

# 조강슬래그시멘트를 이용한 콘크리트의 기초물성에 관한 연구

A fundamental Study on the properties of Concrete  
by using the Rapid Hardening Blast Furnace Slag Cement

김진춘\*, 최광일\*\*  
Kim, Jin-chun Choi, Kwang-il

## Abstracts

Blast-furnace slag cement has been used widely as a structural material due to the latent hydraulicity of granulated ground blast furnace slag(GGBS) for a long time as the wall as ordinary portland cement.

In this study, based on the fundamental investigation on the high strength and high durable concrete using the high fineness GGBS the following remarks can be made.

- 1) The average desired strength of concrete is  $\sigma_r = 600 \sim 800 \text{kg/cm}^2$ .
- 2) The above high strength concrete using the high fineness GGBS is more workable than those using only OPC.
- 3) The adiabatic temperature and drying shrinkage decrease, so the density and resistance to sea water attack increase as results.
- 4) The unit cement content and unit air entrained admixture at the same desired strength of concrete decrease, so the economical high strength concrete can be manufactured from using the high fineness GGBS.

## 1. 서론

고로슬래그는 鐵鐵 과정에서 발생하는 산업부산물의 일종으로 우리나라에서도 연간 600만톤 정도가 생산되는 대단위 산업부산물로서 그 폐기물의 자원화 및 환경영향 측면에서 활용여부가 큰 관심거리가 되고 있다. 선철의 원료는 철광석, 석회석 및 코크스로 한정되어 있기 때문에 고로슬래그의 화학성분등 품질의 편차가 적으며 고로슬래그는 냉각방법에 따라서 서냉슬래그(결정질) 및 급냉슬래그(水碎슬래그, 비정질)로 나뉜다. 한편, 종래의 수쇄슬래그의

비표면적은  $3000 \sim 4000 \text{cm}^2/\text{g}$ (Blaine法), 평균입경  $12 \mu\text{m}$  정도 였지만 최근 분쇄기기의 성능이 개량되면서 비표면적  $4000 \sim 8000 \text{cm}^2/\text{g}$ , 경우에 따라서는  $10000 \text{cm}^2/\text{g}$  이상, 평균입경  $4 \mu\text{m}$  정도까지 분쇄가 가능해졌다. 따라서, 본 연구에서는 슬래그시멘트 이용시 콘크리트의 결점인 초기강도와 강도발현율을 개선시키기 위해서 활성도가 뛰어난 고로슬래그 고분말을 主材로한 조강슬래그시멘트를 개발하여 이 시멘트를 이용함으로써 경제적이고 시공성이 뛰어난 고강도·고내구성 콘크리트를 개발하였다.

\* 쌍용양회 중앙연구소 콘크리트연구실 선임  
\*\* 쌍용양회 중앙연구소 콘크리트연구실 실장

## 2. 슬래그高粉末 및 早強슬래그시멘트 특성

## 2.1 슬래그 고분말

본 연구에 사용된 슬래그는 광양제철소에서 생산되는 수쇄슬래그로 슬래그 미분말 3수준을 생산하기 위해서 당소의 실험용 소형 roller mill(UBE LM3.6)을 이용하였으며 Blaine은 각각 4000, 6000 및 8000cm<sup>2</sup>/g 수준으로 분쇄하였다.

### 2.1.1 화학성분 및 염기도

광양제철소産 수쇄슬래그의 화학성분 및 염기도는 다음과 같았다.

