

연속압입시험법을 이용한 소재의 기계적 물성 평가기술 연구

Development of Evaluation Technology of Mechanical Properties Using Continuous Indentation Method

이정환, 옥명렬, 이윤희, 안정훈, 권동일
서울대학교 재료공학부

Jeong-Hwan Lee, Myoung-Ryul Ok, Yun-Hee Lee,
Jeong-Hoon Ahn and Dongil Kwon

Division of Materials Science and Engineering, Seoul National University

Abstract

Continuous indentation test is a very powerful method to monitor the materials reliability since it is very simple, easy and almost non-destructive. It can provide material properties such as elastic modulus, yield strength, work-hardening exponent, etc., than the conventional hardness test. In our study, the true stress-strain curve is derived from the indentation load-depth curve. For this, average indentation strain is defined and the flow stress is obtained from the analysis of the indentation stress field. The residual stress is analyzed from the variation of the indentation behavior with the applied residual stress. And the estimation of fracture characteristic is tried by considering the conventional fracture toughness modeling and the stress/strain state under the spherical indenter.

1. 서 론

발전용 설비 등은 주위환경에 의한 열화가 심하므로 경년열화에 대한 신뢰성 평가의 중요하다. 기존의 압입경도시험법은 간단 용이함으로 인해 재료의 기계적 물성 평가에 자주 사용되고 있으나, 시험후의 압흔의 관찰에만 의존함으로 다양한 기계적 물성 평가는 어려운 실정이다. 이러한 압입경도시험법을 응용·보완한 방법으로 연속압입 시험법(continuous indentation test)이 제안되었다^{1,2)}. 이 방법을 이용하면 압입하중-변위곡선의 분석과 압입응력장의 해석을 통하여 일축인장시험의

유동곡선을 연속압입시험만으로 예측할 수 있다³⁾. 또한 잔류응력에 의한 압입양상의 변화로부터 잔류응력을 분석 할 수 있었고, 압입변형의 구체적인 이해를 바탕으로 재료의 파괴인성을 모델링할 수 있었다. 따라서 이러한 비파괴적인 연속압입시험법은 구조용재료 뿐만 아니라, 경년열화된 소재, 미세조직이 급변하는 용접부의 기계적 물성을 평가하는 데 적용될 수 있다.

2. 본 론

2-1. 잔류응력-진변형률 곡선의 평가

압입하중의 연속적인 증가에 따른 재료의 변형 양상을 살펴보면, 구형압입자의 경우에는 하중의 증가에 따라 평균압력이 연속적으로 증가하는 양상을 보이게 된다^{4,5)}. 따라서, 구형 압입시는 재료의 변형양상 및 내부의 응력장 해석을 통한 변형률을 정의하고 평균압력에서 진응력을 계산함으로써 강도특성을 평가할 수 있다^{3,6)}.

하중인가시 측정되는 압입깊이는 탄성성분과 소성성분을 모두 포함하고, 하중제거후에는 탄성성분의 회복으로 소성성분이 남게 된다. 평균압력 및 압입변형률을 계산하는데 필요한 접촉반경(a)은 최대하중 및 하중제거시에 동일함을 가정함으로써, 소성깊이(h_p)로부터 계산할 수 있다^{1,7)}.

소성깊이는 비직선적인 하중제거곡선과 압입자 형태 보정항인 ω 를 사용하여 정의되었다. 최대하중(L_{max})에서의 외삽깊이(h_i)는 하중제거곡선을 power law fitting함으로써 결정된 함수를 최대하중에서의 미분함으로써 구한다.

$$h_p = h - \omega(h - h_i),$$

$$L = A(h - h_i)^m$$

h_{max} : 최대 압입깊이

구형 압입자에서 ω 는 0.75를 사용한다¹⁾. 위 식에서 정의된 소성깊이와 구형압입자 형태로부터 접촉반경을 계산할 수 있다¹⁾.

$$h_p = R - \sqrt{R^2 - a^2},$$

$$a = \sqrt{2Rh_p - h_p^2}$$

R: 압입자 반경

이같은 과정을 통하여 접촉반경을 구하고, 이것을 이용하여 평균압력과 평균변형률을 계산한다.

