콘크리트용 골재로써 시멘트 산업 저품위 석회석의 활용

Use of Low-grade Limestone for Cement Industry as Concrete Aggregate

김기훈 Ki-Hoon Kim
아세아시멘트(주)
주임연구원
E-mail : kimkh011@asiacement.co.kr

1. 머리말

국내에서 석회석(Limestone)은 매장량이 풍부한 광물로 $CaCO_3$ 함량에 따라 화학, 탈황, 제철, 시멘트 등의 용도로 구분하여 사용 중이며, 전체 채굴량 중에 약 70 %의 석회암이 시멘트 제조용으로 사용되고 있다. 시멘트의 품질 및 경제성 측면에서 시멘트 제조용으로 사용하기에 부적합한 석회암 품위는 $CaCO_3$ 함량 기준 약 70 % 이하이고, MgO 함량이 2 % 이상인 마그네시아 석회암은 저품위 석회석으로 분류되어 그 동안 폐석으로 버려져 매립되었다. 그러나 최근에는 자원의 유효이용을 목적으로 이와 같은 저품위 석회석을 분쇄 및 체가름 공정 등의 골재 제조 설비를 통해 골재로 생산하고 있는데 석회석을 골재원석으로 활용하기 위해 개발된 석산에서 생산되는 석산 부순골재와 구분하기 위하여 본고에서는 저품위 석회석 골재라고 정의하고, 통상 석회석 암종으로 생산된 골재를 모두 석회석 골재라 한다.

우리나라 석회석 골재의 연구는 일반강도 및 고강도 콘크리트 영역에서의 연구가 활발히 진행되어 실용화되고 있을 뿐만 아니라 초고강도 콘크리트 영역에서의 활용성에 대한 연구도 활발히 진행되어 실용화되고 있다.

따라서 본고에서는 국내의 석회석 현황과 석회석 골재 및 이를 사용한 콘크리트의 특성에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2. 국내외 석회석 및 석회석 골재현황

석회석은 $CaCO_3$을 주성분으로 하는 퇴적암으로 대부분이 산호초 등으로 생물유해가 집적, 고화하여 생성된 것이다.

석회암의 구성광물은 주로 방해석($CaCO_3$)이다. 방해석, Aragonite($CaCO_3$[霰石(선석)]), 돌로마이트($CaMg(CO_3)_2$) 등을 탄산염광물이라 하며, 탄산염 광물을 50 중량 % 이상 함유한 암석을 탄산염암이라고 한다.

2.1 국내 석회석 현황

우리나라의 광물자원은 대부분 비금속 광물로써 석회석, 규석, 납석, 장석 등을 생산하고 있다. 이 중에 석회석 광물이 가장 많이 매장되어 있는 광종으로 가채 광량이 약 81억 톤에 이를 정도로 국내 유일의 자급자족이 가능한 광물자원이다.

국내 석회석 현황을 살펴보면 2014년 기준으로 총 86백만 톤이 생산되었고, 시멘트용 석회석 생산은 약 63.4백만 톤(73.7%), 제철용 11백만 톤(12.7%), 화학용과 기타의 용도로 11.6백만 톤(13.4%)이 채광·생산된 것으로 집계되었다. 또한 상위 10개 석회석 광산(모두 시멘트용)에서 생산된 석회석은 61백만 톤으로 전체의 70.9%를 차지하고 있다.

석회석은 탄산칼슘($CaCO_3$, 이론적으로는 56.03%의 CaO와 43.97%의 CO_2로 구성된다.)을 주성분으로 하는 광물을 말하지만 일반적으로 실제 생산되는 석회석은 순수한 $CaCO_3$가 아닌 MgO, SiO_2, Al2O_3, Fe_2O_3 등의 불순물이 소량 함유되어 있는 광물이다.

이러한 불순물의 함량에 따라 석회석의 품질을 분류한다. 또한, 각종 용도에 따라 요구되는 석회석의 품위가 다르며, 그 예는 [표 1]에 나타내었다.

