

다성분계 혼합시멘트를 사용한 모르타르의 압축강도 및 염소이온투과저항성

배준영* · 김달중 · 권인표 · 조성현 · 노현승 · 김정환
<한일시멘트 중앙연구소>

1. 서 론

1990년대에 서해대교, 영종대교, 광안대교 등과 같은 대형 해양 콘크리트 교량이 건설되었으며, 최근에도 인천대교, 거가대교, 시화호 조력댐 등과 같이 해양환경 조건에서의 대형 콘크리트 구조물이 계속적으로 건설되고 있다. 이러한 대규모 해양 콘크리트 구조물들의 건설은 향후에도 점차 증가될 전망이다. 해양환경 조건하에 건설되는 콘크리트 구조물의 경우에는 해수 중에 용존하는 염소이온, 황산이온 및 마그네슘이온과 같은 유해이온의 침투에 의한 반응생성물 형성 및 철근부식에 의한 성능저하로 인해 사용기간이 크게 단축될 수 있다.

그러므로 해상에 시공되는 대형콘크리트 구조물의 강도 및 내구성을 포함한 품질을 향상시키기 위한 방안으로 콘크리트의 고품질화 및 고성능화를 위한 고유동, 고강도 및 고내구성과 관련된 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히 콘크리트의 고성능화를 위하여 플라이애시,

카올린과 같은 다양한 광물질들이 콘크리트의 혼화제로 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1~4)}

따라서 본 연구에서는 현재 가장 많이 활용되고 있는 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙을 이용한 다성분계 혼합시멘트를 제조하고, 이를 사용한 모르타르의 압축강도 및 염소이온 투과저항성을 검토함으로써 향후 해양용 고내구성 콘크리트 제조를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

다성분계 혼합시멘트를 사용한 모르타르의 압축강도 및 염소이온투과저항성을 검토하기 위하여 본 실험에서는 <표 1>에 나타낸 바와 같이 실험인자로 고로슬래그 대체율, 플라이애시 대체율, 실리카흙 대체율 3인자와 이들의 대체율 수

<표 1> 실험계획

인자	수준	수준			열배치	측정항목
		0	1	2		
A	고로슬래그 대체율 (%)	20	30	40	1	- 플로우 - 압축강도 (재령 3, 7, 28일) - 염소이온투과저항성 (재령 28일) - 염소이온 침투깊이 (재령 28일)
B	플라이애시 대체율 (%)	5	15	25	2	
C	실리카흙 대체율 (%)	0	7.5	15	4	

시멘트 : 모래 = 1: 2.45, W/B : 48.5%

<표 2> 직교배열표 및 배합비

No.	실험조건	열번호				결합재 배합비 (%)				
		1	2	3	4	고로슬래그	플라이애시	실리카흙	시멘트	합계
		A	B	e	C					
1	A0B0C0	0	0	0	0	20	5	0	75.0	100
2	A0B1C1	0	1	1	1	20	15	7.5	57.5	100
3	A0B2C2	0	2	2	2	20	25	15	40.0	100
4	A1B0C2	1	0	1	2	30	5	15	50.0	100
5	A1B1C0	1	1	2	0	30	15	0	55.0	100
6	A1B2C1	1	2	0	1	30	25	7.5	37.5	100
7	A2B0C2	2	0	2	1	40	5	7.5	47.5	100
8	A2B1C2	2	1	0	2	40	15	15	30.0	100
9	A2B2C0	2	2	1	0	40	25	0	35.0	100
10	비교용					-	-	-	100	100

준을 고로슬래그 20, 30, 40%, 플라이애시 5, 15, 25%, 실리카흙 0, 7.5, 15%로 각각 3수준으로 선정하였다.

모르타르의 배합비는 KS L 5105 「수경성 시멘트 모르타르의 압축강도시험 방법」에 의거 결합재 : 모래 = 1 : 2.45, W/B = 48.5% 조건으로 실험을 실시하였으며, 측정항목으로는 플로우, 재령 3, 7, 28일의 압축강도, 재령 28일의 염소이온 투과저항성과 염소이온 침투깊이를 측정하였다.

