

## 물유리계 약액을 이용한 사질고결토의 점탄성 계수 산정에 관한 연구 A Study on the Estimation of Viscoelastic Coefficients on Silicate Grouted Sands

강희복<sup>1)</sup>, Hee-Bog Kang, 김종렬<sup>2)</sup>, Jong-Ryeol Kim, 황성원<sup>3)</sup>, Sung-Won Hwang

<sup>1)</sup> 여수한영대학 토목과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyeong College

<sup>2)</sup> 전남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonnam University

<sup>3)</sup> 전남대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonnam University

**SYNOPSIS** : The objective of this study is to investigate the behavior of Visco-Elasto-Plastic materials of Silicate Grouted Sands due to external load. Uniaxial compression strength of silicate grouted sands was increased accordingly with curing time, but it was almost unchanged after 7days. A series of uniaxial compression creep tests were performed for  $\sigma/\sigma_f = 8\%, 16\%$  and  $24\%$ . The tested Silicated Grouted Sands exhibits three types of strains : elastic, plastic, viscoelastic. It is seen that the magnitude of the instantaneous recoverable strains  $\epsilon_r(t)$  is approximately independent of the unloading time. In this tests, The total creep strains( elastic, plastic, viscoelastic) are proportional to the stress level. Based on the constant creep test results, relationships between the time and the creep compliance are developed.

**Key words** : Creep Compliance, Visco-Elasto- Plastic, Silicate Grouted Sands

### 1. 서 론

최근 고속철도, 지하철, 댐, 연약지반개량, 항만건설 등 대형공사가 진행되면서 약액주입공법의 사례가 증가하고 있다. 차수목적이나 기존구조물의 지반보강을 위한 시공의 경우 일정한 하중이 지속적으로 재하 되면 시간의 경과와 더불어 변형이 증가되어 결국 파괴에 이르게 되는데 이러한 시간 의존 거동은 크리프 현상에 기인 된다고 할 수 있다. 국내에서는 유(1988)가 삼축 크리프 시험을 실시하여 물유리계 약액을 주입한 고결토는 현저한 점탄성, 점소성의 성질을 나타내며 유변학적 모델은 vyalov모델로 표현됨을 밝혔다. 그러나 지금까지의 연구는 일반적으로 적용응력비 50%이상에서 주로 실험이 이루어져 비선형적인 거동을 보임에 따라 실험에서 구한 총 변형률(탄성, 소성, 점탄성, 점소성)의 각 성분을 파악하는데는 어려움이 있는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 적용응력비 30%이하( $\sigma/\sigma_f = 8\%, 16\%$  과  $24\%$ )의 낮은 응력에서 재하/제하 시험을 통해 응력과 변형률, 시간과의 상관관계를 분석하고 이로부터 물유리약액을 이용한 사질 고결토의 점탄성 계수를 결정하였으며 지수함수에 의한 크리프 예측모델 과 일반화된 예측모델을 제시하였다. 또한 약액으로 보강된 지반에 일정한 하중이 주기적으로 반복 재하될 경우에 대해 반복재하 크리프 시험을 실시하였으며 실험값과 예측식을 비교 분석하였다.

### 2 Creep 이론

#### 2.1.1 기본모델

점탄성을 특성화 하는 모델은 일반적으로 그림 1의 Maxwell model 과 그림 2의 Kelvin model을 조합하여 점탄성거동을 예측한다.

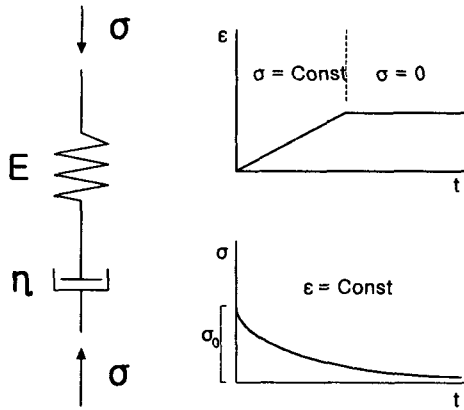


그림 1. Maxwell model

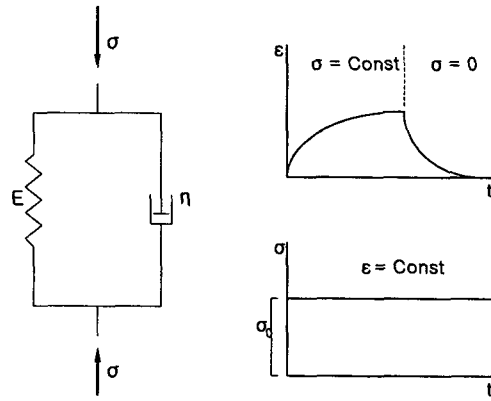


그림 2. Kelvin-Voigt model

### 2.1.2 크리프 변형(재하/제하)

일반적으로 압축크리프 시험은 일정한 응력하에서 단일 재하/제하 에서부터 반복 재하/제하등의 실험을 통하여 재료의 시간의존거동을 파악하게 된다. 그림 3은 가장 간단한 재하/제하 프로그램을 나타낸 것으로 하중조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 t \leq 0, \sigma_q(t) &= 0 \\
 0 < t \leq t_1, \sigma_q(t) &= \sigma_0 \\
 t > t_1, \sigma_q(t) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서  $\sigma_0$  는 적용응력 이다

그림에서 하중 제거 시간을  $t_1$ 이라 하면 크리프 변형률은  $\epsilon_c(t)$ ,제거시 측정된 변형률  $\epsilon_r(s)$ , 그리고 제거 즉시 회복된 변형률은  $\epsilon_r(s)$ 로 표시할 수 있다. 여기서  $s=t-t_1$  이다.

만약,  $t=s$  에 대해  $\epsilon_r(s)$  와  $\epsilon_c(t)$  의 변형률 값이 같다면

$$\text{즉, } \epsilon_r(s, \sigma_0) = \epsilon_c(t, \sigma_0) \quad t=s \text{에 대해}$$

이러한 재료는 선형 점탄성재료 이며 이 경우 완전 회복 되는 탄성과 시간의존적인 점성, 점탄성은 존재하나 소성은 존재하지 않는다. 크리프 변형에 대해 볼츠만의 선형 중첩의 원리를 적용하여 적분형태로 나타내면 다음식과 같다.

$$\epsilon(t, \sigma_0) = \int_{-\infty}^t J(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \tag{2}$$

여기서,  $J(t)$ 는 시간에 따른 크리프 컴플라이언스이며 시간만의 함수이다. ( $\tau \geq t_1$ ). 또한, 식 (2)를 미분형태로 나타내면 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$p_0\sigma + p_1 \frac{d\sigma}{dt} + p_2 \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \dots = q_0\varepsilon + q_1 \frac{d\varepsilon}{dt} + q_2 \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \dots \quad (3)$$

여기서  $p_0, p_1, p_2$  와  $q_0, q_1, q_2$ 는 재료상수이다.  
그림 4는 반복재하 크리프 시험의 시간-변형을 관계를 나타낸 것이다.

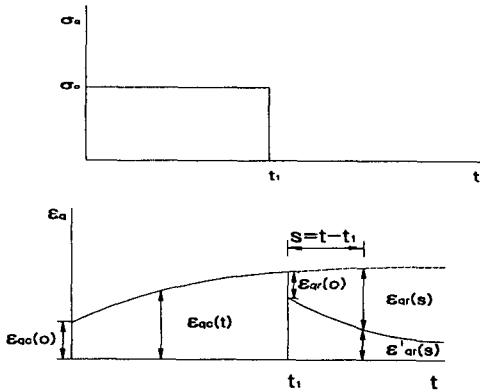


그림 3. 시간-변형률 관계  
(단일재하 크리프시험)

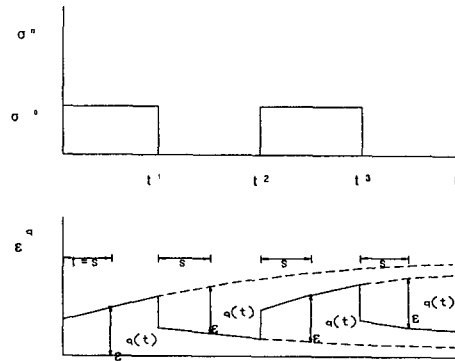


그림 4. 시간-변형률 관계  
(반복재하 크리프 시험)

### 3 실험

#### 3.1 시료

실험에 사용된 주문진사의 물리적 특성은 다음과 같다.

표 1 주문진사의 물리적 성질

시료 특성	$G_s$	$W_n$ (%)	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	$e_{max}$	Grain Size Distribution				
					$D_{60}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	#200 (%)	$C_u$
주문진사	2.67	0.2	15.78	0.80	0.5	0.31	0.065	22.9	7

#### 3.2 실험방법

##### 3.2.1 시편제작

공시체의 성형은 표2에 나타낸 바와 같이 A액(물유리 + 물)과 B액(경화제 + 물)의 체적비가 1:1이 되도록 한 다음 주문진사 320g에 A,B액을 혼합하여 pvc 몰드(직경 5.15cm, 길이 10.3cm)에 자유낙하시켜 넣은후 균질한 샘플이 되도록 cap의 자중으로 일정한 하중을 가하였으며 1시간 경과후 추출하여 양생하였다. 제작된 몰드는 사진1에 보는 바와 같다.

표 2 공시체의 성형에 사용된 배합비

공시체 종류	중량과 부피에 따른 배합비	A액 (물유리 수용액)		B액 (시멘트 현탁액)		
		물유리	물	시멘트	벤토나이트	물
배합 A	중량비(g)	40	15	20	2	43
	부피비(cm <sup>3</sup> )	35	15	6.35	0.33	43
배합 B	중량비(g)	60	10	20	2	30
	부피비(cm <sup>3</sup> )	53	10	6.35	0.33	30

### 3.2.2 실험장치 및 실험방법

그림5는 자체 제작한 크리프 시험장치이며 변형률 측정은 공시체 측면에 120°간격으로 3개의 Strain Gage를 부착하여 Data Logger (UCAM-5A)에 의해 측정한 후 컴퓨터로 연결하여 결과를 자동 저장하였다. 실험은 점·탄소성 특성을 파악하기 위해 시편에 대해 일정재하시험과 10분 반복재하/제하시험을 실시하였다. 적용응력비는 파괴하중의 8%,16%,24%의 3단계를 실시하였으며 온도와 습도에 대한 크리프 영향을 줄이기 위해 실험실 온도와 습도는 일정하게 유지하였다.

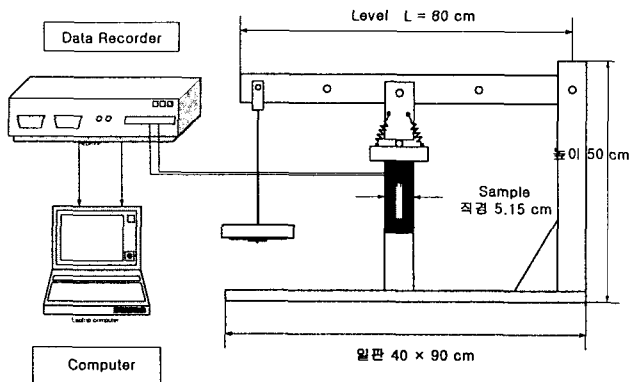


그림 5. 크리프 시험장치

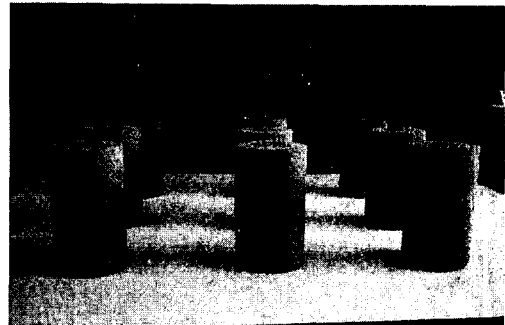


사진 1. 성형된 공시체

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 시간-변형률 관계

#### 4.1.1 단일재하 크리프 시험

많은 연구결과에 의하면 크리프 시험시 재하 응력비를 파괴강도의 40%이하에서는 파괴가 일어나지 않으며 선형거동을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 일축압축강도를 구한후 파괴강도의 30%이하에서의 응력수준을 적용하여 사질고결토의 점탄성 거동을 예측하고 점탄성계수를 구하고자 하였다. 그림 6은 양생기간과 일축압축강도의 관계이며 표 3은 크리프 시험시 단계별 적용응력비를 나타낸다. 그림 7은 배합 A 시료의 30분과,60분 재하에 따른 시간-변형률 관계를 도시한 것이며 그림 8은 배합B 시료의 크리프 시험 결과이다.

표 3. 단계별 적용응력

공시체 종류	적용응력 단계		
	1단계 (8%)	2단계 (16%)	3단계 (24%)
배합 A	0.29 kg/cm <sup>2</sup>	0.58 kg/cm <sup>2</sup>	0.87 kg/cm <sup>2</sup>
배합 B	0.48 kg/cm <sup>2</sup>	0.96 kg/cm <sup>2</sup>	1.44 kg/cm <sup>2</sup>

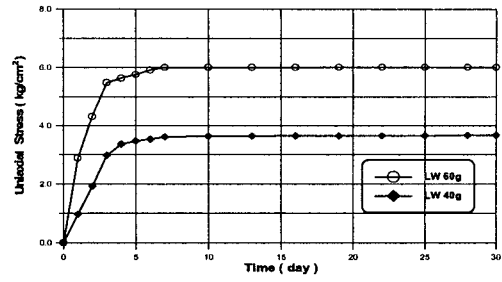
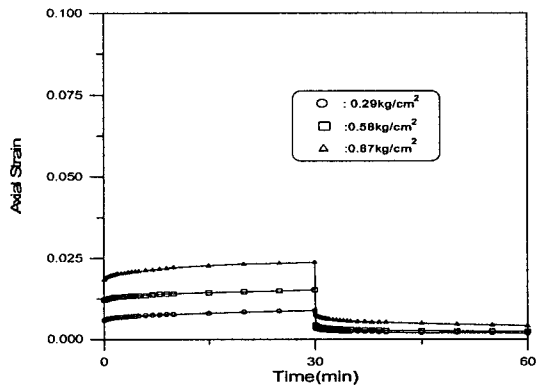
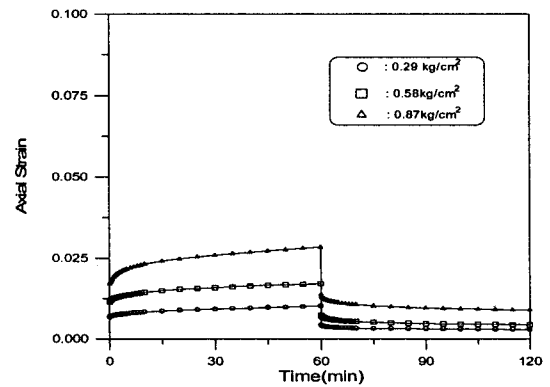


그림 6. 양생과 일축압축강도 관계

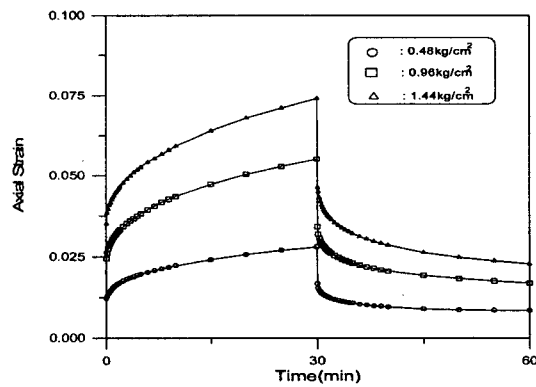


(a) 30분 재하/제하

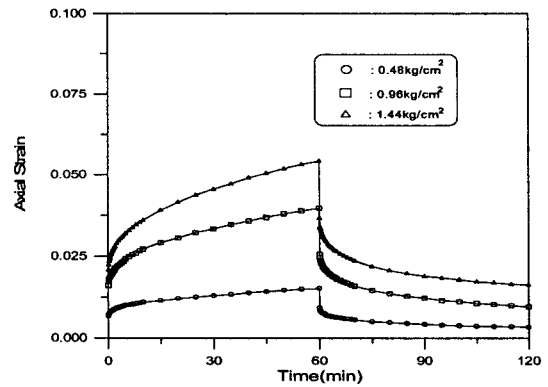


(a) 60분 재하/제하

그림 7. 배합 A 시료의 시간- 변형률 관계



(b) 30분 재하/제하

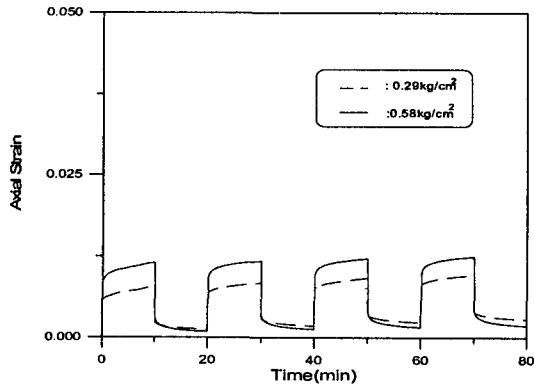


(b) 60분 재하/제하

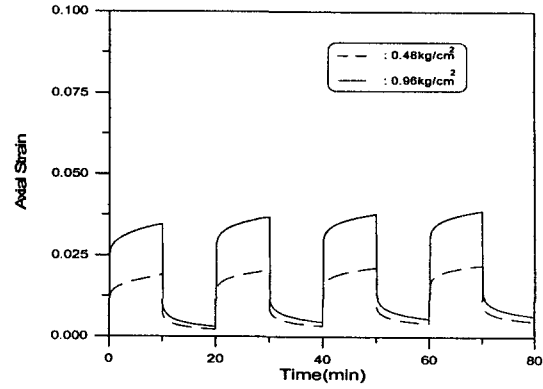
그림 8. 배합 B 시료의 시간- 변형률 관계

#### 4.1.2 반복재하 크리프 시험

그림 9는 일축압축강도의 8% 와 16% 의 응력을 재하하여 10분 간격으로 반복과 제하를 80분 동안 실시하여 시간에 따른 변형률을 도시한 것이다.



(a) 배합 A



(a) 배합 B

그림 9. 반복재하 크리프시험의 시간- 변형률 관계

## 4.2 탄, 소성 변형률

그림 11은 응력수준에 따른 재하시 탄성변형률  $\epsilon_c(0)$ 과 재하시 회복변형률  $\epsilon_r(0)$ 과의 관계를 도기한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 하중제거( $t_1=0$ )즉시 측정된 회복변형률은 재하 즉시 발생하는 순간변형률 보다 적으며 이는 소성 변형률이 존재함을 의미한다. 소성변형률( $\epsilon_p$ )의 크기는 다음 식으로 계산하였다.

$$\epsilon_p = \epsilon_c(0) - \epsilon_r(0) \quad (4)$$

여기서

$\epsilon_p$ : 소성변형률,  $\epsilon_c(0)$ : 응력재하직 후 크리프 변형률(=  $\epsilon_e$ )

$\epsilon_r(0)$ : 응력제하 직후 회복변형률

이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 응력수준이 증가함에 따라 탄성변형률과 소성변형률이 증가하고 있으며 탄성변형률에 비해 하중제거시 완전 회복되지 못하는 소성변형률이 일부 존재하며 탄성, 소성변형률은 응력에 비례하여 증가됨을 알 수 있다. 그림 12는 반복재하시험의 재하 시간과 회복변형률 관계로서 회복된 변형률은 하중제거 시간과 무관함을 알 수 있었다.

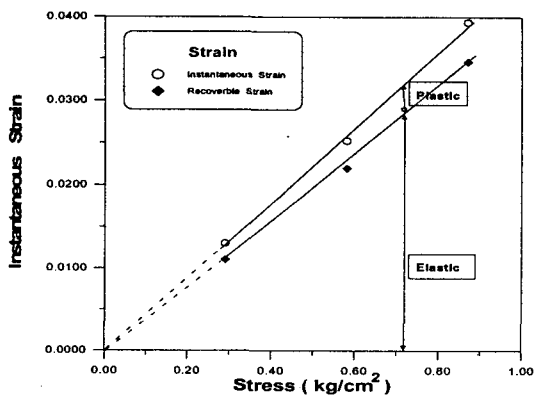


그림 11. 탄소성변형률과 응력관계

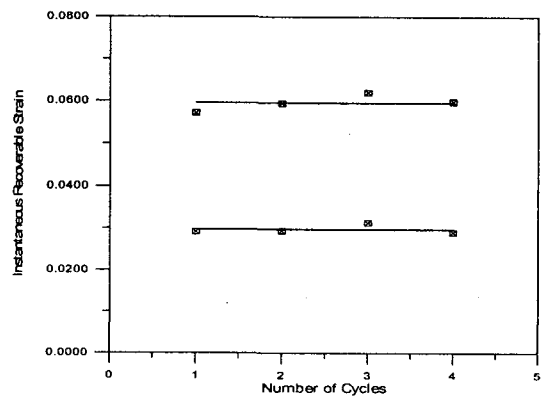


그림 12. 재하시간과 회복변형률 관계

### 4.3 점탄성계수 산정

creep compliance,  $J(t)$ 는 식(5)로 구하였으며, 점탄성계수는 successive residual method를 이용하였다.

$$J(t) = \frac{\epsilon_c(t)}{\sigma_0} \quad (5)$$

여기서  $J(t)$ : creep compliance,  $\epsilon_c(t)$ : 크리프 변형,  $\sigma_0$ : 적용응력 이다

표 4는 대표적인 배합 A시료의 60분 재하에 따른 점탄성 계수를 산정한 것이며 표에서 보는 바와 같이 Maxwell model 1개와 Kelvin model 4개를 조합할 경우 상관계수가 0.95이상 이 되어 실험값과 잘 일치 하였으며 또한, 다음과 같은 지수함수식을 이용하여 구한 재료상수(a,b,c) 및 상관계수는 표 5에 나타내 었다.

$$J(t) = a + b t^c \quad (6)$$

여기서 a,b,c는 상수이다.(  $a \geq 0$ ;  $b \geq 0$ ; 그리고  $0 \leq c \leq 1$ )

표 4. 배합 A 시료의 60분 재하시 산정한 점탄성계수

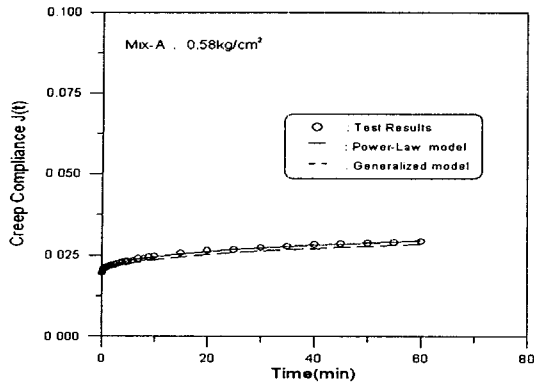
적용 응력 kg/cm <sup>2</sup>	점 탄 성 계 수									
	E <sub>0</sub> kg/cm <sup>2</sup>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	$\eta_0$ kg/cm <sup>2</sup> · min	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$
0.29	50.3	322.5	990.1	1010.1	1694.9	9984.8	3301.9	4294.1	1099.9	511.9
0.58	51.0	323.6	1020.4	1123.6	1086.9	13986.2	2925.3	7040.8	1033.7	213.0
0.87	53.4	333.4	1001.1	1112.1	1667.2	12372.8	3439.7	4310.0	1977.8	224.9

표 5. 지수함수에 의한 재료상수

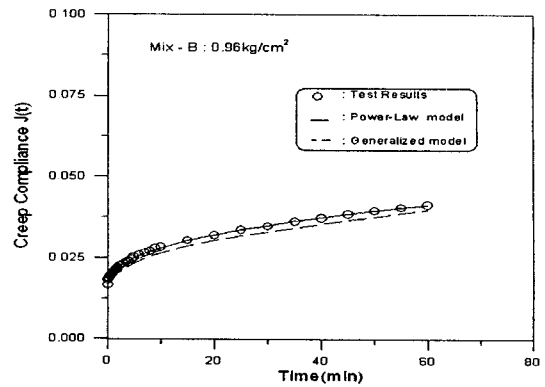
시 료	적용응력(kg/cm <sup>2</sup> )	J(t)=a + b t <sup>c</sup>			상관계수(R <sup>2</sup> )
		a	b	c	
배합 A	0.29	0.0199	0.00261	0.3816	0.9999
	0.58	0.0196	0.00303	0.3186	0.9998
	0.87	0.0187	0.00579	0.2301	0.9996
배합 B	0.48	0.0120	0.00157	0.3816	0.9999
	0.96	0.0167	0.00516	0.3945	0.9993
	1.44	0.0144	0.00475	0.3997	0.9998

