

# 고로슬래그 미분말의 콘크리트용 혼화재로서의 적용성

김 상 규

〈대한주택공사 주택연구소 책임연구원, 공학박사〉

김 형 래

〈대한주택공사 주택연구소 연구원, 공학석사〉

최 진 만

〈대한주택공사 주택연구소 연구원, 공학석사〉

- |                    |                   |
|--------------------|-------------------|
| 1. 서론              | 4.2 건조수축 및 크리프    |
| 2. 고로슬래그 미분말의 물성평가 | 5. 내구성            |
| 3. 균지않은 콘크리트의 성질   | 5.1 내약품성          |
| 3.1 유동성            | 5.2 내동해성          |
| 3.2 공기연행성          | 5.3 중성화           |
| 3.3 온도특성           | 5.4 알칼리 골재반응 억제효과 |
| 4. 경화 콘크리트의 역학 특성  | 6. 결론             |
| 4.1 강도 특성          |                   |

## 1. 서론

제철용 고로에서 산출되는 고로슬래그는 냉각방법에 의하여 서냉슬래그 및 급냉슬래그로 대별된다. 서냉슬래그라는 것은 용융슬래그를 대기중에 방치하여 공기 혹은 물에 접촉시켜 자연 냉각한 슬래그인데 경질의 결정질이기 때문에 콘크리트용 굵은골재 혹은 도로용 쇄석으로 이용되고 있다. 이와 같은 골재에 관해서는 1977년에 JIS A 5011「콘크리트용 고로

슬래그 조골재」가 제정되었으며, 그것을 기본으로 1978년 5월에는 「고로슬래그 쇄석 콘크리트설계시공지침(안)」이 일본토목학회에서 발간되었다.

한편, 급냉슬래그는 용융슬래그를 물 혹은 공기에 의하여 급냉한 슬래그로서 대부분이 비정질상태를 나타내고 있다. 급냉슬래그를 콘크리트용 잔골재로서 사용하는 것도 충분히 고려할 만하지만(JIS A 5012「콘크리트용 고로슬래그 세골재」를 비롯하여 『고로슬래그 세

골재를 사용한 콘크리트의 설계시공지침(안 참조), 이 급냉슬래그는 반응성이 높기 때문에 최근에는 시멘트 클링커와 혼합분쇄 혹은 분리분쇄한 고로슬래그 시멘트로 이용하기도 하고, 보통포틀랜드시멘트에 5%이내에서 혼합하여 사용하는 방법이 주류를 이루고 있다.

이와 같은 급냉 고로슬래그는 일본에서 '97년에는 연간 약 2,300만톤 정도가 생산되어 고로슬래그 시멘트로서 약 1,600만톤이 제조<sup>(1)</sup>되고 있는데, 이는 전체시멘트 생산량에 18%정도의 비율을 차지하고 있다. 국내에서도 '97년 현재 생산되는 고로슬래그는 약 800만톤 정도에 이르고 있는데, 이 고로슬래그 미분말이나 시멘트는 나중에 설명되는 내구성과 관련하여 장차 그 사용량이 증대될 것으로 생각된다.

그러나, 고로슬래그 시멘트는 혼합되는 급냉고로슬래그(이하 이것을 「수쇄슬래그」라고 함)의 규격을 보면, 약간의 염기도 만이 규정되어 있을뿐 그 이외의 강도특성, 산화마그네슘(MgO) 및 삼산화황(SO<sub>3</sub>) 등은 고로슬래그 시멘트에 규격화되어 있다. 또한, 고로슬래그 시멘트의 종류로서 A, B 및 C는 수쇄슬래그의 혼화율에 의해서만 규격화되어 있다. 이것은, 플라이애쉬의 경우 별도의 규격(JIS A6201)에서 플라이애쉬 시멘트와 같은 형태로 A, B 및 C의 세가지 종류로 분류되어 혼합

하도록 규정하고 있는 것과 대조적이다. 그렇기 때문에 수쇄슬래그를 시멘트원료로 사용하는 경우 및 혼화재로 사용하는 경우를 고려하여 양쪽 모두에 적용시키기 위해서는 품질규격의 검토가 필요하게 된다. 이와 관련하여 일본에서는 고로슬래그 미분말에 대해 JIS A 6206「콘크리트용 고로슬래그미분말( '95)」로 규격화되었고, '96년에는 JIS A 5308「레디믹스트 콘크리트」의 규격이 개정되었는데, 국내에서도 이와 관련한 규격 및 기준에 대한 개정작업이 필요하다고 생각한다.

여기에서는 콘크리트용 혼화재로서의 고로슬래그의 적용성에 대한 검토를 목적으로, 수쇄슬래그를 미분으로 분쇄한 고로슬래그 미분말의 여러 특성에 대하여 검토하고, 또한 이것을 혼화재료로서 이용하는 경우의 콘크리트에 관한 특성에 대하여 지금까지의 연구결과를 토대로 검토하였다.

## 2. 고로슬래그 미분말의 물성평가

고로슬래그 미분말은 포틀랜드 시멘트보다도 밝은 회색의 건조 미분말로 부드러운 조개껍질상의 파단면을 가지고 있는 입방상의 입자형상을 지니고 있다. 일본에서 6개의 제철소에서 생산되는 수쇄슬래그를 고로슬래그 시멘트의 혼화용 재료로서 사용하기 위하여 분쇄

[표 1] 고로슬래그미분말의 물리적성질

제철소	화 학 성 분 (%)													염기도	비중	블레인 (cm <sup>2</sup> /g)	비고
	ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	S	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl				
A	0.15	33.85	14.45	0.42	0.69	41.17	6.49	1.74	1.26	-	0.17	0.28	0.0013	1.835	2.90	4,070	석고첨가
B	0.39	32.37	14.44	0.54	1.26	41.76	5.81	1.95	1.09	0.75	0.22	0.42	0.0018	1.916	2.90	4,350	"
C	0.41	34.69	14.65	0.54	0.83	42.53	5.33	0.03	1.14	0.97	0.24	0.41	0.0041	1.802	2.92	3,860	
D	0.38	34.67	12.83	0.46	1.05	42.05	6.05	0.03	1.70	0.88	0.25	0.81	0.0036	1.757	2.93	3,800	
E	0.006	31.79	14.42	0.58	1.72	41.32	6.29	2.79	0.98	0.80	0.20	0.37	0.0021	1.951	2.92	3,480	석고첨가
F	0.24	33.71	14.70	0.90	0.62	40.49	7.44	0.02	1.42	0.88	0.27	0.37	0.0106	1.858	2.91	3,770	

