

# 초유동 콘크리트의 재료특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Research on the Material Properties of Super Flowing Concrete

김진근\*

한상훈\*\*

박연동\*\*\*

노재호\*\*\*

Kim, Jin Keun Han, Sang Hun Park, Yon Dong Noh, Jae Ho

### 요 약

본 연구에서는 5종류의 플라이애쉬를 포함한 초유동 콘크리트와 3종류의 일반 콘크리트에 대한 재료 물성을 측정하여 서로 비교·분석하였다. 경화 전의 물성측정을 위해서 슬럼프 실험, 슬럼프 플로우 실험, O형 깔대기 실험, 박스 충전성 실험, L형 충전성 실험을 수행하였고 경화 후의 물성측정을 위해 압축강도 실험, 할렬인장강도 실험, 탄성계수 실험, 크리프 실험, 건조수축 실험 등을 수행하였다. 경화 전의 물성측정 실험결과들을 바탕으로 초유동 콘크리트와 일반 콘크리트의 유동성과 충전성을 평가하였고 두 결과를 비교·분석하였다. 또한 경화 후의 물성측정 실험결과를 통하여 초유동 콘크리트의 재료역학적인 특성을 파악하였다.

자기충전성을 만족시킬만한 유동성과 작업성을 가지면서 40MPa이상의 28일 압축강도를 갖는 양호한 재료역학적인 특성을 나타내는 초유동 콘크리트의 개발 가능성을 보였다. 일반적으로 초유동 콘크리트의 크리프 변형량은 일반 콘크리트보다 상대적으로 작았지만 건조수축은 일반 콘크리트보다 30% 이상 컸다.

### Abstract

In this study, the properties of super flowing concrete containing fly ash were experimentally investigated and compared with those of ordinary concrete. Tests were carried out on five types of super flowing concrete mixes containing fly ash and three types of ordinary concrete mixes without fly ash. Flow test, O-funnel test, box test, L type test and slump test were carried out to obtain the properties for flowability and workability of fresh concrete. The mechanical properties of hardened concrete were also investigated in terms of compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity, creep and drying shrinkage.

In fresh concrete, it was found that super flowing concrete had excellent workability and flowability compared with ordinary concrete, and had self-compactable performance. Super flowing concrete also had good mechanical properties at both early and late ages with compressive stren-

\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수  
\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 동양중양연구소 선임연구원

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

gth reaching as high as 40 MPa at 28 days. The creep deformation of super flowing concrete investigated was relatively lower than that of ordinary concrete, but drying shrinkage was much higher.

**Keywords :** fresh concrete, flowability, fly ash, self-compactable performance, mechanical property, super flowing concrete, workability

## 1. 서 론

최근 새로운 혼화재와 결합재의 출현으로 고강도, 고유동, 고내구성의 성질을 가진 고성능 콘크리트(high performance concrete)의 생산이 가능해졌다. 특히 유동성을 크게 향상시킨 고성능 콘크리트인 초유동 콘크리트는 1980년대 후반 일본에서 개발된 이래 콘크리트에 대한 기존의 고정관념을 뛰어넘는 혁신적인 재료로 평가받고 있다. (1)

콘크리트 구조물의 품질과 장기적인 내구성은 다짐작업에 크게 영향을 받는다. 그러나 숙련된 노동력의 부족과 여러 사회적인 제약조건으로 인하여 이러한 성질을 향상시키는 데에는 여러 어려움이 따르며 이러한 어려움을 해결할 수 있는 한 방법이 다짐작업이 필요없는 콘크리트 즉, 초유동 콘크리트를 개발하는 것이다. 초유동 콘크리트는 시공불량에 의한 구조물의 결합발생을 억제시켜 장기적인 내구성을 향상시킨다. 또한 초유동 콘크리트의 혼화재로 플라이애쉬, 슬래그, 실리카 흙 등의 산업부산물을 재사용함으로써 이의 처리에 소요되는 경비절감은 물론 환경보존에도 기여할 수 있다.

초유동 콘크리트의 개념과 중요성은 1986년에 일본의 오카무라 교수에 의해 처음 제기되었다. 1988년에 첫 시험 타설에 성공한 이후 일본 건설회사 및 대학연구소에서 실용화를 위한 많은 연구들이 행해져 오고 있으며 몇 번의 현장시공도 이루어졌다. 그러나 좀 더 신뢰성을 가진 초유동 콘크리트의 사용을 위해서는 유동성과 작업성에 대한 측정방법의 개선, 초유동 콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 연구, 타설과 펌프압송 등에 대한 현장 시방의 마련 등이 필요한 실정이다. (2)~(3) 따라서 본 연구에서는 초유동 콘크리트의 경화 전

의 물성과 경화 후의 물성을 측정하고 이를 일반 콘크리트의 재료 물성과 비교·검토하여 초유동 콘크리트의 재료특성에 대한 좀 더 심도있는 연구를 수행하고자 하였다.

## 2. 실험개요와 방법

### 2.1 사용재료

재료의 성질은 Table 1에, 고성능 감수제의 성질은 Table 2에 제시되어 있다.

Table 1 Material properties

Properties	Cement	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate
Type	Type I portland cement	By-product of power plant	Sea sand	Crushed stone Max. size 19 mm
Specific gravity	3.15	2.21	2.58	2.61
Specific surface	3315 cm <sup>2</sup> /g	4201 cm <sup>2</sup> /g	-	-
Fineness modulus	-	-	2.73	6.82

Table 2 Superplasticizer

Specific gravity	pH	Solid content (%)	Quantity (Cement weight %)	Main component
1.18	7~9.5	41	0.8~2.0	Sulfonate naphthalene formaldehyde condensate

### 2.2 배합설계

Table 3에 나타나 바와 같이 SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4는 결합재 중량의 30%가 플라이애쉬이고 SF 2는 결합재 중량의 40%가 플라이애쉬이다. SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4의 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비는 각각 0.27, 0.31,

