

압입접촉깊이 분석을 통한 가공경화지수의 유도

전은채* · 안정훈* · 최 열** · 권동일*

Derivation of work-hardening exponent through indentation contact depth analysis

Jeon Eun-chae*, Ahn Jeong-Hoon*, Choi Yeol** and Kwon Dongil*

Key Words: Continuous Indentation Test(연속압입시험), Work-hardening exponent(가공경화지수), Pile-up/sink-in(파일업/싱크인), Elastic deflection(탄성굽힘), FEM(유한요소해석)

Abstract

In this study we tried to determine the work-hardening exponent using continuous indentation test. Work-hardening exponent, which was determined by Hollomon equation, in tensile test, is an important parameter to determine plastic deformation and brittle/ductile property of materials. For using Hollomon equation, true stress and true strain were defined by indentation depth and indentation load. Using them the new equation, which is constituted by indentation depth, indentation load and work-hardening exponent, was induced. Indentation depth was calibrated because of elastic deflection and pile-up/sink-in phenomena. Work-hardening exponents of various steels derived by it showed good agreement to the results of tensile tests.

In addition to experiments, FEM simulation was accomplished to investigate changes of real contact depth with materials properties changes. Through this simulation it is concluded that the real contact depth is changed by Y/E value which affect the early stage of indentation, and work-hardening exponent which the latter stage.

기호설명

α : 재료상수(0.1)

β : 재료상수(1/3)

ϵ : 진변형률

σ : 진응력

ω : 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

1. 서론

최근의 신소재 개발은 주로 고강도 재료와 박막 등의 미소재료에 초점이 맞추어져 있다. 고강도 재료는 개발 목적 상 기계적 강도 평가가 필수적이며, 미소재료는 개발 목적에 관계없이 상용화 되기 위해서는 일정치 이상의 강도를 가져

* 서울대학교 재료공학부
** (주) 프론틱스 연구개발부

야 하므로 강도 평가가 필수적이다. 그러나 고강도 재료는 다양한 제조공정상에서 두께, 위치에 따른 불균일이 발생하기 쉽고, 미소재료는 크기 제한 때문에 기존의 강도 평가법인 인장시험이나 파괴시험을 적용하기 어렵다.

이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 연속압입시험법이 제안되었다. 연속압입시험법은 기존의 압입시험과는 달리 압입하중에 따른 연속적인 압입깊이의 변화를 측정하여 다양한 기계적 물성을 평가할 수 있다⁽¹⁾. 그러나 아직 세계적으로 표준화가 이루어지지 않아 다양한 연구가 진행 중이다.

본 연구에서는 연속압입시험에서의 여러 인자에 영향을 미치는 것으로 알려진 가공경화지수를 압입접촉깊이의 변화에 대한 모델링을 통해 유도하였다.

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⁽²⁾, 압입시험에서 발생하는 재료의 소성변형양상인 pile-up/sink-in 현상을 결정하는 주요한 인자로 알려져 있다⁽³⁾.

2.2 가공경화지수의 유도를 위한 이론적 분석

압입시험을 통해 가공경화지수를 유도하기 위하여 식 (1)의 진응력과 진변형률을 압입인자를 이용하여 각각 다음과 같이 나타내었다.

진변형률

기존의 인장시험에서 사용했던 진변형률 식과는 달리 압입 인자들을 이용하여 다음과 같이 진변형률을 정의하였다⁽¹⁾.

$$\epsilon = \alpha \frac{a}{R - h_c} \quad (2)$$

진응력

진응력과 압입시 발생하는 평균접촉압력간에는

일정한 비가 성립됨이 알려져 있다⁽⁴⁾. 따라서 식 (3)와 같은 관계를 유도할 수 있었다.

$$\sigma = \beta P = \beta \frac{L}{\pi a^2} \quad (3)$$

실제접촉깊이의 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 가정을 통해 접촉깊이를 구하였다.

그러나 실제 압입시험을 시행하게 되면 압입자 주변에서 발생하는 탄성변형(탄성굽힘)과 소성변형(pile-up/sink-in)에 의해 실제 접촉깊이가 압입자 이동거리와 달라지는 현상이 발생한다.

