

< 논문 >

## 박막 물성평가 압입시험의 수치접근법

이진행<sup>†</sup> · 유한석\* · 이형일\*\*

(2006년 6월 21일 접수, 2007년 2월 16일 심사완료)

### A Numerical Approach to Indentation Techniques for Thin-film Property Evaluation

Jin Haeng Lee, Han Suk Yu and Hyungyil Lee

**Key Words :** Thin-film(박막), Indentation(압입), FEA(유한요소해석), Material Property(재료 물성치)

#### Abstract

In this work, the prior indentation theory for a bulk material is extended to an indentation theory for evaluation of thin-film material properties. We first select the optimal data acquisition location, where the strain gradient is the least and the effect of friction is negligible. A new numerical approach to the thin-film indentation technique is then proposed by examining the finite element solutions at the optimal point. With this new approach, from the load-depth curve, we obtain the values of Young's modulus, yield strength, strain-hardening exponent. The average errors of those values are less than 3, 5, 8% respectively.

#### 기호설명

#### 1. 서론

- $c^2$ : 실제 압입깊이와 이상적 압입깊이의 비
- $D$ : 압입자 직경
- $d$ : 실제 접촉 직경
- $E$ : 박막의 영률
- $E_s$ : 기저층의 영률
- $h_i$ : 기준표면 압입깊이
- $h$ : 실제 접촉 압입깊이
- $n$ : 변형경화지수
- $P$ : 압입하중
- $t$ : 박막의 두께
- $\epsilon_0$ : 항복변형률
- $\epsilon_p$ : (유효) 소성변형률
- $\sigma$ : (유효) 응력
- $\sigma_0$ : 항복강도
- $\psi$ : 평균접촉압력과 유효응력의 비

미소압입시험을 이용한 박막의 물성평가에 대한 초기연구는 주로 Doerner 와 Nix<sup>(1)</sup>, Oliver 와 Pharr<sup>(2)</sup>, Field 와 Swain<sup>(3)</sup> 등에 의해 이루어졌으며, 박막의 영률 및 경도를 예측하는 것에 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 최근 박막 구조물에 대한 연구와 사용이 급증하면서 다양한 재료 물성치의 필요성이 증대되고 있다. 이에 영률을 포함하여 항복강도 및 변형경화지수 등을 예측하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. Knapp 등<sup>(4)</sup>은 항복강도와 영률을 변화시키면서 유한요소해석을 실시하여 시행착오법에 의해 물성치를 구하였으며, Muliana 등<sup>(5)</sup>은 신경 회로망과 유한요소해석을 이용하여 재료의 하중-변위 곡선을 예측하였다. 하지만 Knapp 등의 방법은 시간적 소요가 많으며, 응력-변형률 곡선에 상당한 영향을 미치는 변형경화지수를 배제하였다. Muliana 등의 방법은 제한적인 물성치에 대하여 연구가 이루어졌으며, 신경회로망을 통해 임의의 물성치에 대한 하중-변위곡선만을 얻어냈을 뿐, 반대로 재료의 물성치를 얻어낼 수 없다. 이는 대부분의 연구들이 갖는 이론적 한계성에서 비롯된 것으로 i) 압입에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 서강대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : jinhaeng@sogang.ac.kr  
TEL : (02)705-8636 FAX : (02)712-0799

\* 서강대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 서강대학교 기계공학과

영향을 주는 다양한 매개변수의 정량적 분석 부족, ii) 비커스 (Vickers) 혹은 버코비치 (Berkovich) 압입자의 형상적 한계, iii) 실제 소성변형과 다른 양상을 갖는 탄성이론 내지는 변형소성이론의 한계 등에 기인한다.

이들의 연구에 반해 Lee 등<sup>(6)</sup>은 구형 압입시험의 엄밀 유한요소해석 (ABAQUS, 2002)<sup>(7)</sup>을 이용한 단일 금속재료 및 고무의 압입이론을 제시하였다. Lee 등<sup>(6)</sup>은 다양한 재료물성의 영향을 정량화한 무차원 압입변수로 표현하였으며, 이를 이용한 물성 평가 프로그램을 개발하여 그 유효성을 보였다. 따라서 본 연구에서는 Lee 등<sup>(6)</sup>에 의해 개발된 증분 소성이론에 기초한 단일재료 압입이론을 박막 구조물에 대한 압입이론으로 확장하고자 한다. 이를 위해 먼저 기초 유한요소해석을 수행하여 박막의 압입이론을 전개하기에 적절한 유효 응력-변형을 관측지점과 압입변형에 영향을 미치는 압입변수들을 선정한다. 선정된 변수들 (박막의 두께, 항복변형률, 변형경화지수, 영률)을 변화시켜가면서 이에 따른 무차원화된 변수들을 회귀, 박막의 물성평가 프로그램을 개발하고 이를 검증해 보고자 한다.

## 2. 단일 재료에 대한 압입이론

Lee 등<sup>(6)</sup>의 단일 재료에 대한 압입이론은 압입 중심에서  $0.4d$  ( $d$ 는 실제 접촉 압흔의 직경) 지점,  $l/D = 30\%$  (압입표면에서 하부 방향으로 거리  $l$ 과 압입자 직경  $D$ 의 비)인 곳에서 새로운 압입이론을 전개하였다. 여기서 압입접촉직경  $d$ 는 다음 식으로 계산된다.

$$d = 2\sqrt{hD - h^2} = 2\sqrt{c^2 h D - (c^2 h)^2} \quad (1)$$

식 (1)에서  $h$ 는 압입 시 발생하는 재료의 융기 (pile-up)와 침강 (sink-in)을 고려한 실제 압입깊이,  $h_0$ 는 기준표면으로부터 압입된 깊이를 의미하며, 이들의 비를  $c^2 (= h/h_0)$ 라 정의하였으며, 다음과 같이 재료 물성치와 압입깊이의 함수로 표현하였다.

