

## 슬래그-무수석고체 미분말을 이용한 고강도콘크리트 특성

정중익\* 고승룡 윤용식  
 <한일시멘트 중앙연구소>

### 1. 서 론

최근 국내에서도 콘크리트 구조물의 대형화, 고층화, 경량화 등으로 인하여 건축 및 토목 분야에서 고강도콘크리트의 사용이 증가되고 있다. 콘크리트의 고강도화 방법<sup>1,2)</sup>에는 결합재 자체를 고강도화하는 방법과 결합재와 골재의 계면결합력을 증대시키는 방법이 있으며, 전자의 경우는 결합재 자체의 고강도화를 목적으로 초미립자의 충전, 수화물의 증가, 물/시멘트비 저감 등으로 공극율을 감소시켜 고강도화하는 방법이고, 후자의 경우는 결합재와 골재의 계면결합력을 증대시키기 위해 폴리머-혼화제 등을 이용하여 시멘트 페이스트 자체의 접착성을 개선시켜 고강도화하는 방법이다. 결합재 자체의 고강도화를 위한 초미립자 재료로서는 Silica fume, Metakaolin 등의 고강도 혼합재가 있으나, 거의 수입에 의존하고 있고 고가이기 때문에 부담이 되고 있는 실정이다. 그래서 산업폐기물인 고로수쇄 슬래그와 이를 자극시키기 위해서 불산정제 무수석고를 혼합하여, Blaine 8000cm<sup>2</sup>/g 정도의 미분말을 제조하여 시멘트 페이스트 및 콘크리트에 적용하여 특성을 알아보았다.

### 2. 실 험

#### 2.1. 원 료

슬래그와 무수석고를 Blaine 8000cm<sup>2</sup>/g 정도로 혼합 분쇄한 혼합재(이하 슬래그-무수석고체 미분말 표기)와 시멘트, 슬래그, 무수석고의 화학성분을 표1에 나타내었으며, 잔골재 및 굵은 골재의 물성을 표2에 나타내었다. 그리고 본 실험에서는 유동성 향상 및 W/B 저감을 위해서 나프탈렌계 고성능AE감수제를 사용하였다.

표1. 화학성분

구 분	화학성분(wt%)								비 고
	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>	LOI	SUM	
시멘트	21.21	5.17	3.34	62.72	2.41	2.34	1.20	98.40	3489cm <sup>3</sup> /g
슬래그	33.80	15.26	1.36	41.78	6.65	0.06	-1.37	97.54	고로수쇄
무수석고	0.84	0.47	0.21	40.38	0.21	55.07	1.16	98.33	불산(Ⅱ형)
s+a	26.72	13.97	0.93	41.35	3.83	11.45	0.11	98.44	7983cm <sup>3</sup> /g

주) s+a : 슬래그-무수석고계 미분말

표2. 골재의 물성

구 분	굵은 골재 최대치수	비 중	조립률	비 고
잔골재	-	2.58	2.71	강사
굵은 골재	20 mm 골재	2.70	6.70	쇄석

## 2.2. 콘크리트 혼합방법

콘크리트 믹싱은 강제식 혼합기를 사용하여 잔골재, 굵은 골재, 시멘트, 슬래그-무수석고계 미분말을 혼합기에 넣고 30초간 건비빔한 후, 혼화제와 물을 투입하고 90초간 1차 혼합하였다. 그후 30초간 정지하여 혼합기에 붙은 콘크리트를 긁어내린 후, 90초간 2차 혼합하였다. 본 실험은 슬래그-무수석고계 미분말을 사용하여 고강도뿐만 아니라 고유동 특성을 위해서, Slump 25±3cm, Slumpflow 60±5cm, 공기량 3±1%를 균지 않은 콘크리트의 물성 목표치로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 슬래그-무수석고계 미분말을 적용한 시멘트 페이스트의 특성

