

볼 압입 시험의 기하학적 조건과 유동 응력 곡선의 관계에 관한 연구

이병섭* · 이호진* · 이봉상*
(2003년 5월 15일 접수)

Evaluation of Flow Stress using Geometric Conditions of Ball Indentation Tests

B. S. Lee, H. J. Lee and B. S. Lee

Abstract

Ball indentation tests have been used to estimate the mechanical properties of materials by several investigators. In this study, load-depth curves from ball indentation tests were analyzed using the geometric conditions of the contact between ball and specimen. A series of numerical calculations and experimental results showed that the contact load-depth curves could be simplified by linear functions. Once we obtained the contact indentation depth from linearizing the experimental indentation curves, the estimation process of the flow properties became straight-forward and the scatter of results could be drastically reduced.

Key Words : Indentation Test, Evaluation of Flow Stress, Non-Destructive Test, Automated Ball Indentation, Indentation Load-Depth Curve, Work-Hardening Exponent

1. 서론

60년대 이후로 산업의 근대화 과정을 거친 우리나라의 경우 2000년대에 들어서 많은 기반 시설 및 구조물이 노후화 되어 그 잔존 수명을 재평가할 필요성이 대두되고 있다. 그러나, 수명 평가를 위한 재료의 물성 시험에 대한 기존의 시험 방법들은 대부분, 시편의 파괴나 손실을 통한 파괴 인성 및 피로 여부를 따지고 있기 때문에, 그 비용의 문제만 아니라, 시설을 유지한 상태에서 적정 시험 시편을 생산하는 문제에 부딪혀 많은 어려움을 겪고 있다. 이에, 비파괴적인 방법으로 압

입시험이 제안되었고, 또한 이의 보급에 따라 KS 규격화도 진행되고 있다. 이중 자동화 볼 압입 시험의 경우 2003년에 KS 규격⁽¹⁾이 제정되었고 재료 물성의 기본이 되는 유동 응력을 구하기 위한 연구⁽²⁻³⁾가 그 동안 많이 수행되어 왔으며, 국내에서도 상당한 연구가 진척되었다.⁽⁴⁻⁵⁾ 더욱이, 볼 압입 시험을 이용한 물성 평가를 사용하면, 원자력 발전시설의 경우 용접부와 같이 그 측정부분이 작고, 물성 시험편을 생산하기 어려운 부분에서도 요구된 안전성 확보를 위한 시험을 수행하여, 시설의 해체 없이 방사선 조사 및 열 취성 저하 현상에 대한 수명을 보다 정확히 평가함으로써

* 한국원자력연구소 원자력재료기술개발부

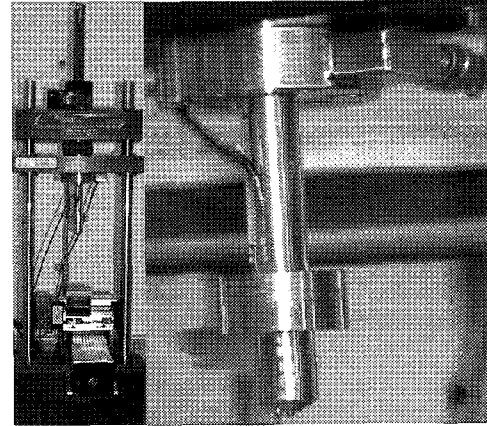
써 그에 따른 적절한 조치와 제반 건설에 따른 비용을 절감할 수 있어 관련 분야에서 많은 연구가 있어 왔다.⁽⁶⁾ 그러나, 현재의 볼 압입 시험을 이용한 물성 취득 방법이 주로 실험과 경험적 자료에 의존하여 아직 그 신뢰도에 있어 사용자들에게 확신을 심어 주지 못하고 있다. 그렇기 때문에, 그 동안 소형 시험편에 대한 연구팀의 경험과 지식을 토대로 본 연구는 볼 압입 시험의 유동 응력 구하는 방법을 기하학적 조건으로 재정립하고, 이를 기존의 방법과 비교 분석하여 보다 신뢰성을 갖춘 물성 취득 방법을 제안 하고자 한다.