한 고로슬래그 미분말의 물리적 성질을 [표 1]에 나타낸다.<sup>(2)</sup>

6종류의 고로슬래그 미분말 중에서 3종류의 고로슬래그 미분말에 석고가 첨가되어 있지만, 그 양은 SO<sub>3</sub>로 3%이내였다. 화학성분은 MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Cl 성분은 제철소에 따라 커다란 차이를 나타내고 있는데, MgO 성분에 대해서는 일본의 고로슬래그 제조 조건을 고려하면 장차 10%정도가 상한선이라고 생각된

다.<sup>(3)</sup> [표 1]에서 일반적으로 염기도가 1.85 정도, 비중이 2.90정도, 블레인 비표면적이 4,000cm<sup>2</sup>/g 정도의 고로슬래그 미분말이 제조되는 것을 알수 있다.

다음으로, [표 1]에서 A 및 B 제철소에서 생산되는 수쇄슬래그를 사용하여 제작된 실험용 고로슬래그 미분말의 물리화학적 성질을 [표 2]에 나타낸다.<sup>(2)</sup> [표 2]에 나타난 시료는 비표면적 및 석고 첨가량에 대하여 검토하기 위해

[표 2] 실험에 사용한 고로슬래그 미분말의 물리화학적 성질

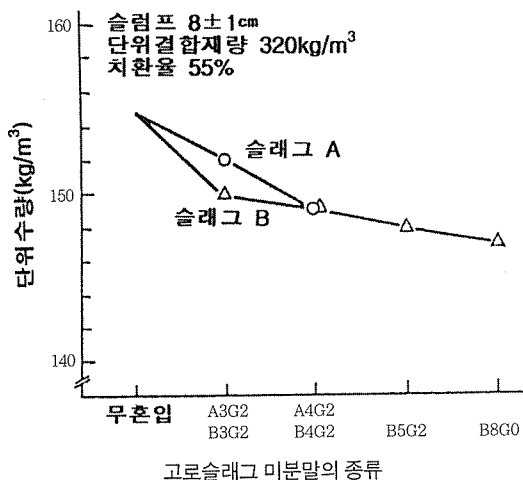
시료	화 학 성 분 (%)									염기도	비중	블레인 (cm <sup>2</sup> /g)	유리화 율(%)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>					3일	7일	28일	91일
A <sub>3</sub> G <sub>0</sub>	-	34.68	13.46	-	0.56	41.53	6.96	0.07	0.28	1.786	2.91	3,280	97.5	82 (41)	149 (53)	339 (81)	464 (92)
A <sub>3</sub> G <sub>2</sub>	-	33.80	13.03	-	0.55	41.94	6.90	1.95	0.25	1.830	2.91	3,160		87 (44)	143 (51)	304 (72)	429 (85)
A <sub>4</sub> G <sub>0</sub>	-	35.03	13.56	0.33	0.57	41.09	7.03	0.11	1.28	1.761	2.91	4,290	97.5	103 (52)	167 (59)	385 (91)	553 (110)
A <sub>4</sub> G <sub>2</sub>	-	34.21	12.56	0.31	0.54	41.12	6.76	1.86	1.24	1.767	2.91	4,300		109 (55)	178 (63)	368 (87)	517 (103)
B <sub>3</sub> G <sub>0</sub>	0.26	33.23	15.09	0.46	0.74	42.49	6.00	0.13	1.07	1.913	2.90	3,290	97.5	167 (84)	240 (85)	426 (101)	605 (120)
B <sub>3</sub> G <sub>2</sub>	0.00	32.17	14.81	0.64	0.65	42.39	5.97	1.58	1.07	1.964	2.89	3,290		162 (82)	210 (75)	412 (98)	522 (522)
B <sub>4</sub> G <sub>0</sub>	0.22	32.41	14.43	0.52	0.65	43.32	5.93	0.54	1.05	1.965	2.90	4,410		164 (83)	275 (98)	489 (116)	644 (128)
B <sub>4</sub> G <sub>3</sub>	0.00	31.82	14.70	0.36	0.61	42.29	5.85	2.35	1.06	1.975	2.89	4,360		156 (78)	252 (89)	474 (113)	615 (122)
B <sub>5</sub> G <sub>0</sub>	0.29	32.45	14.77	0.51	0.61	43.03	5.85	0.70	1.05	1.916	2.90	5,680		194 (98)	349 (124)	529 (126)	644 (128)
B <sub>5</sub> G <sub>2</sub>	0.05	31.81	14.78	0.47	0.71	42.52	5.69	2.05	1.04	1.981	2.89	5,580		193 (98)	318 (113)	535 (127)	597 (116)
B <sub>6</sub> G <sub>0</sub>	0.60	32.95	15.24	0.39	0.65	42.75	5.89	0.51	1.07	1.939	2.90	7,860		236 (117)	435 (154)	611 (145)	606 (120)
단 위 시 멘 트														198 (100)	282 (100)	421 (100)	504 (100)

(주)모르타의 압축강도는 물결합재비50%, 고로슬래그미분말의 치환율을 50%로 하여, 플로우190±10mm가이 되도록 잔 골재량을 결정 한 배합을 사용하였다.( )는 고로슬래그미분말 미혼입 모르타의 압축강도에 대한 비율(%)을 나타낸다.

비표면적을 3,000~8,000cm<sup>2</sup>/g 정도, 석고의 첨가량을 SO<sub>3</sub> 기준으로 0~3% 정도로 변화시켰다. 고로슬래그 미분말 B는 A 및 표1에 나타난 다른 고로슬래그 미분말에 비하여 염기도는 조금 큰 값을 나타내 1.95정도의 값이었다.

[표 2]에서 고로슬래그 미분말 A 및 B를 혼합한 모르터의 압축강도에 관해서는, 고로슬래그 미분말 A 및 B 모두 비표면적의 증가와 함께 재령초기의 압축강도는 증가하고 있지만, 재령 91일에 있어서는 비표면적의 영향은 거의 미치지 않는다.

