

연구논문

## 자원순환을 위한 폐콘크리트 순환골재의 알칼리 및 중금속 용출특성 평가

신태수\* · 홍상표\*\* · 김광렬\*\*\*

동림건설기술(주) 기술개발연구소\*, 청주대학교 환경공학과\*\*, 충북대학교 환경공학과\*\*\*  
(2013년 8월 5일 접수, 2013년 8월 28일 승인)

### Assessment of Leaching Characteristics of Alkaline and Heavy Metal Ions from Recycled Concrete Aggregate

Taek-Soo Shin\* · Sang-Pyo Hong\*\* · Kwang-Yul Kim\*\*\*

Technical Development Institute, DONGLIM Construction & Engineering Co., Ltd.\*  
Department of Environmental Engineering, Cheongju University\*\*  
Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University\*\*\*  
(Manuscript received 5 August 2013; accepted 28 August 2013)

### Abstract

Generation rate of construction wastes in Korea has occupied preponderantly in recent years. To understand chemical properties of recycled concrete aggregate (RCA), RCA samples were tested for their leaching characteristics. Leaching tests were conducted according to Korean Standard Leaching Test (KLT) and Toxicity Characteristics Leaching Procedure (TCLP) respectively. The RCA samples were characterized using X-ray fluorescence (XRF). Alkalinity of the leachate was determined using a pH meter titration method. The XRF analysis result shows that the calcium oxide (CaO) content in the RCA sample is 25.3~50.4 %. When the RCA sample was mixed with water in a batch reactor, pH in the solution was rapidly increased, and 70% of the total pH change was found in 1 hour. The TCLP showed slightly higher efficiency for leaching heavy metals than the KLT. The leaching efficiency was also higher as the particle size of RCA sample was smaller. The leaching test results suggest that RCA can be generally classified as non-hazardous waste.

Keywords : Recycled concrete aggregate, Leaching characteristics, Alkaline ions, Heavy metal ions

## I. 서론

환경영향평가 대상사업중에 도시의 개발사업, 산업입지 및 산업단지 조성사업 등에서는 특히 막대한 양의 건설폐기물이 발생된다. 이러한 건설폐기물은 환경영향평가 등의 분야별 세부평가항목중 생활환경분야의 친환경적 자원순환의 대상이 된다. 건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률에 따르면 건설산업기본법에서 정한 건설공사로 인하여 건설현장에서 발생하는 5톤 이상의 폐기물로 콘크리트 폐기물 등 18가지를 건설폐기물로 정하고 있다. 순환골재란 건설폐기물을 해체할 때 발생하는 콘크리트 등 각종 건설폐기물을 잘게 파쇄하여 용도에 맞게 재활용할 수 있도록 만들어진 것으로, 법적으로는 물리적 또는 화학적 처리과정 등을 거쳐 도로보조기층용 등 14가지로 정한 순환골재 용도(국토해양부, 2009)에 맞는 품질기준에 적합하게 만든 것을 말한다.

국내 건설폐기물 발생량은 2000년에 2천8백만 톤에 불과하던 양이 2009년에는 6천7백만 톤으로 2.4배 이상 증가하였다(환경부, 2011a). 2009년 기준으로 전체 폐기물 발생 총량 1억3천만톤의 약 51%가 건설폐기물로 발생되고 있으며, 이의 처리를 위해서 막대한 비용이 소요되고 있다. 매년 증가하는 건설폐기물의 적절한 처리와 재활용을 위해 정부에서는 건설폐기물 재활용 의무사용량을 연차별로 증가하도록 하여, 도로보조기층용 등 용도별 의무사용량을 2012년 골재 소요량의 15%이상에서 2016년에는 40% 이상을 사용토록 규정하고 있다(환경부, 2013a; 환경부·국토해양부, 2012). 발생한 건설폐기물은 재활용(97.8%), 매립(0.7%), 소각(1.5%) 처리되며, 대부분 재활용되고 있다. 건설폐기물을 파쇄-세척-선별 등의 처리공정을 통해 생산하는 순환골재는 전체 재활용량의 60% 이상을 품질관리가 크게 요하지 않는 성·복토용으로 사용하고 있다(김낙빈, 2004; 한국환경공단, 2010).

순환골재 품질 특성과 관련하여 폐기물관리법에서는 '건설폐기물을 성토용·복토용으로 재활용하고자 할 경우, 최대직경은 100mm 이하, 이물질 함유량은 부피기준을 1%이하'라고 규정하고 있고, 한국공업규

격(KS)에서는 콘크리트용, 도로보조기층용과 같이 제한된 범위에서 순환골재를 사용할 경우에 한해 그 품질규정을 정하고 있다(이세현, 2001). 그러나, 순환골재의 화학적 품질 특성과 관련해서는 기준조차 제시되지 못하고 있으며, 재활용 용도에 따른 품질 규정도 전혀 제시되지 못하고 있는 실정이다(안남규 등, 2005).

그러나, 실제 환경중에서 순환골재를 사용할 경우 천연골재와는 달리 골재에 포함되어 있는 시멘트 모르타르의 CaO 등 일부성분이 물과 접촉하여 알칼리 성분이 용출되는 특성이 있다(김은호 등, 1997; 김종범 등, 2001). 순환골재에서 용출되는 알칼리 성분은 화학적 중화제로 이용할 수 있는 긍정적 측면(안남규 등, 2007)이 있는 반면, 재활용 시에 물과 접촉하여 주변 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Sergi, 1986). 순환골재의 화학적 특성이 때로 환경상에서 심각한 영향으로 나타나는 경우에 관해서 순환골재를 활용할 때 산 처리를 할 경우 모르타르 강도에 미치는 영향(김진만 등, 2008) 및 순환골재를 이용하여 비점오염원 저감을 위한 재료로 활용(강영현 등, 2009) 같이 순환골재의 이용을 확대하고자 하는 연구는 진행이 되었으나, 순환골재의 화학적 특성이 환경에 미치는 영향 정도를 예측하거나, 이를 바탕으로 순환골재의 화학적 품질기준 마련을 위한 시도는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 폐콘크리트 순환골재의 사용에 따른 환경영향평가를 위해 여러 가지 용출시험 방법과 순환골재의 입도 및 성상에 따른 알칼리 및 중금속 용출특성을 분석하였다. 이러한 용출특성 평가방법과 분석결과에 대한 고찰을 통해 건설폐기물의 친환경적 자원순환을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## II. 연구방법 및 재료