그림1은 슬래그-무수석고계 미분말을 시멘트에 0~50%까지 치환첨가한 경화체 (W/B=30%)의 재령별 XRD 분석 DATA의  $\text{Ca(OH)}_2$  주피이크( $2\theta \approx 18^\circ$ ) Intensities를 나타낸 것이다. 치환첨가량이 증가할수록  $\text{Ca(OH)}_2$ 가 감소하는 원인은 먼저 단위 시멘트량의 감소에 의한 것과  $\text{Ca(OH)}_2$ 가 슬래그-무수석고계 미분말과 반응하여 C-S-H를 생성하기 때문으로 판단된다. 그림2는 슬래그-무수석고계 미분말을 시멘트에 0~50%까지 치환첨가한 경화체의 재령별 XRD 분석 DATA의 Ettringite( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) 주피이크( $2\theta \approx 9^\circ$ ) Intensities를 나타낸 것이다. 치환첨가량이 증가할수록 Intensities가 증가하는 것은 무수석고의  $\text{SO}_3$  성분이 반응하여 Ettringite의 생성<sup>3)</sup>에 기여하기 때문으로 판단된다.

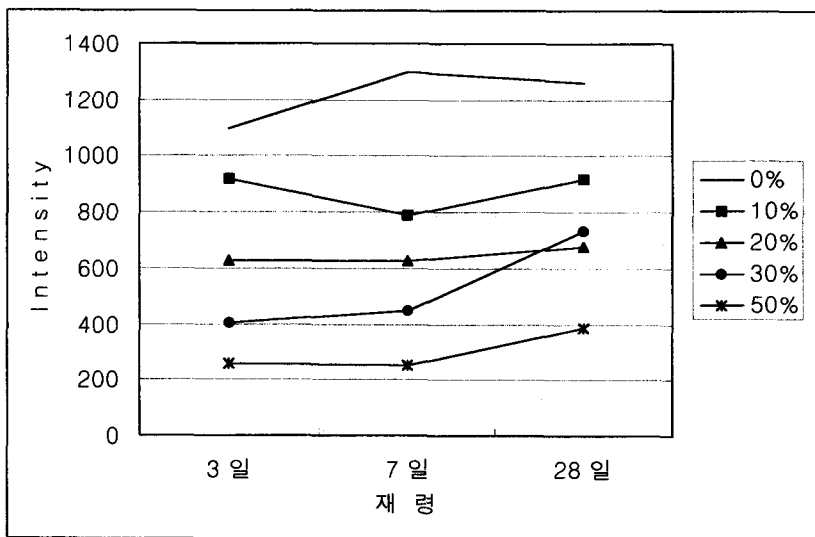


그림 1. 슬래그-무수석고계 미분말 첨가량에 따른  $\text{Ca(OH)}_2$ 의 XRD Intensities ( $2\theta \approx 18^\circ$ )