B8G0의 슬래그를 제외하고는 고로슬래그 미분말을 혼합한 모르터는 무혼입 모르터(기준 모르터)에 비하여 압축강도의 증가량은 크지만, 고로슬래그 A의 경우는 재령 91일에 있어서도 무혼입 모르터에 비해 적은 압축강도를 나타내고 있다. 그러나, 고로슬래그 미분말 B의 경우에 있어서는 재령 28일 이후의 압축강도는 미혼입보다도 커다란 압축강도를 나타내었다. 특히 B8G0의 슬래그는 재령 28일 이후, 압축강도의 증가를 나타내고 있지만 재령 3일에는 무혼입 모르터의 압축강도를 상회하고 있어, 고로슬래그 미분말의 종류 및



(그림 1) 고로슬래그 미분말의 종류와 단위수량의 관계

비표면적에 의한 모르터의 압축강도는 커다란 차이를 나타내고 있다.

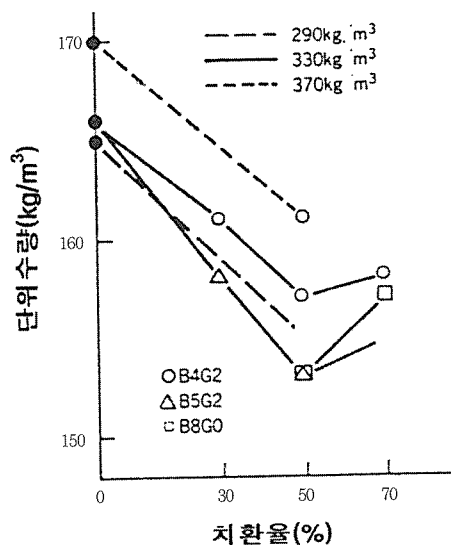
또한, [표 2]에 나타난 고로슬래그 미분말의 시료 범위에서는 석고를 첨가함에 따라 압축강도는 다소 저하하는 경향을 나타내고 있다.

### 3. 굳지 않은 콘크리트의 성질

#### 3.1 유동성

고로슬래그 미분말의 종류와 단위수량의 관계를 [그림 1]에 나타낸다.<sup>(4)</sup> 그림에서 고로슬래그 미분말의 비표면적의 증가와 함께 소요 슬럼프를 얻기 위한 단위수량이 감소하고 있다. 또한, [그림 2]에 고로슬래그 미분말의 치환율과 콘크리트의 단위수량의 관계를 나타내고 있는데<sup>(5)</sup>, 고로슬래그 미분말을 혼입함에 따라 유동성을 증대시키기 위한 단위수량은 치환율의 증가와 함께 감소하고 있다.

그 이유로는, 고로슬래그 미분말의 입자형상 및 표면형상이 좋다는 것과 함께, 고로슬래그 미분말이 지니고 있는 잠재수경성 때문에



(그림 2) 고로슬래그 미분말의 치환율과 단위수량의 관계

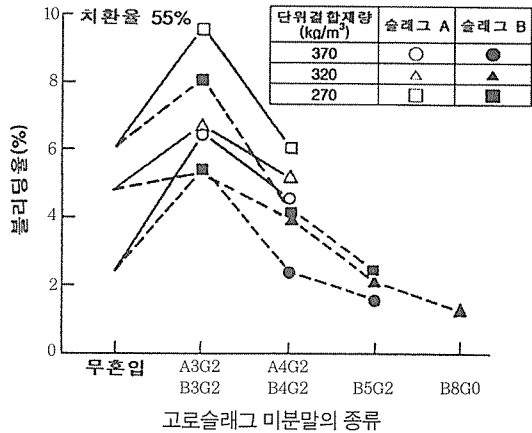
시멘트에 비하여 고로슬래그 미분말의 수화반응이 느리기 때문에 시멘트에 대한 수량이 시멘트 단독의 경우보다 증가하는 것으로 고찰이 가능하다.<sup>(1)</sup>

고로슬래그 미분말의 종류와 블리딩율과의 관계를 [그림 3]에 나타내었다.<sup>(4)</sup> 비표면적 3,000cm<sup>2</sup>/g 정도의 고로슬래그 미분말에서는 무혼입의 경우에 비하여 블리딩율이 증가하며, 비표면적 4,000cm<sup>2</sup>/g 정도 이상인 경우에는 블리딩율이 감소하고 있다. 이것은 시멘트의 비표면적보다도 커다란 비표면적을 지니고 있는 고로슬래그 미분말의 경우, 미분말의 효과보다도 보수능력이 향상하기 때문으로 생각할 수 있다.

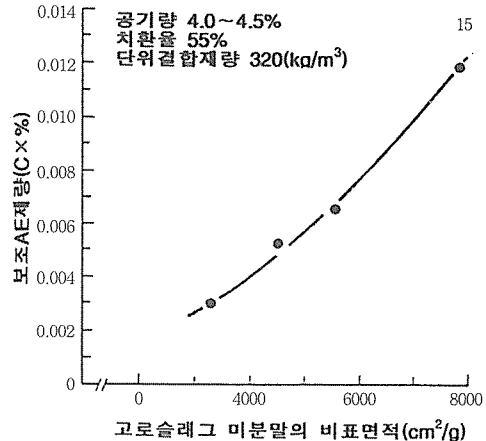
### 3.2 공기연행성

[그림 4]는 단위결합재의 양을 320kg/m<sup>3</sup>, 고로슬래그 미분말의 치환율을 55%로 일정하게 하고, 공기량을 4.0~4.5% 연행하기 위하여 필요한 공기연행(AE)제와 고로슬래그 미분말의 비표면적의 관계를 나타낸 것이다.<sup>(6)</sup> 비표면적이 3,000cm<sup>2</sup>/g 정도가 되면 소요되는 공기연행(AE)제는 무혼입의 콘크리트와 같은 양이 소요되지만, 비표면적의 증가와 함께 소요되는 공기연행(AE)제도 증가하여 비표면적이 8,000cm<sup>2</sup>/g 정도의 고로슬래그 미분말을 사용한 경우에는 무혼입 및 비표면적 3,000cm<sup>2</sup>/g 정도의 고로슬래그 미분말을 사용한 경우에 비하여 약 4배의 공기연행(AE)제가 필요하게 된다.

