

# 流動化 콘크리트의 乾燥收縮 및 크리프 變形 특성에 關한 研究

A Study on the Properties of Shrinkage and Creep Deformation in  
Superplasticized Concrete

朴	承	範*
Park,	Seung	Bum
任	昌	憲**
Im,	Chang	Duk

## Abstract

This study was carried out to investigate the long-term deformation of superplasticized concrete. Compressive strength, shrinkage, creep and creep recovery of concretes with and without the superplasticizing admixture have been compared for one year. The test results on creep of superplasticized concrete were also compared with three methods of predicting creep; the ACI model, the CEB model and the BP model.

According to test results, superplasticized concrete has good results in compressive strength at an age of 28 days of more than 22%, drying-shrinkage cured at air-conditioned storage less than 15%, creep deformation in air conditioned storage and loaded at an age of 28 days to 15% of compressive strength less than 11% of control concrete.

## 요 약

유동화 콘크리트의 건조수축 및 크리프 특성을 검토하기 위하여 유동화제 2종류와 일반감수제 1종류를 사용하여 재하 하중조건(압축강도의 15% 및 30%)별, 양생조건별로 압축강도 및 건조수축을 측정하고 기건상태하의 크리프 및 크리프변형을 측정하여 유동화 콘크리트의 장기 변형특성을 검토하였다.

그 결과, 유동화 콘크리트는 보통 콘크리트에 비하여 재령 28일의 압축강도는 약 22% 증가하였고, 건조수축은 15% 감소 하였으며, 크리프변형은 약 11% 감소하였고 28일간의 크리프회복은 보통 콘크리트에 비하여 작음을 알 수 있었다.

따라서 사용목적에 따른 적절한 유동화제의 선택과 적정량의 유동화제 사용은 건조수축 및 크리프 변형에 효과적인 것으로 판단된다.

\* 忠南大學校 工科大學 土木工程學科 教授

\*\* 忠南大學校 大學院 博士課程

□ 이논문에 대한 토론은 1989년 3월 31일까지 본학회에 보내주시면, 그결과를 1989년 9월호에 게재하겠습니다.

• 본 연구는 1986년도 한국과학재단의 연구비 지원에 의한 것임.

## 1. 서 론

콘크리트의 변형인 건조수축 및 크리프는 구조물의 균열발생과 프리스트레스트 콘크리트 부재의 프리스트레스 손실에 현저한 영향을 주기 때문에 이에 대한 연구는 1905년 Woolson<sup>1)</sup>이 콘크리트의 크리프를 발견하고, 1930년경부터 Davis 및 Glanville<sup>2)</sup>이 크리프특성을 계통적으로 구명한 것을 시작으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 결과 콘크리트의 건조수축 및 크리프에 영향을 주는 각종 원인에 대해 검토되어 그 메카니즘에 관한 여러 학설이 나오게 되었다.

건조수축에 관해서는 모세관 장력이론<sup>3)</sup>, 표면흡착이론<sup>3)</sup>, 층간수이론<sup>4)</sup> 등이 있고, 크리프에 관해서는 점탄성이론<sup>5)</sup>, 삼출이론<sup>6)</sup>, 점성유동이론<sup>6)</sup> 등이 있고, 콘크리트중에 함유된 수분의 거동이 건조수축 및 크리프현상의 주요인이라는 데는 공통적 견해로써 특히 시멘트-겔 공극에 존재하는 수분영향이 가장 큰 것으로 알려지고 있다.

그러나 최근과 같이 고유동화제를 이용하여 물·시멘트비를 보통 콘크리트에 비해 10~30% 낮추어 각종 구조물에 시공되고 있으므로 이에 관한 건조수축 및 크리프연구보고가 매우 빈약한 실정이다.

따라서 필자는 일반 구조물용 유동화 콘크리트의(슬럼프 18cm) 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 물성에 관하여 연구보고한 바 있으나, 본 연구에서는 유동화 콘크리트의 강도 향상 및 뒤틀림 콘크리트에의 적용을 고려하여 목표슬럼프 값이  $7 \pm 0.5$ cm이며 점성이 풍부한 보통반죽의 콘크리트를 제조하기 위하여 대표적인 고유동화제 2종류와 일반감수제 1종류(참고용)를 사용하여 유동화 콘크리트의 재하하중 및 양생조건에 따른 건조수축, 크리프, 크리프회복 및 크리프예측 등의 장기변형 특성을 구명하고자 한다.

## 2. 콘크리트의 건조수축 및 크리프에 관한 이론적 고찰

### 2.1. 건조수축

콘크리트의 건조수축은 콘크리트내의 단위수량, 단위시멘트 페이스트량<sup>7)</sup>이 많을수록 건조수축이 크며, 골재량이 적을수록<sup>8), 9)</sup>, 상대습도가 낮을수록<sup>10)</sup>, 공시체 치수가 작을수록<sup>11)</sup> 크다고 알려져 있다.

콘크리트의 건조수축기구에 관하여는 모세관 장력이론<sup>12)</sup> (Capillary tension theory), 표면흡착이론 (Surface adsorption theory), 층간수<sup>3)</sup> (Interlayer water theory) 등이 있으며, 이중 모세관장력이론이 가장 유력한 이론으로 알려지고 있다.

#### (1) 모세관 장력이론<sup>12)</sup>

건조에 따라 모세관 공극의 물이 증발하면 모세관 장력이 생기고 이로 인해 건조수축이 일어난다는 설로써, 모세관 장력은 보통 상대습도 40~45% 이상에서만 존재하고, 그 효과는 공극직경 26Å 이상에 대해서만 발생된다는 설이다.

#### (2) 표면흡착이론<sup>13)</sup>

수화생성물은 C-S-H 겔과 같이 콜로이드 입자에서는 표면장력에 의해 내부에 많은 압축응력을 생기게 하지만 그 크기는 물리적 흡착수의 양에 의존하고, 건조에 따라 흡착수가 이탈, 감소되면 표면장력은 높아지며 이로 인해 겔입자의 압축력이 증가하여 겔입자에 탄성적인 용적감소가 발생된다는 설이다.

#### (3) 층간수이론<sup>3)</sup>

장기간의 건조에 따라 흡착수막이 감소하면 팽창압도 감소하여 겔입자간의 응집력에 의해 층간막이 좁아지게 되어 페이스트 용적감소로 수축이 발생된다는 설이다.

