

유동응력과 비커스경도의 이론적 관계 연구

이 충 호

만도기계 생산기술원 기반기술실

A Study on the Theoretical Relation between Flow Stress and Vickers Hardness

Chung-Ho Lee

Department of Fundamental Technology, MANDO Machinery Co., LTD.

Abstract

The indentation process in the Vickers hardness test is a kind of controlled local plastic deformation. Vickers hardness is defined as indenting force per unit area indented by a pyramid-shaped diamond at the hardness test. that is a measure of mechanical resistance against indentation of a rigid body into the deformable material. Therefore it is well known that Vickers hardness has a direct relation with the flow stress of the strain-hardened material. This relation is theoretically investigated and the result is given for use in practice.

1. 서론

경도란 기본 정의에 의하면 어떤 한 재료의 다른 더 단단한 재료에 대한 압인(indentation) 저항을 뜻한다. 따라서 경도 시험시 검사체가 재료 표면에 압인하는 과정을 하나의 국부적 소성변형 과정으로 파악하면 단위면적당 검사하중으로서의 경도와 재료의 국부적 변형저항인 유동응력 사이에는 일정한 함수관계가 존재하리라는 것을 쉽게 상상할 수 있다. 실제로 소성 경화된 재료의 비커스 경도와 항복강도(유동응력) 사이에 일정한 함수 관계가 존재한다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 그러나 이 함수 관계는 다만 실험적으로 연구되었을 뿐 이론적으로는 충분히 규명되지 않았다. 한편 로크웰(Rockwell) 경도는 그 정의에 따라 단위면적당 검사하중의 의미를 담고 있지 않고 또한 브리넬(Brinell) 경도는 압인 과정의 기하학적 상사 조건이 충족되지 않아 측정 결과가 시험하중에 크게 의존하기 때문에 이론적 함수관계 연구에 적합치 않다. 이에 반하여 비커스 경도는 압인 과정의 기하학적 상사 조건이 잘 충족되어 시험하중이 충분히 클 경우 측정 결과가 시험하중에 거의 의존하지 않는 고로 여기서는 재료의 경도값으로 비커스 경도를 이용하여 이 함수관계를 이론적으로 규명코자 하였다. 이 관계는 냉간 가공된 재료의 국부적 강도를 간단한 비커스 경도측정을 통해서 쉽게 알아내는 데 유용하게 쓰일 뿐 아니라 나아가서 성형실험과 상계 유한요소 시뮬레이션의 결합에 의해 냉간 가공 공정을 비교적 빠르고 정확하게 분석하는 데에도 유용하게 쓰일 수 있다[1].

2. 본론

일반적으로 비커스 경도 측정시 기하학적 상사조건이 잘 충족됨을 관찰할 수 있다. 이러한 기본 사실과 Hill[2]의 쉐기형 장체가 반 무한평면형의 균질한 소성변형체 표면에 압인하는 과정에 대한 설명에 근거하여 먼저 완전 강-소성(perfect rigid-plastic) 재료에 대하여 비커스 경도와 유동

