

# 산업부산물을 사용한 알칼리 활성화 무시멘트 모르타르의 품질특성에 관한 연구

## A Study on the Quality Properties of Alkali-activated cement free Mortar using Industrial by-products

권용훈<sup>1</sup> · 권영호<sup>2\*</sup> · 이동규<sup>1</sup>

Yong-Hun Kwon<sup>1</sup> · Yeong-Ho Kwon<sup>2\*</sup> · Dong-Gyu Lee<sup>1</sup>

(Received May 15, 2013 / Revised June 13, 2013 / Accepted June 25, 2013)

This study investigated quality properties of alkali activated cement free mortar using industrial by-product such as cement kiln dust(CKD), silica fume(SF) and quartz sand powder(SP) to compare with previous research about blast furnace slag(BS) and fly ash(FA). The results were as following. All materials were effective to increase compressive strength, however they showed different tendency on flowability. CKD and SP increased flowability, but on the other hand SF did not because it's blain was great difference with other materials. Flowability and compressive strength were related with grading distributions of binders because CKD, SP and SF which had small particle size filled up BS and FA. Application of industrial by-products with various grading distributions could be effective for the high early strength and flowability of alkali activated cement free mortar using BS.

**키워드** : 무시멘트, 알칼리 활성화 모르타, 조기강도, 산업부산물

**Keywords** : Cement free, Alkali Activated mortar, High Strength Concrete, Industrial by-product

### 1. 서론

최근 환경문제에 대한 세계적인 관심집중으로 에너지 소비비중이 상대적으로 큰 건설산업에서도 온실가스의 감축 및 에너지 저감 등의 목표를 세우고 있으며, 이를 위해 산업부산물 및 폐기물 등을 콘크리트용 재료로서 재활용하는 제로에미션(Zero emission)화 방안이 검토되고 있다. 이 중 철강산업의 부산물로 발생하는 고로슬래그 미분말은 국내 철강산업의 발전에 따라 그 발생량이 증가하고 있는 실정이며, 이를 활용하는 방안에 대한 많은 연구들이 발표되고 있다.

그러나 고로슬래그 미분말은 물과의 접촉 시  $Ca^{+}$ 이온의 용출에 의해 입자 표면에 불투수성 유리질 피막(Glassy State Film)을 형성시켜 즉각적인 반응이 진행되지 못하고 콘크리트내의  $OH^{-}$  이온에 의해 불투수성 피막이 파괴되어야 수화반응을 시작하기 때문에, 콘크리트의 초기강도 저하 및 응결지연 등의 문제점을 야기시

킨다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 화학적·물리적 차원의 다양한 방법이 시도되고 있는데, 대표적인 방법으로 NaOH,  $Na_2SiO_3$  등의 알칼리 자극제 및 급결제를 적용하여 고로슬래그의 수화반응으로 형성된 유리질 피막을 강제로 파괴하고, 결합재의 중합반응 및 활성화를 통해 수화반응을 유도하는 알칼리 활성화가 제시되고 있다

그러나 알칼리 자극제와 급결제 혼용시 고로슬래그의 급격한 초기반응으로 인해 발생하는 급결(急結)현상에 따른 유동성 손실과 모르타르 및 콘크리트 배합 시 고성능 감수제 및 지연제와의 화학반응성에 의해 분산·유지능력이 저하되는 문제가 발생하여 물-결합재비를 낮추는데는 한계가 있으므로 초기 압축강도를 크게 증진시키기 위해서 고온양생 등의 부차적 요소가 필수적인 것으로 선행연구에서 입증되었으며, 고온양생 등의 과정에서 에너지 다량소비 및  $CO_2$ 를 발생시켜 온실가스 감축이라는 목적에 반하는 실정이다.(Kwon, Y. H 2012; Song & Yang & Lee & Song 2012;

\* Corresponding author E-mail: kyh00127@hanmail.net

<sup>1</sup>동남기업(주) 중앙연구소(Dongnam Co.,LTD Research&Development Center, Gyeonggi-do, 451-822)

<sup>2</sup>동양대학교 건축소방행정학과 교수 (Dept, of Architecture and Fire service Administration, Dong Yang University, Youngju 750-801, Korea)

Song & Yang & Kim & Kim 2010)

따라서 본 연구에서는 고로슬래그(이하, BS)를 기반으로 한 알칼리 활성 모르타르의 초기강도 증진 및 소정의 유동성 확보를 위하여, 선행연구 결과에서 장기강도 발현에 도움을 주는 플라이애시(이하, FA)의 사용량을 줄이고 기타 산업부산물인 실리카퓌름(이하, SF), 시멘트 킬른 더스트(이하, CKD), 규사미분말(이하, SP)을 FA의 대체재로 사용하여 알칼리 활성 무시멘트 모르타르의 기초적 특성에 대해 실험적 검토를 진행하고자 한다. 그리고 FA 대체분체별 적용에 따라 확보되는 모르타르의 유동성 증대 및 초기강도 향상 비교·분석을 위해 입도분포 분석을 통한 저에너지 건설 산업에 활용할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합조건은 Table 2와 같다.

