

Strength and sulfuric acid resistance properties of cement mortar containing copper slag

Chang Woo Hong, Jung-Il Lee* and Jeong Ho Ryu*,†

Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

(Received May 9, 2016)

(Revised May 27, 2016)

(Accepted June 3, 2016)

Abstract Each year, more than seven hundred thousand tons of copper slag are generated in Korea as a byproduct during the production of copper. Due to the large amount of copper slag produced, there has been increased interest in the use of copper slag as a construction material. To evaluate the potential of copper slag as a construction material, laboratory evaluations were conducted in this study, and three particle shapes and replacement rates of river sand were selected as experimental variables. Strength, air-void characteristics, and sulfuric acid resistance were the three properties evaluated to assess whether copper slag can be used as a construction material. Test results indicate that the gradation of copper slag has an effect on strength, and the maximum strength was achieved when 60 % of river sand was replaced with copper slag. In addition, when compared with ordinary Portland cement mortar, replacing river sand with copper slag reduced air void size and increased sulfuric acid resistance.

Key words Copper slag, Cement mortar, Strength, Sulfuric acid resistance

동 제련 슬래그를 사용한 시멘트 모르타르의 강도 및 황산저항 특성

홍창우, 이정일*, 류정호*,†

한국교통대학교 토목공학과, 충주, 27469

*한국교통대학교 신소재공학과, 충주, 27469

(2016년 5월 9일 접수)

(2016년 5월 27일 심사완료)

(2016년 6월 3일 게재확정)

요약 동 제련 과정에서 발생하는 동 슬래그는 국내에서 연간 70만톤 이상이 발생되고 있어 산업부산물의 건설소재로서의 재활용에 대한 관심이 증가되고 있다. 이에 본 연구에서는 동 제련 슬래그의 3가지 유형의 입도형상과 잔골재로 사용된 강사의 대체 치환율 변화를 실험변수로 선정하여, 동 슬래그를 사용한 시멘트 모르타르의 강도 및 공극구조 특성, 황산 침지 저항성 등의 실험을 통해 건설용 골재로서의 사용가능성을 평가하고자 하였다. 실험결과 동 제련 슬래그 입도는 강도에 미치는 영향인자로 확인되었으며 동 제련 슬래그 잔골재 치환율 60 %인 경우가 가장 높은 강도를 보였다. 또한 잔골재를 동 제련 슬래그로 치환함으로써 기공크기가 감소되는 것으로 나타났으며, 황산에 대한 저항성도 증가되는 것으로 나타났다.

1. 서론

최근 건설수요는 증가되는 반면 잔골재 부존량은 감소되는 상황에서 환경 및 자원문제를 해결하기 위한 방안으로 산업부산물의 재활용에 대한 관심이 증가되고 있다 [1]. 산업부산물의 일종인 고로슬래그, 플라이애쉬 등은

콘크리트 혼화재로서 사용하기 위해 그동안 활발한 연구 개발이 진행되었고, 활용도도 증가되어 있는 실정이다[2].

또한 동 제련 과정에서 발생하는 동 슬래그는 국내에서 연간 70만톤 이상이 발생되고 있으며 건설용 소재로서 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다[2-5].

국내의 동 제련 슬래그의 활용에 관한 연구는 시멘트 및 콘크리트용 골재 뿐만 아니라, 철도 노반재료, 샌드블라스팅재, 지반개량재, 케이슨 채움재료 등으로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다[5-8]. 그리고 일본은 산업부

†Corresponding author
E-mail: jhryu@ut.ac.kr

산물의 재활용 차원에서 콘크리트용 잔골재로 활용을 위한 연구를 수행하고, 1997년 JIS A 5011-3(콘크리트용 동 슬래그 골재), 1998년 JIS A 5308(레드믹스트 콘크리트)의 규격에 동 슬래그를 레미콘용 골재로 사용될 수 있도록 개정을 하였다[5]. 최근에는 항만 공사용 테트라포트, 방파제 등에 동 슬래그 콘크리트의 활발한 적용이 이루어지고 있다. 또한 독일은 동 슬래그의 토건용 활용에 대한 DIN-4301 규정을 제정하여 건설공사에 슬래그 스톤으로 활용하고 있다[9].

따라서 본 연구에서는 동 제련 슬래그를 건설용 골재로 사용하기 위한 기술적 검토를 수행하기 위해 동 제련 슬래그의 3가지 유형의 입도형상과 잔골재로 사용된 강사의 대체 치환율 변화(0, 20, 40, 60, 80, 100%)를 실험변수로 선정하여, 동 제련 슬래그를 사용한 시멘트 모르타르의 강도 및 공극구조 특성, 황산침지 저항성 등의 실험을 통해 건설용 골재로서의 사용가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 실험계획

본 연구는 동 제련 슬래그 골재를 사용한 시멘트 모르

타르의 강도 특성을 분석하고자 한다. 주요 실험인자는 동 제련 슬래그 입도 변화조건(CS-A, CS-B, CS-C)과 동일 입도조건에서 잔골재로 사용된 강사에 대한 동 제련 슬래그 골재의 치환율 변화(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)이다. 그리고 주요 실험항목은 플로우, 공기량, 압축강도, 휨강도, 화학저항성, 미세공극구조이다. 주요 실험인자 및 시험체 기호 등은 Table 1과 같다.