응력 사이의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

비커스 경도시험시 검사체(피라미드형 다이아몬드)는 검사하중과 평형을 이룰 때까지 재료의 유동저항을 극복하면서 피검사체(시편)의 표면에 파고든다. 이 때 검사체와 피검사체가 점접촉 상태를 지나 면접촉 상태로 넘어가면 즉시 재료유동이 기하학적으로 상사상태를 유지하게 되어 단일 크기 선도(unit diagram)상에서 볼 때 사실상 유동상태가 더 이상 변하지 않는다. 따라서 이렇게 생성된 초기 변형상태는 다음에 계속되는 나머지 진행과정에 대한 모든 정보를 이미 내포하고 있어 축척만 달라질 뿐 최종 변형상태와 같은 변형상태를 갖게 된다. 이리하여 피라미드 끝점에서의 재료의 유효변형율은 피라미드의 압인 과정이 계속되어도 항상 일정한 크기를 유지하며 전체 재료영역 가운데 최대값을 갖게된다. 다른 점들은 경도시험이 진행되는 동안 변형율이 계속 증가하여 단일크기 선도상에서 이 최대점을 향해 차츰 이동하게 된다. 따라서 이 최대 유효변형율 값은 경도시험에서 나타나는 하나의 극한값을 나타낸다. 한편 비커스 경도는 그 정의에 따라 단위 접촉면적당 시험하중을 뜻하기 때문에 피라미드와 재료 사이에 존재하는 접촉면에서의 응력 분포에 의해서 결정된다. 그리고 이 응력분포는 유동응력과 변형률속도(미소 변형율 tensor) 분포에 의해 결정된다. 따라서 비커스 경도와 유동응력 사이의 관계는 피라미드와 재료 사이의 접촉면에서의 변형률속도 분포에 의해서 결정된다. 한편 접촉면에서의 유효변형율 값은 접촉이 끝나는 부분에서 최소가 되고 이 부분으로부터 중앙의 최대점을 향하여 단순 증가 분포를 이루게 된다. 이러한 변형율 분포를 근사적으로 확인하기 위해 비커스 경도시험 과정을 완전 탄-소성 재료에 대하여 축대칭형 2차원 문제(Fig.1)로 단순화시켜 상용 FEM 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 시뮬레이션 해 보았다. Fig.2는 이러한 시뮬레이션 결과 얻어진 유효변형율 분포를 나타낸다. 이로부터 접촉면에서의 유효변형율 범위는 $\bar{\epsilon}=0.1\sim 0.6$ 정도로, 면적에 대한 평균치는 $\bar{\epsilon}=0.4$ 정도로 추정된다. 이러한 수치는 충분히 소성 경화된 실제의 재료에 대해서 비커스 경도 시험을 행할 경우 국부적으로 예상되는 유효변형율 증가를 뜻하기도 한다. 일반적으로 서로 다른 두가지 완전 탄-소성 재료의 정력학적 상사조건은 $\bar{\sigma}/E = \text{constant}$, $\mu = \tau_t/\sigma_n = \text{constant}$ 로 표현된다. 이 조건은 실제로 탄성변형율이 소성변형율에 비해 무시할 정도로 작고 일정한 마찰상태가 확실히 유지될 경우 잘 충족된다. 이것은 다시 비커스 경도 측정의 경우 충분히 큰 압인 깊이 내지는 시험하중과 두 접촉면에 대한 철저한 흡착물(기름막 또는 먼지) 제거로 달성된다. 한편 비커스 경도 측정시 완전 소성 재료의 경우 다음 관계식이 성립한다.

$$\bar{\sigma}/HV = \text{constant} \equiv \beta_{\text{perfect}} \quad (1)$$

즉, 완전 소성 재료의 경우 유동응력과 비커스 경도의 비는 재료와 유효변형율에 관계없이 일정하다. 다음에는 일반 탄-소성 재료의 비커스 경도 시험시 소성경화가 물질유동에 어떠한 영향을 미칠 것인지 살펴 보기로 한다. 일반적으로 많이 쓰이는 냉간 가공용 금속 재료의 유동응력-유효변형율 곡선은 곡선 모양상 크게 두 영역으로 나눌 수 있다 (Fig.3): 영역 I ($\bar{\epsilon} < 0.3$)과 영역 II ($\bar{\epsilon} > 0.3$). 이 때 $\bar{\epsilon} = 0.3$ 인 점은 두 영역간의 경계를 나타낸다. 영역 I 은 가파른 곡선 기울기(큰 소성 경화율)을 갖고 영역 II는 완만한 곡선 기울기(작은 소성 경화율)을 갖는 것이 특징이다. 동일한 경계조건의 경우 물질유동은 본질적으로 소성역에서의 유동응력 분포에 의해서 결정된다. 이를 바탕으로 다음과 같이 추론한다:

소성경화가 진행 안된 또는 적게 진행된 재료의 경우($\bar{\epsilon} < 0.3$) 비커스 경도 시험시 압인 부분에서

의 유동응력의 변화(flow stress gradient)가 커서 국부적 물질유동이 완전 소성 재료의 그것과 많이 다르지만 이미 소성경화가 많이 진행된 재료의 경우($\bar{\epsilon} > 0.3$) 비커스 경도 시험시 압인 부분에서의 유동응력 변화가 작아서 국부적 물질유동이 완전 소성 재료의 그것과 많이 비슷하다. 이러한 추론을 바탕으로 다음과 같이 가정한다:

비커스 경도 측정시 충분히 소성경화된 ($\bar{\epsilon} > 0.3$) 일반 탄-소성 재료의 물질유동은 완전 소성 재료의 그것과 유사하다.