## 2.2. 크리프

콘크리트의 크리프기구는 지금까지 발표된 여러 학설중에서 C.E.Kesler<sup>6)</sup> 및 A.M. Neville<sup>14)</sup> 등이 분류한 것을 보면 소성변형 (Plastic deformation), 점성유동 (Viscous flow), 겔수의 삼출 (Seepage of Gel water), 지연탄성 (Delayed Elasticity), 불균일한 건조수축 (Nonuniform shrinkage) 등이 있으나 어느 설 단독으로 크리프기구를 설명하기는 어렵고, 이들 설이 복합되어 크리프가 발생

되는 것으로 생각되어지고 있다.

(1)소성변형이론<sup>6)</sup>(Plastic deformation theory)

소성변형은 경화시멘트 페이스트및 골재의 국부적 파괴로 인한 변형설로써 이와 같은 변형은 비회복성으로 극한강도에 가까운 응력수준에서 일어난다.

(2)점성유동이론<sup>14)</sup>(Viscous flow theory)

Thomas<sup>15)</sup>, Glanville<sup>2)</sup>, Reiner<sup>16)</sup> 및 Freudenthal<sup>17)</sup>등은 경화시멘트 페이스트는 분산된 골재입자 주위를 둘러싼 점성유체(Viscous fluid)로 생각한 것으로, 이 이론은 콘크리트의 크리프가 강도의 40%정도 이하의 응력수준에서 응력에 비례한다는 사실에 부합된다.

(3)겔수의 삼출이론<sup>6)</sup>(Seepage of Gel water)

시멘트 겔내에 존재하는 겔수가 콘크리트에 재하시킨 지속하중에 의해 압출되고, 또 외기와 습도조건에 의해 증발됨에 따라 시멘트 겔이 수축하게 되어 변형을 일으키는 설로써, 압축크리프 설명에 지극히 유력한 설로 되어 있다.

(4)지연탄성이론<sup>18)</sup>(Delayed Elasticity theory)

물체에 지속하중이 재하되면 점성유체가 먼저 그 하중을 흡수하여 서서히 C-S-H 겔 골격구조가 이동된다. 즉, 골격구조의 탄성변형이 공극에 존재한 점성유체에 의하여 지연될 수 있다. 이와 같이 지연되어 일어나는 변형을 지연탄성변 이론이라 말하고 있다.

(5)불균일한 건조수축이론<sup>14)</sup>(Nonuniform shrinkage theory)

크리프변형의 일부분은 응력의 작용을 고려하여 수분량의 변화로써 생기는 수축 또는 팽창을 수정한 것으로 설명하고 일부분은 겔구조 요소의 점탄성 변형으로 설명하는 설이다.

2.3. 크리프 예측모델

(1)ACI model<sup>19)</sup>

ACI모델은 Branson등에 의한 연구결과를 모델

화한 것으로 ACI Committee 209는 다음과 같은 모델을 제시하고 있다.

단위응력당 탄성변형과 크리프변형의 합은 다음 식으로 표시된다.

$$\Phi(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} [1 + \phi(t, t_0)] \quad (1)$$

여기서,  $E_c(t_0)$ ; 하중재하시의 탄성계수

$\phi(t, t_0)$ ; 크리프 계수

크리프계수  $\phi(t, t_0)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t-t_0)^{0.6}}{10+(t-t_0)^{0.6}} \phi_{\infty}(t_0)$$

여기서,  $(t-t_0)$ ; 하중 재하기간

$\phi_{\infty}(t_0)$ ; 극한크리프계수

극한크리프계수(Ultimate creep coefficient)는 재령, 습도, 공시체 두께, 슬럼프, 잔골재율, 공기량 등에 의존하는 함수이다.

(2)CEB-FIP model

CEB-FIP모델의 특징은 변형후 회복되는 부분과 회복되지 않고 영구변형으로 남는 부분(irreversible creep)으로 나누고 있으며, 영구변형은 다시 재하후 1일동안의 변형을 나타내는 초기변형(initial flow)과, 뒤이어 발생하는 연속적인 변형(subsequent flow)의 성분으로 나누어지며, 단위응력당 탄성변형과 크리프변형은 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi_{28}(t, t_0)}{E_{c28}} \quad (2)$$

여기서,

$$\phi_{28}(t, t_0) = \underbrace{\beta_a(t_0)}_{\text{Initial flow}} + \underbrace{\phi_a \beta_a(t-t_0)}_{\text{Delayed elastic flow}} + \underbrace{\phi_f [\beta_{f(t)} - \beta_{f(t_0)}]}_{\text{Delayed flow}}$$

이 식에서 고려되는 인자들은 단위시멘트량, 물·시멘트비, 체적/표면적 비, 온도, 습도, 재하시 재령등이다.

(3)Bazant-Panula(BP) model

개발되어 있는 모델중 가장 이론에 근거하고 정확성이 있는 것중의 하나이다. 크리프함수에 있어서 건조크리프(drying creep)항을 도입함으로써 기본크리프(basic creep)로부터 분리되어 고려된 것이 특징이며, 건조크리프항은 건조수축의 함수이다.

총크리프변형(Total creep function)은 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi(t, t_0) = \Phi_b(t, t_0) + \frac{\phi'_d(t, t_0, t_{sh}, 0)}{E'} \quad (3)$$

여기서,

$\Phi_b(t, t_0)$ : basic creep function

$$\phi'_d(t, t_0, t_{sh}, 0) = \bar{B}_d K_T''(t_0)^{-m/2} \left( 1 + \frac{3t_{(1/2)sh}}{t-t_0} \right)^{-0.35}$$

이 식에서 고려되는 인자들은 단위시멘트량, 물·시멘트비, 잔골재량, 굵은 골재량, 잔골재율, 압축강도, 공시체 형상, 온도, 습도, 건조개시시의 재령, 재하시의 재령등이다.

3. 사용재료 및 시험방법

3.1. 사용재료

사용재료는 국내S사 보통 포틀랜드 시멘트와 충남 금강산 강모래 및 25mm강자갈을 사용하였으며, 이들 재료의 물리적 특성은 Table1, 2 및 Fig. 1 과 같고, 이때 사용된 고유동화제 및 일반 감수제의 물리적 특성은 Table3과 같다.

