

동슬래그 및 제강슬래그의 해양 콘크리트용 중량 골재 사용성 평가

Evaluation on Applicability of Copper and Steelmaking Slags for Use of Heavy Weight Aggregates in Marine Concrete Structure

문 훈¹ · 장보길¹ · 김지현¹ · 정철우^{1*}Hoon Moon¹ · Bo-Kil Jang¹ · Ji-Hyun Kim¹ · Chul-Woo Chung^{1*}

(Received June 20, 2017 / Revised September 4, 2017 / Accepted September 5, 2017)

Heavy weight concrete can be used in marine concrete structure to improve resistance against high wave energy. However, heavy weight aggregate, which is an indispensable material for heavy weight concrete, is difficult to be supplied in large quantities because its use is limited due to its high cost. In this work, the applicability of heavy weight by-products, copper and 3 month aged steelmaking slags, were evaluated as sources of heavy weight aggregate for marine concrete structures. Experimental results showed that copper slag was found to be a stable material for marine concrete structure. However, 3 month aged steelmaking slag showed significant expansion by 80°C water immersion test and ASTM C 1260 test. In addition, depth of chloride ion penetration in concrete was higher at which steelmaking slags were located. It was associated with porosity of steelmaking slag, and for this reason, steelmaking slag was not found to be suitable for marine concrete structure.

키워드 : 중량 콘크리트, 중량 골재, 재활용, 동슬래그, 제강슬래그**Keywords** : Heavy weight concrete, Heavy weight aggregate, Recycling, Copper slag, Steelmaking slag

1. 서론

일반적으로 중량 콘크리트는 χ -선과 γ -선 등의 방사선을 차폐하기 위한 구조물에 주로 사용되는 것으로 알려져 있다(Yang et al. 2012; Lee et al. 2014). 그러나 중량 콘크리트는 높은 단위용적중량을 가지므로 태풍과 같은 상황에서 발생하는 높은 파랑에너지에 대해 보다 효율적인 대응이 가능하다. 이러한 이유로 중량 콘크리트를 테트라포드와 같은 수중 구조물에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다(Lee et al. 2016).

일반적으로 중량 콘크리트를 제조하는 대표적인 방법은 굵은골재인 쇠석을 고밀도의 중량 골재로 치환하는 것이다. 대표적인 중량골재로는 자철석, 갈철석, 중정석 등이 사용되고 있다(Mun et al. 2013). 그러나 이들 골재는 국내 생산량이 적어 대부분 수입에 의존하고 있으며, 고가이므로 국내 건설현장에서의 공급이 용이하지 않다. 이에 따라 높은 수밀성 및 고중량의 특성이 요구되는 수중

구조물이나 높은 파랑에 저항하기 위한 해양 구조물, 소파블록 등에 중량 콘크리트를 활용하기 위해서는 경제적이며 수급이 용이한 중량 골재가 필요하다.

최근 건설업계에서는 천연 골재의 고갈로 인해 다양한 대체 재료를 콘크리트의 골재로서 활용하고 있다(Kim et al. 2007; Choi et al. 2012; Hwang et al. 2013). 또한 이러한 노력의 일환으로 다양한 형태의 산업부산물을 골재로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. KS F 2527 콘크리트용 골재 규준에 따르면 콘크리트용 골재로서 활용 가능한 산업부산물은 고로슬래그, 동제련슬래그(이하 동슬래그), 페로니켈슬래그, 전기로산화슬래그(이하 제강슬래그), 용융슬래그, 바텀애쉬 및 연슬래그 등이 있다고 규정되어 있다. 그러나 해당 골재의 안정성 및 사용성에 대한 연구결과 및 자료의 부족으로 적극적인 재활용이 이루어지지 않고 있다. 그러나 KS F 2527에서 규정된 동슬래그 및 제강슬래그의 경우 밀도가 3.0g/cm³을 초과하므로 해양 구조물용 중량 골재로서의 활용성이

* Corresponding author E-mail: cwchung@pknu.ac.kr

¹부경대학교 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Pukyong University, Busan, 48513, Korea)

존재하므로 본 연구에서 그 활용성을 평가하고자 한다.

