

고로슬래그 미분말을 혼화재로 이용한 콘크리트의 건축분야에 이용

依田彰彦

翻譯：成鏞奐

<쌍용양회공업(주) 영업기술부 차장>

1. 고로슬래그 미분말이란

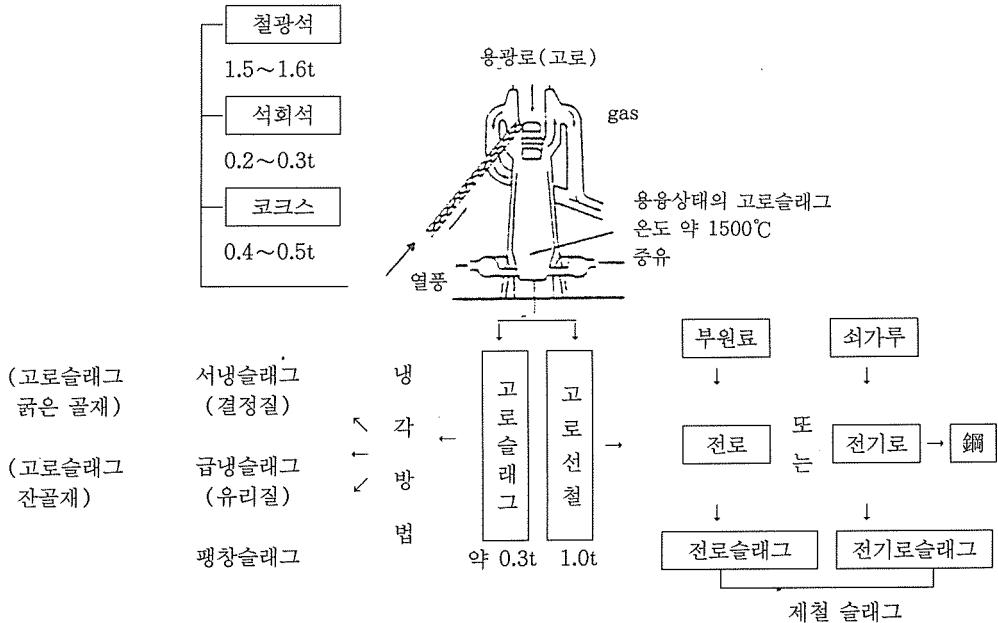
1. 1 고로슬래그란

고로슬래그는 <그림-1>에 나타낸 대로 선철을 생성할 때 발생하는 산업부산물의 일종으로 일본에서는 가장 많이 산출되고 있다<표-1>.

그리고 원료가 철광석, 코크스, 석회석으로 한정되어 있으므로 화학성분 등 품질산포가 작

다.<표-2>

고로슬래그는 냉각 방법으로서 서냉슬래그(결정질)와 수쇄슬래그(급냉슬래그, 유리질)가 있지만, 최근에는 세계 각국에서도 수쇄슬래그를 많이 부산하고 있다<표-3>. 그 이유는 서냉할 때 발생하는 유해한 H₂S gas 등의 발생억제나 설비투자를 오로지 부가가치가 높은 곳에 이용을 모두가 진지하게 고려하고



<그림-1> 철 및 고로슬래그 제철슬래그 생성과정 개요

<표-1> 대표적인 산업부산물의 연간 발생량

(만톤)

고로슬래그	전로슬래그	電爐슬래그	웨로니켈슬래그	銅슬래그	콘크리트에 이용
2500	1100	300	250	200	2300

<표-2> 일본에서 최근 고로슬래그의 화학적 품질의 범위

(단위 : %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	MnO	S	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻
30.7~34.9	12.6~15.2	40.5~43.9	4.2~9.2	0.02~0.64	0.19~0.55	0.41~1.02	0.42~1.73	0.11~1.73	0.18~0.45	0.001~0.007

<표-3> 일본에서 고로슬래그의 수쇄화율

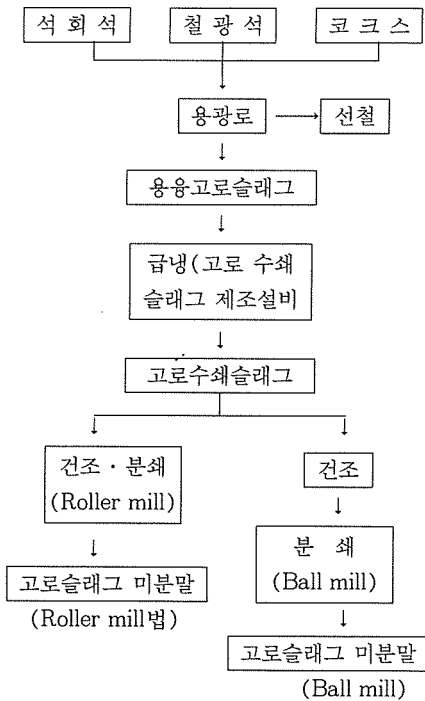
(단위 : %)

73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
7.5	7.2	6.8	11.3	17.2	28.3	32.8	37.8	40.2	43.3	45.5	45.2	46.0	51.9	53.0	53.8	54.7	59.2

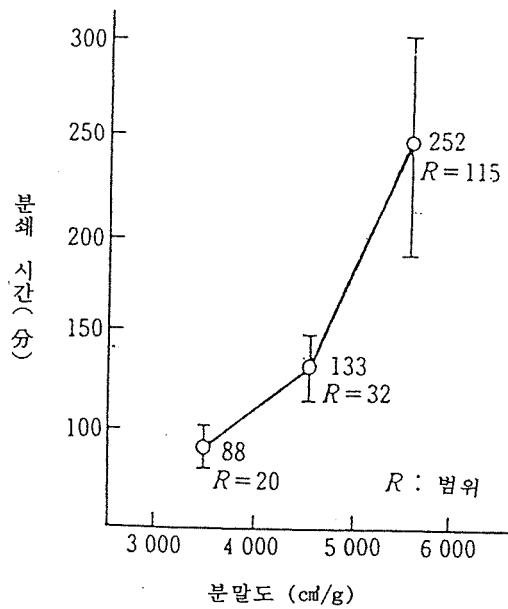
<표-4> '89년도에 고로슬래그의 용도별 사용비율

(단위 : %)

서냉슬래그				구쇄슬래그		
도로용	시멘트용	토목용	굵은골재용 외	시멘트용	토목용	잔골재용 외
23.5	9.4	6.5	5.9	45.5	2.9	6.3



<그림-2> 고로슬래그 미분말의 제조 flow



<그림-3> 분말도와 분쇄에 필요한 시간측정결과 예 (Ball mill법)

있다. 또 1988년도에 일본에서 고로슬래그의 용도별 사용비율을 <표-4>에 나타냈다.

1. 2 고로슬래그 시멘트의 미분말화란

중래 수쇄슬래그의 비표면적은 3000~4000cm²/g(Blaine법). 평균입경 10μm 정도 였으나, 최근 10년전부터 Ball mill등 분쇄기 기의 성능등이 개량 개발되면서 4000~8000cm²/g, 경우에 따라서는 평균입경 3μm 정도까지 분쇄가 가능해졌다.