이러한 가정의 현실성을 검증하기 위해 실제로 냉간단조용으로 많이 쓰이는 저합금강인 SMnC420에 대하여 이미 진행된 유효변형을 $\bar{\epsilon} = 0.3$ 의 상태에서 비커스 경도 시험 과정을 탄-소성 모델을 사용하여 먼저와 같이 2차원 문제로 단순화 시켜 FE 시뮬레이션을 수행하였다. 결과는 Fig.4에서 보는 바와 같이 Fig.2의 완전 탄-소성 모델의 경우와 아주 유사하게 나타났다. 이에 비하여 경화가 안된 초기 재료 상태 $\bar{\epsilon} = 0$ 의 경우는 사뭇 다르게 나타났다 (Fig.5). 이로써 위의 가정은 현실성이 있음이 입증되었다. 이러한 물질유동 모델에 근거하여 이제 본래의 연구 대상인 일반 탄-소성 재료에 대해서 비커스경도와 유동응력 사이의 관계를 간단한 식으로 표현하면 다음과 같다:

$$\beta_{\text{perfect}} \approx \bar{\sigma}(\bar{\epsilon} + \Delta\bar{\epsilon}) / HV(\bar{\epsilon}^*) ; (\bar{\epsilon}^* > 0.3; \Delta\bar{\epsilon} \approx 0.4) \quad (2)$$

$$\beta \equiv \bar{\sigma} / HV \approx \beta_{\text{perfect}} \bar{\sigma} / \bar{\sigma}' = \beta_{\text{perfect}} \bar{\sigma} / (\bar{\sigma} + \Delta\bar{\sigma}) = \beta_{\text{perfect}} 1 / (1 + \Delta\bar{\sigma} / \bar{\sigma}) \quad (3)$$

여기서 β_{perfect} 는 소성 경화율이 아주 작을 때 ($\Delta\bar{\sigma} \rightarrow 0$) 도달되는 극한값으로서 유한한 유효변형을 $\bar{\epsilon}^* > 0.3$ 에 대하여 실험적으로 간단히 결정된다. 이와 같이 충분히 소성 경화된 재료 상태($\bar{\epsilon} > 0.3$)에 대해서는 비커스 경도와 유동응력 사이의 관계가 간단한 근사식으로 표현되고 소성 경화가 작은 재료 상태($\bar{\epsilon} < 0.3$)에 대해서는 별도의 실험을 통해서 간단히 얻을 수 있으므로 전체 유효변형율 영역에 대하여 비커스경도와 유동응력 사이의 관계를 쉽게 결정할 수 있다. 이러한 관계를 간단히 도식적으로 나타내면 Fig.6과 같다.

3. 결론

완전 탄-소성 재료의 비커스 경도 시험 과정과 충분히 소성 경화된 일반 탄-소성 재료의 비커스 경도 시험 과정을 단순한 FE 시뮬레이션 모델을 통하여 비교함으로써 양자간에 물질유동의 유사성이 존재함을 확인할 수 있었으며 이를 바탕으로 비커스경도와 유동응력 사이의 함수 관계를 나타내는 근사식을 제시하였다. 이 함수 관계는 실험적으로 측정이 간단한 비커스 경도를 이용하여 냉간가공된 재료내부의 항복강도를 간접적으로 결정하는 데 유용하게 쓰일 수 있을 것이다. 또한 제시된 근사적 함수 관계는 실험적으로도 잘 확인되었으며 다음 기고문에 그 결과를 발표할 예정이다.

