

습식 중화반응에 의한 순환 잔골재의 품질 향상

Quality Improvement of Recycled Fine Aggregate by Neutralization Reaction in Water

김하석¹ · 김진만^{2*} · 선정수² · 배기선³

Ha-Suk Kim¹ · Jin-Man Kim^{2*} · Joung-Soo Sun² · Kee-Sun Bae³

(Received June 20, 2015 / Revised June 26, 2015 / Accepted June 26, 2015)

Recycled aggregate by the recycling construction waste has a lot of advantage such as the developing the alternative resource and protecting of environment. However, recycled aggregate is used as the low quality grade, because it is difficult to remove old mortar from aggregate. To use the recycled aggregate as high quality grade, it is important to develop the technology to produce the high quality recycled aggregate. To manufacture the high quality recycled aggregate, old mortar attached on the aggregates should be removed efficiently. Therefore, in this study, we suggested the optimum condition to remove old mortar effectively using sulfuric acid and low speed wet rotary mill for high quality recycled fine aggregate. The results shows that the recycled aggregate satisfy on the standards of KS F 2573 in density, absorption and solid volume, when adequate condition of sulfuric mole ratio and aggregate ratio are make.

키워드 : 폐콘크리트, 순환골재, 순환골재콘크리트, 습식 마쇄기, 황산수

Keywords : Waste concrete, Recycled aggregate, Recycled concrete, Wet rotary mill, Sulfuric water

1. 서론

1.1 연구의 목적

최근 재개발·재건축의 증가에 의하여 건설폐기물의 배출량은 급증하여 2001년에 4천만 톤을 넘어섰고, 2010년에는 1억 톤을 상회할 것으로 예상된다(MOILT 2005) 따라서 건설폐기물 중에서도 가장 점유비가 높은 폐콘크리트는 2000년에 약 1,500만 톤, 2020년에 약 1억 톤 이상으로 급격히 증가할 것으로 예상된다(LNE, 2006). 따라서 폐기콘크리트의 재자원화 기술 개발 및 실용화 방안이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 현재 다양한 고품질 순환골재의 생산방법에 관한 기술개발이 진행되고 있으나, 현재 생산되고 있는 순환골재는 품질이 천연 골재에 미치지 못하여 단순 용도로 그 용도가 제한됨으로써 자원의 유효활용이라는 측면에서 고려

하면 좀 더 고부가가치적 활용을 도모할 필요성이 있다. 이와 같은 배경에서 순환골재의 고품질화는 높은 연구적 가치가 있다(Michihiki Abe 1997).

현 국내 고품질의 순환잔골재를 생산하기 위한 기술이 활발히 개발되고 있으며, 그 결과 잔골재의 생산방식은 단순파쇄공정 위주의 건식공정에서 골재의 세척과 선별 등을 포함한 습식공정이 주류를 이루고 있다. 그러나 습식공정을 사용하여 순환잔골재를 생산하는 경우에도 그 품질이 구조용 콘크리트에 적용하기에는 아직까지 부적합한 실정이다. 이와 같이 품질이 저조한 가장 큰 이유는 골재에 다량의 시멘트 페이스트성분이 포함되어 있기 때문이다(Michihiki Abe 1997; Kim, J.M 2006).

일반적인 습식공정에서는 순환잔골재를 생산할 목적으로 4차 이상의 파쇄와 골재에 구모르타르 성분 및 미분의 제거를 위해 골재 세척을 병행하고 있다. 하지만 기존의 파·분쇄 방법만으로는

* Corresponding author E-mail: jmkim@kongju.ac.kr

¹한국건설기술연구원 (Korea institute of construction technology, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea)

²공주대학교 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Kongju University, Chungnam, 331-717, Korea)

³한양대학교 건축공학과(Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-Do, 426-791, Korea)

