

저분말도 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 굳지 않은 상태의 특성 및 수축 특성

Properties of Fresh State and Characteristics of Shrinkage in Concrete Containing Low Fineness GGBFS

김태훈¹ · 윤용식² · 권성준^{3*}

Tae-Hoon Kim¹ · Yong-Sik Yoon² · Seung-Jun Kwon^{3*}

(Received August 28, 2019 / Revised September 30, 2019 / Accepted October 1, 2019)

GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag) is one of the most actively used mineral admixtures with excellent long-aged strength and chloride diffusion resistance. Unlike Standard covering GGBFS in Japan and the U.K., the domestic standard for GGBFS does not contain low fineness of GGBFS under 4000 grade. In this paper, several basic tests are carried out for the concrete with 3,000 grade GGBFS concrete and ternary blended concrete for reducing hydration heat by mixing 4,000 grade GGBFS and fly ash, such as fresh concrete properties, compressive strength, and shrinkage properties. The air content and slump between the ternary blended concrete and the concrete with low-fineness GGBFS showed the similar level, and the results of difference in setting time from them were less than 20 minutes, showing no significant difference. In the evaluation of compressive strength and shrinkage characteristics, the ternary blended concrete showed lower long-aged strength and higher shrinkage than the low-fineness GGBFS concrete.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 저분말도, 굳지 않은 콘크리트, 수축 거동

Keywords : GGBFS, Low fineness, Fresh concrete, Shrinkage properties

1. 서론

콘크리트는 공학적으로 뛰어난 내구성 및 역학적 성능을 나타낼 뿐 아니라 체계화된 생산 및 운송 시스템으로 인해 전 세계적으로 매해 55억 톤 이상 사용되는 건설재료이다(Mehta and Monteiro, 2009). 경화된 콘크리트는 높은 압축 강도를 가지고 있지만 상대적으로 약한 인장 강도를 보완하기 위해서 강재와 결합하여 RC(Reinforced Concrete), PSC(Pre-stressed Concrete) 구조물의 형태로서 다양한 환경에 활발히 사용되고 있다(Song et al. 2006). 하지만 균열에 취약한 특성으로 인해 사용 기간이 증가할수록 균열과 내구성 문제가 발생할 수 있다. 균열부와 같은 취약 부로의 열화 인자의 유입은 내부 보강재의 부식을 가속화시키고

최종적으로 구조적 문제를 야기하기 때문에 이러한 현상을 제어하고자 재료, 설계, 시공 분야에서 다양한 연구가 진행되어왔다(Song et al. 2005; Kim et al. 1998; Broomfield 1997).

콘크리트의 재료거동에 따른 균열의 원인으로는 수화열 및 건조수축을 대표적으로 들 수 있는데, 이러한 균열은 초기재령 콘크리트의 성능을 크게 저하시킨다(ISO 14040 2006). 현재 OPC 사용에 의해 발생하는 이러한 문제점을 보완하기 위해 산업 부산물인 고로슬래그(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag), 플라이애시(FA: Fly Ash), 실리카 폼(SF: Silica Fume)을 결합재로서 사용하는 연구가 꾸준히 이루어지고 있다(Baek et al. 2015; Kim et al. 2011; Bae et al. 2010).

