

페로니켈슬래그(FNS)가 토질 및 수질오염에 미치는 영향

Effect of Ferro-nickel Slag on Contamination of Soil and Water

박경호¹, 김대현^{2*}, 김병호³, 고영진⁴

Kyungho Park¹, Daehyeon Kim^{2*}, Byungho Kim³, Youngjin Go⁴

¹Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., Seosuk-dong Dong-gu Gwangju, 501-759, Republic of Korea

²Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., Seosuk-dong Dong-gu Gwangju, 501-759, Republic of Korea

³Member, Executive Director, Suhrim, Dongmyung-dong Dong-gu Gwangju, 501-813, Republic of Korea

⁴Member, Department Head, Hyoseok, Guemho-dong Gwangyang Jeonnam, 545-878, Republic of Korea

ABSTRACT

The purpose of the study is to evaluate engineering properties of Ferro Nickel Slag (FNS) and to investigate the effects of FNS on potential contamination of surrounding soil and water through small and large chamber tests. Soil conditions in the chamber tests were made as closely as possible to the field conditions. In order to simulate different types of water, we used fresh water, acidic water and seawater. Sand soils were made with relative densities of 40% and 60%, and clay with the degree of compaction of 90%. After flushing water through the FNS in the chambers was completed, the PH test was performed for the water flowing out of the chambers and the soil samples were collected for soil pollution analysis. Based on the results of the chamber tests, although the pollution level was slightly higher in the silt than in the sand, the environmental effect that FNS causes the surrounding soil was found to be very minimal. This indicates that FNS can be used as construction material in place of natural aggregates.

요 지

본 연구에서는 FNS의 공학적 특성을 평가하고, 소형 및 대형 모형토조를 통하여 원지반과 유사한 조건으로 FNS 매립시에 주변토양에 미치는 환경적 영향을 평가하고자 하였다. 주입액은 담수, 산성, 해수를 사용하였으며 모래와 실트시료를 사용하여 각각 상대밀도(40%, 60%)와 다짐도(90%) 조건을 선정하여 실험하였다. 소형 및 대형 모형토조에서 배출되는 용출액은 pH 분석을 실시하였으며, 주입이 완료된 후에 샘플을 추출하여 토양오염분석을 수행하였다. 그 결과, 모래보다 실트에서 pH의 오염도가 더 높게 나타남을 확인할 수 있었고, FNS가 주변 토양에 미치는 환경적 영향은 미미한 것으로 나타나 향후 천연골재 대체재로 활용 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : FNS, Engineering characteristic, pH test, Soil pollution analysis, Natural aggregate

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

제철산업은 대량의 원료와 에너지를 소비하며 철강을 생산할 뿐 아니라 다양한 종류의 부산물과 폐기물을 다량 발

생시켜 양적으로는 주 제품인 철강의 약 50%에 이르고 있다. 이러한 폐기물은 철, 탄소 및 석회석 등의 재활용이 가능한 유효한 자원을 다량 함유하고 있어 이들을 그대로 매립해 버리는 것은 자원 및 에너지의 낭비이다. 더구나 지구 환경이 큰 이슈가 되고 있기 때문에 각종 제철 폐기물의 발생량을 가능한 줄이고, 재활용을 함으로 폐기물 처리비용을 경감하는 동시에 환경공해를 방지해야 한다. 특히 대규모 매립에 요구되는 천연골재의 요구량은 매우 막대하다. 따라서 고갈되어 가는 천연자원의 보호측면에서 제철 부산물과

Received 8 Oct. 2013, Revised 20 Nov. 2013, Accepted 21 Nov. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-62-230-7607; Fax: +82-62-220-2687

E-mail address: dkimgeo@chosun.ac.kr (D.H. Kim)

슬래그는 천연자원의 대체재로 최대한 활용되어야 한다.

국내의 폐기물 배출량은 1996년 1천만 톤에서 2001년 4천만 톤으로 급증하였으며, 2013년에는 1억 톤을 상회할 것으로 예상되고, 하천 및 바다골재 채취제한 또한 금지, 석산개발 제한 등에 따라 향후 천연골재자원의 고갈이 가시화될 전망이다. 이에 따라 최근 정부는 급증하고 있는 폐기물을 재활용하여 천연골재를 대체할 수 있는 고품질의 재생골재를 생산·공급하는 재생골재 생산·유통기지 시범사업을 추진하고자 할 만큼 국가적인 사업이 되어가고 있는 실정이다.

폐기물 중 페로니켈 슬래그(이하 FNS)는 보통 페로니켈 1톤당 약 6톤의 슬래그가 발생하는 것으로 알려져 있으며, FNS는 년 간 100만 톤 (2010년)정도 발생되고 화학적으로 안정하기 때문에 채움재 및 콘크리트 골재로서의 활용가능성이 상당히 높다. 이에 따라 국외에서는 약 120년 전부터 뉴칼레도니아, 일본 등과 같은 주요 선진국에서 FNS의 연구가 수행되었으며, 연구단계를 지나 실용화 시스템을 구축하였다. 일본의 경우 콘크리트용 FNS 골재를 국가표준화(JIS)하여 산업 전반적으로 활용을 극대화하여 현재 발생하는 FNS를 거의 100% 재활용하고 있다(Lee, 2013).

국내에서 FNS를 재활용하기 위해서 환경관련법규 검토가 이루어 졌다. 그 결과, FNS의 니켈은 광석 성분인 니켈산화물(NiO) 형태로 존재하여 안정적이고, 불용성으로 인해 용출되지 않음을 토양지하수 학회 연구보고 결과에서 발표되었으며, 용출 실험결과 유해물질이 검출되지 않아 사업장 일반폐기물로 승낙을 받았다. 또한 니켈 용출에 의하여 주변지역 토양을 오염시킬 우려가 없음으로 성토재, 보조기층재 등으로 활용해도 법적인 문제가 없다는 검토 결과를 받았다. 하지만 FNS가 매립지에 사용되어질 경우 지하수에 따른 환경오염 평가 및 강우량에 따른 지하수 오염 평가, FNS가 주변지반에 미치는 환경오염 평가, 해수 및 담수에 의한 환경오염 평가 등 다양한 변수를 고려해야 함으로 매립에 의한 환경성 평가를 실시해야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 FNS가 매립되는 지반에서의 토질 및 수질오염에 미치는 영향인자를 분석하기 위하여 FNS에 대한 공학적 특성을 분석하였고, 용출수의 수질오염에 대한 유해성 평가를 하기 위해서 pH 분석을 수행하였다. 또한 토양오염에 대한 유해성 평가를 하기 위해서 현장상태와 유사한 조건으로 소형 및 대형 모형토조를 제작하였으며, FNS가 주변 토양에 미치는 환경적 영향을 분석하고자 하였다.

1.2 국내·외 선행연구

FNS의 국내·외 연구를 살펴보면 대부분 콘크리트에 대한 기초성능 평가에 적용되었으며, 일본의 경우 페로니켈 생산공장은 1950년대부터 가동되기 시작하여 현재 3개회사가 조업 중에 있으며, 페로니켈슬래그를 다양한 분야에 재활용 하고 있다. 특히 일본에서는 천연산 골재 자원의 고갈과 자원의 효율적인 이용이 대두되면서 슬래그를 콘크리트용 골재로서 이용하고자 하는 방안이 1970년대부터 연구되어 1992년에 콘크리트용 골재로 사용하는 페로니켈슬래그 잔골재를 JIS(A-5011) 규격으로 설정되었다.

그리고 부가가치가 높은 소재로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 특히 $MgO-SiO_2$ 및 $2MgO \cdot SiO_2$ 등이 주결정인 부산물과 퇴적물을 산 용액에서 분해하여 Mg 이온을 얻기 위한 연구가 다수 진행되고 있다.

