

# 한국해양조건에서의 시멘트 종류별 콘크리트 내구 특성

## Current Status of the Durability Study of Concrete Made with Various Cements in Korean Marine Environment

박춘근\*                      엄태형\*\*                      정해문\*\*\*  
Park, Choon Keun      Eom, Tae Hyong      Cheong, Hai Moon

임정렬\*\*\*\*                      지정식\*\*\*\*\*  
Lim, Jung Ryoul      Jee, Jung Shick

---

### Abstract

The sea water resistance of cement and concrete must be considered when it is used for construction on the seashore or in the ocean. The concrete specimens using seven type of cements such as ordinary Portland cement, moderate heat Portland cement, sulfate resistance Portland cement, type A, B, C Portland blastfurnace slag cement and Portland flyash cement were immersed for 10 years in seawater in Kunsan. This study proved that moderate heat Portland cement, sulfate resistance Portland cement, type A Portland blastfurnace slag cement had higher resistance for seawater.

---

## 1. 서 론

시멘트 콘크리트는 구조재료로서 경제적인 뿐 아니라 내구성이 좋기 때문에 지금까지 해안 항만의 구축재료로 널리 이용되고 있으나, 아직까지 시멘트에 대한 내해수성의 보장은 이루어지지 않고 있는 실정이며 이에 대한 대책이 요구되고 있다. 시멘트 콘크리트의 내해수성에 대한 최적의 평가는 바닷물 속에 직접 침적시켜 시간 경과에 따른 장기적인 변화를 관찰하는 것이라고 할 수 있다.

- 
- \* 쌍용중앙연구소 시멘트콘크리트연구실 실장
  - \*\* 쌍용중앙연구소 시멘트콘크리트연구실 선임연구원
  - \*\*\* 정희원, 쌍용중앙연구소 시멘트콘크리트연구실 주임연구원
  - \*\*\*\* 쌍용중앙연구소 시멘트콘크리트연구실 연구원
  - \*\*\*\*\* 쌍용양회(주) 조사개발팀

선진 외국에서는 이에 따른 해수 장기 폭로 실험에 대한 보고들이 많이 이루어지고 있지만, 외국과 다른 해양 환경을 가진 우리나라에서는 아직까지 해수 장기 폭로시 시멘트 종류별 콘크리트 내구 특성을 관찰한 예를 찾아보기 힘들다.

당사에서는 7종류의 시멘트로 제조한 콘크리트에 대해 1986년부터 서해 군산 앞바다에 직접 침지시켜 지금까지 10년 경과한 콘크리트에 대해 분석한 중간 결과를 보고한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(1종), 중용열 포틀랜드 시멘트(2종), 내황산염포틀랜드 시멘트(5종), 슬래그 시멘트 (A종, B종, C종), 플라이애쉬 혼합 시멘트를 준비하였으며, 표 1과 2에 이들 시멘트에 대한 화학 분석 결과와 물리 시험 결과를 나타내었다. 이들 시멘트중 보통, 중용열, 내황산염 시멘트는 당사의 제품을 사용하였고, 슬래그 시멘트 및 플라이애쉬 시멘트는 당사 보통 포틀랜드 시멘트에 슬래그와 플라이애쉬를 혼합하여 연구소에서 제조한 것이다. 슬래그 시멘트 A, B, C종은 각각 슬래그 미분말을 30, 50, 70%를 혼합한 것이고, 플라이애쉬 시멘트는 플라이애쉬를 15% 혼합하여 제조한 것이다. 잔골재와 굵은 골재는 금강 모래(조립율 2.7, 비중 2.62)와 자갈(조립율 7.0, 비중 2.58)