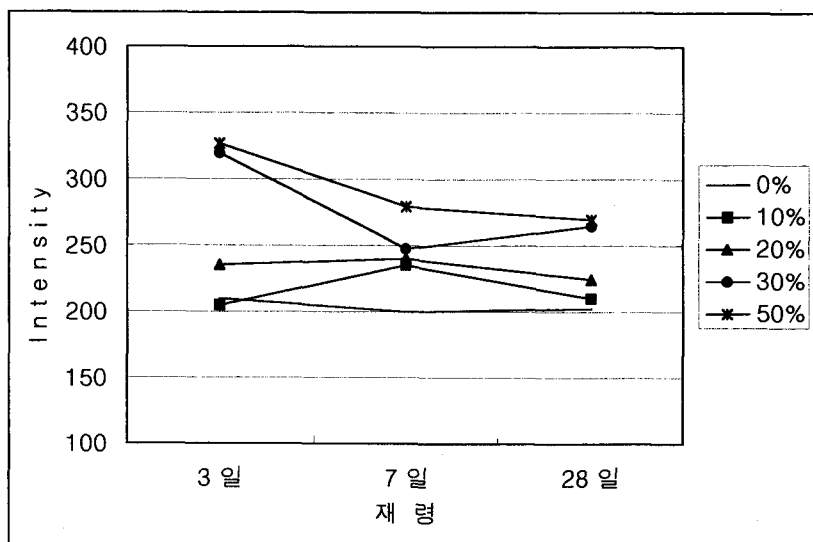
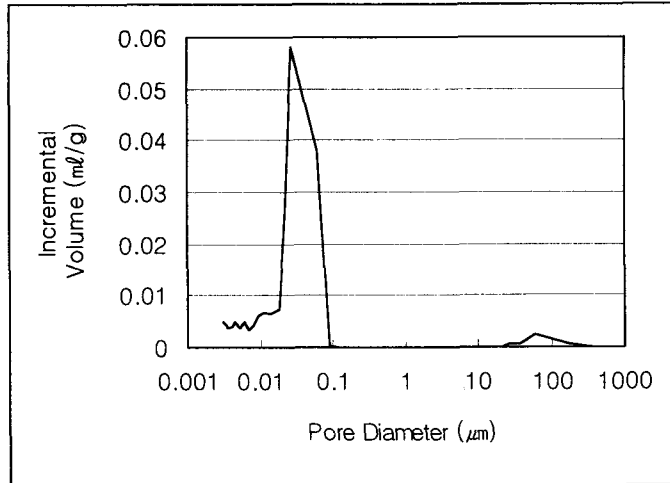
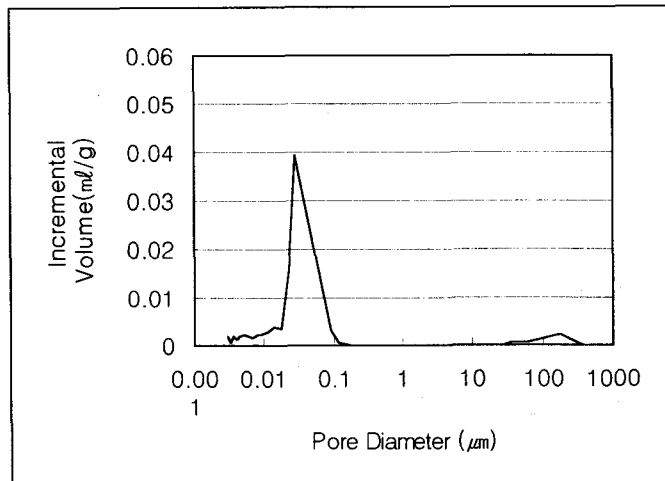


그림2. 슬래그-무수석고계 미분말 첨가량에 따른 Ettringite의 XRD Intensities ( $2\theta \approx 9^\circ$ )

그림3, 4는 시멘트에 슬래그-무수석고계 미분말을 0, 20% 치환첨가한 경화체 (W/B=30%, 재령 28일)의 기공을 분포와 미세구조를 나타낸 것으로, 슬래그-무수석고 미분말을 첨가한 경우 C-S-H와 Ettringite의 생성이 증가되어 페이스트의 공극을 충전시켜 기공율이 작아지는 것으로 나타났다.



(A) 0%

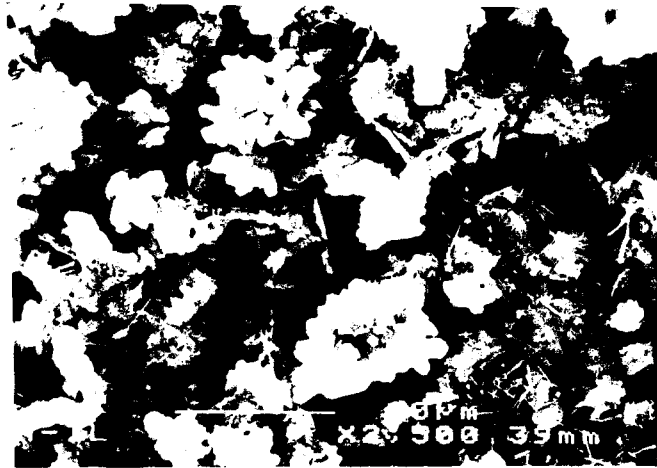


(B) 20%

그림 3. 슬래그-무수석고계 미분말의 치환첨가율에 따른 기공율 분포



(A) 0%



(B) 20%

그림4. 슬래그-무수석고계 미분말의 치환첨가율에 따른 미세구조

그림5는 시멘트에 슬래그-무수석고계 미분말을 0, 20, 40% 치환첨가하여 초기수화 과정의 수화속도를 측정한 것으로, 제1피이크는 Ettringite의 생성, 유리 CaO의 수화와 C<sub>3</sub>S의 표면용해에 의한 것이고, 제2피이크는 C<sub>3</sub>S의 수화에 의한 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> 슬래그-무수석고계 미분말의 첨가량이 많을수록 단위 시멘트량이 적어지기 때문에 초기수화속도가 낮아지는 것으로 나타났으며, 이로 인한 콘크리트의 수화열 저감 효과가 기대된다.