또한, 본 실험범위 내에서 어떠한 인자가 더 유의한 영향을 주었는지를 검토하기 위하여 표 2와 같이 실험계획법 중 직교배열실험법에 의해 실험을 실시하였으며, 실험결과를 분산분석한 후 F-검정을 실시하였다.

2.2 사용재료

시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리·화학적 성질은 <표 3>과 같다.

<표 3> 시멘트의 물리·화학적 성질

구분	비중	응결시간(분)		압축강도(MPa)			화학적 성분					
		초결	종결	3일	7일	28일	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
1종 (보통)	3.15	220	400	23.4	30.7	39.9	21.16	4.65	3.14	62.79	2.81	2.13

<표 4> 광물질 혼화재의 물리·화학적 성질

구분	비중	화학적 성분					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
고로슬래그	2.94	28.14	15.87	1.06	45.95	4.98	2.12
플라이애시	2.19	50.72	20.73	6.37	3.61	1.08	0.54
실리카흙	2.20	95.98	0.35	0.05	0.14	0.36	0.42

잔골재는 KS L 5100의 주문진 표준사를 사용하였다. 광물질 혼화재로 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙을 사용하였으며, 이들의 물리·화학적 성질은 <표 4>와 같다.

2.3 시험방법

2.3.1 유동성 및 압축강도

다성분계 혼합시멘트를 사용한 모르타르의 유동성을 평가하기 위하여 KS L 5111에 준하여 플로우 실험을 실시하였으며, 압축강도는 KS F 5105에 준하여 모르타르의 압축강도 시험을 실시하였다. 시험체 제작은 5×5×5cm의 큐빅 몰드로 제작하였으며, 압축강도 측정은 재령 3, 7, 28 일에 실시하였다.

2.3.2 염소이온 투과저항성 및 침투깊이

염소이온 투과저항성은 KS F 2711 「전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온투과저항성시험방법」에 의거하여 Ø100×50mm의 크기로 제작하였다. 각각의 셀에는 3.0% NaCl 용액과 0.3N NaOH 용액을 넣어 60V 전압으로 30분 간격으로 전류 값을 측정하여 6시간 후 종료하였으며, 아래 식을 사용하여 총 통과전하량을 구하였다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360})$$

여기서

$$Q = \text{통과전하량 (Coulombs)}$$

I_0 = 전압을 가한 직후의 전류 (Amperes)

I_t = 전압을 가한 후 t분 경과 후의 전류 (Amperes)

염소이온 침투깊이는 염소이온 투과저항성을 실시한 후 시험체를 할렬하여 표면에 0.1N AgNO₃용액을 분무하여 평가하였다. 이때 염소이온이 없는 부위에서는 갈색으로 변화하지만, 염소이온이 침투한 부위에서는 AgCl을 침전시킴으로서 은색으로 변화한다. 콘크리트의 표면으로부터 은색으로 변하는 지점까지를 염소이온 침투깊이로 하였으며 변색된 부위까지의 5개소의 평균깊이를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