3골재에 포함되어 있는 시멘트페이스트성분을 효율적으로 떨어내지 못하며 씻기 작업이 필요하며, 이때 사용되어지는 공정수는 씻기 작업 후 별다른 처리 없이 순환하여 사용되어 지고 있기 때문에 칼슘 성분을 다량 함유한 pH 12~13의 고알칼리성수로 변화된다. 따라서 골재 내 구모르타르 성분을 효과적으로 제거하지 못할 뿐더러 용수 또한 지정폐기물로 분류되어 처리 시 추가적인 비용이 발생하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구팀에서는 기존 파·분쇄 방법이 아닌 마쇄 방법과 사용되는 공정수를 산성수로 대체하는 방법을 이용하였다. 마쇄방법은 파쇄와 분쇄 방법과는 달리 골재간의 마찰과 자유낙하에 의한 운동에너지로 골재표면에 구모르타르 성분을 탈리시키는 방법이며, 산성수 적용은 중화반응을 이용하는 방법으로 공정수에 염산, 황산 등과 같은 산성계 물질을 투여함으로써 공정수를 pH 6~7의 중성 또는 약산성화 하는 방법이다(MOILT 2002; Kim, J.M 2006). 이러한 방법을 사용할 경우 공정수를 강알칼리에서 중성화함으로써 폐수의 발생이 없다는 중요한 이점을 제공함은 물론, 골재 세척효율의 향상을 기대 할 수 있게 된다(Kim, J.M, 2006; Kim H.S, 2007). 또한 기존 국내 순환골재 생산 방식인 물리적 파쇄와 비교하여 산성수를 사용한 마쇄 공정의 추가로 생산비용이 증가하나 일본 등에서 고품질 순환골재를 생산하기 위해 일부 사용되고 있는 가열 마쇄에 의한 생산방식과 비교할 경우 보다 경제적으로 유리할 것으로 판단된다. 특히 높은 흡수율과 낮은 밀도로 인해 저부가가치로 사용되고 있는 순환골재의 생산에 있어 고품질의 우수한 성능을 갖는 순환골재를 생산하고, 공정수를 중화하여 폐수의 발생을 억제함으로써 추가비용 절감을 통한 경제적 불리함을 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 기존 순환골재 생산 방식 중 문제시 되어온 파·분쇄 방법의 문제점을 보완한 마쇄기의 효율 특성과 강알칼리수를 중화시켜 순환골재를 생산할 수 있는 조건에 대하여 검토·분석하고자 하였다.

1.2 연구 방법

본 연구는 피분쇄물인 굵은 골재 및 산성수를 이용한 마쇄방법에 의하여 고품질 순환골재를 생산하는데 있어서 최적 마쇄 조건을 검토하기 위한 기초 연구이다. 이를 위해 수차례의 예비실험을 통하여 실험조건을 굵은 골재비(순환골재에 대한 굵은 골재 중량비), 황산수몰비(공정수에 대한 황산의 몰수)로 설정하였으며 각 수준별 실험 결과를 비교·검토하여 마쇄기 운전 조건과 공정수를 산성수(H₂SO₄)로 대체하여 순환골재 제조 시 적정 황산양을 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 실험계획은 Table 1에서 나타낸바와 같이 실험인자로서 공정수로 사용한 황산수의 농도와 마쇄기에 투입되는 굵은골재와 잔골재 비율로 산정하였다. 본 실험에 사용한 황산수 농도는 몰랄 농도로서 일반 상수에 희석하여 황산의 몰수를 1.5, 2.0의 각 2수준으로 하였다. 또한 파·분쇄물로 사용한 굵은골재는 100mm 이상의 부순 골재를 사용하였으며 잔골재에 중량으로 대체하여 3수준으로 실험하였다.

Table 1. Experimental plan

ID	Levels		Test items	
	Mole	Fine agg: Coarse agg	Chemical	Physical
base	none	none	pH	Grade Density Absorption ratio Percentage of solid volume Temperature
Type 1	1.5	1 : 0.5		
Type 2		1 : 1.0		
Type 3		1 : 1.5		
Type 4	2.0	1 : 0.5		
Type 5		1 : 1.0		
Type 6		1 : 1.5		

* Fine aggregate and coarse aggregate are weight ratio

* Washing water : 200 L

* manufacturing time : 20 min

2.2 실험방법

2.2.1 실험 재료

본 실험에서 사용된 골재는 충남 천안 G사에서 생산한 골재를 사용하였으며, 황산은 무색을 띠는 순도 95%인 D사 제품을 사용하였다.

2.2.2 실험 방법

실험 방법은 Fig. 1에 나타낸 바와 같으며, Fig. 2에서 나타내고 있는 마쇄기에 투입한 골재량은 선행실험을 기준으로 도출된 최적 배합비인 골재:공정수 비율 1:0.7 로서 골재 285kg을 기준으로 공정수 200ℓ를 투입하였다. 또한 잔골재:굵은골재 투입비율은 Table 1에 나타낸 바와 같으며, 20분 동안 마쇄과정을 거쳐 순환골재를 생산하였다. 배출된 시료의 분석은 반응수와 골재를 체분리를 통하여 분리한 후 진행하였다.