표-1. 화학성분 및 염기도 (단위 ; %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	염기도
34.8	14.6	1.2	41.8	6.6	1.8

$$\text{염기도} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$$

$$= 1.8 \text{ (규격 ; } > 1.4 \text{)}$$

### 2.1.2 입도분포

표-2. 분말도 수준별 입도분포

	입도분포 (μm)								MS
	1	2	4	8	16	32	48	64	
4000	5.3	9.0	14.2	30.6	53.0	82.1	97.4	96.7	14.6
6000	7.5	12.3	20.2	46.6	75.5	97.5	97.8	98.5	8.5
8000	11.3	18.8	32.7	72.9	98.2	98.7	98.9	99.2	5.1

### 2.1.3 활성화지수(SAI) 및 Flow比

표-3. 분말도 수준별 활성화 지수

	활성도지수 (%)			Flow比 mm(%)
	7일	28일	91일	
기준모르타	263	357	507	266
4000	153(58.2)	347(97.2)	505(99.9)	274(103.0)
6000	162(61.6)	452(126.6)	576(113.6)	263(98.9)
8000	268(101.9)	489(137.0)	580(114.4)	255(95.9)
규격	55% 이상	75% 이상	95% 이상	95% 이상

\*. 기준모르타르에는 동해OPC 사용

<표-3>으로부터 수화확성도가 큰 6000 및 8000級 슬래그 고분말을 본 연구의 고강도콘크리트용 混和材料로 사용하기로 하였다.

## 2.2 조강슬래그시멘트

본 연구에 사용된 부강슬래그시멘트는 고분말도 슬래그를 主材로 하여 만들었고 분말도 수준에 따라서 Type I, II로 나누었으며 일반적으로 많이 사용되고 있는 보통시멘트, 조강시멘트 및 슬래그시멘트와 비교한 결과는 다음과 같다.

### 2.2.1 입도분포

표-4. 시멘트 종류별 입도분포 비교

	입도분포 (μm)								MS
	1	2	4	8	16	32	48	64	
보통	5.1	6.9	11.0	28.6	47.5	76.3	94.3	97.1	16.8
조강	7.5	12.4	19.1	36.8	56.9	83.1	97.6	98.8	12.4
슬래그	3.9	5.3	7.4	24.0	51.0	82.3	96.4	98.2	15.7
Type-I	8.7	14.0	25.4	53.6	75.0	89.0	97.6	99.5	7.3
Type-II	6.5	10.1	16.8	39.2	66.7	86.1	97.4	98.7	10.3

\*. MS ; Median Size

### 2.2.2 물리성능

표-5. 시멘트 종류별 물리성능 비교

	분말도 cm <sup>2</sup> /g	Flow (%)	응결		압축강도 kg/cm <sup>2</sup>			수화열 Kcal/g/°C	
			초결 m	종결 h:m	3일	7일	28일	7일	28일
보통	3210	93.9	260	7:00	152	249	406	97.5	103
조강	4300	89.1	230	6:40	243	355	466	98.9	106
슬래그	3770	96.6	300	9:10	106	189	434	74.8	84.3
Type-I	6100	89.9	260	7:10	236	368	536	83.5	89.2
Type-II	4630	93.2	270	7:40	178	280	491	84.8	90.4

<표-5>로부터 조강슬래그시멘트의 물리성능은 다음과 같다.

유동성 : 슬래그시멘트보다는 떨어지지만 보통시멘트와 동등수준

응결 : 조강시멘트보다는 지연되지만 보통시멘트와 동등수준

강도 : 3~7일 초기강도는 조강시멘트와 비슷하지만 28일이상 장기강도는 조강시멘트보다도 우수

수화열 : 슬래그시멘트보다는 높지만 보통시멘트보다도 낮음

### 3. 실험계획

#### 3.1 사용재료

##### 3.1.1 시멘트

콘크리트 실험에 사용된 시멘트는 연구소에서 실험용으로 제조한 조강슬래그시멘트 Type I 및 II와 비교용으로 보통시멘트를 사용하였으며 각각의 특성은 2.2項의 <표-4~5>와 같다.

##### 3.1.2 골재

본 실험에 사용된 골재의 특성은 다음과 같다.

