

부가응력과 반발경도와의 관계

남승훈 · 김시천 · 전승범*

한국표준과학연구원, 소재특성평가센터

*액셀랩

The Relation between Applied Stress and Rebound Hardness Values

S. H. Nahm, S. C. Kim and S. B. Jeon*

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600

*Excelab Inc., Taejon 306-010

ABSTRACT

Information of change of hardness values during applying load is needed often to control the quality of metal products efficiently, but the relation between applied stress and hardness has not been established. In this paper the theoretical relation between the rebound hardness and stress was examined briefly and the experiment was performed with some materials. Materials used in test were mild steel(SB41), 7-3 brass and copper, which were widely used in the commercial plants. Hardness was measured during stress applied using the Equo-Tip hardness tester as a kind of rebound hardness tester. Hardness values decreased as tensile stress increased, the decreasing rate was effected by the Young's modulus of each material, and the rebound hardness values showed linear relationship with the applied stress in elastic region.

초록

금속제품의 품질관리를 효율적으로 하기 위해서는 응력을 받는 상태에서 경도의 변화를 측정하여야 하는 경우가 발생하는데 그 상관관계가 규명되어 있지 않은 실정이다. 이를 위해서 본 연구에서는 응력과 경도와의 상관관계를 간략하게 이론적으로 고찰하고 몇 가지 재료로 실험·분석하였다.

시험에 사용된 재료는 생산현장에 많이 쓰이는 연장(SB 41), 7-3 황동, 구리로 하였고 인장하중을 가하면서 반발경도시험기의 일종인 Equo-Tip 경도시험기로 경도를 측정하여 응력이 증가함에 따른 경도값의 변화를 측정하였다. 경도값은 인장응력의 증가에 따라 감소하였으며 그 감소율은 재료의 영률에 영향을 받고 탄성한계내에서 반발경도와 부가응력은 선형적인 관계를 가졌다.

1. 서 론

경도측정은 재료의 기계적인 성질을 측정하는 여러 가지 재료시험 중 비교적 간편하고 측정시간이 적게 소요되므로 기계·금속제품의 품질관리에 많이 사용되어 왔다^{1,2)}. 일반적으로 금속제품은 열처리증이나 가공증에 경도가 변하기 때문에 제품의 품질관리를 효율적으로 하기 위해서는 각 단계에서 경도의 변화를 측정하여야 한다.

기계·금속제품의 생산라인에서는 거의 필수적으로 응력을 가하는 공정이 있으며 응력을 받는 상태에서 경도를 측정하여 품질관리를 함으로써 불필요한 가공 등을 가능한 한 줄여서 생산성을 높일 수 있다. 이를 위해서는 응력과 경도의 상관관계가 먼저 규명되어야 한다.

본 연구에서는 여러가지 휴대용(portable) 경도시험기 중 반발경도시험기의 일종인 Equo-Tip 경도시험기를 이용하였다. Equo-Tip 경도시험기는 기존 경도시험기와 근사한 정밀도를 가지고 있으며 시험시간이 짧고 사용범위가 광범위하다는 잇점뿐만 아니라 조작이 간편하고 측정관의 위치(수직, 경사, 수평 등)에 제약없이 측정할 수 있어서 현장에서 널리 사용되고 있다. 이러한 Equo-Tip 경도시험기의 측정에 대한 이론적 해석을 검토하고, 생산현장에 널리 사용되는 연강, 활동 및 구리에 대해 부가응력에 따른 경도값의 변화를 실험·분석하였다.

2. 부가응력과 경도의 관계에 대한 이론적 검토

일반적으로 금속의 경도는 잔류응력이 존재하거나 외부 부가응력을 받을 경우 변화하게 된다. 그러나 금속재료에 내부응력이나 부가응력이 가하여지면 경도가 변하는 것은 당연한 것으로 생각되지만 그 상세한 내용에 대해서는 잘 알려져 있지 않다.¹⁾ 경도의 물리적인 해석이 명확히 규명되어 있지 않아³⁾ 내부응력이나 외부 부가응력이 경도에 주는 영향을 이론적으로 쉽게 분석하는 것은 곤란하나 응력과 경도와의 일

반적인 관계를 개략적으로 규명하는 것은 가능하다.^{1,4)} 본 연구에서는 반발경도시험기의 일종인 Equo-Tip 경도시험기를 사용하여 반발경도와 응력과의 관계를 고찰하였다.