동슬래그는 대표적인 산업부산물 골재이며 연간 70만톤 이상이 발생되고 있어, 이를 재활용하기 위한 다양한 형태의 연구가 진행 중이다(Ji et al, 2006; Lee 2008; Hong et al, 2016). 동슬래그는 밀도가 약 3.4g/cm³ 정도이며, 일반 잔골재보다 다소 굵은 입도를 가지는 것으로 알려져 있어 해양 구조물용 중량 잔골재로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다. 제강슬래그의 경우 연간 약 600만톤이 생산되며 밀도는 3.3g/cm³ 정도이다. 제강슬래그는 덩어리 형태로 생산되므로 분쇄 과정을 거쳐 골재로 활용되는데 이때 원하는 입도로 생산이 가능하다. 따라서 제강슬래그는 중량 굵은골재로서의 활용가능성이 존재한다. 몇몇 연구결과들에 따르면, 제강슬래그의 활용을 위해서는 3~6개월 정도의 에이징(aging)을 거치거나 오토클레이브 반응을 통하여 free lime(CaO) 및 periclase (MgO)의 팽창반응을 발생시키면 골재로서의 활용이 가능하다고 보고되었다(Moon et al, 2002; Yoo et al, 2006). 그러나 여전히 화학적인 안정성에 대한 연구는 미흡한 실정이다(Kim et al, 2009; Jung et al, 2016).

본 연구에서는 산업부산물을 100% 골재로 사용한 중량 콘크리트의 개발을 위하여 동슬래그 및 제강슬래그의 활용성을 평가하고자 하였다. 동슬래그 및 제강슬래그의 광물화학적 성상을 확인하기 위하여 X-ray 회절분석을 진행하였으며, 이러한 골재의 화학적 안정성 평가를 위하여 80°C 수중에서의 수침팽창시험 및 80°C 1M NaOH 용액에서의 알칼리 골재 반응성 평가를 진행하였다. 최종적으로 잔골재, 굵은골재를 동슬래그 및 제강슬래그로 치환한 콘크리트의 강도특성 및 염소이온 침투저항성을 측정하여 해양구

조물용 중량콘크리트로의 사용성을 확인하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험재료

2.1.1 시멘트

콘크리트 배합, 수침팽창시험 및 알칼리 골재반응 시험을 위해 사용된 시멘트는 KS L 5201 규준을 따르는 쌍용양회사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며 화학적 조성은 Table 1과 같다.

2.1.2 동슬래그

동슬래그는 5mm 이하의 입도를 가지는 것을 사용하였으며, 3.43g/cm³의 겉보기밀도를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 1(a)에서 나타난 바와 같이 동슬래그의 주 입도가 1.2~2.5mm 영역에 집중되어 콘크리트용 잔골재의 표준입도 곡선을 벗어나는 것으로 나타났으며 조립률(Fineness Modulus; FM) 또한 3.63으로 높은 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 동슬래그 골재를 콘크리트용 잔골재 표준 입도 곡선에 만족하도록 입도분포를 조절하여 사용하였다. 입도조절 이후의 조립률은 2.45로 나타났다.

2.1.3 제강슬래그

제강슬래그는 국내에서 생산된 것이며, 3개월간 대기중에서 에이징 처리를 거친 것을 사용하였다. 본 연구에 사용된 제강슬래그

Table 1. Chemical compositions of type I ordinary portland cement(%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
63.42	19.48	4.69	4.08	3.11	3.04	1.32	0.38	0.20	0.13	0.11

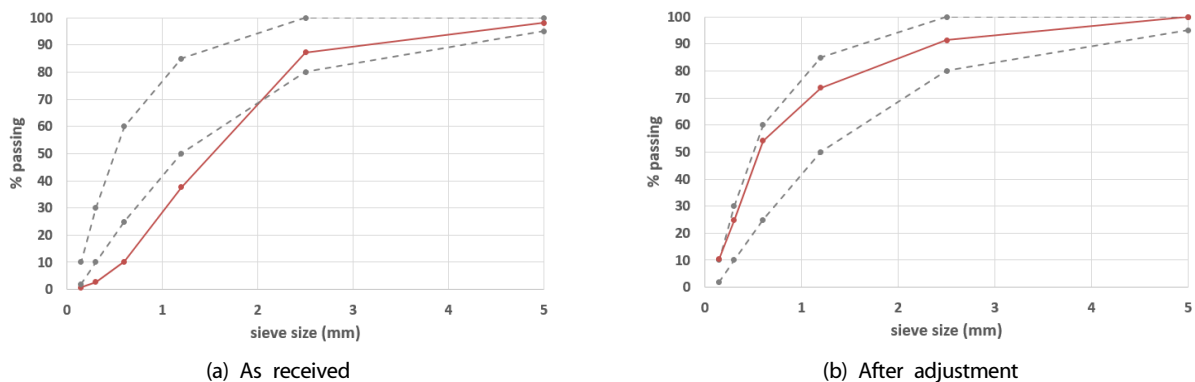


Fig. 1. Size gradation of copper slag(FM of as received sample = 3.63, FM after adjustment = 2.45)

는 전로슬래그 90%, 전기로산화슬래그 10%가 혼합되었으며, KS F 2535 규준을 만족하는 것이다. 콘크리트용 굵은골재로 사용하기 위하여 최대크기 25mm 이하로 파쇄된 것을 사용하였으며, 표준입도곡선내에 분포하도록 입도를 조절하였다. 제강슬래그의 겉보기 밀도는 3.31g/cm³로 나타났는데, 이는 동슬래그보다 다소 낮지만, 충분히 중량 골재로서 활용이 가능할 정도의 밀도값에 해당된다.

