

콘크리트의 강도 및 내구성에 대한 고로슬래그미분말 분말도의 영향

이승태*

Lee, Seung Tae*

Effect of Fineness Levels of GGBFS on the Strength and Durability of Concrete

ABSTRACT

This paper presents the results of experimental work on both strength characteristics and durability of concrete or mortar having 50% ground granulate blastfurnace slag (GBS) with different fineness levels (4,450, 6,000 and 8,000 cm^2/g). Compressive and split tensile strength test results indicated that the concrete with a higher fineness level of GBS exhibited a better strength development due to the acceleration of latent hydraulic property at the later curing stage compared with ordinary portland cement concrete. Meanwhile, it was found that a higher fineness level of GBS showed some negative effects on the resistance against freezing-thawing action. However, incorporation of GBS to concrete, irrespective of fineness levels, significantly enhanced the chloride ions penetration resistance. The resistance against sulfate attack of mortar with GBS was greatly dependent on the attacking sources from sulfate environments.

Key words : Ground granulated blastfurnace slag, Fineness, Concrete, Strength characteristics, Durability

초 록

본 연구는 콘크리트의 강도특성 및 내구성에 대한 고로슬래그미분말 분말도의 영향을 평가하기 위하여 수행되었다. 본 실험에 사용된 고로슬래그미분말의 분말도는 3종류(4,450, 6,000 및 8,000 cm^2/g)를 선정하였으며, 보통포틀랜드시멘트에 대하여 50%를 대체하여 공시체를 제조하였다. 강도실험 결과에 따르면, 분말도가 8,000 cm^2/g 인 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 압축 및 쪼갬인장강도는 초기재령에서는 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 비하여 다소 작았으나, 장기재령에서는 잠재수경성의 촉진으로 인하여 강도가 우수하게 나타났다. 내구성 분석결과에 의하면, 고분말도(6,000 및 8,000 cm^2/g) 고로슬래그미분말 사용 콘크리트의 동결융해 저항성이 다소 작게 나타난 반면, 염소이온 침투저항성은 분말도 크기에 관계없이 고로슬래그미분말 적용 콘크리트가 우수하게 관찰되었다. 한편, 고로슬래그미분말을 사용한 모르타르의 황산염침식 저항성은 침식환경에 지배적인 영향을 받는 것으로 조사되었다.

검색어 : 고로슬래그미분말, 분말도, 콘크리트, 강도특성, 내구성

1. 서론

콘크리트 구조물의 고기능성을 요구하는 사회적 추세로 인하여 콘크리트의 고성능은 필수불가결의 요소로 인식되어지고 있다. 초고층 건축물, 장기간 교량, 해양구조물 등과 같이 고내구성 및 고강도를 필요로 하는 콘크리트 구조물을 건설하기 위해서는 합리적인 콘크리트 배합뿐 만 아니라 사용되는 건설재료의 선택이 무엇보다 중요하다.

또, 콘크리트의 품질은 여러 외부인자에 의하여 크게 영향을 받으며, 특히 온도, 습도 등과 같은 기상작용 및 주변환경에 의하여 콘크리트의 조직내부에 물리·화학적 변화가 일어나게 되어 콘크리트의 내구성능 및 조직구조가 변화하게 된다. 콘크리트의 내구성능을

* 정회원·교신저자·군산대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Kunsan National University · stlee@kunsan.ac.kr)

Received January 21, 2014/ revised February 21, 2014/ accepted June 12, 2014

저하시키는 요인으로는 대기 중의 이산화탄소의 급증에 의한 콘크리트의 탄산화, 해양환경 하에서의 염화물 침투 및 확산에 의한 철근부식, 기온저하에 의한 동해, 유해이온의 침투 및 화학반응에 의한 화학적 침식 등이 있다(Aye and Oguchi, 2011; Sisomphon et al., 2010; Wang et al., 2014).

이상과 같이 콘크리트의 역학적/내구적 성능확보를 위하여 오래 전부터 고로슬래그미분말(ground granulated blastfurnace slag)이 콘크리트 제조를 위하여 널리 사용되어 오고 있으며, 앞으로도 그 사용량이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

1862년 독일에서 처음 생산된 고로슬래그미분말은 국내의 경우 1953년에 최초로 생산되었으며, 매년 생산량이 꾸준히 증가하고 있다. 생산되는 고로슬래그의 약 70% 이상은 고로에서 발생된 용융슬래그를 물로 급속 분사시켜 급랭시킨 수재로, 비정질로 형성되며 잠재수경성을 지니고 있어 고로슬래그시멘트 및 고로슬래그미분말 제조 시 원료로 주로 활용되고 있으며, 최근 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 사공지침도 제정되었다. 국내의 경우, 1975년도에 고로슬래그시멘트 제품규격이 KS L 5210으로 제정되었으며, 1997년에는 콘크리트용 고로슬래그미분말이 KS L 2563으로 제정되기도 하였다.

고로슬래그미분말은 CaO, SiO₂, 및 Al₂O₃의 3가지 주성분과 약간의 MgO가 전체 화학성분의 약 93~98% 정도를 차지하고 있다. 고로슬래그미분말이 콘크리트에 혼입되어 경화작용을 나타내기 위해서는 알카리성 또는 황산염의 자극물을 첨가하여, OH⁻ 및 SO₄²⁻ 이온이 충분히 존재하는 조건이 필요하다. 이러한 조건하에 고로슬래그미분말은 포틀랜드시멘트와 마찬가지로의 수경성의 특성을 나타낸다. 일단 수화가 시작되면 장기적으로 석회 결합기능도 나타나기 때문에 고로슬래그미분말은 포졸란반응(pozzolanic reaction)을 나타내는 물질로도 해석되기도 한다. 또, 고로슬래그시멘트의 잠재수경성(latent hydraulic property)은 주로 유리량(glass content)과 염기도(basicity)에 의해 지배되는 것으로 알려져 있다(Lee, et al., 2012).

분말도가 큰 고로슬래그미분말은 상대적으로 분말도가 작은 것에 비하여 잠재수경성 속도가 빠른 탓으로 강도발현이 크고 공극량이 작게 나타나는 특성을 나타낸다고 알려져 있다(Babu and Kumar, 2000).

