



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017年 8月

박사학위논문

페로니켈슬래그(FNS) 미분말을
활용한 그라우트재 연구

조선대학교대학원

토목공학과

박 일 훈

페로니켈슬래그(FNS) 미분말을 활용한 그라우트재 연구

A Study on Grouting Material using Ferronickel Slag (FNS) Powder

2017년 8월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

박 일 훈

페로니켈슬래그(FNS) 미분말을 활용한 그라우트재 연구

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2017년 4월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

박 일 훈

박일훈의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 운 중 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 성 홍 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 정 응 (인)

위 원 동신대학교 교수 김 재 홍 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 대 현 (인)

2017년 6월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서론	1
1.1 연구배경과 목적	1
1.2 연구 동향	3
1.2.1 국내 연구동향	5
1.2.2 국외 연구동향	8
1.3 연구 내용	10
제 2 장 FNS의 공학적 특성 평가	11
2.1 FNS의 일반적 특성	11
2.1.1 화학성분	11
2.1.2 물리적 특성	12
2.2 FNS의 기본 물성 평가	14
2.2.1 입도분석실험	14
2.2.2 비중실험	15
2.2.3 액·소성 한계실험	16
2.2.4 상대밀도실험	17
2.2.5 다짐실험	17
2.2.6 FNS 물성실험의 종합결론	18
2.3 FNS의 역학적 특성 평가	19
2.3.1 직접전단실험	19

2.3.2 투수실험	22
제 3 장 실내실험 및 분석	24
3.1 그라우트제의 겔타임(Gel-time) 측정	24
3.1.1 겔타임(Gel-time) 측정을 위한 배합비	24
3.1.2 겔타임(Gel-time) 공시체 제작과정	25
3.2 그라우트제의 일축압축강도실험	26
3.2.1 호모겔(Homogel) 일축압축강도를 측정하기 위한 배합비	26
3.2.2 호모겔(Homogel) 공시체 제작	27
3.3 배합비에 따른 겔타임(Gel-time) 분석	28
3.3.1 규산소다 3호에 따른 겔타임(Gel-time) 분석	28
3.3.2 겔타임(Gel-time) 종합 분석	33
3.4 배합비에 따른 일축압축강도 분석	35
3.5 그라우트제의 투수실험	46
3.5.1 투수실험을 위한 배합비	46
3.5.2 투수실험 결과	48
제 4 장 FNS의 환경성 평가	50
4.1 실내실험을 통한 FNS의 환경성 평가	50
4.2 강우조건	51
4.3 FNS 환경성 평가를 위한 실내실험 조건	52
4.3.1 실험 시료의 물리적 특성	52
4.3.2 소형 모형토조 실내실험	54
4.3.3 대형 모형토조 실내실험	57

4.4 FNS 환경성 평가결과	61
4.4.1 용출수 pH 분석결과	61
4.4.2 모형토조의 토양오염 분석결과	68
4.5 토양오염 분석을 위한 전자현미경 방법 및 결과	79
4.5.1 실험장비	79
4.5.2 SEM 분석결과	81
4.5.3 EDX 분석결과	85
4.5.4 XRD 분석결과	90
4.6 어독성 실험	92
4.6.1 어독성 실험의 개요	92
4.6.2 어독성 실험방법	92
4.6.3 어독성 실험결과	97
 제 5 장 결론	 99
 참고문헌	 101

표 목 차

표 2.1 니켈 원광석 화학 성분	11
표 2.2 FNS의 화학성분	12
표 2.3 FNS의 물리적 특성	13
표 2.4 실내실험 항목별 실험규격	14
표 2.5 FNS의 입도 실험 결과표	15
표 2.6 FNS와 일반 모래의 물성 비교	18
표 2.7 FNS의 직접전단실험 결과	21
표 2.8 FNS와 모래 시료의 투수계수 비교	23
표 3.1 겔타임(Gel-time) 측정을 위한 그라우트재 배합비	24
표 3.2 겔타임(Gel-time) 종합 분석 결과	34
표 3.3 C : F(100 : 0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	36
표 3.4 C : F(90 : 10)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	36
표 3.5 C : F(80 : 20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	39
표 3.6 C : F(70 : 30)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	41
표 3.7 C : F(60 : 40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	42
표 3.8 투수실험을 위한 배합비	46
표 3.9 투수실험 결과	48
표 4.1 강우조건 선정	51
표 4.2 FNS와 실험시료의 물리적 및 역학적 특성 비교	52
표 4.3 소형 모형토조실험의 배합비	55
표 4.4 대형 모형토조 시료 배합비	59
표 4.5 고정된 수위의 pH 변화(담수)	61
표 4.6 시간경과에 따른 담수의 pH 변화	64
표 4.7 시간경과에 따른 산성 강우 시의 pH 변화	65
표 4.8 시간경과에 따른 해수의 pH 변화	67
표 4.9 원지반 시료의 토양오염 분석결과	68
표 4.10 주입액에 따른 모래의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	76

표 4.11 주입액에 따른 실트의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	78
표 4.12 모래에 대한 SEM 분석결과	81
표 4.13 실트에 대한 SEM 분석결과	83
표 4.14 FNS에 대한 SEM 분석결과	84
표 4.15 모래에 대한 EDX분석 결과	86
표 4.16 실트에 대한 EDX분석 결과	88
표 4.17 FNS에 대한 EDX분석 결과	89
표 4.18 모래에 대한 XRD분석 결과	90
표 4.19 실트에 대한 XRD분석 결과	91
표 4.20 FNS에 대한 XRD분석 결과	91
표 4.21 적용된 그라우트재 조합별 배합비	94
표 4.22 그라우트재의 시간경과에 따른 pH 변화 및 치사어(울)	97

그림 목 차

그림 2.1 FNS 입도분석	15
그림 2.2 소형 직접전단시험기의 실험모식도 및 전경	20
그림 2.3 대형 직접전단시험기	20
그림 2.4 투수실험	22
그림 3.1 그라우트재의 겔타임(Gel-time) 측정 모습	25
그림 3.2 호모겔(Homogel) 제작에 사용된 일축압축 시험용기	27
그림 3.3 일축압축 공시체 양생과 시험 전경	28
그림 3.4 SS : W(50 : 50)에 따른 겔타임(Gel-time) 실험결과	30
그림 3.5 SS : W(40 : 60)에 따른 겔타임(Gel-time) 실험결과	31
그림 3.6 SS : W(30 : 70)에 따른 겔타임(Gel-time) 실험결과	32
그림 3.7 C : F(100 : 0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	36
그림 3.8 C : F(90 : 10)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	37
그림 3.9 C : F(80 : 20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	39
그림 3.10 C : F(70 : 30)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	40
그림 3.11 C : F(60 : 40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	42
그림 3.12 규산소다 50%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	43
그림 3.13 규산소다 40%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	44
그림 3.14 규산소다 30%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	45
그림 3.15 투수실험	47
그림 3.16 차수 그라우트 재료에 따른 차수효과 분석	49
그림 4.1 실험시료의 입도분포곡선	53
그림 4.2 소형 모형토조	54
그림 4.3 소형 모형토조 실험방법	56
그림 4.4 대형 모형토조	58
그림 4.5 대형 모형토조 실험방법	60
그림 4.6 FNS 양에 따른 고정된 수위에서 pH 변화(담수)	62
그림 4.7 시간경과에 따른 담수의 pH 변화	63
그림 4.8 시간경과에 따른 산성의 pH 변화	65

그림 4.9 시간경과에 따른 해수의 pH 변화	66
그림 4.10 모래 담수의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	69
그림 4.11 실트 담수의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	70
그림 4.12 모래 산성의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	71
그림 4.13 실트 산성의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	72
그림 4.14 모래 해수의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	73
그림 4.15 실트 해수의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	74
그림 4.16 주입액에 따른 모래의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	75
그림 4.17 주입액에 따른 실트의 원지반 및 1지역 우려기준 비교	77
그림 4.18 전자현미경	79
그림 4.19 X선 분석기	80
그림 4.20 고결체	94
그림 4.21 어항수조	95
그림 4.22 pH 측정기	95
그림 4.23 공시어(금붕어, 평균길이 약 5~6cm, 20마리) 시험 전경	96
그림 4.24 시간경과에 따른 그라우트재 용탈에 대한 pH 변화	98

ABSTRACT

A Study on Grouting Material using Ferronickel Slag (FNS) Powder

Park, Il Hoon

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon, Ph. D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

The main raw material of stainless steel is called ferronickel slag, an eco-friendly resource with more than 1 million tons of emissions per year and excellent physical and chemical properties. It is a natural resource substitute for concrete aggregate, foundry sand, abrasive, and contributes to resource and environmental conservation. In Japan, New Caledonia and other advanced countries, ferronickel slag (FNS) has already been used in a variety of ways. However, in Korea, it can be recycled as fine aggregate for concrete but its utilization rate is insufficient. As a result, only 10% of the total amount of the total fraction is abandoned and landfill. Recently, the environmental pollution of the FNS buried has been controversial. There is still a problem with the treatment of FNS.

To combat the current issue of dwindling resources and rising costs in construction materials, the use of FNS micropowder which is derived from waste arising, is being used for construction as well as ground amelioration. In this study, cutoff effect is confirmed from the mechanical characteristic of mixed cement paste with FNS micropowder and analysis of Gel-time. Land reclamation, environmental assessment of ground water and gushout water, soil pollution are performed to estimate the possibility of using in the field as an FNS grout

material, concerning landfill. In the consequence of uniaxial compression experiment, strength has declined about 85%~92% contrasted with 100% of cement strength when it is mixed with 10% of FNS micropowder instead of using cement. The optimal replacement ratio of FNS micropowder is 10% since there is large range of diminution strength when the proportion goes over 10% . From the result of constant head permeability test, it has found that the specimen, mixed with 40% of FNS micropowder, shows cutoff effect over than 20 times comparing with the specimen that has not been mixed with FNS micropowder. So, it is more suitable grout material for the ground that needs cutoff than strength enhancement. Furthermore, as a consequence of estimation in the affection of FNS to surrounding environment, detected harmful metals are all in 1 district tolerance range of concern level. It confirms that the heavy-metal contamination from FNS gushout was insignificant.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경과 목적

철산업은 대량의 원료와 에너지를 소비하며 철강을 생산할 뿐 아니라 다양한 종류의 부산물과 폐기물을 다량 발생시며 주 제품인 철강의 약 50%에 이르고 있다. 제철공정을 갖춘 제철소의 경우 원료, 제선, 제강, 압연 및 표면처리 등 복잡한 연결 생산 체계를 거치면서 수많은 종류의 부산물 및 폐기물을 다량으로 발생시키고 있으며, 이러한 폐기물은 철, 탄소 및 석회석 등의 재활용이 가능한 유효한 자원을 다량 함유하고 있어 이들을 그대로 매립해 버리는 것은 자원 및 에너지의 낭비이다. 더구나 지구환경이 큰 이슈가 되고 있는 요즘 각종 제철 폐기물의 발생량을 가능한 줄이고, 발생된 것은 자원화를 도모함으로써 폐기물 처리비용을 경감하는 동시에 환경공해 방지에 도움이 된다. 특히 건설 사업에 투입되는 콘크리트 골재의 요구량은 매우 막대하며, 따라서 고갈되어 가는 천연자원의 보호측면에서 제철 부산물로서 슬래그는 천연자원의 대체재로 최대한 활용되고 있다(최상원 등, 2007).

스테인리스 스틸(Steel)의 주원료인 페로니켈은 전기로 또는 로터리 킬른(Rotary kiln)에서 제련하여 생성되며, 니켈을 생산하는 과정에서 발생하는 부산물을 페로니켈 슬래그(Ferronickel slag (이하 “FNS”))라고 한다. FNS는 그 대부분이 모래와 같은 상태로 부산되어 견고하고 흡수율이 작으며, 염기도가 상대적으로 낮아 물리·화학적으로 안정되어 있기 때문에 그 활용가능성이 매우 다양하다.

보통 니켈 1톤당 약 30톤의 FNS가 발생하는 것으로 알려져 있으며, FNS는 연간 100만 톤(2010년)정도 발생되고 화학적으로 안정하기 때문에 채움재 및 콘크리트 골재로서의 활용가능성이 상당히 높다(추용식 등, 2010). 이에 따라 국외에서는 약 120년 전부터 뉴칼레도니아(New Caledonia), 일본 등에서 FNS의 연구가 수행되었으며, 연구 단계를 지나 실용화 시스템을 구축하였다. 일본의 경우 콘크리트용 FNS 골재를 국가 표준화(JIS)하여 산업 전반적으로 활용을 극대화하여 현재 발생하는 FNS를 거의 100% 재활용하고 있다(이상홍, 2010).

국내에서는 2009년 한국산업규격(KS F 2790)의 제정과 콘크리트시공 지침서 마련과 함께 콘크리트용 잔골재로서 일부 사용되고 있으나, 사용량은 매우 적었고 FNS 전체 배출량의 10%를 차지하는 미분말은 대부분 재활용되고 있지 않아 버려지고 있는 실정

이다.

FNS가 화학적으로 비철금속으로 물과 반응하지 않는 특징과 물리적·화학적 성질이 우수하고, FNS의 배출량이 많아 산업현장에 적용했을 경우에도 재료수급에 차질이 없다는 장점을 지니고 있다. FNS를 혼합한 제품은 내구성 및 내화확성이 증가하여 염해나 중성화 혹은 균열과 같은 복합적인 원인으로 인한 성능저하가 우려되는 구조물에 장기적인 내구성 확보에 도움을 준다는 연구가 보고된 바 있다(박만석, 2011). 그러나 기존의 FNS에 대한 연구는 대부분 잔골재로 콘크리트의 내화확성을 개선하는 연구로 수행되었기 때문에 본 연구에서 사용하고자 하는 FNS 미분말과는 차별성이 있다. 본 연구는 기존에 전혀 재사용되고 있지 않은 FNS 미분말을 활용하여 그라우팅재 개발에 사용하고자 하였다.

그라우팅공법은 그라우트재의 재료적 한계로 인하여 여러 문제점이 제기되어 왔으며, 재료적 한계를 극복하기 위해 연구되고 있다. 약액 그라우팅 중 일반적으로 많이 쓰이는 공법은 Labile Waterglass(이하 LW)공법으로 주로 자갈층, 모래층에 전면 침투가 가능하지만, 0.6mm 이하 세사 층에서는 주입이 곤란하고 연약한 점성토와 실트 층에는 맥상(흙의 조직을 파괴하면서 주입하는 형태)으로 주입되어 침하방지와 지반강화 등의 효과가 있다(안진현, 2009). 이러한 LW공법의 주된 재료는 시멘트로서 겔(Gel)화 특성과 낮은 침투능이 단점으로 지적되어 왔다. 그러나 최근 재료의 발달 및 시멘트 분쇄기술의 발달로 Micro시멘트(김진춘, 2007) 등 새로운 시멘트계 그라우트재가 개발되었으며, 시멘트의 겔화특성과 침투성의 개선이 기대되고 있다(김종선 등, 2009).

폐기물인 FNS 미분말을 활용하여 시멘트를 주로 사용하는 지반개량 분야에서도 시멘트 대체와 사용량을 절감할 수 있는 재료로 개발하여 원자재 값 상승과 건설재료 부족 등의 문제를 해결하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 FNS 미분말을 혼입한 시멘트페이스트(Cement paste)의 역학적 특성과 Gel-time 분석, FNS 미분말로 인한 차수효과를 확인하였고 FNS가 그라우트재로 사용될 경우 지반에 매립되는 것을 고려하여 FNS의 지반매립에 따른 용출수 및 토양오염 평가 등을 수행하여 FNS의 그라우트 재료로서 현장적용의 가능성을 평가하였다.

1.2 연구 동향

국내의 약액주입공법은 1970년대 서울지하철 건설과 함께 본격적으로 도입되었으며, 1980년대 일본으로부터 LW공법 등 다양한 약액주입공법이 도입되어 현재까지 많은 건설현장에서 사용되고 있다. 1990년대에는 약액의 내구성이 문제화되어 다양한 그라우트재 개발이 본격화 되었고, 2000년대에 들어서는 세계적인 추세에 맞춰 친환경 약액이 개발되었다(Marion et al., 2005).

그라우팅에 많이 사용되는 시멘트 대체자원으로 친환경 재료를 이용하여 느슨한 사질토 지반의 강도를 개선하거나, 고결물이 입자 간극에 침투하여 배움으로 차수를 통해 연약지반을 개량할 수 있는 친환경 재료가 많은 연구자들에 의해 개발되고 있다. 그 중 시멘트를 근본적으로 감소시킬 수 있는 Biopolymer, 유기산 재료, 식물추출액, 슬래그 등을 활용한 지반개량 공법이 다양하게 연구되었다(Dejong et al. 2006, 2010; Soon et al., 2013; Wiffin et al., 2007; Paassen et al., 2009; Zaharaki and Komnitas, 2012; Lemonis et al., 2015; Katsiotis et al., 2015).

또한 자기치유 기능을 이용한 그라우팅공법은 그라우트 경화체에 균열이 발생하면 균열부로 물과 이산화탄소가 투입되어 시멘트의 혼화제(팽윤제, 팽창제, 석출반응제 등)와 반응하여 균열부에 팽창성 반응물이 점착되는 방법으로 지반의 내구성, 차수성의 향상, 용탈 및 환경오염방지 등을 할 수 있는 연구 등이 진행되고 있다(Hearn, 1998; Reinhardt and Jooss, 2003; 문인종 등, 2016). 일반 콘크리트와 자기치유 콘크리트의 성능 비교를 통해 초기비용은 높으나 구조물의 유지관리 비용 절감을 할 수 있으며(Breugel, 2007), 마이크로캡슐을 활용한 자기치유 기술로 균열의 치료(White et al. 2001), 시멘트계 무기물질 석출을 통한 균열에서 들어오는 각종 이온이 물과 반응하여 다른 수화생성물로 변하는 특징을 갖고 있다(Ahn and Kishi, 2010).

이러한 친환경 소재와 더불어 최근에는 산업부산물을 이용한 연구가 꾸준히 증가되고 있으며, 산업부산물 중 특히 고로슬래그의 개발은 국내외에서 많이 이루어져 왔다. 그러나 아직까지 FNS를 그라우트재로 사용하는 연구는 적었다.

FNS의 국내·외 연구를 살펴보면 대부분 콘크리트에 대한 기초성능 평가에 적용되었으며(김필성, 2013; 김우재 등, 2011; 최연왕 등, 2010; 조봉석 등, 2014; 김형석 등, 2015), 일본의 경우 페로니켈(Ferronickel) 생산 공장은 1950년대부터 가동되기 시작하여 현재 3개 회사가 사용하고 있으며, FNS를 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 FNS 잔골재를 JIS(A-5011) 규격으로 설정되었다.

또한 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. 그러나 아직까지 FNS의 미분말에 대한 재활용 방안, 강도, 투수효과 등에 대한 연구는 미흡하고, FNS가 지반에 매립될 경우 지하수위 및 강우수량에 의한 환경성 평가와 토양오염 평가에 대한 연구도 매우 미흡하기 때문에 기존 연구와 차별성을 가지고 있다.

1.2.1 국내 연구동향

국내 S사는 2007년 5월, 매립부지 20만 7천m²에 페로니켈 15만 톤 생산 규모의 공장을 착공 후, 2008년 11월에 준공하여 페로니켈 생산을 시작하였다. 이러한 페로니켈 생산으로 인하여 발생하는 FNS는 2010에 년 간 100만 톤에 달하고 있다. 현재까지 국내에서는 단수매립용 골재 및 관 부설용 채움재 등으로 이용되고 있으며, 한국건설자재시험연구원(2009), 한국콘크리트학회(2011)에서 최근 콘크리트용 골재로의 사용을 위한 기초 연구 및 규격 제정 등을 시도하고 있는 실정이다.

김형석(2015) 등은 FNS를 사용한 증기양생 콘크리트의 압축강도 특성을 분석하였다. W/C은 40%, 잔골재와 굵은골재, OPC와 FNS(0, 50, 100%)의 배합을 통하여 28일 강도를 측정하였다. 그 결과, FNS 0%의 경우 422kg/cm² 강도, FNS 50%의 경우 362kg/cm² 강도, FNS 100%의 경우 356kg/cm² 강도를 나타내었다. 치환율이 클수록 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었으며, 추후 단위수량 및 FNS의 치환율에 따른 최적 배합을 도출하여 PC 콘크리트 대체 잔골재로 FNS를 활용하고자 하였다.

최연왕(2011) 등은 수채 FNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 최적 혼합율 및 내구 특성 평가를 수행하였다. W/C는 50%, AE 혼화제 0.045%, FNS(0, 20, 30, 40, 50, 100%)의 배합비로 혼합하여 28일 강도를 측정하였다. 그 결과, FNS 잔골재 혼합률 증가에 따라 콘크리트의 공기량, 유동성 및 블리딩(Bleeding)량은 비례적으로 증가하였으며, 일축압축강도의 경우 FNS 0%는 320kg/cm² 강도, FNS 40%는 260kg/cm² 강도, FNS 100%는 200kg/cm² 강도로 앞선 김형석 등(2015)과 동일한 경향의 결과를 확인할 수 있었다.

조봉석(2014) 등은 FNS의 콘크리트용 잔골재 적용성 검증 연구를 수행하였다. W/C은 60.3%, 잔골재와 굵은골재, OPC와 FNS(0, 15, 20, 25, 30, 40%)를 배합하여 28일 강도를 측정하였다. 그 결과, 앞선 김형석 등 (2015)와 달리 FNS 0%의 경우 262kg/cm² 강도, 25%의 경우 292kg/cm² 강도, 40%의 경우 302kg/cm² 강도로 미소하지만 FNS의 배합비가 증가할수록 강도가 증가하는 경향을 나타냈으며, FNS의 대체율에 따른 압축강도는 FNS 치환율 30%에서 일반 잔골재 대비 120% 높게 나타났다.

김우재(2011) 등은 FNS 잔골재 혼입 콘크리트에 대한 기초성능평가를 수행하였다. 28일 콘크리트 성능 검토결과, FNS 0%의 경우 320kg/cm² 강도를 나타내었으며 FNS 40%의 경우 360kg/cm² 강도를 나타내어 FNS 혼입율이 높을수록 강도가 미소하게 증

가하는 경향을 확인하였다. 추후 FNS 잔골재를 적용한 콘크리트의 강도별 성능검토 및 현장 적용을 통하여 FNS 잔골재 콘크리트의 적용이 가능할 것으로 판단된다고 하였다.

박재임(2010) 등은 FNS 중 피재슬래그를 활용한 콘크리트의 시공지침을 개발하기 위해서 피재슬래그를 혼입한 콘크리트의 특성을 평가하였다. 그 결과, 피재슬래그 혼입률이 증가할수록 소요 슬럼프를 얻기 위한 혼화제의 첨가량이 증가되어 피재슬래그 혼입한 콘크리트의 작업성이 다소 저하되는 것으로 나타났으나, 탄성계수는 기준 콘크리트의 90% 이상으로 나타나 잔골재의 대체 재료로 FNS 피재슬래그의 사용 가능성이 기대된다고 하였다.

김우재(2012) 등은 FNS 잔골재 혼입율 및 요구강도에 따른 콘크리트 성능평가를 수행하였다. 실험결과, 일반강도, 고강도, 초고강도 배합 모두 혼입율이 40% 이상일 경우 점성이 증가하며 작업성이 불량해지는 것으로 나타났다. 따라서 입도 및 입형 보정이 필요할 것으로 판단되며, FNS의 흡수율이 낮기 때문에 혼입율이 높아질수록 요구단위 수량이 줄어드는 것으로 판단된다고 하였다.

상기 언급된 선행연구는 FNS를 잔골재 및 시멘트 대용으로 사용하여 모르타르 공시체의 일축압축강도를 측정 한 연구이며, 다음 언급되는 국내 선행연구는 FNS 미분말을 잔골재 및 시멘트 대용으로 사용하여 모르타르 공시체의 일축압축강도를 측정 한 연구이다.

박상순(2016) 등은 FNS 미분말을 혼합한 모르타르의 강도 및 내구성 평가를 수행하였다. W/C는 32%, FNS 미분말을 시멘트 대비 0, 10, 15, 20%로 치환하여 28일 강도를 측정하였다. 실험결과, FNS 미분말 0%의 경우 $320\text{kg}/\text{cm}^2$ 강도, FNS 미분말 20%의 경우 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 강도로 혼합비율(0~20%)이 증가할수록 압축강도 및 휨강도는 다소 감소하는 경향을 나타내었으나, 내산성 및 염화물이온침투저항성능은 향상되는 것으로 나타났다.

박상순(2016)은 FNS 미분말 혼합 페이스트(Paste)의 화학적 저항성 평가를 수행하였다. 내산성과 염소이온침투저항성 평가 결과 FNS 미분말을 사용하였을 경우 OPC에 비해 뛰어난 성능을 나타내어 결합재로서의 활용가능성을 확인하였다.

최현규(2017) 등은 FNS 미분말의 분말도 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성 평가를 수행하였다. FNS 미분말 0%의 경우 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 강도를 나타내었으며, FNS 미분말 40%의 경우 $270\text{kg}/\text{cm}^2$ 강도, FNS 미분말 70%의 경우 $250\text{kg}/\text{cm}^2$ 강도로 나타났다.

FNS를 콘크리트 혼화재료로서 사용하는 것은 압축강도에 대한 기초적 특성만 고려할 때 고로슬래그 미분말과 같은 수화반응은 기대하기 어려울 것으로 확인하였으며, 공극충전의 효과가 있는 것으로 판단된다고 하였다.

국내 선행연구를 정리하면, FNS를 활용하여 잔골재 대체 자원으로 활용하는 연구가 대부분이었으며 FNS의 잔골재를 혼입한 양에 따라 모르타르의 일축압축강도가 증감하는 경향은 연구별로 다른 결과를 나타내었다. 또한 FNS의 미분말의 경우 FNS 미분말이 배합될수록 모르타르의 일축압축강도를 감소하는 경향을 나타내었으나, 화학적 저항성이 상당히 높아짐을 확인할 수 있었다. 그러나 FNS 미분말을 활용한 그라우트 재료로서의 평가 및 FNS의 매립에 대한 환경성 평가에 대한 관심은 부족한 실정이다.

1.2.2 국외 연구동향

FNS의 국외 선행연구 결과는 일본의 경우 1982년 이전에는 FNS의 콘크리트용 잔골재로서의 일반적인 특징들이 연구되었지만 FNS를 활용한 콘크리트의 배합 설계 방법이나 굳지 않은 콘크리트의 특성을 상세하게 논의한 연구는 거의 없고, 콘크리트에 있어서 FNS의 내동해성 및 안정성에 관한 연구도 부족하였다(아키야마 준, 1986).

그러나 최근에는 FNS를 다양한 방법으로 재활용하고 있다. 과거에는 노반재료나 비료 원료로서 대부분 이용되어 왔으며(Wang and Emery, 2004), 다른 비철금속 제련 슬래그와 달리 동을 함유하고 있지 않기 때문에 제철 부 원료로도 이용되었고, 근래에는 콘크리트용 잔골재로서 이용량이 증가하였다(Aba et al., 2010; Sato et al., 2011; Sakoi et al., 2013). FNS를 대상 재활용 자재로 포함하여 콘크리트, 채움재, 노반재용 골재 등의 용도를 제시하는 등 국가적 차원에서 슬래그의 자원화를 도모하고 있다(Masayasu, 1997).

콘크리트용으로 사용되고 있는 FNS 잔골재의 비중은 평균값이 2.78~3.11 범위를 나타내고 있으며, 전체 측정 시료들의 측정결과는 2.73~3.13 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.

Sakoi et al. (2013)는 FNS 골재에 사용되는 콘크리트 성질에 대해 분석하였다. FNS의 미분말 골재는 JIS A 5011-2(일본 산업표준)에서 표준화가 되었고 분석결과, FNS를 혼입한 콘크리트의 일축압축강도는 일반 콘크리트의 경우와 거의 유사한 강도를 나타내었으며 탄성계수는 일반 콘크리트 보다 높은 값을 나타냈다.

Lemonis et al. (2015)는 FNS 미분말을 이용하여 시멘트의 수화반응과 모르타르의 일축압축강도 시험을 수행하였다. FNS 미분말은 $4,000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 비표면적을 갖으며 시멘트 재료의 20%를 대체하여 실험을 수행하였다. W/C는 25%, OPC와 잔골재, FNS 20%의 비율로 배합하였을 때 28일 강도를 측정하였다. 실험결과, $470\text{kg}/\text{cm}^2$ 강도를 나타내었으며 90일까지 점진적으로 강도가 증가하여 $570\text{kg}/\text{cm}^2$ 강도를 나타내었다.

Muhammad et al. (2017)는 FNS 미분말을 이용하여 배합비에 따른 모르타르의 일축압축강도를 측정하였다. W/C는 30%, OPC와 잔골재, FNS 0, 20, 30, 40, 50%를 배합하여 공시체를 제작하였고, 28일 강도를 측정하였다. 실험결과, 0%는 가장 높은 340

kg/cm^2 강도를 나타내었고, 20%는 $280kg/cm^2$ 강도, 30%는 $260kg/cm^2$ 강도, 40%는 $240kg/cm^2$ 강도, 50%는 $230kg/cm^2$ 강도를 나타내었다. 그러나 Lemonis et al. (2015)와는 달리 28일 강도와 90일 강도는 크게 차이가 없었으며, FNS가 배합될 경우 모르타르의 일축압축강도가 현저히 감소하는 경향을 확인하였다.

