

세립분 함량을 고려한 동결 사질토의 장기변형 예측 모델 평가

황범식* · 채덕호** · 조완제***

Hwang, Bumsik*, Chae, Deokho**, Cho, Wanjei***

Evaluation of Long-Term Deformation Prediction Model on Frozen Sand Considering Fine Contents

ABSTRACT

Many countries are interested in the development of the Antarctic area because of the abundant resources and living things of high research value. Korea completed the second Antarctic research station in 2014 and spurring the development of the Antarctic area by constructing runway for the airplanes and a third Antarctic research station. However, frozen soils, unlike typical soils, are sensitive to creep behavior due to the influence of ice and unfrozen water. The creep tests for evaluating creep behaviors on the frozen soils require expensive laboratory equipments and large amount of time. Thus, various empirical models had been developed to describe the unconfined compressive creep behavior of frozen soils. In this study, new analytical creep model on frozen sands was proposed by modifying Ting's Tertiary creep model with a new parameter considering fine contents. Thus, the unconfined compressive creep tests were conducted with the frozen specimens of dense Jumoonjin sand with fine contents of 0, 5, 10 and 15% under various loads at -5°C , -10°C and -15°C . Consequently, the modified Tertiary creep model with a new parameter for fine contents are not enough for the description of the actual creep behavior of the frozen sand and new framework should be developed.

Key words : Frozen soils, Creep behavior, Fine contents, Tertiary creep model

초 록

남극 대륙은 연구가치가 높은 다양한 생명체들과 풍부한 자원이 매장되어 있어 세계의 많은 국가들이 남극 개발에 관심을 가지고 있다. 우리나라는 2014년 제2의 남극과학기지인 장보고 과학기지를 준공한데 이어 남극 활주로 건설과 제3의 남극 과학기지 건설을 준비하며 남극 개발에 박차를 가하는 중이다. 하지만 동토의 경우 일반적인 흙과는 달리 얼음과 부동수분의 영향으로 시간에 따른 변형이 크게 나타나기 때문에 크리프 변형 특성을 파악할 필요가 있다. 그러나 크리프 변형 특성을 파악하기 위한 시험의 경우 많은 비용과 시간이 소모되기 때문에 예전부터 동토의 크리프 거동을 추정할 수 있는 모델에 대한 연구들이 많이 진행되어 왔으며, 본 연구에서는 동결 사질토의 함빙비를 고려한 장기변형 모델인 Ting의 Tertiary creep model의 모델 도출 방법에 세립분 함량을 고려할 수 있는 계수를 추가하여 다양한 흙에 적용할 수 있는 크리프 모델을 제안하고자 하였다. 이를 위해 세립분 함량이 0, 5, 10, 15%인 동결 시료로 -5 , -10 , -15°C 의 온도에서 일축 크리프 시험을 수행하였고, 시험 결과를 바탕으로 세립분 함량을 고려한 장기변형 예측 모델을 제안하였다. 그 결과, Tertiary creep model의 모델 도출 방법만을 사용하여 세립분 함량을 고려한 장기변형 예측 모델을 제안하는 것은 무리가 있는 것으로 판단되어 동토의 크리프 변형을 고려하기 위한 새로운 개념의 모델이 필요할 것으로 판단된다.

검색어 : 동토, 크리프 거동, 세립분 함량, Tertiary creep model

* 종신회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Dankook University · hbs6700@naver.com)

** 종신회원 · 한국철도기술연구원 선임연구원 (Korea Railroad Research Institute · Chaedho@etri.re.kr)

*** 종신회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (Corresponding Author · Dankook University · jei0421@dankook.ac.kr)

Received October 26, 2015/ revised March 2, 2016/ accepted November 11, 2016

1. 서론

남극 대륙은 지구 표면적의 약 9.3%를 차지할 만큼 거대하며 연구가치가 높은 다양한 생명체들과 풍부한 자원이 매장되어 있어 세계의 많은 국가들이 남극 개발에 관심을 가지고 있다. 하지만 1998년에 발효된 남극환경보호의정서에 따라 2048년까지는 아무도 영유권을 주장할 수 없으며, 현재 남극에는 남극조약에 가입한 36개국만이 연구 기지를 운영하고 있다. 그 중 2개 이상의 상설기지를 보유한 국가는 우리나라를 포함한 미국, 러시아, 중국 등 10개국 밖에 되지 않으며, 다가오는 2048년을 앞두고 주도권 경쟁이 치열하다. 우리나라는 제2의 남극과학기지인 장보고 과학기지 준공 이후 남극 횡주로 건설과 제3의 남극 과학기지 건설을 준비하며 남극 개발에 박차를 가하는 중이다.

하지만 영구동토지역에서 토목구조물의 설계는 국내 및 현재 진출해 있는 다른 지역과 매우 다른 공학적 문제점들을 수반할 수 있기 때문에 기존의 토질역학 이론들을 그대로 동토에 적용하는 것은 무리한 결과를 초래할 수 있다. 동토는 흙, 공극, 부동수분, 얼음의 4상 구조를 가지고 있어 그 공학적 거동이 일반적인 흙과는 다른 응력-변형-시간 거동을 나타낸다. 특히 동토는 시간에 따른 변형이 크게 나타나기 때문에 시간변형 특성인 크리프 변형 특성을 파악할 필요가 있다. 그러나 동토의 크리프 특성 파악을 위한 크리프 시험의 경우 고가의 장비들이 필요하며, 장시간의 시험 시간이 소요되기 때문에 많은 연구자들이 동토의 크리프 거동을 추정할 수 있는 모델에 대한 연구를 진행해 왔다.

앞서 수행되어진 연구로는 1960년대 동토의 크리프 거동 특성을 반영한 Vyalov (1963)의 Primary creep model을 시작으로 Singh and Mitchell (1968), Ladanyi (1972), Sayles and Haines (1974), Andersland and Anderson (1978) 등에 의해 다양한 모델들이 제시되어 왔지만 각각의 모델들은 적용성에 제한을 가지며 모든 크리프 단계를 나타낼 수 있는 통일된 방법을 제시하지 못하였다. 반면, 1980년대 Ting (1983)은 기존의 Assur (1979)가 제안한 얼음의 크리프 모델을 발전시켜 MFS (Manchester Fine Sand) 동토에서 일축 크리프 시험을 실시하여 함량비에 따른 모든 단계의 크리프 거동을 나타낼 수 있는 경험적인 일축 크리프 모델(Tertiary creep model)을 제안하였다. 함량비란 동결토에 포함된 얼음의 양을 나타내는 지표로 사용되며, 동결토에 포함된 총 수분에 대한 얼음의 양을 질량비로 나타낸 것이다(Andersland and Ladanyi, 2004). Ting (1983)의 크리프 모델은 매우 간단하며 모든 크리프 구간을 비교적 정확하게 모사할 수 있다는 점에서 의의가 있으나, 그 적용성이 MFS 동토에 한정되어 있어 흙의 종류가 달라질 경우 새로운 시험을 수행하여 새로운 모델을 만들어야 한다는 단점이 있으며, 아직 흙의 종류에 따른 장기 변형 예측 모델에 대한 연구는 세계적으로 전무한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 장기변형 예측 모델인 Ting (1983)의 Tertiary creep model의 기본형태 및 입력정수 도출 방법에 세립분 함량을 고려할 수 있는 계수를 추가하여 다양한 흙에 적용할 수 있는 동토의 장기 변형 예측 모델을 제안하고자 하였다. 이를 위해 주문진 표준사에 카올리나이트를 0, 5, 10, 15%로 혼합한 포화 시료를 제작하여 -5, -10, -15°C의 온도에서 각각 크리프 시험을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 세립분 함량을 고려한 장기 변형 예측 모델을 제작하여 실제 크리프 시험 값과 비교해보고, 새로 제작된 모델의 적용성을 평가하였다.

