

마쇄방법을 이용한 순환잔골재의 고품질화

High Qualitization of Recycled Fine Aggregate by abrasion method



김하석*

Ha-Seog Kim



김진만**

Jim-Man Kim

1. 서언

도시 재개발 및 환경 정비에 대한 수요가 증가함에 따라 60~70년대에 건설된 SOC 및 주택의 해체가 증가하고 있다. 구조물의 해체공사 시 발생하는 건설폐기물은 환경 유해성이 낮지만, 그 양이 막대하기 때문에 매우 중요하게 다루어야 할 폐기물이다. 1990년대에 연간 1천 6백만 톤 발생하던 건설폐기물은 2008년 연간 약 6천 4백만 톤으로 5배 이상 증가하여, 국내에서 발생하는 총폐기물의 50% 이상을 점유하게 되었다.^{1),2),3)} 다른 산업폐기물의 발생량의 증가가 정제된 것과는 달리 건설폐기물의 발생량은 지속적으로 증가하는 추세에 있으며, 2020년에는 약 1억 톤 이상 발생될 것으로 예상된다.⁴⁾

이에 건설교통부에서는 건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률 제35조의 규정에 의거 건설폐기물의 재활용을 촉진하기 위한 다양한 용도의 순환골재를 대상으로 한 「순환골재 품질기준」을 2005년 8월에 제정하여 폐콘크리트의 활용율을 높이기 위해 노력하고 있다.

순환골재의 용도는 고품질인 콘크리트용으로부터 저품질인 매립용에 걸쳐 13 종류로 구분된다. 이러한 다양한 용도 중에서 순환골재는 비교적 저급품에 한정되어 활용되고 있는 실정이다. 본질적으로 품질이 낮은 폐콘크리트를 저품질 용도로 활용하는 것은 당연한 것이다. 그러나 지역적으로 콘크리트용의 공급이 부족한 경우도 있고, 저급품 시장의 수요가 높지 않은 경우도 있으므로 고품질의 순환골재를 생산하기 위한 기술개발도 필요하다. 이를 위해서는 순환골재의 품질이 골재상의 원골재에 부착되어 있어 있는 시멘트페이스트의 부착량과 밀접하게 관련되어 있으므로, 시멘트페이스트의 제거율을 높이는 것이 필요하다. 이에 부착 시멘트페이스트를 효과적으로 제거하기 위한 연구가 많이 진행되어지고 있지만 이러한 연구들의 대부분은 폐콘크리트를 물리적으로 파쇄 및 분쇄하여 시멘트페이스트를 제거하는 연구로 원골재의 강도와 시멘트페이스트의 유사한 강도차이로 인해 생산과정 중 시멘트페이스트 뿐만 아니라 원골재에도 균열을 유발하게 되어 이 골재를 콘크리트에 적용하면 매트릭스의 강도와 상관없이 골재부터 파괴되는 현상이 발생하여 목표 강도를 발현하지 못하게 된다. 이에 콘크리트에 적용하였을 경우 성능저하를 유발하지 않기 위해 골재의 손상을 최소화하면서 부착된 시멘트페이스트만을 효율적으로 제거하는 박리 및 마쇄방법에 대한 연구가 활발한 실정이다.

따라서 본 고에서는 안정적이며 콘크리트용 순환골재로 사용이 가능한 고품질의 순환골재 생산기술인 마쇄방법에 대하여 살펴보고자 한다.