먼저, 배합조건으로 물-결합재비(이하, W/B)를 43%로 고정으로 선행연구를 통해 유동성과 재령별 압축강도에서 가장 우수한 결과를 나타낸(Kwon, Y, H 2012) BS 70%, FA 30%를 결합재로 사용한 알칼리 활성 무시멘트 모르타르 배합을 Plain으로 설정하였으며, 목표 테이블 플로는 160±15mm를 만족하도록 배합설계하였다. 그리고 모르타르의 초기강도 향상을 위하여 BS에 비해 알칼리 활성화 초기반응성이 낮아 초기재령에 낮은 압축강도를 나타내는 FA 대체용 결합재로 시멘트 생산 시 킬른 소성과정에서

발생하는 CKD, 실리콘 제조시 발생하는 폐가스를 집진하여 제품화한 SF 및 산(山)규암을 파쇄·분쇄하는 과정에서 생산되는 SP, 이상 3종류의 산업부산물을 검토하였다.

대체용 결합재의 사용량은 FA의 중량비 30, 50, 100%로 치환하여 초기강도의 발현성을 확인하기 위한 6 수준 및 연속입도분포에 의한 유동성 및 강도 개선을 위해 CKD, SF 및 SP를 임의의 비율로 혼합한 4 수준 등 총 11 수준으로 배합조건을 설정하였다.

실험항목으로는 굳지 않은 모르타르에서 타격식 테이블 플로를 측정하고, 경화 모르타르에서는 재령별 압축강도 및 전자현미경

Table 1. Experimental plan

Items		Variables
Mixture	W/B(%)	43
	Flow(mm)	165±15
	Binder composition(%)	- Blast Furnace Slag(BS) : Fly Ash (FA) = 70 : 30*
	Alkali activated composition	- NaOH : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> = 5.5 : 4.5
	Consumptions(%)	- 15
	Industry by-product	- Cement kiln dust(CKD) - Silica Fume(SF) - Quartz sand powder(SP)
Test	Replacement Ratio(%/FA)	- 30, 50, 100
	Measurement	- Table Flow - Compressive strength (1, 3, 7, 28 days) - Scanning Electro Microscope (SEM) - 1Day

\* Plain

Table 2. Mixture proportions of Mortar

Variables	W/B (%)	Dosages (%/FA)	C:S	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )								
				BS	FA	CKD	SF	SP	S	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	
Plain	43.0	0	1:2.45	399	171	-	-	-	1396.5	53.2	29.6	
CKD		30			119.7	51.3	-	-				
SF						-	51.3	-				
SP						-	-	51.3				
CKD						-	85.5	-				-
SF		50			85.5	-	85.5	-				
SP						-	-	85.5				
CKD + SF						-	85.5	85.5				-
CKS + SP						-	85.5	-				85.5
SF + SP		50:50			85.5	-	-	85.5				85.5
CKD + SF + SP						33.3:33.3:33.3	-	57.0				57.0

(Scanning Electron Microscope : 이하 SEM)촬영을 통해 모르타르 내부의 미세구조의 변화를 확인하고자 하였다. 그리고 각 분체별 입도분석을 통해 연속입도분포 곡선을 측정하여 입도분포가 알칼리 활성화 무시멘트 모르타르의 유동성 및 초기강도 특성에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

## 2.2 사용재료

본 연구에 사용할 재료로, BS는 국내 A사의 제품을 사용하였으며, FA는 국내 B사의 분급 정제된 제품을 사용하였는데, 각각의 재료별 물리·화학적 특성은 Table 3~4와 같다.

또한, CKD는 시멘트 킬른 소성과정에서 발생한 입자를 포함한 국내 C사 제품을 사용하였고, SF는 D사, SP는 규암의 분쇄과정에서 집진한 국내산 E사의 제품을 사용하였다. NaOH는 국내산 F사의 제품을 사용하였으며, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>는 국내산 G사의 제품을 사용하였는데, 각 재료별 물리·화학적 성질은 Table 5~9와 같다.

**Table 3.** Properties of blast furnace slag(BS)

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	LOI (%)	Chemical composition(%)					
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
2.91	4 500	2.1	35.08	14.92	0.32	42.26	6.41	0.11

**Table 4.** Properties of fly ash(FA)

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	LOI (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Hygroscopic Moisture (%)
2.20	3 850	2.50	2.63	0.1

**Table 5.** Properties of cement kiln dust(CKD)

LOI (%)	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)
36.11	43.59	1.25	1.45	2.07	2.63	0.95	2.22	0.41

**Table 6.** Properties of silica fume(SF)

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Chemical composition(%)							
		LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
2.21	160 000	1.38	96.65	1.87	0.03	0.38	0.19	0.32	0.56

**Table 7.** Properties of quartz sand powder (SP)

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
2.47	3 685	91.8	4.06	1.61

**Table 8.** Physical properties of NaOH

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Molecular weight (g/mol)	Boiling point (°C)	Freezing point (°C)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
1.52	40	91.8	4.06	1.61

**Table 9.** Specification of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Na <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	Purity (%)
1.61	13.5	30.5	2.26	38.5

