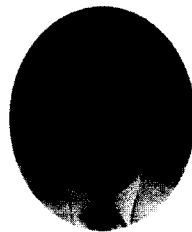
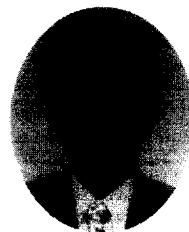


# 해양환경을 고려한 플라이애쉬 · 수중 불분리 콘크리트의 압축강도에 관한 실험적 연구

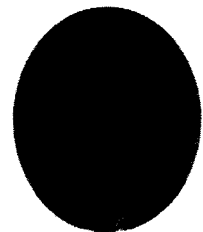
An Experimental Study on the Properties of Compressive  
Strength of Fly Ash Replaced Antiwash out Underwater Concrete  
Considering Marine Environment



권중현\*  
Kwon, Joong-Hyen



정희효\*\*  
Jung, Hee-Hyo



문재길\*\*\*  
Moon, Je-Kil

## ABSTRACT

When the concrete is cast at the sea, there are lots of restrictions in the working process being different from in land, and the concrete is suffered from the physical and chemical action in terms of marine environment. The compressive strength was measured after antiwash out underwater concrete mixed with fly ash had been cast and cured in order to produce the endurable high performance concrete, and then its characteristic was discussed by comparing one cured in air with in fresh water, and the effect of fly ash usage under the properly controled sea water temperature of  $15\pm 3^{\circ}\text{C}$  was also covered. The present work showed that the proper usage of fly ash was obtained at the condition of around 10% of substituted binder weight under the structure required the early age strength, and at the condition of over 40% if considering its durability and economy.

Keywords : flyash, antiwash out underwater concrete, cast under sea water, compressive strength

\* 정희원, 경상대학교 해양과학대학 해양토목공학과 교수  
\*\* 경상대학교 공과대학 토목공학과 교수  
\*\*\* 정희원, 건국대학교 공과대학 토목공학과 명예 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 30일까지 학회로 보내주시면 1999년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서론

해양 콘크리트 구조물은 그 용적이 크고, 일반 콘크리트 구조물과 달리 시공의 어려움이 따르며, 해수의 유수 작용으로 인하여 일반 콘크리트에 비하여 품질이 저하되기 쉽다.

1972년 독일에서 처음 수중 불분리성 혼화제가 개발되어, 구미나 일본 등에서는 많은 시공실적이 있으며, 최근 국내에도 수중 불분리 콘크리트에 대한 활발한 연구와 함께 해양 콘크리트 구조물의 시공에 수중 불분리 콘크리트가 본격적으로 도입되고 있다.<sup>1),3)</sup> 한편 국내 화력 발전소에서 생산되는 플라이애쉬는 95년 기준으로 연간 약 300만톤 정도가 생산되고 있으나 약 18% 정도가 재활용되고 나머지는 폐기물로 처리되고 있는 실정이다.<sup>4)</sup> 플라이애쉬를 콘크리트의 혼화제로 첨가하면 수화열에 의한 발열량 감소로 온도응력을 받는 매스 콘크리트에 유리하며, 투수에 대한 저항성 증대와 특히 해수작용에 대한 내구성을 증가시키는 재료로 보고되어 있다.<sup>4),6)</sup> 그러므로 내구적인 해양구조물의 건설을 위해 플라이애쉬를 도입한 수중 불분리 콘크리트에 대하여 활발한 연구가 필요한 실정이다.

수중 불분리 콘크리트는 수중 불분리성 혼화제의 사용으로, 일반 콘크리트에 비하여 점성이 크게 증가되고, 국내의 골재사정은 부순 자갈의 사용이 불가피해짐에 따라 콘크리트의 유동성과 워커빌리티를 개선하기 위해 고유동화제의 사용이 병행되고 있다. 이와 같이 수중 불분리 콘크리트는 그 성질이 상반되는 2종류 이상의 혼화제가 사용되고 여기에 다시 플라이애쉬를 첨가하게 되면 더욱 더 성인이 복잡하게 되어, 해수 중에 타설할 경우 해수에 포함된 염에 의한 화학작용과 온도의 영향으로 일반 콘크리트에 비해 그 성질은

현저히 달라 질 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 해수 중에서 플라이애쉬를 도입한 수중 불분리 콘크리트의 강도 특성을 밝히기 위해 플라이애쉬를 사용한 수중 불분리 콘크리트를, 우리 나라 연안 수심 10~20m 지점의 최근 10년간 평균 해수 온도인  $15 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 조절한 해수 중에 타설·양생한 것과 기중에서 타설하여 표준양생한 보통 콘크리트(Plain 콘크리트)를 비교하여 해수 중에 타설한 수중 불분리 콘크리트의 플라이애쉬 사용 효과와 플라이애쉬 사용량 변화에 따른 콘크리트의 압축강도 특성을 구명하였다.

