

크리프 물성평가를 위한 구형압입 수치접근법

임동규* · 이진행** · 최영식* · 이형일*

* 서강대학교 기계공학과, ** 한국원자력연구원

A Numerical Approach to Spherical Indentation Techniques for Creep Property Evaluation

Dongkyu Lim*, Jin Haeng Lee**, Youngsick Choi* and Hyungyil Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

** Reactor Mechanical Engineering Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received March 12, 2013 ; Revised August 6, 2013 ; Accepted August 7, 2013)

Key Words: Creep(크리프), Material Property(재료 물성치), Spherical Indentation(구형 압입), FEA(유한요소 해석)

초록: 본 연구에서는 증분소성이론에 기초한 구형압입이론을 크리프 물성을 평가하기 위한 압입이론으로 확장했다. 먼저 크리프변형률 기울기가 일정한 지점을 유효 응력-변형률속도 최적 관측지점으로 선정했다. 구형압입시험 전산모사를 이용해 크리프 지수와 계수를 변화시켜 가면서 이에 따른 재료의 거동을 무차원 변수들 (ξ, ψ)의 회귀식으로 표현해 크리프 물성평가를 위한 새로운 수치 접근법을 구축했다. 이를 토대로 구형압입시험으로부터 재료의 크리프지수 및 계수를 예측하는 물성평가 프로그램을 개발했다. 압입 하중-변위 곡선으로부터 크리프지수는 평균 1.5%, 크리프계수는 평균 1.0% 이내의 오차 범위에서 물성치들을 얻을 수 있다.

Abstract: In this study, the theory of spherical indentation based on incremental plasticity is extended to an indentation method for evaluating creep properties. Through finite element analysis (FEA), the point where the elastic strain effect is negligible and the creep strain gradient constant is taken as the optimum point for obtaining the equivalent strain rate and stress. Based on FE results for spherical indentation with various values of creep exponent and creep coefficient, we derive by regression an equation to calculate creep properties using two normalized variables. Finally a program is generated to calculate creep exponent and creep coefficient. With this method, we obtain from the load-depth curve creep exponents with an average error of less than 1.5 % and creep coefficients with an average error of less than 1.0 %.

- 기호설명 -

- A : 단축인장 크리프계수
- B : 압입 크리프계수
- m : 크리프지수
- ϵ_c : 크리프 변형률
- $\dot{\epsilon}_c$: 크리프 변형률속도
- ξ : 변형률속도와 크리프 시간의 곱
- ψ : 평균 접촉압력과 유효응력의 비

1. 서론

단축 크리프시험법은 재료의 크리프 거동을 평가

하기 위한 표준화된 시험법으로, 고온 크리프 특성 평가에 가장 일반적이고 보편화된 방법이다. 현재까지 단축 크리프시험법으로는 길이 120 mm, 폭 13 mm, 두께 6 mm (ASTM D2990) 크기로 가공한 단축 크리프 시편에 일정한 인장 혹은 압축응력을 가해 크리프 거동을 평가하는 방법이 주로 사용되어 왔으며, 이 방법은 표준화가 잘 되어있다. 그러나 이 방법을 미세구조에 적용하기 위해서는 미세시편을 제작해야 하고 이에 맞는 장비가 필수적으로 구축되어야 한다. 따라서 실제재료의 고온 크리프를 비롯한 기계적 물성 평가시 시편형상 및 크기 등의 한계를 극복하고, 표준시편 채취시 크기 제약이 있는 재료의 크리프 성질을 평가하기 위해 압입 크리프시험법이 개발되었다.^(1~7)

† Corresponding Author, hylee@sogang.ac.kr

Bower 등⁽⁸⁾은 크리프 압입시험으로 구한 크리프 지수가 닦음변환을 통해 재료의 단축인장 크리프 지수와 동일하다는 것을 유도했다. 또한 압입 크리프 계수와 단축인장 크리프계수의 상관관계를 감소된 접촉압력 $F(m)$ 으로 나타냈다. 그러나 Bower 등은 압입 크리프계수와 단축인장 크리프계수의 상관관계를 m 의 영향만을 받는 함수로 정의했고, 압입하부에서 재료가 큰 접촉압력을 받아 접촉 변형률 속도가 빨라질 경우 멱함수법칙을 더 이상 적용할 수 없다. Sohn⁽⁹⁾은 압입 크리프와 단축인장 크리프 사이의 관계에 대한 일반적인 접근법을 제시했다. 구형 및 원뿔형 압입자를 사용한 크리프 압입 유한요소해석으로 재료 탄성특성과는 상관없이 크리프지수의 영향을 받는 일반화된 $h-t, P-h$ 곡선을 구해 단축인장 크리프 변수들을 예측했다. 그러나 E/σ_0 가 작은 재료에서 압입자형상이 고려되지 않았고, 예측된 단축인장 크리프계수의 큰 오차가 존재한다.

압입시험을 이용한 크리프시험은 단축시험에 비해 상대적으로 편리한 방법으로 미소 재료의 크리프 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 많은 비교 실험연구가 보여주는 바와 같이 단축 크리프시험 결과와 압입시험 결과는 큰 차이를 나타내며,⁽¹⁰⁻¹²⁾ 이 원인을 충분히 이해하려면 실험과 해석상에서 많은 난제들을 해결해야 한다. 본 연구에서는 Lee 등^(13,14)에 의해 개발된 구형 압입이론을 재료의 크리프 물성을 평가하기 위한 압입 이론으로 확장하고자 한다. 우선 유한요소 해석으로 압입이론을 전개하기 유리한 유효 응력-변형률속도 관측지점을 선정하고 크리프 재료에 영향을 미치는 변수들을 선정했다. 또한 압입시험 전산모사를 이용해 크리프 계수 및 지수를 변화 시켜가면서 이에 따른 재료의 거동을 살펴 보았고, 무차원변수들의 회귀식으로 표현했다. 이로부터 압입 크리프 물성평가 프로그램을 생성했고 생성된 물성평가 프로그램으로 재료의 크리프 물성을 평가했다.

