

시멘트·콘크리트 제반물성에 미치는 슬래그의 영향

정해문* · 김창범 · 박춘근 · 조동원

(쌍용중앙연구소)

1. 서 론

시멘트 산업은 에너지 다소비, CO₂ 다배출 산업으로서 에너지 소비와 환경부담을 줄이려는 노력과 연구가 계속되고 있다. 시멘트 제조에 있어 에너지 절감과 환경보호 측면에의 방안으로는 크게 첫째, 제조공정에서의 장치개선과 공정개발, 둘째 폐부산 자원의 연료, 원료 및 첨가재료의 적극적 활용, 셋째 CO₂ 배출이 적은 저온 소성클링커의 개발 등을 들 수 있겠다. 이와같은 연구들은 각부분별로 활발한 연구가 이루어져 그 결실들을 보고 있다. 이중 슬래그, 포졸란, fly ash와 같은 수경성을 갖는 산업 폐·부산물의 활용은 CO₂ 배출 저감으로 인한 환경보호 및 에너지 절약, 폐부산물 사용으로 인한 자원의 recycling과 공해방지 효과 등은 물론, 이를 적절히 혼합할 경우 시멘트 경화체의 내구성 증진, 수화열 감소 등 좋은 특성이 발현된다.

따라서 시멘트 혼합재에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 활발하게 진행되고 있고, 이 결과 상업적으로 수경성 혼합 시멘트가 특수용도는 물론 일반용도로도 사용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 수경성 혼합재중 슬래그를 선택하여 혼합시멘트를 조제하고 이로부터 제조한 시멘트·콘크리트의 제반물성을 검토하여 보았다.

2. 실험

2.1 시 료

실험에 사용한 클링커, 슬래그 및 화학이수석고의 화학성분을 표 1에 나타내었다.

2.2 시멘트 제조

슬래그 첨가수준과 Blaine 변화에 따른 시멘트,

시료의 화학성분

〈표 1〉

시료	Chemical composition(%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig. Loss	free CaO
1종 클링커	21.4	5.7	3.5	64.5	3.6	0.10	0.84	0.1	0.2	0.8
슬래그	33.2	15.8	0.5	43.2	6.3	0.20	0.58	0.2	- 0.2	-
화학이수 석고	4.7	0.6	0.2	35.5	-	0.19	0.03	42.8	15.4	-
시료	Modulus			Mineral composition(%)						
	LSF	SM	IM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			
1종 클링커	94.0	2.33	1.63	56.6	18.7	9.2	10.7			

실험인자 및 수준

<표 2>

인자	수준
슬래그 첨가량 (%)	0, 5, 10, 15
Blaine(cm^2/g)	3200, 3400, 3600

* 클링커 : 동해(1종), SO_3 : 2.1 Wt%(화학)

실험항목

<표 3>

구분	실험항목
시멘트	• 분쇄성, 화학성분, 색도, KS 수화열
모르터	• KS 응결, 압축강도, 안정도, 건조수축
콘크리트	• 응결, 압축강도, 균열시험, 동결융해저항성

모르터 및 콘크리트 물성 변화를 검토하기 위하여 표 2에서와같이 클링커와 슬래그를 pilot batch mill에서 혼합 분쇄하여 시멘트를 제조하였다.

2.3 물성 측정

상기 실험인자 및 수준별로 제조한 시멘트에 대하여 표 3에 나타난 바와 같이 시험을 실시하였다.

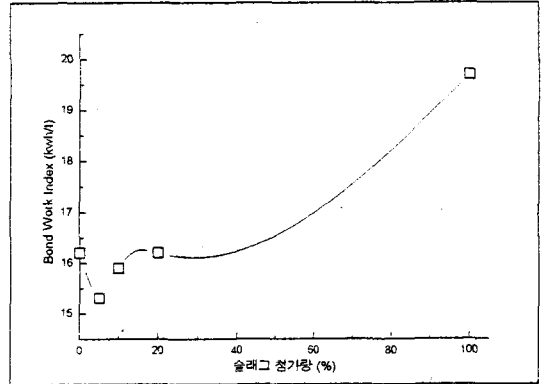


그림 1. 슬래그 함량변화에 따른 분쇄성 변화

3. 실험결과

3.1 슬래그 첨가시 분쇄성

슬래그를 함량별로 첨가하여 분쇄시 Bond 방법에 의한 분쇄성 실험결과를 그림 1에 나타내었다. 슬래그 자체의 분쇄성은 시멘트 클링커보다 불량한데, 이는 슬래그가 유리질로 구성되어 있기 때문이다. 그러나 클링커와 혼합분쇄시 슬래그 첨가량 15%까지는