표-6. 골재의 물리특성

종류	산지	골재크기 (mm)	비중	흡수율 (%)
잔골재 굵은골재	공주 청원	5	2.58	1.20
		25	2.70	1.25
종류	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	실적율 (%)	조립율 F.M.	씻기손실량 (%)
잔골재	1590	61	2.5	0.5
굵은골재	1612	59	6.6	0

##### 3.1.3 혼화제

본 실험에 사용된 혼화제는 당사 레미콘에서 사용하고 있는 AE감수제 표준형과 (日)花王社の 流動化劑 Mighty-150을 표준량 사용하였다.

#### 3.2 배합계획

배합강도  $\sigma_{r28} = 600 \sim 800 \text{ kg/cm}^2$ , Slump 18cm 이상, 공기량 2.5% 이상을 목표로 적당량의 AE감수제와 고성능 감수제를 사용하였으며 다음과 같이 배합을 계획하였다.

표-7. 콘크리트 배합계획

배합 No.	시멘트 종류	W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
①	조강	40	40.5	160	400	720	1107
②	슬래그	35	40	160	457	692	1086
③	Type I	30	39.5	160	534	657	1053
④	조강	40	40.5	160	400	720	1107
⑤	슬래그	35	40	160	457	692	1086
⑥	Type II	30	39.5	160	534	657	1053
⑦		40	40.5	160	400	724	1113
⑧	OPC	35	40	160	457	687	1093
⑨		30	39.5	160	534	663	1063

### 3.3 Mixing方法

종래의 보통콘크리트는 전재료를 일괄 투입하여 혼합하지만 단위수량이 작고 미분이 많아서 점성이 매우 큰 고강도콘크리트에서는 종래의 방법으로는 충분히 혼합되지 않기 때문에 작업성이 떨어지고 강도편차가 심하게 된다. 따라서, 고강도콘크리트의 특성에 영향을 미치는 혼합인자중 현장품질관리 측면에서 관리가 가능한 재료 투입순서와 혼합시간을 고려하여 실험적으로 검토한 결과 <표-8> 같이 mixing방법을 결정하였다.

표-8. 고강도콘크리트의 효율적인 mixing방법

투입순서	혼합시간	효 과
잔골재+ 시멘트+ 混和材料	10~15초	· 결합재의 분산, 혼합 증진으로 물과 혼화제 혼합이 용이
물+ AE감수제+ 유동화제/2	90초	· 점성이 강한 paste로 잔골재표면을 coating
굵은골재+ 유동화제/2	90초	· 혼화제의 2차효과로 모르타르 유동성 향상

### 3.4 實驗方法

<표-7>의 배합설계에 대한 실험항목 및 각각의 실험방법은 다음과 같다.

표-9. 실험항목 및 실험방법

실험항목	실험 방법
콘크리트 혼합	-용량 50리터 pan-type 강제mixer를 이용 <표-8>과 같이 mixing
Slump	-KS F 2402
Slump loss	-용량 100리터 drummixer이용
공기량	-KS F 2421
응 결	-ASTM C-403 관입저항에 의한 콘크리 트 응결시간 측정법
압축강도	-KS F 2424, KS F 2405
건조수축	-KS F 2424
중 성 화	-건조수축 측정용 공시체 이용 -破斷面에 페놀프탈레인 1%용액을 분무시켜 재형별 적색 경계면까지의 평균 중성화깊이 측정.
	-CO2농도 10%, 상대습도 약 60% -(日)朝日科學株式會社の 中性化 促進試驗 裝置
단열온도	-(獨)TONI TECHNIK社の Adiabatic Calorimeter
彈性係數	-최대응력 40% 재하시까지 응력-변형 관계 측정 -Maruto, Model No. ERs-1, Poisson's Ratio Apparatus

#### 4. 實驗結果

<표-7>의 배합에 대해서 <표-9>의 시험항목중 굳지 않은 콘크리트의 특성을 측정 및 분석한 결과는 다음과 같다.