2. 문헌연구

2.1 동토의 크리프 거동

동결시료가 하중을 받게 되면 즉각적으로 발생하는 변형과 시간에 따른 변형이 발생되며, 하중이 매우 큰 경우에는 극한하중이

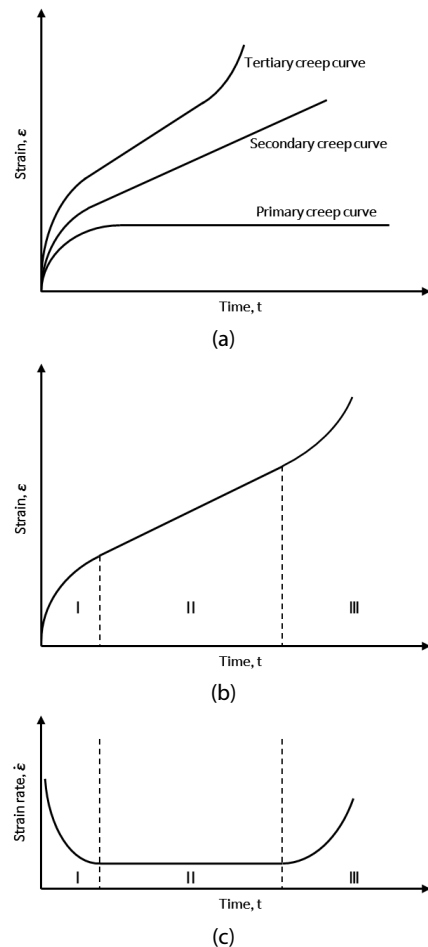


Fig. 1. Constant-Stress Creep Test: (a) Creep Curve Variations, (b) Basic Creep Curve, (c) True Strain Rate Versus Time (Modified after Andersland and Ladanyi, 2004)

발휘될 것이다. Fig. 1(a)는 동토에서 발생하는 크리프 거동을 나타낸 그림이다. 동토에서 크리프 거동은 1차 크리프(Primary creep), 2차 크리프(Secondary creep), 3차 크리프(Tertiary creep)로 구분되며 1차 크리프는 순간 침하라고 하며 일정한 응력 상태에서 크리프 변형 속도가 시간이 경과함에 따라 감소할 때 나타나는 특성이다. 2차 크리프는 1차 크리프 이후 크리프 변형 속도가 시간이 경과함에 따라 일정하게 유지될 때 나타나는 특성이며, 3차 크리프는 2차 크리프 이후 크리프 속도가 시간이 경과함에 따라 증가할 때 나타나는 특성이다.

동토의 크리프 곡선은 온도, 재하되는 응력의 크기, 흙의 종류, 밀도 등에 영향을 받는다. Fig. 1(b)는 일정한 온도조건에서 일반적인 크리프 곡선을 나타낸 그림이며, 3종류의 크리프 거동을 명확히 구분하기 위해 시간에 따른 변형률 속도 곡선을 Fig. 1(c)에 나타내었다. 이러한 동토의 3가지 크리프 현상은 낮은 응력 상태이거나 시료의 포화도가 낮을 경우 2차 크리프 거동과 3차 크리프 거동이 발현되지 않는 경우가 발생하며, 포화도가 높은 세립질 흙에서는 1차 크리프 거동과 2차 크리프 거동만 발현되고 3차 크리프 거동은 발현되지 않을 수 있다. 또한 적절한 응력조건에서 포화도가 높은 시료에서는 1차 크리프 거동은 발현되지 않고 2차 크리프 거동만 발현된다(Ladanyi, 1972).

2.2 Tertiary creep model

동토는 얼음과 부동수분의 영향으로 시간에 따른 변형이 크게 나타나기 때문에 장기강도와 크리프 변형에 대한 거동 특성을 파악할 필요가 있다. 하지만 크리프 현상은 그 자체로 매우 복잡하며, 실험조건의 조성이 어렵고 시간이 매우 오래 걸리기 때문에 예전부터 많은 연구자들이 크리프 현상 자체를 간단한 수학적 형태로 나타내기 위해 노력해왔다. Ting (1983)은 기존의 모델을 발전시켜 MFS 동토에서 일축크리프 시험을 수행하여 모든 단계에서 동토의 시간-변형 거동을 나타낼 수 있는 경험적 일축 크리프 모델(Tertiary creep model)을 제안하였다. 본 절에서는 제시된 Tertiary creep model의 도출 과정을 Ting (1983)의 논문을 인용하여 간략히 설명하였다.

Eq. (1)은 Tertiary creep model의 기본 형태이며 이는 Assur (1979)에 의해 제안된 얼음의 크리프 모델과 유사한 형태를 나타낸다. 여기서 계수 A , m 과 β 는 경험적으로 결정되는 계수이며 t 는 시간을 말한다.

$$\dot{\epsilon} = Ae^{\beta t} t^{-m} \quad (1)$$

여기서, $\dot{\epsilon}$ 은 변형률 속도이며, Eq. (1)을 변형률에 대해서 적분할 경우 Eq. (2)의 직렬식으로 전개된다.

$$\epsilon = \epsilon_0 + [Ae^{\beta t} t^{1-m} S(t)] - [Ae^{\beta t_0} t_0^{1-m} S(t_0)] \quad (2)$$

여기서, ϵ 은 축 변형률이며, S 는 $m \neq 1, 2, 3 \dots$ 일 때 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$S = \frac{1}{1-m} - \frac{\beta t}{(1-m)(2-m)} + \frac{(\beta t)^2}{(1-m)(2-m)(3-m)} + \dots + \frac{(-1)^{i+1}(\beta t)^{i-1}}{\prod_{k=1}^i (k-m)} \quad (3)$$

$m = 1$ 일 때,

$$\epsilon = \epsilon_0 + A \left[\ln t + \frac{\beta t}{1 \times 1!} + \frac{(\beta t)^2}{2 \times 2!} + \dots \right] - A \left[\ln t_0 + \frac{\beta t_0}{1 \times 1!} + \frac{(\beta t_0)^2}{2 \times 2!} + \dots \right] \quad (4)$$

ϵ_0 는 0이 아닌 시작 시간 t_0 에서 변형률 이며 Eq. (1)에 시간 t_0 를 넣어주면 Eq. (5)와 같이 정리된다.

$$A = \frac{\dot{\epsilon}_0 t_0^m}{e^{\beta t_0}} \quad (5)$$

A 값의 단위는 $(time)^{m-1}$ 이며, 최소 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_m$ 에서 A 값은 Eq. (6)과 같다. t_m 은 최소변형률 속도에서의 시간이다.

$$A = \frac{\dot{\epsilon}_m t_m^m}{e^{\beta t_m}} \quad (6)$$

또한 변형률 속도가 최소일 경우, 변형률 속도를 미분한 Eq. (7)의 값이 0이 되므로, Eq. (8)과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\ddot{\epsilon}_m = Ae^{\beta t_m} t_m^{-m-1} (-m + \beta t_m) \quad (7)$$

$$m = \beta t_m \quad (8)$$

Eqs. (6), (7) and (8)을 결합하면 β 는 Eq. (9)와 같이 정리된다.