**Table 10.** Physical properties of standard sand

Grain size(%)	Sieve size(mm)	Residue(%)
	0.08	99 ± 1
	0.16	87 ± 5
	0.50	67 ± 5
	1.00	33 ± 5
	1.60	7 ± 5
2.00	0	

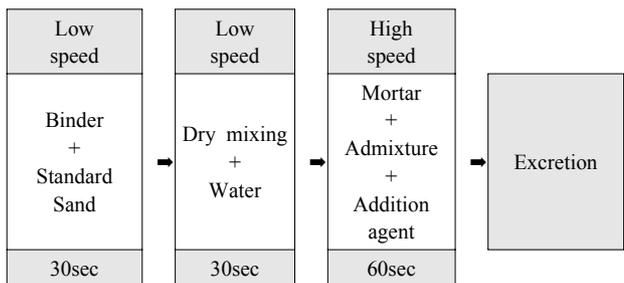
본 알칼리 활성화 모르타르 배합시 잔골재는 ISO 표준사를 사용하였으며, ISO 규격 표준사의 입도범위는 Table 10과 같다.

## 2.3 실험방법

본 연구에서는 각 재료 및 이를 혼합한 혼합분체의 입도분포가 강도 및 유동성에 미치는 영향을 검토하였는데, 각 재료의 입도분석을 위해 KS A ISO 13320-1의 레이저 회절법에 따른 레이저 회절/산란식 입자분포 측정장치(LA-950V2)를 사용하여 측정하였다.

알칼리 활성화 모르타르의 실험은 7ℓ 용량의 강제식 모르타르믹서를 사용하여 KS L 5109의 실험방법에 따라 모르타르를 제조하였는데, 배합방법은 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

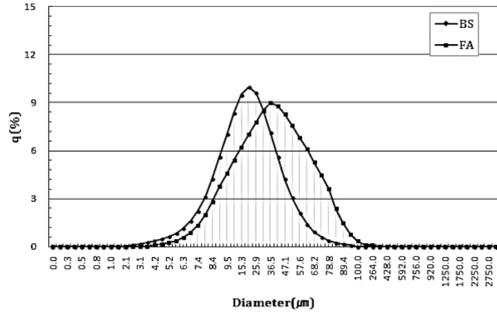
굳지 않은 모르타르의 특성시험으로 타격식 테이블 플로는 KS L 5111에 따라 실시하였다.



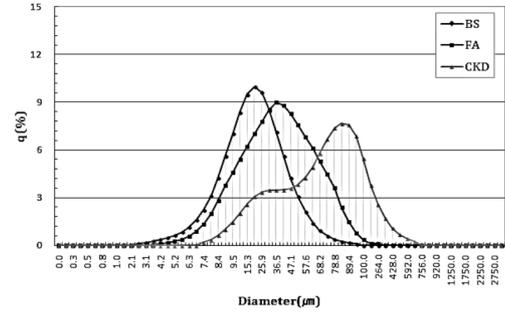
**Fig 1.** Specimen set-up for autogenous shrinkage

경화 모르타르의 실험방법으로 모르타르의 압축강도는 소정기간 항온항습 챔버에서 양생하고 1일(24h) 경과 후, 몰드에서 탈형한 후 KS L 5105에 따라 수중양생을 실시하였다. 또한, 경화된

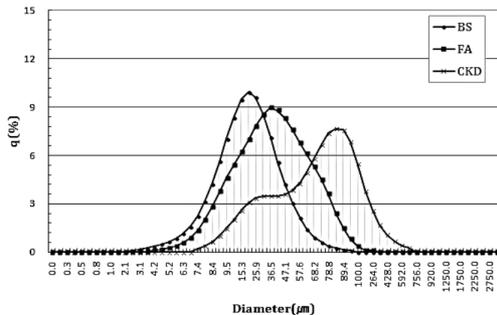
모르타르의 경화체 미세구조를 관찰하기 위하여 압축강도 측정 후 남은 모르타르의 파편을 아세톤에 침지시켜 수화작용을 정지시키고, 수화반응이 정지된 시편에 대하여 건조 후, SEM촬영을 통해