표 1 사용 시멘트의 화학 분석 결과

구 분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI	f-CaO	불용잔분
보 통	20.2	5.8	3.0	63.3	3.4	0.12	0.92	2.1	1.2	0.8	0.12
중 용 열	22.4	4.7	3.7	61.2	3.8	0.17	1.34	1.9	1.0	0.8	0.18
내황산염	21.4	3.6	4.6	63.7	3.0	0.10	0.57	2.0	1.2	0.5	0.14
슬래그A	24.1	8.3	2.4	55.9	4.3	0.18	0.74	2.0	1.3	0.8	0.10
슬래그B	26.5	10.1	1.9	51.5	5.0	0.19	0.69	2.7	1.5	0.6	0.08
슬래그C	28.9	11.6	1.5	47.4	5.6	0.21	0.60	2.7	1.6	0.4	0.16
플라이애쉬혼합	26.7	5.2	2.6	57.6	3.1	0.12	0.98	1.9	1.3	0.7	0.12
구 분	LSF	SM	IM	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	비 고		
보 통	95.1	2.3	1.93	54.9	16.6	10.3	9.1	3.57	쌍용양회		
중 용 열	84.9	2.67	1.27	36.3	36.7	6.2	11.3	3.23	"		
내황산염	92.8	2.61	0.78	60.1	16.0	1.8	14.0	3.40	"		

표 2 사용 시멘트의 물리 시험 결과

구 분	Blaine(cm <sup>2</sup> /g)		응결 특성			압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )					
	시멘트	혼화재	W/C	초결 (분)	종결 (시간:분)	W/C	flow	1일	3일	7일	28일
보 통	3250	-	24.2	245	6:30	54.9	110.7	108	215	267	344
중 용 열	2920	-	25.6	340	8:55	54.9	107.4	82	145	218	330
내황산염	3300	-	22.0	270	7:30	53.9	112.8	93	200	250	329
슬래그A	3250	4000	25.4	295	8:20	54.9	107.4	92	175	235	356
슬래그B	3250	4000	23.8	320	9:00	56.9	105.6	65	133	211	304
슬래그C	3250	4000	22.5	365	9:35	57.8	105.6	43	107	200	294
플라이애쉬혼합	3250	3100	24.0	305	8:50	56.7	108.2	78	142	224	320

을 사용하였으며, 혼화제는 공기량 확보를 위한 AE제를 사용하였다. 철근 부식 평가를 위해 사용한 철근은 두께 20mm의 것을 사용하였다.

## 2.2 공시체 제작

콘크리트 배합 조건은 최대 골재 치수 25mm, W/C는 45%, 잔골재율을 37로 하여 슬럼프 12 ± 1cm, 공기량을 4 ± 0.5%로 맞추어 제조하였으며, 배합을 표 3에 나타내었다. 공시체는  $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$  크기의 몰드에 철근을 중심에서 2cm 떨어뜨려 2 개씩 삽입하여 제조하여 압축 강도와 철근 부식 정도를 측정하였고, 10×10×40 cm 크기로 제작한 공시체는 휨 강도, 중성화 정도를 측정하였다.

표 3 콘크리트 배합

구 분	W/C(%)	슬럼프(cm)	공기량(%)	S/a(%)	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )	
					7일	28일
보 통	45	12.7	3.9	37	201	277
중 용 열		13.8	4.2		167	268
내황산염		12.8	3.9		194	272
슬래그A		11.9	4.5		159	256
슬래그B		12.5	3.8		149	232
슬래그C		13.6	3.9		119	201
플라이애쉬 혼합		13.2	3.7		152	241

## 2.3 공시체 양생 및 해수 침지 시험

제조한 콘크리트 공시체를 전치 재령에 따른 영향을 보기 위해 각각 7일과 28일간 수중 양생을 행한 후 1986년 10월 26일 군산 앞바다 접연안(군산외항 소재 쌍용저유소 1번 돌핀의 아래부분)에 침적시켰다. 이 곳은 조수 간만의 차가 있는 개펄로 조수 간만에 의해 매일 건습이 반복되는 조건이다. 콘크리트 공시체 침지 후 3개월, 6개월, 9개월, 1년, 2년, 3년까지는 외관 상태만을 관찰하였고, 5년, 10년 경과 재령에 대해서 압축강도, 휨강도, 철근 부식, 중성화 깊이 등을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 외관 관찰