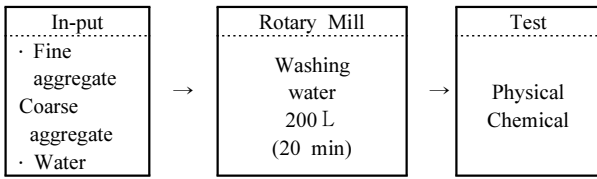


Fig. 1. Experimental method

2.2.3 실험장비

Fig. 2는 고품질의 순환잔골재 생산을 위해 본 실험에서 사용한 장비인 마쇄기를 나타내고 있다. 본 실험에서는 저속의 회전력으로 골재에 달라붙어 있는 구모르타르 성분을 제거하는 것으로서 회전속도 7.7rpm, 사이즈 $\varnothing 2,250 \times 8,480$ mm, 경사각 4.5°의 마쇄기를 사용하였다. 산성수를 사용할 경우 마쇄기의 부식이 우려되거나 마쇄기 중반부부터 배출구까지의 경우 중화반응에 의하여 pH 상승에 의해 부식이 없을 것으로 판단되나, 최초 투입구 일부 구간의 경우 pH 2.2 수준의 산성수에 의하여 부식의 우려가 있어 스테인레스로 일부 표면을 처리하였다.

2.2.4 측정방법

측정항목으로는 마쇄 시 공정수의 온도 및 pH를 측정하였으며, 생산된 순환잔골재의 입도, 밀도, 흡수율 및 실적율 시험은 Table



Fig. 2. Gravity type abraser

Table 2. Test items

Test items		Experimental method
Physical	Grade	KS F 2502
	Density	KS F 2504
	Absorption ratio	KS F 2504
	Percentage of solid volume	KS F 2505
	Temperature	-
Chemical	pH	pH meter

2에 나타난 바와 같이 각각 KS F 2052, KS F 2504 및 KS F 2505에 준하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

Table 3은 황산수를 사용하여 마쇄한 순환잔골재의 품질실험 결과를 나타낸 것이다. 굵은 골재의 비율이 높고, 몰랄농도가 높을 수록 보다 높은 밀도와 낮은 흡수율을 나타내는 것으로 나타났다.

3.1 입도

Fig. 3은 마쇄 전 골재와 황산수를 사용하여 마쇄한 순환잔골재

Table 3. Test results

ID	Sul.	agg.	Density (g/cm ³)	Abs.ratio (%)	Per. of solid volume (%)	F.M.
	Mole	Fine: Coarse				
base	none	none	2.35	5.84	62.13	3.05
type1	1.5	1:0.5	2.33	6.38	61.37	3.39
type2		1:1.0	2.34	4.78	67.52	3.88
type3		1:1.5	2.36	3.95	63.56	3.57
type4	2.0	1:0.5	2.39	3.91	66.53	4.16
type5		1:1.0	2.41	3.31	67.63	4.10
type6		1:1.5	2.53	3.09	62.85	4.06

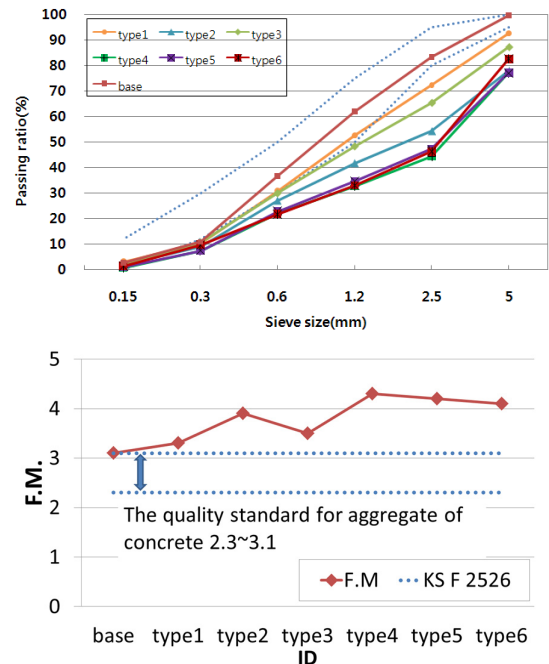


Fig. 3. Variation of grade and FM of recycled aggregate

의 입도분포와 조립률(F.M.)을 나타낸 것이다.

