

용출특성규명을 통한 재생골재 환경성 평가

강성호 · 이상훈[†] · 광기석* · 이주형* · 정문경*

가톨릭대학교 생명공학부 환경공학전공 · *한국건설기술연구원 지반공학연구소

(2004년 12월 6일 접수, 2005년 2월 24일 채택)

Characterization of Leaching Behaviour of Recycled Concrete for Environmental Assessment

S. H. Kang · S. H. Lee[†] · K. S. Kwak* · J. Y. Lee* · M. K. Chung*

Environmental Engineering Section, The Catholic University of Korea

**Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology*

ABSTRACT : We conducted several different leaching experiments for assessing the potential environmental risk when utilizing recycled concrete for stabilizing bridge pier. The methods include continuous batch leaching test (DIN 38414-S4), availability test (NEN 7341), pH-stat test (CEN/TC 292/WG6) and tank diffusion test (NEN 7345). The concentration ranges vary depending on the testing method. Nearly all the trace elements were low, some elements recording under detection limit. The maximum concentrations for trace elements leached throughout the whole tests are (as mg/L); Cd (0.029), Cu (0.437), Pb (0.14), Ni, Zn (0.95), Hg (0.005). Although the testing methods we used in this study are much more rigorous than other commonly adapted method including TCLP and domestic testing method for solid waste, the trace elemental concentrations are under the criteria for hazardous material set by the TCLP and domestic method. The result seems to suggest that applying the recycled concrete on stream water will be acceptable practice as far as trace elements are concerned. However, the influence of inorganics such as Ca, Mg, Ni and SO_4^{2-} on aquatic ecology should be further examined.

Key Words : *Recycled Concrete, Leaching Test, Heavy Metals, Environmental Assessment*

요약 : 재생골재를 교각안정용 쇄석으로 재활용하기 위하여 다양한 용출방법을 이용하여 미량원소를 포함한 무기이온들의 용출특성을 연구하였다. 본 연구에 적합한 방법은 연속 회분식 용출시험(Continuous batch leaching test: DIN 38414-S4), 가용용출시험(Availability test, NEN 7341), pH 유지 시험(pH-stat test: CEN/TC 292/WG6) 그리고 탱크 확산시험(Tank diffusion test: NEN 7345) 등이다. 기준에 많이 적용되온 EPA의 TCLP와 국내 공정시험법의 경우 빠르고 경제적인 방법으로 고형폐기물의 단기간 용출특성을 파악할 수 있으나 다양한 용출환경에서 장기간 일어나는 용출특성을 판단하기 어려운 점이 있었다. 본 시험에 적용된 방법들은 이러한 제한을 극복하고 보다 다양한 환경에서 일어날 수 있는 용출특성을 평가하고자 하였다. 본 연구에 적용된 시험들은 별도의 위해성 판단 기준이 없다. 그러나 본 시험의 결과들을 위해성 판단을 위해 많이 쓰이는 TCLP와 국내폐기물 공정시험방법의 기준에 비교할 때 접촉시간, pH 조건 등의 용출조건이 더 가혹한 조건에서 이루어졌음에도 두 시험의 위해성 기준에 훨씬 못 미치고 있다. 이는 재생골재를 교각안정용 쇄석으로 활용할 경우 환경위해 정도가 우려할 수준 이하일 것임을 시사한다. 특히 교각안정용 쇄석이 사용될 하천은 물이 정지되지 않고 늘 흐르는 곳으로써 용출된 원소들은 그 자리에 축적되지 않고 분산, 희석되어 그 영향정도는 더 낮아질 것으로 생각된다.

주제어 : 재생골재, 용출시험, 중금속, 환경성 평가

1. 서론

재생골재는 주로 콘크리트, 벽돌 및 철근 등으로 구성되며 도로건설, 배수재료 등에 재활용되고 있다. 정부는 건축 폐기물 발생으로 인한 환경파괴를 막고 자원 재활용을 촉진하기 위하여 정부발주 공사의 경우 일정비율 이상의 재생골재 사용을 의무화하는 법안이 추진 중에 있으며 이로 인한 재생골재 재활용 비율은 점차 증가할 것으로 예상된다. 재생골재의 활용에 앞서 재생골재의 공학적 특성 규명

과 품질 향상이 우선적으로 이루어져야하나 동시에 환경적 특성규명과 안전성 확보가 필요하다. 특히 시멘트가 함유된 재생골재는 물과 접촉할 경우 중금속과 염류의 용출로 인한 환경위해성의 우려가 있어^{1~3)} 재생골재의 재활용을 위해서는 원소들의 용출특성 규명과 안전성 확보가 요구된다.

일반적으로 고형폐기물은 단일체(monolithic) 또는 입상(granular) 물질로 구성되며 잠재적 원소용출 특성을 연구하기 위하여 폐기물의 물리적, 화학적 특성을 고려한 다양한 용출시험방법이 제안, 사용되고 있다.^{2,4~6)} 용출시험의 목적은 1) 사용하고자 하는 물질이 환경기준에 적합한지의 판정, 2) 측정환경에서 잠재적 독성물질 방출가능성 평가, 3) 오염물질 용출정도를 조정하는 조정인자들의 결정, 4) 야의

[†] Corresponding author
E-mail: slee@catholic.ac.kr
Tel: 02-2164-4372

Fax: 02-2164-4865

에서의 실제 발생하는 용출량 측정 그리고 5) 오염물질의 이동성을 결정하는 이동 및 분배계수 결정 등이다. 대표적 용출시험방법으로는 국내의 폐기물 공정시험방법과 미국 EPA의 TCLP방법 등을 들 수 있다. 이 시험방법은 빠른 시간에 비교적 단순한 과정을 통해 경제적으로 고품폐기물의 용출특성을 평가할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 시험방법들은 주로 단기간 용출영향을 대상으로 한 것으로 물리, 화학적 용출환경 변화에 따른 장기용출특성을 예측하기 어려운 한계를 가진다.

고형폐기물 용출시험 방법은 1) 교반/비교반 여부, 2) 회분식/연속식 그리고 3) pH 조정의 유무 등에 따라 나뉘며 연구 목적에 따라 이들 방법을 조합하여 특정 환경에서 용출잠재성을 다양하게 평가하기도 한다.^{5~8)} 이밖에 새로운 용액을 지속적으로 첨가 또는 교체하는 동적형태와 처음 첨가한 용액을 교환하지 않는 정적형태가 있다. 전자의 경우 회분식 시험이 해당하며 후자는 주상용출 시험이 해당한다.