침지 재령이 3년이 경과함에 따라 외관상 변색, 시멘트 페이스트 부분의 이탈, 표면 박리 등의 현상이 나타나고 있다. 변색의 경우는 전치 양생 기간에 상관없이 혼합 시멘트보다는 포틀랜드 시멘트계에서 비교적 나타나고 있으나, 이는 시멘트의 색도 차이에 의한 것으로 보인다. 시멘트 페이스트 부분의 이탈과 표면 박리 현상은 전치 양생이 짧은 7일 양생의 슬래그 함유량이 많은 슬래그 시멘트 C종 공시체에서 경과 기간 3년에서부터 발생하여 10년 경과 공시체의 경우에는 굵은 골재 부분이 노출되는 정도의 열화 상태를 보여주고 있고, 보통 포틀랜드 시멘트도 재령 10년 경과에서 약간의 침식이 시작되고 있는 것으로 나타났다. 재령 5년까지는 28일 양생한 시편의 경우 시멘트 종류에는 관계없이 외관상 양호한 결과들을 보여주고 있으나, 10년 양생 시편의 경우에는 보통 포틀랜드 시멘트와 슬래그 함유량

표 4 해수 침적 콘크리트 공사체의 특성 분석 결과

구 분	외관 관찰					압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		휨강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		중성화깊이 (mm)		
	3개월	1년	3년	5년	10년	5년	10년	5년	10년	5년	10년	
7 일 전 양 생	보통	○	○	○	○	△	181	179	45.0	43.1	1	1.9
	중용열	○	○	○	○	○	246	293	55.2	61.4	1	1.9
	내황산염	○	○	○	○	○	226	244	52.8	59.0	1	1.9
	슬래그A	○	○	○	○	○	187	223	56.9	54.3	1	4.7
	슬래그B	○	○	○	△	△	224	245	45.5	25.9	1	7.2
	슬래그C	○	○	△	△	×	252	251	25.2	5.9	1	9.6
	플라이애쉬	○	○	○	○	△	209	252	39.2	49.8	1	7.6
28 일 전 양 생	보통	○	○	○	○	△	277	269	48.9	49.2	1	1.8
	중용열	○	○	○	○	○	302	347	52.6	57.6	1	1.9
	내황산염	○	○	○	○	○	296	335	50.5	54.5	1	1.8
	슬래그A	○	○	○	○	○	287	391	49.7	54.3	1	3.6
	슬래그B	○	○	○	○	○	320	402	35.7	34.3	1	5.1
	슬래그C	○	○	○	○	△	299	345	34.1	18.2	1	7.3
	플라이애쉬	○	○	○	○	○	317	386	38.6	42.6	1	6.6

○: 양호 △: 표면 약간 침식 x: 열화

이 많은 슬래그 C종 공사체의 표면 열화가 시작되고 있는 상태를 보여 주고 있다.

최초의 계획으로는 공사체의 길이 변화 및 중량 변화를 측정하고자 하였으나, 재령 1년 이후부터 패류의 부착 심해 측정이 불가능해 계획을 변경하였다.

