

## 천이크리프를 고려한 구형압입 크리프 물성평가법

임동규\* · 이진행\*\* · 김민수\* · 이형일\*\*†

\*서강대학교 기계공학과, \*\*한국원자력연구원

### Spherical Indentation Techniques for Creep Property Evaluation Considering Transient Creep

Dongkyu Lim\*, Jin Haeng Lee\*\*, Minsoo Kim\* and Hyungyil Lee\*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.,

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

(Received March 12, 2013 ; Revised June 26, 2013 ; Accepted August 7, 2013)

**Key Words:** Transient Creep(천이크리프), Material Property(재료 물성치), Spherical Indentation(구형 압입), FEA (유한요소해석)

**초록:** 기존 단축 크리프시험에서는 천이 크리프의 영향을 무시하고 정상상태 크리프만을 고려하기 때문에 실제 크리프 특성을 나타내지 못한다. 이에 본 연구에서는 천이크리프를 고려한 압입 크리프 물성평가법을 제시한다. 다양한 재료에 대해 구형압입시험 전산모사를 이용해 크리프 물성변화에 따른 거동을 살펴보고, 크리프 특성을 무차원 변수들의 회귀식으로 표현한다. 이를 토대로 천이크리프를 고려한 압입 크리프 물성평가 프로그램을 생성했다. 제시한 물성평가 프로그램을 통해 압입 하중-변위 곡선으로부터 크리프지수, 계수값들을 각각 1.1%, 2.3% 오차범위에서 예측할 수 있다.

**Abstract:** Creep through nanoindentations has attracted increasing research attention in recent years. Many studies related to indentation creep tests, however, have simply focused on the characteristics of steady-state creep, and there exist wide discrepancies between the uniaxial test and the indentation test. In this study, we performed a computational simulation of spherical indentations, and we proposed a method for evaluating the creep properties considering transient creep. We investigated the material behavior with variation of creep properties and expressed it using regression equations for normalized variables. We finally developed a program to evaluate the creep properties considering transient creep. By using the proposed method, we successfully obtained creep exponents with an average error less than 1.1 and creep coefficients with an average error less than 2.3 from the load-depth curve.

- 기호설명 -

#### 1. 서론

- $A$  : 단축인장 크리프계수
- $B$  : 압입 크리프계수
- $C, K$  : 천이크리프를 고려한 크리프 계수
- $m$  : 크리프지수
- $\epsilon_c$  : 크리프 변형률
- $\dot{\epsilon}_c$  : 크리프 변형률속도
- $\xi$  : 변형률속도와 크리프 시간의 곱
- $\psi$  : 평균 접촉압력과 유효응력의 비

기계 등 구조물의 신뢰성평가에 있어 핵심이 되는 재료물성평가 기법에 대한 연구는 최근 나노크기 소자에 대한 관심이 집중되면서 새로운 전환점을 맞이하게 되었다. 인장 및 파괴시험과 같은 기존의 전통적인 시험법은 표준화가 비교적 잘 되어 있으나, 나노크기의 미소재료에 그대로 적용하기에는 한계가 있다. 이에 미소재료를 직접 시험하기 위한 방법이 요구되고 있으며, 나노압입시험법은 편리함과 풍부한 응용가능성 때문에 미소재료시험 분야에서 가장 널리 쓰이고 있는 시험법으로 자리잡고 있다.

최근 미소제조공정에서 발생하는 열 및 이에 따른

† Corresponding Author, hylee@sogang.ac.kr

크리프거동에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 미소압입시험을 통한 크리프 연구가 많은 주목을 받고 있다.<sup>(1~7)</sup> 압입 크리프시험은 단축 크리프와 달리 다축 응력상태에서 크리프 변형이 발생하여 일반적인 단축 크리프시험 하에서 측정되는 응력 및 변형률속도와 압입크리프 데이터 사이의 상관관계 수립이 관건이다. 그러나 미소압입시험에서 장시간 안정적인 고온유지 기술의 기술적 난제와 더불어 압입자형상, 크리프 천이영역 영향 등과 같은 이론적 연구가 아직 충분히 이루어 지지 않아, 현재까지 압입 크리프특성을 단축 크리프물성과 대응 시키는데 많은 어려움이 있다. Lucas와 Oliver<sup>(8)</sup>는 Indium에 대한 크리프 실험으로 단축 크리프에서 얻은 응력 지수  $m$ 과 유사한 값을 압입시험으로부터 얻었으나, 크리프계수  $A$ 와  $B$  사이에는 상당한 차이가 있음을 보였다. 또한 Ogbonna 등<sup>(9)</sup>은 기존 압입평가방법이 천이크리프의 영향을 무시하고 정상상태 크리프만을 고려하기 때문에 크리프 응력 지수를 과대평가하는 경향이 있음을 지적했다.

압입시험을 이용한 크리프시험은 단축시험에 비해 편리한 방법으로 미소재료의 크리프 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 기존 압입 연구들은 정상상태 특성만을 이용하고 있기 때문에 단축 크리프시험과 압입시험 사이에 상당한 편차가 존재한다.<sup>(8~14)</sup> 이에 본 연구에서는 대변형 압입시험 유한요소해석에 기초해 천이크리프를 고려한 크리프 물성평가법을 제시하고자 한다. 이를 위해 우선 천이크리프를 고려한 압입 크리프시험으로 크리프 물성변화에 따른 재료의 거동을 살펴보고, 무차원 변수들의 회귀식으로 표현했다. 이를 토대로 압입 크리프 물성평가 프로그램을 생성했으며 생성된 물성 평가 프로그램으로 재료의 크리프 물성을 평가했다.

