

소형편치시험에서 인장물성변화에 의한 시편의 변형거동과 하중-변위곡선에의 영향

이재봉 · 박재학* · 김민철** · 이봉상**

충북대학교 대학원 안전공학과 · *충북대학교 안전공학과 · **한국원자력연구소

1. 서 론

원자로 압력용기 저합금강들은 원자로 가동 중 중성자 조사에 의해 재질열화(material degradation)가 발생한다. 그러므로 지속적인 재질열화의 평가는 발전소의 수명을 예측, 평가하기 위해서 매우 중요하다. 그러나 표준시편을 이용한 인장시험, 충격시험 및 파괴인성 시험법 등은 조사시편의 크기 및 수량에 제한이 따르고, 높은 방사능으로 인해 시험편의 취급에도 제약을 받게 된다. 따라서 소형시편을 이용한 재료의 손상평가기술의 필요성이 부각되었고, 소형편치시험(small punch test, SP test)은 그 중 하나의 유용한 시험 방법이다.

본 연구에서는 Mn-Mo-Ni 저합금강을 이용하여 소형편치시험을 수행하였다. 또한 SP 곡선으로부터 인장물성의 유추연구를 위하여 SP 시험에 사용된 재료를 이용하여 동일환경에서 인장시험을 수행하였다. 인장시험결과와 SP 시험결과의 비교에서 인장곡선과 SP 곡선과의 관계를 고찰하였다. 또한 인장곡선과 SP 곡선과의 관계를 보다 체계적으로 연구하기 위하여 임의로 가정된 인장물성을 이용하여 SP 시험을 모의 실험하는 방법을 사용하였다. 모의 실험방법에는 유한요소법을 이용하였다.

2. 배경이론

일반적인 연성재료의 경우 소형편치시험에서 나오는 하중-변위 곡선의 경향은 Fig. 1과 같다. 시편이 탄·소성 변형을 하면서 발생하는 하중-변위 곡선을 기존의 연구자들은 탄성 굽힘 영역(elastic bending region, I), 소성 굽힘 영역(plastic bending region, II), 소성막 신장 영역(plastic membrane stretching region, III) 및 소성 불안정 영역(plastic instability region, IV)의 4단계로 구분한다[1]. 하중-변위 곡선으로부터 최대하중(maximum load, P_{MAX}), 항복하중(yield load, P_y), 파단하중(fracture load) 등의 하중 값과 최종변위(total displacement) 그리고 하중-변위 곡선의 면적으로 계산된 SP 에너지를 구할 수 있다. 다른 값들과는 달리 항복하중(P_y)을 구하는 방법은 연구자들에 따라 두 가지로 분류된다. 하나는 탄성굽힘영역 기울기를 시편 두께의 10%를 수평 이동하여 하중-변위 곡선과 만나는 점의 하중 값을 이용하는 방법[1]이며, 다른 하나는 탄성굽힘영역 기울기의 연장선과 소성굽힘영역에서의 직선부분의 연장선이 만나는 점

의 하중 값으로 정하는 방법[2]이다. 하중-변위 곡선으로부터 항복하중(P_y)을 구하는 두 가지 방법에 대한 설명을 Fig. 2에 도시하였다. 이렇게 구하여진 항복하중(P_y)은 최대하중(P_{MAX})과 함께 항복강도(σ_0), 인장강도(σ_{UTS})와 선형적인 관계가 있는 것으로 많이 알려져 있다[3].

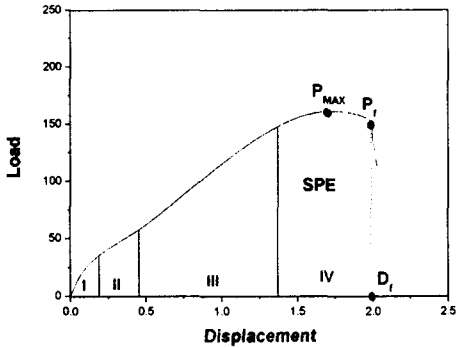


Fig. 1 Typical load-displacement curve in a small punch test.