2.2 국내의 석회석 골재 현황

국내에서 상위 10개 석회석 광산은 모두 시멘트 제조를 위한 석회석을 생산하고 있고, 2014년 기준으로 채취된 석회석은 약 61백만 톤으로 집계되고 있다.

시멘트 제조용 석회석 광산에서 생산되는 석회석은 제철이나 화학용 석회석에 비해 상대적으로 낮은 품위의 석회석이 사용되지만 양호한 품질의 시멘트를 생산하기 위해서는 $CaCO_3$ 함량 기준으로 약 80% 이상의 석회석을 사용하고 있으며, 석회석 채취과정에서 $CaCO_3$ 함량이 낮거나 혹은 $CaCO_3$ 함량이 높더라도 MgO, SiO_2, Al_2O_3 등의 불순물이 상대적으로 많이 포함되어 있는 저품위 석회석이 약 10% 정도 발생하고 있는 실정이다.

시멘트 석회석 광산에서 발생하는 저품위 석회석은 기존에는 폐석으로 구분되어 광산복구를 위한 매립재 등의 용도로 사용되었지만 최근 자원의 유효이용과 골재자원의 부족 해소를 위하여 대부분의 광산에서 저품위 석회석을 골재자원으로 활용하고 있다.

저품위 석회암 골재의 생산량은 시멘트 석회석 광산의 석회석 생산량에 따라 변동이 발생하고 있으나 2014년 기준으로 약 6백만 톤(약 4백만 m^3) 이상의 저품위 석회석 골재가 생산되는 것으로 추정할 수 있다.

2.3 국외의 석회석 골재 현황

일본의 콘크리트용 석회석 골재는 하천골재의 채취규제에 따라 부순골재로 전환하기 시작한 1970년대부터 증가하기 시작하였고, 1980년대에는 일본에서 문제화된 알칼리 골재반응의 대책으로 알칼리 골재반응을 일으킬 염려가

[표 1] 용도별 석회석 품질조건의 예 (단위 : %)

용도 \ 화학성분		CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	S	P
철강용	제철	54.0 이상	1.0 이하	1.0 이하	–	–	0.01 이하	0.03 이하
	제강							
	합금철		0.5 이하					
카바이드		54.9 이상	0.5 이하	0.5 이하	1.0 이하	1.0 이하	–	0.04 이하
판유리		54.3 이상	–	0.3 이하	–	0.1 이하	–	0.4 이하
시멘트용		46.8 이상	1.7 이하	11.0 이하	2.3 이하	–	–	–

없고 품질이 안정한 석회석 골재의 수요가 증가하였다. 버블 붕괴 후 1990년대에는 콘크리트용 골재의 총 수요량 감소에도 불구하고 콘크리트용 골재의 총 수요량에서 석회석 골재가 점유하는 비율은 지속적으로 증가하여 2002년에는 약 8.5 %, 2012년에는 약 25 %에 이르고 있다.

미국의 총 골재 생산량에서 석회석 골재가 차지하는 비율은 2002년 기준으로 약 41 %를 차지하고 있으며, 부순골재 생산량에서 차지하는 비율은 약 71 %로 매우 높은 수준이다.

영국의 부순골재는 연간 약 1억 톤 내외로 생산되고, 2012년 기준으로 콘크리트용 부순골재 중에서 석회석 골재가 차지하는 비율은 약 67 % 수준으로 가장 높고, 화성암 26.8 %, 사암 6.2 %의 순으로 생산되었다.

3. 석회석 골재의 특성

석회석 골재는 괴상의 치밀한 석회석을 원석으로 하고 있기 때문에 품질은 안정적이다. 또한 석회석 광상은 사암 등의 다른 암석과는 다르게 풍화대가 존재하지 않기 때문에 표토 제거 후 바로 제품화 가능한 원석을 확보할 수 있는 특징이 있고 제품에 풍화대가 혼입되는 경우도 없다.