## 2. 크리프 압입시험의 유한요소해석

### 2.1 크리프 압입시험의 유한요소모델

구형압입자를 이용한 크리프 재료의 압입시험을 위해 Fig. 1과 같은 축대칭 유한요소모델을 형성했다 (ABAQUS, 2010).<sup>(15)</sup> 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 가정했다. 압입자와 모재의 접촉면에는 압입자와 모재쪽 모두 접촉 요소면

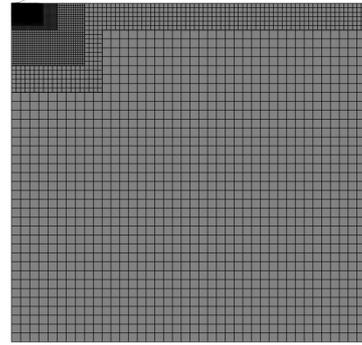


Fig. 1 FE mesh for creep indentation analysis

(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 천이크리프를 고려한 유한요소해석

정확한 압입크리프 특성을 파악하려면 변형경화에 의한 천이크리프의 영향을 고려해야 한다. 천이크리프를 고려할 경우 응력과 변형률속도 사이의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{1/m} \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{1/n} \quad (1)$$

ABAQUS에서 사용되는 시간경화 및 변형경화 크리프 관계식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = C\sigma^k t^l \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = \left\{ C\sigma^k [(l+1)\epsilon]^l \right\}^{\frac{1}{l+1}} \quad (3)$$

여기서  $C, k, l$ 은 크리프 상수로, 온도의 함수이다. 물리적으로 의미있는 거동을 나타내려면  $C$ 와  $k$ 는 양수,  $-1 < l \leq 0$ 이어야 한다. 시간경화 멱함수 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \sigma_0^{\frac{1}{M+N}} t_0^{\frac{N}{M+N}}; \quad \dot{\epsilon}_0 = \left( \frac{\epsilon_0}{t_0} \right) \left( \frac{N}{M+N} \right) \quad (4)$$

여기서  $M$ 과  $N$ 은 각각 식 (1)의  $m, n$ 과 역의 관계 ( $1/m, 1/n$ )이다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음 세 관계식이 유도되며, 유한요소해석에 사용된 매개변수  $m$ 과  $n$  값을 Table 1에 나타냈다.

**Table 1** Material parameters used in finite element analysis

| Material property | Values used in FEA    |
|-------------------|-----------------------|
| $m$               | 1, 2, 5, 10           |
| $n$               | 2, 3, 5, 10, $\infty$ |

$$C = \dot{\epsilon}_0 \sigma_0^{\frac{1}{M+N}} t_0^{\frac{N}{M+N}}; k = \frac{1}{M+N}; l = -\frac{N}{M+N} \quad (5)$$

변형경화 크리프 관계식 (3) 에서  $C$  를 구하려면 다음과정이 요구된다. 먼저 식 (5)를 식 (3)에 대입해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= C^{\frac{M}{M+N}} \sigma^{\frac{1}{M}} \left[ \left( \frac{M}{M+N} + 1 \right) \epsilon \right]^{\frac{N}{M}} \\ &= \left[ C^{\frac{M}{M+N}} \left( \frac{M}{M+N} + 1 \right)^{\frac{N}{M}} \right] \sigma^{\frac{1}{M}} \epsilon^{\frac{N}{M}} \\ &= K \sigma^{\frac{1}{M}} \epsilon^{\frac{N}{M}}; K = C^{\frac{M}{M+N}} \left( \frac{M}{M+N} + 1 \right)^{\frac{N}{M}} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 보면 천이크리프를 고려한 유한요소해석으로 구한  $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}_c$  곡선의  $y$  절편은  $K$ 가 된다. 실제  $C$  값을 구하려면 식 (6)을 식 (7)과 같이 변환해야 한다.

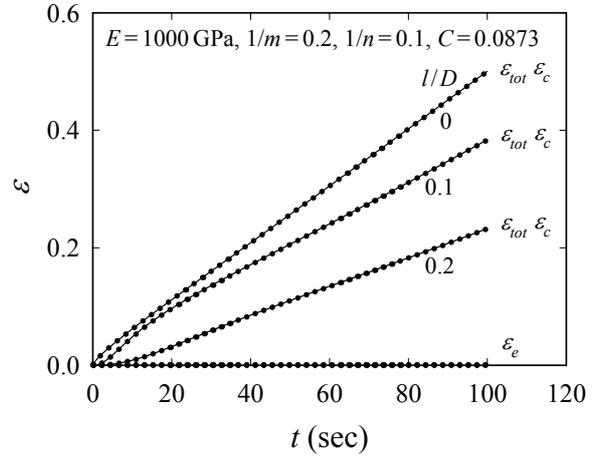
$$\begin{aligned} C^{\frac{M+N}{M}} &= K \left( \frac{M}{M+N} \right)^{\frac{N}{M}} \\ \Leftrightarrow C &= \left[ K \left( \frac{M}{M+N} \right)^{\frac{N}{M}} \right]^{\frac{M}{M+N}} \\ \Leftrightarrow C &= \left[ K (l+1)^{-\frac{1}{l+1}} \right]^{l+1} \end{aligned} \quad (7)$$

크리프 압입시험에서는  $A$ 와  $m$ 을 구하는 것이 1차 목표이기에  $n$ 은 아는 값으로 가정한다. 따라서 식 (6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

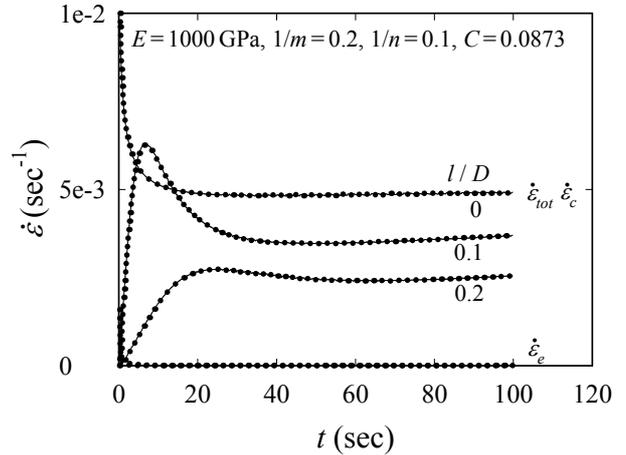
$$\dot{\epsilon} = K \left( \frac{\sigma}{\epsilon^{1/n}} \right)^m; K = C^{l+1} (l+1)^{\frac{l}{l+1}} \quad (8)$$

2.3 크리프 압입시험의 유효변형률속도 관측지점

크리프 압입시험에서 총변형률  $\epsilon_{tot}$ 은 식 (9)와 같이 탄성변형률  $\epsilon_e$ 와 크리프변형률  $\epsilon_c$ 의 합으로 나타난다.