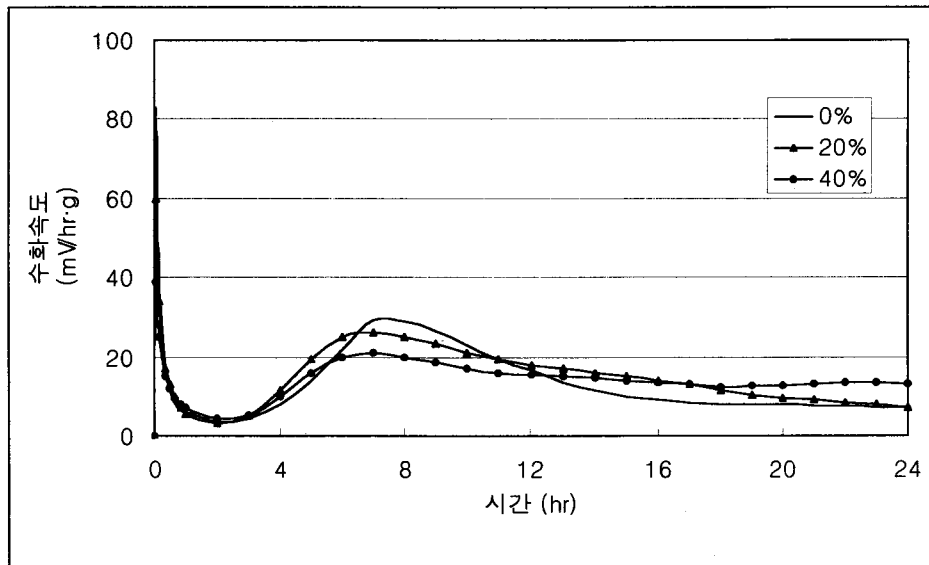


그림 5. 슬래그-무수석고체 미분말의 첨가량에 따른 수화속도 곡선

### 3.2 슬래그-무수석고체 미분말을 적용한 콘크리트의 특성

단위 수량 160, 180kg/m<sup>3</sup>에 대해서 W/B를 26~34%로 증가시키며 전체 Binder에 슬래그-무수석고체 미분말을 20% 치환첨가하였다. 그 배합비 및 물성을 표3에, 압축강도를 그림6에 나타내었다. Slumpflow 60±5cm, Slump 25±3cm, 공기량 3±1% 정도의 물성을 나타내도록 고성능AE감수제의 첨가량과 S/A를 조정하여 실험하였다. 압축강도는 전체적으로 재령 3일에 500kgf/cm<sup>2</sup>을 상회하였으며, 재령 28일에 800kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 강도 발현이 가능하였다.

표3. 단위수량 별 W/B 변화에 따른 배합비 및 물성

구 분	W/B (%)	S/A (%)	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )					Slump (cm)	S-Flow (cm)	공기량 (%)	
			W	C	s+a	S	G				N
160-26	26	39	160	492	123	645	1056	11.08	25	60	1.9
160-28	28	40		457	114	677	1062	10.29	25	61	2.0
160-30	30	41		427	108	706	1064	8.53	25	61	2.3
160-32	32	42		400	100	735	1064	7.00	25	59	2.5
160-34	34	43		377	94	763	1059	7.06	25	63	3.4
180-26	26	41	180	554	139	631	950	10.39	27	65	2.1
180-28	28	42		514	129	664	958	9.64	23	57	2.3
180-30	30	43		480	120	694	964	9.00	26	62	2.4
180-32	32	44		450	113	725	965	8.44	26	65	2.6
180-34	34	45		424	106	754	964	7.00	25	65	3.1

