

페로니켈 슬래그 미분말을 이용한 유동성 뒤채움재 특성

이관호

국립공주대학교 건설환경공학부

Characterization of Flowable Fill with Ferro-Nickel Slag Dust

Kwan-Ho Lee

Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

요 약 본 연구의 목적은 스테인레스 강 제조시 발생하는 페로니켈 슬래그를 파쇄한 미분말을 이용하여 지하매설물용 유동성 뒤채움재로 활용하기 위한 것이다. 페로니켈 슬래그 미분말을 이용한 유동성 뒤채움재의 최적배합설계를 수행하였다. 실험용 조합은 Case A (모래), Case B (흙) 등 2개 조합을 이용하였다. Case A의 최적배합비는 모래(58.4%), 페로니켈 슬래그 미분말 (21.6%), 시멘트(1.8%), 물(18.2%)이고, Case B의 최적배합비는 흙(53.0%), 페로니켈 슬래그 미분말 (20.0%), 시멘트 (1.7%), 물(25.3%)로 결정되었다. 전체적으로 일반모래에 페로니켈슬래그 미분말을 혼합한 Case A의 일축압축강도가 흙을 이용한 Case B에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 또한, 시편의 강도는 양생시간에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 전체적으로 양생시간에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 일반모래를 주재료로 이용한 유동성뒤채움재의 일축압축강도가 흙을 주재료로 이용한 혼합재료에 비해 상대적으로 크게 나타났다. Case A의 경우 양생시간 7일, 14일 및 28일에 따른 일축압축강도의 범위는 각각 0.17-0.33 MPa, 0.21-0.39 MPa, 0.19-0.40 MPa 수준으로 평가되었다. 실험결과로부터 Case A3 정도면 FNS미분말과 시멘트 혼합비를 가장 적정한 것으로 판단되었다. 흙을 주재료로 이용한 Case B의 경우도 Case A와 전체적으로 유사한 경향을 나타냈다. FNS미분말의 환경유해성 평가를 위한 용출시험결과, 환경에 유해한 물질의 용출은 없는 것으로 나타났다.

Abstract The aim of this study was to utilize ferronickel slag produced in the manufacture of stainless steel as a flowable backfill material for underground use using crushed fine powder. Experimental combinations were made using two components: Case A (sand) and Case B (soil). The optimal mixing ratio of Case A was sand (58.4%), ferronickel slag fine powder (21.6%), cement (1.8%), and water (18.2%). In the case of B, the optimal mixing ratio was determined to be soil (53.0%), ferronickel slag fine powder (20.0%), cement (1.7%), and water (25.3%). The uniaxial compressive strength of case A, which is a mixture of ordinary sand and ferronickel slag powder, was relatively larger than that of case B using soil. In addition, the strength of the specimen increased with increasing curing time. The uniaxial compressive strength tended to increase with increasing curing time. In addition, the unconfined compression strength of the fluid backfill material using common sand as the main material was relatively larger than that of the mixed material using soil as the main material. In case A, the uniaxial compressive strength ranged from 0.17-0.33 MPa, 0.21-0.39 MPa, and 0.19-0.40 MPa, respectively, at curing times of 7, 14, and 28 days. From the experimental results, it was concluded that the ratio of FNS powder and cement mixture was the most appropriate for Case A3. Case B, which used soil as the main material, showed a similar tendency to Case A. As a result of the dissolution test for evaluating the environmental harm of the FNS fine powder, there was no dissolution of substances harmful to the environment.

Keywords : Ferro-Nickel Slag, Flowable Backfill, Optimim Mixing Ratio, Compressive Strength, Flowability

본 논문은 국토교통과학기술원 2016년 국토교통기술지역특성화 사업(충청권) 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kwan-Ho Lee(Kongju National University)

Tel: +82-41-521-9313 email: kholee@kongju.ac.kr

Received January 31, 2017

Revised (1st March 31, 2017, 2nd April 12, 2017)

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

1. 서론

페로니켈 슬래그(Ferro-Nickel Slag, FNS)는 페로니켈 생산에 사용된 원료인 니켈광석, 유연탄 등이 고온에서 용융되어 페로니켈과 분리된 후 생산되는 일종의 산업부산물이다. 페로니켈 슬래그는 물리적, 화학적 성질이 우수한 친환경적 자원으로 국내에서는 주로 콘크리트용 골재(KS F 2790), 주물사, 연마재, 마문암 대체재 등으로 활용되고 있다. FNS미분말은 FNS를 콘크리트용 잔골재 등으로 가공하는 과정에서 발생하며, 질량으로 약 10% 정도 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 FNS 미분말은 현재 대부분 폐기하고 있는 실정이다.

