발히 제조 및 사용되고 있는 실정이다.

골재는 생산방식에 따라 천연골재와 인공골재(쇄석, 쇄사, 인공경량골재), 부산골재(고로 슬래그)로 분류되고, 채취장소에 따라 하천골재와 육상골재, 산림골재, 바다골재로 분류된다. 크기에 따른 분류로는 4.75 mm체의 크기를 기준으로 이 체를 85 % 이상 통과하는 골재를 세골재, 이 체에 85 % 이상 남는 골재를 조골재라 한다. 비중 2.0 이하의 골재를 경량골재와 초경량골재로 분류하고, 2.0~2.6 사이의 골재를 보통골재, 그 이상의 것을 중량골재와 초중량골재로 분류한다. 경량골재를 세분하자면 비중 1.1~1.4의 팽창혈암, 팽창점토, 소성 fly ash 등의 구조용 인공경량골재와 비중 0.5~0.8의 소성규조토, 팽창진주암 등의 비구조용 인공경량골재, 부산경량골재(팽창슬래그), 천연경량골재(화산석), 가공골재로 분류된다.

본 연구에서는 골재의 비중을 줄이는 방안과 광산 폐기물인 광미를 재활용하는 방안으로 구조용 조립형 인공경량골재의 제조를 실시하였다. 또한 골재가 갖는 물리적 및 화학적 특성을 밝혀 구조용 골재로서의 타당성을 검증하는데 주안을 두었다.

2. 연구시료 및 경량골재의 제조

본 연구에서 선정된 광산의 광미는 강원도 영월군 상동면에 소재하는 상동광산과 충북 영동군 황간면에 소재하는 월유광산, 충남 부여군 석성면에 소재하는 정수장(슬러지)을 대상으로 하였다. 상동광산은 주로 텅스텐을 대상으로 채굴하던 광산으로 1992년 폐광 이후 광미는 광미댐 2곳에 나누어져 1,200만 톤의 광미가 야적되어 있다. 월유광산은 주로 금, 은을 대상으로 채굴하던 광산으로서, 1998년 폐광 이후 야적된 광미는 광미댐 3곳에 53만 톤으로 추정된다. 석성 정수장은 한국 수자원 공사에서 운영하는 정수장으로서 배출 슬러지는 위탁 사업자를 통해 농지살포 및 매립성토 용도로 쓰이고 있다.

주요어 : 인공경량골재, 광미, 비중, 흡수율, 압축강도, 공시체, 용출, 알카리 잠재반응

1) 충남대학교 지질환경과학과 (cktn@pony.cnu.ac.kr)

2) 하리 엔지니어링 (주)

채취된 시료는 분쇄와 성형과정을 거쳐 로타리 킬른 (rotary tube kiln)에서 소성되어 경량골재로 제조된다. 로타리 킬른은 예열부와 소성부, 냉각부로 구성되며, 각 시료의 소성 조건에 따라 시료의 투입 속도와 각 구간에 가해지는 온도, tube의 회전 속도도 달라지게 된다. 시료는 상동광산 광미, 월유광산 광미와 석성정수장 슬러지를 1:1의 비율로 배합하여 2개 조로 구분하고, 24 inch pan type pelletizer에서 물을 교결제로 사용하여 직경 0.5~1 cm의 pellet을 만들어 자연건조 하였다. 상동광산 광미는 1180 ℃, 회전 속도 1.5 RPM, 경사각 1.5°, 초당 pellet 5개의 투입속도로 하고, 월유광산 광미는 1200 ℃, 회전 속도 1.8 RPM, 경사각 3.6°, 초당 pellet 3.5개의 투입속도로 로타리 킬른에서 소성하였다.

3. 물리화학적 특성

경량골재의 비중 및 흡수율은 KS F 2533과 구조 재료 실험 방법에 따라 아래의 식과 같이 측정하였으며 각각의 시료를 3개의 평균값으로 비중 및 흡수율을 계산하였다.

$$\text{비중} = A/(B-C), \quad \text{흡수율} = \{(B-A)/A\} \times 100$$

$$A = \text{대기중 시료의 노건조 무게(g)}$$

$$B = \text{대기중 시료의 표면 건조 포화상태의 무게(g)}$$

$$C = \text{몰속에서의 시료의 무게(g)}$$

경량골재의 강도와 콘크리트 공시체의 압축강도는 KS F 5201에 규정된 국내 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트와 수돗물을 이용하여, KS F 2403(실험실에서 콘크리트의 압축 및 휨 강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법)과 KS F 2405(콘크리트의 압축 강도 시험 방법)에 따라 실시하였다.

각 시료의 소성전과 소성후의 주성분 원소의 변화를 알기 위해 X-선 형광 분석을 실시하였으며, 경량골재의 중금속 용출 시험을 통해 유해 중금속의 용출 여부를 다음의 과정으로 시험하였다. 경량골재를 150~300 μm의 크기로 파쇄하여 25 g씩 3부분으로 준비하고, 광미 25 g을 준비한다. 반응용기 4개에 증류수를 HCl 적정법으로 pH 5, 6, 7으로 적정한 후 경량골재와 시약을 1: 10의 비율로 섞고, 광미에는 증류수를 같은 비율로 넣는다. 용기를 밀봉하고 교반기에서 25 ℃, 속도 200 RPM, 진폭 4~5 cm의 조건을 주어 24시간 후에 반응액을 채취한다. 반응액은 0.1 μm 여과 섬유지에 여과 채취한 후 유도결합플라즈마질량분석기를 통하여 분석한 후, 골재 제조 전과 제조 후의 중금속 용출량을 비교하였다.