# 2. 실험

## 2.1 사용 재료

### 2.1.1 시멘트 및 플라이애쉬

실험에 사용된 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트로서 그 물리적 성질 및 화학적 성분은 Table 1, 2와 같다.

Table 2 Chemical composition of cement and fly ash

Items	Chemical composition (%)							
	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 <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
C	20.20	5.80	3.00	63.3	3.40	0.12	0.92	2.1
F A	49.66	22.88	8.16	8.91	3.79	0.38	0.70	0.3

또한 플라이애쉬의 성질 및 화학적 조성은, 원탄의 종류, 보일러 형식과 연소 방법에 따라 그 성질이 다른데,<sup>4)</sup> 본 실험에 사용한 플라이애쉬는 삼천포 화력발전소 산으로, 사용 원탄은 인도네시아 Adaro와 호주 Bayswater탄을 4 : 6 비율로 혼합, 연소한 것이다.

KS L 5405의 규정은 비중 1.95 이상, 분말

Table 1 Physical properties of cement and fly ash

Items	Gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time ( t : m )				Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )				Median size (μm)	Moisture (%)	LOI (%)
			Initial		Final		3days	7days	28days	91days			
			Vicat	Gill more	Vicat	Gill more							
Portland cement	3.15	3,250	2:33	3:54	5:59	6:19	213	271	410	452	15.8	0.39	1.38
Fly Ash	2.15	4,440					-				30.2	0.27	2.35

도 2400cm<sup>3</sup>/g 이상, 수분 1.0% 이하, 강열삼량 (LOI) 5.0%로 정하고 있는바, 실험 결과 규정을 만족하였으며 그 결과는 Table 1, 2와 같다.

### 2.1.2 혼화제

수중 불분리성 혼화제(AWA)는 크게 아크릴계와 셀룰로오스계로 나누어진다.

이 실험에 사용된 수중 불분리성 혼화제는 HPMC(Hydroxy Proylene Methyl Cellulose)이며, 불분리성 혼화제 및 고유동화제(SP)는 국내 J사 제품으로 성분 및 성상은 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical admixtures

Admix.	Composit	Form	Gravity	pH	Solid Vol. (%)
A W A	HPMC	Powder	0.7	8.0	-
S P	Melamine	Liquid	1.30	7.5	35

### 2.1.3 골재

본 실험에 사용된 골재는 고성산 부순 돌과 바다 모래를 사용하였다. 굵은 골재는 최대치수가 20mm이고, 바다 모래에는 3.46%의 패각이 함유되어 있었다. 문헌에 의하면 5~10mm 정도의 패각이 4% 이하이면 강도에 무해한 것으로 보고되어 있다.<sup>11)</sup> 골재의 시험은 KS F규정에 따라 실시하였고, 물리적 특성은 Table 4와 같다.

## 2.2 배합설계 및 강도시험

### 2.2.1 배합설계 및 혼합

목표로 하는 콘크리트의 강도는 210kg/cm<sup>2</sup>이며, 해양 및 수중 타설 콘크리트를 기준으로 하여 변동계수를 12%로 정하고 해당 증가계수( $\alpha$ ) 1.25를 고려한 배합 강도는 263kg/cm<sup>2</sup>이다. 배합 강도, 내구성, 수밀성을 고려하여 물·결합재(시멘트와 플라이애쉬)비, 즉 W/B를 50%로 정하였다.<sup>1)~14)</sup>

단위수량은 문헌<sup>15)~16)</sup>을 참고하면 슬럼프 플로

우값 45±5cm 범위를 기준으로 할 때 210~230 kg/m<sup>3</sup>이 일반적으로 적용되므로 본 실험에서는 220kg/m<sup>3</sup>으로 정하고, 단위 결합재량은 440kg/m<sup>3</sup>으로 정하였다. 문헌 및 시공사례를 참고하면 수중 불분리 콘크리트의 경우 350~550kg/m<sup>3</sup>을 사용하고 있다.<sup>8)~16)</sup>

공기량은 수중 불분리 콘크리트의 경우 6%이하를 원칙으로 하며 수중 불분리성 혼화제의 증점작용으로 인하여 일반 콘크리트에 비하여 다소 높아지는 경향이 있으므로 공기량 시험을 통하여 배합조정이 필요하다.<sup>10)</sup>

목표 공기량은 4±1%로 정하였고 시험결과 이 범위를 만족하였다. 잔골재율은 문헌 및 시공사례에 의하면 시험을 통하여 가급적 적게 사용함을 원칙으로 하고 있으며, 본 연구에서는 표면건조포화상태의 잔 골재와 굵은 골재의 혼합 골재에 대한 단위용적중량 시험을 통하여 최대 밀도를 얻을 수 있는 골재비율을 근거로 잔골재율을 43%로 정하였다.

