



## 1. 서론

건설기술의 발전과 더불어 콘크리트가 장대교량, 초고층건물, 고속철도, 해양구조물 및 원자력발전소 등과 같은 다양한 구조물에 적용됨으로써 콘크리트의 고유동, 고강도 및 고내구성과 같은 고성능화가 요구되고 있는 실정이다.

이와 같은 요구에 부응하기 위하여 산업부산물로 발생하는 고로슬래그미분말, 플라이애시, 실리카흙 및 메타카올린 등과 같은 광물질혼화제를 콘크리트용 혼화제로 사용하여 콘크리트의 제물성 개선 및 향상을 위한 연구성과가 발표되고 있다.<sup>(1)~(6),(9)~(11)</sup>

제철산업의 부산물로 발생하는 고로슬래그미분말을 콘크리트용 혼화제로 활용할 경우, 콘크리트의 워커빌리티 개선, 수화열 저감과 내해수성, 화학저항성 및 장기강도의 향상 등에 대한 연구내용이 발표된 바 있다.<sup>(1),(2),(9)</sup>

한편, 주지하는 바와 같이 실리콘 메탈이나 페로실리콘(Ferro-silicon) 등과 같은 규소 합금 제조시 생성되는 실리카흙을 콘크리트의 혼화제로 사용함으로써 시멘트 입자 사이의 공극 및 불연속 영역을 충전하여 고밀도화하는 micro filler 효과와 포졸란 반응으로 콘크리트의 장기강도를 향상시킬 뿐만 아니라 내구성, 수밀성 및 내화성 등을 개선시키는데 유효하며<sup>(3),(4),(10)</sup>, 초미립의 실리카흙을 시멘트 혼화제로 사용함으로써 고강도콘크리트를 효율적으로 제조하였다는 橋 등<sup>(6),(11)</sup>의 연구결과도 있다.

또한 콘크리트 구조물에 발생하는 각종 수축균열을 제어할 목적으로 사용되는 팽창제의 현장적용 사례가 증가하는 추세이며, 콘크리트용 팽창제는 콘크리트의 건조수축 보상 이외에도 온도균열의 제어, Chemical prestressing에 의한 내력 증진 및 수밀성 향상 등에 유용하다.<sup>(7),(8),(12)~(14)</sup>

본 연구에서는 우리나라건설업체의 해외, 특히 동남아시아의 진출에 따른 대형 해양콘크리트구조물 등의 수주물량이 크게 증가하고 있는 추세를 감안하여 고로슬래그미분말, 실리카흙 및 팽창제를 각각 적정량 혼합한 고강도콘크리트를 제조하여 현장의 여건을 고려한 양생조건에 따른 물성평가에 착안하게 되었다.

그래서 광물질혼화제의 혼합률을 각각 달리하였으며, 현장의 기후조건을 고려하여 양생온도 23℃ 및 35℃의 2 종류와 양생조건을 전기간 수중양생, 3일 수중양생 후 기건양생 및 7일 수중양생 후 기건양생의 3 종류로 변화시킨 4 배합, 16종류의 고강도콘크리트를 제조하였다.

이들 광물질혼화제를 혼합한 고강도콘크리트의 기초물성, 공극량 및 염화물이온 침투저항성을 나타내는 총통과전하량을 측정하여 비교, 고찰함으로써 특히 내해수성이 요구되는 해양 콘크리트구조물에 적합한 고강도콘크리트의 현장적용을 위한 유익한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### (1) 시멘트

보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

#### (2) 광물질혼화제

광물질혼화제는 Table 2의 고로슬래그미분말(SG로 약함), 실리카흙(SF로 약함)과 Table 3의 팽창제(SS로 약함)를 사용하였으며, 화학혼화제는 Table 4의 폴리카르본산계 고성능감수제(HRWR로 약함)를 사용하였다.