2.2 시험체 제조 및 분석

2.2.1 XRF 및 XRD

동슬래그 및 제강슬래그의 화학적 성분을 파악하기 위하여 XRF (X-ray fluorescence spectrometer, Shimadzu, Japan, XRF-1700) 분석을 진행하고, 각각의 광물학적 성상을 확인하기 위하여 XRD (X-ray diffractometer, Rigaku, Japan, Ultima IV) 분석을 하였다.

2.2.2 골재의 화학적 안정성 평가

동슬래그 및 제강슬래그 골재의 반응으로 인한 팽창정도 및 안정성을 측정하기 위하여 80°C 수중에 모르타르 시험체를 침지시켜 길이 및 형상변화를 관찰하였다. 이는 free CaO 및 MgO의 수화 반응에 의한 portlandite 및 brucite의 생성을 촉진시켜 이로 인해 발생하는 팽창균열을 확인하기 위함이다. 또한 상당한 비결정성을 가지는 해당 골재들의 알칼리골재 반응성을 확인하기 위하여 ASTM C 1260(American Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates, Mortar-Bar Method)에 의거하여 80°C의 1M NaOH 용액에 모르타르 시험체를 침지시킨 후 시간에 따른 길이변화를 관찰하였다.

Table 2. Grading requirements of fine aggregate in ASTM C 1260

Sieve size		Mass(%)
Passing	Retained on	
4.75mm(No.4)	2.36mm(No.8)	10
2.36mm(No.8)	1.18mm(No.16)	25
1.18mm(No.16)	0.6mm(No.30)	25
0.6mm(No.30)	0.3mm(No.50)	25
0.3mm(No.50)	0.15mm(No.100)	15

Table 4. Mix proportions of concrete(kg/m³)

Type	W/B(%)	S/a(%)	Water	Cement	Blast furnace slag	Silica fume	Copper slag	Steelmaking slag
Plain	35	40	180.0	514.0	-	-	898.2	1,300.5
C-R	35	40	180.0	436.9	51.4	25.7	898.2	1,300.5

동슬래그 및 제강슬래그 골재의 화학적 안정성 평가를 위한 모르타르 시험체 배합을 위하여 Table 2에 나타난 ASTM C 1260에서 규정된 잔골재의 입도에 맞추어 모르타르 시험체를 제작하였다. 모르타르 시험체의 배합비는 Table 3에 정리하였다. ASTM C 1260 규준에서는 w/c = 0.47, C:S 비는 1:2.25로 제시되어 있으나 이는 중량잔골재에 맞는 규준은 아니기 때문에, 이를 표준사로 가정한 후, 표준사의 중량이 차지하는 부피에 맞도록 각각의 슬래그의 중량을 조절하였다.

2.2.3 콘크리트 제작

동슬래그 및 제강슬래그를 골재로 사용한 콘크리트의 배합은 Table 4와 같다. 잔골재 및 굵은골재의 치환율은 100%로 하였으며 해양 구조물로서의 활용 가능성을 평가하기 위하여 기본 배합(Plain) 및 염해 저항성이 높은 배합(Chloride-Resistant, C-R)을 결정하였다. 염해 저항성 향상을 위해 시멘트 중량의 15%를 혼화재(고로슬래그 10%, 실리카퓌름 5%)로 치환하였다(Ryu et al. 2012; Lee et al. 2013). 고유동성을 위한 첨가한 고성능 감수제는 시멘트 중량의 1.1%를 사용하였다.

배합설계 상 콘크리트의 단위용적 중량은 Plain 2.90kg/m³, C-R 2.88kg/m³으로 나타났다. C-R의 단위용적질량 감소는 밀도 3.15g/cm³인 시멘트의 일부가 밀도 2.9g/cm³의 슬래그 및 밀도 2.1g/cm³의 실리카퓌름으로 치환되었기 때문이다.

2.2.4 콘크리트 압축강도 측정

굳지 않은 상태의 콘크리트를 Ø100mm × 200mm 크기의 실린더 몰드에 다져 넣은 후, 24시간 후에 탈형하였다. 이후 27일간 포화된 수산화칼슘 용액에 침지하여 양생하였다. 압축강도의 측정

Table 3. Mix proportions of mortar specimen for length change test(g)

Type	W/C (%)	Water	Cement	Copper slag	Steel making slag
Copper slag	47	206.8	440	1,306	-
Steelmaking slag	47	206.8	440	-	1,260

은 재령 28일에 이루어졌으며, KS F 2405에 따라 전동식 압축강도 시험기(S1 industry Co., Korea, S1-1471D)를 사용하여 측정하였다.