수중 불분리성 혼화제(AWA)는 단위량 5.0kg/m<sup>3</sup> 정도를 사용할 때 탁도 150ppm 이하로 만족하였으며, 고유동화제(SP)는 단위 결합재 중량의 1%를 사용함으로써 슬럼프 플로우값 50cm이상을 얻을 수 있었다. 플라이애쉬(FA)는 단위 결합재 중량의 10%에서 50%까지 치환하였다.

콘크리트의 혼합은 수중 불분리 콘크리트의 경우, 균질하고 양호한 콘크리트를 만들 수 있게 그 방법과 시간을 미리 시험을 통하여 콘크리트의 품질을 확인한 후 결정하는 것으로 되어 있다.<sup>12),13)</sup> 배합설계의 결과는 Table 5와 같다.

수중 불분리 콘크리트의 혼합 방법은 강제식 믹서를 사용할 경우, 수중 불분리성 혼화제와 시멘트 및 골재를 투입하여 30초 동안 건 비빔을 한 후 혼합용수와 유동화제를 투입하고 60~200초 정도 혼합하는 방법을 택하고 있으므로 문헌<sup>10)~16)</sup>을 참고하여 30초간 건 비빔을 하고 혼합

Table 4 Physical properties of aggregate

Agg.	Gmax (mm)	Gravity	Abs orb (%)	F M	Ut. Weig. (kg/m <sup>3</sup> )	Porsity (%)	Solid vol. (%)	Salinity (%)	Shell (%)	Sound ness (%)	Fine particle (%)	Alkali reaction		
												RC	SC	Judge
Fin.agg	-	2.58	1.50	2.71	1535	40.69	-	0.0053	3.46	-	0.37	72	51.0	harmless
Gravel (crush)	20	2.56	1.63	6.83	1454	41.48	56.83	-	-	5.0	1.00	95	32.3	harmless

Table 5 Mixture proportions of concrete and properties of fresh concrete

Mix. No.	Gmax. (mm)	S.F. (cm)	pH	Air (%)	Turb. (ppm)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	Batch quantity (kg/m <sup>3</sup> )						
										W	C	S	G	F.A	AWA	SP
Plain	20	43.0	12.00	0.35	270	2330	50	50	43	220	440	666	876	0	0.0	0.0
F-0	20	61.5	11.70	3.20	230	2252	50	50	43	220	440	666	876	0	4.9	4.4
F-1	20	53.0	11.40	3.55	100	2231	50	56	43	220	396	659	867	44	4.9	4.4
F-2	20	55.5	11.20	3.65	50	2207	50	63	43	220	352	650	858	88	4.9	4.4
F-3	20	57.0	11.00	3.45	95	2195	50	71	43	220	308	645	847	132	4.9	4.4
F-4	20	55.5	11.20	3.50	80	2175	50	83	43	220	264	637	837	176	4.9	4.4
F-5	20	52.0	10.90	3.60	55	2166	50	100	43	220	220	630	829	220	4.9	4.4

용수를 투입할 때는 콘크리트 믹서를 정지시켰다. 콘크리트의 혼합시간과 압축강도의 관계는 수중 콘크리트의 경우 되비비를 하면 콘크리트의 품질이 좋아지는 것으로 되어 있으며<sup>12)</sup>, 특히 플라이애쉬를 첨가하면 콘크리트는 저온에서 적절한 밀도 유지와 강도를 조속히 발현하기가 어려우므로 일반 콘크리트에 비하여 비빔시간이 더 소요된다는 보고가 있다<sup>5)</sup>.

한편 수중 불분리성 혼화제의 경우 셀룰로오스계의 용해시간은 농도 2%, pH 6.8, 온도 20~30°C일 때 50~55분 정도의 용해시간이 소요된다는 보고<sup>16)</sup>가 있다. 수중 불분리 콘크리트의 압축강도를 고려한 경우 혼합용수의 투입 후 유동화제를 첨가하기 전까지 300초간 비빔이 120초 비빔 보다 강도 발현이 크다는 일본 건설성의 보고가 있으며, Dan Ravina<sup>17)</sup>의 연구에 의하면 플라이애쉬를 사용한 콘크리트에서 목표 슬럼프값을 160±10mm로 하고 단위 수량이 고정된 배합에서 혼합시간을 5분에서 45, 90, 135, 180분까지 변경하여 만든 콘크리트의 압축강도 시험을 한 결과 135분까지 혼합 시간이 길수록 압축강도는 선형적으로 증가되었다.

본 연구에서는 수중 불분리 콘크리트에 플라이애쉬를 사용하고 셀룰로오스계의 수중 불분리성 혼화제를 사용하였으므로 위의 내용을 참고하여 용량 60ℓ, 회전속도 30rpm의 강제식 팬믹서로 건 비빔 30초를 포함하여 10분간 혼합하였다.