Table 1 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질

Chemical composition(%)						Ig.loss (%)	Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time(hr:min.)	
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>				Initial	Final
62.75	22.06	5.47	3.31	2.40	2.34	1.01	3.15	3,366	4:35	8:10

Table 2 고로슬래그미분말과 실리카흙의 화학성분 및 물리적 성질

Types	Items	Chemical composition(%)					Ig.loss (%)	Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO			
SG		41.98	34.69	15.42	0.23	6.36	0.15	2.90	4,550
SF		0.19	95.0	0.26	0.13	0.45	0.23	2.30	260,000

Table 3 팽창재의 화학성분(%)

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Ig.loss	free-CaO
58.42	23.06	5.78	4.56	3.53	1.72	0.80	0.09	1.83	0.65

Table 4 고성능감수제의 물성

Type	Items	Main composition	Specific gravity	Appearance	Standard dosage (C×%)
HRWR		Polycarboxylic	1.04	Transparent liquid	0.5~3.0

(3) 골재

잔 골재는 비중 2.60의 세척해사를, 굵은 골재는 최대치수 13mm의 부순돌을 사용하였다. 잔 골재와 굵은 골재의 물리적 성질은 Table 5와 같으며 굵은 골재의 입도시험결과 13mm, 10mm, 5mm, 2.5mm 체의 통과율은 각각 98%, 60%, 5%, 2%였다.

2.2 콘크리트 배합 및 제조

고강도콘크리트를 제조하기 위하여 결합재량 550 kg/m<sup>3</sup>, 물-결합재비 30%, 잔골재율 39%, 및 고성

능감수제는 결합재의 중량에 대하여 0.9%로 고정하였다. 또한 광물질혼화재인 고로슬래그미분말, 실리카흙 및 팽창재의 혼합률을 달리한 고강도콘크리트의 배합은 Table 6과 같다.

콘크리트는 60ℓ용량의 강제식 믹서를 사용하여 잔·굵은 골재와 시멘트를 30초간 건식 비비기 한 후 혼합수와 고성능감수제를 투입하여 150초 동안 혼합하여 제조하였다.

콘크리트공시체는  $\Phi 10 \times 20$ cm 원주형 몰드로 제조하여 23℃ 공기중과 습도 95%, 35℃의 항온항습실에서 1일간 각각 양생한 후 탈형하였다.

Table 5 골재의 물리적 성질

Types	Items	max. size of coarse agg.	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Fineness modulus
Fine agg.		-	2.60	0.95	1,580	2.80
Coarse agg.		13	2.65	0.87	1,567	6.33

Table 6 고강도콘크리트의 배합

Types	Items	W/B (%)	Cement/SG /SF/SS(%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						
					W	C	SG	SF	SS	S	G
G0		30	100/0/0/0	39	165	550	0	0	0	629	1003
G4		30	60/40/0/0	39	165	330.0	220	0	0	623	993
G4F		30	55/40/5/0	39	165	302.5	220	27.5	0	632	1007
G4FS		30	48/40/5/7	39	165	264.0	220	27.5	38.5	642	1023

이 때 탈형한 공시체는 현장의 기후조건을 고려하여 23℃(Standard Curing 또는 ST로 약함)와 35℃(HoT curing 또는 HT로 약함) 수중에서 Table 7과 같은 6 종류의 조건으로 각각 양생을 실시하였다.

### 2.3 실험방법

#### (1) 응결시험 및 슬럼프플로우

고강도콘크리트의 응결시간은 KS F 2436에 의해 실시하였으며, 이때 양생온도는 23, 35℃로 정하였다. 또한 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프시험은 KS F 2402에 의해 실시하였으며, 슬럼프시험 직후 흘러내린 콘크리트의 최대지름과 직교하는 지름을 측정하여 이들 평균값을 슬럼프플로우값(cm)으로 나타내었다.

#### (2) 압축강도 및 공극량

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 의하여 재령 1, 2, 3, 7, 28 및 56일에 각각 MTS사의 500 ton 만능시험기를 사용하여 측정하였다. 또한 콘크리트의 공극량은 ASTM C 642의 시험방법에 의하여 측정하였다.

#### (3) 염화물이온 침투저항성

염화물이온 침투저항성은 ASTM C 1202에 의하여

실시하였다. 이때 전해질 용액의 종류로는 양극셀에 0.3N NaOH, 음극셀에 3% NaCl 수용액을 사용하였으며, 30분 간격으로 6시간동안 측정된 전류를 전하량으로 환산하여 아래식으로 총통과전하량을 구하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360})$$

여기서, Q : 총통과전하량 (coulombs),

In : n분 경과후의 전류 (amperes)

### 3. 실험결과

#### 3.1 굳지 않은 고강도콘크리트의 기초물성

광물질혼화제가 혼합된 굳지않은 고강도콘크리트의 기초 물성을 평가하기 위하여 슬럼프플로우값과 응결시간을 광물질혼화제의 종류 및 혼합률별로 분류하여 Table 8에 나타내었다.