1.2.1 국외선행연구

국외의 경우, 일본 및 뉴칼레도니아 중심으로 연구가 수행되었으며, 실용화 시스템을 구축하고 있다.

일본의 경우, 1988년 192만톤, 1999년 246만톤으로 과거와 비교하여 약 28% 증가하였고, 이러한 FNS의 대부분은 매립 및 노반재료로 활용되어 왔으나 1992년 JIS A 5011 콘크리트용 슬래그 골재 표준에 FNS 잔골재가 추가되어 1994년 FNS 잔골재 콘크리트 시공지침을 개발함으로써 적극적으로 콘크리트용 잔골재로서 활용하게 되었다(Kim, 2013). 특히, 항만공사 재활용 기술지침에는 FNS를 대상 재활용 자재로 포함하여 콘크리트, 채움재, 노반재용 골재 등의 용도를 제시하는 등 국가적 차원에서 슬래그의 자원화를 도모하고 있다(Masayasu, 1997).

일본 광업 협회에 의하면 콘크리트용으로 사용되고 있는 FNS 잔골재의 비중은 평균값이 $2.78\sim 3.11g/cm^3$ 범위를 나타내고 있으며, 전체 측정 시료들의 측정결과는 $2.73\sim 3.13g/cm^3$ 범위에 있다. 이는 천연 잔골재보다 크고, 흡수율은 상대적으로 낮은 특성을 보인다.

동결융해 작용에 대한 저항성 및 일부 잔골재에서 볼 수 있는 알칼리 실리카 반응성을 제외하고는 일반 콘크리트용 골재로서 FNS 골재는 충분히 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

Eric(2001)은 forsterite구조가 마그네슘 팔면체에 의해 실리카 사면체가 연결되어 있으며 이러한 구조는 산용액에서 $Si-O$ 결합보다 $Mg-O$ 결합이 좀 더 쉽게 끊어진다고 하였다. Mg의 팔면체 결합은 수소이온에 의해 분해가

축진될 수 있고, 이러한 분해에 의해 최종적으로 결정이 분해된다고도 하였다. 즉 Mg 의 분해를 기초하여 Mg 이온과 Si 이온 및 SiO_2 가 용출된다고 하였다.

Pokrovsky and Schott(2000) 등도 fosterite를 산에 용해할 경우, Mg 이온과 Si 이온 등 다양한 이온이 동시에 용출된다는 것을 증명하기도 하였다. 따라서 Mg 이온 또는 Si 이온을 각각 얻기 위해서는 용해 후 다양한 처리방안이 도출되어야 한다. 그러나 아직까지 FNS를 사용하여 Mg 이온만을 혹은 Si 이온만을 독자적 화합물로 제조하는 방법이 확립되어 있지 않은 상태이다.

1.2.2 국내선행연구

Park et al.(2010)은 FNS 중 괴재슬래그를 활용한 콘크리트의 시공지침을 개발하기 위해서 괴재슬래그를 혼입한 콘크리트의 특성을 평가하였다. 그 결과, 괴재슬래그 혼입률이 증가할수록 소요 슬럼프를 얻기 위한 혼화제의 첨가량이 증가되어 괴재슬래그 혼입한 콘크리트의 작업성이 다소 저하되는 것으로 나타났으나, 탄성계수는 기준 콘크리트의 90% 이상으로 나타나 잔골재의 대체재로 FNS 괴재슬래그의 사용 가능성이 기대된다고 하였다.

Kim et al.(2011)은 FNS 잔골재를 적용한 콘크리트 개발을 위해 FNS 잔골재의 성능 평가 및 강도별 FNS 적용 콘크리트 기초성능평가를 실시하였다. 콘크리트 성능 검토결과, 유동성 및 압축강도에 있어서 목표 품질을 만족하는 것으로 나타났으며, 추후 FNS 잔골재를 적용한 콘크리트의 강도별 성능검토 및 현장 적용을 통하여 FNS 잔골재 콘크리트의 적용이 가능할 것으로 판단된다고 하였다.

Kim et al.(2012)은 FNS 잔골재를 적용한 콘크리트 개발을 위해 FNS 잔골재의 성능 평가 및 강도별 FNS 적용 콘크리트 기초성능평가를 실시하였다. 검토결과, 일반강도, 고강도, 초고강도 배합 모두 혼입율이 40% 이상일 경우 점성이 증가하며 작업성이 불량해지는 것으로 나타났

다. 따라서 입도 및 입형 보정이 필요할 것으로 판단되며, FNS의 흡수율이 낮기 때문에 혼입율이 높아질수록 요구 단위수량이 줄어드는 것으로 판단된다고 하였다.

Chu et al.(2010)은 고부가가치의 Mg 금속 및 Mg 화합물을 제조하기 위해서 산 용액에서 FNS의 주성분 중 하나인 Mg 이온 등을 용출하고, 용출된 이온 중 Mg 이온만을 분리하여 화합물로 제조하고자 하였다. 그 결과, 용해 시 슬래그의 Mg 이온은 유일하게 용출되는 것이 아니라 기타 성분들과 동시에 용출되어 Mg 이온만을 선택적으로 추출해야 하며, Mg 이온의 용출 조건은 30분-30℃에서 충분한 효과가 발현됨을 확인하였다. 여과액에 Mg 이온과 더불어 존재하는 Si 및 Fe 이온 등은 여과 과정과 암모니아수의 첨가에 의해 대부분 제거될 수 있었다. 최종 여과액을 건조시키면 $MgCl_2 \cdot NH_4Cl \cdot 6H_2O$ 화합물을 생성시킬 수 있었으며, 건조 생성물을 600℃에서 30분간 하소할 경우 MgO 결정도 얻을 수 있었다.

국내·외 선행연구 결과, FNS의 공학적 특성을 이용한 잔골재의 대체재로 대부분 연구되어져 왔고, 콘크리트와 함께 사용되는 잔골재 연구되어 왔으나, 그에 따른 환경적 평가에 대한 연구는 매우 미미함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 FNS가 매립지에 사용되었을 때 주변 토질 및 수질오염에 미치는 영향인자를 분석하고자 현장상태와 유사한 조건으로 소형 및 대형 모형토조를 제작하였으며, FNS가 주변 토양에 미치는 환경적 영향을 분석하고자 하였다.

2. FNS의 공학적 특성평가

2.1 물리적 특성

일본의 경우 FNS를 다양한 방법으로 재활용하고 있으며, 현재 콘크리트용으로 사용되고 있는 FNS 잔골재의 화학적·물리적 특성을 살펴보면 Table 1, 2와 같다. FNS 잔

Table 1. Chemical components of FNS (Lee, 2013)

Manufacturing method	Measured value	CaO	MgO	S	FeO	Fe	SiO_2
Rotary kiln watergranulated slag	Average	5.18	27.8	0.06	7.57	0.65	55.6
	Minimum ~ Maximum	5.92~4.47	28.9~26.4	0.09~0.04	9.27~5.86	0.86~0.46	0.21~0.14
	Standard deviation	0.37	0.67	0.04	0.86	0.11	0.02
Oxidizing PS ball	Average	0.81	33.8	0.05	7.01	0.18	53.8
	Minimum ~ Maximum	1.18~0.52	34.9~32.4	0.07~0.04	7.83~5.74	0.23~0.14	52.8~52.6
Oxidizing cooled slag	Standard deviation	0.16	0.58	0.01	0.45	0.02	0.68
Oxidizing watergranulated slag	Average	0.28	33.2	0.03	10.4	0.19	51.3
	Minimum ~ Maximum	0.46~0.13	34.3~32.5	0.04~0.02	11.9~8.7	0.29~0.09	50.3~0.09
	Standard deviation	0.08	0.44	0.004	0.82	0.04	0.86

Table 2. Engineering characteristics of FNS (Lee, 2013)