반발경도시험기에서 초기에 볼(ball)이 가지는 총 에너지를 W_0 , 볼이 시편에 충돌하여 생성되는 소성 변형과 탄성변형에 따른 에너지를 W_p , W_e 라고 각각 칭하고 마찰 등의 손실 에너지를 W_1 이라 하면 다음과 같이 에너지를 나타낼 수 있다.⁵⁾

$$W_p = \alpha W_0, W_e = \beta W_0, W_1 = \gamma W_0 \quad (1)$$

$$W_0 = W_e + W_p + W_1 = W_0(\alpha + \beta + \gamma)$$

여기서 α, β, γ 는 총에너지에 대한 각 에너지의 비이다. 볼이 시료에 충돌하면 볼의 선단은 그림 1의 C점에서 먼저 시료와 접촉하고 다음에 부하가 증가되어 시료 내부로 압입되고 최대깊이 C_0 에 도달한 후 볼은 시료의 탄성회복에 의하여 반발하게 된다. 이때 시료 표면에는 소성변형으로 인한 압입자국 AC_1B 가 남게 된다.

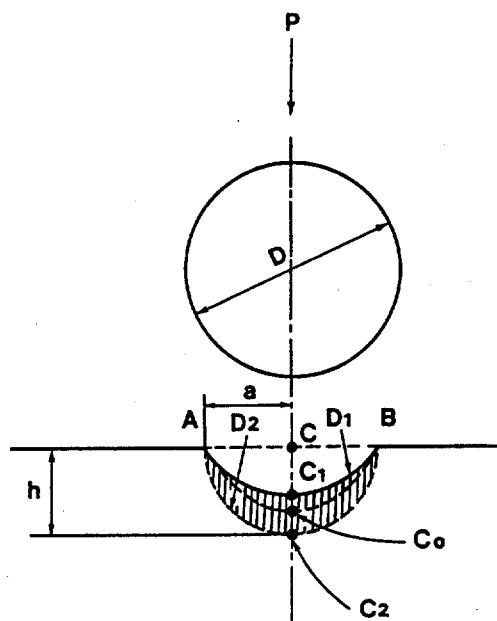


Fig. 1 Deformation of specimen during hardness testing.

따라서 탄성에너지 W_e 는 직경 D 를 가지는 불을 오목면 AC_1B 의 시료에 탄성적으로 C_0 까지 압입시키는데 필요한 에너지로 불 수 있고 이는 Hertz의 탄성접촉론에 의하여 다음식으로 표시된다.

$$W_e = A \frac{P^2}{a} f(E) \quad (2)$$

여기서 A 는 상수이고 P 는 충격시의 최대하중이며 $f(E)$ 는 다음과 같다.

$$f(E) = \frac{1-v_0^2}{E_0} + \frac{1-v^2}{E} \quad (3)$$

v_0 및 v 는 압자 및 시료의 poisson비이고, E_0 와 E 는 불과 시료의 영률이다.

불의 압입문제에 대해 Tabor⁶⁾의 결과를 이용하면 평균압입압력 P_m 은 다음과 같이 표시된다.

$$P_m = C_m \sigma_f \quad (4)$$

여기서 P_m 은 압입하중 P 를 압입부의 투영면적 πa^2 로 나눈 값이며 σ_f 는 소재의 유동용력이고 C_m 은 소재의 특성에 따른 상수이다. 소재에 잔류용력이 존재하거나 부가용력이 가해지면 불의 압입조건이 달라지게 되고 이를 식(4)에 반영시키면 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$(P_m + \sigma_x) = C_m \sigma_f \quad (5)$$

여기서 σ_x 가 잔류용력 또는 내부용력에 의한 영향분이다. 식(5)와 불의 하중 P 를 관련시키면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = \pi a^2 (C_m \sigma_f - \sigma_x) \quad (6)$$