2. 압입하중-변위곡선

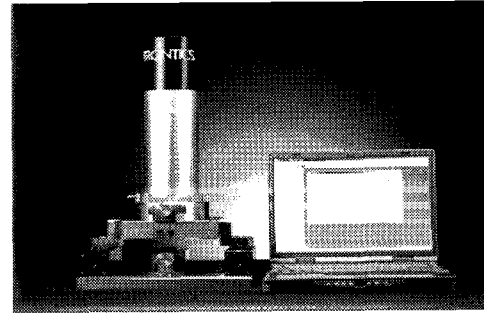
구형 압입자를 이용한 자동화 볼 압입 시험기는 해외에서 개발된 이후로 국내외의 다양한 회사에 의해 보급되고 있다. 이 중 국내에 가장 보급이 많이 되어 있고, 본 연구팀에서 보유하고 있는 2종의 시험기를 Fig. 1에 보여 주고 있다. (a)는 보급 초기의 해외에서 개발된 모델이고, (b)는 국산의 최신 모델로 현재 가장 활발히 보급되고 있다. 보여지고 있는 볼 압입 시험기에서는 압입 하중-깊이 곡선을 출력값으로 가지며, 장치의 통제를 위하여 연결된 컴퓨터의 프로그램에서는 압입 하중-깊이값의 적절한 해석과 분석을 통하여 응력-변형률 곡선, 항복 및 인장 응력, 경도값 등으로 제공하여 준다.

현재 볼 압입 시험기는 소형 시험편이나, 용접 시험편에서 재료 물성을 취득하는데 사용되고 있으며, 정확한 압입 하중-깊이 곡선에 대한 요구와 이해가 인장응력 곡선을 예측하기 위하여 필요하다. 또한, 그 동안 Tabor⁽¹⁾와 Sneddon⁽⁷⁾이후로 많은 연구가 수행되어 왔으나, 대부분 경도 시험에서의 압입이 끝난 후 압흔(壓痕)에 관련된 해석에 의존하고 있어, 본 연구에서는 기존의 방법 보다는 압입 시험에 의해 발생되는 변형이 진행되는 동안에 볼 압입 변형에 따른 기하학적 조건에 중점을 두고 살피고자 한다. 이러한 관점의 차이는 기존의 방법이 하중 제거 곡선의 적절한 해석에 중점을 두고 있는 반면, 본 연구에서는 하중 진행시의 값들을 해석하도록 하고 있다.

압입시험에 의해 얻어지는 일반적인 압입 하중-깊이 곡선을 Fig. 2에 나타내고 있다. Method 1은 참고문헌 4와 Fig. 1의 (b) 시험기에 의한 방법을 의미한다. 또한, 유한요소해석 값은 ABAQUS(version 6.3)⁽⁸⁾을 이용하여 얻어졌으며, 유한요소



(a)



(b)

Fig. 1 Photo of automated ball indentation testers

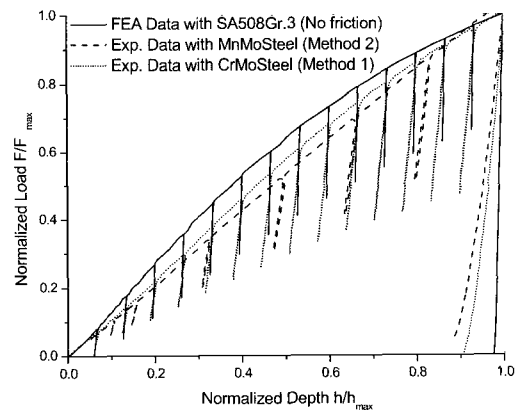


Fig. 2 Typical F-h response of ABI (automated ball indentation) test

해석을 위해 사용된 모델과 해석 조건은 Fig. 3에 나타내었다. 반경 0.25mm의 압입자는 텅스텐이 사용되어 압입되는 소재에 비교하여 강성이 크며

