

동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 중량 콘크리트의 회파블록 적용을 위한 염해저항성 평가

Evaluation of Chloride Attack Resistibility of Heavyweight Concrete Using Copper Slag and Magnetite as Aggregate

문 훈

김 지 현

이 재 용

정 철 우*

Moon, Hoon

Kim, Ji-Hyun

Lee, Jae-Yong

Chung, Chul-Woo*

Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Busan, 48513, Korea

Abstract

Recently, the coastal area has become the popular place for infrastructure development. To provide a beautiful scenery of coastal area to nearby facilities without any hinderance, and also to protect those facilities from the sea water overflow, it is necessary to develop a new type of wave dissipating block, which is a turning wave block. It is noticeable that the top of the turning wave block is flat and thus can provide spaces for various purposes. However, the unit weight of the block decreases due to the presence of pipeline that is installed for turning the direction of the waves. In order to mitigate such problem, a heavyweight concrete needs to be used to increase the resistance against tidal waves. The copper slag and magnetite were used as a source of fine and coarse aggregate, respectively. The 28 day compressive strength of concrete incorporating ordinary and heavyweight aggregate did not show significant differences. It should be noted that the chloride ion penetration resistance was evaluated using NT-BUILD 492 rather than ASTM C 1202 method because concrete incorporating magnetite as a coarse aggregate showed excessive current flow by ASTM C 1202 method. According to the results from NT Build 492 method, which uses the penetration depth of chlorine ions to obtain chloride ion diffusivity, the heavyweight concrete incorporating the copper slag and the magnetite showed the best resistance against the chloride ion penetration. Therefore, it is reasonable to say that heavyweight concrete made with copper slag and magnetite can be used for production of turning wave block.

Keywords : heavyweight concrete, chloride attack resistibility, copper slag, magnetite

1. 서 론

최근 국내에서는 연안체험활동, 해양 레저 등의 연안활동이 증가함에 따라 다양한 형태로 연안이 개발되고 있다. 연안 방파제의 대부분은 설치가 용이한 테트라포드(Tetrapod)로 구성되어 있으나 테트라포드 특유의 형상으로 인해 친수공간

이 부족하고 추락 등의 안전사고 발생 및 주변경관을 저해시키는 단점이 존재한다. 특히 소형항 및 연안에서는 미관저하 및 경제적인 이유로 넓은 면적의 테트라포드 설치가 제한되어 대형 태풍 발생 시 파랑에 저항하지 못하고 배열이 흐트러지거나 이탈할 가능성이 높다. 실제로 2012년 8월 제주 서귀포 항에서는 초대형 태풍 볼라벤(Bolaven)에 의해 2,300여개가 넘는 테트라포드가 파손 및 유실되었다[1].

또한 최근 기후변화가 심해짐에 따라 태풍 및 고파랑의 발생 빈도가 증가할 것으로 예상되며, 특히 북서태평양 지역에서 여름철 극한 파랑의 발생 빈도가 증가 할 것으로 전망하고 있다[2]. 이에 따라 잦은 대형 태풍으로 인해 테트라포드의 이탈 및 전복으로 인한 인명피해 및 해수의 월파로 인해

Received : September 27, 2017

Revision received : November 1, 2017

Accepted : November 23, 2017

* Corresponding author : Chung, Chul-Woo

[Tel: 82-51-629-6084, E-mail: cwchung@pknu.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

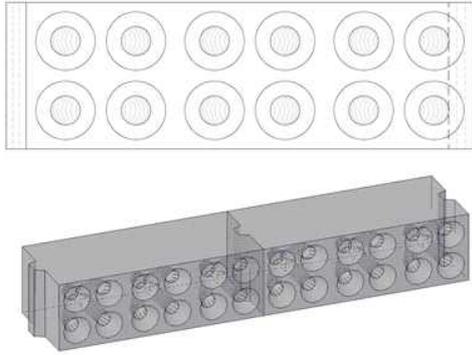


Figure 1. Elevation of turning wave block

인근 지역의 침수로 인한 피해 또한 우려된다. 이러한 위험성을 개선하고자 구조물의 전복, 이탈 위험이 낮은 콘크리트 케이슨방파제가 건설되고 있다. 그러나 설치비용이 고가이며, 넓은 작업장 확보가 불가한 도서지역 및 연약지반 처리가 어려운 곳에서는 설치가 제한되고 있어 이에 대한 대응책이 필요하다[1]. 따라서 테트라포드를 대체할 수 있는 새로운 형태의 연안 방파제의 개발이 요구되고 있다.

테트라포드의 대체를 위해 다양한 형태의 소파블록이 개발되고 있으나[1,3,4], 대부분의 경우 소파 능력 향상에만 초점이 맞추어져 있는 상황이며, 일상적인 상황에서 활용할 수 있는 친수공간의 창출은 상당히 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Figure 1에 나타난 회파(回波)블록을 이용하여 파랑 저항성 상상을 도모하는 동시에, 평상시의 친수공간으로 활용할 수 있는 연안 방파제 시스템을 개발하고자 한다. 회파블록은 블록에 도달한 파랑에너지를 블록 내부의 중공형상을 통해 파랑에너지를 180° 전환시켜 밀려오는 후속파도와 충돌시켜 블록에 가해지는 충격에너지를 감소시키는 매커니즘을 가지고 있다. 파도를 전환시키는 구조상으로 블록의 윗면은 평평한 형상을 가지며, 이로 인해 블록 윗면의 활용이 가능해지므로 친수 공간 창출이 가능하다.

