

# 압입시험 기법을 이용한 인장물성 평가

김성훈 · 안정훈 · 최열\* · 전은채 · 권동일

서울대학교 재료공학부 · \*(주)프론틱스

## 1. 서론

현재 재료의 기계적 특성을 평가하기 위한 가장 표준화된 방법은 일축인장시험이다. 일축인장시험은 다양한 기계적 물성을 제공하나, 일정 크기 이상의 시편을 요구하므로 실제 산업현장에서 사용되고 있는 구조물의 안전성 평가에 이용하기 어렵다. 이러한 단점을 개선할 수 있는 시험법으로 최신압입시험법이 제안되었다. 최신압입시험법은 기존의 압입시험법을 개량하여 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 연속적으로 측정하여 얻어지는 압입하중-변위곡선을 분석하여 경도값 이외에도 일축인장시험을 통해 얻을 수 있는 다양한 물성을 구하는 시험방법이다. 시편크기에 대한 제한이 없으며, 비파괴적이고, 기기의 소형화가 가능하므로 현장적용성이 매우 뛰어나다. 그러나 압입자 하부의 복잡한 응력장과 여러 실험변수들에 대한 연구가 미진하여 현재 표준화가 이루어져 있지 않아, 본 연구실에서는 압입응력장, 실험변수에 대해 연구하였으며, 다양한 기계적 물성 평가기법을 개발중이다.

본 연구에서는 최신압입시험기를 사용하여 얻어진 하중-변위곡선을 이용하여 다양한 장의 유동곡선과 가공경화지수를 유도하였다.

## 2. 이론적 해석

### 압입하중-변위곡선의 해석

최신압입시험기를 통해 얻을 수 있는 압입하중-변위곡선은 그림 1(a)와 같으며, 일반적으로는 다중압입 시험방식을 이용하여 그림 1(b)와 같은 곡선을 얻게 된다. 보통 압입깊이는 변위측정센서로 측정된 압입자의 이동거리로 구하게 되는데, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변 재료의 탄성, 소성 변형에 의해 측정된 압입깊이와 달라지게 된다.

압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 재료의

탄성회복에 해당되는 압입하중제거곡선의 초기 접선의 기울기인 S값을 이용하여 구하게 된다. 그림 1(a)에서의 S는 재료의 stiffness에 해당되며, 탄성변형을 고려한 접촉깊이  $h_c^*$ 는 다음과 같이 구할 수 있다[1].

$$h_c^* = h_{\max} - \omega \frac{L}{S} \quad (1)$$

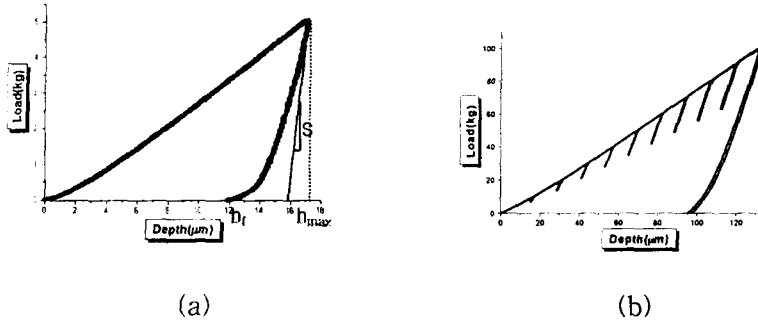


Fig. 1. The load-depth curves obtained from Advanced Indentation System developed by FRONTICS.

L은 압입하중이며,  $\omega$ 는 압입자의 기하학적 형태에 관련된 상수로 flat punch의 경우에는 1, 구형압입자의 경우에는 0.75 그리고 Vickers 압입자의 경우에는 0.72이다.

한편 압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 그림 2와 같이 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 현상이나, 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in 현상이 발생한다 [2].