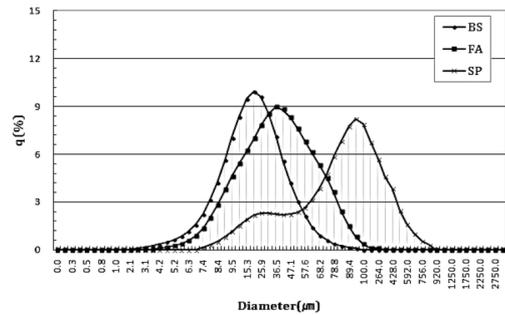
(1) Plain



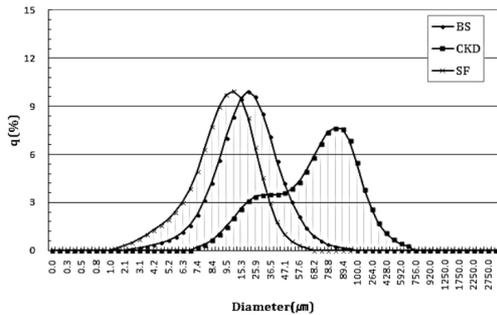
(2) BS+FA+CKD



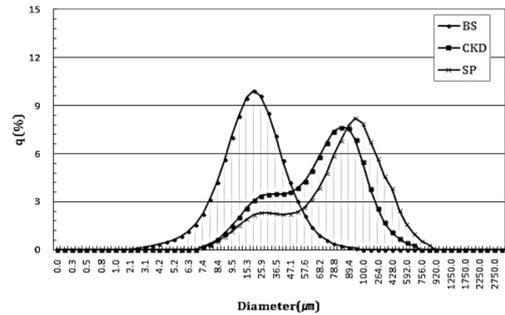
(3) BS:FA:SF



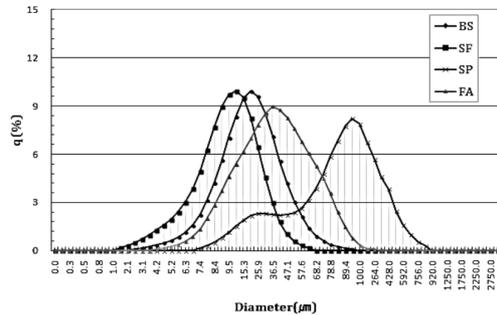
(4) BS:FA:SP



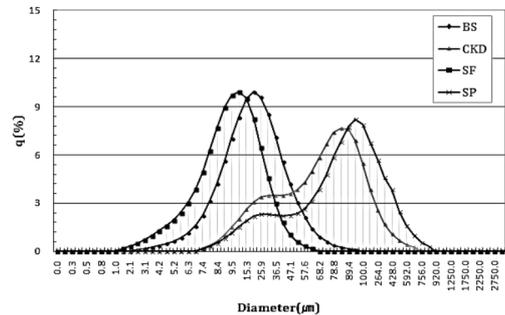
(5) BS:CKD:SF



(6) BS:CKD:SP



(7) BS:SF:SP:FA



(8) BS:CKD:SF:SP

Fig 2. Grading distributions on Industrial by-product

모르타르 경화체의 미세구조를 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 결합재의 입도분포 특성

연속입도분포 형성에 따른 모르타르의 압축강도 및 유동성 증진을 분석하기 위해, Fig. 2는 본 연구에서 사용된 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 실리카푼, 시멘트 킬른 더스트 및 규사미분말의 혼합사용에 따른 입도분포 결과를 나타낸 그래프이고, Table 11은 BS, FA, SF, CKD 및 SP의 고유의 입도분석 결과를 나타낸 것이다.

먼저 Plain의 사용재료인 BS의 평균입경은 14.40 $\mu$ m로 측정되었으며 중위값은 12.25 $\mu$ m, FA의 평균입경과 중위값은 각각 15.66 $\mu$ m, 18.75 $\mu$ m로 측정되었다. 그리고 초기강도 향상 및 유동성 증진을 검토하기위해 사용된 CKD, SF 및 SP의 평균입경과 중위값은 각각 54.10 $\mu$ m, 27.08 $\mu$ m와 9.20 $\mu$ m, 8.31 $\mu$ m 및 47.03 $\mu$ m, 28.12 $\mu$ m로 측정되었다.

Table 11에서 나타난 것과 같이 입자크기(D90)는 BS>FA>CKD>SP>SF 순으로 나타났다. BS, FA, SF의 경우에는 입자의 표준편차가 작아 10 $\mu$ m 이하 되는 입자가 다수 분포하였으나 BS와 FA의 경우 100 $\mu$ m 이상의 크기를 가진 입자가 다수를 차지하는 것으로 분석하였으며, 비교적 넓고 완만한 입도분포를 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 BS와 FA와 함께 고유의 입도분포를 가지는 CKD, SF 및 SP를 적정량 치환하면, 모르타르의 유동성 확보 및 개선의 가능성이 클 것으로 판단되며,(Kang & Kang & Park 2010) 입도분포도가 좁고 경사가 심할수록 모르타르의 내부조직의 치밀화에 따라 모르타르의 압축강도가 증가하는 것으로 사료된다. Fig. 2와 같이 평균입경이 큰 결합재의 치환율이 증가함에 따라 평균직경이 증가하며, 상대적으로 입도분포가 넓고 완만해지는 것으로 확인되는데, 이는 직경이 큰 결합재 사이에 작은 입자들이 채워지

Table 11. Result of grain size analysis

Type	Median ( $\mu$ m)	Mean ( $\mu$ m)	D10 ( $\mu$ m)	D50 ( $\mu$ m)	D90 ( $\mu$ m)
BS	32.25	73.40	5.62	32.26	79.34
FA	34.75	65.66	7.09	34.75	73.91
CKD	27.08	54.10	5.45	27.08	68.69
SF	8.31	9.20	3.44	8.31	13.87
SP	28.12	47.03	14.13	28.12	50.29

주) Median : 중위값 Mean : 평균입경 S.D : 표준편차  
D10:10%범위직경 D50:50%범위직경 D90:90%범위직경

면서 공극을 충전하여 공극사이의 구속수가 최소화되어 자유수의 증가에 따른 유동성 개선 및 치밀성을 발휘하여 내구성이 향상되는 것으로 판단된다.(Lee 2005)

다만 SF의 경우 입자의 크기가 작아 구속수가 저하될 것으로 예상하였으나, 비표면적의 증대에 따라 Ca(OH)<sub>2</sub>와의 반응성이 매우 크고, gel상의 물질을 생성하면서 점성이 부여되어 플로의 저하 및 손실이 증대되는 것으로 사료된다.