고로슬래그 미분말을 콘크리트로 이용한 것은 포틀랜드 시멘트에 비해서 자원·에너지 절약을 꾀하기 위함이고 더욱 이산화탄소(CO₂)의 발생량이 적고 앞으로 세계적 과제로 있는 지구환경보전에 대해서도 우수하여 최근은 더욱 미분말화에 박차를 가하고 있다.<그림-2>, <그림-3>

2. 고로슬래그 미분말콘크리트의 성질

일본 건축학회는 철강 슬래그 협회로부터 연구의뢰를 받아 1989년도에 고로슬래그 미분말의 품질규준(안)과 콘크리트의 시공지침(안) 작성때문에 유용한 자료를 얻기 위하여 동학회 재료 시공위원회 철근콘크리트 공사 운영위원회 산하에 「고로슬래그 미분말 조사 연구소위원회」를 설치하여 방대한 실험연구를 하여 수많은 Data를 얻었다.

그 성과를 발표한 것이 1992년 6월에 간행

한 「고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트기술의 현황」에서다. 본고는 그 중에서 발췌한 것이다.

고로슬래그 미분말의 표면은 시멘트입자 표면에 비해서 치밀하다. 그러므로 이것을 혼화재로 이용하는 것은 매우 유용하다.

2. 1 콘크리트 배합

2. 1. 1 단위 수량

(1) 고로슬래그 미분말의 분말도가 단위수량에 미치는 영향

고로슬래그 미분말로 치환하는 것에 따라 무혼입의 것과 비교해서 소정의 슬럼프를 얻기 위하여 단위 수량을 저감할 수 있다.

그 예로 치환율 50%에서 분말도와 단위수량의 관계를 <표-5>에 나타냈다.

(2) 고로슬래그 미분말의 치환율이 단위수량에 미치는 영향

고로슬래그 미분말의 치환율과 단위수량과의 관계를 <표-6>에 나타냄. 이에 따르면 고로슬래그 미분말의 치환율이 큰쪽이 소정의 슬럼프를 얻기 위한 단위 수량은 적다.

2. 1. 2 잔골재율

잔골재율은 소요의 Workability를 얻기 위한 범위내에서 단위수량이 최소로 되게 하기

<표-5> 분말도와 단위 수량의 관계

(단위 : kg/m³)

물 시멘트비 (%)	분 말 도(cm ² /g)				비 고
	무혼입	4000	6000	8000	
25	154(100)	142(92)	136(88)	131(85)	고성능 AE 감수제 사용
35	166(100)	156(94)	147(89)	144(87)	
45	186(100)	182(98)	182(98)	182(98)	
55	178(100)	174(98)	170(96)	170(96)	감수제 사용
60	170(100)	170(100)	161(95)	162(95)	

주) 실측 슬럼프가 16.0cm이었으나, 슬럼프 21.0cm로 추정하여 구한 값.

() 숫자는 보통 콘크리트를 기준으로 한 단위수량비

<표-6> 치환율과 단위 수량의 관계

(단위 : kg/m³)

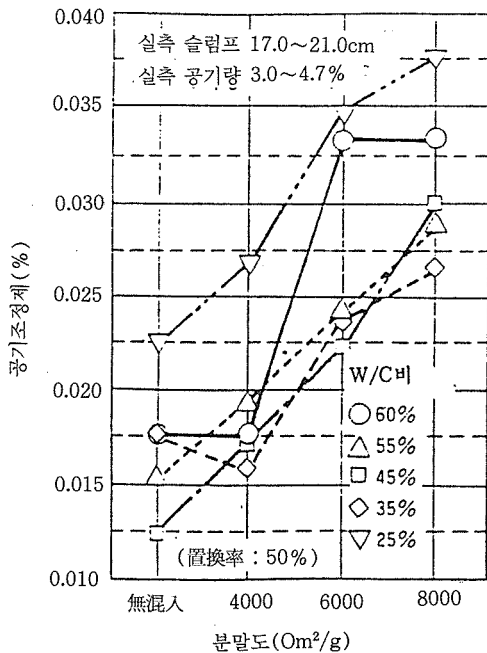
물 시멘트 (%)	분말도 (cm ² /g)	치 환 율 (%)			
		무혼입	30	50	70
25	8000	162(100)	138(85)	132(81)	—
35	6000	166(100)	162(98)	147(89)	146(88)
	8000	166(100)	159(96)	144(87)	146(88)
45	4000	186(100)	183(98)	182(98)	180(97)
	6000	186(100)	180(97)	182(98)	181(97)
55	4000	178(100)	175(98)	174(98)	168(94)

주) () 숫자는 보통콘크리트를 100으로 한 단위수량비

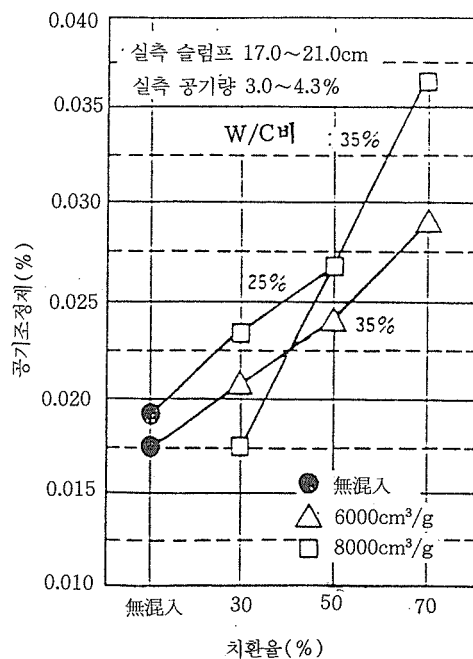
<표-7> 잔골재율(S/A), 단위수량(W)의 일례 (잔골재, 부순돌, AE감수제 콘크리트)

분말도 (cm ² /g)	물 시멘트 비 (%)	치환율 30%		치환율 50%		치환율 70%	
		S/A(%)	W(kg/m ³)	S/A(%)	W(kg/m ³)	S/A(%)	W(kg/m ³)
4,000	55	43.6	168	43.7	166	43.7	164
6,000		43.6	168	43.7	166	43.7	164
8,000		43.6	168	43.7	166	43.7	164
		43.6	168	43.7	166	43.7	164

보통콘리트의 경우는 S/A : 44.7%, 단위수량 173kg/m³



<그림-4> 고로슬래그 미분말의 분말도와 공기량 조정제 첨가량의 관계



<그림-5> 치환율과 공기량 조정제 첨가량의 관계

위하여 시험에 의하여 이것을 정하지 않으면 안 된다. 고로슬래그 미분말을 이용한 것이 비중이 보통시멘트에 비해 작으므로 페이스트의 용적이 증가한다. 또 분말도가 크면 잔골재율이 보통 콘크리트에 비해 고로슬래그 미분말의 치환율, 분말도에 따라 적게할 수 있다.<표-7>