고로슬래그 미분말은 선철을 생산하는 제철 산업에서 나오는

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr

¹한남대학교 토목환경공학과 석사과정 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

²한남대학교 토목환경공학과 박사과정 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

³한남대학교 토목환경공학과 부교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

산업 부산물을 분말화하여 생산되는 포졸란계 혼화재이다(Kim et al. 2012). 이렇게 생산된 고로슬래그 미분말은 콘크리트에 사용되어 우수한 염해 저항성, 수화열 저감, 장기 강도 개선, 알칼리 골재 반응 억제, 유동성 향상 등 OPC만을 결합재로 사용한 콘크리트 대비 여러 공학적 성능을 발휘한다(Lee et al. 2000; Kim et al. 2000; Song et al. 2003). 비록 상대적으로 낮은 초기강도 발현, 탄산화 취약성을 비롯하여 양생 온도 및 기간에 역학적, 내구적 성능이 크게 좌우되므로 이에 대한 고려가 필요하다는 단점이 존재하나, 다양한 품질 개선과 연구를 통하여 상기 단점들을 극복하고 있다. 현재 우리나라는 4,000~10,000cm²/g의 분말도 범위 내에서 총 3 종의 고로슬래그 미분말 규격을 만들어 사용하고 있다(KS F 2563 2009). 그러나 3 종의 고로슬래그 미분말이 모두 4,000급 이상의 분말도를 가지고 있어 저분말도 고로슬래그 미분말 규격을 가지고 있는 국외의 규격보다 다양성이 떨어진다. 뿐만 아니라 높은 분말도로 인하여 수화열 제어가 힘들며, 수축량 증가로 콘크리트 물리적, 화학적 열화를 촉진시키는 균열을 발생시킬 수 있는 단점을 가지고 있다(Kim et al. 2009). 저분말도 고로슬래그 미분말에 대한 규격과 활용은 국외 중 영국과 일본 등에서 찾을 수 있는데, 영국에서는 BS 6699에 따라 2,750cm²/g 이상 고로슬래그 미분말을 사용하고 있으며(BS 6699 1992), 일본의 경우 2013 년도에 총 3가지였던 규격에 2,750~3,500cm²/g의 분말도를 가지고 있는 3,000급 고로슬래그 미분말을 추가하여 저분말도에서 고분말도까지 총 4가지의 다양한 고로슬래그 미분말을 활용 중이다(JIS A 6206 2013). 이렇게 규격화된 저분말도 고로슬래그 미분말은 주로 위에서 언급된 고로슬래그 미분말의 일반적인 장점 중 고분말도 고로슬래그 미분말로 억제하기 어려운 수화열 저감과 건조 수축 감소에 효과적이다(Jeun and Hwang 2018; Song et al. 2000).

본 연구에서는 고분말도 고로슬래그 미분말보다 수화열 억제에 효과적이고 수축이 적다고 알려진 저분말도 고로슬래그 미분말을 혼합한 콘크리트를 일반적인 수화열 저감용 삼성분계 콘크리트와 비교 평가하고자 한다. 기초적 연구로서 압축 강도, 굳지 않은 콘크리트의 물성, 자기 및 건조 수축 특성 면에서 상대적인 성능을 분석하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 사용재료 및 배합

본 연구에서는 170kg/m³의 동일한 단위수량과 50%의 물-결합

재 비를 적용한 2가지 배합을 설계하였다. OS 3,000 배합은 혼화재로 3,000급 고로슬래그 미분말을 60% 치환 적용하여 사용하였으며, OSF 4,000 배합에서는 4,000급 고로슬래그 미분말을 40% 치환 및 플라이애시를 20% 치환하였다. 실험에 사용된 OPC, 고로슬래그 미분말, 무수 석고, 플라이애시 물성은 Table 1에 나타내며, 배합표를 Table 2에, Table 3에서는 설계 압축 강도와 목표하는 슬럼프 및 공기량을 나타낸다.

Table 1. Chemical composition of OPC and GGBFS

Case	Chemical composition(%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	etc	Density (g/cm ³)	Blaine (m ² /kg)
OPC	20.8	4.93	3.5	62.4	1.61	2.21	1.83	3.18	327
4,000 GGBFS	34.0	16.4	0.5	37.2	6.29	2.71	2.02	2.89	433
3,000 GGBFS	32.1	12.97	0.38	43.27	5.5	3.8	1.98	2.88	305
Anhydrous gypsum	1.43	1.14	0.35	39.03	0.75	53.15	4.15	2.31	381
FA	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3	2.19	362

Table 2. Mix proportions of GGBFS concretes

Case	W/B	S/a	Unit weight : kg/m ³							
			W	C	GGBFS Grade(cm ² /g)		FA	G	S	A.D (%)
					3,000	4,000				
OS 3,000	50	46	170	136	204	-	-	800	990	0.5
OSF 4,000	50	47	170	136	-	136	68	789	977	0.4

