

소재의 안전진단을 위한 비파괴 압입 및 소형편치 시험법 연구

옥명렬, 주장복, 이정환, 안정훈, 남승훈*, 이해무*, 권동일
서울대학교 재료공학부, 한국표준과학연구원 방재기술센터*

A Study of Non-destructive Indentation and Small Punch Tests for Monitoring Materials Reliability

Myoung-Ryul Ok, Jang-Bog Ju, Jeong-Hwan Lee, Jeong-Hoon Ahn,
Seung Hoon Nahm*, Hae-Moo Lee* and Dongil Kwon
Division of Materials Science and Engineering, Seoul National University,
Seoul 151-742
Failure Prevention Center, Korea Research Institute of Standards and Science,
Taejeon 305-600*

ABSTRACT

Indentation and small punch tests are very powerful methods to monitor the materials reliability since they are very simple, easy and almost non-destructive. First, recently-developed continuous indentation test can provide the more material properties such as hardness, elastic modulus, yield strength, work-hardening exponent, etc., than the conventional hardness test. In our study, the true stress-strain curve was derived from the indentation load-depth curve for spherical indentation. In detail, the strain was able to be obtained from plastic depth/contact radius ratio, and the flow stress was from mean contact pressure through the analysis of elastic-plastic indentation stress field. Secondly, the small punch test was studied to evaluate the fracture toughness and defomation properties such as elastic modulus and yield strength. Like the indentation test, this test can be applied without severe damage of the target structure.

1. 서 론

소재의 기계적 물성을 평가하기 위한 방법으로 기존의 보편적인 방법인 일축인장시험법이 많이 이용되어 왔다. 그러나, 일축인장시험의 경우 시편의 준비과정이 복잡하고 시험 방법이 파괴적이어서, 가스저장용 탱크와 같이 사용중에 있어서 경년열화가 일어나는 경우, 또는 시편두께가 얇아 시편채취가 어려운 경우에는 적용하기에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 국소부위의 시험이 가능한 비파괴 연속압입시험법이나 소형편치시험법을 이용할 수 있다[1,2].

연속압입시험법은 기존의 압입경도시험법과는 달리 압입하중에 따른 깊이 변화를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위 곡선을 얻은 후, 이 곡선의 분석과 압입하중에 따른 탄/소성응력장의 정량적 해석을 통해서 재료의 기계적 물성을 평가하고 있다. 따라서 압입시 재료가 나타내는 탄소성 전반에 대한 정보를 제공하게 되므로, 재료의 경도값은 물론 탄성계수, 항복강도, 가공경화지수 등의 다양한 물성을 측정할 수 있다[3]. 이외에도 압입균열이 발생할 경우 취성재료의 파괴인성을 평가할 수 있고, 일정한 하중에서의 압입깊이 변화를 측정함으로써 압입 creep 현상을 분석할 수 있다[4].

소형편치시험법은 미국이나 일본에서 원자로용 압력용기의 입자선 조사손상 평가 및 노벽재료 개발을 위해 도입, 연구되어져 왔다. 이 방법은 실제 현장에서 쓰이고 있는 부품에 있어 그 강도에 영향을 주지 않을 정도의 작은 영역에서도 시험편의 채취가 가능하여 비교적 비파괴적인 방법으로 재료의 기계적 물성을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 소형편치 시험을 통하여 하중-변위 곡선을 얻을 수 있고, 이를 통하여 탄성계수, 항복강도, 연신율 등을 구할 수 있다[2]. 또, 하중인가시의 최대하중에서 시험편의 두께변화로부터 파괴변형률을 구하여 재료의 파괴인성도 평가하고 있다. 하지만, 실제로는 최대하중이전에 파괴가 시작되므로 정확한 국부적인 파괴변형률을 얻을 수 없는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 연속압입시험법을 이용하여 압입하중-변위곡선을 얻고, 이 곡선의 해석 및 압입응력장의 해석을 바탕으로 일축인장시험에서 얻을 수 있는 진응력-진변형률 곡선을 얻고자 한다. 또, 소형편치시험법을 이용하여 파괴변형률을 구하고 이를 이용하여 파괴인성을 구하는 방법을 소개하고자 한다. 궁극적으로는 소재의 신뢰성 평가에 필요한 기계적 물성을 비파괴적 방법인 연속압입시험법과 소형편치 시험법을 이용하여 구하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 연속압입시험법을 이용한 강도특성 평가

