

## 케이슨 속채움재로서 동슬래그의 안정성 검토 The Stability of Copper Slag in The Caisson Filling Material

노기만<sup>1)</sup>, Ki-Man Noh

<sup>1)</sup> LS-Nikko 동제련 기술혁신추진실, Assistant Manager, Dept. of Technical Innovation Team,  
LS-Nikko copper Inc.

**SYNOPSIS** : In this study, usability and stability in the caisson filling material were reviewed that copper slag(one million tons per one-year) were produced by smelter. In order to complete these studies, chemical and physical comparing analyses were performed by sea-sand materials as to the materials suitability, After construction, the structural displacement of caisson was measured by the instrument and was examined for stability. As a result of analysis, it was determined that copper slag is eco-friendly, and can be used as recycled alternative to aggregates materials

**Keywords** : 동슬래그, copper slag, caisson 속채움, ferrosand, slag, 항만, 고로슬래그

### 1. 서론

케이슨 안벽 공사 중 케이슨 속채움은 일반적으로 모래를 이용하여 시공한다. 이 때 케이슨 속채움 재료로서의 모래 역할은 단지 중량으로서의 역할을 한다. 즉, 단위중량으로서 케이슨 안벽에 대한 안정성을 유지하거나 케이슨 하부의 SCP 개량지반의 침하를 유발시키는 역할을 한다. 따라서 케이슨 속채움 재료는 설계에서 가정한 단위중량을 만족하는 재료만 있으면 공학적으로 전혀 문제가 없다. 이와 관련하여 동제련시 발생하는 슬래그의 케이슨 속채움 재료로서의 적용성에 대한 안정성을 검토하였다. 우리나라에서는 동제련 과정에서 동슬래그는 연간 100만톤 정도 생산(2009년 기준)되고 있으며, 동슬래그 입도 범위가 0.15mm~5mm로 모래 대용으로 사용될 수 있으며, 특히 모래에 비해 높은 비중이 특징이다. 또한 안정된 유리질 상태이므로 환경적으로 안정된 재료로 일본, 독일 등 해외에서는 항만공사, 호안공사 및 해양구조물 제작 등에 널리 활용되고 있다.(LG-Nikko 동제련(주) 제련기술연구소, 2000; 한국건설기술 연구원 2000). 따라서, 본 연구에서는 케이슨 동슬래그 속채움재로서의 적용성을 평가하기 위하여 실제 시공사례를 바탕으로 검토하였다.

### 2. 동슬래그의 물리적 특성

모래 대체 재료로서의 동슬래그의 사용성을 평가하기 위하여, 각종 기본 특성시험들의 결과를 토대로 화학적·물리적·역학적 특성을 분석하였다.

## 2.1 입도분포와 연경도

실험에서 사용된 동슬래그의 입도분포곡선은 그림1과 같다. 그림1에서와 같이 유효입경(D10)은 0.45mm 이며, 균등계수(Cu)는 4.0, 곡률계수(Cg)는 2.9로 나타나 대체로 입도분포가 균등한 것을 알 수 있다. 또한, 통일분류법에서는 균등계수가 4 또는 6보다 크고 곡률계수가 1~3범위에 있을 때 입도분포가 좋다고 한다. 그림1의 곡선은 이 두 결과를 모두 만족하므로 입도분포가 좋은 재료라고 판단된다. 그리고 통일분류법에 의해 동슬래그를 분류하면, 입도분포가 균등한 SP로 분류되며, 액·소성 시험결과는 모든 시료가 비소성(NP)으로 나타나 재료적 특성은 양호한 것으로 평가된다. 또한 No.200체 통과분이 거의 0%로서 압밀 축진을 위한 배수재로서의 적합한 입도분포특성을 가지고 있다.(藤田圭一,1995)

## 2.2 단위중량

동슬래그의 단위중량은 3.47g/cm<sup>3</sup>로서 해사인 2.645g/cm<sup>3</sup>와 비교하여 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 동슬래그의 포함되어 있는 산화철(FeO, 약 50%) 등의 금속성분에 의한 것이다.