### 1. 실험재료

연구에서 사용한 순환골재는 충북 청원에 위치한 D사에서 건설폐기물중 폐콘크리트를 이용하여 1차

Table 1. Comparison between KS standard and sample analysis of recycled concrete aggregate for road base layer material

Classification	Plasticity index	Modify CBR(%)	Abrasion loss(%)	Sand equivalent	Liquid limit(%)	Organic impurity (% , Volume)	Inorganic foreign materials(% , Mass)		
KS standards	6 below	more than 30	50 below	more than 25	25 below	1.0 below	5.0 below		
Sample analysis	nonplastic	66.5	34.9	71.0	nonplastic	0.14	0.38		
Particle size distribution standards		Distribution Ratio through passage(%)							
		75mm	50mm	40mm	20mm	5mm	2.5mm	0.4mm	0.08mm
KS standards	RSB-1	100	-	70~100	50~90	30~65	20~55	5~25	2~10
	RSB-2	-	100	80~100	55~100	30~70	20~55	5~30	2~10
Sample analysis		100	100	100	97	56	39	13	2

파쇄기(single jaw crusher) - 1차 자력선별기 - 1차 진동스크린 - 송풍기 - 인력선별기 - 2차 파쇄기(double jaw crusher) - 2차 자력선별기 - 3차 파쇄기(cone crusher) - 2차 진동스크린의 공정을 거쳐 25mm 이하로 생산한 것을 사용하였다. 이와 같이 생산한 순환골재는 Table 1에 제시한 바와 같이 도로보조기층용 순환골재 기준(KS F 2574)을 만족하였다.

한편, 순환골재와 비교실험을 위해 사용한 천연골재는 충북 괴산의 D개발에서 토목공사용으로 석산을 개발하여 생산한 것을 사용하였다. 순환골재와 천연골재 시료는 골재를 생산하는 조건이나 원재료의 특성에 따라 조성이나 연구결과에 영향을 줄 수 있으므로 건설폐기물 발생에서 골재 생산까지 강수 등 외부 수분과 접촉이 없었던 시료를 대상으로 시료채취 전 최소 5일간 강수가 없었던 날을 택하여 2012년 8월 1일과 2일 오후에 1시간동안 생산된 시료를 현행 폐기물공정시험기준에서 규정하고 있는 콘크리트 고품화물 시료 채취방법(환경부, 2011b)에 준하여 각각 100kg씩을 대표시료로 각각 채취하였다. 채취한 시료는 현장에서 즉시 체가름 시험기를 통해 입도별로 분류하여 향후 연구에 사용하였다.

2. 알칼리 용출특성 조사방법

순환골재로부터 용출되는 알칼리 용출특성과 용출량 조사를 위해 여러 방법을 고려할 수 있다. 첫 번째 방법으로 화학 조성 분석을 통한 추정 방법으로, 순환골재에 포함되어 있는 성분 중 CaO 등 물과 반응하여 알칼리 성분(OH<sup>-</sup>)을 용출시키는 것으로 알려진

성분 함량을 화학적으로 측정하는 방법을 고려할 수 있으나, 이는 용출 단계에서 주변 조건에 따라 용출량이 크게 좌우될 수 있어 이의 상관관계 도출이 어려운 단점이 있다.

두 번째 방법으로 물과 접촉하여 발생하는 수산화기(OH<sup>-</sup>) 농도를 pH meter로 측정하여 수소이온(H<sup>+</sup>) 농도를 추정한 후 물의 이온화적을 이용하여 산정하는 방법을 생각할 수 있는데, 이는 이온 농도가 높아 pH가 매우 낮거나 높을 경우 수산화기(OH<sup>-</sup>) 농도 산출에 오차가 커질 수 있다.

세 번째 방법으로 적정(titration)법을 이용하여 수중의 알칼리도 유발물질의 농도를 측정하는 방법으로 알칼리도를 측정하여 산성중화능의 용량(ANC: Acid Neutralization Capacity)을 고찰하는 방법으로, pH 측정법에 비해 넓은 범위의 알칼리 농도 산출이 가능하고 페놀프탈레인 알칼리도(PA: Phenolphthalein Alkalinity)와 메틸오렌지 알칼리도(MA: Methylorange Alkalinity)를 구분 측정함으로써 알칼리도를 유발하는 이온의 종류와 양을 추정(Vernon 등, 1980)할 수 있다. 반면, 순환골재와 물을 접촉시켜 알칼리 성분을 용출시켜야 하는 과정에서 알칼리 성분의 용출에 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라 순환골재에 포함되어 있는 알칼리 성분을 모두 용출하기 어려운 단점이 있다.

이러한 알칼리도 측정법의 단점을 보완하기 위해 네 번째 방법으로 순환골재에서 용출되는 알칼리 성분으로 인하여 접촉하는 물의 pH가 높아질 때마다 이를 산으로 중화하면서 계속 용출반응을 진행함으로써 순환골재의 알칼리 성분 용출 속도를 높여 알칼

리 용출에 소요되는 시간을 단축하고, 산을 중화할 수 있는 본질적인 능력(ANC)을 좀 더 정확하게 측정하는 방법을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 순환골재로부터 알칼리 용출 특성을 예측하거나 용출량 추정을 위해 생각할 수 있는 이상의 네가지 방법을 모두 적용하여 실험하였다. 즉, 순환골재의 알칼리 용출특성이 순환골재 내에 포함되어 있는 CaO 성분에 의해 유발되므로 직접 CaO 성분을 포함한 순환골재를 구성하고 있는 화학성분을 XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometry: EDX-720, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다.