Manufacturing method	Measured value	Specific gravity (g/cm^3)	Absorption rate (%)
Rotary kiln watergranulated slag	Average	3.11	0.35
	Minimum ~ Maximum	3.13~3.10	0.39~0.29
	Standard deviation	0.01	0.03
Oxidizing PS ball	Average	2.88	0.83
	Minimum ~ Maximum	2.91~2.84	1.19~0.76
	Standard deviation	0.02	0.08
Oxidizing cooled slag	Average	2.95	1.67
	Minimum ~ Maximum	3.01~2.91	1.87~1.02
	Standard deviation	0.06	0.32
Oxidizing watergranulated slag	Average	2.96	0.82
	Minimum ~ Maximum	2.99~2.92	1.02~0.65
	Standard deviation	0.02	0.09

Table 3. Experiment standards of KS F

	Classification	KOREA INDUSTRIAL STANDARD
Properties of test	Sieve analysis	KS F 2302
	Specific gravity test	KS F 2309
	Atterberg limit test	KS F 2303, KS F 2304
	Compaction test	KS F 2312
	Testing method for relative density of cohesionless soils	KS F 2345
Mechanical properties of experiment	Large direct shear test	KS F 2343
	Small direct shear test	KS F 2343

Table 4. Comparison of engineering characteristics of FNS, sand and silt

Classification	Unit	Experimental results			KS F
		FNS	Sand	Silt	
Specific gravity	—	2.96	2.66	2.44	KS F 2309
# 4	%	69.59	99.58	99.57	KS F 2302
# 200	%	0.02	1.24	50.70	KS F 2302
USCS classification	—	SP	SW	ML	KS F 2302
Atterberg limit	—	N,P	N,P	LL(%) : 40.2 PL(%) : N,P	KS F 2303, 2304
γ_{dmax}	g/cm^3	1.852	1.710	—	—
γ_{dmin}	g/cm^3	1.547	1.307	—	—
Compaction test γ_{dmax}	g/cm^3	1.893	1.782	1.633	KS F 2312
O.M.C	%	5.52	11.50	19.10	KS F 2312
ϕ (Dr 60%)	°	Small : 38.66 Large : 36.69	Small : 35.94	Small : 28.81	KS F 2343
c	kPa	Small : 40.0 Large : 59.5	Small : 29.7	Small : 51.8	KS F 2343

골재의 비중은 $2.78 \sim 3.11 g/cm^3$ 범위를 나타내고 있으며, 전체 측정 시료들의 결과는 $2.73 \sim 3.13 g/cm^3$ 범위에 있다. 따라서 천연 잔골재보다 크고, 흡수율은 상대적으로 낮은 특성을 보이고 있다.

2.2 실험시료의 공학적 특성

2.2.1 시료의 물리적 및 역학적 특성

시료의 기본 물성 및 역학적 특성을 평가하기 위하여

Table 3과 같은 항목을 실험하였다.

본 연구에서 사용된 시료는 모래의 경우 섬진강 유역에 채취한 시료이고, 실트의 경우 담양 도로공사 현장에서 채취한 시료로서 Table 4와 같이 물리적 및 역학적 특성을 나타내었다. Table 4는 공시체의 물리적 및 역학적 특성을 나타낸 것으로 비중, # 200체 통과율은 Table와 같고, USCS로 흙을 분류하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험시료로서 입도분석을 실시한 결과, FNS는 # 4를 통과한 조립분이 50%이상이므로

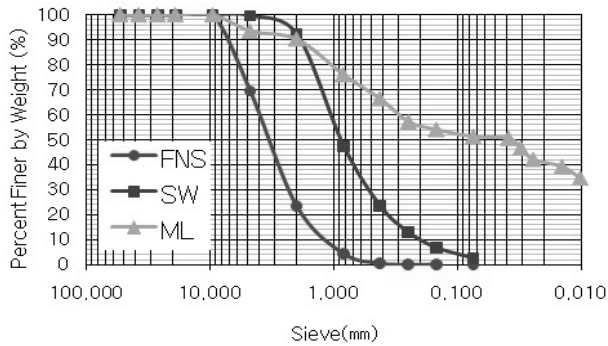


Fig. 1. Particle size distribution curve of specimens

Sand로 분류되었으며 균등계수 C_u 는 3.04, 곡률계수 C_g 는 1.21로 $C_u < 6$ 그리고(또는) $1 < C_g < 3$ 이므로 SP로 분류되었다.

섬진강 유역에서 채취한 시료는 # 4를 통과한 조립분이 50%이상이므로 Sand로 분류되었으며 균등계수 C_u 는 6.05, C_g 는 1.23으로 $C_u > 6$ 그리고 $1 < C_g < 3$ 이므로 입도분포가 좋은 SW로 분류 되었다.

담양 도로공사 현장에서 채취한 시료는 # 200를 통과한 세립분이 50% 이상이므로 실트질에 속하며 액성한계 40.2%, 소성한계는 N.P로 ML시료로 분류되었다.

2.2.2 FNS의 물성 및 역학적 특성 분석결과

입도시험으로부터 최대 입경은 9.5mm, # 200(0.075mm) 체 통과량은 0.02%로 분석되었으며, 균등계수 C_g 는 3.04로 SP시료로 분석되었다. 역학적 특성 평가를 위한 직접전단 실험결과 상대밀도 60%일 때, 내부마찰각은 소형에서 38.66° 와 대형에서 36.69° 로 도로설계요령에서 제시하는 일반 모래의 내부마찰각보다 약 5° 정도 상회하는 것으로 분석되어 지반공학적으로 우수한 재료로 판단되며 FNS는 모래시료와 유사한 특성을 갖는 것으로 나타났다.

3. 모형토조실험을 통한 FNS의 환경성 평가

광양이나 여수산단 등 대규모 매립재가 필요한 상황에서 FNS를 대단위 매립재료로 활용하기 위하여 매립 주변

지반에 미치는 환경성 및 지반 거동을 모형토조 실험을 통해 평가하는데 그 목적이 있다. 또한 연약지반개량에 국소적으로 활용한 시공 실적이 있으나, 대단위 매립재료로서의 적합성을 판정하기 위하여 보다 다양한 방법으로 영향인자를 파악하고 나아가 토양오염공정시험방법에 의한 성분 분석을 하여 FNS가 주변지반에 미치는 환경적 유해요인이 있는지 확인하고자 하였다.

본 연구에서는 모래나 실트 등 매립재료로 사용되는 천연 골재를 대신하여 FNS를 포설하고 강우를 흘려보냈을 때에 강우로 인한 주변 토양에 미치는 환경적 영향을 평가하기 위해서 토양오염 분석과 모형토조에서 배출되는 용출수를 통한 pH 분석을 실시하였다.

3.1 강우조건

Korea Meteorological Administration(2010)의 데이터를 통해 전남권 월 평균 강우량을 보면 300mm 내외, 시간 최대강우량은 평균 93mm 정도의 강우가 내리는 것으로 보고된다. 모형토조에서의 강우조건은 소형 모형토조의 경우 깊이에 따라 시료 60%, FNS 20%를 포설 후 남은 공간 20%를 강우조건을 유지할 수 있는 공간으로 사용하였으며, 정수위 투수실험 장치를 이용하여 정수위 조건을 유지시킴으로써 5일 동안 배출되는 배출수를 측정된 결과 약 10L가 측정되었다. 이를 역산으로 계산하여 강우조건을 산정한 결과 4.72mm/hr의 강우조건을 선정할 수 있었다. 대형 모형토조의 경우 원지반 시료 40cm, FNS 시료 20cm, 복토 20cm를 포설 후 남은 공간을 강우조건을 유지할 수 있는 공간으로 사용하였으며 대형 모형토조는 정수위를 유지하기 어렵기 때문에 모형토조의 상부까지 물을 가득 채운 후 일정시간 경과 후 다시 상부까지 물을 채우는 반복조건으로 실험을 진행하였으며, 이때 배출되는 배출수 약 50L가 측정되어 역산으로 산정한 결과 2.05mm/hr의 강우조건을 선정할 수 있었다. 강우조건은 Table 5와 같이 나타내었다.