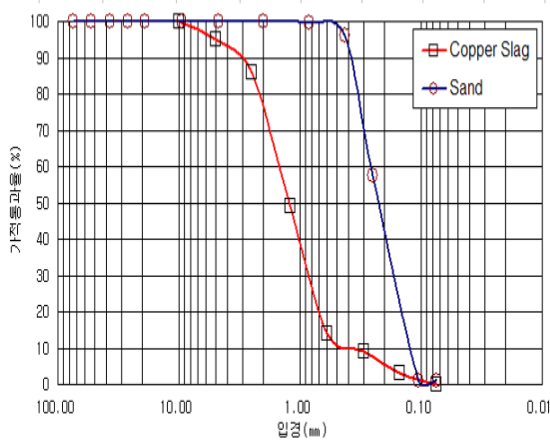


그림 1. 동슬래그 및 해사 입도분포곡선

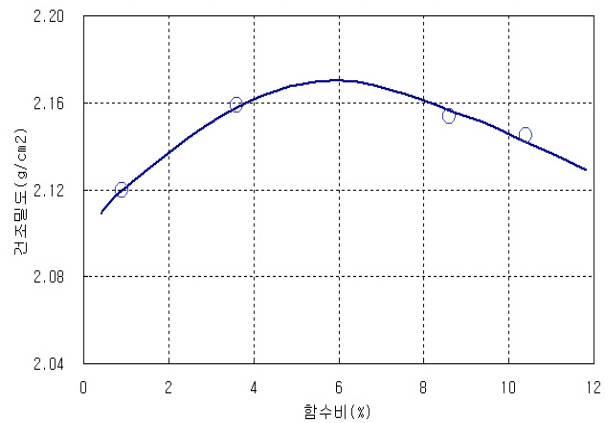


그림 2. 동슬래그 다짐곡선

표 1. 해사 및 동슬래그의 재료특성 요약

구 분	해사	동슬래그
함수비(%)	4.5	0.3
통일분류	SP	SP
유효입경, D <sub>10</sub> (mm)	0.14	0.45
균등계수(Cu)	1.9	4.0
곡률계수(Cg)	0.8	2.9
No.200체 통과량(%)	0.9	0
밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.645	3.47
액소성한계	NP	NP

## 2.3 다짐특성

A다짐시험결과 최대건조밀도 2.17g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 6.11%로 나타났으며, 해사의 경우 최대건조밀도 1.505g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 17.4%를 나타내었다. 동슬래그의 속채움시 토피하중의 영향은 증가할 것이며 그림 2의 다짐곡선에서와 같이 밀도가 완만한 경향을 나타내어 속채움의 경우 함수비의 영향은 크지 않

을 것으로 사료된다.

### 3. 동슬래그의 화학적 특성

동의 제조에 이용되는 원료 광석은 동광석(주로 황화동광)과 규산광(SiO<sub>2</sub>)이다. 원료 광석의 화학 성분은 제련 조업을 위한 사전의 광석 조합(Ore Blending)에 의해 대단히 안정되어 있기 때문에 발생하는 슬래그의 화학 성분의 편차가 극히 작고 안정되어 있다.

동슬래그 골재의 주요 화학 성분은 모든 철(FeO)이 40~55%, 이산화규소(SiO<sub>2</sub>)가 28~37%로서 대부분을 차지하고 있다. 나머지 부분은 CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO가 약간씩 함유되어 있다. 모든 황(S)의 함유량은 0.20~0.87%, 삼산화황(SO<sub>3</sub>)의 양은 0.2% 이하의 수치를 나타내고 있다. 표 2는 금번 케이슨 속채움재로 사용된 연속로에서 산출된 슬래그의 화학 성분이다.

표 2. 연속로 동슬래그 골재의 화학 성분

측정값	화학생분(%)					화학생분(참고)%	
	산화칼슘 (CaO)	황 (S)	삼산화황 (SO <sub>3</sub> )	철 (FeO)	염화물량 (NaCl)	이산화규소 (SiO <sub>2</sub> )	동 (Cu)
평균값	4.67	0.38	< 0.2	45.19	-	33.5	0.90
최대~최소	5.44 ~4.23	0.56 ~0.20		48.18 ~40.43		35.0 ~32.5	1.31 ~0.70
표준편차	0.37	0.10		1.83		0.78	0.21
JIS A 5011-3규격 값	12.0이하	2.0이하	0.5이하	70.0이하	0.03이하	-	-

염화물량에 대해서는 수쇄시의 냉각수로 해수를 이용하는 경우를 고려하여 규정되어 있으나, 국내에서 생산되는 동슬래그는 해수를 사용하지 않고 공업용수로 수쇄하고 있어 사용에는 문제는 없다. 또한 천연모래에서의 염화물량 허용값 0.04%와 같은 수준으로 규격화 되어있어 중금속 등의 용출에 관해서는 국내의 폐기물 공정시험법 및 국회 시험 방법에 의한 판정 기준을 만족하고 있다.

