

# 다압축 상태의 콘크리트 크리프

김진근

〈한국과학기술원, 토목공학과 교수〉

권승희·김선영

〈한국과학기술원 건설 및 환경공학과〉

## 1. 서론

콘크리트는 강재와 더불어 건설분야에 사용되는 가장 대표적인 재료이다. 하지만 강재와는 달리 콘크리트 재료의 역학적 특성을 파악하고 예측하는 것은 많은 불확실성을 갖고 있으며, 이로 인해 콘크리트 구조물의 거동 해석은 상당한 오차를 나타낼 수도 있다. 이러한 콘크리트의 특성 중 하나로 크리프와 건조수축과 같은 시간의존적 변형을 들 수 있다. 콘크리트 구조물은 외부로부터 가해지는 하중이 증가하지 않아도 시간에 따라 변형이 증가하며, 이로 인해 구조물의 사용성에 심각한 문제를 야기시킬 수도 있다. 따라서 이러한 구조물의 거동을 정확히 예측하고 설계와 시공시 이를 반영하는 것이 필요하다.

크리프와 건조수축에 대한 많은 연구업적에

도 불구하고 콘크리트 구조물의 시간의존적 거동 해석의 정확성은 만족스럽지 못한 수준이다. 특히 현재까지 연구결과들과 여러 가지 모델식들은 대부분 1축응력 상태에 대한 것으로 콘크리트가 다축응력 상태에 놓이는 경우를 고려한 정확한 거동 해석은 어려운 실정이다.

최근에는 내진 설계로 인해 콘크리트 기둥에 사용되는 횡보강근의 양이 증가하고 또 내부 콘크리트를 외부의 강관에 의해 구속시켜 재료의 효율성을 높인 CFT 기둥에 대한 관심이 고조되고 있다. 기하학적으로 다양한 형태의 구조물이 많이 건설되고 있으며, 대형 구조물의 증가로 콘크리트 재료가 다축응력 상태에 놓이는 경우가 많다. 또한 매스 콘크리트의 수화열에 의해서도 내부의 콘크리트는 다축응력 상태에 놓이게 된다. 이러한 경우 다축응력을 고려한 크리프 해석이 요구되며, 이를 위해

선 다축압 상태에 놓인 콘크리트의 시간의존적 거동 특성을 파악하는 연구가 필요하다.

이 글에서는 다축응력을 받는 콘크리트의 크리프 실험을 통한 그 거동 특성에 대하여 서술하고자 한다. 일반적으로 많이 사용되는 세 가지 배합의 콘크리트에 대해 각각 9개의 정방형 실험체를 제작하였으며, 1축, 2축, 3축응력을 가해 크리프 실험을 실시하였다. 하중이 가해지는 각 방향에서 시간에 따른 변형률을 측정하였으며, 실험결과로부터 크리프에 의한 포아송 비를 구하였다. 또한 다축압 상태의 변형은 체적 변형률(volumetric strain)과 체적 응력(volumetric stress) 그리고 편차 변형률(deviatoric strain)과 편차 응력(deviatoric stress)으로 설명할 수 있다. 따라서 크리프 변형에 대한 체적 변형률(volumetric strain)과 체적 응력(volumetric stress)의 관계와 편차 변형률(deviatoric strain)과 편차 응력(deviatoric stress)의 관계를 파악해 보고자 한다.

## 2. 크리프 포아송 비(creep Poisson's ratio)

다축응력 상태에 놓인 콘크리트의 크리프에 관한 연구는 국외에서 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다<sup>(1-12)</sup>. 주로 원주형 또는 정방형 실험체에 다축응력을 가하여 각 방향에서 측정된 변형률로부터 크리프 변형에 따른 포아송 비(Poisson's ratio)를 구함으로써 다축응력 하에서의 크리프 특성을 파악하고자 하였다.

일부 실험결과에 따르면 다축응력 하에서 크리프에 의한 포아송 비는 0에 가까운 것으로 나타났다<sup>(1-3)</sup>. 이와는 다르게 초기 탄성변형에서의 포아송 비와 크리프에 의한 포아송 비가 거의 같다는 실험결과도 보고된 바 있다<sup>(4-9)</sup>. 또한 Gopalakrishnan과 Neville의 실험결과

<sup>(10)</sup>에서는 다축응력 상태에서 각 방향으로 가해지는 응력의 상대적인 비에 따라 각 방향의 유효 크리프 포아송 비(effective Poisson's ratio)가 다르며, 1축응력 하에서 보다 다축응력 하에서의 포아송 비가 작은 것으로 나타났다. Jordaan과 Illston의 연구결과<sup>(11-12)</sup> 따르면 응력 상태에 따라 크리프 포아송 비는 거의 일정하며, 다축응력 상태에서 각 방향으로 가해지는 응력이 시간에 따라 변화하는 경우에도 크리프 포아송 비는 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다. 기존의 실험결과들에서 다축응력 상태에서 크리프에 의한 포아송 비는 대략 0.1~0.3의 범위를 나타냈으며, 실험결과 분석방법에 따라 포아송 비의 경향과 크기가 연구자들마다 다르게 나타났다.