또한 순환골재의 알칼리 용출 실험을 위한 실험장치로 회분식 반응기(Batch type)와 연속식 반응기(Column type)를 사용하였다. 먼저 2.0L 크기의 비커 형태의 회분식 반응기에서 입도별로 선별된 일정량(200g 혹은 500g)의 순환골재를 증류수 500mL 넣은후 기계식 교반기를 이용하여  $250 \pm 10$ rpm의 일정한 속도로 교반하면서 용출실험을 진행하였으며, 용출 반응 시간에 따라 일정 시간 간격으로 pH meter (pH-270L, iSTEK, Korea)로 pH를 측정하고, 상등수를 취하여 알칼리도를 측정하여 다음의 Eq.(1)로 페닐프탈레인 알칼리도(PA)와 메틸오렌지 알칼리도(MA)를 각각 계산하였다. 순환골재로부터 용출되는 알칼리 성분의 영향을 배제하기 위한 실험으로는 회분식 반응기에서 각각의 크기별 200g의 순환골재에 200mL의 증류수를 넣어 용출실험을 하였으며, 시간 경과에 따라 pH를 측정하여 pH 7~8 이상이 될 경우 황산( $H_2SO_4$ )을 주입하여 pH를 7~8의 범위로 연속적으로 조정하면서 실험을 진행하였다.

연속식 반응기를 이용한 실험은 일정 크기의 순환골재 충전 컬럼( $\phi 100\text{mm} \times L150\text{mm}$ )에 일정량(200g 혹은 500g)을 충전한 후, 상향류식으로 분당 100mL의 증류수를 정량펌프(MasterFlex LS, Cole Parmer, USA)를 이용하여 주입하면서 진행하였으며, 순환골재 충전 컬럼을 통과하여 배출되는 배출수를 분석함으로써 알칼리 용출특성을 검토하였다.

$$\text{알칼리도}(\text{CaCO}_3 \text{ mg/L}) = \frac{a \times N \times 50}{V} \times 1000 \quad (1)$$

여기서, a: 소비된 산의 부피(mL), N: 산의 농도(eq/L), V: 시료의 양(mL)

### 3. 중금속 용출특성 조사방법

순환골재의 중금속 용출량은 순환골재 입도별로 폐기물공정시험방법(KLT)(환경부, 2011b)과 미국 EPA에서 정한 폐기물 용출시험방법(TCLP)(USEPA, 1986)에 따라 시험하였다. 조사 대상 중금속은 순환골재에 포함되어 있거나 용출이 예상되는 중금속으로 철(Fe)과 납(Pb), 구리(Cu), 아연(Zn), 망간(Mn), 크롬(Cr) 등을 선정하였다. 중금속 용출시험은 동일한 시료에 대해 3회씩 실시하여 평균값으로 나타내었다.

#### (1) KLT(Korean Leaching Test Method, 폐기물공정시험법) 방법

고형폐기물 용출실험법은 Table 2에서 보듯 증류수를 pH 5.8~6.3이 되도록 염산으로 조절하여 용출용매로 사용하며 폐기물의 양은 용출용매 L당 100g으로 되어 있다. 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 제조한 용출용매 1L에 100g의 순환골재 시료를 넣고 진탕기에서 상온상압 하에 200rpm으로 6시간 동안 진탕시켜 용출을 시켰다. 용출실험이 끝난 용출액은 여과하여 여액을 ICP(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy: OPTIMA 7300DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다.

#### (2) TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 방법

먼저 파쇄한 고화체 시료에 의한 용출용매의 pH 변화를 예측하기 위해 시료 5g을 증류수 100mL에 넣어 5min 간 급속 교반하여 pH를 측정하고 pH를 2.28로 조절하기 위한 산의 양을 계산하였다. 계산된 아세트산을 TCLP법에 따라 pH 2.28이 되도록 미리 준비한 증류수에 넣고 순환골재 시료 100g과 용출용매의 비가 1:20(w/w)가 되도록 하여 20℃에서 30rpm으로 18시간 동안 항온진탕기로 용출시킨 후, 여액을 ICP로 분석하였다.

Table 2. Comparison of leaching methods

Leaching factors	KLT	TCLP
Solid Weight	50g	100g
Maximum particle size	5mm	9.5mm
Leaching medium	HCl solution	Acetate buffered solution
pH of leaching Solution	5.8 ~ 6.3	fluid #1:4.93±0.05 fluid #2:2.28±0.05
Solid discarded/Leaching solution ratio(kg/L)	1:10(w.v)	1:20
Leaching temperature	Room temperature	22±3°C
Leaching time	6hr	18hrs
Leaching apparatus & condition	Reciprocal shaker Speed : 200rpm Stroke : 4~5cm	End-over-end flashing 30±0.2rpm

Table 3. Chemical composition analysis results of the recycled concrete aggregate

Classification		CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	etc
recycled aggregates	20mm over	25.3	35.6	18.3	8.7	8.3	3.8
	20~5.0mm	36.8	28.9	15.9	6.7	8.2	3.4
	5.0~2.5mm	40.1	28.2	13.4	7.4	7.6	3.3
	2.5~0.4mm	44.2	26.1	12.5	7.0	6.7	3.5
	below 0.4mm	50.4	21.6	13.0	5.9	5.5	3.5
natural aggregates	20mm over	9.2	37.5	27.5	11.3	10.4	4.2
	5~2.5mm	12.6	34.0	23.6	12.5	12.7	4.6
	below 2.5mm	13.4	33.7	21.3	13.7	13.8	4.1
other research	Lee etc(2002)*	8.3	67.0	9.8	2.2	3.0	9.7
	An etc(2005)**	13.8	67.4	2.2	9.8	2.8	4.0