본 연구에서는 탄성변형은 초기하중제거곡선을 이용하여 식 (4)와 같이 보정하였다⁽⁵⁾.

$$h_c^* = h_{\max} - \omega \frac{L}{S} \quad (4)$$

또한 소성변형된 재료가 그림 3과 같이 압입자 주변에 쌓이거나 압입자 하부로 밀려들어가는 pile-up/sink-in 현상에 의해 실제 접촉깊이가 달라지는 현상이 발생한다⁽⁶⁾. 기존의 연구에 의하면 pile-up, sink-in 효과를 고려하지 않을 경우 측정된 접촉면적의 오차가 최고 50%까지 발생한다는 점이 알려져 있다⁽⁷⁾. 본 연구에서는 pile-up/sink-in 현상을 다음의 식으로 보정하였다⁽⁸⁾.

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

기존의 연구에서는 탄성굽힘현상만 고려하거나⁽⁵⁾, pile-up/sink-in 현상만 고려하였으나⁽⁹⁾, 본 연구에서는 기존 연구와는 달리 탄성변형을 고려한 변형된 압입깊이 h_c^* 를 식 (5)에 대입하여 탄성변형과 pile-up, sink-in 효과를 모두 고려한 실제 접촉반경을 구하여 실제 접촉깊이를 유도하였다.

식 (2)와 식 (3)에 식 (5)를 통해 구해진 접촉깊이와 접촉반경을 대입하여 계산하고, 이를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식이 유도

된다⁽¹⁰⁾.

$$L = A \frac{(a)^{n+2}}{10^n (R - h_c)^n} \quad (6)$$

여기서 A는 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.

2.3 FEM 모델링

앞서 논의된 바와 같이 압입시험을 통해 재료의 물성을 평가하기 위해서는 실제 접촉깊이의 결정이 매우 중요하다. 실제 접촉깊이의 결정은 압입시험과 동시에 직접 관찰하여 측정하는 것이 가장 이상적이나, 직접 관찰은 실제로는 불가능하다.

이러한 단점을 보완하는 방법으로 FEM 시뮬레이션이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 재료의 물성 변화에 따른 실제 접촉깊이와 재료 물성간의 관계를 살펴보기 위하여 FEM 모델링을 시행하였다.

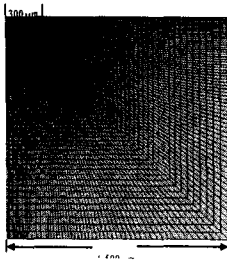


Fig. 1. The diagram of a specimen for FEM.

그림 1은 이번 FEM 시뮬레이션에서 압입자와 시험재료를 모델링한 그림이다. 실제 실험결과와 유사한 결과를 얻기 위해서는 세밀한 mesh의 설정이 필수적이다. 그러나 너무 세밀한 mesh를 설정할 경우에는 계산시간이 지나치게 오래 걸리는 문제가 발생하여 효율성이 저하된다. 따라서 정확성과 계산시간의 경제성을 가장 많이 확보할 수 있는 mesh의 설정이 중요하다.

압입시험은 시편 전체적인 관점에서는 매우 미세한 변형이지만, 변형되는 부분만의 관점에서는

상당히 많은 변형이 발생한다. 따라서 그림 1에서 보는 바와 같이 압입자 하부에서는 세밀한 mesh를 설정하여 주고, 압입자로부터 멀어질수록 밀도가 낮은 mesh를 설정하여 주면 정확성을 높이고 경제성도 확보할 수 있다. 본 연구에서는 전체 면적의 4%에 해당되는 압입자 하부에는 계산의 정확성이 가장 높은 정사각형 형태의 요소 3,600개를 설정하였고, 나머지 영역에 6,112개의 요소를 설정하였다. 압입자는 일반적으로 재료에 비해 상당히 높은 탄성계수를 가지므로 완전 강체로 가정하였고, 반지름은 실제 실험에서 사용하는 압입자와 동일한 0.5mm로 설정하였다. 압입자와 재료 사이의 마찰은 없다고 설정하였다. 구형압입자와 시편의 대칭성을 이용하여 2차원변형으로 모델링하였고, 오른쪽 한 부분에 대해서만 모델링을 하여 계산시간을 절약할 수 있게 하였다. 시뮬레이션은 상용 FEM 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

3. 실험방법

3.1 연속압입시험과 인장시험

앞서의 이론적 분석을 통해 유도된 가공경화지수 식의 검증을 위한 실험에 사용한 재료는 산업에서 많이 쓰이는 강인 SS45, SKD61, SCM4, SA508, SCM21 그리고 SS400을 사용하였다. SKD61 강에 대해 열처리를 다르게 하여 SKD61-A, SKD61-B의 두 가지 시편을 준비하였다.