고품질 건설재료의 효율적인 활용을 위하여 많은 연구자들 사이에 고로슬래그미분말을 적용한 페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 수화반응, 역학적 특성 및 내구성에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 오고 있으며, 관련 연구실적도 많이 보고되고 있다. 그러나, 이러한 연구의 대부분은 고로슬래그미분말의 최적 대체율(Lee et al., 2000; Hooton, 2000), 미세조직구조(Hadj-sadok et al., 2011; Geng and Li, 2014), 수화열(Beushausen et al., 2012), 강도특성(Kim et al., 2012; Oner and Akyuz, 2007; Lubeck

et al., 2012), 건조수축 특성(Neto, et al., 2010; Teng et al., 2013) 등 배합 및 역학적 특성에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, 고로슬래그미분말 사용 콘크리트의 내구성에 대한 연구도 상대적으로 많이 이루어지고 있다(Osborne, 1999; Aye and Oguchi, 2011; Ortega et al., 2012). 그러나, 고로슬래그미분말과 관련한 많은 연구결과에도 불구하고 일부연구(Higgins, 1995; Oner et al., 2003)를 제외하면 콘크리트 혹은 모르타르의 성능에 대한 고로슬래그미분말 분말도의 영향에 대한 보고는 그다지 많지 않은 실정이다.

본 연구는 분말도가 상이한 3종류 고로슬래그미분말을 적용한 시멘트 경화체의 수화생성물, 강도특성 및 내구성을 평가하기 위하여 수행되었으며, 도출된 실험결과를 보통포틀랜드시멘트 경화체와 비교, 고찰하였다. 본 실험에서 얻은 결과는 향후 고성능 콘크리트 구조물 건설에 적용가능할 것으로 판단되며, 합리적인 건설재료 선택을 위한 자료로도 활용될 것으로 기대된다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 고로슬래그미분말

ASTM C 150 규준을 만족하는 Type I 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며, OPC의 클링커 조성광물은 각각 C₃S : 62.5%, C₂S : 10.1%, C₃A : 9.3% 및 C₄AF : 7.2%이다. 사용된 고로슬래그미분말(GBS)은 KS F 2563의 규정에 따라 분말도 등급별로 3종류(GBS4, GBS6 및 GBS8)를 사용하였다. 본 실험에 사용된 OPC 및 GBS의 화학성분 및 물리적 특성을 나타낸 것이

Table 1. Chemical Composition and Physical Properties of OPC and GBS Used in This Study

| Chemical composition, % | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | OPC | GBS4 | GBS6 | GBS8 |
| SiO ₂ | 19.9 | 31.7 | 32.2 | 32.3 |
| Al ₂ O ₃ | 5.0 | 14.5 | 14.6 | 14.6 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.4 | 0.7 | 0.4 | 0.4 |
| CaO | 63.8 | 41.7 | 44.0 | 44.0 |
| MgO | 2.5 | 5.4 | 5.6 | 5.6 |
| SO ₃ | 3.0 | 2.1 | 1.1 | 1.1 |
| K ₂ O | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |
| Na ₂ O | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| L.O.I | 1.2 | 2.6 | 1.2 | 1.2 |
| Physical properties | | | | |
| Fineness*, cm ² /g | 3,120 | 4,450 | 6,000 | 8,000 |
| Density, g/cm ³ | 3.15 | 2.92 | 2.92 | 2.92 |

* Values measured by Blaine's method

Table 1이다.

2.1.2 골재

콘크리트 공시체 제조를 위하여 사용한 잔골재는 밀도 2.60g/cm³, 조립률 2.8인 강모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 25mm 인 부순돌을 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 또, 황산염침식 저항성 평가를 위하여 모르타르를 제조하였으며, 잔골재는 ASTM C 109의 규준을 만족하는 표준사를 사용하였다.

2.1.3 화학혼화제

콘크리트의 단위수량 저감과 적절한 연행공기(5±1%)를 발생시키기 위하여 비중 1.09±0.02의 리그닌계 AE감수제를 사용하였다.

2.2 배합

2.2.1 페이스트 배합

결합재의 수화특성을 고찰하기 위한 물-결합재비(w/b)가 48.5%인 페이스트를 제조하여 포화 석회수용액(sat. limewater)에 28일간 양생시켰다.

2.2.2 모르타르 배합

ASTM C 1012 규준에 따라 결합재와 표준사의 중량비가 1 : 2.75, w/b가 48.5%인 모르타르를 제조하였으며, 화학혼화제는 적용되지 않았다. 사용된 3종류 GBS의 대체율은 50%로 하였으며, 모르타르는 압축강도가 20MPa 이상 발현될 때까지 포화 석회수용액(sat. limewater)에 양생시킨 후, 일부 모르타르 공시체를 꺼내어 황산염용액에 침지시켰다.

2.2.3 콘크리트 배합

콘크리트의 강도특성 및 내구성을 평가하기 위하여 w/b 45%,

Table 2. Physical Properties of Aggregates for Concrete Mixture

| Types | Items | G _{max} , mm | Density, g/cm ³ | Absorption, % | F.M. |
|-------------|-------|-----------------------|----------------------------|---------------|------|
| | | | | | |
| Coarse agg. | 25 | 2.67 | 0.78 | 7.13 | |

Table 3. Concrete Mixtures

| Symbol | w/b % | S/a, % | Unit weight, kg/m ³ | | | | |
|--------|-------|--------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | | W | C | GBS | S | G |
| OPC | 45 | 42 | 187 | 416 | - | 695 | 985 |
| GBS4 | 45 | 42 | 187 | 208 | 208 | 689 | 977 |
| GBS6 | 45 | 42 | 187 | 208 | 208 | 689 | 977 |
| GBS8 | 45 | 42 | 187 | 208 | 208 | 689 | 977 |

S/a 42%, GBS 대체율 50%인 콘크리트를 제조하였으며, 콘크리트 배합표를 Table 3에 나타내었다.

2.3 실험방법

2.3.1 X-ray diffraction (XRD)

재령 28일의 페이스트를 대상으로 수화생성물을 분석하기 위하여 XRD 분석을 실시하였으며, 측정 조건은 CuKα (Ni filter) : 30kV, 20mA, scanning speed : 2°/min 및 2θ : 5~50°로 정하였다. 이때, 수화생성물의 반정량 XRD 분석(semi-quantitative X-ray diffraction analysis)을 위하여 내부 표준물질로서 TiO₂ 분말을 페이스트 분말 중량의 10% (wt.)로 사용하였다.

2.3.2 강도

콘크리트의 강도특성을 고찰하기 위하여 20±3°C에서 수중양생한 Ø 100×200mm 원주형 공시체를 대상으로 콘크리트의 압축 및 쪼갬인장강도를 각각 KS F 2405 및 KS F 2423에 준하여 재령 7, 28 및 91일에서 측정하였다.