#### 3.2 굳지 않은 모르타르의 특성

Fig. 3는 초기강도 증진을 위한 대체용 결합재의 사용량에 따른 알칼리 활성 무시멘트 모르타르의 플로우 실험결과를 나타낸 것이다.

먼저, Plain배합의 플로우는 156mm로 목표 플로우(160 $\pm$ 15mm)를 만족하는 것으로 나타났다.

FA의 30% 치환한 대체용 결합재 CKD 및 SP를 각각 사용한 경우, 모르타르의 유동성은 각각 159mm 및 163mm 로 Plain에 비해 약 2% 및 4.5%씩 증가하였으나, 거의 유사한 경향을 나타내었다.

FA의 50% 치환한 CKD, SP에서는 각각 175mm 및 178mm로 Plain 모르타르에 비해 각각 12% 및 14%씩 유동성이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 FA에 비해 CKD 및 SP의 알칼리 자극제에 의한 초기반응성이 낮아 급결현상이 저하된 것으로 판단된다.

FA를 사용하지 않고 CKD, SF 및 SP를 혼합 사용한 경우, 테이블 플로우 측정값은 모든 수준에서 Plain을 상회하는 것으로 나타났는데, 이는 알칼리 자극제에 의한 반응성이 FA보다 낮아 알칼리 활성화의 속도가 지연됨에 따라 급결 현상을 방지하여 초기 유동성이 증가된 것으로 사료된다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 평균입경이 큰 CKD 및 SP의 치환율이 증가함에 따라 BS, FA와 같은

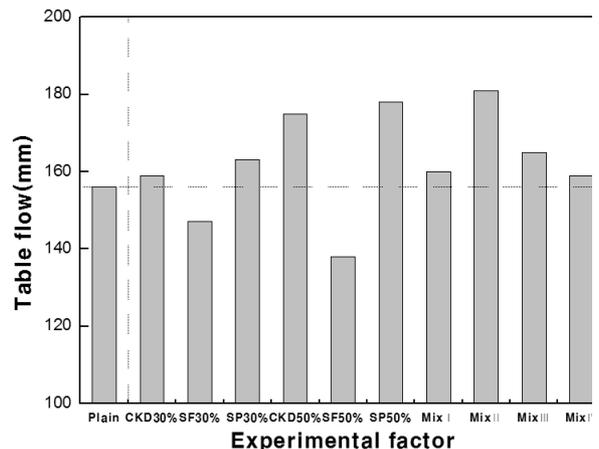


Fig 3. Result of Replacement Ratio table flow

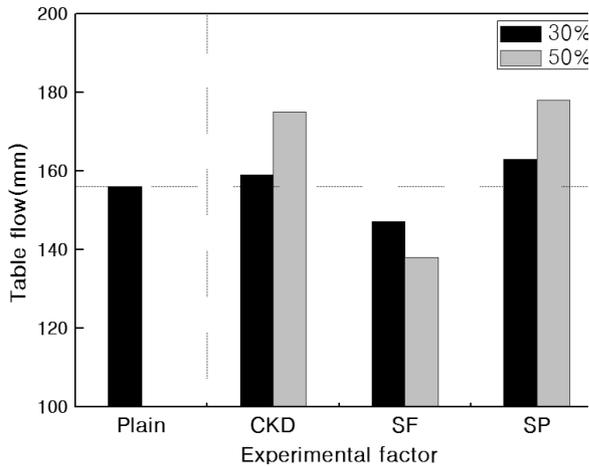


Fig. 4. Result of Replacement Ratio(30, 50%) table flow

작은입자를 가진 결합재가 입자 사이의 공극을 충전시켜 입자 사이의 구속수를 최소화 하는 것에 기인하여 모르타르의 유동성 개선에 유리한 결과를 나타내었다.

반면에 대체용 결합재로 SF를 치환한 경우에는 Fig. 4와 같이 치환율이 증가할수록 모르타르의 겉보기 물성은 매우 양호하지만, 플로우 측정값은 저하되는 것으로 나타났다. 이는 SF의 비표면적 증대에 따른 결합재 매트릭스 내부의 잉여수가 감소되어 유동성에 영향을 미친 것으로 판단된다.(Park & Kim & Sho 2005)

알칼리 활성 무시멘트 모르타르의 경시변화 측정에서는 급결현상에 기인하여 20분 가량의 가사시간을 확보할 수 있었으며, 현장 적용 시 이동식 믹서(mobile mixer)를 사용함에 따라 소요 가사시간 확보에 용이할 것으로 판단된다.