**Fig. 2**  $\epsilon_{tot}, \epsilon_e, \epsilon_c - t$  curves with variation of  $l/D$  considering transient creep



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

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_c \quad (9)$$

이때 유효변형률은 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{tot} &= \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 \right. \\ &\quad \left. + 6(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

재료물성은  $m=5, n=10, C=8.73 \times 10^{-2}, E=1000\text{GPa}, \nu=0.3, \epsilon_0=0.001$ 로 가정하고, 천이크리프를 고려한 CRD 압입 크리프시험으로  $r=0$ 인 지점에서 하부방향으로 떨어진 깊이 ( $l/D$ )와  $\epsilon_{tot}, \epsilon_e, \epsilon_c$ 의 관계를 살폈다.  $r$ 은 변형 후 축대칭중심으로부터

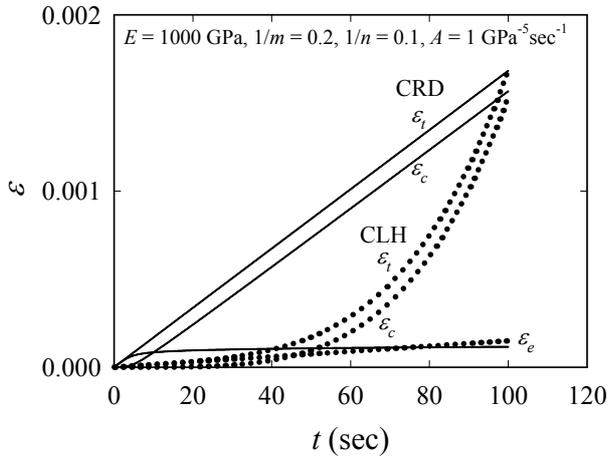


Fig. 4  $\epsilon_{tot}, \epsilon_e, \epsilon_c - t$  curves of single element considering transient creep for CRD and CLH methods

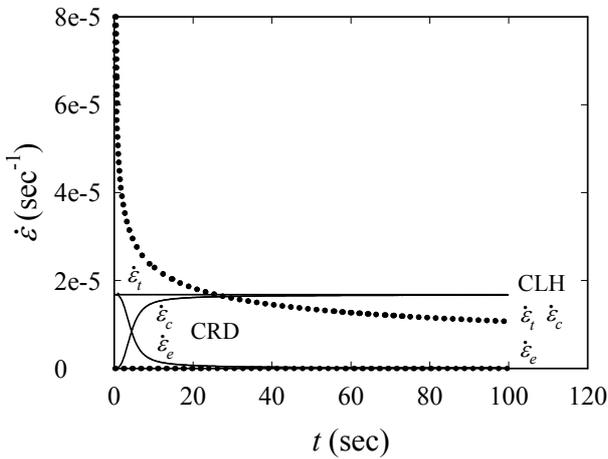
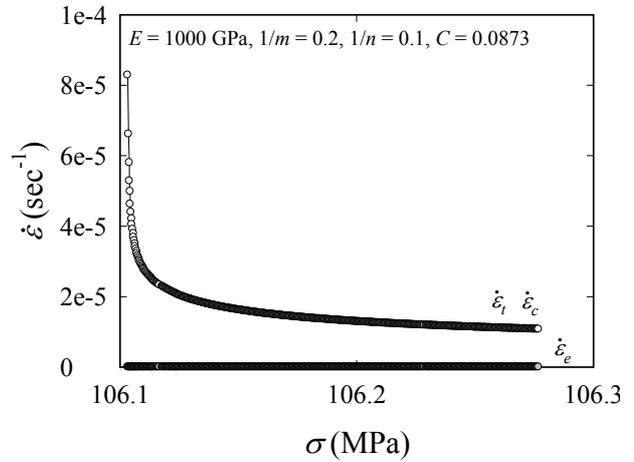
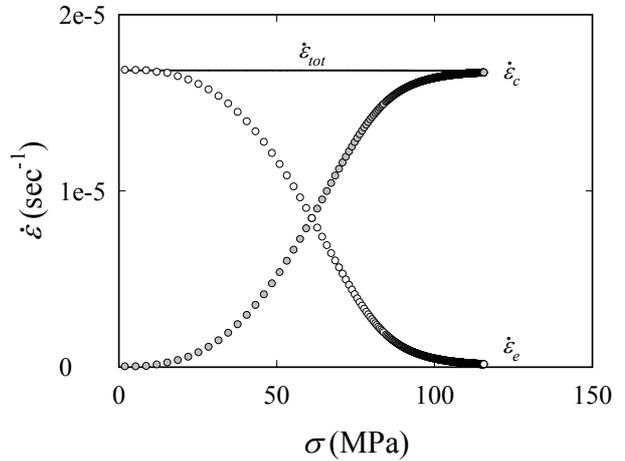


Fig. 5  $\dot{\epsilon}_{tot}, \dot{\epsilon}_e, \dot{\epsilon}_c - t$  curves of single element considering transient creep for CRD and CLH methods



(a)



(b)

