

# 유동응력과 비커스경도의 관계 실험적 연구

이 충 호

만도기계 생산기술원 기반기술실

## An Experimental Study on the Relation between Flow Stress and Vickers Hardness

Chung-Ho Lee

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

### Abstract

Vickers hardness is defined as indenting force per unit area indented by a pyramid-shaped diamond at the hardness test. It is well known that Vickers hardness has a direct relation with the flow stress of the strain-hardened material. This relation was theoretically investigated and the result was summarized in a form of algebraic equation in the last paper. In the present paper an experimental validation of this theoretical relation is given along with mathematical formulas for conversion of Vickers hardness into the flow stress in the strain-hardened material for practical use.

### 1. 서론

소성 경화된 재료의 비커스 경도와 항복강도(유동응력) 사이에 일정한 함수 관계가 존재한다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 이 관계를 이용하면 냉간 가공된 재료의 국부적 항복강도를 간단한 비커스 경도 측정을 통해서 쉽게 알아낼 수 있으므로 편리하다. 그래서 지난 번 기고문[1]에서는 이 함수 관계를 이론적으로 규명하고 결과를 다음과 같은 간단한 근사식으로 표현하였다.

$$\beta_{perfect} \approx \bar{\sigma}(\bar{\epsilon} + \Delta\bar{\epsilon}) / HV(\bar{\epsilon}^*) ; (\bar{\epsilon}^* > 0.3; \Delta\bar{\epsilon} \approx 0.4) \quad \text{with} \quad \beta_{perfect} \equiv [\bar{\sigma} / HV]_{(d\bar{\sigma}/d\bar{\epsilon}=0)} \quad (1)$$

$$\beta \equiv \bar{\sigma} / HV \approx \beta_{perfect} \bar{\sigma} / \bar{\sigma}' = \beta_{perfect} \bar{\sigma} / (\bar{\sigma} + \Delta\bar{\sigma}) = \beta_{perfect} / (1 + \Delta\bar{\sigma} / \bar{\sigma}) \quad (2)$$

이 번 기고문에서는 이 이론적 관계를 실험적으로 검증하는 데 역점을 두었다. 또한 이 관계식들은 간단한 일축 압축시험 데이터를 이용하여 비커스 경도를 유동응력으로 변환하는 공식으로 쉽게 전환될 수 있다.

### 2. 본론

[1]에서 제시된 이론적 관계식을 실험적으로 검증하기 위하여 냉간단조용으로 많이 쓰이는 세가지 서로 다른 철강 재료에 대해서 Rastegaev에 의해 제안된 일축 압축시험을 행하고 유동응력과 비커스 경도를 측정하였다. 이를 위해서 먼저 시편 제작용 봉재를 가공 전에 풀림(annealing)처리하였다 (Tab.1). Fig.1은 열처리 후의 금속 조직에 대한 현미경 사진을 보여준다. 시편 제작시에는 흑시 있을 지도 모르는 표면의 비균질층을 제거하기 위해 열처리된 재료를 최종 시편 직경 치수에 도달할 때까지 최소 2mm 이상 깎아 내었다. Fig.2에는 사용된 재료들에 대해서 압축시험을

