

압입시험에서 하중제하곡선의 강성율에 관한 고찰

이병섭*·이호진*·이봉상*

A Study on the Unloading Stiffness of Instrumented Indentation Tests

B.S. Lee, H.J. Lee and B.S. Lee

Abstract

Instrumented indentation tests have been used for estimating material properties. In order to analyze deformation characteristics with various factors, the unloading stiffness should be properly determined from the elastic behaviour. In general, the unloading stiffness is obtained from shifted power functions fitting to indentation unloading curves. But, the functions give often a poor representation of actual data. In this study, control conditions for fitting unloading curves by shifted power functions were investigated. The current efforts may provide useful information about unloading process and valid unloading stiffness.

Key Words : Unloading Stiffness, Instrumented Indentation Tests, Shifted Power Functions, Control Conditions, Unloading Process

1. 서 론

압입시험은 기존의 재료 물성의 취득 방법이 시편의 파손을 통하여 얻어지는데 비교하여 국부적 압입을 통하여 구해지는 하중과 압입 깊이 사이의 관계를 분석하여 필요한 값을 얻는 준 비파괴적인 방법으로 이미 설치된 구조물이나 완성된 제품에 최소의 손실을 주며 재료의 상태를 파악할 수 있고, 재료 물성을 얻기 힘든 분야인 미소 영역 분야에서도 필요한 값을 얻을 수 있기 때문에 근래에 와서 보다 관심이 집중되는 시험법이다.

이러한, 압입시험의 경도와 재료물성값 사이의 관계에 대한 연구는 1950년대에 Tabor⁽¹⁾가 시작한 이후, 많은 연구자들에 의해 압입 시험을 통하여 필요한 재료물성값을 얻고자 노력되어져 왔으며, Sneddon⁽²⁾을 거쳐 Oliver

와 Pharr⁽³⁾, Haggag⁽⁴⁾에 의해 압흔에 대한 고찰을 기반으로 재료적 의미를 갖는 값으로써 응력과 변형률, 탄성 계수등을 정의할 수 있게 되었으며, 국내에서의 연구 또한 그동안 진척되어 2003년에는 금속 재료의 계장화 압입 시험으로 인장 물성을 평가하는 방법에 대한 KS규격⁽⁵⁾도 제정되었다.

앞에서 언급한 여러 연구자들에 의하면 압입시험의 결과를 재료물성값으로 분석하여 필요한 값을 얻기 위해서는 구해진 하중과 압입 깊이 값으로부터 실제 접촉 깊이를 찾는 것이 가장 중요하다고 알려져 있다. 실제 접촉 깊이는 압입 현상에 따라 누르개 주변에 발생하는 탄성 굽힘과 소성 축적, 소성 함몰 현상을 보정하여 구하는 값으로 압입 하중에 의해 직접적 영향을 받는 영역을 표시하며, 압흔에 대한 연구에 의하면 탄성 굽힘의 영향은

* 한국원자력연구소 원자력재료기술개발부

하중제하 강성률과 관계가 있고, 소성 축적과 소성 함몰은 가공경화 지수와 관계⁽⁵⁾가 있다. 이 중 하중제하 강성률은 실험값에서 취득한 하중제하 곡선을 적합화하여 구한 최대 깊이값에서의 기울기를 의미하나, 이를 적합화하기가 어렵고 실험에서 발생하는 오류에 의해서 영향을 많이 받기 때문에 어려움이 있다.

본 연구는 이러한 이유로 하중제하 강성률의 의미를 파악하고, 하중제하 강성률을 보다 정확하고 편리하게 구하는 방법을 제시하여 압입 시험을 통하여 재료 물성값을 구하는 방법에 대한 신뢰도를 보다 높이고자 한다.

2. 압입 시험과 하중제하 강성률

압입 시험은 구형, 원추형, 비커스형(vickers), 비코비치(berkovich)형의 누르개를 이용 Fig. 1에서 보여지는바와 같이 하중 및 제하 과정을 통하여 하중과 깊이 값을 얻는다. 이때 하중제하 강성률은 (1)식과 같이 탄성 굽힘에 영향을 주는 영률과 탄성 굽힘을 고려한 실제 접촉 깊이의 함수로 표현되어 질 수 있다.

$$S = \frac{dF}{dh_{h=h_{\max}}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E^* \sqrt{A} = 2E^* a \quad (1)$$

여기서, S 는 하중제하 강성률, F 는 압입하중, h 는 압입깊이, E^* 는 압입자와 소재사이의 환산영률, A 는 접촉 투영 면적, a 는 접촉 반지름을 의미한다.