고강도콘크리트의 양생온도 및 혼합률별 응결시간을 그래프로 정리한 것이 Fig. 1이다.

이 그림에 의하면 고강도콘크리트의 응결시간이 광물질혼화제의 종류에 따라 약간 상이하나, 전반적으로 35℃로 양생한 고강도콘크리트의 응결시간이 23℃로 양생한 경우보다 상당히 빠름을 알 수 있다.

Table 7 고강도콘크리트의 양생 조건

Curing temperature	Items	Types	Curing condition
23 °C		ST	cured in water for 56 days
		ST3d	cured in water for 3 days and then cured in air
		ST7d	cured in water for 7 days and then cured in air
35 °C		HT	cured in water for 56 days
		HT3d	cured in water for 3 days and then cured in air
		HT7d	cured in water for 7 days and then cured in air

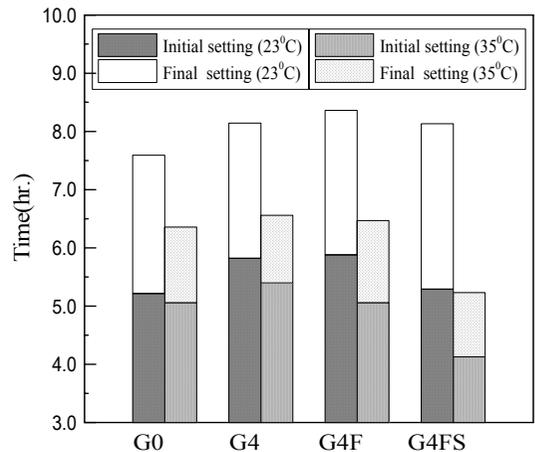


Fig. 3 양생온도 및 혼합률별 응결시간

Table 8 고강도콘크리트 물성 및 압축강도 실험결과

Items Types	Cement/SG /SF/SS(%)	Slump flow (cm)	Curing method	Setting time(hr.)		Compressive strength(MPa)					
				initial	final	1day	2days	3days	7days	28days	56days
G0	100/0/0/0	55.0	ST	5.22	7.59	18.6	27.3	33.3	39.7	52.4	53.3
			HT	5.06	6.36	31.2	37.0	40.3	43.1	47.3	49.5
G4	60/40/0/0	65.0	ST	5.82	8.14	16.8	24.0	32.4	46.9	60.5	64.3
			HT	5.40	6.56	31.5	35.7	38.0	42.0	48.3	51.5
G4F	55/40/5/0	60.5	ST	5.88	8.36	19.5	29.0	39.1	51.8	68.7	72.4
			ST3d	-	-	19.5	29.0	39.1	48.5	60.0	61.5
			ST7d	-	-	19.5	29.0	39.1	51.8	60.7	62.2
			HT	5.06	6.47	32.2	42.3	46.6	50.2	65.4	67.2
			HT3d	-	-	32.2	42.3	46.6	53.0	56.3	57.9
			HT7d	-	-	32.2	42.3	46.6	50.2	57.3	59.5
G4FS	48/40/5/7	51.0	ST	5.29	8.13	21.5	34.4	43.5	51.7	62.1	64.1
			ST3d	-	-	21.5	34.4	43.5	50.6	56.8	59.4
			ST7d	-	-	21.5	34.4	43.5	51.7	57.0	61.2
			HT	4.13	5.23	35.9	42.2	47.0	52.7	58.7	62.3
			HT3d	-	-	35.9	42.2	47.0	51.9	56.5	57.8
			HT7d	-	-	35.9	42.2	47.0	52.7	56.9	59.2

또한 광물질혼화제의 종류별 혼합률에 따라 초결이 크게 상이함을 알 수 있으나, 광물질혼화제의 종류에 따른 종결시간은 큰 차이가 없었다.

그러나 광물질혼화제를 혼합하지 않은 고강도콘크리트(기준콘크리트 또는 control concrete로 약함)보다는 종결이 약간 지연되었다. 그리고 기준콘크리트에 고로슬래그미분말을 40% 혼합함에 따라 응결이 다소 지연되었으나, 팽창재를 7% 추가한 고강도콘크리트는 양생온도 35℃에서 응결시간이 크게 촉진됨을 알 수 있었다.