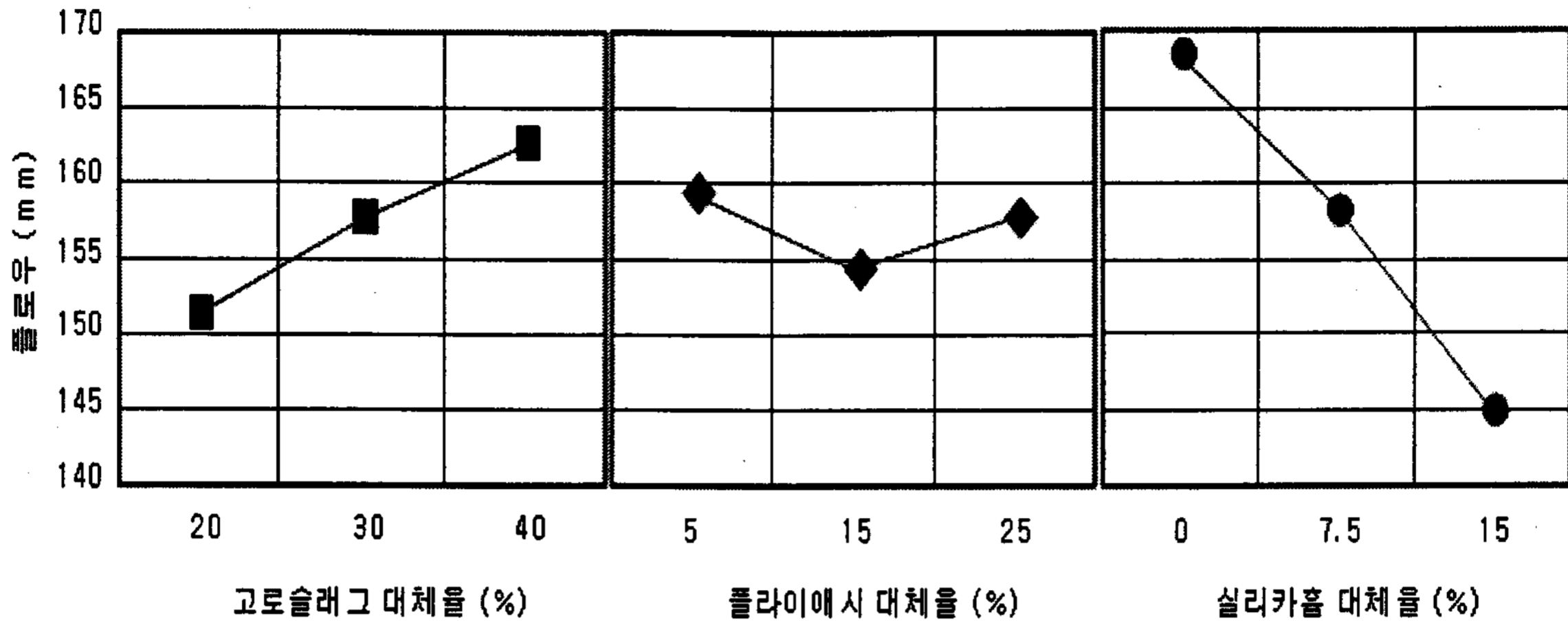
3.1 플로우

<표 5>는 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙의 대체율에 따른 플로우의 분산분석 결과를 나타낸 것이고, <그림 1>은 플로우의 모평균을 나타낸 것이다. 분산분석 결과 본 실험의 범위에서는 실리카흙과 고로슬래그 대체율이 신뢰수준 99%에서 모르타르의 플로우에 유의한 영향을 준 것으로 나타났으며, 플라이애시는 상대적으로 영향이 없는 것으로 나타났다.

<그림 1>에 나타난 바와 같이 고로슬래그는 대체율이 증가할수록 모르타르의 플로우가 증가하는 것으로 나타났으며, 실리카흙은 대체율이 증가할수록 모르타르의 플로우가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 실리카흙을 다성분계 혼합시멘트의 재료로 사용할 경우 모르타르 또는 콘

<표 5> 플로우의 분산분석 결과

실험요인	제공합	자유도	평균제공	Fo	Fo (0.10)	Fo (0.05)	Fo (0.01)
고로슬래그	193.5556	2	96.7778	8.9794	3.11	4.46	8.65
플라이애시	40.2222	2	20.1111	1.8660			
실리카흙	822.2222	2	411.1111	38.1443			
오차	21.5556	2	10.7778				
전체	1077.5556	8					



<그림 1> 실험인자의 수준에 따른 플로우 (시멘트 100% : 154mm)

크리트의 유동성을 저하시키는 것으로 나타나 이에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

3.2 압축강도

<표 6~8>은 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙의 대체율에 따른 각 재령별 압축강도의 분산

분석 결과를 나타낸 것이고, <그림 2>는 각 재령별 압축강도 모평균을 나타낸 것이다. 분산분석 결과 본 실험의 범위에서는 모든 재령에서 플라이애시 대체율이 99%의 신뢰구간에서 압축강도에 유의한 영향을 준 것으로 나타났다. 실리카흙은 재령 7일까지는 유의한 영향을 주지 못하였으나, 재령 28일에는 99%신뢰구간에 유의한