Table 5. Rainfall conditions

Classification	Small chamber	Large chamber	
$Q(\ell/day)$	10	50	for 5days
$A(cm^2)$	176.6	2025	
Equation	$\frac{Q}{5Day \times 24hr \times A}$	$\frac{Q}{5Day \times 24hr \times A}$	
Rainfall intensity(mm/hr)	4.72	2.05	Gwangyang : 4 Yeosu : 1 Suncheon : 3

3.2 실험시료의 배합비

본 실험에 사용된 소형, 대형 모형토조의 배합비는 모래의 경우 KS F 2345 비점성토의 상대밀도 시험방법을 참조하여 $e_{\max} = 1.035$, $e_{\min} = 0.556$ 을 구한 후 실험에 사용될 건조시료의 양을 선정하여 공시체 높이에 맞춰 3층 다짐을 실시함으로써 목표 상대밀도(Dr) 40%, 60%의 지반조건을 재현하였다. 실트의 경우 KS F 2312 흙의 다짐시험을 통하여 $r_{\max} = 1.633$ 를 구하였고, 다짐도(R) 90%의 시료양을 선정하여 공시체 높이에 맞춰 3층 다짐을 실시함으로써 목표 다짐도(R) 90% 지반조건을 재현하였다.

FNS의 경우 모래시료와 마찬가지로 KS F 2345를 참조

하여 $e_{\max} = 0.913$, $e_{\min} = 0.598$ 로 구하여 본 실험에 사용된 시료의 양을 다음 Table 6과 같이 선정하였다.

실험에 사용된 주입액 중 담수는 지하수를 사용하였고, 산성은 HCl 용액을 사용하여 초기 pH를 5.5로 설정하였다. 해수의 경우에는 해수염을 사용하여 해수와 유사한 조건으로 주입액을 사용하였다.

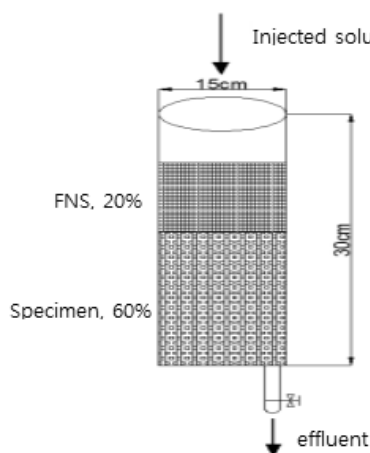
3.3 토양오염 분석을 위한 실내실험 방법

Fig. 2(a)는 소형 모형토조의 구성도로서 소형 모형토조는 D 150mm × H 300mm의 아크릴을 이용하여 모형토조를 제작하였다.

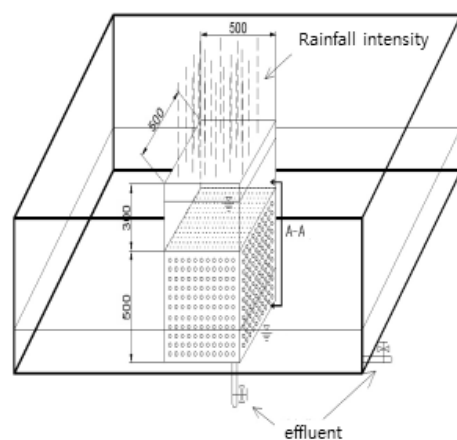
Table 6. Combination ratio of small and large chamber test

※ S : Sand, M : Silt, 1 : Small, 2: Large

Chamber test	Condition		Soil (kg)	Water (ℓ)	비고
1. Small D 150 X H 300 (mm)	Fresh water	S-1-Dr40	2,98	11	—
		S-1-Dr60	3,08	11	
		M-1-R90	5,78	11	
	Acidic water	S-1-Dr40	2,98	11	HCl 15ml
		S-1-Dr60	3,08	11	
		M-1-R90	5,78	11	
	Seawater	S-1-Dr40	2,98	11	Seawater salt 300g
		S-1-Dr60	3,08	11	
		M-1-R90	5,78	11	
2. Large W 450 X B 450 X H 1000 (mm)	Fresh water	S-2-Dr40	84,23	50	—
		M-2-R90	163,3	50	
	Acidic water	S-2-Dr40	84,23	50	HCl 25ml
		M-2-R90	163,3	50	
	Seawater	S-2-Dr40	84,23	50	Seawater salt 1800g
		M-2-R90	163,3	50	



(a) Small chamber test



(b) Large chamber test

Fig. 2. Manufacture of chamber test

Fig. 2(b)는 대형 모형토조의 구성도로서 대형 모형토조는 내부와 외부 토조로 나뉘는데 내부 토조는 아크릴로 W 450mm × B 450mm × H 1000mm로 제작하였으며 외부 토조는 고무토조로 W 1300mm × B 700mm × H 600mm로 겹 모형토조인 고무토조에는 용출액의 배출구가 없기 때문에 흘러나오는 용출액을 배출하기 위해서 인위적으로 구멍을 내어 사용하였다.

3.3.1 소형 모형토조 실험방법

- ① Table 6에서 선정된 시료의 양을 Fig. 3(a)와 같이 소형 모형토조에 자유낙하시켜 3층 다짐을 통해 모래의 경우 상대밀도(Dr) 40%, 60%로 설정하였으며, 실트의 경우 다짐도(R) 90%로 지반조건을 재현함
- ② Fig. 3(b)와 같이 정수위 투수실험 장비를 통해 일정한 수위를 유지할 수 있도록 정수위 조건으로 실험을 진행
- ③ 소형 모형토조에 사용된 강우량은 5일 동안 약 10L가 통과되어 강우강도는 4.72mm/hr로 측정
- ④ 소형 모형토조의 용출액 분석은 각 1day마다 배출되는 용출액을 pH측정기로 측정
- ⑤ 토양오염 분석은 5일이 지난 후 Fig. 3(c)와 같이 시료를 추출하여 121℃ 건조기로 건조시켜 토양오염 분석을 수행함

3.3.2 대형 모형토조 실험방법

- ① Table 6에서 선정된 시료의 양을 Fig. 4(a)와 같이 소형 모형토조에 자유낙하시켜 3층 다짐을 통해 모래의 경우 상대밀도(Dr) 40%로 설정하였으며, 실트의 경우 다짐도(R) 90%로 지반조건을 재현함
- ② 대형 모형토조의 경우 담수일 때에는 초기 pH 조건 변화가 없기 때문에 정수위를 유지하며 실험을 진행함
- ③ 주입액이 산성일 경우에는 초기 pH를 5.5로 맞춰야 하며, 해수의 경우에는 해수염을 섞어 해수로 만들어야 하기 때문에 정수위 조건으로는 실험이 불가함
- ④ 따라서 강우조건은 Fig. 4(b)와 같이 가득 채운 후 수위가 떨어질 때 까지 기다린 다음 다시 초기의 산성 및 해수조건을 설정하여 수위를 가득 채우는 방법으로 실험을 진행
- ⑤ 대형 모형토조의 용출액 분석은 각 1day마다 배출되는 용출액을 pH측정기로 측정
- ⑤ 토양오염 분석은 5일이 지난 후 Fig. 4(c)와 같이 4군데의 시료 중 S는 내부 토조인 아크릴 안의 FNS 하부에 포설된 시료를 말하며, L은 외부 토조의 왼쪽, R은 외부 토조의 오른쪽, C는 외부 토조의 센터에 있는 시료를 추출하여 건조기로 121℃ 건조시켜 토양오염 분석을 실시