### 4. 케이슨 속채움 사용 현황

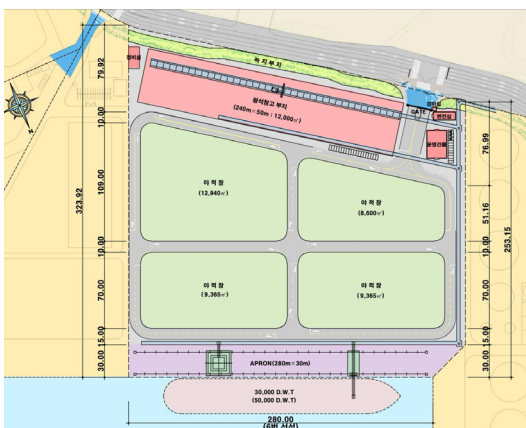


그림 3. 공사계획 평면도

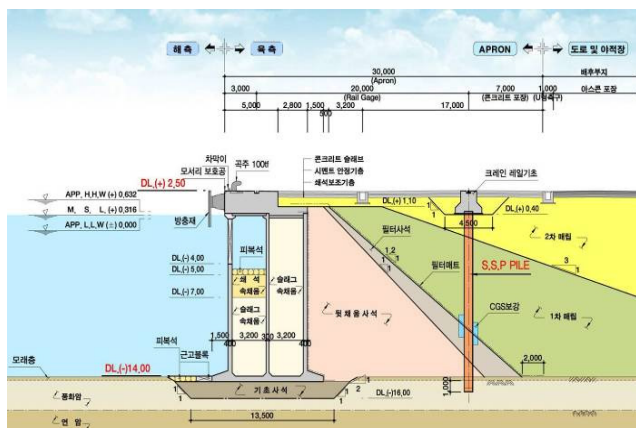


그림 4. 안벽표준단면도

총 9개 선석이 건설 예정인 ‘울산 신항(1-2단계) 남항부두 축조공사’ 중 기타광석에 대한 하역부두인 6번선석은 총 17함(이형 케이슨 2함 포함)의 슬릿케이슨(Slit-Caisson)이 거치되었다.

이 케이슨의 속채움으로 동슬래그가 총 18,161m<sup>3</sup> 가 사용되었으며 속채움 완료 후 슬릿부분에는 피복 석짜기를 통한 유실을 방지하였다.



그림 5. 케이슨 인양



그림 6. 케이슨 속채움

## 5. 케이슨 구조물 경사계 계측

구조물 시공시 해안과 지반 그리고 구조물의 상호작용에 따른 구조물의 안정성 평가를 위해 구조물의 거동 및 침하의 정량적 확인을 위한 계측기를 설치하였으며 케이슨과 관련된 구조물 경사계를 통하여 케이슨의 변위를 측정하였다.

### 5.1 계측빈도

계측의 빈도는 계측의 목적, 계측지점의 중요성, 계측대상 구조물의 상태, 공사의 진척 정도, 계측방법 등에 따라 조정될 수 있으며, 일일 평균치 또는 대표 기준 값 등을 선정하여 기록으로 남기는 것이 필요하다. 즉, 변위 값의 추이에 따라 빈도를 정하는 것이 원칙이며 계측치의 추이가 급속한 변화(가속도) 및 이상 징후 발생시는 수시계측이 요구되며, 일반적으로는 설계상의 계측빈도에 의한 계측 Data를 수집하여 계측관리용 Software를 이용하여 결과를 기록하고 설계치와의 비교 검토 후 계측관리 기준에 따라 판단한다.

표 3과 같이 케이슨 관련하여 계측계획을 수립하였으며 구조물경사계의 변위를 통하여 케이슨 거치 이후의 경사변위에 대한 안정성을 계측하였다.

표 3. 케이슨 관련 계측 계획

구분	계측항목	계측 형태	설치 직후	뒷채움 시공중	배면 매립중	시공 완료 후		
						최초1개월	1개월이후	3개월이후
안벽 구간	구조물 경사계	수동	3회	1회/1일	1회/1일	1회/3일	1회/1주	1회/1개월

## 5.2 구조물경사계 계측 관리기준 및 성적서 절대값

동슬래그를 속채움으로 사용한 케이슨 구조물의 특성을 감안하여 구조물 경사계의 1차 관리기준치는 1/500, 2차 관리기준치는 1/300을 적용하며, 관리기준치는 다음의 표와 같다.