파랑 에너지에 효과적으로 대응하기 위해서는 적정 중량을 확보하여야 하며[5], 높은 단위용적중량을 확보하여 파랑 에너지에 저항하는 방법이 일반적이다[6]. 그러나 회파블록은 블록 내부에 존재하는 중공관으로 인해 높은 유공률을 가지며, 이로 인해 단위용적중량이 감소한다. 따라서 이러한 형태의 구조물이 높은 수준의 파랑에너지를 받는 장소에 활용하기 위해 회파블록에 중량 콘크리트를 적용하여 높은 유공률에 의한 중량손실을 보정할 필요성이 있다.

중량 콘크리트는 일반적으로 굵은골재를 적철석, 자철석,

갈철석, 및 중정석 등의 중량 골재로 치환하여 제조된다[7]. 하지만 이러한 중량 골재는 수급이 어렵고, 고가이므로 공사 비용 상승의 우려가 있다. 중량 콘크리트의 잔골재는 철분말 등이 간간히 사용되고 있으나, 경제적인 이유로 주로 일반 잔골재와 중량 굵은골재를 사용하여 중량콘크리트를 제조하고 있다. 따라서 자철석의 비율을 감소시키고 중량 잔골재로서 동슬래그를 사용한다면 경제성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 동슬래그는 대표적인 산업부산물 골재로서 이를 재활용하기 위한 다양한 연구가 진행 중에 있으며, 3.4g/cm³ 정도의 밀도를 가지므로 중량 잔골재로서 활용이 가능할 것으로 판단된다[8,9,10].

본 연구에서는 동슬래그, 자철석을 중량골재로 사용한 중량 콘크리트를 회파블록에 적용하여 단위용적중량 상승을 통해 안정성 및 파랑 저항성을 상승시키고자 한다. 회파블록은 해수와 직접적으로 접하는 소파블록으로 높은 수밀성 및 내구성이 요구된다. 특히 본 연구는 염해에 의한 저항성이 높아야 하는 회파블록에 적용하기 위한 기초적 연구로서 동슬래그, 자철석을 중량골재로 사용한 중량콘크리트의 강도 특성 및 염해저항성을 평가하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

2.1.1 시멘트 및 고로슬래그미분말

동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 중량 콘크리트의 염해저항성 평가를 위해 사용된 시멘트는 KS L 5201 규준을 따르는 OPC(Ordinary Portland Cement)이며 화학적 조성은 Table 1과 같다.

고로슬래그미분말은 전라북도 당진 현대제철소에서 생산된 3종 고로슬래그미분말을 사용하였다. 고로슬래그미분말의 밀도는 2.9g/cm³, 분말도는 4,500cm²/g, SO₃ 함유량은 1.8%인 것을 사용하였다.

Table 1. Chemical compositions of OPC

(Unit : %)							
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂
63.42	19.48	4.69	4.08	3.11	3.04	1.32	0.38

Table 2. Mix proportions of heavyweight concrete

Type	W/C	S/a (%)	Water	Cement	Slag	Sand	Copper slag	Crushed stone	Magetite	(Unit : kg/m ³)
										Weight of unit volume (ton/m ³)
SC-P				571.42	-	819.65	-	804.18	-	2.40
SC-S				457.14	114.28	815.41	-	800.02	-	2.39
SM-P				571.42	-	819.65	-	-	1388.76	2.98
SM-S				457.14	114.28	815.41	-	-	1381.57	2.97
CC-P	0.35	50	200	571.42	-	-	1060.90	804.18	-	2.64
CC-S				457.14	114.28	-	1055.41	800.02	-	2.63
SM-P				571.42	-	-	1060.90	-	1388.76	3.22
CM-S				457.14	114.28	-	1055.41	-	1381.57	3.21

*Fine aggregate *Coarse aggregate *Slag substitution
 S : Sand C : Crushed stone P : Non slag
 C : Copper slag M : Magetite S : 20wt% of cement

2.1.2 동슬래그 및 자철석

동슬래그는 KS F 2527 규준을 만족하는 5mm 이하의 입도를 가지는 동슬래그를 사용하였다. 동슬래그의 겉보기 밀도는 3.43g/cm³이며, 조립률은 3.63이다. 동슬래그의 주 입도는 1.2~2.5mm 영역에 집중되어 있어 잔골재의 표준 입도 곡선을 벗어나는 것으로 나타났다. 따라서 동슬래그를 표준입도 곡선을 만족하도록 조절하였으며, 조립률은 2.4로 하였다. 자철석은 겉보기밀도는 4.49g/cm³로 나타났다. 중량 골재는 골재의 최대치수가 크면 높은 밀도로 인해 재료분리의 위험성이 높아지므로 골재 최대치수 9.5mm를 사용하였다.

2.1.3 잔골재 및 굵은골재

동슬래그 및 자철석의 염해저항성을 평가하기 위하여 대조군으로 잔골재로 모래를 사용하였으며, 굵은골재로 쇄석을 사용한 대조군을 배합하였다. 모래는 잔골재로 사용한 동슬래그의 입도곡선 및 조립률을 동일하게 조절하였으며, 쇄석 또한 굵은골재로 사용된 자철석과 동일하게 조절하였다.