2.3.3 동결융해저항성

콘크리트의 동결융해저항성 실험은 14일간의 전양생(pre-curing) 기간을 거친 후, ASTM C 666에 준하여 실시하였으며, 온도측정용 중심공시체의 온도가 4°C에서 -18°C를 거쳐 다시 4°C에 도달하는 과정을 1사이클로 하여 총 300사이클을 진행하였으며, 매 30사이클마다 콘크리트 시편의 동탄성계수를 측정하였다. 동결융해 반복작용을 받기 전 공시체의 동탄성계수에 대한 소정의 사이클에서의 동탄성계수를 Eq. (1)과 같이 상대동탄성계수로 나타내었다.

$$E_{d,c}(\%) = (n_1 / n)^2 \times 100 \quad (1)$$

여기서, $E_{d,c}$ = c 사이클에서 상대동탄성계수(%)

n_1 = c 사이클에서의 공명진동수(Hz)

n = 초기 공명진동수(Hz)

또, 매 100 사이클마다 콘크리트의 압축강도를 측정하였으며, 동결융해작용을 받기 전 콘크리트의 압축강도와 비교하여 압축강도비를 다음 Eq. (2)와 같이 계산하였다.

$$\text{Compressive strength ratio (\%)} = (f_n / f_0) \times 100 \quad (2)$$

여기서, f_n : 동결융해를 받은 콘크리트의 n 사이클 후 압축강도 (MPa), (n=100, 200 및 300)

f_0 : 동결융해 받기 전 콘크리트의 압축강도 (MPa)

2.3.4 염소이온 침투저항성

콘크리트의 통과전하량은 ASTM C 1202에 준하여 두께 50mm의 시험체를 대상으로 하여 측정하였다. 시험체 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 통전시키면서 시험체에 흐르는 전류를 데이터 로거를 이용하여 30분 간격으로 측정하였으며(Fig. 1), 측정된 전류로부터 시간에 대한 전류의 적분 값을 취하여 Eq. (3)에 의하여 총 통과전하량을 산정하였다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3)$$

여기서, Q = 총 통과전하량 (Coulomb)

I_x = x분에서의 전류값 (A)

위의 식으로부터 계산된 총 통과전하량을 근거로 Table 4에 제시된 범위구간과 비교하여 염소이온 침투저항성을 정성적으로 판단할 수 있다.

콘크리트의 염소이온 확산계수는 전기화학적 촉진실험법 중 NT BUILD 492법에 의하여 측정하였다. 콘크리트 시편의 두께는 50mm로 하였으며, 음극셀은 10%의 NaCl 수용액을, 양극셀은 0.3M의 NaOH 수용액을 사용하였다. 확산셀을 구성한 후 직류전원

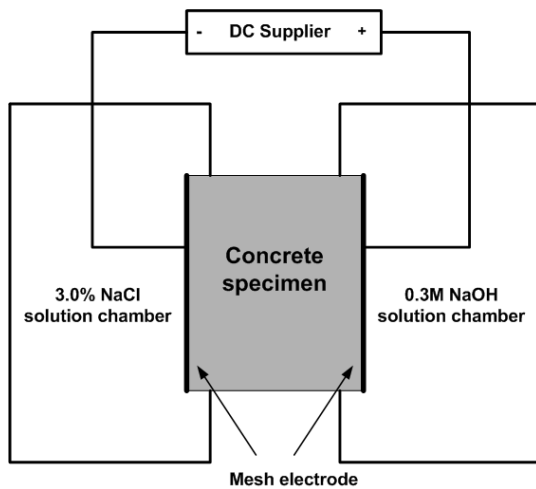


Fig. 1. Set-up for ASTM C 1202

Table 4. Criteria of Chloride Ions Permeability (ASTM C 1202)

| Total charge passed, coulomb | Chloride ions permeability |
|------------------------------|----------------------------|
| > 4,000 | High |
| 2,000 ~ 4,000 | Moderate |
| 1,000 ~ 2,000 | Low |
| 100 ~ 1,000 | Very low |
| < 100 | Negligible |

공급장치를 이용하여 30V의 전압을 공급하였으며, 저항에 걸리는 전류와 확산셀 내부의 온도를 일정 시간동안 측정하였다. 비정상상태의 염소이온 확산계수는 다음 Eq. (4)로 계산하였다.

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (4)$$

여기서, $E = \frac{U-2}{L}$, $\alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}(1 - \frac{2c_d}{c_0})$

D : 비정상상태에서 염소이온 확산계수(m²/s), z : 이온의 원자 가(z=1), F : 패러데이 상수, U : 전압차(V), R : 기체상수, T : 용액의 온도(K), L : 시편의 두께(m), x_d : 염소이온의 침투깊이 (m), t : 실험기간(s), erf : 오차함수, c_d : 비색법에 의한 반응 농도 및 c_0 : 음극셀의 염소이온 농도이다.

2.3.5 황산염침식 저항성

황산염침식 저항성 평가를 위한 실험은 전술한 모르타르 배합으로 제조된 50mm 큐브(강도측정용) 및 25×25×285 mm 각주형(팽창측정용) 공시체를 대상으로 수행되었다. 제조된 모르타르는 7일 동안 수중양생 후 초기 압축강도 및 길이를 측정하여 시험용액에 소정의 재령동안 침지시켰다.

시험용액은 Regent급 황산나트륨(Na₂SO₄) 및 황산마그네슘(MgSO₄) 시약을 사용하였으며, ASTM C 1012에 준하여 SO₄²⁻ 이온의 농도를 33,800ppm이 되도록 조절하였다. 또, 시험용액은 재령이 증가함에 따라 농도가 묽어지는 점을 고려하여, 매 4주마다 새로운 용액으로 교체하였으며, 온도에 의한 영향을 배제하기 위하여 실험기간동안 23±3°C로 일정하게 유지시켜 실험을 수행하였다.

