## < 논문 or 기술논문 >

# 나노 인덴테이션 시험에서의 탄소성 재료의 파일업/싱크인 특성

김병민<sup>†</sup> · 이찬주<sup>\*</sup> · 이정민<sup>\*</sup> · 이상진<sup>\*</sup>

The piling-up/sinking-in response of elasto-plastic materials in nano-indentation using sharp indenter

Kim Byung Min, Lee Chan Joo and Lee Jung Min

Key Words :Nano-indention(나노인덴테이션), Elasto-plastic properties(탄소성 물성치), FE<br/>Analysis(유한요소해석), Pile up(파일업), Sink in(싱크인)

#### Abstract

Over the past decade, many computational researches have been performed to investigate quantitative relationships between load-displacement and material properties. But piling-up which causes errors to estimate mechanical material properties remains the most significant unresolved issue in nano-indentation test. This study has estimated quantitative aspects of the effects of material properties, especially work hardening exponent, on piling up/sinking in response of various materials. Using FE Analysis, piling up/sinking in response when material is indented by sharp indenter is investigated to evaluate the effects of material properties. From the FE analysis result, quantitative relationships between piling up/sinking in height and material properties is assessed using dimensional analysis which is used to define scaling variables and universal functions. And nano-indentation test is performed to verify this relation on various materials. From the result of comparison with prediction from dimensional function and experiment, the work hardening exponent was found to have greater influence on the piling up/sinking in height during the nano-indentation than other material properties, such as elastic modulus and yield stress.

#### 기호설명

| Р                           | : 나노인덴테이션 하중                        |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| $E,E^{*}$                   | : 재료의 탄성계수, 환산탄성계수                  |
| $\sigma_r, \ \varepsilon_r$ | : 대표응력, 대표변형율                       |
| $\sigma_{y}$                | : 항복강도                              |
| n                           | : 가공경화지수                            |
| Η                           | : 인덴테이션 경도                          |
| С                           | : 로딩곡선의 곡률                          |
|                             |                                     |
| ↑ 김병                        | 병민, 정회원, 부산대학교 기계공학부                |
| E-n                         | nail : bmkim@pusan.ac.kr            |
| TE                          | L: (051)510-3074 FAX: (051)581-3075 |

\* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

## 1. 서 론

나노인덴테이션은 수십 nm 단위의 작은 스케일(Scale)에서 인덴테이션 깊이(h)에 따른 하중(P) 곡선(Load-displacement Curve)을 이용하여 재료의 기계적 측성을 측정하는 기술로서 종래의 마이크로 비커스(Micro Vickers)로 측정할 수 같은 없었던 박막과 코팅, MEMS 부품 등과 미소체적 부품의 기계적 특성을 측정할 수 있다. 최근 이러한 나노인덴테이션의 이론적/수치적 해석을 통해 미소체적 부품의 탄서성 거동 측성을 예측하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 차원해석을 통해 나노인덴테이션에서 재료의 탄소성 특성과 하중-변위 곡선의 기초적인 특성을 관계를 규명하고, 탄소성 결정하는

독립변수와 나노인덴테이션의 하중-변위 곡선을 표현하는 독립변수들의 관계를 서로 비교하는 것 함으로써 재료의 탄소성 거동 특성을 예측할 수 있다.[1]

나노인덴테이션의 하중-변위 곡선의 독립변수와 재료의 탄소성 거동 특성에 대한 차원해석은 Cheng 과 Cheng[4]에 의해 가장 먼저 제안되었으며, 이후 Giannakopoulos 와 Suresh[5]는 하중-변위곡선으로부터 재료의 탄소성 특성을 예측하는 알고리즘을 제안하였다.

현재 재료의 탄소성 특성을 결정하기 위한 가장 신뢰할 만한 연구결과는 Dao[2]에 의해 제안된 Forward 와 Reverse 알고리즘으로 알려져 있다. 이 것은 대변형 이론에 근거하여 작성된 6 개의 무차원 함수들로 구성되어 있다.

이후에도 Bucallie[6]와 Chollacoop[7], Tunvisut[8], Cao[9], Swaddiwudhipong[10], Ogasawara[11,12], Yan[13], Antunes[14], Lee[15]등에 의해 재료의 탄소성 특성뿐만 아니라 잔류응력, 박막의 기계적 특성평가에 관한 연구가 수행되었다.

