

## Mn-Mo-Ni 저합금강의 SP-곡선과 인장물성과의 실험적 관계

이재봉\*·김민철\*\*·박재학\*·이봉상\*  
(2003년 8월 4일 접수, 2004년 2월 9일 심사완료)

### Empirical Relationship Between SP-curves and Tensile Properties in Mn-Mo-Ni Low Alloy Steels

Jae Bong Lee, Min-Chul Kim, Jai Hak Park and Bong Sang Lee

**Key Words:** Small Punch Test(소형편치시험), Reactor Pressure Vessel(원자로압력용기), Finite Element Analysis(유한요소해석), Tensile Test(인장시험)

#### Abstract

An empirical relationship between parameters from SP curves and tensile properties has been systematically investigated by experimental tests and FEM simulations. A series of SP and tensile tests were performed. SP tests were also simulated by FE analysis with various tensile properties. It was found that the yield loads( $P_y$ ) and the maximum loads( $P_{MAX}$ ) in SP curves were linearly related with the yield strength( $\sigma_0$ ) and the tensile strength( $\sigma_{UTS}$ ), respectively. The yield loads defined from the intersection point of two lines tangent to the elastic bending region and plastic bending region showed better relation to the yield strength than those from offset line. The maximum loads in SP curves showing plastic instability region was linearly related with the tensile strengths. The slope of SP curves in simulation results had a close correlation with the hardening coefficient and hardening strength as well.

#### 1. 서론

원자로 압력용기는 원자로 가동 중 증성자 조사에 의해 재질열화(material degradation)가 발생한다. 따라서 지속적인 재료의 물성, 특히 파괴인성 평가는 발전소의 수명을 예측, 평가하기 위해서 매우 중요하다. 이를 위해 가동중인 압력용기내에 감시시험편을 장입하여 주기적으로 재료의 물성을 평가하고 있다. 그러나 기존의 표준시험편

을 이용한 인장시험, 충격시험 및 파괴인성 시험법 등은 시험편의 크기 및 수량에 제한이 따르고, 높은 방사능으로 인해 시험편의 취급에도 제약 받게 된다. 따라서 소형시험편을 이용한 재료의 손상평가기술의 필요성이 부각되었고, 소형편치시험(small punch test, SP test)은 그 중 하나의 유용한 시험 방법이다.

SP 시험은 주로 템퍼링취화나 증성자 조사취화로 인한 강의 연성저하를 SP 천이온도를 이용한 평가에 많이 사용되었다.<sup>(1-4)</sup> 최근에는 SP 시험으로부터 보다 많은 재료의 기계적 특성을 구하고자 파괴특성 및 인장특성과의 이론적, 실험적 관계연구가 활발히 진행 중이다.<sup>(5-11)</sup>

그 중 인장물성과 SP 시험과의 관계연구에서는 표준시험에서의 각각의 값들과 최대하중( $P_{MAX}$ ), 항복하중( $P_y$ ), 파단변위( $D_f$ ), SP 에너지 등의 SP

† 책임저자, 회원, 한국원자력연구소 원자력재료기술개발부

E-mail : bongsl@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-8561 FAX : (042)868-8349

\* 책임저자, 회원, 충북대학교 안전공학과

\*\* 한국원자력연구소 원자력재료기술개발부

곡선에서의 특성값들을 정의하고, 비교하는 방법이 주로 사용되며, 실험적 관계가 잘 성립된다고 알려져 있다. 그러나 항복하중을 구하는 방법에 있어서는 연구자들에 따라 조금씩 차이를 보이고 있으며,<sup>(12,13)</sup> SP 곡선에서의 각각의 특징들을 정의하는 방법에 대한 구체적인 연구는 아직 미흡하다.

본 연구에서는 Mn-Mo-Ni 저합금강에 대하여 소형편치시험과 인장시험을 수행하였으며, 실험 결과의 비교를 통하여 SP 곡선과 인장물성과의 실험적 관계를 고찰하였다. 또한 인장물성의 변화에 따른 SP 곡선의 변화 양상을 보다 효과적으로 고찰하기 위해 유한요소법을 이용하여 SP 시험에 대한 전산모사를 수행하였다. 실험결과와 전산모사결과와의 비교에서 항복하중을 구하는 기존의 대표적인 두 가지 방법 중 적합한 방법을 결정하였으며, 최대하중과 인장강도와의 관계를 고찰하였다. 또한 가공경화지수와 강도계수와 같은 인장물성의 변화에 따른 SP 곡선의 기울기 변화를 바탕으로 인장물성과 SP 곡선의 상관관계를 고찰하였다.