2.2.5 콘크리트 염해 저항성 측정

콘크리트의 염해 저항성은 NT Build 492(Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments) 평가 방법을 사용하였다. 원주형 실린더 시험체를 $\varnothing 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ 크기로 절단하여 각 절단면을 0.3N NaOH 용액과 10% NaCl 용액에 침지시킨 후 30V의 전압을 24시간 가하였다. 그 후 시험체를 할렬 파괴하여 파괴 단면에 0.1M AgNO₃ 용액을 분무하여 염소 이온 침투 깊이를 측정하였다. 측정된 염소이온 침투 깊이를 이용하여 염소이온 확산 계수를 구하여 염해 저항성을 평가하였다. 염해 저항성을 평가하기 위한 시험체는 압축강도 측정과 동일한 배합을 사용하였다(Plain, C-R). 압축강도 측정용 시험체와 같이 탈형 후 27일간 포화 수산화칼슘 용액에서 양생하여 재령 28일에 염해 저항성을 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 XRF

동슬래그 및 제강슬래그의 화학적 성분을 XRF를 통해 분석한 결과는 Table 5에 나타나 있다. 동슬래그는 주로 Fe₂O₃ 및 SiO₂로 구성된 것으로 나타났으며 CaO, Al₂O₃ 및 MgO 성분 또한 함유하고 있었다. 제강슬래그는 주로 CaO로 구성되어 있으며, Fe₂O₃, SiO₂가 15% 정도로 구성된 것으로 나타났다. 또한 제강슬래그는 상당량의 MgO 성분을 함유하고 있으며, 다소간의 P₂O₅, Al₂O₃ 및 MnO 성분을 함유하고 있는 것으로 나타났다.

3.2 XRD

Table 5. Chemical compositions of copper slag and steelmaking slag(%)

Chemical component	Copper slag	Steelmaking slag
CaO	5.38	52.15
Fe ₂ O ₃	44.26	16.85
SiO ₂	37.50	14.54
MgO	1.35	7.71
P ₂ O ₅	0.17	3.72
Al ₂ O ₃	4.62	2.44
MnO	0.16	1.40

Fig. 2는 동슬래그의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 동슬래그의 XRD 패턴에서는 magnetite, fayalite와 같은 광물상이 확인되었다. Magnetite는 철광석 원석에서 주로 관찰되는 자철광 성분이며, fayalite는 철을 함유한 실리케이트 광물상이다. 이외에도 quartz, periclase와 같은 광물로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 특히 미량의 periclase가 미반응 상태로 여전히 존재함을 확인할 수 있는데, 이는 이후 brucite의 형성으로 인하여 팽창균열을 발생시킬 수 있기 때문에 동슬래그 골재를 콘크리트에 활용할 시 주의를 기울일 필요성이 있다. 또한 동슬래그의 경우 완만한 형태의 amorphous band가 2 θ 회절각 20~40° 사이에서 분포하는 것을 알 수 있는데, 이는 동슬래그의 상당량이 비결정질로 구성되어 있음을 알 수 있는 부분이다.

Fig. 3은 제강슬래그의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 제강슬래그의 XRD 패턴은 동슬래그보다는 결정성이 높으며, 다양한 형태의 광물상을 함유하고 있는 것으로 나타났다. portlandite는 3개월간의 aging 결과로 CaO가 수분과 반응하여 생성된 것으로 보이며, 이의 중성화 반응으로 calcite가 생성된 것을 확인할 수 있다. 또한

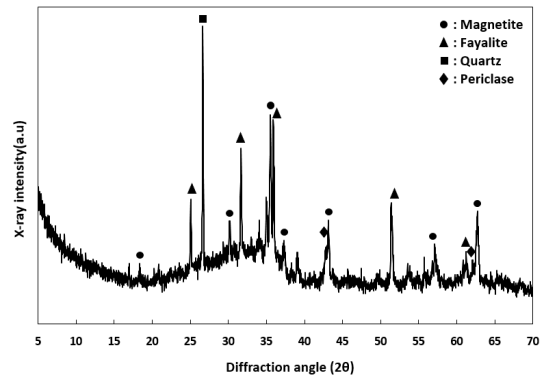


Fig. 2. XRD pattern of copper slag

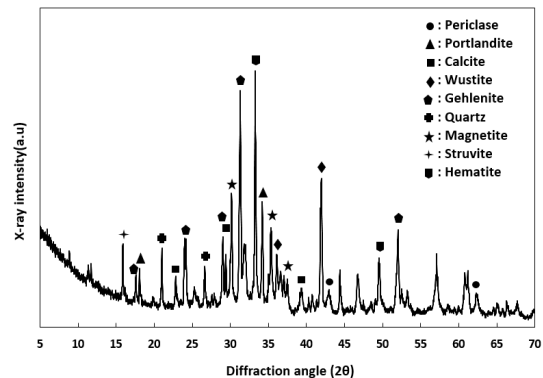


Fig. 3. XRD pattern of steelmaking slag

일정량의 periclase가 미반응 상태로 여전히 존재함을 확인할 수 있다. 그 외 magnetite, wustite, hematite 등의 산화철 계열 광물들도 관찰되었으며, 칼슘알루미네이트 상인 gehlenite 또한 존재함을 확인하였다. Struvite는 제강슬래그 내부에 존재하는 마그네슘 및 인산염 성분의 반응 결과로 생성된 것으로 사료된다.