##### 4.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

표-10. 굳지 않은 콘크리트의 특성치

배합 No.	Slump (cm)	Air 량 (%)	응결 (h:min)		Slump loss (cm)			
			초결	종결	배출	30분	60분	90분
			①	18.9	2.5			
②	19.9	2.4	12:00	15:10	21.0	12.5	7.3	4.5
③	19.7	2.5						
④	19.0	2.9						
⑤	19.5	2.8	15:30	17:50	21.5	10.8	6.1	4.1
⑥	18.5	2.6						
⑦	18.0	3.2						
⑧	19.1	2.9	15:30	17:50	21.5	10.8	6.1	4.1
⑨	19.0	3.2						

##### 4.1.1 작업성

<표-10>으로부터 동일한 배합조건에서 조강슬래그시멘트를 사용한 콘크리트는 OPC를 사용한 콘크리트와 유사한 Slump를 얻을 수 있었으며 공기연행은 약간 떨어졌지만 目視狀態로부터 작업성이 유사함을 관찰할 수 있었다.

##### 4.1.2 응결

<표-10>으로부터 조강슬래그시멘트에서는 슬래그분말이 고분말일수록 응결이 빠르지만 OPC보다는 응결을 지연시키는 양이 있다. 따라서, 슬래그시멘트의 초기강도를 개선시키기 위해서는 슬래그분말을 고분말화 할수록 유리하지만 시멘트의 수화활성이 떨어지는 동진기에는 유의할 필요가 있다.

##### 4.1.3 Slump 경시변화

<표-10>으로부터 조강슬래그시멘트는 슬래그분말이 고분말일수록 Slump 경시변화가 작으며 OPC보다 Slump 경시변화 측면에서 유리함을 알 수 있다. 따라서, 조강슬래그시멘트를 사용하면 OPC를 사용한 콘크리트보다도 작업성이 우수하고 사용된 슬래그분말이 고분말일수록 작업성 측면에

서도 유리하다고 판단할 수 있다.

#### 4.2 경화된 콘크리트의 압축강도 특성

<표-7>의 배합에 대해서 <표-9>의 시험항목중 경화콘크리트의 특성을 측정 및 분석한 결과는 다음과 같다.

##### 4.2.1 압축강도

표-11. 압축강도 측정치

배합 No.	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )			
	3일	7일	28일	91일
①	286	466	603	680
②	318	534	698	728
③	433	580	745	834
④	246	383	547	628
⑤	265	403	584	647
⑥	363	459	637	757
⑦	260	373	482	565
⑧	322	396	525	580
⑨	389	442	587	703

<표-11>의 압축강도를 분석하면 다음과 같다.

표-12. C/W와 재령별 압축강도 관계식

시멘트 종류	관계식 $\sigma_r = a + b * C/W$								
	3 일			7 일			28 일		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
Type I	-176	180	0.97	137	135	0.98	200	167	0.96
Type II	-126	144	0.96	147	93	0.98	276	108	0.99
OPC	-123	154	0.99	162	84	0.99	166	126	0.99

<표-12>의 C/W와 압축강도 관계를 재령별로 나타내면 다음과 같다.

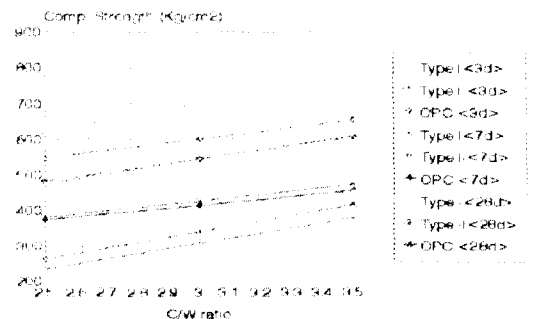


그림-1. C/W와 재령별 압축강도 關係圖

<표-12> 및 <그림-1>로부터 조강슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트는 OPC를 사용한 콘크리트보다 압축강도 발현이 우수하며 슬래그 분말의 분말도에 따라서 다음과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