$$c^2 = f_0^c(\epsilon_0, n) + f_1^c(\epsilon_0, n) \ln(h_0/D) \quad (2)$$

한편 Lee 등<sup>(6)</sup>은  $2r/d = 0.8$ ,  $l/D = 0.3$  지점의 유효 소성변형률과 유효응력을 식 (3)과 (4)와 같이 재료 물성치와 압입깊이의 함수로 표현하였다.

$$\epsilon_p = f_i^e(\epsilon_0, n)(h_0/D)^i; \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\psi \equiv \frac{P}{D^2 \sigma} = f_i^s(\epsilon_0, n)(h_0/D)^i; \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (4)$$

여기서 유효응력은  $\sigma = P/(D^2 \psi)$ 로 계산된다. 이들 응력-변형률 관계는 식 (5)의 Rice와 Rosengren<sup>(8)</sup>이 제안한 구분역급수법 (piecewise power law)을 이용하여 표현할 수 있다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \begin{cases} \frac{\sigma}{\sigma_0} & \text{for } \sigma \leq \sigma_0 \\ \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n & \text{for } \sigma \geq \sigma_0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $\sigma_0$ 와  $\epsilon_0$ 는 각각 항복강도와 항복변형률을 의미하며,  $n$ 은 변형경화지수이다. 한편 재료모델식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_0}\right)^{1/n} = K \epsilon_i^{1/n} \quad (6)$$

여기서  $K$ 는 강도계수,  $n$ 은 변형경화지수이다. 따라서 각 압입깊이에 따른 변형률 예측식 (3)과 응력 예측식 (4)를 식 (6)에 대입하여  $n$ 과  $K$ 를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 재료물성치들을 유추할 수 있다.<sup>(6)</sup>

## 3. 박막 압입시험의 유한요소해석

### 3.1 박막 구조물의 유한요소모델

구형 압입자를 이용한 재료의 압입시험 유한요소 모델은 Fig. 1과 같으며, 유한요소해석에서는  $J_2$  증분 소성이론을 따르는 등방성 탄소성재료로 가정하고 대변형이론을 적용한다. 유한요소모델은 약 17300 개의 절점과 16500개의 4절점 축대칭 요소들로 구성하였다. 압입표면은 미세변형까지 충분히 감지할 수 있도록 압입자직경의 0.0625% 크기의 미세 요소를 배치하였고 요소의 크기가 바뀌는 경계에는 사다리형 요소를 사용하였다. 압입자와 모재의 대칭 축상 절점들은 대칭축에 수직방향 변위성분을 구속하여 축대칭 조건을 만족시키고, 모재 밀면은 하중을 받는 방향의 변위성분만을 구속시킨 후 압입자를 하강시킨다. 사용된 압입자는 영률  $E_I = 537$  GPa, 푸아송비  $\nu_I = 0.24$ 인 텅스텐 카바이드이며, 다이아몬드 압입자에 대해서도 그 유효성이 확인된다.<sup>(9)</sup>

본 연구에서는 MEMS 구조물은 실리콘 웨이퍼 (SiO<sub>2</sub>, 영률  $E_s = 130$  GPa, 푸아송비  $\nu_s = 0.22$ ) 위에 박막을 얹은 단층 금속박막을 가정한다. 여기서 박막은 탄소성 해석, 웨이퍼와 압입자는 탄성해석을 수행한다. 실리콘 웨이퍼 역시 원칙적으로 탄소성해석을 해야 하나, 박막두께에 비하여 상대적으로 얇은 깊이로 압입하며, 구형압입자의 경우

다른 형상의 압입자에 비하여 압입하부의 응력집중이 크지 않아 실리콘의 소성거동 영향을 무시하였다. 박막과 웨이퍼는 박리되지 않는다는 가정하에 시편의 상부와 하부를 구분하여 각각의 물성을 다르게 부여하는 방법으로 박막 구조물을 표현하였다. 박막의 두께는 압입자직경에 대한 비율 ( $t/D$ )로 표현하여 압입자의 직경이 작아질수록 두께가 얇은 박막 구조물의 물성을 평가할 수 있다. Table 1은 유한요소해석에 사용된 변수들과 그 사용값들을 나타내고 있다.

Table 1 Selection of parameter for FEA

Parameter	Values used for FEA
Young's modulus ( $E$ )	100, 200, 300, 400 GPa
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.3
yield strain ( $\epsilon_0$ )	0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.006, 0.008, 0.01
strain-hardening exponent ( $n$ )	1.1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 7, 10, 13, 20, 50
thickness ( $t/D$ )	0.4, 0.6, 0.8, pure

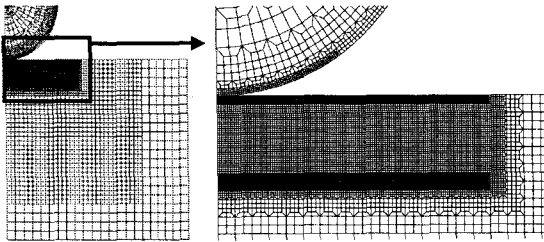


Fig. 1 Indentation model using spherical indenter

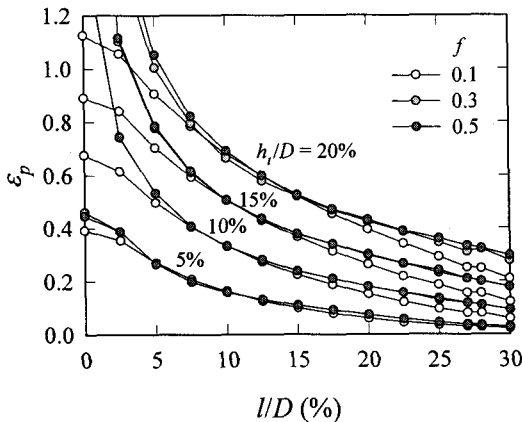


Fig. 2 Equivalent plastic strain  $\epsilon_p$  vs.  $l/D$  at  $2r/d = 0.8$  for various indentation depths