연속압입시험

소재의 국부물성 평가방법으로 제시된 연속압입시험은 하중의 연속적인 인가와 제거에 따른 변위를 연속적으로 측정하는 시험법을 말한다. 이로부터 얻어진 압입하중-변위곡선 분석과 압입응력장의 해석으로부터 다양한 기계적 물성을 평

가할 수 있다.

압입하중의 연속적인 증가에 따른 재료의 변형양상을 살펴보면, Vickers 압입자의 경우에는 압입시 모든 하중에서 재료는 일정한 변형률을 나타내고, 평균압력(하중/면적)이 일정한 것에 비해 구형압입자는 하중의 증가에 따라 평균압력이 연속적으로 증가하는 양상을 보이게 된다[5,6]. 따라서, 구형 압입자의 경우 재료의 변형양상 및 재료 내부의 응력장 해석을 통해 변형률을 정의하고, 평균압력으로부터 진응력을 계산함으로써 강도특성을 평가할 수 있다[3].

압입하중-변위곡선 해석

연속압입시험으로 구하는 압입하중(L)-변위(h)곡선은 그림 1로 나타내어지며, 이 때 변위는 압입깊이를 나타낸다.

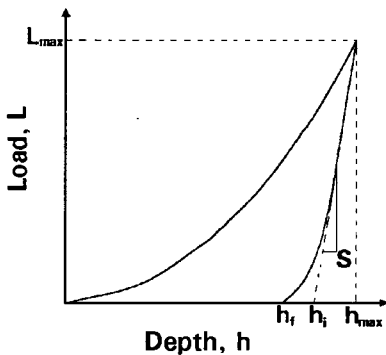


Fig. 1. A schematic representation of indentation load-depth curve.

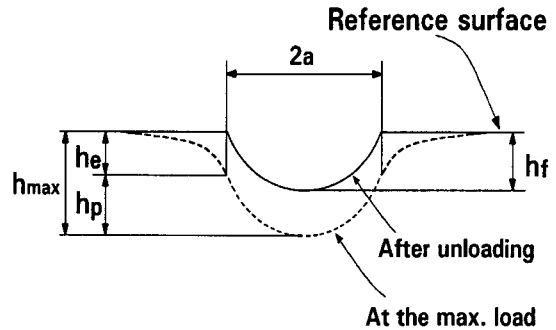


Fig. 2. A schematic diagram of a cross-section view at the maximum load and after unloading.

이 시험에 의한 최대하중에서와 하중제거 후 재료의 변형양상은 그림 2에 도식적으로 나타내었다. 압입에 따른 재료의 변형양상은 하중인가시에는 탄/소성 반응을 나타내게 되고, 하중제거시에는 탄성반응을 보이게 된다. 따라서 하중인가시 측정되는 압입깊이는 탄성성분과 소성성분을 모두 포함하고, 하중제거시에는 탄성성분만이 회복되므로 하중제거 후에는 소성성분이 남게 된다. 그림 2에서 평균압력 및 변형률을 계산하는데 중요한 접촉반경(a)은 최대하중에서와 하중제거시 재료의 접촉반경이 같음을 가정함으로써, 소성깊이(h_p)로부터 계산할 수 있다.

이때 소성깊이의 계산은 실험적으로는 직접 측정이 불가능하므로 재료의 변형양상 및 압입자의 기하학적인 형태를 분석하여 구할 수 있다. 한 예로 소성깊이를 압입하중 제거 후의 잔류깊이(h_r)로 나타내었다[7]. 그러나, 잔류깊이는 압입하중 제거시 발생하는 압입자 주위의 탄성회복의 차이로 인해 실제 최대하중에서의 소성깊이와는 차이가 있다[1]. 한편, Doerner와 Nix에 의해 최대하중에서의 소성깊이를 이론적으로 구하기 위한 방법이 제안되었다[8]. 이 방법은 압입 후 초기 하중제거곡선이 직선임을 가정하여 $L=0$ 까지 외삽한 경우에 얻어지는 깊이(h_i)를 소성깊이로 정의하였으나, 압입자가 flat punch가 아니고, 초기 하중제거곡

선이 직선이 아니므로 이에 대한 보정이 필요하다.