2. 크리프 압입시험의 유한요소해석

2.1 크리프 압입시험의 유한요소모델

구형압입자를 이용한 압입 크리프 해석을 위해 Fig. 1과 같은 축대칭 유한요소해석모델을 형성했다 (ABAQUS, 2010).⁽¹⁵⁾ 압입자와 모재 사이는 무마찰로 가정하고 비선형 대변형해석을 수행했다. 해석에 사용한 요소는 4절점 축대칭요소 CAX4이며, 해석에 큰 영향을 주지 않는 부위의 경계에는 MPC (Multi-Point Constraints)를 사용했다. 모재는 약 16500개의 절점과 15800개의 4절점 축대칭요소들로 구성했고,

압입자는 직경 $1\mu\text{m}$ 의 강체로 해석했다. 압입자와 모재의 접촉면에는 압입자와 모재쪽 모두 접촉 요소면 (Contact Surface)을 배치했다. 압입자와 모재의 대칭축상 절점들은 대칭축에 수직방향 변위 성분을 구속해 축대칭 조건을 만족시키고, 모재 밑면은 완전 구속시킨 후 압입자를 하강시킨다. 본 연구에서는 압입 크리프 시험방법으로 유한요소 해석상 수렴성이 우수한 CRD (Constant Rate of Depth) 방식을 이용했다.

2.2 크리프 압입시험의 변수선정

크리프 압입시험에서 응력과 변형률속도는 멱함수 법칙을 사용해 식 (1)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \leftrightarrow \dot{\epsilon} = A\sigma^m ; A = \frac{\dot{\epsilon}_0}{(\sigma_0)^m} \quad (1)$$

여기서 m 은 크리프지수, σ_0 는 항복강도, $\dot{\epsilon}$ 은 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_0$ 은 단축 변형률속도이다.

본 연구에서는 실제재료의 크리프지수 및 계수를 고려해 Table 1과 같이 변수들을 선정하고, 이 변수들의 변화에 따라 해석을 수행한다.^(2,7,16)

Table 1 Selection of creep parameter for FEM analyses

Properties	Elastic material
Young's modulus (E , GPa)	1000
Friction coefficient	0
Poisson's ratio (ν)	0.3
Creep coefficient (A , $\text{MPa}^{-m}\text{s}^{-1}$)	1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-10} , 1.0×10^{-15}
Creep exponent ($1/m$)	0.13, 0.2, 0.33, 0.5, 1.0

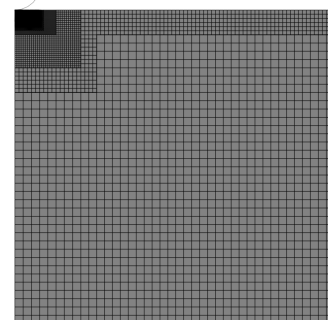


Fig. 1 FE mesh for creep indentation analysis

2.3 크리프 압입시험의 유효변형률속도 관측지점

크리프 압입시험에서 총변형률 ϵ_{tot} 은 식 (2)와 같이 탄성변형률 ϵ_e 와 크리프변형률 ϵ_c 의 합으로 나타난다.

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_c \quad (2)$$

이때 유효변형률은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{tot} &= \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 \right. \\ &\quad \left. + 6(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (3) \end{aligned}$$

CRD 압입 크리프시험으로 $r=0$ 인 지점에서 하부 방향으로 떨어진 깊이 (l/D)와 ϵ_{tot} , ϵ_e , ϵ_c 의 관계를 살폈다. l 은 재료표면으로부터의 관측깊이, D 는 압입자 직경, r 은 변형 후 축대칭중심으로부터 반경방향 거리이다. 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 은 $t-\epsilon$ 곡선의 기울기로 구했다.

Fig. 2는 $1/m=0.33, A=1.0 \times 10^{-9} \text{MPa}^{-3} \text{sec}^{-1}$ 인 재료에 대해 $r=0$ 인 지점에서 하부방향으로 떨어진 깊이 (l/D)와 ϵ_{tot} , ϵ_e , ϵ_c 관계를, Fig. 3는 $\dot{\epsilon}_{tot}$, $\dot{\epsilon}_e$, $\dot{\epsilon}_c$ 의 변화를 나타낸다. 압입중심에서 탄성변형률이 크리프 변형률에 비해 미소해, 총변형률과 크리프 변형률의 크기가 같다. 따라서 CRD 압입시험으로 구한 $\dot{\epsilon}_{tot}$ 는 $\dot{\epsilon}_c$ 와 같고, $\dot{\epsilon}_e$ 는 항상 일정해 $\dot{\epsilon}_{tot}$ 에 영향을 미치지 않는다. 또한 압입표면에서는 변형률 기울기가 크지만, 표면에서 일정거리가 떨어진 곳에서는 변형률 기울기가 감소한다. 이에 변형률 기울기가 작은 압입표면 중심으로부터 반경방향으로 $r=0$, 그리고 압입표면 하부방향으로 압입자 직경의 20% ($l/D=0.2$)인 곳을 관측지점으로 선택한다. 관측지점에서 구한 유효응력과 변형률속도는 재료의 탄성에 큰 영향을 받지 않아, 압입 하중-변위곡선으로부터 정확한 크리프 물성을 얻을 수 있다.

2.4 단일요소를 이용한 CLH 및 CRD 크리프 인장 유한요소해석

단일요소를 이용해 CRD (Constant Rate of Depth) 및 CLH (Constant Load and Hold) 크리프 인장시험을 수행했다. CRD와 CLH 크리프 인장 유한요소해석에서 사용한 요소는 4절점 축대칭요소 CAX4이며, 모재크기는 $60 \times 60 \mu\text{m}$ 이다. 재료물성은 $E=1000 \text{GPa}, 1/m=0.33, A=1.0 \times 10^{-9} \text{MPa}^{-3} \text{s}^{-1}$ 이며, 모재하단을 고정하고 상단에 인장인장변위 및 일정하중을 주었다. CAX4 단일 요소를 이용한 CLH 크리프 인장 유한요소해석에서 모재 중심과