Fig. 6  $\dot{\epsilon}$  vs.  $\sigma$  curve of single element considering transient creep for (a) CLH and (b) CRD methods

반경방향 거리,  $l$ 은 재료표면으로부터의 관측깊이이다. 변형률 속도  $\dot{\epsilon}$ 은  $t-\epsilon$ 곡선의 기울기로 구했다. Fig. 2는  $r=0$ 에서 하부 방향으로 떨어진 깊이 ( $l/D$ )와  $\epsilon_{tot}, \epsilon_e, \epsilon_c$ 의 관계를, Fig. 3은  $\dot{\epsilon}_{tot}, \dot{\epsilon}_e, \dot{\epsilon}_c$ 의 변화를 나타낸다. 압입 중심에서 탄성변형률이 크리프변형률에 비해 미소해, 총변형률과 크리프변형률의 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 압입 표면에서는 변형률 구배가 크지만, 표면에서 일정거리가 떨어진 곳에서는 변형률 구배가 감소한다. 이로부터 변형률 구배가 작고, 총변형률에 대한 탄성변형률의 비율이 1% 미만인 압입표면 중심으로부터 반경방향으로  $r=0$ , 그리고 압입표면 하부방향으로 압입자 직경의 20% ( $l/D=0.2$ )인 곳을 관측지점으로 선택한다. 관측지점에서 구한 응력과 변형률속도는 재료의 탄성에 큰 영향을 받지 않아, 압입 하중-변위 곡선으로부터 정확한 크리프 물성을 얻을 수 있다.

#### 2.4 천이크리프를 고려한 단일요소해석

천이크리프를 고려한 재료물성은  $m=5, n=10, C=8.73 \times 10^{-2}, E=1000 \text{ GPa}, \nu=0.3, \epsilon_0=0.001$ 이며, 단일요소로 CRD 및 CLH (Constant Load and Hold) 크리프 인장시험을 수행했다. 사용한 요소는 4절점 축대칭요소 CAX4이며, 모재크기는  $60 \times 60 \mu\text{m}$ 이다. CLH 크리프 인장시험에서 상단에 인가한 하중은 1200 mN이며, 두 시험 모두 인장길이는  $0.1 \mu\text{m}$ 로 같다. 시간에 따른 총, 탄성, 크리프변형률 변화를 Fig. 4에, 각각의 변형률을 시간증분으로 나누어 구한 총, 탄성, 크리프 변형률속도를 Fig. 5에 나타냈다.

CRD 방법에서는 압입초기  $\dot{\epsilon}_e$ 가  $\dot{\epsilon}_c$ 에 비해 큰 비중을 차지하나, CLH 방법에서는  $\dot{\epsilon}_e$ 가 작아  $\dot{\epsilon}_{tot}$ 와  $\dot{\epsilon}_c$ 가 거의 같다. Fig. 6는 단일요소에서 응력과 크리프 변형률속도 관계를 나타낸 곡선들이다. CLH 방법에서는 하중이 일정하고 단면적 변화가 작아 응력분포가 작은 반면, CRD 방법에서는 응력분포가 크게 나타난다.

두 방법 모두 응력과 변형률속도 관계가 멱함수 법칙을 따르지 않는다.

천이크리프를 고려한 단일요소해석으로 식 (8)을 이용해 응력과 크리프 변형률속도의 관계를 확인했다 (Fig. 7). 멱함수법칙을 따르지 않는  $\sigma - \dot{\epsilon}_c$  곡선을 식 (8) 형태로 회귀하면 멱함수관계가 된다.  $m = 5, n = 10, C = 8.73 \times 10^{-2}, E = 1000\text{GPa}, \nu = 0.3, \epsilon_0 = 0.001, \dot{\epsilon}_0 = 1$  인 재료에 대해, CRD 방식의 크리프 압입 시험으로 100s 동안  $0.1 \mu\text{m}$  깊이만큼 압입했다. 압입 하부지점  $l/D = 0.2, r = 0$  에서 얻은  $\sigma / \epsilon^{1/n} - \dot{\epsilon}_c$  곡선을 CLH와 CRD 인장시험으로 얻은 곡선과 비교했다 (Fig. 8).  $\sigma / \epsilon^{1/n} - \dot{\epsilon}_c$  곡선의 선형구간에서 기울기와  $y$  절편값을 구해 크리프지수  $m$  과 크리프 계수  $C, K$  를 나타냈다 (Table 2).  $m$  과  $C, K$  값은 단일요소해석으로 구한 값과 유사하며, 주어진 물성치와 큰 차이가 없다.

### 3. 크리프 물성평가 압입이론

#### 3.1 천이크리프를 고려한 무차원변수 회귀

재료의 크리프물성치에 따라 선정지점의 변형률 속도 및 응력이 변하므로, 이들 관계를 물성치의 함수로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 선정된 관측지점 ( $r = 0, l/D = 0.2$ )에서 응력-변형률속도와 압입깊이 관계를 수식화하고자 한다.

크리프 물성변화 [4 개의  $1/m (1.0, 0.5, 0.2, 0.1)$  과 5 개의  $1/n (0.5, 0.33, 0.2, 0.1, 0)$ ]에 따른 재료의 거동을 유한요소해석을 통해 확인했고, 재료물성과 관계지은 무차원변수들  $\xi, \psi$ 로 표현했다. 이로부터 얻은 상수값들로 크리프 물성평가 프로그램의 데이터 베이스를 구축했다. 유효 크리프변형률속도와 크리프 시간의 곱을 무차원변수  $\xi$ 로 정의한다.