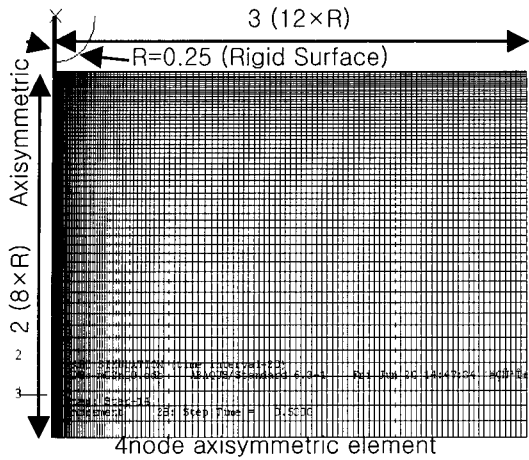


Fig. 3 Schematic of indentation FEM model

로 강체 표면으로 처리하였으며, 소재의 자유면에 영향을 받지 않도록 폭 방향으로 12R을, 깊이 방향으로로는 하단 경계조건에 영향을 받지 않도록 8R을 채용하였다. 실제 실험에 사용 및 추천되고 있는 시편에서의 압입점 사이 거리인 10R에 근거하여 폭과 깊이를 채용하였다.⁽³⁻⁵⁾ 참고문헌 5에서 추천하고 있는 4절점 선형 축대칭 요소가 해석에 사용되었으며, 압입되는 부분을 중심으로 가중값을 부여하여 보다 적은 요소로 해의 정확성을 높이도록 하였다. 중심부 절점에는 축대칭 경계조건을, 밀면에서는 지지 경계조건을, 나머지 부분에서는 자유면으로 처리하였으며, 압입자와 소재간 접촉은 상수 마찰 조건으로 처리하였다.

일반적으로 주어지는 Fig. 2의 압입 하중-깊이(F-h) 곡선을 살펴서 그 관계를 적합화 곡선으로 구하면, 다음과 같이 멱급수로 표현될 수 있다.⁽⁷⁾

$$F = \alpha h^\beta \tag{1}$$

(1)식의 지수 β 는 압입 깊이 h 가 작은 경우 1보다 크고, 일반적인 금속재료의 경우 압입 깊이가 압입자 반경 R 의 30%를 초과하는 경우 β 는 1보다 작게 된다. 그 이유를 Fig. 4에 보여지는 구형 압입 시험의 기하학적 관계를 통해 (1)식과 같이 살펴보면, 압입자가 접촉하는 조건에 따라 파일업(pile-up)과 싱크인(sink-in)현상이 발생하고, 압입 진행에 따라 접촉각 γ 가 변하기 때문이다.

이러한 여러 조건에 따른 압입 접촉 깊이 h_c 를

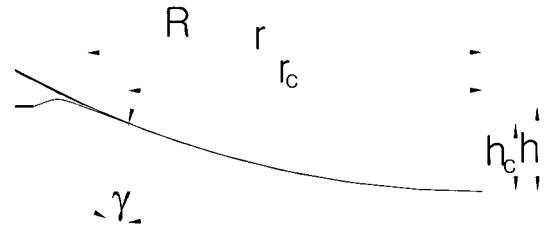


Fig. 4 Schematic representation of ball indentation test

멱급수 식으로 고려하면, 압입 깊이가 작을 때는 싱크인으로 인한 접촉 깊이의 상대적 감소로 β 를 1에 근접시키며, 압입 깊이가 큰 경우 파일업으로 인한 접촉 깊이의 상대적 증가로 β 를 1에 근접시킨다. 또한, 구형 압입자는 압입이 진행될수록 접촉각 γ 가 커지기 때문에 압입 방향 하중의 증가가 둔화되고 재료 물성 값을 획득하는 필요한 충분한 압입 깊이인 $0.6R^{(9)}$ 까지 압입 한 경우 β 는 1보다 작게 된다.