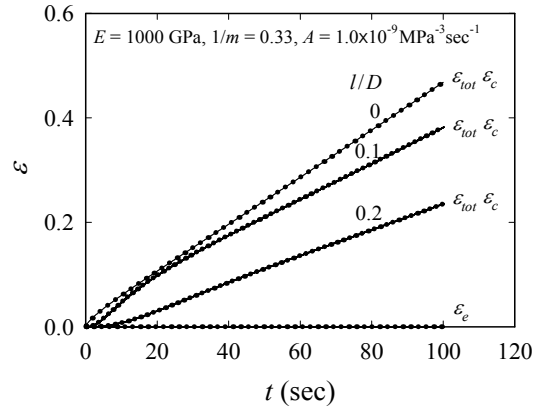


Fig. 2 ϵ_{tot} , ϵ_e , ϵ_c-t curves with variation of l/D

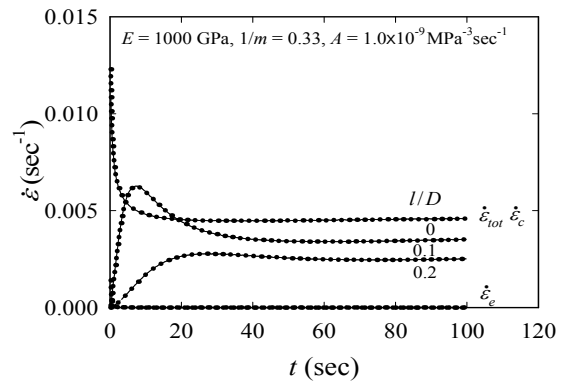


Fig. 3 $\dot{\epsilon}_{tot}$, $\dot{\epsilon}_e$, $\dot{\epsilon}_c-t$ curves with variation of l/D

가장자리에 1:2 비율로 각각 95, 190 mN을 인가해 균일하중을 구현했다. CLH 크리프 인장시험에서 상단에 인가한 하중은 285 mN이며, 두 시험 모두 인장길이는 $0.1 \mu\text{m}$ 로 동일하다.

CRD와 CLH 크리프 인장시험으로 구한 하중-변위 곡선을 Fig. 4에 나타냈다. CLH 방법으로 구한 하중은 항상 일정하나, CRD 방식에서는 선형증가 후 일정 하중이 된다. 시간에 따른 ϵ_{tot} , ϵ_e , ϵ_c 변화를 Fig. 5에 나타냈다. 탄성변형률은 응력을 영률로 나눈 값이고, 크리프 변형률은 총변형률에서 탄성 변형률을 뺀 값이다. CRD와 CLH 방법으로 구한 ϵ_{tot} , ϵ_c 는 시간에 따라 선형적으로 증가한다.

각각의 변형률을 시간증분으로 나누어 구한 $\dot{\epsilon}_{tot}$, $\dot{\epsilon}_e$, $\dot{\epsilon}_c$ 를 Fig. 6에 나타냈다. CRD 크리프 인장시험에서는 $t=100\text{s}$ 동안 $0.1 \mu\text{m}$ 인장되어 $\dot{\epsilon}_{tot} = d\epsilon/dt = (d(l/l))/dt = 1.64 \times 10^{-5}/\text{s}$ 로 일정하다. 6s 이후에는 $\dot{\epsilon}_e$ 가 0이 되어 $\dot{\epsilon}_c$ 와 $\dot{\epsilon}_{tot}$ 가 같아진다.

CLH 방법으로 구한 $\dot{\epsilon}_{tot}$ 는 $\dot{\epsilon}_c$ 와 같고, $\dot{\epsilon}_e$ 는 항상 일정해 $\dot{\epsilon}_{tot}$ 에 영향을 주지 않는다. Fig. 7에 단일요소에서 응력과 변형률속도 사이의 관계를 나타냈고, 이때

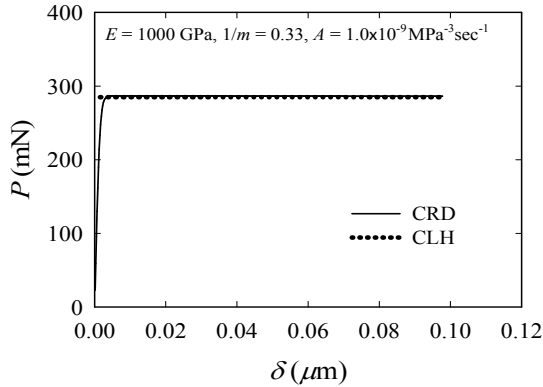


Fig. 4 P - δ curves of single element for CRD and CLH methods

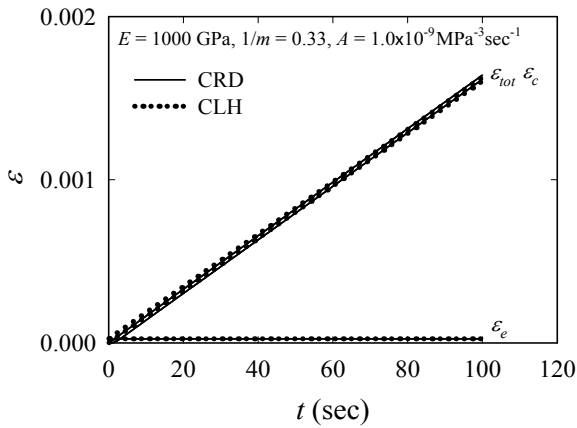


Fig. 5 ϵ_{tot} , ϵ_e , ϵ_c vs. t curves of single element for CRD and CLH methods

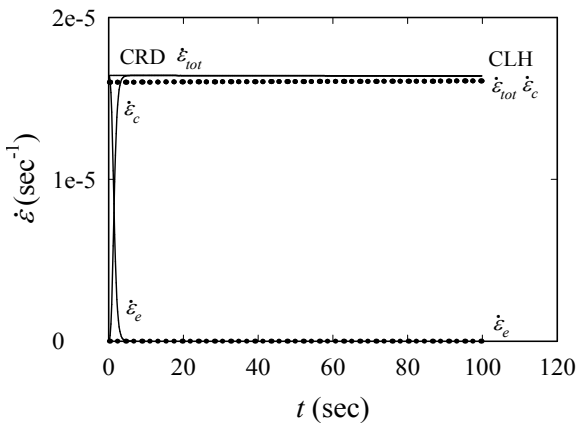


Fig. 6 $\dot{\epsilon}_{tot}$, $\dot{\epsilon}_e$, $\dot{\epsilon}_c$ vs. t curves of single element for CRD and CLH methods