- Type I을 사용한 고강도콘크리트
  - 재령 3일부터 OPC를 사용한 콘크리트강도 상회
  - 재령 28일에서는 OPC를 사용한 콘크리트강도의 약 1.3배 발현
- Type II를 사용한 고강도콘크리트
  - 재령 7일부터 OPC를 사용한 콘크리트강도 상회
  - 재령 28일에서는 OPC를 사용한 콘크리트강도의 약 1.1배 발현

따라서, 초기강도가 중요한 구조물에서는 Type I을 사용하는 것이 유리하지만 초기강도가 중요하지 않은 구조물에서는 Type II를 사용해도 충분할 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 건조수축, 탄성계수, 중성화 깊이

표-13. 건조수축, 탄성계수 및 중성화 경향

배합 No.	건조수축 ( $-1 \times 10^{-5}$ )					靜彈性係數 ( $*10^3$ ) kg/cm <sup>2</sup>	中性化 깊이 <sup>2</sup> (mm)
	1W	1M	2M	3M	6M		
②	0.76	1.42	2.59	2.93	4.28	4.11	7.9
⑤	0.86	1.49	2.86	3.56	5.40	3.78	8.5
⑧	0.92	1.75	2.99	3.84	5.86	3.14	8.0

- \*.1 재령 6개월에서 측정
- \*.2 재령 6개월후의 건조수축 공시체를 4주동안 중성화 촉진시켜서 측정

#### (1) 건조수축

조강슬래그시멘트는 슬래그분말이 고분말일수록 건조수축량이 줄어들며 조강슬래그시멘트는 OPC보다 건조수축면에서 유리함을 보여주고 있다.

#### (2) 탄성계수

조강슬래그시멘트는 슬래그분말이 고분말일수록 탄성계수가 크고, 조강슬래그시멘트가 OPC보다 탄성계수 측면에서 유리하다.

#### (3) 중성화

슬래그 고분말을 主材로한 조강슬래그시멘트는 슬래그분말이 고분말일수록 중성화 경향이 줄어들며 OPC와 거의 동등한 수준임을 알 수 있다. 따라서, 조강슬래그시멘트는 중성화가 문제가 되는 구조물에서도 효과적으로 사용할 수 있다고 판단된다.

#### 4.3 단열온도 상승 특성

동일 배합조건으로 RHBC와 OPC를 사용한 고강도콘크리트의 단열온도 상승량 측정 및 분석결과는 다음과 같다.

표-14. 콘크리트 단열온도 상승량( $\Delta T^{\circ}C$ )

시멘트	투입	24hr	48hr	72hr	96hr
Type I	0	50	57.5	58	58
Type II	0	63.5	58	61	61
OPC	0	60	63.5	63.5	63.5

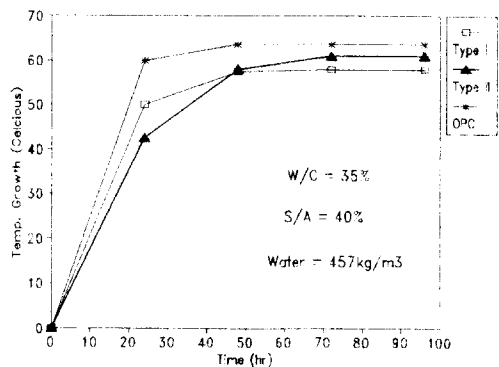


그림-2. 콘크리트의 단열온도 상승도

조강슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 단열온도 상승량은 2일 이내의 초기재령에서는 슬래그 분말이 고분말일수록 높지만 2일 이상의 재령에서는 슬래그 분말이 고분말일수록 낮았다. 또한, 조강슬래그시멘트를 사용한 콘크리트가 OPC를 사용한 콘크리트보다 단열온도 측면에서 유리하였다.

#### 5. 結論

이상의 연구 결과로부터 조강슬래그시멘트를 이용한 콘크리트는 OPC를 이용한 콘크리트에 비해서 초기재령부터 強度發現率

이 것 뿐만 아니라 여러가지 콘크리트 특성이 OPC를 사용한 콘크리트에 비해서 우수하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 經濟的인 高強度콘크리트 제조 가능

조강슬래그시멘트를 사용하여 配合強度( $F_{r28}$ )  $500\sim 800\text{kg/cm}^2$  정도의 高強度콘크리트를 제조하는 경우 다음과 같이 OPC를 사용하는 콘크리트에 비해서 경제성이 있다.

