

시멘트 혼합재 첨가에 따른 콘크리트 내구 특성

A Study on the Durability of Concret made with Various Cements Containing Additive

김창범^{*} 조계홍^{*} 최재웅^{**} 김동석^{***} 박춘근^{****}
Kim, Chang-Bum Cho, Kye-Hong Choi, Jae-Woong Kim, Dong-Suk Park, Choon-Keun

ABSTRACT

This paper covers concrete durability made with portland cement type I and V, and granulated blast furnace slag blended cements 40 and 60%. Typical properties of cements and compressive strength development, drying shrinkage, carbonation, freezing and thawing properties of concretes were investigated. In addition, effects of Cl penetration on various concretes with/without a freezing and thawing treatment were also studied. Portland cement type I and V were superior to the blended cement in the properties of compressive strength development, drying shrinkage, carbonation and freezing and thawing durability. In the respect of resistant of Cl Blended cement showed better than the portland cement due to high permeability. But the blended cement with a freezing and thawing treatment presented a much decreased resistance of Cl penetration.

1. 서론

최근들어 대형국책건설사업 및 각종 SOC 사업이 여러 구조물의 형태로 시공되고 있다. 따라서 이러한 대형구조물의 콘크리트 내구품질을 보장하기 위해서는 시공용도에 부합되는 적절한 시멘트인 사용이 무엇보다도 중요한 사항이다.

특히 대형 해양구조물의 경우에는 해수에 의한 화학적인 침식저항성 뿐만 아니라 mass 시공에 따른 온도균열을 방지하기 위한 낮은 수화발열특성 및 온도응력을 제어할 수 있는 적절한 강도발현특성을 지닌 시멘트 재료의 선정이 중요하며, 특히 초기 경화체의 내해수특성 뿐만 아니라 장기간 열화를 받은 콘크리트 경화체의 내구성 평가가 함께 이루어져야 한다.¹⁻³⁾

따라서 본고에서는 포틀랜드시멘트와 혼합재 시멘트인 Slag 첨가 시멘트를 중심으로 기본적인 물리 특성, 경화체의 내구특성 및 축진 중성화 및 동결융해작용 전·후의 내해수 특성등을 비교하므로써 상기한 대형해양구조물용 시멘트 재료로서의 적합성을 평가하여 보았다.

* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 시멘트연구실 주임연구원
** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 시멘트연구실 연구원
*** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원
**** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 시멘트연구실 책임연구원

2. 실험방법

2.1. 사용재료

본 실험에서는 시중에서 유통되는 KS규격의 보통 포틀랜드시멘트(1종), 내황산염 포틀랜드시멘트(5종) 및 보통 포틀랜드시멘트 1종에 분말도 $4,500\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로 Slag분말을 중량비로 40%, 60% 첨가하여 제조한 시멘트 등 모두 4종류의 시멘트를 사용하였다. 표 1~3에 실험에 사용한 고로 Slag의 화학성분, 제조시멘트의 화학분석결과와 물리 시험결과를 나타내었다. 콘크리트 배합을 위하여 잔골재와 굵은 골재는 부강산 강모래(조립율 2.7, 비중 2.6)와 청원산 채석(조립율 7.0, 비중 2.73)을 사용하였으며, 혼화제는 일본 K사의 고성능감수제 및 국내 K사의 AE제를 사용하였다.