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}_m}\right)}{t_m \ln\left(\frac{t_m}{t_0}\right) + (t_0 - t_m)} \quad (9)$$

β 와 m 을 Eqs. (8) and (9)를 통해 구할 경우 Eqs. (5) and (6)을 통해 A 값을 구할 수 있게 되며 이러한 과정을 Fig. 2에 간단히 도식화 하여 나타내었다. 결국 Tertiary creep model에 사용되는 계수들을 결정하기 위해서는 시간-변형률 속도 곡선을 로그스케일로 나타내어야 하며, 0이 아닌 시작 시간(t_0), 이때의 변형률 속도($\dot{\epsilon}_0$), 시간-변형률 속도 곡선상의 최솟값에서 시간(t_m), 이때의 변형률 속도($\dot{\epsilon}_m$) 값을 결정해야한다.

일반적인 하중 조건에서 Tertiary creep model로 크리프 곡선을 예측하기 위해서는 네 가지 계수(ϵ_0 ; 초기변형률, $\dot{\epsilon}_0$; 초기변형률 속도, $\dot{\epsilon}_m$; 최소변형률 속도, t_m ; 변형률 속도가 최소인 시간)의

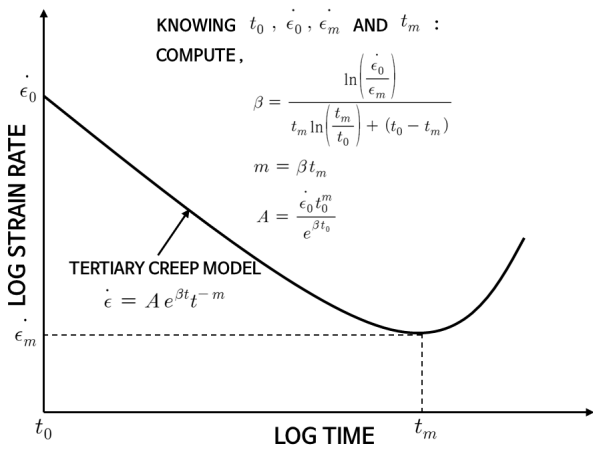


Fig. 2. Determination of Parameters for Tertiary Creep Model (Modified after Ting, 1983)

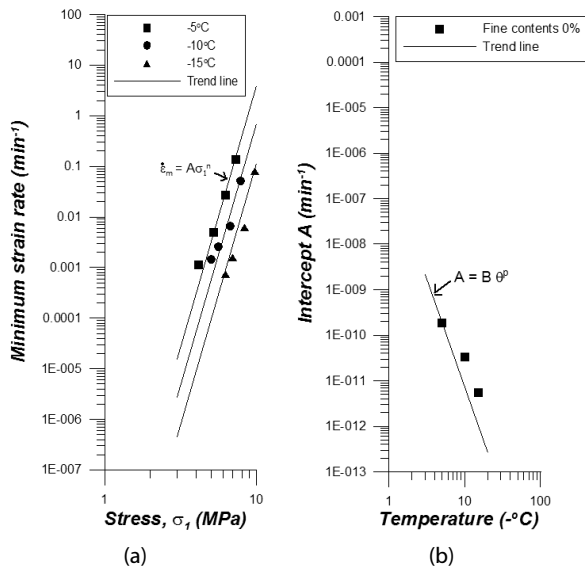


Fig. 3. Determination of Parameters A, B, n and p for Creep Model for Jumunjin Sand with 0% Fine Contents at Various Temperature

산정이 필요함을 앞서 언급하였다. 계수들을 산정하기 위해서는 Modified Rate Process Theory, 강도시험을 통한 극한강도법과 같은 다양한 방법들이 존재하나(Ting, 1981), Tertiary creep model에서는 응력비 기법(Stress ratio technique)을 적용하였다. 응력비 기법은 크리프 시험 데이터만을 사용하여 크리프 곡선의 예측에 필요한 계수들을 결정할 수 있기 때문에 다른 방법들에 비해 비교적 간단하고 편리한 방법이다.

응력비 기법의 적용을 위해 먼저 σ_c (reference stress)를 산정하여 앞서 언급한 Tertiary creep model의 계수인 $\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, t_m, \dot{\epsilon}_m$ 와 응력비(σ_1/σ_c)의 관계를 찾아야한다. 여기서 σ_1 은 현재의 응력을 말하며, σ_c (reference stress)는 Ladanyi (1972)의 Secondary creep model에서 정의한 정규화한 응력과 같은 의미이다. 최소변형률 속도를 예측하기 위해 최소변형률 속도와 응력, 온도 사이에 Eq. (10)과 같은 관계가 성립한다고 가정한다(Vyalov, 1963). 그 후, Fig. 3(a)에 나타난 각 온도에서 응력과 최소변형률 속도 사이의 관계를 통해 계수 A 와 n 을 결정하며, 온도에 따른 계수 A 의 관계를 나타낸 Fig. 3(b)를 통해 계수 B 와 p 를 결정할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_m = A \sigma_1^n = B \theta^p \sigma_1^n \quad (10)$$

결정된 계수 A, B, p, n 을 사용하여 σ_c 를 Eq. (11)을 통해 산정할 수 있다. 여기서, $\dot{\epsilon}_c$ 는 임의로 결정되는 정규화한 변형률 속도로서 본 논문에서는 1min^{-1} 을 적용하였다.

$$\sigma_c = B^{(-1/n)} (\dot{\epsilon}_c)^{(1/n)} \theta^{(-p/n)} \quad (11)$$

산정된 σ_c 를 통해 응력비(σ_1/σ_c)가 구해지면 Eqs. (10) and (11)을 통해 최소변형률 속도와 응력비의 관계를 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_m = \dot{\epsilon}_c \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right)^n \quad (12)$$

초기 응력비의 산정은 최소변형률 속도와와의 비교를 통해 최소제곱법의 오차가 최소인 응력비를 찾아야 한다. 이는 σ_c (reference stress)를 수정하는 과정을 반복하며 찾을 수 있고, 더 적합한 지수 n 값을 찾는 과정이다.

각 시험 데이터를 활용하여 응력비가 결정되면, Eqs. (13), (14) and (15)를 통해 응력비와 $\dot{\epsilon}_0, \epsilon_0, t_m$ 의 관계를 획득할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_0 = a e^b \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right) \quad (13)$$

$$\epsilon_0 = c + d \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right) \quad (14)$$

$$t_m = f \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right)^g \quad (15)$$

여기서, 계수 a, b, c, d, f, g는 최소제곱법을 통해 산정되는 값들이다. 또한 모델에 함빙비를 고려해 주기 위해서 각 함빙비에서 지수 n과 p의 평균값을 사용하여 응력과 온도와의 관계를 나타내었다. 그 결과, 절편 B는 함빙비(S_i)의 함수로 나타낼 수 있으며 이는 Eq. (16)과 같다.

$$B = C \exp \left(\frac{h}{S_i + j} \right) \quad (16)$$

여기서 계수 C, h, j는 반복 최소제곱법으로 구할 수 있다. 그 후, 온도와 함빙비 별로 초기에 산정한 응력비에 따른 최소변형률 속도와의 관계를 나타내어 σ_c (reference stress)와 최소변형률 속도를 예측할 수 있는 식을 만들 수 있다. Ting (1983)은 MFS 동토의 모든 크리프 시험 결과를 통해 응력비(σ_1/σ_c)와 최소변형률 속도와의 관계를 통해 σ_c 와 최소변형률 속도를 예측할 수 있는 식을 Eqs. (17) and (18)과 같이 도출하였다.

$$\sigma_c = 7.75 \exp \left(\frac{-1.042}{S_i + 0.21} \right) \theta^{0.790} \text{ (MPa)} \quad (17)$$

$$\dot{\epsilon}_m = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right)^{8.98}, \quad r^2 = 0.91 \quad (18)$$

장기변형 예측 모델의 경우, 그 과정은 복잡하나 한 종류의 흙에 대한 시험결과를 통해 예측식을 만들 경우, 동일한 지반 조건에서 다양한 온도 및 하중 비율에 따른 장기변형 예측이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 Ting (1983)의 모델은 대상 시료가 달라지는 경우에 대한 고려가 없어 지반 조건이 달라지면 모든 시험을 다시 수행하여 새로운 모델을 만들어야 한다는 단점이 있다.