담수 및 황산염용액에 침지한 모르타르의 재령별 압축강도를

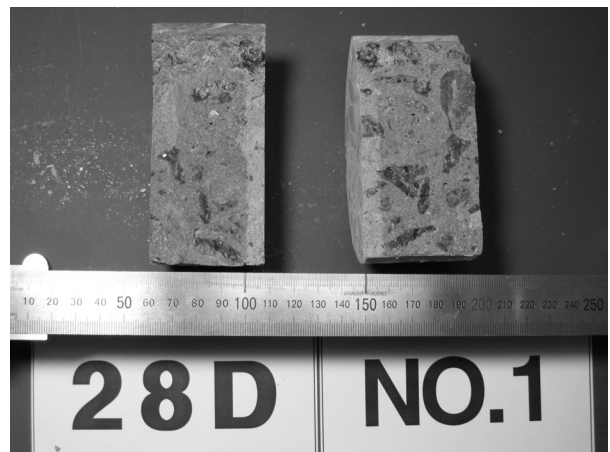


Fig. 2. Measurement of Penetration Depth of Chloride Ions

KS L 5105에 의하여 측정하였으며, 압축강도 감소율(RCS: reduction in compressive strength)은 다음 Eq. (5)와 같이 계산하였다.

$$RCS(\%) = \frac{f_{wc} - f_{sc}}{f_{wc}} \times 100 \quad (5)$$

여기서, f_{wc} : 담수 양생한 모르타르의 압축강도(MPa)
 f_{sc} : 황산염용액에 침지한 모르타르의 압축 강도(MPa)

또, 각주형 모르타르 공시체를 제조하여 20MPa의 압축강도가 발현될 때까지 포화 석회수용액에 양생한 후, 황산염용액에 각각 침지시킨 모르타르의 재령별 팽창량을 KS F 2424의 방법에 준하여 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 XRD 분석

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 4종류 결합재의 수화생성물을 평가하기 위한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알

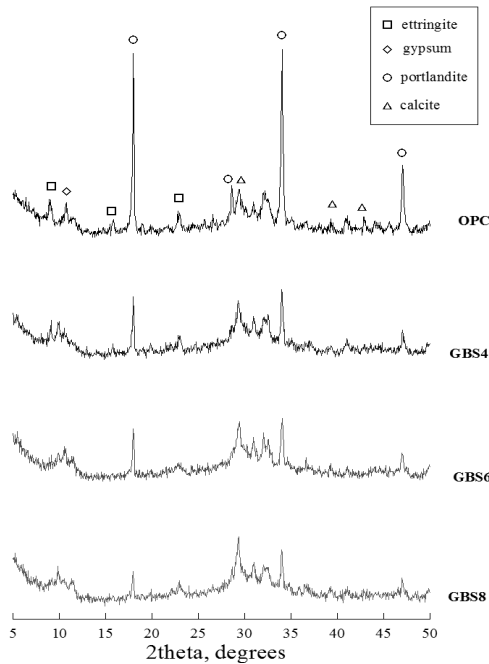


Fig. 3. XRD Patterns for Paste Samples (28 days)

Table 5. Comparison of Portlandite Content by Semi-Quantitative XRD Analysis (%)

| OPC | GBS4 | GBS6 | GBS8 |
|-----|------|------|------|
| 100 | 42 | 38 | 33 |

수 있듯이 결합재의 수화반응에 의한 ettringite, gypsum, portlandite 및 calcite의 수화생성물이 생성됨을 확인할 수 있다. 특히, OPC 페이스트는 18.1 및 34.1° 2θ에서 portlandite의 피크가 강하게 검출되었으며, 9.1, 15.8 및 22.9° 2θ에서 ettringite의 피크도 관찰되었다. 또, GBS를 50% 대체한 페이스트는 분말도가 증가함에 따라 portlandite의 피크강도가 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 한편, XRD 분석결과에 의하면, 25~35° 2θ 영역에서 굴곡형(hill-type curve)의 피크 곡선이 관찰되므로써, 비정질상(amorphous phase)의 C-S-H가 주요 수화물질을 알 수 있었다.

한편, 반정량 XRD법(Ramlochan et al., 2004)에 의하여 계산된 각 결합재의 portlandite (34.1° 2θ) 피크강도를 OPC의 피크강도에 대한 백분율(%)로 비교하여 나타낸 것이 Table 5로써, 결합재 종류에 따라 수화반응에 의하여 생성되는 portlandite의 양이 상이함을 알 수 있다. 따라서, 결합재에 따른 수화생성물의 양이 다르게 나타나므로써 콘크리트의 강도특성 및 내구성에도 영향을 미칠 것으로 예측되며, 이는 Moon and Lee (2003)의 연구결과에서도 강조되었다.

3.2 강도특성

Fig. 4는 GBS 분말도에 따른 콘크리트의 압축강도 발현 경향을 OPC 콘크리트와 비교하여 나타낸 것이다. 초기재령(7일)에서 OPC 콘크리트의 압축강도가 GBS를 사용한 콘크리트에 비하여 다소 크게 나타났으나, 장기재령(91일)에서는 가장 작게 나타났다. 반면, GBS의 분말도가 가장 큰 GBS8을 OPC에 대하여 50% 대체한 콘크리트의 압축강도는 OPC 콘크리트와 반대 경향을 타나냄을 알 수 있다. 이러한 압축강도 결과는 Oner et al. (2003)의 연구결과와 대체적으로 잘 일치하였다.