표 1. 사용 고로 Slag의 화학분석 결과

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Blaine (cm ² /g)
고로 Slag	32.4	15.8	1.24	41.8	6.81	0.26	0.43	0.13	1.1	4500

표 2. 사용 시멘트의 화학분석결과

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
1종	21.3	6.55	2.99	61.5	2.82	0.17	0.93	1.79	1.2
1종+Slag 40%	25.7	9.87	2.13	53.9	4.36	0.22	0.75	1.79	1.3
1종+Slag 60%	28.0	11.30	1.54	50.6	4.90	0.23	0.64	1.70	1.1
5종	22.8	4.10	4.50	62.4	2.70	0.07	0.61	2.00	1.2

표 3. 사용 시멘트의 물리시험 결과

구 분	Blaine (cm ² /g)	용결특성		KS 몰탈 압축강도(kg/cm ²)			
		초결(분)	종결(시간:분)	1일	3일	7일	28일
1종	3320	270	6:40	90	210	291	395
1종+Slag 40%	3720	305	8:50	51	163	251	404
1종+Slag 60%	4070	355	10:50	35	144	234	400
5종	3266	280	7:40	81	200	289	398

2.2. 공시체 제작

콘크리트 배합조건은 최대 골재치수 25mm, 단위시멘트량 350kg/m³, W/C는 45%로 하여 슬럼프 $8\pm 2\text{cm}$, 공기량을 $4.5\pm 1.0\%$ 로 맞추어 제조하였다. 콘크리트 배합을 표 4에 나타내었다.

표 4. 콘크리트 배합

구 분	W/C	S/A	단위재료량(kg/m ³)				혼화제(C×%)		Slump (cm)	공기량 (%)
			C	W	S	G	SP	AE제		
1종	45	40	350	157.5	727	1127	0.9	0.020	7.0	4.7
1종+Slag 40%					723	1122	0.9	0.022	7.4	4.3
1종+Slag 60%					721	1119	1.2	0.024	7.3	5.1
5종					728	1130	0.5	0.015	7.5	4.4

2.3. 공시체 양생 및 염소이온 투과실험

경화 콘크리트 특성평가를 위하여 콘크리트 배합후 압축강도용 공시체를 KS F 2403의 방법으로 제작하였으며, 공시체는 1일후 탈형하여 소정기간 동안 수중양생을 실시하였다. 길이변화 시험은 7.5×7.5×40cm 공시체 몰드 양 끝에 길이측정용 게이지를 설치한 후 KS F 2424규정의 다이알게이지 방법으로 측정하였다. 또한 증성화깊이는 공시체를 28일간 수중양생후 촉진양생 (온도: 40℃, 습도: 40%, CO₂ 농도 10%)을 실시한 후 측정면에 페놀프탈레인 용액을 분무하여 표면으로부터 변색부분까지의 깊이를 측정하였다. 동결융해의 측정은 KS F 2454에 의하여 시멘트종류별 상대동탄성계수를 평가하였다. 한편 ASTM C 1202-94(Electrical Indication of Concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration)에 따르는 전압차에 의한 촉진 염소이온투과실험을 통하여 동결융해열화를 받기 전·후의 시멘트 종류별 영향을 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시멘트 특성

3.1.1. 물리성능 및 수화발열 특성

시멘트 종류별 몰탈 압축강도 및 KS 수화열 특성을 그림 1과 2에 나타내었다. 압축강도의 경우 1종 시멘트와 5종 시멘트는 거의 유사한 강도발현 특성을 나타내나, 1종 시멘트에 고로 Slag를 40% 및 60% 첨가한 경우 초기재령(1~7일)에서는 현저한 저하를 보이며, 28일 재령에서 동등한 수준의 강도를 나타내고 있다. 한편 수화열 측면에서는 1종 시멘트의 경우 85~97kcal/g 수준으로 5종 시멘트 및 고로 Slag 첨가 시멘트에 비해 현저히 높게 나타나고 있다. 5종 시멘트의 경우에는 1종 시멘트 대비 시멘트 광물조성상 수화발열 특성이 큰 C3S 및 C3A의 함량 감소로 인하여 1종 시멘트에 비하여 매우 낮은 수화발열을 나타내고 있으며, 28일 수화열의 경우 1종 시멘트에 고로 Slag를 40% 및 60% 첨가한 시멘트와 큰 차이가 없는 수화발열 특성을 나타내고 있다.