응력은 하중을 실제면적으로 나눠 구했다. CLH 방법에서는 하중이 일정하고 단면적 변화가 작으며 변형률속도가 일정해 σ - $\dot{\epsilon}_c$ 분포가 작다. 이에 하중 변화에 따라 σ - $\dot{\epsilon}_c$ 분포를 구해 Fig.8에 나타냈다. CRD와 CLH 방법 모두 σ - $\dot{\epsilon}_c$ 관계가 멱함수법칙을 따르며,

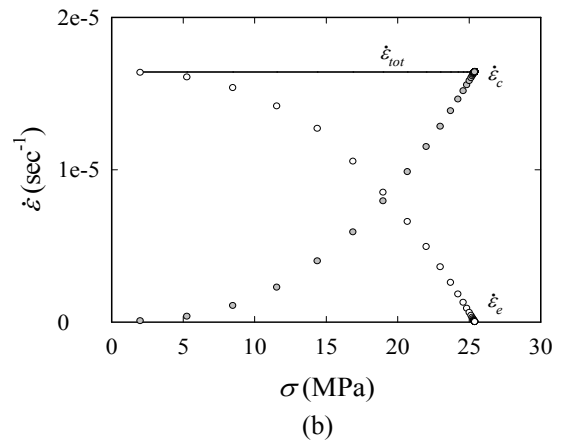
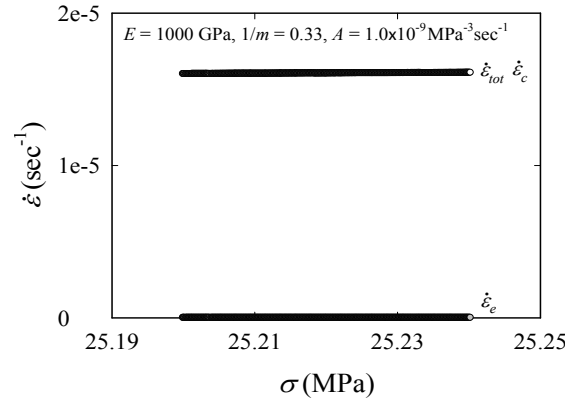


Fig. 7 $\dot{\epsilon}$ vs. σ curves of single element (a) CLH and (b) CRD methods

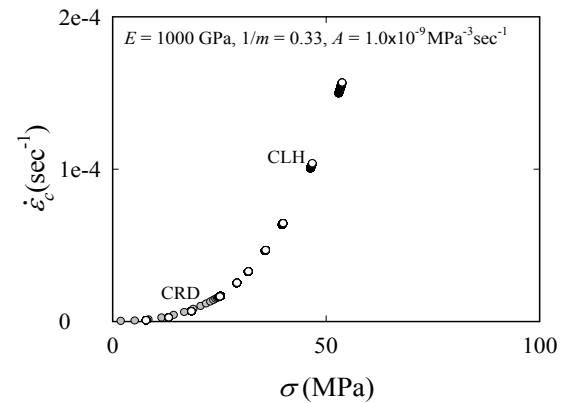


Fig. 8 Comparison of $\dot{\epsilon}$ vs. σ curves for CLH and CRD method

본 연구에서는 유한요소해석상 수렴성이 상대적으로 우수한 CRD 방식을 이용한다.

$m=3$, $A=1.0 \times 10^{-9} \text{MPa}^{-3} \text{sec}^{-1}$, $E=1000 \text{GPa}$, $\nu=0.3$, $\epsilon_0=0.001$, $\dot{\epsilon}_0=1$ 인 재료에 대해, CRD 방식의 크리프 압입시험으로 100 s 동안 0.1 μm 깊이만큼 압입했다. 압입 하부지점 $l/D=0.2$, $r=0$ 에서 얻은 σ - $\dot{\epsilon}_c$ 곡선과 단일요소를 이용한 CRD 크리프 인장시험으로 얻은

Table 2 Comparison of creep properties obtained from CRD tensile and indentation tests

E (GPa)	$1/m$	$\log A$ (MPa ³ sec ⁻¹)	Test method	Computed $1/m$	Computed $\log A$ (MPa ³ sec ⁻¹)
1000	0.333	-9	Tensile	0.333	-9.0
			Inden- tation	0.331	-9.3

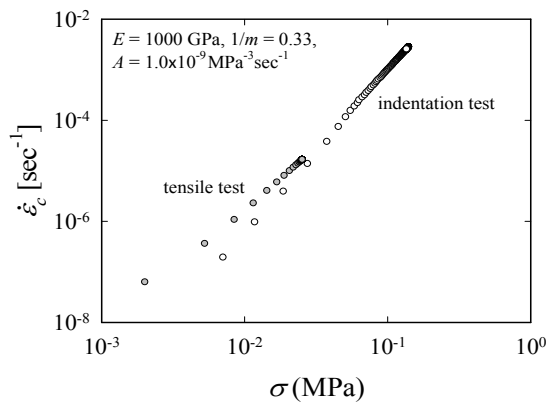


Fig. 9 Comparison of equivalent stress–strain rate curves obtained from CRD tensile and indentation test

$\sigma - \dot{\epsilon}_c$ 곡선을 Fig. 9에 log scale로 나타냈다. $\sigma - \dot{\epsilon}_c$ 곡선의 선형구간에서 기울기와 y절편값을 구해 크리프지수 m 과 크리프계수 A 를 나타냈다 (Table 2). m 과 A 값은 단일요소해석으로 구한값과 유사하며, 주어진 물성치와 큰 차이가 없다.