3.2. 시험 방법

(1)시험배합

본 연구는 고유동화제(나프타렌 설폰산염 고축합물계; Sanflo-FB, NP-10, Sanflo-FBF 및 멜라민 설폰산염 고축합물계; NP-20) 2종류와 일반 감수제(리그닌 설폰산염; Sanflo-K)를 사용하였으며, 콘크리트의 배합설계표는 Table4와 같이 단위시멘트량이 370kg / m<sup>3</sup>, Slump 7±0.5cm, 공기량 4.5±0.5%의 유동화 콘크리트를 제조하였고, 이때 고유동화제는 시멘트의 0.75%와 1.5%를 각각 첨가하였다.

Table 1. Properties of type I portland cement

Specific gravity	Blaine (㎫/g)	88μm residue (%)	Soundness (%)		Setting time			Compressive strength (kg/㎫)		
			Initial	Final	3days	7days	28days			
3.14	3280	0.5	0.06	265 (min.)	7 : 35 (hr:min.)	174	265	348		

Table 2. Physical properties of aggregates

Kind of aggregate	Specific Gravity	Absorption (%)	Fineness Modulus	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	Degradation Loss (%)	Soundness (%)	Organic impurity
Fine agg.	2.64	1.60	2.41	1251	-	good	None
Coarse agg.	2.52	2.10	7.15	1257	14.2	good	-

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	SO <sub>3</sub>	lg.loss
20.9	5.5	3.4	62.8	2.8	0.19	1.20	2.0	0.9

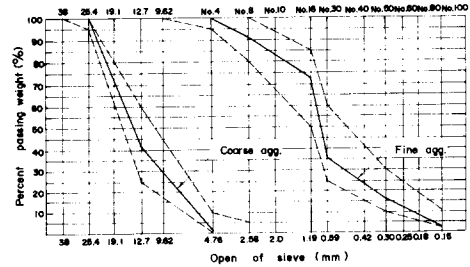


Fig. 1. Gradation curve of fine and coarse aggregate

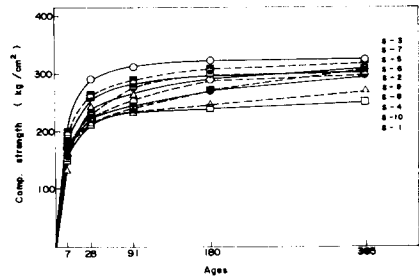


Fig. 2. Relationship between comp. strength and ages

Table 3. Physical properties of the admixtures

Admixture	Appearance	Specific Gravity	PH	ASTMC484 solids (%)
NP-10	Dark brown	1.18-1.20	7-8	38-42
NP-20	Dark brown oily liquid	1.18-1.22	6-9	40-43
Sanflo-FB	Brown liquid	1.19-1.21	8-9	39-43
Sanflo-FBF	Light brown liquid	1.16-1.20	8-9	40-42
Sanflo-K	Brown liquid	1.17-1.21	8-9	39-42

(2)공시체 제작

건조수축및 크리프 시험용 공시체 제작및 시험방법은 KSF 2453(콘크리트의 압축크리프 시험방법)에 준하여 수행하였고, 게이지스터드 삽입은 3방향 Brass inserts 1 조를 몰드내에 20.3cm 간격으로 삽입하여 제작하였다.

압축강도용 공시체는 재령 7, 28, 91, 180, 365 일의 강도측정용으로 각각 3개씩 제작하여 기건 및 습윤양생후 각 재령별로 압축강도를 측정하였다.

(3)크리프 시험장치및 재하

미국 Soiltest사 제품의 콘크리트 크리프 시험장치(KSF 2453규격)를 이용하여, 기건양생조건 하에서 재령28일의 압축강도의 15%와 30%에 해당되는 하중을 가한후 장기재령(1년)까지의 변형을 휘트모어 스트레인게이지(다이얼 엑스텐 소미터의 정밀도:100만분의 10)를 이용하여 측정 한 후 1개월에 걸쳐 크리프회복량을 측정하였다.

보편 고유동화제를 시멘트의 1.5%첨가시 보통콘 크리트에 비하여 기건양생의 경우 7일에서 평균 17%, 28일에서 평균21%의 증가를 나타내었고, 습윤양생의 경우 재령7일에서 평균20%, 28일에서 22%, 91일에서 21%, 180일에서 28%, 365일

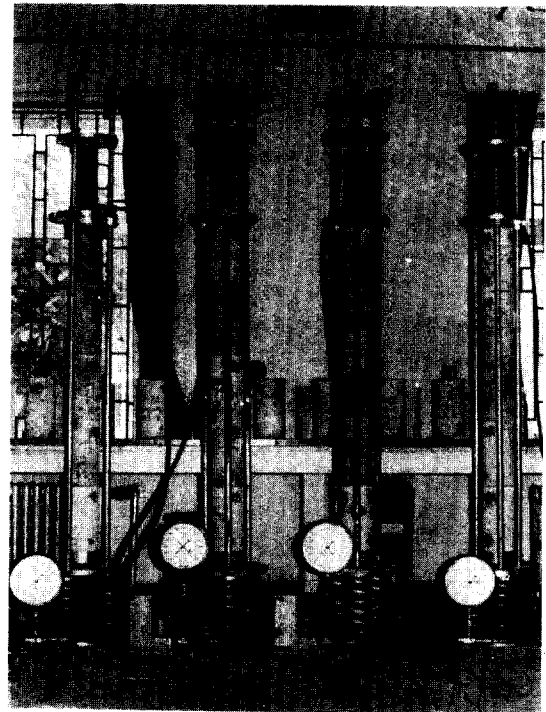


Photo 1. Creep test of superplasticized concrete

4. 실험결과및 고찰

4.1. 압축강도

본 연구에서 유동화 콘크리트의 양생조건, 고유동화제의 종류및 첨가량변화에 따른 압축강도 시험결과는 Table5, Fig.2와 같고, 이를 고찰하여