Table 3 Basic mix proportions

Specific number	Classification	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Binder (kg/m <sup>3</sup> )		Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )		Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Water - Binder ratio (%)	Volume ratio of coarse aggregate to concrete
			Cement	Fly ash	Fine	Coarse			
SF 1-1	Super flowing concrete mixes	195	390	167	814	733	10.0	35	0.27
SF 1-2		185	370	159	782	820	10.0	35	0.31
SF 1-3		175	350	150	739	917	10.0	35	0.35
SF 1-4		165	330	141	678	1032	9.9	35	0.39
SF 2		190	300	200	778	819	8.5	38	0.31
NC 1	Ordinary concrete mixes	185	350	0	775	1035	0.0	53	0.39
NC 2		175	400	0	760	1035	4.0	44	0.39
NC 3		175	500	0	677	1032	7.5	35	0.39

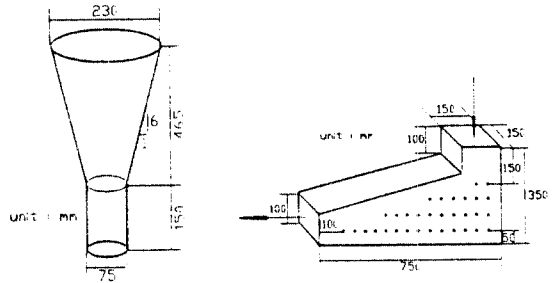
0.35, 0.39이고 물-결합재 비는 모두 35%이다. 또한 초유동 콘크리트는 모두 60cm이상의 슬럼프 플로 우치를 가지도록 배합설계하였다. NC 1, NC 2, NC 3은 각각 20MPa, 40MPa, 60MPa의 배합강 도를 가지고 있다.

스에서 오른쪽 박스로 이동하기 위해서는 D13의 철근들이 배근되어 있는 부분을 통과해야 한다. 유동성과 충전성은 왼쪽 박스와 오른쪽 박스의 높 이차를 측정함으로써 평가한다. (4)~(6)

### 2.3 실험방법

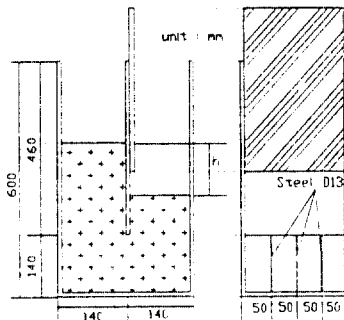
#### 2.3.1 굳지않은 콘크리트에 대한 실험방법

굳지않은 콘크리트의 유동성과 충전성을 평가 하기 위하여 슬럼프 실험, 슬럼프 플로우 실험, O 형 깔대기 실험, 박스 충전성 실험, L형 충전성 실험 등을 실시하였다. 슬럼프 실험과 슬럼프 플로우 실험은 거의 같은 실험순서를 가지고 있다. 그러나 슬럼프 실험은 시료가 변형이 완전히 일어난 후의 높이를 측정하는 방법이고 슬럼프 플로우 실험은 변형 후 밑면의 지름을 측정하는 방법이다. O형 깔대기 실험은 시료가 깔대기에서 빠져나가는 데 걸리는 시간을 측정함으로써 유동성을 평가 하는 실험방법이다. 유동성이 좋을수록 깔대기에서 빠져나가는 시간이 짧을 것이다. 충전성능의 판단을 위해 L형 충전성 실험을 실시하였다. 시료 투입구에 시료를 넣고 충전속도 및 최종 충전상태 를 기준으로 충전성능을 육안으로 판단하여 우수 (excellent), 양호(good), 보통(plain), 불량(bad)의 4가지 수준으로 구분한다. 박스 충전성 실험은 왼쪽의 박스에 시료를 채우고 왼쪽과 오른쪽 박스 를 연결하는 판을 들어올리면 왼쪽 박스에서 오른 쪽 박스로 시료가 이동할 것이다. 시료가 왼쪽 박



(a) O-funnel test

(b) L type test



(c) Box test

Fig. 1 Tests of fresh concrete

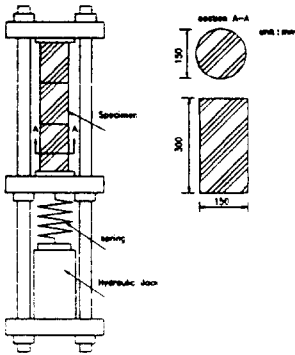


Fig. 2  
Equipment of creep

### 2.3.2 경화 콘크리트에 대한 실험방법

압축강도( $f_c'$ ), 할렬인장강도( $f_t$ ), 탄성계수( $E_c$ ), 크리프, 건조수축 등의 경화 콘크리트에 대한 실험들이 수행되었다. 압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수는  $\phi 100 \times 200$ mm의 실린더를 이용하여 실험을 수행하였고 크리프는  $\phi 150 \times 300$ mm 실린더를, 건조수축은  $100 \times 100 \times 400$ mm의 직육면체 공시체를 이용하여 실험을 수행하였다. 건조수축 실험을 제외한 모든 실험은 적어도 3개의 공시체에 대해 동일한 실험을 수행하여 그 값들의 평균을 취했고 건조수축은 2개의 공시체에 대해서 실험을 수행하여 그 값들을 평균하였다.

압축강도는 KS F 2405에 따라서 실험을 수행하였고 할렬인장강도는 KS F 2423을, 탄성계수는 KS F 2438에 제시된 시험법에 따라서 실험을 수행하였다. 압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수는 Table 3의 전 배합에 대해서 실험을 수행하였으며 압축강도, 할렬인장강도는 재령 3, 7, 28, 90일에 대해서, 탄성계수는 재령 28, 90일에 대해서 실험을 수행하였다. 실험 전에 공시체의 상·하면을 모두 유황으로 캡핑하였다.