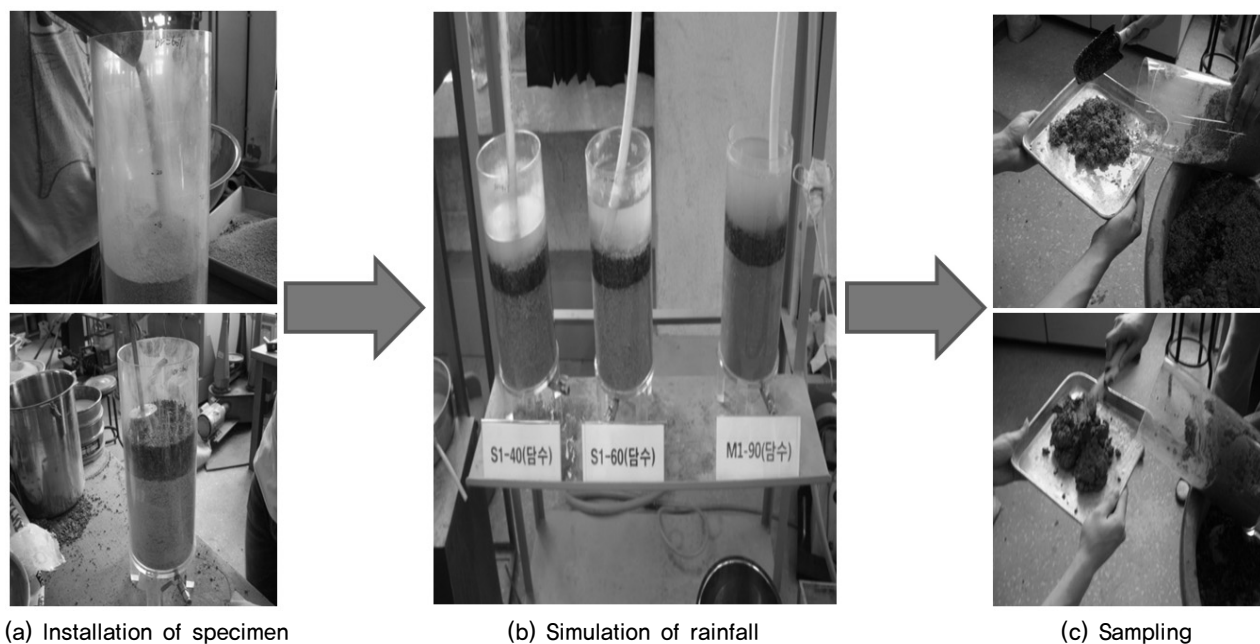


Fig. 3. Experimental method of small chamber test

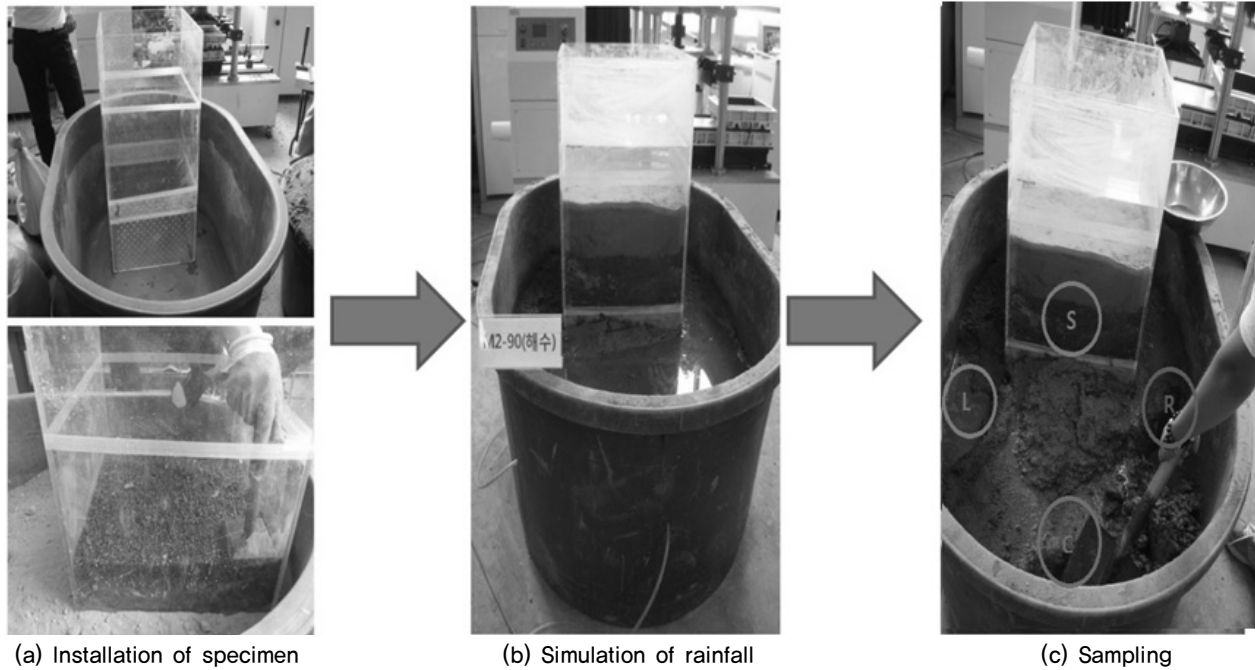


Fig. 4. Experimental method of large chamber test

4. 모형토조실험 결과

4.1 모형토조실험 용출수 pH 분석결과

Fig. 5는 모형토조실험 용출수 pH 분석결과이다. Fig. 5(a)는 담수이며 초기 pH는 7.40~7.60이고 Fig. 5(b)는 산성이며 초기 pH는 5.50, Fig. 5(c)는 해수이며, 초기 pH는 7.80~8.00 사이의 주입액을 사용하였다. 실트의 경우 pH가 높게 나타난 경향을 확인할 수 있는데 이는 실트질의 공극이 SW시료 보다 극히 작으므로 FNS의 물질이 빠져나가지 못하고 머물러 있어 pH의 값이 상승한 것으로 판단된다. 또한 3일 기준으로 pH가 증가하다가 감소하는데 이는 주입용액이 FNS와 지반을 계속적으로 침투하여

배출된 용출수로써 유해물질이 시간이 지남에 따라 어느 정도 씻겨나갔기 때문에 pH가 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단되며, 대부분 5일 후에 1Day 수준으로 pH가 감소되었고 수질오염 기준 pH 8.6이하(수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 : 수질오염물질의 배출허용기준 pH 5.8~8.6)로 감소하였다.