* 한국건설기술연구원 공공건축연구본부 미래건축연구실
Korea Institute of Construction Technology, Advanced Building Research Division, Building Research Department
E-mail : bravo3po@kict.re.kr
** 공주대학교 공과대학 건축학부 교수
Kongju National University
E-mail : jmkim@kongju.ac.kr

2. 중화반응에 의한 구시멘트 페이스트의 취약화 메커니즘

콘크리트는 크게 골재와 시멘트페이스트, 공극으로 이루어져 있으며 이중 시멘트페이스트는 40%공극과 20~25%의 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 그리고 35~40%의 고체수화물질로 이루어져 있으며, 골재와의 부착강도가 골재의 강도와 유사하다는 특징을 가지고 있다. 폐콘크리트를 재활용하여 순환골재로 생산 시 이 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 골재의 pH를 12 이상으로 만들게 된다. pH 12 이상의 강알칼리 골재를 사용할 경우 지하수나 빗물에 의해 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)은 지속적으로 용출되어 비점오염원이 되어 토양, 수자원을 알칼리화 시켜 생태계를 파괴시키는 문제점을 야기 시킨다. 수용성으로 용해도는 낮지만 이온화도가 높은 염기성의 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)은 산성계 물질과 반응 시키는 중화반응을 이용하여 제거 할 수가 있다. 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)을 제거 할 경우 골재와 부착되어 있는 계면을 다공화하여 취약한 구조를 만들 수 있으며 추후 골재강도보다 낮은 강도의 물리적 힘만으로 쉽게 시멘트 페이스트 성분만을 제거 하는 것이 가능하다. 이는 시멘트페이스트, 모르타르 또는 콘크리트가 산성계 물질(acidic) 또는 마그네슘(magnesium)이 포함된 용액과 반응하여 CaO 1% 제거에 약 2%의 압축강도가 저하 된다는 연구결과에 착안하였다.⁵⁾ 중화반응에 사용할 수 있는 산성계 물질로는 황산(H_2SO_4), 염산(HCl), 질산(HNO_3), 탄산(H_2CO_3) 등 다양한 산성계 물질을 이용할 수 있다. 하지만 이러한 중화반응은 수산화칼슘이 고체상에서 액체상으로 용해되어야만 효율적으로 진행되며 고체상의 수산화칼슘이 용해되어 반응이 진행되면 반응생성물이 생성된다. 반응하여 생성되는 반응 생성물은 사용한 산성계 물질에 따라 다르며, 크게 황산을 사용한 경우 석고, 탄산은 탄산칼슘으로 석출되며 염산은 염화칼슘으로 용해된 상태로 존재한다. 이러한 반응 생성물의 평균 크기는 1~3 μm 로 원래의 3~5 μm 의 수산화칼슘보다 크기가 다소 작아 반응 후 순환골재 고체 표면으로 침하 및 부착하여 원래 위치하고 있던 수산화칼슘이 석출된 공극을 메꾸는 문제점을 가지고 있다.⁶⁾ 이러한 문제점은 기존 파분쇄 방법이 아닌 마쇄 방법을 이용하여 해결할 수 있다. 일반적으로 마쇄 방법은 압력과 마모작용을 일컫는 것이지만 본 연구에서 사용한 마쇄방법은 압력은 사용하지 않고 저속으로 원통용 마쇄장치를 회전시켜 골재간의 마찰과 자유낙하에너지에 의한 충격력만을 이용하는 것이다.

즉 화학적 처리로 골재와 시멘트페이스트 계면을 취약

하게 만든 후 저속의 습식마쇄기를 이용하여 효과적으로 골재와 시멘트 페이스트 성분을 분리하는 것이다. 마쇄에 작용하는 메커니즘은 크게 압축, 충격, 전단, 마찰 등으로 대별된다. 그러나 마쇄 메커니즘이 단독으로 작용하는 경우는 거의 없으며 2종 또는 그 이상의 마쇄 메커니즘이 복합적으로 작용하는 것이 일반적인 현상이다. 마쇄 시 마쇄효율 향상을 위하여 여러 형태의 마쇄 매디어를 복합시키면 분쇄 매디어가 피분쇄물에 보다 높은 에너지를 전달하게 되므로 분쇄 효율이 향상된다.

따라서 Fig. 1과 같이 화학적 처리로 골재와 시멘트페이스트 계면을 취약하게 만든 후 저속의 습식마쇄기를 이용하여 효과적으로 골재와 시멘트 페이스트 성분을 효과적으로 분리하는 것이다.