Flat punch외의 다양한 압입자 형태를 보정하기 위해서 ω 라는 보정인자를 도입하여[1] 소성깊이를 정의하고자 한다. 아울러 하중제거곡선이 직선이 아니므로, 최대하중(L_{max})에서 외삽한 깊이(h_i)는 하중제거곡선을 power law fitting을 행하여 아래 정의한 식의 A, m을 결정하고, 최대하중에서의 미분값으로써 계산할 수 있다.

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

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

$$S = \left. \frac{dL}{dh} \right|_{h_{max}}$$

h_{max} : 최대 압입깊이, S: 초기 하중제거곡선 기울기

ω 는 구형 압입자의 경우는 0.75를 사용하고, 원뿔 압입자는 0.72를 사용한다. $\omega=1$ 인 경우는 flat punch의 탄성회복을 가정하여 구한 h_i 와 같게 됨을 알 수 있다. 위 식에서 보정한 소성깊이로부터 압입자가 구형이라는 기하학적인 모양을 이용하여 접촉반경을 계산할 수 있다[1].

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

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

R: 압입자 반경

이와같이 계산함으로써 실제 접촉반경을 구할 수 있으며, 이를 이용하여 평균 압력을 구하고, 또한 평균변형률을 계산하는데 이용할 수 있다.

진응력-진변형률 곡선 예측

압입시 재료의 변형률은 재료 내부의 위치에 따라 다르기 때문에 실험적으로 구한 관계식을 이용하여 평균변형률(ϵ_r)로 나타낼 수 있다. 기존의 연구에 있어서는 실험식 a/R 를 사용하고 있으나[9,10], 본 연구에서는 일축인장시험에서 구한 변형률을 연속압입시험으로 보다 잘 묘사하기 위해서 접촉반경과 소성깊이를 이용하여 나타내고 있다[8].

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

α 는 실험상수로서 재료에 따라서 0.4~0.45 정도의 값을 갖는다.

압입하중의 연속적 증가에 따른 재료의 변형양상은 평균압력 대 유동응력 비의 관계에 따라 크게 세 부분, 즉 탄성영역, 탄/소성영역, 완전소성영역으로 나눌 수 있으며[11], 재료 내부의 소성영역의 성장양상과 관련 지을 수 있다. 탄성영역은 압입하중이 작아서 재료 내부에 가역적인 변형이 존재하는 경우를 말하며, 탄/소성영역은 재료내부에서 항복이 시작된 후, 재료 내부는 압입자 아래의 소성영역과 이를 둘러싼 탄성영역으로 나누어지게 되며, 각각의 영역에 적용되는 응력 해석을 바탕으로 평균압력 대 유동응력 비의 값을 결정할 수 있다. 하중이 증가

함에 따라 특정하중이상에서는 평균압력 대 유동응력 비가 일정하게 되는 영역이 나타나는데 이를 완전소성영역이라 부른다. 세 영역에서의 평균압력 대 유동응력 비의 값은 다음과 같이 표현된다.

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

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

E_r : 환산탄성계수, C : 재료의존 상수 (2.8~3.1), σ_f : 유동응력

E, E_i : 시편 및 압입자 각각의 탄성계수

ν, ν_i : 시편 및 압입자 각각의 Poisson 비

특정하중에서 적용되는 평균압력 대 유동응력 비의 값을 결정하기 위해서 경계조건의 결정이 필요하다. 탄성영역과 탄/소성영역의 경계는 초기항복시와 탄/소성영역에서 구한 평균압력 대 유동응력 비의 값이 같아지는 점을 이용하여 구할 수 있으며, 같은 방법으로 탄/소성영역과 완전소성영역의 경계를 결정할 수 있다. 이상에서 구한 경계는 무차원 변수인 $E_r \epsilon_r / \sigma_f$ 로 결정되며, 이 값을 이용하여 세 영역에서 구한 평균압력 대 유동응력 비의 사용가능한 범위를 결정할 수 있다.