국내에서는 페로니켈 원료 공급사의 과점화 및 중국의 수요급증으로 인하여 주원료인 니켈가격의 급상승에 따른 대책으로 2008년 페로니켈 제련소가 설립되면서 연간 15만톤의 페로니켈 생산체제를 갖추었으며, 2012년 연간 7만 5000톤의 새로운 페로니켈 제련공장을 설립되었다. 따라서 페로니켈 생산 시 발생하는 페로니켈 슬래그의 처리가 자원 재활용 및 페로니켈의 안정적인 공급을 위하여 중요한 문제로 대두되고 있다 [1].

FNS는 보통 페로니켈 1톤당 약 6톤의 슬래그가 발생하는 것으로 알려져 있으며, FNS는 년 간 100만 톤(2010년)정도 발생되고 화학적으로 안정하기 때문에 채움재 및 콘크리트 골재로서의 활용 가능성이 상당히 높다. 이에 따라 국외에서는 약 120년 전부터 뉴칼레도니아, 일본 등과 같은 주요 선진국에서 FNS의 연구가 수행되었으며, 연구단계를 지나 실용화 시스템을 구축하였다. 일본의 경우 콘크리트용 FNS 골재를 국가표준화(JIS)하여 산업 전반적으로 활용을 극대화하여 현재 발생하는 FNS를 거의 100% 재활용하고 있다 [2][5].

국내에서 FNS를 재활용하기 위해서 환경관련법규 검토가 이루어 졌다. 그 결과, FNS의 니켈은 광석 성분인 니켈산화물 형태로 존재하여 안정적이고, 불용성으로 인해 용출되지 않음을 토양지하수 학회 연구보고 결과에서 발표되었으며, 용출 실험결과 유해물질이 검출되지 않아 사업장 일반폐기물로 허가를 받았다[3][4]. 또한 니켈 용출에 의하여 주변지역 토양을 오염시킬 우려가 없음으로 성토재, 보조기층재 등으로 활용해도 법적인 문제가 없다는 검토 결과를 받았다. 하지만 FNS가 매립지에 사용되어질 경우 지하수에 따른 환경오염 평가 및 강우량에 따른 지하수 오염 평가, FNS가 주변지반에 미치는 환경

오염 평가, 해수 및 담수에 의한 환경오염 평가 등 다양한 변수를 고려해야 함으로 매립에 의한 환경성 평가를 실시해야 할 것으로 판단된다.

Choi 등은 FNS 중 괴재슬래그를 활용한 콘크리트의 시공지침을 개발하기 위해서 괴재슬래그를 혼입한 콘크리트의 특성을 평가하였다[1]. 그 결과, 괴재슬래그 혼입률이 증가할수록 소요 슬럼프를 얻기 위한 혼화제의 첨가량이 증가되어 괴재슬래그 혼입한 콘크리트의 작업성이 다소 저하되는 것으로 나타났으나, 탄성계수는 기존 콘크리트의 90% 이상으로 나타나 잔골재의 대체 재료로 FNS 괴재슬래그의 사용 가능성이 기대된다고 하였다.

Kim (2013)은 FNS 잔골재를 적용한 콘크리트 개발을 위해 FNS 잔골재의 성능 평가 및 강도별 FNS 적용 콘크리트 기초성능평가를 실시하였다. 검토결과, 일반강도, 고강도, 초고강도 배합 모두 혼합비율이 40% 이상일 경우 점성이 증가하며 작업성이 불량해지는 것으로 나타났다. 따라서 입도 및 입형 보정이 필요할 것으로 판단되며, FNS의 흡수율이 낮기 때문에 혼합비율이 높아질수록 요구 단위수량이 줄어드는 것으로 판단된다고 하였다[5].