나노인덴테이션을 이용한 재료의 기계적 특성을 측정하는 방법에 있어 가장 중요한 문제는 재료가 압입자에 의해 압입되었을 때 발생하는 파일업/싱크인의 영향을 측정되는 기계적 특성에 반영하는 것이다. Fischer-Cripps[3]이 파일업이 발생되면 실제 접촉면적이 저평가되기 때문에 탄성계수와 경도는 상대적을 크게 나타나며, 특정한 경우, 최대 50%까지 높게 평가된다고 보고하였다. 이러한 파일업(Pile-up)과 싱크인(Sinkin)의 영향을 해결하기 위해 나노인텐테이션에 대한 차원해석을 통한 재료의 탄소성 거동 특성에 관한 연구가 제안되었다.

그러나 앞선 선행연구들은 하중-변위 그래프의 독립변수의 오차가 탄소성 거동 특성을 결정함에 있어 크게 반영되어, 결과값의 유일성이 없는 것이 문제점으로 지적되고 있다. 파일업/싱크인은 접촉면적을 결정하는 요소로서 탄소성 거동 특성을 결정함에 있어 많은 영향을 미치는 것을 고려했을 때, 탄소성 거동 특성과 관련되어 파일업/싱크인의 발생에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Dao 의 연구에 근거하여 유한요소해석을 이용하여 다양한 재료에 대한 나노인덴테이션 시험시의 탄소성 거동을 분석하고, 탄소성 거동 특성과 파일업/싱크인의 관계를 차원해석으로 규명하고자 한다.

## 2. 나노인덴테이션과 차원해석

나노인덴테이션 시험에서 나타나는 하중-변위곡선을 표현하는 세가지 독립변수는 Fig. 1 과 같이 로딩 곡선의 곡률 C, 잔류 인덴테이션 깊이  $h_r$ 와 초기 언로딩 곡선의 기울기  $\frac{dP_u}{dh}\Big|_{h_u}$  로

표현되며, 재료의 탄소성 거동 특성은 아래와 같이 단축인장에서의 가공경화곡선으로 표현할 수 있으며, 탄소성 진응력-진병형률 거동은 식(1)으로 가정된다.

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & (\sigma \le \sigma_y) \\ K\varepsilon^n & (\sigma > \sigma_y) \end{cases}$$
(1)

여기서 E 는 탄성계수, K 는 강도계수, n 은 가공경화지수이다. 재료의 소성영역은 다시 식(2)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \sigma_{y} \left( 1 + \frac{E}{\sigma_{y}} \varepsilon_{P} \right)^{n}$$
<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 재료의 탄소성 특성을 대표하는 독립변수를 탄성계수, 가공경화지수 n, 항복강도  $\sigma_v$ 로 제한하였다.



Fig. 1 Typical load-displacement curve of an elastoplastic material during sharp indentation

Dao 등의 선행연구자들은 파일업/싱크인의 영향을 고려하기 위하여  $h_r/h_m$ 을 이용하여 식(3)과 식(4)의 무차원 함수를 만들었으며, 이를 이용하여 탄성계수와 가공경화지수를 결정하였다.

$$\Pi\left(\frac{h_r}{h_m}\right) = \frac{P_{ave}}{E}, \quad E^* = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A}}S$$
(3)

$$\Pi\left(\frac{E^*}{\sigma_r},n\right) = \frac{1}{E^*h_m} \frac{dP_u}{dh}\Big|_{h_m}$$
(4)

그러나 실제 나노인덴테이션 시험의 언로딩 하중-변위 곡선에서 정확한  $dP_u/dh$ 값을 측정하기 어렵다.  $dP_u/dh$ 값은 작업자의 데이터 처리구간에 크게 의존하며 결국 최종 탄성계수 및 가공경화지수의 값에 영향을 미친다. 본 연구에서는 로딩 곡선의 곡률 C 값을 이용하여 탄성계수을 비롯한 항복응력, 가공경화지수 등의 재료의 탄소성 특성을 평가하였다. 본 연구에서 사용한 무차원 함수는 아래와 같다.

$$\frac{C}{\sigma_r} = \Pi_1 \left(\frac{E^*}{\sigma_r}\right) = \exp\left(4.70 - \frac{58.01}{E^*/\sigma_r + 28.04}\right)$$
$$\frac{C}{E^*} = \Pi_2 \left(\frac{W_p}{W_t}\right) = 2.107 - 2.1092 \left(\frac{W_p}{W_t}\right)^{2.126}$$
$$\frac{C}{H} = \Pi_1 \left(\frac{E^*}{\sigma_r}\right)$$
$$= (61.03 - 52.60n^{0.375}) - (87.28 - 158.16n^{1.2812})$$
$$\times (0.913 - 0.372)^{Ln(E^*/\sigma_r)}$$

본 연구에서 사용된 무차원함수는 10 ~ 1500 까지의  $E^*/\sigma_r$ 의 범위 내에서 유한요소 해석을 수행하여 차원해석을 통해 도출하였다.