### 2.2.2 공시체 제작 및 강도 시험

해수 중에서 수중 불분리 콘크리트에 플라이애쉬의 첨가효과를 확인하기 위해 바다 속에 콘크리

트를 타설할 때와 유사한 조건을 부여하였다.

우리 나라 연안의 수심 10m와 20m에서 최근 10년 동안 관측된 년 평균 해수온도(14.93°C)를 참고하여 15±3°C로 조절된 해수 중에 문헌<sup>10),13)</sup>의 규정에 따라 타설·양생한 것과 그 특성을 비교평가 하기 위하여 공기중 타설·표준양생 및 담수중 타설·표준양생을 하여 압축강도 시험을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

슬럼프 플로우는 Table 5와 같이 단위 불분리성 혼화제 4.9kg/m<sup>3</sup>과 고유동화제 4.4kg/m<sup>3</sup>를 사용한 결과 모든 배합에서 50cm 이상이 되었다.

공기량은 시험결과 모든 배합에서 4%이하로 규정을 만족하였으며, pH는 전 배합에서 12 이하이다.

탁도는 plain 콘크리트의 경우 270ppm인데 비하여 플라이애쉬의 사용량 증가에 따라 점차 감소하여 플라이애쉬 치환율 50%일 때 55ppm으로 현저히 감소되었다. 콘크리트의 단위중량은 수중 불분리 콘크리트가 Plain 콘크리트보다 약 80kg/m<sup>3</sup>이 적었다.

### 3.2 혼화제가 압축강도에 미치는 영향

플라이애쉬를 사용한 콘크리트에서 혼화제가 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 Table 6 및 Fig. 1, 2, 3의 Plain과 F-0의 비교를 통하여 알 수 있다.

Table 6 The results of compressive strength, affected by different casting and curing condition

Mix. No.	7days (kg/cm <sup>2</sup> )					28days (kg/cm <sup>2</sup> )					91days (kg/cm <sup>2</sup> )					365days (kg/cm <sup>2</sup> )				
	A	B	C	B/A (%)	C/A (%)	A	B	C	B/A (%)	C/A (%)	A	B	C	B/A (%)	C/A (%)	A	B	C	B/A (%)	C/A (%)
Plain	278	22	16	8	6	315	45	70	14	22	351	54	121	15	34	355	81	194	23	55
F-0	280	205	182	73	65	332	289	249	87	75	365	316	267	87	73	390	350	273	90	70
F-1	195	188	163	96	84	275	273	241	99	88	305	283	285	93	93	382	316	329	83	86
F-2	190	173	159	91	84	271	268	226	99	83	310	276	279	89	90	411	376	331	91	82
F-3	184	145	135	79	73	228	221	175	97	77	359	354	271	99	75	414	391	336	94	81
F-4	177	133	106	75	60	194	185	158	95	81	375	334	224	89	60	552	445	339	81	61
F-5	102	88	81	86	79	168	161	113	96	67	264	236	194	89	73	444	431	317	97	71

Note: A: cast in air and cured under 21°C of tap water, B: cast and cured 21°C of tap water, C: cast and cured under 15°C of sea water

시험 결과 전 재령에 걸쳐서 F-0의 강도가 Plain의 강도를 상회하였으므로 불분리제와 유동화제가 사용됨으로써 압축강도는 보통 콘크리트보다 증가됨을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 수중 불분리제의 점조성과 유동화제의 유동성 증대로 반죽질기가 적절한 상태로 변하고, 콘크리트가 균질한 상태로 변하기 때문으로 사료된다.

수중 불분리성 혼화제를 사용하지 않고 콘크리트를 타설한 경우 Table 6 및 Fig. 1, 2, 3의 Plain과 같이 재령 1년 강도는 기중 제작의 경우 350kg/cm<sup>2</sup> 이상인데 비하여, 담수중 100kg/cm<sup>2</sup> 이하, 해수중 200kg/cm<sup>2</sup> 이하이다.

공기중 제작 공시체의 압축강도에 대한 담수중 제작 공시체와 해수중 제작 공시체의 압축강도비(%) 이하(기중·담수강도비, 기중·해수강도비)

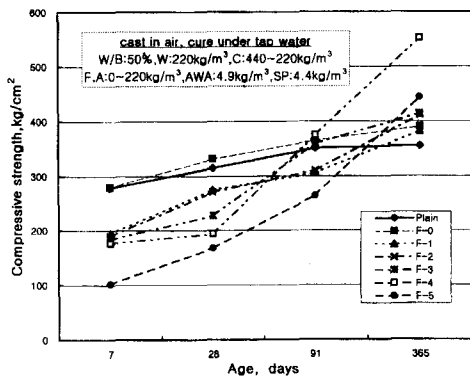


Fig. 1 Compressive strength of concrete, cast in air versus fly ash replacement

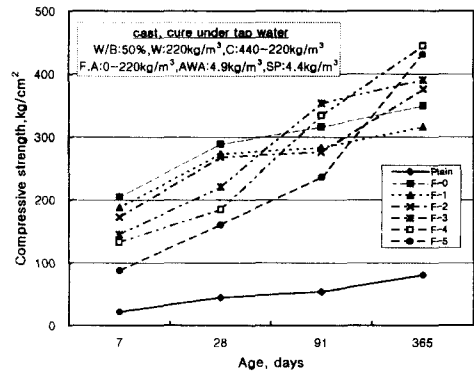


Fig. 2 Compressive strength of concrete, cast under tap water versus fly ash replacement

는 Plain 콘크리트의 경우 재령 7일이 8%와 6% 재령 28일이 14%와 22%, 재령 91일 15%, 34%, 재령 1년에는 23%와 55%에 그친다.