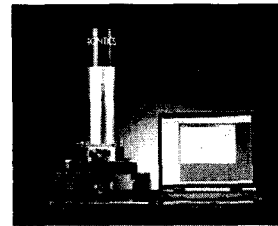


Fig. 2. AIS2000 developed by Frontics, Inc.

각각의 7가지 시편에 대해 연속압입시험을 시행하였다. 사용한 기기는 그림 2의 (주) 프론틱스에서 개발한 AIS2000 기기를 사용하였다. 사용한 기기는 최대압입하중 300kgf, 하중 분해능

0.3kgf, 깊이 분해능 0.2 μ m의 성능을 갖고 있는 시험기로 기존의 압입시험기와는 달리 압입하중에 따른 연속적인 압입깊이의 변화를 측정할 수 있으며, 데이터의 저장이 가능하다. 각 시편에 대해 100kgf 하중으로 시험하였으며, 탄성적인 변형에 의한 압입깊이의 변화의 계산에 필요한 하중제거곡선의 기울기를 얻기 위하여 10번의 부분하중 제거를 실시하였다. 각 하중제거곡선의 최대압입하중 점에서의 압입하중과 압입깊이를 이용하여 각 점에서의 재료상수 A값을 구하고 10개의 값의 표준편차가 가장 작아질 때의 가공경화지수를 재료의 가공경화지수로 결정하였다.

또한 각 강에 대해 ASTM 규정에 따라 인장시험을 실시하여 압입시험을 통해 유도된 가공경화지수의 값을 비교하였다.

3.2 FEM 시뮬레이션

앞서의 이론적 분석에서와 같이 실제 접촉깊이가 탄성적인 변형과 소성적인 변형에 모두 영향을 받는지를 확인하기 위하여 다음과 같은 시뮬레이션을 시행하였다.

시험재료의 탄성계수는 200GPa과 100GPa 두 가지로 설정하였고, 각각에 대한 항복강도는 400MPa로 동일하게 하여 재료의 탄성성질을 나타내는 대표적인 인자인 Y/E 값이 일반적인 금속이 갖는 범위인 0.002와 0.004를 갖는 재료에 대한 시뮬레이션을 시행하도록 하였다.

그리고 소성성질의 영향을 살펴보기 위하여 각 Y/E 값에 대해 가공경화지수가 0.1, 0.2 그리고 0.3인 경우에 대해 각각 시뮬레이션을 하여 가공경화지수의 변화에 따른 접촉깊이의 변화도 살펴 보았다. 압입하중은 계산시간의 절약을 위해 10kgf로 제한하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 가공경화지수의 유도

압입시험을 통해 얻어진 하중-변위곡선의 각 부분하중제거곡선의 최대하중에서의 하중값과 식 (4)와 식 (5)를 통해 보정된 압입깊이를 식 (6)에 대입한 뒤 회귀법을 통해 얻어진 가공경화지수와 인장시험을 통해 얻어진 가공경화지수 값을 비교한 결과는 그림 3과 같다. 그림 3의 실선은 압입

시험을 통해 얻어진 가공경화지수와 인장시험을 통해 얻어진 가공경화지수가 동일할 경우를 나타내는 기준선이다. 그림에서 보는 바와 같이 압입시험을 통해 얻어진 가공경화지수가 인장시험을 통해 얻어진 값과 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 본 방법으로 가공경화지수를 유도하는 것이 가능하다고 생각된다.

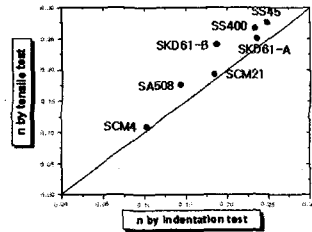


Fig. 3. The comparison of work-hardening exp. obtained by indentation and tensile test.