다축압 상태의 크리프 실험결과로부터 포아송 비를 구하는 방법으로 크게 두 가지가 있다. 첫 번째로는 Gopalakrishnan과 Neville 같이 다축압 상태에서 콘크리트가 등방성(isotropy) 재료가 아닌 것으로 가정하고 식(1)로부터 각 방향의 포아송 비를 구하는 것이다<sup>(10)</sup>. Gopalakrishnan과 Neville<sup>(10)</sup>의 논문에서는 이를 유효 크리프 포아송(effective creep Poisson's ratio) 비라 정의하였다.

$$c_i = c_{sp}[\sigma_i - \nu_{cp,i}(\sigma_j + \sigma_k)] \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $c_i$ 는  $i$ 방향의 크리프 변형률을 나타내고,  $c_{sp}$ 는 1축 방향으로만 하중이 가해졌을 때의 비크리프(specific creep)이다.  $\nu_{cp,i}$ 는  $i$ 방향의 유효 크리프 포아송 비이며,  $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$ 는 서로 직교하는  $i, j, k$ 방향으로 작용하고 있는 주응력(principal stress)이다. 식(1)은 다축압 상태에서 각 방향으로 작용하는 응력의 크기와 1축으로만 응력이 작용할 때의 비크리프를 사용하여 다축압 상태의 크리프 변형률을 구하는 형태의 식으로 각 방향으로 작용하고 있는 응력의 크기가 작고 상

대적인 차이가 큰 경우 실험시의 작은 오차에도 매우 큰 영향을 받게 된다. 또한 콘크리트를 비등방성(anisotropy)으로 고려할 경우 응력 상태에 따라 1축으로만 응력이 가해지는 경우와는 다른 크리프 발생 양상을 보일 수 있음에도 모든 방향에서 1축응력이 가해지는 경우의 비크리프를 사용하게 된다.

다른 방법으로는 Jordaan과 Illston등이 제시한 방법과<sup>(11),(12)</sup> 같이 주어진 응력 상태에서 측정된 크리프에 의한 변형이 등방성이라는 가정 하에 포아송 비를 구하는 것이다. 실험시 측정된 변형률로부터 1축, 2축 그리고 3축 응력 상태에 대해 각각 식(2), (3), (4)와 같이 구할 수 있다.

$$v_c = \frac{\text{lateral strain}}{\text{longitudinal strain}} = -\frac{c_2}{c_1} = -\frac{c_3}{c_1} \dots\dots\dots (2)$$

$$v_c = -\frac{c_3}{c_1 + c_2 - c_3} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\sigma_d \varepsilon_v}{\sigma_d \varepsilon_d} = \frac{1 - 2v_c}{1 + v_c} \dots\dots\dots (4)$$

식(4)에서  $\sigma_d, \varepsilon_d$ 는 각각 편차 응력(deviatoric stress)과 편차 변형률(deviatoric strain)이다.  $\sigma_v$ 와  $\varepsilon_v$ 는 체적 응력(volumetric stress)과 체적 변형률(volumetric strain)이다. Jordaan 과 Illston의 논문<sup>(11),(12)</sup>에서  $v_c$ 를 크리프 포아송 비로 정의하고 있다. 또 크리프 변형률에 초기 변형률을 합한 총 변형률로 위의 식들을 이용해서 구한 포아송 비를 유효 포아송 비(effective Poisson's ratio)라 한다. 편차 응력과 편차 변형률의 경우 작용하는 방향에 따른 영향을 배제하기 위해 octahedral plane 상에 작용하는 전단 응력과 전단 변형률로 고려하게 된다. 이러한 분석방법에서는 다축응력 상태의 시간에 따른 크리프의 발생

양상을 고려하지 않은 채 특정한 시간에서의 변형률만을 가지고 크리프에 의한 포아송 비를 구하게 되며, 응력이 가해지는 각 방향에 대한 포아송 비를 구할 수 없다.

### 3. 실험 계획 및 방법

실험은 세 가지 종류의 콘크리트 배합에 대해 각 방향 응력 조합을 달리하여 실시하였으며, 응력 조합은 [Table 1]과 같다. 하중이 가해지는 시점에서 콘크리트의 탄성 포아송 비는 대략 0.15~0.2 정도의 값으로 콘크리트가 횡방향으로 구속된 경우 1축응력이 가해지면 횡방향으로 작용하는 응력은 1축응력의 15~20% 정도이다. 이를 고려하여 응력조합을 구성하였다. 기존의 타 연구자들의 연구에서는 이보다 큰 횡방향 응력조합으로 실험을 수행한 것이 대부분이다. 또한 아직까지 세 가지 배합에 대해 다축압 크리프 실험을 수행한 경우는 없었다.