\* Source : 이용수 등, 2002 ; 안남규 등, 2005

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 순환골재의 알칼리 용출특성 조사 결과

##### (1) XRF 분석 결과

연구에 사용한 순환골재를 크기별로 분리한 후 XRF 분석을 통해 화학적 조성 성분을 분석한 결과를 Table3에 제시하였다. Table 3에서 순환골재를 구성하는 성분은 대부분이 CaO와 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분임을 알 수 있다. 알칼리 용출 특성과 관련이 큰 CaO 성분은 대체로 25.3~50.4%의 높은 함량을 나타냈다. 이는 천연골재를 분석한 결과나 다른 문헌연구(이용수 등, 2002; 안남규 등 2005)에서 나타난 결과에 비해 상당히 높은 수준임을 알 수 있는데, 이는 순환골재 원료인 건설폐기물의 구성 성분이 상이함에서 기인하는 것으로 생각된다.

또한 순환골재의 크기에 따라 크기가 작을수록 CaO 성분이 높게 나타나, 작은 크기의 순환골재가 높은 알칼리 성분을 용출할 것으로 예상되었다. 그러나 실제 물과의 반응시 온도나 산도 등 물의 특성, 크기나 접촉면적 등 순환골재의 특성, 용출조건, 반응시간, 접촉방식 등에 따라 CaO 성분 중 반응하는 양의 차이가 발생할 것이므로 XRF 분석을 통해 산정한 CaO 성분의 양과 알칼리 성분의 용출 양을 직접적으로 연관지어 고찰하기에는 어려울 것으로 예상된다. 따라서, 화학조성 분석자료는 순환골재에서 발생하는 알칼리 성분의 양을 간접적으로 예측하는 참고지표 정도로 활용함이 바람직할 것으로 판단되었다.

##### (2) 회분식 반응기에서 pH 및 알칼리도 분석 결과

순환골재가 물과 접촉할 때 발생하는 수산화이온

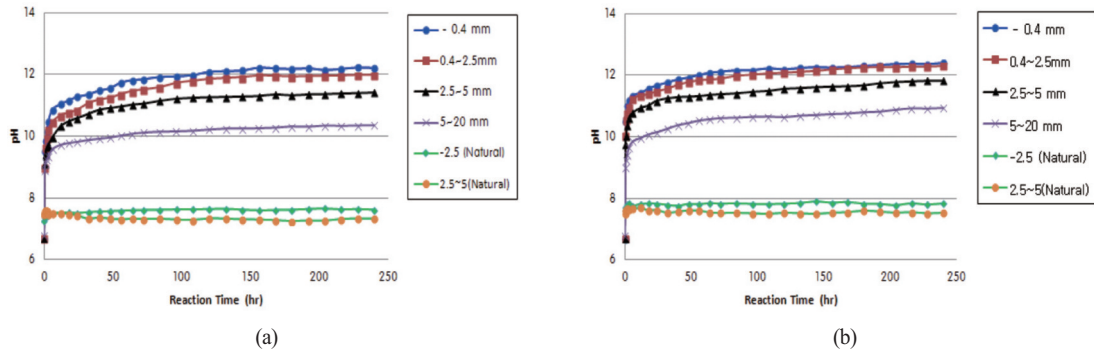


Figure 1. Variation of leaching medium pH according to reaction time in batch reactor of (a) 200g and (b) 500g recycled aggregate

(OH<sup>-</sup>) 세기를 고찰하기 위하여 입도별로 분류한 일정량의 순환골재를 회분식 반응기에 넣고 증류수(500mL)로 용출하면서 용출 시간별로 변화되는 pH를 측정된 결과를 동일한 조건에서 실험한 천연골재의 경우와 비교하여 Figure 1에 제시하였다.

Figure 1에서 순환골재를 증류수에 접촉시키면 접촉 순간부터 증류수의 pH가 빠르게 증가하기 시작하여 전체 250시간동안 측정된 pH의 변화량 중 70~80% 이상이 초기 1시간 이내에 발생하였다. 이는 순환골재와 접촉하고 있는 증류수의 pH가 높아짐에 따라 알칼리 성분의 용출 속도가 작아지기 때문으로 판단된다. 순환골재 크기에 따라 크기가 작을수록 250시간 반응 전체에서 일어나는 pH 변화량에 대한 초기 pH 변화율이 더 큰 경향을 보이며, 대체로 pH 변화량도 더 크게 나타났다. 이는 증류수와 접촉하는

순환골재의 접촉 표면적의 크기에 따라 알칼리 성분의 용출량이 다르기 때문으로 판단된다.

순환골재의 pH 변화 양상을 천연골재의 경우와 비교해 볼 때, 천연골재의 경우 pH 증가량이 상대적으로 매우 적은 것으로 나타났는데, 이는 순환골재에 존재하는 시멘트 페이스트 성분에 의해 알칼리 성분이 용출되기 때문으로 보이며, 이에 비해 천연골재에 함유되어 있는 CaO 성분은 물과 접촉시 쉽게 용출되지 않음을 알 수 있다.