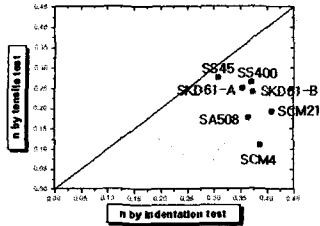


Fig. 4. The comparison of work-hardening exp. obtained by indentation and tensile test. (Meyer's index)

기준에 압입시험을 통해 가공경화지수를 유도하는 방법으로 가장 많이 사용되어 온 방법이 Meyer index이다⁽¹¹⁾. Meyer index는 식 (7)과 같이 하중과 접촉반경을 지수식으로 표현하였을 때 지수에 해당하는 값으로 이 값에서 2를 뺀 값이 가공경화지수와 일치한다고 알려져 있다.

$$L = k(2a)^m \quad (7)$$

이 때 접촉반경은 접촉깊이를 이용하여 기하학적 관계를 통해 구하게 된다. 기존에는 이 접촉깊이를 탄성굽힘 현상과 pile-up/sink-in 현상을 고려하지 않은 압입자 이동거리를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 7가지 강에 대하여 Meyer index를 이용하여 구한 가공경화지수의 결과는 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 인장시험결과와 비교하였을 때 아무런 경향성을 보이지 않고 있음을 알 수 있다.

따라서 접촉깊이를 결정할 때 탄성굽힘 현상과 pile-up/sink-in 현상을 고려하지 않을 경우에는 제대로 된 재료 물성을 유도할 수 없음을 알 수 있다.

4.2 FEM 시뮬레이션

그림 5(a)는 탄성계수 200GPa, 항복강도 400MPa, 가공경화지수 0.2의 재료에 대해 하중 2kgf로 눌렀을 때의 두께 방향(z-방향)으로의 변위의 분포도이다. 오른쪽에 보이는 숫자가 두께 방향으로의 변위로 모두 음수의 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 음수는 하부방향으로의 이동하였음을 의미하므로 재료 표면에서도 pile-up 현상이 나타나지 않았음을 알 수 있다. 그러나 10kgf 하중으로 눌렀을 때는 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 두께 방향의 변위가 양수인 부분이 나타난다. 분포도에서 보면 이 영역이 재료 표면임을 알 수 있으므로, 재료 표면에서 압입방향과 반대인 상부방향으로의 상승이 일어났음을 알 수 있고, 이것이 pile-up 현상이라고 생각할 수 있다.

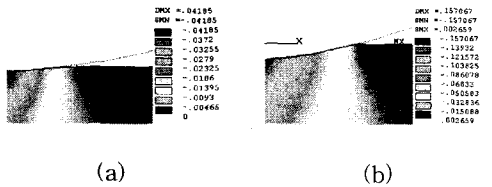


Fig. 5. The z-displacement beneath the indenter at (a) 2kgf and (b) 10kgf.

즉 동일한 재료에 대해서도 저하중에서는 탄성굽힘 현상에 의하여 실제 접촉깊이가 압입자 이동거리보다 작아지게 되나 하중이 높아지게 되면, 소성변형이 많이 발생하여 pile-up 현상으로 실제 접촉깊이가 도리어 커질 수 있음을 알 수 있다. 따라서 탄성굽힘 현상과 pile-up/sink-in 현상 중 어느 하나만을 고려하면 정확한 결과를 얻을 수 없고, 두 현상을 모두 고려해야 한다.

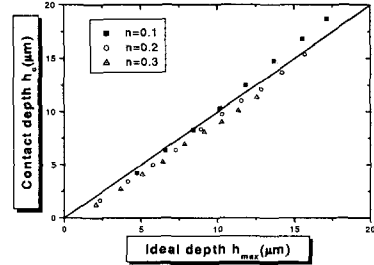


Fig. 6. The comparison of contact depth and ideal depth. (n variation)