3. 크리프 물성평가 압입이론

3.1 크리프 압입시험의 무차원변수 회귀

Fig. 10은 새로운 관측지점에서 크리프지수변화에 따른 압입깊이와 크리프 변형률속도의 관계를 나타내는 곡선이다. 압입초기에는 크리프지수가 증가하면 변형률속도가 작아지나, 최대 압입시에는 변형률속도가 커지는 특성을 보인다. 이와 같이 크리프재료의 물성치에 따라 선정지점의 변형률 속도가 변하므로, 이들 관계를 물성치의 함수로 수식화할 수 있다. 본 연구에서는 선정된 관측지점 ($l/D=0.2, r=0$)에서 응력-변형률속도와 압입깊이 관계를 수식화한다. 크리프 물성변화 [5개의 $1/m(0.13, 0.2, 0.33, 0.5, 1.0)$ 과 3개의 $A(1 \times 10^5, 1 \times 10^{10}, 1 \times 10^{15})$]에 따른 재료의 거동을 유한요소해석을 통해 확인했고, 재료물성과 관계지은 무차원변수들 ξ, ψ 로 표현했다. 이로부터 얻은 상수값들로 물성평가 프로그램의 데이터 베이스를 구축한다. 유효 크리프변형률 속도와 크리프시간의 곱을 무차원

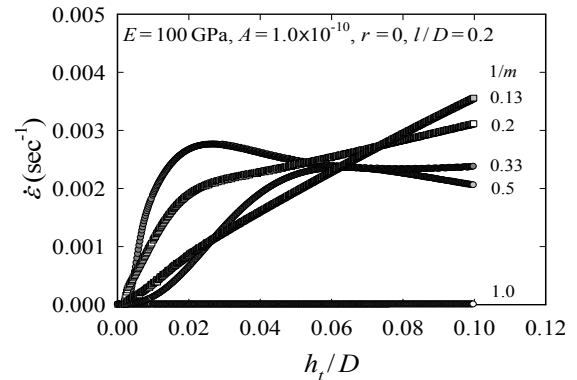


Fig. 10 $\dot{\epsilon}$ vs. h_t relation with variation of $1/m$

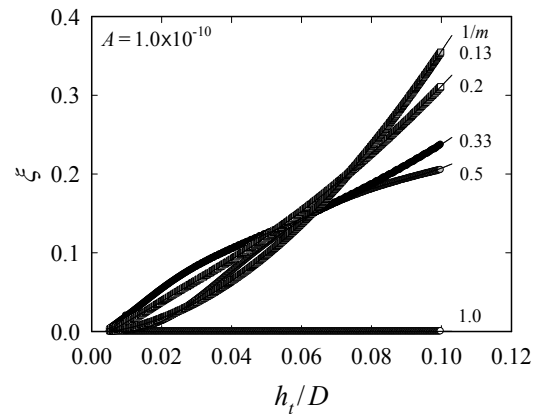


Fig. 11 ξ vs. h_t relation with variation of $1/m$ for $A = 1 \times 10^{-10}$

변수 ξ 로 정의한다.

$$\xi = \dot{\epsilon} \times t_c \tag{4}$$

ξ 는 유효변형률속도에 관한 정보를 갖고 있는 무차원 변수이다. Fig. 11은 $l/D = 20\%$, $r = 0$ 에서 압입깊이와 ξ 의 관계를 m 의 변화에 따라 회귀한 곡선들이며, 식 (5)는 크리프 물성변화에 따른 ξ 를 정의한 회귀식이다. Fig. 11에서 회귀곡선과 유한요소 해석 데이터가 일치함을 볼 수 있다.

$$\xi = f_i^\xi(A, m) \left(\frac{h_t}{D} \right)^i$$

$$f_i^\xi(A, m) = a_{ij}^\xi(A) (m)^{-j}$$

$$a_{ij}^\xi(m) = b_{ijk}^\xi(m)^{-k}$$

$$i = 0, 1, 2, 3 \quad j = 0, 1, 2, 3 \quad k = 0, 1, 2, 3 \tag{5}$$

식 (5)에서 h_t 는 기준표면으로부터 압입된 깊이를 의미한다. 본 연구에서는 식 (6)과 같이 압입시 평균 접촉압력 P 를 변형영역에서의 대표유효응력 σ 와 압입자 직경 D 의 곱으로 나누어 구속인자(constraint factor) ψ 를 응력정보를 가지고 있는 무차원 변수로 정의

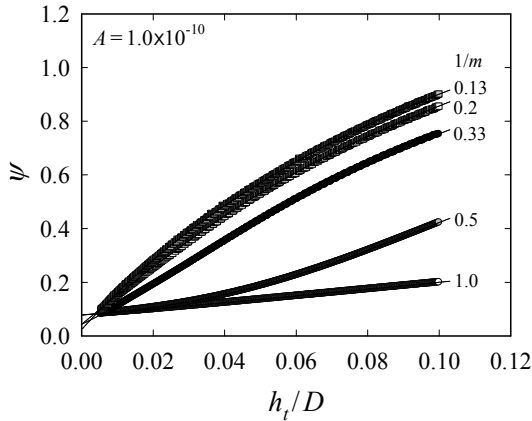


Fig. 12 ψ vs. h_t relation with variation of $1/m$ for $A = 1 \times 10^{-10}$

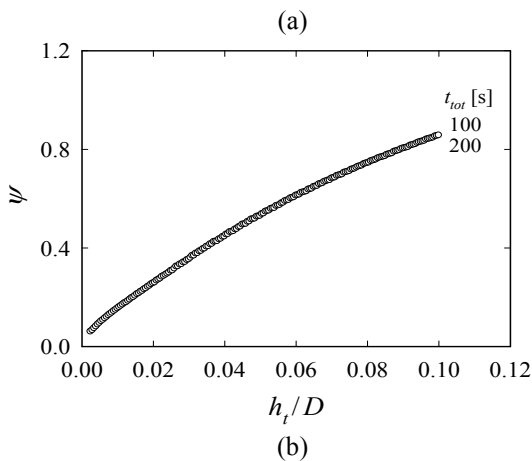
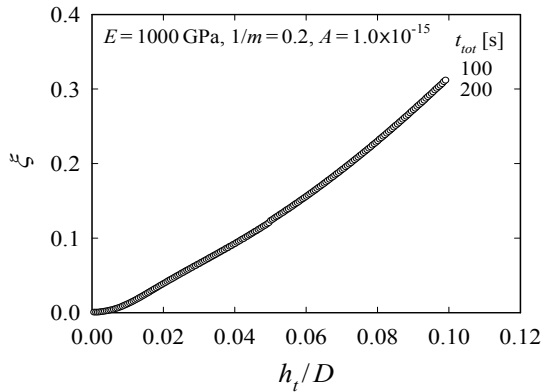