본 연구는 재생골재를 교량안정용 쇄석으로 재활용할 때 무기이온 용출로 일어날 수 있는 환경위해성을 평가하고자 한다. 국내 폐기물 용출시험과 미국 TCLP 방법을 적용한 기존의 연구에서는 재생골재가 각 시험의 기준 이내를 나타냈다.⁹⁾ 그러나 교각용 쇄석의 경우 특히 수십 년 이상 장기간 물과 지속적으로 접촉하게 되므로 단기 시험이 아닌 장기간 용출특성이 요구된다. 이를 위해 연속회분식 시험, availability test, pH 고정 시험 그리고 탱크 확산시험 등의 다양한 시험방법을 통해 현장 적용 가능한 정량적 모형을 도출하고자 하였다. 이 방법들은 원소의 최대용출량 산출, 다양한 pH 환경에서 용출과정 그리고 확산에 의한 고품폐기물의 원소용출과정 등을 모사하기 위한 시험방법들이다. 본 연구의 목적은 재생골재의 교량안정용 쇄석으로 재활용할 경우 환경안정성을 평가하고자 하며: 1) 다양한 용출 시험을 통하여 특정물질의 용출 총량 및 용출정도 측정, 2) 다양한 물리, 화학 조건 변화에 따른 용출특성을 규명하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 재생골재시료는 국내의 한 기업으로부터 공급받았다. 재생골재의 입도범위는 30-70 mm 사이였으며 200번 체 통과량은 0.1% 이하였다. 마모감량은 35-52% 범위로 재생골재 및 도로 보조기층으로 사용이 적합한 것으로 나타났다.

2.2. 용출시험

2.2.1. 연속 회분식 용출시험 (Serial batch leaching test - modified after DIN 38414-S4).

연속회분식 용출시험은 용출대상 시료는 교환하지 않고 용액만 교환하여 연속적으로 원소를 용출하는 시험방법으

로 회분식 시험의 반응시간을 확장할 수 있다. 분쇄하지 않은 재생골재 200 g과 증류수 600 mL (LS ratio 3 1)를 1000 mL 폴리에틸렌 병에 넣은 후 24시간 동안 회전식 교반기 (Rolling mixer)를 이용하여 30 rpm의 속도로 교반하였다. 최초 24시간 동안의 교반이 끝나면 0.45 μ m 필터를 통해 용액을 제거한 후 다시 병에 증류수를 채운 후 같은 방법으로 24시간 교반, 총 4회를 반복하였다. 연속회분식 시험에서 사용한 재생골재 시료는 세척과 비세척으로 구분하여 시행하였다. 즉, 세척과정은 현장에서 시행하는 골재 세척과정을 모사하여 흐르는 수돗물에 1분간 세척하였으며 비세척 시료의 경우 별다른 전처리 과정을 거치지 않았다.

2.2.2. 가용용출시험 (Dutch availability leaching test NEN 7341).

재생골재를 125 μ m 이하로 분쇄하여 골재 8 g과 증류수 800 mL를 1,000 mL 비이커에 혼합 (LS ratio 100 1)한 후 자석막대를 이용하여 교반한다. 이 때 최초 4시간 동안은 pH를 7로 조정하며 4시간 경과 후 용액을 따라내고 다시 증류수를 채운 후 이번에는 pH를 4로 조정하여 같은 방법으로 18시간 교반한다. pH 4와 pH 7로 얻은 두 시료를 섞은 후 0.45 μ m 필터로 여과 후 분석한다. pH 조정은 정량 펌프와 controller를 이용하였으며 재생골재 자체의 pH가 11-13 사이의 강알칼리이므로 pH조정은 거의 0.1 M 질산을 이용하였다.

2.2.3. pH 유지 용출시험 (pH-stat leaching test - CEN/TC 292/WG6, EU standard method of pH dependence test).

재생골재를 125 μ m 이하로 분쇄한 후 30 g과 증류수 300 mL를 500 mL 비이커에 혼합 (LS ratio 10 1)하여 자석막대를 이용, pH 4, 5, 5.5, 7, 8, 9, 10, 11, 12의 총 9단계 조건으로 각각 조정하여 각 pH별로 24시간 교반한다. pH 조정은 0.1 M 질산과 0.1 M 수산화나트륨을 이용하였으며 역시 정량펌프와 controller를 이용하여 일정 pH를 유지하였다.

2.2.4. 탱크 확산시험 (Tank diffusion test - NEN7345, Dutch diffusion leaching test).

전술한 시험방법들이 주로 분체를 대상으로 한 것에 비해 탱크 확산시험은 면적에 따른 확산용출 특성을 알아보기 위한 시험방법으로 입자가 작은 시료의 경우 고화제를 이용 일정한 모양으로 성형, 고품화하여 시험을 진행한다. 따라서 탱크 확산시험 결과는 표면적의 함수에 따른 원소 용출관계로 나타난다. 그러나 재생골재의 경우 입도가 다양하며 외형이 불균질하여 정확한 표면적 산출이 어려워 일정량을 반응조에 넣은 후 증량에 따른 원소용출 결과로 나타내었다. 본 시험은 고품폐기물의 직경이 40 mm 이상인 경우 적용한다. 가용용출시험이나 pH 유지 용출시험과는 달리 분쇄하지 않은 재생골재 1,000 g을 반응조에 넣은 후 증류수 5000 mL와 혼합하였다. 반응을 시작하여 8시간 후 반응조에서 반응이 끝난 물 시료를 채취한 후 다시 같은

양의 증류수를 채운다. 시험 시작 시간 기준으로 24시간 후에 두 번째 물 시료를 채취하며 다시 48시간, 56시간, 4일, 9일, 16일, 36일 그리고 64일째까지 총 누적 시험기간 64일간에 걸쳐 8회 시료를 채취하였다.