OS : OPC and Slag, OSF : OPC and Slag and Fly Ash, W/B : Water to Binder, S/a : Sand to aggregate, W : Water, C : Cement, GGBFS : Ground Granulated Blast Furnace Slag, FA : Fly Ash, G : Gravel, S : Sand, A.D : Anhydrous gypsum

Table 3. Target properties of GGBFS concretes

Case	Compressive strength	Slump	Air contents
Target	24MPa	150±2.5mm	4.5±0.5%

2.2 저분말도 고로슬래그 미분말에 대한 국내 및 국외 규격

본 연구에서는 분말도가 다른 2가지의 고로슬래그 미분말을 사

용하는데 고분말도 4,000급 고로슬래그 미분말은 KS F 2563에서 제시하는 3종 고로슬래그에 해당한다. 저분말도 고로슬래그 미분말은 영국과 일본 등 국외에서 상용되고 있다. 본 연구는 일본의 JIS A 6206의 3,000급 고로슬래그 미분말에 근접하는 품질에 해당되는 고로슬래그 미분말을 사용하였다. Table 4에서는 일본과 영국, 우리나라의 고로슬래그 미분말 규정 중 가장 낮은 분말도에 해당하는 내용을 나타내었다.

Table 4. Low fineness GGBFS of international standards

Article	JIS A 6206 (3,000-fineness GGBFS)	KS F 2563 (Class 3)	BS 6699
Density(g/cm ³)	2.80 over	2.80 over	-
Blaine(cm ² /g)	2,750~3,500	4,000~6,000	2,750 over
Activity (%)	7days	55 over	-
	28days	60 over	-
	91days	80 over	-
Flow ratio(%)	95 over	95 over	-
MgO(%)	10 below	10 below	14 below
SO ₃ (%)	4 below	4 below	2.5 below
Ignition loss(%)	3 below	3 below	3 below
Chloride ion(%)	0.02 below	0.02 below	0.1 below

2.3 굳지 않은 콘크리트의 특성 및 수축 특성 평가 방법

2.3.1 공기량 및 슬럼프 평가 방법

공기량 측정은 KS F 2421에 준하여 주수법으로 측정하였다. 굳지 않은 콘크리트를 용기에 3층으로 나누어 다져 넣은 다음 고무 망치를 이용하여 내부 공기를 배출시켰다. 그 후, 상부 실험기를 설치한 후 공기실 내 압력을 초압력에 위치시킨 다음 5초 후에 주 밸브를 개방하여 압력계를 두들겨 압력이 초압력에 위치하도록 하여 공기량을 측정하였다. Fig. 1은 굳지 않은 콘크리트 물성 중 슬럼프와 공기량 평가 전경을 나타내었다.

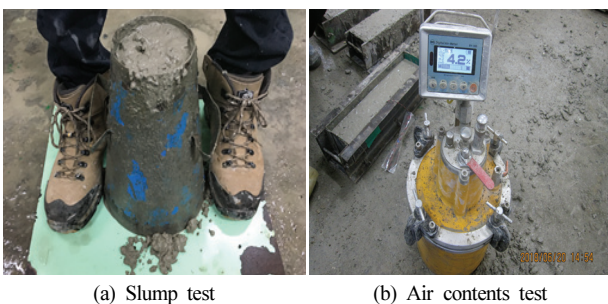


Fig. 1. Fresh concrete properties investigation in test

2.3.2 응결 시간 측정 방법

응결 시간 측정은 KS F 2436에 준하여 측정하였다. 온도 (20~25°C)의 조건에서 25mm까지 관입하여 소요된 힘의 크기 및 물과 시멘트의 결합 경과 시간을 기록하여 초결 및 종결 시간을 측정하였다. 1회 관입은 모르타르를 배합한 후 3~4시간이 지난 후에, 차후의 관입은 30~60분의 간격으로 실행하였으며, 관입 횟수는 측정값이 28MPa 이상이 될 때 까지 수행하였다. 초결 시간의 측정은 관입 저항이 3.5MPa에 도달한 순간으로, 종결 시간의 측정은 관입 저항이 28MPa에 도달하는 시간으로 결정하였다. Fig. 2는 OS 3,000 배합과 OSF 4,000 배합의 초결 및 종결 시간 평가 전경을 나타낸다.