2. 1. 3 공기량

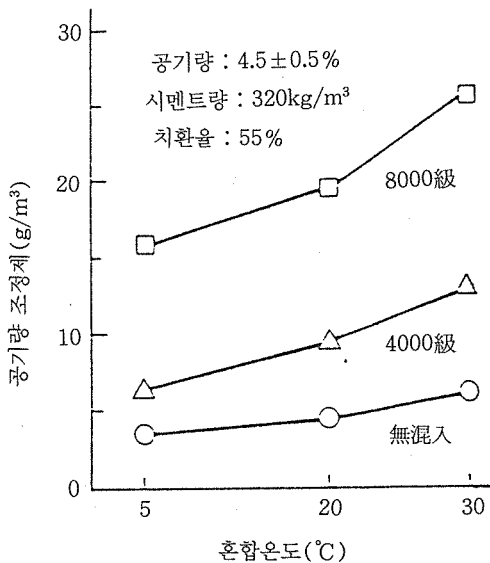
(1) 고로슬래그 미분말과 공기량 조정제 첨가량의 관계

고로슬래그 미분말의 분말도와 공기량 조정제 사용량의 관계를 <그림-4>에 나타냄. 이에 따르면 소정의 공기량을 얻기 위한 공기량 조정제 첨가량은 고로슬래그 미분말의 사용량에 따라 크다는 것이 확인되었다.

특히 고로슬래그 미분말의 분말도가 큰 쪽이 증가하는 경향이 있다.

(2) 고로슬래그 미분말의 치환율과 공기량 조정제 첨가량의 관계

고로슬래그 미분말의 치환율과 공기량 조정



<그림-6> 혼합온도와 공기량 조정제 첨가량의 관계

제 첨가량과의 관계를 <그림-5>에 나타냄. 이에 따르면 고로슬래그 미분말의 치환율이 큰 쪽이 소정의 공기량을 얻기 위하여 공기량 조정제 첨가량은 많이 소요되는 경향이 확인되었다.

(3) 혼합온도와 공기량 조정제 첨가량의 관계
혼합온도와 공기량 조정제 첨가량의 관계를 <그림-6>에 나타냄.

이에 따르면 소정의 공기량을 얻기 위하여 필요한 공기량 조정제의 첨가량은 혼합온도가 상승할수록 많이 소요되는 경향이 있다.

고로슬래그 미분말의 혼입에 따라 그 경향은 현저하다.

2. 2 Fresh콘크리트의 성질

2. 2. 1 응결

(1) 분말도와 응결시간의 관계

고로슬래그 미분말의 치환율이 50%의 경우의 응결시간을 <표-8>에 나타냄.

이 결과에 의하면 고로슬래그 미분말을 치환하는 것에 따라 무혼입에 비해 응결시간이 지연되는 경향이 나타났고 분말도에 의한 영향은 적다.

<표-8> 분말도와 응결시간의 관계 (치환율 50%)

물 시멘트 (%)	응 결 시 간			
	무혼입	4000cm ² /g	6000cm ² /g	
55	초 결	5 : 30	6 : 45	6 : 40
	종 결	7 : 25	8 : 20	8 : 30
60	초 결	5 : 35	7 : 05	6 : 40
	종 결	7 : 35	8 : 55	8 : 45

(2) 치환율과 응결시간의 관계

고로슬래그 미분말의 치환율이 클수록 응결시간이 지연된다.

2. 2. 2 블리딩

고로슬래그 미분말을 혼입함에 따라 무혼입에 비해 블리딩량이 감소한다. <표-9>의 경향은 분말도 큰 쪽이 현저하다.

<표-9> 블리딩 시험결과(치환율 50%)

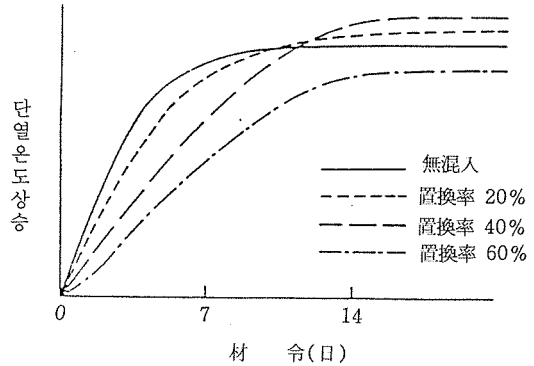
물 시멘트 (%)	블리딩량(cm ² /cm)		
	무혼입	4000cm ² /g	6000cm ² /g
55	0.17	0.19	0.12
60	0.19	0.16	0.11

수화열에 의한 콘크리트의 온도 상승량(경화 후 온도-타설온도)를 말한다. 1종 시멘트 및 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 개략 <그림-7>에 나타난 것 같은 추이로 상승하고 있는 것으로 알려지고 있다.

2. 2. 3 Workability

콘크리트 Workability는 타설, 다짐작업이 용이한 쪽, 재료분리에 대한 저항성 등을 고려해서 판정되어지고 있다.

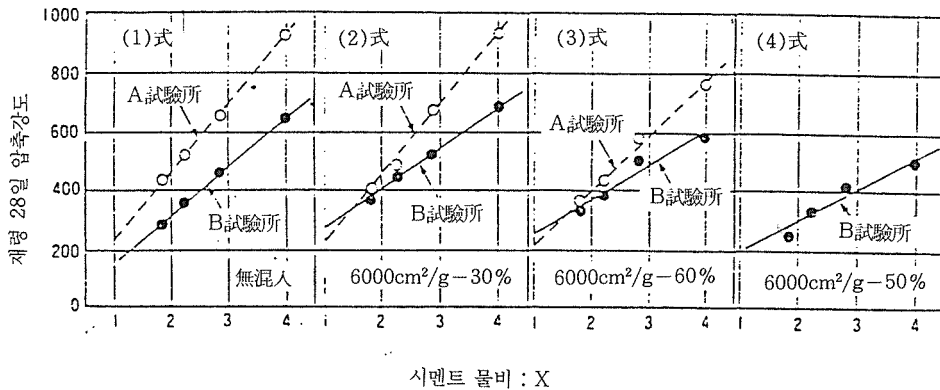
일반적으로는 고로슬래그 미분말을 혼화재로서 사용한 콘크리트와 무혼입의 것으로 비교해서 같은 다짐효과를 얻기 위하여 필요로 하는 진동시간을 적게할 수 있다. 이것은 같은 슬럼프의 경우에는 고로슬래그 미분말을 혼화재로 사용하는 것이 다짐작업이 쉬워진다.



