

## 동슬래그 혼합토의 기본 성질에 관한 연구

### A Study on the Fundamental Characteristics of a Copper Slag Mixed with Granite Soil

김영진<sup>1)</sup>, Young-Chin Kim, 배정호<sup>2)</sup>, Jung-Ho Bae, 홍승서<sup>2)</sup>, Seung-Seo Hong

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Eng. Dept., KICT

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

**SYNOPSIS** : This paper presents fundamental characteristics of a copper slag when used geotechnical materials. For this study, it was conducted laboratory tests such as compaction, large direct shear, hydraulic conductivity, leaching, TDR, frost heave test and so on. The results of laboratory tests shown gradually increase in draining capacity and shearing resistance more slag mixing. The unfrozen water in temperature changes and frost heave amounts in condition of  $-17^{\circ}\text{C}$  appeared to decrease. Also, toxicity tests based on the domestic solid waste regulations were satisfied with nonhazardous. By this research results, a copper slag mixed with granite soil may be used as granular base and embankment materials, fill etc.

**Key words** : copper slag, hydraulic conductivity, leaching, unfrozen water, frost heave

## 1. 서론

최근 산업의 급속한 발전으로 각종 산업 폐기물 발생량이 급증하고 있다. 우리나라는 국토면적이 좁아 폐기물 매립장 확보가 어렵다는 측면에서 뿐만아니라 경제적인 면에서도 폐기물 재활용에 대한 연구 및 기술개발이 매우 필요한 실정이다.

동슬래그(Copper Slag)는 동 제련 과정에서 발생하는 부산물로서 순수한 동 1kg을 생산하는데 약 1.4kg의 비율로 발생하고 있으며, 연간 국내에서만 60만톤 정도가 발생한다(LG-Nikko 동제련 기술연구소, 2000).

동슬래그는  $1100^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 의 용광로에서 배출되고 냉기에 의해 검은색의 유리질 모양을 띠게 된다. 비중은 철(iron) 함유량에 따라 작게는 2.8에서 크게는 3.8 까지 다양하고, 주성분은 Fe로서 약 40% 정도를 함유하고 있으며  $\text{SiO}_2$  및 미량의 Cu 등을 포함하는 것으로 알려져 있다(Emery, 1982).

현재 동슬래그는 주성분 중 산화철량이 많은데 착안하여 일부 시멘트 가철재료, 콘크리트 제품용 골재 등에 부분적으로 이용되고 있다. 그러나, 외국에서는 동슬래그를 지반개량재, 매립용 골재, 뒷채움재 등으로 지반 분야에서 폭 넓게 활용하고 있을 뿐만아니라 이용기준까지 만들어져 있는 실정이다(Collins and Ciesielski, 1994).

앞으로 국내 천연 골재의 고갈에 따른 대체 골재의 필요성과 동 생산 업체의 설비시설 증대로 인한 동슬래그의 증가가 예상되므로 재활용에 대한 연구 개발이 더욱 필요한 실정이다.

본 연구에서는 동슬래그를 지반공학적으로 활용할 수 있는 방안을 모색하기 위해 동슬래그와 화강풍화토를 혼합 다짐시험, 대형전단시험, 투수시험, 용출시험(Leaching Test), 부동수분량시험(TDR), 동상시험(Frost Heave Test) 등을 실시하였다. 이러한 실험 결과를 통해서 동슬래그를 도로의 보조기층이나 동상방지층 재료 및 뒷채움재, Landfill 등에 활용할 수 있는지를 검토하였다.

## 2. 시료 및 시험방법

### 2.1 시료의 기본 성질

#### 2.1.1 동슬래그(Copper Slag)

본 연구에서는 국내 ○○ 동제련 공장의 연속동제련 공정에서 발생하는 동슬래그를 시험시료로 사용하였다. 이 동슬래그는 동광석 중 철분과 규석이 결합하여 생성된 물질로 용융상태에서 고압수를 사용 급냉, 수쇄하여 세립화한 것으로 입자가 균일하고 안정된 유리질 상태를 보인다.