2.2 시험체 배합 및 화학·물리적 특성 분석

2.2.1 XRF 및 XRD

동슬래그 및 자철석의 화학적 특성을 분석하기 위하여 XRF(X-ray fluorescence spectrometer, Shimadzu, Japan, XRF-1700) 분석을 실시하고, 광물학적 특성을 확인하기 위해 XRD(X-ray diffractometer, Rigaku, Japan, Ultima IV) 분석을 하였다.

2.2.2 콘크리트 배합

동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 중량 콘크리트의 압축강도 및 염해 저항성 평가를 위해 Table 2와 같이 배합을 실시하였다. 콘크리트 배합은 ACI 211.1에 따라 결정하였으며 산업부산물인 동슬래그의 활용을 높이기 위하여 잔골재비를 50%로 설정하였다[11]. 이때 ACI 211.1 제시된 바와 같이 잔골재의 조립률은 2.4, 굵은골재 최대치수는 9.5mm로 조절하였다. 시험체명은 사용된 골재에 의해 분류하였으며 잔골재, 굵은골재-고로슬래그미분말 치환유무로 구분하였다.

일반골재를 사용한 배합(SC-P, SC-S), 동슬래그를 잔골재로 사용한 배합(CC-P, CC-S), 자철석을 굵은골재로 사용한 배합(SM-P, SM-S) 및 동슬래그와 자철석을 골재로 사용한 배합(CM-P, CM-S)을 통해 시험체를 제조하였다. 추가적으로 고로슬래그미분말이 염해저항성 상승에 미치는 영향을 파악하기 위해 고로슬래그미분말을 시멘트 중량의 20%를 치환한 배합도 실시하였다.

시험체의 배합 조건은 모두 동일하게 하였으며 시멘트, 물, 잔골재 및 굵은골재가 차지하는 부피가 모두 일정하게 배합설계를 진행하여 각 시험체의 중량차이는 골재에 의해 서만 발생하도록 하였다. 낮은 w/c로 인한 워커빌리티 상승을 위해 고성능 감수제를 0.7~1.1%를 사용하여 슬럼프 플로우 500mm를 달성하였다. 배합 설계상 단위용적중량은 일반 골재만을 사용한 배합(SC-P, SC-S)을 제외하고 2.6ton/m³ 이상으로 나타났다. 이는 ACI에서 정의하고 있는 중량 콘크리트의 단위용적중량인 2.5ton/m³을 만족하는 값이다[12]. 특히 잔골재 및 굵은골재를 전부 동슬래그 및

자철석으로 치환한 배합은 단위용적중량이 3.22ton/m³으로 가장 큰 것으로 나타났다. 염해저항성을 높이기 위해 고로슬래그미분말을 시멘트 중량의 20%를 치환한 배합의 경우 단위용적중량이 감소하였다. 이는 3.15g/cm³의 밀도를 가지는 시멘트중량의 20%를 보다 낮은 2.9g/cm³의 밀도를 가지는 고로슬래그미분말로 대체하였기 때문이다.

2.2.3 압축강도 측정

콘크리트의 압축강도는 재령 28일 압축강도를 측정하였다. 굳지 않은 콘크리트를 Ø100×200mm 크기의 원형 실린더 몰드에 다져 넣은 후 24시간 후 탈형하였다. 이후 27일간 24±1℃ 온도에서 포화 수산화칼슘 용액에 침지시켜 양생하였다. 이후 재령 28일에 압축강도를 측정 하였으며, KS F 2405에 따라 전동식 압축강도 시험기(S1 industry Co., Korea, S1-1471D)를 사용하여 측정하였다.

2.2.4 염해저항성 평가

고로슬래그미분말 및 자철석을 골재로 사용한 중량 콘크리트의 염해저항성 평가를 위해 2가지의 방법으로 실험을 진행하였다. 첫 번째 방법은 ASTM C1202(Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration) 규준에 의거한 통과 전하량 측정방법이다[13]. 통과전하량 측정을 위해 재령 28일의 원주형 실린더 시험체를 Ø100×50mm 크기로 절단하여 각 절단면을 0.3N NaOH 용액과 3% NaCl 용액에 침지시킨 후 60V의 전압을 6시간동안 가하였다. 이후 얻어진 전류값을 이용하여 통과 전하량을 계산한 후 Table 3에 있는 기준을 이용하여 염해저항성을 평가하였다.

추가적으로 NT Build 492(Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments) 방법을 사용하여 염해저항성을 평가하였다[14]. 포화수산화칼슘 용액에 침지된 시편의 각 절단면을 0.3N NaOH 용액과 10% NaCl 용액에 침지 시킨 후 30V의 전압을 가하여 초기 전류값을 확인 후, 본 실험에서의 전압을 결정하여 24시간 동안 전압을 가하였다. 이후 시험체를 할렬 파괴한 후 단면에 0.1M AgNO₃ 용액을 분무하여 염소이온 침투깊이를 측정하였다. 측정된 염소이온 침투깊이를 이용하여 아래의 식 (1)에 따라 염소이온 확산계수를 구해 염해저항성을 정량적으로 평가하였다.

Table 3. Chloride ion penetrability based on charge passed[13]

Charge passed (coulomb)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000 - 4,000	Moderate
1,000 - 2,000	Low
100 - 1,000	Very Low
< 100	Negligible

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} (X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L \times X_d}{U - 2}}) \quad \text{--- (1)}$$

여기서, D_{nssm}은 불안정상태 이동계수(×10⁻¹²m²/s)이며, U는 적용전압의 절대치(V), T는 양극용액의 초기온도와 최종온도의 평균치(℃), L은 공시체 두께(mm), X_d는 침투깊이 평균치(mm), t는 시험시간(hr)이다.

