

원자로 압력용기 강의 계장화 압입시험 모델링을  
통한 진응력-진변형율 평가

Evaluation of True Stress-True Strain relations  
through the Modeling of Ball Indentation Test  
of Reactor Pressure Vessel Steel

이호진, 김기백, 이병섭, 이봉상  
한국원자력 연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

압입시험을 모델링하여 압입하중과 압입깊이의 관계를 구한 후 해석 해 및 실험식을 이용하여 원자로 압력용기 강으로 사용되는 SA 508 재료의 진응력-진변형율 관계를 평가하였다. 이렇게 얻어진 진응력-진변형율은 모델링에 사용된 실제 SA508 강의 값과 잘 일치하였다. 압입자 경계부 재료에 발생하는 pile-up 현상이 재료의 완전소성영역에서부터 시작되었으며, 이 현상에 의해 모델링에서 얻어진 접촉반경이 해석 해에서 얻은 값보다 크게 측정되었다. 압입 방향의 중심 축을 따라 Tresca 조건으로 얻어진 유효응력 분포에서 최대 값에 해당하는 변형율을 대표변형율로 사용한 결과 진변형율과 선형적인 관계가 있음을 확인하였다.

Abstract

The true stress-true strain relation of SA508 steel, the material for reactor pressure vessel, was evaluated with the analytical solutions and experimental equations on the base of the indentation load-depth curve obtained from the modeling of indentation test. The evaluated relation between true stress and true strain is agreed well with that of SA508 steel, which was used to define the plasticity of the material in the modeling. The pile-up deformation on the edge of the indenter began to appear in the stage of fully plastic deformation of material. Because of the pile-up deformation, the contact radius obtained from modeling was larger than those obtained from analytical

solutions. The distribution of effective stresses obtained from Tresca criteria along the center axis of indentation was calculated in the modeling. The representative strains, which are defined as the corresponding strains with the maximum effective stresses, have a linear relation with the true strains.

## 1. 서론

일축 인장시험을 통해 외부 하중에 대한 재료의 변형 정도를 측정함으로써 기본적인 재료의 기계적 물성을 평가할 수 있다. 일축 인장시험은 표준화된 방법에 의해 수행되며 필요한 시편의 크기와 여러 가지 측정 조건을 만족 시켜야 한다. 따라서 시편 크기가 작거나 실험에 의해 재료가 파괴되어서는 안 되는 경우는 이 방법을 사용하기 어렵다. 중성자 조사에 의해 원자로 압력용기 재료의 물성 변화를 확인하는 경우 시편의 크기가 클수록 큰 조사 캡슐의 용량을 필요로 하며, 측정 시 큰 방사선을 방출하므로 시편을 되도록 작게 만들어 인장 특성을 측정해야 한다. 중성자 조사 시편처럼 큰 방사선을 방출하거나, 용접부 또는 박막 재료와 같이 측정 부분의 크기가 작아 인장 시편으로 제작하기 어려운 경우 압입 시험법을 이용하여 재료의 인장 특성을 예측하는 방법이 연구되고 있다 [1,2,3].

재료의 인장 성질을 예측하기 위한 압입시험 방법은 시편의 크기 및 형상의 제한이 없으며, 시험 시간이 짧고, 가정을 통해 얻어진 간단한 실험식 혹은 해석 해를 사용하는 경우 자료 분석이 비교적 간단하다. 실제 압입 과정 중 볼 (ball) 압입자와 시편 사이의 접촉면은 비 선형적으로 증가하고, 탄 소성 재료의 경우 변형 거동 역시 비 선형적이므로 해석이 복잡하다[1]. 따라서 많은 가정을 통해 얻은 해석 해와 실험으로부터 실험식을 사용하여 인장 성질을 예측하므로 실제 인장 시험 결과와는 일치하지 않을 가능성을 많이 가지고 있다. 해석 해에 사용 된 여러 가지 가정들의 영향을 고려하여 인장 시험 결과와 더욱 일치시키기 위한 연구가 계속되고 있다.

재료의 기계적 성질을 평가하기 위해서는 볼 압입에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 상세한 평가가 필요하다. 압입 시 볼 압입자 주변의 응력 분포나 응력 상태, 그리고 압입깊이, 압입자가 받는 평균압력 등의 평가를 통해 볼 압입 시험과 기존의 표준 시험법에서 얻은 인장 시험 결과와의 상관 관계를 확인하는 것이 필요하다[1].