화학적 성분은 표 1과 같이 철분 38.7%~47.4%, 규산질 32.5%~35.0%, 나머지는 미량의 Cu 등으로 구성되어 있다. 비중은 철분의 함유량에 따라 3.37~3.54로서 일반적인 흙이나 골재보다 큰 값을 나타낸다(LG-Nikko 동제련 기술연구소, 2000).

표. 1 동슬래그의 화학적 구성

성분 구분	Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cu	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
평균치	38.13	4.17	33.46	0.91	4.67	0.98	4.74
최소~최대	36.2~40.3	2.5~7.1	32.5~35.0	0.70~1.31	4.23~5.44	0.68~1.44	3.54~5.49

#### 2.1.2 흙 시료

동슬래그와 혼합할 때 사용한 흙 시료는 경기도 파주시 통일동산에서 채취한 화강풍화토로서 비중 2.65이고, 균등계수가 7.4 이며 곡률계수가 0.9로 통일분류법상 SP에 해당하는 시료였다.

## 2.2 시험방법

### 2.2.1 입도분포시험

동슬래그의 입경과 분포를 알아보기 위해 110±5 °C의 건조로에서 건조시킨 다음 체분석(KS F 2309) 시험을 수행하였다.

### 2.2.2 다짐시험

동슬래그와 화강풍화토를 혼합하여 현장에서 다질 때 적합한 수량과 이 수량으로 다졌을 때 예상되는 단위중량을 알아보기 위해 동슬래그를 중량비 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%가 되도록 혼합하여 다짐 시험(KS F 2312)을 수행하였다. 본 시험에서 다짐방법은 A다짐으로 시료의 준비는 건조법, 시료의 사용은 비반복법에 의해 수행하였다.

### 2.2.3 대형전단시험

기초의 지지력, 옹벽 구조물 뒷채움의 측압, 제방의 안전성 문제에 있어서 입상토의 내부마찰각은 상당히 중요하다. 동슬래그를 중량비 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%가 되도록 화강풍화토와 혼합한 다음 전단 상자의 크기가 30×30×30 cm인 대형전단시험기를 사용, 1mm/min의 전단속도로 전단시험을 수행

하였다. 대형전단시험기의 최대변위는 6cm이고, 수직응력은 0.2 kg/cm<sup>2</sup>, 0.4 kg/cm<sup>2</sup>, 0.8 kg/cm<sup>2</sup>로 단계별로 가하였으며, 시료는 비반복법에 의해 사용하였다.

#### 2.2.4 투수시험

동슬래그를 구조물 뒷채움재나 지반개량재로 활용할 수 있는지 판단하기 위해, 다짐시험을 통해 구한 각 혼합토의 최적 함수비 상태에서 KS F 2322 규정에 의한 혼합비별 투수시험을 수행하였다. 시험에 사용된 투수몰드의 직경은 10cm, 높이는 15cm 이고, 공시체의 포화는 상부에 물을 주입하여 하부로 흘러나올 때 까지 장시간 방치하여 완전포화상태가 되도록 만든 후 수행하였다.

#### 2.2.5 부동수분량 시험

동슬래그와 화강풍화토를 혼합한 혼합토가 영하의 기온에 노출되었을 때 부동수분량(Unfrozen Water)이 어떻게 변하는지 알아보기 위해 TDR(Time Domain Reflectometry)이라는 시험장비를 이용하여 부동수분량을 측정하였다. TDR 시험기는 측정용 probe를 동토 속에 넣고, 시험기 내에 전자파를 발생시키면 전자파는 probe의 길이를 따라 왕복하여 전자파의 속도를 계산함으로써 흙의 유전율을 측정하는 장비로서 동토의 구성 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다르기 때문에 이 원리를 이용하여 동토의 체적함수비(부동수분량)를 자동적으로 환산해 낸다(김영진, 1997). 시험방법은 먼저 동슬래그와 화강토를 혼합한 시료를 직경 10cm, 높이 15cm의 투수몰드에 다져 넣고 강제 포화시킨 후 TDR probe 및 온도측정용 센서를 시료내에 삽입한다. 그리고, 장치 전체를 냉동 챔버 속에 넣은 후 온도를 -20℃ ~ -0.5℃까지 단계별로 변화시켜가면서 해당 온도에 대한 부동수분량을 측정한다.