### 3.2 박막 압입시험의 유효소성변형률 관측지점

Lee 등<sup>(6)</sup>의 단일재료에 대한 압입이론에서 압입시험의 최적 관측지점은 압입표면 하부방향으로 압입자 직경의 30% ( $l/D = 0.3$ ), 그리고 압입표면 중심으로부터 반경방향으로  $0.4d$  ( $2r/d = 0.8$ )인 지점이었다. 박막 압입시험 모델에서도 같은 방법을 적용하여 두께 ( $t/D = 0.4, 0.6, 0.8, \text{pure}$ ), 압입중심으로부터 떨어진 거리 ( $2r/d = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ), 마찰계수 ( $f = 0.1, 0.3, 0.5$ ) 변화에 대하여 압입표면에서 하부방향으로 떨어진 깊이 ( $l/D$ )와 유효 소성 변형률  $\epsilon_p$ 의 관계를 살펴보았다. Fig. 2는  $2r/d = 0.8$  지점에서 압입깊이와 마찰계수의 변화에 따른 압입중심으로부터 하부방향 ( $l/D$ )으로 소성변형률 분포를 보여준다. 압입하부의 표면부에서는 소성변형률이 마찰계수의 영향을 심하게 받는 반면, 표면으로부터 일정거리가 떨어진 부근에서는 그 영향이 급격히 감소함을 볼 수 있다. 이로부터 선정된 관측지점은  $l/D = 0.2, 2r/d = 0.8$ 의 위치이다. 단일재료에서 압입자 직경의 30% 하부를 관측하는 반면 박막은 20% 하부를 관측하는 이유는, 박막의 두께가 얇아질수록 기저층 (substrate)의 영향이 증가하므로 관측지점을 표면 부근으로 이동시킴으로써 이의 영향을 감소시키는 동시에, 가급적 동일 압입자 직경에 대하여 얇은 박막 물성을 평가할 수 있도록 하기 위함이다. 또한 이 위치는 i) 마찰계수의 변형률에 대한 영향이 거의 없고, ii) 변형률 구배도 작으며, iii) 같은 압입 깊이에 대해 큰 변형률이 측정되는 장점이 있다. 압입시 재료의 유효응력과 유효변형률은 각 지점에 따라 변화하지만 이처럼 관측지점을 임의로 선택할 수 있는 것은 압입하부의 모든 유효응력과 유효 변형률은 단축 인장 응력-변형률 곡선상에 놓여야 하기 때문이다.<sup>(9)</sup>

## 4. 박막 물성평가 압입이론

### 4.1 압입변수들의 차원해석

무차원변수  $c^2$ ,  $\epsilon_p$ ,  $\psi$ 와 압입깊이의 관계를 재료 물성과 박막두께에 대하여 회귀하기에 앞서 압입 시험에 영향을 미치는 요소들 (재료 물성치, 박막 두께)을 설정하여야 한다. 이 때 이들을 차원해석하여 무차원화시켜 이들이 세 무차원변수  $c^2$ ,  $\epsilon_p$ ,  $\psi$ 와 압입깊이의 관계에 미치는 영향을 살펴보도록 한다.

융기 (pile-up)와 침강 (sink-in) 등이 고려된 실제 접촉된 압입깊이  $h$ 는 식 (7)에 나열된 변수들에 의해 영향을 받는다. 이는 Lee 등<sup>(6)</sup>의 연구에서 고려되지 않았던 기저층 (substrate)의 영률  $E$ 와 박막 두께  $t$ 를

추가적으로 고려한 것이다. 식 (7)을 차원해석하면 식 (8)와 같은 무차원화 된  $h/h_i$ 를 얻는데, 이를  $c^2$ 라 정의한다.<sup>(6)</sup>

$$h = f^h(\sigma_0, n, E, E_s, t, h_i, D) \quad (7)$$

$$\frac{h}{h_i} = \Pi_1(\varepsilon_0, n, E/E_s, t/D, h_i/D) \equiv c^2 \quad (8)$$

미소 압입시험에서 정확한 압입접촉직경을 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 얻을 수 있는  $c^2$ 를 회귀분석하고 이를 식 (1)에 대입하여 압입접촉직경  $d$ 를 구하는 방식을 택하였다.

유효소성변형률 역시 Lee 등<sup>(6)</sup>의 단일재료 연구에서 사용된 압입변수에서 기저층의 영률  $E_s$ 와 박막의 두께  $t$ 의 영향을 추가로 고려하여 식 (9)와 같이 나타내었으며, 식 (9)를 차원해석함으로써 식 (10)과 같은 무차원 압입변수들로 표현하였다.

$$\varepsilon_p = f^\varepsilon(\sigma_0, n, E, E_s, t, h_i, D) \quad (9)$$

$$\varepsilon_p = \Pi_2(\varepsilon_0, n, E/E_s, t/D, h_i/D) \quad (10)$$

유효응력과 관계된 압입변수로는 압입하중과 유효응력의 비를 나타내는  $\psi = P/D^2\sigma$ 가 있다.<sup>(6)</sup> 이를 이용하여 압입하중과 관계된 식 (11)을 차원해석, 식 (12)와 같이 무차원 압입변수들로 표현할 수 있다.

$$P = f^P(\sigma_0, n, E, E_s, t, h_i, D) \quad (11)$$

$$\frac{P}{D^2\sigma} = \Pi_3(\varepsilon_0, n, E/E_s, t/D, h_i/D) \equiv \psi \quad (12)$$

4.2 압입변수들의 회귀

세 무차원변수와 압입깊이의 관계를 얻기 위해 앞서 살펴본 바와 같이  $\varepsilon_0, n, E/E_s, t/D$  변수들을 변화시키며 유한요소해석을 수행하여야 한다. Table 1에서 선정된 변수들에 따른 유한요소해석을 수행하기 위해서는 1344개 ( $E : 4 \times \varepsilon_0 : 7 \times n : 12 \times t : 4$ )의 해석이 필요하다. 그러나 이와 같은 해석을 수행하기 위해서는 상당한 계산시간과 그에 따른 후처리 작업이 필요하므로, 본 논문에서는 영률을 200GPa에 대한 압입수식을 전개한 후 영률 변화에 대한 확장 방법을 제시하고자 한다.