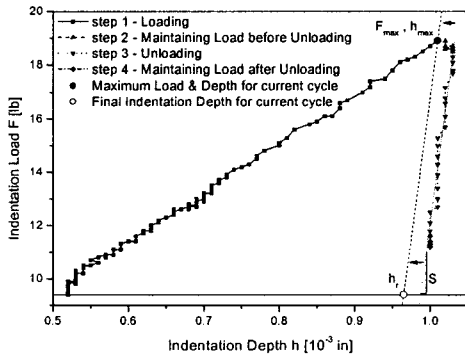


Fig. 1 Typical indentation load-depth curve

현재 압입시험에서 사용되는 하중제하 강성률을 구하는 방법으로는 Oliver 와 Pharr가 제안한 이동멱함수 (Shifted power function) (2)식에 계수를 하중제하 실험값들을 적합화하여 구한후 (3)식과 같이 최대 압입 깊이에서 미분을 통하여 얻는

방법⁽³⁾과 Haggag에 의해 (4)식을 사용하는 방법⁽⁴⁾이 있다. 두 방법을 사용한 압입시험기가 많이 있지만, 실험값과 실험 장치로부터 얻는 계산값에 대한 비교가 용이하도록 전자의 경우, 국내에서 권 등에 의해 연구되고, 개발되어 보급되고 있는 구형 압입시험기에 의한 것을 Method 1⁽⁶⁾이라 하고 Haggag에 의해 개발된 구형 압입시험기에 의한 것을 Method 2⁽⁴⁾라 하여 기술할 것이다. 미소 압입 시험기의 경우 대부분 (3)식에 의한 방법을 사용하고 있고 KS규격 또한 (3)식에 근거하고 있다. 여기서, h_p 은 압입 최종 깊이, h_{\max} 는 압입 최대 깊이를 의미한다.

$$F = \alpha(h - h_p)^\beta \quad (2)$$

$$S = \frac{dF}{dh_{h=h_{\max}}} = \alpha\beta(h_{\max} - h_p)^{(\beta-1)} \quad (3)$$

$$F = Sh \quad (4)$$

압입 시험기에서 하중 제하 강성률을 구한 후 이를 이용하여 구할 수 있는 재료 물성치 중 탄성 계수가 하중제하 강성률로 구하는 반면에 응력과 변형률을 구하는 방법에서는 하중 제하 강성률을 이용하는 Herbert의 연구⁽⁷⁾와 국내의 권 등의 연구⁽⁶⁾와는 달리 직접 하중 중의 실험값을 가지고 응력과 변형률을 구하는 본 연구팀에 연구⁽⁸⁾도 있지만, 직접 하중 중의 실험값을 가지고 응력과 변형률을 구하더라도 이에 대한 검증과 시험기의 기계적 오차를 계산하기 위해서는 하중 제하 강성률이 필요하다.

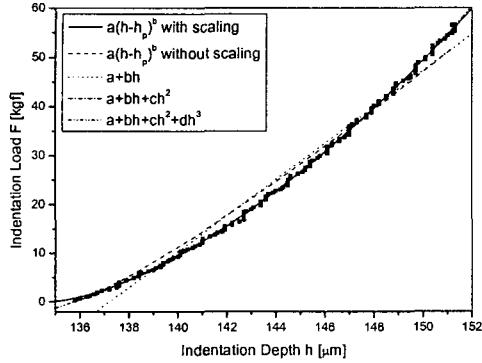
3. 하중제하 실험값의 적합화 함수 결정

하중 제하 실험값을 적합화할 경우 어떤 함수가 가장 적절한지 확인하기 위해서 각 함수에 적합화하여 하중제하곡선을 구하여 Fig. 2에 나타내었다. (a)는 Method 1에 의해 구해진 실험값을 Levenberg-Marquardt 반복법을 사용하여 적합화 한 것이고, (b)는 Method 2에 의해 구해진 실험값을 적합화 한 것이다.