2. 2. 4 단열온도 상승량

단열온도 상승량은 단열상태에 따른 시멘트

<그림-7> 고로슬래그 미분말 콘크리트의 단열온도 상승의 개별도



시멘트 물비와 압축강도의 관계(1차회귀식)

	(1)식	(2)식	(3)식	(4)식
A	$F_{028} = 0.62 + 229.7 X$ ($\gamma = 0.99$)	$F_{028} = -54.60 + 244.35 X$ ($\gamma = 0.99$)	$F_{028} = -23.96 + 187.08 X$ ($\gamma = 0.99$)	-
B	$F_{028} = 5.01 + 162.21 X$ ($\gamma = 0.99$)	$F_{028} = -143.75 + 135.23 X$ ($\gamma = 0.98$)	$F_{028} = -137.5 + 117.06 X$ ($\gamma = 0.97$)	$F_{028} = 95.73 + 105.51 X$ ($\gamma = 0.93$)

<그림-8> 시멘트 물비와 28일 압축강도(Fc 28)의 관계

<표-10> 고로슬래그 미분말의 치환율 및 분말도와 압축강도 발현현황

물 시멘트비 (%)	보통콘크리트의 강도를 100으로 한 강도의 비율(%)								
	치환율 : 30%			치환율 : 50%			치환율 : 70%		
	분말도(cm ² /g)			분말도(cm ² /g)			분말도(cm ² /g)		
	4000	6000	8000	4000	6000	8000	4000	6000	8000
25	102	107	113	89	93	110	70	79	98
	(107)			(97)			(82)		
35	108	112	124	102	107	120	76	90	102
	(115)			(110)			(89)		
45	116	129	138	102	109	129	82	98	110
	(128)			(113)			(97)		
55	120	134	157	115	120	143	72	91	123
	(137)			(126)			(95)		

다시말하면 고로슬래그 미분말의 치환율이 작은 경우는 1종 시멘트보다 단열온도 상승량이 높고 또 단열온도 상승속도는 치환율이 클수록 지연된다.

2. 3 경회콘크리트의 성질

2. 3. 1 압축강도

(1) W/C비와 재령 28일 압축강도(Fc 28)의 관계

25~55% (X=4~1.82)의 범위내에서는 고로슬래그 미분말을 혼입한 경우에도 시멘트 물비와 압축강도 간에는 직선적인 상관관계가 되고 치환율이 큰 경우에는 압축강도의 발현은 낮은 경향이 있다. 또 사용하는 고로슬래그 미분말의 분말도 및 치환율, 물·시멘트비가 동일 gks 보통 콘크리트 및 분말도 6000cm²/g의 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트에 있어서 시멘트, 물 비(X)와 28일 강도(Fc 28) 관계의 일례를 <그림-8>에 나타냈다. 이것에 의하면 물·시멘트비도 사용재료의 배합·배합조건 및 시험조건 등이 다른 경우 시험기관에 따라 강도 차이가 생기는 것으로 나타나 있다.

(2) 치환율 및 분말도와 재령 28일 압축강도(Fc 28)의 관계

보통콘크리트의 28일 압축강도를 100으로 하고 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도의 비율을 치환율 및 분말도 별로 <표-10>에 나타내었다.

1) 치환율과 압축강도의 관계

치환율 30%의 콘크리트 압축강도는 보통콘크리트에 비해서 모든 물 시멘트비에서 높은 강도를 나타내고 전체적으로는 평균 약 22% 높게 강도를 나타내었다.

치환율 50%의 콘크리트에서도 보통콘크리트에 비해서 평균 약 12% 높은 강도를 나타내고, 치환율 70%의 콘크리트에서는 보통콘크리트에 비해 평균 약 10%정도 낮다.

치환율별로는 물 시멘트비가 적을수록 보통콘크리트보다 강도 발현이 적은 경향으로 되어 있다.

2) 분말도와 압축강도의 관계

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도는 보통콘크리트에 비해서 분말도 4000cm²/g의 경우에는 평균 약 4% 낮고, 6000 및 8000cm²/g의 경우의 평균은 각각 약 6% 및 22% 큰 값을 나타내고 분말도가 큰 쪽이 압축강도는 크다.

<표-11> 재령 28일 강도에 대한 7일 및 91일의 강도발현 비율

W/C비 (%)	재령 (일)	보통콘크리트	재령 28일 강도를 100으로 한 강도발현 비(%)								
			치환율 : 30%			치환율 : 50%			치환율 : 70%		
			분말도(cm ² /g)			분말도(cm ² /g)			분말도(cm ² /g)		
			4000	6000	8000	4000	6000	8000	4000	6000	8000
25	7	83	83	83	81	51	59	55	58	57	53
	91	108	104	128	123	140	140	123	173	160	137
35	7	76	70	73	69	49	54	55	56	48	57
	91	115	129	131	122	131	134	125	170	153	144
45	7	71	60	59	61	55	59	56	41	39	52
	91	119	129	126	119	142	144	126	171	159	145
55	7	57	54	54	52	54	55	53	32	35	40
	91	116	122	116	112	121	127	114	188	167	129

(3) 재령에 따른 강도발현 현황

콘크리트의 재령 28일 압축강도에 대한 재령 7일 및 91일 압축강도의 발현현황을 <표-11>에 나타냈다.

1) 재령 7일의 경우

보통콘크리트에서의 재령 28일에 대한 재령 7일의 압축강도 비율은 물 시멘트비 25~55%의 범위 내에서는 57~83%(평균 72%)이다. 또 치환율 30%의 경우에는 52~83%(평균 67%)이고, 보통콘크리트에 비해서 약간 적은 값으로 나타남. 이것에 대해서 치환율 50% 및 70%의 경우 강도 비율은 전평균에서 각각 약 47%이고 보통콘크리트에 비해서 초기강도 발현이 지연되는 경향이다.

2) 재령 91일의 경우

보통콘크리트에서의 재령 28일에 대한 재령 91일의 압축강도 발현 비율은 물·시멘트비 25~55%의 범위 내에서는 108~119%(평균 114%)이다. 이것에 대하여 고로슬래그 미분말을 30, 50 및 70% 치환한 콘크리트의 강도 발현 비율(강도 증진율)은 각각 전평균으로 약 122%, 약 131% 및 약 158%로 치환율이 클수록 장기강도의 증진율이 크다.

또 분말도와 강도 증진율의 관계에서는 전체적으로는 분말도가 작은쪽이 장기 강도는 증진

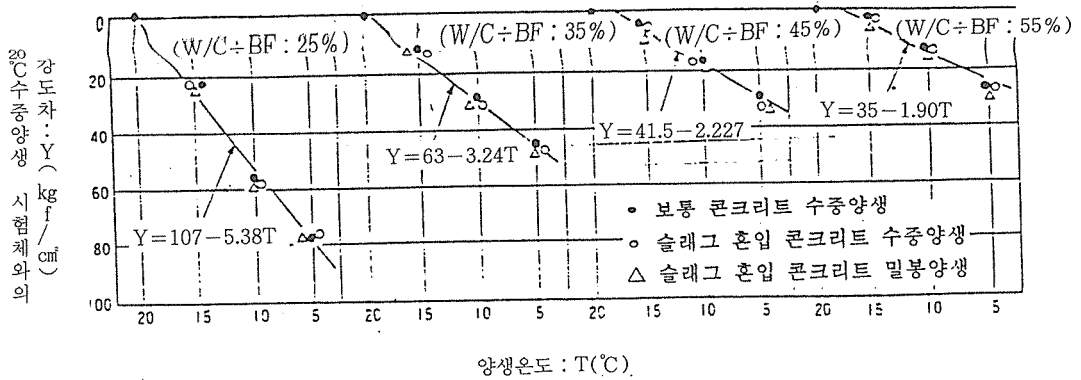
한다.