- 주) ① Binder : 시멘트+(s+a)  
 ② Binder에 슬래그-무수석고계 미분말 20% 치환 첨가  
 ③ S-Flow : Slumpflow  
 ④ N : 고성능AE감수제

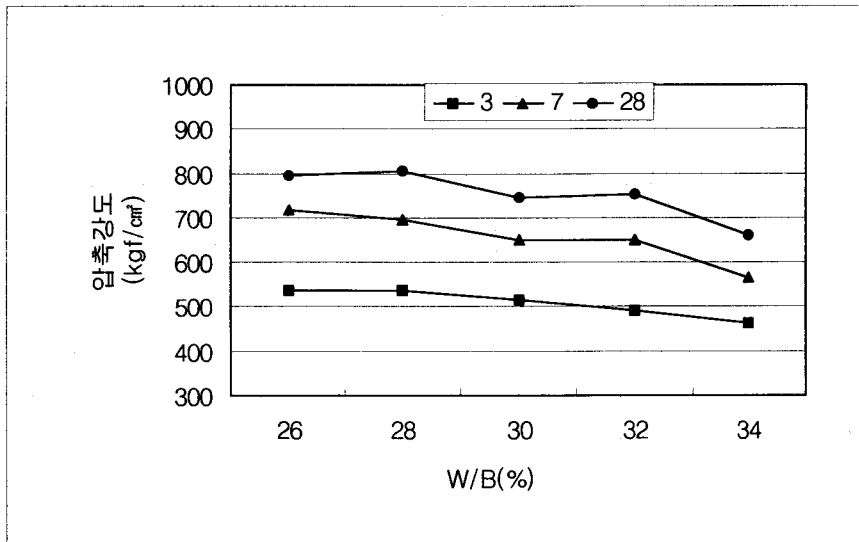
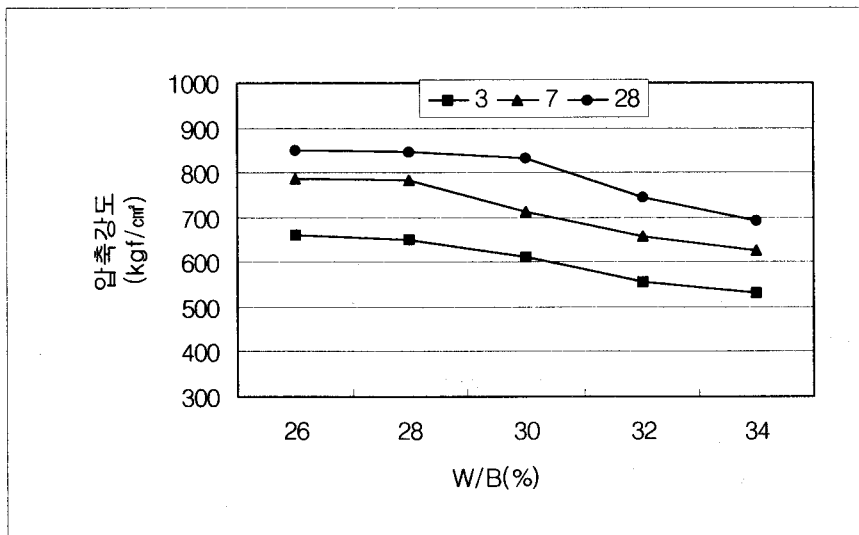
(A)  $W=160\text{kg/m}^3$ (B)  $W=180\text{kg/m}^3$ 

그림6. 단위수량별 재령에 따른 압축강도



슬래그-무수석고계 미분말을 첨가량에 따른 영향을 알아보기 위하여, 단위수량 160kg/m<sup>3</sup>, W/B=34%, S/A=43%로 고정하고, 첨가량을 0, 10, 20, 30%로 증가시켜서 실험하였으며, 그 물성을 표4에 나타내었다. 첨가량이 증가함에 따라, Slump와 Slumpflow가 증가하여 작업성이 향상되는 경향을 나타냈다. 무첨가에 비해 첨가시 높은 압축강도를 발현하였으며, 3일 압축강도는 20% 첨가 까지는 증가하지만, 30% 첨가할 경우는 20% 첨가에 비해 30kgf/cm<sup>2</sup> 정도 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 28일 압축강도는 첨가량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈다.