4.2 모형토조실험 토양오염 분석결과

4.2.1 모형토조에 사용된 원지반 시료에 대한 토양오염 분석결과

토양오염 분석 기준은 측량·수로조사 및 지적에 관한 법률에 제시되어 있는 1, 2, 3지역의 우려기준이다. 다음

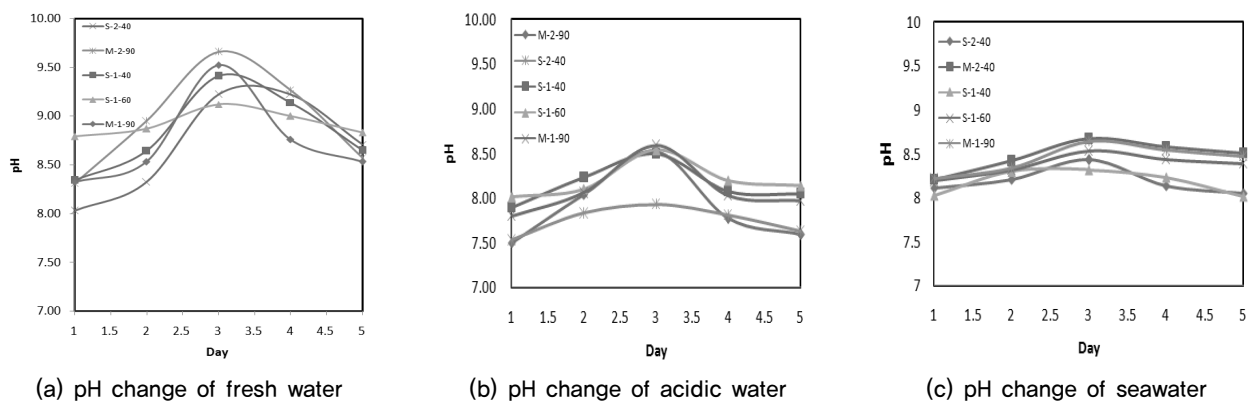


Fig. 5. pH change of effluent over the time

Table 7. Results of Soil pollution analysis

classification		Sample Name	As	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb	Hg
specimen	1	FNS	21,08	0,00	1,97	1,72	27,04	3,01	0,0051
	2	Sand	8,53	0,00	1,53	1,23	19,13	15,30	0,0231
	3	Silt	14,80	0,41	2,97	3,67	135,87	40,93	0,0180
Sand fresh water	4	S1-40-Fresh	6,86	0,01	0,85	1,78	22,17	14,00	0,0072
	5	S1-60-Fresh	7,76	0,01	1,45	1,79	19,66	17,73	0,0040
	6	S2-40-Fresh (S)	6,68	0,02	1,48	1,75	24,32	12,30	0,0058
	7	S2-40-Fresh (L)	12,16	0,01	5,45	4,60	22,45	15,16	0,0051
	8	S2-40-Fresh (R)	5,04	0,00	1,67	1,81	12,67	10,77	0,0223
	9	S2-40-Fresh (C)	8,49	0,01	2,02	2,25	23,99	15,62	0,0033
Sand acidic water	10	S1-40-acidic	9,36	0,02	13,78	3,86	62,80	19,61	0,0045
	11	S1-60-acidic	8,32	0,02	2,77	1,92	31,74	21,53	0,0043
	12	S2-40-acidic (S)	12,48	0,00	1,20	2,66	33,69	24,74	0,0043
	13	S2-40-acidic (L)	14,09	0,00	2,43	1,91	33,68	22,03	0,0040
	11	S2-40-acidic (R)	13,84	0,01	2,45	1,88	31,59	32,85	0,0158
	12	S2-40-acidic (C)	12,17	0,00	1,52	1,89	31,44	17,51	0,0072
Sand Seawater	13	S1-40-Sea	10,35	0,00	3,21	1,41	25,12	17,63	0,0033
	14	S1-60-Sea	9,12	0,00	1,41	0,94	18,29	15,30	0,0184
	15	S2-40-Sea (S)	9,27	0,12	1,38	1,64	20,34	46,78	0,0045
	16	S2-40-Sea (L)	8,18	0,04	1,44	1,58	24,40	16,65	0,0058
	17	S2-40-Sea (R)	11,85	0,00	2,35	1,52	25,86	18,70	0,0188
	18	S2-40-Sea (C)	6,53	0,01	1,45	1,00	14,14	13,60	0,0223
Silt fresh water	19	M1-90-Fresh	13,16	0,15	1,56	1,94	150,23	15,08	0,0188
	20	M2-90-Fresh (S)	11,76	0,14	0,89	1,57	133,32	12,82	0,0241
	21	M2-90-Fresh (L)	13,32	0,16	1,22	2,11	173,43	13,94	0,0184
	22	M2-90-Fresh (R)	11,80	0,15	1,23	1,98	137,59	14,85	0,0231
	23	M2-90-Fresh (C)	11,91	0,13	1,09	1,86	136,75	13,98	0,0159
Silt acidic water	24	M1-90-acidic	12,55	0,18	1,05	2,19	134,99	18,00	0,0180
	25	M2-90-acidic (S)	14,88	0,43	3,79	4,29	145,17	47,63	0,0159
	26	M2-90-acidic (L)	15,65	0,45	2,59	4,04	116,59	44,00	0,0072
	27	M2-90-acidic (R)	14,89	0,46	3,21	6,38	125,51	45,21	0,0058
	28	M2-90-acidic (C)	16,96	0,46	5,01	4,48	170,76	44,79	0,0043
Silt seawater	29	M1-90-Sea	16,06	0,43	3,17	4,04	139,21	43,83	0,0241
	30	M2-90-Sea (S)	15,44	0,41	3,42	4,39	143,26	43,26	0,0051
	31	M2-90-Sea (L)	15,48	0,42	3,21	4,51	131,04	41,61	0,0223
	32	M2-90-Sea (R)	16,13	0,42	3,62	4,16	138,58	42,99	0,0045
	33	M2-90-Sea (C)	16,38	0,41	3,21	4,01	141,13	41,96	0,0033
Standard	Concern/Counterplan 1th location (mg/kg)		(25/75)	(4/12)	(100/300)	(150/450)	(300/900)	(200/600)	(4/12)
	Concern/Counterplan 2th location (mg/kg)		(50/150)	(10/30)	(200/600)	(500/1,500)	(600/1,800)	(400/600)	(10/30)
	Concern/Counterplan 3th location (mg/kg)		(200/600)	(60/180)	(500/1,500)	(2,000/6,000)	(2,000/5,000)	(700/2,100)	(20/60)

Table 7은 토양오염에 대한 분석결과를 나열한 것이다. 그 중 원지반 시료는 모형토조 실험에 앞서 본 모형토조 실험에 사용하지 않은 원상태 시료를 말하며 FNS, 모래, 실트

의 토양오염 분석을 살펴보면 다음과 같다.

FNS의 경우 광양 (주) 효석에서 받은 시료로서 토양오염 분석 결과, 비소(As)가 다소 높은 상태로 분석되었으나 1

지역의 우려기준 허용범위 25mg/kg 내에 있어 오염성이 없는 시료로 분석되었다.

원지반 시료의 모래 시료는 섬진강 유역에서 채취한 시료로서 옥과에서 가져온 시료를 말하며, SW시료이다. 토양오염 분석 결과 모두 적정선에 포함되어 오염성이 없는 시료로 분석되었다.

원지반 시료인 실트 시료는 담양 도로공사 현장에서 채취한 시료로서 토양오염 분석 결과 아연(Zn)이 기본적으로 매우 높은 상태였고, 납 또한 다량으로 포함되어 있는 상태로 분석되었으나, 1지역의 우려기준 허용범위 300mg/kg, 200mg/kg 내에 있어 오염성이 없는 시료로 분석되었다.

4.2.2 담수조건에 대한 소형 및 대형 모형토조의 토양 오염 분석결과

Fig. 6(a)은 모래 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 모래 시료의 담수에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다. 상대밀도 40%(S-1-40)과 상대밀도 60%(S-1-60) 오염정도의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었고, 소형 모형토조의 상대밀도 40%(S-1-40)과 대형 모형토조 상대밀도 40%(S-2-40)을 비교한 결과, 비소와 납을 제외한 5가지 항목에서 소형 모형토조의 오염정도가 높게 나왔다.

Fig. 6(b)은 실트 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 실트 시료의 담수에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다. 소형 모형토조의 다짐도 90%(M-1-90)

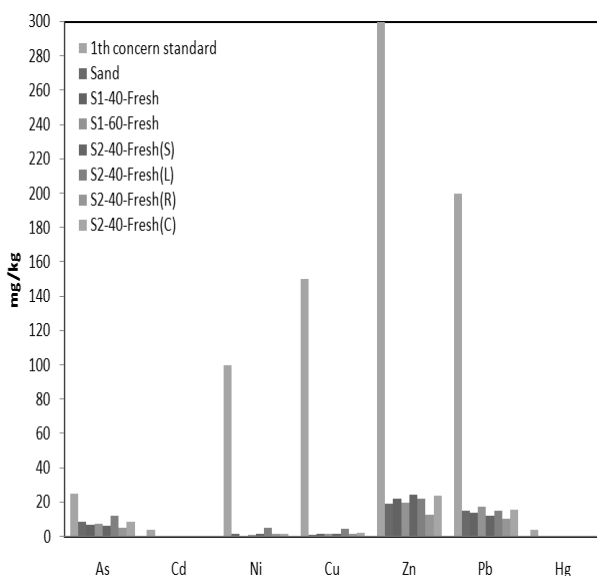
과 대형 모형토조 다짐도 90%(M-2-90)을 비교한 결과 니켈, 아연, 수은을 제외한 나머지 4가지 항목에서 대형 모형토조의 오염정도가 높게 나왔다.