3. 실험결과

3.1 XRF

Table 4는 동슬래그 및 자철석의 XRF 분석 결과를 나타낸 것이다. 동슬래그는 주로 Fe₂O₃ 및 SiO₂로 구성된 것으로 나타났으며 이외에도 CaO, Al₂O₃ 및 MgO 성분을 함유한 것으로 나타났다. 자철석은 주로 Fe₂O₃ 및 TiO₂로 구성된 것으로 나타났다. 이외에도 MgO, SiO₂ 및 Al₂O₃ 성분을 함유한 것으로 나타났다. 동슬래그 및 자철석 모두 높은 Fe₂O₃ 함량으로 인해 높은 밀도를 나타내는 것으로 판단된다.

Table 4. Chemical compositions of copper slag and magnetite (Unit : %)

Chemical Component	Copper slag	Magnetite
Fe ₂ O ₃	44.26	57.36
SiO ₂	37.50	7.95
CaO	5.38	0.44
Al ₂ O ₃	4.62	6.91
MgO	1.35	8.08
TiO ₂	0.37	18.24
P ₂ O ₅	0.17	0.37
MnO	0.16	0.31

3.2 XRD

Figure 2는 동슬래그의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 동슬래그의 XRD 패턴에서는 magnetite, fayalite와 같은 광물상이 나타났다. 두 광물상은 철광석 및 철을 함유한 실리케이트 상으로 XRF 분석과 마찬가지로 철 광물로 구성되어 있는 것으로 판단된다. 동슬래그의 XRD 패턴에서는 magnetite, fayalite와 같은 광물상이 나타났다. 두 광물상은 철광석 및 철을 함유한 실리케이트 상으로 XRF 분석과 마찬가지로 철 광물로 구성되어 있는 것으로 판단된다.

Figure 3은 자철석의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 자철석의 XRD 패턴에서는 동슬래그와 마찬가지로 자철석에서도 magnetite가 관찰되었다. 또한 높은 밀도와 약한 자성을 가지는 ilmenite가 관찰되었다. 이외에도 muscovite, chamosite, ferrotschemakite와 같은 광물상이 관찰되었다.

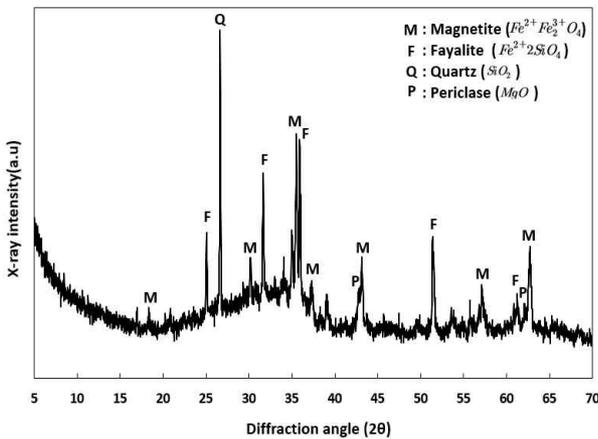


Figure 2. XRD patterns of copper slag

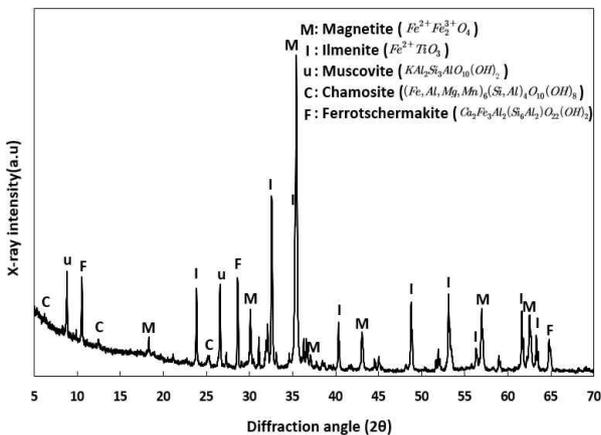


Figure 3. XRD patterns of magnetite

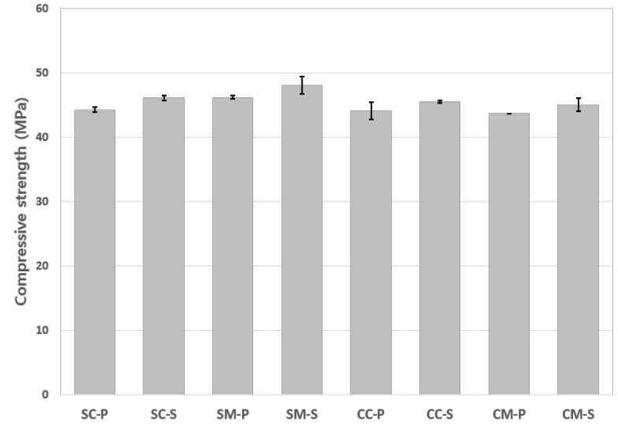


Figure 4. The 28-day compressive strength of concrete incorporating copper slag and magnetite