<표 6> 재령 3일 압축강도의 분산분석 결과

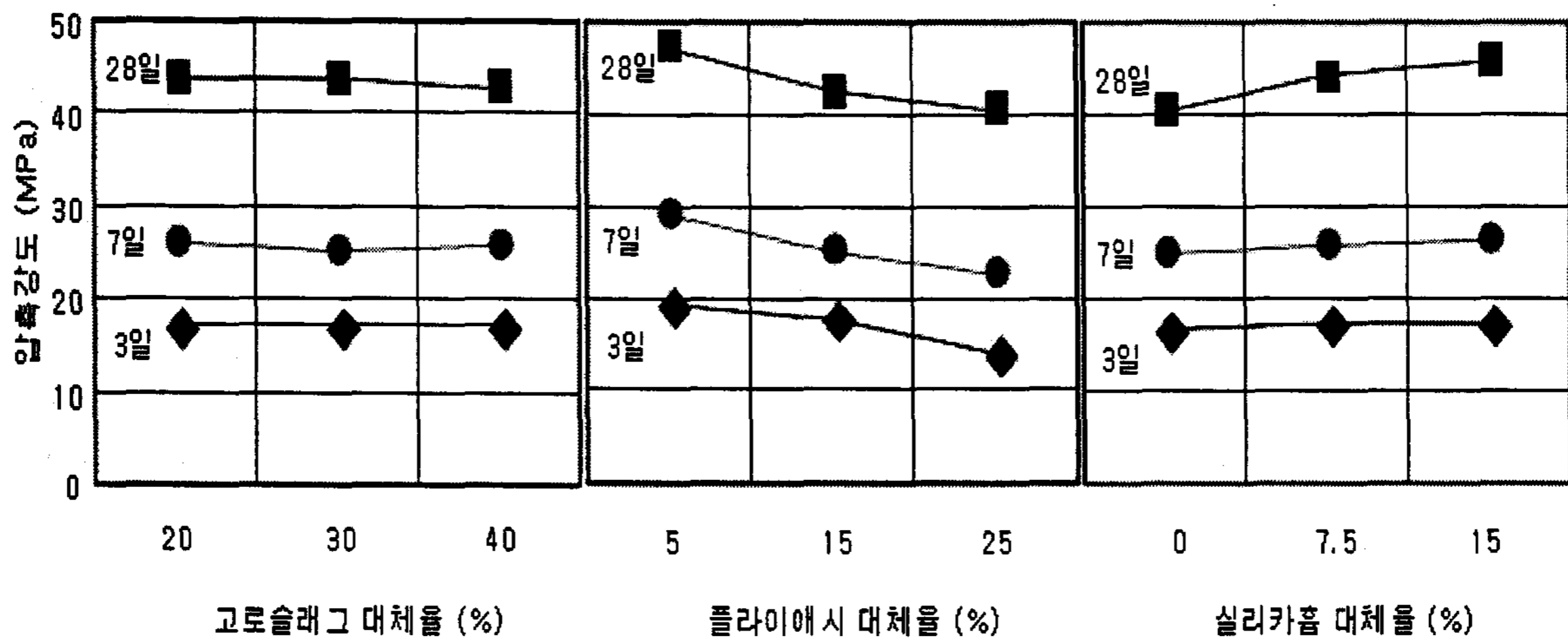
실험요인	제공합	자유도	평균제공	F _o	F _o (0.10)	F _o (0.05)	F _o (0.01)
고로슬래그	0.0689	2	0.0344	0.0295	3.11	4.46	8.65
플라이애시	46.9356	2	23.4678	20.0961			
실리카흙	0.7022	2	0.3511	0.3007			
오차	2.3356	2	1.1678				
전체	50.0422	8					

<표 7> 재령 7일 압축강도의 분산분석 결과

실험요인	제공합	자유도	평균제공	F _o	F _o (0.10)	F _o (0.05)	F _o (0.01)
고로슬래그	1.8600	2	0.9300	0.6534	3.11	4.46	8.65
플라이애시	61.4067	2	30.7033	21.5714			
실리카흙	4.0067	2	2.0033	1.4075			
오차	2.8467	2	1.4233				
전체	70.1200	8					

<표 8> 재령 28일 압축강도의 분산분석 결과

실험요인	제공합	자유도	평균제공	F ₀	F ₀ (0.10)	F ₀ (0.05)	F ₀ (0.01)
고로슬래그	2.4956	2	1.2478	0.0709	3.11	4.46	8.65
플라이애시	67.6422	2	33.8211	1.9215			
실리카흙	43.4289	2	21.7144	1.2337			
오차	43.4289	2	17.6011				
전체	70.1200	8					



<그림 2> 실험인자의 수준에 따른 각 재령별 압축강도 (시멘트 100% 재령 28일 : 41.7MPa)

영향을 준 것으로 나타났다. 그러나 고로슬래그는 상대적으로 압축강도에는 유의한 영향을 주지 못하였다.

