

# 해사 사용 고강도 콘크리트의 물성에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Physical Properties of High-Strength Concrete Using Sea Sand

정영수\*

배수호\*\*

박종협\*\*\*

Chung, Young Soo Bae, Su Ho Park, Jong Heob

### 요 약

국내 건설경기의 비약적인 신장으로 인한 하천사의 고갈로 해사의 사용이 매년 급증하고 있는 추세이다. 시방서 조건을 만족시키지 않는 무분별한 해사의 사용은 저품질 콘크리트의 시공으로 이어져, 이는 곧바로 구조물의 내구성에 치명적인 영향을 끼쳐 사회적으로 엄청난 슬럼프와 재난을 몰고 올 대규모 참사를 야기시킬 수도 있다는 점에서 해사를 사용한 콘크리트에 대한 물리적 특성의 규명이 시급한 실정이라 할 수 있다.

따라서 본 연구는 해사를 이용한 고강도 콘크리트를 개발하기 위한 실험적 연구로서 양질의 하천사를 이용한 고강도 콘크리트와 해사를 이용한 고강도 콘크리트의 물리적 특성을 서로 비교·분석하여 해사를 이용한 고강도 콘크리트를 실제의 콘크리트 공사에 적극적으로 활용하는데 그 목적이 있다.

해사를 이용한 고강도 콘크리트의 실험적 규명은 고강도 콘크리트의 구조물 설계시 중요한 설계자료로 이용될 수 있다. 따라서 본 연구는 콘크리트용 혼화제로서 실리카흙의 사용유무에 따라 최대압축강도를 발현시키는 물-시멘트비(물-결합재비)의 한계값을 결정하고, 정탄성계수의 실험으로 현행 콘크리트 표준시방서의 탄성계수 계산식의 적용범위를 제시한 후, 압축강도 330~800kgf/cm<sup>2</sup>인 고강도 콘크리트의 탄성계수와 항련인장강도 및 휨인장강도를 예측할 수 있는 제안식을 도출해 냈다.

### Abstract

Recent construction activity of infrastructures has been booming and accelerating to incur shortage of river sand for concrete works. Thus, sea sand has been excessively used instead of river sand, that directly causes to decrease the quality and the durability of concrete, and then might lead to the collapse of concrete structures.

The purpose of this experimental research is not only to develop high-strength concrete using sea sand, but also to investigate mechanical properties of high-strength concrete, such as elastic moduli, compressive strength and etc, which could be used for important design data of concrete

\* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수, 공박

\*\* 정회원, 농어촌진흥공사 농공기술연구소 주임연구원, 공박

\*\*\* 정회원, 쌍용엔지니어링 대리

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

structures.

Rational analytic formula for elastic moduli have been proposed together with those for the splitting tensile strength and the flexural strength, which are to be predicted from compressive strength of concrete cylinder.

Optimum water-cement and water-binder ratio have been experimentally obtained so as to develop high compressive strength with and without using silica fume as a admixture for concrete. It is noted that experimental elastic moduli for high strength concrete above  $\sigma_{ck}=330\text{kgf/cm}^2$  are less than those by the Code. Appropriate amount of concrete mixture has been experimentally investigated so as to develop maximum compressive, flexural and splitting tensile strength.

**Keywords :** High-strength concrete, Water-cement ratio, Water-binder ratio, Physical properties, Compressive strength, Splitting tensile strength, Flexural strength, Elastic modulus

## 1. 서 론

국내 건설경기의 비약적인 신장으로 인한 하천사의 고갈로 콘크리트용 잔골재의 공급량이 대량 부족함에 따라 대체골재로서 해사의 사용이 매년 급증하고 있는 추세이다. 신도시 아파트 공사에서 시방서를 만족시키지 않는 무분별한 해사의 사용은 많은 사회적인 문제를 야기시킨 바 있으며, 이에 관한 체계적인 연구가 시급한 실정이라 할 수 있다.

특히, 최근에 경부고속전철, 영종도 신공항, 대규모 아파트 건설 등의 각종 공사로 인하여 잔골재로서의 하천사의 고갈은 심각한 상황에 직면해 있으며, 또한 범세계적으로 추진되고 있는 환경보호운동의 영향으로 우리나라에서도 골재채취 금지구역이 확대되고, 상수원 보호사업 등으로 하천골재의 개발은 더욱 어렵게 되었다.

또한 하천골재의 부족현상으로 인한 해사의 무분별한 사용은 콘크리트의 내구성에 문제를 야기시키며 저품질 콘크리트의 시공으로 이어 질수도 있다는 점에서 해사를 사용한 콘크리트에 대한 보다 많은 물리적 특성을 규명할 필요가 있다. 따라서 해사를 잔골재로서 사용한 고강도·고품질 콘크리트의 개발은 최근 당면하고 있는 시급하고 중요한 과제이다.

따라서 본 연구의 목적은 양질의 하천사를 이용한 고강도 콘크리트와 해사를 이용한 고강도 콘크리트

리트의 물리적 특성을 서로 비교·분석하여 해사를 이용한 고강도 콘크리트를 실제의 콘크리트의 공사에 적극적으로 활용하는 것이다. 또한 해사를 이용한 고강도 콘크리트의 특성을 규명하여 고강도 콘크리트의 구조설계시 필요한 설계자료를 획득하는데 그 목적이 있다.

해사와 하천사에 대해 각 단위시멘트량(단위결합재량)에 따른 실리카흙 사용유무별로 실험을 수행하였으며, 고강도 콘크리트의 강도특성을 규명키 위하여 재령 3일, 7일, 28일의 압축강도, 할렬인장강도 및 휨인장강도 시험을 수행하였다.

고강도 콘크리트의 역학적 특성을 규명키 위하여 재령 28일 양생 공시체에 대한 압축강도 시험시 응력-변형을 곡선을 유도하여 실험적으로 탄성계수를 구하였다.