3.3 재령 28일 압축강도

Figure 4는 일반 골재, 동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 중량 콘크리트의 재령 28일 압축강도를 나타낸 것이다. 모래와 쇄석을 사용한 플레인 콘크리트 시험체(SC-P)의 경우 44.25MPa의 압축강도를 나타내었으며, 고로슬래그미분말 20%를 치환한 플레인 콘크리트 시험체(SC-S)는 46.1MPa로 다소 높게 나타났다. 모래와 자철석을 사용한 콘크리트 시험체(SM-P)의 압축강도는 46.19MPa로 측정되었으며, 고로슬래그미분말을 20% 치환한 시험체(SM-S)는 48.03MPa로 측정되었다. 동슬래그와 쇄석을 사용한 콘크리트 시험체(CC-P)는 44.1MPa, 고로슬래그미분말을 20% 치환한 시험체(CC-S)는 45.49MPa로 측정되었다. 골재 전부를 동슬래그 및 자철석으로 치환한 시험체(CM-P)의 압축강도는 43.65MPa, 고로슬래그미분말로 치환한 시험체(CM-S)는 45.03MPa로 측정되었다.

Figure 4에 따르면 모래와 자철석을 사용한 시험체(SM-P, SM-S)가 압축강도가 가장 우수한 것으로 나타났으나, 골재의 종류에 따른 압축강도의 확연한 차이는 발생하지 않는 것으로 나타났다. 특히 겉보기밀도가 높은 동슬래그, 자철석을 골재로 사용했음에도 확연한 28일 압축강도의 상승은 발견되지 않은 것을 고려하면, 골재의 강도가 큰 차이가 없는 경우 골재가 차지하는 부피비율이 같을 때 콘크리트의 강도는 상당히 유사하게 나온다는 것을 의미한다. 또한 모든 배합에서 고로슬래그미분말을 치환하지 않은 시험체보다 고로슬래그미분말을 시멘트 중량의 20%를 치환한 시험체의 압축강도가 3~4% 가량 상승하는 것으로 나타났다. 이는 유의미할 정도로 큰 차이는 아니지만, 고로슬래그미분

말의 포졸란 반응 및 잠재수경성 반응으로 인한 콘크리트 강도상승 효과인 것으로 판단된다.

3.4 염해저항성 평가

3.4.1 ASTM C1202

Table 5는 재령 28일 콘크리트의 ASTM C1202에 의한 염해저항성 평가 결과를 정리한 것이다. Table 5에 따르면 본 실험에 사용된 대부분의 배합은 염해저항성이 떨어지는 것으로 나타났다.

고로슬래그미분말을 치환한 배합의 경우 일반 배합보다 통과전하량이 감소하였으나, 여전히 높은 통과전하량을 보이는 것으로 나타났다. 중량골재를 사용하지 않고 모래와 쇄석을 사용한 시험체(SC-P, SC-S) 또한 같은 경향을 나타내었다.

이는 본 연구에서 사용된 굵은 골재가 일반적으로 사용되는 굵은골재보다(20-25mm) 최대 치수가 작아 공극률이 낮은 골재의 표면에 의해 받는 저항이 감소하여 통과전하량이 더 높게 측정된 것으로 사료된다. 특히 자철석을 골재로 사용한 시험체의 경우 잔골재 종류에 상관없이 시험 초기에 500mA 이상의 과전류가 흘러 측정이 불가능한 것으로 나타났다.

Table 5. Chloride ion penetration resistance of concrete cured for 28 days (ASTM C1202)

Type	Charge passed (Coulomb)	Chloride ion Penetrability
SC-P	6,973	High
SC-S	3,064	Moderate
SM-P	not measurable	High
SM-S	not measurable	High
CC-P	4,880	High
CC-S	2,862	Moderate
CM-P	not measurable	High
CM-S	not measurable	High

이러한 경향이 장기재령에서도 나타나는지 확인하기 위하여 재령 150일에서 측정을 실시하였으며 Table 6에 결과를 정리하였다. Table 6에 따르면 재령이 경과함에 따라 시멘트의 수화가 진행되어 재령 28일에서보다 전체적인 통과전하량이 40% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 150일 재령에서도 자철석을 골재로 사용한 시험체는 과도한 통과전하량이 측정되었으며, 특히 동슬래그와 자철석을 골재로

사용한 시험체(CM-P)는 시험 15분 후 500mA 이상의 전류가 흘러 측정이 불가능한 것으로 나타났다. 이를 볼 때 XRD 분석에서는 명확하게 확인할 수 없었으나, 자철석 내부에 전도성 물질이 존재하여 통과전하량 측정 시험시 과전류를 유도하는 것으로 사료된다. 그에 비해 동슬래그를 잔골재로 사용한 시험체는 모래를 사용한 시험체보다 통과전하량이 감소하는 것으로 나타났다.

Table 6. Chloride ion penetration resistance of concrete cured for 150 days (ASTM C1202)

Type	Charge passed (Coulomb)	Chloride ion Penetrability
SC-P	3,321	Moderate
SC-S	1,836	Low
SM-P	9,003	High
SM-S	5,738	High
CC-P	2,400	Moderate
CC-S	1,148	Low
CM-P	not measurable	High
CM-S	5,462	High

3.4.2 NT Build 492

Table 7은 재령 28일에 실시된 NT Build 492에 의한 초기 전류값 및 염소이온 침투깊이를 정리한 것이다.