2.2. 원소분석

2.2.1. 재생골재

재생골재를 석질구조 1차 분쇄한 후 아게이트몰탈을 이용하여 125 μm 이하로 분쇄하여 200 mg을 취하였다. 분쇄시료를 왕수 (HNO₃:HCl 3:1) 1 mL와 함께 Teflon bomb에 넣어 밀봉한 후 80°C에서 2시간 동안 가열한다. 가열 후 24시간 방냉한 후 증류수 10 mL과 포화붕산액 29 mL을 넣어 중화 한 후 0.45 μm 필터로 여과하여 원자흡광분석기 (Shimadzu AF 6601F)를 이용, 분석하였다.

2.2.2. 이온분석

용출시험에서 얻은 물시료는 0.45 μm 필터로 여과한 후 증금속을 포함한 양이온은 원자흡광분석기(Aanalytikajena AAS Vario 6)를 이용하여 분석하였으며 음이온은 Ion chromatography (Dionex DX-120)를 이용하여 분석하였다. pH, 전기전도도는 시료 채취 후 바로 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 재생골재 화학특성

페콘크리트의 화학조성은 Table 1과 같다. 주원소중 Ca 함량이 가장 높았으며 Mg, Fe, K, Na의 순서로 농도가 높았다. 미량원소 중 Zn 함량이 높았으며 Cu와 Pb의 함량이 비교적 높았다.

3.2. 용출 시험 결과

3.2.1. 연속 회분식 용출시험

증류수를 이용한 회분식 시험결과는 Table 2와 같다. 세

Table 1. Chemical composition of recycled concrete

(Unit: mg/Kg)

Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb	Cr
50800	2574	866	8720	7	33	< 1 ppb
Ni	Zn	Cu	As	Hg	Fe	
22	5852	17	< 1 ppb	< 1 ppb	3018	

척, 비세척 시료 모두에서 pH는 10에서 11사이로 높게 나타났다. 일반적으로 예상되기를, 세척하지 않은 시료에서 원소의 농도가 높고 특히 초기 용출과정에서 다량의 원소들이 방출될 것으로 예상된다. 즉, 초기 용출시 입자 표면에 부착된 미립자들이 물과 접촉하면서 다량 용해될 것이며 이런 경우 세척을 통해 사전에 쉽게 용출되는 원소들을 제거하여 오염부하량을 저감할 수 있을 것이다.

Ca, K, Na, Cl⁻, NO₃⁻는 비세척 시료에서 더 많이 용출되었으며 1차 용출시료에서 농도가 높아 이러한 가정을 뒷받침한다. 그러나 Mg와 SO₄²⁻의 경우 이와 반대로 세척 시료에서 농도가 더 높았다. 미량원소들의 경우 Cd과 Cr은 비세척 시료에서 농도가 높으나 Ni, Cu는 세척시료에서 더 높은 농도를 보인다. 반면 Mn은 두 시료에서 비슷한 값을 보였다. 나머지 미량원소들 (Pb, Cu, As, Hg)은 분석한계 이하의 낮은 값을 보인다. 세척 또는 비세척 시료에서 농도차이가 나는 원인은 원소가 분포하는 위치와 관련이 있다. 즉, 표면에 주로 분포한 원소들은 물과 접촉하면서 바로 용출된다 (Ca, K, Na 등). 특히 Cl⁻나 NO₃⁻의 경우 재생골재 주구성 물질이 아니며 주로 골재입자에 흡착된 것이 용출되어 나오는 것으로 생각된다. 이 두 원소들은 1차 용출 이후 급격히 농도가 감소하여 이 같은 설명을 가능하게 한다 (Table 1, 2). 그러나 표면이 아닌 입자 내부에 분포한 원소들의 경우 물과 접촉하고 일정시간이 지난 후 용출될 것이다 (Choi et al., 2002). Mg과 SO₄²⁻의 경우가 후자에 해당할 것으로 생각된다.

Table 2. Leachate chemistry collected from continuous batch leaching test (Non-washed/washed, unit: mg/L, Conductivity: μS/cm, *Number of leachings)

N*	Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb	Cr	Al
1	17.6/9.1	0.05/0.16	12.2/18.3	22.2/20.6	0.01/<1 ppb	<1 ppb/<1 ppb	0.009/0.007	0.06/0.14
2	18.4/10.1	0.05/0.10	4.3/5.5	13.4/13.2	0.02/<1 ppb	<1 ppb/<1 ppb	0.004/0.007	0.04/0.07
3	17.3/11.5	0.05/0.09	2.7/3.6	10.1/10.6	0.02/0.01	<1 ppb/<1 ppb	0.003/0.003	0.11/0.19
4	19.3/11.5	0.05/0.08	2.0/2.8	8.2/8.8	0.03/0.01	<1 ppb/<1 ppb	0.003/0.002	0.10/0.10
	Ni	Zn	Cu	As	Hg	Fe	Mn	
1	0.007/0.071	< 1 ppb/0.006	< 1 ppb/0.437	< 1 ppb/< 1 ppb	< 1 ppb/< 1 ppb	< 5 ppb/< 5 ppb	0.17/0.16	
2	0.009/0.080	< 1 ppb/< 1 ppb	< 1 ppb/0.032	< 1 ppb/< 1 ppb	< 1 ppb/< 1 ppb	< 5 ppb/< 5 ppb	0.17/0.16	
3	0.009/0.083	< 1 ppb/< 1 ppb	< 1 ppb/0.030	< 1 ppb/< 1 ppb	< 1 ppb/< 1 ppb	< 5 ppb/< 5 ppb	0.17/0.17	
4	0.011/0.077	< 1 ppb/< 1 ppb	< 1 ppb/0.021	< 1 ppb/< 1 ppb	< 1 ppb/< 1 ppb	< 5 ppb/< 5 ppb	0.18/0.17	
	pH	Conductivity	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
1	11.14/10.64	418.0/270.5	1.1/1.1	6.7/3.1	6.2/4.7	0.14/< 10 ppb	28.2/31.9	52.6/67.1
2	11.30/10.67	309.0/180.3	0.3/0.2	2.1/0.3	1.8/1.2	< 10 ppb/< 10 ppb	5.3/7.7	39.2/38.9
3	11.20/10.68	325.0/178.6	0.2/0.2	1.3/0.5	0.9/0.7	< 10 ppb/< 10 ppb	3.2/5.2	31.7/31.6
4	10.94/10.54	292.5/176.4	0.1/0.1	1.2/0.31	0.8/0.5	< 10 ppb/< 10 ppb	2.9/2.9	29.1/28.2