### 3.2 강도 특성

표 4에 압축강도 및 휨강도 측정값을 외관관찰 결과와 함께 나타내었다. 재령 10년 경과에서 보통 포틀랜드 시멘트의 강도가 둔화되기 시작했으며, 그밖에 다른 공사체에서는 전반적으로 계속적으로 강도가 발현되고 있는 것으로 나타났다. 전반적으로 강도 증진비율은 혼합 시멘트계가 양호한 데이터를 나타내고 있다. 이는 혼합 시멘트의 강도가 해수 폭로 전의 7일과 28일 강도 값이 포틀랜드 시멘트 계보다 작고 포졸란 반응에 의해 점진적인 강도 발현을 보여주고 있기 때문이다. 압축강도의 경우 10년 경과까지 계속적인 강도 증진을 보여주고 있는 것으로 나타났으나, 양생을 7일간 행한 슬래그 C종의 경우에는 10년 경과시 타 공사체와 비교해 보았을 때 강도 증진이 둔화되고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 앞의 외관 관찰 결과와 마찬가지로 혼화재인 슬래그의 함유량이 많아 응결과 경화가 늦기 때문에 표면 경화 특성이 떨어지고 해수 침적 환경이 매일 건습이 반복되는 곳이기 때문에 이에 따른 열화가 초기에서부터 계속 진행되었기 때문으로 보인다. 28일간 전양생을 한 경우 10년 경과시에도 모든 공사체에 대해 강도 저하없이 양호한 값을 보여주고 있다. 혼합시멘트에서는 슬래그와 플라이애쉬의 포졸란 작용으로 Ca(OH)<sub>2</sub>의 생성이 적고, 비표면적이 큰 CaO/SiO<sub>2</sub>의 비가 낮은 C-S-H의 생성 때문이다.

한편, 휨강도의 경우에도 절대적인 강도값은 포틀랜드 시멘트계와 혼합 시멘트와 비교해 거의 비슷하게 나타나고 있으나 슬래그가 많이 첨가된 슬래그 B종과 C종의 경우에는 전치 양생기간과 상관 없

이 10년 경과 재령에서 낮은 휨강도 값을 보여주고 있는데, 휨강도값이 측정 시편의 표면 상태에 크게 영향을 받는다는 것을 고려할 때 표면 박리 현상의 발생이 표면 특성을 취약하게 한데서 온 결과로 보여진다. 그러나 압축강도의 경우에는 시편의 표면 특성에 따른 영향이 적기 때문에 이러한 현상이 나타나지 않은 것으로 보여진다. 이러한 표면 경화 특성 불량에 의한 경우는 해수환경이 건습이 반복되거나 파랑과 같은 물리적인 요인이 있는 곳에서는 이러한 요인이 콘크리트의 열화를 더욱 가속시킬 수 있는 것으로 보여진다. 포틀랜드 시멘트계에서는 압축강도 증진과 비례해 휨강도가 함께 증진되는 것으로 나타났지만, 슬래그 다량 첨가시킨 시편에서는 압축강도 증진과는 달리 휨강도 특성이 떨어지는 것으로 보아, 단순히 해수에서의 침적 조건에서만 압축강도의 측정으로 강도 특성을 판단하는 것은 고려되어야 한다고 생각된다.

### 3.3 철근 부식

철근 부식은 10년 경과까지 모든 공시체에 대하여 상태가 양호하게 나타났다. 이렇게 양호하게 나타난 것은 콘크리트 공시체를  $W/C=45\%$ 로 낮게 제조하였기 때문으로 보여진다. 공시체에 대한 철근의 부식여부는 추후 경과 시간이 더 지남에 따라 그 정도를 파악하는 것이 필요할 것으로 보여진다. 10년 경과된 철근 부식용 공시체에 대해 표면부와 중심부의 모르터 부분에 대한 화학 분석한 결과를 표 5에 나타냈다. 표면부는 표면에서 10mm 정도의 위치에서 중심부는 공시체의 중심부분에서의 모르터 부분을 채취한 것이다. 전반적으로 침투 CI 함량은 시멘트 종류에 따라 그다지 큰 차이를 보이고 있지 않다. 표면부의 CI 함량은 전양생이 7일에서 슬래그의 함유량이 많아질 수록 증가하는 경향이 있고, 포틀랜드 시멘트는 표면부와 중심부의 차이가 크지 않은데 비해 슬래그 시멘트는 내부의 함량이 적은 것으로 보아 포졸란 반응으로 인한 치밀한 수화 조직 때문에 CI 확산이 적은 것으로 보인다.