참고문헌

- [1] Lee, C.H., 1991, "Vereinfachtes Verfahren der FE-Simulation von Kaltmassivumformprozessen", 박사학위 논문, TH Darmstadt, Germany.
- [2] Hill, R., 1950, "The mathematical theory of plasticity", Oxford University Press.

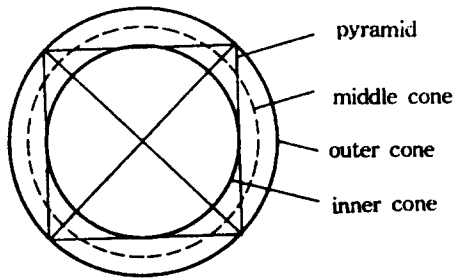


Fig.1 simplification of the pyramid geometry as the middle cone for FE simulation

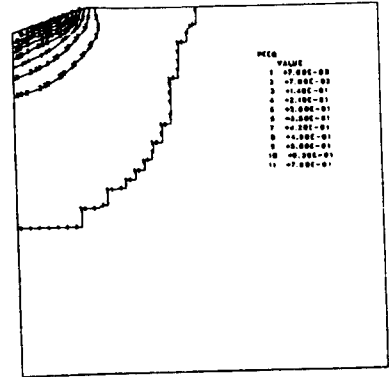


Fig.2 effective strain distribution in the specimen at Vickers hardness test for perfect-plastic material

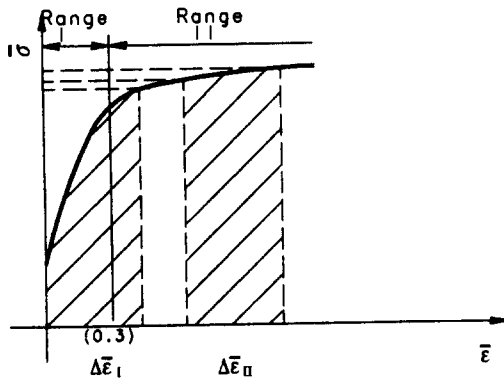


Fig.3 division of flow stress curve range

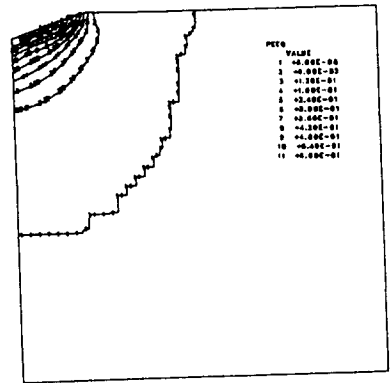


Fig.4 effective strain distribution in the specimen at Vickers hardness test for real plastic material $\bar{\epsilon}=0.3$

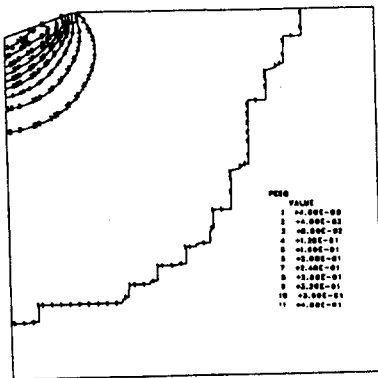


Fig.5 effective strain distribution in the specimen at Vickers hardness test for real plastic material $\bar{\epsilon}=0$.

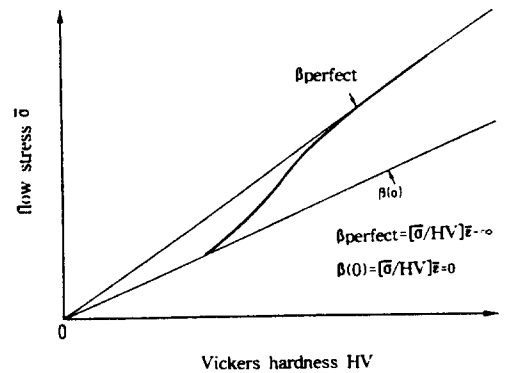


Fig.6 schematic diagram for the relation $\bar{\sigma}/HV$