## 2. 실험재료와 실험방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서는 H1~H7의 총 7가지의 Mn-Mo-Ni 저합금강을 사용하여 소형편치시험과 인장시험을 수행하였다. H1~H6은 각각 제조공정이 다른 SA 508Gr.3 단조재이며, H7은 SA 533 B-1 압연재이

다. H6은 H5와 동일 화학조성을 갖는 재료에 열처리를 달리한 재료이다. 각 강종들의 화학성분을 Table 1에 나타내었다. 원자로 압력용기 구조물과 동일한 크기로 제작된 각 강종들로부터 두께의 1/4 깊이 지점에서 시료를 채취하였다. 소형편치시험에 사용된 시험편은 10×10×0.5mm의 크기로 가공되었으며, 인장시험편은 직경 2.5mm, 표점거리 16mm의 크기로 가공하였다.

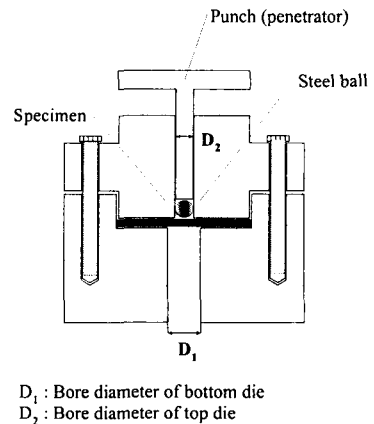
### 2.2 실험방법

SP 시험의 홀더(holder)는 하부홀더, 상부홀더, 4개의 나사로 구성되어 시험편을 고정할 수 있도록 하였다. Fig. 1은 SP 시험에 사용된 시험편홀더이다. 시험편을 홀더 중앙에 위치시키고 하중이 작용하는 축의 일치를 위해서 편치(puncher)가 상부홀더의 홈을 통하여 강구를 누름으로써 시험편에 하중을 가하도록 하였다. 강구는 HRC 62~67의 경도를 가지며, 강구의 지름은 2.4mm이다. SP 시험은 상온에서부터 -196℃의 온도범위에서 수행하였으며, 천이특성이 나타나는 -150℃이하의 온도범위에서는 15℃ 간격으로 시험을 수행하였다. 편치의 변위속도는 1mm/min으로 하였다.

인장시험은 상온에서부터 -196℃의 온도범위에서 실험을 하였다. 변형속도는  $5.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 이었다. 실험온도의 조절은 액체질소를 간접 분사하면서 시험편의 온도를 목표온도에서  $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차 이내로 유지하였다.

**Table 1** Chemical compositions of the steels used in this study

Type	ID	Chemical composition (Wt.%)			
		Ni	Mo	Mn	C
SA 508 Gr.3	H1	0.78	0.52	1.43	0.18
	H2	0.81	0.55	1.42	0.19
	H3	0.92	0.49	1.36	0.21
	H4	0.85	0.51	1.46	0.20
	H5/H6	0.81	0.47	1.38	0.20
SA 533 B1	H7	0.84	0.51	1.42	0.18



**Fig. 1** A schematic drawing of an SP holder

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 SP 시험의 유한요소해석 모델

인장물성의 변화에 따른 SP 곡선의 변화양상을 관찰하기 위하여 임의의 인장물성 변화에 따른 SP 모의실험을 유한요소해석을 이용하여 수행하였다. SP 시험의 유한요소해석에 사용된 요소는 continuum axisymmetry 4 node element이며, Fig. 2와 같이 절점 수 1340개, 요소 수 1214개로 모델을 구성하였다. 볼(ball)은 상부홀더와 하부홀더와 함께 변형이 발생하지 않는 강체(rigid body)로 가정하였으며 변위제어(displacement control)로 시편에 하중을 가하였다. 유한요소해석은 상용프로그램 ABAQUS를 사용하였다.

#### 3.2 유한요소해석을 이용한 SP 모의시험

인장물성의 변화에 따른 SP 곡선의 변화를 관찰하기 위해 인장곡선이 식 (1)과 같이 표현된다고 가정하고 H, N,  $\sigma_0$ 의 값을 변환시키면서 임의의 인장물성을 얻을 수 있었다.