조제 시멘트의 화학성분

<표 4>

시료 *	Chemical composition(%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig. Loss	free CaO
Slag-0-3200	20.2	5.5	3.3	62.6	3.6	0.11	0.84	2.4	1.2	1.0
Slag-0-3400	20.2	5.6	3.3	62.7	3.6	0.10	0.83	2.3	1.2	0.9
Slag-0-3600	20.2	5.6	3.3	63.0	3.4	0.11	0.84	2.3	1.1	0.9
Slag-5-3200	20.8	5.9	3.2	61.8	3.6	0.11	0.82	2.4	1.2	1.0
Slag-5-3400	20.7	6.0	3.2	61.9	3.6	0.11	0.81	2.3	1.2	1.1
Slag-5-3600	20.8	6.0	3.2	61.8	3.6	0.11	0.81	2.4	1.1	1.0
Slag-10-3200	21.3	6.4	3.1	61.9	3.7	0.11	0.81	2.4	1.1	0.9
Slag-10-3400	21.4	6.5	3.1	60.6	3.7	0.12	0.80	2.4	1.2	0.8
Slag-10-3600	21.4	6.5	3.1	60.7	3.7	0.11	0.80	2.4	1.1	0.9
Slag-15-3200	21.8	6.8	3.0	59.6	4.0	0.11	0.78	2.4	1.3	0.8
Slag-15-3400	21.8	6.8	3.0	59.5	4.0	0.12	0.77	2.4	1.3	0.8
Slag-15-3600	22.0	6.8	3.0	59.8	3.8	0.12	0.78	2.5	1.2	0.8

* 시료표기 : 슬래그-슬래그함량(wt. %)-Blaine(cm^2/g)

분쇄성이 다소 향상되고 있는 것으로 나타나고 있는데, 이는 미분쇄시 슬래그가 ball 및 liner coating을 감소시키는 효과가 있기 때문으로 생각된다.

실험밀 분쇄에서 Blaine 도달에 필요한 분쇄 소요 시간은 본 실험범위에서 슬래그 첨가량에 따라 별 차이가 없고 경향성도 없는 것으로 보아 슬래그 첨가량에 따른 분쇄성 저하는 본 실험범위에서는 없는 것으로 보인다.

3.2 시멘트 화학성분

2.1항의 시료를 사용하여 슬래그 첨가수준별 및 Blaine 수준별로 제조한 시멘트의 화학성분을 표 4에 나타내었다.

슬래그 첨가량의 증가에 따라 시멘트의 화학성분상 CaO, 알칼리(K₂O)가 감소하며 SiO₂와 MgO는 미량 증가되는 경향을 보이고 있다. 다만 슬래그 중의 MgO는 고용광물(Akermanite: C₂MS₂)의 형태로 존재하므로 MgO 함량 증가에 따른 안정도 문제는 없을 것으로 판단된다. (표 7참조)

3.3 시멘트 색도

조제 시멘트 색도

〈표 5〉

시 료	Color *		
	L	a	b
Slag-0-3200	53.5	0	6.8
Slag-0-3400	54.5	0	6.9
Slag-0-3600	55.0	0	7.2
Slag-5-3200	54.1	-0.1	6.9
Slag-5-3400	54.8	-0.1	6.9
Slag-5-3600	55.4	-0.1	7.0
Slag-10-3200	55.7	0	7.0
Slag-10-3400	55.9	0	7.0
Slag-10-3600	56.2	-0.1	7.1
Slag-15-3200	55.5	0	6.8
Slag-15-3400	56.2	0.1	6.9
Slag-15-3600	57.2	0.2	7.2

* L : Lightness, a : (+) red (-) green b : (+) yellow (-) blue

조제 시멘트 KS 수화열

〈표 6〉

시 료	KS 수화열(cal/g)	
	7일	28일
Slag-0-3200	78.1	94.3
Slag-0-3400	81.0	95.7
Slag-0-3600	85.6	96.6
Slag-5-3200	77.0	93.2
Slag-5-3400	80.3	94.4
Slag-5-3600	82.3	96.8
Slag-10-3200	75.8	92.1
Slag-10-3400	80.1	94.0
Slag-10-3600	78.5	97.7
Slag-15-3200	69.2	85.9
Slag-15-3400	76.3	93.7
Slag-15-3600	78.3	95.1

슬래그 첨가량 증가시 L값이 다소 상승되며, Blaine 증가시에도 L값이 상승되는 경향을 보이고 있다. a값과 b값은 슬래그 첨가량에 별 영향을 받고 있지 않으나, Blaine이 증가함에 따라 b값은 증가하는 경향을 나타내고 있다(표 5).