회분식 반응기에서 순환골재에 대한 용출액을 분취하여 적정법으로 알칼리도를 측정된 결과를 Table 4에 제시하였다. Table 4에서 알칼리 성분의 용출량을 표현하는데 있어, pH와 알칼리도에 대한 민감도를 살펴보면, 동일한 조건에서 순환골재 투입량에 따른 pH 값의 차이는 크지 않은 반면, 이를 pOH나 수

Table 4. Variation of pH and alkalinity for recycled aggregates in batch reactor

Aggregate size(mm)	wt. of aggregate (g/500mL)	pH	pOH	OH <sup>-</sup> Concentration (mol/L)	OH <sup>-</sup> Concentration (mg/L)	M-Alkalinity(mg/L)
20 over	200	10.26	3.74	1.82E-04	3.09	157.4
	500	10.42	3.58	2.63E-04	4.47	192.4
20~5.0	200	10.36	3.64	2.29E-04	3.89	180.6
	500	10.94	3.06	2.29E-04	14.81	280.6
5.0~2.5	200	11.41	2.59	2.57E-03	43.70	540.4
	500	11.82	2.18	6.61E-03	112.32	630.2
2.5~0.4	200	11.98	2.02	9.55E-03	162.35	1008.4
	500	12.30	1.70	2.00E-02	339.19	1224.5
below 0.4	200	12.21	1.79	1.62E-02	275.71	1208.6
	500	12.42	1.58	2.63E-02	447.15	1360.4

Table 5. Alkalinity composition of recycled aggregates according to particle size

Size(mm)	wt. of aggregate (g/1.5L)	alkalinity		alkalinity ions		alkalinity contribution	
		M-alk.	P-alk.	OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
		(mg/L as CaCO <sub>3</sub> )		(mg/L as CaCO <sub>3</sub> )		(%)	
more than 20	200	157.4	108.6	59.8	97.6	38.0	62.0
	500	192.4	150.8	109.2	83.2	56.8	43.2
20~5.0	200	180.6	138.2	95.8	84.8	53.1	46.9
	500	280.6	226.7	172.8	107.8	61.6	38.4
5.0~2.5	200	540.4	451.2	362.0	178.4	67.0	33.0
	500	630.2	546.2	462.2	168.0	73.3	26.7
2.5~0.4	200	1008.4	904.8	801.2	207.2	79.5	20.5
	500	1224.5	1128.3	1032.1	192.4	84.3	15.7
0.4 or less	200	1208.6	1098.6	988.6	220.0	81.8	18.2
	500	1360.4	1266.3	1172.0	188.2	86.2	13.8

산화이온(OH<sup>-</sup>)의 농도로 환산할 경우 pH에 비해 그 차이가 훨씬 큼을 알 수 있다.

예를 들어, pH 상승량과 메틸오렌지 알칼리도(MA)가 가장 크게 나타난 순환골재 크기 2.5~0.4mm의 경우, 500mL 증류수에 순환골재를 200g 투입했을 경우와 500g 투입했을 경우 pH의 차이는 각각 11.98과 12.30으로 차이가 2.6%에 불과하지만, pOH로 계산할 경우 15.8%가 되며, 수산화이온(OH<sup>-</sup>)의 농도나 메틸오렌지 알칼리도(MA)의 크기로 나타낼 경우에는 18% 이상의 차이가 나타남을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서의 경우와 같이 수산화이온의 농도가 매우 높은 경우 수산화이온의 농도와 pH 간의 오차가 커질 수 있음을 감안하면 실제 환경상에 미치는 영향은 알칼리도 측정 방법이 좀 더 민감하게 영향을 나타낸다.

순환골재 크기별로 지시약을 이용한 적정법을 사용하여 순환골재와 접촉한 증류수의 알칼리도를 측정한 결과를 Table 5에 제시하였다. 순환골재의 크기와 관계없이 모두 페놀프탈레인 알칼리도(PA)가 메틸오렌지 알칼리도(MA)의 50%보다 큰 범위(P)1/2 M)에 있음을 알 수 있다. 따라서 알칼리도를 유발하는 물질중 수산화물(OH<sup>-</sup>)에 의한 알칼리도는 2P-M으로, 탄산염(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)에 의한 알칼리도는 2(M-P)로 계산할 수 있으며, 중탄산염(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 영향은 거의 무시할 수 있다(Howard 등, 1998). 이와 같은

방법으로 계산한 각 성분별 알칼리도 기여도를 Table 5에 제시하였다. Table 5에서 순환골재의 크기가 작을수록, 혹은 알칼리도의 양이 클수록 접촉한 증류수의 알칼리도를 유발하는 물질은 대부분 수산화물(OH<sup>-</sup>)에 기인하는 것을 알 수 있다.

(3) 연속식 반응기에서 알칼리도 발생량 측정

순환골재가 가지는 알칼리 용출량을 보다 정확하게 측정, 평가하기 위하여 입자 크기 5.0~2.5mm와 2.5~0.4mm인 순환골재에 대해 일정량(각각 200g과 500g)의 순환골재를 충전한 컬럼에 증류수를 100mL/min의 속도로 연속적으로 통과시키면서 배출되는 배출수의 알칼리도를 연속 측정된 결과를 Figure 2에 제시하였으며, 이를 바탕으로 순환골재의 크기별 누적 알칼리 양과 순환골재 단위 g당 발생하는 총 알칼리도를 산정한 결과를 Table 6에 제시하였다.

Figure 2에서 보는 바와 같이 모든 경우에서 배출되는 증류수의 알칼리도는 초기에 최대 알칼리도 발생 이후 점차 감소하는 경향을 보이고 있으나, 상당 시간(480시간) 경과한 후에도 배출되는 증류수 중에 알칼리도가 어느 정도는 존재함을 알 수 있다. 알칼리도가 영(zero)인 지점까지 증류수를 투입하는 것은 현실적으로 불가능하다고 판단하여 초기 알칼리도와 비교하여 일정한 상태(처음 알칼리도 발생량의 15% 이하)에 도달할 때 까지 실험한 후 누적 총알칼리도

Table 6. Cumulative alkalinity and total alkalinity per unit wt. of recycled aggregates

Size(mm)	wt. of aggregate(g/column)	Cumulative alkalinity(mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Total alkalinity(mg/L as CaCO <sub>3</sub> / g)
5.0~2.5	200	5,198	26.0
	500	10,846	21.7
2.5~0.4	200	7,946	39.7
	500	18,338	36.7