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

식 (1)에서  $\sigma_0$ 는 항복강도,  $\epsilon_p$ 는 소성변형률, H는 강도계수, N은 가공경화지수이며,  $\epsilon_0$ 는 항복 변형률로서 0.2%로 가정하였다. 유한요소해석에 입력되는 인장물성의 변화범위는 본 연구에 사용된 7가지 강종의 인장실험결과를 참조하여 H는 0.65~0.80, N은 0.145~0.175의 범위 안에서,  $\sigma_0$ 는

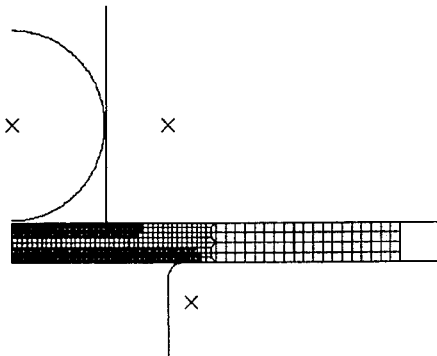


Fig. 2 Finite element model of SP tests

500MPa, 700MPa로 총 32개의 임의의 인장물성을 조합하였다. 이러한 방법으로 선택된 다양한 종류의 인장물성을 SP 시험의 유한요소해석 모델에 입력하여 계산하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 SP 시험결과 및 인장시험결과

Fig. 3은 H7강의 온도에 따른 SP 시험결과를 나타낸 것이다. 온도별로 -196°C에서 6번, -180°C ~ -130°C에서는 각각 3번의 시험을 수행하였다. Fig. 3에서 온도별 SP 곡선의 재현성이 매우 뛰어난 것을 볼 수 있다. 평가된 모든 강종의 실험결과에서도 Fig. 3과 같은 재현성 있는 SP 곡선을 얻을 수 있었다.

H7 강종의 온도별 SP 곡선인 Fig. 3에서 SP곡선의 전형적인 4가지 영역인 탄성 굽힘영역(elastic bending region, I), 소성 굽힘영역(plastic bending region, II), 소성막 신장영역(plastic membrane stretching region, III) 및 소성 불안정영역(plastic instability region, IV)이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 저온으로 갈수록 탄성 굽힘 영역과 소성 굽힘 영역의 경계부분에서부터 SP 곡선의 기울기가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 최대하중(P<sub>MAX</sub>)값도 온도가 저온으로 갈수록 증가하다가 시편의 파단이 소성불안정 영역 이전에 파단되면서 불규칙하게 나타나고 있다.

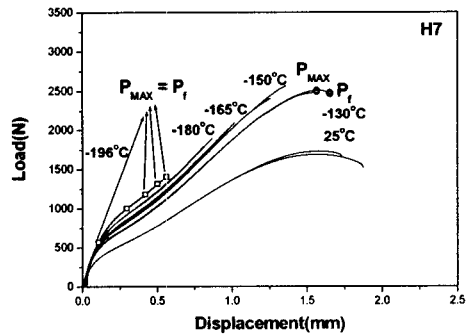


Fig. 3 Load-displacement curves from SP tests of H7 material at various testing temperatures.

Fig. 4는 온도별로 동일재료에 대하여 인장시험을 수행한 결과 중 H7 강종에 대한 결과이다. 저온으로 갈수록 항복강도( $\sigma_0$ )는 494~936MPa, 그리고 인장강도( $\sigma_{UTS}$ )는 640~1021MPa로 증가하는 것을 관찰 할 수 있다.

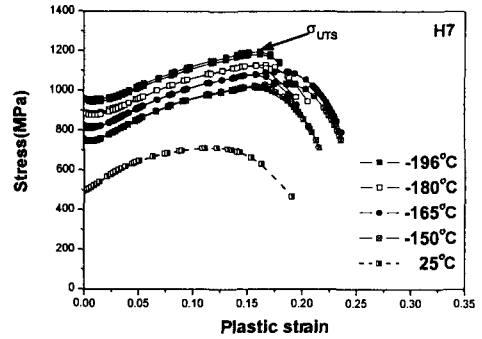


Fig. 4 Stress-plastic strain curves of H7 material in tensile tests at various testing temperature

4.2 유한요소해석을 이용한 SP 모의시험 결과  
인장물성의 변화에 따른 SP 곡선의 변화양상을 관찰하기 위하여 인장물성의 변화에 따른 SP 전사모사를 유한요소해석을 이용하여 수행하였다. 그리고 전산모사에 사용되는 유한요소해석 모델이 SP시험을 재현 할 수 있는지를 해석결과와 SP 시험결과와의 비교를 통하여 확인하였다.