## 3. 유한요소해석

탄소성 재료의 나노인덴테이션 측성 평가를 위 한 유한요소해석은 2 차원 축대칭 모델로 가정하 였으며, 상용해석 s/w 인 ABAQUS 6.5-1 을 이용하 여 수행되었다.



**Fig. 2** FE model of sharp nanoindentation(70.3 $^{\circ}$ )

재료의 *E*<sup>\*</sup>/σ, 범위는 Dao<sup>(1)</sup>의 대표변형율 0.033 을 기초하여 10 ~ 1500 전후까지 설정하였으며 총 7구간 (10~100,~200,~300,~600,~900,~1200,~ 1500)으로 구분하였다. 각 구간은 가공경화지수, 항복강도, 탄성계수를 적절하게 변화시켜 설정하 였고 각 구간별로 탄소성 모델이 20 개씩 포함되 게 하였다. 해석은 총 140 개의 케이스에 대해 수 행되었다.

인덴터는 베르코비치 팁(Tip)을 사용하였고 깊이 에 따른 접촉투영면적(A=24.56h<sup>2</sup>)을 고려하여 인

덴터 반각 70.3°의 상당 원추형 팁으로 가정되었다. 재료와 접촉시 인덴터는 강체로 가정하였으며 마찰은 존재하기 않는 것으로 가정하였다.

해석에서 인텐테이션 깊이는 1000nm 로 하였고 인덴터 팁 반경은 40nm 로 모델링 하였다. Fig. 2 에 나노인덴테이션의 유한요소해석모델을 나타내 었다. 인덴터에 의해 압입시 발생하는 파일업 및 싱크인의 높이를 정확하게 평가하기 위해 최대 압 입시 인덴터와 접촉하는 부분의 요소를 1 nm 간격 으로 생성하였다. 최대압입 시 및 하중제거후 인 덴터와 접촉하는 절점의 좌표로 파일업 및 싱크 인의 높이를 결정하였다.

## 4. 파일업/싱크인 특성

#### 4.1 탄성계수의 영향

동일한 항복응력과 가공경화지수에 대하여 탄성 계수의 변화에 따른 파일업 및 싱크인의 높이 평 가하였다. Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 탄성계수가 증가함에 따라 파일업 및 싱크인의 높이가 증가하 는 경향을 보인다. 이 후에 언급할 항복강도의 변 화 및 가공경화지수의 변화에 따른 파일업 및 싱 크인의 높이 변화량과 비교하여 상대적으로 작다. 즉 인덴터에 의한 압입시 나타나는 파일업 및 싱 크인 특성에 탄성계수의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 인덴터에 의한 재료의 탄소성 거동은 탄 성변형과 소성변형으로 나눌 수 있다. 탄성계수에 의해 탄성변형구간이 결정되지만, 압입시험시 나 타나는 재료의 변형은 특히 금속재료의 경우 소성 변형에 비해 탄성구간이 매우 작게 나타나기 때문 에 파일업 및 싱크인 특성에 영향을 적게 미치는 것으로 판단된다.

본 연구는 Dao 등이 제시한 대변형 이론에 근거 하여 수행되었으며, 이러한 파일업 및 싱크인 특 성에 미치는 탄성계수의 영향은 압입시험에 대한 대변형 이론이 타당함을 알 수 있다.



Fig. 3 Comparison of pile-up/sink-in with different elastic modulus (at Y=150MPa)

#### 4.2 항복강도의 영향

동일한 탄성계수와 가공경화지수에 대하여 항복 강도의 변화에 따른 파일업 및 싱크인의 높이 평 가하였다. Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 항복강도가 증가함에 따라 파일업 및 싱크인의 높이가 감소하 는 경향을 보인다. 항복강도는 탄성변형과 소성변 형의 경계를 나타내며, 항복강도가 낮을수록 소성 변형의 시작이 빠르게 나타난다. 즉 항복강도가 낮을수록 압입하중에 대하여 저항할 수 있는 능력 이 낮기 때문에 파일업/싱크인의 높이가 높게 나 타난다. 가공경화지수가 낮을수록 파일업/싱크인의 높이 변화가 뚜력하게 나타난다. 가공경화지수가 낮으면 초기 소성변형 이후 가공경화지수의 영향 이 거의 없기 때문에 소성변형에 대해서 재료의 항복강도의 영향이 가공경화지수가 높은 경우보다 낮은 경우에서 상대적으로 크게 나타난다.



