

압입 시험의 기하학적 조건과 유동 응력 선도와의 관계에 관한 연구

이병섭*·이호진*·이봉상*

Evaluation of Flow Stress using Geometric Conditions of Ball Indentation Test

Byoung-Seob Lee, Ho-Jin Lee, and Bong-Sang Lee

Abstract

Ball indentation tests have been used to estimate the mechanical properties of materials by some investigators. In this study, load-depth curves from ball indentation tests have been analysed using the geometric conditions of ball indentation. Series of numerical calculations and experimental results showed that those curves could be simplified by linear functions. After linearizing the indentation curves, the estimation process of the flow properties became straight forward and the scatter of results could be drastically reduced.

Key Words : Evaluation of flow stress, non-destructive test, automated ball indentation, indentation load-depth curve

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 시험법들은 대부분, 시편의 파괴나 손실을 통한 파괴인성 및 피로 여부를 따지고 있기 때문에, 그 비용의 문제만 아니라, 시설을 유지한 상태에서 적정 시험 시편을 생산하는 문제에 부딪혀 많은 어려움을 겪고 있

다. 이에, 비파괴적인 방법으로 압입시험이 제안되었고, 또한 이의 보급에 따라 KS 규격화도 진행되고 있다. 이중 자동화 볼 압입시험의 경우, 재료 물성의 기본이 되는 유동 응력을 구하기 위한 연구^{1,2)}가 그동안 많이 수행되어 왔으며, 국내에서도 상당한 연구가 진척되었다³⁾. 더욱이, 원자력 발전시설의 경우 용접부와 같이 그 측정 부분이 작고, 물성 시험편을 생산하기 어려운 부분에서도 안전성 확보를 위한 시험이 요구되고, 시설의 해체 없이 방사선 조사 및 열 취성 저하 현상에 대한 수명을 보다 정확히 평가함으로써 그에 따른 적절한 조치와 제

* 한국원자력연구소 원자력재료기술개발부

건설에 따른 비용을 절감할 수 있어 관련 분야에서 많은 연구가 있어 왔다⁴⁾. 그러나, 주로 실험과 경험적 자료에 의존하여 아직 그 신뢰도에 있어 사용자들에게 확신을 심어 주지 못하고 있다. 그렇기 때문에, 본 연구는 볼 압입 시험의 유동 응력 구하는 방법을 기하학적 조건으로 재정립하고, 이를 기존의 방법과 비교 분석하였다.

2. 압입하중-변위곡선

구형 압입자를 이용한 자동화 압입시험기는 Fig. 1과 같이 현재 다양한 회사에 의해 보급되고 있다. 현재, 시험기에서 얻어지는 압입 하중-깊이 선도는 소형 시편이나, 용접 시편에서 재료 물성을 취득하는데 사용되고 있으며, 정확한 선도에 대한 요구와 이해가 인장응력 선도를 예측하기 위하여 필요하다. 또한, 그동안 Tabor¹⁾와 Sneddon⁶⁾이후로 많은 연구가 수행되어 왔으나, 대부분 경도 시험에서의 해석에 의존하고 있어, 본 연구에서는 경도 시험 보다는 압입의 기하학적 조건에 중점을 두고 살펴보고자 한다.

Fig. 2에는 이러한 압입시험에 의하여 얻어지는 일반적인 압입 하중-깊이 선도를 나타내고 있다. Method 1은 참고문헌 3에 의한 방법을 의미하고, Method 2는 참고문헌 2에 의한 방법을 의미한다. 또한, 유한요소법은 ABAQUS(ver 6.3)해석을 통하여 얻어 졌다. 보여진 압입 하중-깊이($F-h$) 선도를 살펴보면 그 관계는 다음과