Fig. 13 ξ, ψ vs. h_t relation with variation of total creep time

했다.

$$\psi = \frac{P}{D^2 \sigma} \tag{6}$$

압입자 직경 대신 압입접촉직경을 사용해 무차원 변수 ψ 를 정의하면, ψ 는 물성치의 영향을 중복해서 받는 함수형태로 전개되어 평가물성의 오차가 누적될 수 있다. 식 (7)은 크리프지수의 영향을 고려해 정의한

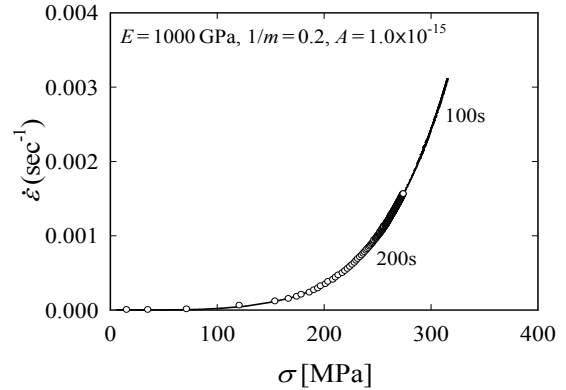


Fig. 14 $\dot{\epsilon}$ vs. σ relation with variation of total creep time

ψ 의 회귀식이다. Fig. 12는 $l/D=20\%$, $r=0$ 에서 m 에 따른 ψ 의 변화를 나타낸 곡선들로 식 (6)의 정의에 따라 회귀한 것이다. 회귀곡선과 FEA 데이터가 일치함을 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} \psi &= f_i^\psi(A, m) \left(\frac{h_t}{D} \right)^i \\ f_i^\psi(A, m) &= a_{ij}^\psi(A) (m)^{-j} \\ a_{ij}^\psi(m) &= b_{ijk}^\psi(m)^{-k} \\ i &= 0, 1, 2, 3 \quad j = 0, 1, 2, 3 \quad k = 0, 1, 2, 3 \end{aligned} \tag{7}$$

Figs. 11-12에서 유한요소해석 데이터와 회귀곡선이 잘 일치함을 보인다. 이러한 방식으로 m 의 변화에 따라 회귀했고, A 에 대해 다시 회귀했다.

앞서 제시된 함수는 재료물성치가 주요변수가 되므로, 재료의 응력-변형률속도 특성을 정량적으로 나타낼 수 있는 물성회귀식이 필요하다. 크리프 변형 재료의 응력과 변형률속도분포를 구하기 위해 Norton이 제안한 식 (1)의 멱함수 법칙을 사용한다.

여기서 m 은 크리프지수, A 는 크리프계수로써 정상 상태영역에서의 응력과 변형률속도 데이터 회귀를 통해 구할 수 있다.

3.2 총 크리프시간 변화에 따른 응력 및 변형률 속도 분포

$1/m=0.2$, $A=1.0 \times 10^{-15} \text{ MPa}^{-5} \text{ s}^{-1}$ 인 재료에 대해 총 크리프시간 변화에 따른 변형률속도 및 유효응력을 살폈다. 재료물성치는 $E=1000 \text{ GPa}$, $\nu=0.3$, $\sigma_0=1000 \text{ MPa}$ 로 가정하고, CRD(constant rate of depth) 방식의 크리프 시험을 이용해 $t=100, 200 \text{ s}$ 동안 $0.1 \mu\text{m}$ 깊이만큼 압입했다.

Fig. 13은 $r=0$, $l/D=0.2$ 에서 총 크리프시간 변화에 따른 압입깊이와 ξ, ψ 의 관계를 나타낸 곡선들로, 무차원변수 ξ, ψ 는 크리프시간에 상관없이 일정함을

볼 수 있다. Fig. 14는 총 크리프시간 변화에 따른 유효 크리프 변형률속도-응력곡선을 비교한 것으로, 두 곡선 모두 응력과 변형률속도 관계가 멱함수 법칙을 따른다. 따라서 총 크리프시간은 유효응력-변형률속도 곡선의 분포에 영향을 미치며, 크리프 물성에는 영향을 미치지 않는다.

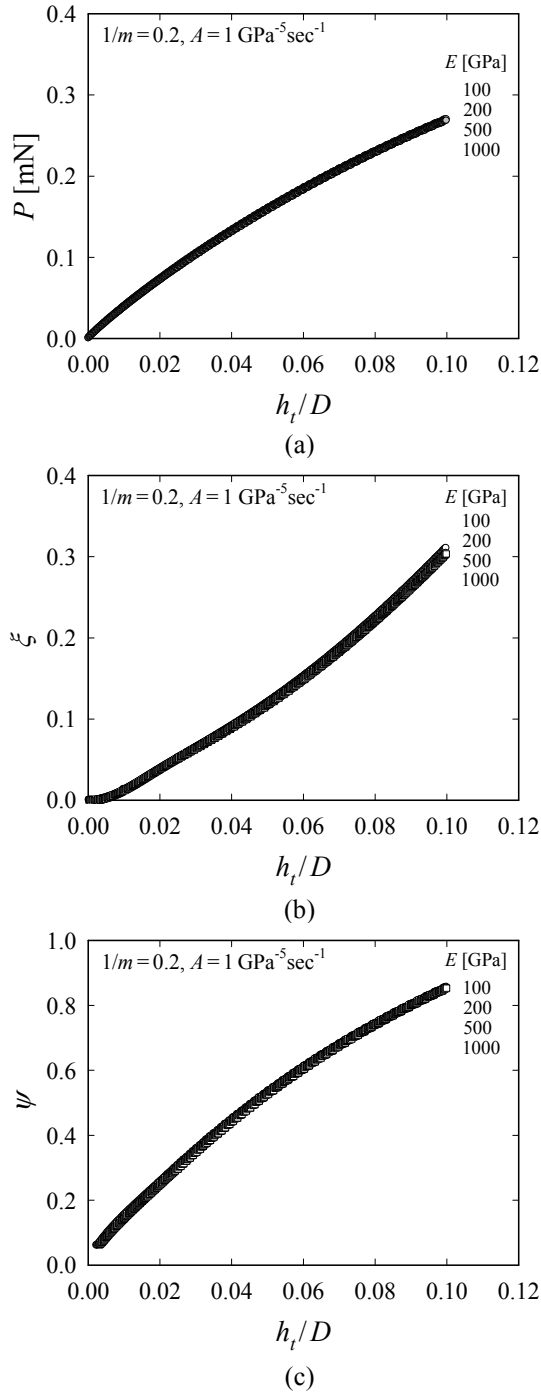


Fig. 15 Variation of elastic modulus related to (a) force vs. depth and (b) ξ vs. depth and (c) ψ vs. depth for $1/m=0.2, A=1.0 \times 10^{-15} \text{MPa}^{-5} \text{s}^{-1}$