또한, 본 연구를 통하여 실리카흙 사용 유무별 최대압축강도를 발현시키는 물-시멘트비(물-결합재비)의 한계값을 결정하였으며, 실험적인 탄성계수식을 구하여 현행 시방서 탄성계수식의 적용범위를 제시하였다.

미국이나 일본 등 선진국에서는 콘크리트의 압축강도를 보통과 고강도로 구분하여 구조설계시 각각 다른 탄성계수식을 적용하도록 권장하고 있는데 반하여 현행 우리나라 콘

크리트 표준시방서에서는 이에 대한 규정이 없으므로 고강도 콘크리트(압축강도  $330\text{kgf/cm}^2$  이상)에 적용할 수 있는 탄성계수 추정식을 본 연구

에서 제안하였다.

한편, 압축강도에 비하여 아주 작은 콘크리트의 인장강도는 건조수축 및 온도변화 등에 의한 균열의 경감 및 방지를 위한 기준값으로 사용될 수 있으며, 콘크리트의 휨인장강도는 도로나 활주로와 같이 직접 휨응력을 받는 포장 콘크리트 및 콘크리트관 등의 설계기준강도에 사용된다. 따라서 본 연구에서는 압축강도시험공시체와 동일한 배치의 공시체로 활렬인장강도 및 휨인장강도시험을 수행한 후 이들의 상관관계를 이용하여 콘크리트의 압축강도로부터 활렬인장강도 및 휨인장강도를 예측할 수 있는 식을 제안하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트

본 연구에서는 시멘트를 선정키 위하여 국내 7개사의 보통 포틀랜드 시멘트를 수집, 품질시험을 하였는데, 국내 보통 포틀랜드 시멘트의 품질은 제품간의 편차가 그리 크지 않은 것으로 나타났으며, 또한 시멘트의 물리성 시험결과도 거의 모두가 KS 규정에 적합한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 품질이 양호하고, 구입조건도 유리한 A사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 physical properties of cement

Specific gravity	Setting time		Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Compressive strength(kgf/cm <sup>2</sup> )		
	Initial (min)	Final (hr)		$\sigma_3$	$\sigma_7$	$\sigma_{28}$
3.14	217	7.0	3,405	166	199	287

#### 2.1.2 골재

본 연구에 사용된 골재시료는 그것을 채취하기 전에 사전답사를 시행, 골재장조사를 실시하여 그 결과를 가지고 골재장을 선정하였다. 즉, 골재의 품질, 매장량, 계속개발 여부 등을 판단하여 이에 적절한 골재장을 선정, 시료를 채취하였다.

하천사는 경기도 미사리, 여주·양평군 일원,

충북 장호원, 음성, 증원군 일대를 답사한 후, 전술한 조건들을 종합적으로 판단하여 골재장으로서의 제반여건이 가장 유리한 경기 여주군에 위치한 남한강산을 채취하였고, 굵은골재로서 부수들은 모암의 품질이 좋고, 매장량 및 금후 계속개발 여부를 고려하였다. 즉, 골재장에서 가장 보편적으로 구할 수 있고, 본 연구의 목적에 부합하는 강도 범위내에서 경제적이고 실용적인 19mm를 선정하였으며, 경기도 안성군 소내리에 위치한 골재장에서 채취하였다.

한편, 하천사의 고갈에 따라 해사의 사용이 매년 증가되고 있으며, 하천사가 고갈된 바다에 인접한 지역에서는 해사의 사용이 불가피하므로 본 연구에서도 해사시료를 채취하였는데, 그 방법은 서해안의 평택항, 안중항, 남해안의 목포항을 사전답사하여 전술한 조건들을 만족시킨 서해안의 충남 당진군 석문면 장고항리에 위치한 시료와 남해안의 전남 해남군 화원면 시하도에 위치한 시료를 채취하였다.

Table 2 Physical properties of fine aggregate

Specimens	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (tf/m <sup>3</sup> )	Weight of passing No. 200 sieve(%)	F · M
Sea Dang Jin	2.60	1.1	1.643	2.3	2.85
sand Hae Nam	2.61	0.3	1.500	1.1	2.60
River Sand (Yeo Joo)	2.59	1.5	1.635	2.4	2.67

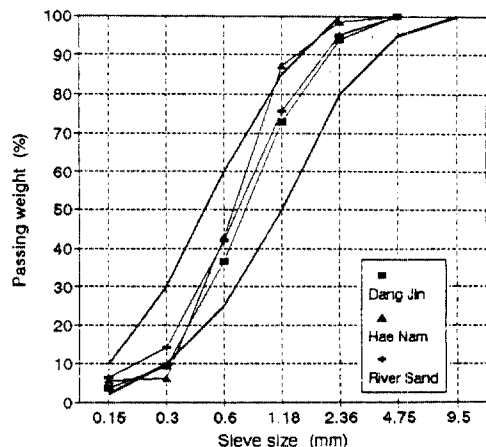


Fig. 1 Grading curve of fine aggregate(Dang Jin, Hae Nam, Yeo Joo)

Table 3 Physical properties of coarse aggregate

Gmax (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (tf/m <sup>3</sup> )	F · M	Abrasion (%)
19	2.71	0.4	1.560	6.65	19.8

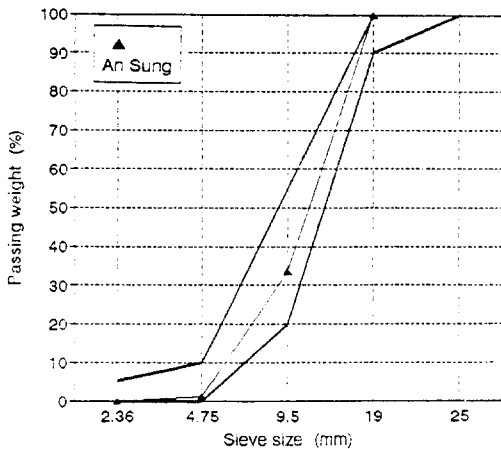


Fig. 2 Grading curve of coarse aggregate(An Sung)

본 연구에 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 2 및 Table 3과 같고, 이들의 입도곡선은 Fig 1, Fig 2와 같다.