Fig. 3는  $t/D = 0.4, \varepsilon_0 = 0.002$ 에서 변형경화지수  $n$ 의 변화에 대한 무차원변수  $c^2, \varepsilon_p, \psi$ 와 압입깊이의 관계를 나타낸 것으로, 기호로 표시된 유한요소해석 데이터와 이를 회귀한 곡선들이 잘 일치함을 볼 수 있다. 이와 동일한 방법으로 항복변형률 변화에

대한 무차원변수들과 압입깊이의 관계를 회귀하였고, 또한 두께에 대하여 재차 회귀하여 최종 통합 회귀함수를 도출하였다.<sup>(9)</sup> 재료 영률 200GPa에 대하여 세 무차원 압입변수  $c^2, \varepsilon_p, \psi$ 와 압입깊이의 관계를 회귀한 식들은 다음과 같다.

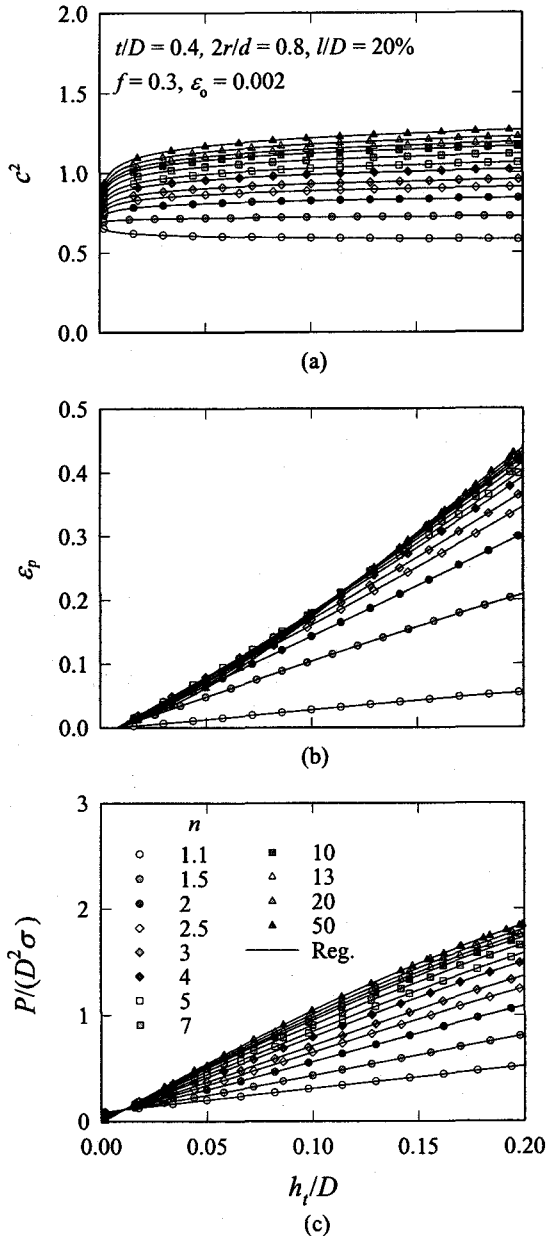


Fig. 3 Regression curves of (a)  $c^2$ , (b) equivalent plastic strain  $\varepsilon_p$ , and (c) constraint factor  $\psi$  with respect to for various values of  $n$

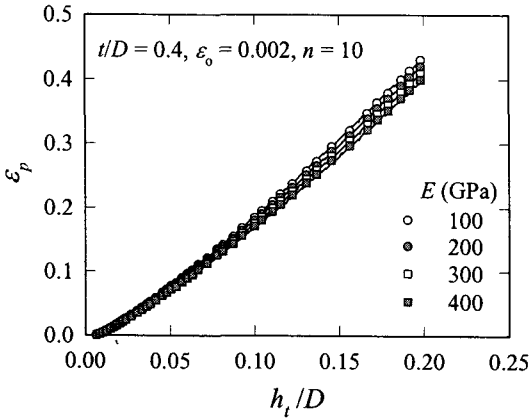


Fig. 4 Comparison of computed  $\epsilon_p$  vs.  $h_i/D$  to those given for various values of Young's modulus

$$c^2|_{E=200\text{GPa}} = f_1^c(\epsilon_0, n, t/D) + f_2^c(\epsilon_0, n, t/D) \ln\left(\frac{h_i}{D}\right) \quad (13)$$

$$f_i^c(\epsilon_0, n, t/D) = \alpha_{ij}^c(\epsilon_0, n) (t/D)^{-j}$$

$$\alpha_{ij}^c(\epsilon_0, n) = \beta_{ijk}^c(\epsilon_0) n^{-k}$$

$$\beta_{ijk}^c(\epsilon_0) = \gamma_{ijkl}^c \epsilon_0^l$$

$$\epsilon_p|_{E=200\text{GPa}} = f_i^e(\epsilon_0, n, t/D) \left(\frac{h_i}{D}\right)^i \quad (14)$$

$$f_i^e(\epsilon_0, n, t/D) = \alpha_{ij}^e(\epsilon_0, n) (t/D)^{-j}$$

$$\alpha_{ij}^e(\epsilon_0, n) = \beta_{ijk}^e(\epsilon_0) n^{-k}$$

$$\beta_{ijk}^e(\epsilon_0) = \gamma_{ijkl}^e \epsilon_0^l$$

$$\psi|_{E=200\text{GPa}} = f_i^\psi(\epsilon_0, n, t/D) \left(\frac{h_i}{D}\right)^i \quad (15)$$