표4. 슬래그-무수석고계 미분말 첨가량에 따른 물성

구 분	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			Slump (cm)	S-Flow (cm)	공기량 (%)	비 고
	3일	7일	28일				
0%	339	411	498	19	44	2.8	W=160kg/m <sup>3</sup> W/B=34% S/A=43%
10%	404	465	573	23	55	3.0	
20%	481	585	647	25	58	3.2	
30%	452	601	688	26	60	3.1	

단위수량 180kg/m<sup>3</sup>, W/B=32%, S/A=44%의 배합비로 슬래그-무수석고계 미분말을 0, 20, 40% 치환첨가하여, 대기온도 35°C에서 50cm×50cm×50cm의 몰드 중앙내부에서 수화온도를 측정하여 그림7에 나타내었다. 첨가량이 증가할수록 최고수화온도가 낮아지고 온도상승 기울기가 작아지는 경향을 나타내며 최고온도에 도달하는 시간이 늦어지는 경향을 나타냈다. 이것은 첨가량이 증가할수록 단위시멘트량이 상대적으로 적어지고 적은 단위시멘트량 대한 혼화제의 지연효과가 커지기 때문으로 사료된다. 일반적으로 콘크리트를 고강도화함에 따라 단위 시멘트량이 증가되어, 시멘트의 급격한 수화열에 의해 콘크리트 부재의 열응력이 발생되어 균열이 발생된다. 그러나 슬래그-무수석고계 미분말을 첨가할 경우 초기양생시에 수화에 의한 콘크리트의 급격한 온도상승을 방지하므로, 콘크리트의 균열 발생을 억제할 수 있을 것이다.