<그림 2>에 나타난 바와 같이 플라이애시는 대체율이 증가할수록 모든 재령에서 압축강도가 감소하는 것으로 경향을 보이는 반면에 실리카흙은 대체율이 증가할수록 재령 28일 압축강도는 증가하는 경향을 보이고 있다. 실험인자 및 수준에 상관없이 모평균 압축강도는 40MPa 이상을 나타내고 있어, 본 실험범위 내에서 제조한 다성분계 혼합시멘트를 사용할 경우 보통시멘트 단독으로 사용한 경우보다 동등 이상의 강도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 염소이온 투과저항성과 침투깊이

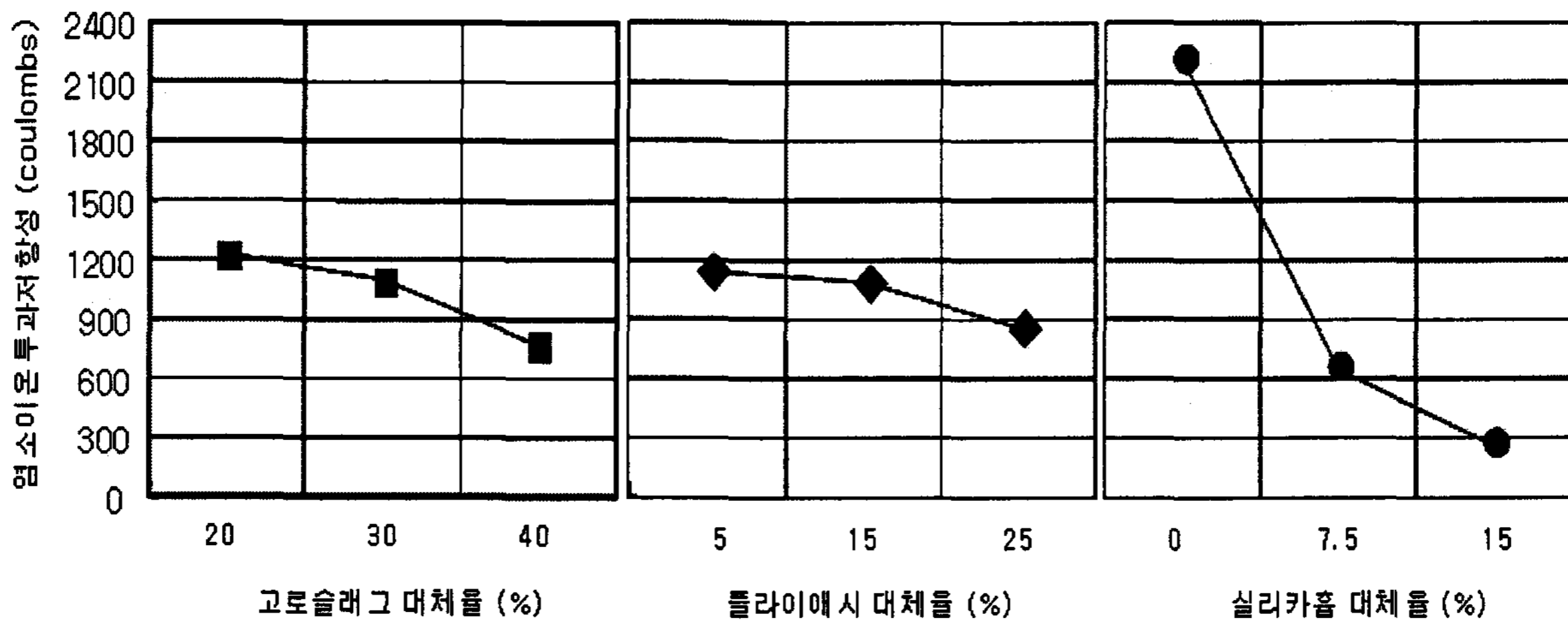
<표 9>는 재령 28일에서의 고로슬래그, 플라

이애시, 실리카흙의 대체율에 따른 염소이온 투과저항성의 분산분석 결과를 나타낸 것이고, <그림 3>은 염소이온 투과저항성 모평균을 나타낸 것이다. 분산분석 결과 본 실험의 범위에서는 실리카흙이 99%의 신뢰구간에서 염소이온 투과저항성에 유의한 영향을 주었으며, 고로슬래그는 95%의 신뢰구간에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다. 반면에 플라이애시는 다소 유의한 영향을 주기는 하지만 90%의 신뢰구간에도 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