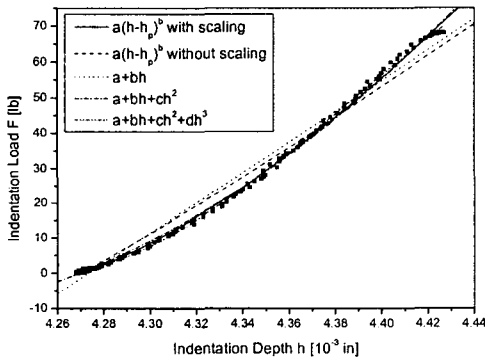
이를 살펴보면, 이동멱함수의 경우가 가장 근사하고, 다항식의 경우 2차 이상인 경우에 근사한 것으로 나타난다. 이 중 이동멱함수의 경우 압흔에 대한 이론적 배경을 만족하는 최종 압입 깊이 h_p 을 계수로 포함하고, 지수에 대한 계수 b 를 재료에 대한 마이어 계수(Meyer's coefficient)로 사용⁽⁴⁾하기 때문에 다항식의 형태 보다 재

료에 대한 표현⁽³⁾으로써 합당한 것으로 알려져 있다.

이동력함수는 앞에서 언급한 장점에도 불구하고 Fig.2 에서와 같이 종종 적절한 적합화가 이루어지지 않는다. 이러한 에러의 요인은 비선형 곡선 적합화 과정에서 계



(a) Experimental Data by Method 1



(b) Experimental Data by Method 2

Fig. 2 Comparison of curve fitting function

수 b 의 경우 해의 범위가 1~2사이에 존재⁽³⁾함이 알려져 있어 통제할 수 있으나, 계수 a 와 h_p 의 경우 δa 와 δh_p 값의 차이에 따라, 차이가 큰 경우 수렴 여부를 계산할 때 큰 쪽의 증분에 지배받기 때문이다. 이를 제어하기 위해서 두 변수에 대하여 변수 분해 후 각각의 임계 조건의 크기를 맞춘 결과 다음 (5)식의 제어 조건을 산출하였다. (5)식의 제어 조건을 사용한 경우 Fig. 2에서 살펴 보는 바와 적절한 적합화가 가능한 것을 알 수 있다.

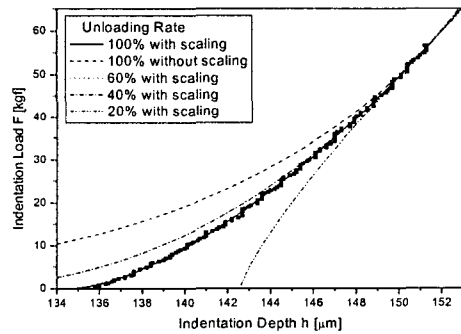
$$\ln(h-h_p) \approx 0.5 \quad (5)$$

4. 하중제하율과 적합화 함수

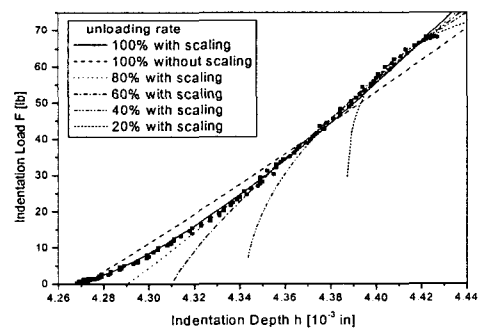
압입 시험 중 자동화 구형 압입 시험의 경우 30~40%의 하중 제하율을 사용하고 있다. 또한, 압입 시험후 제하 속도가 빠른 경우나 점탄성 재료의 경우 탄성 회복을 포함하는 최종 압입 깊이를 구할 수 없기 때문에 Fig. 3에 보여지는 바와 같이 하중 제하율에 따른 이동력함수를 사용한 적합화 곡선을 비교하여 보았다.

Fig. 3에서 Method 1의 (a)의 경우를 살펴보면, 압흔에 대한 이론을 만족시키기 위한 적절한 최종 압입 깊이를 얻기 위해서는 60%이상의 하중 제하율을 가져야 함을 확인할 수 있다. 그러나, 실험값을 얻은 Method 1의 시험기에서 30%의 하중 제하율을 주로 사용하여, 근거한 이론적 적용에 있어 오차가 발생할 것으로 생각된다.