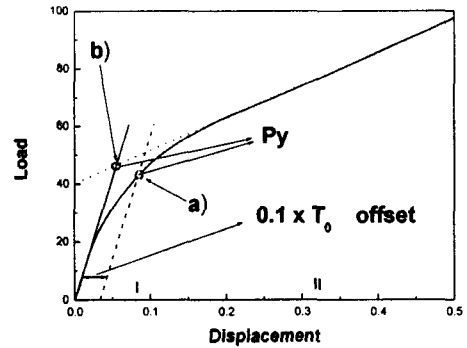


Fig. 2 Definitions of yield load(P_y)

2. 실험방법 및 실험재료

본 연구에서는 원자로 압력용기강으로 사용되는 Mn-Mo-Ni 저합금강 8개강종에 대하여 실험을 수행하였다. H1~H6은 각각 제조공정이 다른 SA 508Gr.3 단조재이며, H7은 SA 533 B-1 압연재, H8은 용접재이다. H6은 H5와 동일 화학조성을 갖는 재료에 열처리를 달리한 재료이다. 소형펀치시험에 사용된 시험편은 $10 \times 10 \times 0.5\text{mm}$ 의 크기로 가공되었으며, 인장시험편은 직경 2.5mm, 표점거리 16mm의 크기로 시험편을 가공하였다.

SP 시험의 홀더(holder)는 하부홀더, 상부홀더, 4개의 나사로 구성되어 시험편을 고정할 수 있도록 하였다. Fig. 3은 SP 시험에 사용된 시험홀더의 개략도이다. 시험편을 홀더 중앙에 위치시키고 하중이 작용하는 축의 일치를 위해서 펀치(puncher)가 상부홀더의 홈을 통하여 펀치 선단의 볼을 누름으로써 시험편에 하중을 가하도록 하였다. 구(ball)는 HRC 62~67의 경도를 갖는 지름 2.4mm의 강구를 사용하였다. SP 시험은 상온에서부터 -196°C 의 온도범위에서 수행하였다. 펀치(puncher)의 변위속도는 분당 1mm/min으로 하였다. 인장시험은 표점거리가 18mm, 직경 2.5mm의 봉상시험편을 이용하여 상온에서부터 -196°C 의 온도범위에서 실험을 하였다. 변형속도는 $5.208 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 이었다. 실험 온도의 조절은 액체질소를 간접 분사하면서 시험편의 온도를 목표온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차 이내로 유지하였다.

3. 유한요소해석

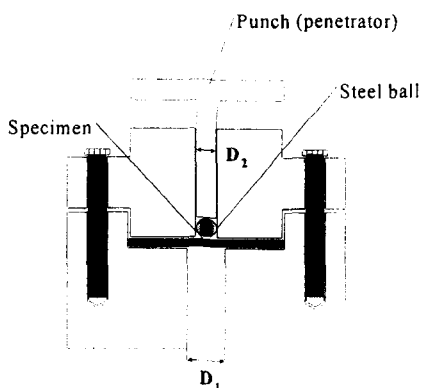
통제된 인장물성의 변화에 따른 SP 곡선의 변화를 관찰하기 위해 유한요소해석을 이용하여 SP 시험을 모의실험하였다. Fig. 4에 SP 시험의 유한요소해석에 사용된 모델을 나타내었다. 볼(ball)은 상부홀더와 하부홀더와 함께 변형이 발생하지 않는 강체(rigid body)로 묘사하였으며 변위제어(displacement control)로 시편에 하중을 가하였다. 입력되는 재료의 인장물성은 가공경화곡선이 식(1)을 만족한다고 가정하고 H, N, σ_0 의 값을 변환시키면서 입력하였다. 입력되는 인장물성의 변화범위는 인장실험결과를 참조하여 H는 0.65~0.80, N은 0.145~0.175의 범위 안에서, σ_0 는 500MPa, 700MPa로 가정하였다.