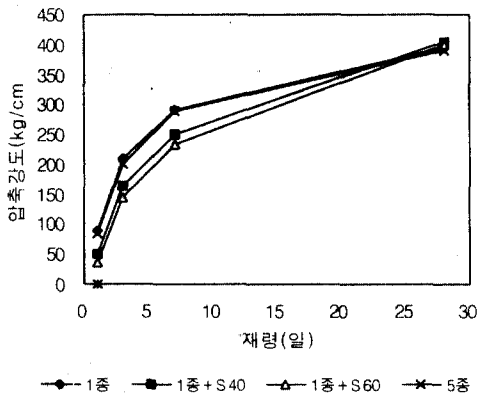


그림 1. 시멘트 종류별 몰탈 압축 강도

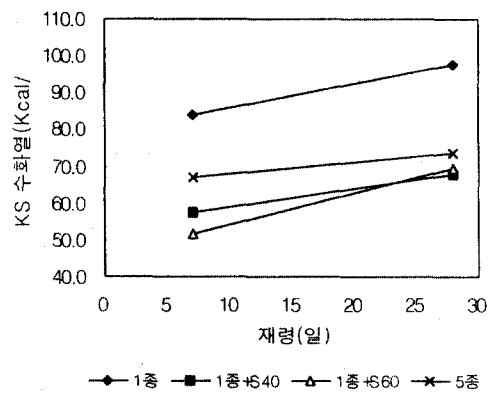


그림 2. 시멘트 종류별 수화열

3.2. 콘크리트 특성

3.2.1. 압축강도 및 내구성

2.2 항의 표 4의 콘크리트 배합조건에 따른 콘크리트 압축강도 및 내구성 실험결과를 그림 3, 4, 5 및 6에 나타내었다.

압축강도의 경우 5종>1종>1종+Slag40%>1종+Slag60% 순으로 높게 나타나고 있는데, 초기재령에서의 강도차이는 현저하며 재령이 증가할수록 차이가 감소되나 28일 재령에서도 Slag 첨가량이 60%인 경우는 강도발현이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 건조수축의 경우에도 압축강도와 유사한 경향으로 1종 및 5종 시멘트에 비해 첨가재의 함량이 증가할수록 건조수축은 증가하는 것으로 나타났는데, 이러한 원인은 동일 W/C 배합에서 저비중의 혼합재 첨가에 따른 결합재의 부피증대에 따른 것으로 판단된다.

축진중성화 실험에 따른 중성화 깊이 측정결과에서는 역시 포틀랜드시멘트계인 1종 및 5종 대비 혼합재 첨가시멘트의 중성화속도가 매우 빠르게 진행되고 있는데 이는 혼합시멘트의 초기 pH가 낮고 시멘트 수화시 생성된 강알칼리의 $Ca(OH)_2$ 를 포졸란 반응에 의해 소모하기 때문으로서 여러 실험결과와도 일치하고 있다.

콘크리트 공시체를 14일간 수중양생한후 동결융해를 가한 시료의 상대동탄성계수 측정결과에서는 혼합재를 첨가한 시멘트의 경우 초기 배합시 공기량을 일정하게 하였음에도 불구하고 포틀랜드시멘트에 비하여 동결융해 저항성이 낮은 것으로 나타났는데, 이는 선행 실험결과⁴⁾와도 일치하는 결과이다.