Table 7. Initial current and chloride penetration depth by NT build 492 method

Type	Initial current (mA)	Chloride penetration depth (mm)
SC-P	93.1	23.28
SC-S	54.4	11.49
SM-P	146.6	21.98
SM-S	114.3	10.77
CC-P	76.0	20.94
CC-S	45.3	9.66
CM-P	178.9	18.02
CM-S	95.5	9.11

Table 7에 따르면 NT Build 492에 의해 염해저항성을 평가한 결과, 초기 전류값은 ASTM C1202의 통과전하량 값과 유사한 경향을 나타냈다. 동슬래그를 잔골재로 사용한 시험체(CC)의 초기 전류가 가장 낮게 측정되었으며, 자철석을 굵은골재(CM)로 사용한 시험체의 초기 전류값이 가장 높게 나타났다.

그러나 Figure 5와 같이 시험체를 할렬파괴 한 후 0.1M

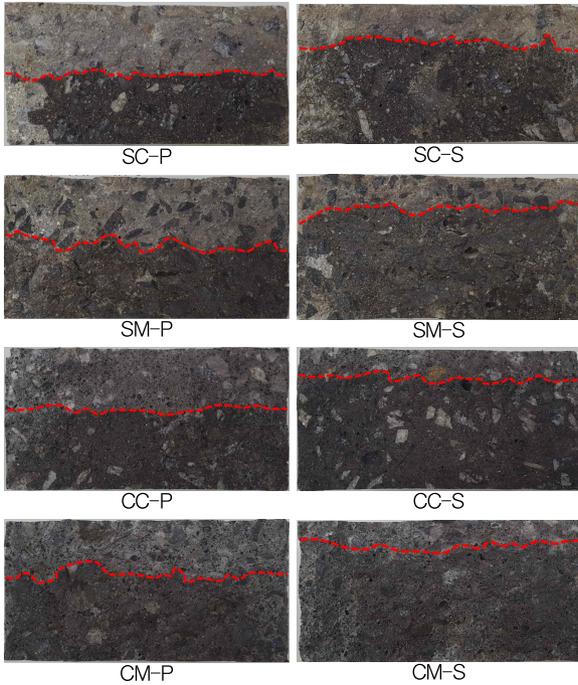


Figure 5. Chloride ion penetration depth of concrete using copper slag and magnetite as aggregate

AgNO₃ 용액을 분무하여 염소이온의 침투 깊이를 확인한 결과 자철석을 혼입한 시험체의 침투 깊이가 가장 얇은 것으로 나타났다. 고로슬래그미분말을 혼입한 시험체는 초기 전류값 및 침투깊이 모두 고로슬래그미분말을 혼입하지 않은 시험체보다 40~50% 정도 감소하는 것으로 나타나 고로슬래그미분말이 염해 저항성 상승에 미치는 영향은 상당히 높은 것으로 나타났다.

Figure 6은 염소이온 침투깊이를 바탕으로 한 염화물 확산계수를 나타낸 것이다. Figure 6에 따르면 동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 시험체(CM)의 염해저항성이 ASTM C1202와는 다른 경향을 나타냈다. ASTM C1202에서는 자철석을 골재로 사용했을 때, 과도한 전류의 흐름으로 측정이 불가능하거나, 염해저항성이 낮은 것으로 판단되었다. 그러나 실제 염소이온 침투 깊이를 바탕으로 한 염화물 확산계수에서는 자철석을 사용한 콘크리트의 염해저항성이 더 뛰어난 것으로 나타났다. 특히 동슬래그, 자철석을 모두 사용한 시험체(CM)의 염해저항성이 가장 우수하였으며, 다음으로 동슬래그를 잔골재로 사용한 시험체(CC), 자철석을 굵은골재로 사용한 시험체(SM), 마지막으로 일반 골재를 사용한 시험체(SC) 순으로 나타났다. 또한 모든 염해저항성 평가 시험에서 고로슬래그미분말을 치환한 배합은 치환하지

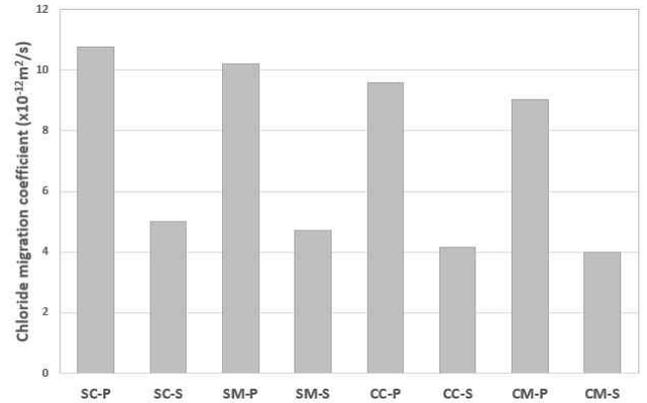


Figure 6. Chloride migration coefficient of concrete using copper slag and magnetite

않은 시험체보다 약 50% 정도 염해저항성이 증대되는 것으로 나타났다.

ASTM C1202 및 NT Build 492 두가지 방법을 모두 사용한 기존의 연구들에 따르면, 배합 및 시험체의 특성에 따라 차이가 발생하여 정확한 상관관계를 찾는 것은 어려운 것으로 생각된다. 그러나 대략적으로 확산계수 $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 당 266.87coulomb 정도의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다[15,16,17,18].

Table 8은 이를 바탕으로 확산계수를 이용하여 대략적으로 ASTM C1202에 의한 염화물 침투성을 유추한 것이다.