2.2. 사용재료

시멘트는 국내 S사 보통포틀랜드 시멘트로서 비중 3.15, 분말도 3,300이며, 잔골재는 비중 2.56, 흡수율 1.0%, 조립률은 2.73%인 강사를 사용하였다. 그리고 동 제련 슬래그 골재는 (주)서원에서 생산된 것을 미분쇄하여 사용하였으며, 비중은 3.5이다. 그리고 Table 2는 동 제련 슬래그 골재의 주요성분을 나타낸 것이며, Fig. 1은 동 제련 슬래그 골재의 입도분포 실험결과이다.

2.3. 실험항목

굳지 않는 시멘트 모르타르의 플로우 실험은 KS F 2594, 공기량 시험은 KS F 2421에 의거해 수행하였으며, 압축강도 및 휨강도는 KS L 5105, KS F 2408 시험규격에 의하여 측정하였다. 그리고 황산 반응 특성 분

Table 1
The composition of the CS-A, CS-B and CS-C samples and experimental design

| Classification | CS grading type | CS contents (%) | W/C (%) | Test items |
|----------------|-----------------|-----------------|---------|--------------------------|
| OPC | - | 0 | | |
| CS-A-20 | A | 20 | | - Flow |
| CS-A-40 | A | 40 | | - Air content |
| CS-A-60 | A | 60 | | - Compressive strength |
| CS-B-20 | B | 20 | | - Flexural strength |
| CS-B-40 | B | 40 | | - Pore size distribution |
| CS-B-60 | B | 60 | 50 | - Chemical resistance |
| CS-B-80 | B | 80 | | - Flow |
| CS-C-20 | C | 20 | | - Air content |
| CS-C-40 | C | 40 | | - Compressive strength |
| CS-C-60 | C | 60 | | - Flexural strength |
| CS-C-80 | C | 80 | | - Pore size distribution |
| CS-C-100 | C | 100 | | - Chemical resistance |

- 1) CS: Copper slag.
- 2) CS-A-20: CS (Copper slag), A (CS grading type), 20 (CS content).
- 3) OPC: Sand 100%, CS 0%.

Table 2
Chemical properties of non-ferrous metal refining slag

| Classification | Specific gravity | Chemical properties (%) | | | | | | | | | |
|----------------|------------------|-------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | Cu | Fe | Zn | Ca | Si | Pb | Cr | Sn | S | etc |
| Copper slag | 3.5 | 36.39 | 28.28 | 10.26 | 8.57 | 4.42 | 3.49 | 2.68 | 1.78 | 1.48 | 2.65 |

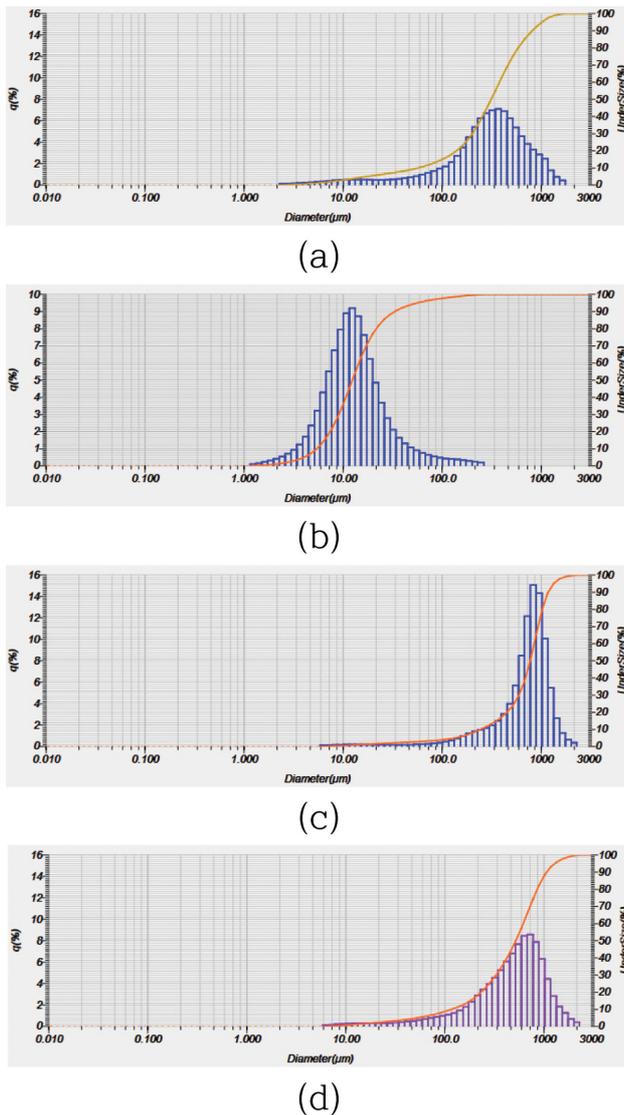


Fig. 1. Particle size of (a) sand, (b) CS-A, (c) CS-B and (d) CS-C. The X axis is distribution ratio and Y axis is diameter (μm).