설계강도 $F_{c28}$	배합강도 $F_{r28}$	Slump (cm)	Air (%)	시멘트 종류	W/C (%)	Cement ( $\text{kg/m}^3$ )
480 $\text{kg/cm}^2$	580 $\text{kg/cm}^2$	18 이상	2-3	Type-I	43.8	365
				Type-II	35.6	449
				OPC	30.5	525
600 $\text{kg/cm}^2$	730 $\text{kg/cm}^2$	18 이상	2-3	Type-I	31.4	510
				Type-II	23.8	(672)
				OPC	22.4	(714)

\* $F_r = 1.21 * F_c$ , ( )은 제조가 어려운 조건임

設計基準強度( $F_c$ ) ;  $480\text{kg/cm}^2$

OPC를 사용하면 단위시멘트량이  $500\text{kg/m}^3$  이상 필요하지만 조강슬래그시멘트를 사용하면

- Type I을 사용한 경우 단위시멘트량이 약  $370\text{kg/m}^3$  소요
- Type II를 사용한 경우 단위시멘트량이 약  $450\text{kg/m}^3$  소요

設計基準強度( $F_c$ ) ;  $600\text{kg/cm}^2$

OPC를 사용해서는 설계강도  $600\text{kg/cm}^2$  정도의 고강도콘크리트를 제조하기 어렵고 조강슬래그시멘트 Type II를 사용해도 어렵다는 것을 알 수 있다. 그러나, 조강슬래그시멘트 Type I을 사용하면 단위시멘트량 약  $510\text{kg/m}^3$  정도로  $F_c=600\text{kg/cm}^2$  정도의 고강도콘크리트를 제조할 수 있다.

혼화제량 감소

조강슬래그시멘트를 사용한 高強度콘크리트의 經濟的 長點은 위와 같이 단위시멘트량의 저감뿐만 아니라 그로인해

서 減水劑의 사용량도 줄일 수 있으므로 그 경제성은 더욱 커지고 조직을 치밀하게 할 수 있으므로 내구적 특성도 향상될 것으로 기대된다.

2) 고품질 콘크리트 제조 가능

조강슬래그시멘트를 이용한 콘크리트는 OPC를 이용한 콘크리트에 비해서 高強度가 發現되고 경제적인 뿐만 아니라 다음과 같은 高品質을 기대할 수 있다.

項目	고품질 발현 요인
乾燥收縮	-단위수량 및 단위시멘트량 감소
斷熱溫度上昇	-低發熱형 시멘트 -단위시멘트량 감소
耐海水性	-슬래그시멘트는 내해수성시멘트
水密性	-Bleeding량 감소 -W/C감소

3) 用途

조강슬래그시멘트의 여러가지 장점을 충분히 이용하면 다음과 같은 용도로 활용할 수 있다.

요구성능	적용분야
고강도	· 고층건축의 보, 기둥 · P.S 콘크리트 부재 · 콘크리트 Pile
콘크리트 2차제품	· PHC Pile · 홈관 · 각종 고강도용 세그먼트
고내구성 콘크리트	· 콘크리트 포장 · 염해환경하에 있는 구조물 · 수밀성을 필요로 하는 구조물 · 매스콘크리트

6. 參考文獻

1) 依田彰彦 ; 高爐スラグ微粉末を混和材とした用いたコンクリートの建築分野への利用, 月刊生コンクリート Vol.11, No.10, pp.13~18, Vol.11, No.11, pp.21~32, 1992년

2) H.J. Jobse, S.E. Moustafa ; Applications of High Strength Concrete for Highway Bridges, PCI Journal Vol.30, No.5, pp.44~73