

## 광물질혼화재 종류별 고강도콘크리트의 압축강도 및 촉진 염소이온침투 특성

문한영<sup>1)</sup> · 김병권<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 <sup>2)</sup> 현대건설 기술연구소

(2004년 2월 5일 원고접수, 2004년 5월 21일 심사완료)

### Compressive Strength and Chloride Permeability of High Strength Concrete according to the Variety of Mineral Admixtures

Han-Young Moon<sup>1)\*</sup> and Byoung-Kwon Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

<sup>2)</sup> Hyundai Institute of Construction Technology, Yongin, Korea

(Received February 5, 2004, Accepted May 21, 2004)

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the ability to resist chloride ions penetration of the concrete structure under marine environment in south-east asia especially.

In this study, high strength concrete(HSC) with various combination of ordinary portland cement(OPC), blast-furnace slag(SG) and silica fume(SF) are cured 23 and 35 °C considering the site weather, and are cured in water for 3, 7 or 56 days respectively. And to investigate the fundamental properties and the resistance of chloride penetration of various HSC, setting time, slump flow, compressive strength, void and ASTM C 1202 test were conducted. Test results show that the compressive strength of HSC is similar regardless of SG replacement ratio and total charge passed of chloride is the smallest at 40% replacement of SG. The compressive strength of G4FS HSC is, besides, outstandingly high at early age compare with other HSC, but the compressive strength of G4F HSC, which is vary according to curing temperature and condition, most high at the age after 7 days. Total passed charge of HSC get larger in the order G4FS <G4F <G4M <G4 <Control concrete. Especially, G4FS and G4F HSC show very excellent ability to resist chloride ions penetration, which are correspond to 'Negligible' and 'Very low' based on chloride permeability grade of ASTM 1202.

**Keywords :** high strength concrete, mineral admixtures, curing conditions, ability to resist chloride ions penetration

#### 1. 서 론

최근 급속한 경제 및 산업발전에 힘입어 콘크리트 구조물이 장대교량, 초고층 건물, 원자력발전소, 심해수중과 같은 해양 및 가혹한 환경에도 널리 적용되고 있으며, 콘크리트 구조물의 성능을 향상시키기 위하여 고유동, 고강도 및 고내구성과 같은 고성능화에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1)</sup>. 또한 이와 같은 요구에 부응하기 위하여 산업부산물 및 폐기물로 발생되는 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카흙, 석회석미분말 및 메타카올린 등과 같은 광물질혼화재를 혼합한 콘크리트의 제 물성 개선 및 향상에 유익한 연구성과들이 발표되고 있다<sup>1-7)</sup>. 제철산업의 부산물인 고로슬래그미분말을 콘크리트용 혼화재료로 활용

하여 콘크리트의 워커빌리티 개선, 수화열 저감과 내해수성 및 장기강도의 향상 등에 대한 연구성과<sup>2-3)</sup>가 있으며, 규소 함유 제조시 발생하는 실리카흙을 사용함으로써 충전효과에 의하여 콘크리트의 강도를 크게 향상시킬 뿐만 아니라 내구성 및 수밀성 개선 등 고강도콘크리트 제조시 필수적으로 활용되고 있다<sup>4-5)</sup>.

그리고 주지하는 바와 같이 카올린(kaolin)을 소성한 메타카올린은 시멘트 입자 사이의 공극 및 불연속 영역을 충전하여 고밀도화 할뿐만 아니라 에트링가이트의 생성과 포졸란 반응으로 강도 및 내구성을 향상시킨다고 보고되고 있으며<sup>6-7)</sup>, 콘크리트 구조물에 발생하는 각종 수축균열을 제어할 목적으로 사용되는 팽창재는 수축보상효과 이외에도 화학적 프리스트레싱에 의한 내력 증진 및 수밀성 향상 등에 유용하다는 연구성과가 발표되고 있다<sup>8-10)</sup>.

본 연구에서는 우리 나라 건설업체의 해외, 특히 동남아시아의 진출에 따른 고속도로, 고속철도, 항만 및 해양콘

\* Corresponding author

Tel : 02-2290-0323 Fax : 02-2293-9977

E-mail : moon77@hanyang.ac.kr

크리트구조물 등의 건설수량이 크게 증가하고 있는 추세를 감안하여, 동남아 지역의 해양콘크리트구조물이 축조되는 현장 여건을 고려한 양생온도 및 조건에 따른 콘크리트 기초 물성 및 염소이온침투특성을 평가함에 의한 광물질혼화제 혼합 고강도콘크리트의 활용에 착안하게 되었다. 그래서 고로슬래그미분말의 혼합률 0, 30, 40 및 50% 4종류와 고로슬래그미분말 40%를 기준으로 고정하여 광물질혼화제 중 실리카흙, 메타카올린 및 팽창재의 혼합률을 각각 다르게 조합하여 혼합한 고강도콘크리트를 제조하였다. 이때 현장의 기후조건을 고려하여 양생온도 23℃ 및 35℃의 2 종류와 양생조건을 전기간 수중양생, 3일 수중양생 후 기건양생 및 7일 수중양생 후 기건양생의 3 종류씩 각각 변화시킨 고강도콘크리트는 총 22종류이다.