Ashish and Prabir (2017)은 FNS로 잔골재를 대체하여 모르타르 일축압축강도를 비교하였다. W/C는 47%, OPC와 잔골재, FNS 0, 25, 50, 75, 100%의 비율로 배합하였을 때 28일 강도를 측정하였다. 실험결과, FNS 0%에서 $380kg/cm^2$ 강도, 25%에서 $480kg/cm^2$ 강도, 50%에서 $570kg/cm^2$ 강도, 75%에서 $530kg/cm^2$ 강도, 100%에서 $440kg/cm^2$ 강도를 나타내었다. 이는 Muhammad et al. (2017)과는 달리 FNS 미분말이 배합될수록 모르타르의 일축압축강도가 증가하다가 50% 이상에서 강도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

이처럼 국내 연구 뿐 아니라 국외 선행연구에서도 FNS의 미분말에 대한 관심은 적은 실정이며, 골재로서의 대체자원 쪽에 초점이 맞춰져 있기 때문에 FNS의 미분말 사용, 시멘트 대체자원으로서의 그라우트재로 활용, 용출에 대한 문제 등을 분석하여 FNS를 더욱 활용할 수 있는 방법을 검토한다면 자원 활용적 측면과 환경적 측면에서도 중요할 것으로 판단된다.

1.3 연구 내용

본 연구에서는 FNS의 미분말이 시멘트 대체 자원으로 그라우트 재료에 미치는 영향을 평가하기 위해 FNS의 미분말 혼입율을 변수로 하여 그라우트 재료의 역학적 특성을 평가하였다. 또한 그라우트재는 지반에 주입하여 사용하기 때문에 FNS가 그라우트재로 개발이 된다면 매립되는 지반에 대하여 환경성 평가를 수행해야 할 필요성이 있다고 판단되었다. 따라서 FNS가 매립되는 지반에서의 주변 토양, 용출에 대한 영향인자를 파악하기 위해 FNS에 대한 실내 물성실험 및 역학적 실험을 수행하였고, 소형, 대형 모형토조를 제작하여 FNS가 주변 토양에 미치는 환경적 영향을 분석하였으며, 어독성 실험을 통해 용탈정도에 따른 수질오염을 분석하여 환경성 평가를 수행하였다.

본 논문을 위해 수행된 연구과정은 다음과 같다.

- (1) FNS의 실내 물성실험 및 역학적 실험을 수행하여 FNS의 물리적 특성을 분석하였으며, SEM, EDX, XRD 등 화학적 분석을 수행하여 FNS의 주성분을 확인하였다.
- (2) FNS 미분말을 사용한 그라우트재를 평가하기 위해 규산소다 3호 : 물(30 : 70, 40 : 60, 50 : 50)의 배합비와 시멘트 : FNS의 미분말의 비율(100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40)로 호모겔(Homogel) 공시체를 성형하여 시간경과에 따른 3, 7, 21, 28일 일축압축강도와 각각의 배합비에 따른 겔타임(Gel-time)을 분석하여 그라우트재의 배합비를 찾고자 하였다.
- (3) 모래시료에 규산소다 3호와 물의 비율은 고정하고, 시멘트 : FNS 미분말 비율(100 : 0, 80 : 20, 60 : 40)을 변경하여 FNS 미분말의 차수효과를 확인하고자 투수실험을 수행하였다.
- (4) FNS가 그라우트재로 사용될 경우 매립되는 지반에서의 주변 토양에 미치는 영향인자를 분석하기 위해 실내 및 소형, 대형 모형토조를 제작하여 FNS의 용출수 및 주변 토양에 미치는 토양환경영향을 평가하였고, 어독성실험을 통해 FNS의 용탈정도에 따른 수질오염 특성을 분석하였다.

제 2 장 FNS의 공학적 특성 평가

2.1 FNS의 일반적 특성

2.1.1 화학성분

FNS 제조 시 사용하는 원광석은 주로 니켈이 함유된 감람암 및 감람암 풍화물로 구성되며, 원광석에 포함된 MgO 의 양은 14.7~36.5%로 높은 값을 나타내고 있다.

표 2.1은 니켈 원광석에 관한 화학성분 표이다.

표 2.1 니켈 원광석 화학 성분(이상홍, 2013)

제조 방법	추정치	화 학 성 분(%)				
		Ni	FeO	SiO_2	MgO	CaO
로터리 킬른 (Rotrary kiln) 수쇄	평균치	2.34	15.8	43.7	22.7	0.29
	최대~최소	2.47~2.21	25.4~11.2	47.4~32.0	27.3~19.3	0.74~0.06
전기로 (Electric furnace) 서냉·풍쇄	평균치	2.39	17.4	37.9	25.6	0.6
	최대~최소	2.59~2.07	35.4~9.0	48.5~24.4	36.5~14.7	0.19~0.02
전기로 (Electric furnace) 수쇄	평균치	2.37	19.2	37.6	23.8	0.09
	최대~최소	2.57~2.22	27.0~13.1	45.2~32.0	27.6~19.3	0.21~0.04

2.1.2 물리적 특성

니켈제련 시 발생하는 FNS의 주성분은 SiO_2 , MgO , FeO 이며, 유황분이나 염분은 거의 포함하고 있지 않다. 로터리 킬른법에 의해 발생하는 수쇄 슬래그는 제련 시 석회석 첨가로 인하여 약 5%의 CaO 를 함유하고 있다.

FNS의 광물조성은 휘석과 감람석을 주체로 하고 있어 천연의 감람암과 유사하다. 슬래그 SiO_2 , MgO , FeO , CaO 등은 완화휘석(Enstatite), 고토감람석(Forstrite), 투휘석(Diopside) 등의 결정성 광물과 유리상으로 형성되어 있다. 이러한 광물 조성의 비율 및 유리상의 양과 성질은 슬래그의 냉각조건 등에 의해 변화하여 반응성 등 화학적 성질에 영향을 미친다. 다만, 일본에서 생산되는 FNS의 경우는 어떠한 제조방법에 의해서도 팽창을 발생시키는 산화마그네슘이나 산화칼슘은 일체 검출되지 않는다고 보고되고 있다.

일본의 경우 FNS를 다양한 방법으로 재활용하고 있으며, 현재 콘크리트용으로 사용되고 있는 FNS 잔골재의 화학성분 및 물리적 특성을 살펴보면 표 2.2와 표 2.3과 같다. FNS 잔골재의 비중은 2.78~3.11 범위를 나타내고 있으며, 전체 측정 시료들의 결과는 2.73~3.13 범위에 있다. 따라서 천연 잔골재보다 크고, 흡수율은 상대적으로 낮은 특성을 보이고 있다.

표 2.2 FNS의 화학성분(이상홍, 2013)

제조 방법	측정치	화 학 성 분(%)					
		CaO	MgO	S	FeO	Fe	SiO_2
로터리 킬른(Rotrary kiln) 수쇄	평균치	5.18	27.8	0.06	7.57	0.65	55.6
	최대~최소	5.92~4.47	28.9~26.4	0.09~0.04	9.27~5.86	0.86~0.46	0.21~0.14
	표준편차	0.37	0.67	0.04	0.86	0.11	0.02
전기로 (Electric furnace) 서냉·풍쇄	평균치	0.81	33.8	0.05	7.01	0.18	53.8
	최대~최소	1.18~0.52	34.9~32.4	0.07~0.04	7.83~5.74	0.23~0.14	52.8~52.6
	표준편차	0.16	0.58	0.01	0.45	0.02	0.68
전기로 (Electric furnace) 수쇄	평균치	0.28	33.2	0.03	10.4	0.19	51.3
	최대~최소	0.46~0.13	34.3~32.5	0.04~0.02	11.9~8.7	0.29~0.09	52.8~49.9
	표준편차	0.08	0.44	0.004	0.82	0.04	0.86

표 2.3 FNS의 물리적 특성(이상홍, 2013)

제 조 방 법	측 정 치	비 중	흡수율(%)
로터리 킬른(Rotrary kiln) 수쇄	평균치	3.11	0.35
	최대~최소	3.13~3.10	0.39~0.29
	표준편차	0.01	0.03
전기로(Electric furnace) 풍쇄	평균치	2.88	0.83
	최대~최소	2.91~2.84	1.19~0.76
	표준편차	0.02	0.08
전기로(Electric furnace) 서냉	평균치	2.95	1.67
	최대~최소	3.01~2.91	1.87~1.02
	표준편차	0.06	0.32
전기로(Electric furnace) 수쇄	평균치	2.96	0.82
	최대~최소	2.99~2.92	1.02~0.65
	표준편차	0.02	0.09

2.2 FNS의 기본 물성 평가

FNS의 기본적인 물성을 평가하기 위하여 표 2.4와 같은 항목을 실험하였다.

표 2.4 실내실험 항목별 실험규격

구 분		한국 산업 규격 (KOREA INDUSTRIAL STANDARD)
물 성 시 험	입 도 분 석	KS F 2302
	비 중 실 험	KS F 2309
	액·소성 한계	KS F 2303, KS F 2304
	상 대 밀 도	KS F 2345
	다 짐 실 험	KS F 2312

2.2.1 입도분석실험

흙은 여러 가지 모양과 크기를 가진 흙 입자들로 구성되어 있다. 체분석의 목적은 이들 입자간의 입도분포를 크기와 집단으로 분류하고, 건조중량에 의해서 각 입자크기의 상대적인 비율을 결정하는데 그 목적이 있다. 또한 입도분포곡선에서 누가 통과량을 구하여 입도분포의 좋고 나쁨을 판단하고, 자갈, 모래, 실트, 점토 등의 구성 비율을 결정하는데 그 목적이 있다.

입도실험의 결과는 표 2.5와 그림 2.1과 같다. 체분석을 실험한 결과 9.5mm체의 평균 통과율이 100%이므로 FNS의 최대 입경은 9.5mm로 확인할 수 있었다. # 200(0.075mm)체 통과량은 0.02%로 실트질이 거의 함유되지 않은 재료로 판단되었고, 균등계수 Cu의 분석결과 3.04로 나타났으며, 곡률계수 Cg는 1.21로 입자크기가 비교적 균등한 것으로 분석되었다. 따라서 통일분류법(Unified Soil Classification System(이하, USCS))로 분석한 결과 # 4(4.75mm)의 통과된 조립분이 50%이상이고 $Cu < 6$ 그리고(또는) $1 > Cg > 3$ 이므로 SP로 분류 되었다(제7판 토질역학, 2012). 또한 FNS의 상태, 적재위치에 따라 SM으로도 분류될 수 있다. 따라서 FNS는 다양한 크기로 분포되어 있으며, SP~SM 시료로 확인되었다.

표 2.5 FNS의 입도 실험 결과표

Sieve(mm)	잔류 흙무게(g)	잔류율(%)	가적잔류율(%)	가적통과율(%)
No.4 (4.75)	304.00	30.41	30.41	69.59
No.10 (2.00)	459.90	46.01	76.42	23.58
No.20 (0.84)	190.20	19.03	95.45	4.55
No.40 (0.42)	39.20	3.92	99.37	0.63
No.60 (0.25)	5.20	0.52	99.89	0.11
No.100 (0.149)	0.60	0.06	99.95	0.05
No.200 (0.075)	0.30	0.03	99.98	0.02
pan	0.20	0.02	100.00	0.00

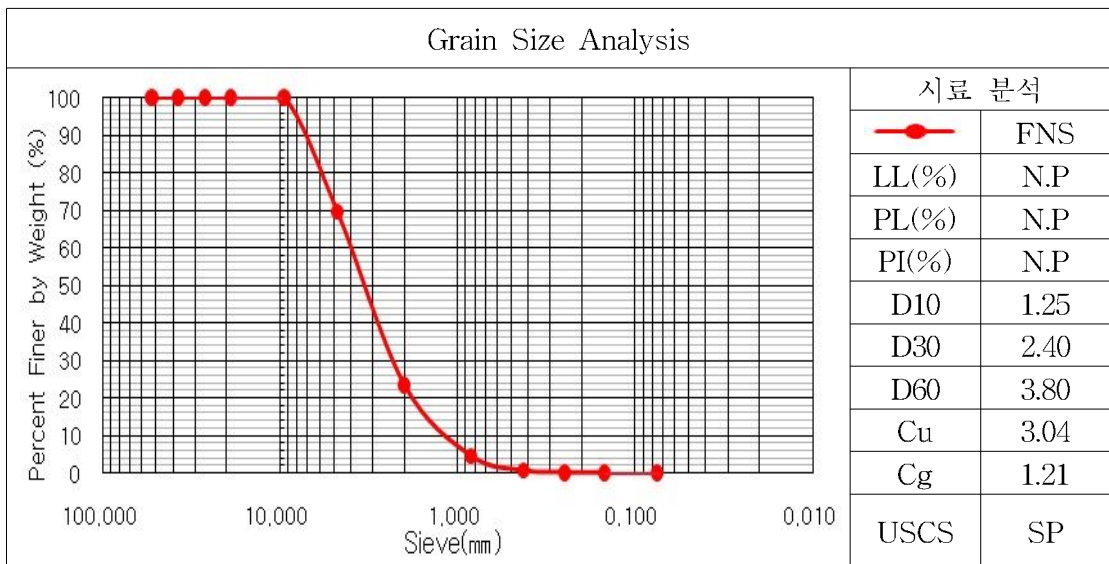


그림 2.1 FNS 입도분석

2.2.2 비중실험

흙 입자의 비중은 지반의 구조골격을 이루며, 그 크기와 구성광물이 다양한 흙 입자의 평균 비중을 말한다. 이러한 흙 입자의 비중은 흙의 기본적인 성질인 간극비와 포화도를 결정하는데 필요할 뿐만 아니라, 흙의 광물이나 견고한 정도를 판정하는데 이용된다. 또한 간극비, 포화도와 함께 흙의 습윤 단위중량, 건조단위중량을 구하여 지반

의 침하량이나 토압 등을 결정하기 위한 토질정수로서 사용된다.

실험방법은 KS F 2309 흙의 비중실험 방법에 의하여 실시하였으며, 100ml의 비중병을 사용하였다. 비중실험을 수행한 결과, FNS의 경우 2.93과 2.98의 비중을 가지고 있으며, 이를 평균하여 2.96의 비중을 갖고 있는 것으로 확인하였다. 이는 잔골재의 비중 2.55~2.60 보다 높은 수치를 내는 것이며, 모래 시료의 경우 비중은 2.68과 2.63으로 평균한 결과 2.66으로 FNS의 비중이 높은 것으로 확인하였다.

2.2.3 액·소성 한계실험

Atterberg Limit는 세립토의 판별 분류 및 공학적 성질을 판단하는 데에 이용된다. 액성한계는 흙이 소성 상태에서 액성 상태로 바뀔 때의 함수비이며, 소성한계는 흙이 소성상태에서 반고체 상태로 바뀔 때의 함수비이다. 액체 상태는 자중에 의하여 변형이 일어나는 상태이고, 소성상태는 외력에 의하여 소성변형이 일어나며 함수비 변화에 따라 부피가 변하는 상태이다. 반고체 상태는 함수비의 변화에 따라 약간의 부피 변화가 있지만 소성이 없고 취성에 가까운 파괴가 일어나는 상태이다.

소성지수는 액성한계에서 소성한계를 뺀 함수비로 재료가 소성상태로 머무를 수 있는 함수비의 범위이다. 연약지반과 같이 소성지수가 큰 재료는 외력에 의한 소성변형이 크고 함수비의 변화에 따른 체적 감소가 많으므로 충분한 압밀을 일으켜 재료를 안정화 시켜야 한다.

실험방법은 KS F 2303 흙의 액성한계, 소성한계로 액·소성의 한계를 측정하고 그 차이 값으로 소성지수를 계산하였다. FNS는 # 40(0.425mm)체를 통과한 시료에 대한 실험으로 전체 시료의 약 0.63%에 해당되며, 소성이 거의 없는 비소성 재료로서 그 결과값을 Non Plastic(이하 N.P)로 표현하였다. 모래 시료 또한 # 40(0.425mm)체를 통과한 시료는 전체 시료의 약 23%에 해당되며, FNS 보다는 높게 나타났으나, 소성이 거의 없는 비소성 재료로서 그 결과값을 N.P로 표현하였다.

2.2.4 상대밀도실험

흙의 단위체적중량은 흙의 단위체적당 중량을 말하며, 흙 입자만을 고려할 경우 건조 단위 체적중량이라고 말한다. 상대밀도는 지반의 현재상태가 어느 정도 조밀한가를 나타내는 척도로서, 가장 조밀한 상태를 100, 가장 느슨한 상태를 0으로 하여 나타낸 값이다. 밀도의 측정은 코어절삭법, 고무막법, 모래치환법, 방사선 동위원소법 등의 방법을 이용하는데 KS F 2345인 상대밀도 방법을 이용하여 최대간극비(e_{max})와 최소간극비(e_{min})을 구하였으며, 최대, 최소 건조단위중량을 측정하였다.

FNS의 경우 γ_{dmax} 는 1.852g/cm^3 과 γ_{dmin} 은 1.547g/cm^3 으로 나타났으며, e_{max} 는 0.913과 e_{min} 은 0.598로 분석되었다. 일반 모래시료의 경우 γ_{dmax} 는 1.710g/cm^3 과 γ_{dmin} 은 1.307g/cm^3 으로 나타났으며, e_{max} 는 1.035와 e_{min} 은 0.556으로 분석되었다.

2.2.5 다짐실험

흙의 다짐이란 함수비를 크게 변화시키지 않고 간극내의 공기를 배출시켜 입자간의 결합을 치밀하게 함으로써 단위중량을 증가시키는 과정이며, 다짐실험은 흙을 어느 일정한 방법으로 다져 함수비와 건조밀도와의 관계를 알아내고 다짐곡선, 최적함수비 및 최대건조밀도를 결정하기 위해서 실시한다. 다짐실험시 다짐곡선은 일반적으로 볼록한 형태가 되며, 이의 극대값을 최대건조밀도, 이에 대응하는 함수비를 최적함수비라 한다.

실험방법은 KS F 2312로 초기 0의 함수비에서 4번의 함수비 변경을 통해 FNS의 최대건조밀도와 최적함수비(Optimum Moisture Content)를 구하고자 하였다. 다만, 시료 자체의 # 200 통과량이 작기 때문에 점성이 없어 시료의 성형과 다짐에 상당한 어려움이 있었다.

상대밀도에서 나타난 γ_{dmax} 와 다짐실험을 통해 나타난 γ_{dmax} 를 비교해 보면, FNS의 경우 γ_{dmax} 는 1.893g/cm^3 의 값을 나타냈으며, 상대밀도로 구한 γ_{dmax} 1.852g/cm^3 과 유사한 경향을 확인하였다. FNS의 최적함수비는 5.52%로 나타났다. 모래 시료의 경우 γ_{dmax} 는 1.782g/cm^3 의 값을 나타냈으며, 상대밀도로 구한 γ_{dmax} 의 1.710g/cm^3 과 유사한 경향을 확인하였다. 모래 시료의 최적함수비는 11.50%로 나타났다.

2.2.6 FNS 물성실험의 종합결론

표 2.6과 같이 FNS의 경우 USCS 분류법에 의해 SP(Poorly Graded) 시료로 분류되었으며 모래의 시료는 SW(Well Graded)시료로 분류 되어 모래 시료에 비해 입도가 불량한 것으로 나타났다. FNS의 비중은 2.96의 비중을 갖으며 모래 시료의 경우 2.66으로 FNS의 비중이 높은 것으로 나타났다.

Atterberg Limit는 FNS와 모래 시료 모두 N.P(Non Plastic)로 나타났으며, 상대밀도 실험 결과, FNS의 경우 γ_{dmax} 는 1.852g/cm³을 모래의 경우 1.710g/cm³의 값을 나타내어 다짐실험 결과와 유사한 경향이 나타났음을 확인하였다.

표 2.6 FNS와 일반 모래의 물성 비교

실험종목	단위	실험결과		실험방법
		FNS	모래	
USCS 분류	-	SP	SW	KS F 2302
비중	-	2.96	2.66	KS F 2309
Atterberg Limit	-	N.P	N.P	KS F 2303, 2304
γ_{dmax}	g/cm ³	1.852	1.710	KS F 2345
γ_{dmin}	g/cm ³	1.547	1.307	KS F 2345
다짐에 의한 γ_{dmax}	g/cm ³	1.893	1.782	KS F 2312
O.M.C	%	5.52	11.50	KS F 2312

2.3 FNS의 역학적 특성 평가

2.3.1 직접전단실험

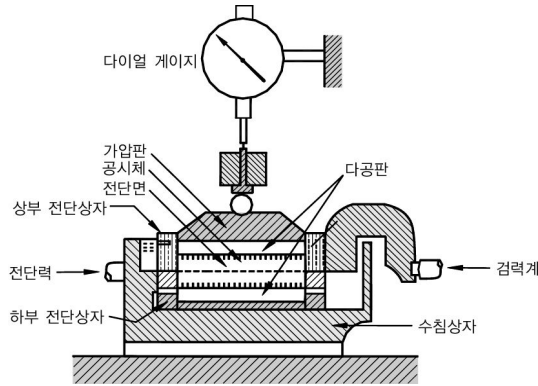
직접전단 실험은 상하로 분리된 전단상자 속에 시료를 넣고 수직하중을 가한 상태로 수평력을 가하여 전단상자 상하단부의 분리면을 따라 강제로 파괴를 일으켜서 지반의 강도정수를 결정할 수 있는 방법이다. 동일한 시료에 대해 공시체 3~4개의 수직하중만 달리 적용하여 측정된 전단저항력으로 수직응력과 전단응력 관계를 선형으로 해석한다.

FNS의 지반공학적 특성을 평가하기 위하여 대형 및 소형 직접전단실험을 실시하였다. 상기 물성 평가에서 언급된 e_{max} 와 e_{min} 을 구한 후 상대밀도 60%로 물드를 재성형하여 실험을 실시하였다. 직접전단실험은 KS F 2343 조건으로 흙의 직접전단실험을 수행하였다.

내부마찰각이 클수록 지반공학적으로 우수한 재료이며, 일반적인 비점성토 재료는 상대밀도가 증가함에 따라 내부마찰각은 증가하고 점착력은 작아지는 경향을 보인다.

(1) 소형 직접전단 실험방법

- ① 전단상자 속에 시료를 넣고 연직 하중을 가한 다음 흙이 전단상자의 갈라진 수평면을 따라 전단 되도록 함
- ② 가해진 연직하중 P 는 시료 단면적 A 로 나누어 연직응력 σ 를 구함
- ③ 전단력 S 는 단면적 A 로 나누어 전단응력 τ 를 구함
- ④ 수직응력을 3, 4회 바꾸어 각 연직응력에 대한 최대전단응력의 값을 구하고, 이 점들을 이용하여 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 작도하여 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)을 구함



(a) 실험 모식도



(b) 실험장비 전경

그림 2.2 소형 직접전단실험기의 실험모식도 및 전경

(2) 대형 직접전단 실험방법

- ① 시료를 교란되지 않게 성형하고, 성형링에 넣은 무게, 함수량을 측정
- ② 공시체를 전단상자위에 밀어 넣고, 재하판을 놓고 재하장치에 장치
- ③ 압밀실험여부에 따라 수직변위 측정용 다이얼게이지를 장치하고, 적절한 수직하중을 가함
- ④ 상하 전단상자의 간격을 0.2~0.5mm정도로 조정하고, 수평 변위용 다이얼 게이지를 장치하여 수직 및 전단 하중 증가할 경우 수직, 수평에 대한 변위를 측정하고자 함
- ⑤ 상하 전단상자 고정편을 뽑고 전단력을 가함



그림 2.3 대형 직접전단실험기

FNS의 지반역학적 특성 평가를 위한 직접전단실험 결과는 표 2.7과 같다. 내부마찰각은 약간 조밀한 상태인 60%로 소형 직접전단 실험에서는 38.66°, 대형 직접전단 실험에서는 36.69°로 나타났다. 점착력은 소형 직접전단 실험에서 40.0kPa와 대형 직접전단 실험에서는 59.5kPa로 분석되었다.

토공재료의 개략적인 토질정수를 살펴보면 비점성토의 점착력은 0으로 보고 있으며, 내부마찰각은 밀실하고 입도가 좋은 모래의 경우 35°, 밀실하지 않거나 입도가 나쁜 모래의 경우 30°로 가정한다. FNS의 내부마찰각은 일반적인 모래의 내부마찰각 보다 대략 5~10° 상회하는 것으로 분석되었다.

표 2.7 FNS의 직접전단실험 결과

시 료	상대밀도	내부마찰각(°)	점착력(kPa)
FNS(소형)	60%	38.66	40.0
FNS(대형)		36.69	59.5
SW(소형)		35.94	29.7

2.3.2 투수실험

흙의 투수성은 흙댐, 하천제방, 간척지 및 기초지반에서의 침투량을 구하고 지하수위 아래에 설치한 구조물에 미치는 양압력을 파악하여, 제체나 배수공 등을 설계 및 시공하기 위해 필요하다. 흙의 투수계수를 구하는 방법 중 본 연구에서는 사질토에 해당하는 투수실험을 수행하였다.

투수실험도 직접전단실험과 같이 상대밀도를 60%로 고정하여 투수계수를 분석하였다. 투수실험은 투수계수가 비교적 큰 비점성토 재료에 적합하며, 일정한 수위차에서 지름과 길이가 일정한 시료 속을 일정한 시간 내에 침투하는 물의 양을 측정하여 결정하는 방법이다.

그림 2.4는 투수실험 전경이다. 투수계수 K 는 유속에 대한 동수경사의 비이고, 속도의 단위를 갖는다. 투수계수는 지반의 구성과 구조골격에 따라 달라지며, 재료의 크기 및 입도분포간극의 배열상태 등에 영향을 받는다. 투수계수의 측정은 약 1분간 메스실린더에 받은 물의 양으로 측정되었다.



그림 2.4 투수실험

상대밀도 60%에서 FNS의 투수계수는 $8.72 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 로 측정되었고, 모래 시료의 투수계수는 $2.72 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 로 측정되어 모래시료에 비해 약 3배 큰 것으로 나타났다. 도로공사 표준시방서에서 제시하는 수평배수재의 기준인 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 보다 약 80배 높은 것으로 나타났다.

수리역학적 특성 평가를 위한 투수실험의 결과는 표 2.8과 같다.

표 2.8 FNS와 모래 시료의 투수계수 비교

FNS			모래		
상대 밀도	통과량 (cm^3)	투수계수 (cm/sec)	상대 밀도	통과량 (cm)	투수계수 (cm/sec)
60%	160	8.72×10^{-2}	60%	50	2.72×10^{-2}

제 3 장 실내실험 및 분석

3.1 그라우트재의 겔타임(Gel-time) 측정

3.1.1 겔타임(Gel-time) 측정을 위한 배합비

시멘트 현탁액형 그라우트재의 급결재로 규산소다 3호와 같은 물유리계를 주로 사용한다. 대표적으로 사용되는 물유리계인 규산소다 3호의 경우 겔화형성이 뚜렷하고, 비교적 저점성으로 침투성도 좋으며, 단가가 매우 저렴하기 때문에 시공면에서 경제성이 우수하다(임춘호, 2017).

본 연구에서는 급결재인 규산소다 3호와 상기 제안하고자 하는 FNS 미분말, 시멘트의 배합비에 따른 겔타임(Gel-time)을 분석하고자 규산소다 3호의 함유량에 따른 겔타임(Gel-time)을 측정하였다.

그라우트재 제조는 A액 속의 규산소다 3호 : 물의 함량을 각각 30 : 70, 40 : 60, 50 : 50로 변화시키고, B액 속의 상기 제안된 FNS 미분말은 시멘트 대비 0%, 10%, 20%, 30%, 40%를 첨가하였다. 겔타임(Gel-time)은 A액, B액을 각각 200ml 종이컵에 제조하여 연속적으로 좌, 우 혼합시켜 종이컵에서 유동성이 정지되는 시간을 3회 측정하여 평균값으로 나타내었다. SS는 규산소다 3호, W는 물, OPC는 시멘트, F는 FNS 미분말이다. 표 3.1은 겔타임(Gel-time) 측정을 위한 그라우트재 배합비이다.

표 3.1 겔타임(Gel-time) 측정을 위한 그라우트재 배합비

A액			B액			
SS(ml)		W(ml)	OPC(g)	F(g)		W(ml)
30%	150	350	130	0%	-	279.5
			117	10%	13	279.5
40%	200	300	104	20%	26	279.5
			91	30%	39	279.5
50%	250	250	78	40%	52	279.5

3.1.2 겔타임(Gel-time) 공시체 제작과정

본 실험에서는 그라우트재 배합비를 중량비로 계산하여 A액과 B액을 각각 200ml 종이컵에 채운 후 혼합하였다. 겔타임(Gel-time)을 측정하기 위해 각각의 종이컵 2개로 배합한 후, 혼합을 시작한 시간부터 종이컵에서 유동성이 없을 때까지 좌, 우로 이동시킨 후 시간을 초단위로 기록하였고, 3회 반복 측정하여 평균으로 나타내었다.

그림 3.1(a)는 겔타임(Gel-time)을 측정하기 위해 배합하여 유동성이 정지 할 때까지 반복적으로 좌, 우로 움직이는 사진이고, 그림 3.1(b)는 유동성이 정지 한 후의 초단위를 기록한 모습이다.