원골재의 경우 순환잔골재 품질 기준안에서 제시하고 있는 콘 크리트용 골재 입도 범위에 적합하였지만 굵은골재를 파·분쇄물로 사용하여 마쇄한 골재의 경우 base에 비해 1.2mm 이상 골재의 양이 증가한 것으로 나타났다.

이는 파·분쇄물로 사용한 100mm 이상의 굵은 골재 또한 마쇄 작용에 의하여 골재가 파쇄된 이유에 기인한 것으로 사료된다.

3.2 밀도 및 흡수율

Fig. 4는 마쇄 전 순환잔골재와 황산수를 사용하여 마쇄한 순환 잔골재의 밀도와 흡수율을 나타낸 것으로 일반적으로 밀도가 증가하면 흡수율은 저하되는 골재특성과 유사한 결과를 나타냈다. 순환잔골재의 밀도와 흡수율은 황산수의 몰수와 잔골재·굵은골재의 비율이 커질수록 마쇄 전 골재에 비해 밀도는 커지고, 흡수율은 저하되는 경향을 나타냈다.

밀도는 마쇄 전 골재와 황산수를 사용하여 마쇄한 순환잔골재 모두 KS F 2573의 순환잔골재 요구성능인 밀도 2.2(g/cm³) 이상을 나타내고 있었으며, 흡수율의 경우 base와 type1을 제외한 나머지 실험체는 순환골재 품질기준에서 제시하고 있는 5% 이하를 만족하였다. 이는 순환골재의 표면에 부착되어 있는 시멘트 페이스트와 석회 성분이 황산과 반응하여 반응생성물인 석고로 석출되어 골재와 시멘트 페이스트 부착 경계면의 부착력을 저하시켜 마쇄시

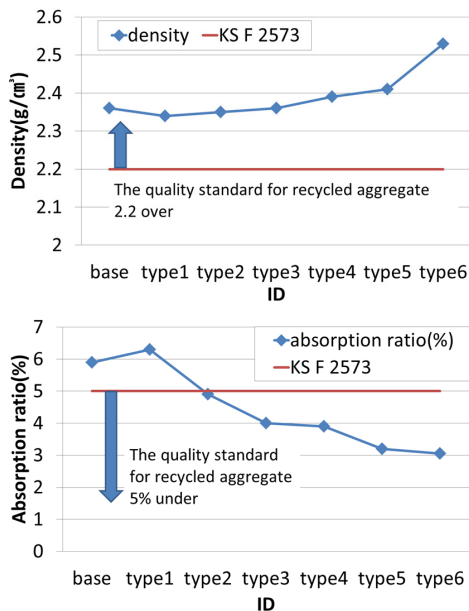


Fig. 4. Variation of density and absorption ratio of recycled aggregate

시멘트페이스트 성분이 쉽게 제거된 것으로 판단된다.

3.3 실적율

Fig. 5는 마쇄 전 순환잔골재와 황산수를 사용하여 마쇄한 순환 잔골재의 실적율을 측정된 결과 값이다. 마쇄 후 순환잔골재의 실적율은 base에 비하여 비교적 높아지는 것을 나타내고 있다. 이는 골재 표면에 붙어있는 시멘트페이스트가 공정수 내에 존재하는 황산과 반응하여 부착력이 약화된 후, 마쇄에 의하여 제거됨으로써 골재의 입형이 개선된 것으로 사료된다.