석을 위해 모르타르 14일 양생 후 5% 황산용액에 침지하여 침지재령 7일, 14일, 21일, 28일에 따른 질량 변화를 측정하고, 시험체의 박리 및 탈락 추이를 평가하였다. 그리고 기공률 측정은 Micromeritics사의 AutoPore IV

Mercury Intrusion Porosimeters 시험기를 사용하여 기공크기 및 분포를 측정하였다.

2.4. 시험체 제작 및 양생

Table 3은 잔골재를 동 제련 슬래그 골재로 치환한 시멘트 모르타르의 배합설계를 나타낸 것이다. 그리고 시멘트 모르타르의 제조는 KS L 5109의 기계적 혼합방법에 의거해 수행하였으며, $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$ 조건에서 압축강도용 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ 의 큐빅 몰드 및 휨강도용 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 몰드를 성형하였다. 다짐은 봉다짐과 진동다짐을 병행하였으며, 양생은 $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수증양생을 실시하였다.

3. 분석 및 고찰

3.1. 강도특성

플로우는 Table 4와 같이 동 제련 슬래그 잔골재 치환율이 증가함에 따라 CS-A 및 CS-B 형상에서는 플로어가 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타난 반면에, CS-C 형상에서는 증가하는 것으로 나타나 동 제련 슬래그의 입도형상에 따라 작업성도 변화되는 것을 확인하였다. 그리고 공기량은 Table 4와 같이 동 제련 슬래그 치환율이 증가함에 따라 CS-B 형상에서는 감소되었으나, CS-A 및 CS-C의 경우는 OPC보다는 증가되었으며, 동 제련 슬래그의 미분함량에 따라 공기량이 변화되는 것으로 나타났다. CS-B의 경우는 강사보다 동 제련 슬래그 미분말의 함량이 증가함으로 인해 동 제련 슬래그 치환율이 증가함에 따라 공기량이 감소된 반면에 CS-C의 경우에는 동 제련 슬래그 치환율이 증가함에 따라 공기량도 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 동 제련 슬래그 입도형상에 따라 공기량 및 플로어 경향이 변화되는 것으로 나타났다.

동 제련 슬래그 입도 및 치환율에 따른 압축강도는 Table 4 및 Fig. 2와 같다. CS-A 입도형상에서는 재령

Table 3
Mix design of copper slag modified cement mortar

| Classification | CS contents (%) | W/C (%) | Unit weight (kg/m^3) | | | |
|----------------|-----------------|---------|--|-----|--------|--------|
| | | | C | W | S | CS |
| OPC | 0 | 50 | 480 | 240 | 1423.8 | 0 |
| CS-20 | 20 | 50 | 480 | 240 | 1139.1 | 383.3 |
| CS-40 | 40 | 50 | 480 | 240 | 854.3 | 766.7 |
| CS-60 | 60 | 50 | 480 | 240 | 569.5 | 1150.0 |
| CS-80 | 80 | 50 | 480 | 240 | 284.8 | 1533.3 |
| CS-100 | 100 | 50 | 480 | 240 | 0 | 1916.7 |

Table 4
Experiment result on the flow, air content, compressive strength and flexural strength

| Classification | Flow (mm) | Air content (%) | Compressive strength (MPa) | | Flexural strength (MPa) | |
|----------------|-----------|-----------------|----------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | | | 7 day | 28 day | 7 day | 28 day |
| OPC | 130 | 4.8 | 27.3 | 42.9 | 5.5 | 10.8 |
| CS-A-20 | 120 | 6.3 | 17.5 | 49.9 | 3.7 | 12.7 |
| CS-A-40 | 108 | 7.5 | 7.1 | 39.9 | 2.5 | 10.3 |
| CS-A-60 | 100 | 25.0 | 3.7 | 11.0 | 1.3 | 1.9 |
| CS-B-20 | 156 | 7.0 | 22.5 | 56.3 | 3.8 | 14.1 |
| CS-B-40 | 147 | 6.4 | 20.6 | 53.7 | 3.6 | 13.9 |
| CS-B-60 | 142 | 6.1 | 19.6 | 52.5 | 3.5 | 14.0 |
| CS-B-80 | 138 | 5.7 | 5.9 | 37.4 | 1.4 | 8.8 |
| CS-C-20 | 160 | 6.4 | 30.7 | 55.9 | 5.9 | 13.8 |
| CS-C-40 | 180 | 7.3 | 31.3 | 56.7 | 6.1 | 14.2 |
| CS-C-60 | 205 | 8.0 | 36.5 | 57.5 | 6.7 | 14.7 |
| CS-C-80 | 215 | 8.5 | 26.3 | 47.5 | 4.8 | 11.1 |
| CS-C-100 | 220 | 9.2 | 24.9 | 35.4 | 3.8 | 8.5 |