3.3 화학적 안정성 평가

Fig. 4는 80°C에서 수중 침지된 모르타르 바의 팽창률을 그래프로 나타낸 것이다.

동슬래그를 잔골재로 사용한 시험체의 경우 팽창이 발생하지 않고 오히려 수축되는 것으로 나타났다. 그러나 제강슬래그 혼입 시험체의 수침팽창 결과에 따르면 초기팽창 후 감소, 이후 서서히 팽창이 증가하는 현상을 보였다. 또한 측정 13일 차에 균열이 발생하였으며, 측정 19일 때 시험체가 파괴되었다.

Fig. 5는 80°C의 1M NaOH 용액에 침지된 모르타르 바의 팽창률을 나타낸 것이다. ASTM C 1260에서 제시하는 바에 따르면 측정

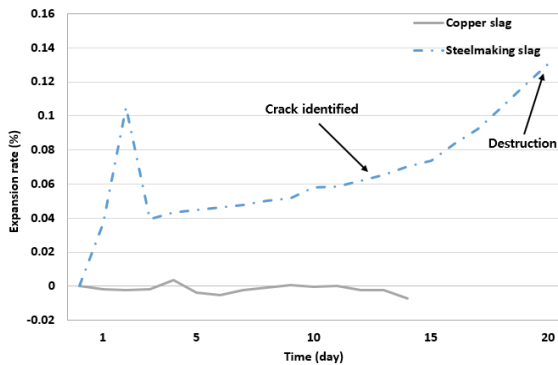


Fig. 4. Expansion of mortar specimens in 80°C tap water incorporating copper and steelmaking slag as fine aggregates

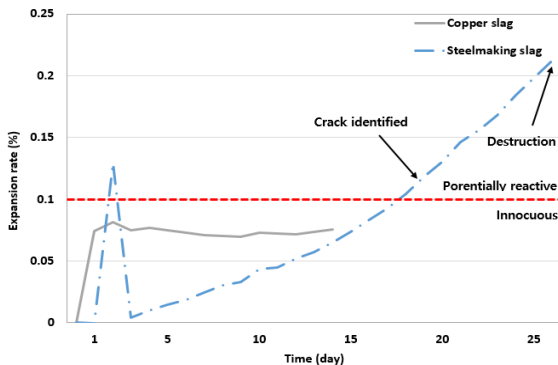


Fig. 5. Expansion of mortar specimens in 80°C 1M NaOH solution incorporating copper and steelmaking slag as fine aggregates

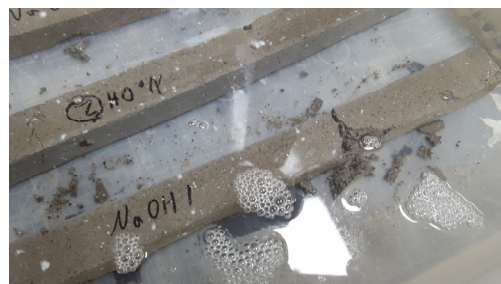
기간 동안 0.2% 이상의 팽창율을 기록할 경우 reactive aggregate, 0.2% 미만, 0.1% 이상의 팽창율의 경우 potentially reactive aggregate, 0.1% 미만의 팽창율을 기록할 경우 innocuous aggregate로 판단한다. 동슬래그를 잔골재로 사용한 시험체는 80°C NaOH 용액에 침지 시 초기에 팽창이 발생하였으나, 이후에는 특별한 팽창이 발생하지 않는 것으로 관찰되었다. 그러나 80°C 1M NaOH에 침지된 제강슬래그 시험체에서 팽창이 과도하게 나타나 potentially reactive 구간을 넘는 것으로 나타났다. 이후 이러한 팽창은 다시 감소하였다가 서서히 증가하는 경향을 보였다. 일반적으로 길이 변화 측정 시험에서 초기에 reactive 또는 potentially reactive 구간을 넘는 경우에는 지속적인 측정 시 유의미한 결과를 나타내는 경우가 존재하기 때문에 14일 이후에도 측정을 계속 진행하였다.