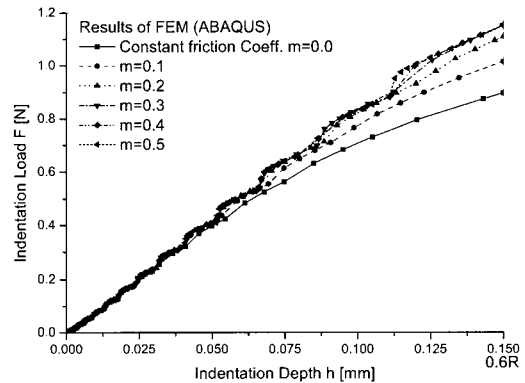


Fig. 5 Effect of friction on ball indentation load -depth curve

압입 하중-깊이 곡선에 대한 접촉각에 의한 영향은 마찰에 의해 크게 좌우되는데, 그 영향을 보기 위해 Fig. 5에서 상수 마찰 계수 m 을 증가시키며 유한요소해석으로 모사한 결과를 살펴보면, 마찰이 커지는 경우에는 β 가 1에 근접하는 것으로 나타났다. 그러나, 마찰이 큰 경우 떨림 현상을

수반하게 되므로 신뢰성 있는 값을 얻기에는 적절하지 못한 것으로 판단된다. 이러한 현상은 실험에서도 종종 나타나는 현상으로 Fig. 2 에서 관찰되는 Method 1 의 결과가 Method 2 에 비교하여 다소 불룩한 현상을 나타내는 것은 사용된 압입사와 시편 사이의 마찰값이 상대적으로 작았기 때문이다.

결국, 압입 하중-깊이 곡선은 압입 깊이 h 와 나일업, 싱크인 그리고, 접촉각 γ 와 마찰 m 에 따라 영향을 받는다. 각 변수들은 모두 압입 깊이와 연관이 있어, Fig. 6 에 보여지는 바와 같이 이를 고려한 압입 깊이를 접촉 깊이 h_c 라 정하고 이를 정확히 구하여야 한다. 또한, 기존의 연구는 압입 하중 제하 곡선에서 한정된 하중 제하 숫자만큼의 h_c 를 구하고 있으나, 본 연구에서는 압입 하중 F 와 실제 접촉 깊이 h_c 가 Fig. 6 과 같은 관계를 가질 것으로 생각하여 깊이의 변화에도 (1)식이 변하지 않을 조건인 β 가 1 인 경우에 대한 연속 함수를 가정하고 재료 물성을 구함으로써 그 타당성을 입증하고자 한다.

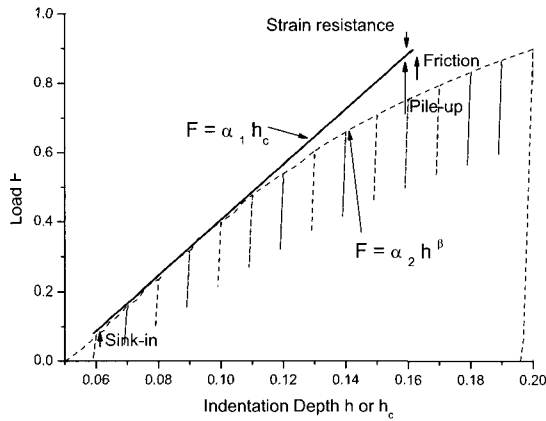


Fig. 6 Schematic representation of various effects on ball indentation load-depth curve

3. 압축 응력 곡선

압입 하중-깊이 곡선을 이용하여 재료의 인장 곡선을 구하는 기존의 예측은 경도시험의 압흔 연구에 근거하고 있기 때문에 하중 제하 곡선의 기울기에 의존하고, 이를 통하여 접촉 깊이 h_c 를 구한다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾ 그리고, h_c 를 이용하여 압입 되는 전계 표면에 일정한 압력이 존재하는 경우에 대해

서 해석하고 있다.