그러나 고로슬래그미분말 40%, 실리카흙 5%를 혼합한 고강도콘크리트의 경우, 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트와 응결시간에는 큰 차이가 없었으며 이는 기존의 연구와도 유사한 결과임을 알 수 있다.<sup>(15)</sup>

### 3.2 경화한 고강도콘크리트의 압축강도

광물질혼화제의 종류, 혼합률 및 양생온도별 고강도 콘크리트의 압축강도를 재령 1, 2, 3, 7, 28 및 56일

로 정리하여 Table 8에 나타내었으며, Fig. 2에 고강도콘크리트의 양생온도 및 혼합률별 압축강도를 나타내었다.

Fig. 2를 보면 광물질혼화제의 종류에 따라 고강도 콘크리트의 압축강도가 약간 상이하나, 35℃로 양생한 고강도콘크리트의 압축강도는 23℃로 양생한 경우보다 초기재령에서는 상당히 크게 나타났다. 이는 고로슬래그미분말 혼합시멘트의 활성화에너지가 보통포틀랜드시멘트보다 낮기 때문에 양생온도가 높은 쪽이 고로슬래그미분말 혼합시멘트의 강도발현에 유리하다고 하는 Malhotra 등의 연구와도 유사하다고 생각된다.<sup>(16)</sup>

한편 고로슬래그미분말 40%, 실리카흙 5% 및 팽창재 7% 혼합 고강도콘크리트의 경우는 재령 7일까지의 압축강도는 상대적으로 크게 나타났으나, 재령 28일 이후의 압축강도는 고로슬래그미분말과 실리카흙만을 혼합한 콘크리트와 비교하면 다소 낮게 나타났다. 그러나 기준콘크리트보다는 압축강도가 향상되었음을 알 수 있다.

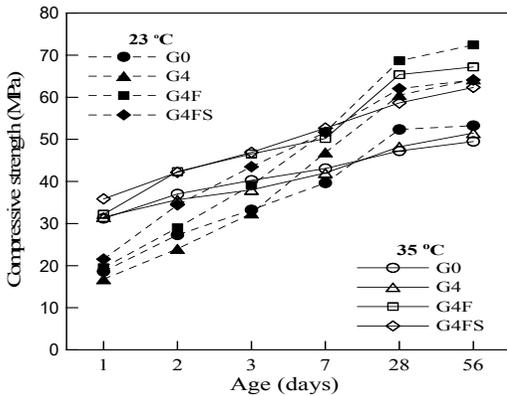


Fig. 2 양생온도 및 혼합률별 압축강도

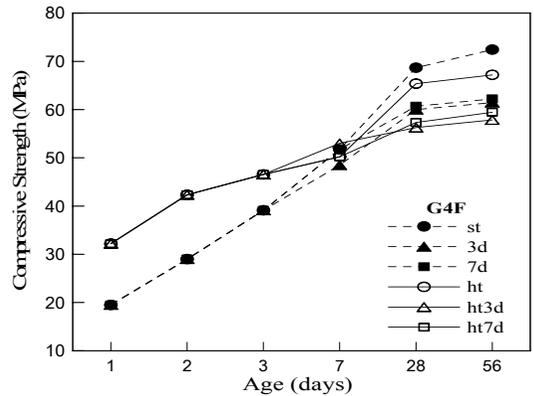


Fig. 3 양생조건별 압축강도 (G4F)

고로슬래그미분말과 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트(G4F 또는 G4F 고강도콘크리트로 약함)와 고로슬래그미분말과 실리카흙에 팽창재를 혼합한 고강도콘크리트(G4FS 또는 G4FS 고강도콘크리트로 약함) 2 종류를 선정하여 양생온도 및 양생조건별 압축강도를 재령 1, 2, 3, 7, 28 및 56일로 정리한 것이 각각 Fig. 3과 Fig. 4이다.

Fig. 3과 Fig. 4의 G4F 및 G4FS 고강도콘크리트는 35°C로 양생한 경우, 재령 7일까지는 23°C로 양생한 경우보다 압축강도가 현저하게 높았으나, 재령 7일 이후는 오히려 압축강도가 역전됨을 알 수 있다.