진응력-진변형률 곡선의 예측은 재료의 변형양상과 압입응력장의 해석으로 이루어진다. 압입시

재료의 변형률은 압입자에 대한 상대적인 위치에 따라 다르기 때문에 실험적으로 구한 관계식을 이용하여 접촉반경과 소성깊이의 항으로 표현되는 평균변형률(ϵ_r)로 나타낸다⁸⁾. α 는 실험상수로 0.4~0.45 정도의 값을 갖는다.

$$\epsilon_r = \alpha \frac{h_p}{a}$$

압입하중의 연속적 증가에 따른 변형양상은 평균압력 대 유동응력 비에 따라 크게 세 부분, 즉 탄성, 탄/소성, 완전소성영역으로 나눌 수 있으며⁸⁾, 소성영역의 성장양상과 관련 지을 수 있다. 탄성영역은 압입하중이 작아서 재료에 가역적인 변형이 존재하는 경우이고, 탄/소성영역은 재료내부에서 항복이 시작되어 소성역이 성장하는 과정이며, 각각의 영역에 적용되는 응력 해석을 바탕으로 평균압력 대 유동응력 비의 값을 결정할 수 있다. 압입하중은 특정하중 이상에 이르면 평균압력 대 유동응력 비가 일정하게 되며 이를 완전소성영역이라 부른다. 세 영역에서의 평균압력 대 유동응력 비의 값은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_f = \frac{P_m}{\phi}$$

$$\phi = \begin{cases} 1.08 & \text{초기항복} \\ \frac{2}{3} \left[1.4 + \ln \left(\frac{E_f}{\sigma_f} \epsilon_r \right) \right] & \text{탄/소성영역} \\ C & \text{완전소성영역} \end{cases}$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}$$

C: 재료의존상수 (2.8~3.1),

σ_f : 유동응력, E : 환산탄성계수,

E, E_i : 시편 및 압입자 각각의 탄성계수

ν, ν_i : 시편 및 압입자 각각의 Poisson 비

특정하중에 적용되는 평균압력 대 유동응력 비의 값을 결정하는 경계조건은 무차원변수인 $E_r \epsilon_r / \sigma_f$

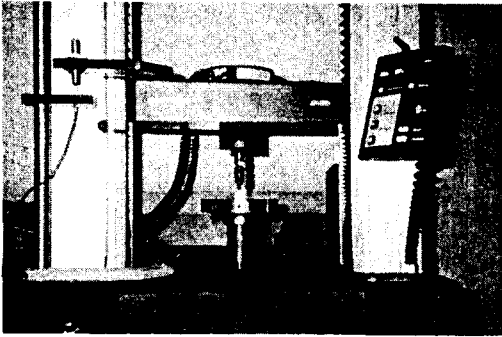


Fig. 1. Continuous indentation tester developed for laboratory test.

로 결정되며, 이 값을 이용하여 세 영역에서 구한 평균압력 대 유동응력 비의 사용가능한 범위를 결정할 수 있다.

연속압입시험을 위한 장비는 그림 1와 같이 Instron 5565를 개조하여 사용하였고, 시험재료는 304 스테인레스강, 순도 99.97%이상의 구리를 사용하였으며, 그림 2는 각각의 시편에 서로 다른 최대하중을 가하였을 때의 압입하중-변위곡선을 나타내고 있다. 이로부터 구한 진응력-진변형률 곡선과 일축인장시험으로 구한 곡선을 비교한 결과는 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 연속압입시험으로 유동곡선은 인장 유동곡선과 잘 일치함을 알 수 있었다.