#### 2.2.6 동상시험

동슬래그를 화강토에 혼합하였을 때 동상량이 어떻게 달라지는지 평가하기 위해 영국 TRRL (Transportation and Road Research Laboratory)에서 제안한 동상시험기를 이용하여 동상시험을 수행하였다. 시험 방법은 먼저 최적함수비 상태에서 직경 10cm, 높이 15cm되는 공시체를 만든 후 황동제 몰드에 넣은 다음 적재 상자에 담아 동상시험기 내에 설치하였다. 이 몰드 하부에는 porous stone을 깔고 자연지반에서 지하수가 모세관 현상에 의해 상승하는 원리에 맞게 물을 공급하였다. 그리고, 공시체 상부에 tufnol disk를 놓고 황동막대를 연결하여 동상시험기 외부에서 다이얼 게이지를 읽어 시간 변화별 동상량을 측정하게 하였다. TRRL 기준에 따라 공기의 온도는 -17℃, 공급되는 물의 온도는 4℃로 유지하였다(Croney and Jacobs, 1967).

#### 2.2.7 용출시험

동슬래그가 지하수나 지반을 오염시킬 수 있는 중금속이나 유기물을 함유하고 있는지 알아보기 위해 국내 폐기물 공정시험법에 의한 용출시험(Leaching Test)을 수행하였다. 시험 방법은 동슬래그 시료 50g과 미네랄성분을 제거시킨 증류수 500ml를 용량 1l의 비이커에 넣고 25±5rpm의 교반기로 연속교반 하면서 6시간과 24시간 경과 후 각각의 시간에 상징액을 뽑아 고액분리하여 여과액내의 중금속농도를 분석하였다.

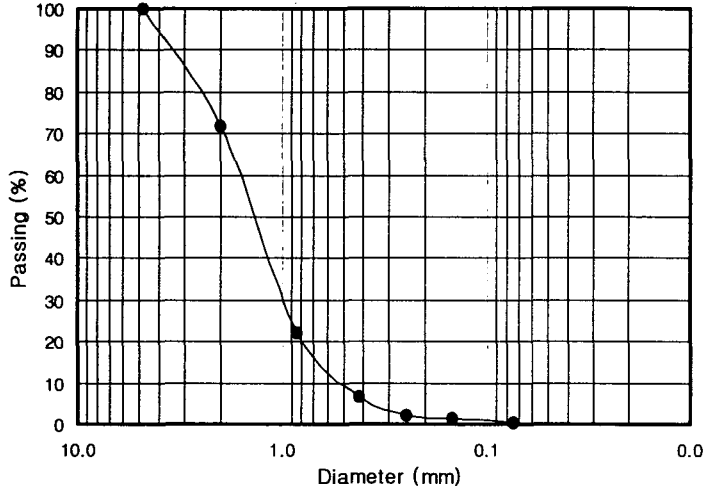
#### 2.2.8 pH 시험

동슬래그의 부식성과 식생에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동슬래그와 증류수로 만든 혼합물의 pH를 측정하였다. 시험 방법은 먼저 500mm의 비이커에 동슬래그 150g을 넣은 후, 미리 준비한 증류수

350mm를 섞어 유리막대를 사용하여 약 3분 정도 저어서 방치해 두고 하루에 한번씩 3회 측정하였다.

### 3. 동슬래그 혼합토의 일반적 특성

#### 3.1 입도분포 특성



건조시킨 동슬래그의 체분석 시험 결과 No. 4번체 통과량은 100.0%, No. 10번체 통과량은 71.7%, No. 40번체 통과량은 6.6%, No. 200번체 통과량은 0.3% 이다(그림. 1). 균등계수는 3.3이고 곡률계수는 1.0으로 통일분류법(ASTM D 2487)에 의해 분류하자면 이것은 SP에 해당한다. 입자는 granule 상태로 대략 0.3~5.0mm의 입도 분포에 집중되어 있고, 일반적인 모래의 범위에서 구분하면 중간 모래(Medium Sand)에 가깝다.