(4) 양생온도와 재령 28일 압축강도의 관계에 대하여

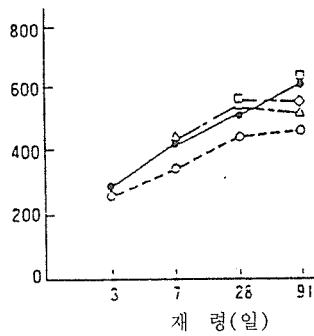
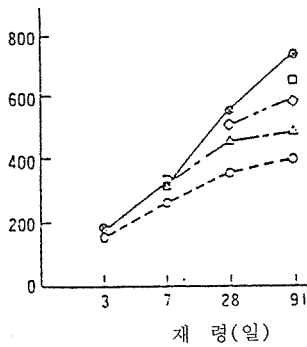
물·시멘트비 25, 35, 45 및 55%의 4수준 고로슬래그 미분말에 의한 치환율을 0, 30, 50 및 70%의 4수준 고로슬래그 미분말의 분말도를 4000, 6000 및 8000cm²/g의 3수준으로 하여 40종류의 콘크리트에 대하여 양생온도를 5, 10, 15 및 20°C 양생방법을 수중양생 및 밀봉양생으로 변화시켜 양생온도가 압축강도에 미치는 영향에 대하여 검토를 하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- ㉑ 물·시멘트비가 작은쪽이 양생온도가 압축강도에 미치는 영향의 정도는 적다.
- ㉒ 치환율이 다르면 양생온도가 압축강도에 미치는 영향의 정도는 적다.
- ㉓ 분말도가 다르면 양생온도가 압축강도에 미치는 영향의 정도는 적다.
- ㉔ 양생방법(수중, 밀봉)이 다르면 양생온도가 압축강도에 미치는 영향의 정도는 적다.

<그림-9>는 이상의 검토를 기초로 수중 양생한 보통콘크리트와 수중양생 및 밀봉 양생한 고로슬래그 미분말 콘크리트에 대하여 치환



<그림-9> 양생온도 양생방법과 강도발현의 관계(재령 28일)



양생조건	
⊗	탈형 → 수중 → 시험
○	탈형 → 기중 → 시험
△	탈형 → 재령 3일까지 수중 → 기중 → 시험
◇	탈형 → 재령 7일까지 수중 → 기중 → 시험
□	탈형 → 재령 7일까지 수중 → 기중 → 시험

<그림-10> 습윤양생 기간과 콘크리트 압축강도의 관계(재령 28일)

을 및 분말도를 전체로 해서 수중양생 및 밀봉양생 별로 양생온도와 강도발현의 현황을 물 시멘트비 별로 나타낸 것이다.

이 그림에서도 명확하게 고로슬래그 미분말을 이용한 경우에서도 양생온도와 강도발현에 있어서는 보통콘크리트와 같은 경향을 나타내고 있고, 배합강도를 산정할 때 온도 보정에 대하여는 보통콘크리트와 같다.

(5) 습윤양생기간의 영향

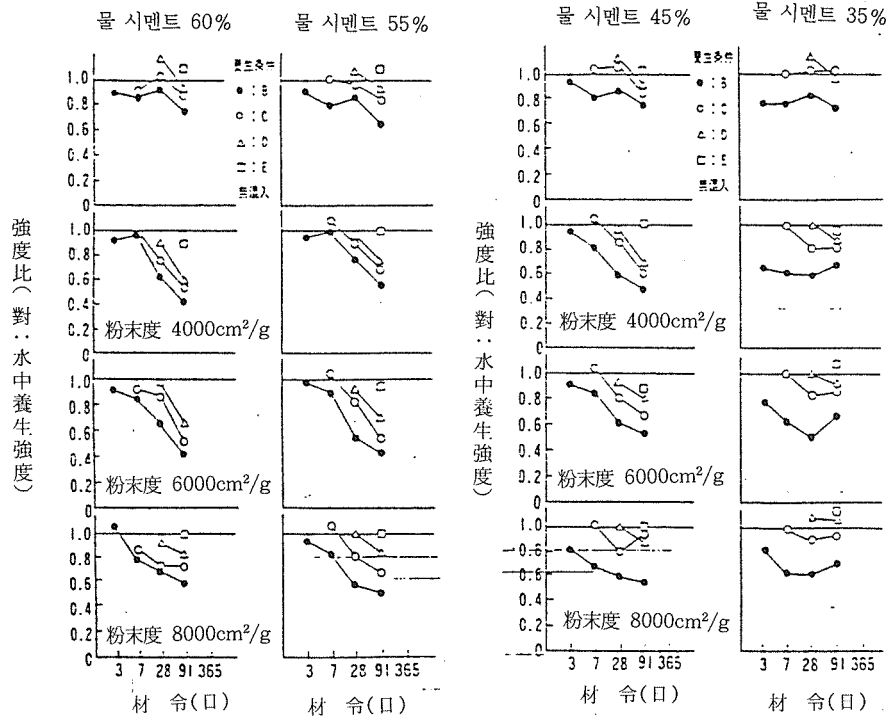
습윤양생 기간과 콘크리트의 압축강도 관계를 <그림-10>에 표준양생에서 콘크리트의 압축강도를 1.0으로 한 경우 각각의 양생조건에 의한 콘크리트의 압축강도 비를 <그림-11>에 나타냈다.

이것으로부터 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트는 습윤양생 기간의 영향이 보통콘크리트에 비해서 크고 습윤양생기간이 짧으면 강도비가 적다. 또 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트 및 보통콘크리트에 있어서도 습윤양생기간이 길은 쪽이 강도비가 크다.