측정 결과 제강슬래그 시험체의 경우 규준에서 제시하는 14일 이내에는 팽창율이 0.1%를 넘지 않는 것으로 나타났다. 그러나 팽창율이 지속적으로 상승하는 경향이 나타났으며, 추가적으로 길이 변화 측정을 실시한 결과 18일 경과 시 팽창률이 0.1%를 넘는 것으로 나타났다. 이후 측정 19일차에 Fig. 6(a)와 같이 표면 박리 현상 및 균열이 발생하였으며, 측정 26일차에 Fig. 6(b)와 같이 측정을 위해 보관 중이던 용기에서 파괴되었다.

80°C의 수침 및 1M NaOH 용액에서 실시한 길이변화시험 결과에 의하면 동슬래그는 화학적 안정성이 제강슬래그 골재보다도 뛰



(a) Cracks of specimen



(b) Destruction of specimen during storage

Fig. 6. Photographic images of mortar specimens immersed in 80°C tap water and NaOH solution. Note the cracks generated during expansion test

어나며, 다소간 존재하는 것으로 나타난 MgO의 반응이 유해한 균열이나 팽창을 발생시키지 않는 것으로 나타났다. 또한 비결정성 실리카 성분에 의한 알칼리 골재 반응이 유해한 수준으로 발전하지 않는 것을 확인하였다. 따라서 동슬래그의 경우 콘크리트용 골재로 사용하여도 콘크리트의 안정성에 큰 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 이는 추후 연구에서 장기간의 알칼리 용액 침지 시험을 통해 더욱 명확하게 증명 할 필요성이 있다.

제강슬래그를 콘크리트용 골재로 사용할 시에는 내부에 존재하는 periclase의 반응으로 인한 팽창 균열을 항상 염두에 두고 이를 억제할 방안이 수립되어야 할 것으로 판단된다. 이는 3개월간 에이징 처리된 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 사용한 본 연구에서의 실험 결과가 콘크리트의 안정성에 문제가 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났기 때문이다. 그러나 제강슬래그와 같이 큰 덩어리 형태로 생산되는 부산물 슬래그는 중심부 및 주변부에서 냉각속도의 차이가 발생한다. 따라서 시료의 채취 위치에 따라 광물학적 성상의 차이가 다소 발생할 수 있다(Yildirim et al, 2011). 결정화가 더 진행된 골재일수록 칼슘 및 마그네슘과 같은 금속 양이온들이 자유산화물(free oxide)의 형태로 존재하지 않고 실리카질의 내부에 결정화되어 존재할 가능성이 높아지므로, 중심부의 경우 다소 높은 화학적 안정성을 기대할 수도 있다. 또한 기존 논문들의 결과에 따르면, 제강슬래그의 경우 에이징 처리 정도 및 방법에 따라 서로 팽창반응에 유의미한 차이를 보일 수 있다고 보고되었다. 따라서 이러한 점들을 고려할 때, 본 논문에서 도출된 결과에 따라 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 사용할 수 없다고 단언하기는 어려울 것으로 사료된다. 그러나 현재까지 개발된 기술 수준으로는 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하기에는 골재의 안정성 측면에서 위험할 것으로 생각된다. 따라서 이를 활용하기 위해서는 유해한 팽창을 일으킬 수 있는 자유 금속산화물(free oxide; 여기서는 CaO 및 MgO)의 양을 정량적으로 평가할 수 있는 시험방법을 개발하고, 에이징 과정에 대한 기준을 설립하여 재료의 안정성에 대한 충분한 신뢰도를 우선적으로 확보해야 할 것으로 사료된다.

3.4 압축강도

Fig. 7은 동슬래그 및 제강슬래그를 골재로 사용한 콘크리트의 재령 28일 압축강도를 나타낸 것이다. Plain 시험체의 압축강도는 41MPa로 측정되었으며 C-R 시험체는 44MPa로 측정되었다. 이는 실리카폼 및 슬래그의 포졸란반응에 의한 강도증진 효과로 판단된다.

3.5 염해 저항성 평가

Fig. 8에 NT Build 492 시험 후 시험체를 할렬 파괴하여 0.1M AgNO₃ 용액을 분무하여 염소이온의 침투 깊이를 확인한 후, 이를 이용하여 얻은 염화물 확산계수를 나타내었다. Plain 시험체의 평균 염화물 침투 깊이는 19.61mm로 측정되었으며 이의 염화물 확산계수는 9.04m²/s로 나타났다. C-R 시험체의 평균 염화물 침투 깊이는 9.49mm로 측정되었으며, 이의 염화물 확산계수는 4.11m²/s로 나타났다. C-R 시험체의 염화물 확산계수는 plain 시험체의 절반이하 수준으로 나타났으며, 이는 슬래그 및 실리카폼의 혼입이 콘크리트의 내염해성에 크게 기여할 수 있음을 의미한다.