Table 3. Chemical composition of leachate from availability test (Unit: mg/L)

Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb
209.60	2.71	28.1	35.6	< 1 ppb	0.01
Ni	Zn	Cu	As	Hg	Cr
0.12	0.95	< 1 ppb	< 1 ppb	< 1 ppb	< 1 ppb
Fe	Mn	F ⁻	Cl ⁻	PO ₃	SO ₄ ²⁻
0.13	< 5 ppb	0.10	1.34	0.15	9.23

원소의 용출은 원소의 위치 뿐 아니라 원소자체의 용출도의 영향을 받는다. 연속희분식 시험에서 용출횟수에 따른 원소들의 용출과정은 용출횟수에 따라 농도가 1) 증가 (Ca, Cd, Ni) 하거나 2) 초기에 최대농도를 기록한 후 감소 (Mg-washed, Na, K, Cr-washed, Cu-washed, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) 하는 경우, 그리고 3) 비교적 일정 농도를 유지하는 경우 (Mn)로 구분된다. 용출횟수에 따라 원소농도가 급격히 감소하는 경우 원소들은 재생골재 표면에 주로 분포하며 이들은 용출 초기 이후 농도가 감소하므로 세척등의 전처리과정을 통하여 환경영향을 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 반면 용출횟수가 증가하면서 오히려 농도가 증가하거나 일정 농도를 유지하는 경우는 원소가 입자표면이 아닌 내부에 존재하거나 또는 원소의 용해도를 제한하는 고형물에 의해 평형 농도를 유지하기 때문으로 생각된다. 원소용출 제어 고형물 질은 지구화학 모델링을 통해 구할 수 있다. 이같이 원소의 위치는 용출행태에 영향을 미치는 1차 요인이 되며 세척에 의한 저감 효과는 표면분포 원소에만 효과적일 것이다.

3.2.2. 가용용출시험

대상시료의 용출 가능한 최대치를 산출하기 위한 시험이다. Ca가 다량으로 용출되며 그 외 주원소 (Mg, Na, K, SO₄²⁻)도 용출된다. 미량원소로는 Pb, Ni, Zn를 제외한 나머지 (Cd, Cu, As, Hg, Cr, Mn) 미량원소들은 검출한계 이하의 낮은 농도를 나타낸다 (Table 3). 비록 같은 조건은 아니지만 availability test 결과는 국내 공정시험법이나 TCLP 방법에 비하여 가혹한 조건 (낮은 pH, 교반시간)에서 행하여졌음에도 불구하고 해당원소 모두 기준 이내를 나타낸다.

따라서 재생골재는 유해폐기물로 매립대상이 아닌 일반 매립 또는 재활용이 가능한 자원으로 간주될 수 있다.

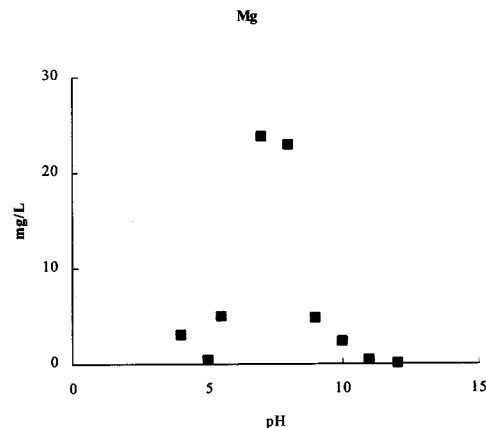
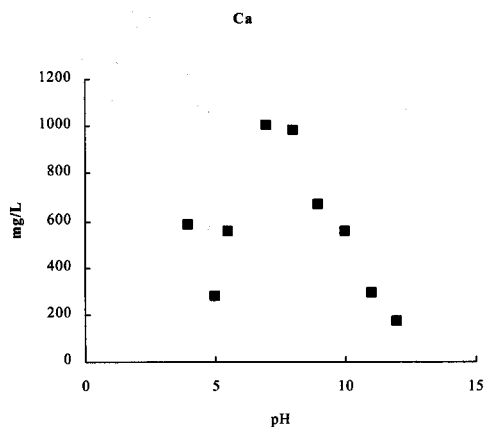
3.2.3. pH 유지 시험

pH는 미량원소를 포함한 금속원소들의 용해도에 영향을 미치는 중요한 조정인자이다. pH를 산성에서 알칼리성으로 변화시키면서 관찰한 재생골재의 용출도 역시 pH의 영향을 받는다 (Table 4, Fig. 1). 미량원소들의 경우 Zn, Cu, Cd 그리고 Ni만이 검출되며 나머지 원소들은 분석한계 이하의 낮은 농도로 검출된다. 또한 최대 용출 농도 역시 국내 폐기물 공정시험법 및 TCLP 기준치 아래를 기록한다. 대부분의 중금속들은 pH가 낮을 수록 용출도가 급격히 증가하나 본 시험결과는 Fe의 경우만 pH가 증가함에 따라 용출도가 낮아지며 Ni과 Cd은 pH 6~8 사이에서 가정 많이 용출되는 결과를 나타낸다. 한편 Cu는 알칼리범위에서 용해도가 급격히 증가함은 보인다.

Table 4. Leachate chemistry from pH-stat test (Unit: mg/L, pH: no unit)

pH	Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb	Cr
4	580.6	3.0	17.0	48.1	0.01	0.14	< 1 ppb
5	276.0	0.3	20.5	493.5	0.01	0.04	< 1 ppb
5.5	557.3	4.9	147.8	35.3	0.02	0.01	< 1 ppb
7	1003.3	23.8	26.8	75.4	0.02	0.04	< 1 ppb
8	977.3	22.8	17.1	85.4	0.03	< 1 ppb	< 1 ppb
9	666.6	4.8	21.2	63.2	0.04	< 1 ppb	< 1 ppb
10	555.6	2.3	32.1	57.7	0.00	< 1 ppb	< 1 ppb
11	292.4	0.3	6.8	40.0	0.01	< 1 ppb	< 1 ppb
12	172.9	0.1	23.0	48.1	0.02	< 1 ppb	< 1 ppb

pH	Ni	Zn	Cu	As	Hg	Fe	Mn
4	0.16	0.08	0.02	< 1 ppb	< 1 ppb	0.30	< 5 ppb
5	0.15	0.07	0.02	< 1 ppb	< 1 ppb	0.13	< 5 ppb
5.5	0.14	0.08	0.01	< 1 ppb	< 1 ppb	0.12	< 5 ppb
7	0.29	0.08	0.01	< 1 ppb	< 1 ppb	0.13	< 5 ppb
8	0.38	0.08	0.01	< 1 ppb	< 1 ppb	0.07	< 5 ppb
9	0.14	0.08	0.06	< 1 ppb	< 1 ppb	0.11	< 5 ppb
10	0.14	0.09	0.05	< 1 ppb	< 1 ppb	0.13	< 5 ppb
11	0.16	0.09	0.04	< 1 ppb	< 1 ppb	0.03	< 5 ppb
12	0.15	0.09	0.05	< 1 ppb	< 1 ppb	0.06	< 5 ppb