### 2.1.3 혼화재료

#### 1) 혼화제

혼화제를 선정키 위하여 고강도 및 유동화 콘크리트용으로 사용되고 있는 고성능감수제(표준형)에 대하여 국내 시판되고 있는 9개사 제품을 구입하여 KS F 2560(콘크리트용 화학혼화제) 및 ASTM C 494(Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete)에 준하여 품질시험을 해본 결과, 본 연구에 사용된 K사 제품은 국내기술로 개발된 것으로, 외국 유명회사 제품과 성능은 비슷하면서 가격은 현저히 저렴하기 때문에 본 연구에서는 K사 제품의 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였으며, 그 품질특성은 Table 4와 같다.

Table 4 Properties of chemical admixture

Specific gravity	pH	Solid content (%)	Quantity (Cement weight %)	Main component	Remarks
1.21	8	41	0.2~2.0	Sodium salt of a sulfonate naphthalene	Liquid

#### 2) 혼화제

콘크리트의 고강도 발현 및 내구성 증진목적의 혼화제는 실용성 및 경제성을 고려할 때 아직까지는 실리카흙이 가장 적절하기 때문에, 본 연구에 사용된 혼화제는 액상의 실리카흙인 Force 10000(G사)이며, 그 품질특성은 Table 5와 같다.

Table 5 Quality properties of admixture

Chemical component					Physical properties			
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ignition loss	Specific gravity	Solid content (%)	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	
97.6	0.8	0.3	0.2	2.1	1.8	50	200,000	

### 2.2 콘크리트 공시체 제작

고품질 콘크리트의 역학적 특성을 규명키 위한 콘크리트 공시체(압축 및 인장강도 시험용 : 10×20cm, 휨강도 시험용 : 15cm×15cm×53cm, 탄성계수 측정용 : 15×30cm)는 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 따라 제작하였으며, 성형후 24시간 경과하여 물드를 제거하고 시험전까지 20±3℃의 온도로 습윤양생하였다.

본 연구에서는 보통강도 콘크리트의 경우에 적용되는 ACI 규정식을 인용한 현행 콘크리트 표준시방서의 탄성계수 계산식의 압축강도 적용한계를 제시하고, 그 이상의 고강도 콘크리트에 대한 탄성계수 추정식을 제안하기 위하여, 콘크리트의 배합표는 보통강도부터 고강도까지 모두 커버할 수 있도록 단위시멘트량을 300~700kg/m<sup>3</sup>로 변화시켰으며, 또한 순수한 단위시멘트량만의 증가로는 콘크리트의 고강도 발현에 한계가 있기 때문에 보다 높은 고강도 발현을 위해서 단위시멘트량이 450~700kg/m<sup>3</sup>인 경우에 대해 단위시멘트량의 15%를 실리카흙으로 대체하여 배합시험을 하였다.

한편, 잔골재율은 시험배합에 의해 결정해야 하나 배합변수 및 종류에 어려움이 있으므로, 콘크리트 표준시방서에 의하여 굵은 골재 최대치수 19mm 경우의 42%를 기준으로 하여 결정하였다.

Table 6~8은 하천사 및 해사 각각에 굵은골재로서 부순돌을 사용한 경우의 콘크리트 배합표를 나타낸 것이고, Table 9~11은 Table 6~8의 배합

중 단위시멘트량이 450~700kg/m<sup>3</sup>인 경우에 대하여 시멘트량의 15%를 실리카흄으로 대체한 경우의 콘크리트 배합표를 나타낸 것이다.

Table 6 Mix proportions of high-quality concrete(river sand)

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	물-시멘트 트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )				
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	고성능감수제
19	12.5	71.5	39	215	300	754	1180	6.0
19	15.0	57.1	39	200	350	738	1155	7.0
19	18.0	48.6	39	195	400	720	1126	8.0
19	18.5	39.6	39	178	450	702	1098	9.0
19	20.5	35.6	39	178	500	684	1078	10.0
19	22.5	33.3	39	183	550	666	1042	11.0
19	20.0	30.4	39	183	600	650	1017	12.0
19	19.0	28.8	39	187	650	635	993	13.0
19	22.0	26.4	39	185	700	619	968	14.0

Table 7 Mix proportions of high-quality concrete(sea sand of Dang Jin)

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	물-시멘트 트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )				
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	고성능감수제
19	12.0	65.2	42	196	300	746	1076	6.0
19	14.5	56.4	42	197	350	731	1049	7.0
19	18.0	46.6	42	186	400	718	1035	8.0
19	18.0	38.0	42	171	450	718	1035	9.0
19	20.0	33.8	42	169	500	702	1008	10.0
19	21.0	31.0	42	171	550	679	976	11.0
19	20.0	28.6	42	172	600	663	951	12.0
19	20.0	26.6	42	173	650	640	919	13.0
19	18.0	25.0	42	175	700	624	900	14.0

Table 8 Mix proportions of high-quality concrete(sea sand of Hae Nam)

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	물-시멘트 트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )				
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	고성능감수제
19	12.0	65.8	40	197	300	726	1133	6.0
19	14.0	54.0	40	189	350	715	1117	7.0
19	17.0	45.5	40	182	400	715	1111	8.0
19	18.0	39.2	40	176	450	694	1081	9.0
19	20.0	35.0	40	175	500	679	1060	10.0
19	20.5	32.7	40	180	550	663	1030	11.0
19	21.0	31.1	40	186	600	645	1003	12.0
19	21.5	28.0	40	182	650	626	973	13.0
19	18.0	26.1	40	183	700	606	946	14.0