**Fig. 4** Comparison of pile-up/sink-in with different yield stress (at E=180MPa)



Fig. 5 Pile-up/sink-in response with different elastoplastic properties at max. load

#### 4.3 가공경화지수의 영향

가공경화지수는 압입시험에서 소재의 파일업과 싱크인의 양상을 결정하는 주된 요인이다. 금속재 료에 있어 가공경화지수는 소재가 변형함에 있어 변형의 균일성을 의미하므로 가공경화지수가 클수 록 인텐터에 의한 압입 방향으로의 소성변형이 크 게 나타나므로 싱크인이 발생할 수 있는 여지가 크다. 반대로 가공경화지수가 낮을수록 파일업이 발생하게 된다. Fig. 5 에 가공경화지수에 따른 파 일업 및 싱크인의 영향을 나타내었다.

최대하중점에서의 파일업 및 싱크인의 크기는 실제 실험에서 측정할 수 없기 때문에 이를 reverse 알고리즘에 적용하여 재료의 탄소성 특성 을 평가하는데 응용할 수 없다. 그러나 일반적인 금속재료는 하중 제거후의 탄성회복량이 작으므로 하중 제거후의 잔류 압입흔적의 높이를 이용한 가 공경화지수를 평가하는 방법을 제시하고자 한다.

4.4 잔류압입흔적을 이용한 가공경화지수 평가

잔류 압입흔적의 높이를 이용하여 가공경화지 수를 평가하였다. 잔류 압입흔적의 높이는 최대하 중에서의 파일업 및 싱크인의 높이와 탄성회복량 에 의존한다. Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 가공경화 지수가 높을수록 하중제거 후 탄성회복량이 많다. 이러한 특징은 잔류 압입흔적의 탄성회복에서도 나타난다.



Fig. 6 Comparison of load-displacement curves with different strain hardening exponent



Fig. 7 Residual impression height with different elastoplastic properties after unloading. Residual impression has same trend of pile-up/sink-in response at max. load.

Fig. 7 은 재료의 탄소성 특성에 대한 잔류 압입 흔적의 높이변화를 나타낸 것이다. 잔류 압입흔적 의 높이변화는 파일업 및 싱크인의 특성을 그대로 반영하고 있다. 이러한 재료의 탄소성 특성과 잔 류 압입흔적의 높이와의 관계를 식(5)과 같이 정 의하였다.

 $Ln(h_{res}) = \Pi\left(\frac{E^*}{\sigma_r}, n\right)$ (5) = exp((0.0689 + 1.1395n + 3.889n^2) + (0.5038 - 0.8161n -1.3057n^2)Ln\left(\frac{E^\*}{\sigma\_r}\right) + (-0.0384 + 0.0879n + 0.0249n^2)Ln\left(\frac{E^\*}{\sigma\_r}\right)^2)

## 5. 나노인덴테이션 시험

#### 5.1 실험조건

본 연구에서 제안한 재료의 탄소성 특성과 잔류 압입흔적의 높이와의 관계를 검증하기 위해 공학 적 금속재료에 대한 나노인덴테이션 시험과 단축 인장시험을 수행하였다. 사용된 소재는 Al6061-T6 와 AISI 1010, 1045, Copper(99%)이다.

잔류압입흔적의 높이를 얻기 위한 나노인텐테이 션 시험에서 시험편의 표면은 3 ~ 8 nm 의 평균표 면조도(Ra)를 가지도록 연마되었으며, 시험은 MTS 사의 Nano-indenter XP 를 사용하였다. 나노인 텐테이션 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 시험 은 10 회 반복 수행되었으며 인텐테이션 깊이는 유한요소해석과 동일한 1000nm 로 설정하였다. 나 노인텐테이션 후 각각의 재료에 대한 파일업/싱크 인 양은 AFM 관찰을 통하여 평가하였다.