추후 알칼리 활성 무시멘트 모르타르의 지속적인 연구를 통해 경시변화에 따른 가사시간 확보에 대한 연구를 진행할 예정이다.

### 3.3 경화된 모르타르의 특성

Fig. 5는 각 수준별 대체용 결합재 CKD, SF 및 SP의 치환율에 따른 압축강도를 나타낸 것이다.

실험결과, 모든 수준에서 Plain보다 초기강도가 높게 나타났으나, CKD를 치환의 배합조건에서는 재령이 경과함에 따라 Plain에 비해 압축강도가 소폭 감소하는 것이 확인되었다. 이는 CKD를 적정량 치환 시 알칼리 자극제의 역할을 하여 잠재수경성 반응을 촉진시키는 효과에 의한 것으로 확인된다.(Maria & Suurenda 2003)

즉, CKD 자체의 반응성은 알칼리 활성화가 지연되는 효과를 가지나, CKD가 고로슬래그의 초기 활성화를 촉진시켜 재령이 경과할수록 반응성이 급격히 낮아져 장기강도는 저하하는 것으로 판

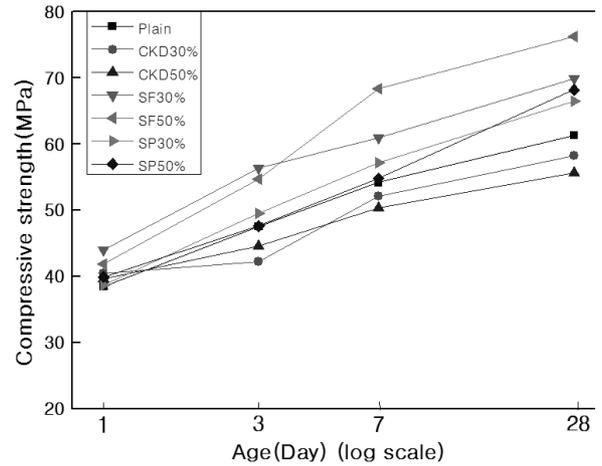


Fig. 5. Compressive strength depending on shrinkage reducing admixtures

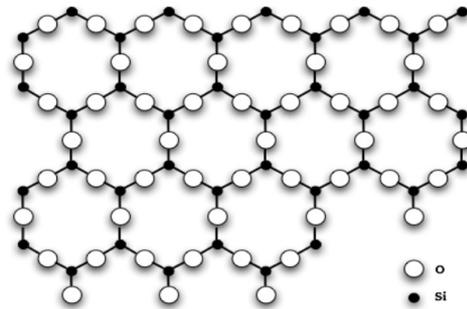


Fig. 6. Structural formula of SiO<sub>2</sub>

단된다.

Plain의 재령 1일 압축강도는 38.5 MPa로 측정되었으며, SP를 제외한 모든 수준에서 초기강도가 우수한 경향을 나타내었다. 본 실험에서 사용한 SP는 무수규산인 이산화규소(SiO<sub>2</sub>) 성분을 가진 석영알갱이를 파쇄·가공한 인조규사로 SiO<sub>2</sub> 성분을 약 97% 가량 함유되어 있어 알칼리 활성화에 의한 강도발현이 유리할 것으로 판단하여 사용하였다.

실험결과, Fig. 6과 같이 SP의 주성분인 SiO<sub>2</sub>는 화학구조상 매우 안정한 단계로 진행되어 있어, 초기 알칼리 자극제에 의한 활성화가 어려운 것으로 확인되었으며, 이에 따라 치환율이 높아질수록 초기강도 발현이 저하될 것으로 사료된다. 그러나 재령 28일에서는 Plain을 상회하는 것으로 확인되었는데, 이는 SP의 포졸란 반응에 의한 것으로 판단된다.

알칼리 활성 모르타르 중 수산화칼슘[Ca(OH)<sub>2</sub>]이 상온에서 서서히 반응하여 C-S-H(Calcium Silicate Hydrate 및 C-A-H(Calcium Aluminate Hydrate) 수화물을 생성하여 내부조직이 치

밀해 짐에 따라 장기강도 향상에 기여한 것으로 사료된다.

또한, SF 치환에 따라 초기 및 장기재령에서 우수한 강도발현을 나타내었는데, 이는 SP와 동일하게 무정형의 SiO<sub>2</sub>로 이루어져 있으나 분말도가 매우 미세하기 때문에 충전효과(Micro-Filler effect)에 의해 초기 높은 알칼리 활성능력을 가지는 BS와 골재 입자 사이에 존재하는 천이영역(Transition-zone)을 감소시켜 공극 감소에 따라 초기 및 장기강도가 증진되는 것으로 사료된다.

### 3.4 SEM 촬영에 따른 미세구조 관찰

Photo 1은 각 변수별 시험체의 SEM 관찰로 모르타르 내부의 미세구조를 5000배 확대하여 촬영한 것이다.

