

# 연속압입시험법을 이용한 가공경화지수의 유도

전은채 · 안정훈 · 권동일

## Derivation of work-hardening exponent using continuous indentation technique

Jeon Eun-chaе, Ahn Jeong-Hoon and Kwon Dongil

**Key Words:** Continuous indentation test technique(연속압입시험법), Work-hardening exponent(가공경화지수), Pile-up/sink-in(파일업/싱크인), Elastic deflection(탄성굽힘)

### Abstract

In this study, we derived work-hardening exponent using continuous indentation test technique. Continuous indentation test technique is a powerful method to evaluate mechanical properties, such as hardness, modulus,  $\sigma$ - $\epsilon$  curves and etc. It has many merits conventional indentation test has. The relationship between true stress and mean contact pressure and between strain and indentation depth were derived. While the indenter pushes the materials, the region around the indenter is deflected elastically. It is called elastic deflection. And pile-up phenomenon related to plastic deformation around the indenter increased the contact depth, and sink-in phenomenon decreases. So we calibrated contact depth change by considering elastic deflection and pile-up/sink-in. Using calibrated contact depth we redefined the relationship between true stress and mean contact pressure and between strain and contact depth. Through these relationship we could derive work-hardening exponent by analyzing load-depth curves. And it showed good agreement with tensile test results.

#### 기호설명

$a$  : 재료상수(0.1)  
 $\beta$  : 재료상수(1/3)  
 $\epsilon$  : 진변형률  
 $\sigma$  : 진응력  
 $\omega$  : 압입자 형태상수(0.75)  
 $a$  : 압입자와 재료의 접촉반경  
 $a^*$  : 탄성굽힘을 고려한 깊이에서의 접촉반경  
 $A$  : 재료상수  
 $h_c$  : 압입자와 재료의 접촉깊이  
 $h_c^*$  : 탄성굽힘을 고려한 접촉깊이  
 $h_{max}$  : 최대접촉깊이  
 $k$  : 재료상수  
 $K$  : 재료상수

$L$  : 압입하중  
 $m$  : Meyer index  
 $n$  : 가공경화지수  
 $P$  : 평균압력  
 $R$  : 압입자 반경  
 $S$  : 재료의 stiffness  
 $u_z$  : z방향으로의 변위  
 $r$  :  $u_z$ 에서의 접촉반경

### 1. 서론

산업이 발전함에 따라 다양한 재료가 새로이 등장하여 기존의 재료를 대체하고 있다. 신소재가 개발되면 새로운 재료에 대한 정확한 물성 평가가 필수적으로 수행되어야 한다.

기존의 기계적 물성을 평가하는 방법으로는 일축인장시험, 충격시험 등이 있다. 이들 방법은 시험방법이 표준화되어 있으며, 변형 및 파괴에 대한 많은 정보를 제공하는 장점을 가지고 있다. 그러나 일정크기 이상의 시편이 필요하여 최근 수요가 증가하고 있는 박막, MEMS 등의 미소재료에는 적용하기 힘들며, 시편 전체의 평균적인 물성치를 얻게 되어 국부적으로 물성이 변화하는 재료에 적용할 수 없다는 단점이 있다.

이와 같은 단점을 보완할 수 있는 시험법으로 연속압입시험법이 각광을 받고 있다. 연속압입시험법은 압입하중에 따른 연속적인 압입깊이의 변화를 측정하여 얻어진 압입하중-변위곡선을 분석하여 다양한 기계적 물성을 구할 수 있다. 기존의 압입시험과 마찬가지로 시편크기 및 형상에 대한 제한이 거의 없으며, 시험시간이 짧으며, 데이터 분석이 비교적 간단하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 압입자 하부의 복잡한 삼축응력장으로 인해 아직 시험법이 표준화되어 있지 않아 현재 많은 연구가 행해지고 있다.

본 연구에서는 연속압입시험을 이용하여 기존의 인장시험을 통해 얻을 수 있었던 재료의 가공경화지수를 유도하는 방법에 대해 이론적인 분석을 행하였고, 실제 실험을 통해 검증하여 보았다.

## 2. 이론적 분석

### 2.1 가공경화지수의 의미

일반적인 금속재료에 대해 인장시험을 실시하면 항복 이후에 재료가 경화되는 현상이 발생하며 진응력과 진변형률 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1)$$

이때 식 (1)의  $n$  이 재료의 가공경화지수가 된다. 가공경화지수는 재료의 소성변형에 대한 척도로서 균일연신율과 거의 일치하며<sup>(1)</sup>, 압입시험에서 발생하는 재료의 소성변형양상인 pile-up/sink-in 현상을 결정하는 주요한 인자로 알려져 있다<sup>(2)</sup>.