Table 4. Mix Proportion of Concrete

Kinds of Concrete	Dosage*	S/A (%)	W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Darex AEA (ml)	Slump (7 ± 0.5cm)	Air content (4.5 ± 0.5%)
				W	C	Sand	Gravel			
control	-	38	48.6	180	370	691	1132	111	7.0	4.3
NP-20	0.75	38	43.8	162	370	709	1162	111	7.3	4.2
	1.50	38	42.7	158	370	713	1168	111	7.0	4.3
Sanflo-FB	0.75	38	43.8	162	370	709	1162	111	7.2	4.9
	1.50	38	37.8	140	370	731	1197	56	7.4	4.6
NP-10	0.75	38	43.8	162	370	709	1162	111	7.1	4.6
	1.50	38	39.5	146	370	724	1187	111	7.3	4.4
Sanflo-FBF	0.75	38	43.8	162	370	709	1162	111	7.0	4.2
	1.50	38	35.9	133	370	738	1208	-	7.3	4.8
Sanflo-K	0.50	38	44.5	165	370	709	1179	-	7.0	4.8

\*Amount of admixture solution expressed as a percentage by weight of cement

에서 25%의 압축강도 증가현상을 나타내었으며, 이는 고유동화제 사용에 따른 물·시멘트비의 감소에 기인된 것으로 판단된다.

Table 5. Test results of compressive strength (kg/cm<sup>2</sup>)

Sample No.	Type of Concrete	Admixtue dosage (c×%)	7일		28일		91일	180일	365일
			AC	MR	AC	MR	MR	MR	MR
S-1	control	-	157	148	196	216	234	240	251
S-2	NP-20	0.75	178	182	256	266	283	298	302
S-3	NP-20	1.50	192	190	300	290	299	321	324
S-4	Sanflo FB	0.75	165	158	201	226	228	269	297
S-5	Sanflo FB	1.50	148	133	178	244	261	297	306
S-6	NP-10	0.75	189	152	193	211	214	276	305
S-7	NP-10	1.50	228	199	292	261	288	307	322
S-8	Sanflo FBF	0.75	162	173	210	237	242	285	299
S-9	Sanflo FBF	1.50	166	189	190	255	284	298	301
S-10	Sanflo K	0.50	186	168	283	219	233	247	269

\*AC : Air condition cured  
MR : Moisture condition cured

또한 양생조건에 있어서 기건양생은 재령7일의 초기재령에서는 습윤양생조건보다 압축강도가 평균 약3%높게 발현되고 있으나, 28일에서는 습윤양생조건보다 압축강도가 평균5% 저하되는 경향을 나타내었다.

한편, 일반 감수제인 Sanflo-K를 사용한 경우의 압축강도는 보통콘크리트에 비하여 습윤양생 시 재령7일의 경우 13%, 28일에서 약1%의 강도 증진현상을 나타내어 유동화 콘크리트에 비하여 저조한 강도발현현상을 나타내었다.

4.2. 건조수축

유동화 콘크리트의 건조수축 시험결과는 Table6, Fig.3및 4와 같고, 이를 고찰하면, 고유동화제의 첨가량증대에 따라 건조수축이 감소되어 기건양생조건에서 재령1년의 경우 고유동화제를 시멘트의 1.5%첨가시 보통콘크리트에 비해 약15% 건조수축이 감소하는 경향을 보였는데, 이는 Tokuda<sup>20)</sup>의 연구결과중 건조수축이 약12% 감소되는 결과와 유사한 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 단위수량감소로 인한 콘크리트내부에 존재하는 모세관장력이 적게되어 건조수축이 감소된 것으

로 판단된다.

한편, 습윤양생조건인 경우 건조수축이 거의

Table 6. Test results of drying shrinkage at each condition

(Unit : × 10<sup>-4</sup>)

Sample No.	Ages (days) condition Type															
		1	2	3	4	5	6	7	14	28	91	180	365			
S-1	Control	AC*	15	28	55	82	93	104	131	208	278	482	641	710		
		MR*	-5	6	10	9	9	13	-15	25	20	16	21	31		
S-2	NP-20	AC	13	25	52	69	83	94	118	173	230	441	563	620		
		MR	2	4	2	6	10	8	6	0	-2	4	15	24		
S-3	NP-20	AC	12	24	49	65	84	92	101	160	212	434	531	578		
		MR	0	-2	6	1	-3	1	0	-8	-3	9	9	14		
S-4	SanfloF	AC	12	24	45	67	82	93	105	163	212	475	558	613		
		MR	0	0	4	4	8	8	4	14	17	6	8	15		
S-5	SanfloF	AC	10	25	45	65	83	90	96	128	207	429	526	572		
		MR	2	0	2	8	0	2	0	-2	0	4	4	10		
S-6	NP-10	AC	13	24	46	63	81	94	109	125	212	452	552	606		
		MR	-2	0	4	2	4	4	6	0	0	13	2	18		
S-7	NP-10	AC	12	24	47	62	79	85	90	121	205	430	521	562		
		MR	0	2	4	2	0	-2	2	10	10	4	4	12		
S-8	SanfloF	AC	12	25	43	62	75	88	105	120	208	470	549	604		
		MR	2	4	4	-2	6	8	6	4	8	25	21	23		
S-9	SanfloF	AC	10	23	46	65	72	79	85	116	197	425	519	561		
		MR	0	2	6	12	10	6	12	13	15	11	14	14		
S-10	Sanflo K	AC	10	24	45	76	85	93	121	189	222	422	593	642		
		MR	0	2	6	10	10	10	8	14	10	6	-13	12		

\*AC : Air condition cured  
MR : Moisture condition cured

Table 7. Test results of shrinkage at each condition

Item Sample No.	Shrinkage × 10 <sup>4</sup> (365days)	Water content (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength(kg/cm <sup>2</sup> ) (365days)	Cement paste content (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
S-1	710	180	251	0.297
S-2	620	162	302	0.279
S-3	578	158	324	0.275
S-4	613	162	297	0.279
S-5	572	140	306	0.257
S-6	606	162	305	0.279
S-7	562	146	322	0.263
S-8	604	162	299	0.279
S-9	561	133	301	0.250
S-10	642	165	269	0.282

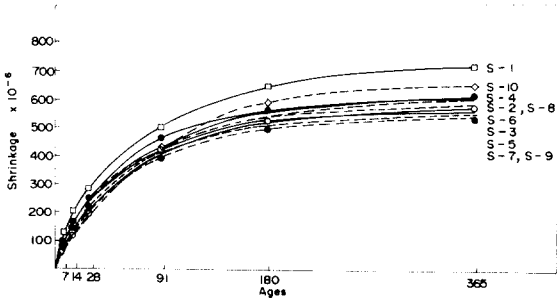


Fig. 3. Relationship between shrinkage and ages at air condition cured.