(a) 종이컵에 배합



(b) 종이컵 유동성

그림 3.1 그라우트재의 겔타임(Gel-time) 측정 모습

3.2 그라우트제의 일축압축강도실험

3.2.1 호모겔(Homogel) 일축압축강도를 측정하기 위한 배합비

본 연구에서 측정하고자 하는 호모겔(Homogel) 공시체는 일축압축강도 공시체를 제작하는데 흙 시료를 사용하지 않고, 그라우트제의 순수한 일축압축강도를 측정하여 그라우트재료의 타당성을 확인하기 위한 실험으로, LW공법 시 사용되는 규산소다 3호와 시멘트의 사용량을 10%, 20%, 30%, 40% 절감시킬 수 있는 시멘트 대체 자원 개념으로 FNS 미분말을 시멘트 대신 혼합하여 일축압축강도를 측정하고자 하였다. 공시체의 강도를 평가하기 위해서 지름(D) 5cm × 높이(H) 10cm 원주형 몰드에 성형하여 호모겔(Homogel) 형태의 공시체를 제작하였다. 3시간 후 탈형하여 3일, 7일, 21일, 28일 수중양생하고, 일축압축강도를 나타내었다.

그라우트제의 혼합비율은 표 3.1과 같으며, 급결재인 A액과 경화재인 B액을 부피비 1:1로 혼합 성형하여 준비된 몰드에서 양생되도록 하였다. A액은 규산소다 3호 : 물의 함량 각각 30 : 70, 40 : 60, 50 : 50로 변화시키고, B액은 FNS 미분말을 시멘트 대비 0%, 10%, 20%, 30%, 40%를 첨가하였다. 또한 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 각 배합비마다 3개의 Case를 제작하여 일축압축강도의 평균값을 사용하였다. 일축압축강도는 만능재하시험기를 이용하였으며, 재하속도는 1mm/min 수준으로 일축압축강도를 측정하였다.

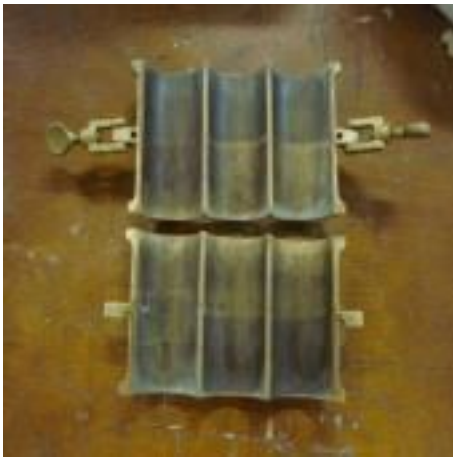
3.2.2 호모겔(Homogel) 공시체 제작

(1) 시험용기

일축압축강도실험을 위한 공시체 크기는 KS F 2331에 의해 지름(D) 7cm와 높이(H) 14cm로 1 : 2의 크기를 추천하고 있으며, 시료의 크기나 직경 대 높이의 비율을 맞추도록 하고 있다. 그러나 실질적으로 사용하는 시료의 크기나 실험에 사용된 용기에 맞추기는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 용기의 크기는 지름(D) 5cm와 높이(H) 10cm의 원형 용기로서 직경 대 높이의 비율이 1 : 2로 제작하였다. 실험 용기는 주철로 제작하였으며, 공시체를 제작 후 용기의 탈거가 용이하도록 1/2로 분리되는 형태로 설계되었다. 탈거 과정에서 공시체의 변형을 최소화하기 위하여 용기 안쪽에 윤활제를 얇게 도포하였다.

실험에 사용할 용기는 그림 3.2와 같다.



(a) 1/2로 분리되는 공시체 몰드



(b) 윤활제 도포

그림 3.2 호모겔(Homogel) 제작에 사용된 일축압축 시험용기

(2) 호모겔(Homogel) 공시체 제작

1/2로 분리되는 공시체 몰드에 윤활제를 도포한 다음 배합비에 따라 그라우트재를 혼합 성형하였다. 준비된 몰드에 그라우트재를 넣고, 3시간 후 공시체를 탈형하여 그림 3.3 (a)와 같이 수중양생을 통해 공시체를 재령하였다.

시간경과에 따른 그라우트재의 일축압축강도의 특성을 분석하고자 3일, 7일, 21일, 28일까지 재령하였으며, 그림 3.3 (b)와 같이 일축압축시험 시 각각의 공시체마다 대각선 방향의 파괴형상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 탈형 후 수중양생 전경



(b) 일축압축시험 파괴 후

그림 3.3 일축압축 공시체 양생과 시험 전경

3.3 배합비에 따른 겔타임(Gel-time) 분석

3.3.1 규산소다 3호에 따른 겔타임(Gel-time) 분석

(1) SS : W(50 : 50) 겔타임(Gel-time) 분석

SS : W의 배합비가 50 : 50일 경우 시멘트 : FNS 미분말(100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40) 비율에 따라 겔타임(Gel-time)을 분석하였다. 겔타임(Gel-time) 분석을 수행하기 위해서 3회 이상의 겔타임(Gel-time)을 측정하여 평균값을 나타내었다.

그림 3.4에서 시멘트는 “C”로 표기하였으며, FNS 미분말은 “F”로 표기하였다.

C : F가 100 : 0에서 3회 측정 평균 112.3초로 가장 겔타임(Gel-time) 속도가 가장 빨랐으며, C : F가 90 : 10에서는 평균 147.3초, C : F가 80 : 20에서는 평균 165.3초, C : F가 70 : 30에서는 평균 187.3초, C : F가 60 : 40에서는 평균 231.7초로 FNS 미분말의 양이 증가할수록 겔타임(Gel-time) 속도는 약 1.3배~2배 증가하는 경향이 나타났다.

일반적으로 시멘트는 Alite($3CaO \cdot SiO_2; C_3S$), Belite($2CaO \cdot SiO_2; C_2S$), Filite($4CaO \cdot Al_2O_3; C_3A$)의 3가지 주요 조성물로 이루어지는데, 특히 시멘트 강도의 대부분을 차지하는 것은 C_3S 및 C_2S 이다. 이러한 조성물은 시멘트의 주원료가 되는 석회(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 혼합비에 따라 시멘트의 성질들이 변화하게 된다(이강호, 2013).

따라서 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 겔타임(Gel-time)이 증가하는 경향이 나타났으며, FNS는 고로슬래그나 시멘트와 같이 자체적인 수화반응과 포졸란 반응은 발생하지 않는 것으로 확인하였다.

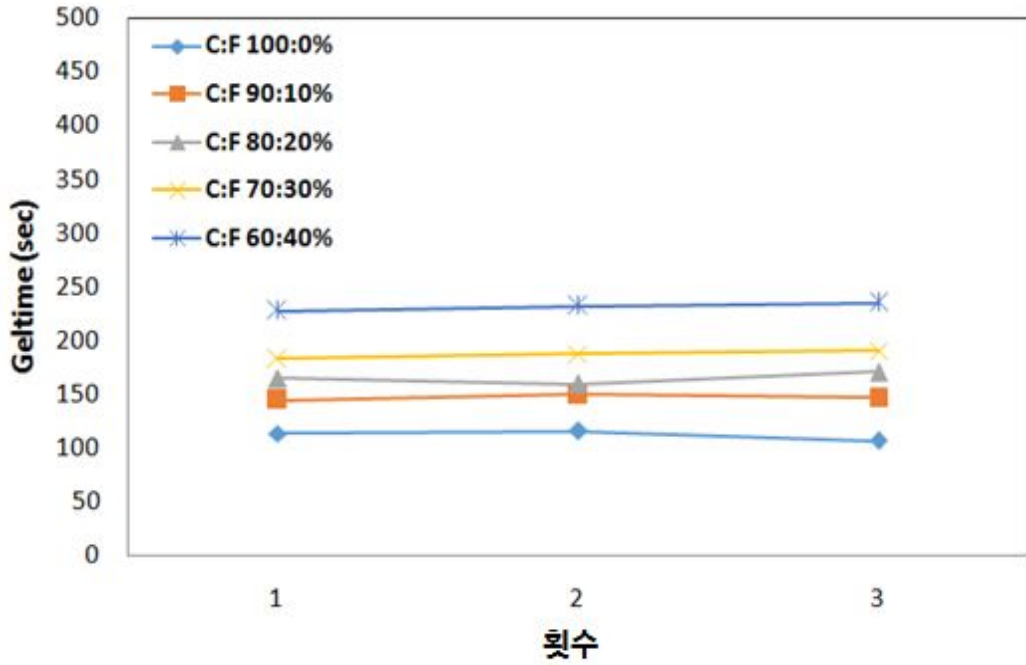


그림 3.4 SS : W(50 : 50)에 따른 겔타임(Gel-time) 실험결과

(2) SS : W(40 : 60) 겔타임(Gel-time) 분석

그림 3.5와 같이 C : F가 100 : 0에서는 3회 측정 평균 143초로 겔타임(Gel-time) 속도가 가장 빨랐으며, C : F가 90 : 10에서는 평균 174.3초, C : F가 80 : 20에서는 평균 188.3초, C : F가 70 : 30에서는 평균 222.0초, C : F가 60 : 40에서는 평균 266.0초로 FNS 미분말의 양이 증가할수록 겔타임(Gel-time) 속도는 약 1.2배~1.8배 증가하는 경향이 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 시멘트의 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 겔타임(Gel-time)이 증가하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

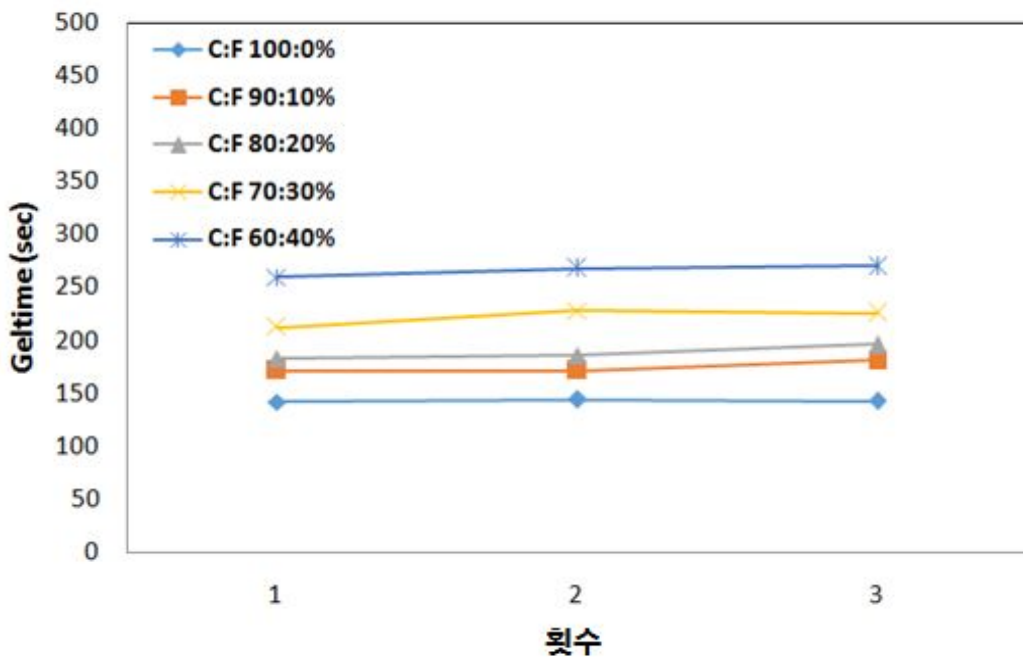


그림 3.5 SS : W(40 : 60)에 따른 겔타임(Gel-time) 실험결과

(3) SS : W(30 : 70) 젤타임(Gel-time) 분석

그림 3.6과 같이 C : F가 100 : 0에서는 3회 측정 평균 166.7초로 젤타임(Gel-time) 속도가 가장 빨랐으며, C : F가 90 : 10에서는 평균 176.7초, C : F가 80 : 20에서는 평균 217.3초, C : F가 70 : 30에서는 평균 236.7초, C : F가 60 : 40에서는 평균 355.0초로 FNS 미분말의 양이 증가할수록 젤타임(Gel-time) 속도는 약 1.1배~2.1배 증가하는 경향이 나타났다.

SS : W의 배합비(50 : 50, 40 : 60, 30 : 70)를 비교하면 규산소다 3호의 양이 감소할수록 젤타임(Gel-time)의 속도는 상당히 증가하는 경향을 보였으며, LW그라우팅 시 완결재는 300초(5분)대의 젤타임(Gel-time)으로 SS : W의 배합비 30 : 70에서 C : F의 배합비 60 : 40 조건을 제외한 나머지 배합비에서 모두 만족시키는 것으로 나타났으며, FNS 미분말을 사용할 경우 급결재 보다 완결재에 가까운 배합비임을 확인할 수 있었다.

급결재로 사용되어야 할 경우 시멘트 성분에 추가적인 석회(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 혼화재를 적절히 사용하여 급결시간을 감소시켜 사용해야 할 것으로 판단된다.

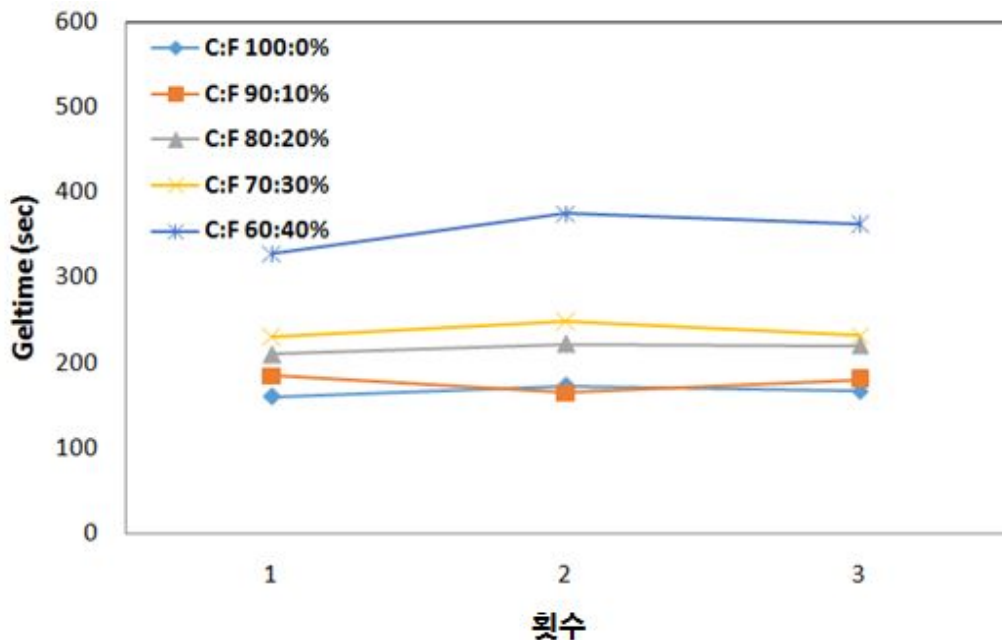


그림 3.6 SS : W(30 : 70)에 따른 젤타임(Gel-time) 실험결과

3.3.2 겔타임(Gel-time) 종합 분석

표 3.2는 겔타임(Gel-time) 종합 분석 결과를 정리하였다.

SS : W의 배합비에 따른 C : F(100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40)의 겔타임(Gel-time) 분석 결과, FNS 미분말 10%, 20%, 30%, 40% 첨가시 겔타임(Gel-time)은 약 1.1배~2배 증가하는 경향을 나타내었으며, 규산소다 3호의 양이 10% 감소할수록 겔타임(Gel-time)은 약 1.2배~1.5배 증가하는 경향을 나타내었다.

일반 LW 그라우팅 공법에서 겔타임(Gel-time)은 명시된 기준은 없으나, 일반적으로 초급결 겔타임(Gel-time)은 6~12초, 급결 겔타임(Gel-time)은 12~50초, 일반 겔타임(Gel-time)은 50~90초, 완결 겔타임(Gel-time)은 90~300초의 겔타임(Gel-time)을 기준으로 하며, 겔타임(Gel-time)의 조절은 시멘트량의 증감, 혼화재 등으로 간단히 조절이 가능하다.

본 연구에서 수행한 실험결과, 시멘트를 줄이고 FNS 미분말을 섞으면 겔타임(Gel-time)은 완결에 가까운 겔타임(Gel-time)을 갖는다. 따라서 FNS 미분말의 첨가는 겔타임(Gel-time)을 지연시킴으로 급결시 보다 완결시에 사용하는 것이 적정할 것으로 나타났으며, 급결시로 사용하고자 할 때에는 혼화재인 석회(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 양을 증가시켜 목표 겔타임(Gel-time)을 확보해야 할 것으로 판단된다.

표 3.2 겔타임(Gel-time) 종합 분석 결과

SS : W(%)	C : B(%)	겔타임(Gel-time)(초)			
		1회	2회	3회	평균
50 : 50	100 : 0	114	116	107	112.3
	90 : 10	145	150	147	147.3
	80 : 20	165	160	171	165.3
	70 : 30	183	188	191	187.3
	60 : 40	228	232	235	231.7
40 : 60	100 : 0	142	144	143	143.0
	90 : 10	171	171	181	174.3
	80 : 20	183	186	196	188.3
	70 : 30	212	228	226	222.0
	60 : 40	260	268	270	266.0
30 : 70	100 : 0	160	173	167	166.7
	90 : 10	185	165	180	176.7
	80 : 20	210	222	220	236.7
	70 : 30	230	248	232	236.7
	60 : 40	328	375	362	355.0

3.4 배합비에 따른 일축압축강도 분석

(1) 규산소다 3호의 함유량에 따른 일축압축강도 시험결과

표 3.3과 그림 3.7 같이 C : F(100 : 0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 규산소다 3호가 30%일 때 3일 강도에서는 $1.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%일 때 $2.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 가장 높게 나타났다.

28일 강도에서는 규산소다 3호가 50%일 때 $7.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 30%일 때 $14.9\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 가장 높게 나타났다.

규산소다 3호의 함유량이 증가할수록 3일 강도에서는 겔타임(Gel-time) 시간이 짧아져 조기강도를 발현하기 때문에 호모겔(Homogel) 일축압축강도 값이 증가하였으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량이 많을수록 현저히 강도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 박원춘 등(2004), 이강호(2013), 임춘호(2017)과 유사한 결과를 나타내었는데, 규산소다 3호의 첨가가 다량 함유되면 28일 재령시 시멘트에 미소한 균열을 가져오는 문제가 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 급결의 차수가 요구될 경우에는 규산소다 3호의 함량이 50%가 적합할 것으로 판단되나, 차수의 목적이 아닌 강도증진의 목적이면 조기강도가 높고 장기강도도 유사한 규산소다 3호의 30%가 적합할 것으로 판단된다.

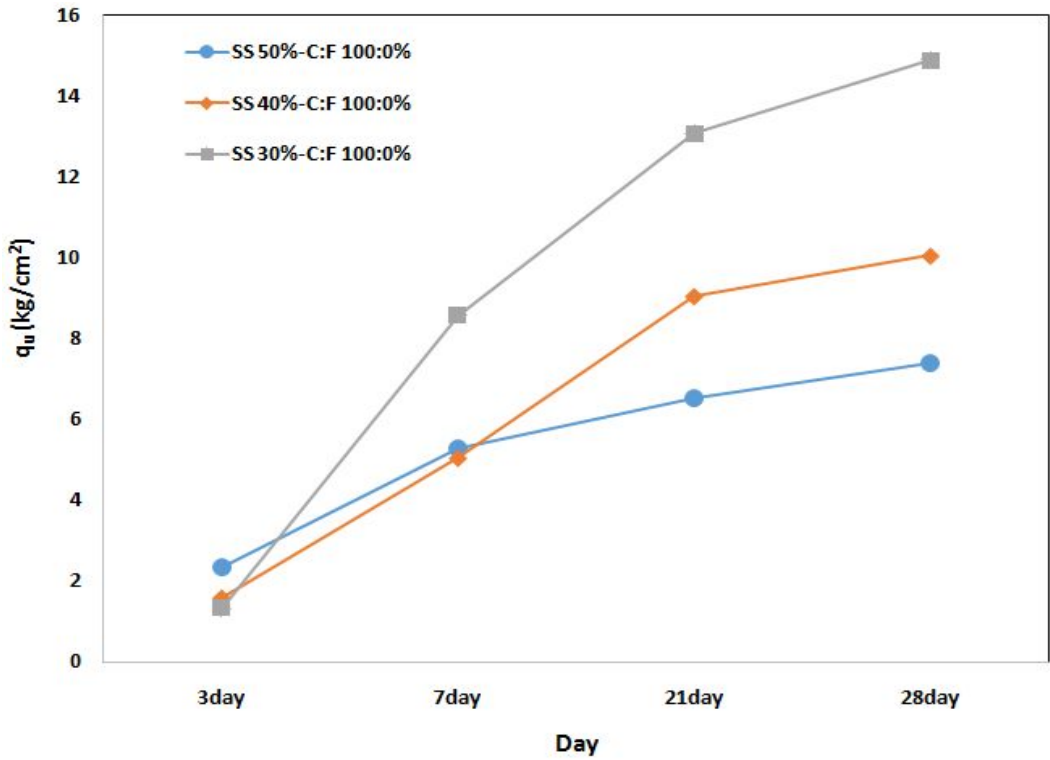


그림 3.7 C : F(100 : 0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

표 3.3 C : F(100 : 0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

재령(day)	일축압축강도(kg/cm^2)		
	SS 50%	SS 40%	SS 30%
3	2.33	1.60	1.32
7	5.28	5.05	8.57
21	6.53	9.05	13.07
28	7.40	10.05	14.88

표 3.4와 그림 3.8 같이 C : F(90 : 10)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 규산소다 3호가 30%일 때 3일 강도에서는 1.12kg/cm^2 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%일 때 1.95kg/cm^2 로 가장 높게 나타났다. 또한 28일 강도에서는 규산소다 3호가 50%일 때 6.16kg/cm^2 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 30%일 때 11.46kg/cm^2 로 가장 높게 나타났다.

그림 3.8과 마찬가지로 3일 강도에서는 규산소다 3호의 영향으로 인해 겔타임(Gel-time)이 빨라 규산소다 3호 50%에서 가장 높은 강도를 나타내었으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호가 미소한 시멘트의 균열을 가져오기 때문에 일축압축강도가 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 급결의 차수가 요구될 경우에는 규산소다 3호의 함량이 50%가 적합할 것으로 판단되나, 차수의 목적이 아닌 강도증진의 목적이면 장기강도가 높은 규산소다 3호의 30%가 적합할 것으로 판단된다.

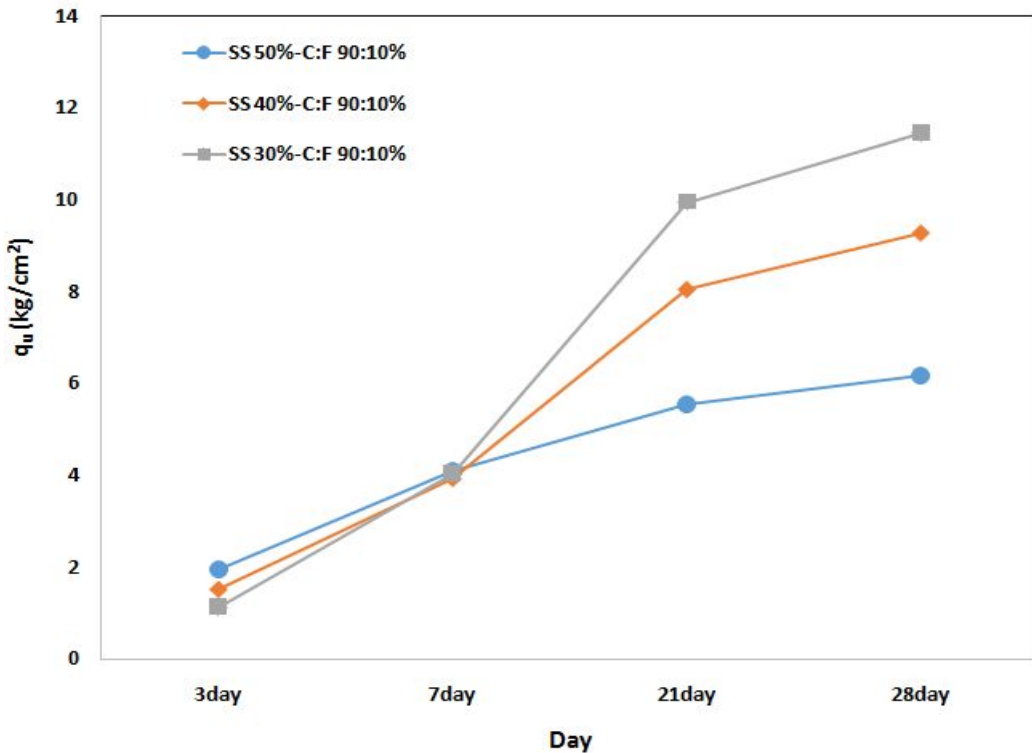


그림 3.8 C : F(90 : 10)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

표 3.4 C : F(90 : 10)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

재령(day)	일축압축강도(kg/cm^2)		
	SS 50%	SS 40%	SS 30%
3	1.95	1.53	1.12
7	4.08	3.94	4.03
21	5.53	8.04	4.52
28	6.16	9.27	11.46

표 3.5와 그림 3.9 같이 C : F(80 : 20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 규산소다 3호가 30%일 때 3일 강도에서는 $0.70kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%일 때 $1.06kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다. 또한 28일 강도에서는 규산소다 3호가 50%일 때 $3.37kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 30%일 때 $5.04kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다.

3일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량에 따라 강도차이는 작게 나타났으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량에 따라 큰 영향을 미치는 것으로 확인하였다.

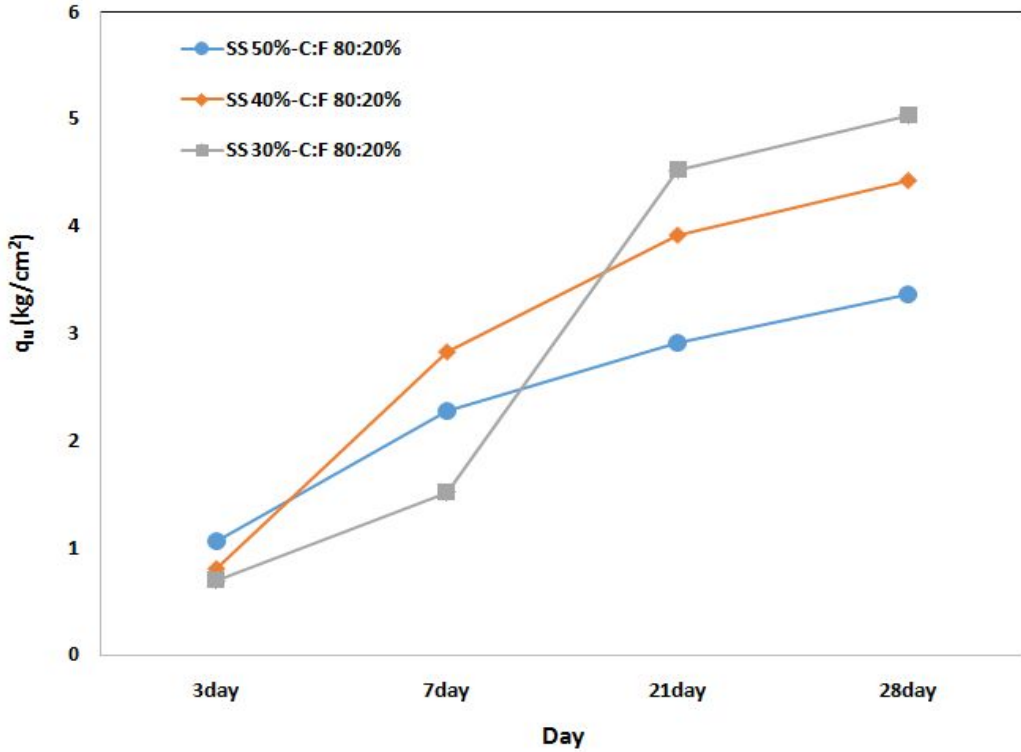


그림 3.9 C : F(80 : 20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

표 3.5 C : F(80 : 20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

재령(day)	일축압축강도(kg/cm^2)		
	SS 50%	SS 40%	SS 30%
3	1.06	0.81	0.70
7	2.28	2.83	1.52
21	2.92	3.92	4.52
28	3.37	4.43	5.04

표 3.6과 그림 3.10 같이 C : F(70 : 30)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 규산소다 3호가 30%일 때 3일 강도에서는 $0.62kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%일 때 $0.84kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다. 또한 28일 강도에서는 규산소다 3호가 50%일 때 $1.80kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 30%일 때 $2.77kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다.

3일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량에 따라 강도차이는 작게 나타났으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량에 따라 큰 영향을 미치는 것으로 확인하였다.