3. 크리프 시험 방법

본 연구에서는 세립분 함량에 따른 동결토의 크리프 예측 모델을 만들기 위해 조립질의 주문진 표준사에 세립질의 카울리나이트를 0, 5, 10, 15%로 혼합하여 제작된 공시체로 크리프 시험을 수행하였다. 크리프 시험은 온도, 세립분 함량, 하중비율 별로 총 50번의 시험을 수행하였다. 시험은 ASTM D5520 (1995)의 방법에 따라

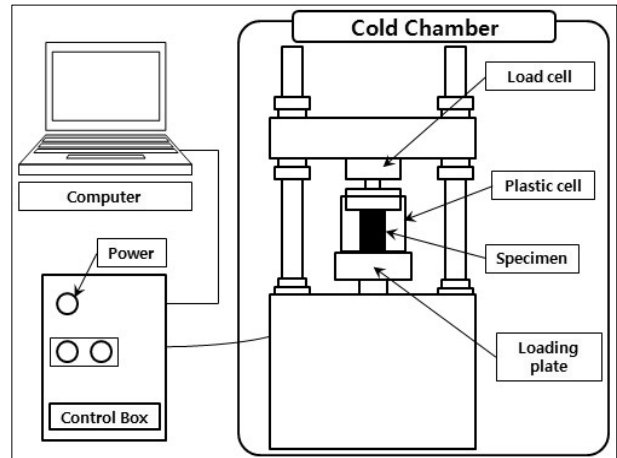


Fig. 4. Schematic Diagram of Uniaxial Creep Testing Equipment (Chae et al., 2015)

수행하였으며, 온도와 습도가 일정하게 유지되는 밀폐된 냉동 챔버 내에서 진행되었다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 시험 장비의 모식도를 나타내었으며, 일축크리프 시험 장비는 상재하중을 가하는 고강도 Frame과 하중을 일정하게 유지하고 기계의 작동 및 정지를 조정하는 Control box, 시험 데이터를 기록하는 Computer system으로 구성되어 있다. 시험의 진행 및 데이터 수집은 모두 챔버 외부에서 컴퓨터 시스템으로 진행되며, 시험이 진행되는 동안 내부 상황은 문의 유리면을 통해 관찰할 수 있어 외부와의 접촉을 최소화할 수 있었다. 공시체 제작 및 시험과 관련된 세부 사항에 대해서는 Chae et al. (2015) 및 Cho et al. (2015)에 자세히 수록되어 있다.

4. 모델 제작 및 평가

4.1 시험 데이터 분석방법

본 연구에서 수행된 크리프 시험을 통해 획득된 데이터는 컴퓨터 시스템을 통해 시험이 완료될 때 까지 60초 마다 한 번씩 자동으로 저장되는 방식이다. 액추에이터가 하중을 일정하게 유지하는 과정에서 액추에이터의 오차로 인해 시료의 변형률 속도가 미세하게 감소하는 경우가 발생하였다. 크리프 시험 데이터를 통해 크리프 모델 제작에 필요한 계수들을 찾기 위해서 시간에 따른 변형률 속도곡선을 로그스케일로 나타낼 필요가 있으며, 이를 그래프로 도시할 경우 Fig. 5와 같이 나타난다. 원본데이터의 경우 액추에이터 및 LVDT의 미세한 떨림으로 인해 Fig. 5와 같은 경향을 나타내었고 이를 보정하기 위해 본 연구에서는 단순이동평균법을 사용하였다. 단순이동평균법은 평균의 계산 기간을 순차로 한개 항씩 이동시켜 가면서 기간별 평균을 계산하여 경향을 구하는 방법으로

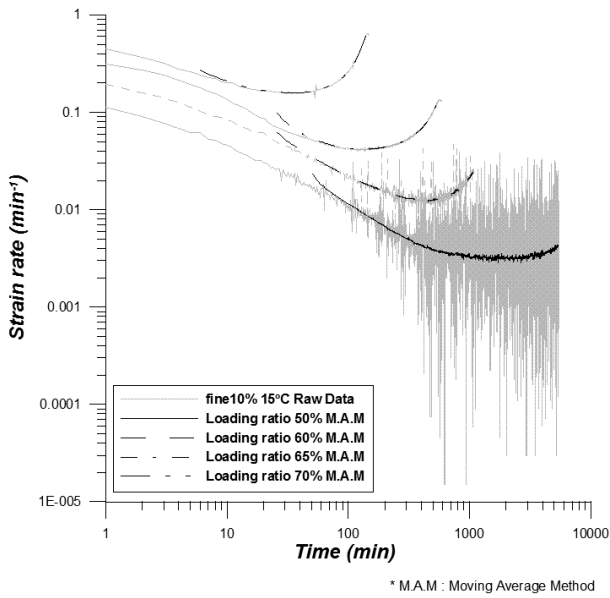


Fig. 5. Data Analysis of Creep Tests with Regard to Loading Ratio for Frozen Sand at -15°C with 10% Fine Contents

현 시점에서 가장 가까운 N개의 데이터를 평균하여 차례로 구하여 나가는 방법이다. 평균에 사용할 데이터의 개수(N)를 결정한 후, 이동평균법을 사용한 결과 원본 데이터의 경향을 반영한 크리프 시험 데이터를 획득할 수 있었다. 평균에 사용된 데이터의 개수(N)는 데이터의 편차에 따라 다르게 결정되었으며, 모든 크리프 시험 데이터는 단순이동평균법을 사용하여 오차의 영향을 최소화 한 후 Tertiary creep model 계수 결정 및 세립분 함유량을 고려한 크리프 모델 제작에 사용되었다.

4.2 Tertiary creep model 적용

모델 제작에 앞서 Tertiary creep model의 기본 형태인 Eq. (1)을 검증하기 위해 본 연구에서 수행한 일축 크리프 시험결과에 Tertiary creep model을 적용해 보았다. 이동평균법이 적용된 데이터를 통해 Tertiary creep model에 필요한 계수들을 산정하였으며, 세립분 함량이 0%인 경우에 대해서만 Table 1과 Fig. 6에 나타내었다.