식(2)와 식(6)에서 탄성에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$W_e = A \pi^2 a^3 (C_m \sigma_f - \sigma_x)^2 f(E) \quad (7)$$

다음 소성에너지 W_p 는 압입자국 AC_1B 를 만들기 위한 에너지 W_{p1} 이외에 압입자국부의 하중에 있어서 소성유동조직이 생기게 되는 영역 AC_2BC_1A 를 발생시키는데 소비된 에너지 W_{p2} 와의 합으로 생각하여 각각의 영역의 체적을 V_1 및 V_2 로 하면 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_p = W_{p1} + W_{p2} = (V_1 + V_2) P_m \quad (8)$$

그림 1에서 D_2 는 해머의 선단직경 D 에 비례한다고 가정하면 $D_2=kD$ 라 쓸 수 있고 $a^2=hD$ 의 관계를 고려하면 소성 에너지는 식(9)와 같이 된다.

$$W_p = (V_1 + V_2) P_m = \int_0^h P dh = \frac{\pi a^4 P_m}{2 D_2} = \frac{\pi a^4 P_m}{2 k D} \quad (9)$$

결국 (1) 및 (9) 식에서 a 는 다음과 같이 주어진다.

$$a = \left[\frac{2kD}{\pi P_m} (1-\beta\gamma) W_0 \right]^{1/4} \quad (10)$$

식(7)과 식(10)에 의해서 다음을 구할 수 있다.

$$\frac{\beta}{(1-\beta\gamma)^{3/4}} = \frac{3}{10} (2k)^{3/4} \pi^{5/4} P_m^{5/4} f(E) \left(\frac{D^3}{W_0} \right)^{1/4} \quad (11)$$

이 식은 β 의 4차 방정식이며 간단한 해는 구할 수 없다. 그러나 많은 경우 손실 에너지는 전 에너지의 약 10% 정도로 알려지고 있다⁷⁾. 따라서 $\gamma=0.1$ 로 가정하고 $(1-\beta\gamma)^{1/4}=1-\beta$ 로 하면 $\beta=0.2\sim0.85$ 일 때 오차는 5% 이내로 된다. 이런 가정하에서 β 를 구하면 다음과 같다.

$$\beta = \frac{P_m^{5/4}}{\frac{1}{K} f(E) \left(\frac{W_0}{D^3} \right)^{1/4} + P_m^{5/4}} \quad (12)$$

여기서 $K = \frac{3}{10} (2k)^{3/4} \pi^{5/4} \circ$ 이다.

Equo-Tip 경도값 H_L 은 식(13)과 같이 해머의 반발속도 v_2 와 초기속도 v_1 의 비로 정의되며 식(1)의 β 관계를 고려하면 Equo-Tip 경도값 H_L 과 β 는 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$H_L = 1000 \times \frac{v_2}{v_1} \quad (13)$$

v_1 : 초기속도(충격직전)

v_2 : 반발속도(충격직후)

$$H_L = 1000 \times \sqrt{\beta} \quad (14)$$

식(12)와 (14)에서 H_L 은 식(15)로 나타낼 수 있다.

$$H_L = 1000 \times \left[\frac{(C_m \sigma_f - \sigma_x)^{5/4}}{\frac{1}{K} f(E) \left(\frac{W_0}{D^3} \right)^{1/4} + (C_m \sigma_f - \sigma_x)^{5/4}} \right]^{1/2} \quad (15)$$

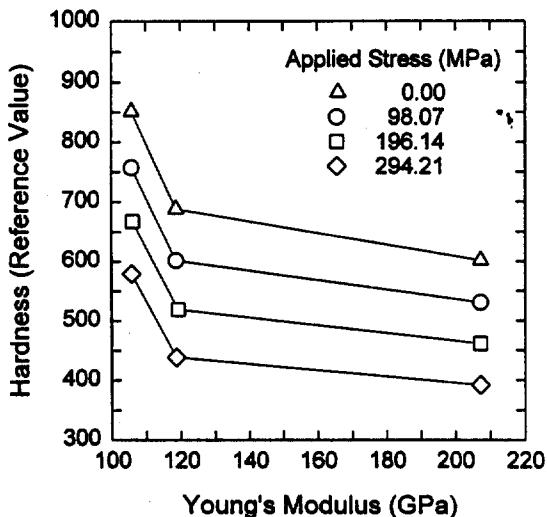


Fig. 2(a) Relation between rebound hardness (reference value) and Young's modulus.