$$f_i^\psi(\epsilon_0, n, t/D) = \alpha_{ij}^\psi(\epsilon_0, n) (t/D)^{-j}$$

$$\alpha_{ij}^\psi(\epsilon_0, n) = \beta_{ijk}^\psi(\epsilon_0) n^{-k}$$

$$\beta_{ijk}^\psi(\epsilon_0) = \gamma_{ijkl}^\psi \epsilon_0^l$$

$i = 0, 1$  for  $c^2$   $i = 0, 1, 2, 3$  for  $\epsilon_p$  and  $\psi$

$j = 0, 1, 2, 3$   $k = 0, 1, 2, 3, 4$   $l = 0, 1, 2, 3$  for  $c^2, \epsilon_p$  and  $\psi$

#### 4.3 영률변화에 대한 압입변수들의 회귀

앞 절에서는 영률 200GPa로 고정된 경우에 대하여 다양한 압입변수들의 영향을 살펴보았다. 본 절에서는 영률 변화가  $\psi, \epsilon_p, c^2$ 와  $h_i/D$ 의 관계에 미치는 영향을 분석하여 최소한의 유한요소해석으로부터 영률 변화의 영향을 표현할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

Fig. 4의 실선은 소성변형률과 압입깊이의 관계에 미치는 영률의 영향을 보여준다. 그림에서와 같이 곡선들 사이의 간격이 거의 일정함을 알 수 있다. 이는 압입자와 기저층의 영률이 특정한 관계를 가지고 박막의 영률에 영향을 미치지 때문이다. 이와 같이 영률 변화에 따른 곡선의 변화를 활용하여 일부 물성에 대한 추가 해석 데이터와  $E = 200$  GPa의 데이터를 이용한 물성평가 방법을 제시한다.

Fig. 4의 그림에서 인접하는 곡선들간의 최대 압입깊이 ( $h_i/D = 0.2$ )의  $\epsilon_p$ 값들로 비를 구하고, 이를 이용하여 기준 영률 200GPa의 데이터에 곱하여 분산시켜 보았다. Fig. 4의 기호들은 이들의 한 예로,  $t/D = 0.4, \epsilon_0 = 0.002, n = 10$ 의 경우에서 소성변형률과 압입깊이  $h_i/D$  관계 곡선에 대한 것이다. 해석을 통해 생성된 데이터와 평균값을 이용하여 기준곡선으로부터 분산시킨 데이터들이 잘 일치함을 보인다.

이와 같이 영률 200GPa의 데이터를 이용하여 다른 영률의 물성을 예측하기 위해서는 기준영률 (200GPa)과 다른 영률간 최대압입깊이( $h_i/D = 0.2$ )의  $c^2, \epsilon_p, \psi$  비를 정의해야 한다. 이를 보정계수  $\xi^c, \xi^e, \xi^\psi$ 라 칭하고 식 (16)-(18)과 같이 정의한다.

$$\xi^c \equiv c^2 / c^2|_{E=200\text{GPa}} \quad (16)$$

$$\xi^e \equiv \epsilon_p / \epsilon_p|_{E=200\text{GPa}} \quad (17)$$

$$\xi^\psi \equiv \psi / \psi|_{E=200\text{GPa}} \quad (18)$$

물성값들 ( $\epsilon_0, n, t/D$ )을 다양하게 변화시키면서 재료 영률변화에 따른  $c^2, \epsilon_p, \psi$ 의 보정계수들을 다음 식 (19-21)과 같이 회귀하였다.

$$\xi^c = p_i^c(\epsilon_0, n, t/D) \left(\frac{E}{E_s}\right)^i \quad (19)$$

$$p_i^c(\epsilon_0, n, t/D) = q_{ij}^c(\epsilon_0, n) (t/D)^{-j}$$

$$q_{ij}^c(\epsilon_0, n) = r_{ijk}^c(\epsilon_0) n^{-k}$$

$$r_{ijk}^c(\epsilon_0) = s_{ijkl}^c \epsilon_0^l$$

$$\xi^e = p_i^e(\epsilon_0, n, t/D) \left(\frac{E}{E_s}\right)^i \quad (20)$$

$$p_i^e(\epsilon_0, n, t/D) = q_{ij}^e(\epsilon_0, n) (t/D)^{-j}$$

$$q_{ij}^e(\epsilon_0, n) = r_{ijk}^e(\epsilon_0) n^{-k}$$

$$r_{ijk}^e(\epsilon_0) = s_{ijkl}^e \epsilon_0^l$$

$$\xi^w = p_i^w(\varepsilon_0, n, t/D) \left( \frac{E}{E_s} \right)^i \quad (21)$$

$$p_{ij}^w(\varepsilon_0, n, t/D) = q_{ij}^w(\varepsilon_0, n) (t/D)^{-j}$$

$$q_{ij}^w(\varepsilon_0, n) = r_{ijk}^w(\varepsilon_0) n^{-k}$$

$$r_{ijk}^w(\varepsilon_0) = s_{ij\mu}^w \varepsilon_0^l$$

$$i=0, 1 \quad j=0, 1 \quad k=0, 1, 2 \quad l=0, 1, 2, 3 \text{ for } \xi^c, \xi^e \text{ and } \xi^w$$

이 보정계수를 기준에 회귀된  $E = 200\text{GPa}$ 에서 구한  $c^2$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\psi$  함수 식 (13)-(15)에 곱하면 식 (22)-(24)의 새로운  $c^2$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\psi$  함수를 얻을 수 있다.