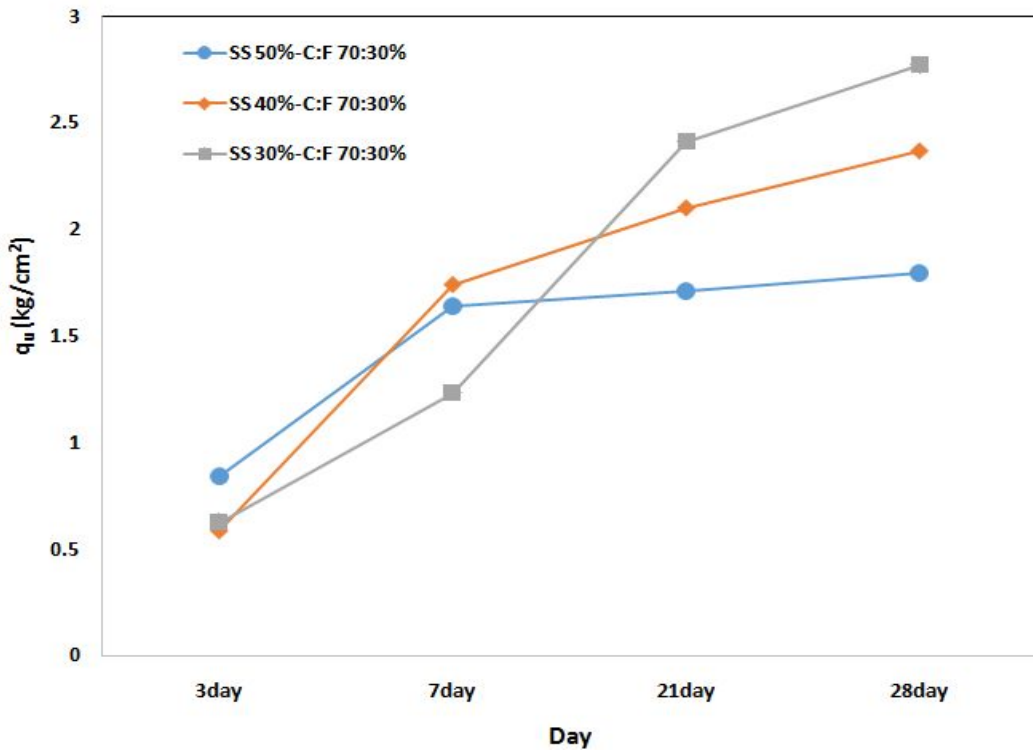


그림 3.10 C : F(70 : 30)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

표 3.6 C : F(70 : 30)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

재령(day)	일축압축강도(kg/cm^2)		
	SS 50%	SS 40%	SS 30%
3	0.84	0.59	0.62
7	1.64	1.74	1.23
21	1.71	2.10	2.41
28	1.80	2.37	2.77

표 3.7과 그림 3.11 같이 C : F(60 : 40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 규산소다 3호가 30%일 때 3일 강도에서는 $0.51kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%일 때 $0.62kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다. 또한 28일 강도에서는 규산소다 3호가 50%일 때 $0.94kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 30%일 때 $1.28kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다.

3일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량에 따라 강도차이는 작게 나타났으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량에 따라 큰 영향을 미치는 것으로 확인하였다.

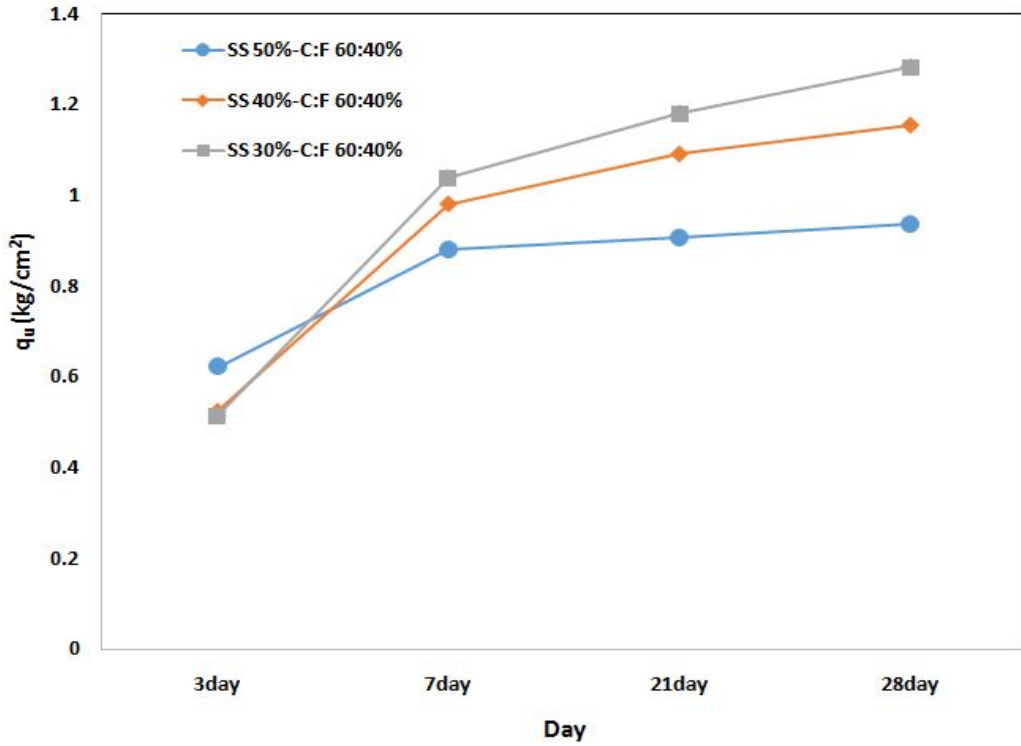


그림 3.11 C : F(60 : 40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

표 3.7 C : F(60 : 40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

재령(day)	일축압축강도(kg/cm^2)		
	SS 50%	SS 40%	SS 30%
3	0.62	0.53	0.51
7	0.88	0.98	1.04
21	0.90	1.09	1.18
28	0.94	1.15	1.28

(2) FNS 미분말 함유량에 따른 일축압축강도 시험결과

그림 3.12와 같이 규산소다 3호가 50%일 때 C : F의 배합비(100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40)에 따른 일축압축강도를 살펴보면 다음과 같다.

C : F가 100 : 0일 때의 28일 강도 대비 C : F가 90 : 10은 약 83%의 강도를 나타내며, C : F가 60 : 40은 약 12.6%의 강도를 나타냈다. 본 결과는 박상순 등 (2016)과 같이 FNS 미분말 10~20% 혼입되었을 경우 시멘트 강도 대비 약 80~90%로 유사한 결과를 나타내었다.

FNS 미분말의 경우 기대했던 것과는 달리 고로슬래그, 시멘트와 같이 물과 혼합되는 과정에서 수화반응 및 포졸란 반응은 나타나지 않았으며, 이에 따른 강도증진도 나타나지 않았다. FNS 미분말은 미소한 알갱이로 이루어져 있기 때문에 차수에 대한 효과는 높을 수 있으나, 강도는 상당히 저하되는 것으로 나타났으며, 강도에 대한 효과를 증진시키려면 추가적인 혼화재나 시멘트의 양을 증가시켜 사용해야 될 것으로 판단된다.

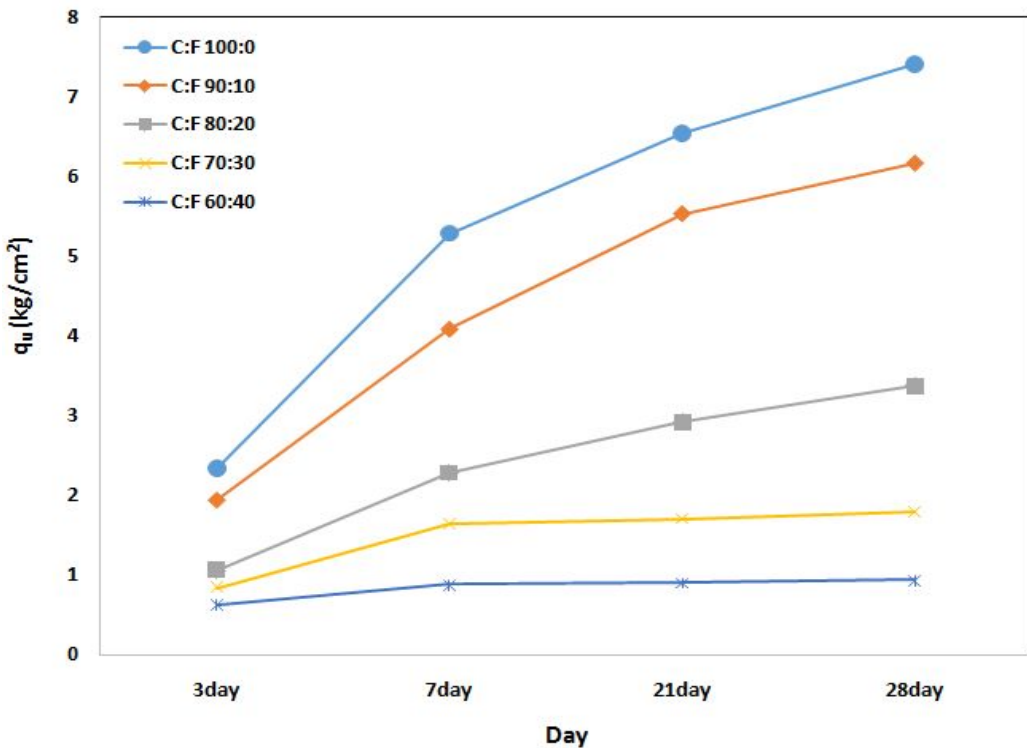


그림 3.12 규산소다 50%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

그림 3.13과 같이 규산소다 3호가 40%일 때 C : F의 배합비(100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40)에 따른 일축압축강도를 살펴보면 다음과 같다.

C : F가 100 : 0일 때의 28일 강도 대비 C : F가 90 : 10은 약 92.3%의 강도를 나타내며, C : F가 60 : 40은 약 11.5%의 강도를 나타냈다. 본 결과는 박상순 등 (2016)과 같이 FNS 미분말 10~20% 혼입되었을 경우 시멘트 강도 대비 약 80~90%로 유사한 결과를 나타내었다.

그림 3.12와 마찬가지로 강도에 대한 효과를 증진시키려면 추가적인 혼화재나 시멘트의 양을 증가시켜 사용해야 될 것으로 판단되나, 현장에서 요구하는 차수 그라우팅의 강도는 일반적으로 0.6kg/cm^2 이상이므로 최적 배합비는 10%에서 상황에 따라서 40%까지 대체자원으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 강도증진을 위한 배합비를 고려한다면 추가적인 혼화재를 사용해야 할 것으로 판단된다.

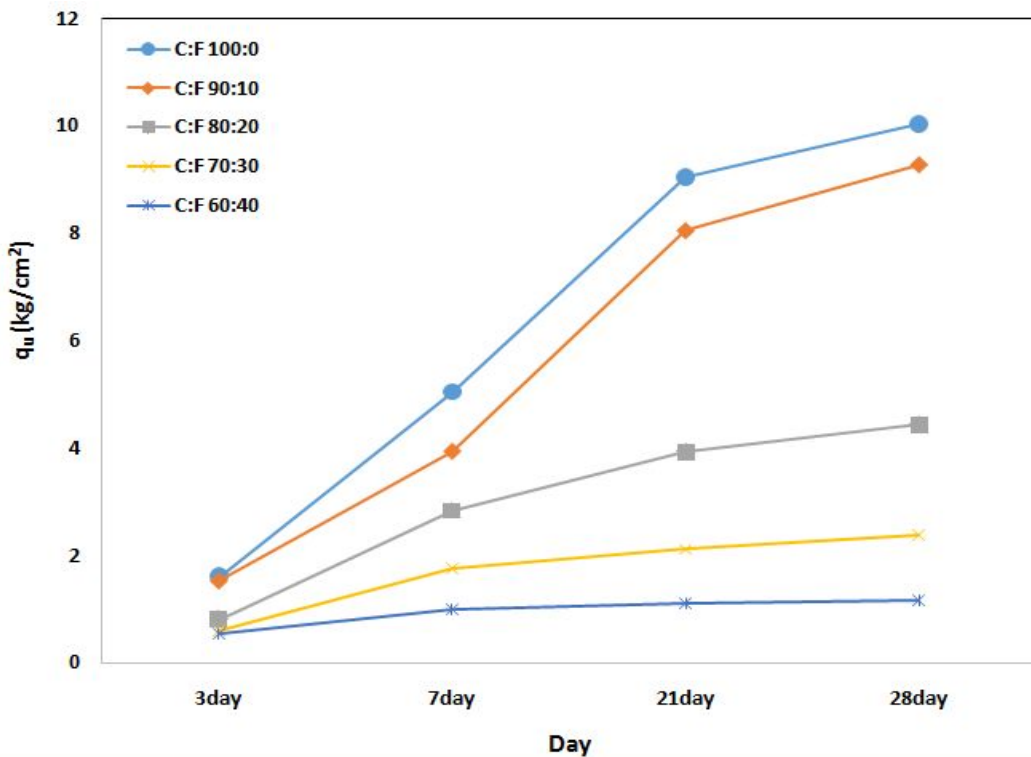


그림 3.13 규산소다 40%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

그림 3.14와 같이 규산소다 3호가 30%일 때 C : F의 배합비(100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40)에 따른 일축압축강도를 살펴보면 다음과 같다. 본 결과는 박상순 등 (2016)과 같이 FNS 미분말 10~20% 혼입되었을 경우 시멘트 강도 대비 약 80~90%로 유사한 결과를 나타내었다.

C : F가 100:0일 때의 28일 강도 대비 C : F가 90 : 10은 약 75%의 강도를 나타내며, C : F가 60 : 40은 약 10%의 강도를 나타냈다. 시멘트 대비 FNS 미분말의 함유량에 따른 일축압축강도 분석결과, 대부분 C : F가 90 : 10일 때 C : F 100 : 0과 강도차이가 작기 때문에 FNS의 미분말을 통해 시멘트의 10%를 대체하여 사용할 수 있을 것으로 확인되었다. 또한 현장에서 요구하는 차수 그라우팅의 강도는 일반적으로 0.6 kg/cm^2 이상이므로 최적 배합비는 10%에서 상황에 따라서 40%까지 대체자원으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 강도증진을 위한 배합비를 고려한다면 추가적인 혼화재를 사용해야 할 것으로 판단된다.

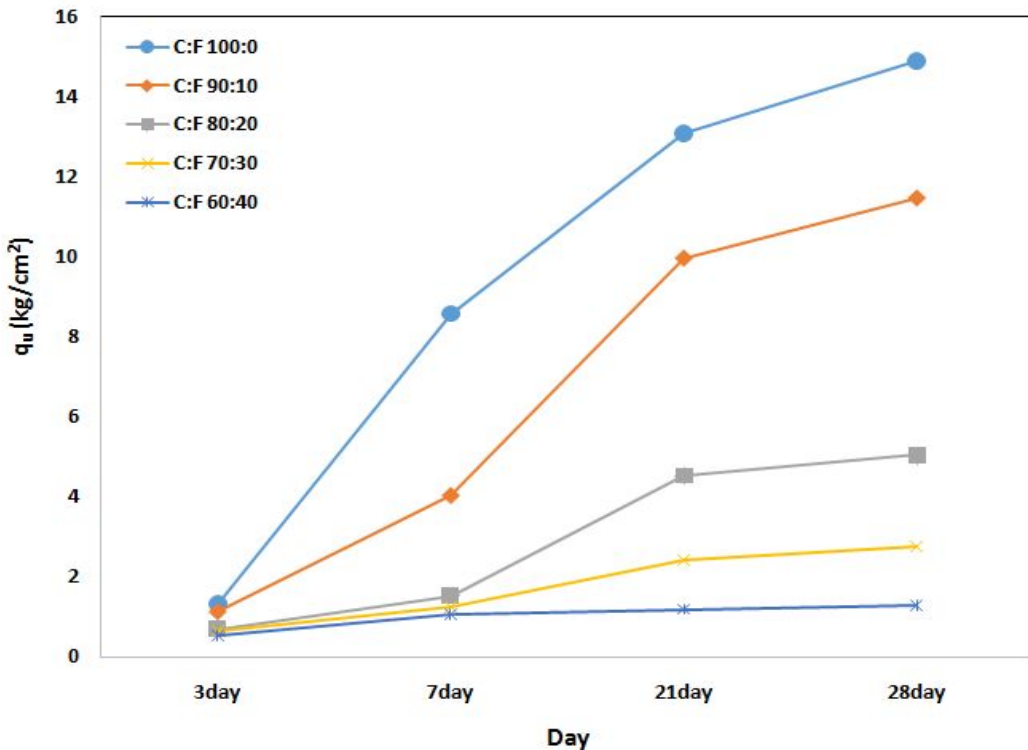


그림 3.14 규산소다 30%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

3.5 그라우트제의 투수실험

3.5.1 투수실험을 위한 배합비

본 연구에서 투수실험을 수행하기 위해 사용된 모래시료는 주문진 표준사이며, 지반에 그라우팅 적용시 투수계수의 변화를 살펴보고자 모래시료에 표 3.8과 같은 배합비로 배합하여 투수실험을 수행하였다.

벤토나이트는 그라우팅 시 보조제로 사용되며, 물에 분산되면 높은 점도를 발현한다. 시멘트와 FNS 미분말은 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40%의 비율로 사용하였으며, 그라우팅 적용이 어렵기 때문에 표준사에 A액과 B액을 Mixing하여 투수장치에 다져넣고 3일 경과 후 투수실험을 수행하였다.

그림 3.15(a)는 투수실험을 수행하기 위해 재료 Mixing 전경이며, 그림 3.15(b)는 투수실험 전경이다.

표 3.8 투수실험을 위한 배합비

A액		B액				표준사(g)
SS(ml)	W(ml)	벤토나이트(g)	OPC(g)	F(g)	W(ml)	
210	90	12	132	0	258	1,100
			105.6	26.4		
			79.2	52.8		



(a) A액 + B액 Mixing



(b) 투수실험

그림 3.15 투수실험 전경

3.5.2 투수실험 결과

표 3.9는 투수실험 결과이다. 투수실험 결과를 살펴보면, C : F가 100:0일 경우 600초 동안 통과한 투수량 Q는 2.84cm^3 으로 투수계수는 $3.81 \times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 이었으며, C : F가 80 : 20일 경우 통과한 투수량 Q는 0.24cm^3 으로 투수계수는 $3.22 \times 10^{-6}\text{cm/sec}$ 이었으며, C : F가 60 : 40일 경우 통과한 투수량 Q는 0.04cm^3 으로 투수계수는 $5.37 \times 10^{-7}\text{cm/sec}$ 로 나타났다.

그림 3.16은 본 연구결과와 기존 개발공법에 대한 차수효과를 비교하였다.

박원춘 등(2004)과 이강호(2010)는 미세립분, 마이크로 시멘트를 이용한 투수실험을 수행하였다. 실험결과, 투수계수는 각각 $5.0 \times 10^{-6}\text{cm/sec}$, $8.0 \times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 로 나타나 C : F가 80 : 20의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 또한 Acrylic Resin Chemical(ARC) 그라우팅 공법의 경우 투수계수는 약 $1.0 \times 10^{-7}\text{cm/sec}$ 가 시방기준이며 현장에서 그라우팅 차수를 평가할 때 특정한 기준은 없으나, 투수계수가 약 $1.0 \times 10^{-6}\text{cm/sec}$ 가 되면 차수가 되었다고 판단한다. 따라서 본 연구에서 사용 그라우트의 경우 C : F가 80 : 20, C : F가 60 : 40일 때 차수그라우트제의 기준을 확보할 수 있다고 판단된다.

FNS의 미분말이 20% 증가할수록 약 10배 이상 투수계수가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 FNS 미분말의 아주 미소한 입자들이 공극사이에 침투하여 차수효과를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 FNS 미분말을 사용하여 그라우팅에 사용할 경우 대체적으로 강도의 효과보다는 차수의 효과에 사용해야 할 것으로 판단되며, 강도의 증진이 필요할 경우 추가적인 혼화재 및 시멘트의 혼합비율을 높여서 적용해야 할 것으로 판단된다.

표 3.9 투수실험 결과

시 료	통과량(cm^3)	수두차 (cm)	시간 (sec)	투수계수(cm/sec)
C : F (100:0)	2.84	17.75	600	3.81×10^{-5}
C : F (80:20)	0.24	17.75	600	3.22×10^{-6}
C : F (60:40)	0.04	17.75	600	5.37×10^{-7}

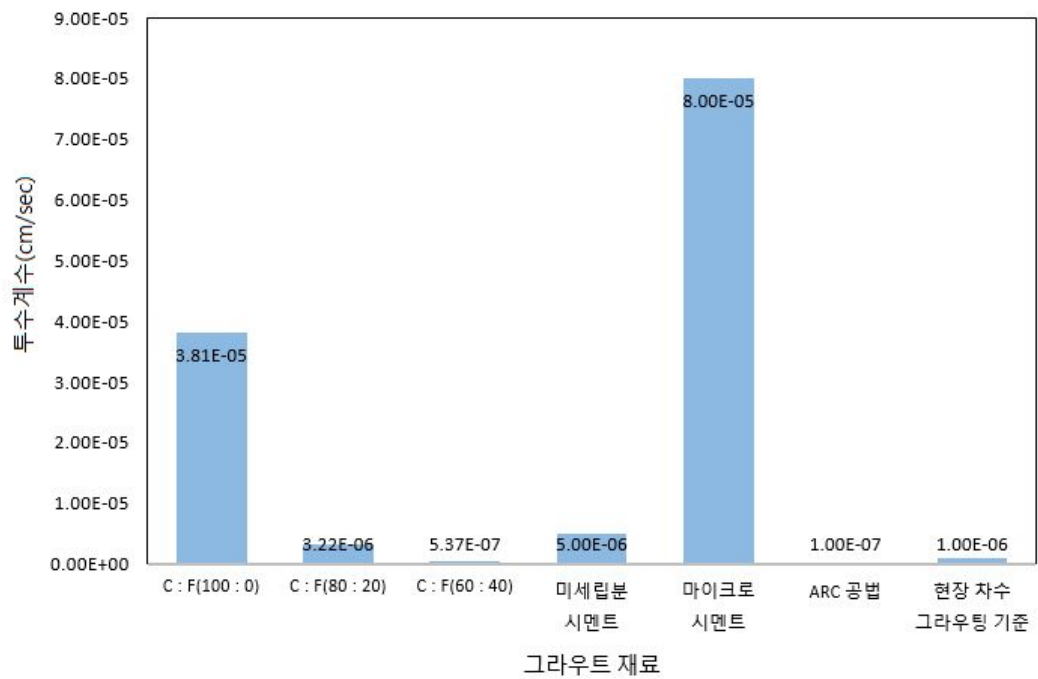


그림 3.16 차수 그라우트 재료에 따른 차수효과 분석

제 4 장 FNS의 환경성 평가

4.1 실내실험을 통한 FNS의 환경성 평가

FNS가 그라우트재로 사용될 경우 지반에 매립재가 되기 때문에 FNS가 주변지반에 미치는 환경성을 모형토조실험을 통해 평가하고자 하였다. 또한 매립재로 적합성을 판정하기 위하여 보다 다양한 방법으로 영향인자를 파악하고, 나아가 토양오염방지법에 의한 성분 분석을 하여 FNS가 지반에 미치는 환경적 유해요인을 확인하고자 하였다.

본 연구에서는 FNS를 소형 토조에 담아 하부에는 모래, 실트를 포설하여 담수, 산성, 해수 등을 흘려보내 시간경과에 따른 배출되는 용출수를 통하여 pH를 분석하고, 하부 시료를 추출하여 토양오염분석을 수행하였다.

대형 토조에는 FNS를 하부에 포설하고 상부에 모래시료, 실트시료를 포설하여 지반에 강우를 흘려보냈을 때에 FNS의 용출수가 주변 토양에 미치는 환경적 영향을 평가하고자 토양오염분석을 수행하였다. 또한 어독성 실험으로 연약지반 처리시 사용되는 포트랜드 시멘트(W/C 1:1) 및 FNS의 용탈실험을 수행하여 pH 비교를 통해 수질오염을 평가하였다.

4.2 강우조건

모형토조에서의 강우조건은 소형 모형토조의 경우 깊이에 따라 시료 60%, FNS 20%를 포설 후 남은 공간 20%를 강우조건을 유지할 수 있는 공간으로 사용하였으며, 투수실험 장치를 이용하여 정수위 조건을 유지시킴으로써 5일 동안 배출되는 배출수를 측정된 결과, 약 10ℓ가 측정되었다. 총 유량 10ℓ를 역산으로 산정한 결과 0.472cm/hr의 강우조건을 확인하였다.

대형 모형토조의 경우 원지반 시료 40cm, FNS 시료 20cm, 복토 20cm를 포설 후 남은 공간 20cm를 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 측정되었다. 총 유량 50ℓ를 역산으로 산정한 결과 0.205cm/hr의 강우조건을 확인하였다.

표 4.1과 같은 방법으로 각각의 강우조건을 확인하였다.

표 4.1 강우조건 선정

구 분	소형 모형토조	대형 모형토조
총 유 량(Q)	10ℓ = 10,000cm ³	50ℓ = 50,000cm ³
단 면 적(A)	$\frac{\pi \times (15\text{cm})^2}{4} = 176.6\text{cm}^2$	45cm × 45cm = 2,025 cm ²
식	$\frac{Q}{5\text{Day} \times 24\text{hr} \times A}$	$\frac{Q}{5\text{Day} \times 24\text{hr} \times A}$
cm/hr	0.472	0.205

4.3 FNS 환경성 평가를 위한 실내실험 조건

4.3.1 실험 시료의 물리적 특성

(1) 시료의 물리적 및 역학적 특성

본 연구에서 사용된 시료는 모래의 경우 섬진강 유역에 채취한 시료이고 실트의 경우 담양 도로공사 현장에서 채취한 시료로서 다음과 같은 물리적 및 역학적 특성을 평가하였다. 표 4.2는 공시체의 물리적 및 역학적 특성을 나타낸 것으로, 비중, # 200체 통과율, USCS로 흙을 분류하였다.

표 4.2 FNS와 실험시료의 물리적 및 역학적 특성 비교

실험종목	단위	실험결과			실험방법
		FNS	모래	실트	
비중	-	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 분류	-	SP	SW	ML	KS F 2302
Atterberg Limit	-	N.P	N.P	LL(%) : 40.2 PL(%) : N.P	KS F 2303, 2304
최대건조단위중량	g/cm ³	1.852	1.710	-	KS F 2345
최소건조단위중량	g/cm ³	1.547	1.307	-	KS F 2345
다짐에 의한 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
내부마찰각 (Dr 60%)	°	소형: 38.66 대형: 36.69	소형: 35.94	소형: 28.81	KS F 2343
점착력	kPa	소형: 40.0 대형: 59.5	소형: 29.7	소형: 51.8	KS F 2343

(2) 실험시료의 입도분포 곡선

그림 4.1은 본 연구에 사용된 실험시료로서 입도분석을 실시한 결과, FNS는 # 4를 통과한 조립분이 50%이상이므로 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 $C_u \geq 6$ 그리고 $1 \leq C_g \leq 3$ 이므로 입도분포가 좋은 SW로 분류되었다. 담양 도로공사 현장에서 채취한 시료는 # 200를 통과한 세립분이 50% 이상이므로 실트질에 속하며 액성한계 40.2%, 소성한계는 N.P로 ML시료로 분류되었다.

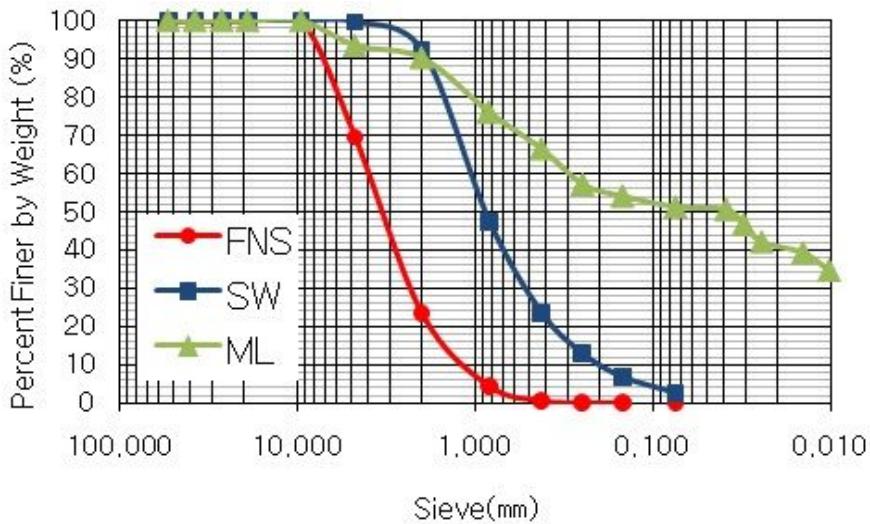


그림 4.1 실험시료의 입도분포곡선

4.3.2 소형 모형토조 실내실험

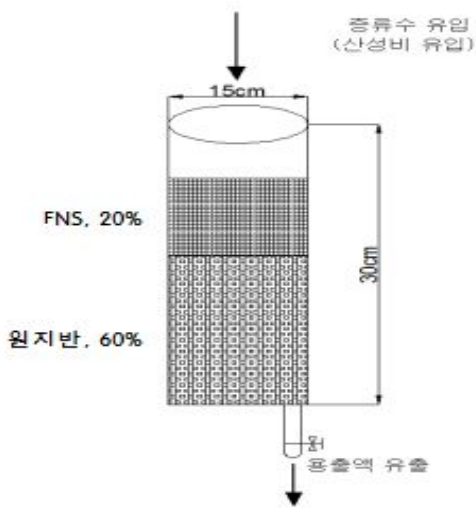
(1) 소형 모형토조 제작

그림 4.2(a)와 같이 소형 모형토조 제작안을 작성하였고, 그림 4.2(b)는 지름(D) 150mm, 높이(H) 300mm의 아크릴을 이용한 소형 모형토조이다.

실험조건으로는 시료(모래, 실트)에 따라, 주입액(담수, 산성, 해수)에 따라 FNS가 지반에 미치는 환경성 평가를 수행하고자 하였으며, 시간경과에 따른 pH 분석과 실험 종료 후 시료채취를 통한 토양오염분석을 수행하였다.