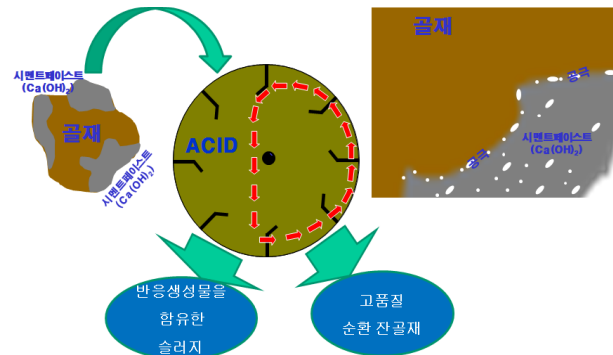


Figure 1. Principle of technique

3. 최적 마쇄 조건

고품질 순환골재를 생산하기 위해 마쇄방법을 적용한 수차례의 실험결과 골재 품질에 영향을 주는 주요한 인자는 중화반응과 골재 세척에 이용되는 공정수의 양과 마쇄 시간, 피분쇄물의 양인 것을 사전 연구 결과 확인 하였다.⁷⁾ 이를 바탕으로 실험계획법을 통한 최적조건을 도출한 결과 Fig. 2와 같이 마쇄공정에 사용되는 세척수의 양은 적을수록, 마쇄시간은 길어질수록, 피분쇄물의 양은 많을수록 그 효율은 향상되는 것으로 나타났으며 특히 피분쇄물의 양이 많을수록 보다 적은 마쇄시간을 필요로 하였다.⁸⁾

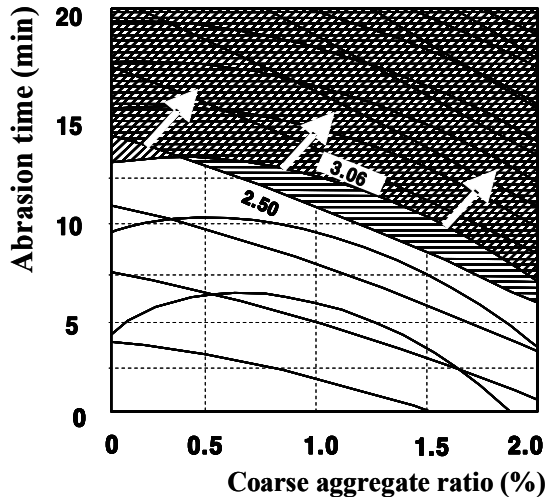


Figure 2. The optimum condition

4. 중화반응과 저속 습식 마쇄로 생산한 순환잔골재의 품질

위 최적 마쇄 조건을 순환잔골재 제조 공정에 적용한 결과 시멘트페이스트가 효과적으로 탈리되어 밀도는 상승하고 흡수율은 저하하는 결과를 얻었다. 하지만 본 연구의 중화반응에 사용되어진 산은 황산으로 시멘트 페이스트의 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 반응하여 석고(CaSO_4)를 생성하게 된다. 석고는 시멘트 페이스트 매트릭스 내에서 C_3A 가 용해되기 전 먼저 이온화되어 수화지연효과를 가져오며 C_3A 와 반응하여 초기 강도 발현에 기여하는 에트린자이트($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$)를 생성한 후 모노설페이트($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$)로 전이되지만, 그 양이 많은 경우 급격히 모노설페이트를 형성하여 매트릭스 내에 체적 붕괴를 가져와 강도성상에 악영향을 끼치는 것으로 보고되어져 있다.⁹⁾

이에 저품질의 순환골재를 중화반응과 저속습식마쇄방법을 이용하여 고품질화한 후 밀도, 흡수율, 골재강도 및 골재 안정성 실험 등을 통하여 골재의 품질특성을 검토하였으며, 이를 이용한 모르타르 실험을 실시하여 반응생성 물질인 석고의 영향 및 강도 특성을 분석 하였다.