그림 6은 탄성계수 200GPa, 항복강도 400MPa인 재료에 대해 가공경화지수를 0.1, 0.2 그리고 0.3 세가지로 바꾸어가면서 시뮬레이션한 결과이다. 그래프의 'ideal depth'는 압입자의 이동거리를 의미하며, 사선은 압입자의 이동거리가 실제 접촉깊이가 같을 경우를 나타내는 기준선이다. 가공경화지수가 0.1인 경우에 초기에는 실제 접촉깊이가 압입자 이동거리보다 작으나 하중이 증가함에 따라 도리어 커짐을 확인할 수 있다. 또한 가공경화지수가 0.1인 경우를 제외하고는 점들이 기준선 아래에 위치하므로 실제 접촉깊이가 압입자의 이동거리보다 작다. 이들 재료에 대해 표면에서 깊이방향의 변위를 조사하면 pile-up 현상이 일어남을 확인할 수 있었음에도 불구하고 실제 접촉깊이가 압입자 이동거리에 비해 작게 나타났다. 이는 pile-up이 발생한다 하여도 모든 pile-up 영역에서 압입자와의 접촉이 발생하는 것은 아님을 의미한다. 그리고 가공경화지수가 작을수록 접촉깊이가 증가하므로 pile-up현상이 더 발달하고 있음을 알 수 있다.

탄성계수 100GPa, 항복강도 400MPa인 경우에도 이와 같은 결과를 보였다.

그림 7은 앞서의 경우에서 가공경화지수가 0.2인 경우일 때 Y/E 값의 변화에 따른 접촉깊이의 변화를 나타낸 것이다. Y/E 값이 작아질수록 동일한 압입자 이동거리에서 실제 접촉깊이가 커짐을 확인할 수 있다. 이는 Y/E 값이 클수록 탄성변형이 많이 발생함을 의미한다. Y/E값은 결국 항복변형률을 의미하므로 Y/E 값이 크면 재료의 탄성성질이 강하기 때문이다. 또한 앞

서의 가공경화지수가 변할 때와는 달리 두 경우의 깊이 차이가 깊이가 증가함에 따라 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

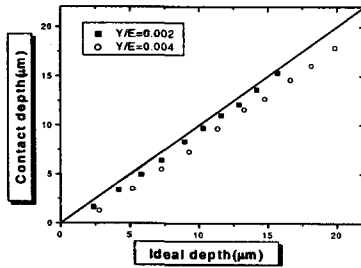


Fig. 7. The comparison of contact depth and ideal depth. (Y/E variation)

두 가지 시뮬레이션 결과에서 Y/E는 초기 탄성변형의 양을 결정하며, 가공경화지수는 후기 소성변형의 양을 결정함을 알 수 있다. 이로 인하여 Y/E 값이 달라지면 깊이가 증가해도 각각의 차가 일정하게 유지되지만, 가공경화지수가 다르면 깊이가 깊어질수록 각각의 차가 커진다고 생각된다.

5. 결론

(1) 연속압입시험을 통하여 가공경화지수를 유도하였으며, 인장시험과 좋은 일치성을 얻었다.

(2) 압입시 실제 압입깊이는 탄성굽힘과 pile-up/sink-in 현상을 보정한 뒤 결정되어야 한다.

(3) 재료의 탄성성질을 나타내는 Y/E값은 압입 시험시 초기 탄성 변형의 양을 결정하며, 가공경화지수는 후기 소성변형의 양을 결정한다.

후기

본 연구는 과학기술부의 '국가지정연구실' 사업의 지원을 받아 행하여졌습니다.

참고문헌

(1) 안정훈, 최열, 권동일, 2000, "압입하중-변위 곡선의 해석을 통한 재료의 소성 유동특성 평가", *대한금속재료학회지*, vol. 38, no. 12, pp.1606-1611.

(2) Dieter, G.E., 1986, "*Mechanical Metallurgy*",

McGraw Hill press, pp.286-289

(3) 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

(4) Tabor, D. 1951, "*Hardness of Metals*", Clarendon Press, Oxford, pp.2

(5) 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

(6) 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

(7) 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

(8) 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

(9) 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

(10) 전은채, 안정훈, 권동일, 2000, "연속압입시험법을 이용한 가공경화지수의 유도", 2000년도 추계기계학회논문집 A, pp.255-261

(11) Meyer, E., 1908 "Untersuchungen über Härteprüfung und Härte", *Zeitschrift V.D.I.*, vol.52, pp.645-654.