한편, 4종류 콘크리트의 재령별 쪼갬인장강도 발현경향을 나타

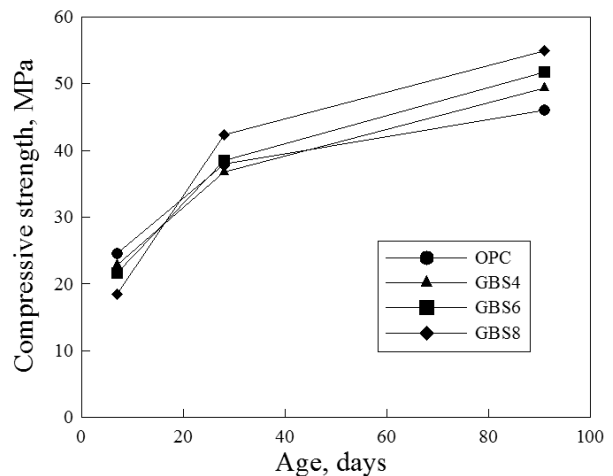


Fig. 4. Development of Compressive Strength of Concretes

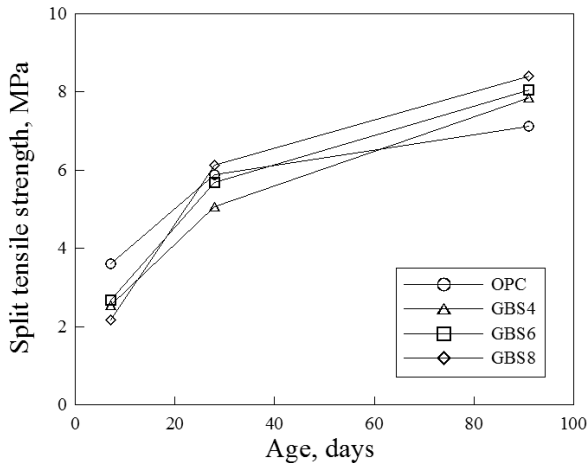


Fig. 5. Development of Split Tensile Strength of Concretes

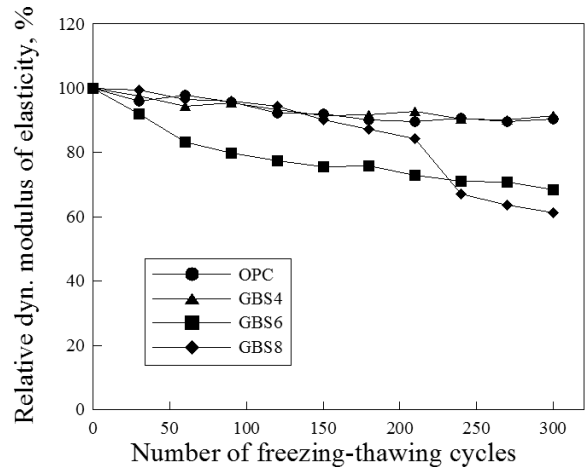


Fig. 7. Variation of Relative Dynamic Modulus of Elasticity

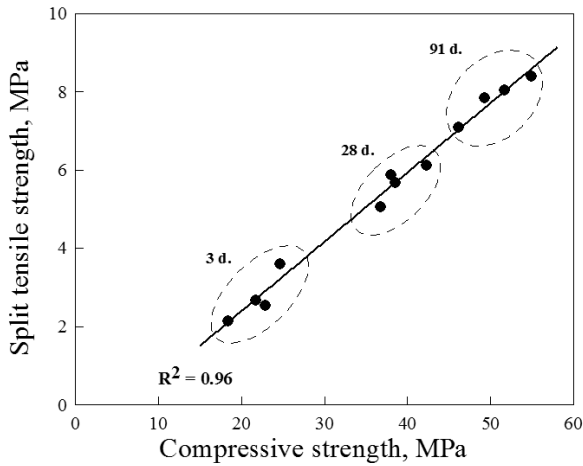


Fig. 6. Relationship Between Compressive Strength and Split Tensile Strength

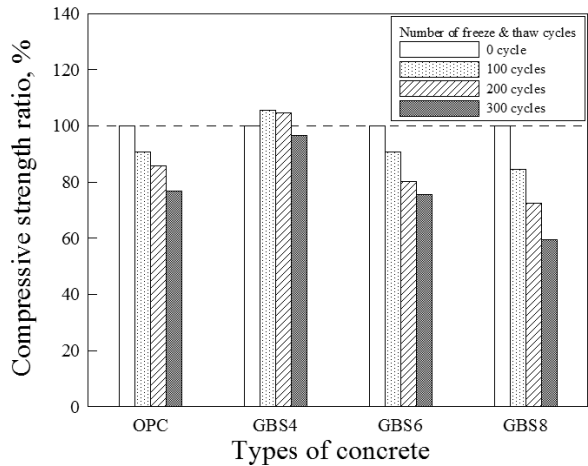


Fig. 8. Compressive Strength Ratio of Concretes Exposed to Freezing-Thawing Action

낸 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 콘크리트의 쪼갬인장 강도 경향은 압축강도 발현경향과 대체적으로 유사하게 나타났다. 다시 말해서, OPC 콘크리트의 재령 7일 쪼갬인장강도는 3.6MPa로 가장 크게 나타났으나, 재령 91일에서는 7.1MPa로 4종류 콘크리트 중 가장 작은 값을 나타내었다. 그러나, GBS의 분말도에 따른 인장강도 차이는 그다지 크지 않았으나, 고분말 GBS를 사용한 콘크리트의 쪼갬인장강도가 장기재령에서 다소 크게 나타났다.

이상의 결과로부터 고미분말 GBS를 사용한 콘크리트가 초기재령에서는 강도가 다소 낮게 발현되나, 장기강도가 향상되는 특성을 나타내었다. 이러한 실험결과는 고미분말 GBS의 잠재수경성이 우수하였기 때문으로 판단된다(Oner et al., 2003).

한편, 본 실험에서 사용한 4종류 콘크리트의 압축강도 및 쪼갬인장강도의 상관관계를 나타낸 것이 Fig. 6으로써, 두 강도특성은 상당히 밀접한 상관관계($R^2 = 0.96$)가 있음을 알 수 있다.

3.3 동결융해저항성

GBS 콘크리트의 동결융해 및 스케일링 저항성에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되었다(Sisomphon et al., 2010; Deja, 2003; Allahverdi et al., 2014). 특히, 최근의 연구결과에 의하면, Allahverdi et al. (2014)은 고로슬래그 콘크리트의 우수한 스케일링 저항성에 대한 실험결과를 보고한 반면, Sisomphon et al. (2010)은 고로슬래그 콘크리트가 포틀랜드시멘트 콘크리트에 비하여 동결저항성이 작은 상반된 연구결과를 보고하기도 하였다. 그러나, 분말도가 상이한 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 동결융해저항성에 연구결과는 상대적으로 많지 않은 실정이다.

Fig. 7은 ASTM C 666법에 준한 실험결과로써, 동결융해 반복 작용을 받은 4종류 콘크리트의 상대동탄성계수 변화를 나타낸 것이다. OPC 및 GBS4 콘크리트의 상대동탄성계수는 300 사이클 까지 서로 유사한 결과를 나타낸 반면, 고미분말 GBS를 사용한

GBS6 및 GBS8 콘크리트의 상대동탄성계수는 300 사이클 후 약 68% 및 61%로 각각 나타남으로써, 동결융해저항성이 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 고분말도 광물질혼화제를 사용함에 따라 콘크리트 중의 공극크기가 감소하여 동해시 팽창압을 크게 받았기 때문으로 판단되며, 이러한 결과는 고분말도 실리카 흡을 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성을 평가한 Sabir (1997)의 연구결과와도 어느 정도 유사하게 나타났다.

한편, 콘크리트의 동결융해 사이클별 압축강도를 동결융해 환경에 노출하기 전 콘크리트의 압축강도에 대한 강도비(%)로써 나타낸 것이 Fig. 8이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 OPC, GBS6 및 GBS8 콘크리트는 동결융해 사이클이 증가할수록 강도비가 감소하였으나, GBS4 콘크리트는 100 및 200 사이클에서 오히려 압축강도비가 증가하는 경향을 나타내었으며, 300 사이클 후에도 강도비가 97%로 나타나므로써, 동해작용에 의한 강도감소가 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, GBS8 콘크리트는 동결융해 사이클의 증가에 따라 강도비가 59%로써 4종류 콘크리트 중 가장 작게 나타나므로써, 동해작용에 의한 성능저하가 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

결론적으로, 본 연구의 범위에서 평가해 보면, 콘크리트가 동해 환경에 노출될 경우 분말도가 4000급인 GBS를 적용하는 것이 콘크리트의 내동해성 향상에 유효할 것으로 판단된다.