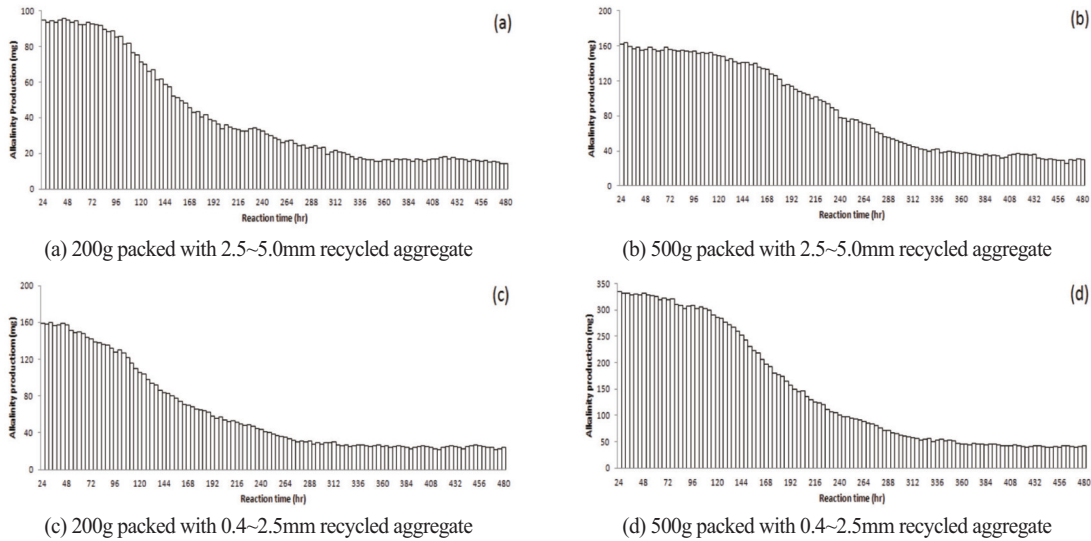


Figure 2. Amount of leached alkalinity in column reactor

를 계산하였다.

순환골재의 크기별, 투입량에 따른 누적 알칼리 양을 산정한 결과와 이로부터 도출한 순환골재 단위 g 당 발생하는 총 알칼리도는 Table 6에 제시한 바와 같이 순환골재의 단위 무게당 알칼리 발생량은 최대 39.7mg 정도로 산정되었으며, 알칼리 발생량은 충전한 순환골재량보다는 순환골재의 크기에 따라 더 많이 좌우됨을 알 수 있다.

(4) 산 주입을 통한 알칼리도 측정 결과

연속식 반응기를 이용한 순환골재의 용출시 용출액 알칼리도 측정 방법은 시간은 과다하게 소요됨에도 잔류되는 알칼리도가 존재함으로써 순환골재의 정확한 알칼리 양 측정에는 한계가 있다. 이를 보완하고자 순환골재에서 발생하는 알칼리 성분을 직접 중화하는데 필요한 산의 양을 측정하여 순환골재에서 발생하는 알칼리 성분의 양을 추정하고자 하였다. 즉, 산으로 알칼리를 연속적으로 중화시킴으로써 용

출액의 pH를 7~8로 유지할 경우 알칼리 농도 상승에 따른 용출 속도 저하를 방지하여 신속 정확한 측정이 가능할 것으로 기대하였다.

이를 위해 회분식 반응기에서 순환골재와 접촉하고 있는 증류수의 pH를 연속적으로 측정하면서 산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 주입하여 용출된 알칼리 성분을 중화함으로써 pH가 7~8 범위로 유지되도록 연속적으로 실험한 결과를 Figure 3과 Table 7에 제시하였다. Figure 3에서 보는 바와 같이 모든 경우에 있어 산의 투입으로 pH가 낮아졌다가 다시 증가하기를 반복하였으나, 상당한 시간(480시간)이 경과한 후에는 순환골재와 반응하고 있는 증류수의 pH가 7~8 범위에서 비교적 안정하게 유지됨을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 투입된 산의 양(농도×주입량)을 해당하는 알칼리의 양으로 전환하여 계산한 결과 Table 7에 제시한 바와 같이 순환골재 단위 g당 발생하는 총 알칼리의 양은 순환골재 크기별로 각각 16.7, 27.4, 46.5, 62.2, 90.8mg으로 나타나, 앞서 연속식 반응기에서 측정



Table 7. Total alkalinity generation by acid neutralization and unit wt. of recycled concrete aggregate

Size(mm)	Dose(g/column)	Total alkalinity generation by acid neutralization(mg as CaCO <sub>3</sub> )	Alkalinity generation by recycled aggregates(mg as CaCO <sub>3</sub> / g)
more than 20 mm	200	3,345	16.73
20~5.0 mm	200	5,485	27.43
5.0~2.5 mm	200	9,305	46.53
2.5~0.4 mm	200	12,440	62.20
0.4 mm or less	200	18,165	90.83