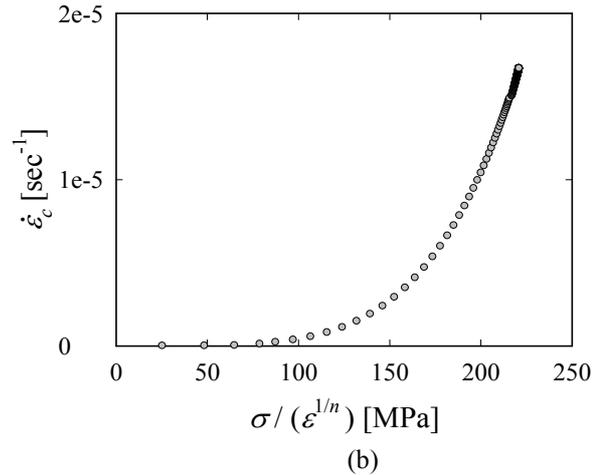
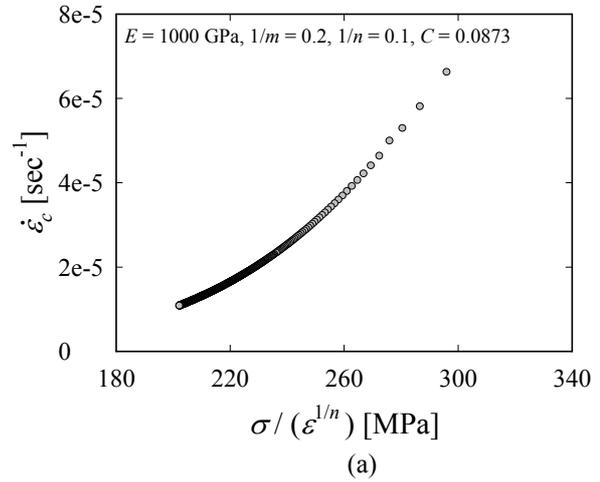
$$\xi = \dot{\epsilon} \times t_c \quad (11)$$

Fig. 9(a)는  $1/m = 0.5$  에서 변형경화지수 변화에 따른 무차원변수  $\xi$ 와 압입깊이의 관계를 보여준다.

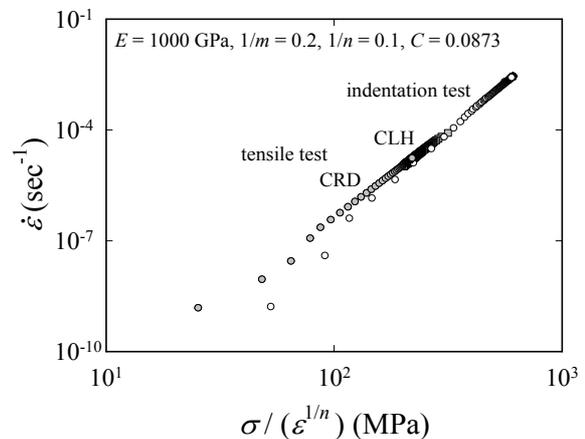
**Table 2** Comparison of computed creep properties obtained from equivalent stress-strain curve to those given for CRD, CLH tensile test and CRD indentation test

| $E = 1000\text{GPa}, 1/m = 0.2, C = 0.0873\text{GPa}^{-m}\text{sec}^{-1}$ |                |              |              |
|---|----------------|--------------|--------------|
| Test method   | Computed $1/m$ | Computed $K$ | Computed $C$ |
| CLH tensile   | 0.198          | 0.0334       | 0.0889       |
| CRD tensile   | 0.198          | 0.0336       | 0.0891       |
| CRD indentation   | 0.198          | 0.0341       | 0.0897       |

$n$  이 커질수록  $\xi$ 가 증가하며, 압입깊이 증가에 따라  $\xi$ 는 일정값으로 수렴하지 않고 계속적으로 증가한다. 이를 토대로 식 (12)에서  $\xi$ 를  $h_t$ 와  $n$ 의 함수로 나타냈다.



**Fig. 7**  $\dot{\epsilon}$  vs.  $\sigma / \epsilon^{1/n}$  curve of single element considering transient creep for (a) CLH and (b) CRD methods



**Fig. 8** Comparison of  $\dot{\epsilon}$  vs.  $\sigma / \epsilon^{1/n}$  curve obtained by CRD, CLH tensile test and CRD indentation test