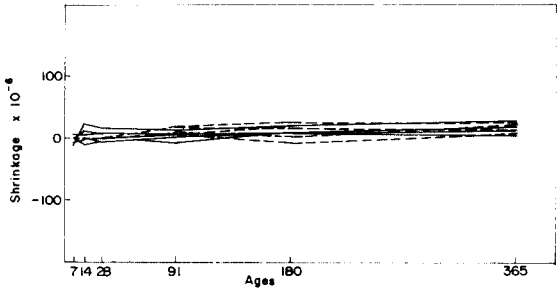


Fig. 4. Relationship between shrinkage and ages at moisture condition cured.

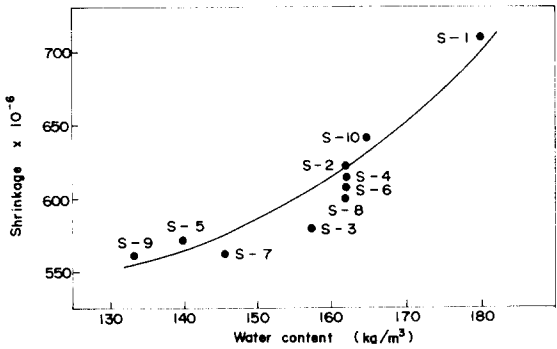


Fig. 5. Relationship between water content and shrinkage at 365 days.

변화가 없는데 이는 시멘트수화시 시멘트 젤수 및 모세관수의 수분이동이 있기때문인 것으로 판단된다.

또한 건조수축은 Fig.5에서 나타내는 바와 같이 단위수량이 증가함에 따라 건조수축도 크게 증가하는 경향을 나타내었고, 이는 山田<sup>21</sup>가 제안한 건조수축과 단위수량 및 단위시멘트량의 관계식에서 건조수축은 단위수량에 크게 영향받는 결과와도 잘 일치됨을 알 수 있다. 한편, 건조수축과 압축강도 및 단위시멘트 페이스트량과의 관계는 Table 7, Fig.6 및 7에 나타난 바와 같이 건조수축은 유동화 콘크리트의 압축강도가 증가함

에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

또한 건조수축은 주로 시멘트페이스트 부분에서 발생하고 골재부분은 수축을 구속하므로, 단위시멘트 페이스트량이 많을수록 건조수축이 크다고 알려져 있다.<sup>22)</sup>

본 실험결과에서도 단위시멘트 페이스트량이 증가함에 따라 건조수축도 증가하는 동일한 경향을 나타내어 長瀧<sup>22)</sup>의 보고와 유사한 결과를 보였으며, 건조수축을 감소시키기 위해서는 단위시멘트 페이스트량의 감소 및 단위수량감소를 위하여 유동화 콘크리트의 사용이 바람직한 것으로 판단된다.

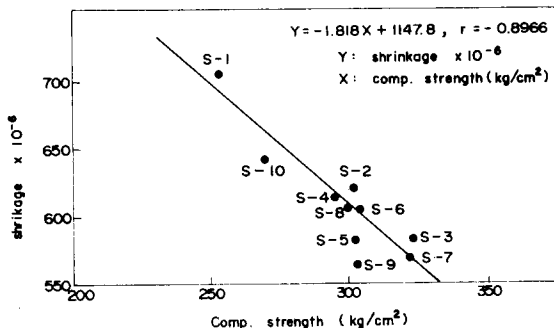


Fig. 6. Relationship between shrinkage and comp. strength at 365days.

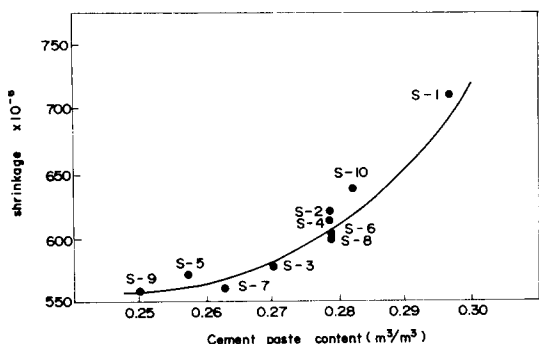


Fig. 7. Relationship between shirnkage and cement paste content ( $m^3/m^3$ )

그외에 시멘트페이스트의 점성유동, 미세공극의 폐쇄, 결정의 이동과 미세균열발생등이 추가되어서 일어나는 것으로 알려져 있다.<sup>16</sup> 또한 크리프에 영향을 미치는 요인은 시멘트의 성질, 골재의 광물적 성질 및 압도, 배합중에서 물·시멘트비와 골재량, 재하시 재령, 재하기간중의 온도와 습도, 재하응력의 크기 및 하중의 종류와 공시체 크기<sup>14</sup> 등으로 유동화제를 '첨가한 유동화 콘크리트의 크리프변형에는 연구자들 사이에 상반된 보고들이 많다.

Dhir와 Yap<sup>23</sup>에 의하면 고유동화제의 첨가는 콘크리트의 크리프변형을 감소시키는 것으로, Brooks와 J. Wainwright<sup>24</sup>는 오히려 약간 증가시키는 것으로 보고하고 있다.

본 연구에서 두종류의 고유동화제를 유동화 콘크리트의 시험결과는 Table 8, Fig. 8에 나타난 바와 같다.