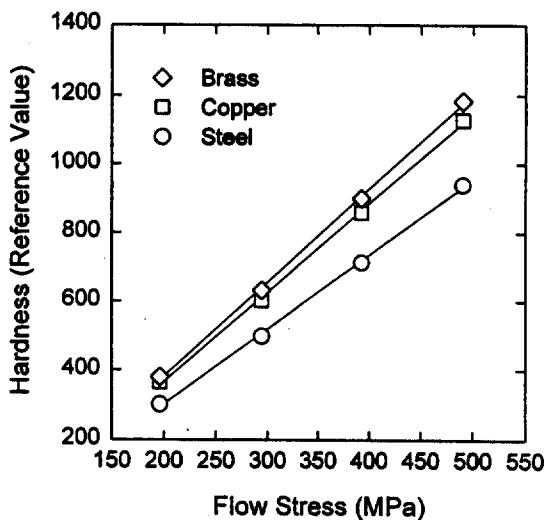


Fig. 2(b) Relation between rebound hardness (reference value) and flow stress.

식(15)로 부터 Equo-Tip 경도값 H_L 과 시료의 영률 E , 유동응력 σ_f 와의 관계를 살피기 위해 일부 상수 (C_m , k)값을 가정하고 계산한 결과를 그림 2 (a), (b)에 나타내었다.

예상된 바와 같이 영률이 커질수록 경도값이 낮게 나타나고 유동응력이 커질수록 경도값이 높게 나타남을 보여 주고 있다.

또한 시료에 부기응력 (a_x)과 경도값 (H_L)의 관계를 살피기 위해 각 재질에 대한 E 값과 σ_f 값을 대입하고 a_x 를 변화시켜 계산한 결과를 그림 3에 나타내었다. 영률이 큰 재질일수록 경도값은 낮게 나타나고 부기응력이 커질수록 경도값은 낮게 나타나고 있음을 보여 주고 있다.

여기서 양(+)의 부기응력은 불의 압입에 대한 방향과 같음을 의미하므로 시료에 대해서는 불의 운동방향으로 압축응력이 부가됨을 의미하게 된다.

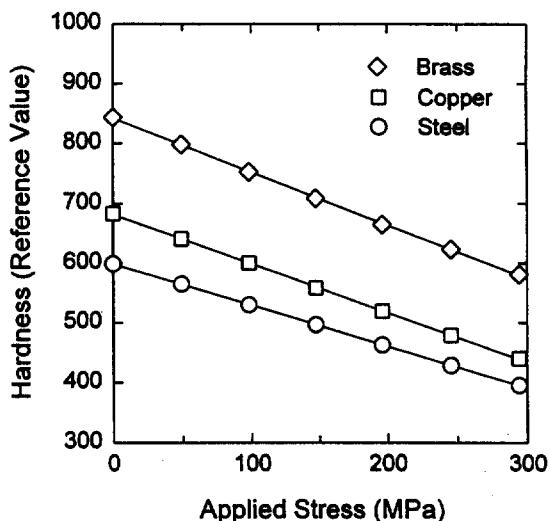


Fig. 3 Relation between rebound hardness (reference value) and applied stress.

3. 실험

본 연구에서는 생산현장에서 많이 쓰이는 재질중 연강(SB 41), 7-3 황동, 구리에 대하여 응력이 증가함에 따른 경도값의 변화를 측정하였다.

시편은 그림 4와 같이 하중을 부과할 수 있도록 인장시험형태를 취하였으며, 판재(두께 5mm)를 밀링 가공한 후 표면을 연마하였다. 각 재료의 기계적 성

질은 표 1에 나타내었다.