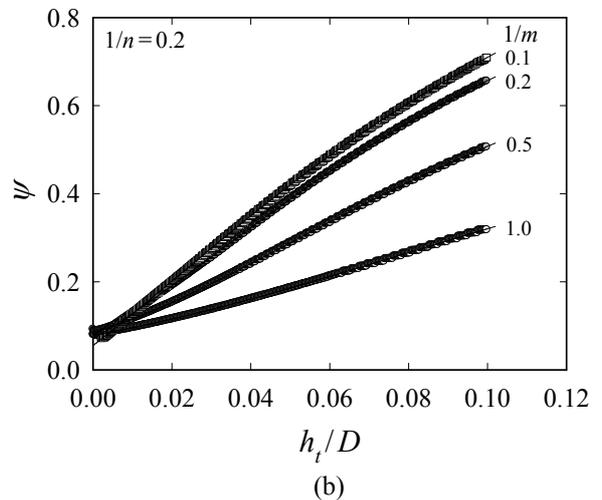
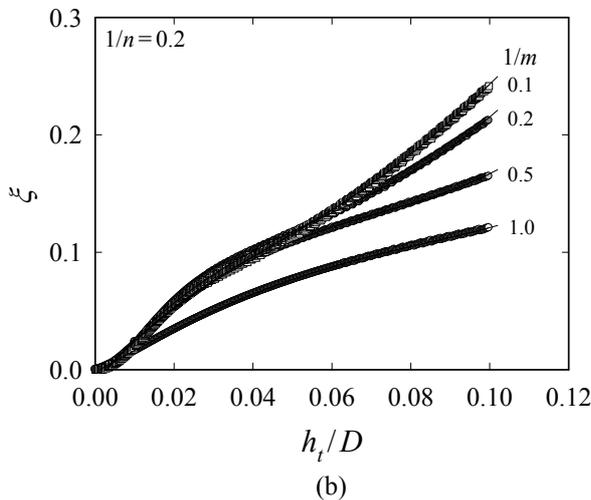
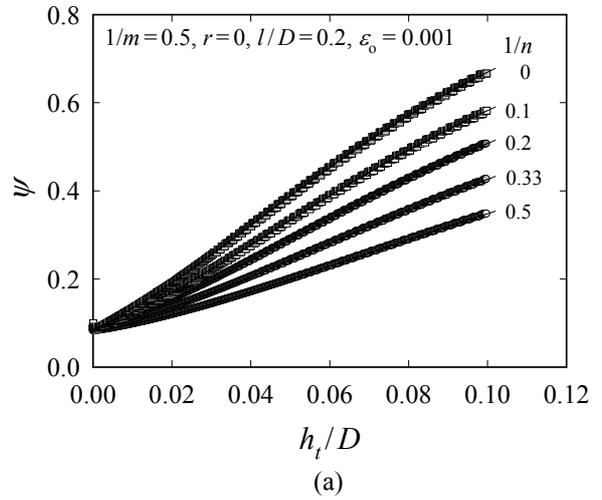
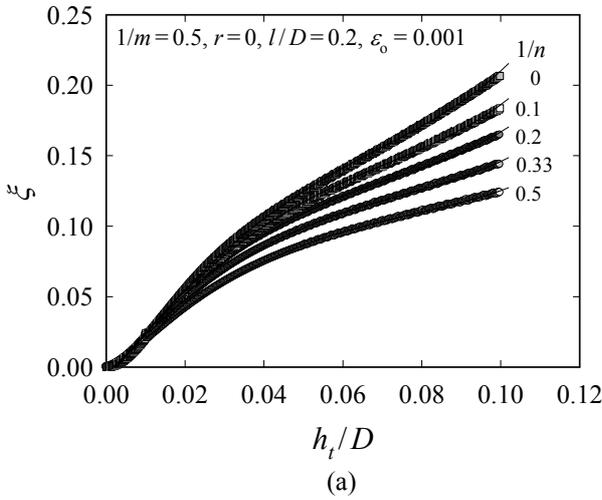


Fig. 9 Regression curves of factor  $\xi$  for (a)  $1/m=0.5$  and (b)  $1/n=0.2$

Fig. 10 Regression curves of factor  $\psi$  for (a)  $1/m=0.5$  and (b)  $1/n=0.2$

$$\xi = f_i^\xi(n) \left( \frac{h_t}{D} \right)^i \tag{12}$$

$$f_i^\xi(n) = a_{ij}^\xi n^{-j}$$

$$i = 0,1,2,3 \quad j = 0,1,2,3$$

Fig. 9(b)는  $1/n=0.2$ 에서 크리프지수 변화에 따른  $\xi$ 와  $h_t/D$ 의 관계를 보여준다. 여기에서도 주어진 압입깊이에서 크리프지수가 증가함에 따라 유효크리프 변형률속도는 증가한다. Fig. 9의 관계를 토대로  $\xi$ 를 다음과 같이 압입깊이와 변형경화지수 및 크리프 지수의 함수형태로 설정했다. 먼저 각 크리프지수가 주어지면 5 가지 변형경화지수에 대해 식 (12) 형태로 회귀한다. 이어 식 (12)의 회귀계수들을 4 가지 크리프 지수에 대해 다시 회귀한다. 이와 같은 과정을 거치면 식 (12)를 식 (13)과 같이 변형경화지수와 크리프 지수의 통합함수로 표현할 수 있다.

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

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

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

$$i = 0,1,2,3 \quad j = 0,1,2,3 \quad k = 0,1,2,3 \tag{13}$$

압입시 평균점촉압력  $p$ 를 변형영역에서의 대표 유효응력  $\sigma$  값으로 나눈 것을 구속인자(constraint factor)  $\psi$ 로 나타내며, 압입자직경을 이용한 무차원 형태를 사용해 정의한다.

$$\psi = \frac{P}{D^2 \sigma} \tag{14}$$

Fig. 10은  $1/m=0.5, 1/n=0.2$ 에서 변형경화지수와 크리프지수의 변화가  $\psi$ 와  $h_t/D$ 관계에 미치는 영향을 보여준다.  $\xi$ 와 동일하게  $m, n$ 이 커짐에 따라  $\psi$ 는 증가하며, 이로부터  $\psi$ 를 식(15)와 같이 압입깊이와