고로슬래그미분말을 혼입한 시험체는 모두 염화물 이온 침투성이 낮은(low) 것으로 평가되었다. 특히 고로슬래그미분말이 치환된 동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 시험체(CM-S)는 1,065 coulomb으로 유추되어 매우 낮음(very low)평가에 근접하는 것으로 나타났다.

Table 8. Estimation of chloride permeability based on chloride migration coefficient

Type	Chloride migration coefficient ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Estimated charge passed (Coulomb)	Chloride ion Penetrability
SC-P	10.76	2,872	Moderate
SC-S	5.02	1,340	Low
SM-P	10.20	2,722	Moderate
SM-S	4.70	1,254	Low
CC-P	9.59	2,559	Moderate
CC-S	4.16	1,110	Low
CM-P	9.02	2,407	Moderate
CM-S	3.99	1,065	Low

4. 고 찰

동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 콘크리트의 염해저항성 평가를 서로 다른 두 가지의 시험방법을 활용하여 측정된 결과 전혀 다른 결과를 얻을 수 있었다. 60V의 높은 전압을 사용하는 ASTM C1202 평가 방법의 경우 동슬래그는 염해저항성 평가에 큰 영향을 미치지 않거나, 염해저항성을 상승시키는 것으로 나타났다. 그러나 자철석을 골재로 사용할 경우 과도한 전류 흐름을 야기하는 것으로 나타났다. 이로 인하여 매우 높은 통과전하량이 측정되거나 측정 자체가 불가능한 수준으로 나타났다. 이는 28일 재령뿐만 아니라 시멘트의 수화가 상당히 진행된 150일 재령에서도 같은 경향을 나타내었으며, 자철석 내부에 존재하는 것으로 예상되는 전도성 물질에 의하여 염소이온침투성이 과평가 된 것으로 판단된다. 이는 염소이온 침투깊이를 바탕으로 염해저항성을 평가하는 NT Build 492 시험결과를 볼 때 더욱 명확하게 입증 되었다고 판단된다. 자철석의 어떠한 광물상이 이러한 문제를 초래하였는지 명확히 알 수 없으나, 동슬래그에도 magnetite가 존재하는 것을 고려하면 순수한 자철광(magnetite)에 의한 영향은 아닌 것이 확실하다. 특히 자철광의 경우 원산지에 따라 매우 다양한 광물학적 조성을 가질 수 있다는 점을 고려하면[19,20,21], 본 연구에서 나타는 결과가 다른 원산지를 가지는 자철광 원석을 이용한 콘크리트에도 그대로 적용되지 않을 가능성이 존재한다.

NT Build 492 시험에서도 실질적으로 전류의 흐름은 자철석을 혼입한 시험체가 높은 것으로 나타났다. 그러나 시험체를 할렬 파괴하여 실제 염소이온 침투 깊이를 확인한 결과 자철석을 혼입한 시험체는 높은 통과전류량과는 달리 염소이온 침투깊이는 일반 골재와 비슷하거나 더 얇은 것으로 나타났다. 이를 볼 때 전류의 흐름을 통해 염해저항성을 평가할 경우 콘크리트 내 전도성 물질이 존재 할 경우 염소이온 침투성이 과대평가가 될 우려가 있다. 특히 강섬유와 같은 재질을 혼입한 콘크리트의 경우 이러한 경향이 더욱 두드러지게 나타났다.

Figure 7은 강섬유로 보강된 일반 콘크리트의 염해저항성 평가를 위해 60V의 전압을 사용하는 ASTM C1202 평가 중 발생한 부식을 촬영한 이미지이다. 시험체에 따라 발생속도의 차이가 있으나, 시험 개시 후 10분에서 2시간 사이에 육안으로 부식이 관찰되었다.



Figure 7. Corrosion during the chloride ion penetration resistance test of steel fiber reinforced concrete

국내의 염해저항성 평가 기준은 KS F 2711이며 ASTM C1202와 동일한 방법을 사용하고 있다. 따라서 본 실험에서 사용된 자철석과 같이 전도성 물질을 포함하고 있을 경우 정확한 염해저항성 평가가 어려울 것으로 사료되며 이에 따라 염해저항성 평가 시 부식 및 통과전하량의 과평가를 막을 필요성이 존재한다. 따라서 낮은 전압을 사용하고 이를 보정하기 위하여 시험 시간을 조절하거나, 상대적으로 낮은 전압을 사용하는 평가 방법인 NT Build 492와 같은 방법을 도입하는 등의 현재의 기준을 개선할 필요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용된 자철석 및 동슬래그를 활용한 중량콘크리트의 염해저항성은 ASTM C 1202 방법으로 평가하는 것보다 NT-BUILD 492 방법으로 평가하는 것이 더욱 적절하다고 사료된다. 이러한 추론에 따라 자철석 및 동슬래그의 해양구조물용 중량골재로서의 활용성은 충분한 것으로 결론 내하고자 한다.

5. 결 론

동슬래그 및 자철석을 중량 골재로 사용한 중량 콘크리트의 염해저항성 실험에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) 동슬래그 및 자철석을 콘크리트의 골재로 사용할 경우 단위용적중량은 크게 증가하며, 재령 28일 압축강도는 일반 골재와 유사한 수준으로 나타났다.
- 2) ASTM C1202에 의한 염해저항성 평가 시 동슬래그를 잔골재로 사용할 경우 염해저항성이 일반 잔골재보다 개선되는 것으로 나타났다. 그러나 자철석을 골재로 사용한 콘크리트는 과도한 전류의 흐름으로 측정이 불가능한 것으로 나타났다.