[Table 1]은 세 가지 콘크리트 배합에 따른 다축응력의 조합이다. 각 배합의 28일 압축강도와 탄성계수는 [Table 2]와 같다. [Table 3]은 세 가지 콘크리트의 배합이다. 시멘트는

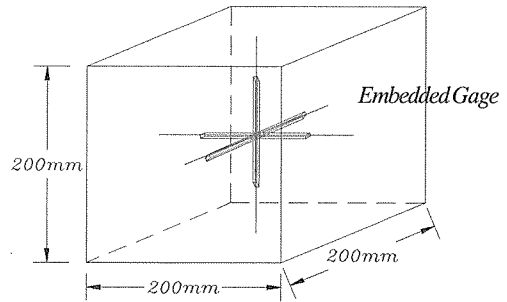
(Table 1) Stress combination for multiaxial creep test

Stress combination	Concrete mix			
	CI	C II	C III	
Uni-axial stress, $O_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	U1	50	75	100
	U2	100	100	125
Bi-axial stress, $O_1, O_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	B1	50, 10	75, 15	100, 20
	B2	50, 20	75, 30	100, 40
	B3	100, 20	100, 30	125, 40
Tri-axial stress $O_1, O_2, O_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	T1	50, 5, 5	75, 7.5, 7.5	100, 10, 10
	T2	50, 10, 10	75, 15, 15	100, 20, 20
	T3	50, 20, 20	75, 30, 30	100, 40, 40
	T4	50, 20, 10	75, 30, 15	100, 40, 20

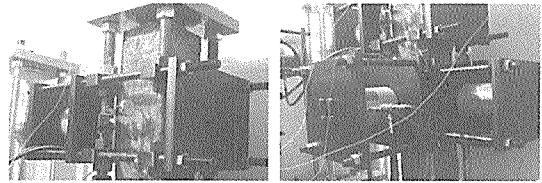
1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재의 최대 치수는 20 mm이다.

크리프 실험을 위한 실험체의 형상은 [Fig. 1]과 같다. 시간에 따른 각 방향 변형률 측정을 위해 콘크리트 실험체 내부에 콘크리트 매립 게이지를 설치하였고 콘크리트와 일체 타설하였다. 타설 후 28일 동안 수중에서 양생하였고, 재령 28일에 크리프 실험을 실시하였다.

1축 지속하중은 기존의 크리프 실험기를 이용하였다. 2축 하중의 경우, 한 축 방향의 가력은 크리프 시험기를 이용하였고, 다른 축 방향의 가력은 실린더를 사용하였다. 실린더를 통해 양방향으로 가력할 수 있는 가압판을 제작하여 크리프 실험기에 고정하였다. 3축 하중을 가하는 경우, 한 축은 크리프 실험기를 이용하고, 다른 두 개의 축은 실린더와 가압판을 이용하였다. 각 응력조합에 대해 1개의 실험체를 제작하여 실험하였다. 크리프 실험시 실험체 내의 수분 증발을 막기 위해 공시체의 모든 면



(Fig. 1) Concrete specimen



(Fig. 2) Experimental apparatuses loading biaxial stresses and tri-axial stresses

에 역청제를 도포하였다. 실험시 온도에 의한 변형률 발생을 억제하기 위해 항온 항습실에서 실험을 하였으며, 유지온도는 20℃이다. [Fig. 2] 는 2축과 3축응력이 가해진 실험체의 모습이다.

(Table 2) Compressive strength and elastic modulus

Concrete mix	CI	C II	C III
Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	265	450	554
Elastic modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	245000	304500	347000

(Table 3) Properties of concrete mixes

Mix	W/C (%)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )				
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse Aggregate	Super plasticizer
CI	58	187	320	776	1028	1.6
C II	40	167	418	726	1028	4.2
C III	32	160	506	776	1028	5.1

\* maximum aggregate size = 20 mm

#### 4. 실험 결과 및 분석

[Fig. 3]은 CI 콘크리트에 대한 크리프 실험 결과이다. 압축방향의 변형률을 양수로 나타내고 인장방향의 변형률을 음수로 나타내었다. 응력을 시간에 따라 일정하게 유지하면서 60일간 각 방향의 변형률을 측정하였다. 가해진 응력의 조합은 [Table 1]과 같다. 1축 방향의 크리프 변형에서 1축응력만 가해진 경우가 다축응력이 가해진 경우에 비해 크게 나타났다. 이는 다축압 상태에서 횡방향으로 작용하는 응력에 의한 크리프 변형의 영향으로 볼 수 있다. 1축과 2축응력 상태에서 하중이 가해지지 않은 방향으로 인장 변형이 발생했으며, 작

용하는 응력의 크기가 증가함에 따라 인장방향의 변형도 증가하였다. 3축응력 상태에서 2축과 3축으로 작용하는 응력의 크기가 증가함에 따라 2축과 3축 방향의 변형이 인장방향에서 압축방향으로 변화하였다.