Fig. 9에 나타난 내용에 따르면, 염화물 침투깊이는 제강슬래그 골재가 위치하지 않은 부분과 제강슬래그가 위치한 부분에서 침투 깊이에서 확연한 차이를 보였다. 각 시험체에서 염화물이 침투한 부분과 그렇지 않은 부분의 경계선이 제강슬래그 골재를 따라 분포하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Plain 시험체 및 C-R 시험체에서도 같은 경향을 나타낸 것으로 제강슬래그 골재가 염해 저항성 측면에서는, 마치 철근의 피복두께가 국부적으로 줄어든 것과 유사한 형태의 부정적인 영향을 미칠 수 있는 것을 의미한다.

이는 Fig. 10(a)과 같이 제강슬래그 내부에 철 성분을 함유하고

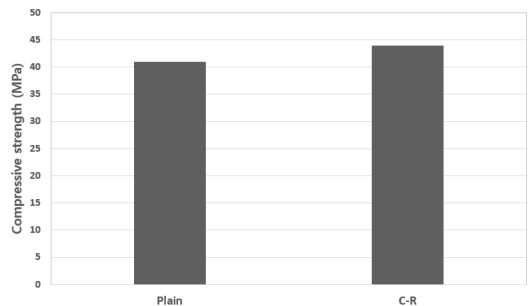


Fig. 7. The 28-day compressive strength of concrete incorporating copper and steelmaking slag

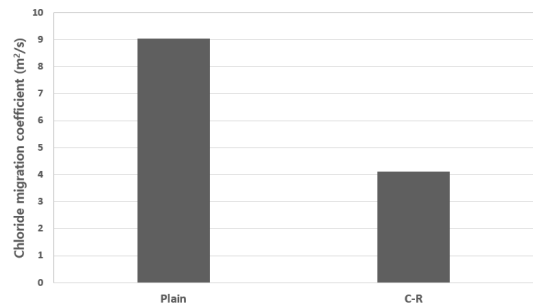


Fig. 8. The 28day chloride migration coefficient of concrete incorporating copper and steelmaking slag

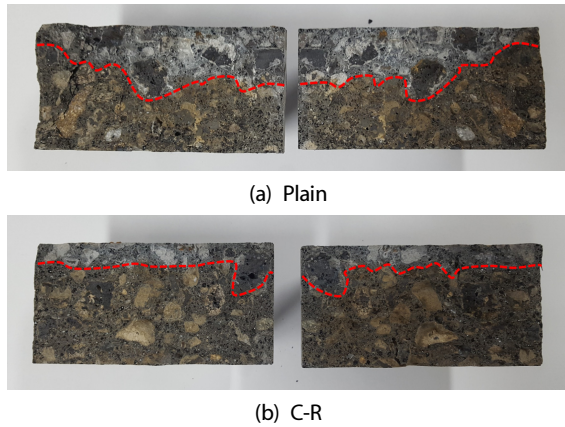


Fig. 9. Depth of chloride ion penetration (red dashed lines indicate penetration depth)



(a) Steel present in the steelmaking slag



(b) Section of steelmaking slag containing numbers of voids

Fig. 10. Photographs of sliced steelmaking slag

있어 밀도는 높으나 Fig. 10(b)와 같이 다량의 공극을 가지는 제강 슬래그의 특성으로 인한 것으로 판단된다. 특히 골재 내부의 철 성분의 혼입은 해양환경에 노출 시 부식의 문제를 초래할 수 있기 때문에 더욱 위험할 수 있어 해양 환경에 노출 시 각별한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 동슬래그 및 3개월간 에이징처리된 제강슬래그의 해양구조물용 중량 콘크리트의 잔골재 및 굵은골재로서 사용성을 평가하기 위한 실험을 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동슬래그 골재는 수침팽창 및 알칼리 골재반응 실험에서 유해

한 팽창을 발생시키지 않았다. 그러나 3개월간 에이징처리된 제강슬래그 골재는 수침팽창 및 알칼리 골재반응 실험에서 유해한 팽창 및 균열, 파괴 거동을 보였다. 따라서 3개월간의 에이징 과정을 거친 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하기 어려울 것으로 판단된다.