### 2.2 가공경화지수의 유도를 위한 이론적 분석

압입시험을 통해 가공경화지수를 유도하기 위하여 식 (1)의 진응력과 진변형률을 압입인자를

이용하여 각각 다음과 같이 나타내었다.

#### 진변형률

압입시험시 압입자 하부에서 재료의  $z$  방향으로의 변형  $u_z$ 는 기하학적인 관계에 의해 식 (2)와 같이 표현되며, 이를 미분하여 얻어진 변형률의 최대값과 적합화 상수를 사용하여 식 (3)과 같은 압입시험에서의 재료의 변형률을 유도하였다.

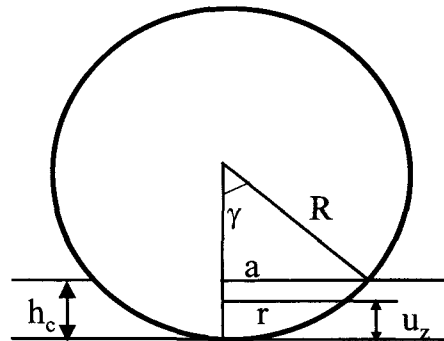


Fig. 1. The schematic diagram of spherical indentation.

$$u_z = h_c - R + \sqrt{R^2 - r^2} \quad (2)$$

$$\epsilon = \alpha \frac{h_c}{a} \quad (3)$$

#### 진응력

압입시험에서 압입자가 재료에 가하는 평균압력( $P$ )은 압입하중( $L$ )을 접촉면적으로 나눔으로써 구할 수 있으며, 기존의 연구에 의하면 진응력과 평균압력간에는 일정한 비가 성립됨이 알려져 있다<sup>(3)</sup>. 따라서 식 (4)와 같은 관계를 유도할 수 있었다.

$$\sigma = \beta P = \beta \frac{L}{\pi a^2} \quad (4)$$

#### 실제 접촉깊이의 결정

진변형률과 진응력을 압입인자와 관련된 식을 보면 모두 압입자와 재료간의 접촉깊이와 접촉반경이 모두 들어감을 알 수 있다. 그런데 접촉반경은 접촉깊이를 구하게 되면 압입자와의 기하학적인 관계에 의해 구해지는 항이므로 결국 각 식은 접촉깊이의 함수임을 알 수 있다. 기존에는

압입자 이동거리가 접촉깊이와 일치한다는 가정 하에 LVDT와 같은 변위측정기로 압입자 이동거리를 측정하여 접촉깊이를 구하였다.

그러나 실제 압입시험을 시행하게 되면 압입자 주변에서 발생하는 탄성변형과 소성변형에 의해 실제 접촉깊이가 압입자 이동거리와 달라지는 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상으로는 탄성굽힘 현상과 pile-up/sink-in 현상이 있다.

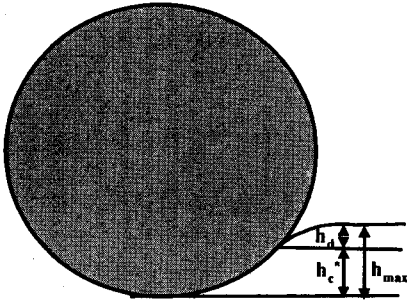


Fig. 2. The elastic deflection phenomenon.

일반적으로 압입시험을 시행할 때 압입자 부근에서 그림 2와 같은 탄성굽힘현상이 발생한다. 이는 스폰지를 눌렀을 때 눌린 부위 주변이 안으로 굽혀 들어가는 현상과 유사한 현상으로 압입자를 제거하면 회복이 일어나게 된다. 탄성굽힘에 의해 변화된 접촉깊이인  $h_c^*$ 는 압입하중-변위곡선의 재료의 탄성회복을 반영하는 초기하중 제거곡선을 이용하여 식 (5)과 같이 구할 수 있다<sup>(4)</sup>.

$$h_c^* = h_{max} - \omega \frac{L}{S} \quad (5)$$

( $\omega : 0.75$ ,  $S$  : 초기하중제거곡선의접선의기울기)