크리프는 SF 1-2와 NC 2 배합에 대해서 그림 2의 크리프 시험기를 이용하여 실험을 수행하였다. 크리프 공시체는 타설 후 24시간 안에 탈형하여  $23.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 의 온도에서 28일동안 수증양생하였다. 기본 크리프를 측정하기 위해서 공시체를 플라스틱 필름으로 싸서 외기와의 수분이동을 차단하였으며 실험기간동안  $23.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 의 온도를 유지하였다. 공시체들은 재령 28일에서 압축강도 하

중의 40%를 재하하여 실험을 시작하였다.

건조수축은 Table 3의 NC 1을 제외한 모든 배합들에 대해서 실험을 수행하였다. 건조수축 공시체들은 크리프와 같은 조건으로 7일동안 양생하였다. 양생 후, 공시체는 온도  $20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ , 상대습도  $60 \pm 5\%$ 의 항온항습조에 보관하면서 실험을 수행하였고 건조수축변형량은 comparator를 이용하여 측정하였다.<sup>(7)~(8)</sup>

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 굳지않은 콘크리트의 실험결과 및 분석

실험결과 Table 4에 제시되어 있다. 배합 SF 1-1, SF 1-2와 SF 1-3, SF 1-4는 유동성과 충전성에 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비가 0.35이상인 배합일 때, O형 깔대기 실험, 박스 충전성 실험, L형 충전성 실험들에서 유동성과 충전성이 저하됨을 알 수 있었다. 따라서 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비 0.31(SF 1-2)과 0.35(SF 1-3)사이에 유동성과 충전성에 큰 영향을 미치는 임계의 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비가 존재함을 알 수 있다. Table 4에 제시된 바와 같이 플라이애쉬 대체율이 30%에서 40%로 증가하여도 유동성과 충전성에는 큰 차이가 없다.

일반 콘크리트 배합인 NC 1, NC 2, NC 3과 초유동 콘크리트 배합인 SF 1-1, SF 1-2의 유동성과 충전성의 실험결과는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 슬럼프 플로우 실험에서 일반 콘크리트는 초유동 콘크리트의 슬럼프 플로우치의 50%수준인

Table 4 Experimental data of fresh concrete

Specific number	Flow(cm)	O funnel(sec)	Box(cm)	L type	Slump(cm)
SF 1-1	65	6.9	2.5	excellent	-
SF 1-2	67	7.8	2.0	excellent	-
SF 1-3	65	closed	45.7	poor	-
SF 1-4	60	31.8	48.5	poor	-
SF 2	65	7.6	22.5	excellent	-
NC 1	40	closed	-	-	18.7
NC 2	36	closed	-	-	18.0
NC 3	36	closed	-	-	18.7

을 알 수 있다. 또한 O형 깔대기 실험에서는 일반 콘크리트의 유동성 부족으로 인하여 배출구가 시료에 의해 폐쇄되었다. L형 충전성 실험에서도 초유동 콘크리트 배합인 SF 1-1, SF 1-2만 실험이 가능하고 일반 콘크리트는 시료가 배출구로 빠져 나오지 못하여 유동성과 충전성의 평가가 불가능하였다.

### 3.2 경화 콘크리트의 실험결과 및 분석

#### 3.2.1 압축강도( $f_c$ )

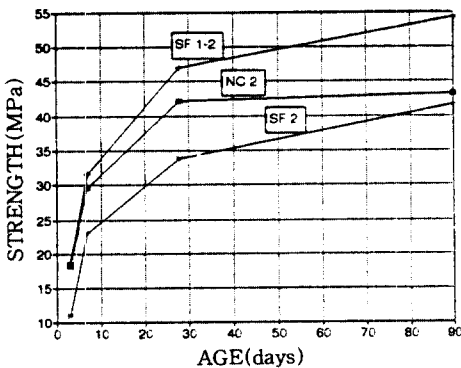
그림 3(a)는 초유동 콘크리트(SF 1-2)와 일반 콘크리트(NC 2)의 재령에 따른 압축강도의 변화 양상을 나타내고 있다. 두 종류의 콘크리트가 거의 비슷한 초기강도를 가지고 있었음에도 시간이 지날수록 초유동 콘크리트가 일반 콘크리트보다 압축강도의 증가속도가 빨라짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 초유동 콘크리트에 포함된 플라이애쉬의 특성이 나타난 것으로 사료된다. 그림 3(b)는 플라이애쉬 대체율이 0%, 30%, 40%인 NC 2, SF 1-2, SF 2 세가지 배합의 재령 28일 압축강도에 대한 각 재령의 강도비를 나타낸 그래프이다. 이 그래프는 플라이애쉬 첨가에 따라 초기재령의 강도증진이 늦어지고 장기재령의 강도증진이 빨라짐을 잘 나타내고 있다. 그림 3(a)에서 나타난 바와 같이 SF 1-2배합의 콘크리트가 SF 2 배합의 콘크리트보다 30~40% 큰 압축강도를 가지고 있

다. 따라서 3%의 물-결합재비의 차이를 감안하더라도 플라이애쉬 대체율이 30%에서 40%로 증가하면 모든 재령에서 압축강도가 20%이상 감소함을 알 수 있다.

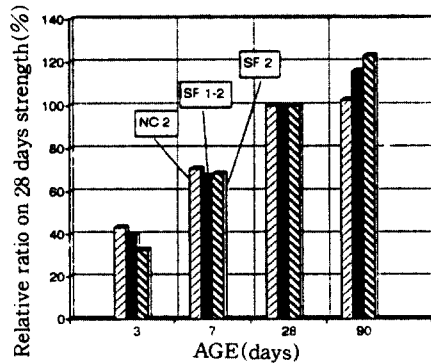
그림 4(a), (b)는 양생조건에 따른 압축강도의 변화를 나타내고 있다. 이 실험에 사용된 콘크리트 배합은 SF 1-2와 NC 3으로 둘 다 동일한 물-결합재비를 가지고 있다. 두 종류의 콘크리트 모두 재령 3일의 압축강도는 기건양생과 수중양생 사이에 차이가 거의 없거나 기건양생이 조금 크다. 그러나 재령이 경과함에 따라 수중양생 콘크리트의 압축강도가 기건양생 콘크리트의 압축강도보다 크다. 재령 28일에서 SF 1-2의 양생조건에 따른 압축강도의 차이는 10% 정도이고 NC 3의 양생조건에 따른 압축강도의 차이는 18% 정도이다. 따라서 초유동 콘크리트가 일반 콘크리트보다 양생 조건의 영향을 작게 받는다고 추정할 수 있다.