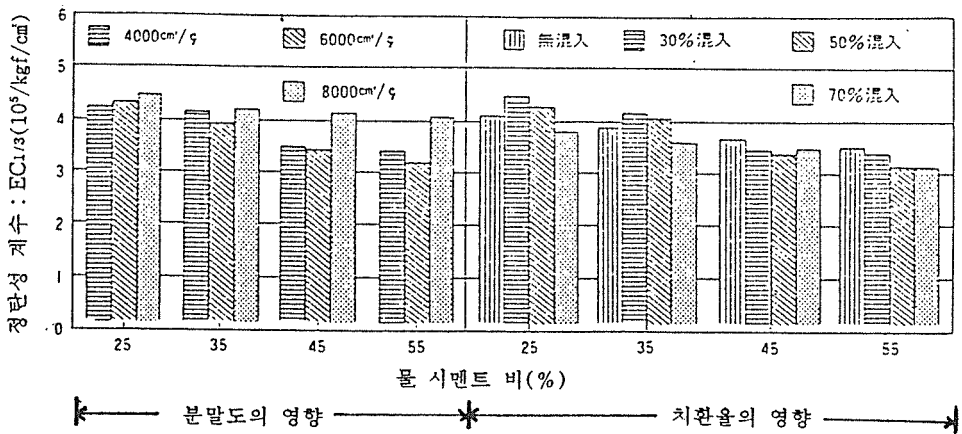
2. 3. 2 정탄성 계수

고로슬래그 미분말은 혼입한 콘크리트 재령 4주에서 측정된 정탄성 계수를 <그림-12>에 나타내었다.

이것에 의하면 물 시멘트비가 25~35% 범위의 고강도에서는 보통콘크리트의 정탄성계수 ($3.86 \sim 4.03 \times 10^9 \text{kgf/cm}^2$)에 비해서 고로슬래그 미분말을 혼입한 것이 5% 정도 큰 경향



<그림 - 11> 습윤양생 기간과 압축강도비(표준양생 : 1.0)



<그림 - 12> 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트의 정탄성 계수

이 있다.

한편 물·시멘트비가 45~55% 범위내에서는 반대로 보통콘크리트(3.45~3.62 $\times 10^5$ kgf/cm²)에 비해서 6%정도 적다.

또 미분말과의 관계에서는 분말도가 큰 쪽이

치환율과의 관계에서는 치환율이 작은쪽이 탄성계수가 큰 영향이 있다. 이것을 종합하면 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 정탄성 계수는 보통콘크리트에 비해서 $\pm 5\%$ 전후의 값을 나타내므로 RC구조물 단면 산정에 이용

할 정탄성 계수에 대하여는 보통콘크리트와 같이 취급하면 된다.

2. 3. 3 인장 및 휨 강도

(1) 인장강도

보통콘크리트는 압축강도에 대한 인장강도비가 0.11~0.07이고, 고로슬래그 미분말 콘크리트는 0.09~0.07이며 고강도 쪽이 그 비는 작다.

(2) 휨강도

보통콘크리트는 압축강도에 의한 휨강도 비가 0.20~0.14이고 고로슬래그 미분말 콘크리트는 0.19~0.09이며 고강도 쪽이 그 비는 적다.

2. 3. 4 건조에 의한 길이 변화

콘크리트는 건조에 의하여 콘크리트중의 수분이 증발되어 체적이 수축한다. 그때의 수축량, 수축속도, 인장강도, 인장능력, 구속력 등 제요인의 영향에 의하여 균열이 발생하는 것이 있다.

균열은 콘크리트 구조물의 구조내력, 내구성 등에 큰 영향을 미치게 된다. 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트에서는 일반적으로 가수화의 수화 반응이 약간 늦고 초기에서는 보통콘크리트에 비해서 표면부터 수분의 발산이 약간 크므로 KSF 2424(물탈 및 콘크리트의 길이

변화 시험방법)에 규정한 방법으로 시험한 경우에는 건조에 의한 수축율에 경화수축율이 가산되고 초기의 수축율은 약간 큰 값을 나타내고 있다.

(1) JASS 5에서 목표로한 건조수축의 관계 13주 및 1년의 각 공시체의 건조수축율을 <표-12>에 나타냈다. 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트의 건조기간 13주 및 1년의 건조수축율은 어떤 콘크리트에서도 $6\sim 8 \times 10^{-4}$ 의 범위내에 있고 JASS 5에서 목표로한 콘크리트의 건조수축율 8×10^{-4} 이하(건조 기간 26주)임. 또 전체적인 경향으로서는 물 시멘트비가 큰쪽이 건조수축이 큰 경향이다.

(2) 치환율의 영향

고로슬래그 미분말의 분말도 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 을 이용한 경우 보통콘크리트에 대한 건조수축율의 비는 치환율 30% 및 50%에서 각각 건조기간 1년에서 전평균이 약 0.97 및 약 1.00이고, 치환에 의한 영향은 별로 없는 것으로 되어 있다.

또 물 시멘트비에 있어서 분말도 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 및 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트에 있어서 치환율과 건조수축의 관계에서도 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 과 같은 경향이다.

<표-12> 콘크리트의 길이변화 시험결과

치환율 (%)	분말도 (cm^2/g)	건 조 수 축 율 ($\times 10^{-4}$)							
		물 시 멘 트 비							
		25%		35%		45%		55%	
		13주	1년	13주	1년	13주	1년	13주	1년
0	-	6.70	7.10	6.95	7.15	7.28	7.53	7.29	7.65
30	4000	-	-	-	-	-	-	7.18	7.56
	6000	6.40	6.68	6.78	6.91	6.97	7.50	7.00	7.34
	8000	-	-	-	-	-	-	6.99	7.25
50	4000	-	-	-	-	-	-	7.01	7.41
	6000	6.67	7.47	6.78	7.09	6.90	7.47	6.94	7.88
	8000	-	-	-	-	-	-	6.57	7.35

<표-13> 300 Cycle 종료시 각 시험체의 내구성지수

치환율 (%)	분말도 (cm ² /g)	물 시 멘 트 비							
		25%		35%		45%		55%	
		空氣量 (%)	耐久性 指數	空氣量 (%)	耐久性 指數	空氣量 (%)	耐久性 指數	空氣量 (%)	耐久性 指數
0	-	1.0	99	1.6	99	4.3	98	5.0	87
30	4000	1.2	99	1.0	99	4.0	99	5.5	91
	6000	1.6	99	1.0	93	4.2	98	4.0	99
	8000	1.8	98	1.2	100	4.5	99	4.2	90
50	4000	3.6	100	2.1	99	3.6	99	3.8	92
	6000	3.0	99	2.5	99	3.8	99	4.3	98
	8000	3.0	100	2.2	99	3.8	99	4.2	89
70	4000	2.6	100	2.1	99	3.5	98	3.9	97
	6000	2.0	99	2.1	99	3.7	99	3.2	99
	8000	2.4	100	2.0	99	3.9	99	3.9	90

(3) 분말도의 영향 (건조수축 1년)

건조기간 1년의 물 시멘트비 55%에 있어서 4000, 6000 및 8000cm²/g을 이용한 콘크리트의 건조수축율은 고로슬래그 미분말의 분말도가 큰 쪽이 약간 적은 경향이다.

(2) 치환율의 영향에 대하여

고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트의 내구성지수는 치환율 30, 50 및 70% 에서 각각 97, 97 및 98이다. 치환율의 영향은 없다. 또 보통콘크리트의 '내구성 지수 96에 비해서 약간 큰 값을 나타냈다.