3.4 시멘트 KS 수화열

슬래그 첨가량 증가에 따라서 수화발열량이 감소되고, Blaine 비표면적 증가시 수화열이 상승되는 경향을 볼 수 있다(표 6).

3.5 모르터 물리성능

3.5.1 응결 및 안정도

응결시간은 슬래그 첨가함량 증가시 초기 수화반응성의 감소로 인하여 지연되는 경향이 나타나고 있으나, Blaine 비표면적 증가에 따라 응결시간이 짧아지는 경향을 보이고 있으며, 주도 물량은 슬래그 첨가량이 많아짐에 따라 Blaine이 상승함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 안정도는 변화폭은 적으나 슬

조제 시멘트 모르터 물리성능

〈표 7〉

시 료	응결(Gillmore)			건조수축($\times 10^4$)			KS 압축강도 (kg/cm ²)				안정도 (%)	
	W/C	초결(분)	종결(시간)	1주	2주	4주	flow(%)	1일	3일	7일		28일
Slag-0-3200	22.6	275	7:20	-5.55	-8.11	-10.20	112.5	103	219	315	412	0.09
Slag-0-3400	22.8	270	7:10	-5.73	-8.17	-10.31	113.2	106	225	329	418	0.10
Slag-0-3600	23.0	265	7:00	-6.21	-8.84	-11.03	110.0	117	236	335	419	0.07
Slag-5-3200	23.0	282	7:30	-5.67	-8.28	-10.30	113.8	97	211	318	401	0.08
Slag-5-3400	23.0	280	7:20	-6.06	-8.31	-10.52	112.0	102	209	324	408	0.07
Slag-5-3600	23.0	275	7:20	-6.36	-9.12	-11.18	112.1	109	228	329	410	0.06
Slag-10-3200	23.0	285	7:30	-5.68	-8.30	-10.32	115.0	94	201	310	397	0.05
Slag-10-3400	23.0	283	7:20	-6.06	-8.88	-11.18	113.8	99	207	315	403	0.05
Slag-10-3600	23.0	280	7:15	-6.44	-9.19	-11.19	113.0	104	222	319	405	0.05
Slag-15-3200	23.0	292	7:40	-5.73	-8.31	-10.35	115.0	80	186	295	385	0.05
Slag-15-3400	23.4	290	7:40	-6.06	-8.92	-10.92	113.9	85	195	303	398	0.06
Slag-15-3600	23.8	285	7:30	-6.53	-9.28	-11.26	113.5	92	209	313	406	0.05

래그 첨가량 증가에 따라 향상되는 경향을 보이고 있다.

3.5.2 건조수축

슬래그 첨가량에 대한 모르터의 건조수축을 변화(그림 4)는 슬래그 첨가량 증가에 따라 변화폭은 작으나 건조수축율이 증가하는 경향을 보이는데 그 변

화폭을 볼때 본 실험 범위내에서는 무첨가 경우와 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 다만 슬래그의 잠재수경성으로 인해 초기보다 후기에 무첨가경우 보다 건조수축이 더욱 작아 질 것이라 예상할 수 있다.

3.5.3 압축강도

KS방법(W/C=0.485)에 의거 모르터 시험결과

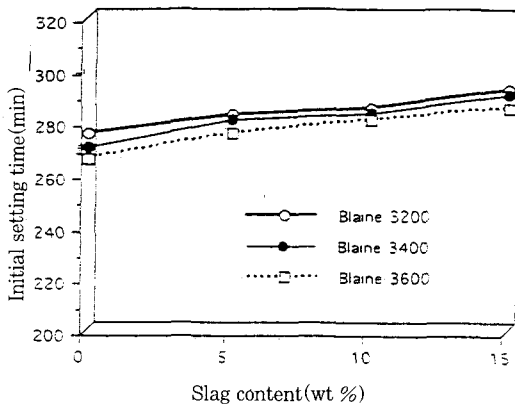


그림 2. 슬래그 함량에 따른 응결시간 변화(초결)