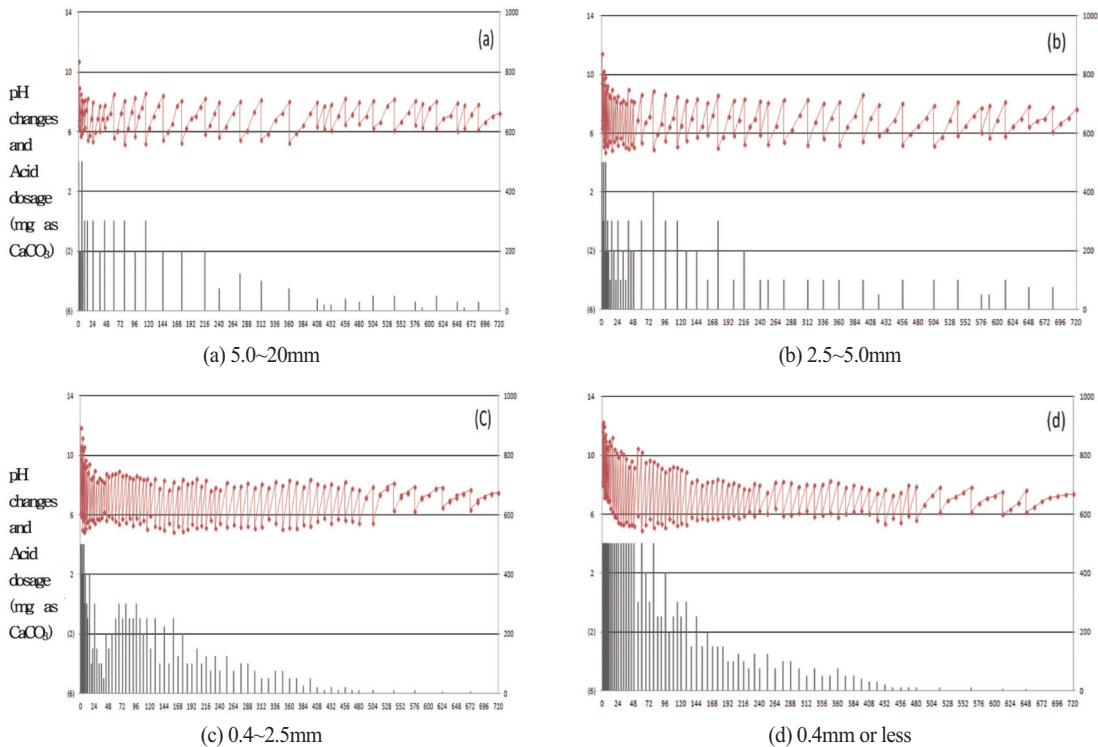


Figure 3. pH variation according to neutralization with acid during batch leaching of recycled concrete aggregates

한 알칼리도를 통해 계산한 양에 비하여 월등히 높은 값을 나타내었다.

순환골재 단위 질량당 발생한 총 알칼리의 양을 당량계산 (CaO/CaCO<sub>3</sub>=0.56)을 통해서 CaO 성분의 단위로 환산한 후 앞의 순환골재 XRF의 분석결과 CaO 성분비와 비교하여 보면 각각의 크기별로 CaO 성분중 약 3.7~10.1% 정도가 용출된 것을 의미한다 (Skousen, Jeffrey G., 1996). 따라서, 추후 순환골재를 환경중에서 도로보조기층 재료로 사용할 경우 알칼리 용출 영향이 지속적으로 발생할 수 있는 가능성이 있다고 할 수 있다.

## 2. 순환골재의 중금속 용출특성 조사 결과

순환골재 구성 성분중에는 중금속 성분들이 함유되어 있다. 본 연구에서는 순환골재에 포함되어 있는 중금속의 용출 가능성을 평가하기 위하여 KLT법과 TCLP법으로 중금속 용출시험을 한 결과 Table 8과 같이 나타났다. 대체로 TCLP가 KLT법에 비하여 약간 더 높은 중금속 용출 농도를 나타내었고, 순환골재의 입경이 작을수록 용출되는 농도도 약간 더 높은 경향을 나타내었다. 그러나, 순환골재에서 용출되는 중금속의 농도는 폐기물관리법에서 규정하고 있는 유해폐기물 분류기준(환경부, 2013b)과 비교할 때

Table 8. Comparison of heavy metal concentrations by KLT and TCLP method for recycled concrete aggregate

Classification	Methods	Aggregate size	Analyzed heavy metals(mg/L)					
			Fe	Pb	Cu	Zn	Cr	Mn
Experimental results	KLT	0.4mm below	BDL	BDL	BDL	0.011	0.022	BDL
		2.5~0.4mm	BDL	BDL	BDL	0.017	0.021	BDL
		5~2.5mm	BDL	0.011	BDL	0.012	0.016	BDL
		20~5mm	BDL	0.017	BDL	0.014	0.010	BDL
	TCLP	0.4mm below	0.594	BDL	0.044	0.763	0.018	0.497
		2.5~0.4mm	0.421	BDL	0.029	0.335	0.016	0.291
		5~2.5mm	0.402	0.012	0.080	0.351	0.020	0.635
		20~5mm	0.169	0.018	0.067	0.446	0.014	0.361
Environmental standards	Hazardous substances standards of waste		-	3	3	-	1.5	-
	standards of drinking water		0.3	0.01	1.0	3.0	0.05	0.3

\* BDL: below detection limit

1/50 이상 낮은 수준으로 유해폐기물 기준에는 해당되지 않았다. 또한, 중금속 용출 농도를 각각의 시험법에서 사용하는 고액비(1:10 혹은 1:20)를 기준으로 순환골재 단위 질량(kg)당 함유된 중금속 양(mg)으로 환산하여 토양환경보전법에서 규정하고 있는 토양오염기준(환경부, 2013c)과 비교할 때에도 토양오염 대책기준은 물론 우려기준을 하회하고 있었다. 따라서, 순환골재를 직접 매립할 경우, pH에 대한 영향 등을 배제하면 중금속 등에 의한 오염은 우려할 만한 수준은 아닌 것으로 평가할 수 있다. 한편, 중금속 용출 농도를 먹는물 수질기준(환경부, 2008)과 비교할 경우에는 기준을 상회하는 항목 (Pb, Fe, Mn)들이 나타났다. 폐기물 용출시험방법인 KLT법과 TCLP법이 폐기물의 유해성을 판단하기 위한 극한 시험법으로 먹는물 기준과의 직접비교는 어려우나, 적어도 순환골재 세척수나 순환골재를 통과한 강수 등의 유출수가 음용수원으로 유입될 경우 중금속 농도에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되었다.