이들 광물질혼화제를 혼합한 고강도콘크리트의 응결, 압축강도, 공극률 및 총 통과전하량을 측정하여 비교, 고찰함으로써 해양콘크리트구조물에 적합한 고강도콘크리트의 현장적용을 위한 유용한 데이터를 제시하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트 및 광물질혼화제

시멘트는 비중 3.15의 보통포틀랜드시멘트(OPC), 광물질혼화제는 고로슬래그미분말(SG), 실리카흙(SF), 메타카올린(MK) 및 팽창재(SS)를 사용하였으며, 이들의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

#### 2.1.2 골재 및 화학혼화제

잔골재는 세척해사, 굵은골재는 최대치수 13mm의 부순 돌을 사용하였으며, 잔·굵은 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 굵은 골재의 입도 시험결과 13mm, 10mm, 5mm, 2.5mm체의 통과율은 각각 98%, 60%, 5%, 2%이

었다. 한편, 화학혼화제는 폴리카르본산계 고성능감수제(HRWR)를 사용하였다.

### 2.2 콘크리트의 배합

광물질혼화제 4 종류의 혼합률과 목표 슬럼프플로우 60 ± 5cm 및 잔골재율 39%로 고정시킨 고강도콘크리트의 배합은 Table 3 이다.

Table 3의 시리즈 1은 물-결합재비 30%, 고로슬래그미분말의 혼합률 0, 30, 40 및 50%로 변화시킨 4 배합이며, 시리즈 2는 고로슬래그미분말의 혼합률 40%를 기준으로 선정하여 실리카흙, 메타카올린 및 팽창재를 각각 조합한 4 배합이다. 고강도콘크리트는 60ℓ 용량의 강제식 믹서를 사용하여 잔·굵은골재와 시멘트를 30초간 건식 비비기한 후 혼합수와 고성능감수제를 투입하여 150초 동안 믹싱하여 제조하였다. 그리고 콘크리트공시체는  $\Phi 10 \times 20$  cm 원주형 몰드로 제조하여 23℃ 공기중과 습도 95%, 35℃의 항온항습실에서 1일간 각각 양생한 후 탈형 하였다. 이때 탈형한 공시체는 현장의 기후조건을 고려하여 23℃ (standard curing 또는 st로 약함)와 35℃ (hot curing 또는 ht로 약함) 수중에서 Table 4와 같은 6 종류의 조건으로 각각 양생을 실시하였다.

### 2.3 실험방법

#### 2.3.1 응결 및 슬럼프플로우

굳지 않은 콘크리트의 응결시간은 KS F 2436에 준하여 측정하였으며, 이때 양생온도는 23℃ 및 35℃로 정하였다. 또한 슬럼프시험은 KS F 2402와 대한토목학회(1995)의 “수중불분리성 콘크리트의 슬럼프플로우 시험방법”에 의하여 실시하였으며, 슬럼프시험 직후 흘러 퍼진 콘크리트의 최대지름과 직교하는 지름을 측정하여 평균값을 슬럼프플로우 값(cm)으로 나타내었다.

Table 1 Chemical composition and physical properties of cement and mineral admixture

Items Types	Chemical composition(%)							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	SO <sub>3</sub>	Ig.loss		
OPC	62.75	22.06	5.47	3.31	2.40	2.34	1.01	3.15	3,366
SG	41.98	34.69	15.42	0.23	6.36	0.15	0.04	2.90	4,550
SF	0.19	95.0	0.26	0.13	0.45	0.23	0.10	2.30	260,000
MK	0.1	52.5	44.7	0.2	0.3	-	0.4	2.50	130,000
SS	58.42	23.06	5.78	3.53	1.72	4.56	1.83	2.65	-

Table 2 Physical properties of aggregates

Items Types	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 3 Mix proportion of concretes

Types	Items	W/B (%)	OPC/SG/MK/SF/SS(%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )								HRWR (C×%)
					W	C	S	G	SG	SF	MK	SS	
Series 1	G0	30	100/0/0/0/0	39	165	550.0	629	1003	-	-	-	-	0.90
	G3F	30	65/30/0/5/0	39	165	357.5	633	1010	165	27.5	-	-	0.90
	G4F	30	55/40/0/5/0	39	165	302.5	632	1007	220	27.5	-	-	0.90
	G5F	30	45/50/0/5/0	39	165	247.5	630	1005	275	27.5	-	-	0.90
Series 2	G4	30	60/40/0/0/0	39	165	330.0	623	993	220	-	-	-	0.90
	G4M	30	55/40/5/0/0	39	165	302.5	630	1004	220	-	27.5	-	0.90
	G4FS*	30	48/40/0/5/7	39	165	264.0	642	1023	220	27.5	-	38.5	0.90

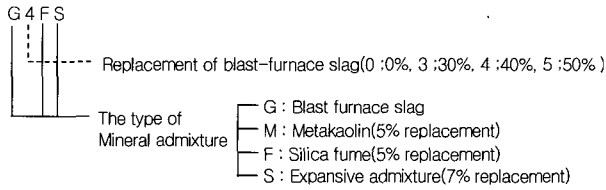


Table 4 Curing condition of concretes

Curing temperature	Items	Curing condition	Remark
23 °C		Cured in water for 56 days	st
		Cured in water for 3 days and then cured in air	3d
		Cured in water for 7 days and then cured in air	7d
35 °C		Cured in water for 56 days	ht
		Cured in water for 3 days and then cured in air	ht3d
		Cured in water for 7 days and then cured in air	ht7d

2.3.2 압축강도

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 의하여 재령 3, 7, 28 및 56일에 각각 500 ton 만능시험기를 사용하여 측정하였다.