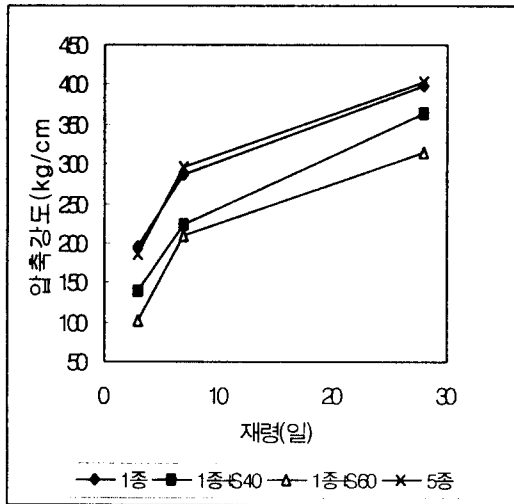


그림 3 시멘트 종류별 콘크리트 압축강도

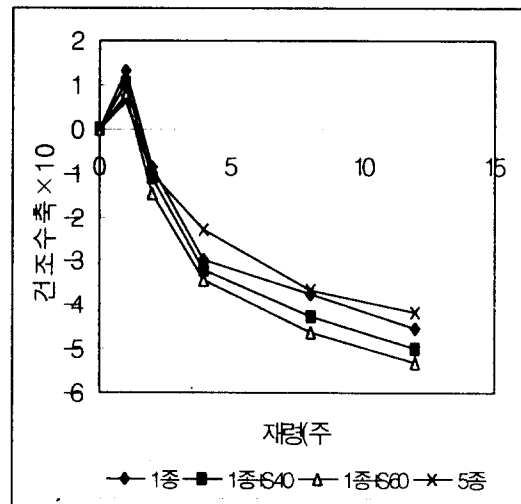


그림 4 시멘트 종류별 건조수축

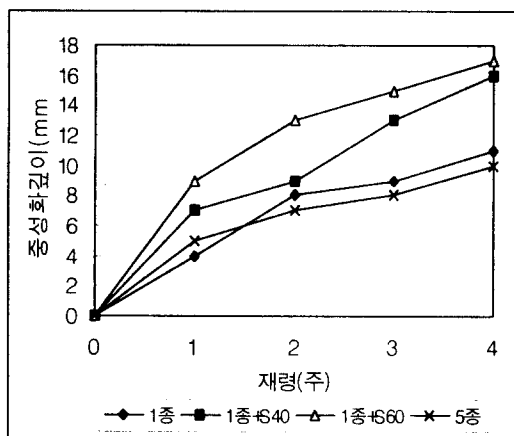


그림 5 시멘트 종류별 중성화깊이

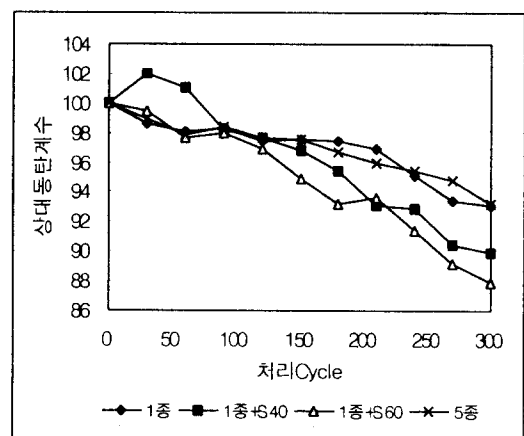


그림 6 시멘트 종류별 상대동탄성계수

3.3. 염소이온 투과실험

콘크리트 공시체에 동결융해 열화작용을 가하기 전·후의 시편에 대한 전압차에 의한 촉진 염소이온 투과실험을 실시한 결과 동결융해를 받지 않은 시편의 투수성 측면에서는 포틀랜드시멘트(1, 5종) 대비 고로 slag 혼합재를 첨가한 시편이 양호한 것으로 나타났다. 한편 1종과 5종 시멘트 간에는 5종 시멘트의 경우가 양호한 것으로 나타났는데, 이러한 이유는 5종 시멘트의 경우 광물조성상 $Ca(OH)_2$ 와 같은 가용성 수화생성물이 적고 1종 시멘트 대비 Ca/Si 이온 mole비가 낮은 치밀한 C-S-H의 생성량이 증대됨에 따른 현상으로 파악된다. 한편 1종시멘트에 고로 Slag 혼합재를 첨가한 경우 혼합재의 포졸란 반응 등에 의한 경화체 조직의 상대적 치밀화를 포틀랜드시멘트에 비해 양호한 투수저항성을 보이고 있으나, 3.2항의 동결융해 열화를 받은 시편에 대한 측정결과에서는 측정값이 포틀랜드시멘트에 비해 큰 폭으로 증가하는 현상을 보이고 있다.