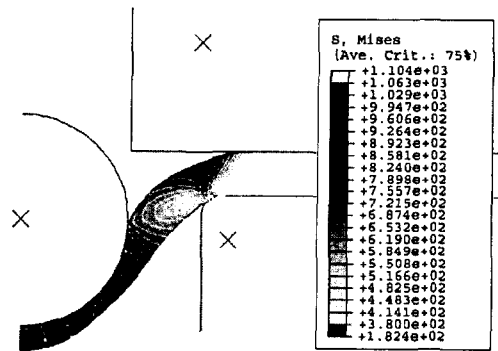


Fig. 5 The contour of von-mises stresses(MPa) in deformed FE analysis model

Fig. 5는 H3 강종의 상온 인장시험결과를 이용한 유한요소해석 결과로부터 변형 후의 SP model과 Von-mises 등가응력을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 6은 SP 해석결과 곡선과 SP 실험곡선을 비교한 것이다. Fig. 5에서 변형후의 SP model이 실험 후의 SP시편 모양과 같음을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 6에서 온도에 따른 SP 실험곡선과 해석곡선이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

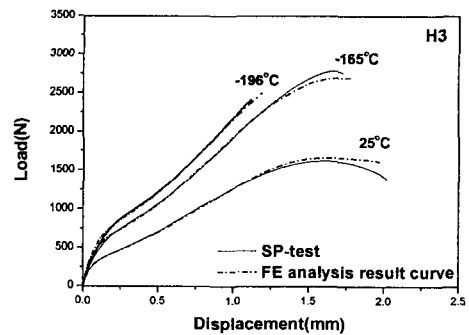


Fig. 6 Comparison of SP-test results and FE analysis results

따라서 본 연구에서 사용된 유한요소해석 모델이 SP 시험을 재현할 수 있는 것으로 판단하였으며, 인장물성을 변환시키면서 SP 시험을 전산모사 하였다.

4.3 SP 곡선과 인장물성과의 실험적 관계

인장물성과 일반적으로 관계되는 SP 곡선에서의 각 요소(parameters)들로서 최대하중( $P_{MAX}$ ), 파단하중( $P_t$ ), 항복하중( $P_y$ ) 등이 있다. 실험결과 및 해석결과로부터 인장물성의 변화에 따른 SP 곡선에서의 요소들의 변화를 관찰하여, 이로부터 실험적 관계를 고찰하였다.

항복강도와 항복하중

항복강도( $\sigma_0$ )와의 관계연구에 사용되는 항복하중은 연구자들에 따라 크게 두 가지 방법으로 나뉜다.<sup>(12,13)</sup> Fig. 7에 항복하중을 구하는 두 가지 방법을 도시하였다. 하나는 탄성 굽힘 영역의 기울기를 갖는 직선을 원점에서 시편의 초기두께의 10% 거리만큼 수평 이동하여 SP 곡선과 만나는 점의 하중 값을 이용하는 수평이동방법(offset method)이며,<sup>(12)</sup> 다른 하나는 탄성 굽힘 영역에서의 기울기 직선과 소성 굽힘 영역에서의 기울기

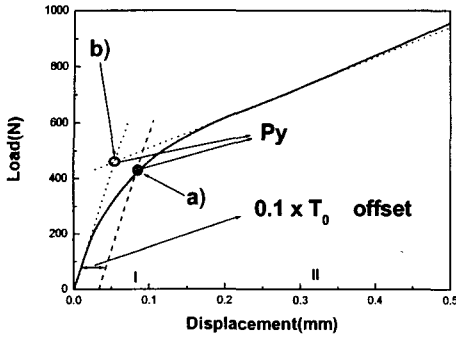


Fig. 7 Two methods of defining yield load(Py)

직선이 만나는 교점의 하중 값을 이용하는 교점방법(intersection point method)이다.<sup>(13)</sup> 앞에서 설명한 두 가지 방법을 모두 이용하여 SP 시험결과로부터 항복하중을 구하였다. 이를 인장시험결과에서의 항복강도와 비교하여 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8(a)는 수평이동방법을 이용한 항복하중과 항복강도의 비교이며, Fig. 8(b)는 교점방법을 이용한 항복하중과 항복강도의 비교이다. Fig. 8(b)의 교점방법을 이용한 항복하중이 Fig. 8(a)에 비하여 항복강도와와의 관계가 보다 선형적으로 나타나고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 실험적인 결과의 비교에서 항복하중을 구하는 두 가지 방법 중 교점방법이 보다 적합한 방법임을 의미하는 결과이다. 이러한 결과는 유한요소해석을 이용한 SP 시험의 전산모사결과에서도 나타나며 각각의 방법으로 구한 항복하중이 항복강도 이외의 인장물성에 어떠한 영향을 받는지도 확인 할 수 있다.