### 3.4 중성화

중성화 깊이는 표 4에 보이듯이 재령 5년까지는 시멘트 종류에 관계없이 1mm 정도로 나타났으나, 재령 10년에서는 혼합시멘트가 포틀랜드 시멘트에 비해 중성화 깊이가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 조직의 세공 용액에서의 알칼리도가 혼화재가 첨가됨에 따라 낮아지기 때문으로 조수 간만의 차에 의해 매일 건습이 반복되는 환경이기 때문에 그 정도가 더 큰 것으로 보여진다.

따라서 혼화재의 다량 첨가는 포졸란 반응에 의한 치밀한 내부 수화 조직 측면에서는 바람직하나, 표면 경화 불량 및 중성화에 의한 콘크리트 표면 조직 열화 가속 및 철근 부식 촉진 가능성을 보여주고 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 보인다.

### 3.5 고 찰

해수 폭로 10년까지 보통 포틀랜드 시멘트와 슬래그 C종을 제외하고는 콘크리트 공시체의 열화는 없는 것으로 나타났다. 해수 환경하에서 콘크리트의 열화는 콘크리트 조직 자체의 화학적 부식과 염분에 의한 철근 부식, 외부의 물리적인 충격 등에서 기인되므로 내해수성의 평가는 비단 어느 한 부분만으로는 평가해서는 곤란하다. 즉 지금까지의 많은 보고들에 의하면 슬래그나 플라이애쉬, 실리카 흡 등 무기계 혼화재의 첨가는 콘크리트 내부 조직을 균질하고 치밀하게 하므로 해수중의 황산염을 포함한 성분들에 의한 화학적 침식 및 염분에 의한 침투 등을 지연시켜 주어 내해수성이 매우 우수하다고 알려져 있으나, 이 정도의 치밀한 수화조직을 갖기 위해서는 포졸란계 혼화재의 첨가는 50% 이상을

표 5 해수 침적 콘크리트 공시체의 표면부위와 중심부위 모르터 화학분석결과

구분		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	SO <sub>3</sub>	
7 일 전 양 생	보통	표면부	60.79	7.54	0.96	17.02	1.04	2.23	0.64	1.25	0.45
		중심부	61.93	7.65	0.90	16.33	0.93	2.35	0.64	0.89	0.45
	중용열	표면부	61.41	7.58	1.28	16.61	1.11	2.34	0.67	1.13	0.60
		중심부	61.88	7.65	1.24	16.30	1.04	2.42	0.71	0.86	0.58
	내황산염	표면부	60.36	7.37	1.49	17.55	1.09	2.19	0.75	1.29	0.62
		중심부	60.65	7.35	1.49	17.55	1.09	2.19	0.75	0.95	0.62
	슬래그A	표면부	62.48	7.61	0.71	16.95	1.21	2.24	0.69	1.32	0.75
		중심부	63.31	7.69	0.74	14.87	1.20	2.32	0.23	0.86	0.67
	슬래그B	표면부	61.52	7.69	0.54	13.91	1.69	2.25	1.00	1.48	0.89
		중심부	62.77	7.81	0.55	13.71	1.45	2.39	0.80	0.93	0.67
	슬래그C	표면부	62.19	7.83	0.33	12.56	1.93	2.34	0.21	1.73	0.67
		중심부	64.08	7.89	0.34	13.06	1.65	2.39	0.34	0.63	0.69
	플라이애쉬	표면부	62.84	7.57	0.82	15.26	1.03	2.23	0.59	1.33	0.44
		중심부	63.25	7.62	0.79	14.98	1.11	2.39	0.59	0.80	0.44
28 일 전 양 생	보통	표면부	61.10	7.65	0.92	16.30	0.98	2.36	0.75	1.13	0.43
		중심부	61.50	7.73	0.94	16.65	0.98	2.44	0.52	0.97	0.47
	중용열	표면부	61.87	7.65	1.20	16.26	1.02	2.45	0.792	1.06	0.50
		중심부	61.74	7.68	1.21	16.24	1.05	2.46	0.64	0.95	0.45
	내황산염	표면부	59.20	7.39	1.48	17.37	0.99	2.18	0.82	1.22	0.49
		중심부	61.21	7.41	1.45	17.06	0.83	2.21	0.83	1.01	0.43
	슬래그A	표면부	61.13	7.75	0.72	14.72	1.25	2.39	0.92	1.06	0.76
		중심부	62.31	7.81	0.71	14.55	1.13	2.45	0.64	0.86	0.70
	슬래그B	표면부	61.90	7.74	0.56	13.50	1.53	2.33	1.03	1.48	0.78
		중심부	63.60	7.79	0.53	13.61	1.24	2.37	0.26	0.63	0.64
	슬래그C	표면부	62.97	7.80	0.32	12.31	0.87	2.32	0.94	1.16	0.84
		중심부	65.75	7.89	0.35	12.76	1.57	2.40	0.11	0.53	0.52
	플라이애쉬	표면부	62.55	7.42	0.72	15.44	0.99	2.25	0.69	1.05	0.50
		중심부	64.34	7.59	0.72	15.29	1.05	2.36	0.88	0.86	0.49