2.3.3 공극량

정확한 콘크리트의 공극량은 ASTM C 642 (Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete)의 시험방법에 준하여 측정하였다.

$$\text{공극량 (\%)} = (G_2 - G_1) / G_2 \times 100$$

여기서,  $G_1$  = 벌크 비중,  $[A/(C-D)] \cdot \rho$ ,  $G_2$  = 겉보기 비중,  $[A/(A-D)] \cdot \rho$ ,  $\rho$  = 물의 비중, A = 오븐 건조 샘플의 공기중 중량(g), C = 침지와 끓인후 공기중에서 측정된 표면건조 중량(g), D = 침지와 끓인후 물속에서 측정된 겉보기 중량(g)

2.3.4 염소이온 침투저항성

염소이온 침투저항성은 ASTM C 1202 (Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to

Resist Chloride Ion Penetration)에 의하여 재령 28일에 실시하였다. 이때 전해질 용액은 양극셀에 0.3N NaOH, 음극셀에 3% NaCl 수용액을 사용하였으며, 30분 간격으로 6시간동안 측정된 전류를 사다리꼴법칙에 의해 아래 식과 같이 총 통과전하량으로 환산하였다.

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

여기서, Q = 총 통과전하량 (coulombs),  $I_n$  = n분 경과후의 전류 (amperes)

3. 고강도콘크리트의 기초물성 및 압축강도에 대한 고찰

3.1 굳지 않은 고강도콘크리트의 응결

고로슬래그미분말 혼합률 0, 30, 40 및 50%와 실리카흙을 5% 혼합하여 양생온도와 양생조건을 달리한 고강도콘크리트의 기초물성 및 압축강도 실험결과를 정리한 것이 Table 5의 시리즈 1이며, 고로슬래그미분말 혼합률 40%를 기준으로 하여 광물질혼화재 3종류를 각각 조합한 실험결과가 Table 5의 시리즈 2이다.

고로슬래그미분말 혼합률 0, 30, 40 및 50%과 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 양생온도에 따른 응결시간을 나타낸 것이 Fig. 1이다.

이 그림에서 고로슬래그미분말을 혼합하지 않은 고강도콘크리트(기준 콘크리트 또는 control concrete)보다 고로슬래그미분말의 혼합률이 증가함에 따라 응결시간이 약간 지연됨을 알 수 있다. 특히, 35 °C로 양생한 경우 고로슬래그미분말의 혼합률에 관계없이 응결시간이 대체로 유사하였으나, 23 °C로 양생한 경우 고로슬래그미분말의 혼합률이 증가함에 따라 초결 및 종결시간이 약간 지연되었다. 특히, 23 °C로 양생한 경우 고로슬래그미분말을 혼합함에 따라 응결시간이 지연되는 이유는 고로슬래그미분말이 포틀랜드시멘트와 물 사이의 수화반응으로 자유로워진 알칼리에 의해서 활성화되는 잠재수정성을 가짐으로써 수화반응이 느리게 이루어지기 때문이라고 생각된다<sup>11)</sup>.

Table 5 Fundamental properties and comp. strength results of high strength concrete

Types	Items	OPC/SG/ MK/SF/SS(%)	Curing method	Slump flow (cm)	Void (%)	Compressive strength(MPa)			
						3days	7days	28days	56days
Series 1	G0	100/0/0/0/0	st	55.0	8.20	33.3	39.7	52.4	53.3
			ht		8.83	40.3	43.1	47.3	49.5
	G3F	65/30/0/5/0	st	59.0	7.02	38.6	47.6	64.0	67.1
			ht		7.61	46.3	53.2	63.5	64.2
	G4F	55/40/0/5/0	st	60.5	6.51	39.1	51.8	68.7	72.4
			3d		7.33	39.1	48.5	60.0	61.5
			7d		7.28	39.1	51.8	60.7	62.2
			ht		7.41	46.6	50.2	65.4	67.2
			ht3d		7.33	46.6	53.0	56.3	57.9
			ht7d		7.25	46.6	50.2	57.3	59.5
G5F	45/50/0/5/0	st	63.0	7.01	33.6	52.8	65.3	66.4	
		ht		7.56	43.7	50.9	64.6	66.2	
Series 2	G4	60/40/0/0/0	st	65.0	8.20	32.4	46.9	60.5	64.3
			ht		8.83	38.0	42.0	48.3	51.5
	G4M	60/40/5/0/0	st	52.7	6.88	30.9	45.7	63.3	66.5
			ht		7.54	42.9	47.5	58.7	65.6
	G4FS	48/40/0/5/7	st	51.0	6.41	43.5	51.7	62.1	64.1
			3d		7.21	43.5	50.6	56.8	59.4
			7d		7.14	43.5	51.7	57.0	61.2
			ht		7.01	47.0	52.7	58.7	62.3
			ht3d		7.34	47.0	51.9	56.5	57.8
			ht7d		7.28	47.0	52.7	56.9	59.2