Fig. 9에 항복강도는 500, 700MPa로 고정하고, 식1)의 H와 N을 변화시켜 전산모사를 실시한 SP 해석곡선의 탄성 굽힘 영역과 소성 굽힘 영역 부분을 확대하여 나타내었다. Fig. 9를 이용하여 항복하중을 구하는 두 가지 방법에 대한 보다 세밀한 고찰을 할 수 있다. 수평이동방법은 동일한 항복강도로 가정된 SP 해석곡선에서 H와 N의 변화에 따라 값이 변할 수 있음을 보여주고 있다. 반면에 교점을 이용한 방법은 가정된 항복강도에 따라 일정한 값을 나타내고 있다. Fig. 9에 제시된 각각의 SP 해석곡선들에 대한 항복하중을 두 가지 방법을 각각 사용하여 Fig. 10에 나타내었

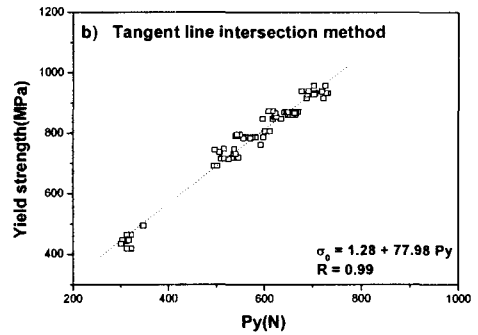
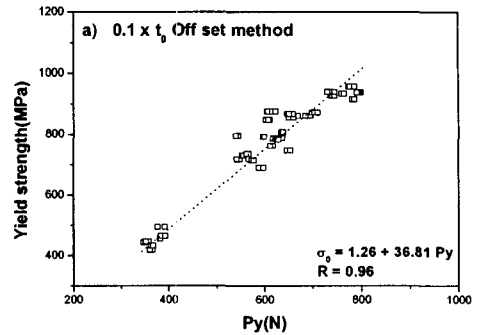


Fig. 8 The relationship between yield strength( $\sigma_0$ ) and yield load(Py) defined by a) offset method & b) intersection point method

다. 교점방법으로 구한 항복하중의 값은 경화지수에 상관없이 항복강도에만 영향을 받고 있음을 확인 할 수 있다.

또한 실제 인장시험으로부터 구한 항복강도와 같은 온도에서의 SP 곡선으로부터 구한 항복하중을 비교함으로써 항복강도와 항복하중이 1:1 대응관계에 있음을 실험적으로도 확인할 수 있었으며, 이는 다음과 같은 실험식으로 표현할 수 있었다.

$$\sigma_0 = a \times Py + \beta \quad (2)$$

이때, 실험결과로부터 a는 1.28,  $\beta$ 는 77.98의 값을 구할 수 있었다. 항복하중의 단위는 N이며, 항복강도의 단위는 MPa이다.

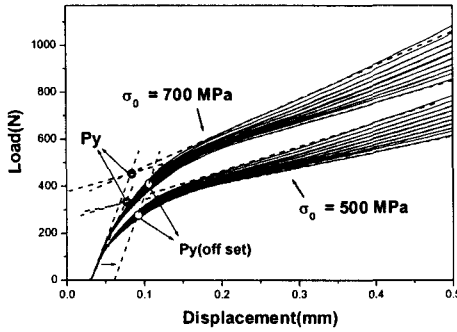


Fig. 9 Two methods of defining the yield load(Py) and their application on FE analysis results

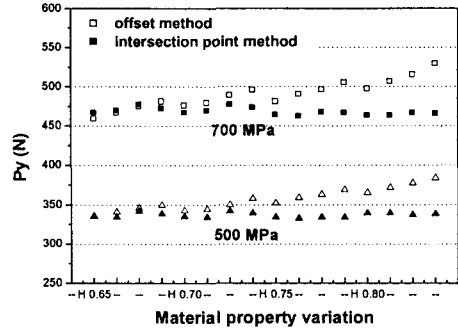


Fig. 10 The yield loads(Py) measured from FE analysis results by different methods

인장강도와 최대하중

각각의 SP 시험결과로부터 최대하중(P<sub>MAX</sub>)을 구하여 인장시험 결과에서의 인장강도(σ<sub>UTS</sub>)와 비교하여 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 11에서 전체적인 분포에서는 인장강도와 최대하중과의 관계를 찾을 수 없다. 그러나 소성불안정 영역이 발생하는 SP 곡선과 소성불안정 영역 전에서 파괴가 일어나는 SP 곡선에서의 최대하중을 구분하여 도시한 결과 소성불안정 영역 이후에 파단된 SP 곡선의 최대하중과 인장강도가 선형적인 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다.