이들 콘크리트의 배합시험 방법은 단위시멘트량(단위결합재량)과 고성능감수제 첨가량을 일정

Table 9 Mix proportions of high-quality concrete containing silica fume(river sand)

굵은골재 최대치수 (mm)	단위 결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )	물-시멘트 트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )					
				물	시멘트	실리카흄	잔골재	굵은골재	고성능감수제
19	450	36.4	18.5	164	382.5	67.5	702	1098	9.0
19	500	30.0	18.0	150	425.0	75.0	684	1070	10.0
19	550	28.4	18.5	156	467.5	82.5	666	1041	11.0
19	600	26.6	18.7	160	510.0	90.0	650	1016	12.0
19	650	24.4	22.2	159	552.5	97.5	635	993	13.0
19	700	23.3	20.0	163	595.0	105.0	619	968	14.0

Table 10 Mix proportions of high-quality concrete containing silica fume(sea sand of Dang Jin)

굵은골재 최대치수 (mm)	단위 결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )	물-시멘트 트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )					
				물	시멘트	실리카흄	잔골재	굵은골재	고성능감수제
19	450	32.9	15.0	148	382.5	67.5	718	1035	9.0
19	500	29.5	16.0	148	425.0	75.0	702	1008	10.0
19	550	26.6	14.0	146	467.5	82.5	679	976	11.0
19	600	22.8	15.0	137	510.0	90.0	663	951	12.0
19	650	18.7	15.0	122	552.5	97.5	640	919	13.0
19	700	17.6	15.0	123	595.0	105.0	624	900	14.0

Table 11 Mix proportions of high-quality concrete containing silica fume(sea sand of Hae Nam)

굵은골재 최대치수 (mm)	단위 결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )	물-시멘트 트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )					
				물	시멘트	실리카흄	잔골재	굵은골재	고성능감수제
19	450	37.1	16.0	167	382.5	67.5	694	1081	9.0
19	500	33.5	18.0	168	425.0	75.0	679	1060	10.0
19	550	31.1	18.0	171	467.5	82.5	663	1030	11.0
19	600	28.7	18.0	172	510.0	90.0	645	1003	12.0
19	650	27.5	18.0	179	552.5	97.5	626	973	13.0
19	700	25.7	17.0	180	595.0	105.0	606	946	14.0

하게 하였을 때, 목표슬럼프(20±2cm)를 얻기 위한 단위수량을 구하여 최종적으로 물-시멘트비(물-결합재비)를 결정하였다.

### 2.3 시험방법

#### 2.3.1 압축강도 시험

콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 따라 하천사 및 해사를 사용한 콘크리트 공시체에 대하여 각 재령별( $\sigma_3, \sigma_7, \sigma_{28}$ )로 하였다.

### 2.3.2 인장 및 휨강도 시험

콘크리트의 인장 및 휨강도 시험은 KS F 2423 (콘크리트의 인장강도 시험 방법)과 KS F 2407 (콘크리트의 휨강도 시험 방법 : 단순보의 중앙점 하중법)에 따라 압축강도 시험에서의 동일한 배합에 대하여 재령 28일의 강도를 시험하였다.

### 2.3.3 탄성계수 측정

콘크리트의 탄성적 성질을 규명키 위한 탄성계수 측정은 KS F 2438(콘크리트의 원주공시체의 정탄성계수 및 포아슨비 시험 방법)에 따라 탄성계수 측정용 공시체와 동일한 배합으로 동반공시체를 추가로 제작하여 탄성계수 측정에 앞서 압축강도 시험을 행하여 파괴하중의 40%의 하중을 미리 계산한 다음, 파괴하중의 10~70%까지 하중을 10%씩 증가시키면서 컴프레소미터에 의하여 각각의 변위를 측정하여 탄성계수를 계산하였다.

### 2.3.4 단위중량 시험

굳지 않은 콘크리트의 단위중량 시험 방법은 KS F 2409에 규정되어 있으나 콘크리트의 압축강도나 탄성계수는 동일배치의 공시체라 할지라도 시험시마다 각각 그 값이 다르기 때문에 굳지 않은 콘크리트의 단위중량을 측정하여도 그것은 실제 탄성계수를 측정한 콘크리트 공시체의 단위중량이라고 말할 수 없다. 따라서 본 시험에서는 압축강도 및 탄성계수를 측정하기 전에 공시체의 중량을 측정한 후 그것을 공시체의 체적으로 나누어서 단위중량을 구하였다.

## 3. 결과분석 및 고찰

### 3.1 콘크리트의 물-시멘트비와 압축강도와의 관계

Fig.3~5는 하천사 및 해사 각각에 굵은골재로서 부순돌을 사용한 콘크리트의 각 재령별 강도 시험 결과를 나타낸 것으로, 재령 28일의 강도를 기준으로 한 경우 하천사를 사용한 콘크리트는 물-시멘트비가 33%이상의 범위에서, 당진해사 및 해남해사를 사용한 콘크리트는 물-시멘트비가 각각 34%, 35%이상의 범위에서 물-시멘트비의 감소에 따라서 강도가 거의 직선적으로 증가되나 이들값 이하의 범위에서는 강도증진이 크게 둔화되거나

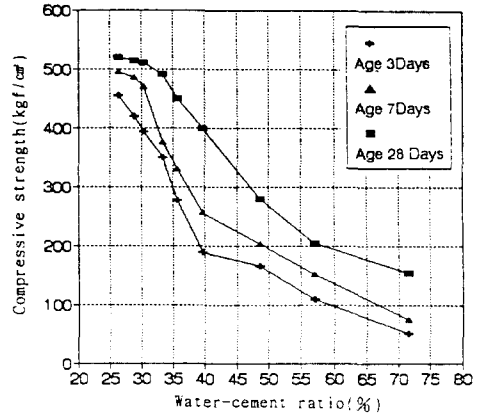


Fig. 3 Water-cement ratio and compressive strength of concrete (river sand)