표 4. 구조물경사계 관리기준 및 성적서 절대값

< 여러가지 구조물의 각변위 한계 (Bjerrum, 1963) >	
각변위, $\delta / L$	관리기준
1/100	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 칸막이 벽이나 벽돌벽의 상당한 균열</li> <li>- 가소성벽들의 안전한계</li> <li>- 일반적인 건물의 구조적 손상이 예상되는 한계</li> </ul>
1/200	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 강성의 고층빌딩의 전도가 눈에 띄일 수 있는 한계</li> </ul>
1/300	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 칸막이벽에 첫 균열이 예상되는 한계</li> <li>- 고가크레인의 작업곤란이 예상되는 한계</li> </ul>
1/500	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 균열을 허용 할 수 없는 빌딩에 대한 안정한계</li> </ul>
1/600	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 사재를 가진 뼈대의 위험한계</li> </ul>
1/1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 침하에 예민한 기계 기초의 작업곤란</li> </ul>
기 준	판 단
1차관리기준치 : $H \times 1/500 = 0.100\text{mm}$ 2차관리기준치 : $H \times 1/300 = 0.167\text{mm}$ H=50mm(센서길이)	1차관리기준치 > 실측치 : 안전 2차관리기준치 < 실측치 < 2차관리기준치 : 주의 2차관리기준치 < 실측치 : 위험
<구조물 경사계 성적서 절대값> A축 : Serial Number : 80074, Gage Factor = $20/\text{span} = 20 / 2953.32 = 0.00678$ B축 : Serial Number : 80074, Gage Factor = $20/\text{span} = 20 / 3028.36 = 0.00660$ $D = (20/\text{span}) \times (R1 - R0)$ D = Degree(o), R1 = Current reading(mV), R0 = Zero reading(mV), S = Sensitivity(span mV) Sensor displacement = $\sin D \times \text{TILT Beam Length}(0.05\text{m})$ (TILT Beam Length : Sensor displacement = structure height : structure displacement)	

### 5.3 계측결과

동슬래그 속채움에 의한 케이슨의 안정적 거치확인을 위하여 1개소에 구조물 경사계를 설치하였고 속채움이 완료된 2009년 7월 15일(경과일 3일)에 초기치를 설정하여 320일(2010년 5월 기준)동안의 케이슨 변위를 측정하였다.

구조물 경사계의 측정 방향은 양방향인 A측방향, B측방향(해측에서 육상으로 볼 때)으로 측정하였고 센서변위측정에 대한 구조물 변위량은 아래 그림 9와 같다.