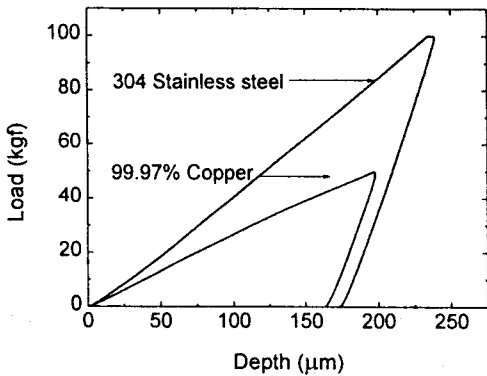


Fig. 2. Indentation load-depth curves for 304 stainless steel and 99.97% copper.

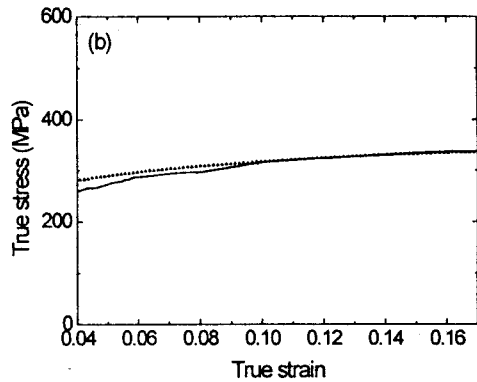
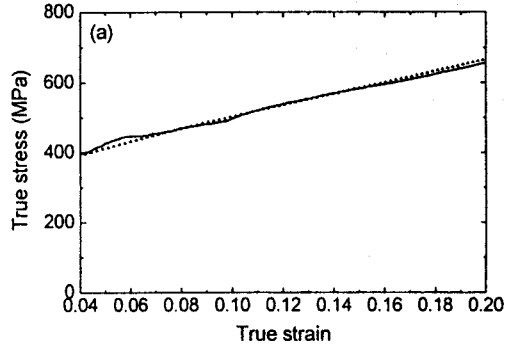


Fig. 3. Comparison between flow properties calculated from continuous indentation test and those from uniaxial tensile test for (a) 304 stainless steel and (b) 99.97% copper.

2-2. 잔류응력 평가

재료가 불균일한 변형을 받는 경우 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력은 균열을 유발하고 구조물의 부식을 촉진시키므로 대형구조물의 신뢰성에 영향을 주게 된다. 따라서 재료내의 잔류응력을 평가하는 기술의 개발은 중요한 문제로 대두되어 왔으며, x-선 회절⁹⁾ 등의 여러 방법이 시도되고 있으나 대부분 시편 채취에 있어서 파괴적인 방법에 의존하므로 사용중인 구조물이나 산업현장의 적용에는 한계가 있다. 이에 따라 비파괴적인 방법으로 잔류응력을 평가하는 방법의

필요성이 대두되었고, 비교적 간단하고 준비과파괴적인 압입경도시험으로 잔류응력을 정성적으로 평가¹⁰⁾하는 방법도 사용되었다. 이러한 압입경도시험법을 개량한 연속압입시험법을 이용하면 압입하중-변위곡선의 분석을 통하여 경도값이외의 여러 다른 인자들을 통하여 잔류응력을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

재료내에 존재하는 잔류응력이 압입응력장과 중첩되면 재료의 변형기동이 달라지게 된다. 즉 인장 잔류응력이 존재하면 압입에 의한 재료의 변형이 보다 용이해 지고, 압축 잔류응력이 존재할 경우 변형이 구속됨에 따라 압입하중-변위곡선 상에 여러 가지 변화가 나타나게 된다. 즉 잔류응력에 의해 압입하중이 동일하더라도 최대압입깊이(h_{max})가 달라지게 된다. 이러한 압입하중-변위곡선의 변화를 분석하기 위해 시편에 인위적으로 정량화된 잔류응력을 형성시켰고, 여기에 압입시험을 함으로써 잔류응력의 영향과 영향에 민감한 새로운 인자들을 찾아내었다. 빔 형태로 가공한 TMCP강에 응력제거 열처리를 한 다음 굽힘을 이용하여 시편내의 위치에 따른 다양한 크기의 잔류응력 상태를 유발하였고, 여기에 압입시험을 행하였다. 그림 4는 최대하중 15kgf에서의 압입하중