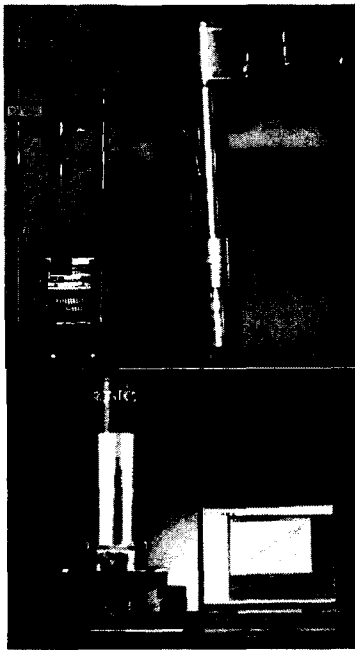


Fig. 1 Photo of automated ball indentation tester

같이 멱급수로 표현될 수 있다.

$$F = ah^\beta \quad \text{--- (1)}$$

(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.

Fig. 3에서 보여지는 구형 압입 시험의 도식적 관계를 (1)식과 같이 살펴보면, 압입자가 접촉하는 조건에 따라 파일업(file-up)과 싱크인(sink-in)현상이 발생하고, 그에 따른 실제 압입 깊이 h_c 를 고려하면, 압입 깊이가 작을 때는 싱크인으로 인한 접촉 깊이의 상대적 감소와 깊이가 큰 경우 파일업으로 인한 상대적 증가는 β 를 보다

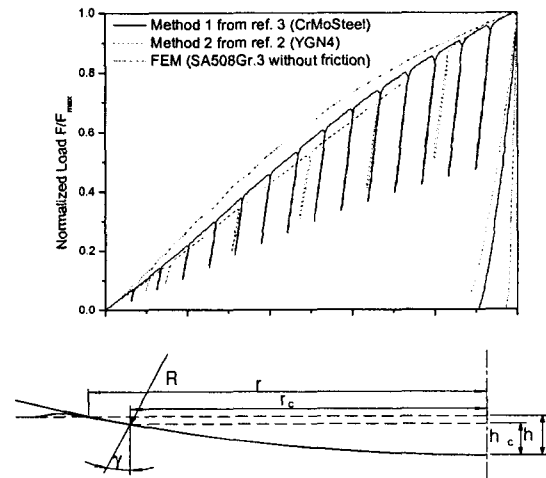


Fig. 3 Schematic representation of ball indentation test

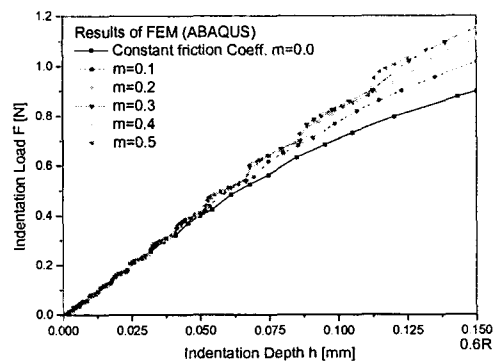


Fig. 4 Effect of friction on indentation load-depth curve

1에 근접시킨다. 그러나, 구형 압입자는 다른 형태의 압입자와 달리 압입이 진행될수록 접촉각 γ 가 커지기 때문에 압입 방향 하중의 증가가 둔화되고 물성치를 획득하는데 필요한 충분한 압입 깊이인 $0.6 R^{(5)}$ 까지 압입한 경우 β 는 1보다 작게 된다. 또한, 압입 깊이-선도에 대한 접촉각의 영향은 마찰에 의해 크게 좌우되는데, 그 영향을 보기 위해 Fig. 4에서 상수 마찰 계수 m 을 증가시키며 유한요소법으로 모사한 결과를 살펴보면, 마찰이 커지는 경우에는 β 가 1에 근접하는 것으로 나타났다. 그러나, 마찰이 큰 경우 떨림 현상을 수반되므로 하므로 신뢰성 있는 값을 얻기에는 적절하지 못한 것으로 판단된다.