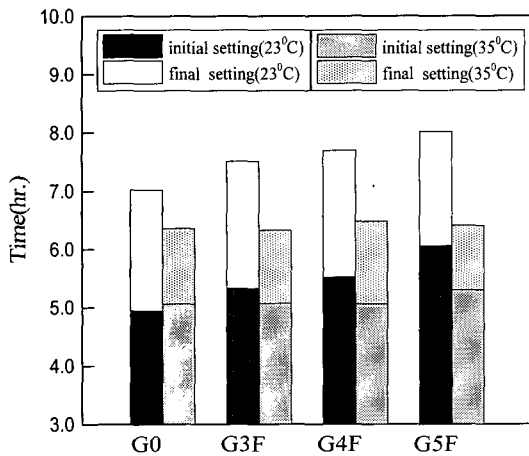


Fig. 1 Setting time with curing temp. and SG replacement

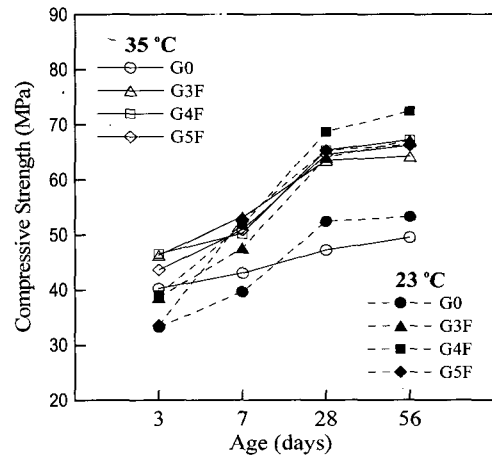


Fig. 2 Compressive strength with curing temp. and SG replacement

### 3.2 경화한 고강도콘크리트의 공극량 및 압축강도

Table 5의 양생온도 23 °C 및 35 °C 2 종류와 고로슬래그미분말 혼합물에 따른 고강도콘크리트의 재령별 압축강도를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 이 그림에서 고로슬래그미분말의 혼합유무 및 혼합률에 따라 고강도콘크리트의 압축강도가 약간 상이하였으며, 재령 3일에서는 35 °C로 양생한 고강도콘크리트의 압축강도가 23 °C로 양생한 경우보다 크게 나타났으나, 재령이 증가함에 따라 혼합률이 클

수록 기준콘크리트보다 압축강도가 현저하게 크게 나타났다. 양생온도가 높아짐에 따라 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 압축강도가 커지는 이유는 고로슬래그미분말 혼합 시멘트의 활성화 에너지가 보통포틀랜드시멘트보다 낮기 때문에 양생온도가 높은 쪽이 고로슬래그미분말 혼합 시멘트의 강도발현에 유리하다고 하는 Malhotra 등의 연구와도 유사하다.<sup>11)</sup>

이번에는 양생온도 23 °C 및 35 °C와 광물질혼화제의 종류에 따른 고강도콘크리트의 재령별 압축강도를 나타낸

것이 Fig. 3 및 4이다. 양생온도 23 °C 경우 Fig. 3에서 알 수 있듯이 광물질혼화재 혼합 고강도콘크리트의 압축강도는 기준 콘크리트와 비교하여 재령이 증가할수록 더욱 크게 나타났다. 이때 고로슬래그미분말과 실리카흄 혼합 고강도콘크리트 (G4F 고강도콘크리트 또는 G4F)의 압축강도가 7일 이후 재령에서 가장 크게 발현되었으며, 고로슬래그미분말과 실리카흄에 팽창재 혼합 고강도콘크리트 (G4FS 고강도콘크리트 또는 G4FS)의 경우 초기재령에서

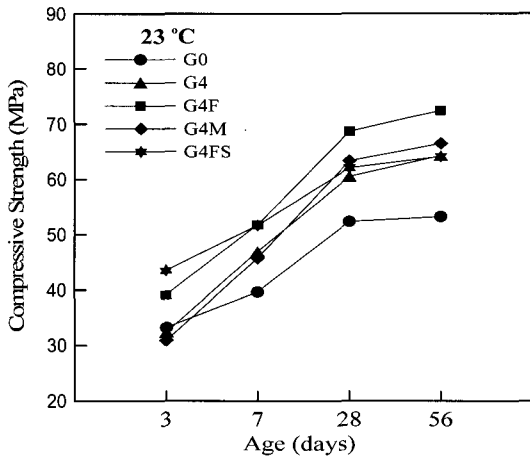


Fig. 3 Compressive strength of high strength concrete (23 °C)

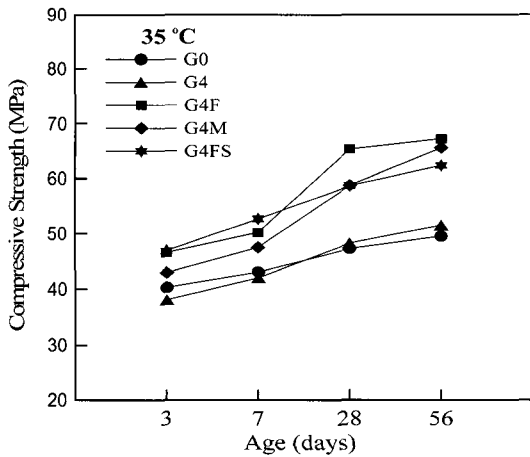


Fig. 4 Compressive strength of high strength concrete (35 °C)