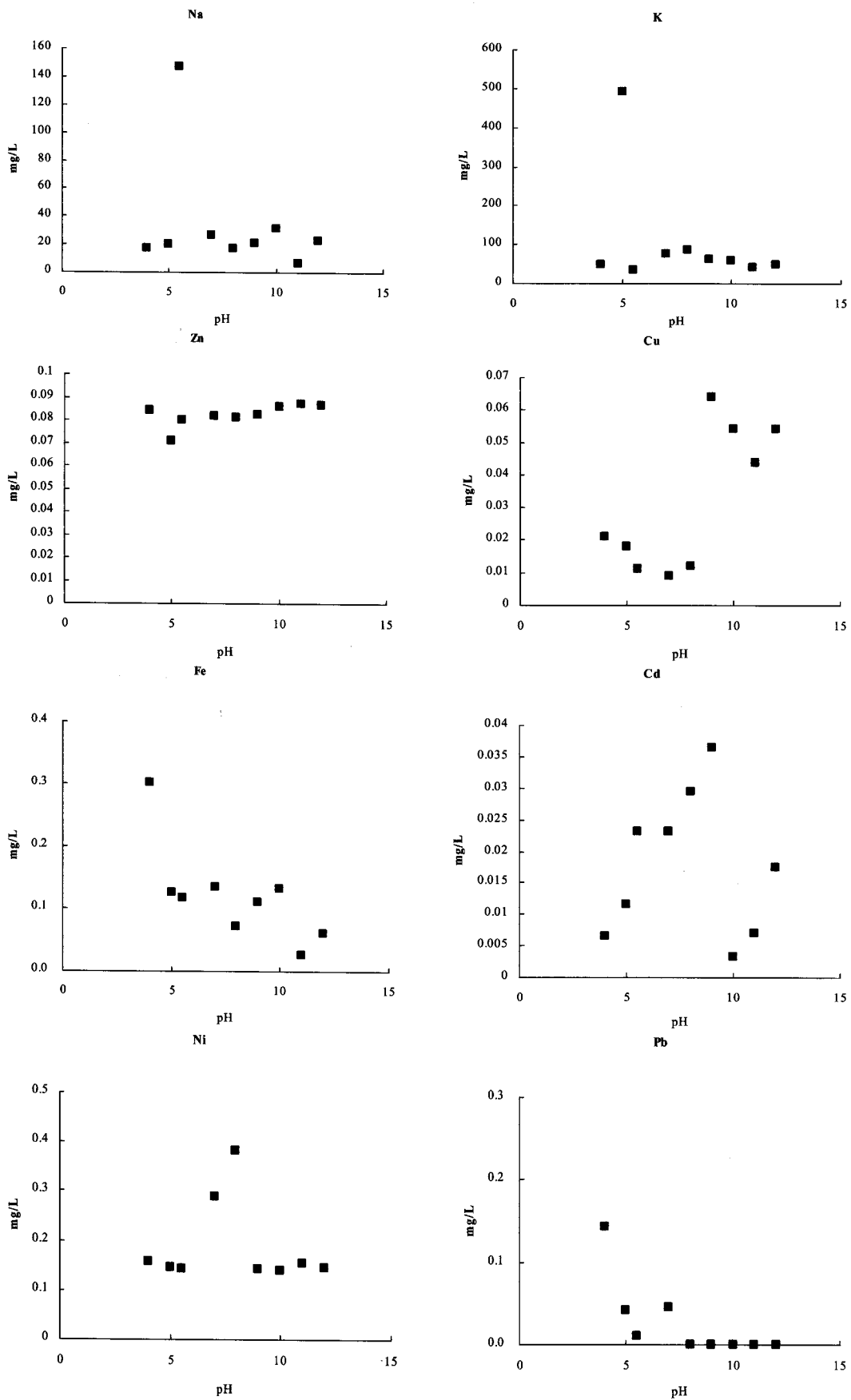


Fig. 1. Elemental variation of leachate from pH-stat test.

3.2.4. 탱크 확산 시험

총 64일에 걸쳐 반응시킨 결과 반응기간에 따라 원소용출이 증가하거나 또는 감소하는 경향의 2가지로 나눌 수 있다 (Table 5, Fig. 2). 전자의 경우 Ca, Cd, Zn, Ni, Fe 등이 해당하며 후자의 경우 Mg, K, Na, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, F⁻ 등을 포함하는 대부분의 주원소들이 해당되며 미량원소로는 Zn, Hg, Cu 등이 해당된다. 전자의 경우 재생골재가 물과 접촉하는 시간에 따라 용출량이 증가하는 것으로 확산에 의한 원소용출과정을 의미하는 것으로 생각된다. 반면 시간에 따라 용출농도가 감소하는 경우는 주로 입자 표면에 분포한 원소들이 시간에 따라 용출되는 것으로 궁극적으로 고갈되어 농도가 0에 가까워 질 것으로 판단된다.