통해 측정된 유동응력 곡선을 나타내었다. 이 때 각 재료당 40개의 시편이 제작되었다. 시편의 치수는 양호한 실험 결과를 얻기 위해 매우 중요하며[2] Oberlaender[3]의 추천에 따라 선택하였다(Fig.3). 따라서 시편은 최적의 윤활 주머니 형상을 갖게 될 것이다. 시편을 압축하기 전에 시편의 위아래에 만들어진 윤활재반이 흠을 윤활재로 채운다. 윤활재로는 시편되는 보통 양초를 사용하였다. 압축 편치와 다이는 SUJ2 로 만들어 압축면을 곱게 연삭 후 연마하였다. 다이와 편치의 성형 접촉면과 양초로 채워진 시편의 위 아래 면은 압축 전에 추가로 MoS<sub>2</sub> 를 발라 윤활성을 더욱 향상시켰다. 시편들은 상온에서 크게 두드러진 온도상승 없이 여러 단계로 촘촘히 나누어진 예정된 높이까지 천천히 압축되었다. 이리하여 결과적으로 아주 높은 유효변형율( $\bar{\epsilon} = 1.1 \sim 1.3$ )까지 거의 균일한 압축 성형을 이룩할 수 있었다. 압축된 시편들은 다시 각각의 유효변형율에 해당하는 비커스 경도를 측정하기 위해 남아있는 부분이 절반가량 되도록 축방향으로 기계 가공되었다. 이어서 이 가공면은 연삭 후 연마하여 비커스 경도측정에 적합한 상태로 준비되었다(Fig.4). 경도 측정은 전체적으로 균일한 재료 상태를 고려하여 대칭축에 수직인 횡방향의 중앙선을 따라 10kgf의 시험하중으로 수행하되 등간격으로 여러 점을 측정하여 평균값을 계산하였다. 이 때의 평균산포값은 3% 이내였다. Fig.5에는 측정결과를 유효변형율에 따라 유동응력과 비커스경도의 비로 나타내어 이론적 예측결과와 대비시켰다. 그 결과 먼저 번에 제시한 이론적 모델이 상당히 쓸모 있다는 것이 입증되었다. Tab.2에는 식(1)에 따라 계산된 유동응력과 비커스경도 비의 이론적 극한치에 관한 데이터를 기록하였다. 이 표에 의하면 비- 또는 저합금강의 경우 유동응력과 비커스경도 비의 극한값은  $\beta_{\text{perfect}} = 3.4 \sim 3.5$  정도임을 알 수 있다. 주목할 점은 이 극한값들이 비슷한 재료그룹(비- 또는 저합금강) 내에서는 각개 재료와 거의 관계가 없다는 것인데 이것은 상사이론적으로도 충분히 예견되었던 것이다. 한편 유동응력과 비커스경도의 함수관계에 관한 연구 목적은 무엇보다도 간단한 비커스 경도 측정을 통해서 냉간 가공된 재료의 국부적 항복강도를 쉽게 알아낼 수 있다는 데에 있으므로 관련식 (2)를 좀 더 쓰기 위한 모양으로 발전시킬 필요가 있다. 이를 위해서 이미 잘 알려진 Ludwik의 유동응력에 관한 실험식을 이용하기로 하였다. 이에 따라 충분히 소성경화가 진행된 재료영역 ( $\bar{\epsilon} > 0.3$ )에 대해서는 다음과 같은 출발식을 이용한다:

$$\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^n; (\bar{\epsilon} > 0.3) \quad (3)$$

이 식을 사용하면 비커스 경도 시험시 압인 접촉면에서의 평균 유동응력은

$$\bar{\sigma}' = C(\bar{\epsilon} + \Delta\bar{\epsilon})^n; (\bar{\epsilon} > 0.3; \Delta\bar{\epsilon} \approx 0.4) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 또한 식(3)과 식(4)로부터

$$\bar{\sigma}'/\bar{\sigma} = (1 + \Delta\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon})^n; (\bar{\epsilon} > 0.3; \Delta\bar{\epsilon} \approx 0.4) \quad (5)$$

을 얻는다. 마침내 식(2), 식(3), 식(4)를 이용하여  $\bar{\epsilon}$ 를 소거하면

$$\bar{\sigma} = C((HV\beta_{\text{perfect}}/C)^{1/n} - \Delta\bar{\epsilon})^n; (HV > HV_{(\bar{\epsilon}=0.3)}; \Delta\bar{\epsilon} \approx 0.4) \quad (6)$$

을 얻는다. 한편 소성경화가 적은 재료영역 ( $\bar{\epsilon} < 0.3$ )에 대해서는 다음식을 이용한다:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 + C_k\bar{\epsilon}^{n_k}; (\bar{\epsilon} < 0.3) \quad (7)$$

여기서

$$n_k = \ln \{(\bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}=0.3)} - \bar{\sigma}_0) / (\bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}=0.15)} - \bar{\sigma}_0)\} / \ln 2; C_k = (\bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}=0.3)} - \bar{\sigma}_0) / (0.3)^{n_k} \quad (8)$$

로서  $\bar{\epsilon} = 0, 0.15, 0.3$ 을 데이터 포인트로 하여 결정한다.