결국, 압입 하중-깊이 선도는 압입 깊이 h 와 파일업, 싱크인 그리고, 접촉각 γ 와 마찰 m 에 따라 영향을 받는다. 각 변수들은 모두 압입 깊이와 연관이 있어, 이를 고려한 압입 깊이를 실제 압입 깊이 h_c 라 정하고 이를 정확히 구하여야 한다. 기존의 연구는 압입 하중 제하 곡선에서 한정된 하중 제하 숫자 만큼의 h_c 를 구하고 있으나, 본 연구에서는 압입하중 F 와 실제 압입 깊이 h_c 가 일정한 관계를 가질 것으로 생각하여 깊이의 변화에도 (1)식이 변하지 않을 조건인 β 가 1인 경우에 대한 연속 함수를 가정하고 그 타당성을 입증하고자 한다.

3. 압축 응력 선도

압입하중-변위 곡선을 이용하여 재료의 인장 곡선을 구하는 기존의 예측은 하중 제하 곡선의 기울기에 의존하고, 이를 통하여 실제 접촉 깊이 h_c 를 구한다^{7,8)}. h_c 을 이용하여 압입되어지는 전체 표면에 일정한 압력이 존재하는 경우의 압입 방향으로 기여된 하중 관계로부터 실제 접촉 반경 r_c 을 구하고, 하중 F 를 접촉 면적 πr_c^2 으로 나누어 구한 평균 접촉 압력 p_m 은 진응력 σ 와 일정한 비가 성립한다^{3,7)}.

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

(2)식의 F 에 대하여 β 를 변화시키며 도시한 Fig. 5에서 보면, β 가 1보다 작을 경우 압입 깊이가 커질수록 응력 증가를 표현하지 못한다. 그런 이유로, 응력과 평균 접촉 압력식에서 소성구속인자 Ψ 를 탄성, 탄소성, 소성 영역에 따라 다른 값으로 표현하기도 하지만, 이는 재료에 따라 다르고 다분히 경험적 근거에 의존한다.

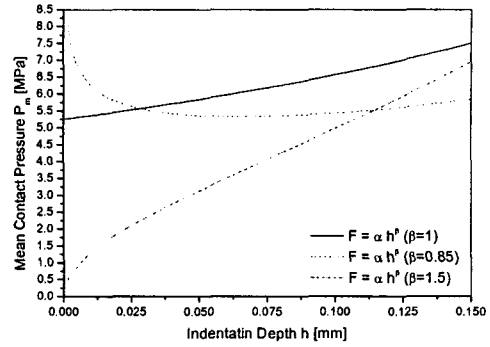


Fig. 5 Mean contact pressure on indentation F-h curve

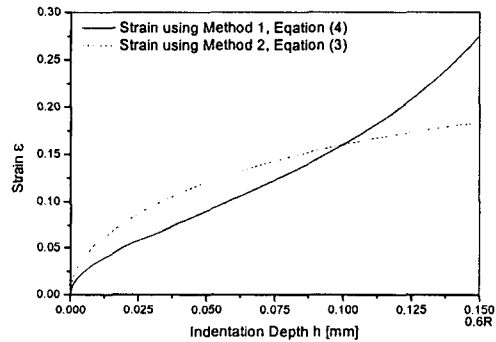


Fig. 6 Typical strain-depth curve of ball indentation test

변형률의 경우에 있어서는 접촉 반경 r 과 압입자 직경 R 를 이용한 다음의 (3)식과 (4)식이 많이 사용된다.

$$\epsilon = \xi_1 \frac{r}{R} \quad \text{--- (3)}$$

$$\epsilon = \xi_2 \frac{r}{R-h} \quad \text{--- (4)}$$

그러나, Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 (3)식의 제안⁷⁾보다 (4)식 제안⁵⁾이 접촉각 γ 에 따른 효과를 고려하였기 때문에 압입깊이가 깊어질수록 변형되는 체적량의 증가에 의한 변형률 증가에 적합한 설명이 되고 있다. 그러나, 응력을 구하는 (2)식의 압입 하중 함수 F 의 지수 β 가 1보다 작으면, 변형률 ϵ 의 증가에 따른 응력 σ 값이 감소하게 되어 적절한 응력 선도를 표시한다고 할 수 없다. 또한, 기존의 Method 1이나 Method 2는 $0.4 R$ 이하의 압입 깊이에 대한 하중 제하 곡선으로 구한 압입 하중 F 과 실제 압입 깊이 h_c 를 사용하고 있는데 그 영역에서 (1)식의 β 값은 실험적으로 1에 근접한다.