이러한 현상은 막(shell)의 효과로 설명을 할 수 있으며, Kielsen 등<sup>(17)~(19)</sup>에 의하면 상대적으로 고온의 온도로 양생한 경우 초기 수화반응이 촉진됨으로 인해 초기재령의 압축강도는 증가되나, 급격하게 이루어진 수화생성물로 인해 시멘트 입자 주위에는 더 두터운 막을 형성하게 되기 때문이다.

그리고 이러한 두터운 막으로 인해 시멘트 입자의 확산이 방해되고 장기재령에서의 강도발현속도가 낮은 온도로 양생한 콘크리트보다 느려지게 된다.

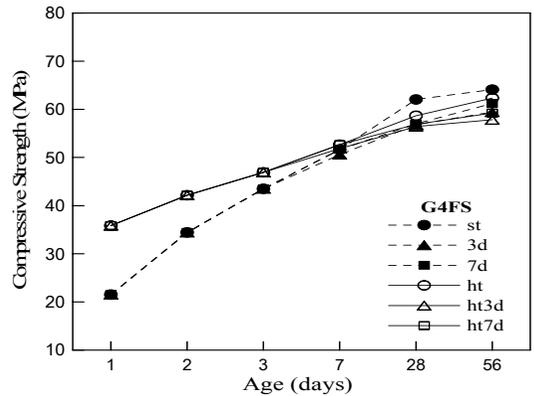


Fig. 4 양생조건별 압축강도 (G4FS)

### 3.3 고강도콘크리트의 공극량 및 총통과전하량

광물질혼화재의 종류, 혼합률, 양생온도 및 양생조건별 경화한 고강도콘크리트의 공극량과 염화물이온 침투저항성을 나타내는 총통과전하량을 측정하여 정리한 것이 Table 9이다.

Table 9 고강도콘크리트의 공극량 및 총통과전하량

Items Types	Cement/SG /SF/EA (%)	Void (%)						Passed charge (Coulomb)					
		ST	ST3d	ST7d	HT	HT3d	HT7d	ST	ST3d	ST7d	HT	HT3d	HT7d
G0	100/0/0/0	8.20	-	-	8.83	-	-	1379.0	-	-	1924.2	-	-
G4	60/40/0/0	7.32	-	-	8.53	-	-	346.3	-	-	737.0	-	-
G4F	55/40/5/0	6.51	7.33	7.28	7.41	7.33	7.25	120.1	173.0	153.3	147.3	181.8	158.0
G4FS	48/40/5/7	6.41	7.21	7.14	7.01	7.34	7.28	35.6	62.9	55.5	40.8	80.5	52.2

이 표에서 양생온도 및 양생조건에 따라 공극량과 총통과전하량이 상이함을 알 수 있으며, 35°C에서 양생한 경우가 23°C로 양생한 경우보다 공극량과 총통과전하량이 각각 크게 나타났다. 이는 높은 온도에서의 빠른 수화반응으로 치밀하지 못한 조직이 생성되는 것에 기인한 것으로 판단된다.

#### 4. 고강도콘크리트의 염화물이온 침투 저항성에 대한 고찰

##### 4.1 광물질 혼화재의 종류 및 혼합률

고강도콘크리트의 전기간 수중양생한 경우에 대한 광물질혼화재 혼합률별 염화물이온 총통과전하량 및 공극량과의 관계로 정리하여 나타낸 것이 Fig. 5이다.

이 그림을 보면 광물질혼화재의 종류 및 혼합률에 따른 고강도콘크리트의 총통과전하량이 양생온도별로 상이함을 알 수 있으며, 경화한 고강도콘크리트의 공극률이 클수록 총통과전하량도 크게 나타나는 경향을 보였다.

특히 G4FS 고강도콘크리트는 총통과전하량이 기준 콘크리트와 비교하면 현저하게 감소되었으며, 이때 ASTM C 1202의 총통과전하량에 따른 염화물침투 저항성에 대한 등급에 의하면<sup>(20)</sup> Negligible에 해당되는 값으로써 염화물이온 침투저항성이 매우 우수한 콘크리트로 판단된다.