#### 3.2.2 할렬인장강도( $f_t$ )

Table 5에 나타난 바와 같이 초유동 콘크리트의 재령 28일에 대한 할렬인장강도는 3.6~4.0 MPa이다. 이 값은 28일 압축강도의 약 8~10%이고 이러한 비율은 같은 압축강도를 가진 일반 콘크리트에서의 비율과 거의 일치한다. 또한 Table 5를 통하여 각 재령에서의 압축강도와 할렬인장강도의 비는 그 재령의 압축강도 크기의 함수이며 재령과의 상관관계는 없음을 알 수 있다.

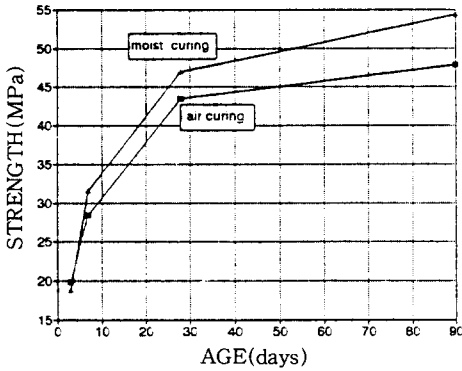


(a) SF 1-2, SF 2 and NC 2

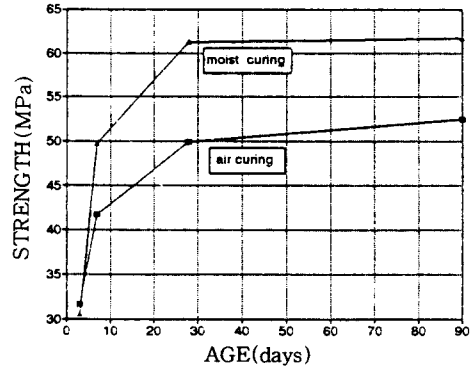


(b) Relative ratio on 28 days compressive strength

Fig. 3 Compressive strength



(a) SF 1-2



(b) NC 3

Fig. 4 Compressive strength with curing condition

압축강도로부터 할렬인장강도를 예측하기 위한 많은 실험식 중 ACI 모델식<sup>(9)</sup>은  $[f_t = 0.556(f_c')^{0.5}]$ , CEB-FIP 모델식<sup>(10)</sup>은  $[f_t = 0.273(f_c')^{0.67}]$ , Oluokun 모델식<sup>(11)</sup>은  $[f_t = 0.295(f_c')^{0.69}]$ 이다. 여기서,  $f_t$ ,  $f_c'$ 는 MPa 단위이다. 아래의 그림 5는 재령 28일에서의 할렬인장강도의 실험치와 모델식들에 의한 값을 서로 비교하고 있다. ACI, CEB-FIP, Oluokun의 모델식과 실험결과를 비교해 보면 CEB-FIP 모델식은 실험결과보다 대부분 낮은 할렬인장강도를 예측함으로써 CEB-FIP 모델식은 할렬인장강도에 대한 하한계 모델식으로 사용할 수 있다. Oluokun이 제안한 식은 실험결과들과 가장 잘 일치하고 그 차이는 대체로 10% 미만이며, ACI 모델식은 저강도에서 실험치보다 큰 값을 주고 고강도에서는 실험치보다 작은 값을 준다.

Table 5와 그림 5를 통하여 일반 콘크리트와 초유동 콘크리트의 할렬인장강도는 두 가지 콘크리트의 종류에 따른 값의 차이가 거의 없음을 알 수가 있다.

### 3.2.3 탄성계수( $E_c$ )

Table 5에 나타난 바와 같이 초유동 콘크리트의 탄성계수는 재령 28일에서 27~28GPa 정도이고 재령 90일에서는 30~33GPa 정도이다. 실험에서 구한 28일 탄성계수와 ACI 규준식에 의한 탄성계수의 값을 비교해 보면 대부분 실험치가 규준식보다 10~20% 정도 작음을 알 수 있다.

그림 6은 재령 28일과 90일에서 압축강도와 탄성계수의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 초유동 콘크리트의 기울기와 일반 콘크리트의 기울기를 비교하면 일반 콘크리트의 기울기가 초유동 콘크

Table 5 Experimental data of splitting tensile strength and elastic modulus

	3 days		7 days		28 days				90 days		
	$f_c'$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$E_c$ by ACI Code	$f_c'$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
SF 1-1	20	2.4	33	3.5	47	4.0	28	32	53	4.7	31
SF 1-2	19	2.3	32	3.4	47	3.7	28	32	54	4.6	33
SF 1-3	16	2.0	31	2.9	46	3.7	28	32	53	4.4	33
SF 1-4	11	1.0	26	2.8	37	3.6	28	29	44	4.0	30
SF 2	11	1.1	23	2.5	34	3.5	25	27	42	4.4	29
NC 1	8	1.4	17	2.3	24	3.1	23	23	27	3.4	24
NC 2	18	2.6	30	3.7	42	4.0	28	31	43	4.2	31
NC 3	31	3.6	50	4.3	61	4.9	32	37	62	5.2	34

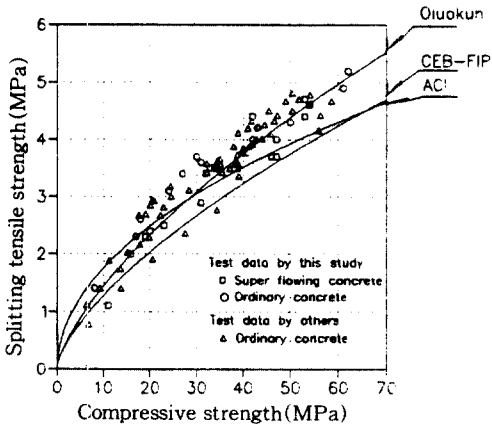


Fig. 5 The relation between splitting tensile strength and compressive strength

리트보다 크다. 이것은 재령이 경과함에 따라 초유동 콘크리트의 탄성계수 증가율이 압축강도의 증가율을 따라가지 못함으로 인하여 나타난 것으로 사료된다. 즉 초유동 콘크리트는 장기재령에서 압축강도의 증가속도는 빠르지만 탄성계수의 증가속도는 압축강도만큼 빠르지 않다.