### 4.4 크리프 예측

그림 13은 단일재하 크리프 시험의 2단계 재하시 측정된 변형률에 대해 지수함수 및 일반화된 모델 예 측식을 실험결과와 비교한 것으로 실험결과에 거의 근접함을 알 수 있다.또한, 그림 14는 반복재하 크리 프 시험의 실험결과와 예측치를 비교한 것으로 예측치와는 약 9%의 오차를 보이는 것으로 나타났다.

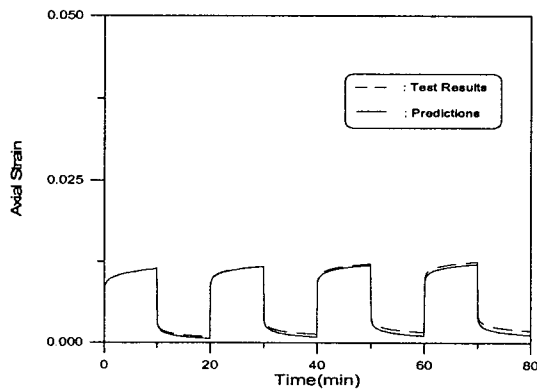


(a) 배합 A: 0.58kg/cm<sup>2</sup>

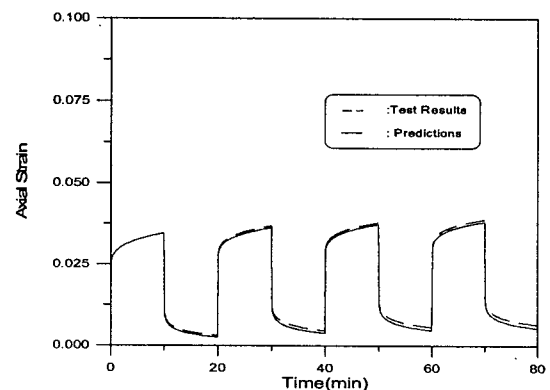


(b) 배합 B: 0.96kg/cm<sup>2</sup>

그림 13. 실험결과 와 예측모델 비교



(a) 배합 A: 0.58kg/cm<sup>2</sup>



(a) 배합 A: 0.96kg/cm<sup>2</sup>

그림 14. 반복재하 시험의 실험결과와 예측모델 비교

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사질고결토의 크리프 변형은 시간이 지속되면서 증가되는 시간의존적임을 알 수 있으며 탄성변형률과 소성변형률 그리고 점탄성변형률은 응력 증가에 따라 비례하여 증가한 것으로 나타났다.
2. 반복재하 크리프 시험결과 회복된 변형률은 하중 제거 시간  $t_1$ 에 무관하며 점탄성 계수 산정 결과 Maxwell model 1개와 Kelvin model 4개를 조합할 경우 상관계수가 0.95이상으로 실험결과에 거의 근접함을 알 수 있었다.
3. 단일재하 크리프 시험에서 Creep compliance에 대한 지수함수와 일반화된 예측모델은 실측값과 잘 일치한다. 따라서 하중제거 이후의 임의의 시간에 대한 크리프 변형률을 유추할 수 있으며 반복재하 시험의 경우 예측모델을 제시하였다.

## 참고문헌

1. 이종규(1981) “점토의 크리프거동에 관한 류변학적 연구”, 공학 박사 학위 논문, 서울대학교
2. 유재일(1988) “물유리계 약액에 의한 사질고결토의 공학적 특성에 관한 실험적 연구”, 공학 박사 학위 논문, 한양대학교
3. Abdulshafi, A.H. and K. Majidzadeh(1984). “Combo viscoelastic-plastic modeling and rutting of asphalt mixtures”. *Transt.Res.Rec.968, Transp. Res. Board*, Washington, D.C., pp.19-31