○ 지름(D) 150mm, 높이(H) 300mm의 소형 모형토조 제작

- ① 지반조건(Dr, R) 및 시료(모래, 실트)의 변화에 따른 pH 및 토양오염분석
- ② 주입액(담수, 산성, 해수)의 변화에 따른 pH 및 토양오염분석



(a) 소형 모형토조 제작안



(b) 소형 모형토조 제작품

그림 4.2 소형 모형토조

(2) 소형 모형토조실험의 배합비

본 실험에 사용된 소형 모형토조의 배합비는 모래의 경우 상대밀도(Dr)를 40%, 60%를 기준으로 나타냈으며, 실트의 경우 다짐도(R)로 90%를 기준으로 시료를 배합하였다. 본 실험에 사용된 시료의 양은 모래와 FNS의 경우는 상대밀도를 이용한 방법으로 실트의 경우에는 다짐시험을 통한 최대건조단위중량 도출하여 소형 모형토조에 사용될 시료의 양을 표 4.3과 같이 측정하였다.

산성은 HCl 용액을 구매하여 담수에 1.5ml/ℓ를 적용하여 산성 조건을 만들어 실험을 수행하였으며, 해수염은 Natural Ocean 사의 D-666-01 모델을 사용하였으며, 담수에 해수염 30g/ℓ를 적용하여 해수 조건을 만들어 실험을 수행하였다.

표 4.3 소형 모형토조실험의 배합비

모형토조 제원(mm)	조 건		Soil (kg)	물 (ℓ)	비 고
지름(D) 150, 높이(H) 300	담수	S-1-Dr40	2.98	10	-
		S-1-Dr60	3.08	10	
		M-1-R90	5.78	10	
	산성	S-1-Dr40	2.98	10	HCl 1.5ml/ℓ
		S-1-Dr60	3.08	10	
		M-1-R90	5.78	10	
	해수	S-1-Dr40	2.98	10	해수염 30g/ℓ
		S-1-Dr60	3.08	10	
		M-1-R90	5.78	10	

※ 조건 - S : Sand, M : Silt, 1 : 소형 토조, Dr : 상대밀도, R: 다짐도

(3) 소형 모형토조 실험방법

- ① 그림 4.3(a)와 같이 시료를 자유낙하시켜 다짐을 통해 모래의 경우 상대밀도 (Dr) 40%, 60%로 설정하였으며, 실트의 경우 다짐도(R) 90%로 설정
- ② 그림 4.3(b)와 같이 일정한 수위를 유지할 수 있도록 정수위 조건으로 실험을 진행
- ③ 소형 모형토조에 사용된 강수량은 5일 동안 10ℓ가 통과되어 강우강도는 4.72mm/hr로 측정
- ④ 소형 모형토조의 용출액 분석은 각 1day마다 배출되는 용출액을 pH측정기로 측정
- ⑤ 토양오염 분석은 5일이 지난 후 그림 4.3(c)와 같이 시료를 추출하여 121℃ 건조기로 건조시켜 토양오염 분석을 실시

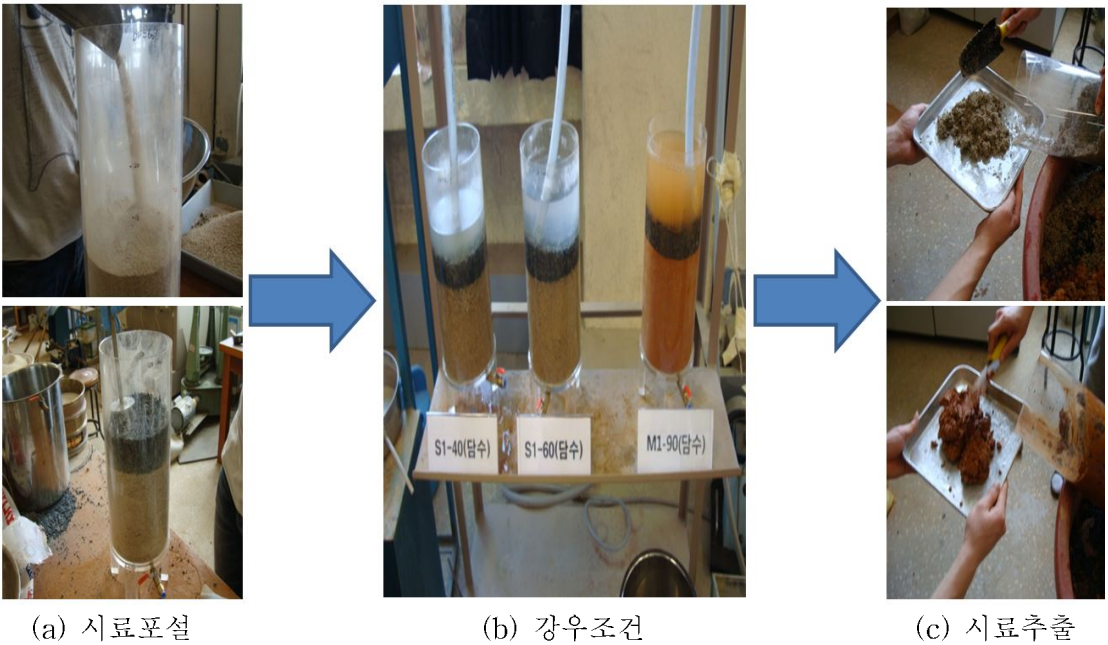


그림 4.3 소형 모형토조 실험방법

4.3.3 대형 모형토조 실내실험

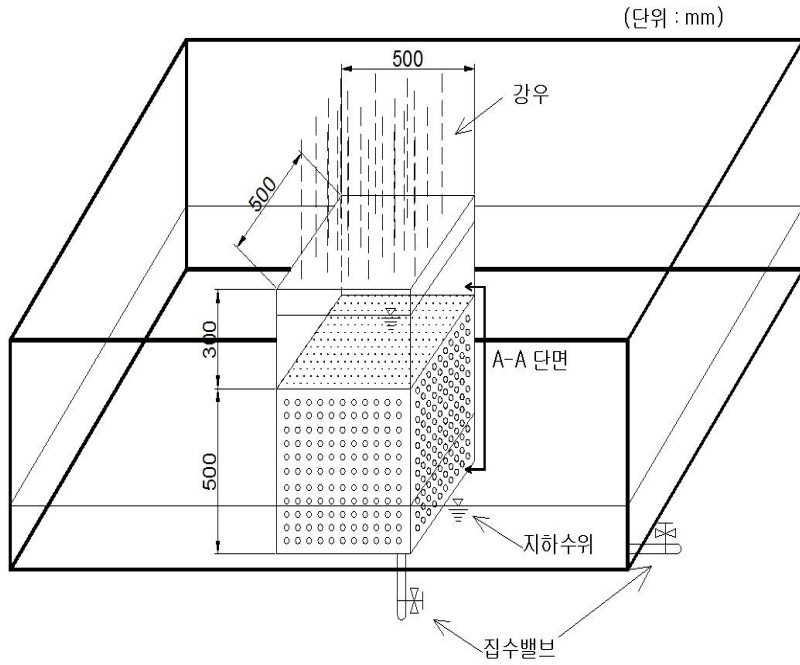
(1) 대형 모형토조 제작

그림 4.4(a)는 대형 모형토조이다. 속 모형토조는 아크릴로 제작하였으며, 겉 모형토조는 고무통으로 구매하여 실험을 진행하였다. 제작안은 속 모형토조의 크기가 500mm로 되어있으나, 제작시 아크릴 한판의 크기가 450mm로 금영되어 그림 4.4(b)와 같이 넓이(W) 450mm × 폭(B) 450mm × 높이(H) 1000mm로 제작하였다. 또한 속 모형토조의 경우 지표면으로부터 높이 300mm까지 작은 구멍이 사방으로 균일하게 있는 것을 확인 할 수 있는데 이는 FNS 구간으로 상부에서 주입액이 들어가 FNS를 통과하여 주변 토양으로 용출액이 배출되기 용이하도록 제작하였다.

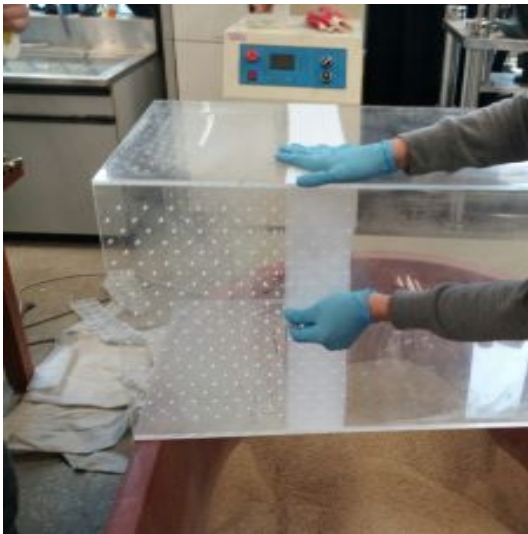
겉 모형토조는 제작안을 작성 할때에 속 모형토조(아크릴)에서 1m 떨어진 구간의 토양오염 분석을 하기 위해 겉 모형토조를 넓이(W) 2500mm × 폭(B) 2500mm × 높이(H) 500mm 아크릴로 제작하려고 하였으나, 제작이 어려울 뿐만 아니라 지반조건 Dr 40%, 60%, R 90%를 제작하기 위해서는 다짐 수행해야하므로 아크릴이 깨질 위험이 있어 겉 모형토조는 넓이(W) 1300 × 폭(B) 700mm × 높이(H) 600mm 고무토조를 구입하여 사용하였다. 겉 모형토조인 고무토조에는 용출액의 배출구가 없기 때문에 흘러나오는 용출액을 배출하기 위해서 인위적으로 홀을 내어 사용하였다.

○ 대형 모형토조 제작

- ① 지반조건(Dr, R) 및 시료(모래, 실트)의 변화에 따른 pH 및 토양오염 분석
- ② 주입액(담수, 산성, 해수)의 변화에 따른 pH 및 토양오염 분석
- ③ 제작한 아크릴 속 모형토조는 그림 4.4(b)와 같으며, 고무토조인 겉 모형토조는 그림 4.4(c)와 같음



(a) 대형 모형토조



(b) 속 모형토조 제작



(c) 겉 모형토조 구입

그림 4.4 대형 모형토조

(2) 대형 모형토조실험의 배합비

본 실험에 사용된 대형 모형토조의 배합비는 모래의 경우 상대밀도(Dr)를 40%를 기준으로 나타냈으며, 실트의 경우 다짐도(R)로 90%를 기준으로 시료를 배합하였다. 본 실험에 사용된 시료의 양은 모래와 FNS의 경우는 상대밀도를 이용한 방법으로 실트의 경우에는 다짐시험을 통한 최대건조단위중량 도출하여 대형 모형토조에 사용될 시료의 양을 표 4.4와 같이 측정하였다.

산성은 HCl 용액을 구매하여 담수에 1.5ml/ℓ를 적용하여 산성 조건을 만들어 실험을 수행하였으며, 해수염은 Natural Ocean 사의 D-666-01 모델을 사용하였으며, 담수에 해수염 30g/ℓ를 적용하여 해수 조건을 만들어 실험을 수행하였다.

표 4.4 대형 모형토조 시료 배합비

모형토조 제원(mm)	조 건		Soil (kg)	물 (ℓ)	비 고
W : B : H (450 : 450 : 1,000)	담수	S-2-Dr40	84.23	50	-
		M-2-R90	163.3	50	
	산성	S-2-Dr40	84.23	50	HCl 1.5ml/ℓ
		M-2-R90	163.3	50	
	해수	S-2-Dr40	84.23	50	해수염 30g/ℓ
		M-2-R90	163.3	50	

※ S : Sand, M : Silt, 2: 대형토조, Dr : 상대밀도, R: 다짐도

(3) 대형 모형토조 실험방법

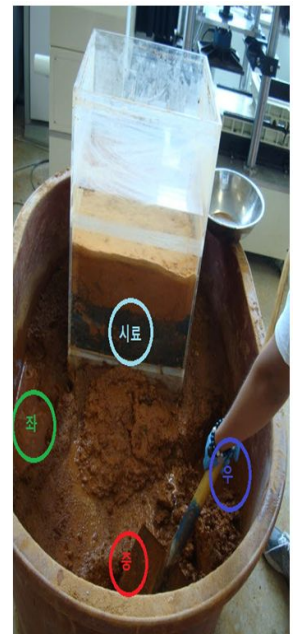
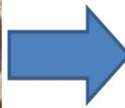
- ① 그림 4.5(a)와 같이 시료를 자유낙하시켜 다짐을 통해 모래의 경우 상대밀도 (D_r) 40%로 설정하였으며, 실트의 경우 다짐도(R) 90%로 설정
- ② 대형 모형토조의 경우 담수일 때에는 초기 pH 조건 변화가 없기 때문에 정수위를 유지하며 실험을 진행함
- ③ 주입액이 산성일 경우에는 초기 pH를 5.5로 맞춰야 하며, 해수의 경우에는 해수염을 섞어 해수로 만들어야 하기 때문에 정수위 조건으로는 실험이 불가함
- ④ 따라서 강우조건은 그림 4.5(b)와 같이 가득 채운 후 수위가 떨어질 때 까지 기다린 다음 다시 초기의 산성 및 해수조건을 설정하여 수위를 가득 채우는 방법으로 실험을 진행
- ⑤ 대형 모형토조의 용출액 분석은 각 1day마다 배출되는 용출액을 pH측정기로 측정
- ⑥ 토양오염 분석은 5일이 지난 후 그림 4.5(c)와 같이 4곳의 시료(시료, 중, 원, 오)를 추출하여 건조기로 121°C 건조시켜 토양오염 분석을 실시



(a) 시료포설 및 다짐



(b) 강우조건



(c) 시료추출(4곳)

그림 4.5 대형 모형토조 실험방법

4.4 FNS 환경성 평가결과

4.4.1 용출수 pH 분석결과

(1) 강우가 없는 담수의 pH 변화

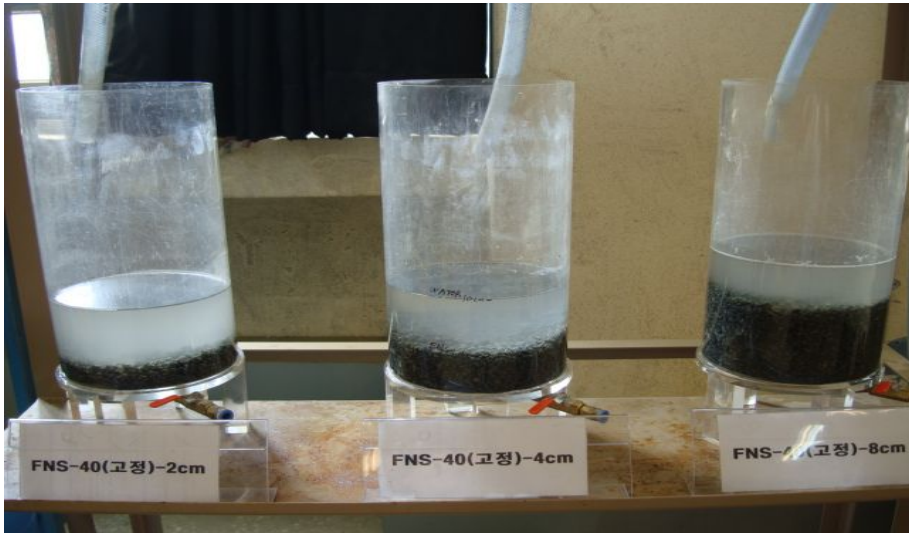
표 4.5는 고정된 수위의 pH 변화 값을 나타내었으며, 그림 4.6(a)는 실험전경, 그림 4.6(b)는 pH 변화 그래프를 나타내었다.

FNS 양의 변화에 따라 pH를 확인 하고자 다음과 같이 FNS를 2cm, 4cm, 8cm 포설 하여 강우가 없을 때에 고정된 담수에서의 pH의 변화를 분석하였다. 고정된 담수의 pH 측정은 1, 2, 3, 4, 5day를 측정하였다.

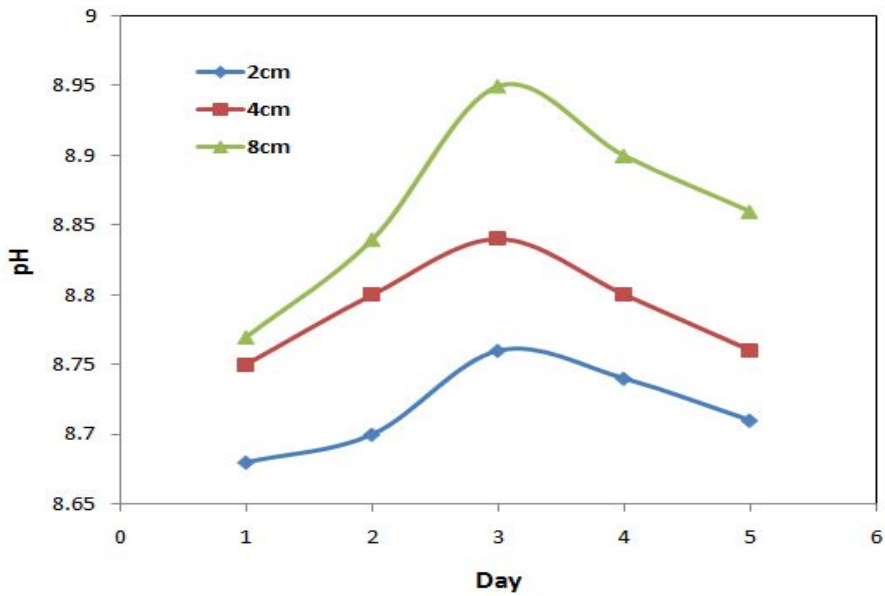
pH 측정 결과, 초기 pH는 7.42로 확인하였으며, 2cm일 때 pH는 8cm 일 때 pH보다 낮게 나타났으나, 차이는 매우 적었다. pH는 3일까지 꾸준히 증가하다 3일 이후부터 감소하기 시작하여 1일 수준의 pH의 회복됨을 확인하였다. 이러한 pH의 변화의 폭은 0.5정도로 변화가 적었다.

표 4.5 고정된 수위의 pH 변화(담수)

시료 \ 시간	1DAY	2DAY	3DAY	4DAY	5DAY
2cm	8.68	8.70	8.76	8.74	8.71
4cm	8.75	8.80	8.84	8.80	8.76
8cm	8.77	8.84	8.95	8.90	8.86



(a) FNS 양의 변화에 따른 고정된 수위의 pH 변화 실험



(b) 고정된 수위의 시간경과에 따른 pH 변화 그래프

그림 4.6 FNS 양에 따른 고정된 수위에서 pH 변화(담수)

(2) 시간경과에 따른 강우 담수의 pH 변화

그림 4.7과 표 4.6은 담수의 pH 변화에 대해서 그래프와 표로 나타내었다.

초기 pH는 모두 7.41~7.60 정도로 담수의 pH를 나타내었다. 그림 4.7은 시간경과에 따른 담수의 pH 변화 그래프이며, 최대 pH는 실트의 대형 모형토조에서 9.66으로 가장 크게 나타났다. 이는 실트질의 공극이 SW시료 보다 극히 작으므로 FNS의 물질이 빠져나가지 못하고 머물러 있어 pH의 값이 상승한 것으로 판단된다. 가장 낮은 pH는 소형 토조 상대밀도 40%이다. 이는 투수계수가 커서 강우에 의해 오염물질이 씻겨 나가 토양에 잔여 오염물질이 없어 pH가 가장 낮게 나온 것으로 판단된다. 대부분 5일 후에 1일 수준으로 pH가 회복되었다.

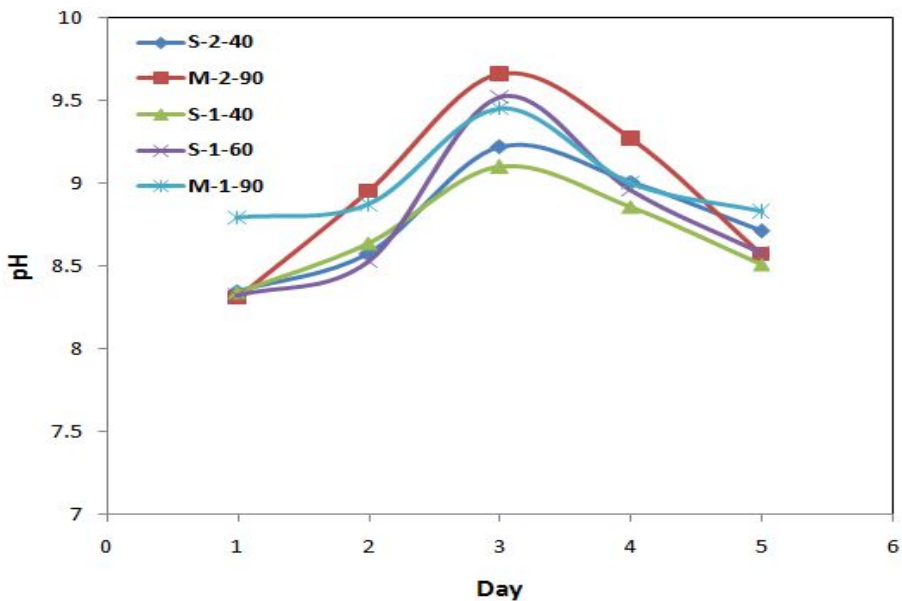


그림 4.7 시간경과에 따른 담수의 pH 변화

표 4.6 시간경과에 따른 담수의 pH 변화

시료 \ 시간	1DAY	2DAY	3DAY	4DAY	5DAY
S-2-40	8.35	8.58	9.22	9.01	8.71
M-2-90	8.31	8.95	9.66	9.27	8.57
S-1-40	8.34	8.64	9.1	8.86	8.51
S-1-60	8.32	8.53	9.52	8.96	8.58
M-1-90	8.79	8.87	9.45	9	8.83

(3) 시간경과에 따른 산성 강우 시의 pH 변화

그림 4.8과 표 4.7은 산성의 pH 변화에 대해서 그래프와 표로 나타내었다.

초기 pH는 5.5의 값인 산성의 pH를 나타내었다. 그림 4.8은 시간경과에 따른 산성의 pH 변화 그래프이며, 최대 pH는 실트의 소형 토조에서 8.59로 가장 크게 나타내었다. 이는 실트질의 공극이 SW시료 보다 극히 작으므로 FNS의 물질이 빠져나가지 못하고 머물러 있어 pH의 값이 상승한 것으로 판단된다. 가장 낮은 pH를 보인 것은 소형 토조 상대밀도 40%이며, 이는 공극의 크기가 커서 강우에 의해 오염물질이 씻겨 나가 토양에 잔여 오염물질이 없어 pH가 가장 낮게 나온 것으로 판단된다.

5일 후 pH 측정 결과, 대부분 1일 수준으로 pH가 감소가 되었고, 수질기준 pH 8.5 이하로 감소될 것으로 판단된다. 따라서 산성의 정도 높은 곳에 FNS를 사용하게 된다면 중성의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

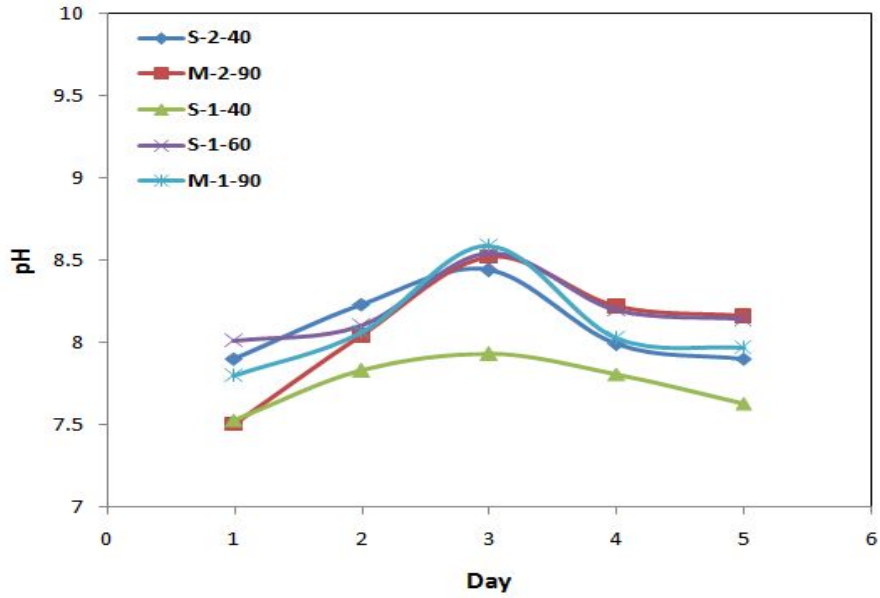


그림 4.8 시간경과에 따른 산성의 pH 변화

표 4.7 시간경과에 따른 산성 강우 시의 pH 변화

시료 \ 시간	1DAY	2DAY	3DAY	4DAY	5DAY
S-2-40	7.9	8.23	8.44	7.99	7.9
M-2-90	7.5	8.04	8.52	8.22	8.16
S-1-40	7.53	7.83	7.93	7.81	7.63
S-1-60	8.01	8.1	8.54	8.2	8.14
M-1-90	7.8	8.06	8.59	8.03	7.97

(4) 시간에 따른 해수의 pH 변화

그림 4.9와 표 4.8은 해수의 pH 변화에 대해서 그래프와 표로 나타내었다.

초기 pH는 7.8~8.0의 값인 pH를 나타내었다. 그림 4.9는 시간경과에 따른 해수의 pH 변화 그래프이며, 최대 pH는 실트의 대형 토조에서 8.67로 가장 크게 나타났다. 이는 실트질의 공극이 SW시료 보다 극히 작으므로 FNS의 물질이 빠져나가지 못하고 머물러 있어 pH의 값이 상승한 것으로 판단된다. 가장 낮은 pH를 보인 것은 소형 토조 상대밀도 40%이며, 이는 공극의 크기가 커서 강우에 의해 오염물질이 씻겨 나가 토양에 잔여 오염물질이 없어 pH가 가장 낮게 나온 것으로 판단된다.

5일 후에 pH 측정 결과 대부분 1일 수준으로 pH가 감소가 되었고, 수질기준 pH 8.5 이하로 감소될 것으로 판단된다.

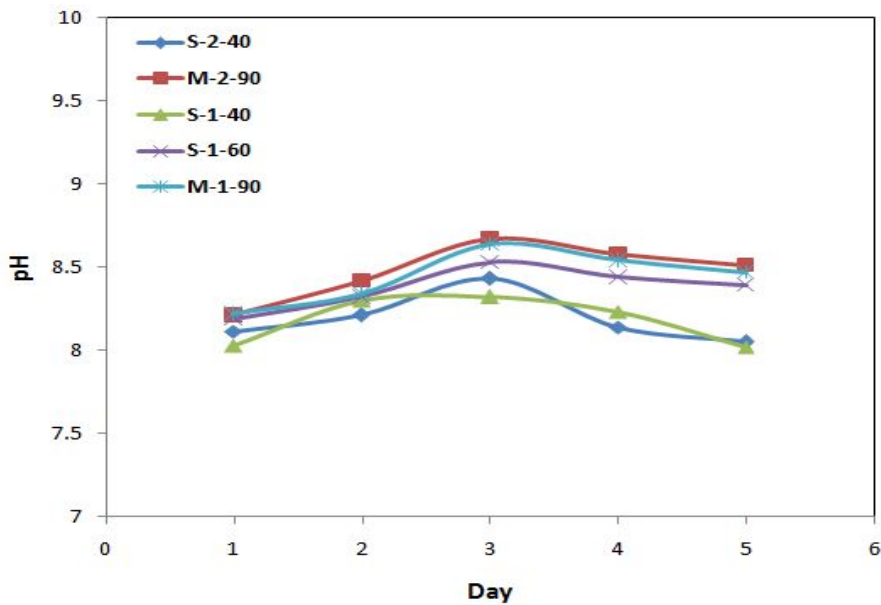


그림 4.9 시간경과에 따른 해수의 pH 변화

표 4.8 시간경과에 따른 해수의 pH 변화

시료 \ 시간	1DAY	2DAY	3DAY	4DAY	5DAY
S-2-40	8.11	8.21	8.43	8.14	8.05
M-2-90	8.21	8.42	8.67	8.58	8.51
S-1-40	8.03	8.30	8.32	8.23	8.02
S-1-60	8.19	8.32	8.53	8.44	8.39
M-1-90	8.22	8.34	8.64	8.54	8.47

4.4.2 모형토조의 토양오염 분석결과

(1) 모형토조에 사용된 원지반 시료에 대한 토양오염 분석결과

표 4.9는 토양오염에 대한 분석결과를 나열한 것이다. 그 중 원지반 시료는 모형토조 실험에 앞서 본 모형토조 실험에 사용하지 않은 원상태 시료를 말하며 FNS, 모래, 실트의 토양오염 분석을 살펴보면 다음과 같다.

FNS의 경우 광양 (주) 효석에서 받은 시료로서 분석 결과, 비소가 다소 높은 상태로 분석되었으나, 1지역의 우려기준 허용범위 $25mg/kg$ 내에 있어 양호한 수준으로 분석되었다.

원지반 시료의 모래 시료는 섬진강 유역에서 채취한 시료로서 옥과에서 가져온 시료이며, SW시료이다. 토양오염 분석 결과, 모두 적정선에 포함되어 토양오염에 있어서 양호한 수준으로 분석되었다.