Table 1. Summary of Parameters for Tertiary Creep Model at 0% Fine Contents

Fine contents (%)	Temperature (°C)	Loading ratio (%)	Measured values				parameters		
			t_0 (min)	$\dot{\epsilon}_0$ (min^{-1})	t_m (min)	$\dot{\epsilon}_m$ (min^{-1})	A	m	β
0	-5	40	1	0.1952	4187	0.001127	0.1952	0.7022	0.00017
		50	1	0.2145	589	0.004981	0.2142	0.6994	0.00118
		60	1	0.2254	79	0.02679	0.2236	0.6297	0.00797
		70	1	0.4751	23	0.13488	0.4633	0.5779	0.02513
	-10	45	1	0.1522	1563	0.001461	0.1522	0.7311	0.00047
		50	1	0.1751	545	0.002593	0.1749	0.7944	0.00146
		60	1	0.2561	308	0.006709	0.2555	0.7695	0.00250
		70	1	0.1625	34	0.051906	0.1604	0.4466	0.01314
	-15	45	1	0.1012	2497	0.000747	0.1012	0.7195	0.00029
		50	1	0.1115	1298	0.001584	0.1114	0.6895	0.00053
		60	1	0.2521	296	0.006106	0.2514	0.7927	0.00268
		70	1	0.2964	48.7	0.078787	0.2937	0.4561	0.00937

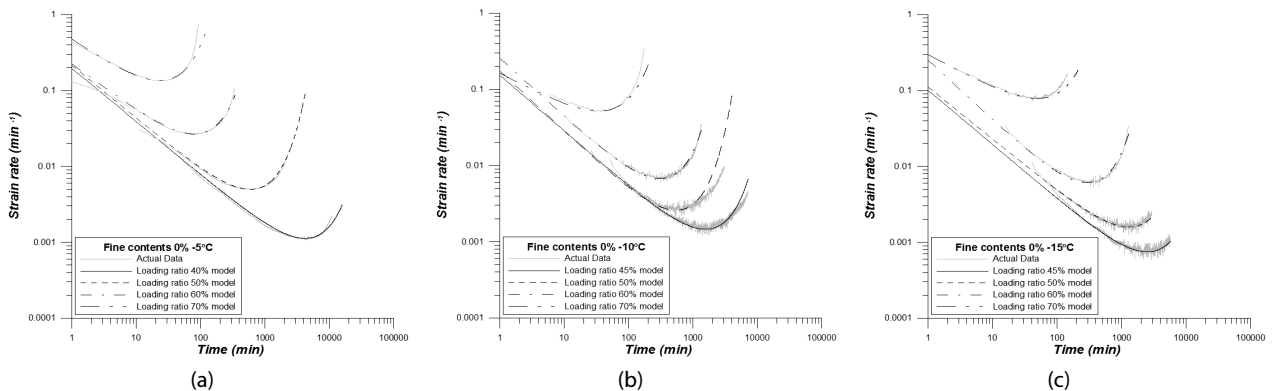


Fig. 6. Comparison between Actual Creep Curves and Calculated Creep Curves by Tertiary Creep Model for Frozen Sand with 0% Fine Contents

분석 결과 실제 시간-변형률 속도 곡선과 Tertiary creep model 로 계산된 시간-변형률 속도 곡선이 -5, -10, -15°C 모두에서 2차 크리프 구간과 3차 크리프 구간을 잘 나타냄을 확인할 수 있었다. 반면 1차 크리프 구간에서는 Tertiary creep model이 변형률 속도를 과소평가하는 것으로 나타났다. 이는 실제 측정된 데이터를 이동평균법으로 보정하여 나타난 오차로 판단되며, 1차 크리프 구간에서 변형률 속도가 급격히 감소되는 경향이 평균에 반영되어 원본데이터에 비해 평균 10% 정도 큰 보정값을 나타내었다. 이동평균법을 적용하기 전의 원본 데이터와 모델로 계산된 값을 비교 시 Tertiary creep model이 변형률 속도를 과대평가하는 것으로 나타났다. 이는 계수 ϵ_0 를 로그스케일로 나타낸 시간-변형률 속도 곡선의 직선구간을 연장하여 결정하기 때문에 실제 변형률 속도보다 크게 나타난 것으로 판단된다. 장기 변형 특성은 2차 크리프 구간과 3차 크리프 구간을 파악하는 것이 중요하므로, Tertiary creep model의 기본 형태를 통해 크리프 곡선을 추정하는 방법은 합리적인 것으로 판단된다.

4.3 크리프 모델 제작

Ting (1983)의 Tertiary creep model은 Secondary creep 구간과 Tertiary creep 구간을 잘 나타내어 크리프 곡선을 추정함에 있어 합리적임을 확인하였다. 그러나 Tertiary creep model의 경우 세립분 함량이 약 7% 정도인 MFS (Manchester Fine Sand)로 제작된 동결 시료만을 사용하여 모델을 제작하였으며, 다른 세립분 함량을 가진 동결 사질토의 장기 변형을 추정하기 위해서는 새로운 시험을 수행해야 된다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Tertiary creep model에서 제시한 기본형태 및 계수 예측 방법을 사용하여 세립분 함량에 따른 동결 사질토의 크리프 곡선을 예측할 수 있는 모델을 제시하고자 하였다.

Tertiary creep model로 크리프 곡선을 예측하기 위해서는 네가지 계수(t_0 ; 초기시간, ϵ_0 ; 초기변형률 속도, ϵ_m ; 최소변형률 속도, t_m ; 변형률 속도가 최소인 시간)의 산정이 필요하다. 크리프 시험 데이터를 통해 계수들을 산정하기 위해서 응력비 기법(Stress ratio technique)이 적용되었으며, 응력비 기법의 적용을 위해 σ_c (reference stress)를 산정하여 계수 ϵ_0 , t_m , ϵ_m 와 응력비(σ_1/σ_c)의 관계를 찾아야 한다.

Fig. 7은 응력비 기법을 적용하여 최소변형률 속도를 예측하기 위해 최소변형률 속도와 응력, 온도 사이에 Eq. (10)과 같은 관계가 성립한다고 가정한 후 계수 A 와 n 을 산정한 그림이며, 산정된 계수 A 와 n 값을 Table 2에 정리하여 나타내었다. 계수 n 의 경우 흙의 종류에 따라 결정되므로 세립분 함량이 같은 흙에서는 같은 값을 적용하였으며, 이는 온도별로 n 값을 각각 산정한 후 최소제곱법을 사용하여 결정하였다. 그 결과 n 값은 세립분 함량이 증가함에