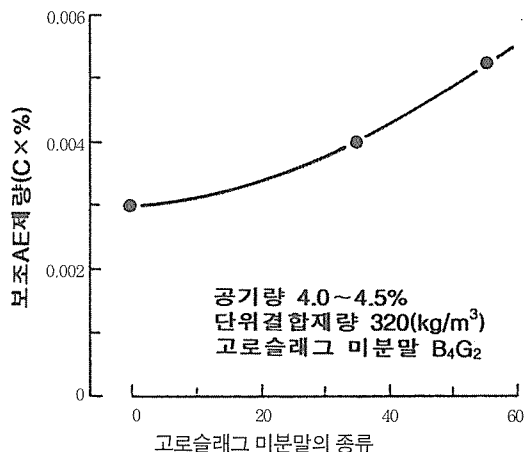
비표면적 4,500cm<sup>2</sup>/g 정도의 고로슬래그 미분말의 치환율과 공기연행(AE)제와의 관계를 [그림 5]에 나타내었는데<sup>(6)</sup> 치환율의 증가와 함께 공기연행(AE)제의 양은 증가하고 있다. 이와 같이 공기연행(AE)제의 증가 원인으로서는 비표면적의 증가에 의하여 콘크리트



(그림 3) 고로슬래그 미분말의 종류와 블리딩율의 관계



(그림 4) 고로슬래그 미분말의 비표면적과 보조AE제의 관계

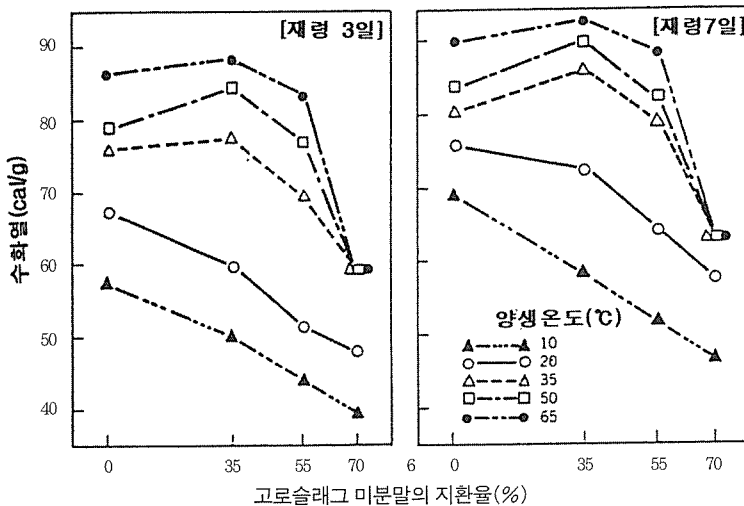


(그림 5) 고로슬래그 미분말의 치환율과 보조AE제의 관계

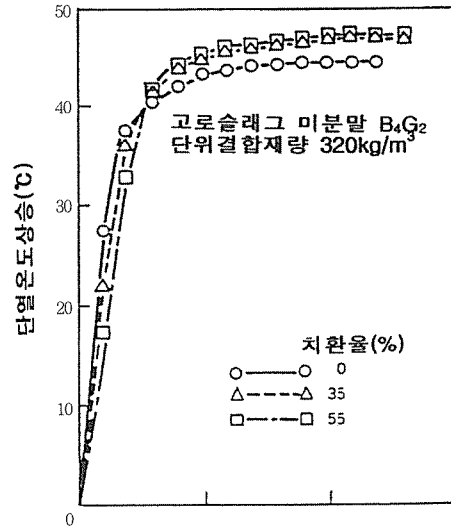
의 유동성이 증가하기 때문에 공기가 연행되기 어려운 점과, 결합재의 체적이 증가하는 점 등을 생각할 수 있다.<sup>(6)</sup> 따라서, 고로슬래그 미분말을 사용하는 경우에는, 무혼입의 콘크리트에 비하여 소요 공기량을 연행하기 위한 공기연행(AE)제를 증가시키는 것이 필요하다.

### 3.3 온도특성

고로슬래그 미분말을 사용한 시멘트 페이스트의 수화열은 고로슬래그 미분말의 치환율 및 양생온도 등에 영향을 받는다. [그림 6]에 시멘트 페이스트의 수화열과 고로슬래그 미분말의 치환율과의 관계를 나타내었다.<sup>(7)</sup> 양생온도가 20℃이하의 경우에는 치환율의 증가와 함께 수화열은 감소하는 경향을 나타내지만, 35℃이상에서는 재령 3일, 7일 모두 시멘트의 55%정도 이상을 고로슬래그 미분말로 치환하지 않으면 무혼입의 경우와 비교하여 수화열이 저감되지 않는다. 더욱이, 치환율이 70%의 경우, 양생온도가 35℃이상에서는 10℃ 및 20℃와는 다르게 양생온도의 영향은 거의 나타나지 않는 결과를 나타내고 있다.



(그림 6) 고로슬래그 미분말의 치환율과 수화열과의 관계



재령(일)

(그림 7) 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 단열온도 상승

[그림 7]은 단위 결합재량 320kg/m<sup>3</sup>, 고로슬래그 미분말의 치환율을 일정하게 한 콘크리트의 단열온도의 변화를 나타낸다.<sup>(7)</sup> 치환율이 35%, 55%인 경우 재령 3일까지는 무혼입에 비하여 단열온도의 상승량이 작지만, 재령 5일에 있어서 무혼입보다 커다란 값을 나타낸다.

즉, 발열속도는 고로슬래그 미분말의 혼입에 의해 저감되지만, 단열온도 상승량이 무혼입 콘크리트보다 커다란 값을 나타낸다.