실험결과 Fig. 3과 같이 밀도 2.27(g/cm^3)의 원골재(A)에 비해 중화반응과 마쇄과정을 거친 골재(B)는 2.41(g/cm^3)로 밀도가 상승하였으며, 공정을 거친 후 세척을 한 골재(C)는 2.47(g/cm^3)로 가장 높은 밀도 값을 보였으며 흡수율 또한 밀도와 유사하게 6.56%에서 공정 적용 후 4.21%, 세척 후는 2.98%로 하락하였다.

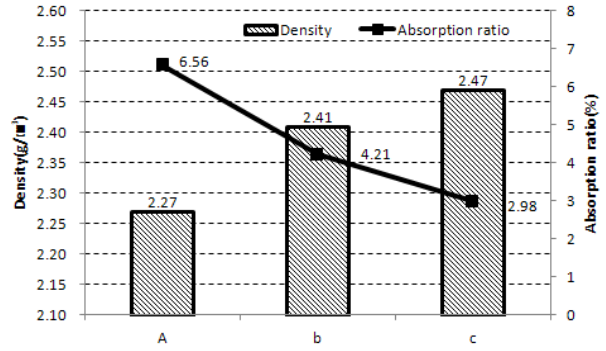


Figure 3. Density and absorption ratio

골재 안정성 실험결과 Fig. 4와 같이 원골재(A)는 5.2%, 중화반응과 마쇄과정을 거친 골재(B)는 6.7%, 공정을 거친 후 세척을 한 골재(C)는 5.1%로 3가지 시험체 모두 『순환골재 품질기준』에서 정하고 있는 안정성 10% 이하를 만족하였다.

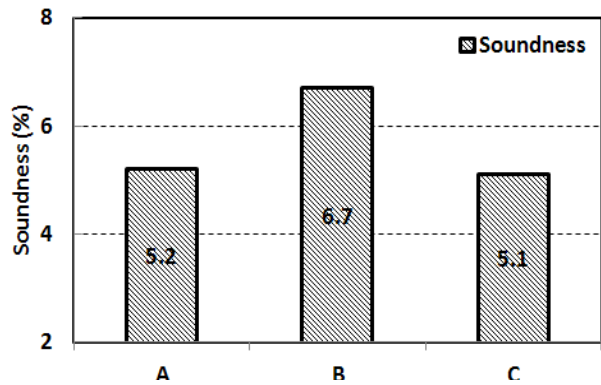


Figure 4. A variation of soundness

Fig. 5는 중화반응과 마쇄과정을 거친 골재(B)의 X-선회절분석(XRD) 측정 결과를 나타낸 것으로 공정 후 제조된 골재를 $100\pm 5^\circ\text{C}$ 와 45°C 이하 온도에서 건조 후 광물을 분석하였다. $100\pm 5^\circ\text{C}$ 에서 건조를 한 경우는 Basanite 광물상이 존재하였으며 45°C 이하에서 건조한 경우는 Gypsum이 측정되었다. 이는 순환골재에 다량 포함되어 있는 시멘트 페이스트 주성분인 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 황산(H_2SO_4)과 반응하여 이수석고($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)형태인 백색침전물이 생성되고 이 침전물을 100°C 이상 온도에서 건조시 Basanite 상인 반수석고($\text{CaSO}_4\cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)상태로 변하게 되며, 45°C 이하 온도에서 건조 시 이수석고($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)형태인 Gypsum으로 존재하는 것에 기인한다. 따라서 황산을 이용하여 중화반응 할 경우 시멘트페이스트의 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 황산(H_2SO_4)의 반응이 매우 활발하였음을 알 수 있다.