Fig. 2. Setting time investigation in test

2.3.3 압축 강도 실험 방법

압축 강도 측정은 두 가지 배합으로 만들어진 콘크리트를 KS F 2405에 준하여 측정하였다. 사용되는 Ø100×200mm의 공시체는 수중양생 하였으며 재령 3일, 7일, 28일, 91일에 대하여 각 배합별 압축 강도 거동을 평가하였다. Fig. 3은 강도 측정을 위해 만들어진 공시체를 나타낸다.



Fig. 3. Photo for specimen for this study

2.3.4 수축 특성 측정 방법

수축 특성은 KS F 2424에 준하여 건조 및 자기 수축을 평가하였다. 대상 시편은 제작 시 100×100×400mm의 철제 몰드에 매립형 게이지를 중심축 선상에 일치하게 위치 후 타설하였다. 또한 자기 수축 실험체의 경우 몰드 상단에 아크릴비닐을 덮어 공기 노출면에서의 수분 증발을 최소화하였다. 게이지가 매립된 시편을 항온항습 챔버(20±1℃, 60±5%)에서 60일간 존치시키면서 주기적으로 수축량을 측정하였다. Fig. 4는 자기 및 건조 수축 시편 제작 전경을 나타낸다.



Fig. 4. Photos of pouring concrete for autogenous and drying shrinkage test

3. 실험 결과 및 분석

3.1 공기량 및 슬럼프 평가 결과

Table 5에서는 OS 3,000 배합과 OSF 4,000 배합의 슬럼프와 공기량 평가 결과를 나타내었다. OS 3,000 배합과 OSF 4,000 배합의 슬럼프 및 공기량은 목표한 150±25mm와 4.5±0.5%에 대하여 모든 배합에서 목표 슬럼프와 공기량을 만족하는 160mm와 3.7%를 나타내었다. 이를 통하여 치환 혼입 하였을 때 입상 성질에 의하여 워커빌리티가 증가하지만 공기량이 저감되는 고로슬래그 미분말의 특징을 알 수 있었다. 또한 위의 슬럼프 및 공기량 값을 보아 OS 3,000 배합의 유동성은 OSF 4,000 배합과 차이가 없다고 사료된다. 현재 제시된 배합에서는 불밀을 사용하였으나,

Table 5. Result of slump and air content

Case	Slump(mm)	Air(%)
OS 3,000	160	3.7
OSF 4,000	160	3.7

대량생산이 사용되는 롤러밀을 사용할 경우, 입도가 더욱 조악할 수 있으며 분산성이 없어지므로 생산되는 밀링작업을 고려한 배합이 중요하다.

3.2 초결 및 종결 시간 평가 결과

Fig. 5는 두 배합의 응결시간 평가 결과를 나타내었다. OS 3,000 배합과 OSF 4,000 배합의 초결 시간을 보면 990분과 1000분이 측정되어 OS 3,000 배합이 OSF 4,000 배합보다 10분 정도 빠른 초결 시간을 나타내었다. 반면에 종결 시간은 OS 3,000 배합이 1480분 그리고 OSF 4,000 배합이 1460분으로 측정되어 초결 시간과 다르게 OSF 4,000 배합이 OS 3,000 배합보다 20분 정도 빠른 종결 시간을 보였다. 일반적으로 근소한 차이의 주된 원인은 저분말도 고로슬래그 미분말이 혼입된 OS 3,000 배합에 OSF 4,000 배합보다 많은 석고를 혼입하여 강도 발현이 빠른 점, 그리고 OSF 4,000 배합에서 강도 발현이 빠르지만 플라이애시가 혼입되어 강도 증진이 늦어진 점이 동시에 고려된 결과인 것으로 판단된다. 전반적으로 OSF 4,000배합에서 약간 종결시간이 단축됨을 알 수 있으며 이는 강도 발현과 일치하는 경향을 보인다.