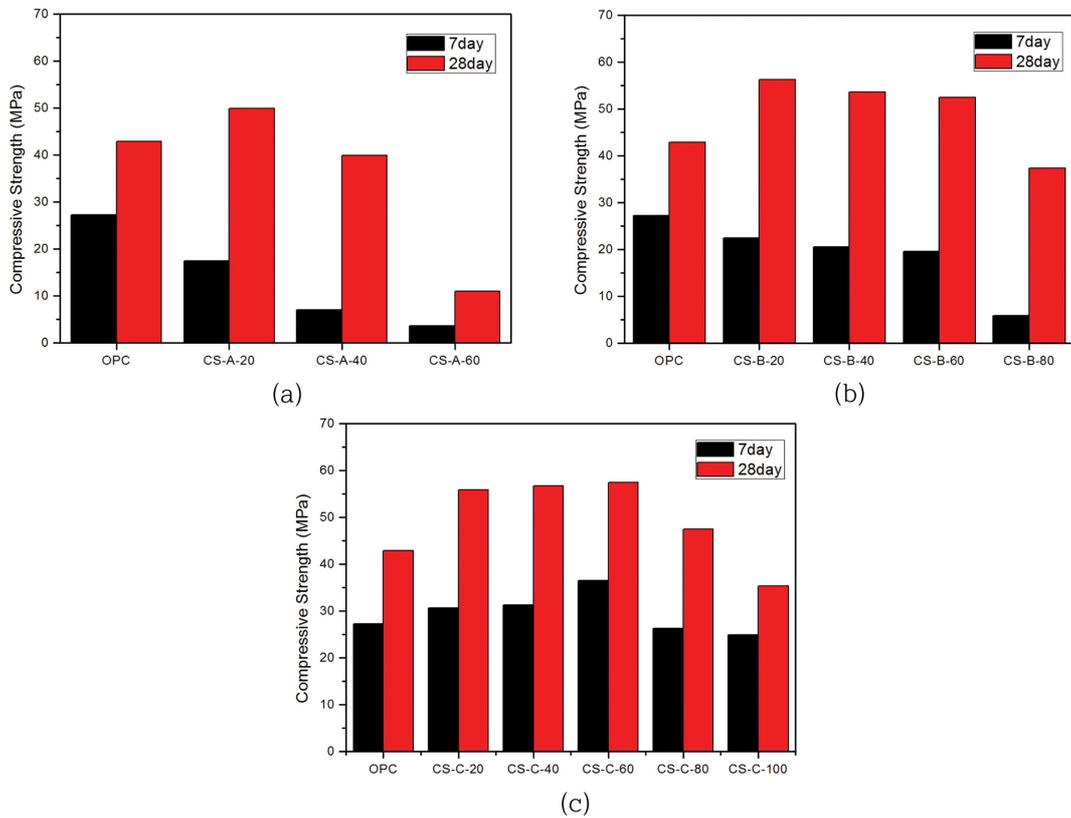


Fig. 2. Compressive strength of mortar with variation replacement ratio of copper slag for the (a) CS-A, (b) CS-B and (c) CS-C samples.

7일 강도는 동 제련 슬래그를 치환함으로써 OPC보다 감소하는 것으로 나타났으나, 재령 28일에서는 동 제련 슬래그를 20% 잔골재로 치환한 경우만 OPC보다 증가하는 것으로 나타났다. CS-B 입도형상에서는 재령 7일에서는 동 제련 슬래그를 치환한 모든 경우에서 OPC보다 감소하는 것으로 나타났으나, 재령 28일에서는 동 제련 슬래그 치환율 20, 40, 60%의 경우에는 OPC보다

증가하는 것으로 나타났다. 그리고 CS-C 입도형상에서는 재령 7일 강도가 동 제련 슬래그를 60% 치환한 경우까지는 OPC보다 증가하는 것으로 나타났으며, 재령 28일에서는 동 제련 슬래그를 60% 치환한 경우까지 증가하였으며, 80% 치환한 경우까지 OPC보다 압축강도가 증가한 것으로 나타났다. 60% 치환한 CS-C-60이 57.5 MPa로 가장 높은 압축강도를 보였으며, OPC보다