마찬가지로 비커스 경도에 대해서도 비슷한 근사식을 사용한다.

$$HV = HV_0 + C_H\bar{\epsilon}^{n_H}; (\bar{\epsilon} < 0.3) \quad (9)$$

여기서

$$n_H = \ln \{ (HV_{(\bar{\epsilon}=0.3)} - HV_0) / (HV_{(\bar{\epsilon}=0.15)} - HV_0) \} / \ln 2 ; C_H = (HV_{(\bar{\epsilon}=0.3)} - HV_0) / (0.3)^{n_H} \quad (10)$$

로서 마찬가지로  $\bar{\epsilon} = 0, 0.15, 0.3$  을 데이터 포인트로 하여 결정한다.

식(7)과 식(9)로부터  $\bar{\sigma}$  를 소거하면 마침내

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 + C_k \{ (HV - HV_0) / C_H \}^{n_k/n_H} ; (HV < HV_{(\bar{\epsilon}=0.3)}) \quad (11)$$

을 얻는다.

이상의 결과를 실제로 냉간단조용으로 많이 쓰이는 저합금강인 SMnC420 재료에 대하여 실험치와 비교하여 그래프로 나타내면 Fig.6과 같다. 이 그림에서 또 한번 위에서 제시한  $HV \rightarrow \bar{\sigma}$  변환 공식의 유용성이 입증된다.

### 3. 결론

본 기고문에서는 지난 번 기고문에서 제시한 비커스경도와 유동응력 사이의 이론적 함수 관계를 실험적으로 검증하였다. 그리고 이 함수관계를 실용상 편리하도록 발전시켜  $HV \rightarrow \bar{\sigma}$  변환공식을 만들었다. 이 공식들은 성형실험과 상계 유한요소 시뮬레이션의 결합에 의해 냉간 가공 공정을 비교적 빠르고 정확하게 분석하는 데에도 유용하게 쓰일 수 있다[4]. 이 공식들은 또한 실험을 통하여 냉간 성형 공정의 FE 계산 결과를 부분적으로 검증하는 데에도 응용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- [1] Lee, C.H., 1997, "유동응력과 비커스경도의 이론적 관계 연구", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집 게재예정.
- [2] Poelandt, K., 1984, "Vergleichende Betrachtung der Verfahren zur Pruefung der plastischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe", 연구보고서 제80권, 소성가공연구소, Stuttgart University, Germany.
- [3] Oberlaender, T., 1988, 이충호에 보낸 개인 서신.
- [4] Lee, C.H., 1991, "Vereinfachtes Verfahren der FE-Simulation von Kaltmassivumformprozessen", 박사학위 논문, TH Darmstadt, Germany.

material	S15C	SMnC420	S45C
Vickers hardness (HV10) a.h.t.	124	147	185
heat treatment	annealing (700° C, 8h)		

material	S15C	SMnC420	S45C
$\bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}^*)}$	563.1	651.7	734.4
$\bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}^* + \Delta\bar{\epsilon})}$	668.8	758.1	842.6
$HV_{(\bar{\epsilon}^*)}$	194	217	245
$[\bar{\sigma}/HV]_{(\bar{\epsilon}^*)}$	2.9	3.0	3.0
$\beta_{perfect}$	3.45	3.49	3.44

Tab.1: initial material state of test specimens

Tab.2:  $\bar{\sigma}$ , HV and  $\beta_{perfect}$  of test specimens ( $\bar{\epsilon}^*=0.3$ ;  $\Delta\bar{\epsilon}=0.4$ )