원지반 시료인 실트 시료는 담양 도로공사 현장에서 채취한 시료로서 토양오염 분석 결과, 아연이 기본적으로 매우 높은 상태였고, 납이 다량으로 포함되어 있는 상태로 분석되었으나, 1지역의 우려기준 허용범위 $300mg/kg$, $200mg/kg$ 내에 있어 양호한 수준으로 분석되었다.

표 4.9 원지반 시료의 토양오염 분석결과

분류	비고	Sample Name	As	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb	Hg
원 지 반	1	FNS	21.08	0.00	1.97	1.72	27.04	3.01	0.0051
	2	모래 원지반	8.53	0.00	1.53	1.23	19.13	15.30	0.0231
	3	실트 원지반	14.80	0.41	2.97	3.67	135.87	40.93	0.0180
기 준	기 준	우려기준 1지역(mg/kg)	25	4	100	150	300	200	4
		우려기준 2지역(mg/kg)	50	10	200	500	600	400	10
		우려기준 3지역(mg/kg)	200	60	500	2,000	2,000	700	20

※ 토양환경보전법 시행규칙 중 토양오염우려기준

(2) 담수조건에 대한 소형 및 대형 모형토조의 토양오염 분석결과

그림 4.10은 모래 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 모래 시료의 담수에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다.

모래시료의 토양오염시험을 분석한 결과, 1지역 우려기준 대비 비소의 경우는 약 50% 이내, 아연의 경우 약 10% 이내, 납의 경우 약 10% 이내로 나타났으며 나머지 항목인 카드뮴, 니켈, 구리, 수은은 적은 양이 분포하고 있음을 확인하였다.

전반적인 실험결과, 모래 담수의 경우 일반적으로 원지반의 토양오염 분석보다 더 낮아지는 경향을 볼 수 있는데, 이는 투수성이 좋아 강우에 의해 씻겨나가는 것으로 판단된다. 대부분 원지반 모래 시료와 비교하여 큰 차이는 없었으며, 담수의 경우 1지역 우려기준 허용범위 내에 있어 양호한 수준으로 분석되었다.

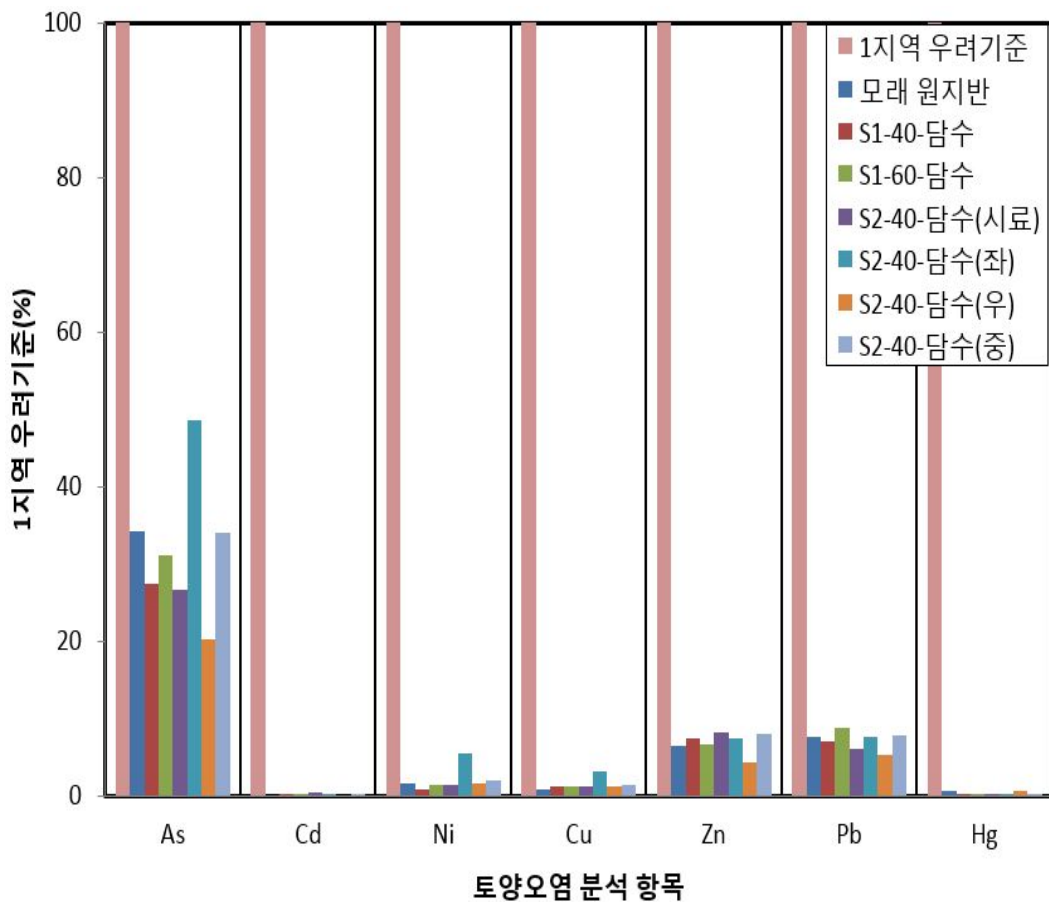


그림 4.10 모래 담수의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

그림 4.11은 실트 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 실트 시료의 담수에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다.

실트시료의 토양오염분석을 비교한 결과, 1지역 우려기준 대비 비소의 경우 약 60% 이내, 아연의 경우 60% 이내, 납에서 20% 이내, 카드뮴에서 10% 이내로 나타났으며 나머지 항목인 니켈, 구리, 수은은 적은 양이 분포하고 있음을 확인하였다.

전반적인 실험결과, 실트 담수의 경우 일반적으로 모래와 유사하게 원지반 실트의 토양오염 분석보다 더 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 대부분 원지반 실트 시료와 비교하여 큰 차이는 없었으나, 아연에 대해서 약간 증가하는 경향을 보였다. 담수의 경우 1 지역 우려기준 허용범위 내에 있어 양호한 수준으로 분석되었다.

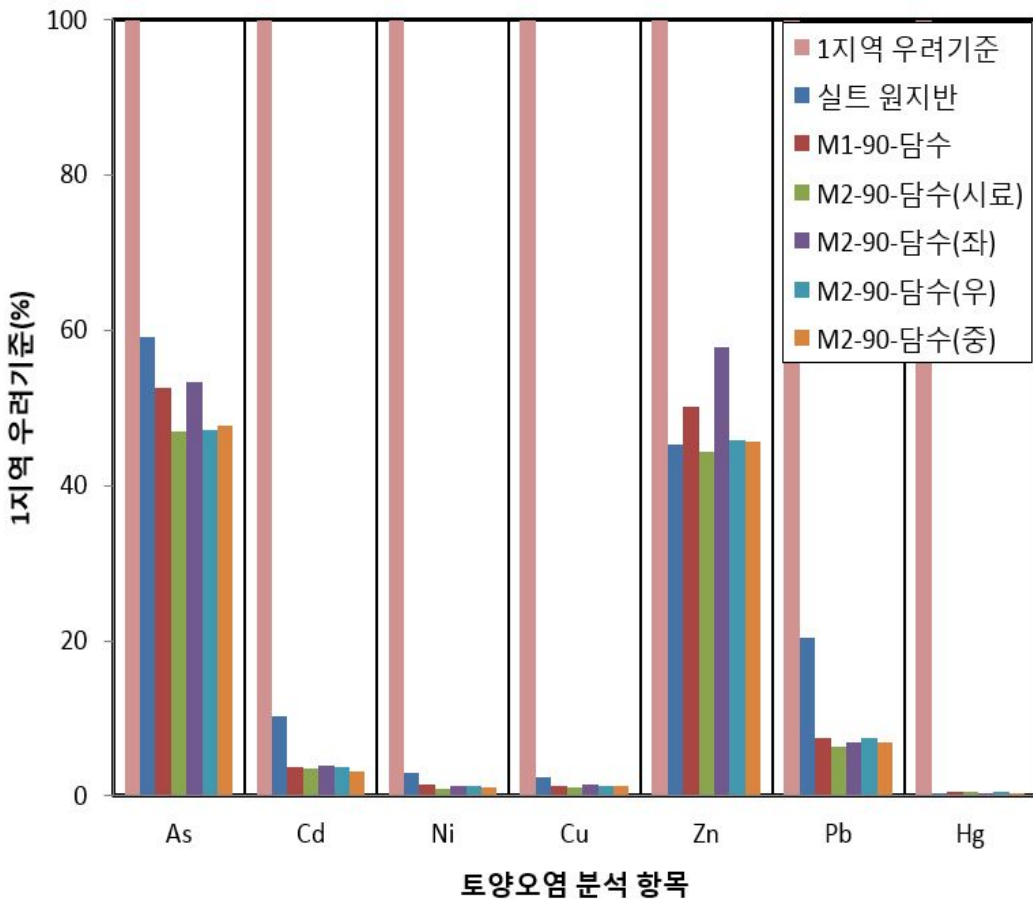


그림 4.11 실트 담수의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

(3) 산성조건에 대한 소형 및 대형 모형토조의 토양오염 분석결과

그림 4.12는 모래 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 모래 시료의 산성에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다.

모래시료의 토양오염시험을 분석한 결과, 1지역 우려기준 대비 비소의 경우는 약 60% 이내, 아연의 경우 약 20% 이내, 납의 경우 약 20% 이내, 니켈의 경우 15% 이내로 나타났으며 나머지 항목인 카드뮴, 구리, 수은은 적은 양이 분포하고 있음을 확인하였다.

전반적인 실험결과, 모래 산성의 경우 일반적으로 원지반의 토양오염 분석보다 더 상회하는 것을 볼 수 있는데 이는 산성 자체의 오염성이 있는 것으로 판단되며, 전반적으로 1지역 우려기준 허용범위 내에 있어 양호한 수준으로 분석되었다.

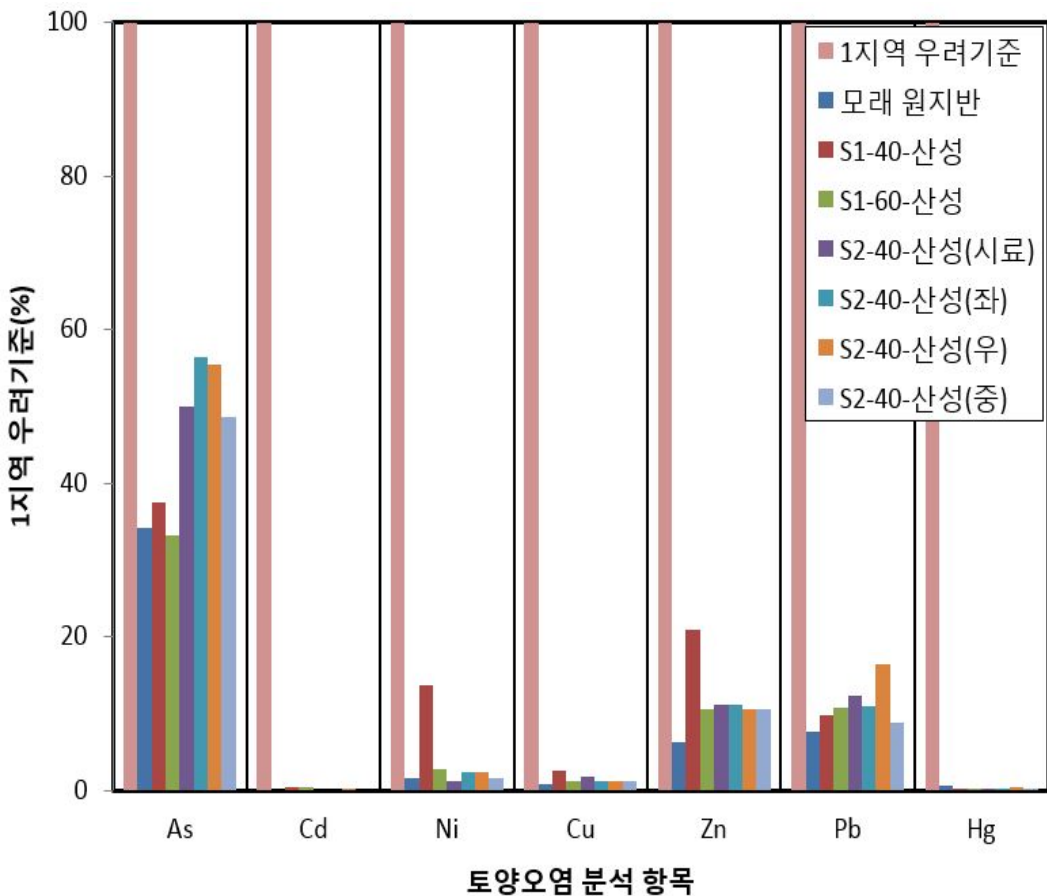


그림 4.12 모래 산성의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

그림 4.13은 실트 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 실트 시료의 산성에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다.

실트시료의 토양오염분석을 비교한 결과, 1지역 우려기준 대비 비소의 경우 약 70% 이내, 아연의 경우 60% 이내, 납에서 20% 이내, 카드뮴에서 10% 이내로 나타났으며 나머지 항목인 니켈, 구리, 수은은 적은 양이 분포하고 있음을 확인하였다.

전반적인 실험결과, 실트 산성의 경우 일반적으로 원지반 실트의 토양오염 분석보다 더 높아진 것을 확인할 수 있었다. 이는 pH 측정 시와 마찬가지로 공극이 극히 작아 FNS의 오염성 물질이 공극을 통과하지 못하고 강우에 의해 계속 침전되어 원지반의 실트질 보다 오염도가 상회하는 것으로 나타났다. 그러나 토양오염 분석된 중금속이 모두 1지역 우려기준 허용범위 내에 있어 양호한 수준으로 분석되었다.

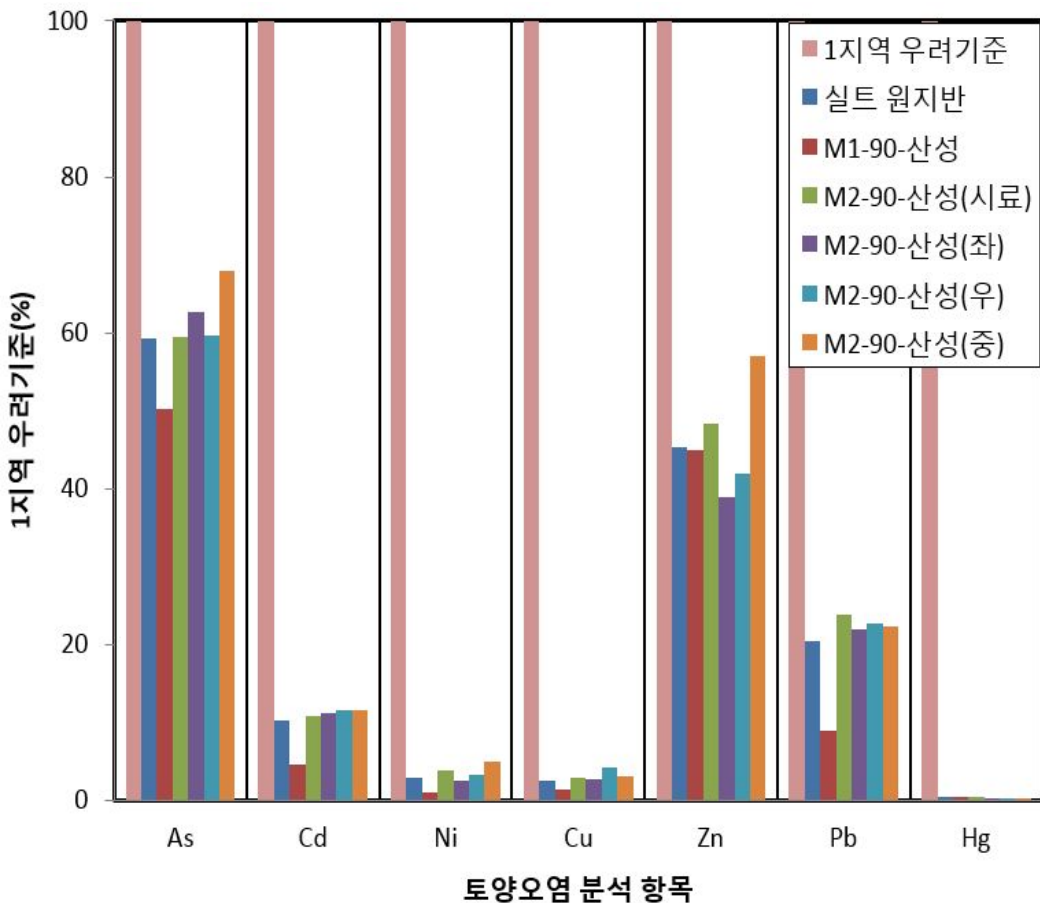


그림 4.13 실트 산성의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

(4) 해수조건에 대한 소형 및 대형 모형토조의 토양오염 분석결과

그림 4.14는 모래 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 모래 시료의 해수에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다.

모래시료의 토양오염시험을 분석한 결과, 1지역 우려기준 대비 비소의 경우는 약 10% 이내, 아연의 경우 약 25% 이내, 납의 경우 약 20% 이내로 나타났으며 나머지 항목인 카드뮴, 니켈, 구리, 수은은 적은 양이 분포하고 있음을 확인하였다.

전반적인 실험결과, 모래 해수의 경우 일반적으로 원지반 모래 시료와 비교하여 큰 차이가 없었으며, 해수의 경우 1지역 우려기준 허용범위 내에 있어 양호한 수준으로 분석되었다.

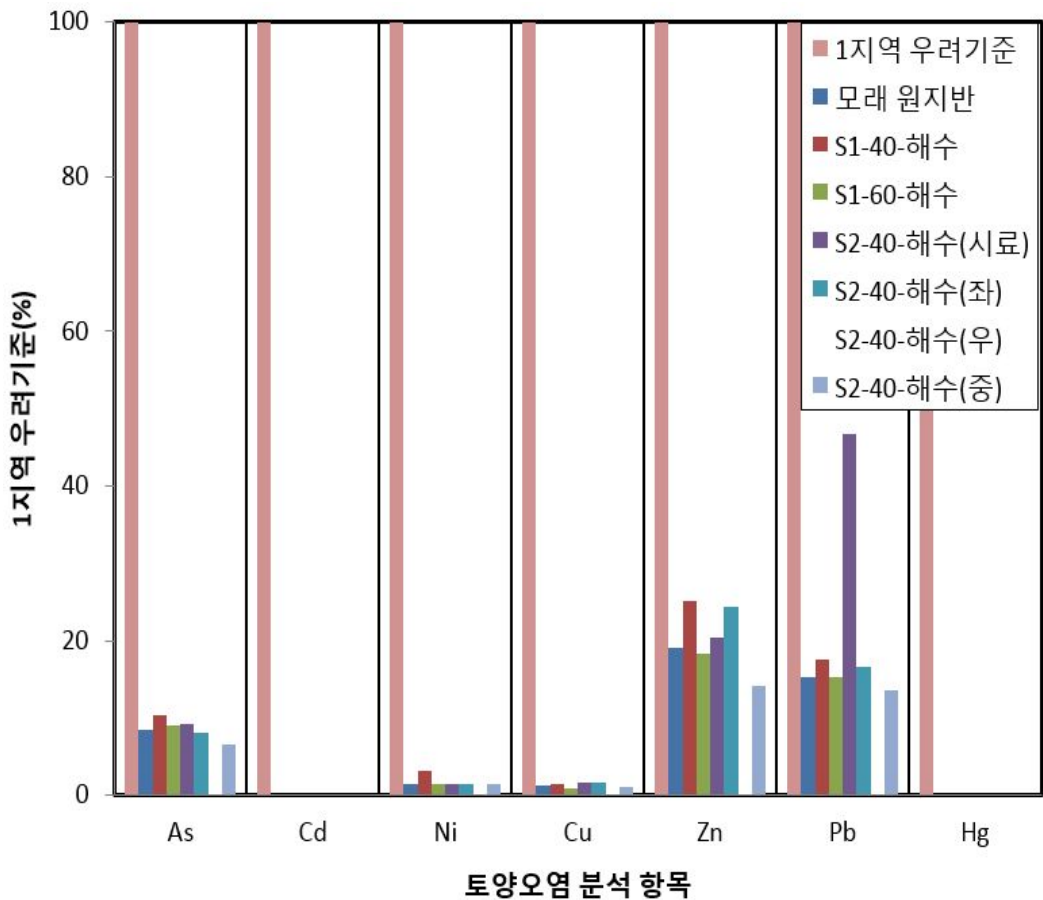


그림 4.14 모래 해수의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

그림 4.15는 실트 원지반 시료와 소형, 대형 모형토조 실험에 사용된 실트 시료의 해수에 대한 토양오염 분석하여 비교한 결과이다.

실트시료의 토양오염분석을 비교한 결과, 1지역 우려기준 대비 비소의 경우 약 65% 이내, 아연의 경우 50% 이내, 납에서 20% 이내, 카드뮴에서 10% 이내로 나타났으며 나머지 항목인 니켈, 구리, 수은은 적은 양이 분포하고 있음을 확인하였다.

전반적인 실험결과, 실트 해수의 경우 일반적으로 원지반 실트의 토양오염 분석보다 더 높아진 것을 확인할 수 있었다. 이는 pH 측정 시와 마찬가지로 공극이 극히 작아 FNS의 오염성 물질이 공극을 통과하지 못하고 강우에 의해 계속 침전되어 원지반의 실트질 보다 오염도가 상회하는 것으로 나타났다. 그러나 토양오염 분석된 중금속이 모두 1지역 우려기준 허용범위 내에 있어 양호한 수준으로 분석되었다.

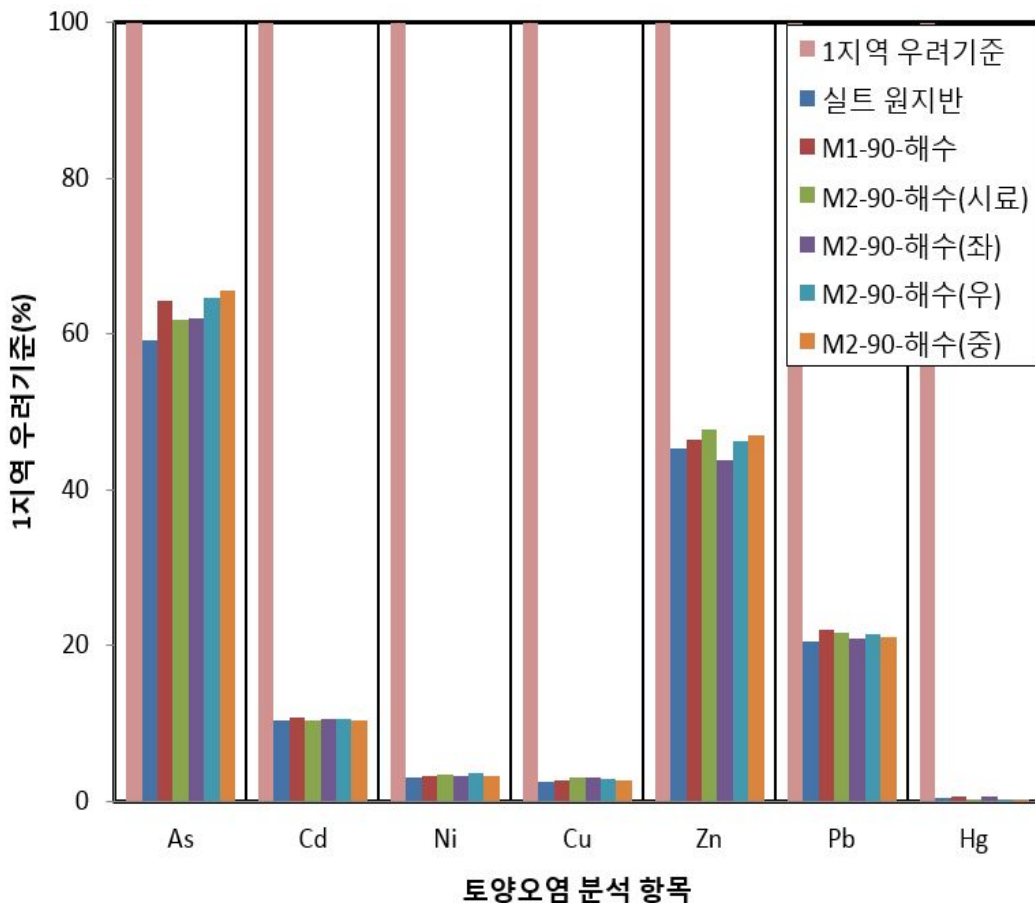


그림 4.15 실트 해수의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

(5) 담수, 산성, 해수조건에 대한 모래 모형토조의 토양오염 분석결과

그림 4.16은 주입액인 담수, 산성, 해수에 대한 모래 원지반 시료와 모형토조 실험에 사용된 모래 Dr 40%, 60% 시료의 토양오염 분석하여 비교한 결과이며, 표 4.10은 모래지반에 따른 토양오염도를 비교한 표이다.

주입액에 따른 모래지반의 토양오염 분석결과, 1지역 우려기준 대비 담수의 경우 비소는 약 30% 이내, 아연, 납에서는 약 10% 이내로 나타났으며, 산성의 경우 비소는 약 50% 이내, 아연은 약 20% 이내, 납은 약 10% 이내로 나타났고, 해수의 경우 비소는 약 35% 이내, 아연은 약 10% 이내, 납에서는 약 20% 이내로 나타났다. 산성 주입 시 토양에 오염이 많이 되는 것으로 보아 산성비 자체가 가지고 있는 오염도가 있어 높게 나온 것으로 판단되며, 일반적으로 담수에서 오염도가 가장 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 모래에서는 산성, 해수, 담수의 순으로 오염도가 분석되었다.

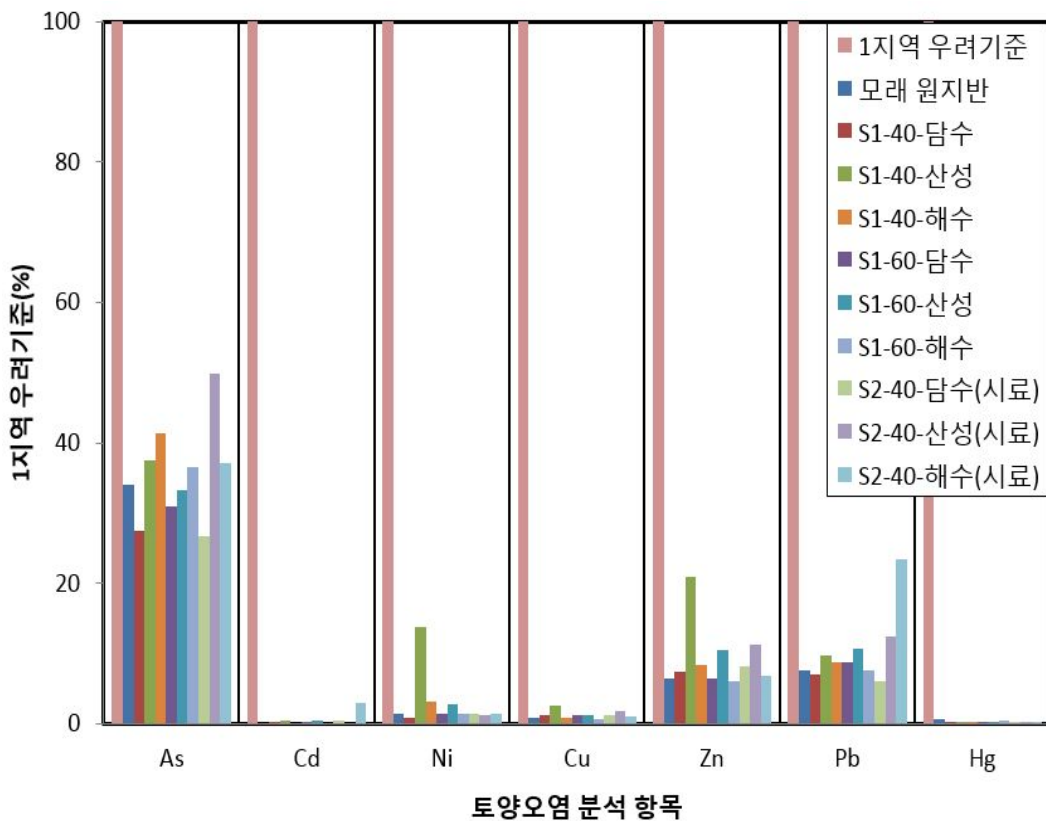


그림 4.16 주입액에 따른 모래의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

표 4.10 주입액에 따른 모래의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

분류	비고	Sample Name	As	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb	Hg
모래 담수	4	S1-40-담수	6.86	0.01	0.85	1.78	22.17	14.00	0.0072
	5	S1-60-담수	7.76	0.01	1.45	1.79	19.66	17.73	0.0040
	6	S2-40-담수(시료)	6.68	0.02	1.48	1.75	24.32	12.30	0.0058
	7	S2-40-담수(좌)	12.16	0.01	5.45	4.60	22.45	15.16	0.0051
	8	S2-40-담수(우)	5.04	0.00	1.67	1.81	12.67	10.77	0.0223
	9	S2-40-담수(중)	8.49	0.01	2.02	2.25	23.99	15.62	0.0033
모래 산성	10	S1-40-산성	9.36	0.02	13.78	3.86	62.80	19.61	0.0045
	11	S1-60-산성	8.32	0.02	2.77	1.92	31.74	21.53	0.0043
	12	S2-40-산성(시료)	12.48	0.00	1.20	2.66	33.69	24.74	0.0043
	13	S2-40-산성(좌)	14.09	0.00	2.43	1.91	33.68	22.03	0.0040
	14	S2-40-산성(우)	13.84	0.01	2.45	1.88	31.59	32.85	0.0158
	15	S2-40-산성(중)	12.17	0.00	1.52	1.89	31.44	17.51	0.0072
모래 해수	16	S1-40-해수	10.35	0.00	3.21	1.41	25.12	17.63	0.0033
	17	S1-60-해수	9.12	0.00	1.41	0.94	18.29	15.30	0.0184
	18	S2-40-해수(시료)	9.27	0.12	1.38	1.64	20.34	46.78	0.0045
	19	S2-40-해수(좌)	8.18	0.04	1.44	1.58	24.40	16.65	0.0058
	20	S2-40-해수(우)	11.85	0.00	2.35	1.52	25.86	18.70	0.0188
	21	S2-40-해수(중)	6.53	0.01	1.45	1.00	14.14	13.60	0.0223
기준	기준	우려기준 1지역(<i>mg/kg</i>)	25	4	100	150	300	200	4
		우려기준 2지역(<i>mg/kg</i>)	50	10	200	500	600	400	10
		우려기준 3지역(<i>mg/kg</i>)	200	60	500	2,000	2,000	700	20

※ 토양환경보전법 시행규칙 중 토양오염우려기준

(6) 담수, 산성, 해수조건에 대한 실트 모형토조의 토양오염 분석결과

그림 4.17은 주입액 담수, 산성, 해수에 대한 실트 원지반 시료와 모형토조 실험에 사용된 실트 R 90% 시료의 토양오염 분석하여 비교한 결과이며, 표 4.11은 실트지반에 따른 토양오염도를 비교한 표이다.