CII 콘크리트는 72일간 각 방향의 변형률을 측정하였고, 각 방향으로 가해진 응력은 [Table 1]과 같으며, 시간에 따른 크리프 변형의 발생 양상은 [Fig. 3]과 유사하다. 그리고 CIII 콘크리트에 대해서는 80일간 실험하였으며, 그 결과도 [Fig. 3]과 유사하다.

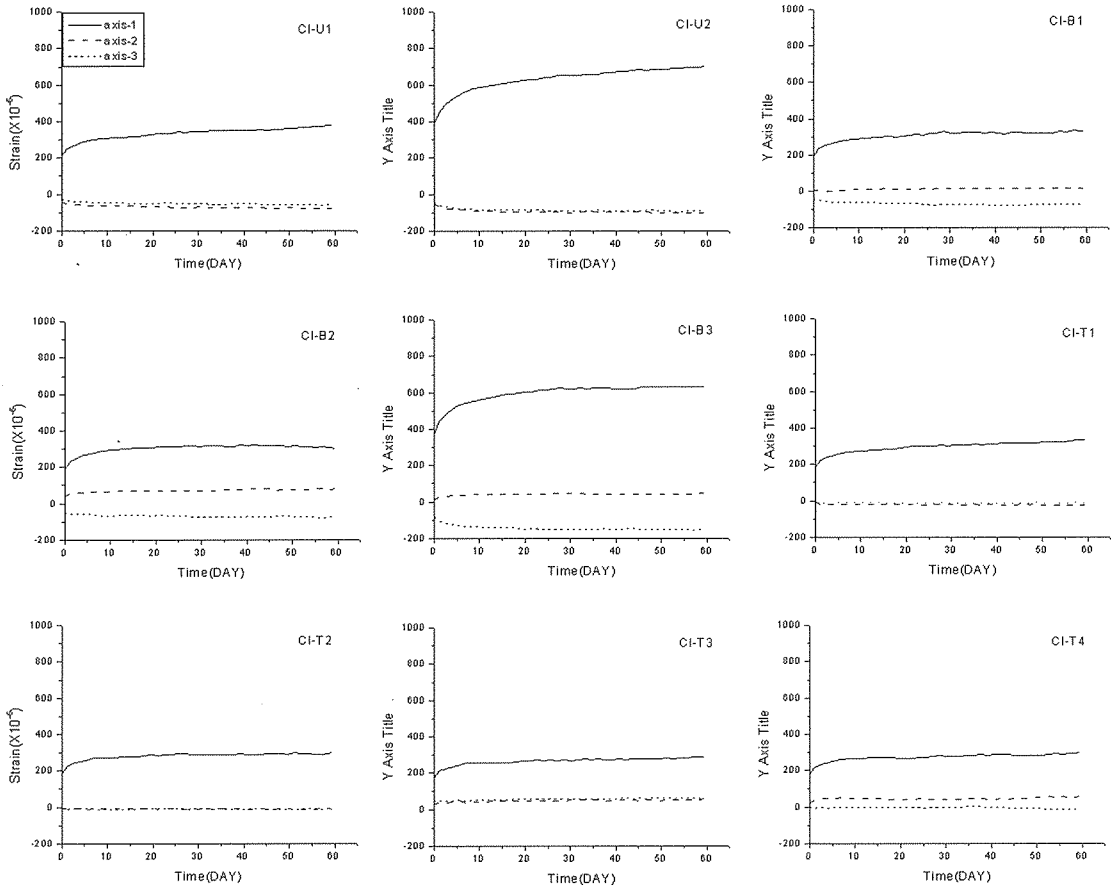
세 가지 배합의 콘크리트에 대한 실험결과들로부터 식(2), (3), (4)를 이용하여 크리프 변형률에 의한 크리프 포아송 비와 초기 탄성 변형률과 크리프 변형률을 합한 총 변형률에 대한 유효 포아송 비를 구해 보았다. 본 연구에서 수행한 실험에서는 1축응력에 대한 횡방향 응력의 상대적인 크기가 작아 식(1)로부터 유효 크리프 포아송 비를 구할 경우 실험시 작은 오차에 의해서도 신뢰할 만한 값을 얻지 못하였다.

본 실험에서 유효 크리프 포아송 비로 분석을 수행하기 위해서는 모든 실험체의 역학적 성질이 동일하다는 가정 하에  $1 \times 10^{-6}$  이내의 정확성을 요구하는 데, 실제 전기저항 스트레인 게이지로 측정시 피할 수 없는 자유전자에 의한 실험오차도 이 범위를 초과하게 된다. 식(2), (3), (4)로부터 크리프 포아송 비를 구하는데 있어 크리프 변형률의 시간에 따른 발생 양상이나 응력 상태에 따른 영향 등은 체적(volumetric) 성분의 응력과 변형률 그리고 편차(deviatoric) 성분의 응력과 변형률의 시간에 따른 관계로부터 파악해 보고자 한다.