CKD를 사용한 경우, Plain에 비해 일부분의 미세구조가 더욱 치밀한 형태를 나타내는데, 이는 CKD 치환에 따라 알칼리 활성화 촉진작용에 기인한 것으로 관찰된다.(Maria & Suurenda 2003) 하지만 내부공극 역시 다른 결합재의 치환에 비해 많은 것으로 확인되는데, 이는 알칼리 활성화 특성상 급격한 반응에 의한 급결형상으로 치밀성이 결여되어 나타나는 공극으로 사료된다.

모든 수준에서 활성화제로 사용된 수산화나트륨과의 반응 생성물인 C-S-H gel 사이에 Ca(OH)<sub>2</sub>를 확인할 수 있다. 이는 수산화이온(OH<sup>-</sup>)이 BS의 유리질막 및 알루미늄 규산염 중의 Si-O나 Al-O의 결합을 파괴하여 Si나 Al을 함유하고 있는 이온의 용해를 촉진시키는데, 이렇게 용출된 이온은 수경성 물질로서 C-S-H gel과 C-A-H gel을 형성하는 것으로 나타났다.(Kang & Kang &

Park 2010; Kim 2012; F Puertad, A Fernandez, M,T Blanco- Varela 2004)

C-S-H gel의 형태는 비교적 넓은 공간에서 생성하는 섬유상과 망목상, 그리고 공간적 여유가 없는 장소에서 생성되는 덩어리상 등의 4가지로 알려져 있다. SF를 치환한 배합의 경우, 주로 후자인 덩어리형 C-S-H gel이 형성되었는데 이는 SF 치환 시 비표면적의 증대에 따라 구속수가 증가되면서 공극의 감소와 동시에 충분한 공간을 확보하지 못한 상태에서 급격한 반응물이 생성되어 덩어리형 C-S-H gel이 형성된 것으로 사료된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 알칼리 활성 무시멘트 모르타르의 초기강도 향상을 위한 방안으로 고로슬래그 및 플라이애시 등의 결합재에 대체용 결합재로 CKD, SF 및 SP를 사용한 모르타르의 기초적 특성을 비교·분석 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 모든 수준에서 Plain에 비해 유동성이 소폭 향상되었으며 공기량에서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 고로슬래그 및 플라이애시의 결합재를 혼합하여 사용한 것에 비해 대체용 결합재를 사용한 배합조건이 우수한 연속입도 분포도에 의한 자유수의 증가에 따라 유동성이 증가되는 것으로 판단된다.