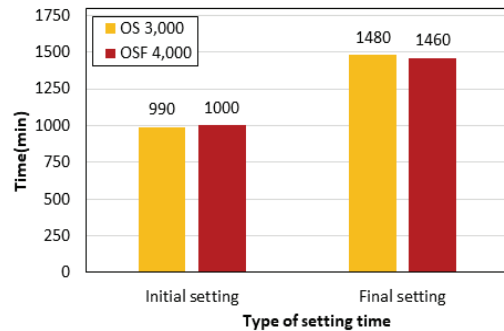


Fig. 5. Setting time with 2 different mix conditions

3.3 압축 강도 특성

배합 계획에 의해 만들어진 OSF 4,000 배합과 OS 3,000배합의 압축 강도의 결과는 Fig. 6에 나타나있다. 재령 3일차에서 OS 3,000 배합은 5.4MPa 그리고 OSF 4,000 배합은 4.8MPa의 초기 강도를 보였다. 하지만 재령 7일에서는 OS 3,000은 14.2MPa 그리고 OSF 4,000은 14.08% 높은 16.2MPa를 나타낸다. 그 이후 재령 28일에서는 OS 3,000은 24MPa, OSF 4,000은 1.67% 높은 24.4MPa를 나타내며 목표하였던 설계 압축 강도 24MPa를 만족하였다. 재령 91일에서는 OS 3,000은 25.5MPa, OSF 26.2MPa를

나타냈고, OSF 4,000은 2.75% 높은 26.2MPa를 나타낸다. 전반적으로 OS 3,000과 OSF 4,000의 압축강도는 최대 2MPa 내외의 근소한 차이를 보여 비슷한 강도 성능을 보였다.

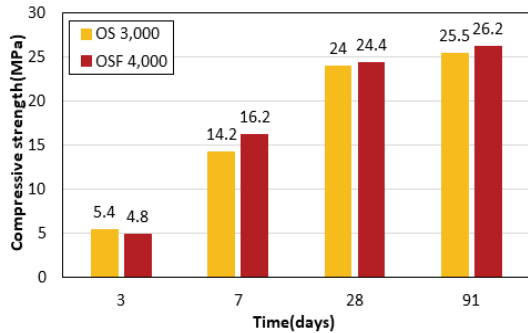


Fig. 6. Compressive strength with 2 different mix conditions

3.4 자기 및 건조 수축 특성

Fig. 7에는 두 배합의 자기 및 건조 수축량 결과를 나타내었다. 자기 수축량 측정 결과 4,000급 고로슬래그 미분말을 40% 및 플라이애시를 20% 치환한 OSF 4,000 배합에서 101,12 μ m의 상대적으로 높은 값이 나타났다. 이는 저분말도의 3,000급 고로슬래그 미분말을 치환한 OS 3,000 배합의 평균 자기 수축량인 50,71 μ m과 비교하면 차이가 50,31 μ m이며, 대략 2 배의 자기 수축이 발생하였음을 알 수 있어 OS 3,000 배합보다 OSF 4,000 배합에서 자기 수축에 취약하다고 판단된다.

건조 수축의 경우, OSF 4,000 배합에서는 362,32 μ m 그리고 OS 3,000 배합에서는 278,48 μ m의 평균 건조 수축량을 나타내었으며, 그 차이는 83,84 μ m으로 대략 OSF 4,000 배합에서 OS 3,000 배합 대비 1.3 배로 더 큰 건조 수축량을 보였다. 이러한 차이는 잠재 수경성에 의하여 장기 재령에서 수축량이 증가한다는 고로슬래그 미분말의 특성과 초기에 반응하는 OPC함량의 동일함이 영향을 끼쳤다고 사료된다. 뿐만 아니라, 3,000급 고로슬래그 미분말보다 고분말도의 4,000급 고로슬래그 미분말 및 플라이애시의 혼입으로 건조 및 수화 과정에서 보다 수밀성이 높은 조직으로 형성됨에 따라 발현되는 모세관 장력에 의한 영향으로 사료된다(Kwon et al. 2016). 결과적으로 국내 규격의 범위 내에서 주로 수화열 저감을 위하여 배합된 OSF 4,000 배합은 저분말도 고로슬래그 미분말을 혼입한 OS 3,000 배합보다 수축에 취약함을 보였다.