[Fig. 4]는 각 배합의 콘크리트에 대한 크리프 포아송 비를 나타낸 것이다. 각 실험체에서 구한 크리프 포아송 비를 응력 상태별로 평균하여 나타내었다. 초기에 심한 크리프 포아송

비의 변동은 크리프 변형의 크기가 작아 측정 오차에 민감하기 때문인 것으로 판단된다. 실험기간 동안 크리프 포아송 비의 시간에 따른 증가나 감소 경향은 나타나지 않았다. [Fig. 4](a)에서 1축응력 상태의 크리프 포아송 비가 다소 크게 나타났고 다음으로 3축과 2축응력 상태 순서로 작게 나타났다. [Fig. 4](b)에서도 [Fig. 4](a)와 같이 1축응력 상태의 크리프 포아송 비가 가장 컸으며, 2축응력 상태에서 가장 작게 나타났다. [Fig. 4](c)에서는 다른 경우와는 달리 1축응력 상태의 크리프 포아송 비가 가장 작았다. 모든 경우에서 2축응력 상태의 크리프 포아송 비가 3축응력 상태의 크리프 포아송 비보다 다소 작게 나타났으며, 전체적으로는 0.15~0.20의 범위로 크리프 포아송 비가 나타났다.

[Fig. 5]는 각 콘크리트에 대해 초기 탄성 변형과 크리프 변형을 합한 총 변형률로 유효 포아송 비를 구한 것이다. [Fig. 4]와 같이 응력 상태별로 평균하여 나타내었다. 크리프 포아송 비에 비해 시간에 따른 변동폭이 작았다. 이는 초기 탄성 변형률을 포함한 총 변형률로 구해지는 유효 포아송 비가 크리프 포아송 비보다 실험오차에 의한 영향을 적게 받기 때문이다. [Fig. 5](a)에서는 [Fig. 4](a)와 달리 1축응력 상태에서 가장 작은 유효 포아송 비를 나타내었다. 또한 2축응력 상태의 경우가 3축응력 상태보다 다소 크게 나타났다. [Fig. 5](b)에서 1축응력 상태의 경우는 [Fig. 4](b)와 같이 가장 큰 값을 나타내었으나, 2축과 3축응력 상태의 경우는 [Fig. 4](b)와 달리 3축응력 상태의 유효 포아송 비가 가장 작았다. [Fig. 5](c)에서도 3축응력 상태의 경우가 2축응력 상태보다 작은 값을 보였고, 1축응력 상태의 유효 포아송 비는 시간에 따라 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 모든 경우에서 3축응력 상태의 유효 포아송 비가 2축응력 상



(Fig. 3) Strains of concrete CI under sustained multiaxial stresses

태의 경우보다 작았으며, 크리프 포아송 비와 유효 포아송 비의 경향은 일치하지 않았다. 유효 포아송 비는 대략 0.16~0.20의 범위로 나타났다.

[Table 4]는 가압 시점에서의 포아송 비와 크리프 포아송 비 그리고 유효 포아송 비를 각 콘크리트에 대해 응력 상태 별로 평균하여 나타낸 것이다. 하중이 가해지는 시점에서의 포아송 비와 크리프 포아송 비 그리고 유효 포아송 비의 크기는 서로 큰 차이를 보이지 않았으며, 근사적으로 초기 탄성변형에 의한 포아송 비와 크리프 포아송 비가 일정한 것으로 볼 수 있다.

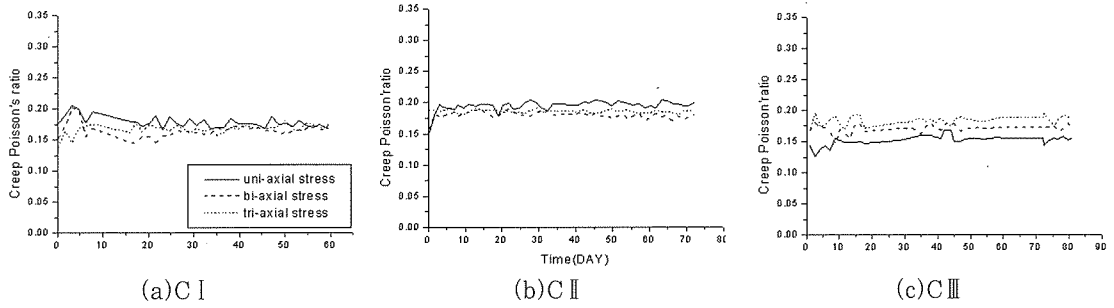
다축압 상태의 콘크리트의 크리프 변형은 체적성분의 변형률과 응력 그리고 편차성분의 변형률과 응력으로 분리하여 고려할 수 있다. 응력과 변형률의 체적성분은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_v \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \dots\dots\dots (5)$$