Table. 1. Physical properties of testing materials

Physical properties	Materials (SB 41)	Steel (SB 41)	Copper	Brass (7-3)
Yield strength (MPa)	341.3	325.6	372.7	
Hardness (HRB)	81.4	57.3	77.5	
Young's modulus (GPa)	207.9	117.7	98.1	

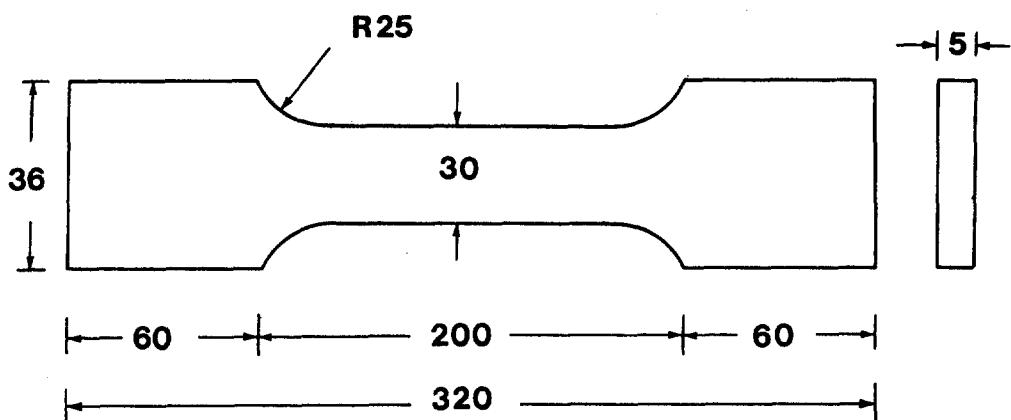


Fig. 4 Configuration of specimen.

unit : mm

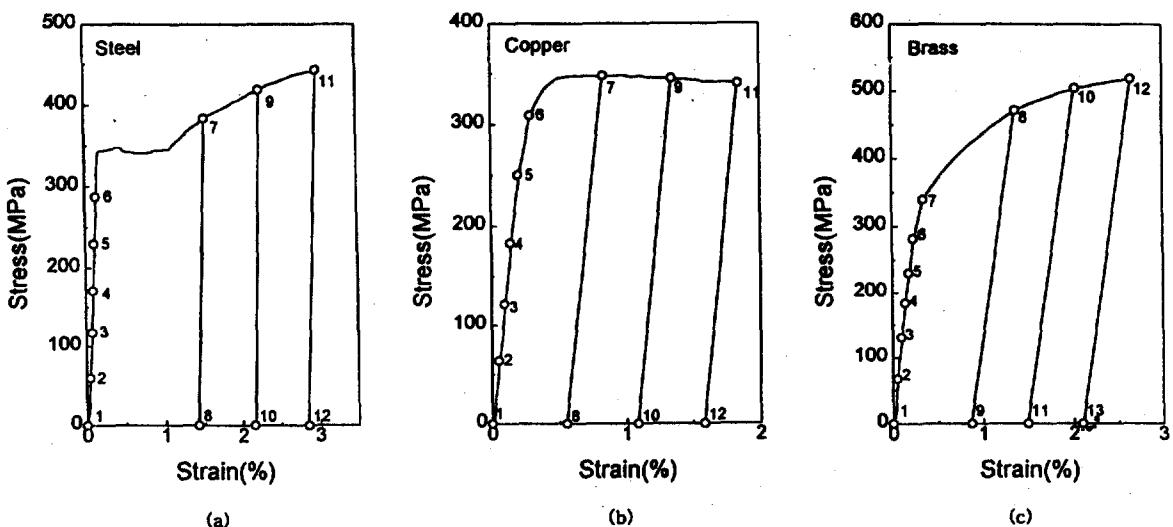


Fig. 5 Stress-strain curves obtained by tensile test.