### 3.2.4 크리프

그림 7은 초유동 콘크리트(SF 1-2)와 일반 콘크리트(NC 2)의 크리프 변형도를 나타내고 있다. 재령 20일까지는 초유동 콘크리트의 크리프 변형도 증가량이 일반 콘크리트보다 매우 크다. 그러나 재령이 경과할수록 그 증가율은 둔화되고 일반 콘크리트와 비슷한 경향을 나타낸다.

그림 8(a), (b)는 초유동 콘크리트와 일반 콘크리트의 크리프 실험결과와 기존의 여러 모델식의 결과들을 비교하고 있다. ACI 모델식에 의한 값이 두 배합의 실험결과에 가장 근접한 경향을 나타내고 있다. BP 모델식은 크리프 변형도를 너무 과대평가하고, BP-KX 모델식과 CEB-FIP(90) 모델식은 너무 과소평가하고 있다. 초유동 콘크리트의 크리프 변형도에 대한 실험결과는 초기재령에서 ACI 모델식보다 조금 크고, 일반 콘크리트인 경우에는 ACI 모델식과 거의 비슷하다. 그러나 재령이 경과할수록 초유동 콘크리트의 크리프 변형도는 ACI 모델식보다 작아지고 그 차이는 점

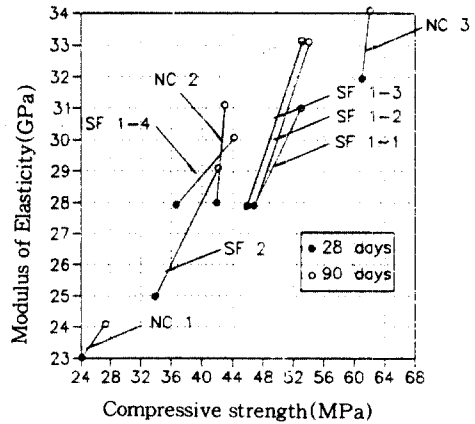


Fig. 6 The relation between modulus of elasticity and compressive strength

점 커진다. 일반 콘크리트 또한 재령이 경과할수록 ACI 모델식과의 차이가 커지지만 그 차이는 초유동 콘크리트보다는 작다. 이것과 앞에서 언급한 내용을 종합해 볼 때, 초기재령에서 초유동 콘크리트의 크리프 변형도의 증가율은 일반 콘크리트보다 크지만 재령이 경과할수록 그 증가율은 둔화된다. (13~(20))

### 3.2.5 건조수축

#### (1) 여러 배합들의 건조수축량 비교

그림 9는 건조수축 실험의 결과들을 나타내고 있다. 배합 SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4는 각각 195, 185, 175, 165의 단위 수량과 0.27, 0.31,

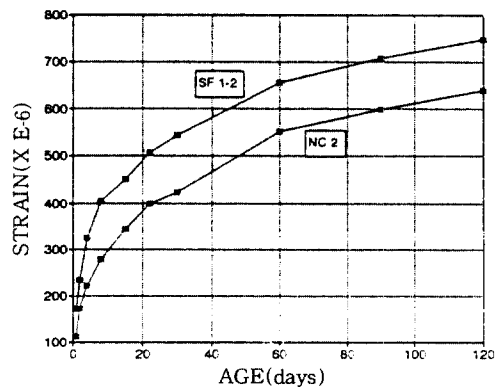
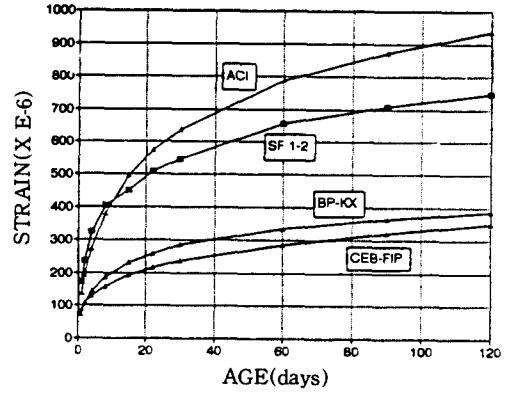
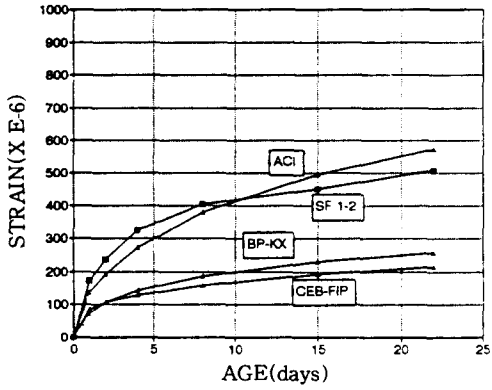
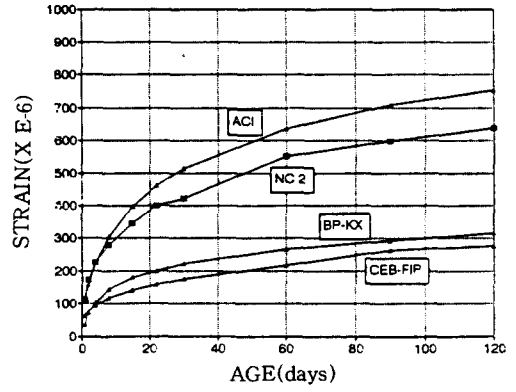
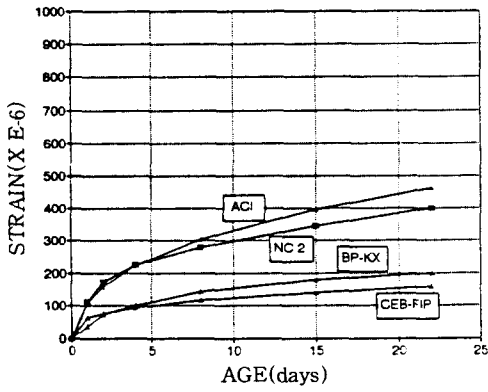