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = H\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^N \quad (1)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과 및 고찰

각 강종들의 SP 시험결과와 인장시험결과를 비교하였다. 우선 인장시험결과에서의 항복강도(σ_0)와 SP 시험결과에서의 항복하중(P_y)의 값을 Fig. 5에 비교하였다. SP 곡선으로부터 항복하중(P_y)을 구하는 두 가지 방법을 모두 사용하였다. 그림 Fig. 5a는 평행이동방법이며 그림 Fig. 5b는 두 탄성급힘영역 기울기의 연장선과 소성급힘영역 기울기의 연장선이 만나는 점을 사용하는 방법을 사용한 결과이다. 평행이동방법보다



D_1 : Bore diameter of bottom die
 D_2 : Bore diameter of top die

Fig. 3 Schematic drawing of SP test.

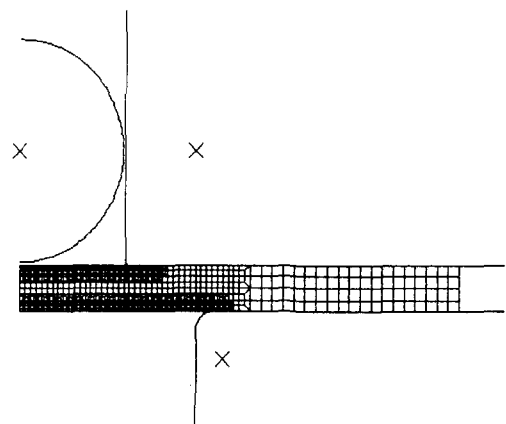


Fig. 4 Finite element model of SP test.

두 영역의 기울기를 이용하는 방법이 항복하중(P_y)과 밀접한 관계가 있음을 Fig. 5a

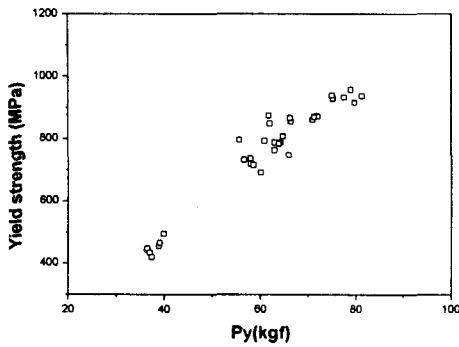
와 Fig. 5b에서 알 수 있으며, 이러한 원인을 유한요소해석결과 및 고찰에서 밝혔다. 그리고 SP 곡선에서의 최대하중(P_{MAX})과 인장강도(σ_{UTS})의 비교를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 매우 흥미로운 사실을 보여주고 있다. SP 시험에서의 최대하중(P_{MAX})을 소성 막신장영역에서 단면 수축에 의한 파단이 발생하는 부류와 소성 막신장영역전에서 파괴가 발생하는 부류의 두 가지로 나누었다. Fig. 6에서 소성막 신장영역에서 파단이 일어나는 점들은 인장강도(σ_{UTS})와 선형적인 관계를 보여 주고 있다. 반면에 그렇지 않은 점들은 예상되는 SP 시험에서의 최대하중(P_{MAX})에 도달하기 전에 무작위로 파괴가 일어나고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 최대하중(P_{MAX})과 인장강도(σ_{UTS})의 비교에 있어서 파괴 모드까지도 고려해서 비교해야 함을 보여 주고 있다. 또한 최대하중(P_{MAX})과 인장강도(σ_{UTS}) 뿐만 아니라 항복하중(P_y)과 항복강도(σ_0), 최대변위와 연신율 등 다른 연구자들에 의해 비교되고 있는 여러 값들이 서로 물리적인 관계가 있음을 먼저 확인하여야 함을 보여주고 있다.