골재의 알칼리 잠재반응 시험은 경량골재를 150~300 μm의 크기로 파쇄하여 25 g을 반응용기에 담아 1N 농도의 NaOH 용액 25 ml를 넣고, 반응 용기를 하나 더 만들어 NaOH 용액만을 넣는다. 이 용기를 밀봉하고 인위적인 반응을 조작하기 위해 교반기에서 온도 80 ℃, 속도 100 RPM, 진폭 4~5 cm의 조건으로 교반하여 24시간 후에 반응액을 채취한다. 반응액은 0.1 μm 여과 섬유지에 여과 채취한 후 유도결합플라즈마질량분석기를 통하여 분석하고, NaOH 용액만 교반시킨 용액과 골재 시료를 넣어 NaOH 용액과 반응시킨 용액의 알칼리와 실리카 검출량을 1,000N 농도의 NaOH용액으로 가산하여 다음의 식으로 환산한다.

$$S_c = \frac{\text{Si의 알칼리 반응 후 농도(ppm)}}{\text{Si의 원자량}} \quad R_c = \frac{\text{Na의 알칼리 반응 후 농도(ppm)}}{\text{Na의 원자량}}$$

Sc와 Rc값을 무해 및 유해 골재를 판정하기 위한 KS F 2545의 검정곡선에 도시 하였

다. 골재 시료는 건조시킨 후 주사전자현미경을 통해 표면 관찰을 하여 알칼리 반응 전의 골재와 비교하였고, 이상부는 전자현미분석을 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

상동광산 광미를 이용한 인공경량골재는 비중 1.59 g/cm^3 , 흡수율은 6.2 %이고, 골재의 강도는 122 kg, 경량콘크리트 공시체의 압축강도는 재령 28일째 447.4 kg/cm^2 로 측정되었다. 월유광산 광미와 정수장 슬러지를 이용한 골재는 비중 1.38 g/cm^3 , 흡수율은 6.4 %이고, 골재의 강도는 86.4 kg, 경량콘크리트 공시체의 압축강도는 재령 28일째 424.0 kg/cm^2 , 채석장의 산림골재를 이용한 공시체의 압축강도가 481.3 kg/cm^2 이었다. 현행 경량골재의 규격상 비중 1.68 g/cm^3 이하에 압축강도 170 kg/cm^2 이상이므로 물리적 특성만으로 고려해 볼 때 구조용 골재로서의 이용이 가능하다.

상동광산 광미를 이용한 경량골재는 $\text{SiO}_2(61.79 \%)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(11.40 \%)$, $\text{Fe}_2\text{O}_3(11.28 \%)$, $\text{CaO}(8.71 \%)$ 등으로 구성되고, 월유광산 광미와 정수장 슬러지를 이용한 경량 골재는 $\text{SiO}_2(59.27 \%)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(16.23 \%)$, $\text{Fe}_2\text{O}_3(7.10 \%)$, $\text{CaO}(8.57 \%)$ 등으로 구성되어 인공경량골재의 이론적 소성 조건에 충족되는 화학 조성을 이루고 있다. 중금속 용출 시험 결과 두 경량골재 모두 6대 중금속의 용출량이 산성으로 갈수록 용출량이 증가하며, 각 pH 조건에서는 광미 자체의 용출량 보다 감소하는 경향을 보여 시료를 고온에서 소성한 결과 경량골재의 입자 내부가 치밀해지고 유리질이 골재의 표면을 피복하기 때문에 일부 중금속 이온들의 거동을 제한하고 있기 때문이라 판단된다.

상동광산 광미를 이용한 경량골재의 알칼리 잠재반응 시험결과 $\text{Sc} = 228.91 \text{ mmol/L}$, $\text{Rc} = 471.08 \text{ mmol/L}$ 로서 검정곡선상 안정영역에 도시되었고, 전자현미경 관찰에서도 특이점이 없었다. 월유광산 광미와 정수장 슬러지를 이용한 경량골재는 $\text{Sc} = 390.87 \text{ mmol/L}$, $\text{Rc} = 147.84 \text{ mmol/L}$ 로서 불안정 영역에 도시되었으며, 전자현미경 관찰에서 침상의 결정체($\text{CaO} 44.10 \%$)가 정출되는 점으로 보아 알칼리 잠재반응이 진행된 것을 보여준다. 향후 몰탈바를 이용한 콘크리트 팽창 시험이나 시멘트와 골재간의 알칼리 골재반응 등 더 많은 시험이 요구되며, 경량골재를 이용한 구조물 시공이나 생산 및 시험 방법에 있어서 그 비용과 이용 가능성을 개선 시킬 수 있는 현실적인 연구가 다각도로 지속되어야 할 것이다.