또한, 단열온도의 상승량에는 거의 비표면적 및 치환율은 영향을 미치지 않지만, 발열속도는 비표면적이 작을수록, 더욱이 고로슬래그 미분말의 치환율이 클수록 늦어지는 경향을 나타내고 있다.<sup>(7)</sup>

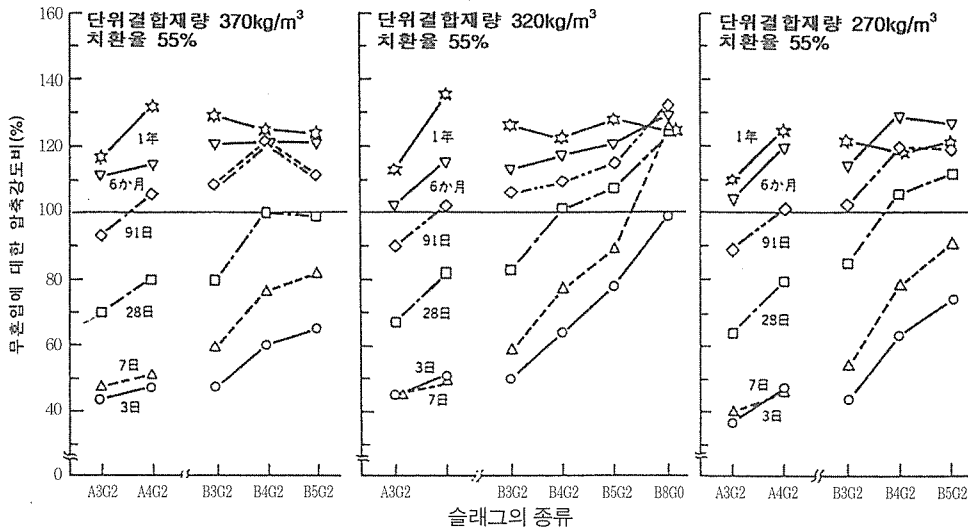
## 4. 경화 콘크리트의 역학적 특성

### 4.1 강도 특성

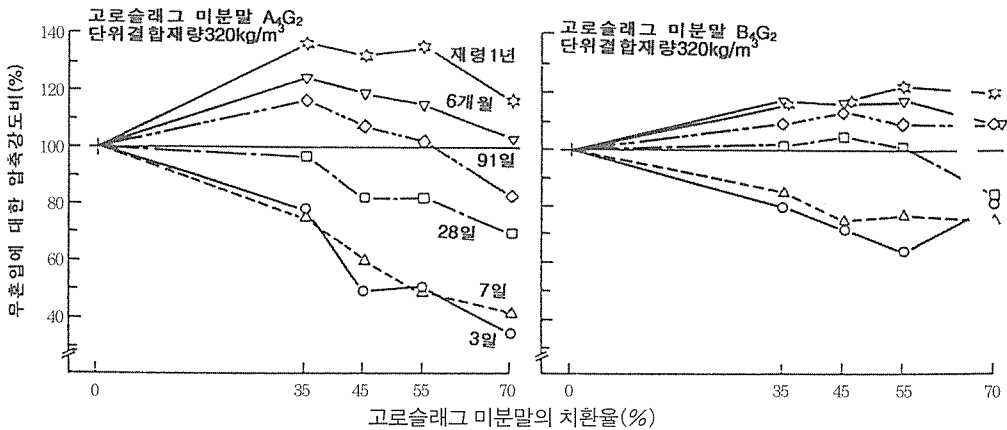
고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도는 고로슬래그 미분말의 종류 및 치환율에 의하여 커다란 차이를 나타낸다. 고로슬래그 미분말의 종류와 고로슬래그 미분말 무혼입 콘크리트의 압축강도비에 대한 관계를 [그림 8]에 나타내었는데, <sup>(4)</sup> 고로슬래그 미분

말의 종류 및 비표면적에 의하여 압축강도의 변화를 확인할 수 있다. 고로슬래그 미분말 A, B 모두 비표면적이 클수록 압축강도는 크게 나타나고, 특히 고로슬래그 미분말 B를 사용한 경우 재령초기에 있어서 그 경향은 현저하지만, 재령의 경과에 따라 그 영향은 거의 없게 된다.

[그림 9]는 고로슬래그 미분말의 치환율과 고로슬래그 미분말 무혼입의 경우에 대한 압축강도비의 관계를 나타낸 것이다. <sup>(4)</sup> 재령 초



(그림 8) 고로슬래그 미분말의 종류와 무혼입 콘크리트의 압축강도비의 관계



(그림 9) 고로슬래그 미분말의 치환율과 무혼입 콘크리트의 압축강도비의 관계

기에 있어서는 치환율의 증가와 함께 압축강도는 감소하지만, 재령의 경과와 함께 치환율의 영향은 작게 나타나고 있다. 또한, 석고 첨가량 3%정도 이하에서는 압축강도에 미치는 석고첨가의 영향은 거의 나타나지 않는다.

고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 양생기간에 많은 영향을 미친다. 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 경우, 재령 28일까지 20℃에서 습윤양생을 하고, 그 이후에 20℃에서 기중양생을 한 공시체의 압축강도는 20℃에서 연속으로 습윤양생한 공시체의 압축강도에 비하여 작은 값을 나타내고 있다.

또한, 압축강도에 미치는 양생온도의 영향에 대해서도 살펴보면, [그림 10]에 나타난 바와 같이 양생온도가 5℃의 경우 고로슬래그 미분말을 사용함에 따라 표준양생에 대한 압축강도비는 무혼입 콘크리트에 비하여 현저하게 저하하며, 30℃에는 반대로 증가하고 있다.

그러나, 재령의 경과에 따라 양생온도의 영향은 적게 된다. 따라서, 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 사용하는 경우에는 무혼입에 비하여 양생온도 및 습도 등의 양생조건에 주의

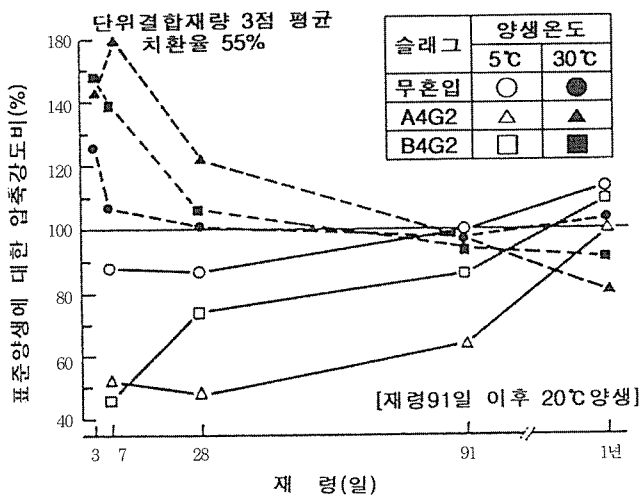
할 필요성이 있다.