인장 시험에 의한 응력 및 변형율의 관계를 예측하기 위해 압입시험을 통해 압입하중과 깊이 변화를 연속적으로 측정하는 방법을 통하여 재료의 진응력과 진변형율을 예측한다. 지금까지는 압입 시험장치를 통해 얻은 자료를 통해 재료의 진응력-진변형율을 구한 후 여러 가지 변수에 대한 영향을 해석하였으나, 본 연구에서는 압입시험 장치 대신 모델링을 통해 압입시험을 모사함으로써 시험 중 발생할 수 있는 측정 오차와 장비 자체가 갖는 고유의 변형 영향을 제거하였다. 이 결과로부터 얻은 압입하중과 압입깊이 관계로부터 진응력-진변형율 관계를 구하였으며, 압입자 근처의 응력 상태를 비롯한 여러 변수들의

영향을 확인하였다.

## 2. 이론 해석

일반적으로 금속 재료의 인장시험을 수행하면 진응력과 진변형율이 지수형태의 경화 거동을 나타낸다. 이와 같은 경화 거동을 볼 압입 시험으로 예측하기 위해 여러 가지 방법이 제안되었다. 압입시험에서 얻을 수 있는 압입하중과 압입깊이의 관계는 그림 1 과 같이 볼 압입깊이가 증가하면서 압입하중이 연속적으로 증가하는 양상을 보인다. 최대 압입하중을 가한 후 압입하중을 제거하면 재료의 물성에 따른 탄성회복에 의해  $h_f$  의 깊이로 압흔이 남게된다. 압입시험에서 발생하는 재료의 변형 양상 및 재료 내부의 응력장 해석을 통해 변형율을 정의하고, 평균압력으로부터 얻어진 응력을 계산함으로써 인장물성을 평가할 수 있다[3,4].

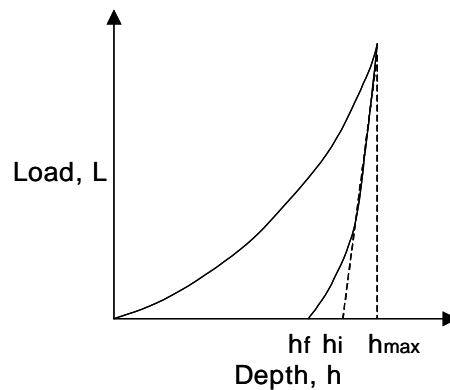


Fig. 1 A schematic diagram of indentation load-depth curve

압입시험 중 재료의 변형 양상은 하중 증가에 따라 탄성, 탄/소성, 완전소성 영역으로 나뉘어 진다. 탄성영역은 재료 변형이 가역적으로 발생하는 영역이며, 탄/소성 영역은 재료의 항복이 시작되어 하중이 증가하면서 소성 영역이 재료 내부에서 성장하고, 평균압력 대 유동응력 비가 증가하는 영역이다. 그리고 특정 하중 이상에서는 재료 내부의 소성영역이 표면까지 전파된 후 평균압력 대 유동응력의 비가 일정하게되는 영역을 말한다.

볼 압입 후 하중을 제거하게 되면 탄성성분은 제거되고 소성성분만 남게 되므로 식 1 과 같이 표현된다. 평균압력 및 변형율을 계산하기 위해 사용되는 접촉반경은 최대하중에서와 하중제거 시 재료의 접촉반경이 같고, 하중 제거 곡선의 기울기가 같다고 가정하는 경우 식 2 과 같이 임의의 압입깊이  $h$ 에서 소성 깊이  $h_p$ 를 계산할 수 있다[3].

$$h_{\max} = h_e + h_p \quad (1)$$

$$h_p = h - \omega(h - h_i) \quad (2)$$

여기서  $h_e$ ,  $h_p$  는 압입깊이의 탄성성분 및 소성 성분이며,  $h_i$  는 최대 압입깊이에서의 하중 해소 기울기를 고려한 압흔 깊이이며, 상수  $\omega$  는 구형 압입자의 경우 0.75를 사용한다. 볼 압입자의 기하학적 관계에서 볼 가장자리에 pile-up 현상이 발생하지 않는다고 가정하면 식 3 과 같이 접촉반경을 계산 할 수 있다[3].

$$a = \sqrt{2Rh_p - h_p^2} \quad (3)$$

접촉반경을 이용하여 식 4 와 같이 평균 압입압력을 구할 수 있다.