Fig. 2는 용출시험의 각 회별 농도변화를 총 누적농도, 페콘크리트 고체 분석결과 산출된 총 농도 그리고 가용용출시험 결과 등과 비교한 그림이다. 가는 선은 가용용출시험에서 용출된 양을 나타내고 굵은 선은 재생골재의 왕수법을 이용한 총량을 나타낸다. 만일 확산에 의해 원소가 용출된다면 이론적으로 시간에 따라 원소 용출이 일정속도로 일어나며 누적농도곡선은 기울기가 1에 가까운 직선의 식으로 표현될 것이다. 본 실험 결과에서는 Ca, Fe, Ni을 제외한 대부분의 원소들의 누적 농도가 점차 평형에 가까

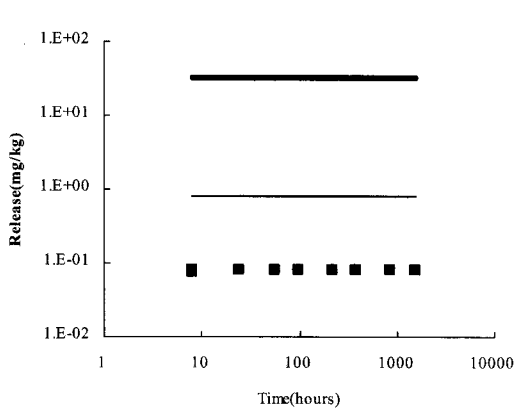
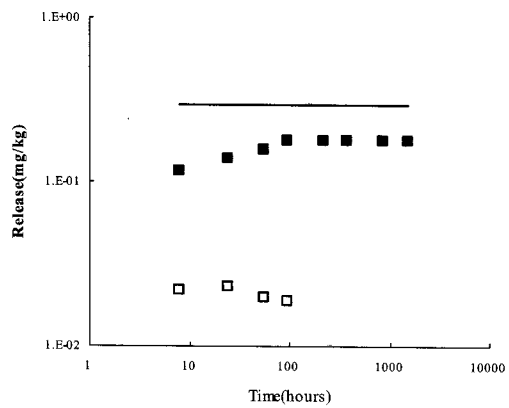
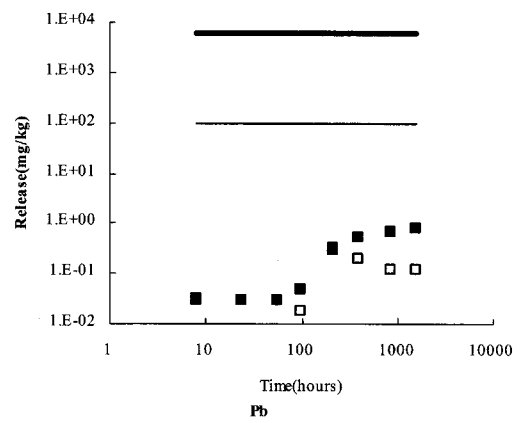
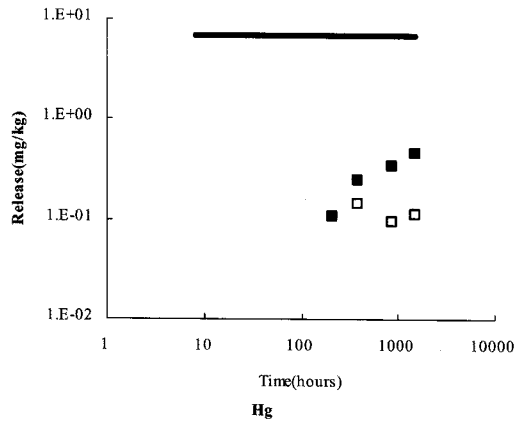
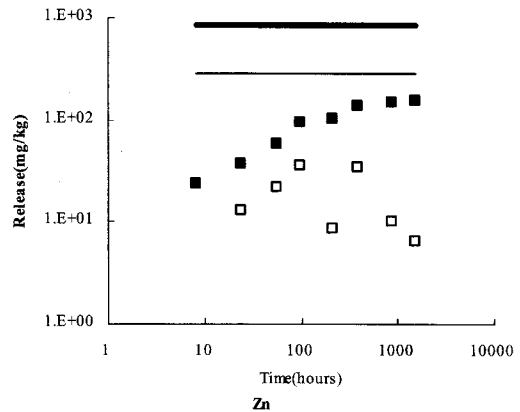
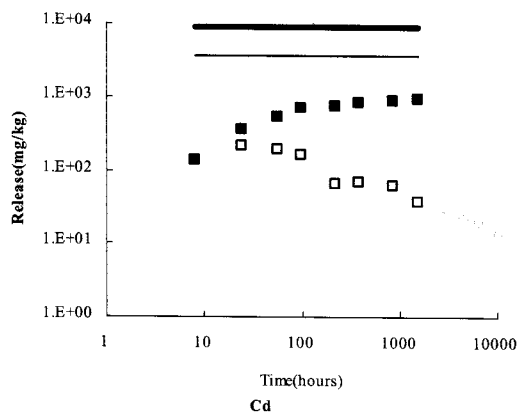
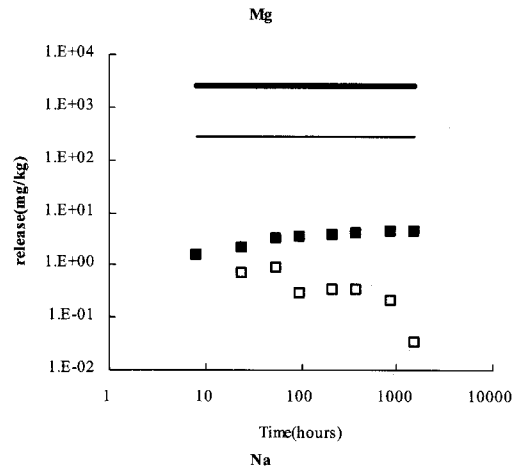
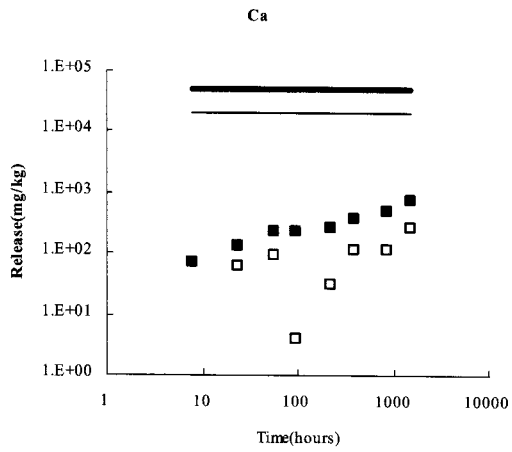
워진다. Ca는 S와 함께 재생골재의 주구성 성분으로 지속적인 용출이 예상된다. 그러나 Ca와는 달리 SO₄²⁻는 일정농도를 유지하는데 이는 S의 농도를 제어하는 고형성분이 존재할 수 있음을 시사한다. Zn와 같이 초기용출이 일정하다가 어느 시점 이후 용출속도가 증가하는 것은 용출기간중 용출에 영향을 미치는 화학 조건의 변화 (예, pH 변화)에 의한 것으로 생각된다. 시멘트에서 Zn는 Ca-Zn complexes에 의해 이동성이 제한될 수 있다. 본 실험에서 Zn가 지연 용출되는 것은 Ca-Zn complex를 포함한 Ca 복합물질의 용출과 관계가 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