#### IV. 결론

건설폐기물로부터 생산되는 순환골재의 알칼리 및 중금속 용출특성을 규명하여 주변에 끼칠 환경영향의 정도를 평가하기 위한 연구결과는 다음과 같다. 첫째, 순환골재를 구성하는 화학성분을 분석한 결과 알칼리 성분의 용출특성과 직접적인 관련 있는 CaO

성분은 25.3~50.4% 범위로 나타났으며, 대체로 순환골재 크기가 작을수록 CaO 용출율 성분이 크게 나타났다. 둘째, 순환골재를 회분식 반응기에서 증류수와 접촉시키며 pH를 측정된 결과, pH가 빠르게 상승하였으며, 전체 pH 변화량의 70% 이상이 초기 1시간 이내에 발생했다. 또한 순환골재 크기가 작을수록 초기pH 변화가 크게 나타났다.

셋째, 순환골재의 알칼리 용출특성을 나타내기 위하여 pH 측정법과 pOH 및 수산화물(OH<sup>-</sup>) 농도 산정법, 알칼리도 측정법에 대하여 비교한 결과, 알칼리도 측정법의 민감도가 상대적으로 크게 나타났다. 또한, 순환골재에서 용출되는 알칼리도 유발물질은 대부분 수산화기(OH<sup>-</sup>) 이었다. 넷째, 순환골재의 산성중화 능력을 알아보기 위하여 연속식 반응기에서 누적 발생 총알칼리도를 측정하는 방법과 회분식 반응기에서 발생하는 알칼리도를 중화하는데 소요되는 산의 양을 측정하는 방법을 사용하여 실험한 결과, 후자의 경우가 순환골재 단위중량에서 발생하는 알칼리량이 더 높게 평가되었으며, 순환골재 단위 질량(g)당 발생하는 알칼리도는 최대 90.83mg 정도로 나타났다. 따라서 순환골재를 환경중에서 도로보조기층 재료로 사용할 경우 알칼리 용출 영향이 지속적으로 발생할 수 있는 가능성이 우려된다.

다섯째, 순환골재에 대한 중금속 용출 특성을 KLT법과 TCLP법으로 분석한 결과 두 경우 모두 유해폐기물 판단 기준이나 토양오염 우려기준에는 미치지

못하는 농도로 나타났다. 그러나 Pb, Mn, Fe는 음용수 기준을 초과하여 유출수가 음용수원으로 유입되지 않도록 순환골재를 사용한 도로의 초기 유출수 관리가 요구된다.

### 참고문헌

- 국토해양부, 2009, 순환골재 품질기준, 국토해양부 공고 제2009-459호.
- 강영현, 장대창, 강선홍, 2009, 다공성 경량골재 및 순환골재를 이용한 비점오염원 저감시설의 처리효율 평가, 상하수도학회지, 23(6), 735-741.
- 김낙빈, 2004, 건설폐기물 적정처리 및 재활용 촉진 방향, 건설폐기물 자원화 기술 및 정책발표회, 148-157.
- 김은호, 김정권, 성낙창, 1997, 페콘크리트의 중화 및 중금속 제거를 위한 재활용에 관한 연구 (I), 한국환경과학회지, 6(5), 497-503.
- 김종범, 오재일, 조운호, 2001, 재생골재의 산성수 중화능력 및 금속이온 용출특성, 대한토목학회지, 21(4-B), 485-491.
- 김진만, 김하석, 박선규, 곽은구, 이도현, 2008, 산 처리한 순환잔골재를 활용한 모르타르의 강도특성, 한국폐기물학회지, 25(4), 273-279.
- 안남규, 오재일, 이주영, 2005, 페콘크리트 재생잔골재의 산중화능 산정, 한국폐기물학회지, 22(1), 59-66.
- 안남규, 오재일, 이재현, 2007, 재생잔골재 알칼리 생성조를 이용한 산성광산배수 처리, 한국폐기물학회지, 24(2), 185-192.
- 이세현, 2001, 순환골재의 재활용 활성화 방안, 한국도로포장공학회지, 5(4), 21-35.
- 이용수, 조재범, 현재혁, 정하익, 2002, 페콘크리트를 이용한 중금속(Cd, Pb, Cu, Cr<sup>6+</sup>) 제거능력 평가, 한국폐기물학회 추계학술발표연구회 논문집, 191-194.
- 한국환경공단, 2010, 2009년도 건설폐기물 재활용 통계조사 보고서.
- 환경부, 2008, 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙, 환경부령 제276호.
- 환경부, 2011a, 2010 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
- 환경부, 2011b, 폐기물 공정시험기준(방법), 환경부 고시 제2011-3호.
- 환경부, 2013a, 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률 시행령, 대통령령 제24451호.
- 환경부, 2013b, 폐기물관리법 시행규칙, 환경부령 제508호.
- 환경부, 2013c, 토양환경보전법 시행규칙, 환경부령 제509호.
- 환경부 · 국토해양부, 2012, 순환골재 등 의무사용 건설공사의 순환골재 · 순환골재 재활용제품 사용용도 및 의무사용량에 관한 고시, 환경부 고시 제2012-198호, 국토해양부 고시 제2012-652호.
- American Public Health Association, 1998, Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed., American Water Works Association, Water Environment Federation, 2-29.
- Howard S. Peavy, Donald R. Rowe, and George Tchobanoglous, 1998, Environmental Engineering, McGraw-Hill, 27-31.
- Sergi, G., 1986, Corrosion of steel in concrete, Cement matrix variables, Ph.D. dissertation, Aston University, Birmingham, UK.
- Skousen, Jeffrey G., Ziemkiewicz, Paul F., 1996, Acid mine drainage control and treatment, 2nd Edition, West Virginia University, 159-162.
- U.S. Environment Protection Agency(USEPA), 1986, Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP), Fed. Reg., 54(216), 40643-40653.
- Vernon L. Snoeyink, David Jenkins, 1980, Water Chemistry, John Wiley & Sons. 178-181.