또한, 압축강도와 인장강도 및 압축강도와 정탄성계수의 관계는 고로슬래그 혼입에 의한 변화는 거의 없는 것으로 알려져 있다.

#### 4.2 건조수축 및 크리프

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 건조수축 및 크리프도 압축강도의 경우와 마찬가지로 양생조건에 영향을 받는다. 초기에 28일간 수중양생을 하면 7일간 수중양생한 경우에 비하여 건조수축은 현저하게 저감된다. 초기의 수중양생 기간이 7일인 경우, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트 쪽이 무혼입에 비하여 건조수축이 작고, 비표면적이 클수록 건조수축이 다소 작아지는 경향을 나타내며, 재령을 28일로 정도에서는 고로슬래그 미분말 혼입의 유무, 비표면적의 대소에 관계없이 건조수축은 거의 동일한 값을 나타낸다. 또한, 비표면적 8,000cm<sup>2</sup>/g 정도의 고로슬래그 미분말을 사용하여 3일간 초기수중양생 시킨 경우에는 무혼입에 비하여 커다란 건조수축을 나타내고 있지만, 28일이 경과하면 무혼입과 거의 동일한 건조수축을 나타내었다.<sup>(8)</sup>

크리프도 건조수축과 비슷한 경향을 나타내고 있는데, 고로슬래그 미분말의 혼입 유무에 관계없이 초기의 수중양생 재령을 7일에서 28일로 증가시킴으로써 크리프균열도 저감시킬 수 있다. 더욱이 고로슬래그 미분말을 사용한 공시체의 크리프균열은 무혼입에 비하여 같은 정도 혹은 약간 작은 값을 나타내지만, 특히 수중에서 양생한 공시체의 크리프균열은 무혼입의 경우와 비교하여 작은 값을 나타내었으며, 더욱이 비표면적 및 치환율의 증가와 함께 크리



(그림 10) 재령과 표준양생에 대한 압축강도비의 관계



프균열은 다소 작은 값이 된다.<sup>(8,9)</sup> 그러나, 상대습도가 60%정도로 비교적 낮은 경우에는 고로슬래그 미분말의 사용에 의하여 크리프균열이 증대되는 보고도 있다.<sup>(10)</sup>

## 5. 내구성

### 5.1 내약품성

콘크리트의 약품에 의한 열화현상중에서 문제가 될 수 있는 사항은 황산염에 의한 열화이다. 그 열화반응기구는 수화반응에 의하여 발생한 수산화칼슘이 황산염과 반응하여 황산칼슘이 생성되고, 이 황산칼슘과 콘크리트중의 C<sub>3</sub>A 등이 반응하여 에트링가이트를 형성하여 그 팽창압에 의하여 콘크리트가 열화한다는 연구결과도 있다.<sup>(11)</sup>

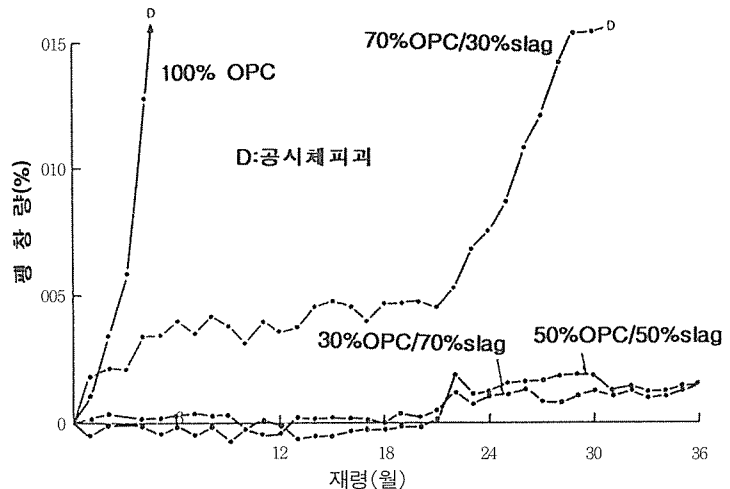
시멘트의 일부를 고로슬래그 미분말로 치환한 경우, 시멘트량의 감소에 따라 수산화칼슘의 생성이 감소하고, 더욱이 C<sub>3</sub>A의 양도 감소하는 등, 고로슬래그 미분말과의 반응에 의하여 수산화칼슘이 소비되는 것 등에 의하여 내황산염성은 개선되는 것으로 알려져 있다.

[그림 11]은 0.31몰 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액중에 침지시킨 공시체의 팽창량을 나타내고 있는데,<sup>(12)</sup> 고로슬래그 미분말을 사용함에 의하여 내황산염성이 개선되고 있고 치환율의 증가

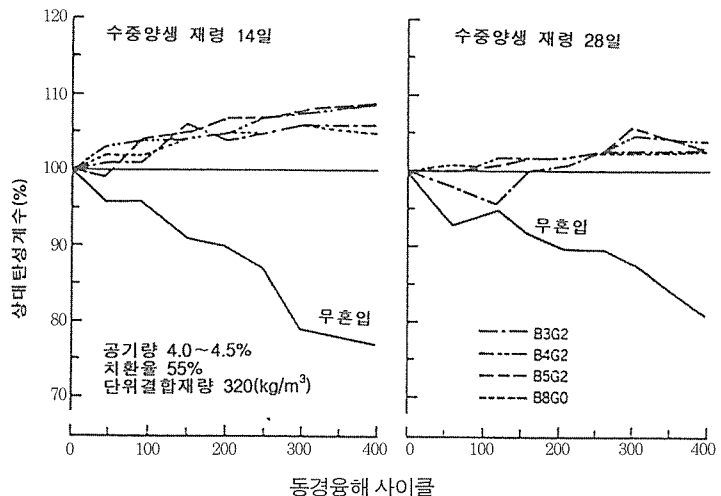
와 함께 팽창량도 저감되고 있다.