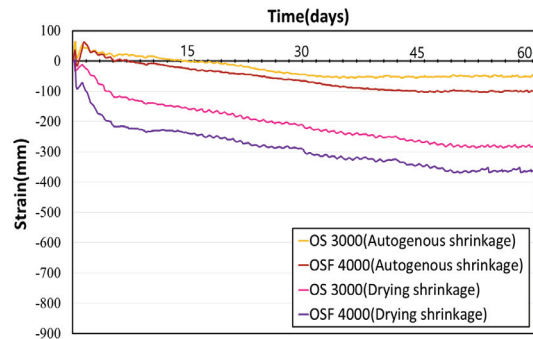


Fig. 7. shrinkage with 2 different mix conditions

4. 결론

본 연구에서는 50%의 물-결합재 비를 바탕으로 3,000급 고로슬래그 미분말을 60% 치환한 OS 3,000 배합과 4,000급 고로슬래그 미분말을 40% 치환 및 플라이애시를 20% 치환한 OSF 4,000 배합의 굳지 않은 상태에서의 특성과 수축 특성을 서로 비교하여 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 아래와 같다.

1. 슬럼프 측정 결과 OS 3,000 배합과 OSF 4,000 배합은 동일한 160mm를 나타내었으며, 목표하였던 150 \pm 25mm를 충분히 만족하였다. 공기량의 경우 측정 결과 OS 3,000 배합과 OSF 4,000 배합은 약간 감소를 보이며, 3.7%를 나타내었다.
2. OS 3,000 배합과 OSF 4,000 배합의 응결시간의 경우 초결에서는 OS 3,000 배합이 OSF 4,000 배합에 비하여 10분 정도 빠르고 종결에서는 20분 정도 느렸지만 전반적으로 비슷한 경향을 보였다. 이러한 근소한 응결시간 차이는 동일한 단위수량, 플라이애시의 지연 효과, 4000급 고로슬래그 미분말의 조강 효과 등이 동시에 작용하여 나타난 것으로 판단된다.
3. OS 3,000과 OSF 4,000의 압축 강도는 24MPa과 24.4MPa으로 설계 압축 강도 24MPa을 만족하였다. 이 후 재령 91일에서 OS 3,000은 25.5MPa, OSF 4,000은 26.2MPa이 발현되며 재령 28일 이전에 강도 발현의 80%가 이루어지는 콘크리트의 특성을 고려하면 OS 3,000과 OSF 4,000의 강도 발현은 차이가 크지 않다고 판단된다.
4. 자기 수축량 측정 결과 OSF 4,000 배합은 OS 3,000 배합보다 50,31 μ m 차이로 거의 2배 많은 자기 수축량을 나타내었다. 또한 건조 수축량 측정에서는 OS 3,000 배합보다 83,84 μ m 차이로 거의 1.3배 많은 건조수축량을 보이며, 취약한 수축

특성을 보였다. 굳지 않은 콘크리트의 물성에서는 OS 3,000 배합과 OSF 4,000 배합은 거의 비슷한 결과를 나타내었으나, 수축 특성에서는 OS 3,000 배합이 OSF 4,000 배합보다 우수한 수축 거동을 나타내었다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

2018년 포스코(포항산업과학연구원)의 지원에 의해 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