#### 5.2 파일업/싱크인 예측

나노인덴테이션의 데이터를 이용한 reverse 알고 리즘에 의한 탄소성 특성과 인장시험에서 얻은 탄 소성 특성을 이용하여 잔류 압입흔적의 높이를 예 측하였다. 예측결과의 검증을 위해 AFM 관찰을 통해 조사된 베르코비치 팁을 따라서 잔류하는 압 입흔적의 높이의 평균과 예측결과를 비교하였다. 베르코비치 팁과 70.3°의 원추형 팁은 압입방향 으로 자기유사성(self similarity)을 가지며, 두개의 팁은 동일한 면적을 가지기 때문에 재료의 압입시 험시 동일한 변형량을 가진다고 가정하였다. 이러 한 가정을 검증하기 위해 시험소재의 탄소성 특성 에 대하여 베르코비치 팁과 70.3°의 원추형 팁에 의한 나노인덴테이션 시험을 유한요소해석하였다. Fig. 는 베르코비치 팁을 이용하여 잔류압입흔적 의 원리에 대해 개략적으로 나타내었다.

#### 5.3 AFM을 파일업/싱크인 측정

| 베르코비치 팁 | ]을 사용 | 용하여 10 | )00nm 압 | ·입시 | 험을 |
|---------|-------|--------|---------|-----|----|
|---------|-------|--------|---------|-----|----|

Al6061-T6, AISI 1010, 1045, Copper(99%)에 대하여 수행하였으며, 인덴테이션 후 잔류 압입흔적을 AFM을 이용하여 측정하였다. Table. 1은 시험소재 의 인장시험 및 reverse 해석에 의해 얻어진 탄소 성 특성이며, 이 결과를 바탕으로 Table. 2 에 그 결과를 비교하여 유사한 결과를 얻었다. 본 연구 의 결과는 앞선 연구자들이 제시한 reverse 알고리 즘의 신뢰성을 검증하는데 유용하게 사용할 수 있 다.또한 기존의 reverse 알고리즘을 통해 얻어지는 탄소성 특성의 유일성에 대한 문제를 해결할 수 있으며, 식(5)으로부터 파일업/싱크인 특성으로 가 공경화지수를 평가할 수 있다.



Fig. 8 Principle of transformation from pile-up/sink-in response by berkovich tip to conical tip $(70.3^{\circ})$ 

| Table 1 Results of tensile test and reverse analysis |
|--|
| for experiment material                              |

| Material   |         | E (GPa) | $\sigma_y$ (MPa) | n     |
|------------|---------|---------|------------------|-------|
| A16061     | Tensile | 70.6    | 331.7            | 0.081 |
|            | Reverse | 77.1    | 315.2            | 0.064 |
| AISI 1010  | Tensile | 209.6   | 210.6            | 0.249 |
|            | Reverse | 200.8   | 209.4            | 0.254 |
| AISI 1045  | Tensile | 210.3   | 337.1            | 0.191 |
|            | Reverse | 208.2   | 308.9            | 0.196 |
| Copper(99% | Tensile | 110     | 32.7             | 0.482 |
| )          | Reverse | 95.47   | 35.9             | 0.502 |

 
 Table 2 Results of residual impression height for experiment material using various method

| Mat.        | Tensile   | Reverse   | FEM         |           |  |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|--|
|             | Test      | Algorithm | (Berkovich) | Агм       |  |
| A16061      | 149.50 nm | 159.38 nm | 162.71 nm   | 175.74 nm |  |
| AISI 1010   | 54.36 nm  | 54.25 nm  | 52.85 nm    | 64.54 nm  |  |
| AISI 1045   | 86.22 nm  | 87.17 nm  | 97.35 nm    | 93.27 nm  |  |
| Copper(99%) | 5.24 nm   | 5.32 nm   | 6.54 nm     | 15.32 nm  |  |

본 연구는 나노인텐테이션 시험시 재료의 탄소 성 특성에 따른 파일업 및 싱크인의 특성을 도출 하기 위한 목적으로 수행되었다. 진행은 유한요소 해석을 통해 재료의 탄소성 특성과 파일업 및 싱 크인의 특성을 파악하고, 탄소성 특성으로 구성된 무차원 변수를 이용하여 그 관계를 규명하였다. 그 결과로써 재료의 탄소성 특성으로부터 1000nm 압입시 발생하는 파일업 및 싱크인 특성을 예측하 였다. 예측된 결과를 검증하기 위해 AFM 관찰을 통해 잔류 압입흔적의 높이을 조사하여 예측결과 와 비교하였다. 이상의 연구결과로부터 다음과 같 은 결과를 얻을 수 있었다.