3.4 염소이온 침투저항성

Fig. 9는 ASTM C 1202 실험법에 준하여 측정된 콘크리트의 총통과전하량을 나타낸 것으로써, 재령 및 GBS 사용유무에 따라 다소 상이한 결과가 나타났다. 특히, OPC 콘크리트는 초기재령에서 4,000 coulomb을 상회하는 높은 총통과전하량 값을 나타낸 반면, GBS4, GBS6 및 GBS8 콘크리트는 약 2000 coulomb 전후의 값을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 경향은 장기재령에서도 유사하게 나타났으며, OPC 콘크리트의 재령 91일 총통과전하량이 Table 4에서 제시된 염소이온 침투성 기준에서 ‘Moderate’ 범위인 반면, GBS를 사용한 콘크리트의 재령 91일 총통과전하량은 ‘Very low’인 것으로 조사되었다.

한편, NT BUILD 492법에 의한 콘크리트의 재령 28일 및 91일 비정상상태(non-steady state) 염소이온 확산계수 값을 나타낸 것이 Fig. 10이다. 이 그림에서 나타났듯이 재령 28일에서 OPC 콘크리트의 염소이온 확산계수가 $2.3 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 로 나타난 반면, GBS를 사용한 콘크리트의 염소이온 확산계수는 OPC 콘크리트의 약 28~33%로 나타나므로써, 3종류 GBS 콘크리트의 염소이온 확산계수는 서로 유사함을 알 수 있다. 이러한 경향은 재령 91일 콘크리트에서도 유사하게 관찰되었다.

따라서, Figs. 9 and 10의 염소이온 침투저항성 실험결과에

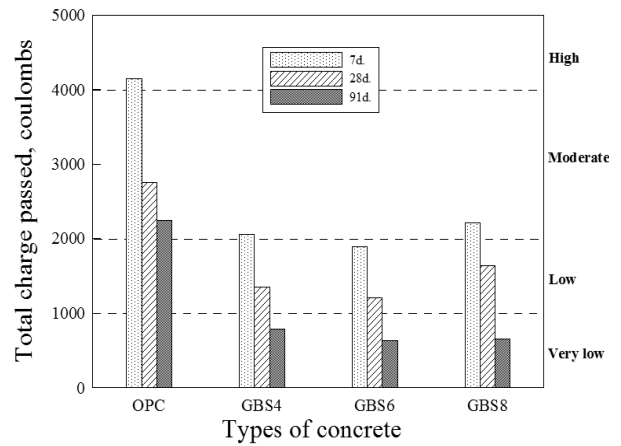


Fig. 9. Total Charge Passed Through Concretes

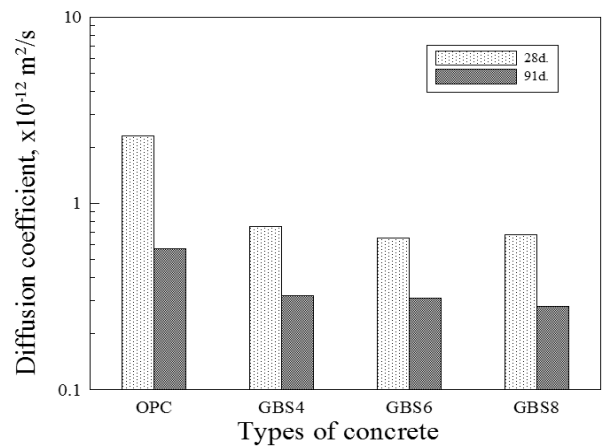


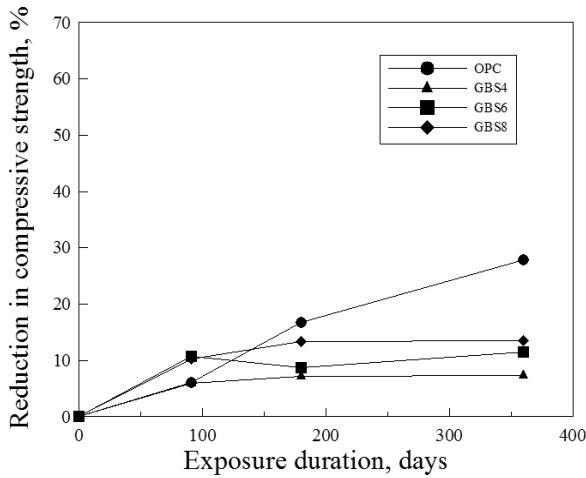
Fig. 10. Diffusion Coefficient of Chloride Ions

의하면, GBS의 분말도 크기는 콘크리트의 총통과전하량 및 염소이온 확산계수에 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

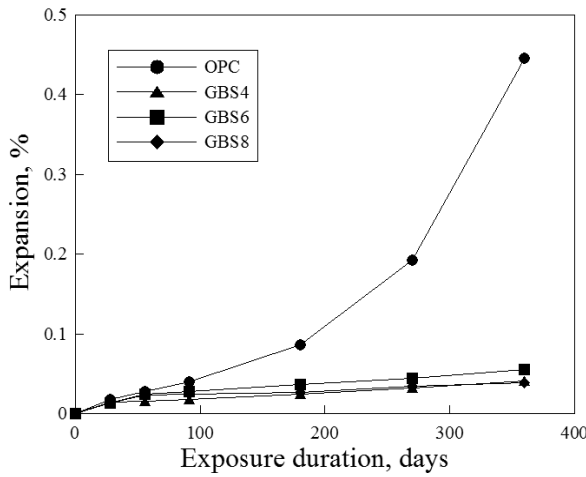
3.5 황산염침식 저항성

GBS 분말도에 따른 모르타르의 황산염침식 저항성을 평가하기 위하여 압축강도 감소율 및 팽창량 측정 결과를 나타낸 것이 각각 Figs. 11 and 12이다.