3.4 공정수의 pH 및 온도변화

산과 염기의 중화반응은 식 (1)과 같으며, 발열반응으로 인하여

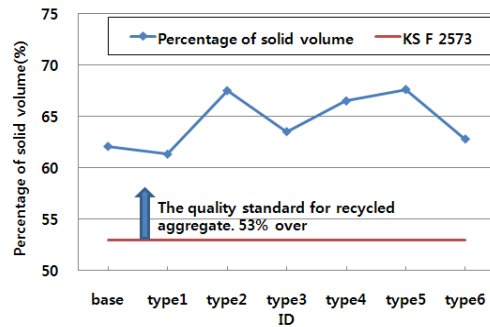


Fig. 5. Variation of solid volume of recycled aggregate

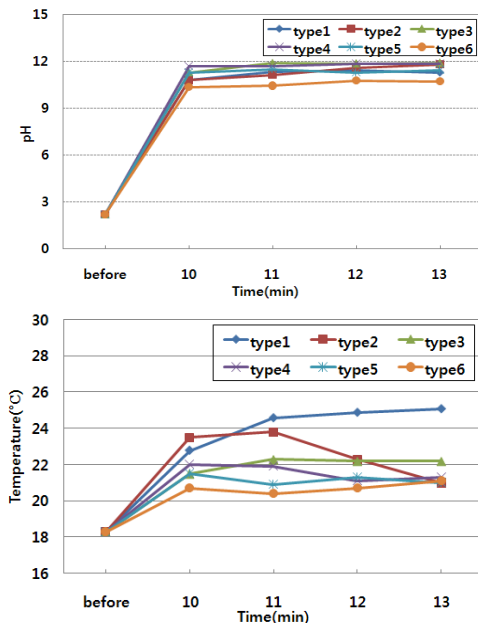
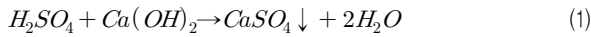


Fig. 6. Variation of pH and temperature of water

온도가 상승하게 된다. 본 실험 결과 Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 모든 조건에서 황산을 희석한 공정수의 황산성분과 골재에 포함되어 있는 수산화칼슘이 반응하여 온도가 상승하는 유사한 경향을 나타내고 있다. pH는 최초에 2.2 수준으로 산성을 보이지만 수산화칼슘과 반응함에 따라 pH가 상승 하여 공정수에 포함된 황산성분이 소진된 이후에는 11이상으로 상승하였다. 이는 골재에 포함되어 있는 시멘트 페이스트 성분을 완전하게 반응시키지 못했음을 나타내는 것으로서 완전반응을 나타내는 pH 6~7의 중성 상태를 유도하기 위해서는 더 많은 산이 필요할 것으로 판단된다.



3.5 골재의 광물상 분석

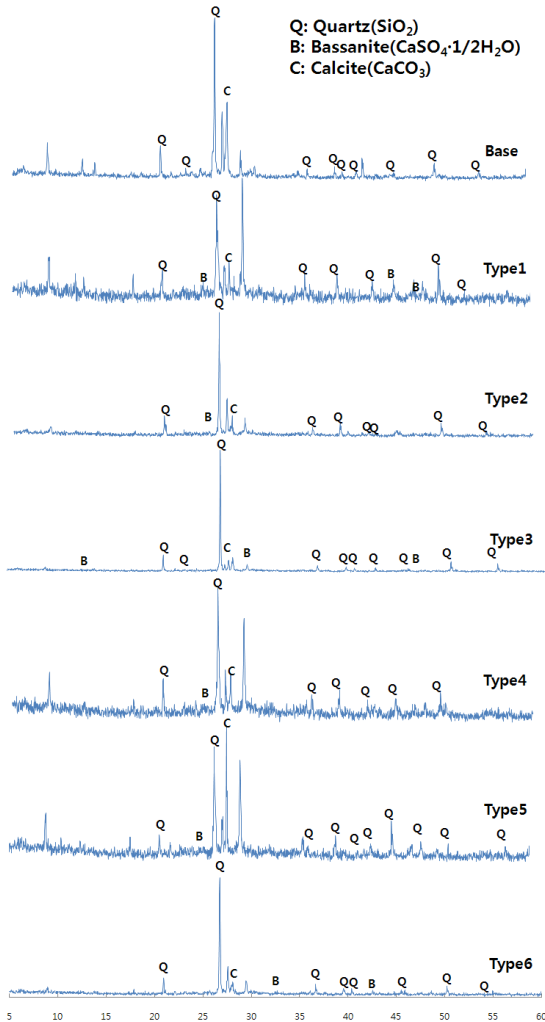


Fig. 7. XRD pattern of recycled aggregate

Fig. 7은 원골재를 천연수와 황산수를 사용하여 실험한 골재의 X-선회절분석 (XRD) 측정 결과를 나타내는 것으로 원골재와 천연수를 이용하여 마쇄한 경우는 일반적인 광물상인 Quartz (SiO₂)와 Calcite (CaCO₃) 등이 발견되었으며 황산수를 사용한 경우는 이러한 광물 이외에 Bassanite (CaSO₄·1/2H₂O) 광물이 존재하였다. 이는 순환골재에 존재하는 구모르타르 성분인 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 황산(H₂SO₄)과 반응하여 이수석고(CaSO₄·2H₂O)를 생성하였지만, 분석을 위한 건조공정에서 탈수되어 이수석고상으로 변화되었기 때문일 것으로 판단된다.