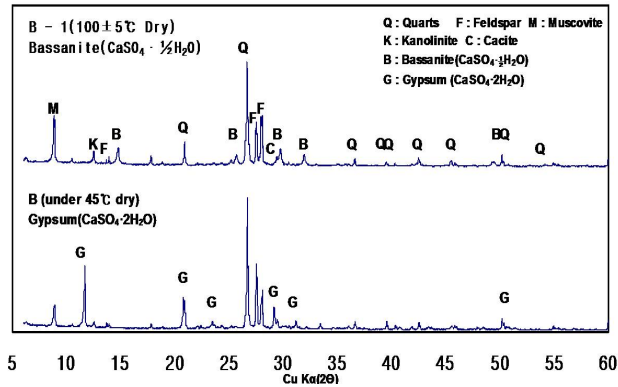


Figure 5. XRD of HRAI

각 골재 종류에 따른 모르타르의 압축강도는 Fig. 6과 같이 150 μm 이하 미분 및 반응생성물인 석고를 포함한 실험체가 비표면적이 증가에 기인한 물시멘트 저감효과와 석고(CaSO_4)에 의한 SO_3 함량 증가에 의한 강도 증진으로 150 μm 이하 미분 및 반응생성물인 석고를 제거한 실험체보다 나은 강도 발현을 나타냈다.^{10,11)}

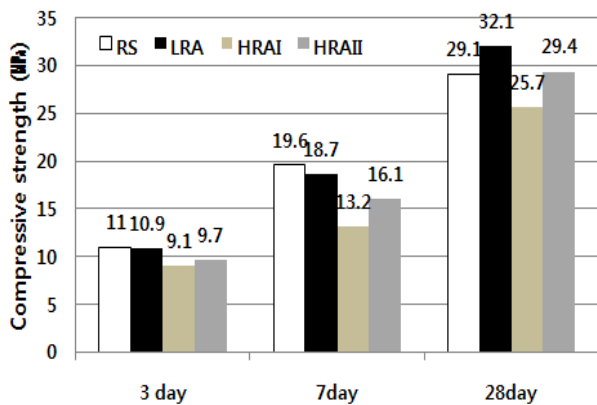


Figure 6. Variation of compressive strength

5. 결론

중화반응과 저속 습식 마쇄 방법을 적용한 순환골재의 품질 향상에 대한 연구 결과 본 기술의 적용 가능성을 확인하였지만 사용되는 산성계 물질의 다변화와 반응생성물질의 안정성 등에 대한 문제점을 더 연구하여야 하며 본 마쇄기술을 실 생산 공정에 적용하기 위하여 경제성, 생산성, 제품의 품질 안정화 등에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Ministry of environment. An annually trend of variation of waste. 2008
2. Ministry of environment. An annually trend of variation of waste, 2008
3. Lee DH. Construction & Transportation R&D Report. Korea Land & Housing Corporation. 2006
4. KICT, A preestimate to the amount of occurrence waste concrete in domestic. 2003
5. Metha PK, Paulo JM. Concrete Microstructure Properties and Materials. 3th rev. ed. Newyork:Mc Graw Hill; 1993. p.186-89
6. Metha PK, Paulo JM. Concrete Microstructure Properties and Materials. 3th rev. ed. Newyork:Mc Graw Hill; 1993. p.29-31
7. Kim JM. An Experimental study on the Manufacturing Method for High Quality Recycled Fine Aggregate Using Low Speed Wet Abraser and Sulfuric Water. Architectural Institute of Korea. 2008 May;24(5):109-116.
8. Kim JM. Optimum Abrasing Condition for Recycled Fine Aggregate Produced by Low Speed Wet Abraser Using Sulfur. Journal of the Korea Concrete Institute. 2008 Oct;20(5):557-563.
9. Chan CF, Sakiyama M, Mitsuda T. Kinetics of the CaO-Quartz-H₂O Reaction at 120°C to 180°C in Suspensions. Cement and Concrete Research. 1978;8:1-6.
10. Jambor J. Pore Structure and Properties of Materials. Proc Conf. Prague. Vol. II. 1973. pp. 30-36.
11. Neville AM. Properties of Concrete, 4th rev. ed. Newyork:John Wiley & Sons, Inc; 1995. p. 277-84.