소성불안정 영역 이전에 파괴가 일어나는 SP 곡선에서의 최대하중은 무작위로 산포되는 경향을 보였다. 이는 소성불안정 영역 이전에 파괴가 일어나는 -196℃에서의 SP 곡선에서는 최대하중이 여러 값으로 나타날 수 있는 반면에 -196℃의 인장곡선에서는 인장강도가 하나의 값으로 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 소성불안정 영역 이후에 파단 되는 SP 곡선에서의 최대하중은 인장강도와 같이 SP 곡선에 따라 동일한 값을 나타내고 있다. Fig. 11과 같은 현상은 SP 시험에서 시편의 파단 되는 양상이 소성불안정 영역을 기점으로 달라짐을 의미한다. 소성불안정 영역 이전에서의 파단은 재료가 가해진 응력을 수용하지 못하여 발생하는 취성 파괴(brittle fracture)이며, 확실적인 요소가 파괴(fracture)에 영향을 미친다. 소성불안정 영역 이후의 파단(failure)은 재료가 국부적으로 발생하는 변형량을 수용하지 못함으로서 발생하는 파단(failure)으로 설명할 수 있

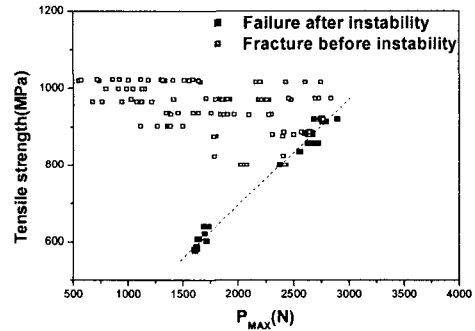


Fig. 11 The relationship between tensile strength (σ<sub>UTS</sub>) and maximum load(P<sub>MAX</sub>) in SP tests

며, 구조적 형상과 재료의 강도계수(H), 가공경화지수(N)가 영향을 미친다. 확실적 영향이 있는 소성불안정영역 이전의 최대하중은 necking(necking) 현상으로 인하여 발생하는 인장강도와 관계를 설정하기에는 물리적 의미가 다름을 알 수 있다. 그러므로 인장강도와 최대하중과의 관계는 소성불안정영역 이후에 파단 되는 곡선에서 비교가 가능하며 이러한 실험적 관계를 식 (3)과 같이 나타내었을 때 α' 은 0.27, β' 은 143.6의 값을 얻을 수 있었다. 이때 최대하중의 단위는 N이며, 인장강도의 단위는 MPa이다.

$$\sigma_{UTS} = \alpha' \times P_{MAX} + \beta' \quad (3)$$

이와 같은 결과에서 SP 곡선에서의 각 요소들과 표준시험법에서의 유추하고자 하는 어떠한 값과의 실험적 관계연구에 있어서는 SP 곡선에서의 각 요소와 표준시험법에서의 값이 내포하고 있는 물리적 현상도 고려되어야 함을 알 수 있다.

인장물성에 따른 SP 곡선의 기울기 변화

인장물성의 변화에 따른 해석곡선의 기울기 변화를 관찰함으로써 강도계수와(H)와 가공경화지수(N)가 SP 곡선에 주는 영향을 고찰하였다.

Fig. 12는 강도계수(H)가 0.75로 가정되었을 때 가공경화지수(N)와 항복강도의 변화에 따른 SP 해석곡선들이다. Fig. 12에서 H와 N의 변화에 따른 SP 곡선의 변화는 각 영역에서의 기울기 변화로 나타남을 볼 수 있다. 그러나 항복강도가 달라지면 강도계수와 가공경화지수의 값이 같더라도 각 영역에서의 기울기 또한 달라진다. 그러므로 각 영역에서의 기울기를 항복강도에 독립적으로 나타낼 필요성이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 SP 곡선에서의 하중 축을 항복강도로 나누어 normalize 하였다. 그러한 결과 Fig. 13과 같이 강도계수와 가공경화지수의 값이 같으면 항복강도가 달라지더라도 동일한 기울기를 갖는 곡선을 얻을 수 있었다.