### 5.2 내동해성

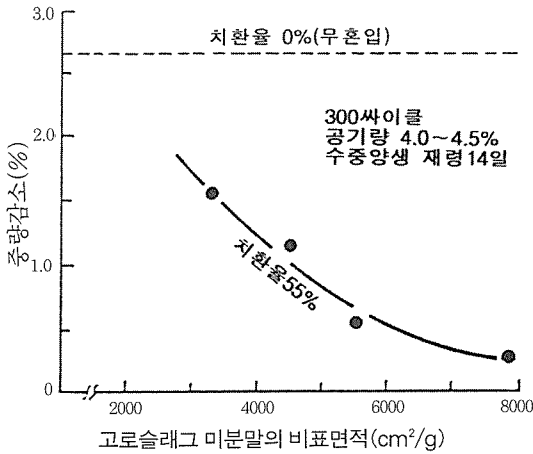
콘크리트의 내동해성은 적당한 공기량이 연행되어 있으면 충분히 확보되는 것으로 보고되어 있다. 고로슬래그 미분말을 사용하는 경우, 3.2항(공기연행성)에 나타낸 바와 같이 소요되는 공기량을 연행하기 위하여 필요한 AE



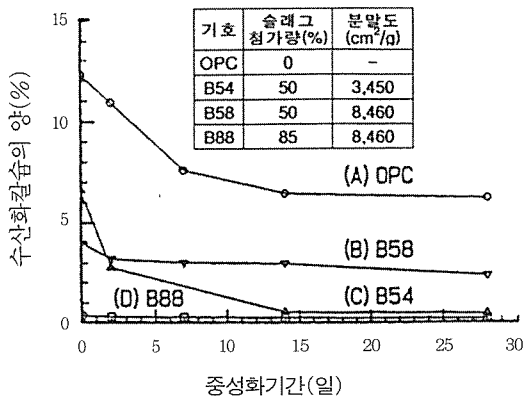
(그림 11) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액 중에 침지시킨 공시체의 팽창량



(그림 12) 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수의 변화



(그림 13) 고로슬래그 미분말의 비표면적과 콘크리트의 중량감소율과의 관계



(그림 14) 고로슬래그를 첨가한 경화체의 중성화에 의한 수산화칼슘의 변화

제량이 증가하지만, [그림 12]에 나타난 바와 같이 동일한 공기량을 연행함으로써 콘크리트의 내동해성은 고로슬래그 미분말을 사용함에 의하여 개선되고 있다. 이 경우, 압축강도는 거의 동일한 수준에서 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 공기량을 3%정도 저하시켜도 무혼입 콘크리트보다도 우수한 내구성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.<sup>(6)</sup> 더욱이, [그림 13]에 콘크리트의 중량변화량을 나타내었지만,<sup>(6)</sup> 14일 수중양생을 한 경우 고로슬래그

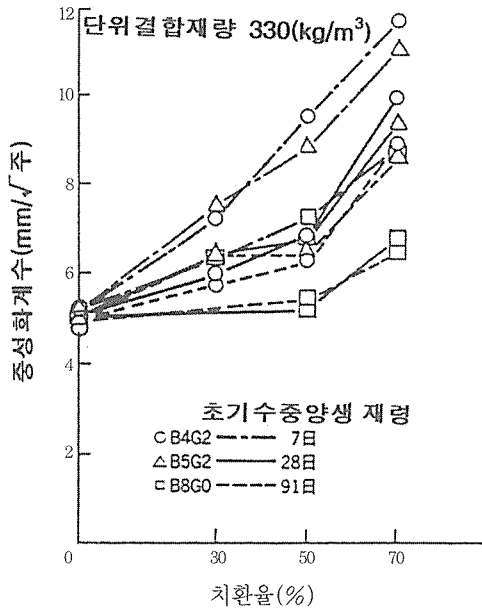
미분말을 사용함에 의하여 콘크리트의 표면열화는 저감되며, 고로슬래그 미분말의 비표면적의 증가와 함께 중량감소량도 저감되고 있다. 이와 같은 결과에서 내동해성에 관해서는 고로슬래그 미분말의 혼입이 유효한 것으로 생각할 수 있다.

### 5.3 중성화

콘크리트의 중성화는 이산화탄소가 콘크리트 중에 확산하여 콘크리트 중의 수산화칼슘과 반응하여 콘크리트의 알칼리성이 저하되는 현상이다. 따라서 중성화는 콘크리트의 화학조성과 조직에 많은 영향을 받는다.

5.1항에서 설명한 바와 같이, 고로슬래그 미분말을 사용한 경우, 수산화칼슘의 생성량이 저하되기 때문에 중성화에 대하여 불리할 뿐만 아니라, 콘크리트의 압축강도가 초기의 양생조건에 영향을 받는 점에서 초기의 양생조건이 중성화에 현저하게 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다.

[그림 14]는 경화체에 존재하는 수산화칼슘의 중성화에 의한 변화를 나타낸 것이다.<sup>(12)</sup> 중성화전 수산화칼슘의 양은 OPC, B54, B58 및 B88에 있어서 각각 12.4%, 6.4%, 4.0% 및 0.5%의 값을 나타내었다. B54에서 수산화칼슘의 생성량이 OPC의 반정도의 값을 나타내는 것은 물시멘트비의 증가에 따라 시멘트 수화반응의 촉진효과와 슬래그와 수산화칼슘의 반응의 진행에 의한 효과로 상쇄된 것으로 생각된다. B58에서는 미세한 고로슬래그 미분말을 첨가하였기 때문에 수산화칼슘의 양은 줄어들고, 더욱이 B88는 잔존 수산화칼슘은 거의 남아 있지 않게 된다. 촉진중성화 28일후 수산화칼슘의 양은 OPC는 6.0%, B54은 0.5%, B58는 2.0% 및 B88는 0.2% 정도의 값을 나타내었는데, 이는 치밀한 조직을 형성



(그림 15) 고로슬래그 미분말의 치환율과 중성화 계수

하는 것은 물론이고 수산화칼슘의 존재가 필요하다는 결과로 보여진다.

[그림 15]는 고로슬래그 미분말의 치환율과 콘크리트의 중성화계수(중성화의 깊이/재령의 평방근)의 관계를 나타낸다.<sup>(5)</sup> 치환율의 증가와 함께 중성화 계수는 증대하고 있고, 초기의 수중양생에도 영향을 받아 초기의 수중양생 기간을 증가시킴으로써 중성화 계수를 저감시킬 수 있는 것을 나타내고 있다. 더욱이 고로슬래그 미분말의 비표면적에도 영향을 받기 때문에 비표면적을 증대시킴으로써 중성화계수를 저감시킬 수 있다.