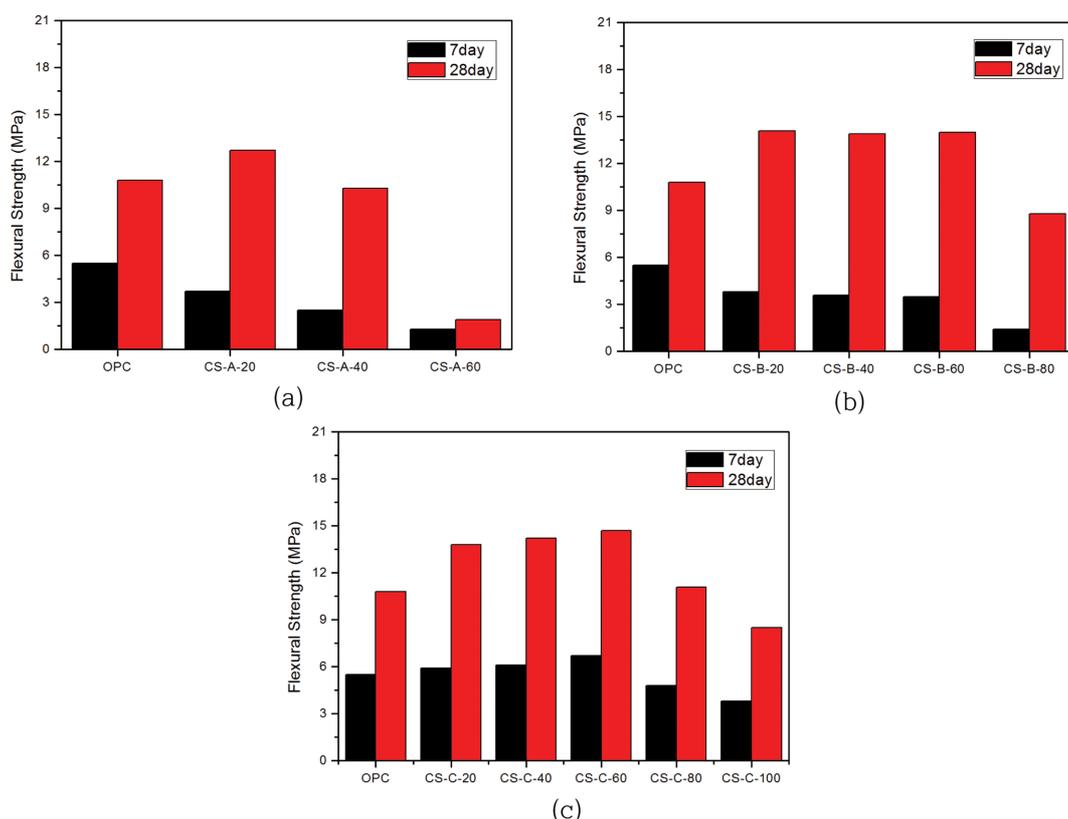


Fig. 3. Flexural strength of mortar with variation replacement ratio of copper slag for the (a) CS-A, (b) CS-B and (c) CS-C samples.

는 34 % 증가한 것으로 나타났다.

휨강도 실험결과는 Table 4 및 Fig. 3과 같다. 압축강도와 유사한 경향을 보이며, CS-A 입도형상에서는 동 제련 슬래그를 20 % 치환한 경우에만 OPC보다 높은 휨강도를 보였으며, 치환율이 증가함에 따라 휨강도가 감소되었다. 그리고 CS-B 입도형상에서는 동 제련 슬래그 치환율 60 %까지는 OPC보다 증진된 휨강도를 보였으며,

CS-C 입도형상에서는 80 % 치환한 경우까지 OPC보다 증가된 결과를 보였으며, 60 % 치환한 경우까지는 치환율이 증가함에 따라 휨강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험결과를 통해 동 제련 슬래그 골재의 입도형상이 압축 및 휨강도에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 동 제련 슬래그의 최적 치환율은 CS-C 입도형상에서 치환율 60 %로 나타났다.

Table 5

The porosity and weight change of the OPC, CS-A, CS-B and CS-C samples in sulfuric acid

| Classification | Porosity (%) | Weight change ratio in 5 % sulfuric acid (%) | | | |
|----------------|--------------|--|--------|--------|--------|
| | | 7 day | 14 day | 21 day | 28 day |
| OPC | 14.36 | -1.70 | -10.57 | -16.78 | -20.43 |
| CS-A-20 | 9.89 | -1.73 | -5.82 | -10.61 | -16.10 |
| CS-A-40 | 14.21 | +0.72 | -2.89 | -6.83 | -10.11 |
| CS-A-60 | 20.94 | +0.21 | -2.15 | -5.91 | -8.29 |
| CS-B-20 | 12.04 | -0.25 | -9.82 | -16.03 | -20.09 |
| CS-B-40 | 8.60 | -0.32 | -7.48 | -14.04 | -18.09 |
| CS-B-60 | 7.93 | -0.71 | -6.60 | -12.78 | -16.50 |
| CS-B-80 | 9.70 | -1.03 | -5.17 | -6.84 | -8.12 |
| CS-C-20 | 14.01 | -4.50 | -7.20 | -15.50 | -20.58 |
| CS-C-40 | 10.63 | -4.97 | -7.27 | -13.15 | -17.61 |
| CS-C-60 | 8.41 | -4.39 | -6.80 | -12.61 | -16.29 |
| CS-C-80 | 11.54 | -0.54 | -1.18 | -3.75 | -4.75 |
| CS-C-100 | 15.41 | -0.69 | -1.20 | -3.48 | -4.46 |