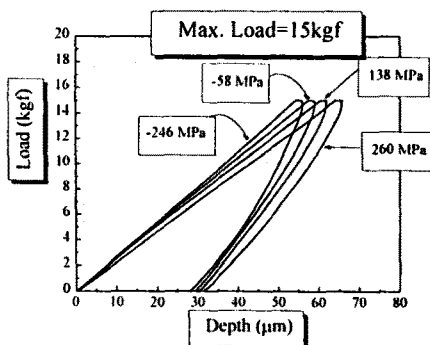
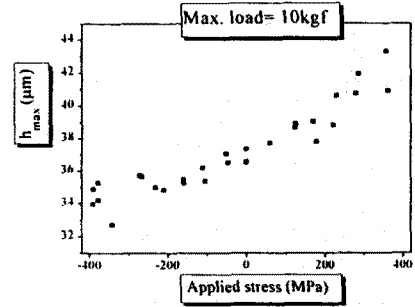
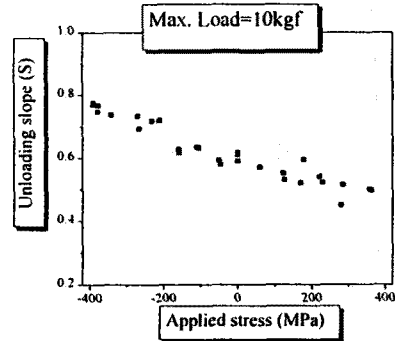


Fig. 4. Change of indentation load-depth curve by applied residual stress



(a)



(b)

Fig. 5. Variation of (a) h_{max} and (b) unloading slope (S) with applied residual stress

-변위곡선의 변화물, 그림 5는 10kgf에서의 최대 압입깊이(h_{max})와 하중제거곡선 기울기(S)를 나타 낸 것이다. 최대압입깊이와 하중제거곡선 기울기는 잔류응력의 변화에 따라 뚜렷한 변화양상을 나타내었으며 잔류응력 평가의 척도가 될 수 있을 것으로 기대된다. 이에 따라 이들 인자들과 잔류응력 사이의 정량적인 관계를 유도해 내는 데에 앞으로의 연구의 초점이 모아지고 있다.

2-3. 파괴인성 평가

연성재료를 압입할 경우 재료는 주로 변형기동만을 나타낸다. 그러나 변형상황에서 파괴가 유발되는 임계점을 표시하는 인자를 결정하고 이것과 파괴인성간의 관계를 모델링함으로써 파괴인성을 결정할 수 있다.

우선 균열주위의 응력상태가 특정거리에 걸쳐 파괴응력 이상에 도달하면 파괴가 일어난다는 개념(critical fracture strain condition)이 있다¹¹⁾. 이 경우에는 압입에 의한 시편 내부의 응력상태에 대한 정확한 이해가 필요하므로, 재료가 좀 더 탄성적인 성질을 갖는 연성-취성 천이온도 이하에 적용하고 있다. 이러한 응력해석과 함께 소규모 항복조건을 사용함으로써 재료의 파괴인성과 관련된 식이 얻어지게 된다. 그러나 정확히 살펴보자면 압입자 하부에 비선형적인 소성역이 발생하기 때문에 이론적인 응력상태의 분석은 곤란하다.

구형 압입시험에 임계 파괴응력 조건을 사용한 최근의 접근¹²⁾에서는 유한요소방법(FEM)을 이용하여 재료의 압입응력장을 해석하였다. 이로부터 파괴응력 크기를 결정하고, 이것과 파괴에 사용된 압입에너지의 관계를 결정함으로써 재료의 파괴인성을 평가하였다.