#### 5.4 알칼리골재반응 억제효과

최근에 알칼리골재반응에 의한 콘크리트의 열화현상이 문제화되고 있는데, 각 연구기관에 의하여 다수의 연구가 활발히 진행되었다. 이와 같은 연구에 의하여, 포졸란질의 혼화재료를 사용함으로써 알칼리골재반응 억제에 유

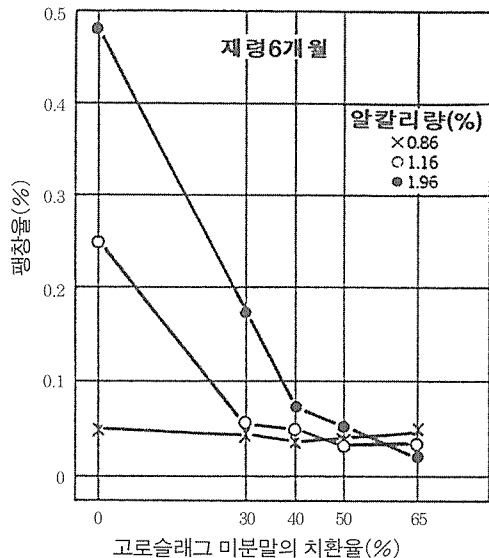
효한 것이 판명되었다.

[그림 16]에는 고로슬래그 미분말의 치환량과 모르타바의 재령 6개월에 있어서 팽창량의 관계를 나타내고 있는데,<sup>(14)</sup> 고로슬래그 미분말의 치환율의 증가와 함께 팽창량은 저감되는 것을 알 수 있다. 이것은 단순히 모르타 중의 알칼리 회석효과 뿐만 아니라 그 이외의 억제효과도 함께 나타나는 것으로 생각되지만 현시점에서는 이후에 검토가 필요할 것이다.

## 6. 결론

본고에서는 주로 일본토목학회 고로슬래그 혼화재 연구 소위원회에서 주최한 「고로슬래그 미분말의 콘크리트에의 적용에 관한 심포지움」에 제출된 문헌 및 관련자료를 참조하여, 고로슬래그 미분말에 대한 콘크리트용 혼화재료로서의 적용성을 검토하였다.

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 유동성 증진 및 수화열 저감 등의 특성을 발휘함은 물론, 내구성 증진 등에 여러 장점을 지니고



(그림 16) 고로슬래그 미분말의 치환율과 모르타바의 팽창율과 관계(%)

있는 재료로 생각된다. 그러나, 고로슬래그를 첨가한 콘크리트는 무혼입 콘크리트에 비하여 알칼리성이 낮기 때문에 사용에 있어 주의해야 할 점 등도 있음을 명심해야 한다.

앞으로 콘크리트용 혼화재로 사용을 적극 유도하기 위해서는 이에 관련한 많은 연구검토를 통한 데이터 축적은 물론, 각종 공사에 사용하는 시방서 및 KS규준 등을 정비함으로써, 사용 목적에 적합하고 고로슬래그 미분말이 지니고 있는 특성을 충분히 발휘할 수 있는 방안으로 고로슬래그 미분말 혹은 고로슬래그 시멘트를 이용한 콘크리트의 사용을 적극 권장해야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. 鐵鋼슬래그協會, 鐵鋼슬래그統計年報, p.5, 1998
2. 高爐슬래그混和材研究小委員會の委員會資料
3. 土木學會, 콘크리트標準示方書改正資料, 콘크리트라이브러리, No.61, p.15, 1986
4. 遠藤裕悅, 中川脩, 高田誠, 高爐슬래그微粉末가 콘크리트의配合と強度におよぼす影響について, 高爐슬래그微粉末의 콘크리트への適用に關するシンポジウム論文集, pp.73~80, 1987
5. 長瀧重義, 大賀宏行, 荒井俊晴, 高爐슬래그微粉末を混和した 콘크리트의 中性化, 高爐슬래그微粉末의 콘크리트への適用に關するシンポジウム論文集, pp.143~150, 1987
6. 山本泰彦, 竹内 徹, 高爐슬래그微粉末を用いた 콘크리트의 配合と斷熱溫度上昇, 高爐슬래그微粉末의 콘크리트への適用に關するシンポジウム論文集, pp.129~134, 1987
7. 國部勝郎, 村田芳樹, 阿部入實, 高爐슬래그微粉末を用いた 콘크리트의 配合と耐凍害性, 高爐슬래그微粉末의 콘크리트への適用に關するシンポジウム論文集, pp.51~58, 1987
8. 米倉亞州夫, 田中敏嗣, 高爐슬래그微粉末の使用가 콘크리트의 乾燥收縮およびクリープに及ぼす影響, 高爐슬래그微粉末의 콘크리트への適用に關するシンポジウム論文集, pp.99~106, 1987
9. 小林和夫, 井上 晋, 津田 章, 高爐슬래그微粉末を用いた 콘크리트의 乾燥收縮とクリープに關する研究, 高爐슬래그微粉末의 콘크리트への適用に關するシンポジウム論文集, pp.107~114, 1987
10. Nevile, A.M. and Brooks, J.J., Time-dependent Behaviour of Cemsave Concrete, Concrete No.9, Vol.3, pp.36~39, 1975
11. 岡田清 編, 콘크리트의 耐久性, pp.62~64, 1986
12. 金尙奎, 鶴見敬章, 大門正機, 高爐슬래그セメント硬化體の炭酸化反應, セメント・コンクリート論文集, No.48, pp.572~577, 1994
13. Frearson, J.P.H., Sulfate Resistance of Combinations of Portland Cement and Ground Granulated Blast Furnace Slag, ACI SP-91, pp.1495~1524, 1986
14. 小林茂敏, 河野廣隆, 沼田晋一, 近田孝夫, 高爐슬래그微粉末의 알칼리骨材反應抑制 果について, 高爐슬래그微粉末의 콘크리트への適用に關するシンポジウム論文集, pp.155~162, 1987.