시험결과를 고찰하여 보면, 유동화 콘크리트의 크리프변형은 보통콘크리트에 비하여 재하하중 15%의 경우 재령28일 기건상태에서 평균10%, 재령1년에서 9%정도 감소하였고, 재하하중 30%의 경우 재령28일 기건상태에서 평균17%, 재령1년에서 14%정도의 감소경향을 나타내어 Dhir와 Yap<sup>23</sup>의 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

또한 Table 9, Fig. 9와 같이 총크리프변형(Total specific creep)은 단위시멘트 페이스트량이 증가함에 따라 증가하는 현상을 보였고, 재하하중 30%에 비하여 15%의 경우 평균 약50%의 높은 값을 나타내어 단위시멘트 페이스트량과 재하하중에 의한 영향이 크다고 발표한 長瀧<sup>22</sup>의 보고와

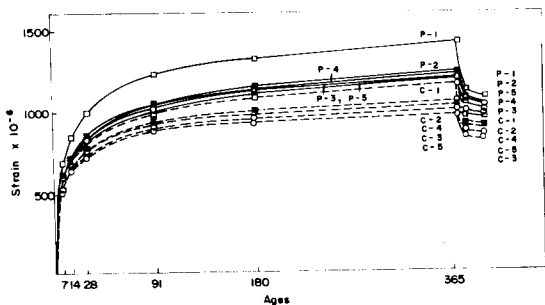


Fig. 8. Relationship between total creep strains and ages at each load(15%, 30%)

### 4.3. 크리프 변형

콘크리트의 크리프 발생기구는 시멘트페이스트의 점탄성적 시멘트페이스트와 골재사이의 소성적 성질의 복합작용에 기인하여 연속재하에 의한 겔수의 압출이 주요인으로 알려져 있고<sup>14</sup>,



Table 8. Test results of total creep strain and creep recovery at each ages.

( $\times 10^{-4}$ )

Appl-ies load	Sym-bol No.	Ages Type	1	2	3	4	5	6	7	14	28	90	180	365	Creep recovery							
															1	2	3	4	5	6	7	28
15%	C - 1	Control	52	104	142	171	285	403	441	571	661	900	1105	1183	123	164	205	224	237	241	246	265
	C - 2	NP-20 cx 0.75%	46	90	132	164	237	403	406	512	596	847	977	1035	92	125	162	171	176	180	185	204
	C - 3	NP-20 cx 1.5%	43	86	132	164	247	301	373	492	587	831	932	985	93	124	160	170	174	179	185	203
	C - 4	Sanflo-FB cx 0.75%	45	87	127	156	232	346	399	528	607	883	974	1031	83	116	151	158	160	162	166	185
	C - 5	Sanflo-FB cx 1.5%	44	86	124	151	182	297	374	485	585	828	928	982	55	78	97	102	104	106	110	129
30%	P - 1	Control	109	124	152	203	330	550	564	782	898	1132	1293	1371	154	208	263	285	291	297	309	341
	P - 2	NP-20 cx 0.75%	90	108	142	181	315	512	563	635	761	1012	1140	1203	96	127	159	173	176	179	185	214
	P - 3	NP-20 cx 1.5%	88	104	135	176	312	502	524	617	731	993	1095	1152	104	142	177	197	200	203	209	235
	P - 4	Sanflo-FB cx 0.75%	90	107	137	180	312	503	524	632	749	1030	1131	1195	908	139	171	190	192	194	198	225
	P - 5	Sanflo-FB cx 1.5%	94	105	130	180	305	485	498	564	725	972	1091	1149	74	103	131	139	141	143	148	168

Table 9. Test results of shrinkage and creep at 1 Year.

Stress/strength ratio	Symbol No.	Type of concrete	Total strain $\times 10^{-4}$	Drying shrinkage $\times 10^{-4}$	Creep strain $\times 10^{-4}$	Total specific creep $\times 10^{-4}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Cement paste content (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
15%	C - 1	Control	1183	710	473	12.8	0.297
	C - 2	NP-20 cx 0.75%	1035	620	415	11.2	0.279
	C - 3	NP-20 cx 1.5%	985	578	497	13.5	0.275
	C - 4	Sanflo-FB cx 0.75%	1031	613	418	11.3	0.279
	C - 5	Sanflo-FB cx 1.5%	982	572	410	11.1	0.257
30%	P - 1	Control	1371	710	661	9.0	0.297
	P - 2	NP-20 cx 0.75%	1203	620	583	7.9	0.279
	P - 3	NP-20 cx 1.5%	1152	578	574	7.8	0.275
	P - 4	Sanflo-FB cx 0.75%	1195	613	582	7.9	0.279
	P - 5	Sanflo-FB cx 1.5%	1149	572	577	7.8	0.257

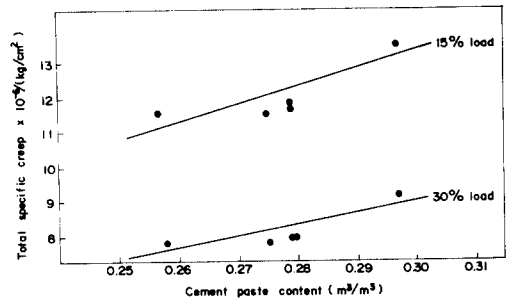


Fig. 9. Relationship between total specific creep and cement paste content at each load condition (15%, 30% of control concrete)

유사한 결과를 나타내었다.

한편, Table10, Fig.10에서 보는 바와 같이 총 크리프변형(Total creep strain)은 stress / strength 비가 증가할 수록 증가하는 경향을 보였으며, 여기서 재하하중 15% 및 30%일때의 총크리프변형과 stress / strength비와의 사이에는 다음과 같은 관계식(4)을 얻을 수 있었다.

$$Y=1560.0X+833.91, r=0.8845 \quad (4)$$

Table 10. Relationship between stress/strength and creep strain at 365days

	Symbol No.	Comp. Strength at 365days (kg/cm <sup>2</sup> )	Stress/Strength ratio	Total creep strain (×10 <sup>-6</sup> )	Stress (kg/cm <sup>2</sup> )
15%	C-1	251	0.147	1183	37.0
	C-2	302	0.123	1035	
	C-3	324	0.114	985	
	C-4	297	0.125	1031	
	C-5	306	0.121	982	
30%	P-1	251	0.295	1371	74.0
	P-2	302	0.245	1203	
	P-3	324	0.228	1152	
	P-4	297	0.249	1195	
	P-5	306	0.242	1149	

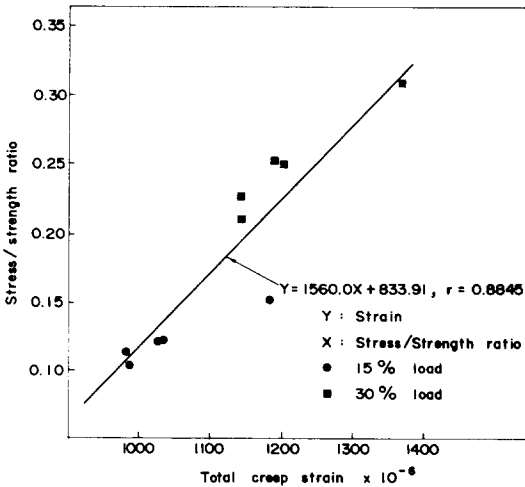


Fig. 10. Relationship between stress/strength ratio and total creep strain at 365days.