Fig. 7 Creep of SF 1-2 and NC 2

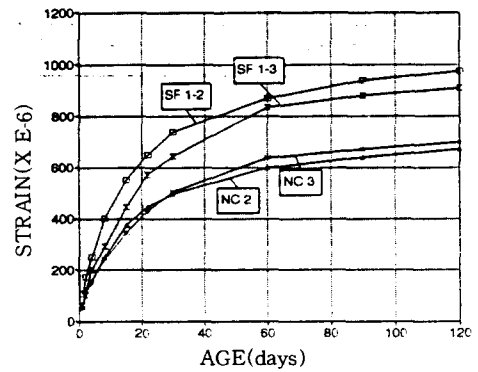
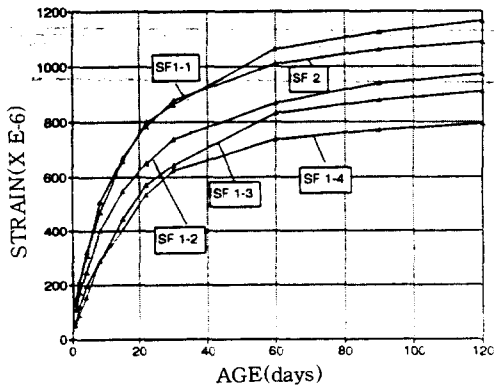