β 값을 1에 근사하였을 경우, 재료의 특성인 가공경화

지수와의 관계를 살피기 위해 응력 변형을 선도식을 항복 응력 σ_0 를 사용 무차원화 하여 가공경화지수 n 에만 의존하도록 (5)식과 같이 가정하고, 가공경화지수를 증가시키면서 ABAQUS로 모사 하였다. 이때, 오프셋(offset)량 ϵ_0 는 0.002를 선택하였다.

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^n \Rightarrow \sigma = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^n \quad \text{--- (5)}$$

Fig. 7은 서로 다른 가공경화지수를 갖는 재료에 대해 해석으로 얻어진 압입 하중-깊이 선도이다. 그림에서 압입 하중-깊이 선도는 1차 선형 관계 ($\beta=1$)로 근사화할 수 있음을 알 수 있으며, 이를 바탕으로 유동 특성 평가에 더욱 안정적인 해석 절차를 수립할 수 있다.

Fig. 8은 크롬 몰리브덴 강에 대하여 실험에 의해 구해진 압입 하중-깊이 값을 이용 각각 방법에 따라 응력-변형을 관계를 구한 결과를 도시하고 있다. 그 결과, 본 연구에서 제안된 β 를 1로 근사한 방법은 h_c 을 연속 함수로 구하고 응력-변형을 선도를 얻기 때문에 보다 넓은 변형률 범위에서 값을 얻을 수 있고, 해석 결과의 편차를 무시할 정도로 줄일 수 있다.

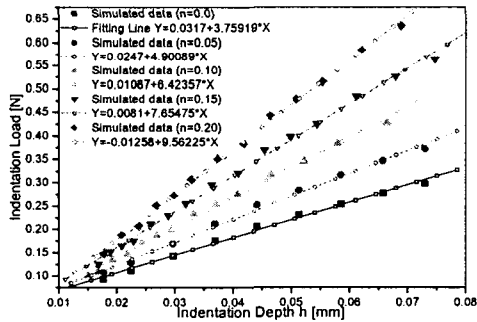


Fig. 7 Effect of work hardening exponent on F-h curve

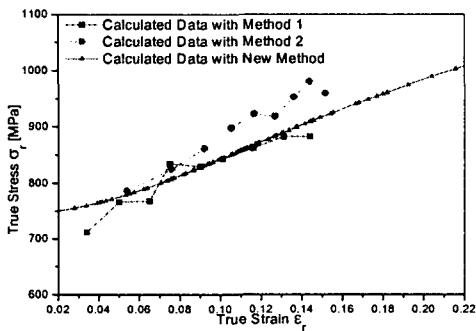


Fig. 8 Effect of work hardening exponent on F-h curve

4. 결론

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

후기

본 연구는 원자력 연구개발 중장기 사업과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) D. Tabor, 1951, "The hardness of metals", Oxford university press, New York
- (2) F. M. Haggag, 1993, "In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System", ASTM STP 1204, pp. 27~44.
- (3) 안정훈, 최열, 권동일, 2000, "압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성 유동특성 평가", 대한 금속-재료학회지, Vol. 38, No. 12, pp. 1606~1611
- (4) 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
- (5) 전은채, 박주승, 권동일, 2003, "인장물성 평가를 위한 연속압입시험법의 실험조건 최적화", 대한 금속-재료학회지, Vol. 41, No. 2, pp. 83~89
- (6) I. N. Sneddon, 1965, Int. J. Eng. Sci. 3, pp. 47
- (7) 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
- (8) 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