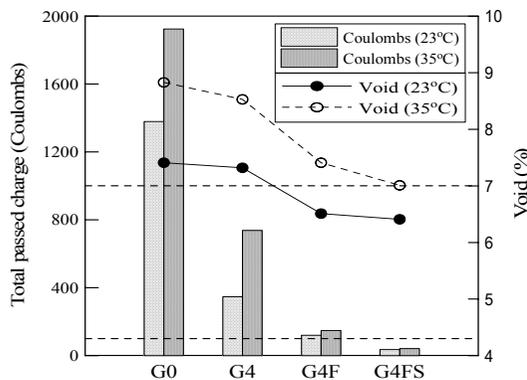


Fig. 7 혼합률별 염화물이온 총통과전하량과 공극량(재령 28일)

그리고 G4F 고강도콘크리트의 경우에도 Very low에 해당되는 값으로써 염화물이온 침투저항성이 우수한 콘크리트로 생각된다.

이상의 실험결과를 종합해보면 고로슬래그미분말과 실리카흙 및 팽창재를 각각 적정량 혼합함으로써 염화물이온 침투저항성을 현저하게 향상시킬 수 있는 밀실한 고강도콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 사료된다.

그래서 이번에는 광물질혼화재 혼합 고강도콘크리트의 재령 28일 공극량과 총통과전하량과의 상관관계를 알아보기 위하여 회귀분석 결과를 나타낸 것이 Fig. 6이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 양생온도에 따라 공극량과 총통과전하량과의 사이에는 power 함수에 의한 결정계수가 0.9 이상으로 좋은 상관관계를 나타내었다.

##### 4.2 양생 온도 및 양생 조건

G4F 고강도콘크리트와 G4FS 고강도콘크리트를 선정하여 양생온도와 양생조건을 달리한 고강도콘크리트의 총통과전하량과 공극량과의 관계를 그래프로 나타낸 것이 Fig. 7이다.

양생온도나 양생조건에 따라 총통과전하량이 다소 상이하였으며, 전 기간 23°C 수중에서 양생한 고강도콘크리트의 총통과전하량이 35°C로 양생한 경우보다 좋은 결과를 나타내었다.

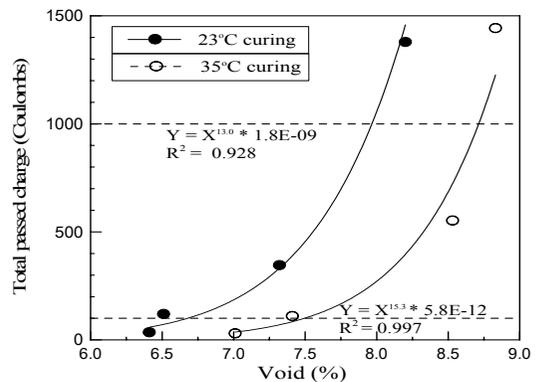


Fig. 8 공극량과 총통과전하량(재령 28일)

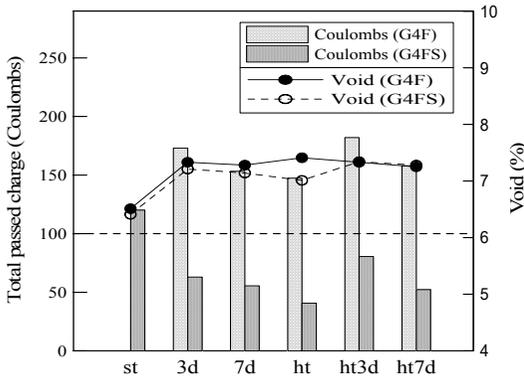


Fig. 9 양생조건별 염화물이온 총통과전하량과 공극량(재령 28일)

한편, G4FS 고강도콘크리트의 총통과전하량은 양생온도 및 양생조건에 관계없이 G4F 고강도콘크리트보다 1/2 정도 이하되는 작은 값의 좋은 결과를 나타내었다.

그러나 G4F 고강도콘크리트와 G4FS 고강도콘크리트의 공극량은 총통과전하량과는 경향이 상이함으로 상관관계를 알 수 없었다.

그래서 이번에는 G4F 고강도콘크리트와 G4FS 고강도콘크리트에 대한 양생온도 및 양생조건에 따른 재령 28일 공극량과 총통과전하량과의 상관관계를 나타낸 것이 Fig. 8이다.

이 그림에서 G4F 및 G4FS 고강도콘크리트의 공극량이 증가할수록 총통과전하량도 증가하는 경향을 나타내었으나, 이들 사이의 명확한 상관관계는 알 수 없었다.