Method 2의 (b)의 경우 80%의 하중 제하율의 경우에도 제어조건인 $1 \leq b \leq 2$ 을 만족하지 못하고 부적절한 적합화를 보여주고 있다. 이는 압입시험에서 하중 후 제하 전에 잔류영향을 제거하기 위한 하중 유지 시간에 의한 것이다.

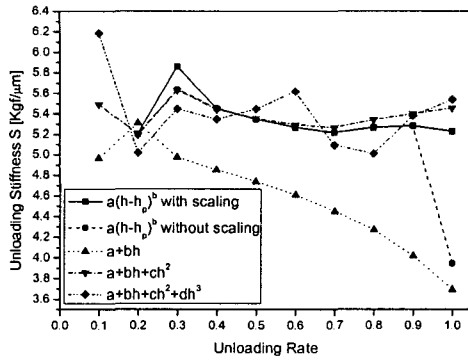


(a) Experimental Data by Method 1

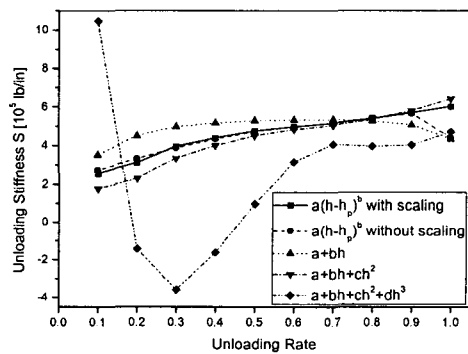


(b) Experimental Data by Method 2

Fig. 3 Comparison of fitting curve by unloading rate



(a) Experimental Data by Method



(b) Experimental Data by Method 2

Fig. 3 Comparison of unloading stiffness by unloading rate

5. 하중제하 강성률과 적합화 함수

하중제하 실험값을 적합화하는 목적은 하중제하 강성률을 구하는 데 있다. 그렇기 때문에 적합여부를 판정하기 위해서 하중제하 강성률을 살펴볼 필요가 있다. Fig. 4는 각 적합화 함수별로 하중제하율에 따른 하중제하 강성률을 살펴 본 것이다. Method 1의 (a)를 살펴보면 이동력함수가 하중제하율 60% 이후로 일정한 강성률 값을 보여주는 것을 확인할 수 있으며, Method 2의 (b)의 경우 하중제하율 80% 이하에서는 적합화가 적절하게 이루어지지 않았으나, 하중제하율은 보다 선형적 결과로 나타났다. 이는 멱함수의 특성에 의한 것이다. (a), (b)의 결과에서 하중제하율 100%에서 이동력함수에 의한 적합화를 사용한 경우 하중제하 강성률에 에러가 발생할 수 있음을 살펴 볼 수 있다. 반면에 본 연구에서 제안한 제어조건을 적용한 경우에 이에 대한 적절한 수정이 가능

함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 압입 시험의 하중제하 강성률을 구하기 위한 하중제하 적합화 함수로 이동력함수가 적절함을 확인하고 이동력함수의 사용으로 발생할 수 있는 에러에 대한 제어 조건을 제시하였다. 이를 이용하여 하중제하 강성률을 구한 결과 적절한 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 사업 과제에 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) D. Tabor, 1951, "The hardness of metals", Oxford university press, New York
- (2) I. N. Sneddon, 1965, "The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile", Int. J. Eng. Sci., Vol. 3, No. 1, pp. 47~57
- (3) W. C. Oliver and G. M. Pharr, 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
- (4) F. M. Haggag, 1993, "In-situ measurements of mechanical properties using novel automated ball indentation system", ASTM STP 1024, pp 27~44
- (5) KS 규격집, 2003, "금속재료의 계장화 압입시험 - 압입 인장 물성 평가", KSB0950
- (6) 안정훈, 최열, 권동일, 2000, "압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성 유동특성 평가", 대한 금속·재료학회지, Vol. 38, No. 12, pp 1606~1611
- (7) E. G. Herbert, G. M. Pharr, W. C. Oliver, B. N. Lucas, J. L. Hay, 2001, "On the measurement of stress-strain curves by spherical indentation", Thin Solid Films 398-399, pp 331~335
- (8) 이병섭, 이호진, 이봉상, 2003, "볼 압입 시험의 기하학적 조건과 유동 응력 곡선의 관계에 관한 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 12, No. 4, pp. 328~333