4.2 유한요소해석결과 및 고찰

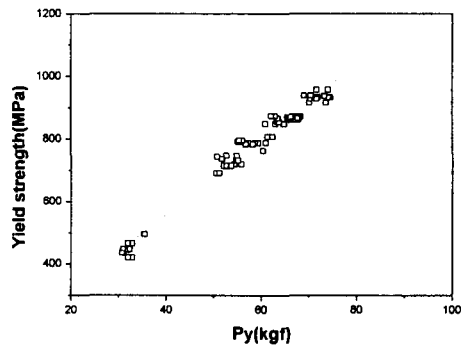
Fig. 5는 인장실험결과를 이용하여 SP 시험을 FE해석한 결과와 SP 시험곡선을 비교한 것이다. 두 곡선이 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 FE해석 모델이 인장물성의 변화에 따른 SP 곡선의 변화 경향을 관찰하는데 적합하다는 것을 확인 시켜주는 결과이다. Fig. 5에서 해석결과곡선이 일반적인 SP 곡선과 같이 탄성굽힘영역등의 영역이 나타남을 확인 할 수 있다. Fig. 7은 해석결과곡선들의 탄성굽힘영역과 소성굽힘영역을 확대하여 도시한 그림이다. Fig. 7에서 두 영역의 기울기의 교점으로 구한 항복하중(P_y)이 H 와 N의 변화에는 전혀 무관하게 항복강도(σ_0)에 따라 일정한 값을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 반면에 평행이동방법으로 구한 항복하중(P_y)은 동일한 항복강도(σ_0)로 가정된 SP 해석곡선에서 다른 값을 갖을 수 있음을 확인 할 수 있다. 이러한 사실은 Fig. 8에서 보다 정확하게 확인 할 수 있다. Fig. 8a는 수평이동방법을 이용하여 항복하중(P_y)을 구한 값을 나타낸 그림이며, Fig. 8b는 두 영역의 기울기의 교점을 이용하여 구한 항복하중(P_y)을 나타낸 그림이다. Fig. 8a와 Fig. 8b의 비교에서 두 영역의 기울기의 교점을 이용하여 구한 항복하중이 항복강도를 SP 곡선으로부터 예측하는 보다 적합한 방법임을 확인 할 수 있다. 이러한 항복하중(P_y)과 항복강도(σ_0), 최대하중(P_{MAX})과 인장강도(σ_{UTS})의 관계들을 각각 식 (2)와 식 (3)으로 나타내었다.

$$\sigma_0 = 12.5 + 54.5 \times P_y \quad (2)$$

$$\sigma_{UTS} = 181.6 + 2.54 \times P_{MAX} \quad (3)$$



a)



b)

Fig. 5 The relationship between yield strength(σ_0) and yield load(P_y) defined by a) off set method & b) two tangent line intersection method in test results.

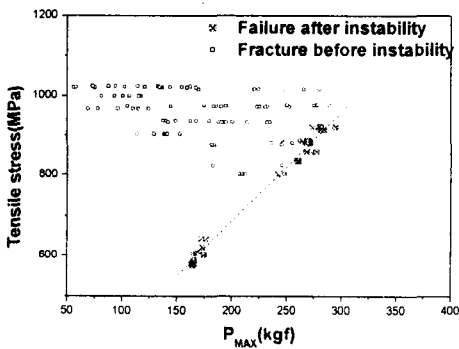


Fig. 6 The relationship between tensile strength(σ_{UTS}) and maximum yield load(P_y) and those application load(P_{MAX}) in SP test.