2. 3. 5 동결융해 작용에 대한 저항성

(1) JASS 5에 나타난 고 내구성 콘크리트의 품질목표와의 관계

<표-13>에 300 cycle 종료시 콘크리트의 내구성지수를 나타내었다. 이에 따르면 공기량이 대략 3~5%의 범위에 있는 물 시멘트비 45% 및 55%의 콘크리트 내구성지수는 각각 전평균으로 99 및 93이고 어느 것이나 내동결융해성이 양호하게 나타났다.

또 물 시멘트비 25% 및 35%의 고강도 콘크리트에서는 공기량이 1~3%로 비교적 적지만 각각 99 및 98로 극히 양호한 결과를 얻었다.

본시험의 범위내에서는 물 시멘트비가 적은 쪽이 바뀌말하면 압축강도에 비례해서 동결융해 작용에 대한 저항성은 크고 어느 것도 JASS 5의 고내구성 콘크리트에서 목표한 내구성지수 80을 상회하고 있다.

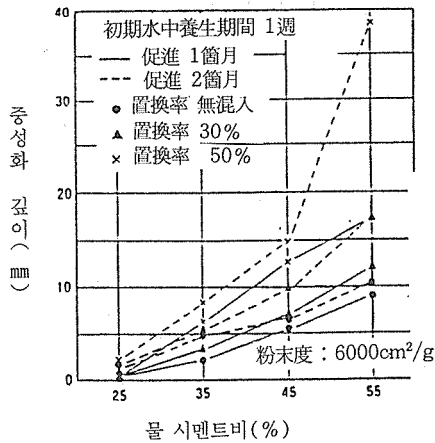
(3) 분말도의 영향에 대하여

분말도 4000, 6000 및 8000cm²/g의 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 내구성지수는 어느것이든 평균 약 97의 값을 나타냄. 이것으로 부터 분말도가 콘크리트의 내동결융해에 미치는 영향은 비교적 적다고 사료된다.

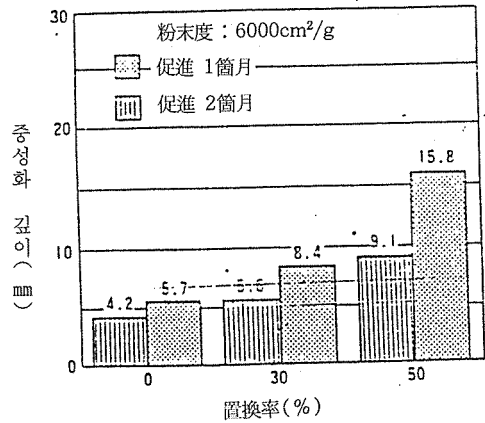
2. 3. 6 중성화

고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트에서는 시멘트 수화시에 생기는 Ca(OH)₂와 고로슬래그 성분이 반응하여 콘크리트의 알칼리성이 약간 저하하지만 동일 배합(W/C+BF)의 경우는 콘크리트의 중성화가 빠르게 진행되고 있다.

<그림-13>의 a 및 b는 탈형 후 재령 1주까지 수증양생한 후 2주간 20℃ - RH



a. 물 시멘트비와 중성화 깊이의 관계



b. 치환율과 중성화 깊이의 관계

(물 시멘트비 25, 35, 45 및 55% 공시체의 평균치로 표시)

<그림 - 13> A시험기관에 의한 중성화 시험결과

60%의 공기중에서 건조된 콘크리트를 CO₂ 농도 5%, 30°C -RH 60%에서 촉진 중성화 시험한 결과를 나타내었다.

이에 따르면 콘크리트의 중성화 깊이에 최고 영향을 미치는 것은 물 시멘트비로 사료된다. 다시말하면 물 시멘트비 25% 및 35%에서는 치환율에 관계없이 10mm 이하의 중성화 깊이를 나타내고 있고, 물 시멘트비 55%에서는 10mm 이상의 중성화 깊이를 나타내고 있다. 그리고 물 시멘트비 45%의 중성화 깊이는 그 중간 정도이다. 또 치환율과의 관계에 대하여는 전체적인 경향으로서는 치환율이 증가하면 중성화 깊이가 증가하지만 이 경우에서도 치환율 30%에서는 보통콘크리트에 비해서 약간 크게 나타났다.

또 치환율 50% 이상에서는 보통콘크리트에 비해서 2배 이상의 중성화 깊이를 나타내고 있다.

2. 3. 7 수밀성

수밀성의 정도는 콘크리트의 치밀함, 다시말하면 콘크리트중의 공극량 및 그의 직경, 공극의 연속, 불연속에 따라 다르며 공극의 직경이 작을수록 수밀성은 증가한다.

고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트에서는 보통콘크리트에 비해서 총 공극량은 많지만 공극 직경이 적어 수밀성은 현저히 향상한다. 또 흡수율과의 상관성도 비교적 높다.

수밀성의 향상은 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트의 우수한 특성의 하나이다.

2. 3. 8 염분 차폐성

염분의 차폐성은 조직이 밀실한 콘크리트가 크고 일반적으로 물 시멘트비가 적을수록 단위 재료량이 많을수록 크다.

고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트에서는 콘크리트 표면으로부터 침수한 염화물 이온량을 보정하고 Furi-deru씨 염을 생성한다. 이와같이 콘크리트의 표층에서 염화물 이온량은 1종시멘트를 이용한 경우보다 많이 측정되어 지고 있다.

그러나 염화물 이온의 침수 깊이에서는 1종시멘트를 이용한 경우에 비해서 적다. 그러므로 적절한 두께가 확보된 철근에 대하여는 부식의 억제에 기대된다. 염분 차폐성은 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트의 우수한 특성의 하나이다.

2. 3. 9 내해수성

필자는 20년간 해수중에 침적한 콘크리트 공시체에 대하여 실험한 결과 고로슬래그 미분말량이 많은 콘크리트는 보통 콘크리트와 비교해서 압축강도가 크고 길이 변화율이 적으며 염분 침수량이 적은 것이 명확하게 나타났다.

2. 3. 10 내약품성

콘크리트 공시체는 재령 7일까지 표준양생, 재령 28일까지 20°C -RH 80%실에서 공기중 양생한 후 재령 28일까지 2% 염산, 5% 황산, 10% 황산나트륨의 각 용액중에 침적하고 비교검토를 위해서 20°C 표준양생조에서 양생하여 6개월 및 1년간 시험을 하였고, 또 각 용액은 1주일 간격으로 교환하였다. 그 결과 압축강도에서는 다음과 같은 경향을 얻었다.

- ① 보통콘크리트에 비교해서 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트는 어느 침적기간, 치환율, 물 시멘트비, 분말도의 경우도 압축강도비가 크다. 다시말하면 보통콘크리트의 압축강도비가 80%이고, 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트는 91%이다.
- ② 침적기간별로는 6개월보다 1년이 압축강도비가 적고 침적기간의 경과에 따라 노화가 진행하고 있다.
- ③ 침적용액과의 관계에 대하여는 침적 6개월에서는 3종류 용액 모두 평균 5~7% 정도 저하하고 있지만, 1년간의 침적에서는 10% Na_2SO_4 가 19% 정도, 2% 염산이 10%정도, 5% 황산이 7% 정도 각각 저하하고 있다.
- ④ 치환율이 큰 콘크리트쪽이 압축강도 비율은 다소 크다.
- ⑤ 물 시멘트비가 적은쪽이 압축강도 비율의 저하는 작다.
- ⑥ 분말도가 큰 쪽도 압축강도 비율은 약간 크다. 다시말하면 분말도 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 저하율은 7% 정도, $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 은 8%, $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 은 12% 정도이다.