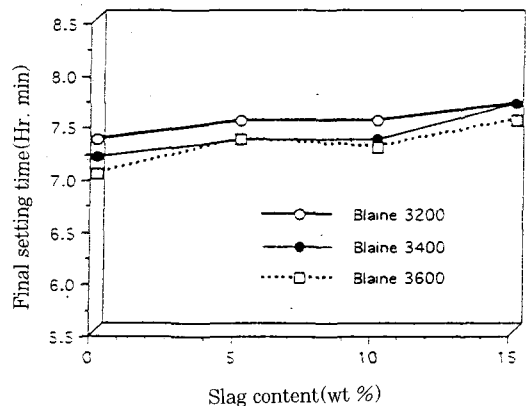


그림 3. 슬래그 함량에 따른 응결시간 변화(종결)

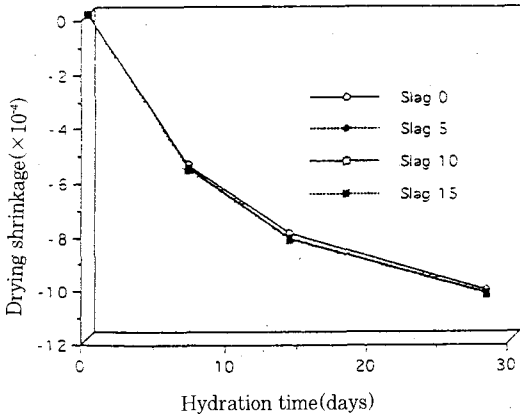


그림 4. 슬래그 첨가량 변화에 따른 건조수축율

flow는 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 슬래그가 유리질로 되어 있어 표면특성상 시멘트와는 달리 매끄럽고, 수화활성이 시멘트에 비해 낮으므로 수화초기에 입자 표면에 수화생성물이 거의 생기지 않기 때문에 작업성이 향상되는 것으로 보인다.

모르터 압축강도는 슬래그 첨가량 증가에 따라 28일 재령까지는 소폭으로 감소하는 경향을 보이는데 이는 슬래그의 수화활성이 시멘트 보다 떨어지기 때문이나, 슬래그의 잠재수경성으로 인해 강도발현 양상은 재령이 길어질수록 강도 저하율이 둔화된다. 슬래그 첨가량 증가에 따른 강도저하는 Blaine 상승으로 인해 보상되며 특히 그 경향은 슬래그 첨가량이 많을수록 두드러진다. 이는 혼합분쇄시 슬래그의 분쇄성이 시멘트 클링커보다 떨어지기 때문에 Blaine이 상승되면 기초시멘트가 더욱 미분이 되어 강도 특성이 향상되기 때문이라고 생각된다.

3.6 콘크리트 물리성능

3.6.1 콘크리트 배합

슬래그 첨가량 및 Blaine 수준별로 제조한 슬래그 혼합 시멘트의 콘크리트 물성을 검토하기 위하여 단위 시멘트량을 330kg/m³, S/A를 40%로 하여 공기량 4±1%, Slump가 12±1cm 수준이 되도록 배합하였으며 배합 설계와 물성 측정결과는 표 8에 나타내었

다.

슬래그 함량이 증가함에 따라 단위수량이 감소하는데, 이러한 특성은 앞서 모르터 플로우 실험에서 언급한 바와 같이 슬래그의 표면특성과 낮은 수화활성 때문이다.

또한 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 연행공기량이 감소하는데 이 또한 슬래그 표면이 매끄러워 기포가 소멸되고 슬래그 수화활성이 낮아 수화초기에 수화물생성이 적으며, 슬래그가 첨가된 시멘트 페이스트의 pH와 표면장력 등이 공기연행에 적합하지 않기 때문으로 이와 같은 경향은 슬래그 첨가량과 Blaine이 증가함에 따라 함께 커지는 경향이 있다고 알려져 있다.