압입 방향으로 기여된 하중 관계로부터 실제 접촉 반경 r_c 를 구하고, 하중 F 를 접촉 면적 πr_c^2 으로 나누어 구한 평균 접촉 압력 p_m 은 압축 인 응력 σ 와 일정한 비가 성립한다.^(3,8) 이때, 그 비로써 소성구속인자 ψ 를 도입하면 평균 접촉 압력으로 응력을 나타낼 수 있으며, 인장과 압축값의 차이도 소성구속인자의 결정으로 그 효과가 상쇄될 수 있다.

$$p_m = \frac{F}{\pi r^2} = \frac{F}{\pi(2Rh - h^2)} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{p_m}{\psi} \quad (3)$$

(1)식의 F 와 β 관계를 이용하여 β 을 변화시키며 F 을 구한 후 이를 (2)식에 대입하여 Fig. 7 에 도시하였다. 이를 살펴보면, β 가 1 보다 작을 경우 압입 깊이가 커질수록 압축 응력이 증가하는 것을 표현하지 못한다. 그런 이유로, 응력과 평균 접촉 압력인 (3)의 관계가 되기 위해서는 β 가 1 보다 크거나 같아야 한다. 그러나, 실험에 의해 구해지는 Fig. 2 와 같은 일반적인 압입 하중-깊이 곡선을 적합화 하여 (1)식을 구하는 경우 β 가 1 보다 크지가 않다. 그렇기 때문에 (3)식의 적용에 있어 실험 곡선의 적합화에도 만족하고 변형 이론에도 만족하는 조건인 β 가 1 인 경우로 접촉 깊이 h_c 의 적합화를 시도하였다.

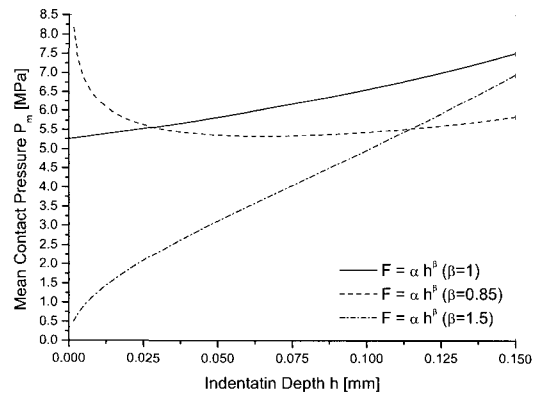


Fig. 7 Mean contact pressure on indentation F-h curve

이때, 소성구속인자 ψ 를 상수로 보지 않고 탄성, 탄-소성, 소성영역에 따라 다른 값으로 표현하기도 하지만, 이는 재료에 따라 다르고 다분히 경험적 근거에 의존한다.⁽³⁾ 또한, 실제 압입 동안 탄성에 의한 변형 영역은 상대적으로 작기 때문에 그 효율성이 떨어진다.

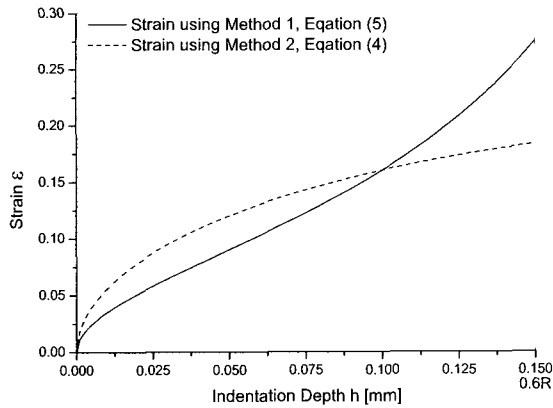


Fig. 8 Typical strain-depth curve of ball indentation test

변형률의 경우에 있어서는 접촉 반경 r 과 압입자 반경 R 를 이용한 다음의 (4)식과 (5)식이 많이 사용된다.

$$\varepsilon = \xi_1 \frac{r}{R} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \xi_2 \frac{r}{R-h} \quad (5)$$