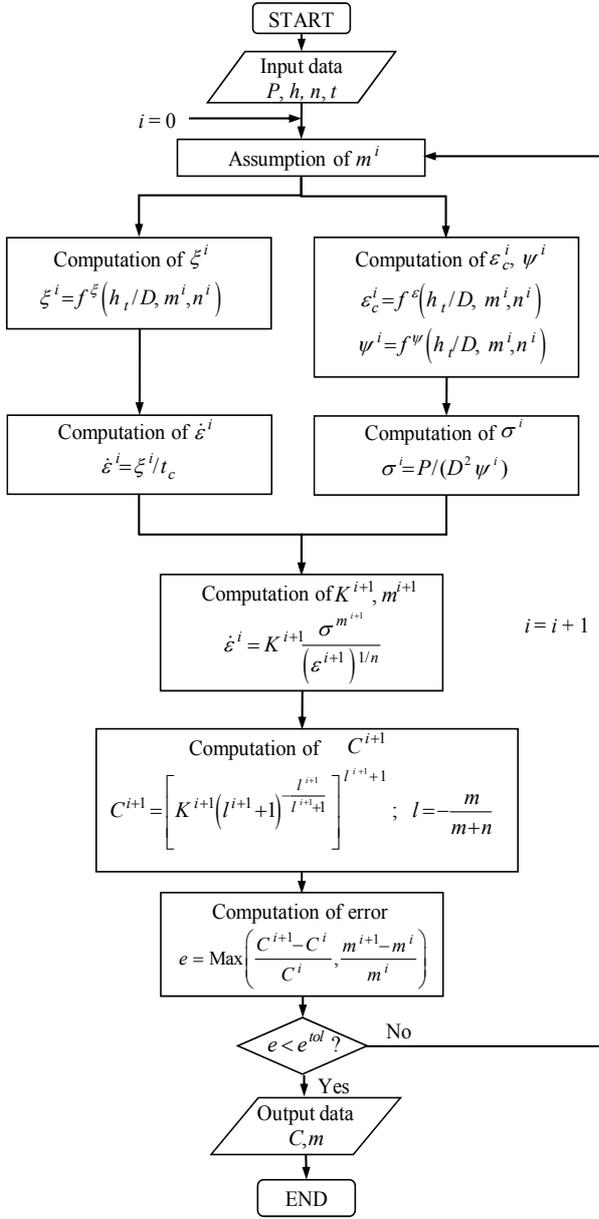


Fig. 11 Flow chart for determination of C and m

m, n의 함수로 나타냈다.

$$\begin{aligned} \psi &= f_i^\psi(A, m) \left(\frac{h_t}{D}\right)^i \\ f_i^\psi(A, m) &= a_{ij}^\psi(A) (m)^{-j} \\ a_{ij}^\psi(m) &= b_{ijk}^\psi(m)^{-k} \end{aligned} \quad (15)$$

$i = 0, 1, 2, 3 \quad j = 0, 1, 2, 3 \quad k = 0, 1, 2, 3$

앞서 제시된 함수는 재료물성치가 주요변수가 되므로, 재료의 응력-변형률속도 특성을 정량적으로 나타낼 수 있는 물성회귀식이 필요하다. 천이크리프를 고려할

Table 3 Comparison of computed creep properties to those given with variation n

| 1/m | 1/n  | C (GPa <sup>-m</sup> sec <sup>-1</sup> ) | Computed 1/m (Error %) | Computed K             | Computed C (Error %)        |
|-----|------|--|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 1.0 | 0    | 1  | 1.006 (0.6)            | 0.964                  | 0.964 (3.5)                 |
|     | 0.1  | 0.529                                    | 1.007 (0.7)            | 0.483                  | 0.512 (3.2)                 |
|     | 0.2  | 0.307                                    | 0.995 (0.5)            | 0.258                  | 0.314 (2.3)                 |
|     | 0.33 | 0.165                                    | 1.002 (1.6)            | 0.099                  | 0.165 (0.3)                 |
| 0.5 | 0    | 1  | 0.497 (0.6)            | 1.036                  | 1.036 (3.6)                 |
|     | 0.1  | 0.307                                    | 0.501 (0.2)            | 0.250                  | 0.305 (0.6)                 |
|     | 0.2  | 0.126                                    | 0.506 (1.2)            | 6.07×10 <sup>-2</sup>  | 0.123 (2.8)                 |
|     | 0.33 | 5.14×10 <sup>-2</sup>                    | 0.509 (1.8)            | 9.73×10 <sup>-2</sup>  | 5.06×10 <sup>-2</sup> (1.7) |
| 0.2 | 0    | 1  | 0.200 (0.1)            | 1.003                  | 1.003 (0.3)                 |
|     | 0.1  | 8.73×10 <sup>-2</sup>                    | 0.201 (0.7)            | 3.17×10 <sup>-2</sup>  | 8.75×10 <sup>-2</sup> (0.2) |
|     | 0.2  | 2.24×10 <sup>-2</sup>                    | 0.198 (0.8)            | 9.98×10 <sup>-4</sup>  | 2.23×10 <sup>-2</sup> (0.1) |
|     | 0.33 | 7.22×10 <sup>-3</sup>                    | 0.196 (1.8)            | 9.08×10 <sup>-6</sup>  | 6.97×10 <sup>-3</sup> (3.6) |
| 0.1 | 0    | 1  | 0.101 (1.1)            | 0.921                  | 0.921 (7.8)                 |
|     | 0.1  | 2.24×10 <sup>-2</sup>                    | 0.104 (3.8)            | 1.02×10 <sup>-4</sup>  | 2.25×10 <sup>-2</sup> (0.8) |
|     | 0.2  | 4.81×10 <sup>-3</sup>                    | 0.101 (1.0)            | 1.08×10 <sup>-6</sup>  | 4.93×10 <sup>-3</sup> (2.5) |
|     | 0.33 | 1.59×10 <sup>-3</sup>                    | 0.101 (0.7)            | 1.13×10 <sup>-10</sup> | 1.64×10 <sup>-3</sup> (3.0) |

경우 응력과 변형률속도 사이의 관계는 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\sigma}{\sigma_0} &= \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{1/m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^{1/n} \\ \Leftrightarrow \dot{\epsilon} &= K \left(\frac{\sigma}{\epsilon^{1/n}}\right)^m ; \left[ C = K(l+1)^{-\frac{l}{l+1}} \right]^{l+1} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 m은 크리프지수, C는 크리프계수로써 정상상태영역에서의 응력과 변형률속도 데이터 회귀를 통해 구할 수 있다.