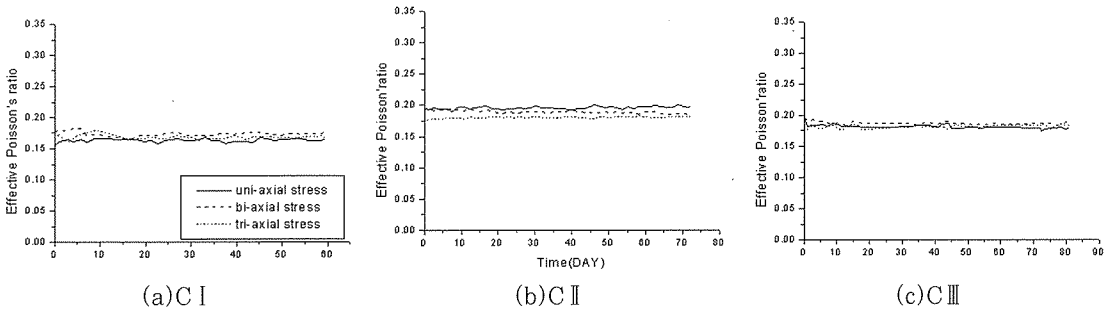
$$\varepsilon_v \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \dots\dots\dots (6)$$

응력과 변형률의 *i* 방향 편차 성분은 다음과 같다.

$$\sigma_{d'i} = \sigma_i - \sigma_v \dots\dots\dots (7)$$



(Fig. 4) Creep Poisson's ratio with time



(Fig. 5) Effective creep Poisson's ratio with time

(Table 4) Poisson's ratio at loading, creep Poisson's ratio and effective Poisson's ratio

Concrete		Poisson's ratio at initial loading	Creep Poisson's ratio	Effective Poisson's ratio
C I	uni-axial stress	0.155	0.177	0.163
	bi-axial stress	0.178	0.164	0.173
	tri-axial stress	0.168	0.164	0.168
C II	uni-axial stress	0.195	0.195	0.194
	bi-axial stress	0.195	0.180	0.190
	tri-axial stress	0.179	0.189	0.183
C III	uni-axial stress	0.199	0.152	0.182
	bi-axial stress	0.196	0.171	0.187
	tri-axial stress	0.180	0.184	0.182

$$\varepsilon_{d_i} = \varepsilon_i - \varepsilon_i \dots \dots \dots (8)$$

이 편차성분의 응력과 변형률은 octahedral plane에서 식(9)와 식(10)과 같이 전단응력( $\tau_0$ )과 전단 변형률( $\varepsilon_0$ )로 표현된다. 즉 식(9)로 표현되는 octahedral plane에서의 전

단응력은 octahedral plane에서의 수직응력 벡터와 traction 벡터의 차에 의해 구해지는 전단응력 벡터의 크기를 의미하며, 편차 응력의 두 번째 불변량(second invariant)  $J_2$ 와 비례한다.

$$\tau_0 = \frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(9)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{3}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(10)$$

[Fig. 6]은 각 배합의 콘크리트에 대한 체적 성분의 응력과 크리프 변형에 하중을 가한 후 1, 4, 7, 28일에서 나타낸 것이다. 체적 성분의 응력은 식 (5)로부터 구하였고 변형률은  $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$ 으로 하였다. 실험체에 가해지는 9가지의 응력조합에서 같은 체적 응력을 받는 실험체의 경우는 평균하여 나타내었다. 체적성분의 응력과 변형률은 선형을 관계를 보이며, 시간이 지남에 따라서도 선형의 관계를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 실험체에 가해지는 다축응력의 조합이 서로 다른 경우에도 체적성분의 응력과 변형률은 일정한 관계를 갖는다는 것을 의미한다. [Fig. 6](a)의 경우 [Fig. 6](b)보다 큰 변형률이 발생하였고 [Fig. 6](c)의 경우가 가장 작았다. 이는 콘크리트 강도가 증가함에 따라 체적 탄성계수 (bulk modulus)가 증가하기 때문으로 판단된다.

[Fig. 7]은 각 콘크리트에 대한 편차성분의 응력과 크리프 변형률의 관계를 나타낸 것이다. 9가지의 응력조합 중 같은 편차응력을 받는 실험체에 대해선 평균하여 나타내었다. [Fig. 6]과 같이 편차성분의 경우도 응력과 크리프 변형률은 선형의 관계를 나타내는 것으로 나타났다. 이는 다축응력의 조합에 관계없이 편차성분의 응력과 변형률도 일정한 관계가 있음을 의미한다. [Fig. 7](a), (b), (c)에서 강도가 증가함에 따라 시간에 따른 편차성

분의 변형률 발생은 감소하였다. 이는 전단 탄성계수(shear modulus)가 강도 증가와 함께 증가하기 때문이다.