한편, G4F 및 G4FS 고강도콘크리트의 공극량 대신 재령 28일 압축강도와 총통과전하량과의 관계를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 9이다.

이 그림에서 두 종류의 고강도콘크리트는 압축강도가 증가하는데 따라 총통과전하량이 감소하는 경향의 비교적 좋은 상관관계를 나타내었다.

## 5. 결 론

광물질혼화제의 종류, 혼합률과 양생온도 및 양생조건을 달리하여 제조한 고강도콘크리트의 물성, 공극량

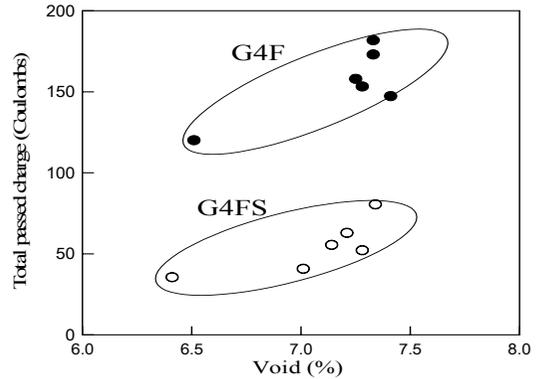


Fig. 10 혼합률별 공극량과 총통과전하량(재령 28일)

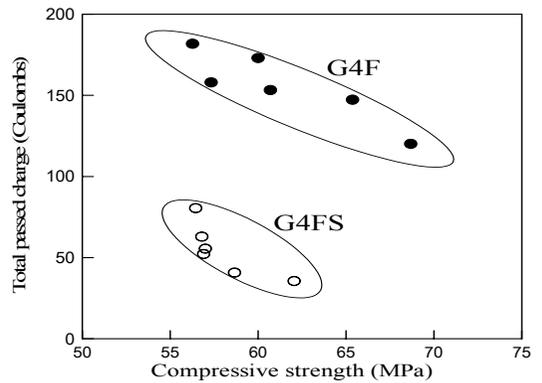


Fig. 11 혼합률별 압축강도와 총통과전하량(재령 28일)

및 염화물이온 침투저항성을 비교 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 광물질혼화제의 종류와 혼합률을 달리한 고강도콘크리트의 초결시간은 크게 상이하였으나, 종결시간은 큰 차이가 없었으며 기준콘크리트보다 약간 지연되었다. 또한 양생온도에 따라서도 고강도콘크리트의 응결시간에 차이가 있었으며, 팽창제 혼합 고강도콘크리트의 경우 양생온도에 따라 응결시간이 크게 촉진됨을 알 수 있었다.
- 2) 광물질혼화제 혼합 고강도콘크리트를 35°C로 양생한 경우 초기재령에서 압축강도가 23°C로 양생한 경우보다 컸으나 재령 28일 이후에는 반전되었다. 특히 G4FS 고강도콘크리트의 경우 초기재령의 압축강도는 컸으나 재령 28일 이후에는 G4F 고강도

콘크리트와 비교하여 낮게 나타났다. 이는 초기재령의 빠른 수화로 형성된 두터운 막으로 인해 장기 재령의 강도발현이 억제되기 때문인 것으로 판단된다.

- 3) G4FS 고강도콘크리트의 총통과전하량이 G4F 고강도콘크리트 경우보다 약 1/2 이하 정도의 작은 좋은 결과를 나타내었다. 그러나 양생온도나 양생 조건에 따라서 총통과전하량이 다소 상이하였으며, G4FS 고강도콘크리트를 전 기간 23℃의 수중에서 양생한 경우 총통과전하량이 매우 작은 좋은 결과를 나타내었다.
- 4) G4FS 고강도콘크리트의 총통과전하량은 Negligible에 해당되며, G4F 고강도콘크리트 경우에는 Very low에 해당되는 값을 나타내었다. 그러므로 고로슬래그미분말, 실리카흙 및 팽창제를 각각 적정량 혼합함으로써 염화물이온 침투저항성을 현저하게 향상시킬 수 있는 밀실한 고강도콘크리트의 제조가 가능하다고 판단되었다.