여기서, Y: Total creep strain (×10<sup>-6</sup>)  
X: stress / strength비

4.4. 크리프 회복

유동화 콘크리트를 기건양생조건에서 1년간 크리프 재하시험후 28일간 크리프회복을 측정 한 결과는 Table11, Fig.8에 나타난 바와 같다. 이들 결과를 고찰하여 보면, 유동화 콘크리트의 크리프회복은 보통콘크리트의 크리프회복에 비해 약간 작은 경향을 보이고 있어, Dhir와 Yap<sup>23</sup>이 주장하는 고유동화제가 크리프회복에 큰 영향을

Table 11. Test results of creep recovery

Stress/strength ratio	Symbol No.	Type of concrete	Strains on loadings ×10 <sup>-4</sup>	Maximum strain ×10 <sup>-4</sup>	Instantaneous strain recovery ×10 <sup>-4</sup>	Creep recovery ×10 <sup>-4</sup>	Permanent strain ×10 <sup>-4</sup>
	C-1	Control	135	1183	123	265	795
15%	C-2	NP-20 cx 0.75%	106	1035	111	204	720
	C-3	NP-20 cx 1.5%	82	985	123	203	559
	C-4	Sanflo FB cx 0.75%	31	1031	74	185	772
	C-5	Sanflo FB cx 1.5%	82	982	99	129	754
30%	P-1	Control	292	1371	197	341	833
	P-2	NP-20 cx 0.75%	251	1203	160	214	829
	P-3	NP-20 cx 0.75%	237	1152	147	235	770
	P-5	Sanflo FB cx 1.5%	218	1149	111	168	870

주지 않는다는 결과와는 다소 다른 결과를 나타 내었다.

한편, 재하하중 30%일 경우 재하하중 15%에 비하여 크리프회복은 평균 약16%크게 나타나 재하하중이 클수록 크리프회복량도 점차 증가하는 경향을 나타내었다.

4.5. 크리프실측값과 예측값과의 비교

예측모델인 ACI모델, CEB-FIP모델, BP모델에서 고려되는 인자들을 대입하여 해당 재령에서 구한 예측값을 재하하중 15%와 30%의 기건 상태하에서의 유동화 콘크리트 크리프의 실측값과 비교한 결과는 Table12및 Fig.11, 12와 같다. 이들 결과를 고찰하여 보면, 각 예측모델에서 고려되는 인자가 다르므로 동일한 공시체에서도 다소 차이를 보이고 있으며, 15%재하시 크리프의 실측값은 재령 7, 14, 28일에서 ACI모델, CEB-FIP모델, BP모델 3종류의 예측값보다 각각 40%, 61%, 55%로 크게 나타났고, 장기간 재하하중을 받을수록 점차 예측값이 실측값에 접근되는 경향을 나타내었다. 특히 365일 재령에서의 실측값은 CEB-FIP예측모델값과, BP및 ACI예측모델값의 중간값을 나타내었다.

Table 12. Comparing test data with prediction model at each load condition

load condition	Mix No.	Items	Ages (days)										
			1	3	5	7	14	28	90	180	395		
15 %	Predict value	ACI model	163	180	192	200	221	244	286	310	330		
		CEB model	170	175	181	186	203	232	317	387	461		
		BP model	167	182	199	214	223	248	292	326	342		
	Test value	C-1	NP-20 cx 0.75%	143	163	184	288	339	366	406	414	415	
		C-2	NP-20 cx 1.5%	141	150	173	272	332	375	397	401	407	
		C-3	Sanflo-FB cx 0.75%	145	162	192	294	365	395	408	416	418	
		C-4	Sanflo-FB cx 1.5%	134	159	179	278	357	378	399	402	410	
	30 %	Predict value	ACI model	325	359	381	398	438	485	567	612	652	
			CEB model	315	326	337	347	378	432	590	719	856	
			BP model	326	363	398	405	452	493	571	628	676	
		Test value	P-1	NP-20 cx 0.75%	307	314	322	445	462	531	572	577	583
			P-2	NP-20 cx 1.5%	296	306	318	423	457	519	559	564	574
P-3			Sanflo-FB cx 0.75%	308	312	330	419	469	537	555	573	582	
P-4			Sanflo-FB cx 1.5%	291	295	312	402	436	518	543	565	577	

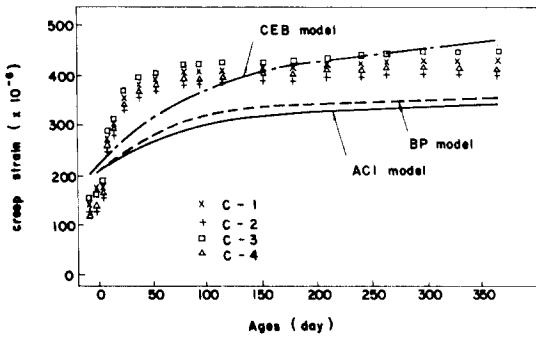


Fig. 11. Comparing superplasticized concrete creep with prediction mode at 15% load

또한 28일 압축강도의 재하하중을 30%로 재하한 유동화 콘크리트의 크리프변형은 15%재하시보다 하중에 따른 크리프변형이 비례적으로 증가되었으며, 재령 7, 14, 28일의 각 예측값은 실측값과 거의 일치되는 현상을 보였고, 365일

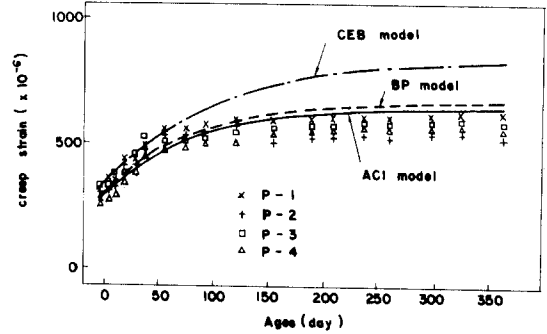


Fig. 12. Comparing superplasticized concrete creep with prediction model at 30% load

재령의 경우 실측값이 ACI예측값과 약12% 적은 값을 나타내었다.