본 연구의 목적은 주로 도로노반재 및 콘크리트용 잔골재로 사용하기 위해 입도를 조정하는 과정에서 발생하는 FNS 미분말을 이용하여 지하매설물용 유동성 뒤채움재 특성을 평가하여 활용 가능성을 평가하는 것이다. 이를 위해 2가지(모래, 흙) 다른 조합을 이용하여 최적배합비를 결정하였고, 일축압축강도 및 양생에 따른 강도발현 특성을 평가하였다.

2. 실험재료

2.1 FNS 미분말 주요 구성물질

본 연구에 사용된 FNS 미분말은 기존의 페로니켈 생산과정에서 발생하는 페로니켈 슬래그를 잔골재로 사용하기 위해 분쇄하는 과정에서 Fig.1 과 같이 생산된다. 이렇게 생산된 미분말의 분말도는 $3,050 \text{ cm}^2/\text{g}$ 정도이고, 메카노케미칼 작용에 따라 FNS와는 달리 물과 반응을 하게 되고, 24시간 이내에 경화가 진행된다. FNS 미분말의 밀도는 2.96 g/cm^3 정도로 측정되었다.

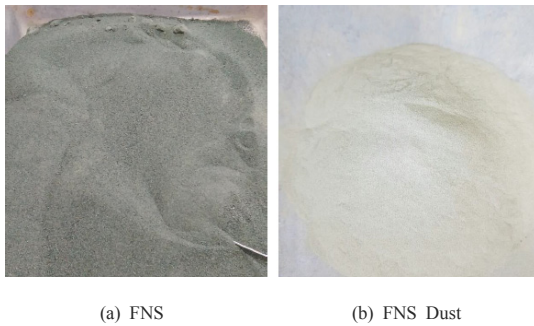


Fig. 1. FNS & FNS Dust

2.2 FNS 미분말 구성성분

본 연구에 사용된 FNS 미분말 구성성분은 주로 CaO(5.2%), MgO(27.8%), S(0.1%), FeO(7.57%), Fe(0.7%), SiO₂(55.6%) 등이다. 구성성분의 대부분은 이산화규소와 산화마그네슘이 차지하고 있다.

2.3 일반모래

유동성 뒤채움재에 가장 기본적으로 사용되는 모래는 지반공학적 분류상 SP 계열이고, 밀도 2.56 정도이다. 모래의 조립률은 2.88, 균등계수(Cu)는 2.37, 곡률계수(Cc)는 0.78로 측정되었다. 다짐시험결과 최대건조단위 질량은 1.47 ton/m³이다.

2.4 현장발생토 (natural soil)

본 연구에 사용된 흙은 천안시 인근의 도로공사 현장에서 발생한 굴착잔토이다. 흙의 지반공학적 분류로는 SP이고, 밀도는 2.7 정도로 측정되었다. 지반공학에서 사용하는 10%, 30% 및 60% 통과시 입자의 크기는 각각 0.22mm, 0.57mm, 및 1.25mm로 측정되었다. 이를 이용한 흙의 균등계수(Cu)는 5.68, 곡률계수(Cc)는 1.18로 측정되었다. 또한, 200번체 통과량은 1.51%로 미분이 상대적으로 적은 흙으로 판정되었다.

3. 최적배합설계

3.1 기본조건 및 실험방법

FNS미분말을 이용한 유동성 뒤채움재의 최적배합비는 다음과 같은 과정을 통해 결정하였다. 지하매설물용 유동성 뒤채움재로 적용시 200 - 700 kPa의 일축압축강도를 가지도록 하는 것이 일반적이고, 본 연구에서는 시

료의 목표 강도를 200 kPa 이상으로 정하였고, 경제성을 고려하여 시멘트양이 되도록 적게 포함되도록 하였다. 최적배합설계는 유동성과 일축압축강도를 기본특성으로 평가하였다[6]. 유동성 평가를 위해 본 연구에서는 Nantung(1993)이 제안한 시험방법을 이용하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 $\phi 7.6\text{cm} \times 15.2\text{cm}$ (3in $\times$ 6in)의 한 쪽이 개방된 실린더에 시료를 그 표면이 편평하도록 완전히 채운 후, 표면이 매끄러운 유리판에 위에 부어, 퍼진 재료의 지름이 23cm를 만족하는 배합비를 결정하였다[6]. 부은 시료의 퍼진 정도는 시공 초기에 시료가 자기수평능력(Self-Leveling) 및 적절한 유동성을 갖게 하는 중요한 특성치이다.