압축강도는 크게 발현되었으나 7일 이후 재령에서는 상대적으로 낮게 나타났다. 한편 양생온도 35 °C 경우 광물질혼화재의 종류에 따라 고강도콘크리트의 압축강도가 그림 4에서와 같이 양생온도 23 °C와는 약간 상이하였으며, G4F와 G4FS 및 고로슬래그미분말과 메타카올린을 혼합한 고강도콘크리트 (G4M 고강도콘크리트 또는 G4M)가 기준콘크리트에 비해 큼을 알 수 있다.

이번에는 G4F 및 G4FS 고강도콘크리트 2 종류를 선정하여 양생 온도 및 조건별 압축강도를 재령 3, 7, 28 및 56일로 정리한 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 G4F와 G4FS 고강도콘크리트의 재령별 강도발현정도가 크게 상이하였으나, 35 °C로 양생한 경우, 재령 7일까지는 23 °C로 양생한 경우보다 2 종류 고강도콘크리트의 압축강도가 높았으나, 재령 7일 이후에서는 오히려 역전됨을 알 수 있다. 이러한 현상을 Kiellsen 등<sup>12-14)</sup>은 상대적으로 고온으로 양생할 경우 초기 수화반응이 촉진됨으로써 초기재령의 압축강도는 증가되나, 급격하게 생성된 수화물로 인하여 두터운 막(shell)이 형성되어 수화가 방해됨으로써 장기재령에서의 강도발현속도가 낮은 온도로 양생한 콘크리트보다 느려진다고 한다.

이상의 실험결과를 종합해보면 고로슬래그미분말과 실리카흄 혼합 G4F 고강도콘크리트와 고로슬래그미분말과 실리카흄에 팽창재 혼합 G4FS 고강도콘크리트는 다 같이 양생 온도 및 조건에 민감하였으며, 장기재령에서는 23 °C로 양생한 경우가 압축강도발현에 유리함을 알 수 있었다.

#### 4. 경화한 콘크리트의 염소이온 침투저항성에 대한 고찰

광물질혼화재의 종류, 혼합률, 양생 온도 및 조건별 경화한 고강도콘크리트의 염소이온 침투저항성을 나타내는 총 통과전하량을 재령 28일에서 측정하여 정리한 것이 Table 6 이다. 양생 온도 및 조건에 따라 고강도콘크리트의 총 통과전하량이 약간 상이하게 나타났으며, 35 °C에서 양생한 경우가 23 °C로 양생한 경우보다 총 통과전하량이 각각 큼을 알 수 있다. 여기서는 고로슬래그미분말 혼합물 및 광물질혼화재 4 종류별 고강도콘크리트의 촉진 염소이온 침투특성에 대하여 고찰하고자 한다.

Table 6 Total charge passed of high strength concrete (Coulomb, 28 days)

Types	Items	OPC/SG/ MK/SF/SS(%)	23°C			35°C		
			st	3d	7d	ht	ht3d	ht7d
Series 1	G0	100/0/0/0/0	1,379	-	-	1,924	-	-
	G3F	65/30/0/5/0	130	-	-	315	-	-
	G4F	55/40/0/5/0	120	173	153	147	182	158
	G5F	45/50/0/5/0	205	-	-	291	-	-
Series 2	G4	60/40/0/0/0	346	-	-	737	-	-
	G4M	55/40/5/0/0	142	-	-	236	-	-
	G4FS	48/40/0/5/7	36	63	56	41	81	52

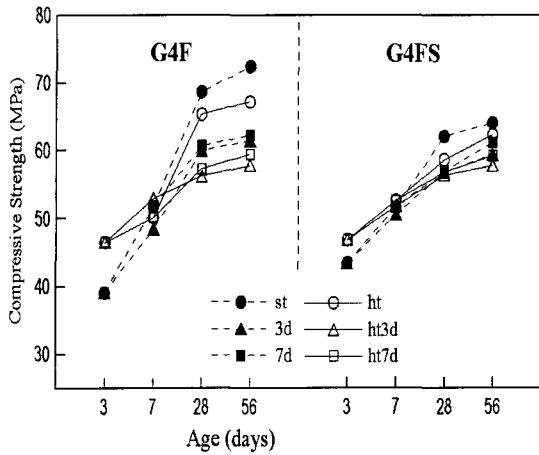


Fig. 5 Compressive strength of high strength concrete with curing temp. and conditions