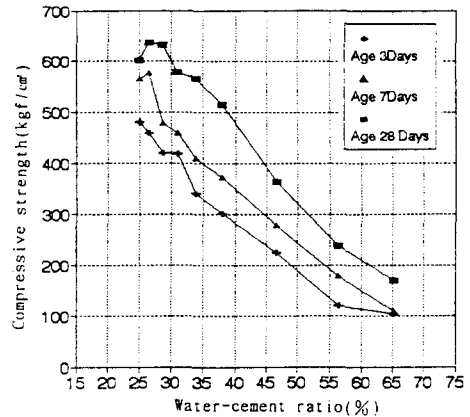


Fig. 4 Water-cement ratio and compressive strength of concrete (sea sand of Dang Jin)

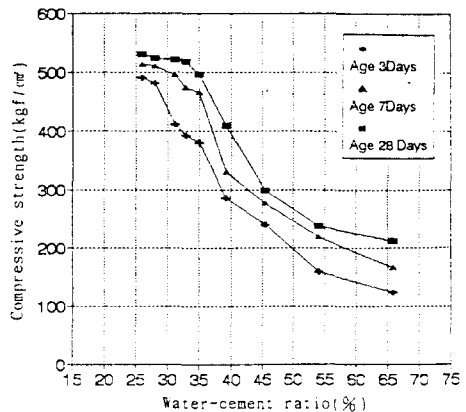


Fig. 5 Water-cement ratio and compressive strength of concrete (sea sand of Hae Nam)

감소되는 경향으로 나타났다. 따라서 일반적인 재료와 고성능감수제만을 사용한 경우 콘크리트의 압축강도와 시멘트-물비가 비례하는 물-시멘트비의 범위는 약 34%이상(시멘트-물비 : 약 2.94이하)으로 나타났다.

한편, 동일한 시멘트량에서 콘크리트의 압축강도는 재령에 관계없이 당진해사가 가장 큰데, 이것은 당진해사가 콘크리트용 골재로서의 물리적 성질이 여주하천사나 해남해사보다 우수하기 때문이다.

따라서 골재로서의 물리적 성질이 동일할 때, 하천사와 해사 사이의 콘크리트의 강도차이는 거의 없다고 할 수 있으며, 하천사나 해사는 골재의 종류에 관계없이 그 자체의 물리적 성질이 우수한 것이 콘크리트의 강도도 우수하다고 말할 수 있다.

Fig. 6~Fig. 8은 단위결합재량이 450~700kg/m<sup>3</sup>일 때, 그 중량비로 15%를 실리카흙으로 대체한 콘크리트의 강도시험 결과를 나타낸 것으로, 실리카흙을 혼입한 하천사 콘크리트의 재령 28일의 강도는 물-결합재비가 27% 이상의 범위에서, 당진해사 및 해남해사를 사용한 콘크리트는 물-결합재비가 각각 23%, 29% 이상의 범위에서 물-결합재비의 감소에 따라서 강도가 직선적으로 증가되나 이들을 이하의 범위에서는 강도증진이 크게 둔화되거나 오히려 감소되는 경향이 나타났다.

따라서 실리카흙을 혼입한 콘크리트는 물-결합재비가 약 26%이상(결합재-물비 : 약 3.85이하)의 범위에서 압축강도와 결합재-물비가 비례관계에 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 물-시멘트비 및 물-결합재비의 이상치가 존재하는 것은 본 논문의 참고문헌(8)에서도 동일한 경향을 얻었는데 그것은 물-시멘트비(물-결합재비)의 감소에 따라서 일반적으로 콘크리트의 강도는 증가되지만 물-시멘트비(물-결합재비)가 어느 한계값 이하로 되면 시공성의 악화로 다짐이 어렵고 균일한 품질의 콘크리트를 얻을 수 없기 때문이며, 또 하나는 콘크리트의 강도발현에 필요한 최적의 골재용적비가 존재하는데 단위시멘트량의 대폭적인 증가에 따라 이 골재용적비가 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

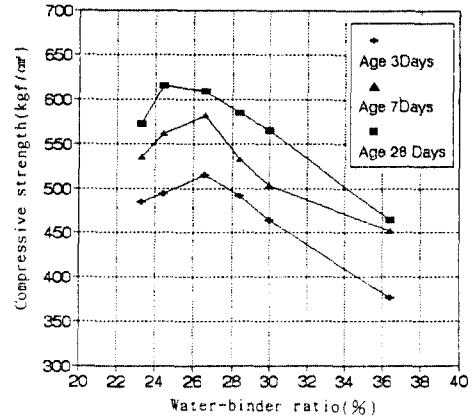


Fig. 6 Water-binder ratio and compressive strength of concrete (river sand)

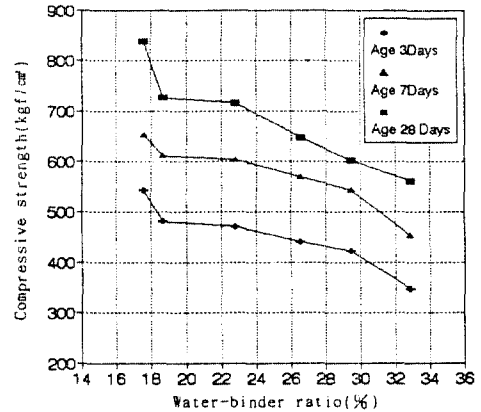


Fig. 7 Water-binder ratio and compressive strength of concrete (sea sand of Dang Jin)