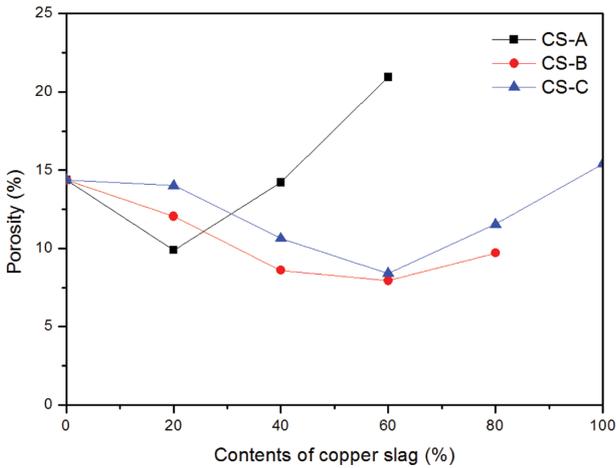


Fig. 4. Porosity of mortar with variation replacement ratio of copper slag.

3.2. 미세기공구조 특성

동 제련 슬래그 골재를 잔골재로 치환한 시멘트 모르타르의 공극률은 Table 5 및 Fig. 4에 나타내었다. OPC의 공극률은 14.36%를 보였으며, CS-A 입도형상의 동 제련 슬래그 골재를 치환하였을 경우 20% 치환한 경우가 9.89%로 가장 낮은 공극률을 보였으며, 치환율이 증가함에 따라 공극률도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 CS-B 입도형상의 동 제련 슬래그 골재를 치환한 경우에는 60% 치환한 경우까지 공극률이 12.04%, 8.6%, 7.93%로 감소되었으며, 80% 치환한 경우에는 9.7%로 증가되는 경향을 보였다. 또한 CS-C 입도형상에서도 CS-B의 경우와 유사하게 동 제련 슬래그를 60%까지 치환한 경우까지는 공극률이 감소하다가, 치환율이 80% 이상부터 공극률이 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 앞선 압축 및 휨강도에서도 동 제련 슬래그 골재를 60% 치환한 경우에서 강도가 가장 크게 나타난 결과와 연관성이 있는 것을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 5는 시멘트 모르타르의 기공크기 및 분포 정도를 나타낸 것이다. OPC의 경우 분포정도(X축)는 1~10 사이에 분포되어 있으며, 기공분포율(Y축)도 증가하는 것으로 나타났으며, CS-A 동 제련 슬래그를 60% 치환한 경우에는 0.1~1 사이에 주 분포되어 있으며, 기공분포율도 증가하였으며, 동 제련 슬래그를 20%, 40% 치환한 경우에는 0.01~0.1에서 기공분포율이 증가되는 것을 확인하였다.

그리고 CS-B 입도형상에서의 기공구조는 잔골재를 동 제련 슬래그로 20% 치환한 경우를 제외하고는 OPC보다 전반적으로 기공크기가 감소되는 것으로 나타났다. 또한 CS-C 입도형상에서의 기공구조는 동 제련 슬래그를 100% 치환한 경우 20~70의 기공분포를 이루며, 기

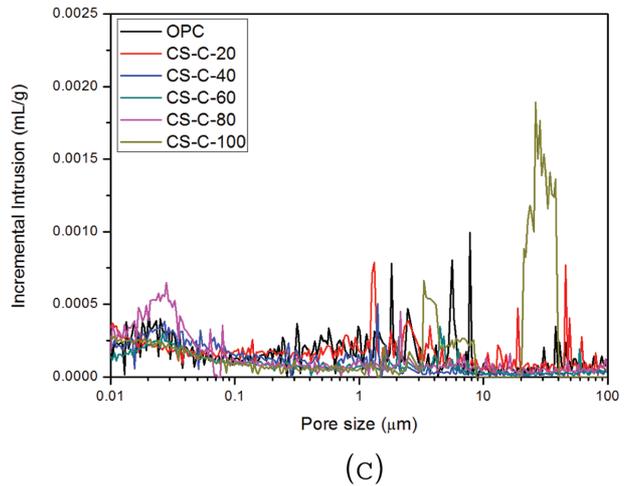
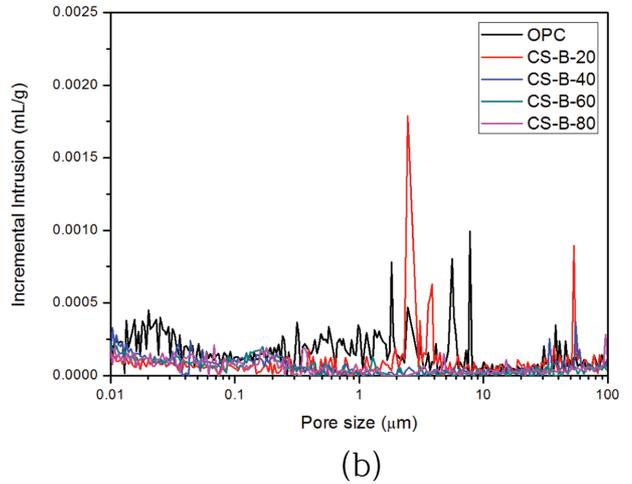
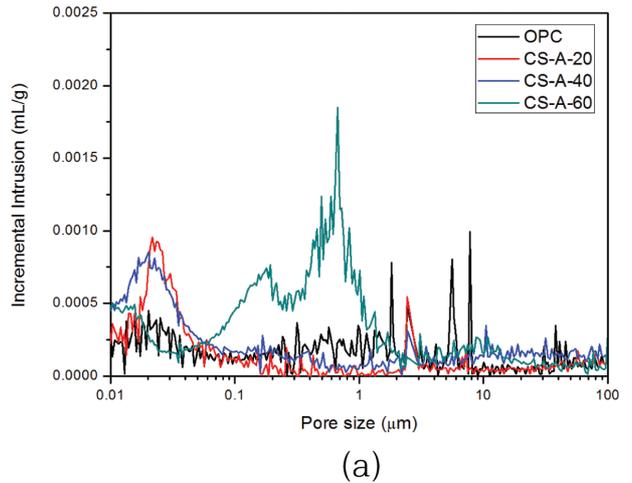