첨가해야지만 그 효과를 볼 수 있다. 본 실험 결과에서 보이듯이 슬래그가 70% 첨가된 슬래그 C종의 경우 응결 경화 지연으로 인한 표면 경화 상태 불량으로 동결 용해 등에 열화의 가속화와 포틀랜드 시멘트의 첨가량이 30%로 적기 때문에 중성화 깊이가 포틀랜드 시멘트에 비해 4배 정도 큰 것으로 나타나 이에 따른 철근 부식 촉진의 위험성을 갖고 있는 것으로 나타났다. 따라서 혼화재 첨가 시멘트의 표면 경화 특성을 좋게 하기 위한 충분한 전양생의 조건이 반드시 이루어져야만 내해수 시멘트로의 사용이 가능할 것으로 나타났으며, 화학적 침식 및 염분 침투에 대한 저항성을 갖기 위한 치밀한 수화 미세조직 측면과 중성화에 의한 철근 부식 촉진에 대한 영향을 충분히 감안해야 할 것으로 보인다. 한편 포틀랜드 시멘트계에서는 재령 경과 10년까지는 보통 포틀랜드 시멘트의 열화가 시작되고 있고, 그 외는 해수에 의한 열화는 관찰되지 않았다. 화학적 침식면에서는 C<sub>3</sub>A 함량이 적은 내황산염 시멘트가, 수화 조직의 치밀도면에서는 C<sub>2</sub>S의 함량이 비교적 많은 중용열 시멘트가 양호한 성상을 보여주어 내해수성 시멘트로 타당하다고 보여지며 제반 결과들을 종합해 볼 때, 내황산염 시멘트나 중용열 시멘트를

기초로 혼화재를 30% 미만으로 혼합하는 시멘트 또한 내해수성을 위한 시멘트로 검토하는 것이 필요하다고 보여진다.

#### 4. 결 론

시멘트 종류별 콘크리트 공시체에 대해 군산 앞바다에 직접 침지시켜 10년간 관찰한 결과, 보통 포틀랜드 시멘트와 슬래그 첨가가 다량 첨가된 슬래그 C종을 제외하고는 외관 상태 및 강도 특성은 양호한 것으로 나타났다. 혼합 시멘트의 경우 응결 경화 지연으로 인한 표면 경화 상태가 불량하며 이로 인해 바닷물의 건습 반복과 동결 응해 작용 등으로 인한 열화의 가속화와 포틀랜드 시멘트의 첨가량이 적기 때문에 중성화에 의한 철근 부식 촉진의 위험성 등 내구성에 문제를 갖고 있는 것으로 나타났다. 전반적으로 보았을 때 내황산염 시멘트와 중용열 시멘트는 내구성이 혼합 시멘트와 비교해 양호한 것으로 생각되며, 혼화재 첨가 시멘트의 경우 콘크리트 제조시의 품질 관리와 전양생 등의 시공에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것으로 보인다. 이후 장기적인 해수 폭로에 의한 콘크리트 내해수성에 대하여 계속 검토하여 보고 할 예정이다.