주입액에 따른 실트지반의 토양오염 분석결과, 1지역 우려기준 대비 담수의 경우 비소는 약 55% 이내, 아연은 약 45% 이내, 납은 10% 이내로 나타났으며, 산성의 경우 비소는 약 60% 이내, 아연은 약 45% 이내, 납은 약 20% 이내로 나타났고, 해수의 경우 비소는 약 65% 이내, 아연은 약 50% 이내, 납에서는 약 20% 이내로 나타났다.

주입액에 따른 실트지반의 토양오염 분석결과, 담수가 가장 낮게 나타났으며, 산성도 비교적 낮은 경향을 나타냈는데 이는 실트지반이 산성의 중성화 역할을 하는 것으로 판단된다. 따라서 실트에서는 해수, 산성, 담수의 순으로 오염도가 분석되었다.

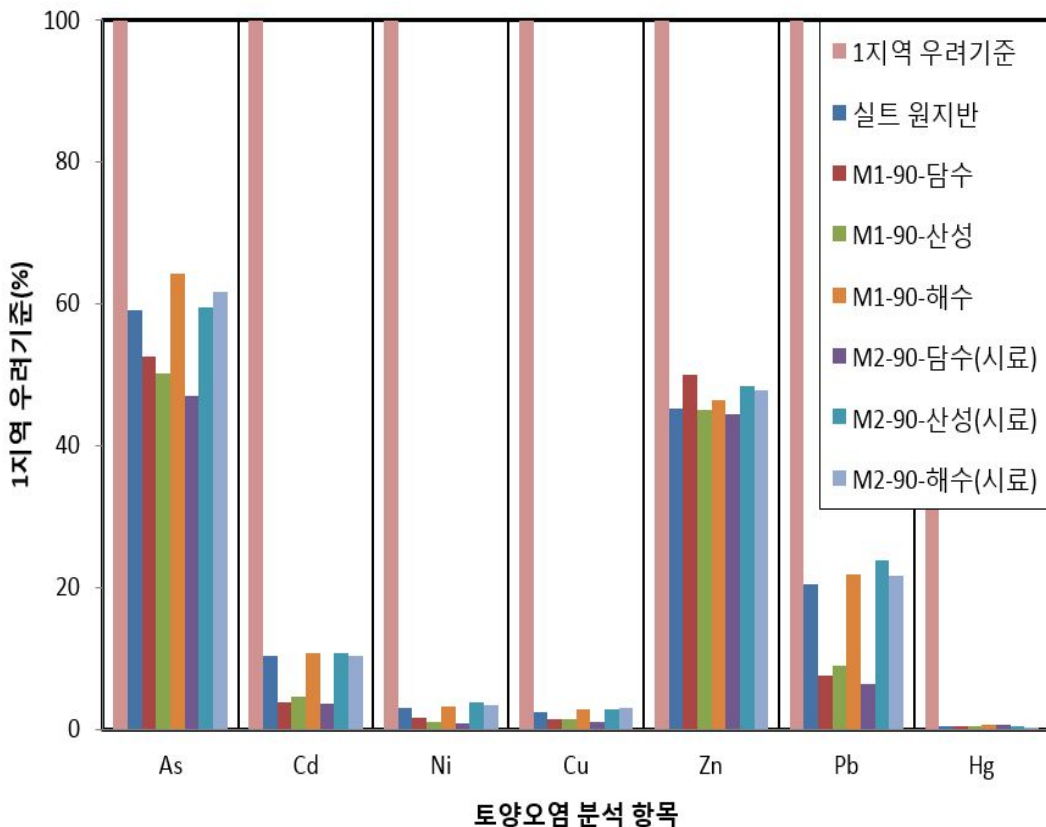


그림 4.17 주입액에 따른 실트의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

표 4.11 주입액에 따른 실트의 원지반 및 1지역 우려기준 비교

분류	비고	Sample Name	As	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb	Hg
실트 담수	19	M1-90-담수	13.16	0.15	1.56	1.94	150.23	15.08	0.0188
	20	M2-90-담수(시료)	11.76	0.14	0.89	1.57	133.32	12.82	0.0241
	21	M2-90-담수(좌)	13.32	0.16	1.22	2.11	173.43	13.94	0.0184
	22	M2-90-담수(우)	11.80	0.15	1.23	1.98	137.59	14.85	0.0231
	23	M2-90-담수(중)	11.91	0.13	1.09	1.86	136.75	13.98	0.0159
실트 산성	24	M1-90-산성	12.55	0.18	1.05	2.19	134.99	18.00	0.0180
	25	M2-90-산성(시료)	14.88	0.43	3.79	4.29	145.17	47.63	0.0159
	26	M2-90-산성(좌)	15.65	0.45	2.59	4.04	116.59	44.00	0.0072
	27	M2-90-산성(우)	14.89	0.46	3.21	6.38	125.51	45.21	0.0058
	28	M2-90-산성(중)	16.96	0.46	5.01	4.48	170.76	44.79	0.0043
실트 해수	29	M1-90-해수	16.06	0.43	3.17	4.04	139.21	43.83	0.0241
	30	M2-90-해수(시료)	15.44	0.41	3.42	4.39	143.26	43.26	0.0051
	31	M2-90-해수(좌)	15.48	0.42	3.21	4.51	131.04	41.61	0.0223
	32	M2-90-해수(우)	16.13	0.42	3.62	4.16	138.58	42.99	0.0045
	33	M2-90-해수(중)	16.38	0.41	3.21	4.01	141.13	41.96	0.0033
기준	기준	우려기준 1지역(<i>mg/kg</i>)	25	4	100	150	300	200	4
		우려기준 2지역(<i>mg/kg</i>)	50	10	200	500	600	400	10
		우려기준 3지역(<i>mg/kg</i>)	200	60	500	2,000	2,000	700	20

※ 토양환경보전법 시행규칙 중 토양오염우려기준

4.5 토양오염 분석을 위한 전자현미경 방법 및 결과

4.5.1 실험장비

그림 4.18은 본 실험에서 사용한 전자현미경 Scanning Electron Microscope (이하, SEM)이다. 전자현미경은 전자에 대한 렌즈작용을 코일에 흐르는 전류를 변환시킴으로써 magnetic field를 사용하여 전자의 이동 경로를 변하게 하여 마치 볼록렌즈가 빛을 집속하듯 전자를 모아주는 것과 유사하다. 광선 대신에 전자 빔을 사용하기 때문에 현미경의 내부는 진공상태여야 하는 이유는 전자가 공기와 충돌하면 에너지가 소실되거나 굴절되는 등 원하는 대로 제어하기 어렵기 때문이다. 또한 표본과 대물렌즈와 렌즈 사이의 거리는 일정하지만 중간렌즈와 투영렌즈의 코일에 통하는 전류의 세기에 의해 배율이 결정되며 상의 초점은 대물렌즈의 코일에 흐르는 전류에 의해 조절된다.

광학현미경은 실제의 상을 볼 수 있지만 전자현미경은 형광판이나 사진판을 통해 상을 볼 수 있다. 광학현미경은 높은 에너지의 전자빔을 이용하여 전자가 시편과 충돌할 때 발생하는 이차전자, 반산전자, X-선 등을 검출하여 확대 상을 촬영하는 장치로서 표본의 빛을 흡수/반사상이 형성되는 반면, 전자현미경에서는 전자선이 시료의 표면에 충돌하면서 발생하는 이차 전자, 산란전자, 투과전자, X-Ray 등을 측정하여 표면의 형태를 영상으로 나타낸다.



그림 4.18 전자현미경

그림 4.19는 X선 분석기 X-ray diffraction (이하, XRD)이다. X-선은 고속의 전자가 무거운 원소의 원자에 충돌할 때 발생한다. 가열된 음극 filament로 부터 나온 열전자는 양극표적을 향해서 가속된다. 이때 전자의 종속도는 전자가 얻은 운동 에너지가 전기장에 의해서 전자에 한 일과 같다고 놓음으로써 계산할 수 있다. 이 전자의 운동에너지는 충돌 시 대부분 열로 전환되어지며 단지 1% 미만의 에너지만이 X-선을 발생시키는데 이용된다. 양극의 역할을 하는 Target Material(표적)로는 보통 *Cr*, *Fe*, *Co*, *Ni*, *Cu* 등이 사용된다. 표적에 도달한 고속의 전자는 원자핵의 coulomb장에 의해서 강하게 굴곡 되어 저지당한다. 이 때 전자의 운동에너지 중 일부가 전자기파의 형태로 방사하는데 이것이 X-선이다.

이 X-선은 보통 연속적인 파장을 가지고 있기 때문에 연속 X-선 혹은 제동 X-선(bremsstrahlung)이라 한다. 한편 운동에너지의 일부는 표적원자의 궤도전자를 쫓아내든지 아니면 높은 준위로 들뜨게 함으로써 에너지를 잃는다. 이때도 높은 궤도로부터 낮은 궤도로 전자가 떨어지면서 X-선이 방사되는데, 이 X-선은 궤도간의 에너지 차에 의해 주어지는 특정한 파장을 가진다. 그러므로 이 X-ray를 특성 X-선이라 부른다. 만일 하나의 전자가 coulomb힘에 의해서 완전히 저지되어 그의 운동에너지 E 가 하나의 x광자로 변한다면 그 X-선은 최대의 에너지를 가질 것이다. 보통 연속 X-선과 특성 X-선은 그림에서와 같이 함께 나타난다. 특성 X-선은 전자 궤도간의 에너지 차에 관계되는 것으로, 그 파장은 표적으로 사용된 원소에 특유하며 X-선관에 걸어진 전압과는 관계없다. 특성 X-선의 스펙트럼은 파장이 짧은 쪽으로부터 K, L, M등의 계열이 있다.



그림 4.19 X선 분석기

4.5.2 SEM 분석결과

(1) 실험 방법

토양오염 분석 시료 중 소형, 대형 모형토조 모래시료와 소형, 대형 모형토조 실트시료의 일부를 채취하여 SEM(500배, 1000배, 5000배)분석을 하였으며, 시료 입자를 확대하여 입자의 모습을 살펴 보았다.

(2) 모래시료

모래 시료의 경우 표 4.12와 같이 소형과 대형의 사진을 보면 입자 표면이 상당히 매끄러운 모습을 알 수 있고, 이는 일반적인 모래 알갱이 시료에서 나타는 SEM 분석 결과와 유사하며 특별히 어떠한 입자나 광물이 침전되어 있음을 육안으로 확인할 수 없었다.

표 4.12 모래에 대한 SEM 분석결과


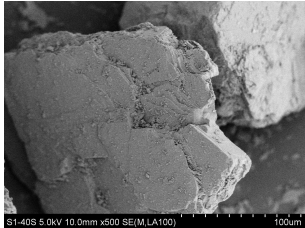
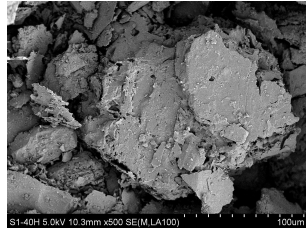
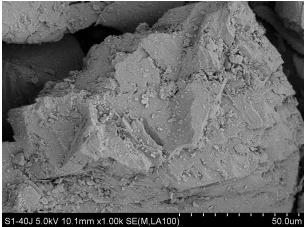
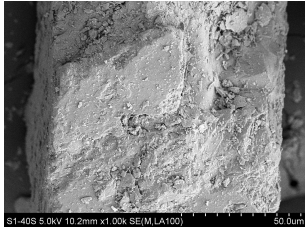
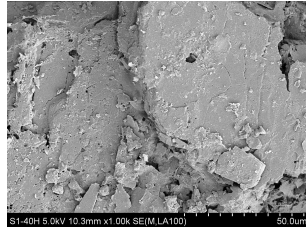
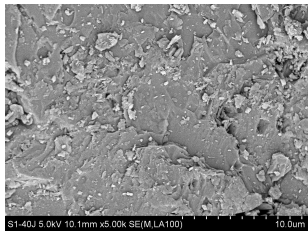
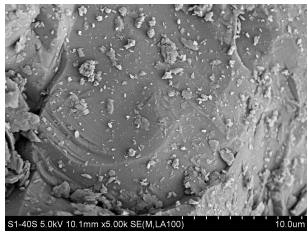
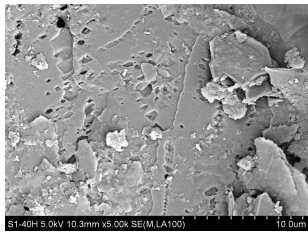


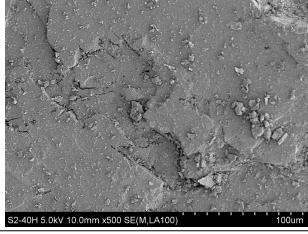
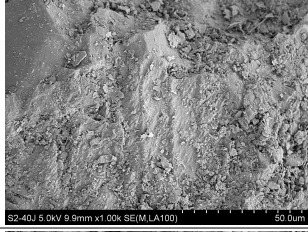
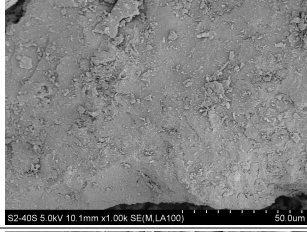
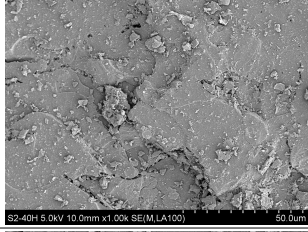
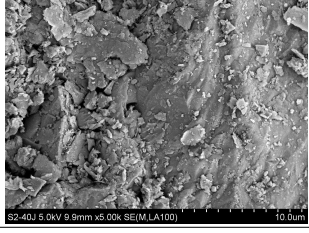
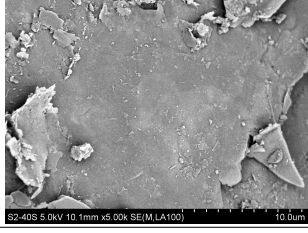
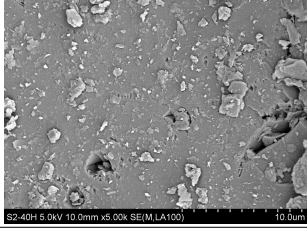
토조	비율	담수	산성	해수
소형	X500			
	X1000			

표 4.12 모래에 대한 SEM 분석결과(계속)

토 조	비율	담 수	산 정	해 수
소 형	X 5 0 0 0			
				
대 형	X 1 0 0 0			
				

(3) 실트시료

실트시료의 경우 표 4.13과 같이 소형과 대형의 사진을 보면 입자 표면이 상당히 모난 부분이 있음을 확인 할 수 있었고, 이는 일반적인 실트 시료에서 나타나는 SEM 분석 결과와 유사하게 입자표면이 거칠게 나타남을 확인할 수 있었다.

표 4.13 실트에 대한 SEM 분석결과

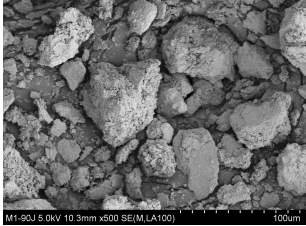
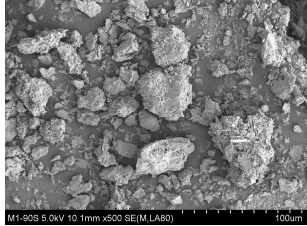
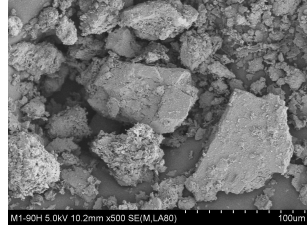
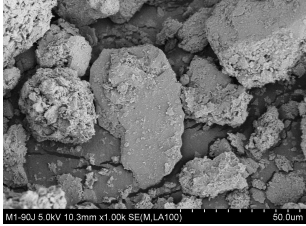
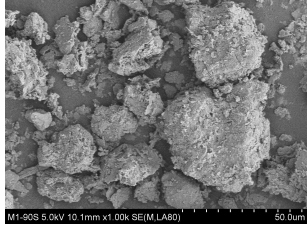
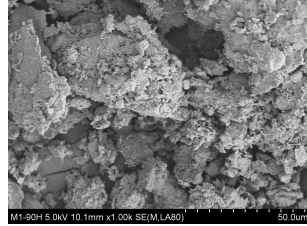
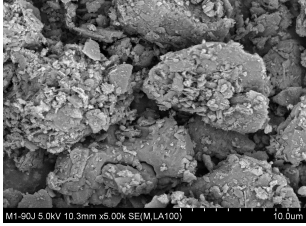
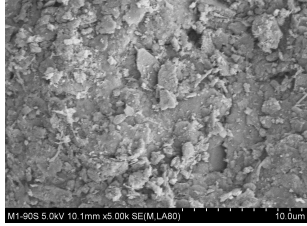
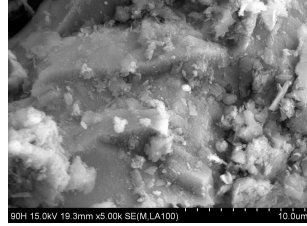
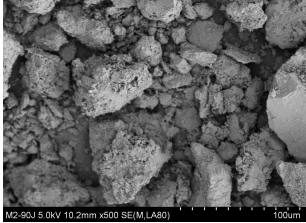
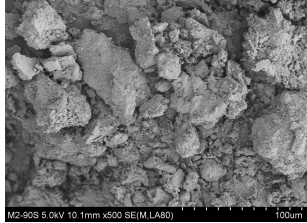
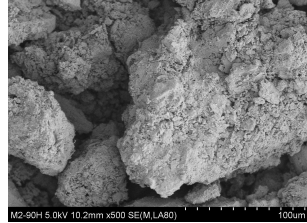
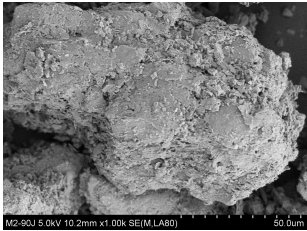
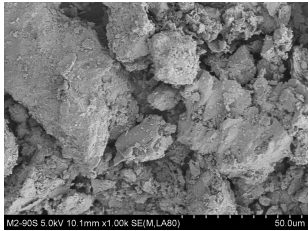
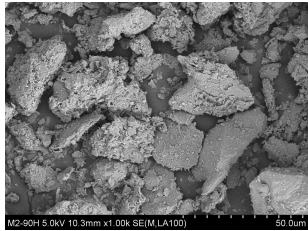
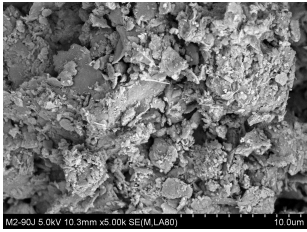
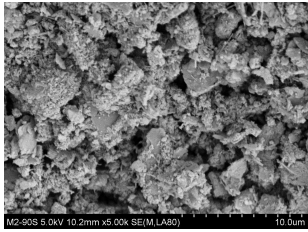
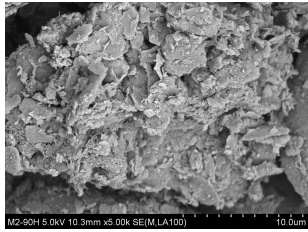
토 조	비율	담 수	산 성	해 수
소형	X500			
	X1000			
	X5000			
대형	X500			

표 4.13 실트에 대한 SEM 분석결과(계속)

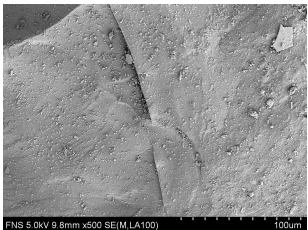
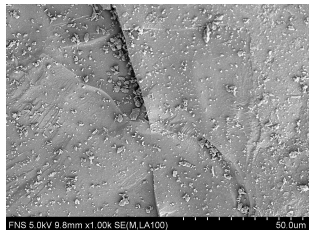
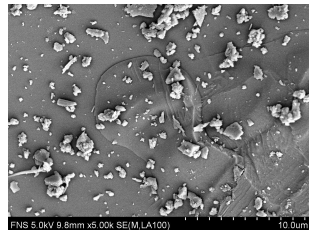
토 조	비율	담 수	산 성	해 수
대 형	X 1 0 0 0			
	X 5 0 0 0			

(4) FNS 시료

표 4.14는 FNS에 대한 SEM 분석결과이다.

FNS 시료 분석 결과, FNS의 입자의 표면은 모래시료와 매우 흡사함을 알 수 있으며 이는 잔골재로서의 역할을 할 수 있는 입자 구조를 나타냄을 확인 할 수 있었다. 또한 입자의 크기가 일반 모래와 실트 시료보다 상당히 크기 때문에 확대 단면에서 같은 배율로 측정함에도 불구하고 표면 전체가 확대됨을 확인 할 수 있었다.

표 4.14 FNS에 대한 SEM 분석결과

비율	X 500	X 1000	X 5000
F N S			

4.5.3 EDX 분석결과

(1) 실험 방법

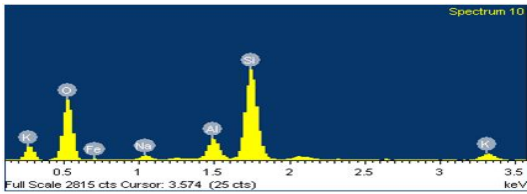
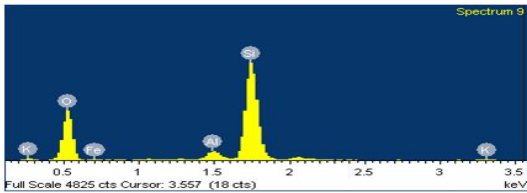
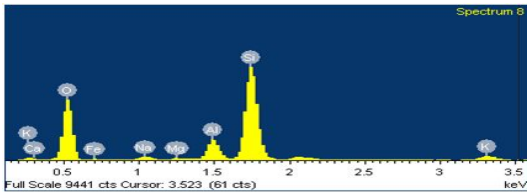
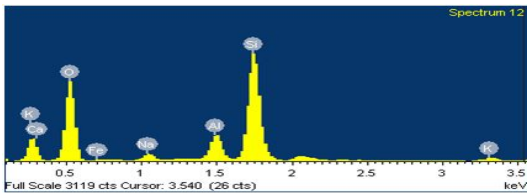
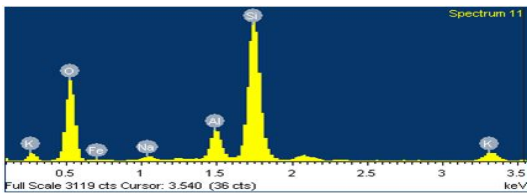
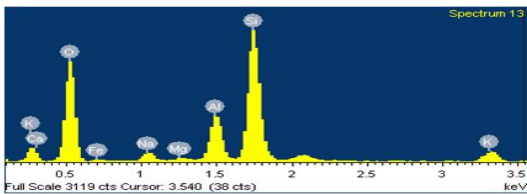
토양오염 분석 시료 중 소형, 대형 모형토조 모래시료와 소형, 대형 모형토조 실트시료의 일부를 채취하여 Energy Dispersive X-ray microanalysis (이하, EDX)분석을 하였으며 SEM 분석을 통해 확대된 시료의 입자 표면을 전자현미경으로 분석하여 시료 표면에 포함되어 있는 원소의 입자를 그래프로 표시하였다.

(2) 모래시료

표 4.15는 모래에 대한 EDX 분석표이다.

모래시료 분석 결과, Ca의 함유량은 1%내외로 미소하여 삭제하였으며, Si의 함유량이 많은 이유는 모래 성분 자체가 SiO_2 의 규소 물질로 이루어져 있기 때문이다. 특히, 해수에서 Mg의 성분이 발견 된 것은 해수 자체에 포함되어 있는 마그네슘으로 인하여 EDX 분석 상에 나타난 것으로 판단된다. 따라서 원지반 모래의 원소와 동일함으로 FNS의 용출로 인한 주변 토양은 양호한 것으로 분석되었다.

표 4.15 모래에 대한 EDX분석 결과

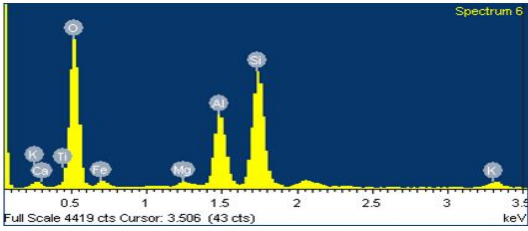
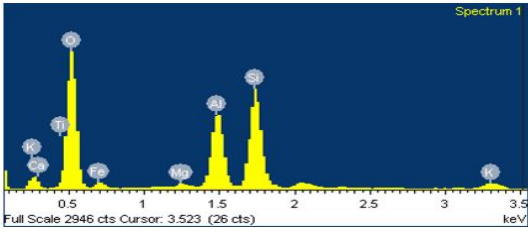
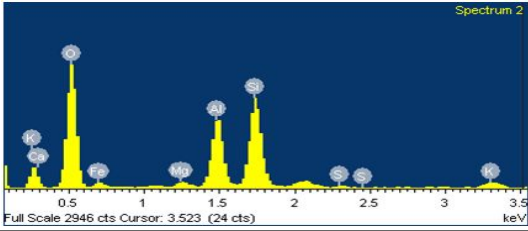
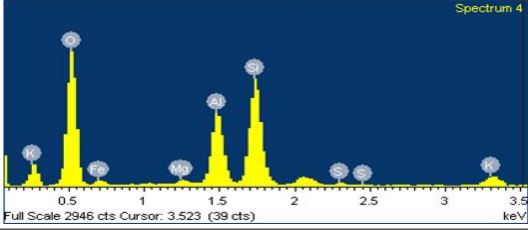
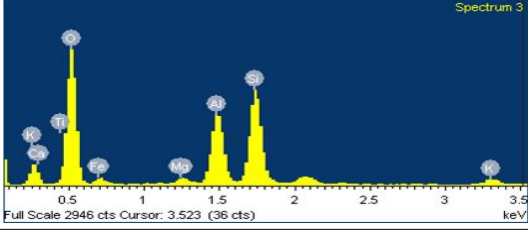
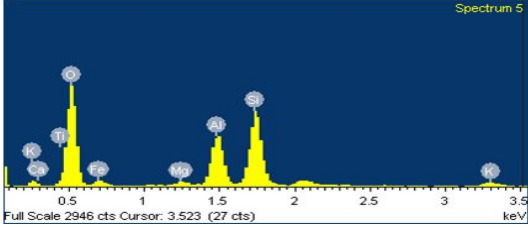
토 조		그 래 프	함 유 원 소	
소 형	담수		광물	함유량(%)
			O	53.18
			Na	1.97
	산성		광물	함유량(%)
			O	53.72
			Al	3.05
	해수		광물	함유량(%)
			O	53.06
			Na	1.35
대 형	담수		광물	함유량(%)
			O	54.90
			Na	2.55
	산성		광물	함유량(%)
			O	51.34
			Na	1.13
	해수		광물	함유량(%)
			O	52.18
			Na	2.13

(3) 실트시료

표 4.16은 실트에 대한 EDX 분석표이다.

실트시료 분석 결과, 모래시료와는 달리 Si의 함유량 보다는 Al, Fe, Mg가 실트시료의 주요 원소임을 EDX분석을 통해 확인 할 수 있었으며, 이는 모래시료보다 실트시료가 다양한 혼합물로 이루어져 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서 원지반 실트의 원소와 동일함으로 FNS의 용출로 인한 주변 토양에 대한 중금속오염은 양호한 것으로 분석되었다.