담수의 경우 일반적으로 원지반의 오염정도와 비슷하거나 낮아지는 경향을 볼 수 있는데 이는 투수성이 좋아 강우에 의해 씻겨나가는 것으로 판단된다. 또한 소형보다 대형에서 오염의 정도가 높게 나온 이유는 넓은 범위에서 보다 많은 양의 오염물질이 씻겨 나오기 때문이다. 그러나 대부분의 경우 원지반 모래시료와 비교하여 큰 차이는 없으며, 토양오염 분석된 중금속이 모두 1지역의 우려기준 허용범위 내에 있어 담수의 경우 FNS의 용출로 인한 주변 토양에 대한 중금속오염은 거의 없는 것으로 분석되었다.

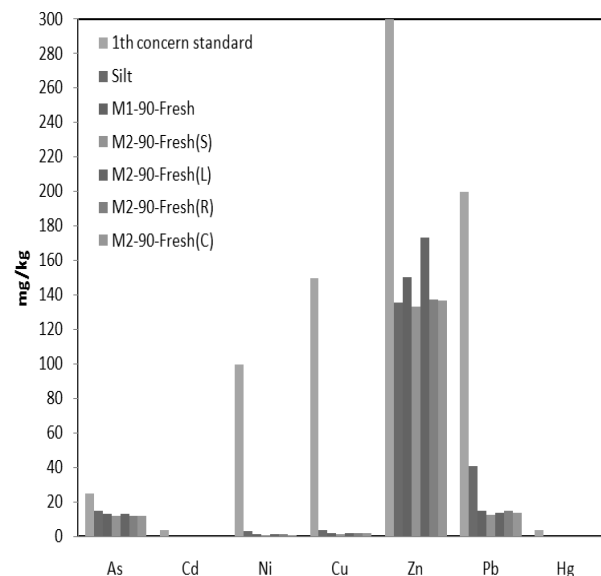
4.2.3 산성조건에 대한 소형 및 대형 모형토조의 토양 오염 분석결과

Fig. 7(a)은 모래 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 모래 시료의 산성에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다. 상대밀도 40%(S-1-40)과 60%(S-1-60)의 오염도의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었고, 소형 모형토조의 상대밀도 40%(S-1-40)과 대형 모형토조 상대밀도 40%(S-2-40)을 비교한 결과 비소와 납을 제외한 5가지 항목에서 소형 모형토조의 오염정도가 높게 나왔다.

Fig. 7(b)은 실트 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 실트 시료의 산성에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다. 소형 모형토조의 다짐도 90%(M-1-90)

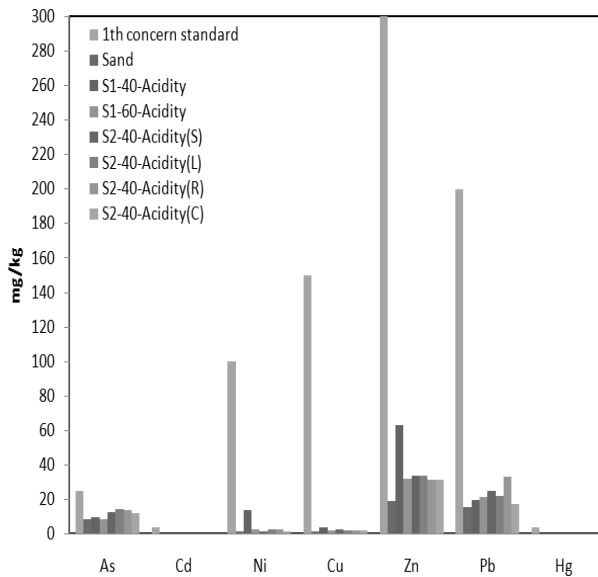


(a) Results of Soil pollution analysis for sand

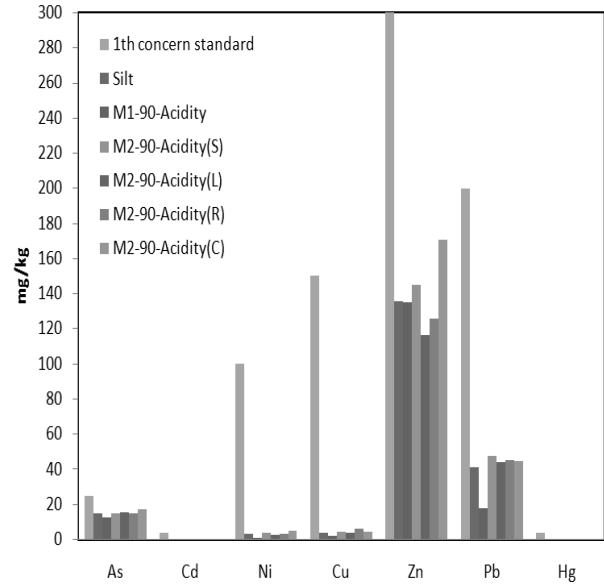


(b) Results of Soil pollution analysis for silt

Fig. 6. Comparison of original ground and 1th local concern standard by fresh water

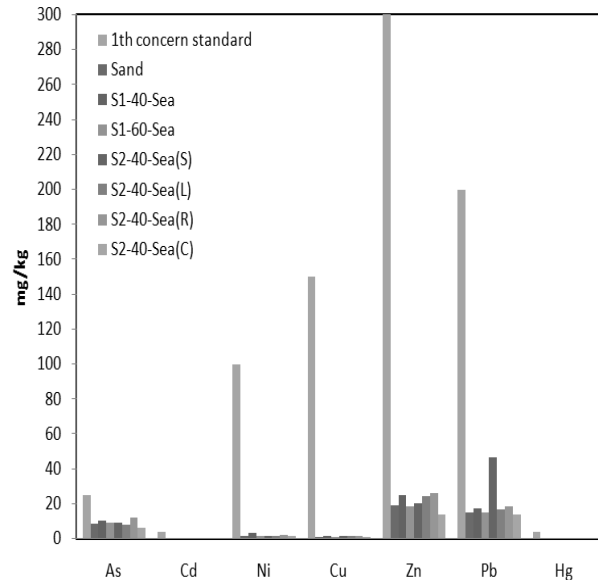


(a) Results of Soil pollution analysis for sand

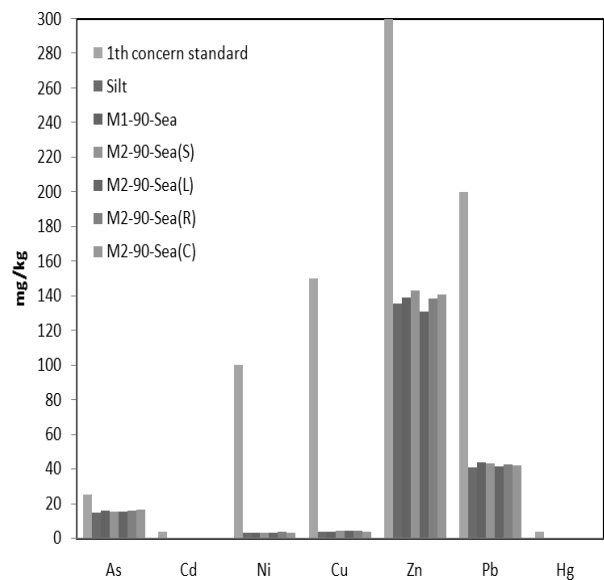


(b) Results of Soil pollution analysis for silt

Fig. 7. Comparison of original ground and 1th local concern standard by acidic water



(a) Results of Soil pollution analysis for sand



(b) Results of Soil pollution analysis for silt

Fig. 8. Comparison of original ground and 1th local concern standard by seawater

과 대형 모형토조 다짐도 90%(M-2-90)을 비교한 결과 7 가지 항목 모두 대형 모형토조의 오염정도가 높게 나왔다.