석회석의 주 구성광물인 방해석의 밀도는 2.71 g/cm^{3}이지만 석회석의 밀도는 공극이나 불순물 등의 영향으로 다소 저하된 약 2.6~2.7 g/cm^3, 흡수율은 0.2~0.8 % 정도이며, 다른 골재용 암석과 비교하면 변동 폭이 적다.

석회석의 압축강도는 결정입경, 균열밀도, 균열의 2차 정질물에 의한 교착도, 편상구조의 유무에 따라 다르지만 괴상이 치밀한 것이라면 결정입경이 작을수록 강도가 높고, 결정화가 진행될수록 강도는 저하한다. 골재로 사용되는 석회석의 압축강도는 100~200 MPa, 인장강도는 8~12 MPa 정도의 값을 나타낸다.

석회석은 열중량분석에서 700 ℃ 부근부터 CO_2의 방출에 의해 질량의 가속적인 감소가 확인된다. 따라서 700 ℃까지 현저한 열분해를 일으키지 않기 때문에 내화성은 충분한 것을 알 수 있으며, 0~100 ℃ 범위에서 석회석의 열팽창계수는 4~8×10^{-6}/ ℃으로 일반적인 화강암의 열팽창계수의 6~12×10^{-6}/ ℃보다 작다.

석회석을 구성하는 탄산칼슘은 순수한 물에 대한 용해도가 1.43 mg/100 cc(25 ℃)로 통상의 환경에서는 사실상 거의 용해되지 않지만 산에는 약하기 때문에 산성약품을 사용하는 환경이나 온천수, 산성수, 황산염이 함유된 지하수의 영향이 있는 지역에서는 석회석이 용해되기도 한다. 그렇지만 일반적인 중성내지 약알칼리성의 담수–해수 중에서 석회석은 충분히 안정하고 골재로서의 내구성에 문제가 없다.

4. 석회석 골재를 사용한 콘크리트의 특성

일반적으로 부순골재를 사용한 콘크리트는 소정의 유동성을 확보하기 위한 단위수량이 증가한다. 하지만 부순골재 중에서 석회석은 실적률이 크고 입형이 양호하기 때문에 다른 암종의 골재와 비교하여 동일한 유동성을 얻기 위한 단위수량이 감소한다.

콘크리트의 강도 등 역학특성은 페이스트의 강도와 골재 강도뿐만 아니라 골재와 시멘트 페이스트 계면의 부착강도에도 큰 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. 석회석 골재를 사용한 콘크리트에서는 골재 표면에서 시멘트 페이스트와 화학반응에 의해 칼슘·카보알루미네이트 수화물이 생성되고 골재–페이스트 계면의 조직이 치밀화되기 때문에 부착강도가 증가한다. 이러한 것에 의해 다른 골재를 사용한 것과 비교하여 석회석 골재를 사용한 콘크리트는 일반적으로 강도발현성이 양호하다. 또한 석회석의 품질이 콘크리트의 강도에 미치는 영향은 $CaCO_3$ 순도의 영향은 적고 결정입도의 영향이 큰 것으로 알려져 있다.

석회석 골재를 사용한 콘크리트의 건조수축은 다른 골재를 사용한 경우보다 작은 것으로 알려지고 있는데 이는 시멘트와 석회석과의 반응에 의해 생성된 칼슘·카보알루미네이트($C_3A \cdot mCaCO_3 \cdot nH_2O$)가 결정수 또는 간극수로써 수분을 취하고 있는 것, 골재 계면에 수화물이 생성되어 세공량이 적게 되어 수분의 확산이 적게 되는 것, 일반 골재

가 건조하면 수축하는 것에 반하여 석회는 골재는 팽창하는 것 등에 의한 것으로 판단된다.