이와 달리 균열주위의 변형률이 특정거리에 걸쳐 파괴변형률 이상에 도달하면 파괴가 일어난다는 개념(critical fracture strain condition)이 있다¹¹⁾. 파괴변형률과 소규모항복조건을 사용함으로써 파괴인성을 모델링할 수 있다. 임계 파괴변형률 조건을 압입시험에 적용키위해서는 압입변형률에 대한 명확한 정의가 필요하다. 기존에 사용된 평균 압입변형률은 Tabor 등이 제안하였으며, 압입자 크기와 압입정도의 함수로 되어있다. 그러나 위에서 언급된 인장물성을 얻는데 사용된 개량압입변형률에서 보는 것과 같이 아직 논란의 여지가 있다. 압입변형률의 정의와 함께 구형 압입상황에서의 가상 파괴조건을 결정하거나, 압입변형과 파괴와의 관계를 모델링함으로써 파괴인성식을 유도할 수 있다.

구형 압입시험에 임계 파괴변형률 조건을 사용한 최근의 접근¹³⁾에서는 일축인장에서 얻어지는 파괴변형률과 구형압입시험에서 얻어지는 가공경화지수의 관계를 분석함으로써 파괴인성을 평가하였다. 즉, 파괴인성과 파괴변형률의 관계를 나타낸 임계 파괴변형률 조건식에 존재하는 파괴변형률 항을 압입시험의 가공경화 지수로 대체한 것이다.

기존의 파괴관련 모델링들을 검증하고, 구형 압입에서의 변형률분포에 대한 명확한 이해를 바탕으로 압입시의 파괴조건을 설명할 수 있고, 최종적으로는 적절한 구형 압입시험을 통한 연성재료의 파괴인성을 평가하는 식을 제안할 수 있다.

4. 결 론

연속압입시험을 행하여 얻어지는 압입하중-변위곡선 및 재료의 변형양상을 분석하여 재료의 여러 가지 기계적물성을 평가하였으며, 또한 평가를 위한 시도가 행해지고 있다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- 강도특성(진응력-진변형률 곡선, 가공경화수, 탄성계수 등)
- 잔류응력
- 파괴인성(임계 파괴변형률, 임계 파괴응력)

이상의 기계적물성 평가를 위한 기법을 바탕으로 경년열화된 소재, 특히 국부물성 평가에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 궁극적으로는 이상의 물성 평가기법을 현장적용을 목적으로 하고 있으므로, 소형화 및 이동성을 확보한 연속압입시험기의 개발을 위한 연구가 진행중에 있다.

참고문헌

1. W. C. Oliver and G. M. Pharr: J. Mater.

- Res., 7 (1992) 1564
2. D. L. Joslin and W. C. Oliver: *J. Mater. Res.*, 5 (1990) 123
 3. F. M. Haggag, H. Wong, D. J. Alexander and R. K. Nanstad: *Recent Trends in Welding Science and Technology TWR'89* ASM, (1990) 843
 4. B. R. Lawn and R. Wilshaw: *J. Mater. Sci.*, 10 (1975) 1049
 5. J. S. Field and M. V. Swain: *J. Mater. Res.*, 8 (1993) 297
 6. D. Tabor: *Hardness of Metals*, Clarendon, Oxford (1951) 73
 7. M. F. Doerner and W. D. Nix: *J. Mater. Res.*, 1 (1986) 601
 8. H. A. Francis: *J. Eng. Mater. Technol.*, *Trans. ASME*, 98 (1976) 272
 9. B. D. Cullity: *Elements of X-Ray Diffraction*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, (1978)
 10. W. R. LaFontaine, C. A. Paszkiet, M. A. Korhonen and C.-Y. Li: *J. Mater. Res.*, 6 (1991) 2084
 11. R. O. Ritchie, W. L. Server and R. A. Wullaert: *Metall. Trans A*, 10A (1979) 1557
 12. 변택상, 김진원, 홍준화: 제 11회 재료강도심포지엄 논문집 (1997) 467
 13. F. M. Haggag: *ASTM STP 1204* (1993) 27