각 영역에서의 기울기 변화를 측정하기 위해 Fig. 14와 같이 강도계수와 가공경화지수의 변화에 민감하게 반응하는 소성 굽힘영역에서의 기울기와 소성막 신장영역에서의 기울기를 각각  $S_{P.B.}$ 와  $S_{P.M.}$ 으로 정의하였다. Fig. 13과 같이 항복강도( $\sigma_0$ )로 normalize된 SP 해석곡선에서 기울기의 변화를 인장물성의 변화에 따라 Fig. 15와 Fig. 16에 도시하였다. Fig. 15는 H의 변화에 따른 소성막 신장영역의 기울기( $S_{P.M.}$ )이며, 선형적인 관계가 명확하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 영역에서의 기울기를 N의 변화에 따라 나타내어도 Fig. 15와 같은 경향을 나타낸다. 이는 소성 막 신장영역의 기울기가 H와 N의 값에 따라 일정한 경향을 보이고 있음을 의미한다.

Fig. 16은 H의 변화에 따른 소성 굽힘영역의 기울기( $S_{P.B.}$ )를 나타낸 것이다. 소성 굽힘영역에서의 기울기에서는 H와 N이 작은 값을 갖는 부분에서 선형적인 관계가 다소 떨어지나, 전체적으로 앞서 Fig. 15에서와 같이 선형적인 관계가

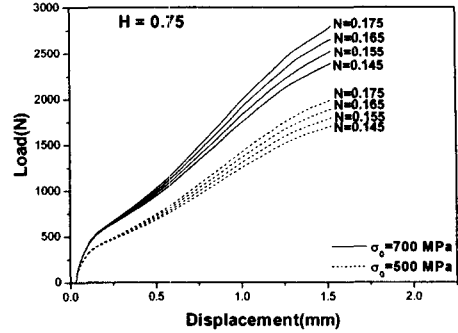


Fig. 12 The FE analysis result curves with various material properties

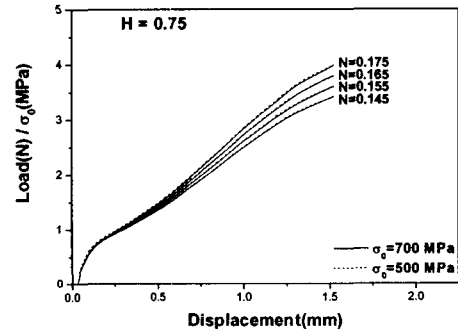


Fig. 13 The FE analysis result curves normalized by yield strength( $\sigma_0$ )

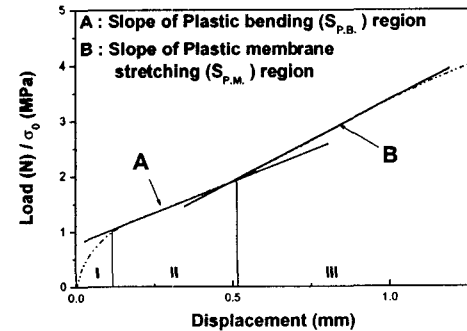


Fig. 14 Definitions of slopes in SP curves

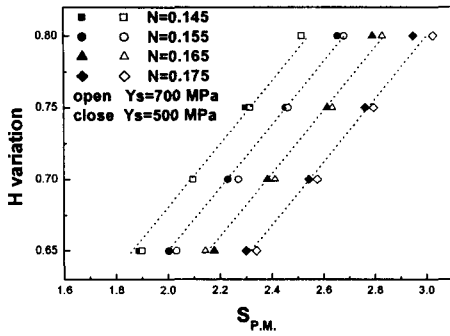


Fig. 15 The variation of slopes( $S_{P.M.}$ ) in FE analysis results with different H

나타나는 것을 볼 수 있다. N에 대해서 소성 굽힘영역의 기울기를 나타내어도 Fig. 16과 같은 현상을 볼 수 있다. 소성 굽힘영역에서는 기울기의 변화가 매우 작고, 항복강도의 영향을 동시에 받기 때문에 작은 H와 N에서 다소 선형성이 떨어지는 것으로 생각된다. 전체적으로 H와 N의 값이 변화함에 따라 SP 곡선의 기울기  $S_{P.M.}$  및  $S_{P.B.}$ 가 선형적인 경향을 갖는 것을 확인할 수 있었으며, SP 곡선으로부터 H와 N 값의 유추도 가능할 것으로 판단된다.

SP 시험결과와 인장물성사이의 경험적 관계를 정립하기 위해서는 수많은 실험 data가 필요하지만, 본 연구에서와 같이 전산모사기법을 병행함으로써 보다 체계적이고, 적은 실험 data만으로도 경험적 관계를 도출 할 수 있었다.

## 5. 결론

원자로 압력용기용 저합금강에 대하여 소형편치 시험과 인장시험에 대한 SP 곡선과 인장물성과의 관계를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SP 시험결과로부터 항복하중을 구하는 두 가지 방법 중 탄성 굽힘 영역과 소성 굽힘 영역의 기울기 직선이 만나는 교점에서의 하중 값으로 항복하중을 정의하는 방법이 항복강도의 추정 에 더욱 적합하였다.