4. 결론

황산수와 저속습식 마쇄방법을 이용한 고품질 순환잔골재의 제조를 위한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 황산수와 저속습식마쇄기를 이용하여 제조한 순환잔골재는 절건밀도 2.53g/cm³, 흡수율 3.1%로 순환잔골재 품질기준인 절건밀도 2.2g/cm³이상, 흡수율 5%이하를 만족하는 순환잔골재를 얻을 수 있었다.
2. 황산수를 사용하여 품질이 향상된 것은 황산의 산성분이 골재에 포함되어 있는 구모르타르의 수산화칼슘과 반응하며 그 과정에서 반응생성물인 석고로 석출되어 이 반응 골재와 시멘트 페이스트 부착 경계면의 부착력을 저하시켜 마쇄시 시멘트 페이스트 성분이 활발하게 탈리되어 마쇄효율이 증가한 것으로 사료된다.
3. 본 실험에서 나타난 pH11 이상의 값은 골재에 포함되어 있는 시멘트페이스트 성분을 완전히 반응시키지 못했음을 나타내는 것으로서 pH6~7의 중성상태를 유도하기 위해서는 더 많은 산이 필요한 것으로 판단된다.
4. 본 실험결과 황산수와 저속습식 마쇄기의 적용가능성을 확인할 수 있었으나, 더욱 효율적인 마쇄기 운전조건을 위한 추가적인 검토와 생산된 골재의 품질확보 및 안전성을 위한 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부 차세대에코이노베이션 사업(2013000150009)과 산업통상자원부 한국에너지 기술평가원(20134010200540)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Kim H.S., Kim, J.M., Sun, J.S., Choi, H.G., Jang, S.Y., Lim, D.B. (2007). A fundamental study on the manufacture of high quality recycled fine aggregate by experiment design, Proceedings of the Korea concrete institute, **19(1)**, 617–620 [in Korean].

Kim J.M., Kim H.S., Sun, J.S., Kwak E.G., Han, K.S., Jun M.H. (2006). Experimental study on physical properties of circulation bone material by acid treatment, Journal of Korea society of waste management, Proceedings of the Korea society of waste management, **20(1)**, 331–335 [in Korean].

Kim J.M., Kim H.S., Sun, J.S., Kwak E.G., Lim D.B et al. (2006). Study of the quality of circulation bone material by grinding method using a CO2 gas, Proceedings of the Korea society of waste management, **20(2)**, 344–348 [in Korean].

LHI. (2006). Recycling policy and technology development trend of construction waste, Land&Housing institute, Gyeongnam,

South Korea.

Michihiko Abe. (1997). recycled aggregate concrete concrete engineering, **35(7)**, 42–48 [in Japanese].

MOILT. (1997). A study on the development of recycling phosphorus system and recycling technology of the construction industry waste, Minister of Land, Infrastructure and transport, Construction & transportation R & D report, Gyeonggi–Do, South Korea.

MOILT. (2002). Quality standards of the recycling of construction waste and measures to promote, Minister of Land, Infrastructure and transport, Construction & transportation R & D report, Gyeonggi–Do, South Korea. 6–125.

MOILT. (2005). Studies on the long–term stability of the recycled aggregate and recycled aggregate concrete structures of structure, Minister of Land, Infrastructure and transport, Construction & transportation R & D report, Gyeonggi–Do, South Korea.

습식 중화반응에 의한 순환 잔골재의 품질 향상

순환골재는 건설폐기물을 재활용함으로써 자원절약 및 대체자원의 개발과 환경보호의 측면에서 국가사회적으로 많은 이점을 가지고 있다. 하지만 낮은 밀도와 높은 흡수율을 가지는 저품질 순환골재는 구조용 콘크리트 골재로 사용되지 못하고 주로 저부가가치로 사용되고 있다. 고품질 순환골재를 생산하기 위해서는 골재와 골재에 부착된 구모르타르를 효과적으로 제거해야 한다. 최근 물리작화학적 방법을 이용하여 구모르타르를 효율적으로 제거하기 위한 연구가 행해지고 있으나, 고품질 순환잔골재의 생산 조건에 관한 정량적 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고품질 순환잔골재를 생산하기 위해서 황산과 저속습식마쇄기를 이용하여 구모르타르를 효과적으로 제거할 수 있는 최적 조건을 제시하고자 하였다. 황산의 몰비와 골재비율에 따른 순환골재의 실험결과 밀도, 흡수율, 실적율은 기준을 만족시키는 결과를 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.