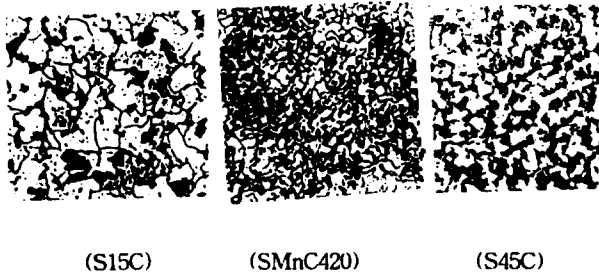


Fig.1 microscopic structures of test materials

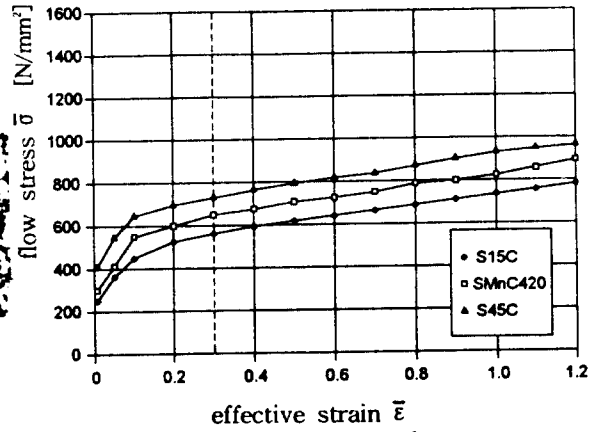
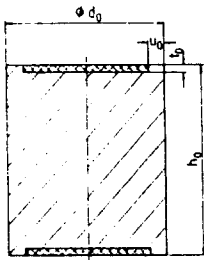
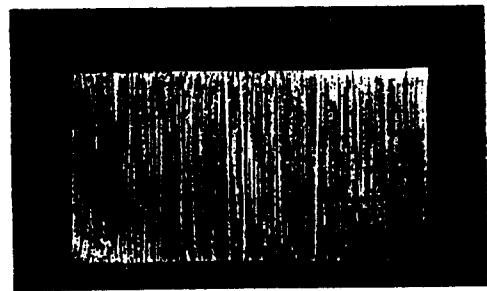


Fig.2 flow stress curves of test materials



$h_0 = 16 \pm 0.05 \text{ mm}$   
 $\phi d_0 = 16 \pm 0.05 \text{ mm}$   
 $t_0 = 0.15 \pm 0.01 \text{ mm}$   
 $u_0 = 0.8 \pm 0.05 \text{ mm}$

Fig.3 dimensions of a test specimen



( $\bar{\epsilon} = 0.4$ )

Fig.4 prepared surface of a test specimen after machining (material: S45C)

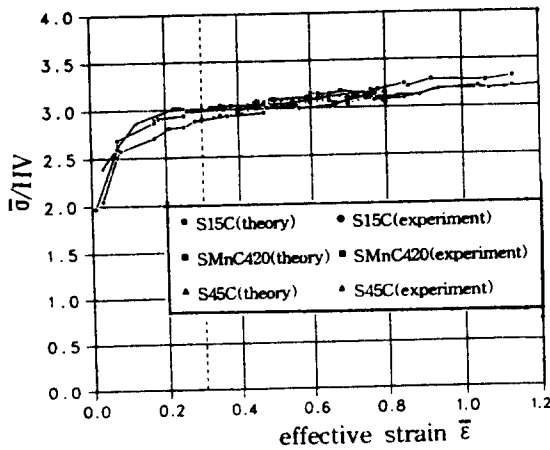


Fig.5 comparison of measured data with theoretical ones on  $\bar{\sigma}/\text{HV}$  along  $\bar{\epsilon}$

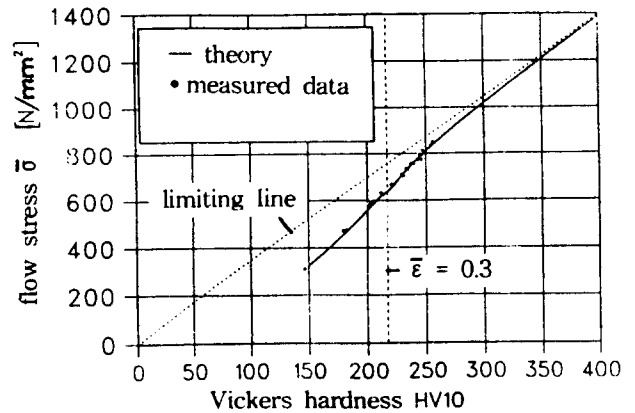


Fig.6 comparison of measured data with theoretical ones on  $\bar{\sigma}$  along HV