3. 건축분야에의 이용

2에서 설명한 고로슬래그 미분말 콘크리트의 성질부터 특성 및 용도를 <표-14>, <표-15>에 총괄하여 나타냈다.

고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트는 보통콘크리트와 같이 적용된다.

고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트는 전장까지와 <표-14>, <표-15>에 총괄하여 보통콘크리트에 비해 아래에 나타난 특징을 갖고 있어 건축공사에의 이용범위는 광범위할 것으로 생각된다.

(1) Workability의 개선

(2) 수화열에 의한 온도 상승의 억제

(3) 유산염이나 해수에 대한 화학저항성의 향상

(4) 콘크리트의 고강도화가 가능

(1)의 개선효과는 분말도가 큰쪽이 현저하며 유동화가 우수하고 블리딩도 적은 성질을 나타낸다. 이를 이용하여 낮은 물 시멘트비의 콘크리트를 제조하거나 고강도 콘크리트를 이용한 건축물에의 적용이 가능한 것으로 생각된다. 또 최근 화제가 되고 있는 고유동콘크리트의 혼화재로서 많이 사용될 것으로 예상되고 다짐이 어려운 부재의 적용도 많이 사용될 것으로 생각된다.

응결시간이 보통콘크리트의 경우에 비해 약간 지연되므로 주의를 요한다. 그러나 반면으로 그 성질을 이용하여 서중 콘크리트에 있어 슬럼프 감소나 콜드 조인드의 발생 억제 등이 기대된다.

(2)의 온도 상승 억제 효과는 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 급의 고로슬래그 미분말을 50% 이상 치환한 것에 의한 효과를 나타내고 큰 건축물의 기초나 원자력 연구소의 격납 용기 등 매스콘크리트에의 적용이 고려된다.

(3)의 고강도화는 분말도가 큰 고로슬래그 미분말에서 30~50% 치환한 것이 효과가 크다. 이를 이용 초고층 RC 건축물이나 초고층 RC타워 저층부의 콘크리트 또는 깊은 지하구

<표-14> 고로슬래그 미분말의 분말도 및 치환율이 콘크리트성질에 미치는 영향

고로슬래그 미분말	분말도(cm ² /g) 치환율(%)	2750~5500			5500~7500			7500이상		
		30	50	70	30	50	70	30	50	70
콘 크 리 트 성 질	유 동 성	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	불 리 덩	○	○	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	응결지연효과(*)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	단열온도상승량	-	-	◎	-	-	◎	-	-	◎
	발열속도저감	○	◎	◎	○	○	◎	○	○	◎
	초기강도	○	△	△	○	△	△	○	○	△
	재령 28 일 강도	○	△	△	◎	○	△	◎	◎	◎
	장기강도	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
	고 강도	○	△	△	◎	○	○	◎	◎	○
	건조수축	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	내동해성	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	중성화	-	-	△	-	-	△	-	-	△
	염분차폐성	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	내해수성	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎
	내약품성	○	○	◎	○	○	◎	○	○	◎
	내열성	○	○	○	○	○	○	○	○	○
축진양생효과	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

- [기호] ◎ : 보통 포틀랜드 시멘트보다 양호한 성능
 ○ : 보통 포틀랜드 시멘트와 같거나 다소 양호한 성능
 △ : 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 사용에 주의 필요
 - : 조건에 따라 다르다
 주) 응결지연효과로는 콘크리트의 응결을 지연시키는 효과

<표-15> 고로슬래그 미분말의 특징을 활용한 용도

특 징	주 요 용 도
고 유 동	고유동 콘크리트(콘크리트 품질향상등)
응결지연효과大	서중콘크리트, 대량연속 타설 콘크리트등
저 발 열	매스콘크리트(대형건축물 기초등)
재령 28 일 강도大	단위시멘트량 저감등
고 강 도	고층 RC건축물, 大深度 지하구조물등
수 밀 성大	지하구조물, 해상·수중구조물, 수조구조물 등
염 분 차 폐 성大	연안건축물, 해상·해중건축물
내 해 수 성大	해상·해중건축물 등
내 약 품 성大	화학공장 건축물, 온천지역 건축물, 산성비 대책 등

<표-16> 고로Slag 미분말의 기준·규격의 개략

항 목	기준·규격	일 본 토목학회기준	미 국 ASTM-989	영 국 BS-6699	캐 나 다 CSA-A363
염기도(C+M+A)/S		1.4이상	—	1.0이하	—
Insol.	(%)	—	—	1.5이하	—
Ig-loss	(%)	3.0이상	—	3.0이하	—
황 S	(%)	2.0이하	2.5이하	2.0이하	—
SO ₃	(%)	3.0이하	4.0이하	—	2.5이하
Mgo	(%)	10.0이하	—	14.0이하	—
수분	(%)	1.0이하	—	1.0이하	—
분말도					
45 μ m잔분	(%)	—	20이하	—	20이하
Bluine(cm ² /g)		2750이상	—	2750이상	—
활성도 지수 (SAI)%		7d 55이상 28d 75이상 91d 95이상	80급 — 28d 75이상 — 100급 7d 75이상 28d 95이상 — 120급 7d 95이상 28d 115이상		— — 28d 80이상 —
flow값비	(%)	95이상	—	—	—

조물 등에 또 장기 강도의 발현이 큰 것으로부터 관리재령을 길게 한 구조물에 유효하게 적용할 수 있다.

(4)의 효과를 이용하여 온천이나 해안에 인접한 건축물이나 산을 취급하는 화학공장 등의 건축에 적용이 고려된다. 수밀성, 염분 차폐성도 양호하여 수중·해양 구조에의 적용도 유리하다. 또 최근 화제가 되고 있는 산성비의 대책에도 효과가 있는 것으로 사료된다.

이상과 같이 고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트의 적용범위는 대부분의 건축물에 적용될 수 있다고 생각된다. 그러나 시공상 주의점

으로 초기양생을 충분히 할 필요가 있다.

양생이 충분히 되었을 때 위에서 설명한 효과를 얻으므로 충분히 염두할 필요가 있다.

4. 고로슬래그 미분말의 기준·규격

고로슬래그 미분말에 대한 외국에서의 규격은 ASTM C 989-82, BS6 669-1986 및 CSA Standard A 363-M1983, 일본 토목학회 기준(콘크리트용 고로슬래그 미분말 규격) 등이 있고, <표-16>에 각 기준·규격의 개략을 나타냈다.