- 3) NT Build 492에 의한 염해저항성 평가 결과 동슬래그 및 자철석을 골재로 사용할 경우 염해저항성이 일반 골재를 사용할 때 보다 개선되는 것으로 나타났다.
- 4) 동슬래그 및 자철석은 염해저항성이 일반골재보다 상승되어 화파블록용 중량골재로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

실험 결과에 따르면 염해저항성 평가 시 콘크리트에 전도성 물질이 존재할 경우 정확한 염해저항성 평가가 불가능한 것으로 나타났으며, 현재 통과전하량에 의해서만 염해저항성을 평가하고 있는 국내의 기준을 개선할 필요가 있을 것으로 판단된다.

요 약

최근 국내에서는 다양한 형태로 연안이 개발되고 있다. 이에 따라 안전사고를 예방하고 경관을 저해시키지 않는 새로운 소파블록의 개발이 요구되고 있다. 화파블록은 상부가 평탄하여 친수공간으로 활용이 가능하지만, 구조 내부에 존재하는 화파관으로 인해 중량손실이 발생한다. 따라서 이에 대응하기 위해 중량콘크리트를 사용하여 파랑 저항성을 상승시킬 필요성이 있다. 이러한 목적을 위하여 본 연구에서는 동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 중량 콘크리트를 개발하고 이의 염해저항성을 평가하였다. 연구 결과에 따르면, 일반 골재와 중량골재를 각각 혼입한 콘크리트의 28일 압축강도는 큰 차이가 발생하지 않았으나, ASTM C1202에 의한 염소이온침투저항성 시험 시 자철석을 혼입한 콘크리트는 과도한 전류의 흐름으로 평가가 불가능한 것으로 나타났다. 그러나 염소이온의 침투깊이를 이용하는 NT Build 492 시험에서는 ASTM C 1202 시험법에서 관찰된 문제점 없이 실험 진행이 가능하였고, 동슬래그, 자철석을 골재로 사용한 중량 콘크리트의 염소이온침투저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 동슬래그 및 자철석을 골재로 사용한 중량콘크리트는 화파블록에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

키워드 : 중량콘크리트, 염해저항성, 동슬래그, 자철석

Acknowledgement

This research was supported by a grant (16TBIP-C111160-01) from Technology Business Innovation Program (TBIP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

1. Park YH, Youn DO. Development of a new armor unit against high waves, *Journal of the Korea Academia-Industrial*, 2016 Jun;17(6):737-43.
2. Park JS, Kang KR, Kang HS, Kim YH. Projection of the future wave climate changes over the western north pacific, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 2013 Oct;25(5):267-75.
3. Seo JH, Park YH, Han TH, Oh YM, Won DH. Structural performance evaluation of new-type wave dissipating block : tri-loc, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 2016 Aug;16(4):287-93.
4. Paik IY, Oh YM. Static performance test for new wave dissipating block reinforced with frp, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 2011 Dec;23(4):285-91.
5. Lee, JS, Suh KD. Calculation of stability number of tetrapods using weights and biases of ann model, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 2016 Oct; 28(5); 277-83.
6. Lee DS, Oh S H, Cho, BS. Experimental investigation on the change of stability coefficient of tetrapod according to difference in density, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 2016 Jun; 28(3):124-31.
7. Mun JH, Mun JS, Yang KH. Stress-strain relationship of heavyweight concrete using magnetite aggregate, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2013 Aug;29(8):85-92.
8. Ji SW, Seo CH. The application of copper smelting slag as concrete aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2006 Dec;3:68-75.
9. Lee MH. A study on the evaluation of the durability of concrete using copper slag aggregates, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2008 Dec;20(6):773-84.
10. Hong CW, Lee JI, Ryu JH. Characteristics of fresh mortar with particle size and replacement ratio of copper slag, *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 2016 Feb;26(1):41-8.

11. ACI Committee 211.1. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete(ACI 211.1-91). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
12. ACI Committee 304. Heavyweight concrete : measuring, mixing, transporting, and placing (ACI 304.3R-96). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1996.
13. ASTM C1202, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
14. NT BUILD 492, Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest, Taastrup, Denmark, 1999.
15. Bjegovic D, Stirmer N, Serdar M. Durability properties of concrete with blended cements. *Materials and Corrosion*, 2012 Oct; 63(12):1087-96.
16. Teng S, Lim TYD, Divsholi BS. Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 2013 Mar;40:875-81.
17. Liu X, Chia KS, Zhang MH. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. *Construction and building Materials*, 2011 Jan; 25(1):335-43.
18. Yang WH, Hwang JS, Jeon CS, Lee SH. An Experimental Study on the Chloride Attack Resistibility of Alkali-Activated Ternary Blended Cement Concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2016 Aug;16(4):321-29.
19. Fleet ME. The structure of magnetite. *Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 1981 Jan;37(4):917-20.
20. Reichmann HJ, Jacobsen SD. High-pressure elasticity of a natural magnetite crystal. *American Mineralogist*, 2004 Jul;89(7):1061-6.
21. Yoshida J, Iida S. X-ray diffraction study on the low temperature phase of magnetite. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1977 Jul;42(1):230-37.