(a) SF 1-2



(b) NC 2

Fig. 8 Comparison of creep by experiments and models

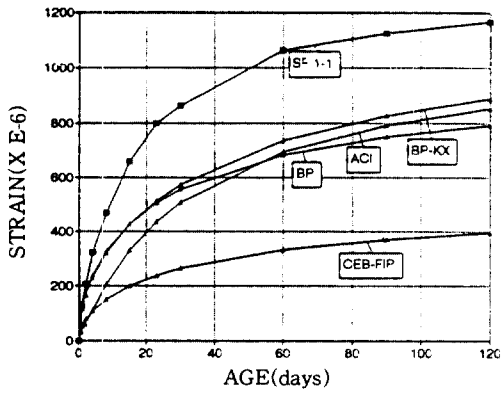


(a) SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4 and SF 2

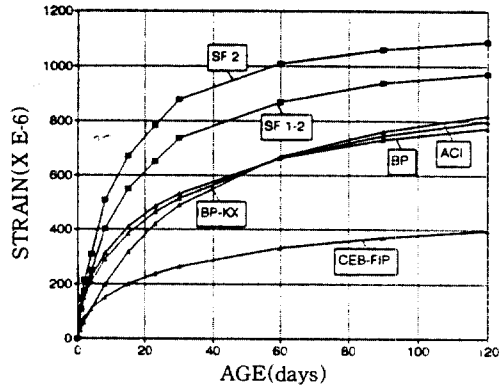
(b) NC 2 and NC 3

Fig. 9 Drying shrinkage

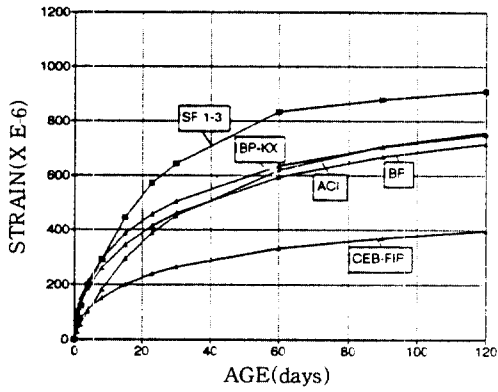




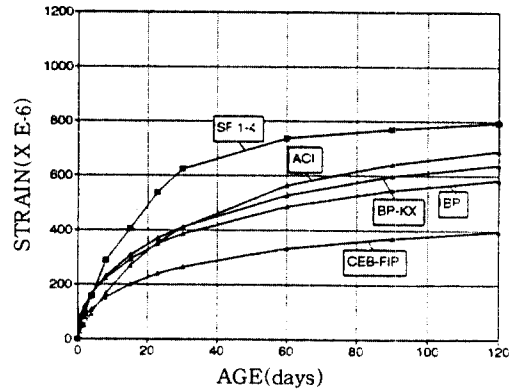
(a) SF 1-1



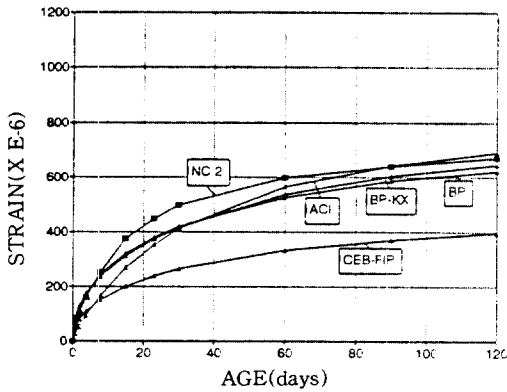
(b) SF 1-2



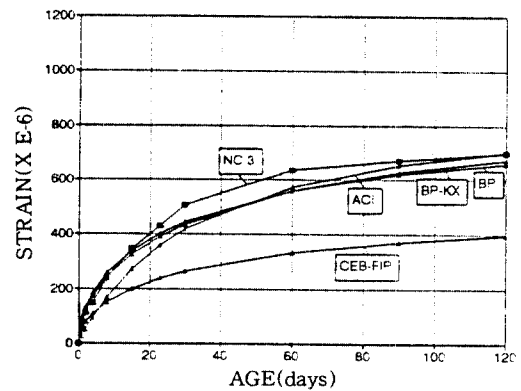
(c) SF 1-3



(d) SF 1-4



(e) NC 2



(g) NC 3

Fig. 10 Comparison of shrinkage by experiments and models

0.35, 0.39의 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비를 가지고 있다. 이러한 영향으로 그림 9(a)에 나타난 바와 같이 건조수축량은 SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4의 순이다. SF 2는 190의 단위수량과 0.31의 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비를 갖고 있으므로 건조수축량이 SF 1-1과 SF 1-2의 건조수축량 사이에 존재해야 한다. 그림 9(a)와 같이 SF 2의 건조수축량은 초기재령에서 SF 1-1과 거의 비슷한 건조수축량을 가지고 있고 재령이 경과할수록 SF 1-1과 SF 1-2의 건조수축량 사이에 있음을 알 수 있다. 따라서 플라이애쉬 첨가율이 증가할수록 초기재령의 건조수축량은 증가하지만 장기재령으로 갈수록 그 값의 증가는 둔화된다.

일반 콘크리트 배합인 NC 2와 초유동 콘크리트 배합인 SF 1-2의 실험결과(그림 9(b))를 비교해보면 재령 120일에서의 건조수축량이 초유동 콘크리트가 일반 콘크리트보다 30%이상 큼을 알 수 있다. 이것은 초유동 콘크리트의 굵은 골재량이 적고 모르타르량이 많은 배합특성, 플라이애쉬의 첨가, 다량의 고성능 감수제의 사용 등에서 기인한 것으로 사료된다. 따라서 초유동 콘크리트를 실용화하기 위해서는 건조수축량을 줄이는 방법이 연구되어야 할 것으로 사료된다. NC 2와 NC 3은 같은 단위수량과 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비를 갖고 있으므로 거의 비슷한 건조수축량을 나타낸다.

## (2) 실험치와 제안식에 의한 값의 비교

SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4배합의 건조수축량은 제안식에 의한 건조수축량보다 매우 크다. 이것은 이 배합에 포함된 플라이애쉬와 많은 양의 고성능 감수제가 건조수축량의 증가에 기여한 것으로 사료된다. 건조수축량은 3~20nm의 미세공극에 포함된 물의 양과 직접적인 관계가 있다. 일반적으로 고로 슬래그나 플라이애쉬는 시멘트 수화물의 미세공극의 양을 증가시키고 치밀한 미세공극을 만들어준다. 또한 고성능 감수제나 지연제 등도 같은 역할을 한다. 따라서 플라이애쉬와 고성능 감수제를 많이 첨가할수록 건조수축량은 증가한다. 실험결과와 제안식 사이의 차이는 기존의 제안식들이 이러한 두 가지 요인을 고려하지 못하

는 데서 기인한 것으로 사료된다.

SF 1-1 배합의 실험치는 BP-KX 모델과 가장 작은 차이를 보이고 있다(그림 10(a)). 그러나 재령에 따른 건조수축의 변화양상은 BP 모델과 가장 유사하다. 또한 SF 1-2 배합의 실험치는 ACI 모델과 가장 작은 차이를 보이고 재령에 따른 건조수축의 변화양상은 BP 모델과 가장 유사하다(그림 10(b)). 나머지 SF 1-3(그림 10(c)), SF 1-4(그림 10(d)) 배합들의 실험치들도 BP-KX 모델 및 ACI 모델과 가장 작은 차이를 보이고 재령에 따른 건조수축의 변화양상은 BP 모델과 가장 유사하다. SF 1-2와 SF 2의 배합조건들은 플라이애쉬 대체율을 제외하고는 거의 비슷하다. 따라서 플라이애쉬 대체율을 고려하지 못하는 기존의 모델식들에 의한 예측값은 SF 1-2와 SF 2배합이 비슷하다. 이 예측값과 SF 2배합의 실험치를 비교하면 그림 10(b)에 나타난 바와 같이 BP 모델과 BP-KX 모델이 가장 실험치에 근접한 예측값을 준다. 그림에서 보는 바와 같이 120일동안의 건조수축량의 40%이상이 10일이하의 재령에서 일어난다. 그런데 BP 모델과 BP-KX 모델이 실험시작 후 10일이하의 재령에서는 가장 실험치와 근접한 예측값을 준다. 따라서 BP 모델과 BP-KX 모델이 SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4 배합들에 가장 적합한 모델인 것으로 사료된다.

NC 2(그림 10(e))와 NC 3(그림 10(f)) 배합도 재령에 따른 건조수축 변화양상과 초기치를 고려해 볼 때 BP 모델이나 BP-KX 모델과 가장 유사한 경향을 나타내며 두 모델과 실험치의 차이는 약 10~15% 정도이다.<sup>(21)-(23)</sup>

## 4. 결 론

1. 자기충전성을 만족시킬만한 충분한 유동성과 충전성을 확보한 초유동 콘크리트 개발의 가능성을 보였으며, 이 때 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비 0.31(SF 1-2)과 0.35(SF 1-3)사이에 유동성과 충전성에 큰 영향을 미치는 임계의 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비가 존재함을 알 수 있었다.
2. 플라이애쉬를 함유한 초유동 콘크리트의 압

## 참 고 문 헌

축강도는 일반 플라이애쉬 콘크리트의 압축강도 특성과 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 초기재령에서의 압축강도 증 가속도가 플라이애쉬를 포함하지 않은 콘크리트보다 늦고 장기재령에서는 그 반대의 경향이 초유동 콘크리트에서도 나타났다.

3. 초유동 콘크리트의 압축강도는 일반 콘크리트의 압축강도보다 양생조건의 영향을 작게 받았다. 또한 동일한 압축강도를 가진 초유동 콘크리트와 일반 콘크리트의 할렬인장강도 및 탄성계수는 비슷한 값을 가졌다.