연속압입시험을 위한 장비는 그림 3와 같이 기존의 Instron 5565를 개조하였으며, 크게 하중을 연속적으로 인가하기 위한 load cell과 변위측정을 위한 LVDT (linear variable displacement transducer)로 이루어져 있다. 연속압입시험은 AISI 304 스테인레스강, 9% Ni 강을 가지고 행하였으며, 이로부터 얻어진 실험결과는 그림 4와 같으며, 이 곡선으로 계산된 얻어진 진응력-진변형률 곡선은 그림 5에서 일축인장시험에서 구한 유동곡선과 비교하여 나타내었다. 그림 5에서 보면 유동곡선이 대체로 잘 일치함을 관찰할 수 있다.

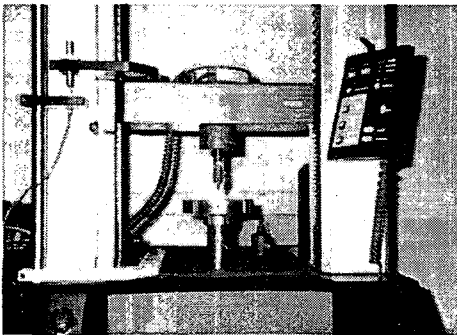


Fig. 3. Continuous indentation tester developed for laboratory test.

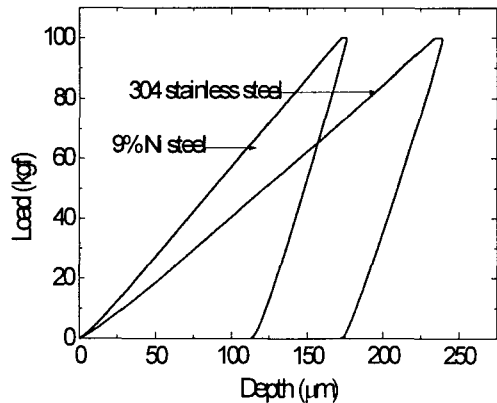


Fig. 4. Indentation load-depth curves for 304 stainless steel and 9% Ni steel.

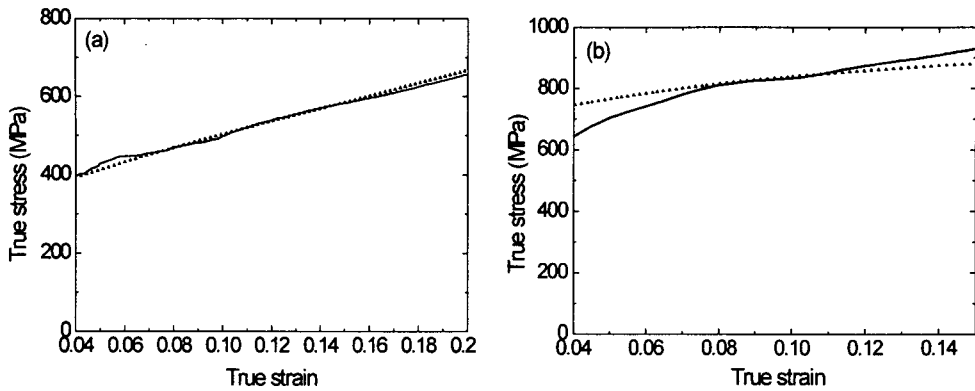


Fig. 5. Comparison between flow properties calculated from continuous indentation test and those obtained from uniaxial tensile test for (a) 304 stainless steel and (b) 9% Ni steel (\blacktriangle : data of uniaxial tensile test, —: data of continuous indentation test).