세 가지 콘크리트에 대해 체적 성분과 편차 성분의 응력과 크리프 변형 사이에는 선형의 관계를 보였다. 따라서 다음과 같이 크리프의 변형을 표현할 수 있다.

$$\sigma_v = 3K_c \varepsilon_v \dots\dots\dots(11)$$

$$\sigma_d = 2G_c \varepsilon_d \dots\dots\dots(12)$$

여기서,  $K_c$ 는 크리프 변형에 대한 체적 탄성계수이고  $G_c$ 는 전단 탄성계수이다. 이 두 개의 상수  $K_c$ 와  $G_c$ 의 관계로부터 3축응력 상태에 대한 식(4)를 이용하여 크리프 포아송 비를 구하는 것은 타당한 것으로 판단된다. 또한 [Fig. 4]에서 보듯 크리프 포아송 비는 시간이 지남에 따라 증가나 감소의 경향을 나타내지 않았으며 이는 체적 성분과 편차성분의 크리프 발생 속도와 상대적인 크기의 비가 거의 일정하게 유지되고 있음을 의미한다.

[Fig. 8]은 세 가지 배합의 콘크리트 실험체에서 측정된 체적성분과 편차성분 크리프의 평균을 단위 응력에 대한 크리프 발생으로 계산한 비크리프(specific creep)이다. 체적성분을  $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$ 으로 구하였기 때문에 편차성분의 크리프보다 체적성분이 크게 나타났다. 편차성분과 체적성분의 크리프 발생 경향과 상대적인 크기의 비는 시간에 따라 거의 일정한 것으로 나타났다.

체적성분과 편차성분의 응력과 크리프의 관계는 다축응력 상태의 콘크리트 크리프 현상을 합리적으로 설명하고 있는 것으로 판단되며, 이를 기초로 구한 크리프 포아송 비와 유효 포아송 비 또한 다축압 상태의 크리프에 의한 콘크리트의 전체적인 변형 특성을 나타내고 있다. 하지만 이러한 분석 방법으로는 각 방향으로 작용하는 응력의 상대적인 크기에 따라

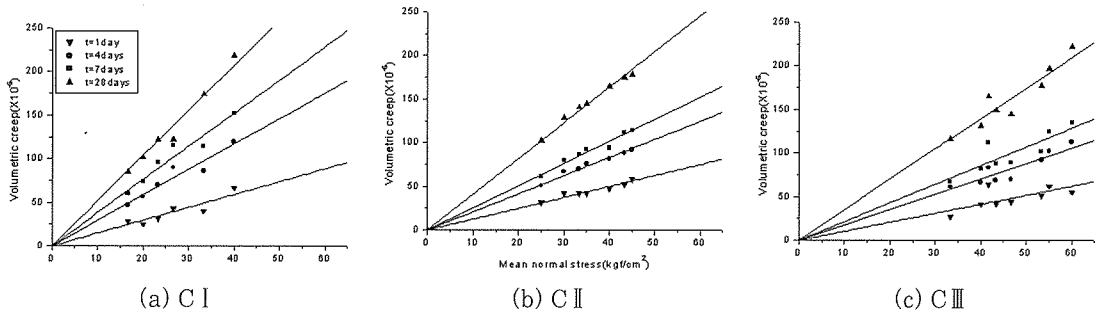


각 방향의 유효 크리프 포아송 비가 다른 경우에 대해서는 고려하기 어렵다. 또한 본 실험으로부터 구한 크리프 포아송비는 배합에 따라 다른 경향을 보이며, 유효 포아송 비와 크리프 포아송 비도 서로 다르게 나타났다. 이를 고려하여 다축압 크리프 현상을 보다 정확히 파악하기 위해선 새로운 분석방법이 요구된다.

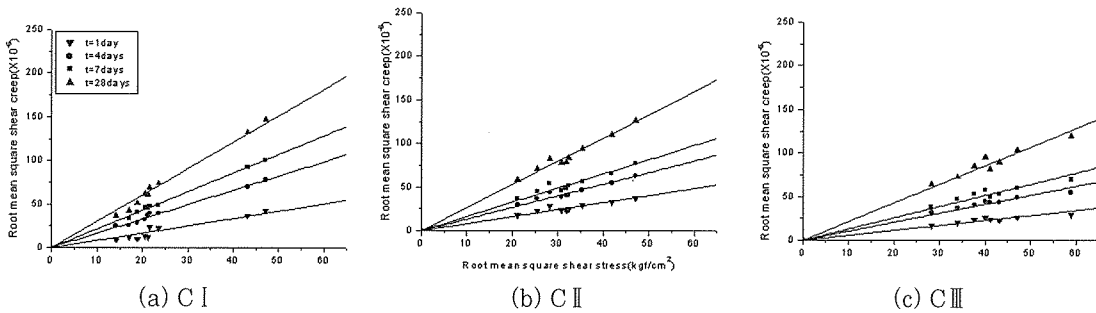
## 5. 결론

이 글에서는 세 가지 종류의 콘크리트에 대해 다축응력 상태에서 크리프 실험을 실시했으며, 실험결과 및 분석으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