4. 초기재령에서 초유동 콘크리트의 크리프 변형도의 증가율은 일반 콘크리트보다 크지만 재령이 경과할수록 그 증가율은 둔화되어 어느 시점에서 일반 콘크리트보다 작아졌다. 또한 크리프 변형도 예측식들 중 ACI 모델식이 실험치에 가장 근접한 예측값을 주는 것으로 나타났다.

5. 플라이애쉬 첨가율이 증가할수록 초기재령의 건조수축량은 증가하지만 장기재령으로 갈수록 그 양의 증가는 둔화되었다. 또한 굵은 골재량이 적고 모르타르량이 많은 배합특성, 플라이애쉬의 첨가, 다량의 고성능 감수제의 사용 등으로 인하여 초유동 콘크리트의 건조수축량은 일반 콘크리트보다 30%이상 컸다. 따라서 초유동 콘크리트를 실용화하기 위해서는 건조수축량을 줄이는 방법이 연구되어야 할 것으로 사료된다.

6. 플라이애쉬의 첨가와 다량의 고성능 감수제의 사용에 따라 초유동 콘크리트의 건조수축량은 이 러한 요인을 고려하지 못하는 기존의 여러 모델식들의 예측값보다 20%이상 컸다. 그러나 초기재령의 예측값과 재령에 따른 변화양상을 비교해 볼 때 BP 모델, BP-KX 모델이 초유동 콘크리트의 건조수축량을 추정하기 위한 가장 적합한 모델식인 것으로 판단되었다.

### 감사의 글

본 연구는 1995년도 건설교통부의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

1. Carino, N. J., and Clifton, J. R., "High Performance Concrete: Research Needs to Enhance Its Use," Concrete International, Vol. 13, No.9, 1991, pp.70-76.
2. Ozawa, K., Maekawa, K., and Okamura, H., "Development of the High Performance Concrete," Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.11, No.1, 1989, pp.699-704.
3. Tatsuo, I., Hotaka, Y., Shin, M., and Tatsuya, M., "Rheological Study on High Flowing Concrete," Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.16, No.1, 1994, pp.177-182.
4. Noh, J. H., Han, C. H., Baeg, M. J., Lee, B. G., and Park, K. C., "초유동 콘크리트의 유동 성능에 미치는 배합요인의 영향," 한국콘크리트학회 가을 학술 발표회, Vol.6, No.2, 1994, pp. 115-120.
5. Park, Y. D., Cho, I. H., Kwon, Y. H., and Park, C. L., "플라이애쉬를 사용한 2성분계 초유동 콘크리트의 개발," 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, Vol.6, No.2, 1994, pp.121-126.
6. Kang, S. H., and Park, C. L., "일본에서의 초유동 콘크리트의 실용화동향," 한국콘크리트학회지, Vol.5, No.2, 1993, pp.54-65.
7. Tikalsky, P. J., Carrasquillo, P. M., and Carrasquillo, R. L., "Strength and Durability Considerations Affecting Mix Proportioning of Concrete Containing Fly Ash," ACI Materials Journal, Vol.90, No.6, 1988, pp.535-544.
8. Carrette, G. G., Bilodeau, A., Chevrier, R. L., and Malhotra, V. M., "Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S.," ACI Materials Journal, Vol.90, No.6, 1993, pp.535-544.
9. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-89/318R-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989, pp.353.
10. "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures," Comit Euro-International du Beton, Paris, 1978, pp.348.
11. Oluokun, F. A., "Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength,"

- ACI Materials Journal, Vol.88, No.3, 1991, pp. 302-309.
12. Bazant, Z. P., and Panula, L., "Practical Prediction of Time-Dependent Deformation of Concrete," *Materials and Structures*, Vol.12, No.69, 1979, pp.169-183
  13. Bazant, Z. P., and Panula, L., "New Models for Practical Prediction of Creep and Shrinkage," *ACI SP-76*, 1982, pp.7-23.
  14. ACI Committee 209 (chaired by Rhodes, J. A.) "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," *ACI SP- 27 (Designing for Creep & Shrinkage in Concrete Structure)*, 1982, pp.193-301.
  15. ACI Committee 209/II (chaired by Branson, D. E.) "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," *ACI SP-27 (Designing for Creep & Shrinkage in Concrete Structure)*, 1971, pp.51-93.
  16. Meyers, B.L., Branson, D.E., Schumann, C. G., and Christiason, M.L., "The Prediction of Creep and Shrinkage Properties of Concrete", Iowa Highway Commission, Final Report No. 70-5, 1970, pp.140.
  17. Bazant, Z.P., and Panula, L., "Practical Prediction of Time- Dependent Deformation of Concrete", *Materials and Structures*, Vol.11, No.65, 1978, pp.307-328; Vol.11, No.66, 1978, pp.415-434 ; and Vol.12, No.69, 1979, pp.169-183.
  18. "Evaluation of the Time Dependent Behavior of Concrete", *Comit Euro-Internation l du Beton*, Bulletin No.199, 1990, pp.201.
  19. Bazant, Z. P., and Kim, J. K., "Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformation of Concrete," *Materials and Structures*, Vol.24, No.148, 1991, pp.219-223.
  20. Kim, J. K., Kim, Y. Y., and Eo, S. H., "크리이프와 건조수축을 고려한 강재-콘크리트 합성부재의 장기거동에 관한 연구, 대한건축학회논문집, Vol.11, No.10, 1995, pp.329-337.
  21. Kim, J. K., Yang, E. I., and Kwon, K. H., "콘크리트 건조수축에 관한 실험과 통계적 예측," *대한건축학회논문집*, Vol.4, No.2, 1988, pp.131-139.
  22. Neville, A. M., "Properties of Concrete," 1981, pp.268-318.
  23. Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M., "CONCRETE," 1993, pp.93-101.
- (접수일자 : 1996. 2. 26)