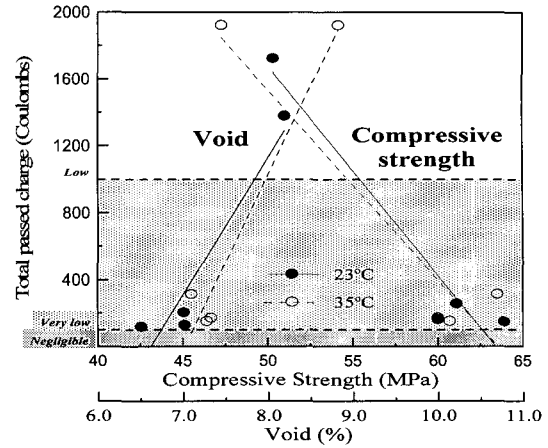


Fig. 7 Relationship between comp. strength and void and total charge passed

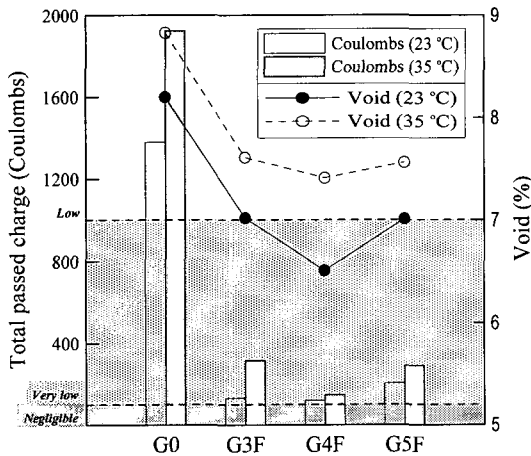


Fig. 6 Total charge pass and void with SG replacement ratio

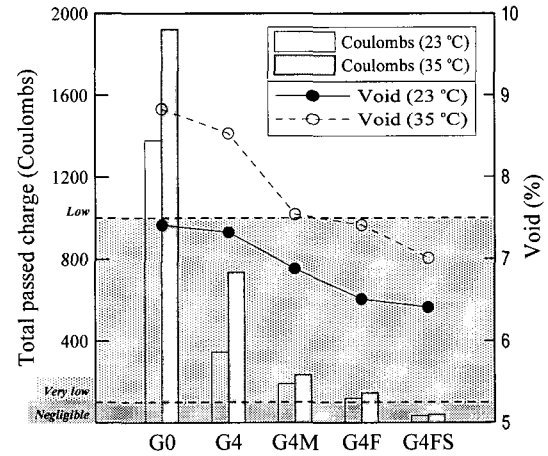


Fig. 8 Relationship between total charge passed and void with type of mineral admixtures

#### 4.1 고로슬래그미분말의 혼합률

고로슬래그미분말을 4 종류로 변화시킨 고강도콘크리트의 혼합률별 총 통과전하량 및 공극량의 관계로 정리한 것이 Fig. 6이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 기준 콘크리트의 총 통과전하량은 염소이온 침투저항성이 '낮음'(Low, 1000~2000 Coulombs)에 해당되는 큰 값을 나타내었다. 한편 고로슬래그미분말 혼합 고강도콘크리트의 총 통과전하량은 혼합률 및 양생온도별로 다소 상이하였으나 기준 콘크리트와 비교하여 현저하게 작은 값을 알 수 있다. 이 때 경화한 고강도콘크리트의 공극률은 총 통과전하량이 클수록 크게 나타났으며, G4F 고강도콘크리트의 총 통과전하량과 공극률이 가장 작았으며, ASTM C 1202의 총 통과전하량에 따른 염소이온 침투저항성 등급에 의하면<sup>15)</sup> '매우 낮음'(Very low, 100~1000 Coulombs)에 해당되는 값으로써 염소이온 침투저항성이 우수한 콘크리트로 판단된다. 따라서 고로슬래그미분말을 40%정도 혼합함으로써

고강도콘크리트의 염소이온 침투저항성을 향상시키는 효과를 얻었다.

고로슬래그미분말 혼합 고강도콘크리트의 재령 28일 총 통과전하량과 압축강도 및 공극량의 상관관계를 알아보기 위하여 정리한 것이 Fig. 7이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 양생온도에 따라 약간 상이하였으나 기준콘크리트의 총 통과전하량과 공극량은 고로슬래그미분말 혼합 고강도콘크리트와 비교하여 월등히 컸으며, 압축강도는 매우 작았으나, 총 통과전하량과 공극량 및 압축강도와는 각각의 상관성을 찾기 어려웠다.

#### 4.2 광물질혼화재의 종류별 양생온도 및 양생조건

고강도콘크리트의 광물질혼화재 종류별 염소이온 총 통과전하량 및 공극량의 관계를 정리한 것이 Fig. 8이다. 이 그림에서 광물질혼화재의 종류에 따른 고강도콘크리트의 총 통과전하량이 양생온도별로 약간 상이함을 알 수

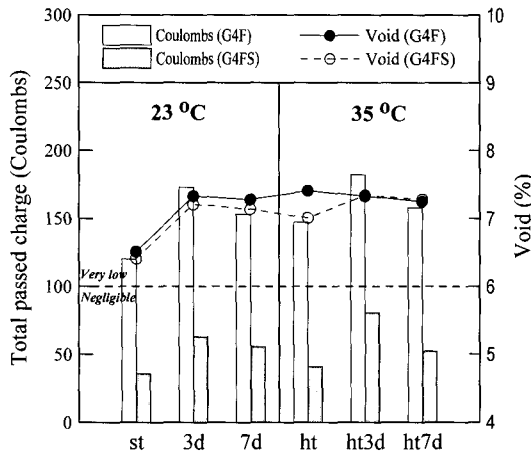


Fig. 9 Total charge passed and void with curing temp. and condition (G4F, G4FS)