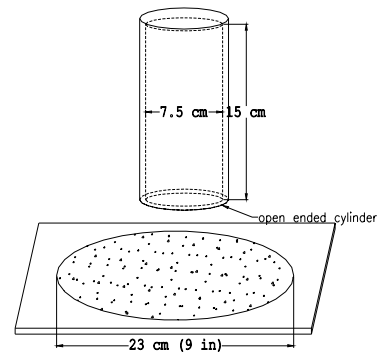


Fig. 2. Flowability Testing Setup

3.2 최적배합비 결정

최적배합비를 결정하기 위하여 초기에 시멘트와 현장발생토사의 양을 고정시키고, 물과 페로니켈슬래그 미분말(플라이애쉬 대용)의 양을 번갈아 늘리면서 퍼짐 특성이 23cm를 만족하는 점들을 구하여 연결한 곡선을 얻을 수 있다. 이 곡선을 이용하여 최소물소요량(Point of Minimum Water Demand, PMWD)을 결정하였다. 이는 일반모래(흙)와 FNS미분말 혼합물이 적절한 유동특성을 가지기 위해 필요한 최소의 물소요량을 의미한다. 그리고 최소물소요량은 혼합재료의 재료분리를 최소화하고 비교적 균질한 재료를 만드는데 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 일반모래 및 노상토를 주재료 사용하고, 여기에 기존에 사용하는 플라이애쉬 대신 페로니켈슬래그 미분말, 시멘트, 물 등을 혼합하여 최적배합비를 결정하였다. 결정된 최적배합비는 Table 1 및 Table 2와

같고, 중량비율로 결정하였다. 또한, 페로니켈 슬래그 미분말의 사용량에 따른 특성을 비교 분석하기 위하여 최적배합비를 기준으로 시멘트와 페로니켈슬래그 사용량을 다르게 하여 Case A (일반모래) 및 Case B (노상토) 등에 대해 각각 3개의 배합조건에 대한 일축압축강도 등의 시험을 수행하였다.

Table 1. Mixing Ratio for Sand

Component	Case A1	Case A2	Case A3
Sand	58.4	58.4	58.4
FNS Dust	21.6	22.6	20.6
Cement	1.8	0.8	2.8
Water	18.2	18.2	18.2
Sum	100	100	100

Table 2. Mixing Ratio for Natural Soil

Component	Case B1	Case B2	Case B3
Sand	53.0	53.0	53.0
FNS Dust	20.0	21.0	19.0
Cement	1.7	0.7	2.7
Water	25.3	25.3	25.3
Sum	100	100	100

4. 실험결과 및 분석

4.1 양생시간 따른 일축압축강도 특성

일반모래 및 흙에 FNS미분말을 이용하여 유동성뒤채움재를 만들었다. 혼합된 시편은 7일, 14일 및 28일 양생시간별로 일축압축강도를 측정하였다. 측정된 시험결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

전체적으로 양생시간에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 일반모래를 주재료로 이용한 유동성뒤채움재의 일축압축강도가 흙을 주재료로 이용한 혼합재료에 비해 상대적으로 크게 나타났다.

일반모래의 경우 기본조건인 Case A1에 비해 시멘트량을 줄이고, FNS미분말을 증가시킨 Case A2의 일축압축강도가 가장 작은 일축압축강도(0.16-0.20 MPa)를 나타냈다. Case A2의 28일 강도가 최소기준강도 200kPa를 만족시키지 못하였다. Case A1에 비해 시멘트량을 늘리고, FNS미분말을 감소시킨 Case A3의 양생일별 일축압축강도는 0.32 MPa에서 0.39 MPa 정도로 가장 크게 나타났다. 양생시간에 따른 강도발현은 Case A3에서

좀더 크게 나타났고, 기본조건인 Case A1의 강도발현효과는 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이는 FNS미분말을 이용한 유동성 뒤채움재의 강도특성이 비교적 적은 1.8%에서 2.8% 범위에서 사용이 가능한 것을 의미하고, 향후 경제성 분석을 통해 적절한 시멘트사용량을 결정할 수 있을 것이다.