$$P_m = \frac{L}{\pi a^2} \quad (4)$$

인장 시험에서의 진변형율과 진응력에 대응할 수 있는 대표변형율과 대표응력을 아래와 같이 정의하였다. 압입시험의 경우 재료 위치에 따라 변형율이 다르므로 전체 변형율 대표하는 변형율을 선택해야 한다. 본 논문에서는 식 5 와 같이 대표 변형율에 상수를 곱하여 진변형율로 정의하였다. 이 식은 근사적인 평균 전단 변형율을 의미한다[3,4,5].

$$\epsilon_r = a \frac{h_p}{a} \quad (5)$$

여기서  $a$ 는 실험으로부터 0.40-0.45 정도의 값을 가지고 있으며 본 논문에서는 0.43을 사용하였다. 기존 연구에 의하면 볼 압입이 되면서 진응력과 평균압력사이에는 일정한 비가 성립된다고 알려져 있으므로 식 6 과 같이 진응력은 표현될 수 있다.

$$\sigma_f = \Psi P_m \quad (6)$$

여기서  $\Psi$  는 소성구속인자로 정의한다.

재료에 볼 압입자가 입입되는 동안 재료는 초기소성이 발생하기 전 까지 탄성 영역에 있게되며 이때의 유동응력과 평균압력과의 관계는 식 7 과 같다고 알려져 있다[3].

$$\frac{P_m}{\sigma_0} = 1.08 \quad (7)$$

여기서  $\sigma_0$  는 재료의 항복강도이다.

이 후 탄소성 영역을 거치게되는 데, 이때는 소성영역이 재료 내부에서 발생하여 표면 및 재료 내부로 확대되는 단계이다 이때는 응력과 변형율은 식 8 과 같은 관계를 갖는다 [3].

$$\frac{P_m}{\sigma_f} = \frac{2}{3} [1.4 + \ln(\frac{E_r}{\sigma_f} \epsilon_r)] \quad (8)$$

이 후 소성영역이 확대되어 표면에까지 이르게되는데, 이때를 완전 소성영역이라고 하며, 이때 유동응력과 입입자의 평균압력과의 관계는 식 9 와 같다[3].

$$\frac{P_m}{\sigma_f} = C=2.8\sim 3 \quad (9)$$

본 연구에서는 상수 C 의 값으로 3 을 사용하였다. 식 6, 7, 8 에서 어떤 식을 적용해야 할지는 각 식으로부터 값을 구하여 비교함으로써 적용 범위를 예상할 수 있다.

### 3. 전산코드를 이용한 압입시험 모델링

지금까지의 연구결과들은 실험을 통해 얻은 압입하중과 압입깊이 관계도를 이용하여 진응력과 진변형율의 관계를 구하고 실제 진응력-진변형율과 비교하여 그 일치성 또는 변수들의 영향을 고려하였다. 그러나 실제 장비의 경우 장비 자체가 갖는 고유 변형이나 측정 중 발생하는 오차를 무시할 수 없다.

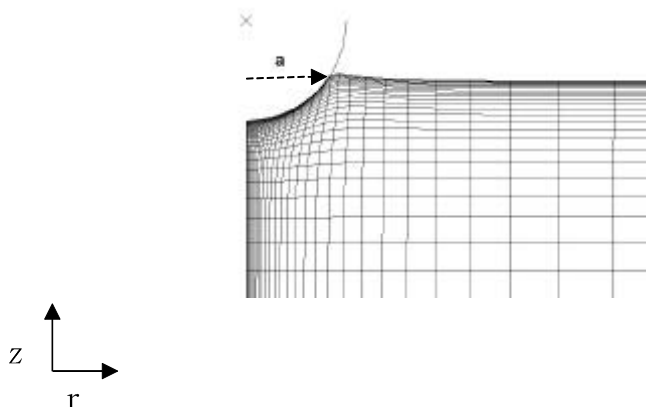


Fig 2. Meshing and deformation of SA 508 steel during simulated indentation test (a : contact radius)

본 연구에서는 해석 중 시험 장비에서 발생하는 영향을 제거하기 위해 압입시험을 모델링하여 재료의 변형 및 응력 거동을 확인하였으며, 모델링에서 계산된 재료의 압입하중과 압입깊이 관계식을 이용하여 재료의 진응력-진변형을 관계를 구하였다.