그 관계를 보기 위해서 Fig. 8 에서는 (4)식의 제안^(3,10)과 (5)식의 제안^(4,9)에 의해 구한 변형률을 압입 깊이에 따라 도시하였다. 이때, 초기에 급격한 증가를 보이는 것은 볼 압입 시험에서는 압입 면적이 0 에서부터 시작되기 때문에 이전 체적으로 진행 체적을 나누는 변형률의 특성때문이고, 0.3R 을 지나면서 두 곡선은 차이를 보인다. 변형 이론에 의하면, 압입 깊이가 깊어질수록 변형되는 체적이 점점 크게 증가하기 때문에 평균 변형률 증가량이 점점 커져야 한다. 그렇기 때문에 0.3R 이후로 상승하는 경향을 보이는 (5)식의 제안이 현상에 보다 적합한 설명이라 할 수 있다. 이는 (5)식의 경우 접촉각 γ 에 따른 효과를 고려하였

기 때문이다.⁽⁴⁾

(1)식에서 주어진 압입 하중 함수 F 의 지수 β 가 1 보다 작으면, (5)식에서 보논바와같이 압입 깊이에 따라 변형률이 증가하더라도, 압입 깊이에 따라 (2)식의 평균 접촉 압력은 감소하게 되어 적절한 응력 곡선으로 표시될 수 없다. 또한, 기존의 Method 1 과 Method 2 는 0.4R 이하의 압입 깊이에 대한 하중 제하 곡선으로 구한 압입 하중 F 와 접촉 깊이 h_c 를 사용하고 있는데, 그 영역에서 (1)식의 지수 β 값은 실험적으로 1 에 근접한다. 그러므로 압입 하중 F 와 실제 압입 깊이 h_c 곡선의 지수값 β 을 1 로 보고 선형화 함수로 사용하는 것은 큰 무리가 없을 것이다.

β 값을 1 로 근사하였을 경우, 재료의 특성인 가공경화지수와 관계를 살피기 위해 응력-변형률 관계식을 항복 응력 σ_0 를 사용 무차원화하여 가공경화지수 n 에만 의존하도록 (6)식과 같이 가정하고, 가공경화지수를 증가시키면서 유한요소해석으로 모사하였다. 이때, 옴셋(offset)량 ε_0 는 0.002 를 선택하였다.

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^n \Rightarrow \hat{\sigma} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^n \quad (6)$$

(6)식에 따라 서로 다른 가공경화지수를 갖는 재료에 대해 해석하여 얻어진 압입 하중-깊이 값을 Fig. 9 에 나타내었다. 이를 통하여 압입 하중-깊이 선도는 1 차 선형 관계로 근사화할 수 있음을 알 수 있으며, 곡선의 기울기 α 가 가공경화지수값에 비례하는 것을 알릴 수 있다.

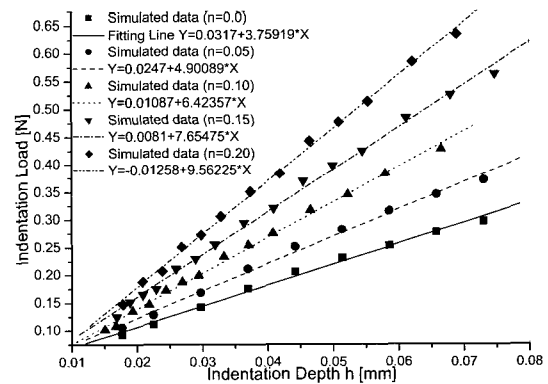


Fig. 9 Effect of work hardening exponent on F-h curve

이를 근거로 하여 유동 특성 평가에 사용되는 압입 하중-깊이 관계를 1 차 선형화 연속 함수로 적합화하면 (2), (3), (5)식을 이용한 계산을 통하여 수치적으로 더욱 안정적인 해석 절차를 세울 수 있다. 또한, 기존에 사용되는 회귀적 방법⁽³⁻⁵⁾에 비교하여 간편한 절차를 가진다.