표 4.16 실트에 대한 EDX분석 결과

토 조		그 래 프	함 유 원 소	
소형	담수		광물	함유량(%)
			O	54.05
			Mg	0.82
			Al	11.00
			Si	20.21
			K	1.64
		Ti	0.86	
		Fe	10.79	
		합	100.00	
소형	산성		광물	함유량(%)
			O	55.13
			Mg	0.66
			Al	12.31
			Si	18.68
			K	1.72
		Ti	1.53	
		Fe	9.41	
		합	100.00	
소형	해수		광물	함유량(%)
			O	51.50
			Mg	1.05
			Al	12.42
			Si	18.81
			K	1.96
		Fe	12.58	
		합	100.00	
대형	담수		광물	함유량(%)
			O	51.71
			Mg	0.64
			Al	11.86
			Si	20.31
			K	2.89
		Fe	12.02	
		합	100.00	
대형	산성		광물	함유량(%)
			O	54.87
			Mg	1.10
			Al	12.01
			Si	18.84
			K	1.61
		Ti	0.79	
		Fe	10.22	
		합	100.00	
대형	해수		광물	함유량(%)
			O	52.21
			Mg	0.90
			Al	10.94
			Si	18.40
			K	1.36
		Ti	0.86	
		Fe	13.40	
		합	100.00	

(4) FNS 시료

표 4.17은 FNS에 대한 EDX 분석결과이다.

FNS 시료 분석 결과, 주요 구성 원소는 Si와 Mg가 다량 포함되어 있음을 확인 할 수 있었다. 이는 선행연구 추용식(2010) 등으로부터 용출된 이온 중 Mg 이온만을 분리하여 화합물로 제조하는데 FNS가 사용됨을 확인 할 수 있었으며, Mg를 제외한 나머지 원소는 모래시료와 동일함을 확인함으로써 모래시료와 유사한 원소로 이루어져 있음을 확인할 수 있었다.

표 4.17 FNS에 대한 EDX분석 결과

시 료	그 래 프	함 유 원 소	
		광물	함유량(%)
FNS		O	50.59
		Na	0.89
		Mg	15.57
		Al	0.96
		Si	24.67
		Ca	1.72
		Fe	5.60
		합	100.00

4.5.4 XRD 분석결과

(1) 실험 방법

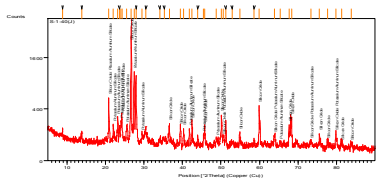
토양오염 분석 시료 중 소형, 대형 모형토조 모래시료와 소형, 대형 모형토조 실트시료의 일부를 채취하여 XRD분석을 하였으며 X선 회절기를 통해 시료가 가지고 있는 광물의 성분을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

(2) 모래시료

표 4.18은 모래에 대한 XRD 분석표이다.

모래시료 분석 결과, SiO_2 (Silicon Oxide)와 $KAl_1Si_3O_8$ (Aluminum Silicon Oxide) 광물로 이루어진 시료이며 대부분이 규소 광물로 이루어져 있기 때문에 화학식에서도 이와 동일하게 나타난 것으로 판단된다. 또한 규소 광물 자체가 여러 광물들과 결합력이 좋고 변질이 쉬운 물질이므로 흙 속에 있는 여러 광물과 혼합되어 나타난 것으로 판단된다. 따라서 원지반 모래의 광물과 동일함으로 FNS의 용출로 인한 주변 토양에 대한 중금속오염은 양호한 것으로 분석되었다.

표 4.18 모래에 대한 XRD분석 결과

그 래 프	화 학 식	광 물 명 칭
	SiO_2	Silicon Oxide
	$KAl_1Si_3O_8$	Aluminum Silicon Oxide

(3) 실트시료

표 4.19는 실트에 대한 XRD 분석표이다.

실트시료 분석 결과, SiO_2 (Silicon Oxide)와 $K_{0.9}Na_{0.1}AlSi_3O_8$ (Sodium Aluminum Silicate) 광물로 이루어진 시료이며 대부분이 규소 광물로 이루어져 있기 때문에 화학식에서도 이와 동일하게 나타난 것으로 판단된다. 또한 규소 광물 자체가 여러 광물들과 결합력이 좋고 변질이 쉬운 물질이므로 흙 속에 있는 여러 광물과 혼합되어 나타난 것으로 판단된다. 따라서 원지반 실트의 광물과 동일함으로 FNS의 용출로 인한 주변

토양에 대한 중금속오염은 양호한 것으로 분석되었다.

표 4.19 실트에 대한 XRD분석 결과

그 래 프	화 학 식	광 물 명 칭
	SiO_2	Silicon Oxide
	$K_{0.9}Na_{0.1}AlSi_3O_8$	Sodium Aluminum Silicate

(4) FNS 시료

표 4.20은 FNS에 대한 XRD 분석표이다.

FNS 분석 결과, $MgSiO_3$ (Magnesium Silicate)와 $NaAl(Si_2O_6)$ (Sodium Aluminum Silicate) 광물로 이루어진 시료이며, 대부분이 규소 광물로 이루어져 있기 때문에 화학식에서도 이와 동일하게 나타난 것으로 판단된다. 또한 FNS에서 함유율이 많은 Mg 와 혼합하여 Magnesium Silicate 광물이 생성됨을 확인할 수 있다.

표 4.20 FNS에 대한 XRD분석 결과

시 료	그 래 프	화 학 식	광 물 명 칭
FNS		$MgSiO_3$	Magnesium Silicate
		$NaAl(Si_2O_6)$	Sodium Aluminum Silicate

4.6 어독성 실험

4.6.1 어독성 실험의 개요

지반 개량제 및 그라우트제의 환경영향을 평가하기 위한 방법으로서는 일본에서 약액 주입공법에 의한 지반개량 시 고결체로부터 약액의 성분이 용탈되어 주변 토양 및 지하수를 오염시킨 사례가 보고되고 있는 바, 주입공사 시 그라우팅 용액이 주변 환경에 미치는 영향을 평가하기 위한 방법이다.

1998년 천병식 등에 따르면 국내에서는 약액주입공법에 의한 지반개량 시 고결체로부터 약액의 성분이 용탈됨으로써 주변의 토양 및 지하수를 오염시킨 사례가 보고되고 있으며 환경오염을 고려하면서 불가피하게 주입공사를 수행하여야 할 경우 주변 환경의 영향을 고려하여 적절한 공법과 재료를 선택하도록 법적인 근거를 마련해야하지만, 국내에서는 지금까지 약액주입공법에 의한 피해사례가 보고된 적이 없고 외국의 사례를 통해 추정할 수밖에 없다.

본 연구에서는 그라우트체로부터 용출되는 유독성 물질로 인한 오염도를 측정하기 위해서 관련규정인 KS M 0111에 의하면 Lethal Concentration (LC) 50은 어류를 급성 독 물질이 함유되어 있는 폐수의 희석액 중에 기르고, 그 사이에 공시어의 50%가 살아남는 폐수의 농도를 나타내는 것으로 규정되어 있다. 보통시멘트의 고결체와 같은 체적의 FNS를 수조의 바닥에 설치하고 용탈되는 알칼리에 의한 어독성을 측정함으로써 수질오염에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

4.6.2 어독성 실험방법

(1) KS M 0111 규정에 의한 LC 50의 실험방법

1) 실험방법

- ① 실험수조는 유리 및 스테인리스 스틸로 용량 50L 이상
- ② 공기송풍 + 수온은 25°C 유지토록 하고 자동온도조절장치 부착
- ③ 공시어는 환경 및 실험실 생존조건에 적합한 것으로 선택 ex) 금붕어
- ④ pH 미터는 경과시간에 따라 pH 측정이 용이하도록 포터블형 사용
- ⑤ 충분한 산소공급을 위해 blower를 부착

⑥ 그라우트재 시료의 시편을 표면적으로 일정하게 유지되도록 수조에 넣고 실험

2) 어독성 실험결과 및 분석

- ① 초기에는 pH가 증가한 후 일정시간 경과 후 감소 : 토양의 완충 및 먹이 혹은 공시어의 배설물의 부패 등으로 인한 유기산의 화학작용
- ② 공시어의 숫자 유지 : 알칼리 용탈에 의한 오염도가 적은 것

3) 결과표시

- ① pH-time 그래프 (횡축은 time, 종축은 pH)
- ② 공시어수 변화-time 그래프 (변화가 없어야 환경에 무해함)

(2) 실험 시료의 배합비

지반보강공법으로 국내·외에서 가장 많이 활용되고 있는 LW공법은 응결속도를 조절하는 A액과 경화재인 B액으로 구성되어 있다.

조합 1은 순수 시멘트와 물의 비율을 1:1 혼합비로 시멘트는 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

조합 2는 FNS 슬래그를 사용하여 종이컵에 부피의 체적을 맞춰 사용하였다.

실험시료는 시멘트의 경우 체적 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 의 시편 11개($1,375\text{cm}^3$)를 제작하였고, FNS의 슬래그는 D 6cm \times H 6.5의 시편 7.5개($1,375\text{cm}^3$)를 종이컵으로 제작하였다. 이에 본 실험에 적용된 그라우트재 조합별 배합비는 표 4.21과 같고 그림 4.20은 고결체의 제작모습이다.

표 4.21 적용된 그라우트재 조합별 배합비

구분	그라우트재의 종류	
	1	시멘트(g)
1,375		1,375
2	FNS(g)	
	1,650	



(a) 시멘트 공시체 제작



(b) FNS 체적 계산

그림 4.20 고결체

(3) 실험장치 및 pH측정 방법

그림 4.21은 어항수조의 전경이다.

실험수조는 일반 어항수조(밖에서 관찰이 용이한 유리체를 사용)를 사용하였고 공시어의 생존을 위하여 필요한 공간으로서 용량은 약 50ℓ(길이(L) 63cm × 폭(B) 33cm × 높이(H) 40cm) 이상인 것으로 하며, 충분한 산소를 공급하기 위해 blower를 설치하였고, 공기송풍이 가능한 크기의 수조를 제작하였다.



그림 4.21 어항수조

공시어는 수운, 먹이, 취급 등 실험실 내의 생존조건에 적합한 것으로 크기는 약 5~6cm로 금붕어를 사용하였고, 실험 시에 1개조 20마리를 사용하였다. 또한 경과시간에 따라 pH를 측정정하기 위해 그림 4.22와 같은 pH meter를 사용하였다.

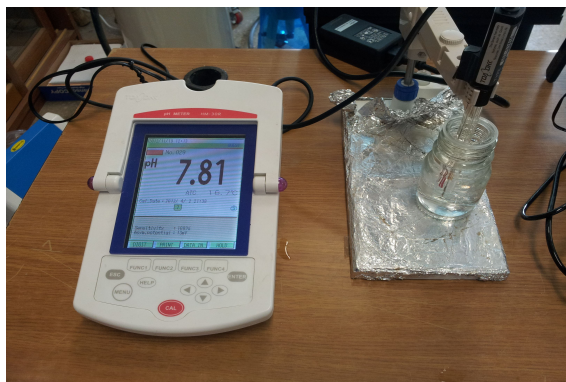


그림 4.22 pH 측정기

(4) 실험방법

상기 실험방법에 따라 실시한 각 과정별 장면은 그림 4.23(a)~(d)와 같다.

공시어는 실험 전 수조에 50ℓ의 물을 부어 실험 시 수온 및 수질에 적응시킨다. 수조내의 산소가 공급되도록 blower를 켜고 pH의 변화를 시간에 따라 측정하였다. 실험 시작 후 일정 시간 0h, 4h, 8h, 24h, 48h, 72h 마다 공시어의 상태변화를 관찰하면서 어독성 실험 일지에 기록하였고 공시어의 치사 유무를 수시로 관찰하고 치사한 공시어는 되도록 빨리 제거하였다.



(a) 시멘트 공시체



(b) FNS 공시체



(c) 공시어 방류



(d) 어독성 평가

그림 4.23 공시어(금붕어, 평균길이 약 5~6cm, 20마리) 시험 전경

4.6.3 어독성 실험결과

표 4.22는 시멘트, FNS의 시간경과에 따른 pH 변화 및 치사어(율)를 나타낸 표이고, 그림 4.24는 시간경과에 따른 시멘트 및 FNS의 재료 용탈에 대한 pH 변화를 나타낸 그래프이다.

본 연구에서는 각 실험으로부터 0, 4, 8, 24, 48, 72시간의 pH와 치사율을 구하고 공시어가 50% 치사하는 pH를 검토하였다. 이는 시멘트와 FNS를 비교하여 용탈로 인한 pH 변화를 측정 환경오염 정도를 확인할 수 있는 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다. 초기 pH는 공시체의 알칼리 용탈이 거의 없는 시점에서의 수조내의 물의 pH를 측정하였고, pH는 7.4~7.8 정도였다

순수한 포트랜드 시멘트(W/C 1:1)의 경우 최대 pH는 10.22까지 올라가 공시어의 활동성이 둔해지고 24시간 이후 1마리의 치사가 있었다. 그러나 72시간 이후 빠르게 회복되어 초기 pH와 비슷한 양상을 나타내어 공시어의 활동성이 다시 회복됨을 확인할 수 있었다. 반면에 FNS의 경우 최대 pH는 8.14로 pH 상승효과는 시멘트에 비해 적음을 확인할 수 있었다. 다음은 그라우트재 조합별로 시간에 따른 pH 변화 및 치사하는 공시어 수를 측정한 결과이다.

표 4.22 그라우트재의 시간경과에 따른 pH 변화 및 치사어(율)

조합	그라우트재	조건	초기	4h	8h	24h	48h	72h
1	시멘트	pH	7.57	10.07	10.22	10.22	9.12	8.55
		치사어수	0	0	0	1	1	1
		치사율(%)	0	0	0	5	5	5
2	FNS	pH	7.51	7.96	8.14	8.14	8.12	8.03
		치사어수	0	0	0	0	0	0
		치사율(%)	0	0	0	0	0	0

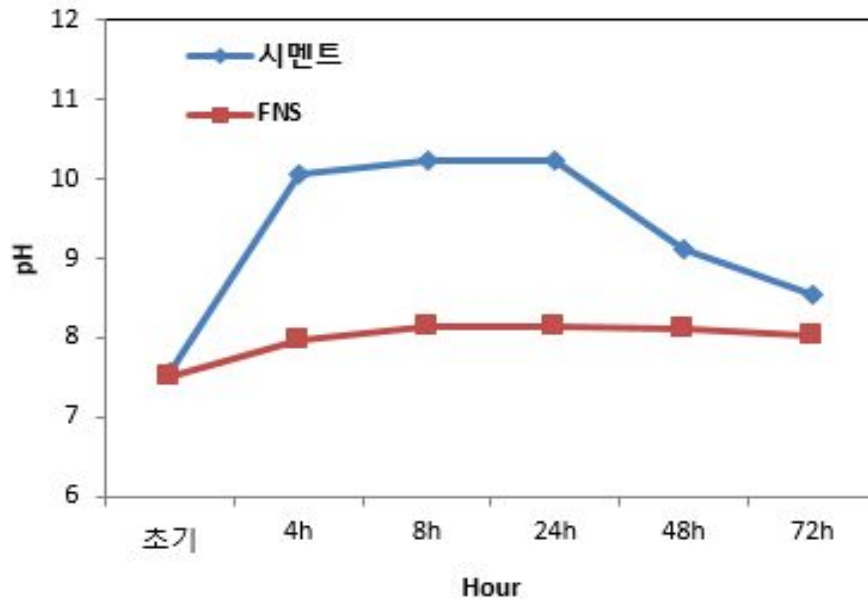


그림 4.24 시간경과에 따른 그라우트재 용탈에 대한 pH 변화

제 5 장 결 론

본 연구에서는 FNS를 미분말화 하여 그라우트체로 사용하기 위해 규산소다 3호 : 물의 비율을 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70으로 하고, 시멘트 : FNS 미분말의 비율을 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40으로 호모겔(Homogel) 공시체에 혼합 성형하여 시간경과에 따른 일축압축강도와 겔타임(Gel-time)을 분석함으로 배합비를 결정하고자 하였다. 또한 FNS를 그라우트체로 사용할 경우 지반에 매립되어야 하기 때문에 지반에 매립되었을 경우 FNS가 지반에 미치는 환경성 평가에 대한 실험을 수행하여 이를 분석한 결과 다음과 같다.

1. 시멘트 : FNS 미분말(100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40)의 각 배합비 별 겔타임(Gel-time)을 측정한 결과, 규산소다 3호의 함유량이 증가함에 따라 겔타임(Gel-time)이 감소(급결성 겔타임)하여 3일 강도에서는 규산소다 3호 함유량이 50%에서 가장 큰 일축압축강도 값을 나타내었다. 28일 강도에서는 규산소다 3호 함유량이 30%일 때 가장 크게 나타났다. 따라서 규산소다 3호의 함유량은 급결시 50%, 완결시 30%를 배합하는 것이 적정할 것으로 판단된다.
2. 시멘트 : FNS 미분말(100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40)의 각 배합비 별 일축압축강도를 분석한 결과, 시멘트를 대체하여 FNS 미분말을 10%정도 배합할 경우 시멘트 강도 100% 대비 약 85~92%로 강도가 감소되는 경향을 확인하였고, 10% 이상 배합할 경우 강도저하 폭이 크게 나타남을 확인하였다. 그러나 현장에서 요구하는 차수 그라우팅의 강도는 일반적으로 $0.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상이므로 최적 배합비는 10%이나 상황에 따라서 40%까지 대체자원으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 강도증진을 위한 배합비를 고려한다면 추가적인 혼화재를 사용해야 할 것으로 판단된다.
3. FNS 미분말을 혼입한 투수실험결과, 시멘트 : FNS 미분말 100 : 0 대비 시멘트 : FNS 미분말 60 : 40에서 20배 이상의 차수효과를 확인하였다. 이는 FNS 미분말의 가는 입자가 공극을 메워 차수효과가 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 현장에서 차수 그라우트의 기준이 일반적으로 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm}/\text{sec}$ 이하를 기준으로 하므로 C :

F가 80 : 20, 60 : 40에서 적절한 차수가 될 것으로 판단되며 기존 차수 그라우트 재 보다 월등히 차수효과가 높았음을 확인할 수 있었다.

4. 모형토조의 담수, 산성, 해수의 시간에 따른 pH 분석한 결과, 일반적으로 실트질 시료에서 pH가 높게 측정이 되었으며, 이는 실트질 시료의 공극이 작아 FNS의 오염물질이 공극사이를 통과하지 못하고 계속적으로 축적됨으로 pH가 높게 나타난 것으로 판단된다. 모래질 시료에서는 대부분 pH가 낮게 나타났다. 특히 산성의 경우 초기의 낮은 pH 5.5 임에도 불구하고 하루만에 pH가 7.5를 상회하여 산성의 정도가 낮은 지역에 FNS를 사용하게 된다면 중성의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.
5. 모형토조의 토양오염을 분석한 결과, 검출된 중금속이 1지역 우려기준 허용범위에 있어 FNS 매립시 FNS의 용출로 인한 주변 토양에 대한 중금속오염은 양호한 수준으로 분석되었다. 실트의 경우 일반적으로 원지반과 비교하였을 때에 토양오염이 약간 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 상회하는 것으로 판단된다.
6. SEM 분석 결과, FNS의 표면은 모래 표면과 매우 유사한 표면을 가졌으며, EDX 분석결과, FNS의 입자표면에 나타난 원소는 대부분 Mg로 나타났고, 소형, 대형토조 시료에서 Mg의 양은 매우 낮게 나타났으므로 FNS의 용출로 인한 토양에 대한 오염은 거의 없는 것으로 분석되었다. XRD 분석결과, FNS의 주요 광물은 Magnesium Silicate로 나타났으며, 규소 광물 자체가 여러 광물들과 결합력이 좋고 변질이 쉬운 물질이나 소형, 대형토조 시료에서 Magnesium Silicate 광물은 발견되지 않았으므로 FNS의 용출로 인한 중금속오염은 양호한 것으로 분석되었다.
7. 어독성 실험을 수행한 결과, 시멘트의 경우 24시간이 지난 후 pH는 10.22까지 높아져 공시어가 한 마리 치사되고 공시어의 활동성이 둔해짐을 확인 할 수 있었다. 반면에 FNS의 경우 최대 pH는 8.14로서 pH 상승효과는 시멘트 보다 적었다.

참고문헌

1. 김우재, 홍석범, 김필성, 조봉석(2011), “페로니켈슬래그 잔골재 혼입 콘크리트에 대한 기초성능평가”, 한국콘크리트학회 2011년 봄 학술대회 논문집, pp.453~454.
2. 김우재, 홍석범, 김필성, 조봉석(2012), “페로니켈슬래그 잔골재 혼입율 및 요구강도에 따른 콘크리트 성능평가”, 한국콘크리트학회 2012년 봄 학술대회 논문집, pp.49~50.
3. 김종선, 이인모, 이문선, 최향석(2009), “점도변화와 흡착현상을 고려한 시멘트계 그라우트재의 새로운 침투 기준”, 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp.154~163.
4. 김진춘(2007), MSG공법 : 설계-시공 지침서, MSG공법협의회 보고서
5. 김필성(2013), 페로니켈슬래그 잔골재를 활용한 친환경 콘크리트의 성능평가에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교
6. 김형석, 최슬우, 이광명, 최세진(2015), “페로니켈슬래그 잔골재를 사용한 증기양생 콘크리트의 압축강도 특성”, 한국콘크리트학회 2015년 봄 학술대회 논문집, Vol. 27, No. 1, pp.541~542.
7. 문인중, 김병일, 허준, 최용성, 최용기(2016), “자기치유 기능을 이용하는 SSG공법 공학적 특성”, 한국지반공학회논문집, Vol. 35, No. 3, pp.29~37.
8. 박만석(2011), 수쇄 페로니켈슬래그 잔골재 콘크리트의 품질특성에 관한 연구, 세명대학교 대학원, 석사학위논문
9. 박상순, 소병탁, 임법규, 정세영, 서현석(2016), “페로니켈슬래그 미분말을 혼합한 모르타르의 강도 및 내구성 평가”, 한국콘크리트학회 2016년 봄 학술대회 논문집, 제 29권, 제 1호, pp.645~646.
10. 박상순(2016), “페로니켈슬래그 미분말 혼합 페이스트의 화학적 저항성 평가”, 한국콘크리트학회 2016년 가을 학술대회 논문집, 제 28권, 제 2호, pp.419~420.
11. 박원춘, 문경주, 정종주(2004), “초미립자 시멘트의 지반 주입재로서의 특성 평가”, 한국콘크리트학회 2004년 가을 학술발표회 논문집, pp.303~306.
12. 박재임, 배수호, 유재원, 최연왕, 이광명(2010), “페로니켈 피재슬래그 골재를 활용한 콘크리트의 특성”, 한국콘크리트학회 2010년 가을 학술대회 논문집, pp.215~216.
13. 아키야마 준(1986), “콘크리트용 세골재로 페로니켈슬래그의 활용”, 토목학회 논문

집, Vol. 4, pp.603~608.

14. 안진현(2009), 공동터널에서 부분 노출 프로펠러의 모형시험을 위한 선행 연구, 석사학위논문, 한양대학교
15. 이강호(2010), 초미립 시멘트를 이용한 강관다단 그라우팅 주입재 연구, 석사학위논문, 배재대학교
16. 이강호(2013), 슬래그 시멘트를 이용한 터널보강용 주입재에 관한 연구, 박사학위논문, 배재대학교
17. 이상홍(2013), 니켈 환원을 향상을 위한 최적 슬래그 조성에 관한 연구, 순천대학교 대학원, 박사학위논문
18. 임춘호(2017), 바이오그라우팅공법의 주입재 배합비에 따른 적용성, 조선대학교 대학원, 박사학위논문
19. 최상원, 김빅토르, 장우석, 김은영(2007), “국내외 철강슬래그의 발생 및 이용 현황”, 콘크리트학회지 제 19권, 제 6호, pp.1~6.
20. 최연왕, 박만석, 오성록, 이광명, 김지상, 조봉석(2010), “수쇄 페로니켈슬래그 잔골재 콘크리트의 현장 적용성 평가”, 한국콘크리트학회 2010년 가을 학술대회 논문집, pp.217~218.
21. 최연왕, 박만석, 이광명, 배수호, 김지상(2011), “수쇄 페로니켈슬래그 잔골재를 이용한 콘크리트의 최적 혼합률 및 내구 특성 평가”, 한국건설순환자원학회, 제 13권, pp.120~127.
22. 최현규, 이재만, 홍지훈, 서기환, 박민용(2017), “페로니켈슬래그 미분말의 분말도 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성”, 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 제 29권, 제 1호, pp.491~492.
23. 추용식, 임유리, 박홍범, 송훈, 이종규, 이승호(2010), “페로니켈 슬래그로부터 Mg 이온의 용출특성과 화합물 제조”, 한국세라믹학회, 제 47권, 제 6호, pp.613~617.
24. 한국전자재시험연구원(2009), “콘크리트용 페로니켈슬래그 골재의 규격화 기술개발”, 연구보고서
25. 한국산업규격(2009), KS F 2790 콘크리트용 페로니켈슬래그 골재
26. 한국콘크리트학회(2011), “페로니켈슬래그 골재를 활용한 콘크리트 시공지침 개발”, 연구보고서
27. Aba, M., Sakoi, Y., Shoya, M., Tsukinaga, Y. and Nagataki, S. (2010), “Properties of Concrete Incorporating Ferronickel Slag as Coarse Aggregates”,

- Concrete Research and Technology, Vol. 21, No. 3, pp.63~75.
28. Ahn, T. H. and Kishi, T. (2010), "Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures", Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 8, No. 2, 2010, pp.171~186.
 29. Ashish, K. S. and Prabir, K. S. (2017), "Compressive Strength of Mortar Containing Ferronickel Slag as Replacement of Natural Sand", Procedia Engineering, Vol. 171, pp.689~694.
 30. Breugel, K. V. (2007), "Is there a market for self-healing cement-based materials?" Proceeding of the 1st International Conference on Self-Healing Materials, Netherlands, April, pp.18~20.
 31. Dejong, J. T., Fritzges, M. B. and Nüsslein, K.(2006). "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 11, pp. 1381~1392.
 32. Dejong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C. and Nelson, D. C.(2010), "Bio-mediated Soil Improvement", Journal of Ecological Engineering, Vol. 36, pp.197~210.
 33. Hearn, N. (1999), "Self-healing, Autogenous Healing and Continued Hydration: What is the Difference?", Materials and Structures, Vol. 31, pp.563~567.
 34. JIS A 5011 (2013), Slag Aggregate for Concrete : Part 1
 35. Katsiotis, N. S., Tsakiridis, P. E., Velissarios, D., Katsiotis, M. S., Alhassan, S. M. and Beazi, M. (2015), "Utilization of Ferronickel Slag as Additive in Portland Cement: A Hydration Leaching Study", Waste and Biomass Valorization, Vol. 6, No. 2, pp.177~189.
 36. Lemonis, N., Tsakiridis, P. E., Katsiotis, N. S., Antiohos, S., Papageorgiou, D., Katsiotis, M. S. and Beazi-Katsioti, M. (2015), "Hydration Study of Ternary Blended Cements Containing Ferronickel Slag and Natural Pozzolan", Construction and Building Materials, Vol. 81, No. 15, pp.130~139.
 37. Marion, A., Laeve, M. D. and Grauw, A. D. (2005), "Study of the Leaching Behaviour of Paving Concretes : Quantification of Heavy Metal Content in Leachate Issued from Tank Test Using Demineralized Water", Cement and

- Concrete Research, Vol. 35, No. 5, pp.951~957.
38. 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.
 39. Muhammad A. R., Prabir, K. S., Faiz, U. A. S. and Ashish, K. S. (2017), "Soundness and Compressive Strength of Portland Cement Blended with Ground Granulated Ferronickel Slag", Construction and Building Materials, Vol. 140, pp.194~202.
 40. Paassen, L. A., Harkes, M. P., Zwieter, G. A., Zon, W. H., Star, W. R. L., and Loosdrecht, M. C. M.(2009), "Scale Up of Biogrout: A Biological Ground Reinforcement Method", Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.2328~2333.
 41. Reinhardt, H., W., Jooss, M. (2003), "Permeability and Self-healing of Cracked Concrete as a Function of Temperature and Crack Width", Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp.981~985.
 42. Sakoi, Y., Aba, M., Tsukinaga, Y. and Nagataki, S. (2013), "Properties of Concrete Used in Ferronickel Slag Aggregate", 3th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Japan, August, pp.1~6.
 43. Sato, T., Watanabe, K., Ota, A., Aba, M. and Sakoi, Y. (2011), "Influence of Excessive bleeding on Frost Susceptibility of Concrete Incorporating Ferronickel Slag as Aggregates", 36th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, August, pp. 14~16.
 44. Soon, N. G., Lee, L. M., Khun, T. C. and Ling, H. S.(2013), "Improvements in Engineering Properties of Soils through Microbial-Induced Calcite Precipitation", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 4, pp.718~728.
 45. Wang, G. and Emery, J. (2004), "Technology of Slag Utilization in Highway Construction", Environmental Benefits of In-situ Material Recycling and Strengthening Session, Canada, September, pp.1~9.
 46. Whiffin, V. S., Paasen, L. A. and Harkes, M. P.(2007). "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", Geomicrobiology Journal, Vol. 24, No. 5, pp.417~423.

47. White, S., R., Sottos, N., R., Geubelle, P., H., Moore, J., S., Kessler, M., R., Sriram, S., R., Brown, E., N. and Viswanathan, S. (2001), "Autonomic Healing of Polymer Composites, Nature", Vol. 409, pp.794~797.
48. Zaharaki, D. and Komnitsas, K. (2012), "Long Term Behaviour of Ferronickel Slag Inorganic Polymers in Various Environments", Fresenius Environ. Bull. Vol. 21, No. 8, pp.2436~2440.