이와 같이 수중제작 콘크리트의 경우 불분리제를 사용하지 않고 콘크리트를 타설할 경우는 콘크리트의 강도 발현을 기대할 수 없음을 알 수 있다. 수중 불분리성 혼화제를 사용한 콘크리트의 기중·해수강도비가 70% 이하인 경우는 해수중 제작 양생한 공시체에서 플라이애쉬를 50% 치환한 경우 재령 28일에 67%이며, 플라이애쉬를 40%치환한 경우는 재령 91일에 60%와, 재령 1년의 경우 61%이며 그 외는 전 배합에서 기중 제작 양생한 강도 값의 70%를 상회하였다.

즉, 수온이 낮을 경우 플라이애쉬를 40% 이상 다량 치환하여 배합한 경우는 문헌<sup>6),19)</sup> 내용과 같

이 기중 강도비가 작게 나타나는 경향을 보였다. 플라이애쉬를 치환한 수중 불분리 콘크리트의 기중·수중 압축 강도비는 담수중에 타설한 경우 평균 90%인 반면 해수 중에 타설한 콘크리트는 76%에 머문다. 이와 같은 현상은 타설·양생시의 담수 온도가 23℃ 전후인 반면 해수는 15℃로, 콘크리트가 초기에 상대적으로 낮은 수온과 접하게된 원인으로 사료된다.

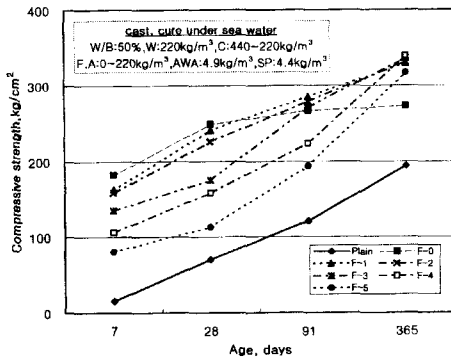


Fig. 3 Compressive strength of concrete, cast under sea water versus fly ash replacement

플라이애쉬 치환에 따른 장기 강도 증가 효과는 재령 91일 이후에 강도 역전 현상이 나타나며, 그 증가율은 플라이애쉬를 40~50% 치환한 배합에서 현저하였다. 해수 중에서 플라이애쉬 사용에 따른 장기강도 증가 효과는, 기중과 담수중 제작에 비하여 플라이애쉬 사용량이 30%이상일 경우 91일 이전 강도는 낮으나 1년 강도는 플라이애쉬를 10~50%까지 치환한 전 배합이 플라이애쉬를 사용하지 않은 배합의 강도를 상회하였다.

강도 증가율은 플라이애쉬를 사용하지 않은 불분리 콘크리트의 경우, 28일 이후 1년까지 강도 변화가 249~273kg/cm<sup>2</sup>로, 증가율 9.6%에 그쳤다. 이에 반해 플라이애쉬 50% 치환의 경우 113~317Kg/cm<sup>2</sup>으로 증가율이 180%에 달해 해수에서 플라이애쉬를 사용함이 장기강도 증진면에 유리함을 알 수 있다.

### 3.3 재령과 압축강도의 관계

재령에 따른 압축강도의 변화 추이는 Fig.4 (a), (b)와 같이 재령 28일 까지는 전 배합에서 플라이애쉬 사용량이 증가함에 따라 압축강도는 반비례하여 감소되었으나, 재령 91일 이후부터는 Fig. 4(c), (d)와 같이 기중제작 및 담수제작의 경우 플라이애쉬 40%까지는 치환율의 증가에 따라 강도 증가가 커짐을 알 수 있다. 그러나 15℃의 해수 중에 제작 및 양생한 경우 플라이애쉬의 치환을 증가에 따른 91일 이후의 장기강도는 거의 비슷한 값을 나타내었다. 이와 같은 현상은 온도의 영향으로, F급 플라이애쉬가 C급 플라이애쉬나 보통 콘크리트에 비하여 온도가 낮을 경우 포조란 반응이 온도에 따라 민감하게 영향을 받는다는 연구결과<sup>(6), (19)</sup>와 일치한다.