그림. 1 동슬래그의 체분석 시험 결과

#### 3.2 다짐 특성

동슬래그와 화강풍화토의 혼합비별 다짐 시험을 수행한 결과 동슬래그의 혼합비가 높을수록 최대 건조밀도가 증가하고 최적함수비는 감소하는 경향을 나타내었다(그림. 2). 동슬래그 혼합비에 따른 최대 건조단위중량의 경우 100% 화강풍화토에 비해 4%~18%까지 증가하였고, 최적함수비는 8%~31%까지 감소하였다. 이러한 경향으로 화강토에 동슬래그를 혼합할수록 다짐 효과가 높음을 알 수 있다.

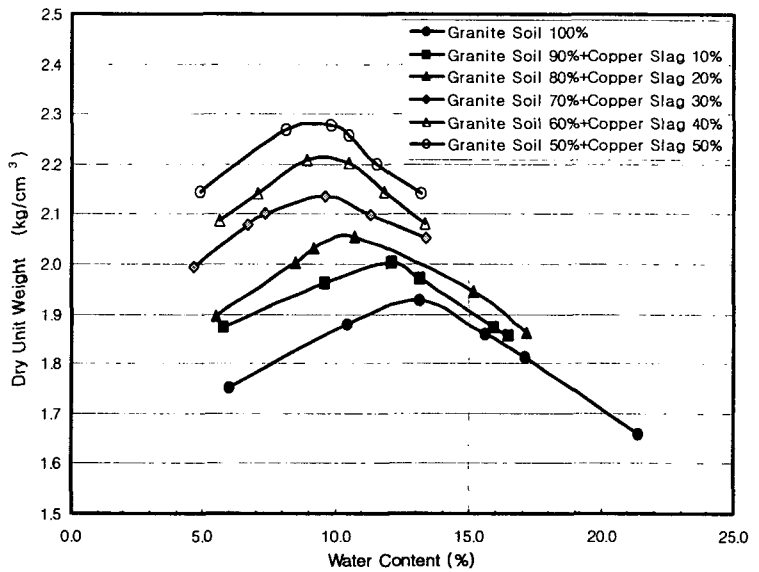


그림. 2 동슬래그 혼합비에 따른 다짐곡선

#### 3.3 전단 특성

단계별 수직하중에 의한 동슬래그 혼합토의 내부마찰각 및 점착력은 표 2와 같고, 동슬래그 혼합비가 30% 이상 될 경우 중립~조밀한 상태의 일반적인 모래나 자갈보다 큰 내부마찰각을 나타내었다. 그림 3 과 같이 동슬래그 혼합비가 높은 혼합토일수록 전단에 의한 마찰저항이 더 크게 나타나는데, 이것은 시험에 사용된 동슬래그 입자가 각이졌기 때문으로 판단된다.

표. 2 동슬래그 혼합비에 따른 내부마찰각 및 점착력

혼합비	내부마찰각(°)	점착력(kg/cm <sup>2</sup> )
화강토 100%	33.32	0.11
화강토 90%+동슬래그 10%	36.88	0.18
화강토 80%+동슬래그 20%	39.81	0.21
화강토 70%+동슬래그 30%	42.65	0.32
화강토 60%+동슬래그 40%	47.29	0.34
화강토 50%+동슬래그 50%	48.69	0.43