References

- Bae, S.H., Park, J.I., Lee, K.M. (2010). Influence of mineral admixtures on the resistance to sulfuric acid and sulfate attack in concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **22(2)**, 219–228 [in Korean].
- Baek, C.W., Kim, H.S., Choi, S.W., Jo, H.T., Ryu, D.H. (2015). Durability assessment of high strength concrete with high volume mineral admixture, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **27(6)**, 641–649 [in Korean].
- Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1–15.
- BS 6699 (1992). *Specification for Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use with Portland Cement*, British Standard.
- ISO 14040 (2006). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principle and Framework*, The International Organization for Standardization.
- Jeun, J.Y., Hwang, I.H. (2018). “A study on the concrete properties of slag cement mixed with low blaine blast furnace slag,” Korea Concrete Institute Academic Conference, Korea Concrete Institute, Pyeongchang, Korea, **30(2)**, 553–554 [in Korean].
- JIS A 6206 (2013). *Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Concrete*, Japanese Standards Association.
- Kim, H.S., Kim, H.J., You, C.D., Hwang, H.J., Jeun, J.Y., Ryu, D.H. (2009). “A study on the low heat-blended cement using blast furnace slag with low blaine value,” Korea Concrete Institute Academic Conference, Korea Concrete Institute, Yongin, Korea, 107–107 [in Korean].
- Kim, J.K., Lee, S.S., Yang, J.K., Shin, B.C. (1998). Curvature and deflection of reinforced concrete beams due to shrinkage, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **10(6)**, 261–268 [in Korean].
- Kim, M.H., Kwon, Y.J., Kang, S.P., Park, S.G. (2000). Experimental study on frost resistance of high-strength concrete using granulated blast-furnace slag, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **12(4)**, 41–48 [in Korean].
- Kim, S.K., Hong, S.H., Hur, I., Yun, K.K. (2011). Characteristics of alkali silica reaction according to types and substitution ratios of mineral admixtures in Korea, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **23(1)**, 49–55 [in Korean].
- Kim, W.K. (2012). Current states and prospect of utilization of blast furnace slag, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **56(8)**, 14–17 [in Korean].
- KS F 2563 (2009). *Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete*, Korea Standard Association.
- Kwon, S.H., Kim, J.K. (2016). Understanding of drying shrinkage and autogeneous shrinkage in concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **28(6)**, 22–26.
- Lee, S.S., Won, C., Kim, D.S., Park, S.J. (2000). A study on the engineering properties of concrete using blast-furnace slag powder, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **12(4)**, 49–58 [in Korean].
- Mehta, P.K., Monterio, P.M. (2009). *Concrete: Structure, Properties and Materials*, 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, 1–7.
- Song, H.W., Kwon, S.J., Lee, S.W., Byun, K.J. (2003). A study on resistance of chloride ion penetration in ground granulated blast-furnace slag concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **15(3)**, 400–408 [in Korean].
- Song, H.W., Kwon, S.J., Byun, K.J., Park, C.K. (2005). A study on analytical technique of chloride diffusion considering characteristics of mixture design for high performance concrete using mineral admixture, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **25(1A)**, 213–223 [in Korean].
- Song, H.W., Pack, S.W., Lee, C.H., Kwon, S.J. (2006). Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, *Journal of Restoration of Building and Monuments*, **12(4)**, 265–284 [in Korean].
- Song, J.T., Kim, J.Y., Choi, H.K., Byun, S.H. (2000). Properties of blended cement using ground blast-furnace slag with low blaine value, *Journal of the Korea Ceramic Society*, **37(1)**, 70–76 [in Korean].

저분말도 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 굳지 않은 상태의 특성 및 수축 특성

고로슬래그 미분말은 뛰어난 장기 강도와 염해 저항성 등을 바탕으로 활발히 사용되는 혼화재들 중 하나이다. 국내 규격(KS F 2563)은 저분말도 GGBFS를 가지고 있는 일본 및 영국의 규격과는 다르게 3종의 GGBFS가 모두 고분말도에 포함된다. 본 연구에서는 4,000급 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 혼입한 수화열 저감용 삼성분계 배합과 3,000급 GGBFS를 혼입한 배합의 굳지 않은 콘크리트 특성, 압축 강도, 수축 특성을 분석하였다. 수화열 저감용 삼성분계 배합과 저분말도 고로슬래그 미분말을 혼입한 배합 간에 공기량과 슬럼프는 동일한 값을 나타내었으며 초결 및 종결 시간의 경우 20분 내외의 결과를 나타내어 큰 차이가 나타나지 않았다. 압축 강도와 수축 특성 분석에서 삼성분계 배합은 저분말도 GGBFS를 혼입한 배합보다 더 낮은 장기 강도와 높은 수축량을 나타내었다.