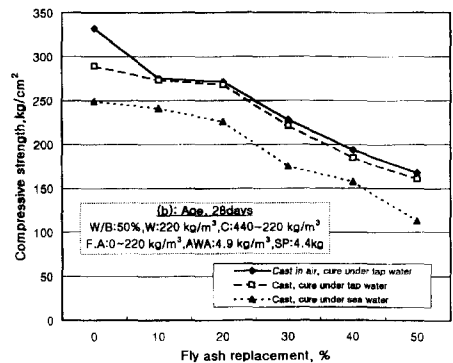
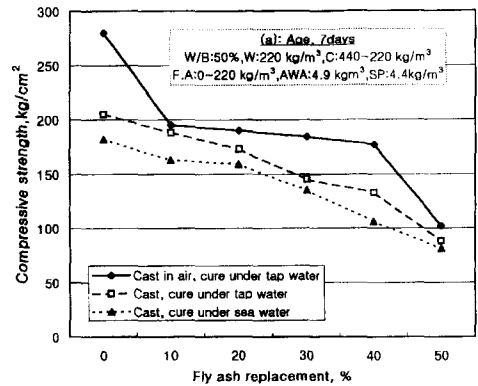


Fig. 4 (a),(b) Compressive strength of concrete, at age of 7 and 28days

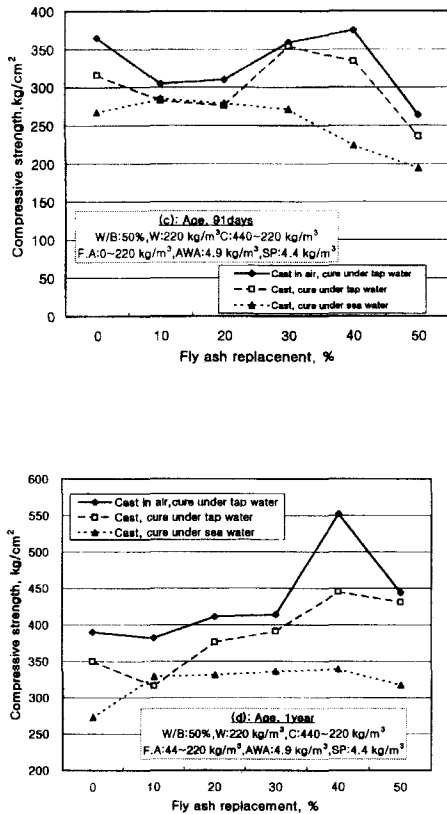


Fig. 4 (c),(d) Compressive strength of concrete, at age of 91 days and 1 year

### 3.4 기중과 담수중에서 제작한 콘크리트의 압축강도의 특성

기중과 담수중에 제작한 콘크리트의 강도 특성은 Fig.5, 6과 같이 플라이애쉬를 10%이상 치환한 경우 플라이애쉬를 치환하지 않은 콘크리트와 비교하여 28일 이전의 초기강도는 작으나, 91일 이후의 장기강도는 플라이애쉬 치환율의 증가에 따라 증대되었다. 장기강도 증대를 위한 최적의 플라이애쉬 사용량은 시험 결과, 치환율 30~40%이다.

재령 1년을 기준 하면 플라이애쉬를 10~50% 치환한 경우 재령의 증가에 따라 전 배합의 압축강

도는 증가하였고, 역시 치환율 30~40%에서 최대이다. 한편 플라이애쉬를 치환하여 보통 콘크리트 28일 강도 이상을 얻기 위해서는 Fig.5, 6과 같이 재령 91일 기준으로 30~40%치환이 필요하다.

이 때 최대 강도 값을 보통 콘크리트 28일 강도를 기준으로 나타내면 기중에서 제작한 콘크리트는 플라이애쉬 40% 치환의 경우 119%이고 담수 중에서 제작한 경우에는 플라이애쉬를 30% 치환할 때 112%이다.

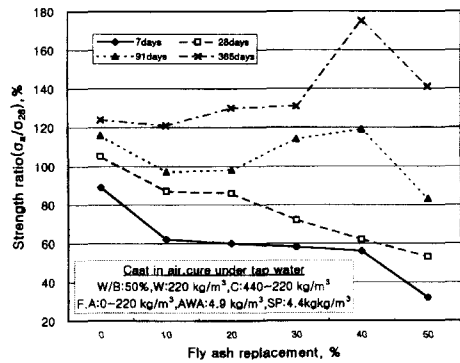


Fig. 5 Compressive strength of concrete, cast in air and cured under tap water

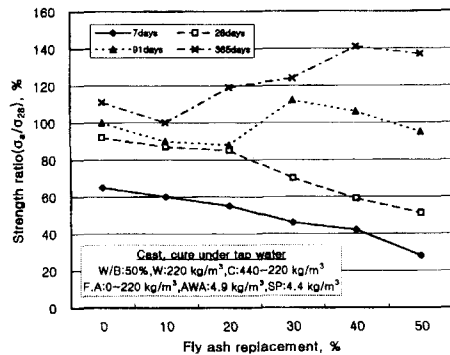


Fig. 6 Compressive strength of concrete, cast and cured under tap water

재령 1년을 기준하면 모든 배합에서 보통 콘크리트 28일 강도를 상회하였으며 최대 강도는 플라이애쉬를 40% 치환했을 때 최대 값을 나타내

었다. 이 때 강도 값은 Plain 콘크리트 28일 강도에 대해 기준 제작한 경우는 175%에 해당하고 담수 중에 제작한 것은 141%에 해당한다.