2. NT Build 492를 통한 염해 저항성 평가결과 슬래그 10% 및 실리카폼 5%를 치환한 배합에서 염해 저항성이 상승하는 것으로 나타났다.
3. 콘크리트 염소이온 침투시험 결과 다공성의 제강슬래그가 위치한 면을 따라 염화물의 침투깊이가 변화함을 확인하였다.
4. 동슬래그는 해양구조물용 중량콘크리트의 골재로서 활용성이 존재하나, 제강슬래그는 특유의 다공성으로 인하여 염소이온의 확산을 초래하여 해양구조물용 중량골재로 활용하기에는 부적합한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화지원 연구개발사업의 연구비지원(16TBIP-C111160-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, Y.W., Oh, S.R., Choi, B.K., Lee, H.H., Choi, W. (2012). A study on physical properties of FINEX slag to utilize fine aggregate for concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **7(4)**, 79-87 [in Korean].
- Hong, C.W., Lee, J.I., Ryu, J.H. (2016). Characteristics of fresh mortar with particle size and replacement ratio of copper slag, Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, **26(1)**, 41-48 [in Korean].
- Hwang, E.H., Kim, J.M., Yeon, J.H. (2013). Characteristics of polyester polymer concrete using spherical aggregates from industrial by-products, Journal of Applied Polymer Science, **129(5)**, 2905-2912.
- Ji, S.W., Seo, C.H. (2006). The application of copper smelting slag as concrete aggregate, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **3(1)**, 68-75 [in Korean].
- Jung, W.K., Hwang, Y.S., Park, D.C., Cho, B.S. (2016). Development of concrete and evaluation of properties of combined steel making slag aggregates for offshore structure

- production (I), Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, **25(2)**, 49–59 [in Korean].
- Jung, W.K., Kim, H.S., Park, D.C., Cho, B.S. (2016). Development of concrete and evaluation of properties of combined steel making slag aggregates for offshore structure production (II), Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, **25(2)**, 60–68 [in Korean].
- Kim, J.M., Kwak, E.G., Bae, K.S. (2007). The properties of underwater-hardening epoxy mortar used the rapidly cooled steel slag (RCSS), Journal of the Korea Concrete Institute, **19(5)**, 549–555 [in Korean].
- Kim, N.W., Bae, J.S. (2009). A fundamental study on the characteristics of concrete with the substitution ratio of the rapidly cooled steel slag, Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **13(1)**, 78–87 [in Korean].
- Lee, H.S., Kim, M.K., Kwon, S.J. (2014). Study on analysis technique comparison and evaluation of high thermal conductivity concrete with magnetite aggregates and steel powder, Journal of the Korea Concrete Institute, **26(3)**, 315–321 [in Korean].
- Lee, H.H., Kwon, S.J. (2013). Evaluation of chloride penetration in concrete with ground granulated blast furnace slag considering fineness and replacement ratio, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **1(1)**, 26–34 [in Korean].
- Lee, M.H. (2008). A study on the evaluation of the durability of concrete using copper slag aggregates, Journal of the Korea Concrete Institute, **20(6)**, 773–784 [in Korean].
- Lee, D.S., Oh, S.H., Cho, B.S. (2016). Experimental investigation on the change of stability coefficient of tetrapod according to difference in density, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, **28(3)**, 124–131 [in Korean].
- Moon, H.Y., Yoo, J.H. (2002). Utilization of electric arc furnace slag and converter slag after aging for concrete aggregate, Journal of the Korea Concrete Institute, **14(4)**, 567–607 [in Korean].
- Mun, J.H., Mun, J.S., Yang, K.H. (2013). Stress-strain relationship of heavyweight concrete using magnetite aggregate, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **29(8)**, 85–92 [in Korean].
- Ryu, D.W., Kim, W.J., Yang, W.H., You, J.H., Ko, J.W. (2012). An experimental study on the freezing-thawing and chloride resistance of concrete using high volumes of GGBS, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **12(3)**, 315–322 [in Korean].
- Yang, K.H., Moon, J.H. (2012). Mix proportions and physical properties of heavy weight concrete for nuclear power plant, Korea Institute of Building and Construction, **12(3)**, 9–14 [in Korean].
- Yoo, J.H., Choi, J.J. (2006). A study on the residual expansibility of electric arc furnace slag aggregate, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **2(1)**, 124–131 [in Korean].

동슬래그 및 제강슬래그의 해양 콘크리트용 중량 골재 사용성 평가

중량 콘크리트는 고파랑에 대한 저항성 상상을 위해 해양 구조물에 사용될 수 있다. 그러나 중량 콘크리트를 제조하기 위해 필수적인 재료인 중량 골재는 대량 공급이 어려우며, 고가이므로 사용이 제한되고 있다. 따라서 본 연구에서는 산업부산물인 동슬래그 및 제강슬래그의 해양 콘크리트용 중량 골재로서 활용성을 평가하였다. 실험 결과 동슬래그는 수침팽창 및 알칼리 실리카반응성이 안정적인 것으로 나타나 해양 콘크리트용 중량 골재로서 활용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 제강슬래그는 수침팽창 및 ASTM C 1260 시험에서 높은 팽창율을 보였다. 또한 콘크리트 내 제강슬래그가 위치한 곳에서 염화물 이온이 깊게 침투한 것이 발견되었다. 따라서 제강슬래그는 해양 콘크리트 구조물의 골재로서는 부적합한 것으로 사료된다.