흙을 주재료로 이용한 Case B의 경우도 Case A와 전체적으로 유사한 경향을 나타냈다. 다만, 측정된 일축압축강도는 Case A의 약 60% 수준으로 0.1-0.2 MPa 범위에서 측정되었다. 양생시간별 일축압축강도의 변화는 모든 조건에서 증가하였고, 특히, Case B3에서 효과가 큰 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 현장발생토의 경우 200번째 통과 시료의 일부가 점토광물로 구성되어 있어서, 시멘트 사용량에 따른 강도 발현효과가 일반모래에 비해 좀더 명확하게 나타난 것으로 판단된다.

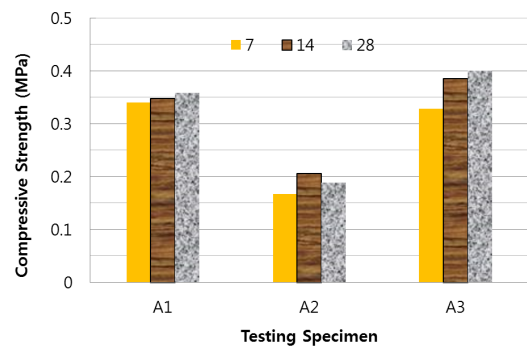


Fig. 3. Strength of Sand Flowable Backfill

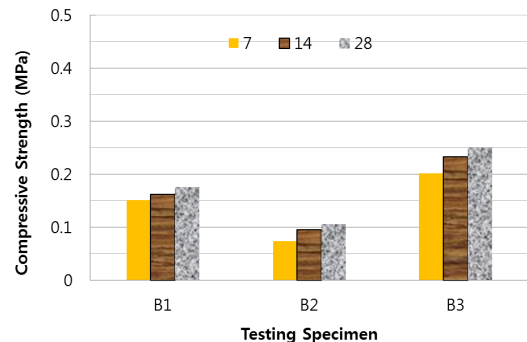


Fig. 4. Strength of Soil Flowable Backfill

4.2 양생시간 따른 강도와 변형 특성

FNS미분말을 이용하여 혼합한 유동성뒤채움재 시편

은 14일 및 28일 양생시간별로 하중 및 변형특성을 측정하였고, Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다.

전체적으로 시멘트 사용량이 많고, 최대강도가 클수록 strain이 작게 발생하였다. 모래를 이용한 혼합물의 경우 파괴시 강도가 명확하게 나타났고, 흙을 이용한 혼합물의 경우 14일 양생시 파괴형상이 점성토의 시험결과와 유사한 경향을 나타내었다. 28일 양생후 시험한 모래 및 흙을 이용한 혼합물 시편의 파괴시 강도는 14일 시편에 비해 좀더 명확하게 나타났다. 다만, 흙을 이용한 혼합물의 경우 14일 양생시에는 연약한 점성토 거동을 보이다가, 28일 양생시에는 단단한 점성토 형태의 거동특성을 보여주고 있다. 이는 현장에서 발생한 흙을 이용하는 경우 양생초기에 하중이 크지 않으므로, 도로포장 등 상층부 시공시 걱정 강도를 확인하는 것이 바람직할 것이다.

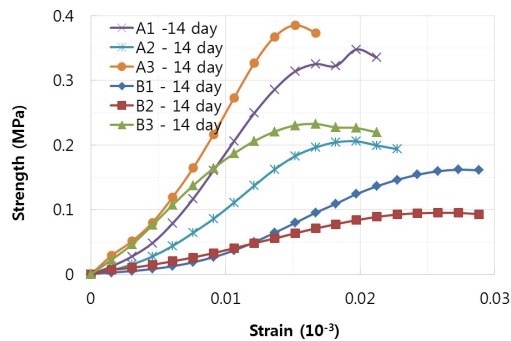


Fig. 5. Strength vs. Strain at 14 day

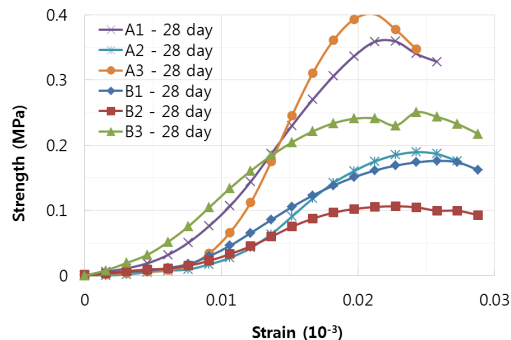


Fig. 6. Strength vs. Strain at 28 day

4.3 FNS 미분말 환경유해성 평가

FNS 미분말의 환경유해성 평가를 위해 KS L ISO 18575 (KS A 0094) 시험방법을 이용하였다[3][4]. 시험

온도는 20도 및 습도는 30% 수준을 유지하였다. 폐기물 공정시험기준에 따른 용출시험결과는 Table 3에 나타난 것과 같다.