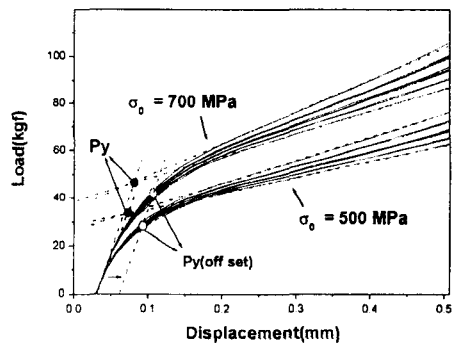


Fig. 7 Two method of defining the tensile strength(σ_{UTS}) and maximum yield load(P_y) and those application load(P_{MAX}) in SP test.

5. 결론

원자로 압력용기용 저합금강에 대하여 소형편치시험과 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 인장물성(σ_0 , H, N)의 변화에 따른 SP 해석곡선의 변화양상을 관찰한 결과 항복하중(P_y)을 구하는 두 가지 방법 중 탄성굽힘영역 기울기와 소성굽힘영역 기울기의 연장선이 만나는 점을 이용하는 방법이 다른 물성(H, N)에 영향을 받지 않고 항복강도(σ_0)를 보다 잘 예측할 수 있음을 알 수 있었으며, 항복하중(P_y)과 항복강도(σ_0)와의

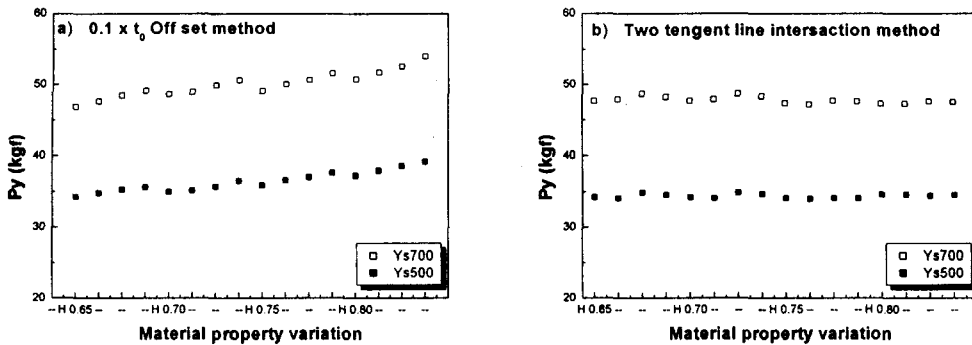


Fig. 5 The yield loads(Py) from a) off set method & b) two tangent line intersection method in FE analysis results.

관계를 정량화 할 수 있었다.

2) 인장강도(σ_{UTS})와 최대하중(P_{MAX})과의 비교에서 소성 불안정영역에서 파단 된 값 들은 인장강도(σ_{UTS})와 최대하중(P_{MAX})과의 선형적인 관계가 선명하였으나, 소성 불안 정 영역이전에서 파괴가 일어난 값들은 인장강도(σ_{UTS})와 최대하중(P_{MAX})과의 선형적 인 관계로부터 예상되는 최대하중(P_{MAX})까지 무작위로 분포되는 것을 확인 할 수 있었 으며, 이는 인장강도(σ_{UTS})의 비교에 있어서는 파괴모드까지도 고려해야함을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 과기부의 원자력연구개발사업중 파괴특성평가 및 향상기술개발 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) A. Okada, M. L. Hamilton, and F. A. Garner, "Microbulge Testing Applied to Neutron Irradiation Materials", J. Nucl. Mater., 179-181, 1991, pp.445-448.
- 2) Yuanchao Xu, Guangshen Ning ,Changyi Zhang ,Qingkai Yu and Yanping Xu, "Application of The Miniature Specimen Technique to Material Irradiation Tests and Surveillance for Reactor Component", J. Press. Ves. and Piping, Vol. 77, 2000, pp.715-721.
- 3) X. Mao, T. Shoji, and H. Takahashi, " Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by combined Recrystallization-Etch Method and Rigid Plastic Analysis", J. Test. Eval., Vol. 15, 1987, pp. 30-37.