3. 소형편치시험을 이용한 파괴인성 평가

소형편치시험

최근의 고기능성 재료의 요구로 인해 여러 재료의 복합 또는 이종재료의 접합기술이 발달하였고, 재료의 사용환경도 초고온이나 LNG 탱크와 같은 저온 및 활성적인 분위기로 열악해졌다. 이에 따라 접합부나 계면부와 같은 제조중에 발생한 국소 취약부의 사용시간에 따른 열화 및 최종 파괴로 인해, 이부분의 물성 평가가 시급해졌다.

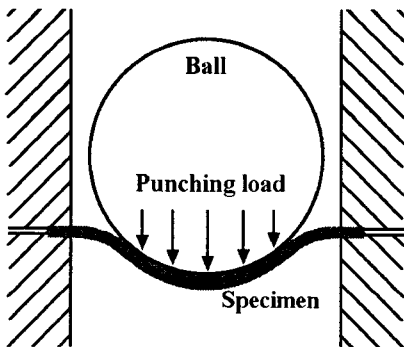


Fig. 6. Schematic diagram of small punch test.

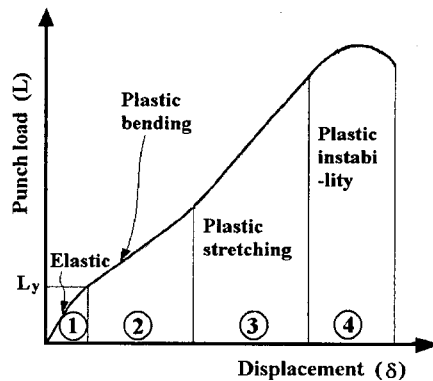


Fig. 7. Load-displacement curve of small punch test.

한편 기존의 시험법으로는 국소영역의 물성을 적절히 평가할 수 없으므로 인해 소형시편을 이용하는 시험법이 필요하게 되었다. 소형시편을 이용하는 파괴인성 측정법으로는 미국이나 일본 등에서 원자로용 압력용기강의 방사선 조사 손상의 평가를 위해 연구되어온 소형편치시험법이 있다.

이 방법은 구조설비의 강도에 영향을 주지 않을 정도인 0.5mm 정도의 박판을 채취하고[2], 그림 6과 같은 구형의 볼로 시편에 하중을 가하여 이때의 변형 및 파괴거동을 그림 7의 하중-변위곡선으로 구하게 된다[11]. 그림 7을 살펴보면 일반 연성재료는 탄성급힘-소성급힘-소성막 신장-소성 불안정의 4단계 변형거동을 나타낸다. 재료의 소성막 신장영역에서는 볼주위에서 불균일한 소성변형으로 잘록한 부분(necking)이 발생하고, 네킹된 부분에서 연성균열이 발생하여 성장함으로써 최종파괴가 일어난다.

기존 연구

소형편치시험을 통한 기존의 연구로는 하중-변위 곡선의 시험온도에 따른 양상변화로부터 연성-취성 천이온도를 구하거나 파괴양상의 관찰을 통하여 파괴인성을 구하는 것이 있다. 취성영역에서 재료는 탄성급힘영역에서 파괴가 일어나며 연성영역에서 재료는 소성변형이 크게 일어난 이후 파괴를 유발한다. 결국 하중-변위 곡선의 하부면적이 시험온도에 따라 달라지고, 이 크기의 온도에 따른 변화에서 기존의 충격시험을 대치하는 천이거동을 얻을 수 있다[12].

소형편치시험을 통한 재료의 파괴인성을 평가하는 연구는 연성균열 침단의 응력장 분석이 복잡하여, 균열침단의 시편두께 변화로 파괴등가변형률을 구하고, 이 값과 파괴인성사이의 실험적인 관계식을 구하였다[13].

새로운 연구동향

기존의 연성재료에 대한 파괴역학시험법의 개념과 관련지어 볼 때 파괴인성의 측정은 균열의 발생시점에서 구해져야 한다. 따라서 하중-변위곡선에서 정확한 파괴시작시점을 찾는 것이 필요하다.