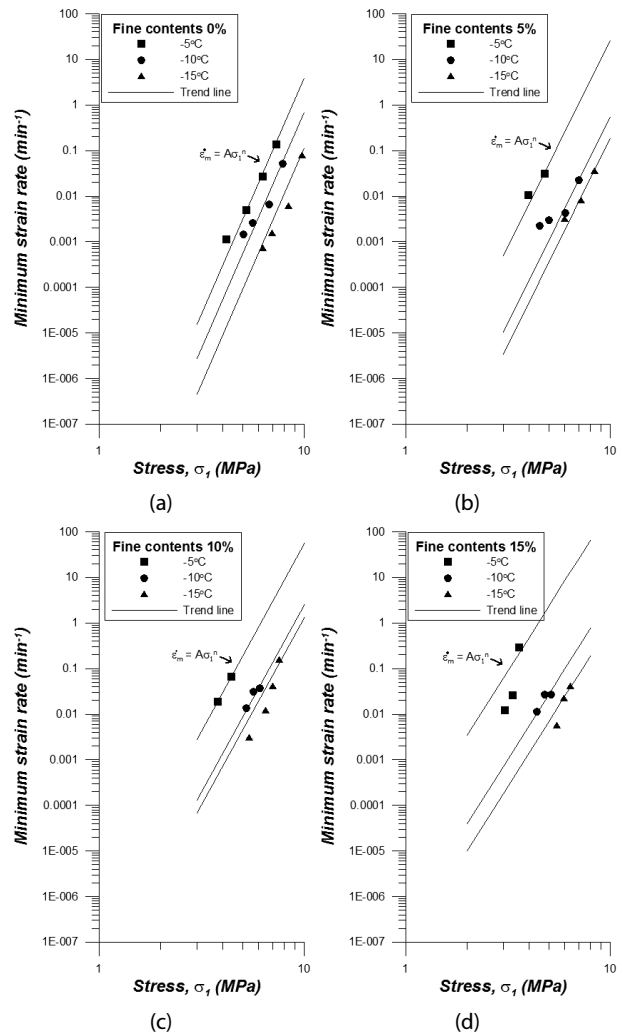


Fig. 7. Determination of Parameters A and n

Table 2. Summary of Parameters A and n with Regard to Fine Contents

		Fine contents (%)			
		0	5	10	15
-5°C	A	1.89E-10	2.41E-08	3.42E-07	2.46E-05
	n	10.2603	9.0298	8.2090	7.1155
	R^2	0.9998	0.9747	0.9999	0.6001
-10°C	A	3.32E-11	5.08E-10	1.58E-08	2.89E-07
	n	10.2603	9.0298	8.2090	7.1155
	R^2	0.9903	0.9681	0.7125	0.4969
-15°C	A	5.47E-12	1.68E-10	8.21E-09	7.19E-08
	n	10.2603	9.0298	8.2090	7.1155
	R^2	0.9771	0.9952	0.8566	0.9052

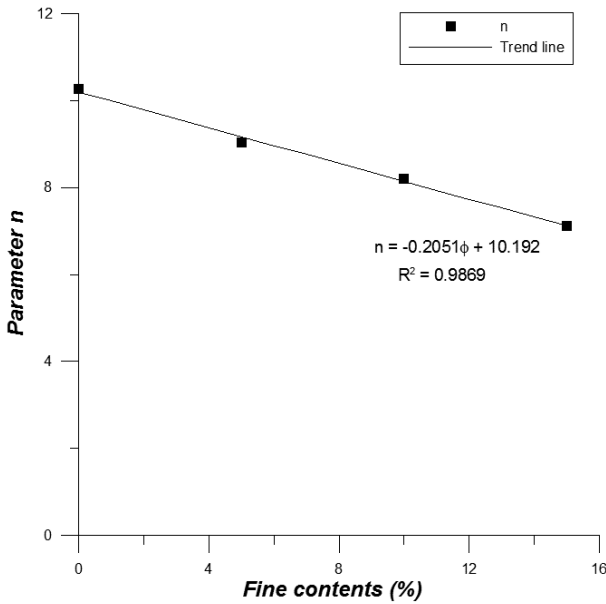


Fig. 8. Parameter n with Regard to Fine Contents

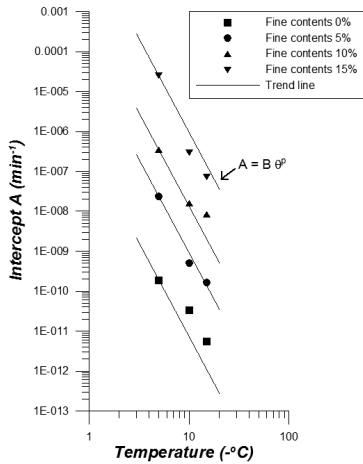


Fig. 9. Determination of Parameters B and p

따라 감소하는 경향을 나타내어 Fig. 8을 통해 Eq. (19)와 같은 관계를 획득할 수 있다.

$$n = -0.2051\phi + 10.192 \quad (19)$$

여기서, ϕ 는 세립분 함량(%)으로 총 시료에서 세립분이 포함된 양을 증량비로 나타낸 값이다. 그 다음 계수 B 와 p 를 결정하기 위해 온도에 따른 계수 A 의 관계를 Fig. 9에 나타내었으며, 이를 Table 3에 정리하였다. 계수 p 의 경우 세립분 함량에 관계없이 일정한 값이며, 계수 n 의 산정 방법과 같이 각각의 세립분 함량에서의 p 값을 계산한 후 최소제곱법을 사용하여 결정하였다. 계수

Table 3. Parameters B and p with Regard to Fine Contents

Fine contents (%)	B	3.73292E-07	$R^2=0.9999$
	0	p	
5	B	4.71255E-05	$R^2=0.9995$
	p	-4.71005	
10	B	6.70075E-04	$R^2=0.9994$
	p	-4.71005	
15	B	4.81461E-02	$R^2=0.9989$
	p	-4.71005	

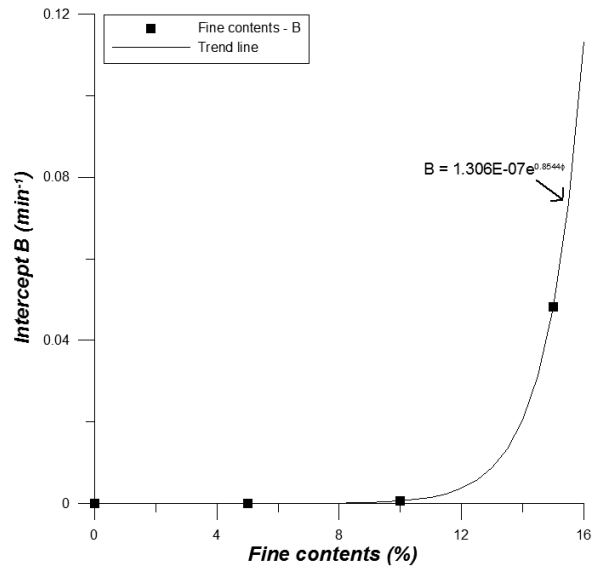


Fig. 10. Parameter B with Regard to Fine Contents

B 값의 경우 세립분 함량이 증가할수록 증가하는 경향이 나타남을 확인할 수 있으며, 이를 통해서 세립분 함량과 계수 B 값의 관계를 도출할 수 있다.

응력비 기법의 적용을 위해서는 σ_c 를 산정해야 하며, Eq. (11)의 계수 $\dot{\epsilon}_c$ (임의로 결정되는 정규화를 위한 변형률)와 계수 B , n , p 를 결정해야 한다. $\dot{\epsilon}_c$ 의 경우 creep model을 제작할 때 연구자의 판단에 따라 가장 합리적인 값으로 선택할 수 있으며, 본 연구에서는 0.01min^{-1} 을 사용하였다. 계수 n 과 p 의 경우 앞서 Figs. 7 and 9를 통해 결정하였으며, 계수 B 의 경우 Fig. 10의 세립분 함량에 따른 계수 B 의 관계를 통해 Eq. (20)과 같은 관계로 산정할 수 있다.

$$B = 1.306 \times 10^{-7} e^{0.8544\phi} \quad (20)$$

여기서, ϕ 는 세립분 함량(%)이며, 상수는 최소제곱법을 통해 결정되었다.