$$c^2 = \xi^c \times c^2 \Big|_{E=200\text{GPa}} \quad (22)$$

$$\varepsilon_p = \xi^e \times \varepsilon_p \Big|_{E=200\text{GPa}} \quad (23)$$

$$\psi = \xi^w \times \psi \Big|_{E=200\text{GPa}} \quad (24)$$

#### 4.4 영률보정계수의 회귀

해중 곡선의 초기 기울기를 이용하여 영률을 구하는 방법은 Pharr 등<sup>(10)</sup>이 제안한 것으로 임의의 축대칭 강체 압입자에 대해 탄성이론을 바탕으로 영률을 구하였다. 하지만 Pharr 등의 식은 재료를 탄성으로 가정하여 도출된 것이기 때문에 탄소성으로 해석한 본 압입이론에 적합하도록 식 (25)와 같이  $\kappa$ <sup>(6)</sup>를 도입하여 보정하였다.

$$E = \frac{1 - \nu^2}{d/(\kappa S) - (1 - \nu^2)/E_t} \quad (25)$$

여기서  $E_t$ 와  $\nu_t$ 는 압입자의 영률과 푸아송비이며,  $\nu$ 는 재료의 푸아송비이다. 압입접촉직경  $d$ 와 해중시 초기기울기  $S$ 를 구하고, 이에 상응하는  $\kappa$ 값을 식 (25)에 대입하여 영률을 계산한다.  $\kappa$ 값은 다양한 물성치 및 박막의 두께에 대하여 유한요소해석으로부터 구하며, 식 (26)과 같이 표현된다.

$$\kappa = f_i^x(\varepsilon_0, n, t/D) \left( \frac{E}{E_s} \right)^i \quad (26)$$

$$f_i^x(\varepsilon_0, n, t/D) = \alpha_{ij}^x(\varepsilon_0, n) (t/D)^{-j}$$

$$\alpha_{ij}^x(\varepsilon_0, n) = \beta_{ijk}^x(\varepsilon_0) n^{-k}$$

$$\beta_{ijk}^x(\varepsilon_0) = \gamma_{ij\mu}^x \varepsilon_0^l$$

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

식 (26)의  $\kappa$ 는 텅스텐 카바이드 압입자를 이용한

압입 유한요소해석으로부터 유도된 값이다. 그러나 다이아몬드 압입자를 이용하는 경우에도 동일  $\kappa$ 를 이용하고 식 (25)에서 다이아몬드 압입자의  $E_t$ 와  $\nu_t$ 를 사용할 경우 거의 동일한 오차범위 이내에서 물성치들을 평가할 수 있다.<sup>(9)</sup>

4.5 새로운 수치접근법을 이용한 박막의 물성평가 영률이 200GPa인 경우에서 회귀한 무차원변수들과 보정계수를 조합하여 박막물성평가 프로그램을 개발하였으며, 프로그램의 흐름도를 Fig. 5에 나타내었다. 계산과정은 다음과 같다. 먼저 압입자 직경의 20%에 해당하는 깊이로 1회 압입한 후 해중하여 얻은 하중-변위 데이터와 박막의 두께를 박막 물성평가 프로그램의 입력자료로 대입한다. 이 때  $n$ 과  $\varepsilon_0$ 를 초기 가정치로 설정한 상태에서 각 하중-변위 데이터와  $c^2$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\sigma$ 의 관계를 식 (22)-(24) 및 (26)을 사용하여 얻는다. 계산된 응력-변형률 데이터를 식 (6)에 대입하여 새로운  $n$ 과  $\varepsilon_0$ 를 계산, 업데이트 시킨다. 이와 같은 과정을 반복하여 향상된  $n$ 과  $\varepsilon_0$ 의 변화량이 일정범위 내에 들어오면 프로그램을 종료하고 최종 물성치인 영률, 항복강도, 변형경화지수 및 응력-변형률 곡선을 결정한다.

Fig. 6는 유한요소해석에 사용된 실제 응력-변형률 곡선 (실선)과 압입시험으로 예측한 응력-변형률 곡선 (회색 원)을 비교하여 나타낸 것이다. Table 2에 이들 실제 물성치와 예측 재료물성치, 그리고 오차를 정리하였다. 새로운 박막 물성평가 압입수식을 이용하면 폭넓은 박막 두께 및 물성치들에 대해서 영률 3%, 항복강도 5%, 변형경화지수 8%의 평균오차 이내에서 각 물성치들을 구할 수 있다. 이 때 영률  $E = 200\text{GPa}$ 인 재료에 대해서는 예측 물성치의 최대 오차가 영률 3%, 항복강도 5%, 변형경화지수 6% 정도로, 상당히 정확한 물성예측이 가능하다. 반면  $E = 100$  및  $300\text{GPa}$ 인 재료의 경우 최대오차가 영률 7%, 항복강도 10%, 변형경화지수 12%로 증가한다. 이는 유한요소해석의 개수를 줄이기 위하여 영률 200GPa에서 얻은 압입변수에 보정계수를 곱하여 다른 영률에서의 압입변수를 예측하기 때문이다.

## 5. 요약

본 연구에서는 Lee<sup>(6)</sup> 등이 유한요소해석을 통하여 이끌어낸 단일재료 압입이론을 박막의 물성평가에 확장하여 적용해 보았다. 박막 물성평가 압입이론은 박막재료는 물론 단일재료의 물성평가도 가능하며,