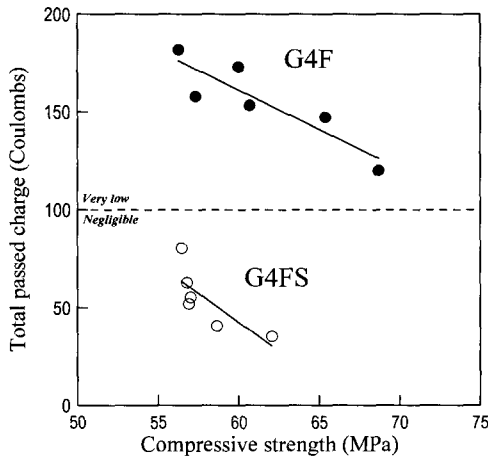


Fig. 10 Relationship between total charge passed and comp. strength (G4F, G4FS)

있으며, 총 통과전하량이 클수록 공극량이 크며 양생온도가 높을수록 총 통과전하량과 공극량이 큰 경향을 나타내었다. 이때 광물질혼화재 혼합 고강도콘크리트의 총 통과전하량은 4FS 강도콘크리트 < G4F 고강도콘크리트 < G4M 고강도콘크리트 < G4 고강도콘크리트 < 기준콘크리트의 순으로 크게 나타났다. 특히 G4FS 고강도콘크리트의 총 통과전하량은 양생온도에 따라 36 과 41 Coulombs로 기준콘크리트 1379와 1924 Coulombs보다 현저하게 작은 값을 알 수 있으며, 염소침투저항성은 '무시가능'(Negligible)에 해당되는 염소이온 침투저항성이 매우 우수한 콘크리트로 판단된다. 한편 G4F, G4M 및 G4 고강도콘크리트의 경우에도 '매우 낮음'(Very low) 범주에 속하는 값으로써 염소이온 침투저항성이 우수한 콘크리트로 해당된다. 다시 말해서 고로슬래그미분말 40% 혼합한 고강도콘크리트를 기준으로 하여 메타카올린 5%, 실리카흙 5% 및 실리카흙 5% + 팽창재 7%를 각각 혼합한 3 종류 고강도콘크리트의 염소이온 침투저항성이 현저하게 향상되는 밀실한 고강도

콘크리트의 제조가 가능할 것으로 판단된다.

이상의 실험결과에서 염소침투저항성이 가장 우수한 2 종류 고강도콘크리트, 즉 G4F 및 G4FS 고강도콘크리트를 선정하여 양생온도 2 종류와 양생조건 3 종류로써 조합한 6배합 고강도콘크리트에 대한 총 통과전하량과 공극량을 나타낸 것이 Fig. 9이다. 이 그림에서 양생 온도 및 조건에 따라 G4F 및 G4FS 고강도콘크리트의 총 통과전하량이 다소 상이하였으며, 전 기간 23 °C 수중에서 양생한 고강도콘크리트의 총 통과전하량이 35 °C로 양생한 경우보다 약간 좋은 결과를 나타내었다. 이 때 G4FS의 총 통과전하량은 G4F보다 약 1/2 정도 이하 되는 작은 값을 알 수 있다. 그래서 G4F 및 G4FS 고강도콘크리트의 재령 28일 총 통과전하량과 압축강도와의 관계를 알아보기 위하여 정리한 것이 Fig. 10이다. 이 그림에서 2 종류의 고강도콘크리트는 압축강도가 증가하는데 따라 총 통과전하량이 감소하는 경향을 나타내었으나 양생 온도와 조건이 각각 상이한 탓으로 명확한 상관관계를 알 수 없었다.

## 5. 결 론

광물질혼화재의 종류, 혼합률과 양생 온도 및 조건을 달리하여 제조한 고강도콘크리트의 응결, 공극량, 압축강도 및 염소이온 침투 특성에 대하여 비교 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고로슬래그미분말의 혼합률을 달리한 고강도콘크리트의 응결은 23 °C로 양생한 경우 기준 콘크리트보다 혼합률이 증가함에 따라 초결 및 종결시간이 약간 지연되었으나, 35 °C로 양생한 경우 고로슬래그미분말의 혼합률에 관계없이 응결시간이 대체로 유사하였다.
- 2) 고로슬래그미분말 혼합 고강도콘크리트의 압축강도는 재령이 증가함에 따라 혼합률이 클수록 기준콘크리트보다 현저하게 크게 나타났다. 한편 G4FS 고강도콘크리트의 경우 초기재령 압축강도는 컸으나, 재령 7일 이후에서는 G4F 고강도콘크리트의 압축강도가 가장 크게 발휘되었으며, 양생 온도 및 조건에 따라 차이가 있었다.
- 3) 고로슬래그미분말 혼합 고강도콘크리트의 총 통과전하량과 공극량은 혼합률 및 양생온도별로 다소 상이하였으나 기준 콘크리트와 비교하여 현저히 작은 값을 나타내었다. 특히 고로슬래그미분말 40% 혼합 고강도콘크리트는 염소이온 침투저항성이 크게 향상되는 효과를 얻었다.
- 4) 광물질혼화재 혼합 고강도콘크리트의 총 통과전하량은 G4FS 고강도콘크리트 < G4F 고강도콘크리트 < G4M 고강도콘크리트 < G4 고강도콘크리트 < 기준콘크리트의 순으로 크게 나타났다. 특히 G4FS 고강도콘크리트의 총 통과전하량은 기준콘크리트보다 현저하게 작은 '무시가능'(Negligible)에 해당됨으로써 염소이온 침투저항성이 매우 우수한 콘크리트로 판단된다.