Fig. 11은 황산나트륨 침식을 받은 4종류 모르타르의 성능저하를 나타낸 것이다. 황산나트륨 용액에 침지한 모르타르의 압축강도 감소율을 Eq. (5)로 계산하여 나타낸 것이 Fig. 11(a)로써, OPC 모르타르의 압축강도 감소율은 침지재령이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며, 침지재령 360일에서 약 29%의 압축강도 감소율을 나타내었다. 한편, GBS를 사용한 모르타르는 분말도에 관계없이 압축강도 감소율이 OPC 모르타르에 비하여 상대적으로 작게 나타났다. 4종류 모르타르의 황산나트륨 침식에 의한 침지



(a)



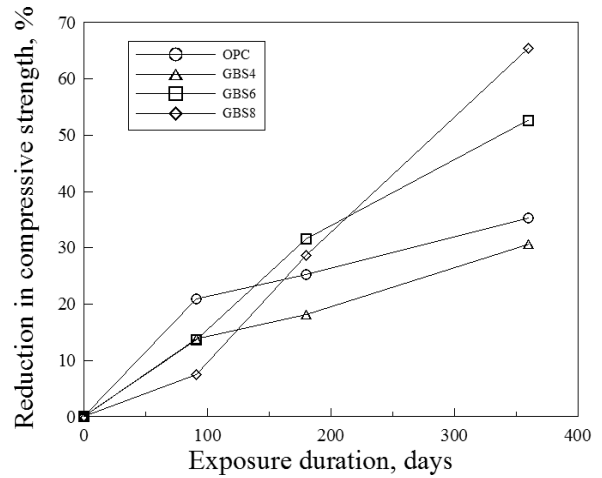
(b)

Fig. 11. Deterioration of Mortars Exposed to Sodium Sulfate Solution. (a) Reduction in Compressive Strength, (b) Expansion

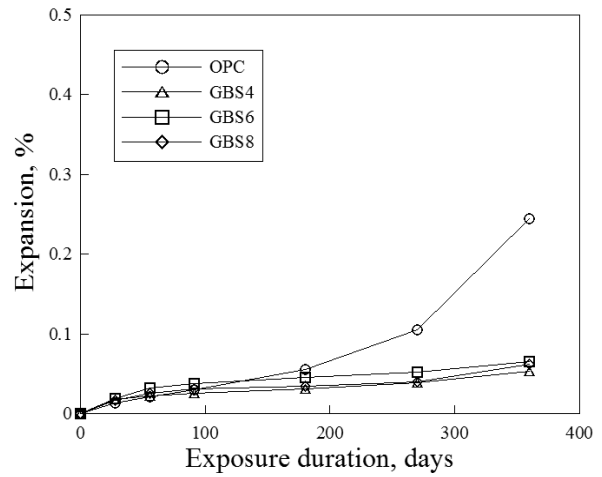
채령별 팽창을 나타낸 것이 Fig. 11(b)로써, OPC 모르타르와 비교하여 GBS 사용 모르타르는 황산나트륨 침식에 대하여 매우 우수한 저항성을 나타냄을 알 수 있다.

이상과 같이 황산나트륨 침식에 대하여 GBS 사용 모르타르의 저항성이 우수하게 나타난 이유는 GBS를 사용하므로써 황산염이 온과 반응하는 C₃A량이 감소하였으며, GBS의 잠재수경성으로 인하여 시멘트 경화체의 조직구조가 치밀해진 탓으로 황산염이 온의 침투가 어려워졌기 때문으로 판단된다(Lawrence, 1992; Rasheeduzzafar et al., 1990).

Fig. 12는 황산마그네슘 침식을 받은 4종류 모르타르의 압축강도 감소율 및 팽창량을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)의 실험결과는 Fig. 11(a)와 비교해서 압축강도 감소를 경향이 다소 다르게 나타남을 알 수 있다. 다시 말해서, 침지재령에 관계없이 GBS4 모르타르는



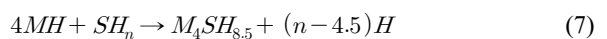
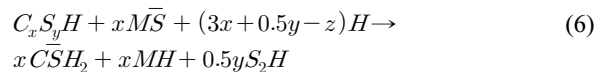
(a)



(b)

Fig. 12. Deterioration of Mortars Exposed to Magnesium Sulfate Solution. (a) Reduction in Compressive Strength, (b) Expansion

OPC 모르타르에 비하여 압축강도 감소율이 다소 작게 나타난 반면, 고미분말 GBS를 사용한 모르타르의 압축강도 감소율은 수화반응 및 잠재수경성 반응으로 생성되는 C-S-H량이 상대적으로 많은 탓으로 인하여 고미분말 GBS를 사용한 모르타르가 MgSO₄ 용액에 침지할 경우, Mg²⁺ 이온과의 반응으로 인하여 저항도의 비시멘트질 물질(non-cementitious materials)인 M-S-H가 다량으로 생성되므로써 모르타르의 강도감소가 상대적으로 큰 결과를 나타내었다(Cohen and Bentur, 1988). M-S-H의 생성 반응식을 Eqs. (6) and (7)과 같이 나타낼 수 있다.



한편, Fig. 12(b)는 황산마그네슘 용액에 침지한 모르타르의 팽창량을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 GBS를 사용한 모르타르의 침지재령 360일에서 팽창량은 0.07%이하의 매우 작은 값이 나타난 반면, OPC 모르타르는 동일재령에서 약 0.22%의 팽창량을 나타내므로써, Fig. 12(a)의 압축강도 감소율 경향과는 다르게 나타났다. 전술하였다시피, 황산마그네슘 환경에서 시멘트 경화체의 압축강도는 M-S-H의 생성과 밀접한 연관이 있는 반면, 황산염침식에 의한 팽창과 밀접한 관련이 있는 반응생성물은 에트린자이트로써, 황산나트륨 환경과는 다르게 황산마그네슘 환경에서는 비팽창성 에트린자이트(non-expansive ettringite)가 생성되었기 때문에 판단된다(AI-Amoudi et al., 1995).