또한 소성변형된 재료가 그림 3과 같이 압입자 주변에 쌓이거나 압입자 하부로 밀려들어가는 pile-up/sink-in 현상에 의해 실제 접촉깊이가 달라지는 현상이 발생한다<sup>(5)</sup>. 따라서 그림 3에서 보는 바와 같이 실제 접촉깊이가 이상적인 경우와 달라지게 된다. 기존의 연구에 의하면 pile-up, sink-in 효과를 고려하지 않을 경우 측정된 접촉면적의 오차가 최고 50%까지 발생한다는 점이 알려져 있다<sup>(6)</sup>. Norbury and Samuel 등의 연구

에 의해 실제접촉반경  $a$ 와 이상적인 접촉반경  $a_0$  사이에 다음과 같은 관계가 있음이 밝혀졌다<sup>(7)</sup>.

$$a^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} a_0^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (6)$$

기존의 연구에서는 탄성굽힘현상만 고려하거나<sup>(4)</sup>, pile-up/sink-in 현상만 고려하였으나<sup>(8)</sup>, 탄성변형과 소성변형이 같이 일어나는 압입시험에 있어서 어느 한 가지만 고려하는 것은 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구와는 달리 탄성변형을 고려한 변형된 압입깊이  $h_c^*$ 를 식 (6)에 대입하여 탄성변형과 pile-up, sink-in 효과를 모두 고려한 실제 접촉반경을 구하였고, 압입자와 재료간의 기하학적인 관계를 이용하여 실제 접촉깊이를 유도하였다.

식 (3)과 식 (4)에 식 (6)을 통해 구해진 접촉깊이와 접촉반경을 대입하여 계산하고, 이를 식 (1)에 대입하여 압입인자로 표현하여 정리하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$L = A \frac{h_c^n}{a^{n-2}} \quad (7)$$

여기서  $A$ 는 재료상수이므로 같은 재료에 대해서는 압입하중에 관계없이 일정해야 한다. 따라서 다양한 하중과 그에 대응되는 접촉깊이에 대해  $A$  값을 일정하게 되는  $n$  값을 회귀법을 이용하여 구하게 된다.

### 3. 실험 결과 및 고찰



Fig. 4. Continuous indentation tester developed by our laboratory.

실험에 사용한 재료는 산업현장에서 많이 쓰이는 강인 SS45, SKD61, SCM4, SA508, SCM21 그리고 SS400을 사용하였다. 다양한 가공경화지수를 얻기 위하여 SS45 강에 대해 820℃에서 3 시간동안 유지시킨 후 냉각을 공냉과 노냉으로 나누어 함으로써 두 가지 시편을 얻을 수 있었다. SKD61 강에도 똑같은 열처리 과정을 시행하였다. 노냉한 시편은 강 이름 뒤에 A를 붙이고, 공냉한 시편은 B를 붙여 구분하였다.

이렇게 얻어진 8가지 시편에 대해 각각 압입시험을 시행하였다. 사용한 기기는 그림 4와 같이 본 실험실에서 직접 제작한 기기를 사용하였다.

시편은 25×25×20(mm)의 직육면체 시편을 사용하였으며, 시험면은 1μm 알루미늄까지 연마하였다. 압입하중은 상용 로드셀을 통해 얻었고, 압입깊이는 압입자의 이동거리를 LVDT로 측정하여 구하였다. 각 시편에 대해 100kg 하중으로 시험하였으며, 하중제거곡선의 기울기를 얻기 위하여 10번의 부분하중 제거를 실시하였다. 이를 통해 그림 5와 같은 재현성 있는 하중-변위곡선을 얻을 수 있었다.

각 하중제거곡선의 기울기를 구하여 각 최대하중에서의 탄성굽힘을 고려한 접촉깊이를 결정하였으며, iteration 법을 통하여 각 최대하중에서의 재료상수 A 값이 일정하게 하는 가공경화지수의 값을 결정하였다.

한편 압입시험을 통해 유도된 가공경화지수를 검증하기 위해 각 강에 대해 인장시험을 실시하였다. 각 시편은 ASTM 규격에 따라 표점거리 25mm로 제작하였으며, Instron 5582기를 사용하여 인장속도 1mm/min으로 시험을 실시하였다.

각 강에 대해 3회 실시하여 얻어진 가공경화지수의 평균값을 재료의 가공경화지수로 결정하였다.