다양한 시험방법을 이용한 시험결과를 볼 때 재생골재는 물과 접촉할 경우 환경위해성이 큰 미량원소들의 용출로 인한 수질오염 가능성이 매우 낮다고 판단된다. 적용한 시험방법에 따라 원소의 용출범위는 다양하나 그 농도는 본 연구에서 채택한 실험보다 훨씬 덜 가혹한 조건에서 수행되는 TCLP 또는 폐기물 공정시험법의기준에 못 미친다. 또한 본 실험에서 적용된 물과 고체의 비율의 1:3에서 1:100의 범위로 실제 물이 흐르는 하천 현장에서 안정용 채

Table 5. Diffused ion chemistry from tank test (unit: mg/L, conductivity: μS/cm, * Total amount of element leached from recycled concrete, unit: mg/Kg)

Duration : Hours	Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb	Cr
8	14.49	0.30	4.72	26.67	< 1 ppb	0.015	< 1 ppb
24	12.66	0.13	2.59	43.09	< 1 ppb	< 1 ppb	< 1 ppb
56	18.97	0.17	1.88	38.23	< 1 ppb	< 1 ppb	< 1 ppb
96 (4 days)	0.78	0.06	7.05	31.56	< 1 ppb	< 1 ppb	< 1 ppb
216 (9 days)	6.11	0.07	1.65	12.99	0.021	< 1 ppb	< 1 ppb
384 (16 days)	23.87	0.07	6.95	13.73	0.029	< 1 ppb	< 1 ppb
864 (32 days)	22.65	0.04	2.07	12.40	0.019	< 1 ppb	< 1 ppb
1536 (64 days)	54.89	0.01	1.32	7.42	0.023	< 1 ppb	< 1 ppb
Total leached*	770.10	4.22	153.81	930.44	0.46	0.08	N/A
	Ni	Zn	Cu	As	Hg	Fe	Mn
8	0.108	0.062	0.079	< 1 ppb	0.004	0.08	< 5 ppb
24	0.100	< 1 ppb	0.064	< 1 ppb	0.005	0.10	< 5 ppb
56	0.140	< 1 ppb	0.090	< 1 ppb	0.004	0.19	< 5 ppb
96	0.052	0.035	0.038	< 1 ppb	0.004	0.15	< 5 ppb
216	0.135	0.057	0.051	< 1 ppb	< 1 ppb	< 5 ppb	< 5 ppb
384	0.098	0.040	0.045	< 1 ppb	< 1 ppb	< 5 ppb	< 5 ppb
864	0.164	0.025	< 1 ppb	< 1 ppb	< 1 ppb	< 5 ppb	< 5 ppb
1536	0.168	0.024	< 1 ppb	< 1 ppb	< 1 ppb	< 5 ppb	< 5 ppb
Total leached	4.83	0.78	1.84	N/A	0.08	3.71	N/A
	pH	Conductivity	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
8	9.78	84.1	0.02	1.12	4.37	0.30	21.88
24	9.42	33.5	0.02	0.66	1.85	< 10 ppb	13.83
56	9.19	23.2	0.06	0.70	1.82	< 10 ppb	16.27
96	9.29	22.3	0.01	0.40	0.84	< 10 ppb	9.00
216	9.26	80.5	0.01	0.32	0.75	< 10 ppb	9.63
384	8.97	105.6	0.01	0.35	0.50	< 10 ppb	8.66
864	9.28	48.7	0.02	1.23	0.41	< 10 ppb	10.31
1536	9.42	33.5	0.01	0.13	0.59	< 10 ppb	10.00
Total leached	N/A	N/A	0.80	24.55	55.80	1.50	497.90