3.3 영률변화에 따른 무차원 곡선들의 관계

영률변화에 따른 크리프거동을 살펴보고자 $1/m=0.2$ 에서 영률을 변화시켜 가면서 P, ε_c, ψ vs. h_t/D 의 관계를 확인했다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 하중과 무차원 곡선들은 영률의 영향을 거의 받지 않는다. 이는 탄성영역이 크리프영역에 비해 상대적으로 매우 작아 영률이 달라져도 하중, 변형률속도 및 응력이 일정하기 때문이다. Fig. 16은 $A=1.0 \times 10^{-15} \text{MPa}^{-5} \text{s}^{-1}, 1/m=0.2$ 에서 $r=0, l/D=0.2$ 지점의 유효 응력-변형률속도 곡선을 log scale로 나타낸 것으로, 영률에 상관없이 곡선들이 일치함을 볼 수 있다.

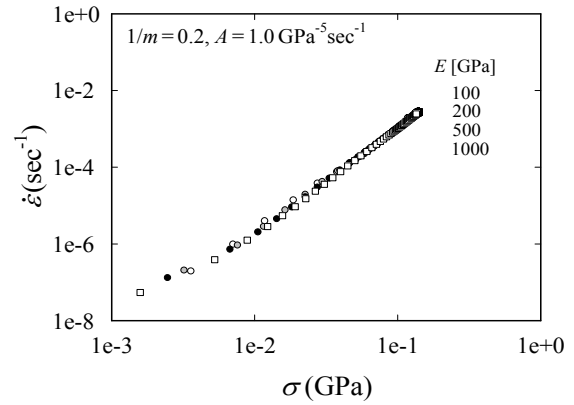


Fig. 16 $\log \dot{\varepsilon}$ vs. σ curves with E for $1/m=0.2, A=1.0 \times 10^{-15} \text{MPa}^{-5} \text{s}^{-1}$

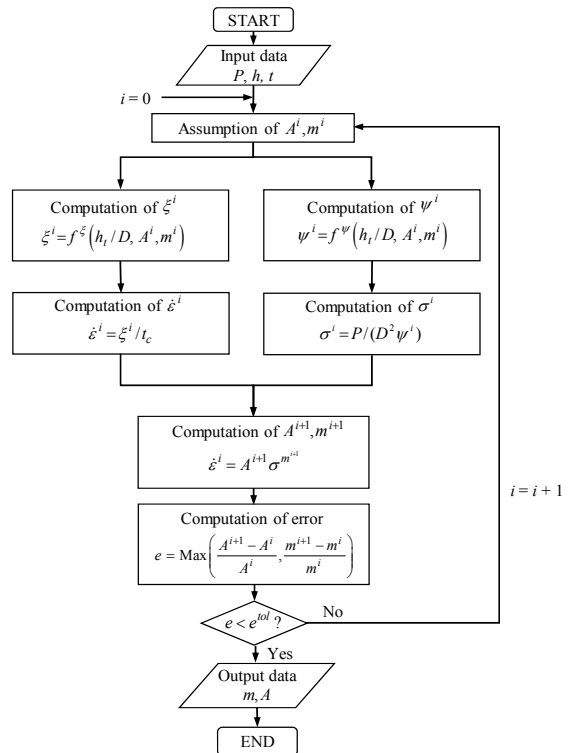


Fig. 17 Flow chart for determination of m and A

Table 3 Comparison of computed creep properties to those given

E (GPa)	$1/m$	Computed $1/m$ (Error %)	$\log A$ ($\text{GPa}^{-m} \text{sec}^{-1}$)	Computed $\log A$ (Error %)
1000	0.2	0.196 (2.2)	-15	-15.3 (1.8)
	0.33	0.332 (0.2)	-12	-10.0 (0.1)
	1.0	1.019 (1.9)	-5	-4.9 (0.8)
100	0.2	0.198 (1.1)	-15	-15.1 (0.9)
	0.33	0.325 (2.6)	-10	-10.2 (1.9)
	1.0	1.015 (1.5)	-5	-4.9 (0.7)

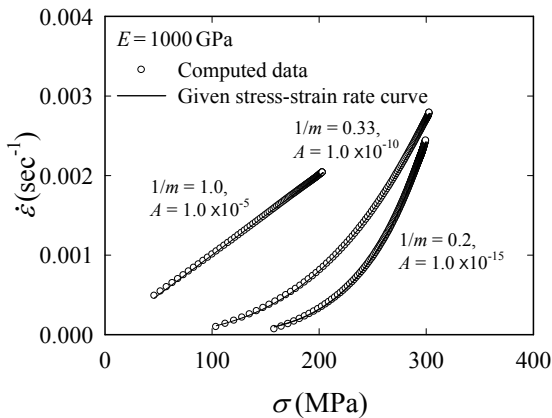


Fig. 18 Comparison of computed stress-strain rate curves to those given with variation of $1/m$ and A for $E = 1000 \text{ GPa}$

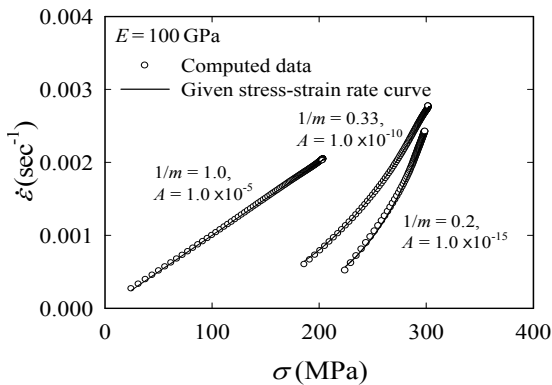


Fig. 19 Comparison of computed stress-strain rate curves to those given with variation of $1/m$ and A for $E = 100 \text{ GPa}$

CRD 크리프 압입시험에서는 영률변화에 따른 무차원 곡선과 유효응력 - 변형률속도 곡선이 일치하므로 재료

영률에 상관없이 크리프 물성을 구할 수 있다.