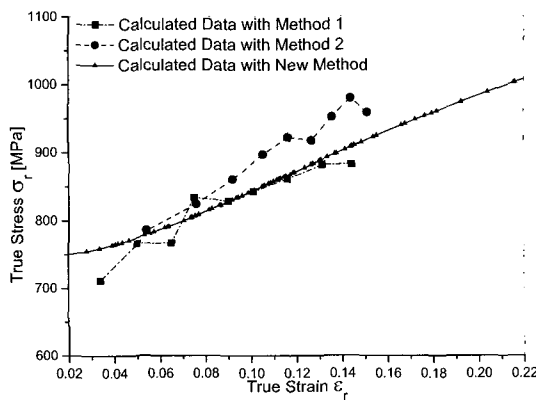


Fig. 10 Comparison of true stress/true strain curve

기존의 해석 절차와 새롭게 제안된 해석절차에 따라 크롬 몰리브덴 강의 경우에 대하여 실험에 의해 구해진 압입 하중-깊이 값을 응력-변형률 관계로 구한 결과를 Fig. 10 에 도시하고 있다. 그 결과, 본 연구에서 제안된 β 을 1 로 근사한 방법은 h_c 을 연속 함수로 구하고 응력-변형률 곡선을 얻기 때문에 보다 넓은 변형률 범위에서 값을 얻을 수 있고, 각 압입 깊이 마다 구해지는 해석 결과를 응력-변형률 식으로 적합화하였을 경우 발생하는 편차 또한, 무시할 정도로 줄일 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 볼 압입 시험의 기하학적 조건을 고려하여 압입 하중-깊이 선도에 영향을 미치는 인자를 살피고 압입 하중-깊이 선도를 1 차 선형 함수로 근사화하여 재료유동특성을 해석하는 방법을 제시하고 그 타당성을 살펴보았다. 또한, 해석 및 실험 결과는 압입 하중-깊이 선도의 1 차 선형화의 유용성을 뒷받침해주었으며, 이에 근거하여 구한 유동 응력 값들은 보다 넓은 범위에서 안정된 경향을 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 사업 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) KS 규격집, 2003, “금속재료의 계장화 압입시험 - 압입 인장 물성 평가”, KSB0950.
- (2) D. Tabor, 1951, “The hardness of metals”, Oxford university press, New York.
- (3) F. M. Haggag, 1993, “In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System”, ASTM STP 1204, pp. 27~44.
- (4) 안정훈, 최열, 권동일, 2000, “압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성 유동특성 평가”, 대한 금속·재료학회지, Vol. 38, No. 12, pp. 1606~1611.
- (5) 이형일, 이진행, 2001, “유한요소해에 기초한 물성평가 압입이론”, 대한기계학회논문집 A 권, Vol. 25, No. 11, pp. 1685~1696.
- (6) T. S. Byun, J. H. Hong, F. M. Haggag, K. Farrell, E. H. Lee, 1997, “Measurement of through-the-thickness variations of mechanical properties in SA508 Gr.3 pressure vessel steels using ball indentation test technique”, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 74, pp. 231~238.
- (7) I. N. Sneddon, 1965, “The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile”, Int. J. Eng. Sci., Vol. 3, No. 1, pp. 47~57.
- (8) ABAQUS Manual Version 6.3, 2002.
- (9) 진은채, 박주승, 권동일, 2003, “인장물성 평가를 위한 연속압입시험법의 실험조건 최적화”, 대한 금속·재료학회지, Vol. 41, No. 2, pp. 83~89.
- (10) M. D. Mathew, K. L. Murty, 1999, “Non-destructive studies on tensile and fracture properties of molybdenum at low temperatures”, J. mat. sci., Vol. 34, pp. 1497~1503.
- (11) J. L. Bucaille, S. Stauss, E. Felder, J. Michler, 2003, “Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters”, Acta Materialia 51, pp. 1663~1678.