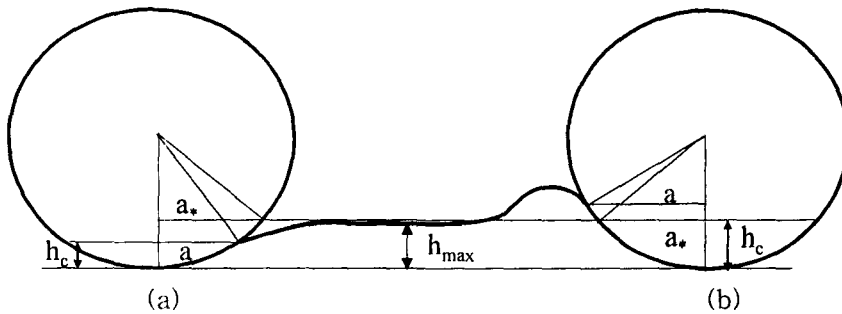


Fig. 2. The (a) sink-in and (b) pile-up phenomena.

이때 pile-up/sink-in 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 다음과 같이 나타난다[3].

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

여기서  $n$ 은 재료의 가공경화지수,  $R$ 은 압입자 반경,  $a$ 는 접촉반경이며, 식(2)를 통해 얻어진 접촉반경에서 기하학적인 관계를 이용하여 실제 접촉깊이인  $h_c$ 를 구하게 된다.

### 유동곡선의 유도

일축인장시험을 통해 얻어지는 인장곡선의 항복이후의 영역에서 진응력과 진변형률은 일반적으로 다음과 같은 관계를 갖는다[4].

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (3)$$

( $\sigma$ : 진응력,  $K$ : 응력계수,  $\epsilon$ : 진변형률)

구형압입자를 이용한 압입시험에서의 변형률은 재료의 깊이방향으로의 변위를 기하학적인 관계를 이용하여 구한 후 미분하여 얻어지는 변형률 값 중 최대값에 적합화 상수( $\alpha$ , 일반적으로 0.1)를 적용함으로써 식 (4)와 같이 접촉반경과 접촉깊이의 항으로 나타난다.

$$\epsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (4)$$

다음으로 압입자 하부의 응력은 압입하중과 접촉면적의 비인 평균압력( $P_m$ )과 일정한 관계를 가지고 있는데, 일반적인 인가하중인 kgf 이상의 하중에서는 일정한 상수비( $\psi$ , 일반적으로 3)를 가지며, 이 상수는 압입시험을 통해 결정된다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \quad (5)$$

그림 1(b)와 같이 다중하중제거 시험방식을 통해 얻어진 압입하중-변위곡선에서 각 하중제거곡선을 이용하여 접촉깊이와 접촉반경을 결정하고, 이를 통해 진응력과 진변형률을 구하게 된다.

### 3. 실험방법

압입하중-변위곡선으로부터 유동특성을 유도하기 위한 연구에서는 구조용강인 TMCP, SM50, SA508, SA213, SA106 및 AISI1025를 사용하였다. 연속압입시험은 20×20×15mm 정도로 제조하였고, 인장시험편은 표점 길이 25mm의 ASTM 규격을 따랐다.

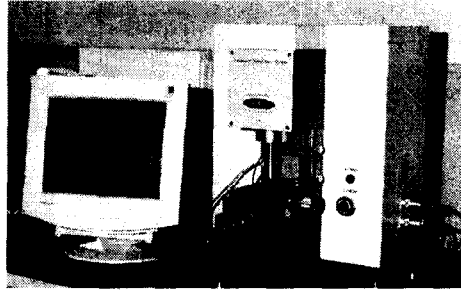
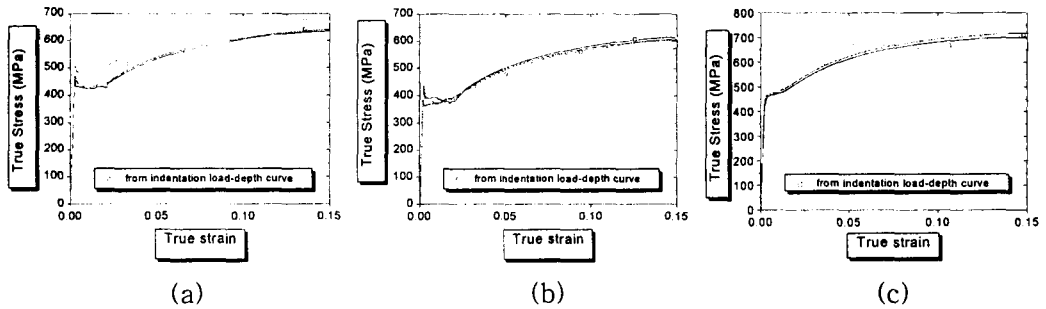


Fig. 3. The Advanced Indentation System developed by FRONTICS.