(a) steel (SB 41) (b) copper (c) 7-3 brass

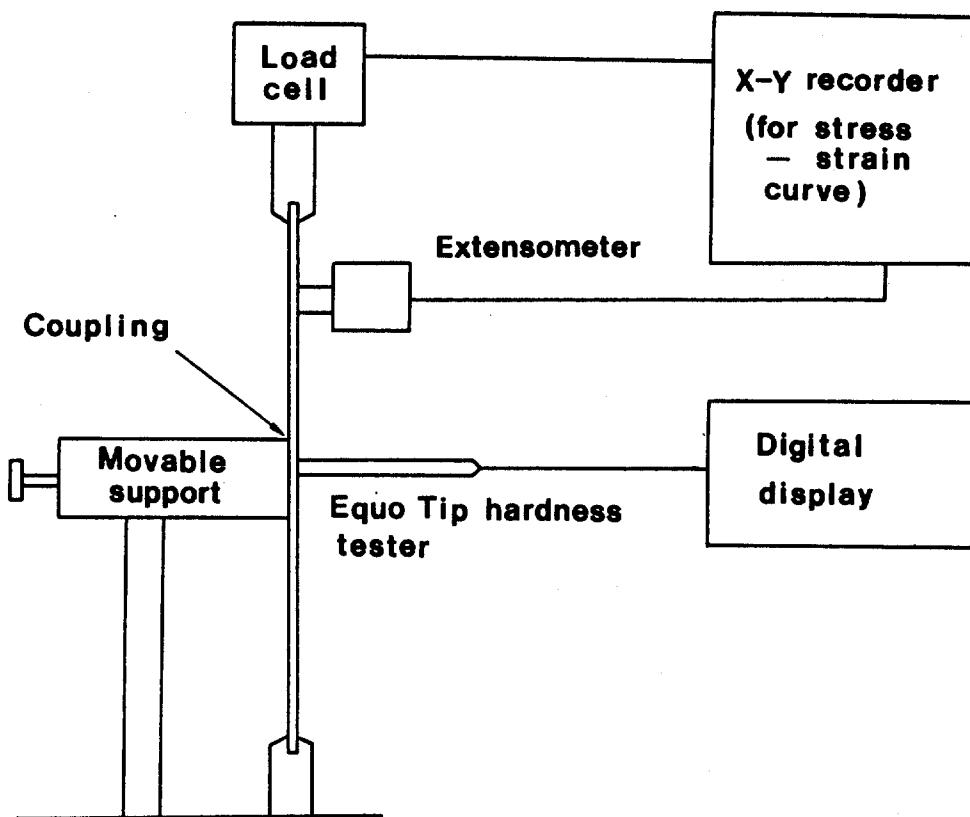


Fig. 6 Schematic diagram of hardness measurement under applying load.

실험은 MTS사 재료시험기에서 인장하중을 가하면서 Equo-Tip 경도시험기를 이용하여 경도를 측정하였다. 그림 5와 같이 각 재질에 대해 탄성영역에서 하중을 부가하는 도중(1~6)에 경도를 측정하고 항복점을 지나서는 하중을 부가하는 도중과 제거한 상태(7~12)에서 경도를 측정하였다. 개략적인 실험장치는 그림 6과 같다.

4. 결과 및 고찰

각 재질에 대해 하중을 가하면서 Equo-Tip으로 측정한 경도값을 표 2에 나타내었다. 평균 경도(\bar{X})은

각 위치에서 7회 측정한 값의 평균을 구했으며 범위(R)은 최대측정값과 최소측정값의 차이를 나타낸다. 이 결과를 보면 범위가 H_L 값으로 약 10 정도(HRC 단위로 1정도)이며, 표준편차가 H_L 값으로 3.0(HRC 단위로 0.3 정도) 이내이다. 이는 기존 경도시험기를 사용할 때의 정밀도와 유사하게 유지하고 있음을 알 수 있다.