이상과 같이 GBS를 사용한 콘크리트가 황산염환경에 노출될 경우, 황산염침식을 일으키는 반응물질의 생성 메커니즘에 대한 이해가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 분말도가 상이한 3종류 고로슬래그미분말을 사용한 모르타르 및 콘크리트의 강도특성 및 내구성을 실험적으로 고찰한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 콘크리트의 강도특성을 고찰한 결과, GBS8을 사용한 콘크리트의 압축강도 및 쪼갬인장강도는 OPC 콘크리트에 비하여 초기재령에서는 다소 작았으나, 잠재수경성의 촉진으로 인하여 장기재령으로 갈수록 강도발현이 우수하게 나타났다.
- (2) 동결융해 반복작용을 받은 콘크리트의 상대동탄성계수 및 압축강도비를 측정한 결과, 고분말도 고로슬래그미분말(GBS6 및 GBS8) 사용 콘크리트가 동해시 팽창압을 크게 받은 탓으로 인하여 GBS4 콘크리트에 비하여 동결융해 저항성이 떨어지는 것으로 조사되었다.
- (3) 콘크리트의 염소이온 침투저항성 실험결과에 따르면, 고로슬래그미분말 사용 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비하여 상대적으로 우수한 염해저항성을 나타내었으며, 고로슬래그미분말의 분말도는 콘크리트의 염해저항성 향상에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- (4) 황산나트륨 침식환경에 노출된 고로슬래그미분말 사용 모르타르는 분말도에 관계없이 C₃A 회석효과 및 조직구조의 치밀화로 인하여 OPC 모르타르에 비하여 상대적으로 우수한 내구성능을 나타내었으나, 황산마그네슘 침식을 받은 고분말도 고로슬래그미분말 사용 모르타르의 강도감소는 OPC 모르타르에 비하여 크게 나타났다. 따라서, 고로슬래그미분말 사용 콘크리트가 황산염환경에 노출될 경우, 반응물질의 생성 메커니즘에 대한 이해가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 이공분야 기초연구사업의 연구비를 지원받아 연구되었습니다(과제번호 : 2013R1A1A2009938). 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M. and Saadi, M. M. (1995). "Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements." *ACI Mater. J.*, Vol. 92, No. 1, pp. 15-24.
- Allahverdi, A. and Abadi, M. M. B. R. (2014). "Resistance of chemically activated high phosphorous slag content cement against frost-salt attack." *Cold Reg. Sci. Tech.*, Vol. 98, pp. 18-25.
- Aye, T. and Oguchi, C. T. (2011). "Resistance of plain and blended cement mortars exposed to severe sulfate attacks." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 25, No. 6, pp. 2988-2996.
- Babu, K. and Kumar, V. S. R. (2000). "Efficiency of GGBS in concrete." *Cem. Concr. Res.*, Vol. 30, No. 7, pp. 1031-1036.
- Beushausen, H., Alexander, M. and Ballim, Y. (2012). "Early-age properties, strength development and heat of hydration of concrete containing various South African slags at different replacement ratios." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 29, pp. 533-540.
- Cohen, M. and Bentur, A. (1988). "Durability of portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solution." *ACI Mater. J.*, Vol. 85, No. 3, pp. 148-157.
- Deja, J. (2003). "Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes." *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 25, No. 3, pp. 357-361.
- Geng, H. and Li, Q. (2014). "Development of microstructure and chemical composition of hydration products of slag activated by ordinary Portland cement." *Mater. Charact.*, Vol. 87, pp. 149-158.
- Hadj-sadok, A., Kenai, S., Courard, L. and Darimont, A. (2011). "Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 25, No. 2, pp. 1018-1025.
- Higgins, D. D. (1995). "Ground granulated blast furnace slag." *World Cem.*, Vol. 6, pp. 51-52.
- Hooton, R. D. (2000). "Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete." *Can. J. of Civ. Eng.*, Vol. 27, No. 4, pp. 754-760.
- Kim, G. W., Kim, B. J., Yang, K. H. and Song, J. K. (2012). "Strength development of blended sodium alkali-activated ground granulated blast-furnace slag (GGBS) mortar." *J. of Kor. Concr. Instit.*, Vol. 24, No. 2, pp. 137-145 (in Korean).
- Lawrence, C. D. (1992). "The influence of binder type on sulfate resistance." *Cem. Concr. Res.*, Vol. 22, No. 6, pp. 1047-1058.
- Lee, S. H., Kim, W. K. and Kang, S. H. (2012). "Hydration mechanism of ground granulated blast furnace slag." *J. of Kor. Concr.*

- Instit.*, Vol. 24, No. 6, pp. 31-34 (in Korean).
- Lee, S. S., Won, C., Kim, D. S. and Park, S. J. (2000). "A study on the engineering properties of concrete using blast-furnace slag powder." *J. of Kor. Concr. Instit.*, Vol. 12, No. 4, pp. 49-58 (in Korean).
- Lubeck, A., Gastaldini, A. L. G., Barin, D. S. and Siqueira, H. C. (2012). "Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag." *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 34, No. 3, pp. 392-399.
- Moon, H. Y. and Lee, S. T. (2003). "Influence of silicate ratio and additives on the sulphate resistance of portland cement." *Adv. Cem. Res.*, Vol. 15, No. 3, pp. 91-101.
- Neto, A. A. M., Cincotto, M. A. and Repette, W. (2010). "Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum." *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 32, No. 4, pp. 312-318.
- Oner, A. and Akyuz, S. (2007). "An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete." *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 29, No. 6, pp. 505-514.
- Oner, M., Erdogdu, K. and Gunlu, A. (2003). "Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement." *Cem. Concr. Res.*, Vol. 33, No. 4, pp. 463-469.
- Ortega, J. M., Sanchez, I. and Climent, M. A. (2012). "Durability related transport properties of OPC and slag cement mortars hardened under different environmental conditions." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 27, No. 1, pp. 176-183.
- Osborne, G. J. (1999). "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete." *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 21, No. 1, pp. 11-21.
- Ramlochan, T., Thomas, M. D. A. and Hooton, R. D. (2004). "The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature: Part II: Microstructural and Microchemical Investigations." *Cem. Concr. Res.*, Vol. 34, No. 8, pp. 1341-1356.
- Rasheeduzzafar, Dakhil, F. H., Al-Gahtani, A. S., Al-Saadoun, S. S. and Mather, A. B. (1990). "Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements." *ACI Mater. J.*, Vol. 80, No. 2, pp. 114-122.
- Sabir, B. B. (1997). "Mechanical properties and frost resistance of silica fume concrete." *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 19, No. 4, pp. 285-294.
- Sisomphon, K., Copuroglu, O. and Fraaij, A. L. A. (2010). "Development of blast furnace slag mixtures against frost salt attack." *Cem. and Concr. Compos.*, Vol. 32, No. 8, pp. 630-638.
- Teng, S., Yang, T., Lim, D. and Divsholi, B. S. (2013). "Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine ground granulated blast-furnace slag." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 40, pp. 875-881.
- Wang, Z., Zeng, Q., Wang, L., Yao, Y. and Li, K. (2014). "Corrosion of rebar in concrete under cyclic freeze-thaw and Chloride salt action." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 53, pp. 40-47.