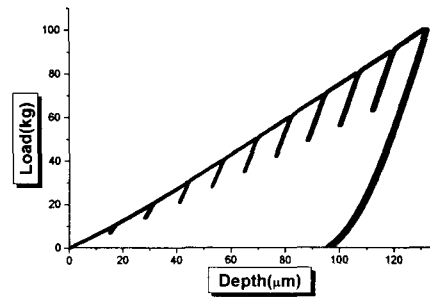


Fig. 5. Load-depth curves of SCM4 steel.

압입시험과 인장시험을 통해 얻어진 가공경화지수는 표 1과 같으며, 그림 6에 그래프로 표시하였다. 그림 6에서의 실선은 압입시험결과와 인장시험 결과가 서로 같을 때를 나타내는 선이다. 압입시험을 통해 얻어진 결과들은 대체로 실선에서 가까운 곳에 위치함을 알 수 있다.

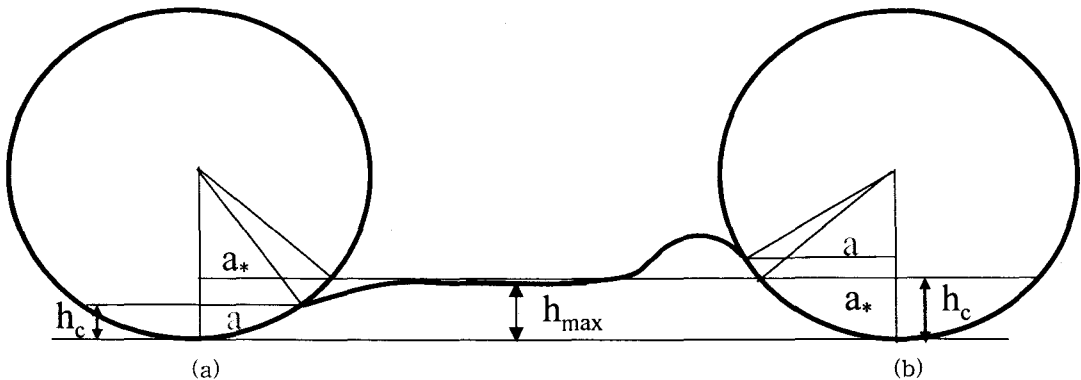
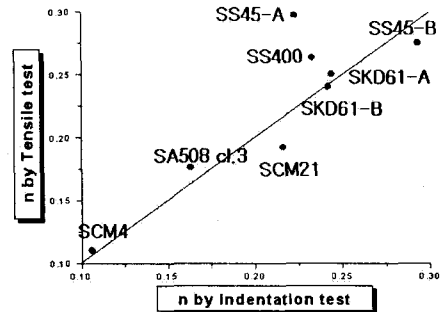


Fig. 3. The (a) sink-in and (b) pile-up phenomena.

Fig. 6. Comparison of work-hardening exp. from indentation test and tensile test.

SS45-A는 다른 시편들과는 달리 비교적 차이가 많이 남을 알 수 있는데, 이는 실제 접촉 깊이를 결정하는 방법에 사용된 식이 탄성굽힘과 pile-up/sink-in 현상을 각각 따로 고려한 식이기 때문이라고 생각된다. 더 정확한 접촉깊이를 구하기 위해서는 두 가지 현상을 동시에 고려해 줄 수 있는 새로운 인자를 도입해야 할 것이라 생각되며, 이는 FEM 시뮬레이션을 이용하면 가능할 것으로 생각된다.

한편 과거에 압입시험을 통해 가공경화지수를 구하는 방법으로 Meyer index가 많이 사용되어 왔다<sup>(9)</sup>. Meyer index는 식 (8)과 같이 압입하중과 접촉지름 사이에 성립하는 지수관계에서의 지수로서 일반적으로 2를 뺀 값이 가공경화지수와 일치한다고 알려져 있다.

$$L = k(2a)^m \quad (8)$$

이때 접촉지름은 시험기에서 얻어진 압입깊이를 이용하여 기하학적인 관계에 의해 얻어지게 된다. 따라서 압입자의 이동거리를 재료와 압입자 간의 접촉깊이로 간주하게 된다. 이번 실험에 사용한 각 시편들에 대해 식(8)을 이용하여 가공경화지수를 유도하였으며 그 결과는 그림 7과 같다.

그림 7 에서 보는 바와 같이 기존의 Meyer index를 사용하여 유도된 가공경화지수 값은 실제 값보다 크게 평가됨을 알 수 있으며, 별다른 경향성을 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 앞에서 서술한 바와 같이 압입시험시 발생하는 탄성굽힘과 pile-up/sink-in 현상을 고려하지 않았기 때문이라 생각된다.