산성의 경우 일반적으로 모래의 경우 원지반의 토양오염 분석보다 더 상회하는 것을 볼 수 있는데 이는 산성 자체의 오염성이 있는 것으로 판단되며, 실트의 경우 원지반 실트의 토양오염 분석보다 더 높아진 것을 확인할 수 있다. 이는 공극이 극히 작아 FNS의 오염성 물질이 공극을 통과하지 못하고 강우에 의해 계속 침전되어 원지반의 실트질보다 오염도가 상회하는 것으로 나타났기 때문이다. 또한

소형보다 대형에서 오염의 정도가 높게 나온 이유는 넓은 범위에서 보다 많은 양의 오염물질이 씻겨 나오기 때문이다. 그러나 토양오염 분석된 중금속이 모두 1지역의 우려기준 허용범위 내에 있어 산성의 경우 FNS의 용출로 인한 주변토양에 대한 중금속오염은 거의 없는 것으로 분석되었다.

4.2.4 해수조건에 대한 소형 및 대형 모형토조의 토양 오염 분석결과

Fig. 8(a)은 모래 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실

험에 사용된 모래 시료의 해수에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다. 상대밀도 40%(S-1-40)과 60%(S-1-60)의 오염도의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었고, 소형 모형토조의 상대밀도 40%(S-1-40)과 대형 모형토조 상대밀도 40%(S-2-40)을 비교한 결과 카드뮴, 구리, 납, 수은을 제외한 3가지 항목에서 소형 모형토조의 오염정도가 높게 나왔다.

Fig. 8(b)은 실트 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 실트 시료의 해수에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다. 소형 모형토조의 다짐도 90%(M-1-90)과 대형 모형토조 다짐도 90%(M-2-90)을 비교한 결과 비소, 카드뮴, 납, 수은을 제외한 3가지 항목에서 대형 모형토조의 오염정도가 높게 나왔다.

해수의 경우 모래, 실트 모두 담수와 유사한 결과를 얻었고 토양오염 분석된 중금속이 모두 1지역의 우려기준 허용범위 내에 있어 해수의 경우 FNS의 용출로 인한 주변 토양에 대한 중금속오염은 거의 없는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 FNS가 매립되는 지반에서의 토질 및 수질오염에 미치는 영향인자를 분석하기 위하여 FNS에 대한 공학적 특성을 분석하였고, 용출수의 수질오염에 대한 유해성 평가를 하기 위해서 pH 분석을 수행하였다. 또한 토양오염에 대한 유해성 평가를 하기 위해서 현장상태와 유사한 조건으로 소형 및 대형 모형토조를 제작하였으며, FNS가 주변 토양에 미치는 환경적 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) FNS의 실내물성실험을 분석한 결과, # 200체 통과량은 0.02%로 모래(2.58%)와 크게 차이가 없는 것으로 나타났고, 균등계수 Cg가 3.04로 입도의 분포가 고르지 않은 SP시료로 분석되었다. 또한 비중은 2.966으로 일반 잔골재의 비중 2.55~2.60보다 높았으며 액·소성 분석 결과 비소성(N.P)로 나타났다.
- (2) FNS의 역학적 특성을 분석한 결과, 직접전단 실험 시 상대밀도 60%일 때, 내부마찰각은 소형에서 38.66°과 대형에서 36.69°로 일반 모래시료 보다 약 5°상회하는 것으로 나타났다. 따라서 지반 공학적으로 우수한 재료로 평가된다.
- (3) 모형토조의 담수, 산성, 해수의 시간에 따른 pH 분

석한 결과, 일반적으로 실트질 시료에서 pH가 높게 측정이 되었으며 이는 실트질 시료의 공극이 작아 FNS의 오염물질이 공극사이를 통과하지 못하고 계속적으로 축적됨으로 pH가 높게 나타난 것으로 판단되었으며, 모래질 시료에서는 대부분 pH가 낮게 나타났다. 특히 산성의 경우 초기의 낮은 pH 5.5임에도 불구하고 하루만에 pH가 7.5를 상회하여 산성의 정도가 낮은 지역에 FNS를 사용하게 된다면 중성의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

- (4) 모형토조의 토양오염을 분석한 결과, 검출된 중금속이 우려기준 1 지역 허용범위에 있어 FNS 매립 시 FNS의 용출로 인한 주변 토양에 대한 중금속오염은 거의 없는 것으로 분석되었다. 실트의 경우 일반적으로 원지반과 비교하였을 때 토양오염이 미미하게 높게 측정되는 경향을 볼 수 있었는데 이는 pH 측정시와 마찬가지로 공극이 극히 작아 FNS의 오염성 물질이 공극을 통과하지 못하고 강우량에 의해서 계속 침전되어 원지반의 실트질 보다 오염정도가 상회하는 것으로 판단되었다. 모래의 경우는 원지반의 오염정도 보다 더 낮아지는 경향이 나타났다으며 이는 모래시료와 혼용하여 사용할 때 좋은 재활용 재료가 될 것으로 판단된다.

Acknowledgement

The authors acknowledge the financial support from Hyoseok (No. 2012-0671).

References

1. Chu, Y. S., Lim, Y. R., Park, H. B., Song, H., Lee, J. K. and Lee, S. H. (2010), "Extraction of Mg ion and Fabrication of Mg Compound from Ferro-Nickel Slag", *Journal of Korean Ceramic Society*, Vol.47, pp.613-617.
2. Eric H. O. (2001), "An Experimental Study of Fosterite Dissolution Rates as a Function of Temperature and Aqueous Mg and Si Concentration", *Chemical Geology*, Vol.175, pp.485-94.
3. Kim, P. S. (2013), *The Study on Performance Evaluation of Eco-friendly Concrete using Ferro-Nickel Slag for Fine Aggregate*, Master's thesis, Hanyang University.
4. Kim, W. J., Hong, S. B., Kim, P. S. and Cho, B. S. (2011), "Research on the Concrete using Ferro-Nickel Slag for Fine Aggregate", *2011 Korea Concrete Institute Fall National*

- Conference, pp.453-454.
5. Kim, W. J., Hong, S. B., Kim, P. S. and Cho, B. S. (2012), "Performance Evaluation of Required Strength Using Ferro-Nickel Slag for Fine Aggregate", *2012 Korea Concrete Institute Spring National Conference*, pp.49-50.
 6. Korea Meteorological Administration (2010), *1984 ~2010 Korean Climatograph*, pp.30-31.
 7. Lee, S. H. (2013), *A Study on the Optimized Chemical Composition of FeNi Slag for Improving Nickel Recovery*, Ph. d thesis, Suncheon University.
 8. Masayasu K. (1997), "Utilization of Non-ferrous Metallurgical Slags", *Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan*, Vol.113, No.12, pp.995-998.
 9. Park, J. I., Bae, S. H., Yu, J. W., Choi, Y. W. and Lee, K. M. (2010), "Characteristics of Concrete Using Ferronickel Air Cooled Slag Aggregate", *2010 Korea Concrete Institute Fall National Conference*, pp.215-216.
 10. Pokrobsky, O. S. and Schott, J. (2000), "Kinetics and Mechanism of Forsterite Dissolution at 25 °C and pH from 1 to 12", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.64, No.19, pp.3313-3325.