압입시험 모델링에서 해석 영역은 그림 2 와 같이 축대칭 조건으로 하였으며, 볼은 강체로 가정하였고, 재료는 사각 요소를 사용하였다. 볼 압입자의 반경은 500  $\mu\text{m}$  로 하였으며, 재료는 두께 3 mm, 직경 6mm 크기로 하였다. 시험재료는 원자로 압력 용기 재료인 SA 508 재료의 물성을 사용하였다. 항복강도는 407 MPa 이었으며, 탄성계수는 200 GPa 로 하였다[1,3]. 강체와 재료의 마찰계수는 0.1 로 하였으며, 최대 200  $\mu\text{m}$  까지 압입한 후 하중을 제거하는 과정을 모델링한 후 ABAQUS 상용코드를 사용하여 계산하였다[1].

#### 4. 진응력-진변형을 평가

모델링 된 압입시험으로부터 그림 3 과 같은 압입하중-압입깊이 관계도를 구할 수 있었다. 이 관계는 참고문헌 [3] 의 SA 508 압입하중-압입깊이 관계도의 결과와 비교하면 압입 시 기울기가 가파르며 압입하중 제거 시 변형 회복기울기가 급격한 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 재료의 고유한 변형이외에 장치의 변형에서 오는 오차를 제거한 결과로 예상할 수 있다.

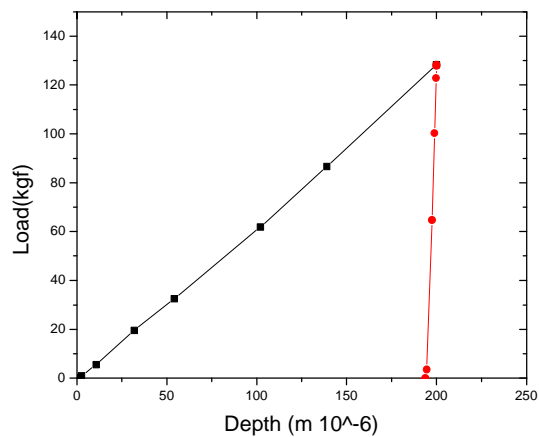


Fig. 3 Indentation load- depth curve calculated from modeling

그림 3 과 같은 관계도로부터 식 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9를 이용하여 SA508 재료의 진응력-진변형율의 관계를 구하였다. 그림 4 에 실제 SA508 진응력-진변형율 관계와 그림 3 으

로 부터 계산으로 얻어진 진응력-진변형을 관계를 비교하였다. 실제 진응력-진변형을 관계는 모델링 시 재료의 소성물성 입력 값으로 사용하였다. 그림에서 보듯이 변형을 0.07과 0.08 사이에서 재료가 탄성소성 영역에서 완전소성 영역으로 변하고 있으며, 계산된 두 개의 곡선 중 서로 교차하는 위치에서 윗 부분 곡선으로 연결된 곡선이 실제 응력 변형을 곡선과 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과는 참고 문헌 [3] 에서 예상한 SA 508 의 진응력-진변형을 보다 잘 일치하고 있으며, 따라서 그림 3에서 얻어진 관계도가 실제 장치에서 측정된 결과보다 실제 재료의 거동을 잘 표현하고 있는 것으로 예상할 수 있다.

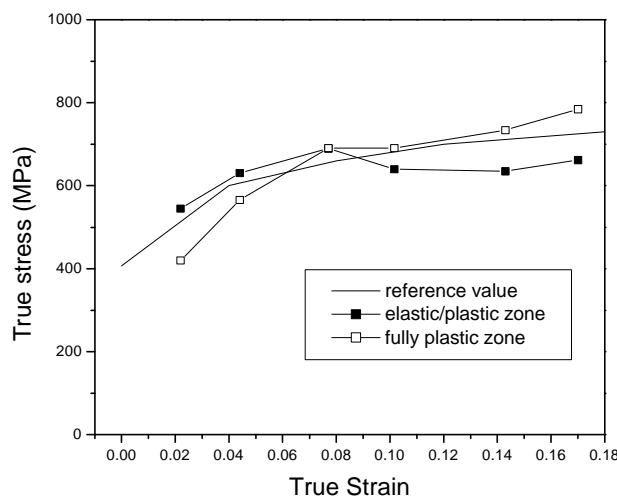


Fig. 4 Comparison between flow properties calculated from simulated indentation test and those obtained from the reference