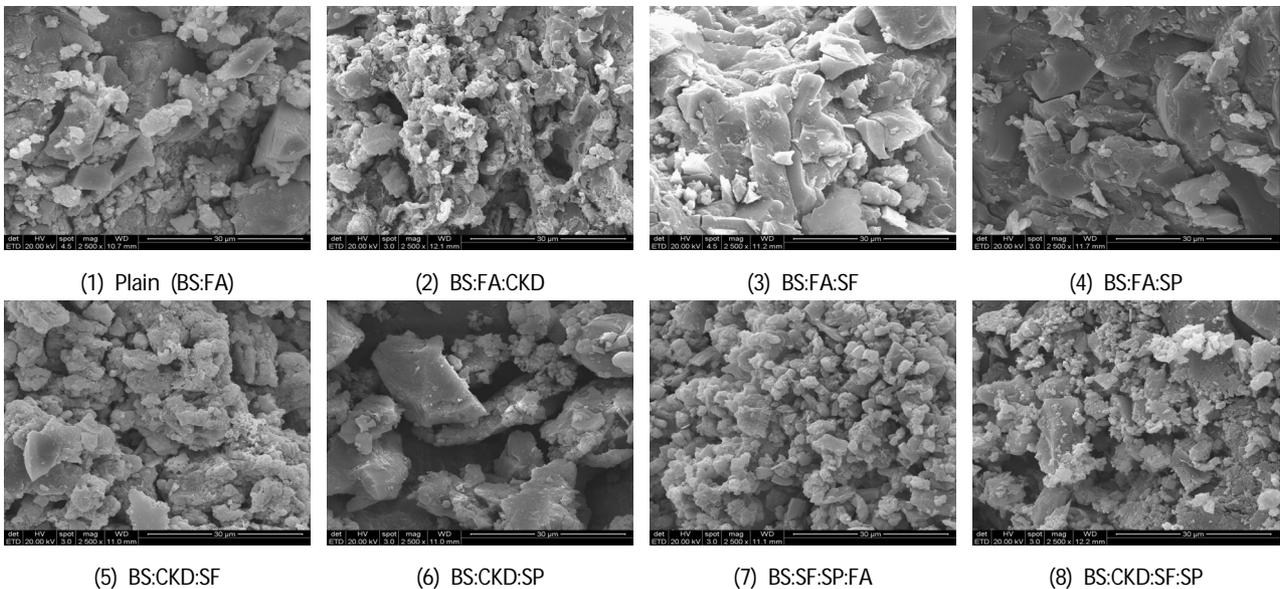


Photo 1. Fine structure of Mortar depending on industrial by-product

2. CKD를 적정량 치환하였을 경우, CKD의 자체의 반응성은 알칼리 활성화에 의한 반응이 지연되는 효과를 가지나, CKD에 함유되어 있는  $K_2O$  및  $Na_2O$ 가 알칼리 자극제의 역할을 하여, 잠재수경성에 의해 생성된 유리질피막을 자극하여 촉진반응에 의해 초기 압축강도가 증가하는 것으로 사료되며, 초기 급격한 활성화반응에 의해 재령이 경과할수록 반응성이 떨어져 장기강도가 저하하는 것으로 판단된다.
3. SEM촬영 미세구조 관찰 시 SF를 치환한 배합에서 덩어리형 C-S-H gel이 확인되었는데 이는 실리카폼 치환에 의해 비표면적의 증대에 기인한 점성증대가 발생하고, 결합재의 입자간 공극이 줄어들어 따라 충분한 공간을 확보하지 못한 상태에서 급격한 반응물이 생성되어 덩어리형 C-S-H gel이 형성되면서 타수준에 비해 조직이 치밀화가 진행되어 높은 압축강도를 발현하는 것으로 확인되었다.
4. 각 분체별 입도분포그래프의 경사가 비교적 넓고 완만할 경우 모르타르의 유동성 개선에 유리한 경향을 나타내는 것으로 판단되며, 그래프의 경사가 좁고 가파를 경우 모르타르 내부 조직의 치밀화에 따라 모르타르의 압축강도 증진에 효과적인 것으로 사료된다.
5. BS 및 FA를 사용한 배합조건에서 고유의 입도분포를 갖는 CKD, SF 및 SP를 적정량 치환하여 사용하는 것이 모르타르 유동성 확보에 용이한 것으로 확인된다. 이는 큰 직경의 결합재 사이에 작은 입자들이 채워지면서 공극을 충전하고, 공극사이의 구속수가 자유수로 표출되어 유동성 개선 및 치밀성을 발휘하게 되며 내구특성 또한 증가될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술연구원의 국토해양기술 연구개발 사업인 “저탄소 녹색 공방 포장 시공 및 유지관리기법개발”의 연구지원으로 수행되었습니다.

## References

- F Puertad, A Fernandez, and M.T Blanco-Varela. (2004). “Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate,” *Cement and Concrete Research*, **34(1)**, 139–148.
- Kang, H.Y., Kang, H.B., and Park, S.S. (2010). “Strength Behavior and Microstructure of Alkali-Activated Slag Cement Concrete,” *Journal of Korea Society of Waste Management*, **27(5)**, 405–414.
- Kim, T.W. (2012). “The Strength Properties of Alkali-Activated Slag Mortars by Combined Caustic Alkali with Sodium Carbonate as Activator,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(6)**, 745–752.
- Kwon, Y.H. (2012). “A study on Fundamental Properties of Alkali-Activated Cement free Concrete using Industrial by-product,” Graduate School Dongyang university.
- Lee, S.H. (2005). “Grain-size distribution Cement in,” *Journal of the Korea Cement Association*, **166(3)**, 60–66.
- Maria S. Konsta-Gdoutos, Suurenda P. Shah. (2003). “Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag,” *Cement and Concrete Research*, **33**, 1269–1267.
- Park, S.J., Kim, K.M., and Sho, K.H. (2009). “Effect of Particle Size Distribution of Binder on the Fluidity of High Flowing Concrete,” *Journal of the Korea Architecture Institute of Korea*, **25(8)**, 167–174.
- Song, J.K., Yang, K.H., Kim, G.W., and Kim, B.J. (2010). “Properties of Sodium Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag(GGBS) Mortar,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, **26(6)**, 61–68.
- Song, K.I., Yang, K.H., Lee, B.Y., and Song, J.K. (2012). “Carbonation Characteristics of Alkali Activated Blast-Furnace Slag Mortar,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(3)**, 315–322.

### 산업부산물을 사용한 알칼리 활성 무시멘트 모르타르의 품질특성에 관한 연구

산업부산물인 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 적용하였던 선행 연구들과 차별하여 시멘트 킬른 더스트, 실리카폼, 규사미분말 등의 기타 산업부산물을 사용한 알칼리 활성 무시멘트 모르타르의 품질특성을 검토하고자 하였으며, 그 결과는 다음과 같다. SF 치환의 경우 Plain에 비해 유동성이 저하되었으나 강도발현에는 우수한 경향을 나타내었으며, CKD와 SP의 사용량 증가에 따라 각각 유동성 및 압축강도가 증가하였다. 유동성 증진 및 초기강도 향상에 각 결합재의 고유입도분포와 높은 상관관계를 가지는데, 이는 입자사이즈가 큰 BS 및 FA 입자사이에 입자가 작은 CKD, SF 및 SP가 공극을 충전하여 연속입도곡선을 형성하는 것에 기인한 것으로 사료된다. BS 기반 조기강도 증진용 알칼리 활성 모르타르의 초기강도 향상 및 유동성 개선을 위해서는 고유의 입도분포를 가진 기타 결합재를 치환 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.