(2) SP 최대하중의 경우 소성불안정 영역 이후에 파단 된 곡선의 값에서 인장강도와 선형적인 경향이 나타났으며, 이로부터 실험적인 관계를

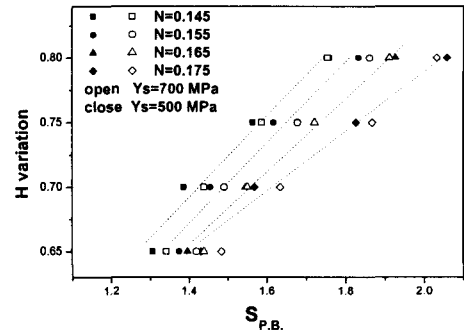


Fig. 16 The variation of slopes( $S_{P.B.}$ ) in FE analysis results with different H

구할 수 있었다.

(3) SP 곡선의 기울기( $S_{P.B.}$ ,  $S_{P.M.}$ )가 강도계수와 소성경화지수의 변화에 일관된 변화 양상을 보였으며, 이로부터 SP 곡선의 기울기가 강도계수, 소성경화지수와 밀접한 관계가 있음을 SP 해석곡선의 분석을 통하여 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 과기부의 원자력연구개발사업중 파괴특성평가 및 향상기술개발 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Ghosh, A.K. and Hecker, S.S., 1975, "Failure in Thin Sheets Stretched over Rigid Puncher," *Metallurgical Transactions*, Vol. 6A, pp.1065~1074.
- (2) Lucas, G.E., Okada, A., and Kiritani, M., 1986, "Parametric Analysis of the Disc Bend Test," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 141~143, pp.532~535.
- (3) Kameda, J. and Mao, X., 1992, "Small-Punch and TEM-Disc Testing Techniques and Their Application to Characterization of Radiation Damage," *Journal of Materials Science*, Vol. 27, pp.983~989.
- (4) Kim, J.K., Lee, J.K., Yoon, K.B., and Chung, S.H., 1991, "Study on Evaluation by Small Punch



- Test for Material Degradation of Steam Tubes of Fossile Electric Power Plant," *Transactions of KSME (A)*, Vol. 15, No. 5, pp.1665~1673.
- (5) Fleury, E. and Ha, J.S., 1998, "Samll Punch Tests to Estimate The Mechanical Properties of Steels for Steam Power plant: I. Mechanical Strength," *Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp.699~706.
- (6) Fleury, E. and Ha, J.S., 1998, "Samll Punch Tests to Estimate The Mechanical Properties of Steels for Steam Power plant: II. Fracture Toughness," *Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp.707~713.
- (7) Mao, X. and Takahashi, H., 1987, "Development of A Further-Miniatured Specimen of 3mm Diameter for TEM Disk( $\phi$ 3mm) Small Punch Tests," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 150, pp.42~52.
- (8) Mao, X., Shoji, T., and Takahashi, H., 1987, "Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by combined Recrystallization-Etch Method and Rigid Plastic Analysis," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 15, pp.30~37.
- (9) Lee, W.K., Metzger, D.R., Donner, A., and Lepik, O., 1998, "The Use of a Small Punch Test Procedure to Determine Mechanical Properties," Small Specimen Test Techniques, *ASTM STP 1329*, W. R. Corwin, S. T. Rosaski, and E. Van Walle Eds., ASTM, pp.539~556.
- (10) Foulds, J.R., Woytowitz, P.J., Parnell, T.K., and Jewett, C.W., 1995, "Fracture Toughness by Small Punch Testing," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 23, pp.3~10.
- (11) Yu, H.S., Nho, S.H., Chung, S.H., and Ong, J.W., 1995, "A Study on the Small Punch Test for Fracture Strength Evaluation of CANDU Pressure Tube Embrittled by Hydrogen," *Transactions of Korea Society Nondestructive Testing*, Vol. 15, No. 4, pp.510~521.
- (12) Okada, A., Hamilton, M.L., and Garner, F.A., 1991, "Microbulge Testing Applied to Neutron Irradiated Materials," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 179/181, pp.445~448.
- (13) Xu, Y., Ning, G., Zhang, C., Yu, Q., and Xu, Y., 2000, "Application of The Miniature Specimen Technique to Material Irradiation Tests and Surveillance for Reactor Component," *Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 77, pp. 715~721.