<그림 3>에 나타난 바와 같이 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙 모두 대체율이 증가할수록 염소이온 투과저항성이 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 실리카흙을 첨가할 경우 염소이온 투과저항성이 상대적으로 크게 개선되는 것으로 나타났다.

<표 9> 재령 28일 염소이온 투과저항성의 분산분석 결과

실험요인	제공합	자유도	평균제공	F _o	F _o (0.10)	F _o (0.05)	F _o (0.01)
고로슬래그	334517.5556	2	167258.7778	5.5775	3.11	4.46	8.65
플라이애시	132562.8889	2	66281.4444	0.3115			
실리카흙	6340710.8889	2	3170355.4444	0.0094			
오차	59976.2222	2	29988.1111				
전체	6867767.5556	8					



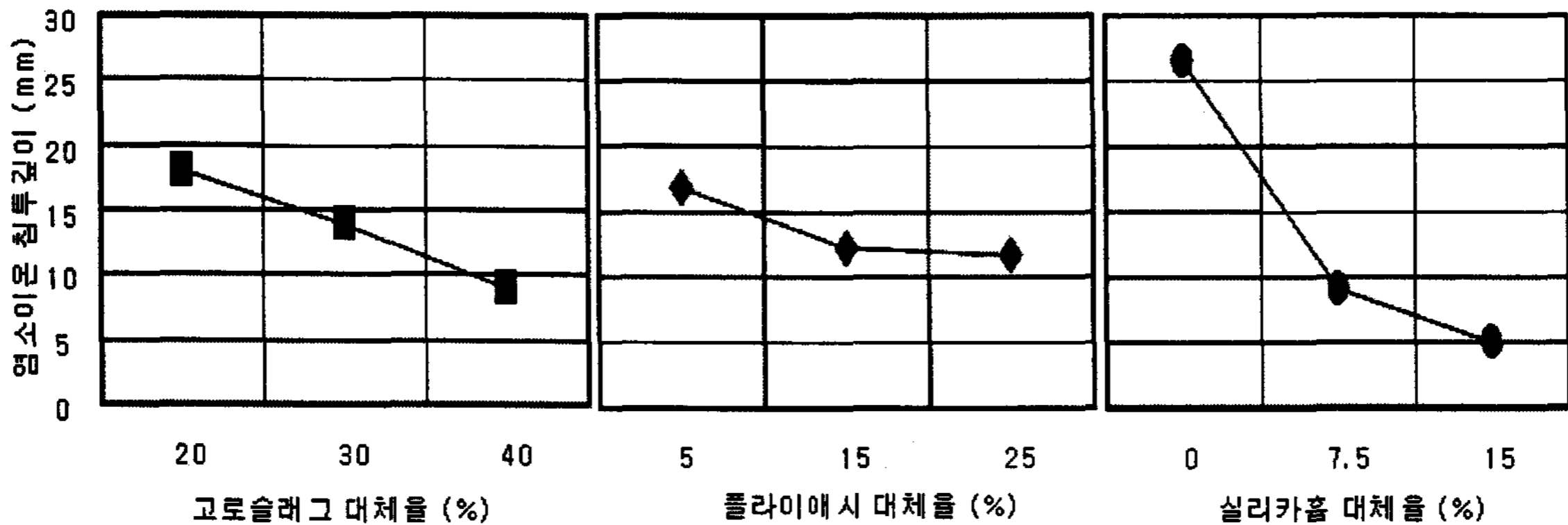
**<그림 3> 실험인자의 수준에 따른 재령 28일에서의 염소이온 투과저항성
(시멘트 100% 재령 28일 : 9820 coulombs)**