한편 슬래그는 기초시멘트에 비해 비중이 작으므로 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 단위시멘트의 부피가 증가하고, 단위수량이 감소하므로 골재량이 증

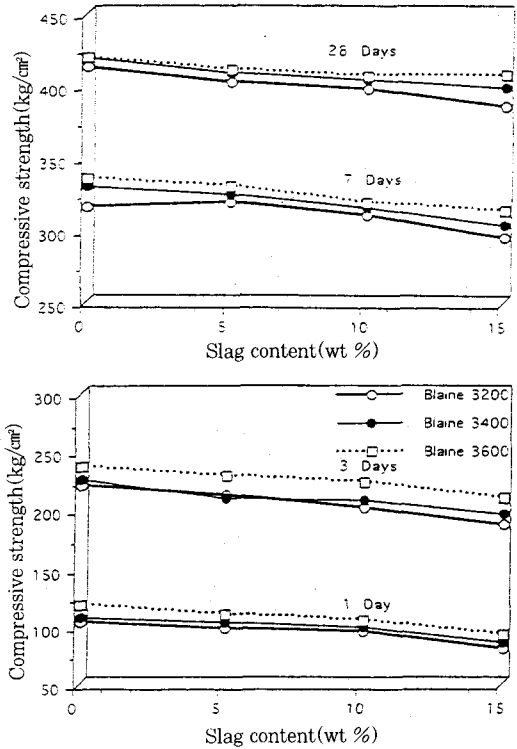


그림 5. 슬래그 첨가 수준별 모르터 압축강도 변화

조제 시멘트 콘크리트 물리성능

〈표 7〉

(25-210-12 배합)

시 료	S/A (%)	단위재료량 (kg/m ³)					Slump (cm)	Air량 (%)	압축강도 (kg/cm ²)			콘크리트** 균열시기 (일)
		C	W	S	G	AE 감수제(%)*			3일	7일	28일	
Slag-0-3200	40	330	188	689	1081	0.11	12.7	3.1	155	238	310	22
Slag-0-3400	40	330	188	689	1081	0.12	11.4	3.1	169	259	323	23
Slag-0-3600	40	330	186	690	1084	0.12	12.5	3.2	166	258	325	21
Slag-5-3200	40	330	186	690	1084	0.14	13.0	3.6	153	237	309	22
Slag-5-3400	40	330	186	690	1084	0.14	12.4	3.7	150	251	320	22
Slag-5-3600	40	330	186	690	1084	0.14	12.2	3.5	167	252	325	20
Slag-10-3200	40	330	182	682	1087	0.14	12.4	4.3	146	229	311	21
Slag-10-3400	40	330	182	692	1087	0.145	11.5	4.0	148	252	321	21
Slag-10-3600	40	330	182	692	1087	0.145	12.6	3.5	169	256	320	19
Slag-15-3200	40	330	182	682	1087	0.145	11.7	3.7	138	226	308	21
Slag-15-3400	40	330	182	692	1087	0.145	11.9	3.7	149	239	314	20
Slag-15-3600	40	330	182	692	1087	0.145	12.1	3.4	162	255	322	19

* AE 감수제 : NEOMIX C/M ** 철근구속에 의한 콘크리트 균열 시기 측정(오차범위 ±2일)

가했음을 알 수 있다.

3.6.2 압축강도

슬래그 혼합시멘트의 콘크리트 압축강도 측정결과(그림 6) 슬래그 첨가량 증가에 따라 3일 강도는 다소 저하되는 현상을 보이고 있지만 7일, 28일 압축강도 발현정도는 본 실험수준 내에서 무첨가 대비 동등한 수준임을 알 수 있다. 이는 동일 W/C의 모르터 실험과는 달리 콘크리트 실험에서는 단위수량 감소로 인해 강도저하는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 또한 모르터 실험과 마찬가지로 Blaine 상승에 의해 강도 저하는 보상이 된다.

3.6.3 균열시험

구속 균열판을 사용하여 슬래그 혼합 시멘트의 균열시기를 측정한 결과(그림 7) 균열 시작 시기는 슬래그 첨가시 무첨가 대비 ±2일 내의 수준으로 나타났는데 이 결과로 보아 슬래그 함량 및 Blaine 증가에 따른 영향은 큰 차이가 없는 것으로 보인다.

3.6.4 동결융해저항성

슬래그 혼합 시멘트의 동결융해저항성을 판단하

기 위하여 3.6.1 항의 배합조건에서 각 수준별 제조 시멘트의 동결융해저항성 측정결과는 그림 8과 같다.