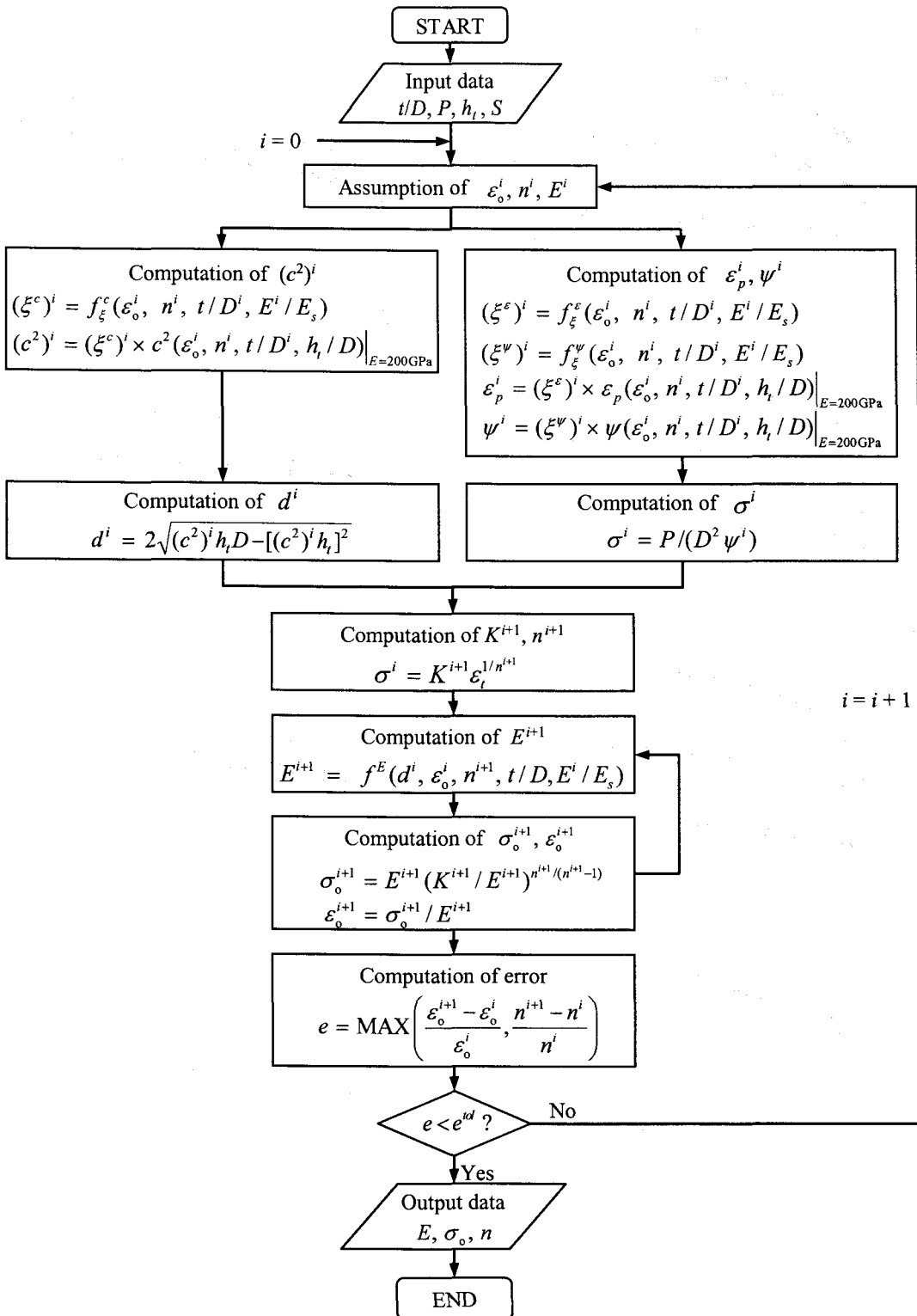


Fig. 5 Flow chart for determination of material properties

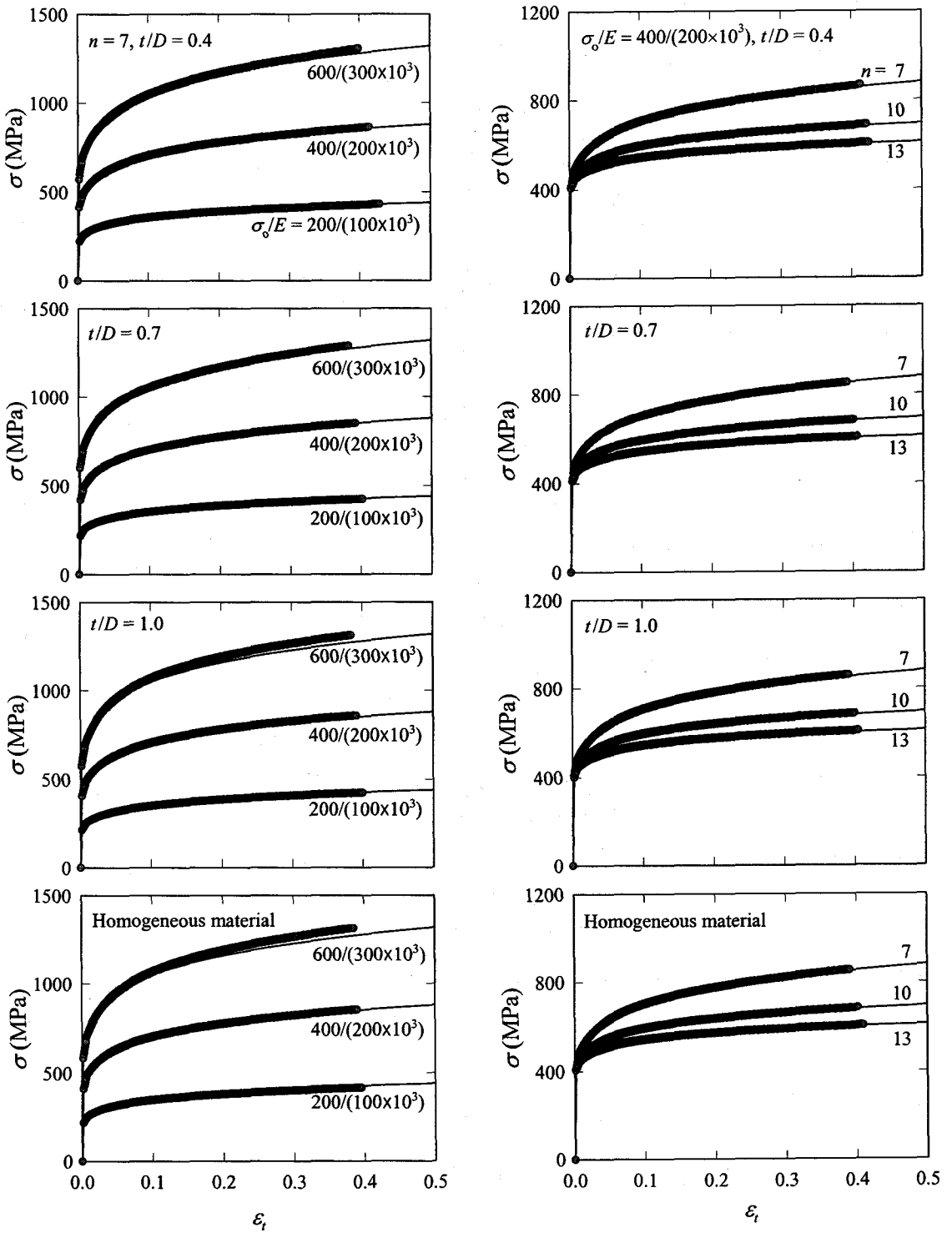


Fig. 6 Comparison of computed stress-strain curves to those given



**Table 2** Comparison of computed material property values to those given

t/D	Given		Computed			
	$\sigma_0/E$ (MPa/GPa)	n	$\sigma_0/E$ (MPa/GPa)	Error (%)	n	Error (%)
0.4	200/100	7	220/100	10/0.0	7.5	8.3
	400/200	7	413/203	3.2/1.3	6.9	1.1
	600/300	7	571/322	4.8/7.3	6.3	10
0.7	200/100	7	217/102	8.5/2.0	7.5	7.6
	400/200	7	420/206	4.9/2.9	7.1	2.5
	600/300	7	600/318	0.0/6.0	6.6	4.5
1.0	200/100	7	213/98	6.3/1.7	7.3	4.6
	400/200	7	407/199	1.7/0.3	6.7	3.7
	600/300	7	576/309	4.0/2.8	6.1	12
pure	200/100	7	217/98	8.7/1.5	7.7	11
	400/200	7	411/199	2.8/0.7	6.8	1.5
	600/300	7	583/301	2.9/0.2	6.2	11
0.4	400/200	7	413/203	3.2/1.3	6.9	1.1
	400/200	10	409/202	2.2/0.8	9.8	1.3
	400/200	13	407/200	1.9/0.1	13	0.7
0.7	400/200	7	420/206	4.9/2.9	7.1	2.5
	400/200	10	414/206	3.6/3.2	10	2.4
	400/200	13	410/195	2.4/2.3	13	1.9
1.0	400/200	7	407/199	1.7/0.3	6.7	3.7
	400/200	10	404/200	1.1/0.1	9.5	4.2
	400/200	13	401/199	0.3/0.4	12	6.4
pure	400/200	7	411/199	2.8/0.7	6.8	1.5
	400/200	10	407/199	1.8/0.6	9.8	2.0
	400/200	13	406/198	1.4/0.8	13	2.0

제한적인 물성범위 내에서 유효했던 기존의 압입 이론들에 비하여 다양한 박막 두께와 물성 범위에서도 활용 가능하다. 새로운 박막 물성평가 압입 이론은 영률, 항복강도, 변형경화지수값들을 각각 평균 3%, 5% 8% 오차범위에서 예측할 수 있다.

본 연구에서는 유한요소해석 개수를 줄이기 위하여 기준영률 200GPa을 기준으로 압입변수에 보정계수를 곱하여 사용하였으며, 이로 인해 기준영률과 큰 차이를 보이던 예측물성치의 오차가 증가할 수 있다. 전반적인 예측오차는 공학적 이용에 적정한 범위에 있으며, 추가적인 압입해석을 통해 보정계수 및 압입변수 등을 향상시킴으로써 보다 정밀한 물성 평가가 가능해질 수 있다.

후 기