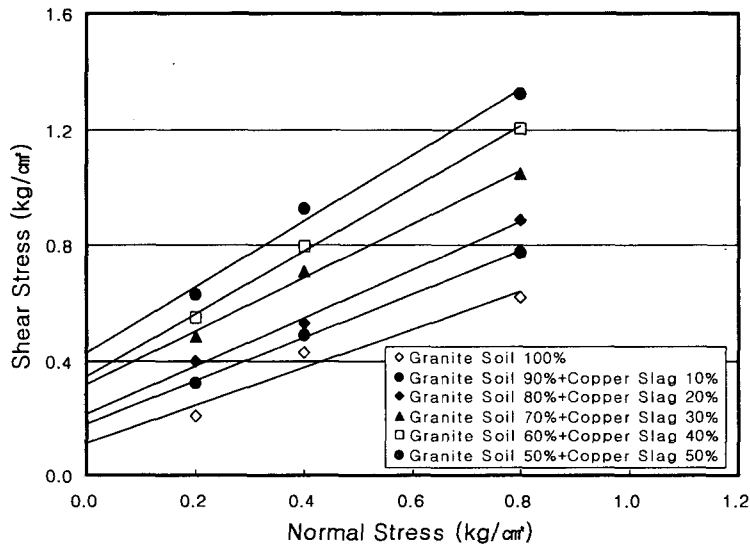


그림. 3 동슬래그 혼합토의 단계별 하중에 대한 전단응력

### 3.4 투수 특성

다짐시험을 통해 구한 최적 함수비 상태에서 동슬래그와 화강풍화토의 혼합비별 투수시험을 수행한 결과 동슬래그 혼합비가 증가함에 따라 투수계수가 점점 증가하는 경향을 보였다(그림. 4). 동슬래그 혼합비를 10%~30%까지 증가시켰을 때는  $1 \times 10^{-5}$  cm/sec, 40%~50% 증가시켰을 때는  $1 \times 10^{-4}$  cm/sec의 투수계수를 보였다.

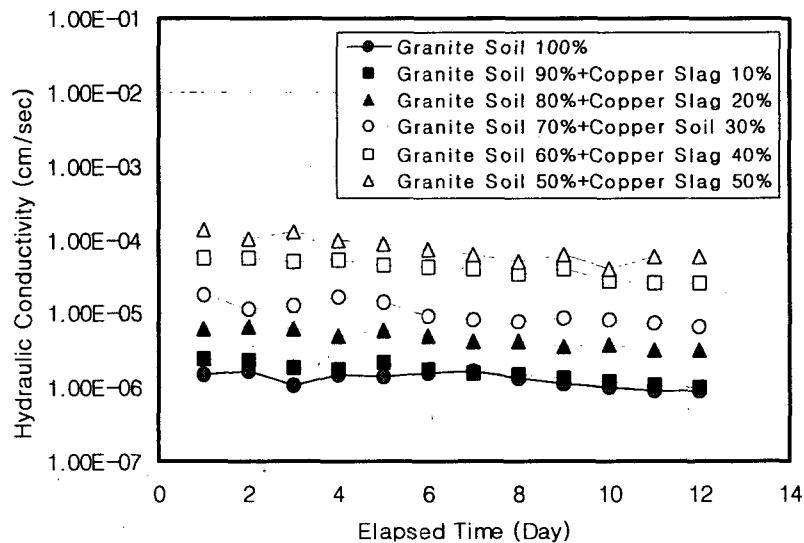


그림. 4 동슬래그 혼합비에 따른 투수계수

## 4. 동슬래그 혼합토의 동토 공학적 특성

### 4.1 부동수분 특성

동슬래그와 화강토의 중량별 혼합비에 따른 부동수분량의 측정 결과 동슬래그의 혼합비가 증가함에 따라 어느 경우든 온도가 낮아질수록 부동수분량이 감소하고 있으며, 특히 0°C ~ -5°C 사이에서 급속히 감소하고 있는 것을 알 수 있다(그림. 5). 또한 동일한 온도에서는 동슬래그의 혼합비가 높은 시료일수록 부동수분량이 감소하는 경향을 보이고 있다.

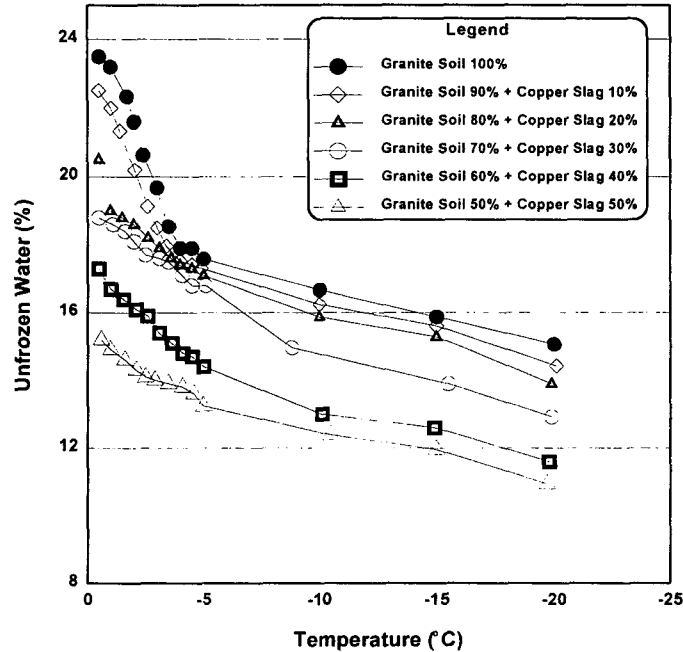


그림. 5 온도변화에 따른 동슬래그 혼합토의 부동수분량

### 4.2 동상 특성

동슬래그와 화강토의 혼합비에 따른 동상량의 결과를 살펴보면 동슬래그 혼합비가 증가함에 따라 동상량이 감소하는 경향을 알 수 있다(그림. 6). 그리고, 동상성 흙일 경우 48시간에 18mm 이상 팽창한다는 TRRL의 동상성 판정기준에 의하면 동슬래그를 30% 이상 혼합시 비동상성 흙으로 판정됨을 알 수 있다. 이것은 동슬래그의 입자 크기의 영향으로 중간 모래 크기와 유사한 동슬래그 입자를 배합함으로써 모관능력이 감소하고, 시료의 비표면적이 줄어들어 물이 동결면으로 이동하는 능력이 저하하였기 때문으로 풀이된다.

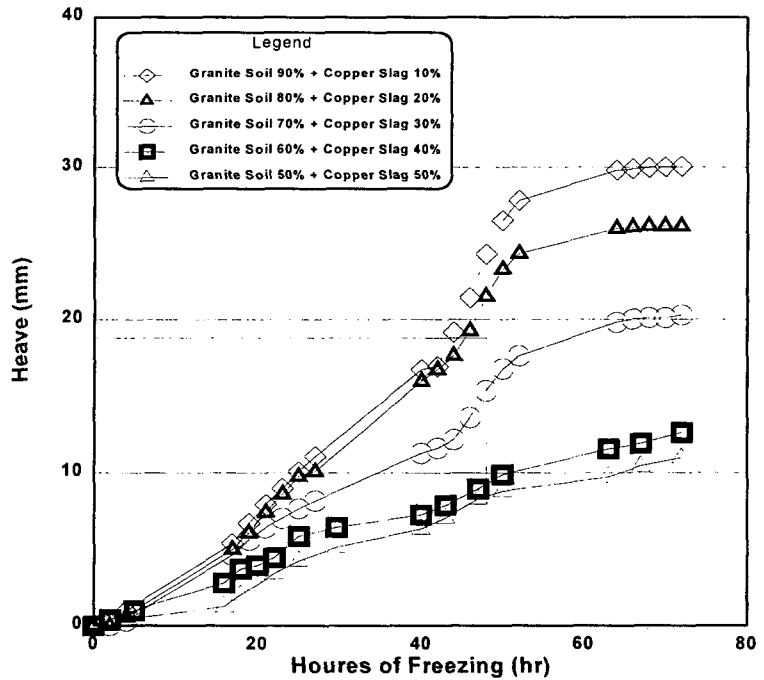


그림. 6 동슬래그 혼합비에 따른 동상량

## 5. 동슬래그 혼합토의 환경 공학적 특성

동슬래그에 대한 용출시험 결과 표 3과 같이 구리 성분이 0.39 mg/l 검출되었지만 유해성 판정기준인 3 mg/l 이하로 나타났고, 나머지 시험항목에서는 유해성분이 검출되지 않아 판정기준에 만족함을 보였다.

동슬래그의 부식성과 식생공에 미치는 정도를 알아보기 위해 하루에 한번씩 3회 측정된 pH의 최종 평균값은 6.84로 거의 중성에 가까웠다.

표. 3 국내 폐기물 공정시험법에 의한 유해성 판정기준 및 시험 결과치 (단위: mg/l)

시험항목	유해성판정기준	결과치
Cu	3.0	0.39
CN <sup>-</sup>	1.0	검출안됨
Cr <sup>b</sup>	1.5	검출안됨
Pb	3.0	검출안됨
Cd	0.3	검출안됨
As	1.5	검출안됨
Hg	0.005	검출안됨
트리클로로에틸렌	0.3	검출안됨
테트라클로로에틸렌	0.1	검출안됨
유기인	1.0	검출안됨

## 6. 결론

- (1) 국내 생산 동슬래그는 입상으로서 0.3~5.0mm의 입도 분포를 나타내고 있고, 입자의 크기는 중간 모래와 비슷하며, 비중은 철분의 함유량에 따라 3.37~3.54로서 일반적인 흙이나 골재보다 높게 나타났다.
- (2) 동슬래그 입자는 각이졌기 때문에 화강토에 동슬래그를 혼합하는 혼합비가 높을수록 전단에 의한 마찰저항이 더 크게 나타났으며, 중량비 30% 이상으로 배합하였을 경우 중립~조밀한 상태의 일반적인 모래나 자갈보다 큰 내부마찰각을 보였다.
- (3) 투수계수는 동슬래그 혼합비가 10%~30%일 때  $1 \times 10^5$  cm/sec, 40%~50%일 때  $1 \times 10^4$  cm/sec로 나타나 혼합비가 증가할수록 투수성이 좋아짐을 알 수 있다.
- (4) 동슬래그의 혼합비가 높은 시료일수록 부동수분량이 감소하는 경향을 보였다.
- (5) 동슬래그의 투수계수가 화강토의 투수계수보다 크기 때문에 화강토에 동슬래그를 혼합하는 비율이 증가할수록 동결면으로의 모세관수 공급이 줄어들어 동상량이 감소하는 경향을 보였다. TRRL의 동상성 판정기준을 적용할 경우 동슬래그를 30% 이상 혼합한 화강토는 비동상성 흙으로 판정할 수 있다.
- (6) 동슬래그를 지반 재료로 사용시 토양 오염 가능성을 평가하기 위해 폐기물 공정 시험법에 의해 용출시험을 실시한 결과 유해성 판정기준치 이하로 나타났고, 측정된 pH 값은 6.84로 거의 중성에 가까웠다.

## 7. 참고문헌

- (1) 김영진(1997), “부동수가 동토의 성질에 미치는 영향”, 한국건설기술연구원 건설기술정보, pp.24~30.
- (2) 김영진 외(1999), “동결심도 및 포장체 온도분포조사”, 한국건설기술연구원 연구보고서.
- (3) LG-Nikko 동제련 기술연구소(2000), 동 제련 슬래그의 물성과악 및 개선을 통한 용도개발.
- (4) Croney, D. and Jacobs, J. C. (1967), “The Frost Susceptibility of Soils and Road Materials”, *Transport Road Research Laboratory Report LR 90*.
- (5) Emery, J. J. (1982); “Slag Utilization in Pavement Construction, Extending Aggregate Resources”, *ASTM STP 774*, pp.116~117.
- (6) Das, B. M., Tarquin, A. J. and Jones, A. D. (1983), “Geotechnical Properties of a Copper Slag”, *Transportation Research Record No. 941*, pp.1~4.
- (7) Collins, R. J. and Ciesielski, S. K. (1994), “Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction”, *Transportation Research Board National Research Council, NCHRP Synthesis 199*.