### 3.2 천이크리프를 고려한 크리프 물성평가

구형압입자를 이용한 크리프 압입시험의 하중-변위

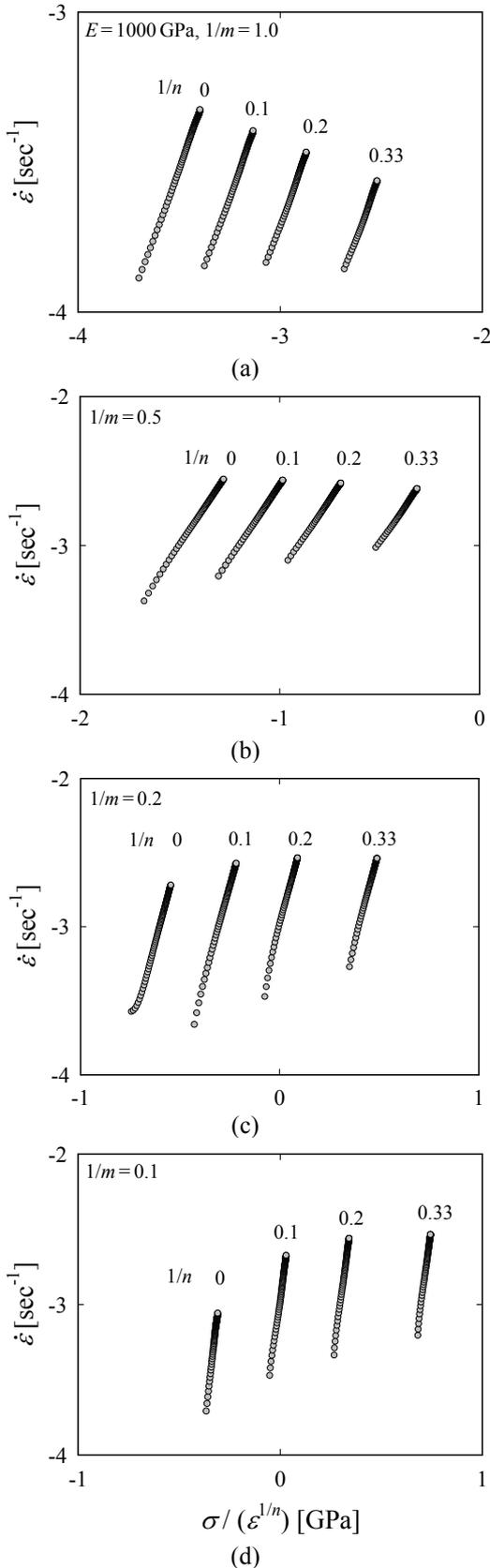


Fig. 12 Computed stress-strain rate curves for (a)  $1/m=1.0$ , (b)  $0.5$ , (c)  $0.2$  and (d)  $0.1$

곡선으로부터 크리프 물성을 평가할 수 있는 프로그램 흐름도를 Fig. 11에 나타냈다.  $n$ 은 입력값,  $m$ 은 초기 가정치로 설정하고 최적 관측지점에서 각 하중-변위 곡선 데이터와 무차원함수의 관계를 구한다. 계산된 응력-변형률속도 데이터를 회귀해  $m$ 과  $K$ 를 계산하고, 식 (16)을 이용해  $K$ 를  $C$ 로 변환한다. 같은 과정을 반복수행 하면서  $C$ 와  $m$ 의 변화량이 일정범위 내에 들어오는지 판별한다.

Fig. 12는  $1/m=0.1, 0.2, 0.5, 1.0$ 에서 유한요소해석으로 얻은 하중-변위곡선을 크리프 물성평가 프로그램의 입력자료로 대입해 계산된 변형률속도-응력곡선이다.  $\log \sigma / \epsilon^{1/n} - \log \dot{\epsilon}_c$  곡선의 선형영역에서 기울기와  $y$  절편값을 구해 크리프지수  $m$ 과 크리프계수  $K, C$ 를 나타냈다 (Table 3). 크리프지수는 평균 1.1%, 크리프계수는 평균 2.3% 이내의 오차 범위에서 물성치들이 얻어진다.

#### 4. 요약

기존 압입시험을 이용한 크리프 물성평가 연구들은 천이크리프 영향을 고려하지 않아 압입시험으로 얻은 데이터가 단축 크리프시험과 상당한 편차가 있다. 그러나 본 연구에서는 천이 크리프를 고려한 유한요소해석을 활용함으로써 재료의 변형경화지수가 응력과 변형률속도 사이의 관계에 미치는 영향을 살폈고, 이를 바탕으로 천이크리프를 고려한 크리프 물성평가법을 제시했다. 새로운 크리프 물성평가 프로그램을 이용해 압입 하중-변위곡선으로부터 크리프 지수, 계수 값들을 각각 1.1%, 2.3% 오차범위에서 예측할 수 있다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) Lamanna, J. A., 2006, "A Study of the Relationship Indentation Creep and Uniaxial Creep," PhD Thesis, University of Tennessee.
- (2) Lee, J. H., Zhou, C., Su, C. J., Gao, Y. F. and Pharr, G. M., 2010, "Similarity Relationships in Creep Contacts and Applications in Nanoindentation Tests," *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 1224, 209~214.
- (3) 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, 97~124.
- (4) 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, 147~152.
- (5) Stone, D. S., Jakes, J. E., Puthoff, J. and Elmustafa, A. A., 2010, "Analysis of Indentation Creep," *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 89, 7~12.
- (6) Mulhearn, T. O. and Tabor, D., 1960, "Creep and Hardness of Metals : a Physical Study," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30, 601~610
- (7) Sargent, P. M. and Ashby M. F., 1992, "Indentation Creep," *Materials Science and Technology*, Vol. 8, 594~601.
- (8) Lucas, B. N. and Oliver, W. C., 1999, "Indentation Power-Law Creep of High-Purity Indium," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30, 601~610
- (9) Ogbonna, N., Fleck, N. A. and Cocks, C. F., 1995, "Transient Creep Analysis of Ball Indentation," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, 1179~1202.
- (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, 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, 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, 175~178.
- (13) Lee, J. H. and Lee, H., 2012, "Transient Creep Analysis in Indentation Tests," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, 81~90.
- (14) Sohn, S. J., 2007, "A Study of Indentation Creep Using the Finite Element Method," PhD Thesis, University of Tennessee.
- (15) ABAQUS *User's Manual*, Version 6.10, 2010, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA