

## 다축응력 상태에 놓인 콘크리트의 크리프 특성에 관한 실험 연구

권승희<sup>1)</sup> · 김선영<sup>2)</sup> · 김진근<sup>1)\*</sup> · 이수곤<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 <sup>2)</sup> 대한안전진단연구원 <sup>3)</sup> 전남대학교 건축공학과

(2003년 10월 10일 원고접수, 2004년 2월 5일 심사완료)

### Experimental Studies on Creep of Concrete under Multiaxial Stresses

Seung-Hee Kwon<sup>1)</sup>, Sun-Young Kim<sup>2)</sup>, Jin-Keun Kim<sup>1)\*</sup>, and Soo-Gon Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea

<sup>2)</sup> Korea Building Safety Inspection Center, Gwangju, Korea

<sup>3)</sup> Dept. of Architecture, Chonnam National University, Gwangju, Korea

(Received October 10, 2003, Accepted February 5, 2004)

#### ABSTRACT

It is difficult to analyze and predict the long-term behavior of concrete structures and members under multiaxial stresses because most of existing researches on creep of concrete were mainly concerned about uniaxial stress state. Therefore, the main objective of this paper is the investigation of creep properties of concrete under multiaxial stresses. This paper presents experimental study on creep of concrete under multiaxial compression. Twenty seven cubic specimens(20×20×20 cm) for three concrete mixes were tested under uniaxial, biaxial, and triaxial stress states. Creep strains were measured in three directions of principal stresses.

Poisson's ratio at the initial loading was obtained, as was Poisson's ratio due to creep strain and Poisson's ratio due to the combined creep strain and elastic strain. These Poisson's ratios were approximately equal for each concrete mix. The Poisson's ratio at the initial loading and the Poisson's ratio for the combined strain increased slightly as the strength of the concrete increased. In addition, the volumetric creep strain and deviatoric creep strain were linearly proportional to volumetric stress and deviatoric stress, respectively.

**Keywords :** multiaxial stress, creep, creep Poisson's ratio, experiments

#### 1. 서 론

콘크리트는 강재와 더불어 건설분야에 사용되는 가장 대표적인 재료이다. 그러나 강재와는 다르게 재료의 역학적 특성을 파악하고 예측할 때 불확실한 점이 많으며, 이러한 불확실한 점 때문에 콘크리트 구조물의 거동 해석은 실제와 차이를 나타낼 수도 있다. 특히 콘크리트 구조물은 외부로부터 가해지는 하중이 증가하지 않아도 시간에 따라 예측하기 힘든 크리프와 건조수축에 의한 변형이 일어나, 이로 인해 구조물을 사용할 때 심각한 문제가 일어날 수도 있다. 따라서 구조물의 거동을 정확히 예측하여 설계와 시공하고자 할 때 정확한 크리프와 건조수축을 반영하는 것이 필요하다.

그러나 크리프와 건조수축에 대한 많은 연구업적에도 불구하고 콘크리트 구조물의 시간 의존적 거동 해석을 정확하게 하지 못하고 있는 실정이다. 특히 현재까지 연구

결과들과 여러 가지 모델식들<sup>1-3)</sup>은 대부분 1축응력 상태에 대한 것으로 콘크리트가 다축응력 상태에 놓이는 경우에 대한 정확한 거동 해석은 어려운 실정이다.

최근에 들어 내진 설계로 인해 확보된 콘크리트 기둥, 또 내부 콘크리트를 외부의 강관에 의해 구속시켜 재료의 효율성을 높인 콘크리트 충전 강관기둥<sup>4)</sup>(CFT : Concrete Filled steel Tubular column), 기하학적으로 다양한 형태의 구조물, 대형 구조물 등 콘크리트 재료가 다축응력 상태에 놓이는 경우가 많아지고 있다. 또한 매스콘크리트의 수화열에 의해서도 내부의 콘크리트는 다축응력 상태에 놓이게 된다<sup>5)</sup>. 이러한 경우 다축응력을 고려한 크리프 해석이 요구되며, 이를 위해서 다축응력 상태에 놓인 콘크리트의 시간의존적 거동 특성을 파악하는 연구가 필요하다.

이 연구는 다축응력을 받는 콘크리트의 크리프 실험을 실시하여 그 거동 특성을 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해 일반적으로 많이 사용되는 세 배합의 콘크리트에 대해 각각 9개의 정방형 실험체가 제작되었으며, 1축, 2축, 3축응력을 가해 크리프 실험을 실시하였다. 하중이 가해지

\* Corresponding author

Tel : 042-869-3614 Fax : 042-869-3610

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

는 각 방향에서 시간에 따른 변형률을 측정하였으며, 실험 결과로부터 크리프에 의한 푸아송비를 구하였다. 또한 다축응력 상태의 변형은 체적변형률(volumetric strain)과 체적응력(volumetric stress) 그리고 편차변형률(deviatoric strain)과 편차응력(deviatoric stress)으로 분리하여, 크리프변형에 대한 체적변형률과 체적응력의 관계와 편차변형률과 편차응력의 관계가 분석되었다.

## 2. 크리프푸아송비 (creep Poisson's ratio)

다축응력 상태에 놓인 콘크리트의 크리프에 관한 연구는 외국에서 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다<sup>6-16)</sup>. 주로 원주형 또는 정방형 실험체에 다축응력을 가하여 각 방향에서 측정된 변형률로부터 크리프변형에 따른 푸아송비를 구하여 다축응력 상태의 크리프 특성이 분석되었다.

일부 실험결과에 따르면 다축응력이 작용할 때 크리프에 의한 푸아송비는 0에 가까운 것으로 나타났다<sup>6-9)</sup>. 이와는 다르게 초기 탄성변형의 푸아송비와 크리프에 의한 푸아송비가 거의 같다는 실험결과도 보고된 바 있다<sup>9-14)</sup>. 또한 Gopalakrishnan과 Neville의 실험결과<sup>15)</sup>에 의하면 다축응력 상태에서 각 방향으로 가해지는 응력의 상대적인 비에 따라 각 방향의 유효크리프푸아송비(effective creep Poisson's ratio)가 다르며, 1축응력이 작용할 때보다 다축응력이 작용할 때 푸아송비가 작은 것으로 나타났다. Jordaan과 Illston의 연구결과에<sup>16,17)</sup> 따르면 응력 상태에 따라 크리프푸아송비는 거의 일정하며, 다축응력 상태에서 각 방향으로 가해지는 응력이 시간에 따라 변화하는 경우에도 크리프푸아송비의 변화가 매우 작은 것으로 나타났다. 기존의 실험결과들에서 다축응력 상태에서 크리프에 의한 푸아송비는 대략 0.1~0.3의 범위로 분석방법에 따라 푸아송비의 경향과 크기가 연구자들마다 다르게 나타났다.

다축응력 상태의 크리프 실험결과로부터 푸아송비를 구하는 방법으로 크게 두 가지가 있다. 첫 번째로는 Gopalakrishnan과 Neville 같이 다축응력 상태에서 콘크리트가 등방성(isotropy) 재료가 아닌 것으로 가정하는 것으로서, 다음의 식과 같이 정의되는 유효크리프푸아송비이다<sup>13)</sup>.

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

여기서,  $c_i$ 는  $i$  방향의 크리프변형률이며,  $c_{sp}$ 는 1축응력에 대한 비크리프(specific creep),  $\nu_{cp,i}$ 는  $i$  방향의 유효크리프푸아송비,  $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$ 는 서로 직교하는  $i, j, k$  방향으로 작용하고 있는 주응력이다.

식 (1)은 다축응력 상태에서 각 방향으로 작용하는 응력의 크기와 1축응력에 대한 크리프를 사용하여 다축응력

상태의 크리프변형률을 구하는 형태의 식이다. 이 식은 각 방향으로 작용하고 있는 응력의 크기가 작고 상대적인 차이가 큰 경우 실험의 작은 오차에도 매우 큰 영향을 받는다. 또한 콘크리트를 이등방성(anisotropy)으로 고려할 경우 응력 상태에 따라 1축으로만 응력이 가해지는 경우와는 다른 크리프 발생 양상을 보일 수 있음에도 모든 방향에서 1축응력에 대한 비크리프를 사용한다.

다른 방법으로는 Jordaan과 Illston 등이 제시한 방법으로서 주어진 응력 상태에서 측정된 크리프에 의한 변형이 등방성이라고 가정하여 푸아송비를 구하는 것이다<sup>16,17)</sup>. 실험할 때 측정된 변형률로부터 1축, 2축 그리고 3축응력 상태에 대해 각각 다음과 같이 계산될 수 있다.

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

$$\nu_c = - \frac{c_3}{c_1 + c_2 - c_3} \quad (3), \quad \frac{\sigma_d \epsilon_v}{\sigma_v \epsilon_d} = \frac{1 - 2\nu_c}{1 + \nu_c} \quad (4)$$

식 (4)에서  $\sigma_d$ 와  $\epsilon_d$ 는 각각 편차응력과 편차변형률이며,  $\sigma_v$ 와  $\epsilon_v$ 는 체적응력과 체적변형률이다. Jordaan과 Illston<sup>16,17)</sup>은  $\nu_c$ 를 크리프푸아송비로 정의하였다. 크리프 변형률에 초기변형률을 합한 총 변형률로 위의 식들로부터 계산된 푸아송비를 유효푸아송비(effective Poisson's ratio)라 한다. 편차응력과 편차변형률의 경우 작용하는 방향에 따른 영향을 배제하기 위해 8면체 평면(octahedral plane) 위에 작용하는 전단응력과 전단변형률로 고려된다. 이러한 분석방법에서 다축응력 상태의 시간에 따른 크리프의 발생양상을 고려하지 않은 채 특정한 시간에서 발생하는 변형률만을 가지고 크리프에 의한 푸아송비를 구하게 되어, 응력이 가해지는 각 방향에 대한 푸아송비가 계산될 수 없다.

## 3. 실험 계획 및 방법

실험은 Table 1과 같이 세 가지 종류의 콘크리트 배합에 대해 각 방향 응력 조합을 다르게 하여 실시되었으며, 응력 조합은 Table 2와 같다. 하중이 가해지는 시점에서 콘크리트의 탄성푸아송비는 대략 0.15~0.2 정도의 값으로 콘크리트가 횡방향으로 구속된 경우 1축응력이 가해지면 횡방향으로 작용하는 응력은 1축응력의 15~20% 정도이다. 이를 고려하여 응력조합이 구성되었다. 기존의 연구는 이보다 큰 횡방향 응력조합으로 실험을 수행한 것이 대부분이다. 또한 아직까지 여러 배합에 대해 동시에 다축응력 상태의 크리프 실험을 수행한 연구는 보고되지 않았다.

Table 2는 세 가지 콘크리트 배합에 따른 다축응력의 조합이고, 각 배합의 28일 압축강도와 탄성계수는 Table

3과 같다. 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재의 최대 치수는 20mm이다.

크리프 실험을 위한 실험체의 형상은 정방형으로 Fig. 1과 같다. 시간에 따른 각 방향 변형률 측정을 위해 콘크리트 실험체 내부에 콘크리트 매립게이지를 설치하였고 콘크리트와 일체 타설하였다. 타설 하루 후 몰드에서 탈형하여 재령 28일까지 수중에서 양생하였고, 재령 28일에 크리프 실험을 실시하였다. 1축 지속하중은 기존의 크리프 실험기를 이용하였다. 2축 하중의 경우, 한 축 방향의 가력은 크리프 시험기를 이용하고, 다른 축 방향의 가력은 유압실린더를 사용하였다. 이 때 유압실린더를 통해 양방향으로 가력할 수 있는 가압판을 제작하여 크리프 실험기에 고정하였다. 3축 하중을 가하는 경우, 한 축은 크리프 실험기를 이용하고, 다른 두 개의 축은 유압실린더와 가압판을 이용하였다. 2축, 3축 하중을 가하는 경우 횡방향 하중을 안정적으로 제어하기 위해 유압펌프, accumulator, 유압게이지, 유압스위치로 구성된 시스템을 구축하여, 시간에 따라 일정한 하중이 지속되도록 하였다.

크리프 실험을 할 때 실험체 내의 수분 증발을 막기 위해 플라스틱 필름과 역청제를 사용하여 공시체의 모든 면을 밀봉하였다. 그리고 실험할 때 온도에 의한 변형률 발생을 억제하기 위해 20℃ 항온 항습실에서 실험을 하였다. Fig. 2는 2축과 3축응력이 가해진 실험체의 모습이다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

Fig. 3은 응력을 시간에 따라 일정하게 유지하면서 60일간 각 방향의 변형률을 측정된 CI 콘크리트에 대한 크리프 실험 결과로서 압축방향의 변형률을 양의 값으로 나타내고, 인장방향의 변형률을 음의 값으로 나타낸 것이다. Table 2와 같은 응력조합으로 1축 방향의 크리프변형은 1축응력만 가해진 경우가 다축응력이 가해진 경우에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 다축응력 상태에서 횡방향으로 작용하는 응력에 의한 크리프변형의 영향으로 볼 수 있다. 1축과 2축응력 상태에서 하중이 가해지지 않은 방향으로 인장변형이 발생하며, 작용하는 응력의 크기가 증가함에 따라 인장방향의 변형률도 증가하고 있음을 보여주고 있다. 3축응력 상태에서 2축과 3축으로 작용하는 응력의 크기가 증가함에 따라 2축과 3축 방향의 변형이 인장방향에서 압축방향으로 변화하였다.

Fig. 4는 CII 콘크리트에 대한 크리프 실험결과로서, 72일간 일정한 응력상태에서 측정된 각 방향의 변형률이다. 각 방향으로 가해진 응력은 Table 2와 같으며, 시간에 따른 크리프변형의 발생 양상은 Fig. 3과 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 5는 80일간 측정된 CIII 콘크리트의 실험체별 각 방향 변형률을 보여주고 있다. 콘크리트의 크리프는 일반

적으로 하중을 가한 후 60일 이내에 30년 후 크리프변형의 50% 이상이 발생되며, 또한 시간이 지남에 따라 크리프 발생속도는 크게 감소한다<sup>9)</sup>. 따라서 이 연구의 실험기간 동안 측정된 결과로부터 크리프 특성을 파악하는 것은 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 1 Proportions of concrete mixes

Mix	W/C (%)	Unit mass(kg/m <sup>3</sup> )				
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super-plasticizer
CI	58	187	320	776	1,028	-
CII	40	167	418	762	1,011	4.2
CIII	32	160	506	739	980	5.1

\* maximum aggregate size = 20 mm

Table 2 Stress combination for multiaxial creep test

Stress combination		Concrete mix		
		CI	CII	CIII
Uniaxial stress, $\sigma_1$ (MPa)	U1	4.90	7.35	9.80
	U2	9.80	9.80	12.25
Biaxial stress $\sigma_1, \sigma_2$ (MPa)	B1	4.90, 0.98	7.35, 1.47	9.80, 1.96
	B2	4.90, 1.96	7.35, 2.94	9.80, 3.92
	B3	9.80, 1.96	9.80, 2.94	12.25, 3.92
Triaxial stress $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (MPa)	T1	4.90, 0.49, 0.49	7.35, 0.74, 0.74	9.80, 0.98, 0.98
	T2	4.90, 0.98, 0.98	7.35, 1.47, 1.47	9.80, 1.96, 1.96
	T3	4.90, 1.96, 1.96	7.35, 2.94, 2.94	9.80, 3.92, 3.92
	T4	4.90, 1.96, 0.98	7.35, 2.94, 1.47	9.80, 3.92, 1.96

Table 3 Compressive strength and elastic modulus

Concrete mix	CI	CII	CIII
Compressive strength (MPa)	26.0	44.1	54.3
Elastic modulus (MPa)	24010	29841	34006

Embedded gage

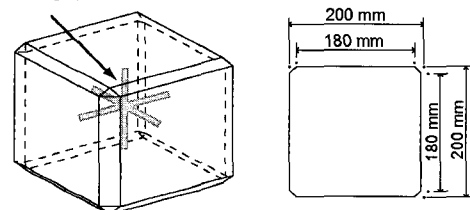


Fig. 1 Concrete specimen

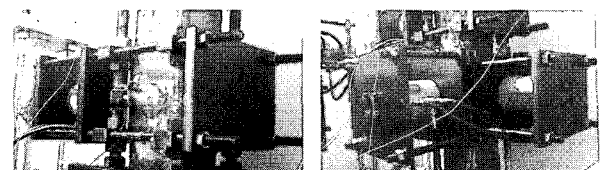


Fig. 2 Experimental apparatuses loading biaxial stresses and triaxial stresses

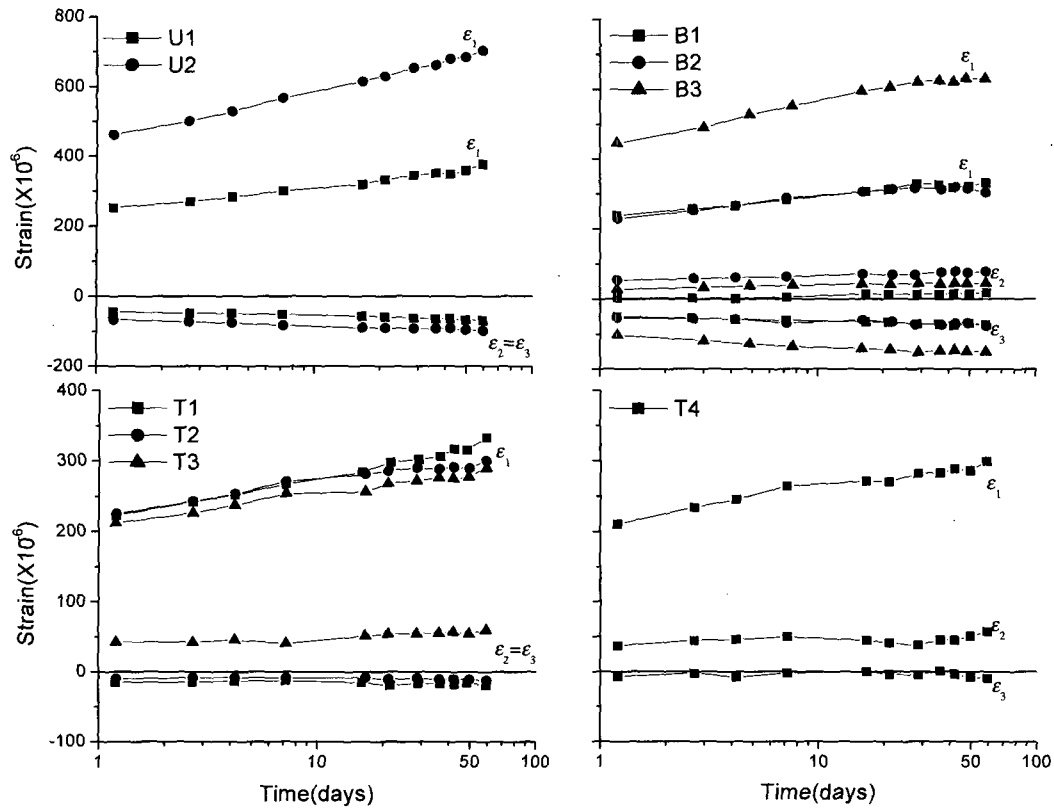


Fig. 3 Strains of concrete CI under sustained multiaxial stresses

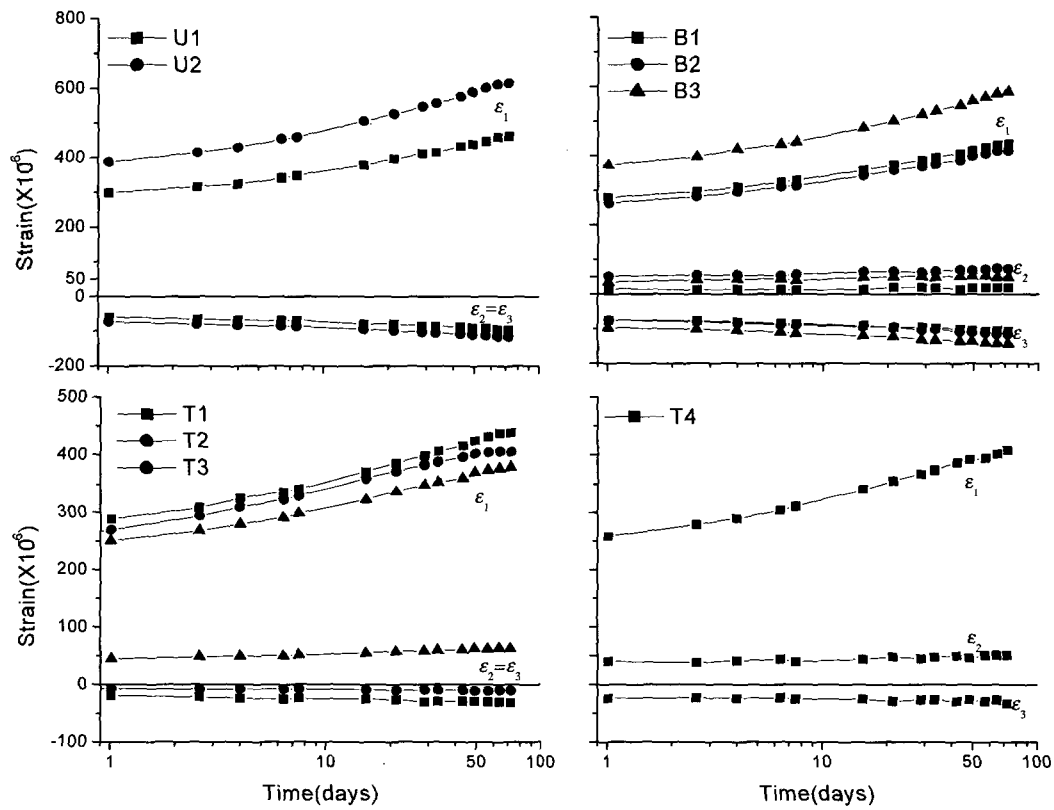


Fig. 4 Strains of concrete CII under sustained multiaxial stresses

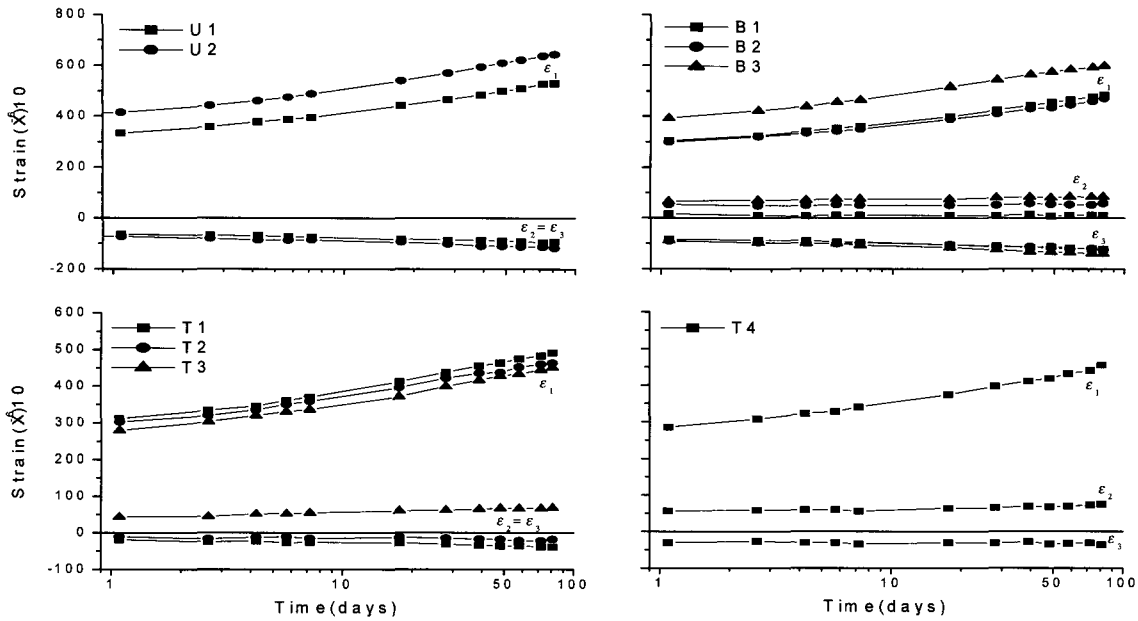


Fig. 5 Strains of concrete CIII under sustained multiaxial stresses

세 배합의 콘크리트에 대한 실험결과로부터 식 (2)-(4)를 이용하여 크리프푸아송비와 초기 탄성변형률과 크리프 변형률을 합한 총 변형률에 대한 유효푸아송비가 계산되었다. 그러나 이 연구의 실험에서 1축응력에 대한 횡방향 응력의 상대적인 크기가 작아 식 (1)로부터 유효크리프푸아송비가 계산될 경우 작은 실험 오차에 의해서도 신뢰할 만한 값을 얻지 못하였다. 유효크리프푸아송비는 모든 실험체의 역학적 성질이 동일하다는 가정에서  $1 \times 10^{-6}$  이내의 정확성이 있어야 분석이 가능한데, 실제 전기저항 스트레인 게이지로 측정할 때 피할 수 없는 자유전자에 의한 실험오차도 이 범위를 초과하게 된다.

Fig. 6은 가압시점에서 푸아송비, 크리프푸아송비 그리고 유효푸아송비를 각 콘크리트 배합별로 모든 실험체에 대해 측정기간 내 평균값으로 계산한 결과이다. Fig. 6(a)에서 세 콘크리트에 대한 가압시점의 푸아송비의 평균값은 0.182로 나타났으며, 이 평균값에 대한 변동계수는 0.122이다. Fig. 6(b)의 크리프푸아송비에 대한 평균값은 0.178이었으며, 이에 대한 변동계수는 0.151이다. Fig. 6(c)에서 유효푸아송비의 경우 평균값은 0.182이며, 변동계수는 0.104이다. Fig. 6의 세 푸아송비는 응력상태에 따라 특정한 경향을 보이지 않았다.

Table 4는 각 콘크리트에 대해 세 푸아송비의 평균값을 보여주고 있다. 초기의 푸아송비와 유효푸아송비는 콘크리트 강도의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며, 각 콘크리트에 대한 세 푸아송비의 평균값은 근사적으로 같은 값을 나타내었다. 그리고 세 배합 콘크리트의 모든

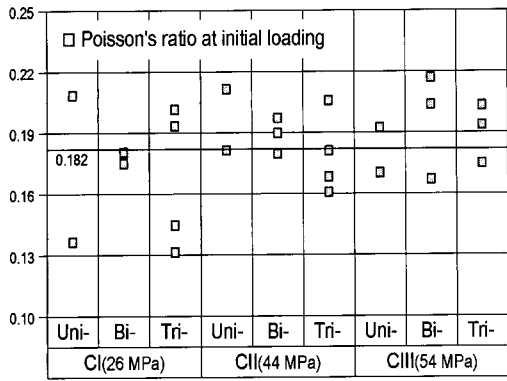
실험체에서 측정된 세 푸아송비에 대한 전체 평균은 0.181 그리고 변동계수는 0.126이었다.

크리프푸아송비와 유효푸아송비의 시간에 따른 평균값의 경향은 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)에서 크리프푸아송비의 경우 실험 오차에 매우 민감하기 때문에 시간에 따른 변동(fluctuation)으로 인해 증가나 감소 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. CI 콘크리트에 대한 크리프푸아송비가 가장 작은 값을 보였으며, CII 콘크리트의 크리프푸아송비가 가장 큰 값을 나타내었다. Table 4에서 CI, CII, CIII 콘크리트에 대한 평균값은 각각 0.168, 0.187, 0.178이었다.

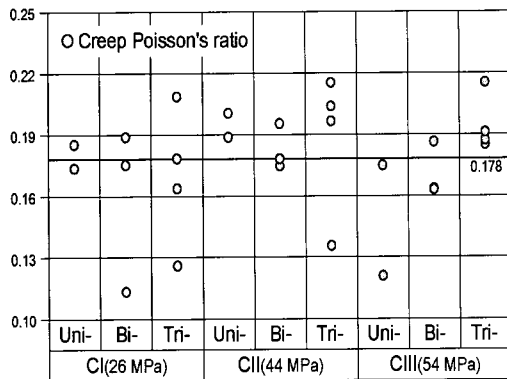
Fig. 7(b)에서 각 콘크리트의 유효푸아송비는 시간에 따라 일정한 것으로 보이며, 크리프푸아송비에 비해 시간에 따른 변동의 폭이 매우 작게 나타나고 있다. 이는 유효푸아송비가 탄성변형률과 크리프변형률을 합한 총 변형률로 계산되어 실험오차에 크게 영향을 받지 않기 때문으로 판단된다. 유효푸아송비는 강도의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며, CI, CII, CIII 콘크리트에 대한 평균값

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

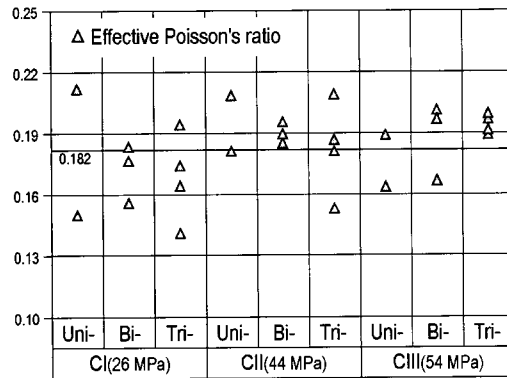
Concrete	Poisson's ratio at initial loading	Creep Poisson's ratio	Effective Poisson's ratio
CI	0.168	0.168	0.169
CII	0.188	0.187	0.188
CIII	0.190	0.179	0.189



(a) Poisson's ratio at initial loading



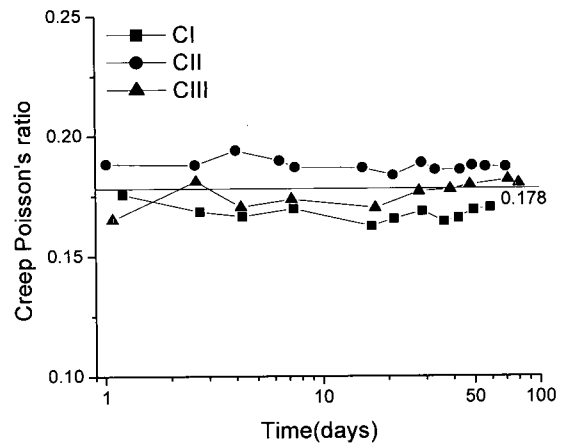
(b) Creep Poisson's ratio



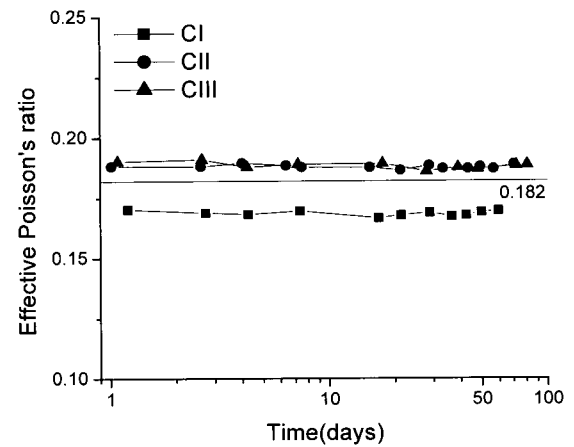
(c) Effective Poisson's ratio

**Fig. 6** Poisson's ratio at the initial loading, the creep Poisson's ratio and the effective Poisson's ratio for all specimens

은 각각 0.168, 0.188, 0.189로 가압시점의 푸아송비와 거의 같은 값을 보였다. 따라서 콘크리트 구조물에 대한 탄성변형과 장기변형을 고려한 해석에 있어 푸아송비가 적용될 경우 이 유효푸아송비의 평균값을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 가압시점의 푸아송비, 크리프푸아송비, 유효푸아송비에 대한 측정기간 내 평균값은 거의



(a) Creep Poisson's ratio with time



(b) Effective Poisson's ratio with time

**Fig. 7** Creep and Effective Poisson's ratios with time

같은 값을 보였으며, 기존의 실험결과<sup>9-14)</sup>도 같은 경향을 나타내고 있다. 이 연구에서 푸아송비의 시간에 따른 변화와 방향에 따른 차이에 대한 분석은 어려웠으며, 이는 실험 측정값으로부터 계산되는 푸아송비가 실험오차에 매우 민감하기 때문으로 판단된다.

다축응력 상태에 놓인 콘크리트의 크리프변형은 체적성분의 변형률과 응력 그리고 편차성분의 변형률과 응력으로 분리하여 고려할 수 있다. 응력과 변형률의 체적성분은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

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

$$\varepsilon_v = \frac{1}{3} (c_1 + c_2 + c_3) \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_v$ 와  $\epsilon_v$ 는 체적성분의 응력과 크리프변형률이며,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  그리고  $c_1, c_2, c_3$ 는 각각 주응력 방향의 응력과 크리프변형률이다. 응력과 변형률의  $i$  방향 편차 성분은 각각 다음과 같다.

$$\sigma_{di} = \sigma_i - \sigma_v \quad (7), \quad \epsilon_{di} = c_i - \epsilon_v \quad (8)$$

여기서,  $\sigma_{di}$ 와  $\epsilon_{di}$ 는  $i$  방향의 편차응력과 편차변형률이며,  $\sigma_i$ 와  $c_i$ 는  $i$  방향으로 작용하는 응력과 크리프변형률이다. 이 편차성분의 응력과 변형률은 8면체 평면에서 다음과 같이 전단응력  $\tau_0$ 과 전단변형률  $\epsilon_0$ 로 표현된다.

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

$$\epsilon_0 = \frac{1}{3} [(c_1 - c_2)^2 + (c_2 - c_3)^2 + (c_3 - c_1)^2]^{1/2} \quad (10)$$

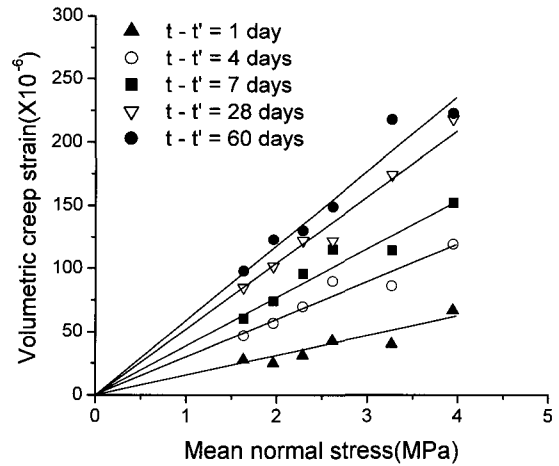
식 (9)로 표현되는 8면체 평면의 전단응력은 8면체 평면에서 수직응력 벡터와 traction 벡터의 차에 의해 계산되는 전단응력 벡터의 크기이며, 편차응력의 두 번째 불변량(second invariant)  $J_2$ 와 비례한다.

Fig. 8은 각 배합의 콘크리트에 대한 체적성분의 응력과 크리프변형률 하중을 가한 후 1, 4, 7, 28일 그리고 마지막 측정 재령에서 나타난 것이다. 체적성분의 응력은 식 (5)로부터 계산되었고 변형률은  $(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)$ 의 값이다. 실험체에 가해지는 9 가지의 응력조합에서 같은 체적응력을 받는 실험체의 경우는 평균하여 나타내었다. 체적성분의 응력과 변형률은 선형의 관계가 있음을 보여주고 있으며, 시간이 지나도 선형의 관계를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 실험체에 가해지는 다축응력의 조합이 서로 다른 경우에도 체적성분의 응력과 변형률은 일정한 관계를 갖는다는 것을 의미한다.

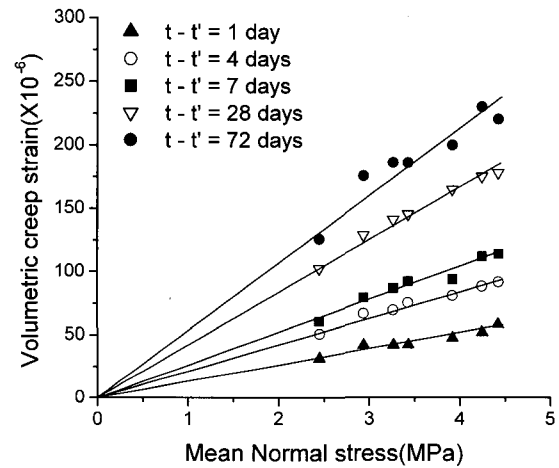
Fig. 8(a)의 경우 Fig. 8(b)보다 큰 변형률이 발생하였고, Fig. 8(c)의 경우는 변형률이 가장 작았다. 이는 콘크리트강도가 증가함에 따라 체적탄성계수(bulk modulus)가 증가하기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 각 콘크리트에 대한 편차성분의 응력과 크리프변형률의 관계이다. 9가지의 응력조합 중 같은 편차응력을 받는 실험체에 대해서 평균하여 나타내었다. Fig. 8과 같이 편차성분의 경우도 응력과 크리프변형률은 선형의 관계를 보였다. 다축응력의 조합에 관계없이 편차성분의 응력과 변형률도 일정한 관계가 있음을 알 수 있다.

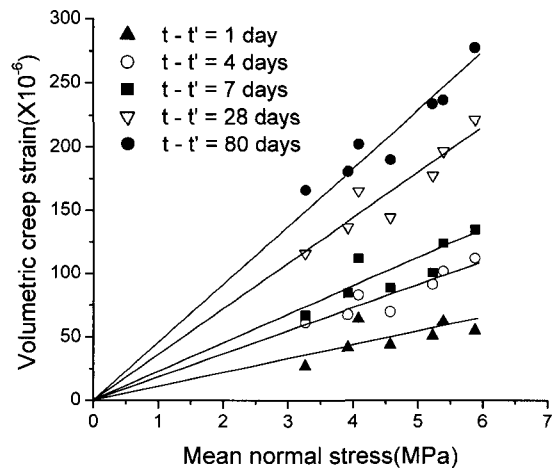
Fig. 9(a), (b), (c)에서 강도의 증가에 따라 시간에 따른 편차성분 변형률의 크기는 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 전단 탄성계수가 강도 증가와 함께 증가하기 때문으로 판단된다.



(a) CI



(b) CII



(c) CIII

Fig. 8 Relationship between volumetric stress and volumetric creep strain

세 가지 콘크리트에 대해 체적성분과 편차성분의 응력과 크리프변형 사이에는 선형의 관계를 보였으며, 임의의 응력상태에서  $i$  방향의 크리프변형률은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_v}{3K_c} + \frac{\sigma_{di}}{2G_c} \quad (11)$$

여기서,  $K_c$ 는 크리프변형에 대한 체적탄성계수이고,  $G_c$ 는 전단탄성계수이다. 다축 응력상태에서 크리프푸아송비는  $K_c$ 와  $G_c$ 의 관계로부터 계산될 수 있다. 이 연구에서 실험으로 평가된 푸아송비는 응력상태에 따른 특정한 경향이나 관계를 나타내지 않았다. 이는 체적성분의 응력과 크리프변형률 그리고 편차성분의 응력과 크리프변형률이 선형관계에 있기 때문인 것으로 판단된다.

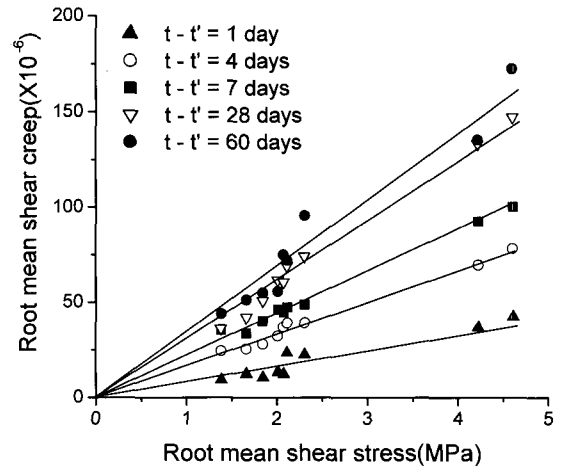
체적성분과 편차성분의 응력과 크리프의 관계는 다축응력 상태의 콘크리트 크리프 현상을 합리적으로 설명하고 있는 것으로 판단된다. 이를 기초로 구한 크리프푸아송비와 유효푸아송비 또한 콘크리트의 전체적인 변형 특성을 보여주고 있다.

그러나 이러한 분석방법으로는 각 방향으로 작용하는 응력의 상대적인 크기에 따라 각 방향의 유효크리프푸아송비가 다른 경우에 대해서 고려하기 어렵다. 또한 크리프푸아송비의 시간에 따른 증가 또는 감소 경향을 판단하기가 어려웠다. 특히 앞에서 언급했던 기존의 크리프에 관한 실험결과들이 서로 차이를 나타내고 있으며, 이러한 문제점들을 명확히 규명하기 위해서 새로운 분석방법이 요구된다.