압입자가 재료로 압입되는 경우 재료표면과 압입자의 경계에서 재료가 pile-up, 즉 재료가 압입 반대 방향으로 변형하여 올라가는 현상이 발생한다. 재료에 따라 혹은 마찰 계수에 따라 sink-in 즉 재료가 압입자를 따라 변형하여 함몰되는 현상을 보이기도 하는 것으로 알려져 있다. SA 508 의 경우 마찰 계수 0.1에서 그림 2 와 같이 pile-up 현상이 발생하였다. 그림 3 의 관계에서 해석 해로 얻어진 접촉반경과, 모델링 해석 후 변형 결과에서 얻어진 접촉 반경을 그림 5 에 비교하였다. 그림 5 에서 보듯이 모델링 결과 측정된 접촉반경은 소성변형이 진행될수록 해석 식에서 구한 값보다 크게 나타나고 있으며, 재료가 탄성/소성영역에서 완전소성 영역으로 변하는 변형율에 해당하는 깊이, 약 32 $\mu$ m에서 접촉반경의 차이가 시작되는 것을 확인하였다. 이것은 pile-up 현상의 효과가 완전소성영역에서부터 나타나고 있는 것으로 예상되며, 압입이 진행될수록 pile-up 현상이 크게 발생하여 pile-up 을 고려하지 않는 가정으로부터 얻어진 해석 해를 사용하여 응력과

변형률 관계를 구하는 경우 오차를 가져올 수 있을 것으로 예상된다.

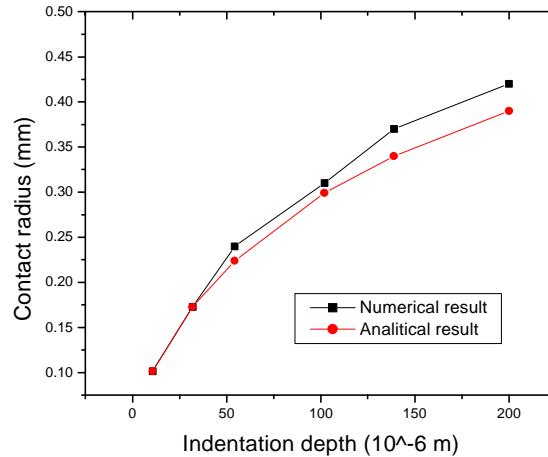


Fig. 5 Comparison between contact radius calculated from indentation load–depth curve and those measured in deformation of SA508 steel during simulated indentation test.

연속 압입시험으로 재료의 진응력-진변형률, 즉 가공 경화정도를 평가하기 위해 여러 가지의 변화된 대표변형률을 정의하여 실제 값에 접근시키는 연구가 진행되어 왔다. 즉 평균 압입압력에 대하여 일정 부분에서의 변형률을 대표변형률로 정의하여 진변형률과의 관계를 제안하는 방법이다. 본 연구에서는 식 5 와 같이 볼 압입자에 의해 발생하는 표면에서의 최대 전단 변형률 ( $\epsilon_{zr}$ )을 대표변형률로 정의하여 계산하였다[5]. 본 논문의 모델링 해석 결과 최대  $\epsilon_{zr}$  은 재료 표면에서 발생하지 않고 재료 내부로 이동되므로 표면의 압입자 경계 위치를 따라 변형률을 계속 확인하는 것이 무의미하였다. 따라서 본 연구에서는 압입 중심 축을 기준으로 하여 Tresca 조건으로 얻어진 유효응력에 따른 변형률을 새로운 대표변형률로 제안하고, 압입 압력사이에 어떤 관계가 있는지 확인하였다.

그림 6 에서 보듯이 압입깊이가 깊어짐에 따라 초기소성이 발생한 후, 재료의 가공경화에 따라 Tresca 조건으로 얻어진 유효응역, 즉 최대 주응력과 최소 주응력 값의 차이가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 유효응력과 유효변형률 사이의 관계는 진응력 진변형률 관계와 일치한다고 가정하여 그림 6 에서 얻어진 유효응력에 상응하는 변형률의 변화를 확인하였다[6]. 최대 유효응력에 해당하는 변형률을 실제 진응력-진변형률 곡선에서 찾은 후, 이 값들을 해석 해에서 구한 변형률에 대하여 그래프로 표현하는 경우 그림 7 과 같이 선형적인 관계를 가지고 있었다. 즉 대표변형률은 압입 중심 축에서 계산된 Tresca 조건에서 최대 유효응력 해당하는 변형률로 정의할 수 있으며, 그림 7 에서 보듯이 이 변형률 값의 약 1/2 정도의 변형률이 해석 해에서 정의한 진변형률을 나타내고 있음을 알



수 있다.