Fig. 5. Pore size distribution of mortar with variation replacement ratio of copper slag for the (a) CS-A, (b) CS-B and (c) CS-C samples.

공분포율 또한 증가하는 것으로 나타났다. 동 제련 슬래그를 20% 치환한 경우는 OPC와 유사한 경향을 보였으며, 40~60% 치환한 경우는 기공크기가 0.01~0.1에서 기공분포율이 증가하는 것으로 나타나, 동 제련 슬래그 잔골재 치환율이 40~60%인 경우에서 기공크기가 작은

것이 주를 이루며, 치환율이 이 범위를 초과하면 기공크기가 큰 것이 주를 이루는 것을 확인하였다.

3.3. 황산저항성

동 제련 슬래그 골재의 사용에 따른 영향 정도를 고찰하기 위해 시험체를 $50 \times 50 \times 50$ mm로 제작하고 14일 양생 후 5%의 황산에 28일 동안 침지시키면서 7일 간격으로 중량변화와 시험체의 균열 및 형상변화를 관찰하였다. 실험결과는 Fig. 6과 같다. OPC의 경우 28일 침지 후 20.43%의 중량이 감소된 반면에 동 제련 슬래그를 치환한 경우는 전반적으로 중량 감소율이 OPC보다 감소된 것으로 나타났다. CS-A 입도형상에서는 동 제련 슬래그를 60% 치환한 경우 8.29%로 가장 작은 중량감소율을 보였다. 그리고 CS-B 입도형상에서는 80% 치환한 경우 8.12%, CS-C 입도에서는 80%, 100% 치환시 4.75%, 4.46% 중량이 감소되는 것으로 나타나, 동 제련 슬래그 잔골재 치환율이 CS-A 입도에서는 60% 이상, CS-B, C 입도에서는 80% 이상 치환시 중량감소율이 가장 적은 것으로 나타났다. 이상과 같이 동 제련 슬래그를 잔골재로 치환함으로써 동 제련 슬래그에 함유되어 있는 비철금속의 특성으로 인해 황산에 대한 저항성이 증가되는 것으로 판단되며, 시험편의 형상은 침지재령이 증가됨에 따라 골재의 박리현상이 증가되나, 균열 등은 관찰되지 않았다.

4. 결 론

동 제련 슬래그의 시멘트 콘크리트의 잔골재 치환용으로 활용하기 위해서 동 제련 슬래그의 잔골재 치환율과 입도형상을 주요 실험인자로 하여 역학적 특성을 분석한 결론은 다음과 같다.

1) 동 제련 슬래그 입도 CS-C 형상이 CS-A, B 입도형상에 비해 압축강도 및 휨강도가 증가되는 것으로 나타나, 동 제련 슬래그 입도형상이 강도에 미치는 영향인자로 확인되었으며, CS-C 입도형상에서 동 제련 슬래그 잔골재 치환율 60%가 최적 치환율인 것으로 나타났다.

2) 기공구조는 잔골재를 동 제련 슬래그로 치환함으로써 전반적으로 OPC보다 기공크기가 감소되는 것으로 나타났다. 동 제련 슬래그 잔골재 치환율이 40~60%인 경우에서 기공크기가 작은 것이 주를 이루며, 동 제련 슬래그의 치환율이 이 범위를 초과하면 기공크기가 큰 것이 주를 이루는 것을 확인하였다.