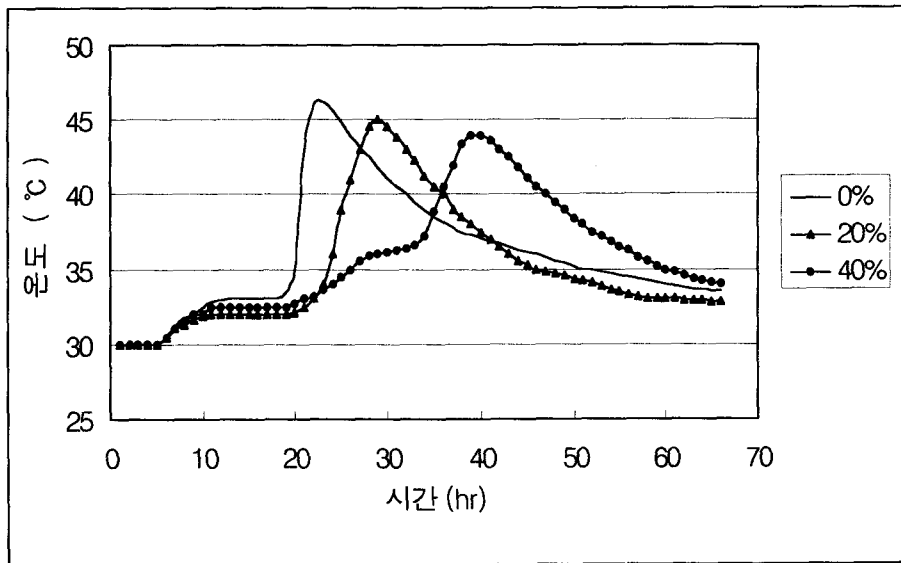


그림7. 슬래그-무수석고체 미분말의 첨가량에 따른 수화온도

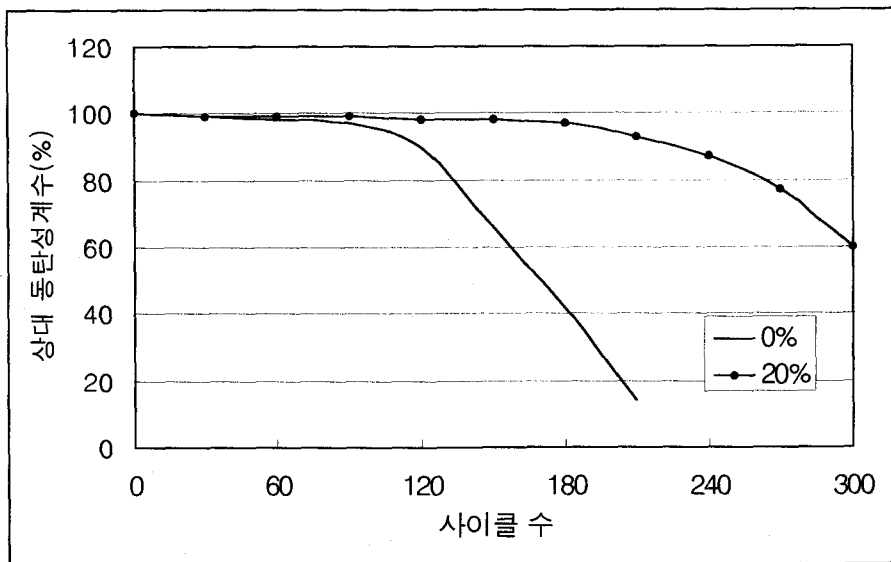


그림8. 슬래그-무수석고체 미분말을 첨가한 경우의 상대 동탄성계수

슬래그-무수석고계 미분말을 0, 20% 적용한 콘크리트에 대한 동결융해 내구성을 알아보기 위해 상대 동탄성계수를 측정하여 그림3에 나타내었다. 물이 동결하면 9%의 체적팽창이 생겨 공극안의 물이 얼면 부피팽창압력이 발생하고 일정 압력 이상이 되면 콘크리트 표면이 파괴된다.<sup>5)</sup> 슬래그-무수석고계 미분말을 20% 첨가한 콘크리트가 무첨가에 비해 동결융해저항성이 우수하게 나타났다. 이것은 에트링자이트와 C-S-H 수화물의 다량 생성으로 인하여 콘크리트 내부조직이 치밀해지고, 에트링자이트가 동결융해의 주원인인 자유수를  $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  형태로 물분자를 고정하기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

슬래그-무수석고계 미분말을 적용하여, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 슬래그-무수석고계 미분말을 시멘트에 치환하면, C-S-H 수화물 및 Ettringite의 생성량을 증대시키고, 페이스트의 공극을 감소시킨다. 이런 효과에 의해서 고강도 발현이 가능하였다.

2) 슬래그-무수석고계 미분말을 결합재 대비 20% 치환첨가하여 800kgf/cm<sup>2</sup>의 고강도콘크리트 제조가 가능하였다. 그리고 30%까지 첨가량이 증가할수록 28일 압축강도가 증진되었다.

3) 슬래그-무수석고계 미분말을 적용한 콘크리트의 Slump와 Slumpflow는 각각 25cm와 60cm 정도로 유동성이 우수하였다.

4) 슬래그-무수석고계 혼합재의 치환첨가량이 증가할수록 수화온도가 낮아졌으며, 시멘트의 급격한 수화열에 의한 콘크리트 균열을 억제할 것이다. 그리고 수화물 생성에 의해 콘크리트 조직이 치밀해져 동결융해내구성이 향상되었다.

#### 【참고 문헌】

- 1) 大濱嘉顔 “手段をせばここまて高强度になる”, セメント・コンクリート, No.546, 64~75 (1992)
- 2) 寺村悟, 坂井悦郎, “高强度化のための混和材の開発”, セメント・コンクリート, No.546, 34~40 (1992)
- 3) H. El-Didamony, A.S. Taha, “The Role of CaSO<sub>4</sub> Content in the Hardening of Slag Rich Cement”, ZEMENT-KALK-GIPS, No.6/83, 152, (1983)
- 4) 荒井康夫 “セメントの材料化学”, 大日本圖書株式會社, Japan, 156~158, (1984)
- 5) 安谷孝一, 西澤記昭, “凍害”, 技報堂出版, 東京, 日本, 23~28 (1988)