본 연구는 2003년도 한국과학재단 특정기초연구 (KOSEF R01-2003-000-10207-0)에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Doerner, M. F. and Nix W. D., 1986, "A Method for Interpreting the Data from Depth-sensing Indentation Instruments," *Journal of Materials Research* Vol. 1, pp. 601~609.
- (2) Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 1992, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," *Journal of Materials Research* Vol. 7, pp. 1564~1583.
- (3) Field, J. S. and Swain, M. V., 1993, "A Simple Predictive Model for Spherical Indentation," *Journal of Materials Research* Vol. 8, pp. 297~306.
- (4) Knapp, J. A., Follstaedt, D. M., Myers, S. M., Barbour, J. C. and Friedmann, T. A., 1999, "Finite-Element Modeling of Nano-indentation," *Journal of Applied Physics* Vol. 85, pp. 1460~1474.
- (5) Muliana, A., Steward, R., Haj-ali, R. M and Saxena, A., 2002, "Artificial Neural Network and Finite Element Modeling of Nano-indentation Tests," *Metallurgical and Materials Transactions* 33A, pp. 1939~1947.
- (6) 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.
- (7) ABAQUS *User's Manual*, 2002, Version 6.3, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (8) Rice, J. R. and Rosengren, G. F., 1968, "Plane Strain Deformation Near a Crack-tip in a Power Law Hardening Material," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, pp. 1~12.
- (9) Lee, J. H., 2006, *A Numerical Approach and Experimental Verification of the Indentation Techniques for Material Property and Residual Stress Evaluation*, Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sogang University.
- (10) Pharr, G. M., Oliver, W. C. and Brotzen, F. R., 1992, "On the Generality of the Relationship among Contact Stiffness, Contact Area and Elastic Modulus during Indentation," *Journal of Materials Research* Vol. 7, pp. 613~617.