Table 4. Summary of Parameters for the Calculation of the σ_c

Parameters	Fine contents (%)			
	0	5	10	15
n	10.260296	9.029769	8.209031	7.1155
p	-4.710054	-4.710054	-4.710054	-4.710054
$-p/n$	0.4590564	0.521614	0.573765	0.661943
α	2.9923443	3.4744	3.93511	4.857263
β	-0.083276	-0.09462	-0.10409	-0.12008

Table 5. Summary of σ_c with regard to Temperature and Fine Contents

	Fine contents (%)	Temperature (°C)		
		5	10	15
σ_c (MPa)	0	5.65	7.77	9.36
	5	4.19	6.02	7.43
	10	3.50	5.21	6.57
	15	2.33	3.68	4.81

Eqs. (11) and (20)을 통해 온도와 세립분 함량에 따른 σ_c 를 추정하기 위한 Eq. (21)을 만들 수 있으며, Table 4는 σ_c 를 산정하기 위한 계수들을 세립분 함량별로 정리한 표이다.

$$\sigma_c = \alpha \exp(\beta\phi) \theta^{(-p/n)} \text{ [MPa]} \quad (21)$$

여기서, ϕ 는 세립분 함유량(%), θ 는 온도(°C), p 와 n 은 Figs. 7 and 9를 통해 결정되는 계수, α 와 β 는 각각 Eqs. (22) and (23)으로 산정할 수 있다.

$$\alpha = (1.306 \times 10^{-7})^{(-1/n)} \times (0.01)^{(1/n)} \quad (22)$$

$$\beta = -\frac{0.8544}{n} \quad (23)$$

Table 4를 통해 각 세립분 함유량에서 온도에 따른 σ_c 값을 산정할 수 있으며, 이를 Table 5에 정리하여 나타내었다.

Eq. (21)을 통해 결정된 σ_c (reference stress)를 통해서 응력비 기법을 적용하기 위해 Tertiary creep model의 계수 $\dot{\epsilon}_0$, t_m , $\dot{\epsilon}_m$ 과 응력비(σ_1/σ_c)와의 관계를 사용하였다.

Fig. 11은 산정된 σ_c 로 크리프 시험 시 재하 된 각각의 응력, σ_1 을 나눠준 응력비(σ_1/σ_c)와 최소변형률($\dot{\epsilon}_m$)과의 관계를 나타낸 그래프이다. 모든 시험 데이터를 한 그래프에 도시하였으며, 이를 통해 Eq. (24)와 같은 관계를 획득하였다.

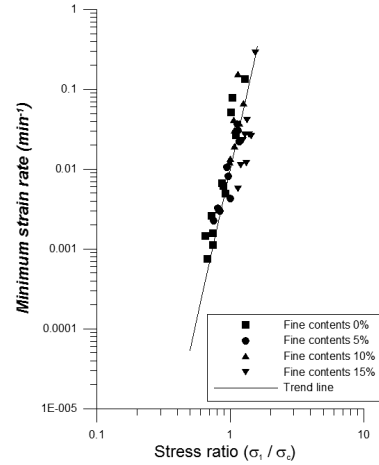


Fig. 11. Relationship between Stress Ratio and Minimum Strain Rate on Frozen Sand with Various Fine Contents

$$\dot{\epsilon}_m = 0.01 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right)^{7.75}, \quad r^2 = 0.71 \text{ [min}^{-1}] \quad (24)$$

최소변형률 속도에서의 시간(t_m)과 시작 시의 변형률 속도($\dot{\epsilon}_0$)의 관계 또한 최소변형률 속도($\dot{\epsilon}_m$)와 같은 방법으로 응력비와 각 계수들의 관계를 통해 각각 Eqs. (14) and (15)의 형태로 도출하였으며, 이를 Eqs. (25) and (26)에 나타내었다.

$$t_m = 555.62 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right)^{-4.498}, \quad r^2 = 0.71 \quad (25)$$

$$\dot{\epsilon}_0 = 0.626 \exp(-0.886) \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right), \quad r^2 = 0.81 \quad (26)$$

시작 시의 변형률 속도($\dot{\epsilon}_0$)의 경우, 데이터 분석과정에서 로그스 케일로 나타낸 크리프곡선의 직선구간을 연장하여 시간이 1분일 때의 변형률로 결정하였기 때문에 직선구간의 선정위치에 따라 시험값과 예측값의 큰 편차가 발생하였다. 전체적인 크리프 변형 특성을 파악하기 위한 경우, 이러한 편차가 1차 크리프 거동 특성에 영향을 미치게 되며 완전히 다른 거동을 나타낼 수 있기 때문에 데이터 분석과정에서 시작 시 변형률의 오차를 줄이기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 하지만, 크리프 시험결과를 설계에 반영하기 위한 장기강도 산정 시에는 크리프 파괴가 발생하는 2차 크리프가 끝나는 시점, 다시 말해 3차 크리프가 시작되는 시점의 파악이 중요하므로 이러한 편차가 현장 적용에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

4.4 크리프 모델 평가 및 토의

본 연구에서는 크리프 시험 결과를 통해 세립분 함량에 따른 크리프 곡선을 모사할 수 있는 모델을 제안하였다. 제작된 크리프 모델의 정확성을 평가하기 위해 실제 크리프 시험결과로 나타낸 크리프 곡선과 제작된 모델을 통해 예측한 크리프 곡선을 함께 나타낸 그래프를 Figs. 12(a)~(c)에 나타내었으며, 전체 데이터 중 대표적인 세 가지 경우에 대해서만 나타내었다. Fig. 12(a)는 최소변형률과 최소변형률에서의 시간을 모두 잘 나타내는 경우, Fig. 12(b)는 최소변형률에서의 시간만 잘 맞는 경우, Fig. 12(c)는 최소변형률과 최소변형률에서의 시간 모두 잘 맞지 않는 경우를 확인할 수 있다.

전체 크리프 시험 데이터에 대해 예측값의 정확성을 판단하기 위해 크리프 곡선을 나타내는데 필요한 계수 ϵ_0 , ϵ_m , t_m 의 예측값을 시험값으로 나눠 그 분포를 Figs. 13(a)~(c)에 나타내었다. 예측값을 시험값으로 나눈 값이 1에 분포할수록 예측값이 시험값을 정확하게 예측한다고 볼 수 있으며, 빈도수는 각각의 계수에 대해 총 데이터의 개수로 나눠 정규화한 후 나타내었다. 분석 결과 시작

시 변형률의 경우 예측값이 시험값을 비교적 과대평가하며, 최소변형률의 경우 예측값이 시험값을 과소평가하는 것으로 나타났다. 반면 최소변형률에서 시간의 경우 예측값을 시험값으로 나눈 값이 비교적 1에 많이 분포하고 있으나, 그 정도가 전체 데이터의 30% 수준에 불과하여 잘 맞지 않는 것으로 나타났다.

계수들을 분석해 본 결과 전체적으로 예측값이 시험값을 잘 나타내지 못함을 확인하였다. 이는 시험에 사용된 공시체의 형상에 차이가 있기 때문에 나타난 결과로, 직경 대 높이가 1:2인 Ting (1981)이 수행한 크리프 시험과 ASTM D5520 (1995)에서 제시한 크리프 시험 공시체 기준 3:2, 본 연구에서 사용한 공시체 직경 대 높이가 1:1이 서로 상이하여 나타난 결과로 판단된다. 공시체의 직경 대 높이가 달라질 경우 크리프 특성에도 영향을 미치는 것으로 판단되며, 추후 이와 관련된 연구를 진행 할 계획이다. 또한 모델의 제작과정에서 기존의 모델에 세립분 함유량을 고려할 수 있는 새로운 계수를 추가하면서 계수들 간의 오차가 누적되었고, 크리프 시험 과정에서 지반공학적인 불확실성과 시험데이터 분석 과정에서 발생된 오차들이 복합적으로 결과에 영향을 미쳤을 것