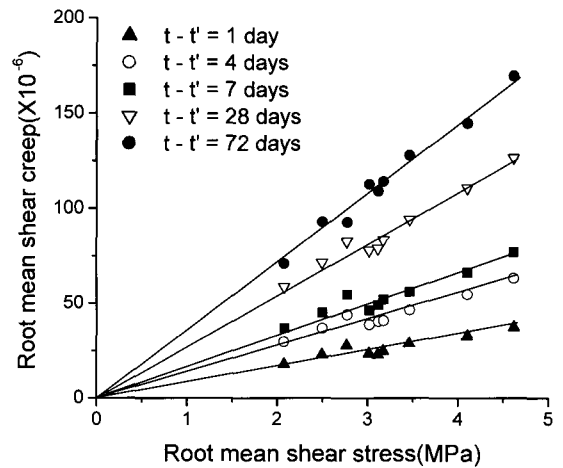
## 5. 결 론

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

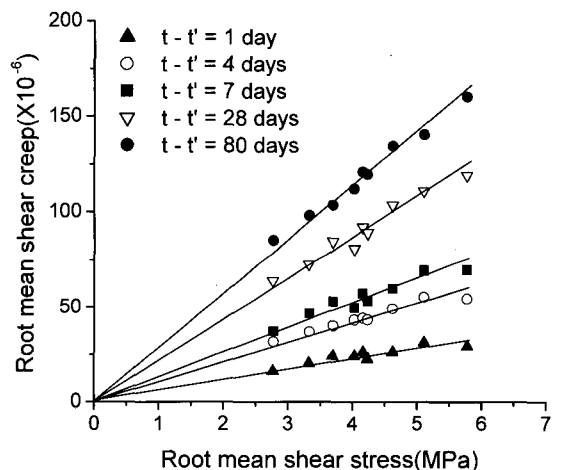
- 1) 각 콘크리트에 대한 초기 가압시점의 푸아송비와 크리프푸아송비 그리고 유효푸아송비는 근사적으로 같은 값을 나타내었다. 그리고 초기 가압시점의 푸아송비와 유효푸아송비는 강도의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 크리프푸아송비는 응력상태에 따라 특정한 경향을 나타내지 않았다.
- 3) 체적성분의 응력과 크리프변형률 그리고 편차성분의 응력과 크리프변형률은 선형의 관계로 나타났으며, 시간에 따라서 선형의 관계가 유지되었다.
- 4) CI, CII, CIII 콘크리트에 대한 유효푸아송비의 평균 값은 각각 0.169, 0.188, 0.189이었다.



(a) CI



(b) CII



(c) CIII

Fig. 9 Relationship between deviatoric stress and deviatoric creep strain



## 감사의 글

이 연구는 과학재단의 목적기초연구 지원(1999-2-310-002-3)과 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가지정 연구실 사업(National Research Lab)의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

## 참고문헌

1. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures," *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1*, ACI 209 R-92, 2003.
2. CEB-FIP Model Code, "Time effects," Comite Euro-International Du Beton, 1990, pp.51~59.
3. Bazant, Z. P. and Baweja, S., "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures model B3," *Materials and Structures*, Vol.28, 1995, pp.357~365.
4. 김진근, 권승희, "특집-CFT 과거·현재 그리고 미래," *강구조학회지*, 제14권, 2호, 2002, pp.44~50.
5. 김진근, 양은익, "매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 영향 요인," *콘크리트학회지*, 제9권, 3호, 1997, pp. 15~23.
6. Glanville, W. H. and Thomas, F. G., "Further investigations on the creep of flow of concrete under load," *Building Research Technical Paper*, No.21, London, H.M.S.O., 1929, 44pp.
7. 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.
8. L'Hermite, R., "Que savons-nous de la deformation plastique et du fluage bu beton?," *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Public*. Vol.10, No.117, 1957, pp.778~809.
9. 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.
10. 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.
11. Polivka, M., Pritz, D. and Adams, R. F., "Studies of creep in mass concrete," *Symposium on mass concrete*, American Concrete Institute, Detroit, 1963, SP-6, pp.257~283.
12. 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.
13. Hannant, D. J., "Strain behaviour of concrete up to 95 °C under compressive stresses," *Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels*, Institute of Civil Engineering, London, 1967, pp. 177~191.
14. 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.
15. Gopalakrishnan, K. S., Neville, A. M., and Ghali, A., "Creep Poisson's ratio of concrete under multiaxial compression," *Journal of the American Concrete Institute*, Vol.66, No.66, 1969, pp.1008~1019.
16. Jordaan 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.
17. Jordaan 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.
18. Neville, A. M., Dilger, W. H., and Brooks, J. J., "Creep under Different States of Stress," *Creep of plain and structural concrete*, Construction Press, London and New york, 1983, pp.120~128.
19. Neville, A.M., "Elasticity, Shrinkage, and Creep," *Properties of Concrete-Fourth Edition*, Jhon Wiley & Sons, 1996, pp.412~481.

---

## 요 약

콘크리트의 크리프에 관한 기존의 연구결과들은 대부분 1축응력이 가해지는 경우에 대한 것으로 콘크리트 구조물 또는 부재가 다축응력 상태에 놓이는 경우에 적용하기가 어려운 점이 있다. 따라서 다축응력 상태의 콘크리트 크리프 특성에 관한 연구가 필요하다. 이 연구에서 다축응력 상태에 놓인 콘크리트의 크리프 특성을 실험을 통해 파악하였다. 세 가지 서로 다른 강도를 갖는 배합의 콘크리트에 대해 각각 9개의 실험체를 제작하였으며, 1축, 2축, 3축응력 상태에서 크리프 실험을 실시하였다. 하중이 가해지는 세 방향에서 시간에 따른 변형률을 측정하였다. 가압시점의 푸아송비와 크리프변형에 기인한 푸아송비 그리고 탄성변형과 크리프변형에 기인한 푸아송비를 구하였으며, 각 콘크리트에 대한 세 가지 푸아송비는 근사적으로 같은 것으로 나타났다. 가압시점의 푸아송비와 전체 변형에 대한 푸아송비는 콘크리트 강도의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며, 각 푸아송비는 응력상태에 따라 특정한 경향을 나타내지 않았다. 체적성분의 응력과 크리프변형률, 편차성분의 응력과 크리프변형률은 선형의 관계를 나타내었다.

**핵심용어 :** 다축응력 상태, 크리프, 푸아송비, 실험

---