## 참고문헌

1. 문한영, 김기형 “고성능콘크리트의 제조, 특성 및 활용에 대한 고찰,” 도로기술세미나, 한국도로공사, 1995, pp.1~68.
2. ACI Committee 233, “Granulated Blast-furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete,” Committee Report ACI 234, American Concrete Institute, Detroit, 2003, 233R-1~18.
3. 문한영, 최연왕, “고로슬래그미분말을 혼화제로 사용한 고강도콘크리트의 강도특성에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 16권 3호, 1996, pp.463~472.
4. ACI Committee 234, “Standard Practice for the Use of Silica Fume in Concrete,” Committee Report ACI 234, American Concrete Institute, Detroit, 2003, 234R-1~51.
5. Kazuyuki Torii and Mitsunori Kawamura, “Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume,” *Cement and Concrete Composites*, Vol.16, 1994, pp.279~286.
6. Curcio F. and Deangelis B. A., “Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No.6, 1998, pp.803~809.
7. Asbridge A. H., Chadbourn G. A. and Page C. L., “Effects of metakaolin and the interfacial transition zone on the diffusion of chloride ions through cement mortars,” *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.11, 2001, pp.1567~1572.
8. 日本コンクリート工學協會, “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 공학 연차 논문집, Vol.25, No.1, 2003, pp.1~62.
9. 小林一輔 編著, “特殊콘크리트”, 技報堂, 1980, pp.6~14.
10. Nagataki, S. and Gomi, H., “Expansive Admixture(Mainly Ettringite),” *Cement and Concrete Composite*, No.20, 1998, pp.163~170.
11. 長瀧重義 (1997), “콘크리트의 고성능화, 콘크리트의 고성능화의 메카니즘과 혼화재료의 역할”, 技報堂出版, pp.23~31.
12. Kjellsen, K. O., Detwiler, R.J., and Gjorv. O. E., “Pore Structure of Plain Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures,” *Cement & Concrete Research*, Vol.20, No.6, 1990, pp.927~933.
13. Kjellsen, K. O. and Detwiler, R.J., “Reaction Kinetics of Portland Cement Mortars Hydrated at Different Temperatures,” *Cement and Concrete Research*, Vol.22, No.1, 1992, pp.112~120.
14. Kjellsen, K. O. and Detwiler, R. J., “Later-Age Strength Prediction by a Modified Maturity Model,” *ACI Material Journal*, Vol.90, No.3, 1993, pp.220~227.
15. ASTM C 1202, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration,” ASTM, Philadelphia, 1992, pp.1~5.
16. Caijun, Shi. et. al., “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, pp.389~394.
17. Celik Ozyildirim, “Laboratory Investigation of Low-Permeability Concretes Containing Slag and Silica Fume,” *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No.2, March-April 1994, pp.197~202.

## 요 약

최근 우리나라 건설업체들의 해외, 특히 동남아시아의 빈번한 진출에 따른 고속도로, 항만 및 해양콘크리트구조물 등의 건설수주물량이 크게 증가하고 있는 추세이다. 이와 같은 요구에 부응하기 위하여 4종류의 산업부산물을 콘크리트용 혼화제로 활용한 고강도콘크리트에 착안하게 되었다.

본 연구에서는 광물질혼화제 4종류를 각각 조합한 고강도콘크리트는 현장의 기후조건을 고려하여 양생온도 2종류와 양생 조건 3종류씩 각각 변화시킨 총 22종류의 배합에 대하여, 고강도 강도 콘크리트의 기초물성과 염소이온 침투 저항성을 평가하기 위하여, 응결 및 슬럼프, 압축강도, 공극률 및 ASTM C 1202 시험을 실시하였다.

본 연구결과, 고로슬래그미분말 혼합 고강도콘크리트의 혼합률에 관계없이 압축강도는 거의 비슷하였으나, 염소이온 총 통과전하량은 혼합률 40%에서 가장 작은 값을 나타내었다. 한편 G4FS 고강도콘크리트의 초기재령 압축강도는 가장 컸으나, G4F의 압축강도는 양생 온도 및 조건에 따라 상이하였으며, 재령 7일 이후 가장 크게 발견되었다. 한편, 고강도콘크리트의 총 통과전하량은 G4FS < G4F < G4M < G4 < 기준 콘크리트의 순으로 크게 나타났으며, 특히 G4FS 및 G4F 고강도콘크리트의 총 통과전하량은 각각 기준콘크리트보다 현저하게 작은 ‘Negligible’ 및 ‘Very low’에 해당됨으로써 염소이온 침투저항성이 매우 우수한 콘크리트로 판단된다.

**핵심어 :** 고강도콘크리트, 광물질혼화제, 양생온도, 양생조건, 염소이온 침투저항성