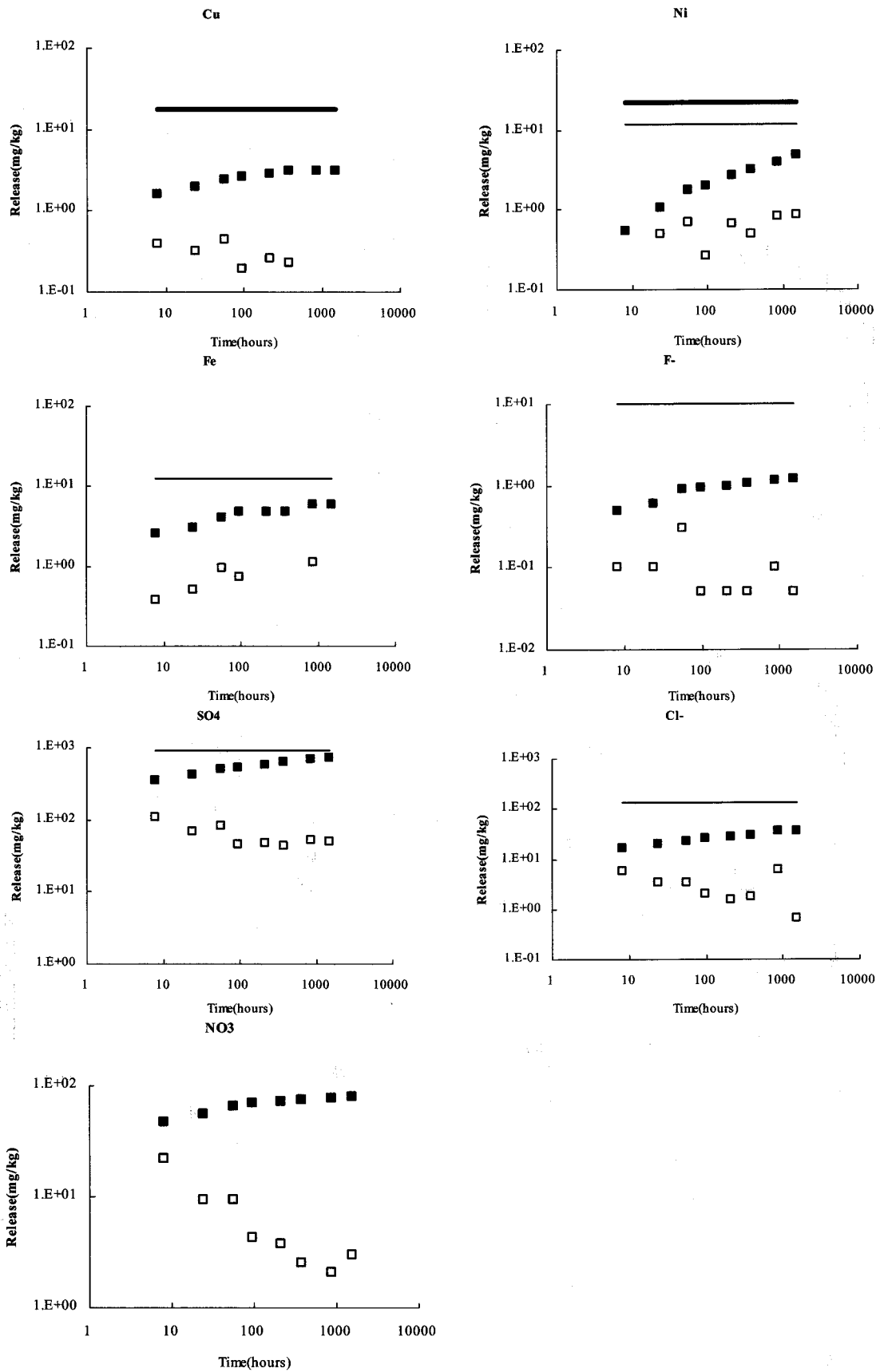


Fig. 2. Elemental release from tank leaching test (thin line: availability test, bold line: total contents, open square: leaching from each session, closed square: cumulative release).

석으로 사용될 경우 물과 고체의 비율이 이보다 훨씬 커지며 거의 무한대에 이를 것으로 예상된다. 따라서 용출된 원소들 역시 하천수에서 분산, 이동하며 희석될 것으로 예상된다. 다만 재생골재의 pH는 이번 연구에서 모두 9에서 11 범위의 강염기성을 나타낸다. 그러나 물:고체 비율이 1:3이었던 연속희분식 용출시험에서 11 이상을 보이던 pH는 비슷한 물:폐기물 비율 (1:5)인 탱크확산시험에서 9정도로 떨어진다. 전자의 경우 360도 교반시키는 실험이었으나 후자는 교반 없이 그대로 방치하는 차이가 있다. 하천수에 교각안정용 쇄석으로 사용하는 환경은 쇄석간 인위적인 교반과 마찰이 거의 없으며 단순한 확산을 통한 pH 물질의 영향 역시 희석등을 통해 커지지 않을 것으로 판단된다.

본 연구에 적용된 시험방법에 별도의 위해성 기준이 없어 TCLP, 국내 폐기물 공정시험법과 간접 비교하였다. 그러나 강의 유량이 많을 경우 환경위해성이 측정될 만큼 나타나는 경우는 거의 없을 것으로 생각되며 이 경우 재료 자체의 환경위해성 보다는 재생골재의 단위 무게당 용출량을 기준으로 다른 재료 또는 다른 재생골재와 비교 평가하는 것이 의미가 있을 것이다. Table 5에서 총 누적량은 탱크확산 시험을 통해 재생골재 1 kg 당 용출된 총량을 의미한다. 이를 바탕으로 하천에 적용되는 재생골재의 양에 따른 원소용출 잠재성을 평가가 가능하며 적용지역의 특성에 따른 정성적 위해성 판단이 이루어질 수 있을 것이다.

재생골재를 교각안정용 쇄석으로 활용할 때 야기될 수 있는 환경문제 중 미량원소의 용출로 인한 환경위해성은 극히 낮은 것으로 판단된다. 다만 환경기준에는 제시되지 않으나 Ca, Mg 등과 같은 염류가 다량 용출될 때 이러한 무기염류로 인한 수생생태계 안전성 평가에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Hohberg, I., de Groot, G. J., van der Veen, A. M. H., and Wassing, W., "Development of a leaching protocol for concrete," *Waste management*, **20**, 177~184(2000).
- van der Sloot, H. A., "Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized wastes with different waste loading for long-term environmental assessment," *Waste management*, **22**, 181~186 (2002).
- Tiruta-Barna, L., Imyim, A., and Barna, R., "Long-term prediction of the leaching behaviour of pollutants from solidified wastes," *Advances in Environmental Research*, **8**, 697~711(2004).
- Todorovic, J. and Ecke, H., "Leaching tests for assessment of mobility of inorganic contaminants from solidified incineration residues - Literature review. Report No. 2004:01," Division of Waste science and technology, Lulea University of Technology, Sweden(2004).
- Kylefors, K., Andreas, L., and Largerkvist, A., "A comparison of small-scale, pilot scale and large scale tests for predicting leaching behaviour of landfill wastes," *Waste management*, **23**, 45~59(2003).
- Fallman, A. M., "Performance and design of the availability test for measurement of potentially leachable amounts from waste material," *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 735~744(1997).
- Hage, J. L. T. and Mulder, E., "Preliminary assessment of three new European leaching tests," *Waste management*, **24**, 165~172(2004).
- Wahlstrom, M., Laine-Ylijoki, J., Maattanen, A., Luotojarvi, T., and Kivekas, L., "Environmental quality assurance for use of crushed mineral demolition wastes in road constructions," *Waste management*, **20**, 225~232 (2000).
- 이용수, 현재혁, 정하익, 정형식, "폐콘크리트의 유효활용을 위한 환경특성 평가," 한국지반공학회논문집, **17**(2), 143~150(2001).

1. Hohberg, I., de Groot, G. J., van der Veen, A. M. H., and Wassing, W., "Development of a leaching protocol