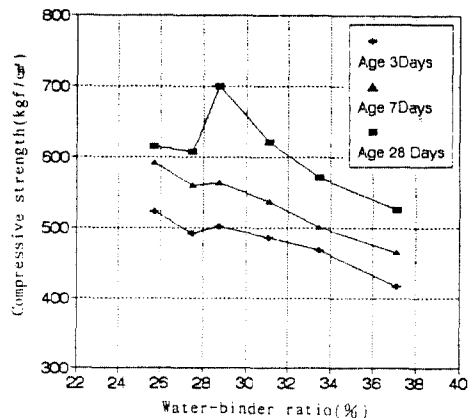


Fig. 8 Water-binder ratio and compressive strength of concrete (sea sand of Hae Nam)

### 3.2 고강도 콘크리트의 탄성계수

현행 콘크리트 표준시방서에 규정된 탄성계수 계산식( $E_c = W^{1.5} \times 4,270 \sqrt{\sigma_{ck}} (\text{kgf/cm}^2)$ )은 보통 강도 콘크리트의 경우에 적용되는 ACI 규정식을 인용한 것으로, 이것을 고강도 콘크리트에 적용하게 되면 실제 탄성계수보다 과대한 값을 나타내게 된다.

따라서 고강도 콘크리트의 탄성계수를 구하기 위해서는 실제 콘크리트 공시체로 종방향변위를 측정하거나 고강도 콘크리트에 적절한 탄성계수를 구할 수 있는 제안식을 이용하여야 한다.

미국, 일본 등 선진국에서는 콘크리트의 탄성계수 계산식을 보통 콘크리트와 고강도 콘크리트로 구분하여 적용하고 있으나 지금까지 국내의 관련 시방서에는 고강도 콘크리트에 관한 탄성계수 계산식이 규정되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 표준시방서에 규정된 탄성계수 계산식의 합리적인 적용범위를 결정하고, 또한 고강도 콘크리트의 탄성계수 계산식을 도출시키기 위하여 저강도부터 고강도 콘크리트까지 각 배합비별로 탄성계수를 측정하였다.

콘크리트의 탄성계수와 단위중량 및 압축강도와의 관계를 구하기 위하여 최소자승법을 이용, 독립변수가 2개 이상인 경우 종속변수와의 관계를 나타내는 중선형회귀모형을 가정, 고강도 콘크리트에 가장 적절한 이상적인 회귀곡선을 찾기 위하여 실측자료(압축강도 기준 :  $140 \sim 800 \text{kgf/cm}^2$ )에 대하여 오름차순, 내림차순 각각으로 회귀분석을 수행하였으며, 먼저 콘크리트 표준시방서 계산식이 가장 잘 맞는 압축강도의 적용한계를 결정한 후( $\sigma_{ck} = 330 \text{kgf/cm}^2$ ), 압축강도  $330 \sim 800 \text{kgf/cm}^2$ 의 고강도 콘크리트에 대하여 가장 잘 맞는 형을 선정하여 상관계수가 가장 높게 되는 비지의 모수를 결정하였다.

즉, 하천사와 당진해사 및 해남해사 모두를 조합하여 단위중량 및 압축강도를 독립변수로 하고 탄성계수를 종속변수로 하여 회귀분석을 수행하였는데, 그 결과 압축강도  $330 \sim 800 \text{kgf/cm}^2$ 인 고강도 콘크리트의 탄성계수와 압축강도 및 단위중

량과의 관계식은 식(1)과 같다.

$$E_c = W^{1.2} \times 18,000 (\sigma_{ck})^{0.3} (\text{kgf/cm}^2) \quad (1)$$

여기서, W : 콘크리트의 단위중량( $\text{tf/m}^3$ )

$\sigma_{ck}$  : 콘크리트 표준공시체의 재령 28일  
의 압축강도( $\text{kgf/cm}^2$ )

압축강도  $330 \sim 800 \text{kgf/cm}^2$ 인 고강도 콘크리트의 단위중량은 약  $2.4 \text{tf/m}^3$ 이므로 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$E_c = 51,400 (\sigma_{ck})^{0.3} (\text{kgf/cm}^2) \quad (2)$$

Fig. 9는 하천사와 당진해사 및 해남해사 모두를 조합하여 단위중량 및 압축강도와 탄성계수와 상관도를 나타낸 것이다.

한편, Fig. 10은 각국의 고강도 콘크리트에 대한 탄성계수를 나타낸 것으로, 콘크리트 표준시방서 계산식(Current Code)과 유럽코드(CEB-FIP)<sup>(1)</sup> 규정에 의한 값은 고강도 콘크리트의 탄성계수 계산에 신뢰성있게 사용되고 있는 ACI 제안식<sup>(1)</sup>이나 일본의 New RC(철근 콘크리트조 건축물의 조정량, 조고층화 기술개발 프로젝트) 제안식<sup>(2,3)</sup> 등에 비하여 그 값이 과대하게 된다.

따라서 고강도 콘크리트 구조물의 설계시, 콘크리트 표준시방서 계산식이나 CEB-FIP 규정식을 적용하게 되면 탄성계수가 실제값보다 과대하게 평가되어 위험측으로 설계될 수가 있으므로 이 때, 본 연구의 제안식을 이용하면 합리적인 구조 해석을 할 수 있게 된다.

본 논문의 제안식을 ACI 제안식이나 New RC 제안식과 비교하면 대체적으로 탄성계수가 약간 크게 평가되는데, 이것은 본 제안식을 얻기 위한 회귀분석시 고강도 콘크리트의 압축강도 영역이  $330 \sim 800 \text{kgf/cm}^2$ 로서, ACI 제안식(압축강도 영역 :  $420 \sim 1,000 \text{kgf/cm}^2$ )이나 New RC 제안식(압축강도 영역 :  $360 \sim 1,400 \text{kgf/cm}^2$ )보다 작기 때문인 것으로 판단된다.