Table 3. Environmental Hazard Assessment

Element	Specification (mg/kg)	Test
Pb	0.04	not detected
Cu	0.006	not detected
Cd	0.004	not detected
Hg	0.0005	not detected

5. 결론

본 연구에서는 페로니켈 생산시 발생하는 페로니켈 슬래그 미분말을 지하매설물용 뒤채움재 재료로 재활용하기 위해 최근 국내외에서 많이 사용하고 있는 유동성 뒤채움재로의 적용성을 평가하였다. 평가항목은 최적배합설계, 일축압축강도 및 환경성 시험등이다.

기존의 유동성 뒤채움재는 주로 모래 또는 흙을 주성분으로 유동성 및 장기강도 발현을 위해 플라이애쉬와 시멘트, 및 물 등을 주재료로 이용하였다. 본 연구에서는 플라이애쉬 대용으로 100% 폐기되고 있는 FNS미분말을 이용하였다. 최적배합비는 모래를 이용한 혼합물의 경우 중량비 기준으로 모래 58.4%, FNS미분말 21.6%, 시멘트 1.8%, 물 18.2%를 이용하였다. 현장에서 발생한 발생토사의 경우 흙 53%, FNS미분말 20%, 시멘트 1.7%, 물 25.3%를 최적배합비로 적용하였다.

전체적으로 양생시간에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 일반모래를 주재료로 이용한 유동성뒤채움재의 일축압축강도가 흙을 주재료로 이용한 혼합재료에 비해 상대적으로 크게 나타났다.

일반모래 혼합물의 경우 양생시간 7일, 14일 및 28일에 따른 일축압축강도의 범위는 각각 0.17-0.33 MPa, 0.21-0.39 MPa, 0.19-0.40 MPa 수준으로 평가되었다. 실험결과로부터 Case A3 정도면 FNS미분말과 시멘트 혼합비율 가장 적절한 것으로 판단되었다. 흙을 주재료로 이용한 Case B의 경우도 Case A와 전체적으로 유사한 경향을 나타냈고, Case B1이 적절한 것으로 나타났다. 다만, 측정된 일축압축강도는 Case A의 약 60% 수준으로 0.1-0.2 MPa 범위에서 측정되었다. FNS미분말

의 환경유해성 평가를 위한 용출시험결과, 환경에 유해한 물질의 용출은 없는 것으로 나타났다.

References

- [1] Cho, B. S., Lee, H. H., Choi, Y. W., Park, D. C., Choi, Y. C., "A Study on Performance of Concrete using FeNi Slag Aggregate", KCI Fall Conference, Korean Concrete Institute, pp. 583-584, 2014.
- [2] Choi, Y. W., Park, M. S., Lee, K. M., Bae, S. H., Kim, J. S., "Evaluation of Optimum Mixing Rate and Durability of Concrete Using Water Granulated Slag Fine Aggregate", Journal of Korean Recycled Construction Resource Institute, Vol. 3, No. 1, pp. 120-127, 2011.
- [3] Kim, E. Y., Choi, S. W., Kim, V., Li, Y., Park, J. H., "The Dissolution of Magnesium and Iron from Ferronickel Slag Depending on Aging Condition", Journal of Applied Chemical Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 350-356, 2013.
- [4] Park, K., Kim, D., Kim, B., Go, Y., "Effect of Ferro-Nickel Slag on Contamination of Soil and Water", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 12, No. 4, pp. 21-33, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgss.2013.12.4.021>
- [5] Kim, P. S., "The Study on Performance Evaluation of Eco-friendly Concrete using Ferro-Nickel Slag for Fine Aggregate", Master Thesis, Hanyang University, 2013.
- [6] ASTM, "Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders", ASTM D 4832-16, 2016.

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학 (공학석사)
- 1996년 12월 : 미국 Purdue Univ. Civil Eng., (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

도로공학 및 지반공학