최신압입시험기는 (주)프론틱스 사에서 제작한 최신압입시험기를 사용하여 실험을 수행하였다(그림 3). 최대하중 300kgf인 load cell과  $0.2\mu\text{m}$ 의 분해능을 가진 변위센서를 이용하여 제작하였으며, 시스템의 compliance에 의한 오차를 최소화하기 위하여 압입자와 LVDT를 최대한 가깝게 하였다. 압입자는 반경 0.5mm의 W ball을 사용하였다. 압입속도는 분당 0.1mm로 하였으며, 압입시험방법은 10번의 부분하중제거를 통한 다중인가방식을 채택하였으며, 이때 하중 제거정도는 각 단계에서 최대하중의 70%까지 하였다. 한편, 일축인장시험의 경우에는 Instron 5582를 이용하였으며, cross-head 속도는 1mm/min로 하여 실험을 하였다. 압입시험의 경우에는 각 시편에 대해 5회 실시하였으며, 편차가 적은 일축인장시험의 경우에는 3회 실시하여 결과를 얻었다.

#### 4. 실험결과 및 토의



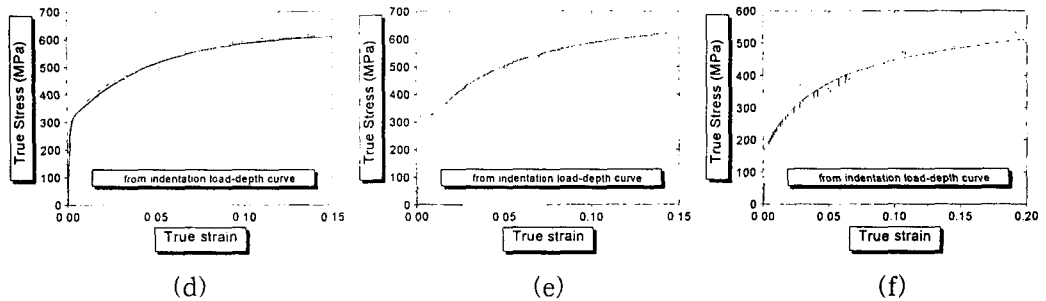


Fig. 4. Comparisons between flow properties calculated from advanced indentation test and those from tensile test for

(a) TMCP, (b) SM50, (c) SA508, (d) SA213, (e) SA106 and (f) AISI1025.

앞의 이론적 해석에서 나타난 방법을 통해 얻어진 유동곡선을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 실선은 실제 인장시험을 통해 얻어진 유동곡선이며, 점은 최신팅입시험을 통해 얻어진 유동곡선의 점이다. 그림에서 보는 바와 같이 최신팅입시험을 통해 얻어진 유동곡선이 인장시험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

따라서 최신팅입시험법이 기존의 일축인장시험을 대신하여 재료의 기계적 물성 평가 기법으로 사용될 수 있을 것으로 생각되며, 최신팅입시험기기의 소형화, 실구조물에 대한 부착방식의 도입 등을 통해 실제 산업구조물의 안전성 평가에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

- (1) 최신팅입시험법을 이용하여 유동곡선과 가공경화지수를 유도하였으며, 이는 일축 인장시험결과와 잘 일치하였다.
- (2) 최신팅입시험법이 기존의 일축인장시험을 대체할 수 있을 것으로 생각되며, 기기의 소형화 및 실구조물에 대한 부착방식을 도입하면 실제 산업구조물의 안전성 평가에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. Oliver, W.C. and Pharr, G.M., *J. Mater. Res.*, 1992, vol.7, no.6, pp.1564-1583
2. Cheng, Y.T. and Cheng, C.M., *Phil. Mag. Letters*, 1998, vol.78, no.2, pp.115-120

3. Norbury, A.L. and Samuel, T., *J. Iron steel Inst.*, 1928, vol.117, pp.673-687
4. Dieter, G.E., "*Mechanical Metallurgy*", McGraw Hill press, 1986, pp.286-289