따라서 압입시험 시 발생하는 탄성굽힘현상과 pile-up/sink-in 효과에 의한 실제 접촉깊이의 변화를 고려해야만 정확한 재료의 기계적 물성을 유도할 수 있으며, 가공경화지수를 유도하기 위해서도 필수적으로 고려해야 한다.

Table. 1. Work-hardening exponents derived from indentation and tensile tests.

	SCM4	SKD61-A	SKD61-B	SS45-A	SS45-B	SA508	SCM21	SS400
Indentation	0.106	0.244	0.242	0.223	0.294	0.163	0.216	0.233
Tensile	0.110	0.250	0.240	0.297	0.275	0.176	0.192	0.266

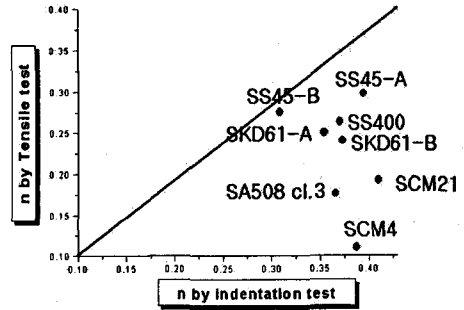


Fig. 7. Comparison of results from indentation test(Meyer index) and tensile test.

#### 4. 결론

본 연구에서는 인장시험으로만 구할 수 있었던 가공경화지수를 연속압입시험법을 이용하여 구하는 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 진응력과 평균접촉압력 간에는 일정한 상수비가 존재하며, 변형률의 정의를 이용하여 압입시험에서의 변형률을 정의할 수 있었다.
- (2) 압입시험시 탄성굽힘 현상에 의해 압입깊이가 감소하는 현상이 발생하며, 소성변형이 일어나게 되면, pile-up 현상에 의해 압입깊이가 증가하거나, sink-in 현상에 의해 압입깊이가 감소하는 현상이 발생한다.
- (3) 탄성굽힘 현상과 pile-up/sink-in 현상은 압입자 이동거리로 측정되는 압입깊이와 실제 접촉깊이가 달라지게 하며, 이를 고려하지 않으면 정확한 기계적 물성을 측정할 수 없다.
- (4) 진응력, 진변형률을 압입인자로 표현하고, 압입깊이를 보정하여 다음과 같은 식으로 가공경화지수를 유도하였으며, 인장시험과 좋은 일치성을 보여주었다.

$$L = A \frac{h_c^n}{a^{n-2}}$$

### 참고문헌

- (1) Dieter, G.E., 1986, "*Mechanical Metallurgy*", McGraw Hill press, pp.286-289
- (2) Hill, R., Storåkers, B. and Zdunek, A.B., 1989, "A theoretical study of the brinell hardness test", *Proc. R. Soc. London*, A423, pp.301-330
- (3) Tabor, D. 1951, "*Hardness of Metals*", Clarendon Press, Oxford, pp.2
- (4) Oliver, W.C. and Pharr, G.M., 1992, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", *J. Mater. Res.*, vol. 7, no.6, pp.1564-1583
- (5) Cheng, Y.T. and Cheng, C.M, 1998, "Effects of 'sinking in' and 'piling up' on estimating the contact area under load in indentation", *Phil. Mag. Letters*, vol. 78, no. 2, pp.115-120
- (6) Lim, Y.Y., Chaudhri, M.M. and Enomoto, Y., 1999, "Accurate determination of the mechanical properties of thin aluminum films deposited on sapphire flats using nanoindentation", *J. Mater. Res*, vol.14, no.6, pp.2134-2327
- (7) Norbury, A.L. and Samuel, T., 1928, "The recovery and sinking-in or piling-up of material in the brinell test, and the effects of these factors on the correlation of the brinell with certain other hardness tests", *J. Iron steel Inst.*, 117, pp.673-687
- (8) Taljat, B., Zacharia, T. and Pharr, G.M., 1998, "Pile-up behavior of spherical indentations in engineering", *MRS Fundamentals of nanoindentation and nanotribology* vol. 522, pp.33-38
- (9) Meyer, E., 1908, "Untersuchungen über Härteprüfung und Härte", *Zeitschrift V.D.I.*, vol.52, pp.645-654