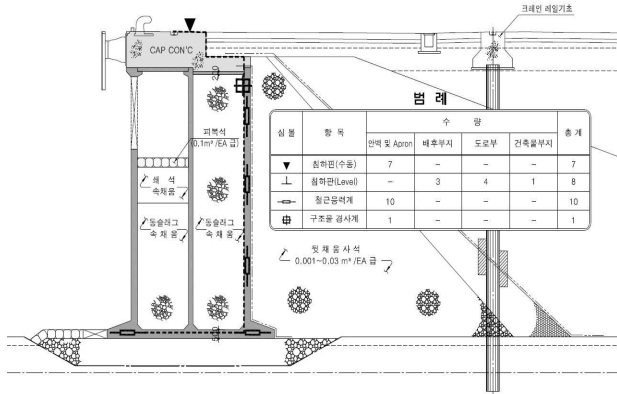


그림 7. 계측 계획 표준단면도

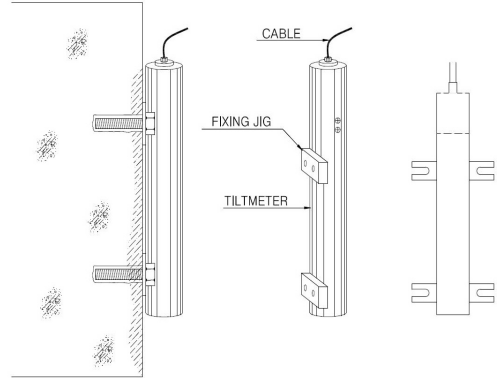


그림 8. 구조물 경사계

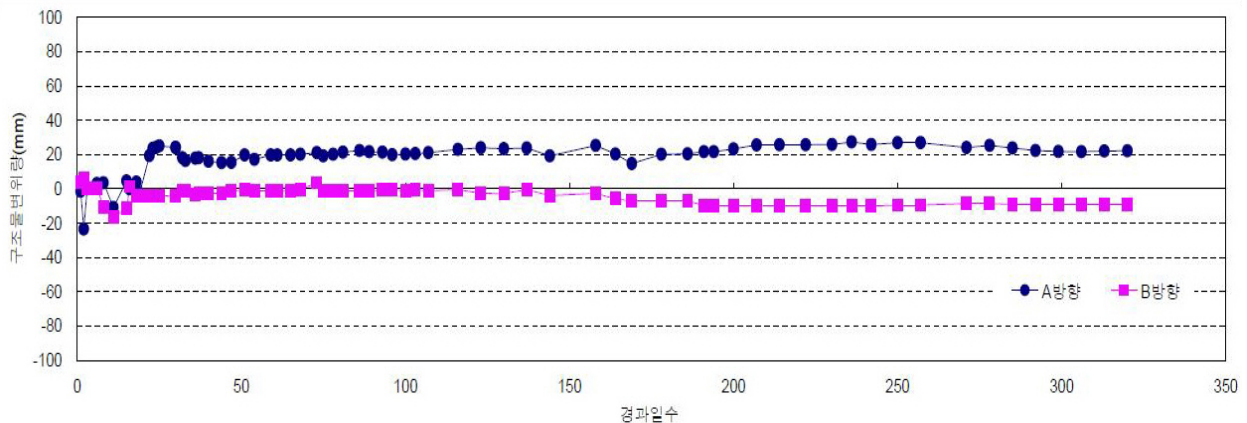


그림 9. 구조물 변위량

센서의 방향은 해측으로 육측방향으로 볼 때, A측 센서의 경우 해측 방향이(+) 방향이며, 육측 방향이 (-)방향이 되며, B측의 경우 좌측이(-), 우측이(+)방향이 된다.

케이슨 속채움 완료 20일 이후 A방향의 경우 구조물변위량 20mm에서 안정화되어 고정값을 가지고 있으며 B방향의 경우는 구조물변위량 (-)10mm에서 안정화되어 고정값을 유지하고 있다.

### 6. 결론

케이슨 속채움재로서 동슬래그 사용성에 관한 화학적 및 물리적 분석을 통하여 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- (1) 동슬래그는 대체로 입도분포가 균등하여 통일분류법에서도 입도분포가 양호한 SP로 분류되고 모든 시료가 비소성(NP)로 나타났으며, No.200체 통과분이 거의 0%에 가까운 속채움재로서 적합한 입도분포특성을 가진 것으로 판단된다.
- (2) 동슬래그의 단위 중량은 3.47g/cm<sup>3</sup>로서 일반적으로 속채움 재료로 사용되는 해사의 2.645g/cm<sup>3</sup>과 비교하여 매우 큰 것으로 나타났으며, 단위중량이 중요한 요소인 속채움 재료로서 동슬래그 적용은 전혀 문제가 없는 것으로 판단된다.
- (3) 동슬래그의 화학적 특성은 제련조업시 사진 조합으로 인하여 화학적 편차가 극히 작고 안정화되어 있다. 또한 천연모래에서의 염화물량 허용값 0.04%와 같은 수준으로 규격화 되어 있어 중금속 등의 용출에 관해서는 국내의 판정기준을 만족하고 있다.
- (4) 동슬래그로 속채움을 케이슨의 거치 후 구조물 경사계를 통하여 장기 변위 측정결과 거치 20일이 후 변위에 대한 안정화를 이루어 정착 된 것으로 판단된다.

케이슨 속채움 재료로서 동슬래그의 사용은 화학적, 물리적 안정성을 바탕으로 경제적 우위성을 가지며 나아가서는 재활용 재료의 친환경 건설재료 활용으로 사용 범위를 넓혀 나갈 더 많은 연구가 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 ‘울산 신항(1-2단계) 남항부두 축조공사’ 중 LS-Nikko 동제련 부두인 6번석 관련 동슬래그 사용관련 논문이며 설계 및 시공에 관련된 모든 분들께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. LG-Nikko 동제련(주) 제련기술연구소(2000), “토목·건설용 소재 LG-Ferrosand”, pp.3~22.
2. 한국건설기술연구원(2000), “동제련 슬래그의 건설재료 활용 및 기준 개발”, pp.168~236.
3. 藤田圭一(1995), “軟弱地盤對策工法總技術, 日本軟弱地盤對策工法總技術委員會”, pp.749~753
4. 박조범(2000), “동제련 슬래그를 혼입한 모르타의 강도특성에 관한 연구”, 석사논문, pp.7~17
5. 지반환경(2000), “지반공학분야에서 산업폐기물 재활용 기술: 폐비밀 골재와 동제련 슬래그를 중심으로”, pp.5~10
6. Teik-Thye Lim(2006), “Assessment of the use of spent copper slag for land reclamation”, ISWA 2006, pp.67~73
7. 박영목, 최인걸(2007), “현장실무를 위한 지반공학”, 구미서관, pp.109~131