표 5. 동결융해전후 염소이온 투과실험 결과

시멘트 구분	동결융해 열화전		동결융해 열화후(300Cycles)	
	통과전하(Coulomb)	Chloride Ion Penetrability	통과전하(Coulomb)	Chloride Ion Penetrability
1종	3491	Moderate	3621	Moderate
1종+S40	2415	Moderate	2976	Moderate
1종+S60	1842	Low	2346	Moderate
5종	3317	Moderate	3459	Moderate

4. 결론

1종 및 5종 시멘트와 고로 Slag 및 Fly ash를 첨가하여 제조한 혼합시멘트에 대한 콘크리트 내구성 및 동결융해 열화를 가한 시편에 대한 염소이온 투과실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 포틀랜드계 시멘트인 1종 및 5종 시멘트와 1종 시멘트에 고로 Slag를 40% 및 60% 혼합한 시멘트의 기본적인 수화발열 특성을 보면 Slag 첨가 시멘트의 수화발열이 낮았으나, 5종 시멘트의 경우 1종 시멘트와는 현저히 다른 광물조성으로 Slag 첨가 시멘트와 큰 차이가 없는 낮은 수화발열 특성을 보이고 있다.
- 2) 시멘트 종류별로 제조한 콘크리트의 압축강도는 동일한 단위 시멘트량으로 실험하였기 때문에 28일 강도값이 5종=1종>1종+Slag40%>1종+Slag60% 순으로 높게 나타났으며, 특히 Slag첨가 시멘트의 초기 강도 발현율은 포틀랜드 시멘트에 비해 크게 떨어지는 것으로 나타났다.
- 3) 건조수축은 고로Slag 첨가 시멘트의 경우 다소 증대되는 경향이며, 촉진중성화 실험결과 에서도 포틀랜드 시멘트대비 고로Slag 첨가 시멘트의 중성화 속도가 빠른 것으로 나타났다.
- 4) 동결융해 저항성 측면에서는 콘크리트 배합상 AE제를 사용하여 공기량을 일정하게 하였음에도 고로 Slag 첨가 시멘트의 저항성이 저하되는 것으로 나타났는데 이는 포틀랜드계 시멘트 대비 낮은 강도발현 특성 때문인 것으로 보인다.
- 5) 전압차에 의한 촉진 염소이온 투과실험 결과에서는 포틀랜드 시멘트에 비해 고로Slag 첨가 시멘트의 내투과성이 양호한 것으로 나타났는데 이는 혼합재 첨가에 따른 수밀성의 증대에 기인한 것으로 보인다

동결융해를 받은 시편의 측정결과에서는 이러한 차이가 상당히 감소하는 결과를 보이고 있다. 한편 1종 시멘트에 비해서는 5종 시멘트의 경우가 상대적으로 양호한 경향을 보이고 있는데 이러한 이유는 시멘트 광물조성의 차이에 따른 수화조직의 치밀도 차이에 기인한 것으로 보인다.

참고문헌

1. D. M. Roy, "Mechanism of Cements Paste Degradation due to Chemical and Physical Process", 8th Inter. Cong. Chem. Cements, Vol.4, p362 (1986).
2. Y. Kasai, N. Nakamura, "Accelerated Test Method for Durability of Cements Mortars in Sea Water", ACI. SP 65-21, p379 (1980).
3. O.S.B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, M. M. Saudi, "Effect of Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate on the Durability Performance of Plain and Blended Cements", ACI Materials J.1-2, p15 (1995).
4. 최세규, 김생빈, "고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트 동결융해 저항성에 관한 연구", 콘크리트학회지, 제9권 5호 p149, 1997년 10월호