이를 위해서 초기 소성이나 균열시작 시점에서 신호의 큰 변화를 나타내는 비파괴적인 A.E.(acoustic emission) 검출기를 이용한다. 이 검출기의 원리는 재료 내부에 축적된 탄성에너지가 음향으로 방출되는 것을 관찰함으로써 재료의 변형이나 파괴상황을 감지하는 것이다. 이렇게 확인된 파괴시작시점에서 수정된 파괴등가변형률을 구함으로써 기존의 파괴시작시점이 최대하중이라고 가정한 경우에 구해진 파괴등가변형률보다 보다 합리적인 값을 얻을 수 있다. 또 파괴시작 시점까지 축적된 소형편치 에너지

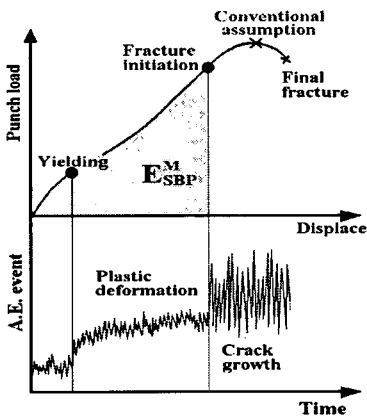


Fig. 8. Acoustic emission events during small punching

지를 계산하여 파괴균열 침단의 에너지와 이를 분석함으로써 응력과 변형률의 관계를 구함으로써 직접적으로 재료의 파괴인성을 구할 수 있다.

4. 결론 및 요약

앞에서 설명된 연속압입시험법과 소형편치시험법은 기존의 시험법에 비해 미소한 시편을 이용한다는 장점을 가지고 있다. 이 장점을 이용하여 가동중인 구조설비재에 영향을 주지 않는 범위내에서 충분히 시편을 채취할 수 있고, 또 시험방법 역시 거의 비파괴적이므로 완제품의 물성평가에도 적용할 수 있다. 그러나 이러한 시험에서 얻어지는 결과의 분석을 통한 기계적 물성을 평가하는 연구는 아직까지 미흡한 편이며, 본 연구에서는 연속압입시험법을 통하여 재료의 인장물성을 구하는 연구와 소형편치시험을 통한 파괴인성의 평가기법을 확립하고자 하였다. 우선 연속압입시험을 통한 인장 유동곡선의 예측을 위하여 구형압입에 따르는 변형률과 이 때의 압입응력장을 분석하였다. 또 소형 편치시험을 통한 파괴인성의 평가를 위하여 비파괴적인 장비의 부착과 연성균열 침단의 미세역학적 분석을 고려하였다. 이상의 연구를 통하여 기계적 물성평가 기법이 확립되면 좀더 나아가 이동식 소형시험기의 제작을 통하여 작업현장에서 직접 시험을 행할 수도 있다.

참고 문헌

1. W. C. Oliver and G. M. Pharr: J. Mater. Res., **7** 1564 (1992)
2. G. E. Lucas: Metall. Trans. A, **21A** 1105 (1990)
3. F. M. Haggag, H. Wong, D. J. Alexander and R. K. Nanstad: *Recent Trends in Welding Science and Technology* TWR'89 ASM, 843 (1990)
4. G. R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn and D. B. Marshall: J. Am. Ceram. Soc., **64** 533 (1981)
5. B. R. Lawn and R. Wilshaw: J. Mater. Sci., **10** 1049 (1975)
6. J. S. Field and M. V. Swain: J. Mater. Res., **8** 297 (1993)
7. Y. Tirupataiah and G. Sundararajan: Mater. Sci. Eng., **91** 169 (1987)
8. M. F. Doerner and W. D. Nix: J. Mater. Res., **1** 601 (1986)
9. D. Tabor: *Hardness of Metals*, Clarendon, Oxford 73 (1951)
10. S. P. Baker: Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **308** 209 (1993)
11. H. A. Francis: J. Eng. Mater. Technol., Trans. ASME, **98** 272 (1976)
12. H. Li, F. C. Chen and A. J. Ardell: Metall. Trans. A, **22A** 206 (1991)
13. X. Mao, T. Shoji and H. Takahashi: J. Test. and Eval., **15** 30 (1987)
14. J. Baik, J. Kameda and O. Buck: Scripta Metall., **17** 1443 (1983)