 재료의 파일업/싱크인 특성은 탄성계수가 증 가함에 따라서 증가하며, 항복강도가 증가함에 따 라 감소한다. 그러나 이들 특성은 가공경화지수의 영향과 비교하여 상대적으로 작다.

2) 재료의 파일업/싱크인 특성은 가공경화지수가 증가함에 따라서 감소한다. 이러한 경향은 탄성계 수 및 항복강도가 변해도 뚜렷하게 나타난다. 파 일업/싱크인 특성과 탄소성 특성(특히 가공경화지 수)과의 관계를 규명함으로써 재료의 탄소성 특성 에 따른 재료의 파일업/싱크인 특성을 예측하였다. 베르코비치 팁과 70.3°의 원추형 팁에 의한 파일 업/싱크인 특성을 유한요소해석을 통해 파악하였으며, 베르코비치 팁의 파일업/싱크인 특성으로부 터 70.3°의 원추형 팁에 의해 발생하는 파일업/싱 크인 특성을 파악하였다.

3) 본 연구에서 규명된 탄소성 특성과 파일업/성 크인의 관계는 기존의 reverse 알고리즘으로부터 평가된 탄소성 특성을 검증하는데 사용할 수 있다. 또한 파일업/싱크인 특성으로부터 가공경화지수를 평가하여 기존의 reverse 알고리즘을 개선할 수 있 는 방법을 제안하였으며, 이는 기존의 reverse 알 고리즘이 가지고 있는 해의 유일성 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연 구센터사업(R15-2006-022-03003-0) 지원으로 수행 되었음

## 참고문헌

(1) Rieth, M. and Schommer, W., 2004, "Theoretical

and computational nanotechnology," ASP.

- (2) Dao, M., Chollacoop, N., Van viliet, K. J., Venkatesh, T. A. and Suresh, S., 2001, "Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation," *Acta materialia*, Vol. 49, pp. 3899~3918.
- (3) Anthony, C. and Fischer-cripps, 2002, "Nanoindentation," *Springer*.
- (4) Cheng, Y. T. and Cheng, C. M., 2004, "Scalling, dimensional, and indentation measurements," *Material science and Engineering R 44*, pp. 91~149.
- (5) Giannakopoulos, A. E. and Suresh, S., 1999, "Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation," *Scripta materialia*, Vol. 40, No. 10, pp. 1191~1198.
- (6) Bucaille, J. L., Stauss, S., Felder, E. and Michler, J., 2003, "Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters," *Acta materialia*, Vol. 51, pp. 1663~1678.
- (7) Chollacoop, N., Dao, M. and Suresh, S., 2003, "Depth-sensing instrumented indentation with dual sharp indenters," *Acta meterialia*, Vol. 51, pp. 3713~3729.
- (8) Tunvisut, K., O'Dowd, N, P. and Busso, E, p., 2001, "Use of scaling functions to determine mechanical properties of thin coatings from microindentation tests," *International journal of solids and structures*, Vol. 38, pp. 335~351.
- (9) Cao, Y, P. and Lu, J., 2004, "A new method to extract the plastic properties of metal materials from an instrumented spherical indentation loading curve," *Acta materialia*, Vol. 52, pp. 4023~4032.
- (10) Swaddiwudhipong, S., Tho, K, K., Liu, Z, S. and Zeng, K. 2005, "Material characterization based on dual indenters." *International journal of solids and structures*, Vol. 42, pp. 69~83.
- (11) Ogasawara, N., 2005, "Representative strain of indentation analysis," *Journal of material research*, Vol. 20, No. 8, pp. 2225~2234.
- (12)Ogasawara, N., Chiba, N. and Chen, X., 2006, "Measring the plsastic properties of bulk materials by singles indentation test," *Scripta materialia*, Vol. 54, pp. 65~70.
- (13) Yan, J., Karlsson, A. M. and Chen, X., 2007, "Determining plastic properties of a material with residual stress by using conical indentation," *International journal of solids and structures*, Vol. 44, pp. 3720~3737.
- (14) Antunes, J, M., Fernandes, J, V., Menezes, L, F. and Chaparro, B, M., 2007, "A new approach for reverse analyses in depth-sensing indentation using numerical simulation," *Acta materialia*, Vol. 55, pp. 69~81.
- (15) Lee, J, H., Yu, H, S. and Lee, H, Y., 2007, " A numerical approach to indentation techniques for thinfilm property evaluation," *Journal of KSME Part A*, Vol. 31, No. 3, pp. 313~321.