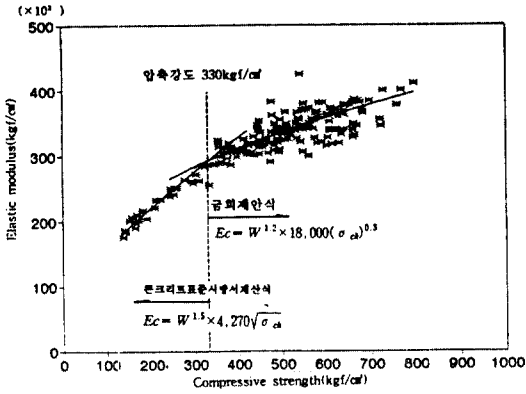


Fig. 9 Relationship between compressive strength and elastic modulus

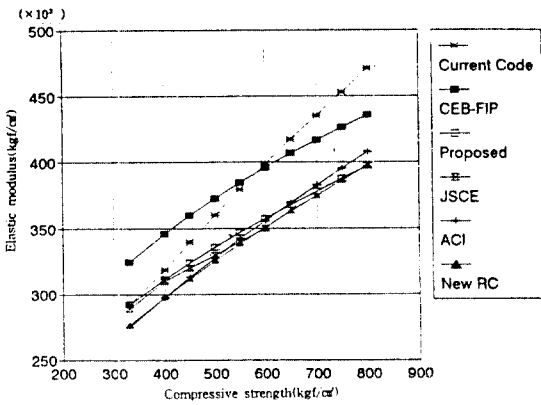


Fig. 10 Elastic modulus of high-strength concrete for each countries

### 3.3 압축강도와 인장강도와의 관계

콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비하여 아주 작으므로 철근콘크리트 설계에서 무시되지만, 건조수축 및 온도변화 등에 의한 균열의 경감 및 방지를 도모하기 위해서는 인장강도의 크기를 알 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 할렬인장강도 시험 방법에 의하여 고품질 콘크리트의 인장강도를 구하였으며, 인장강도시험에서 사용된 공시체와 동일배치의 공시체로 압축강도를 구한 후, 압축강도가 330~800kgf/cm<sup>2</sup>인 고품질 콘크리트에 대하여 독립변수를 압축강도로, 종속변수를 할렬인장강

도로 하는 단순회귀분석을 수행하여 상관계수가 최대로 되는 미지의 모수를 구하였다.

본 연구에 사용된 하천사와 당진해사 및 해남해사 모두를 조합한 고강도 콘크리트(압축강도: 330~800kgf/cm<sup>2</sup>)의 할렬인장강도와 압축강도의 상관식은 식(3)과 같고, 이들의 상관도는 Fig. 11과 같다.

$$\sigma_{ct} = 1.4\sqrt{\sigma_{ck}} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_{ct}$ : 콘크리트의 할렬인장강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ck}$ : 콘크리트 표준공시체의 재령 28일의 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

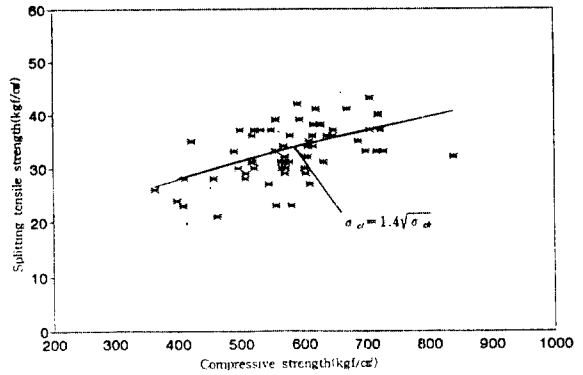


Fig. 11 Relationship between compressive strength and splitting tensile strength

### 3.4 압축강도와 휨강도와의 관계

콘크리트의 휨강도는 도로나 활주로와 같이 직접 휨용력을 받는 포장판 및 콘크리트관, 콘크리트말뚝 등의 설계기준강도에 채용되고, 이들 콘크리트의 품질판정, 품질관리 및 콘크리트의 휨균열 발생의 예측에도 이용되고 있으므로 휨강도의 크기를 알아 둘 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 휨강도 시험 방법(단순보의 중앙점 하중법)에 의하여 휨강도를 구하고, 그것과 동일배치의 공시체로 압축강도를 구한 후, 압축강도가 330~800kgf/cm<sup>2</sup>인 고품질 콘크리트에 대하여 전절의 『3.3 압축강도와 인

장강도와와의 관계』에서와 동일한 방법으로 단순회귀분석을 수행하여 상관계수가 최대로 되는 미지의 모수를 구하였다.

본 연구에 사용된 하천사와 당진해사 및 해남해사 모두를 조합한 고강도 콘크리트(압축강도: 330~800kgf/cm<sup>2</sup>)의 휨강도와 압축강도와의 상관식은 식(4)와 같고, 이들의 상관도는 Fig. 12와 같다. 그리고, 해사가 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향은 하천사와 거의 같으므로 기존식과의 차이는 거의 없는 것으로 판단된다.

$$\sigma_{ru} = 2.1(\sigma_{ck})^{0.6}(\text{kgf/cm}^2) \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_{ru}$ : 콘크리트의 휨강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ck}$ : 콘크리트 표준공시체의 재령 28일의 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

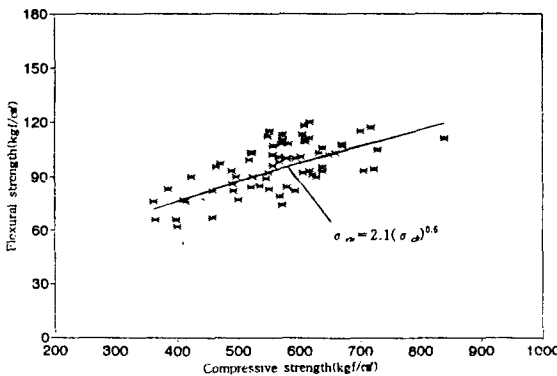


Fig. 12 Relationship between compressive strength and flexural strength

#### 4. 결 론

시공성, 강도특성 및 내구성이 우수한 고강도 콘크리트의 특성에 관한 실험연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일반적인 재료와 고성능감수제를 사용한 고강도 콘크리트의 경우, 물-시멘트비가 약 34% 이상에서는 압축강도와 시멘트-물비가 비례하나 그 이하로 되면 강도증진이 크게 둔화되는 경향이 나타났고, 실리카흙을 시멘트 중량비로 15% 혼입한 고강도 콘크리트는 물-결합재비가 약 26% 이상에서 압축강도와 결합재-물비가 비례관계에 있

으나 그보다 작게 되면 강도증진이 크게 둔화되거나 오히려 강도가 저하되는 경향이 나타났다.

2. 압축강도가 330~800kgf/cm<sup>3</sup>인 고강도 콘크리트의 압축강도로부터 인장강도를 예측할 수 있는

제안식은  $\sigma_{ct} = 1.4\sqrt{\sigma_{ck}}(\text{kgf/cm}^2)$ 이다.

3. 압축강도가 330~800kgf/cm<sup>2</sup>인 고강도 콘크리트의 압축강도로부터 휨강도를 예측할 수 있는 제안식은  $\sigma_{ru} = 2.1(\sigma_{ck})^{0.6}(\text{kgf/cm}^2)$ 이다.

4. 압축강도가 140~800kgf/cm<sup>2</sup>인 콘크리트에 대하여 회귀분석을 수행한 결과, 현행 콘크리트 표준시방서에 규정된 탄성계수 계산식을 합리적으로 적용할 수 있는 압축강도의 한계치는 330kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났고, 콘크리트의 압축강도가 330~800kgf/cm<sup>2</sup>인 고품질 콘크리트에 대하여 본 논문의 탄성계수 제안식을 이용할 수 있으며, 그 값은  $E_c = W^{1.2} \times 18,000(\sigma_{ck})^{0.3}(\text{kgf/cm}^2)$ 이다.

5. 콘크리트용 골재로서 해사가 강도에 미치는 영향은 거의 없지만 제염되지 않은 미세척해사를 사용한 콘크리트는 철근의 부식발생을 촉진시켜 콘크리트의 내구성에 나쁜 영향을 미칠 수 있으므로 반드시 해사의 염분은 부식허용한도 이하로 제염하여야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 1994년도 한국학술진흥재단의 공모 과제(01 E 0982) 연구비에 의하여 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro: "CONCRETE", Prentice Hall, 1993
2. (財)國土開發技術研究センター: "建設省綜合技術開發プロジェクト『鐵筋コンクリート 造建築物の超輕量・超高層化技術の開發』"高強度コンクリート分科會報告書, 昭和63年度~平成4年度
3. (財)國土開發技術研究センター: "建設省綜合技術開發プロジェクト『鐵筋コンクリート 造建築物の超輕量・超高層化技術の開發』"高強度コンクリート分科會報告書, 平成3~平成4年度
4. 배수호: "해사와 하천사를 이용한 고품질 콘크리

- 트의 특성에 관한 실험적 연구”, 중앙대학교 공학 박사 학위논문, 1995.6
5. 윤상대, 배수호 : “콘크리트용 대체골재 개발에 관한 연구(최종)”, 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 94-05-19, 1994.12
  6. 정영수, 배수호, 윤상대, 김영의 : “고성능감수제를 사용한 콘크리트의 품질특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회논문집, Vol.6, No.6, 1994.12, pp.135-142
  7. 건설부편 : “콘크리트 표준시방서”, 1988.12
  8. 田佳寛 : “高強度コンクリート”, 콘크리트工學, Vol.32, No.4, 1994.4, pp.81-89
  9. 飛坂基夫 : “高性能(AE)減水劑を 用いた高強度・高品質コンクリートの諸性質”, セメント・コンクリート, No.548, pp.9-18, 1992.10
  10. 飛坂基夫 : “高性能(AE)減水劑を 用いた高強度・高品質コンクリートの諸性質”, セメント・コンクリート, No.549, pp.9-18, 1992.11
  11. Walid Baalbaki, Pierre-Clude Aitcin, and Gerard Ballivy: “On Predicting Modulus of Elasticity in High-Strength Concrete”, ACI Materials Journal, Vol.89, No. 5, Sept. -Oct. 1992, pp.517-520
  12. W. Baalbaki et al.: “Influence of Coarse Aggregate on Elastic Properties of High-Performance Concrete”, ACI Materials Journal, Vol.88, No.5, Sept. -Oct. 1991, pp.499-503
  13. Francis A. Oluokun, Edwin G. Burdette, and, J. Harold Deatherage: “Elastic Modulus, Poisson's Ratio, and Compressive Strength Relationships at Early Ages”, ACI Materials Journal, Vol.88, No.2, Jan. -Feb. 1990, pp.3-10
  14. Baidar Bakht, Leslie G. Jaeger, and Aftab A. Mufti: “Elastic Modulus of Concrete from Compressive Tests”, ACI Materials Journal, Vol.86, No.3, May. -June. 1989, pp.220-224
  15. Reji John and Surendra P. Shah: “Fracture Mechanics Analysis of High Strength Concrete”, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.1, No.4, November, 1989, pp. 185-198
  16. Safwna, A. Khedr, Mohamed Nagib Abou-Zeid, “Characteristics of Silica-Fume Concrete”, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.6, No.3, August, 1994, pp. 357-375

(접수일자 : 1996. 4. 1)