석회석 골재를 사용한 콘크리트의 탄성계수는 〈그림 1〉에서와 같이 동일 압축강도 수준에서 화강암 골재를 사용한 콘크리트보다 높기 때문에 고유동·고강도 및 고탄성이 요구되는 초고층 건축물 분야에서는 석회석 골재를 활용하는 것이 유리하다.

1990년대 중반 일본에서는 '시멘트 및 시멘트 원료가 되는 물질이 콘크리트 결합재, 혼합재 또는 골재로써 이용되며, 경화 후 재차 전량이 시멘트 원료 및 재생골재로써 사용 가능한 콘크리트 및 모르타르'라는 완전 리사이클 콘크리트의 개념이 제창되었다.

완전 리사이클링 콘크리트의 관점에서 볼 때 보통 포틀랜드 시멘트, 석회석 굵은 골재, 석회석 잔골재를 사용하여 제조된 콘크리트는 폐 콘크리트 단계에서 [표 2]와 같이 CaO함량이 85 % 이상으로 높기 때문에 점토, 규석, 철, 석고 등의 원료를 첨가하면 재생시멘트의 제조가 가능하고, 이러한 재생시멘트의 품질은 [표 3]과 같이 보통 시멘트와 동등한 품질이 확보되어 완전 리사이클 콘크리트의 실현이 가능하다고 소개하고 있다.

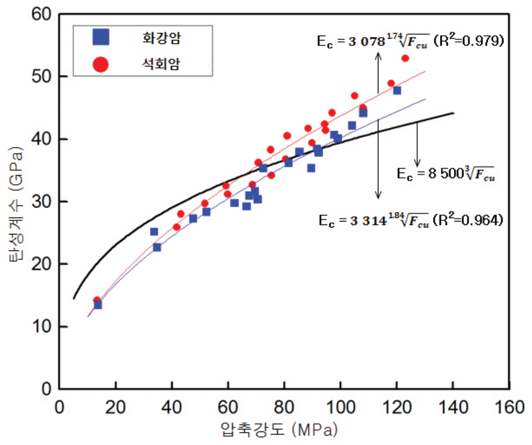

그림 1. 굵은 골재 종류별 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 관계

[표 2] 시멘트와 석회석 골재 콘크리트 및 재생시멘트의 화학성분

(단위 %)

구분	보통 시멘트	석회석골재 콘크리트	재생 시멘트
CaO	62.3	87.3	66.8
SiO_2	21.4	8.1	21.4
Al_2O_3	5.2	1.4	5.0
Fe_2O_3	2.8	0.8	2.8
SO_3	2.1	0.4	1.9

출처 : 석회석 골재와 콘크리트 일본석회석광업협회, 2005

[표 3] 보통 시멘트와 재생 시멘트의 품질

구분		보통 시멘트	재생시멘트
밀도(g/cm^2)		3.15	3.13
분말도(cm^2/g)		3 360	3 340
응결 시간 (h:m)	초결	2:33	2:00
	종결	3:24	2:50
압축 강도 (MPa)	3일	16.2	15.2
	7일	26.2	24.8
	28일	42.4	43.2
안정성		양호	양호

출처 : 석회석 골재와 콘크리트 일본석회석광업협회, 2005

5. 맺음말

석회석은 시멘트, 제철, 탈황, 화학 등의 각 산업분야에서 사용되고 있는 광물로 각 산업별로 요구되는 석회석의 품위는 각각 다르다. 제철, 화학용 석회석 광산에서 발생하는 저품위 석회석이 시멘트 산업에서는 고품위 석회석으로 활용되고 있는 것처럼 시멘트 산업에서 발생하는 저품위 석회석은 골재산업의 관점에서는 양질의 골재자원으로 활용할 수 있다.

이번 특집기사를 통해 다른 산업에서 발생하는 폐석이나 산업부산물과 같은 순환자원의 활용성을 높이고, 사용자의 편견을 다소나마 해소할 수 있기를 바란다.

담당 편집위원 : 박희곤(두산건설(주)품질/기술연구소)