#### 참고문헌

1. 문한영, 최연왕, “고로슬래그미분말을 혼화제로 사용한 고강도콘크리트의 강도특성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 16권 1-4호, 1996.
2. 문한영, 최연왕, “고강도용 콘크리트의 온도상승 억제를 위한 고로슬래그미분말의 효과”, 콘크리트학회 논문집, 제 10권 제 4호, 1998.
3. 문한영, 김진철, “실리카흙을 혼합한 콘크리트의 고강도화에 관한 기초적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 12권 제 4-1호, 1992.
4. 문한영, 문대중, 신승호, “실리카흙 혼합 고강도콘크리트의 강도향상을 위한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 14권 제 5호, 1994.
5. 문한영, 김홍삼, 최두신, “콘크리트 종류별 모세관공극 특성과 전위차 염소이온 확산계수”, 대한토목학회논문집, 제 23권 5A호, 2003.
6. 橋 大介, 山崎庸行, “超高强度コンクリート”, 콘크리트工學, Vol.31, No.3, 1993.
7. 辻 幸和 外 3名, “膨脹 콘크리트による構造物の高機能化/高耐久化 研究委員會 報告”, 콘크리트工學年次論文集, Vol. 25, No. 1, 2003.
8. 辻 幸和 外 2名, “膨脹 콘크리트によるひび割れ制御

に関する研究”, 콘크리트工學年次論文集, Vol. 24, No.1, 2002.

9. ACI Committee 233, “Granulated Blast-furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete”, Committee Report ACI 234, American Concrete Institute, Detroit, 1999.
10. Jähren, P., “Use of Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete”, ACI Publication, SP-79, Vol. 1, 2, 1983.
11. Tomosawa, F. et. al., “Development and Evaluation of Binders for High Strength Concrete”, Proceeding of Cement Association of Japan, Vol.46, 1992.
12. Enyi, C., Huizhen, “Role of Expansive Admixtures in High-Performance Concrete”, High-Performance Concrete : Research to Practice, ACI SP-189, 1999.
13. Nagataki, S., Gomi, H., “Expansive Admixture (mainly Ettringite)”, Cement and Concrete Composite, No. 20, 1998.
14. ACI Committee 223, “Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete”, Committee Report ACI 223, American Concrete Institute, Detroit, 1999.
15. ACI Committee 234, “Standard Practice for the Use of Silica Fume in Concrete”, Committee Report ACI 234, American Concrete Institute, Detroit, 1999.
16. Malhotra, V. M. and Mehta, P. K., “Pozzolanic and Cementitious Materials”, Gordon and Breach Publishers, Taylor Woodrow, 1996.
17. Kjellsen, K. O., Detwiler, R. J. and Gjørv, O. E., “Pore Structure of Plain Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures.” Cement and Concrete Research, Vol. 20, No. 6, Nov.1990.
18. Kjellsen, K. O., Detwiler, R. J., “Reaction Kinetics of Portland Cement Mortars Hydrated at Different Temperatures.” Cement and Concrete Research, Vol. 22, No. 1, Nov.1992.
19. Kjellsen, K. O. and Detwiler, R. J., “Later-Age Strength Prediction by a Modified Maturity Model,” ACI Material Journal. Vol. 90, No. 3, 1993.
20. ASTM C 1202, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”. ASTM, Philadelphia, PA, 1992.

- 
21. AASHTO T 277, "Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete", AASHTO, Washington, DC, 1990.
  22. Kazuyuki Torii, Mitsunori Kawamura, "Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume", Cement and Concrete Composites, Vol. 16, 1994.
  23. Caijun Shi, Julia A. Stegemann, and Robert J. Caldwell., "Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and Its Implications on the Rapid Chloride Permeability Test(AASHTO T 277 and ASTM C 1202) Results", ACI Materials Journal, Vol. 95, no. 4, 1998.
  24. Celik Ozyildirim, "Laboratory Investigation of Low-Permeability Concretes Containing Slag and Silica Fume.", ACI Materials Journal, Vol. 91, no. 2, March-April 1994.
  25. Rachel J. Detwiler, Knut O. Kjellsen, and Odd E. Gjorv, "Resistance to Chloride Intrusion of Concrete Cured at Different Temperatures", ACI Materials Journal, Vol. 88, no. 1, January-February 1991.
  26. Abdurahman Alhozaimy, Parviz Soroushian, and Faiz Mirza, "Effects of curing conditions and age on chloride permeability of fly ash mortar", ACI Materials Journal, Vol. 96, no. 1, 1996.

(접수일자 : 2004년 1월 19일)