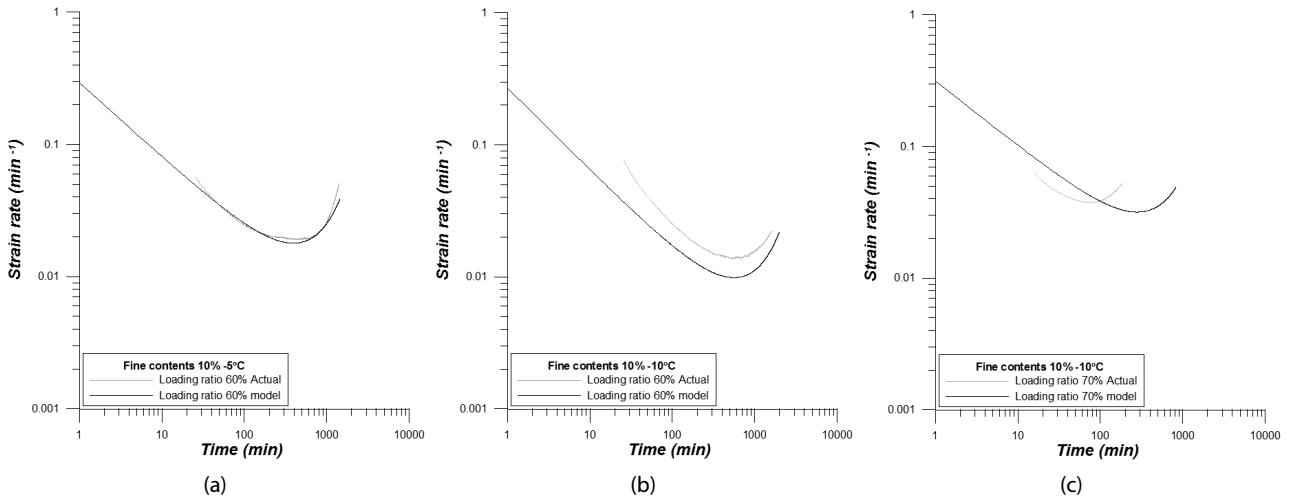


Fig. 12. Comparison of Actual Creep Curve with Fitted Creep Curve

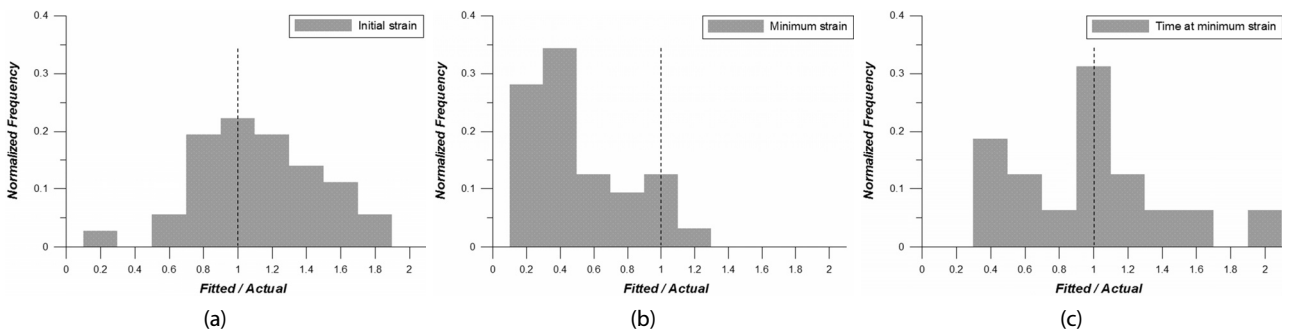


Fig. 13. Normalized Frequency of Fitted Values Divided by Actual Values

로 판단된다. 따라서 세립분 함유량을 고려한 크리프 모델 개발 시, 기존의 Tertiary creep model의 입력정수 도출 방법을 그대로 적용하는 것은 한계가 있다고 판단되며, 모델 제작과정에서 발생된 여러 가지 오차들을 줄이기 위한 다양한 추가 연구를 통해 새로운 방법을 적용한 모델이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 Ting (1983)의 Tertiary creep model의 모델 제작 과정을 적용하여 세립분 함유량을 고려한 동토의 장기변형 예측 모델을 제안하였다. 이를 위해 세립분 함량이 0, 5, 10, 15%인 시료를 -5, -10, -15°C에서 동결 한 후 크리프 시험을 수행하였고, 시험 결과를 바탕으로 세립분 함유량을 고려할 수 있는 변수를 추가한 장기 변형 예측 모델을 제안하였다. 제작된 모델을 실제 시험데이터와 비교하여 그 적용성을 평가해 본 결과 예측값이 시험값을 잘 예측하지 못하여, 세립분 함유량을 고려한 장기변형 예측 모델 제작 시 Tertiary creep model의 모델 도출 방법을 그대로 적용하는 것은 무리가 있는 것으로 나타났다. 따라서 동토의 크리프 변형을 고려하기 위한 새로운 개념모델이 필요할 것으로 판단되며, 추후 동결 시 발생하는 구조적인 변화를 디지털 이미지를 통해 분석하고 크리프 변형을 에너지 개념(fracture energy)으로 분석하는 등 다양한 관점에서 연구를 진행할 계획이며, 이를 바탕으로 새로운 방법을 적용한 모델을 개발할 계획이다.

본 연구는 최근에 연구된 동토의 장기변형 예측 모델을 분석하고 이를 통해 새로운 계수를 고려한 동토의 장기변형 예측모델을 만들었다는 점에서 의의가 있으며, 본 연구에서 분석된 오차의 영향 및 새로운 관점에 대한 추가 연구를 통해 더욱 정확한 모델을 만들 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 이공분야기초연구사업의 연구비 지원(NRF-2014R1A1A1002401)에 의해 수행되었습니다.

References

- American Society for Testing and Materials (ASTM) (1995). *Laboratory determination of creep properties of frozen soil samples by uniaxial compression (D 5520)*, sec. 4, Vol. 04.08, ASTM, Philadelphia: ASTM.
- Andersland, O. B. and Anderson, D. H. (1978). *Geotechnical Engineering for Cold Regions*, McGraw Hill, New York, p. 566.
- Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004). *Frozen Ground Engineering Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp. 24-25.
- Assur, A. (1979). "Some promising trends in ice mechanics." *Proc. of the international Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium*, Copenhagen, pp. 1-15.
- Chae, D., Hwang, B. and Cho, W. (2015). "Stress-strain-strength characteristics of frozen sands with various fine contents." *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 16, No. 6, pp. 31-38 (in Korean).
- Cho, W., Chae D., Hwang, B., Oh, M. and Ban, H. (2015). "Effects of fine contents on the mechanical response of frozen sands." *Proc. of The 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kona, Big Island, Hawaii, USA, pp. 1765-1770.
- Ladanyi, B. (1972). "An engineering theory of creep of frozen soils." *Journal of Canadian Geotechnical*, Vol. 9, pp. 63-80.
- Sayles, F. H. and Haines, D. (1974). *Creep of Frozen Silt and Clay*, No. AD0784088, Cold Regions Research and Engineering Lab, Haover N H.
- Singh, A. and Mitchell, J. K. (1968). "General stress-strain function for soils." *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 94, No. SM1, pp. 21-46.
- Ting, J. M. (1981). *The Creep of Frozen Sand: Qualitative and Quantitative Models*, Research Report R81-5, Massachusetts Institute of Technology Dept. of Civil Engineering, Cambridge.
- Ting, J. M. (1983). "Tertiary creep model for frozen sands." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 7, pp. 932-944.
- Vyalov, S. S. (1963). "Rheology of frozen soils." *Proc. of the 1st Permafrost Conference*, Lafayette, Ind., pp. 332-342.