일반적으로 150 cycle 까지의 동결융해 측정결과 80% 이상이면 내구성에 이상이 없는 것으로 판단되므로 150cycle까지의 동결융해저항성의 측정결과 슬래그 함량의 영향은 본 실험수준내에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

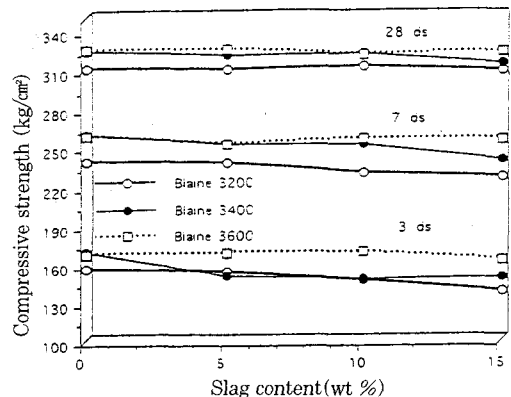


그림 6. 슬래그 첨가수준별 콘크리트 압축강도 변화

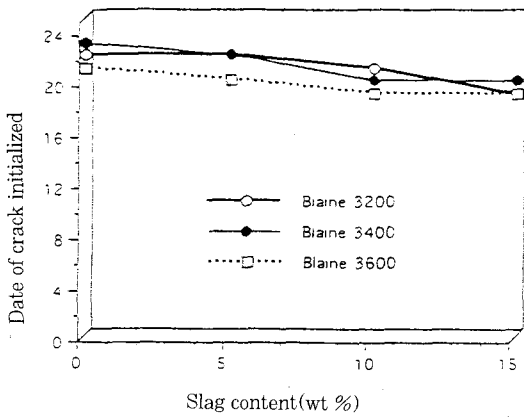


그림 7. 슬래그 첨가수준별 콘크리트 균열 변화

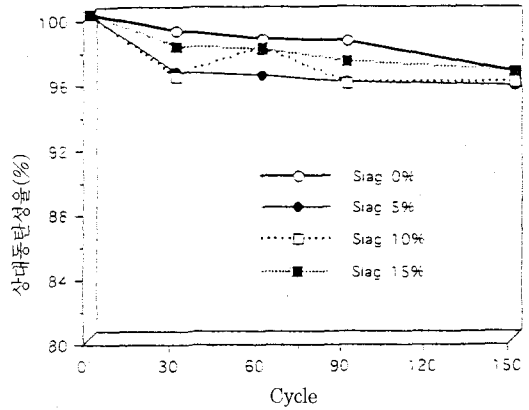


그림 8. 슬래그 첨가수준별 콘크리트 동결융해저항성 변화

4. 결과종합

포틀랜드시멘트 1종 클링커에 고로 수쇄 슬래그 함량을 15%까지 첨가하여 Blaine비표면적 3200~3600cm²/g으로 시멘트를 제조하여 제반물성을 검토한 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) 슬래그 첨가량과 Blaine 증가함에 따라 밝기가 다소 상승하는 경향이며, 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 수화열은 감소하고, Blaine 증가에 따라 수화열은 상승한다.

2) 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 응결지연 현상이 나타나고, 건조수축은 약간 증가하지만 그 변화폭을 볼 때 무첨가경우와 대비해 유사한 수준이고, 안정도는 다소 향상되는 경향을 보인다.

3) 모르타의 경우 슬래그의 함량이 증가함에 따라 플로우 값이 증가하는 경향을 보이고, 압축강도의 경우에는 슬래그 첨가량이 증가하면 28일 재령까지 소폭 감소하는 경향을 보이나 재령이 길어질수록 무첨가 대비 강도저하율이 둔화되며, Blaine이 높을수록 강도가 상승하는 경향을 보인다.

4) 콘크리트의 경우 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 단위수량이 감소하며 이로인해 슬래그 첨가량에 따른 압축강도의 저하는 거의 없고, Blaine 상승에 따라 강도 상승경향이 나타난다.

5) 균열시기와 동결융해저항성의 경우 슬래그 무첨가 경우와 대비해 별 차이가 없는 것으로 판단된다.

5. 결 론

슬래그 첨가에 따른 시멘트 및 콘크리트 물성검토 결과 모르타의 경우 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 플로우 값이 증가하고 안정도는 향상되는 경향은 보이지만, 압축강도는 슬래그 첨가량 증가에 따라 다소 저하하는 경향이거나 Blaine 상승에 따라 강도 저하가 보상된다.

콘크리트의 경우에는 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 단위수량이 감소하여 본실험 범위인 15%까지 강도의 하락이 없는 것으로 나타났으며, 그외 동결융해저항성 및 균열특성에서도 무첨가 대비 유사한 수준으로 나타났다.