<표 10>은 재령 28일에서의 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙의 대체율에 따른 염소이온 침투깊이를 나타낸 것이고, <그림 4>는 염소이온 침투깊이의 모평균을 나타낸 것이다. 분산분석 결과 본 실험의 범위에서는 실리카흙이 99%의 신뢰구간에서 염소이온 침투깊이에 유의한 영향을 주었으나, 고로슬래그와 플라이애시는 상대적으로 유의한 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

<그림 4>에 나타난 바와 같이 염소이온 투과저항성 결과에서처럼 실리카흙의 대체율이 증가할수록 염소이온 침투깊이도 감소하는 것으로 나타났다. 고로슬래그와 플라이애시는 분산분석 결과에서는 실리카흙의 영향이 상대적으로 커서 유의한 인자로 나타나지 않았지만, 모평균 침투깊이는 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

<표 10> 재령 28일 염소이온 침투깊이의 분산분석 결과

실험요인	제공합	자유도	평균제공	F _o	F _o (0.10)	F _o (0.05)	F _o (0.01)
고로슬래그	132.6534	2	66.3267	1.4538	3.11	4.46	8.65
플라이애시	61.3435	2	30.6717	0.6723			
실리카흙	758.0442	2	379.0221	8.3076			
오차	91.2473	2	45.6236				
전체	1043.2883	8					



<그림 4> 실험인자의 수준에 따른 재령 28일에서의 염소이온 침투깊이
(시멘트 100% 재령 28일 : 50mm)

4. 결 론

고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙을 사용한 다성분계 혼합시멘트를 제조하고, 이를 사용한 모르타르의 압축강도 및 염소이온 투과저항성을 검토한 결과 본 실험범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모르타르의 유동성을 검토한 결과 고로슬래그와 실리카흙 대체율이 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 고로슬래그는 대체율이 증가할수록 유동성이 증가하는 경향을 보였고, 실리카흙은 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.
- 2) 압축강도에 있어서는 플라이애시 대체율은 모든 재령에서 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났고, 실리카흙 대체율은 재령 28일에서만 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 플라이애시는 모든 재령에서 대체율이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 보였고, 실리카흙은 재령 28일에 대체율이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 보였다.
- 3) 재령 28일 염소이온 투과저항성 및 침투깊이에 있어서는 실리카흙 대체율이 가장 유의한 영향인자로 나타났으며, 대체율이 증가할수록 염소이온 투과저항성과 침투깊이는 감소하는 경향을 보였다. 고로슬래그와 플라이애시는 분산분석 결과에서는 실리카흙의 영향이 매우 커서 상대적으로 낮은 유의한 인자로 나타나지 않았지만, 모평균에서는 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

- 4) 본 실험범위에서 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙을 사용한 다성분계 혼합시멘트의 모르타르 압축강도는 실험인자 및 수준에 관계 없이 모평균치가 재령 28일에 40MPa 이상을 보이고 있어 보통시멘트 단독으로 사용한 경우보다 동등 이상의 강도를 얻을 수 있을 수 있었다. 염소이온 침투저항성 및 침투깊이에 있어서는 시멘트 단독으로 사용한 경우보다 상대적으로 크게 개선되는 것으로 나타났다.

<참 고 문 헌>

- 1) 문한영, 김병권 ; 광물질혼화재 종류별 고강도콘크리트의 압축강도 및 축진 염소이온침투 특성, 콘크리트학회 논문집, Vol.16, No.3, 2004, pp.407~414
- 2) 구봉근외 5인 ; 석회석 미분말 혼합 콘크리트의 염소이온 침투 저항 특성, 콘크리트학회 가을학술발표 논문집, 2002, pp.75~80
- 3) 문한영, 신화철; 저발열형 시멘트 콘크리트의 염소이온 침투·확산에 대한 저항성, 콘크리트학회 논문집, 1999, pp.31~41
- 4) 하재담외 6인; 플라이애쉬 치환율에 따른 콘크리트의 염소이온 투과 특성, 콘크리트학회 가을학술발표 논문집, 2002, pp.39~42
- 5) 박성현: 실험계획법, 민영사, 2003