### 3.5 해수 중에 타설 및 양생한 콘크리트의 압축강도의 특성

수중 불분리 콘크리트에서 플라이애쉬를 사용하지 않은 경우는 Table 6 및 Fig.7과 같이 재령 91일과 1년 강도는  $267\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서  $273\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 증가율 2%에 지나지 않고, 1년 강도는 기준에서 제작하여 표준양생한 보통 콘크리트 28일 강도의 87%에 그쳤다.

반면 플라이애쉬를 치환한 경우는 모든 배합에서 기준에서 제작한 보통 콘크리트 재령 28일 강도비가 100%를 상회하므로 해수 중에 수중 불분리 콘크리트를 타설할 경우 플라이애쉬를 사용하면 탁월한 강도증가 효과가 있음을 알 수 있다.

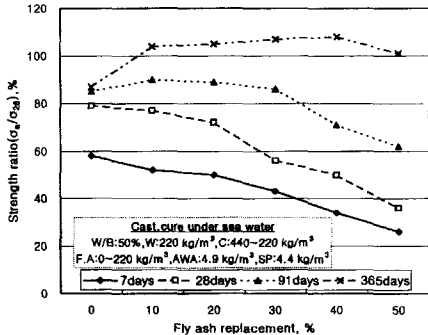


Fig. 7 Compressive strength of concrete, cast and cured under sea water

특히 해수 중에 콘크리트를 타설·양생한 경우 플라이애쉬의 치환을 변화에 따른 강도변화의 특징은 재령 1년을 기준 할 때 Fig.7과 같이 치환율이 10, 20, 30, 40, 50%로 증가함에 따라 기준 제작·표준 양생한 보통 콘크리트 28일 강도에 대해 각각 104, 105, 107, 108, 101%이므로 수온  $15^{\circ}\text{C}$  정도의 해수 중에서는 기준이나 담수 중에 제작한 경우에 비하여 플라이애쉬 치환율 증가에 따른 압축강도의 증가가 뚜렷하지 않은

것이 특징이다.

그러므로 재령 28일을 기준으로한 조기강도는 플라이애쉬 치환율 증가에 따라 현저히 감소되므로 구조물의 사용성과 재하 시기를 고려한다면 조기강도가 큰 쪽이 유리하므로 특히 수온이 낮은 해수 중에 콘크리트를 타설할 때는 플라이애쉬를 10%정도 사용하는 것이 적당하다.

그러나 콘크리트의 경제성 측면이나 플라이애쉬의 자원활용 측면과 장기강도 증대 효과를 고려하여 특별히 조기강도를 요구하지 않는 구조물이라면 플라이애쉬를 단위 결합재 중량의 40%정도 사용함이 합리적일 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

- 1) 불분리성 혼화제 및 고유동화제가 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 혼화제를 사용하지 않은 보통 콘크리트에 비하여 강도를 증진시키는 효과가 있었다.
- 2) 수중에 콘크리트를 타설할 경우에 수중 불분리제를 사용하지 않은 경우는 재령 1년강도가 28일 기준강도의 약 39%에 불과하며, 전 재령에 걸쳐서 콘크리트의 압축강도의 발현을 기대할 수 없었다.
- 3) 플라이애쉬의 치환에 따른 장기강도 증가효과는 재령 91일 이후부터 강도 역전현상이 나타나며, 치환율 40% 내지 50%에서 현저하였다.
- 4) 플라이애쉬를 10%에서 50%까지 치환하여 해수 중에 타설 및 양생한 수중 불분리 콘크리트의 1년 강도는 전 배합에서 플라이애쉬를 사용하지 않은 보통 콘크리트의 강도를 상회하였다. 보통 콘크리트는 재령 28일에서 재령 1년동안의 강도 증가율이 9.6%이고, 재령 91일에서 재령 1년 사이의 강도 증가율이 2%에 그친 반면 플라이애쉬를 50% 치환한 경우 재령 28일에서 재령 1년까지의 강도 증가율은 180%에 달하였다.
- 5) 온도  $15 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 해수 중에 타설·양생한 경우 재령 91일 이후 1년까지의 강도변화는 플라이애쉬를 사용함에 따라 크게 증가되었으나, 재령 1년 강도의 특성은 플라이애쉬



의 치환율을 10%에서 50%까지 증가시키면 따라 기중 28일 강도를 기준 하여 104%에서 107%로 그 증가율은 아주 작았다.