3.4 크리프 물성평가

구형압입자를 이용한 크리프 압입시험의 하중-변위 곡선으로부터 크리프 물성을 평가할 수 있는 프로그램 흐름도를 Fig. 17에 나타냈다. m, A, t_c 를 초기 가정치로 설정하고 최적 관측지점에서 각 하중-변위곡선 데이터와 무차원함수의 관계를 구한다. 계산된 응력-변형률속도 데이터를 회귀해 m 과 A 를 계산하고, 같은 과정을 반복수행 하면서 A 와 m 의 변화량이 일정범위 내에 들어오는지 판별한다.

무차원변수들 ξ, ψ 의 회귀를 수행해 얻은 상수값들로 크리프 물성평가 프로그램을 완성했다. Table 3와 Figs. 18-19에 $r=0, l/D=0.2$ 에서 크리프 물성평가 프로그램으로 얻은 물성치와 주어진 물성치를 비교했다. 실선은 유한요소해석에 사용된 이론적인 변형률 속도-응력곡선이고, 원으로 이루어진 곡선은 FEA를 통해 얻은 하중-변위 곡선을 크리프 물성평가 프로그램의 입력 자료로 대입해 계산된 변형률속도-응력곡선이다. 크리프 지수는 평균 1.5%, 크리프계수는 평균 1.0% 이내의 오차범위에서 물성치들이 얻어진다.

4. 요약

압입 크리프시험은 단축 크리프와 달리 다축 응력 상태에서 크리프 변형이 발생하므로 일반적인 단축 크리프시험 하에서 측정되는 응력 및 변형률 속도와 압입크리프 데이터 사이의 상관관계 수립이 관건이다. 본 연구에서는 Lee 등^(13,14)이 유한요소 해석을 통해 이끌어낸 구형압입이론을 재료의 크리프 물성을 평가하기 위한 압입이론으로 확장했다. 단일요소를 이용한 크리프 인장시험과 구형 압입 크리프시험을 비교해 인장시험과 압입시험의 유사성을 살폈으며, 영률과 총 크리프시간이 응력-변형률속도 곡선에 미치는 영향을 살폈다. 새로운 크리프 물성평가 수치 접근법은 크리프지수, 계수 값들을 각각 1.5%, 1.0% 오차범위에서 예측할 수 있다.

후 기

본 논문은 2012년 교육과학기술부 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다 (No. 2012 R1A2A2A 01046480).

참고문헌

(1) Hill, R., 1992, "Similarity Analysis of Creep Inden-

- tation Tests," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 63, pp. 574~581.
- (2) Lamanna, J. A., Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 2005, "On the Measurement of Material Creep Parameters by Nanoindentation," *Materials Research Society*, Vol. 841, pp. 147~152.
- (3) Mayo, M. J. and Nix, W. D., 1988, "Investigation of the Constant Load Method for Nanoindentation Creep," *Acta Metallurgica*, Vol. 36, pp. 2183~2192.
- (4) Mulhearn, T. O. and Tabor, D., 1960, "Creep and Hardness of Metals : a Physical Study," *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 89, pp. 7~12.
- (5) Sargent, P. M. and Ashby M. F., 1992, "Indentation Creep," *Materials Science and Technology*, Vol. 8, pp. 594~601.
- (6) Stone, D. S., Jakes, J. E., Puthoff, J. and Elmustafa, A. A., 2010, "Analysis of Indentation Creep," *Journal of Materials Research*, Vol. 25, pp. 611~621.
- (7) Whirley, R. G. and Henshall, G. A., 1992, "Creep Deformation Structural Analysis using an Efficient Numerical Algorithm," *International Journal of Numerical in Engineering*, Vol. 35, pp. 1427~1442.
- (8) Bower, A. F., Fleck, N. A., Needleman, A. and Ogbonna, N., 1993, "Indentation of a Power Law Creeping Solid," *Proceedings of the Royal Society of London (A)*, Vol. 441, pp. 97~124.
- (9) Sohn, S.J., 2007, "A Study of Indentation Creep Using the Finite Element Method," PhD Thesis, University of Tennessee.
- (10) Goodall, R. and Clyne, T. W., 2006, "A Critical Appraisal of the Extraction of Creep Parameters from Nanoindentation Data obtained at Room Temperature," *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 5489~5499.
- (11) Poisl, W.H., Oliver, W.C. and Fabes, B.D., 1995, "The Relationship Between Indentation and Uniaxial Creep in Amorphous Selenium," *Journal of Materials Research*, Vol. 10, pp. 2024~2032.
- (12) Wang, C. L., Lai, Y. H., Huang, J. C. and Nieh, T. G., 2010, "Creep of Nanocrystalline Nickel: a Direct Comparison Between Uniaxial and Nanoindentation Creep," *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 175~178.
- (13) Lee, H., Lee, J. H. and Pharr, G.M., 2005, "A Numerical Approach to Spherical Indentation Technique for Material Property Evaluation," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 53, pp. 2037~2069.
- (14) Lee, J. H., Lim, D. K., Hyun, H. C. and L, H., 2012, "A Numerical Approach to Indentation Technique to Evaluate Material Properties of Film-on-Substrate Systems," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 18, pp. 1898~1901.
- (15) ABAQUS User's Manual, Version 6.10, 2010, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- (16) Yoo, B. G., Oh, J. H., Kim, Y. J., Park, K. W., Lee, J. C. and Jang, J. I., 2010, "Nano-indentation Analysis of Time-dependent Deformation in As-cast and Annealed Cu-Zr Bulk Metallic Glass," *Inter-metallics*, Vol. 18, pp. 1898~1901.