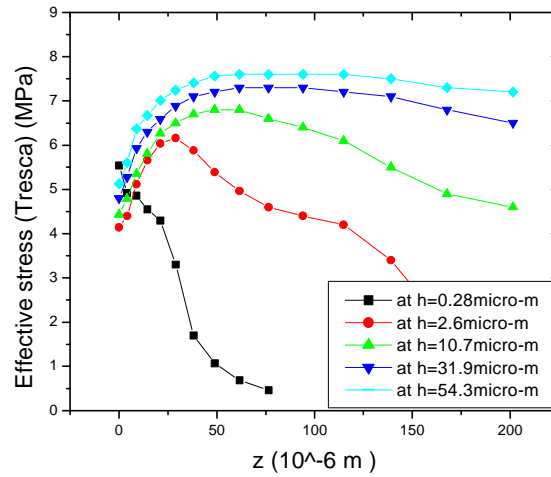


Fig. 6 Distribution of Tresca criteria along center axis of indentation with increase of indentation depth.

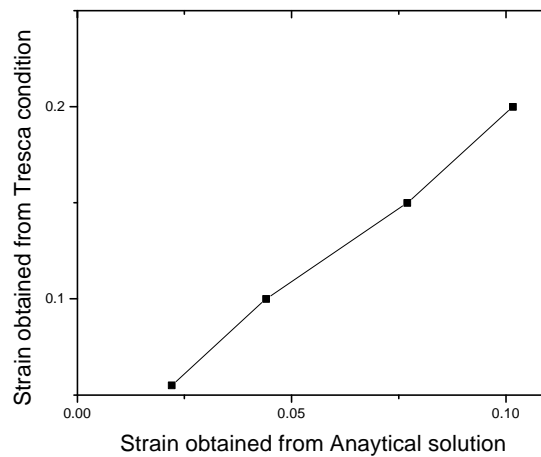


Fig. 7 Relation between the representative strain obtained Tresca criteria and true strain obtained analytical equations.

## 5. 결론

압입시험 시 시험 장치가 갖는 고유의 변형과 측정오차를 제거하고, 순수한 재료만의

압입거동을 확인하기 위해 압입시험을 모델링하여 압입하중과 압입깊이 관계를 구하였다. 모델링 결과 얻은 압입하중-깊이 관계를 근거로 하고 해석 해 및 실험식을 이용하여 원자로 압력용기 강으로 사용되는 SA 508 강의 진응력-진변형을 관계를 평가하였다. 이렇게 얻어진 진응력-진변형을 관계는 모델링에 사용된 실제 SA508 강의 진응력-진변형들과 잘 일치하였다. 재료의 완전소성영역에서부터 보이기 시작한 pile-up 현상에 의해 모델링에서 얻어진 접촉반경이 해석 해에서 얻은 값보다 크게 측정되었다. 압입 방향의 중심 축을 따라 Tresca 조건으로 얻어진 유효응력 분포에서 최대 값에 해당하는 변형율을 대표변형율로 사용한 결과 진변형율과 선형적인 관계가 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 원자력 연구개발 중장기 사업과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. 김진원 외, “ 원자로 압력용기강 압입 시험에서의 응력 상태 해석”, Proc. of the 11th conference on Mechanical behaviors of Materials, Seoul, Korea, August 22, 1997, pp489-498
2. 전은채 외, “ 압입하중-변위곡선의 정량적 해석을 통한 가공경화지수의 평가”, 대한금속학회지, Vol.39, No.12, 2001, pp1392-1398
3. 이정향 외, “ 연속압입시험법을 이용한 재료의 진응력-진 변형률 곡선 평가”, 대한금속학회지 Vol. 35, No. 12, 1997, pp1616-1625
4. J.S. Field et al. “ A simple predictive model for spherical indentation”, J. Mater. Res., Vol. 8. No. 2, Feb 1993, pp297-306
5. 안정훈 외, “ 압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성 유동특성 평가”, 대한 금속재료학회지, Vol.38, No.12, 2000, pp1606-1611
6. W.F. Hosford, et al., Metal Forming-mechanics and metallurgy, PTR Prentice Hall, 1993, pp41-43