6) 따라서 바다에 플라이애쉬를 사용한 수중 불분리 콘크리트를 타설할 경우 특별히 91일 이전의 조기 강도를 요구할 경우는 10%정도의 플라이애쉬 치환이 적절하나, 경제적 측면과 플라이애쉬의 재활용과 장기강도 증대효과를 고려한다면 40%정도 치환함이 합리적인 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. 채소연, "수중 불분리성 혼화제를 사용한 콘크리트의 제 성질에 대한 실험적 연구", 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1993, pp. 3~4.
2. 이영제, "수중 콘크리트용 혼화제를 사용한 콘크리트의 실험적 연구", 건국대학교 대학원 석사학위논문, 1992, pp. 1~2.
3. 한태영, "수중 비분리 콘크리트의 최적 배합비에 관한 연구", 부산대학교 산업대학원 석사학위논문, 1995, pp. 3~4.
4. 오성원, "석탄회(Fly Ash) 처리 현황과 대책", 석탄회 활용 국제워크숍, 1996, pp. 8~9.
5. 권중현, "Fly ash를 사용한 수중 불분리 콘크리트의 유동성에 관한 연구", 해양공학회지, 12권, 1998, pp. 153~161.
6. Malhotra, V.M. "Fly Ash in Concrete", CANMET, 1994, pp. 135~166.
7. Malhoter, V.M. "some aspects of durability of High-Volume Fly ahs concrete", CANMET, 1990, pp. 10~11.
8. Seabrook, P.T. and Wilson, H.S. "High-Strength Semi-Light weight concrete for use in off shore structures: Utilization of Fly Ash and silica fume", Journal of cement composites and light weight concrete, vol.10, pp. 183-192.
9. Malhotra, V.M. "Concrete in incorporating High volumes of ASTM class F Fly Ash", Cement, and Aggregates, Vol.10, No2, 1988, pp. 88~95
10. 沿岸開發技術研究センター, 水中不分離性コンクリート. マニュアル, 1990. pp. 42~471p.
11. 배수호, "해사와 하천사를 사용한 고품질콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구", 중앙대학교 대학원 박사학위 논문, 1995. 31p.
12. 대한토목학회, 콘크리트표준시방서, 31-32장, 1996.
13. 대한토목학회, 콘크리트용 수중 불분리성 혼화제 품질 기준(안), 1995. 5p.
14. 대한토목학회, 유동화콘크리트 시공지침(안), 1991. 31p
15. 日本土木學會, 水中コンクリート 不分離性 和劑 品質規準, 1994. pp. 12~19.
16. 日本土木學會, 水中不分離性コンクリート設計施工指針(案), 1993. PP. 12~23.
17. Ravina, D. "Effect of Prolonged Mixing on Compressive Strength of Concrete with and without Fly Ash and or Chemical dmixture." ACI Materials Journal, 1960, pp. 451~ 455.
18. 谷川恭雄, 構造材料實驗法, 2版, 森北出版社, 1991, 191p
19. Yamamot, Y. and. Kobayasi, S. "Effect of Temperature on the Properties of Superplasticized Concrete", ACI Journal, 1986, pp. 80~87.

### 요약

바다에 콘크리트를 타설 할 때는 육상과는 달리 여러 가지 제약을 받게 되며 타설 후에는 해양의 물리, 화학작용과 혹독한 기상작용을 받게 된다. 해양환경에서 내구적인 고품질의 콘크리트를 제조하기 위해 플라이애쉬를 혼입한 수중 불분리 콘크리트를 해수 중에 타설·양생한 후 압축강도를 측정하고 기중 및 담수 중에서 양생한 것과 비교하여 그 특성을 구명하였다. 우리 나라 연안의 87년에서 96년까지 10년간 수심 10m에서 20m의 연 평균수온이 14.9℃임을 고려하여, 수온을 15±3℃로 조절한 해수 중에 타설·양생한 후 콘크리트의 압축강도를 측정하여 플라이애쉬 사용효과를 확인하였다. 시험결과 해수 중에서 플라이애쉬를 사용하지 않은 불분리 콘크리트의 경우 재령 91일부터 1년까지의 강도증가는 2%에 머무나 플라이애쉬를 단위 결합재 중량비로 10%에서 50%까지 10%씩 증가시켜 치환한 결과 압축강도는 각각 15%, 19%, 24%, 51%, 64%가 증가되었다. 플라이애쉬의 적정 사용량은 콘크리트의 조기강도가 요구되는 구조물의 경우 단위 결합재에 대한 중량비로 10%정도 치환함이 적절하며, 내구성과 경제성을 고려한다면 40%~50%정도가 효과적임을 알 수 있었다.

(접수일자 : 1998.12.10)