### 5. 결 론

본 연구는 유동화 콘크리트의 장기변형특성을 파악하기 위하여 압축강도, 건조수축, 크리프및 크리프회복 특성을 구명하기 위한 것으로 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1)유동화 콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 고유동화제 첨가량증대에 따라 압축강도도 증가하는 경향을 보였고, 고유동화제를 시멘트의 1.5%첨가시 재령28일에서 기건양생은 평균21%, 습윤양생에서는 22%정도 증가하는 경향을 나타내었으며, 고유동화제종류에 따라 강도발현능의 차이가 인정되므로 적절한 성능시험후 선택사용이 요망된다.

(2)유동화 콘크리트의 건조수축은 기건양생조건하에서 고유동화제를 시멘트의 1.5%첨가시 재령1년의 경우 건조수축이 약15%감소되는 양호한 결과를 나타내었고, 유동화제사용에 따른 콘크리트의 단위수량과 단위시멘트 페이스트량이 작을수록 감소하는 경향을 나타내어 고유동화제사용은 건조수축감소에도 효과적인 것으로 판단된다.

(3)유동화 콘크리트의 크리프변형은 보통콘크리트에 비하여 기건양생의 조건에서 재하하중15%, 재령28일의 경우 평균10%, 재령1년에서 평균9%감소하였고, 재하하중30%의 경우는 재령28

일에서 평균 17%, 재령 1년에서 14% 감소하는 경향을 나타내어 재하하중에 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 따라서 적당한 고유동화제의 선택과 적정량의 고유동화제사용은 크리프변형 감소에 효과적인 것으로 판단된다.

(4) 유동화 콘크리트를 1년간 재하시험 후 28일간의 크리프회복은 보통 콘크리트에 비해 작은 경향을 보이고 있고, 재하하중이 클수록 크리프회복량은 점차 증가하는 경향을 보이고 있다.

(5) ACI 모델, CEB-FIP 모델, BP 모델을 이용한 예측값과 유동화 콘크리트의 크리프실측값을 비교한 결과, 장기간 재하하중을 받을수록 점차 예측값에 접근되는 경향을 보였으며, 재하하중 30%로 재하할 경우 15% 재하시보다 하중에 따른 크리프변형이 증가되는 경향을 나타내어 재하하중 30%의 경우, 재령 365일에서 실측값이 ACI 예측값보다 약 12% 작은 양상을 보였다.

### References

1. I.H. Woolson, "Some remarkable tests indicating flow of concrete under pressure", Engineering news, 54, No.18, 1905
2. W.H. Glanville, "Further investigations on the creep or flow of concrete under load", Building Research Technical paper, 21, London, 1939
3. T.C. Powers, "Mechanism of shrinkage and Reversible creep of hardened cement paste", proc. international conf. on the structure of concrete, London, 1965.
4. 岩崎訓明, 콘크리트의 특성, 共立出版, 昭50, pp.126~128.
5. A.M. Neville, "Creep of concrete: plain, Reinforced and prestressed", North-Holland Publishing company, Amsterdam, 1970.
6. Iqbal Ali and Clyde E Kesler, "Mechanisms of creep in concrete", Symposium on creep of concrete, ACI pub. SD-9, 1964. pp.35~63.
7. C.F. Ferraris and F.H. Wittmann, "Shrinkage Mechanism of hardened cement paste", Cement and concrete Research, Vol.17, 1987, pp.453~464.
8. G. Pickett, "Effect of Aggregate on shrinkage of concrete and Hypothesis concerning shrinkage", J. of ACI, Vol.52, 1956, pp.581~590.
9. D.W. Hobbs, "Influence of Aggregate Resistant on the Shrinkage of Concrete", J. of ACI, Sept. 1974.
10. Inge Lyse, "Shrinkage and creep of concrete", J. of ACI, Feb. 1960, pp.775~782.
11. D.W. Hobbs, "Influence of Specimen geometry upon Weight change and Shrinkage of air-dried concrete specimens", Magazine of concrete research, Vol.29, No.99, June, 1977.
12. 岩谷考一·馬場明生, "建築材料の 乾燥收縮 機構" セメント・コンクリート, No.346, Dec.1975.
13. 近藤連一, "乾燥收縮と その 機構", 多孔材料, 日本 技報堂, 1973, pp.314~315.
14. A.M. Neville, "Properties of concrete", Pitman press, 3rd edition, London, 1981, pp.296~311.
15. F.G. Thomas "Conception of creep of unreinforced concrete and an estimation of the limiting values", Structural engineer(London), Vol.11, 1933, p.69.
16. M. Reiner, "Deformation, Strain and Flow", H. K. Lewis and Co. Ltd. London, 1960, pp.347.
17. A.M. Freudenthal, "The John inelastic behavior of engineering materials and structure", York, 1950, pp.587.
18. E. Freyssinet, "The deformation of concrete", Magazine of concrete research(London), Vol.3, No.8, Dec. 1951, pp.49~56.
19. ACI Committee 209, "Prediction of creep, Shrinkage and Temperature effects in concrete structure, ACI, Detroit, Oct. 1978.
20. Tokuda and Shoya, "Application of Superplasticizer of concrete", ACI pub. sp-68, ACI, 1981.
21. 山田順治, 有泉昌, "わかりやすい セメントと コンクリート 知識", 鹿島出版, 昭51, pp.154.
22. 長滝重義, "高強度コンクリートの 乾燥收縮 及び クリープの 特性", 콘크리트 工學, Vol. 20, No.4, 1982, pp.75~87.
23. R.K. Dhir and A.W.F. Yap, "Superplasticized flowing concrete: strength and deformation properties", Magazine of Concrete Research, Vol. 36, No.129, 1984.
24. J.J. Brooks and P.J. Wainwright, "Properties of Ultra high-strength concrete containing a superplasticizers", Magazine of concrete Research, Vol.35, No.125, Dec.1983, pp.205~214.

(접수일자 1988. 5. 31)