3) 황산침지 저항성은 동 제련 슬래그를 치환함으로써 중량 감소율이 OPC보다 감소된 것으로 나타났으며, CS-A 입도에서는 60% 이상, CS-B, C 입도에서는 80% 이상 동 제련 슬래그를 치환시 중량감소율이 가장 적은 것으로 나타났으며, 황산 침지 재령이 증가됨에 따라 골재의 박리현상은 증가되나, 균열 등은 관찰되지 않

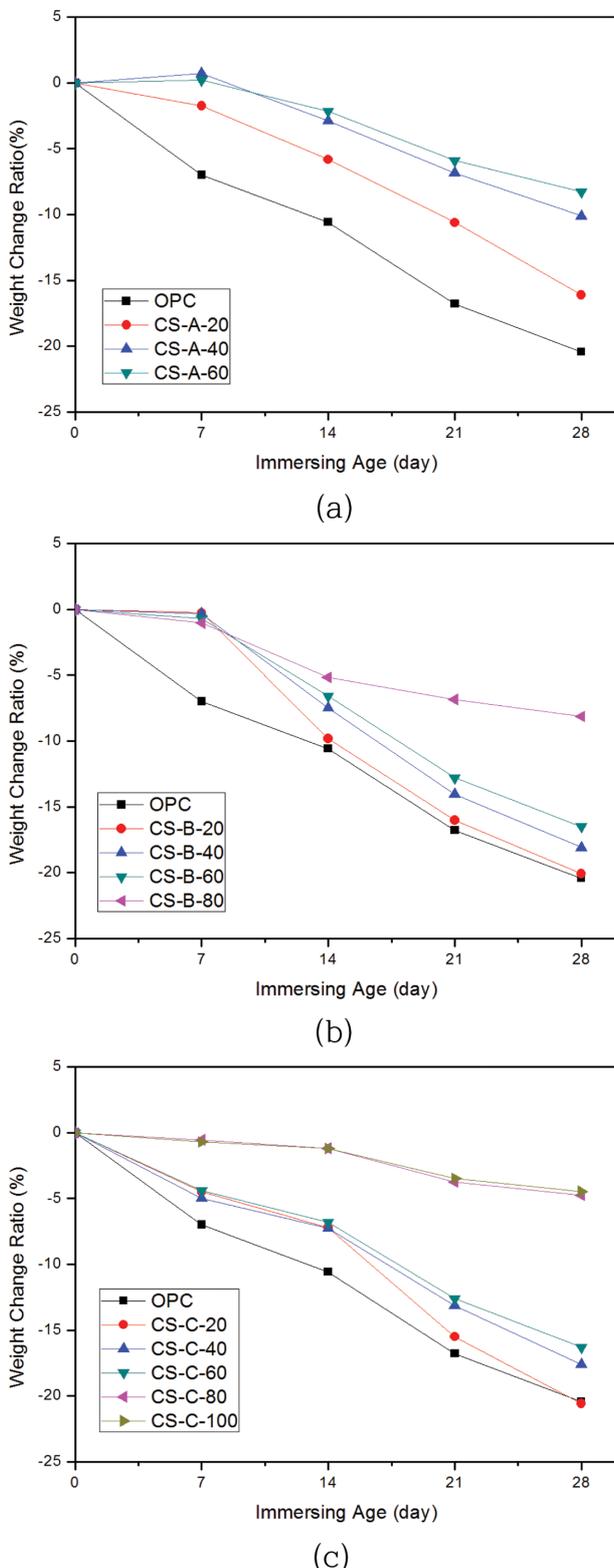


Fig. 6. Weight change ratio of mortar with immersing age in 5% sulfuric acid for the (a) CS-A, (b) CS-B and (c) CS-C samples.

았다. 이와 같은 결과는 동 제련 슬래그에 함유되어 있는 비철금속의 특성으로 인해 황산에 대한 저항성이 증가된 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP, No. 20125010100030-11-2-400)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] M.H. Lee, "Experimental study for the derivation of the optimal replacement ratio of copper slag in the production of concrete", J. of the Architectural Institute for Korea Structure & Construction 25 (2009) 143.
- [2] C.W. Hong, J.I. Lee and J.H. Ryu, "Characteristics of fresh mortar with particle size and replacement ratio of copper slag", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 26 (2016) 41.
- [3] J.I. Lee, C.W. Hong and J.H. Ryu, "Separation of Nickel and Tin from copper alloy dross", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 24 (2014) 224.
- [4] J.I. Lee, C.W. Hong and J.H. Ryu, "Evaluation of cement mortars blended with copper alloy slag", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 25 (2015) 39.
- [5] S.W. Ji and C.H. Seo, "The application of copper smelting slag as concrete aggregate", J. of the Korean Recycled Construction Resources Institute 2 (2006) 68.
- [6] M.H. Lee, "A study on the evaluation of the durability of concrete using copper slag aggregates", J. of the Korea Concrete Institute 20 (2008) 773.
- [7] N.W. Kim, H.W. Kim and J.S. Bae, "Properties of mixed concrete using metakaolin and copper slag", J. of Korean Inst. of Resources Recycling 19 (2010) 13.
- [8] M.Y. Park, K.M. Kim, J.H. Park and J.D. Lee, "Feasibility assessment for use to railway subsoil material of copper slag", 2012 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway 2012 (2012) 980.
- [9] S.H. Lee, "Technology of copper slag and recycled aggregates in application of concrete material", J of the Korea Concrete Institute 14 (2002) 44.