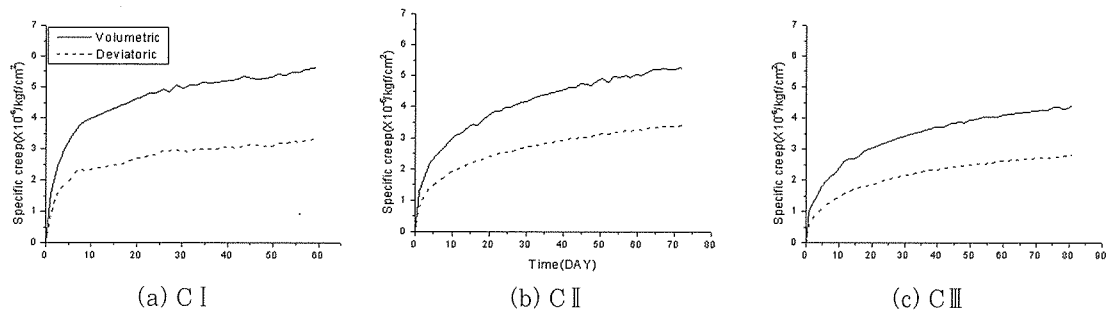
(1) 크리프 포아송 비는 0.15~0.2 정도의 범위로 나타났다. 시간에 따른 증가나 감소 경향은 나타나지 않았으며, 3축응력 상태의 크리프 포아송 비가 2축응력 상태보다 다소 크게



(Fig. 6) Relationship between volumetric stress and volumetric creep stain



(Fig. 7) Relationship between deviatoric stress and deviatoric creep stain



(Fig. 8) Specific creep for volumetric and deviatoric creep

나타났다.

(2) 유효 포아송 비는 0.16~0.2 정도의 범위로 나타났다. 하중이 가해지는 시점부터 시간에 따라 일정하게 유지되었으며, 크리프 포아송 비와는 응력 상태에 따라 다른 경향을 보였다. 근사적으로 다축압 상태의 크리프 포아송 비는 탄성 변형의 포아송 비와 같다.

(3) 다축응력 상태의 콘크리트 크리프는 체적성분의 응력과 변형률, 편차성분의 응력과 변형률로 고려할 수 있다. 실험결과로부터 얻은 체적성분의 응력과 변형은 선형관계를 나타냈으며, 시간에 따른 변형증가도 응력에 비례하는 것으로 나타났다.

(4) 편차성분으로 octahedral plane 상의 전단 응력과 전단 변형률은 선형의 관계를 나타냈으며, 시간에 따른 변형의 증가에서도 선형성을 유지했다. 다축압 크리프에 따른 체적 성분 변형에 대한 편차성분 변형의 시간에 따른 상대적인 비는 거의 일정하게 유지된다.

## 참 고 문 헌

1. Glanville, W. H. and Thomas, F. G., "Further investigations on the creep of flow of concrete under load," London, H.M.S.O., Building Research Technical Paper No. 21, 1929, pp. 44
2. Ross, A. D., "Experiments on the creep of concrete under two-dimensional stressing," Magazine of Concrete Research, Vol. 6, No. 16, 1954, pp. 3~10.
3. L' Hermite, R., "Que savons-nous de la deformation plastique et du fluage du beton?," Annales de l' Institut Technique du Batiment et des Travaux Public. Vol. 10, No. 117, 1957, pp. 778~809.
4. Davis, R. E., Davis, H. E., and Hamilton, J. S., "Plastic flow of concrete under sustained stress," Proceedings of the American Society for Testing and Materials. Vol. 34, Part 2, 1934, pp. 354~386.
5. Duke, C. M. and Davis, H. E., "Some properties of concrete under sustained combined stress," Proceedings of the American Society for Testing and Materials, Vol. 44, 1944, pp. 888~896.
6. Polivka, M., Pritz, D. and Adams, R. F., "Studies of creep in mass concrete," Symposium on mass concrete, Detroit, American Concrete Institute, 1963, SP-6, pp. 257~283.
7. Darthanari, S. and Yu, C. W., "Creep of concrete under uniaxial and biaxial stresses at elevated temperatures," Magazine of Concrete Research, Vol. 19, No. 60, 1967, pp. 149~156.
8. Hannant, D. J., "Strain behaviour of concrete up to 95°C under compressive stresses," Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels, London, Institute of Civil Engineering, 1967, pp. 177~191.
9. Meyer, H. G., "On the influence of water content and of drying conditions on lateral creep of plain concrete," Materials and Structures, Vol. 2, No. 8, 1969, pp. 125~131.
10. Gopalakrishnan, K. S., Neville, A. M., and Ghali, A., "Creep Poisson's ratio of concrete under multiaxial compression," American Concrete Institute, Vol. 66, No. 66, 1969, pp. 1008~1019.

11. Jordaanm I. J. and Illston, J. M., "The creep of sealed concrete under multiaxial compressive stresses," Magazine of Concrete Research, Vol. 21, No. 69, 1969, pp. 195~204.
12. Jordaanm I. J. and Illston, J. M.,

"Time dependent strains in sealed concrete under system of variable multiaxial stress," Magazine of Concrete Research, Vol. 23, No. 75-76, 1971, pp. 79~88.