응력을 받았을 때의 경도의 변화는 인장응력이 증가할수록 경도값이 감소하다가 항복점을 지남에 따라 다시 경도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이 현상은 연강의 경우가 가장 심하게 나타나는데 이는 가공 경화의 결과로 판단되며 활동, 구리의 경우를 보면

Table 2. Hardness value at various stress field

Material hardness (H) Test position	Steel (SB 41)			Copper			Brass (7-3)		
	Mean value (X)	Range (R)	Standard deviation (σ)	Mean value (X)	Range (R)	Standard deviation (σ)	Mean value (X)	Range (R)	Standard deviation (σ)
1	427.7	1.0	0.5	424.6	7.0	2.8	287.5	4.0	1.4
2	425.8	5.0	1.7	418.8	4.0	1.2	481.1	8.0	2.5
3	422.3	5.0	1.8	415.6	4.0	1.3	476.9	3.0	0.8
4	417.2	5.0	2.3	406.9	5.0	1.5	470.4	6.0	2.7
5	412.3	9.0	3.0	399.8	5.0	1.9	461.4	6.0	2.2
6	409.7	8.7	2.7	390.8	8.0	2.2	453.4	7.0	2.6
7	420.8	5.0	1.9	388.9	8.0	2.6	444.9	5.0	2.1
8	450.7	3.0	1.2	423.3	8.0	2.6	437.3	4.0	1.7
9	424.3	5.0	1.7	389.0	9.0	3.1	495.7	4.0	1.2
10	460.3	5.0	1.7	424.5	9.0	2.1	439.1	5.0	1.8
11	430.2	3.0	1.1	388.5	12.0	4.0	497.3	5.0	2.2
12	467.7	1.0	0.7	425.0	6.0	1.8	440.3	6.0	1.7
13							500.0	3.0	1.1

좀더 확실하다. 즉 연강보다 가공경화가 적은 황동에서는 이 경향이 적어지며, 가공경화가 거의 나타나지 않는 구리에서는 소성영역에서도 경도는 증가하지 않음을 보여주고 있다.

탄성한계내에서는 인장응력이 증가할수록 경도값이 감소하는데 이를 좀더 분석하기 위하여 부가응력에 따른 경도값을 그림 7에 나타내었다. 시편에 인장응력이 부가되면 경도를 측정하는 방향으로는 단면적 수축에 의한 압축응력이 부가되는 것이므로 식(15)에 분석된 부가응력 α_x 가 양(+)의 값으로 부가되는 것과 동등한 결과가 된다.

그림 7에서 보면 인장응력이 증가하면 경도값이 감소하고 그 관계가 거의 직선적으로 변화함을 알 수 있다. 이는 부가응력과 경도와의 관계를 식(15)에 의해 구한 그림 3과 같은 경향을 보이고 있다.

참고로, 부가응력이 100MPa 증가하는데 연강(SB 41)은 Equo-Tip 경도값 H_L 로 약 6정도, 구리 및 황동은 약 11정도 감소한다. 또한 영률이 작아질수록

경도값이 작게 나타나며 이는 식(15)에 의해 고찰하였던 결과(그림 2 참조)와 일치함을 알 수 있다.

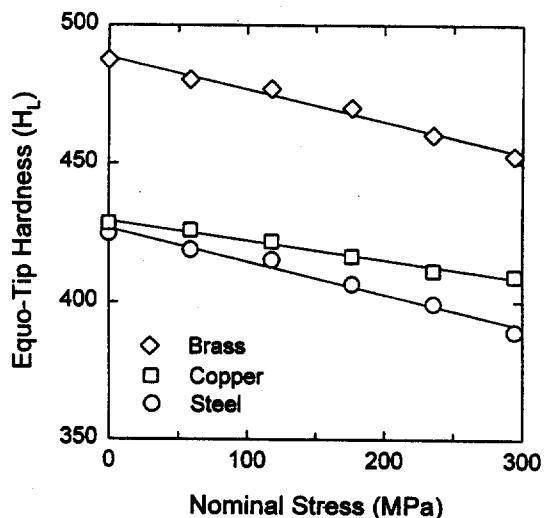


Fig. 7 Relation between the Equo-Tip hardness and applied stress in elastic region.

5. 결 론

축방향의 인장응력과 Equo-Tip 경도와의 상관관계에 대하여 실험한 결과는 다음과 같다.

- 1) 금속재료에서 탄성한계내에서는 인장응력이 증가 할수록 반발경도값은 선형적으로 감소한다.
- 2) 탄성한계내에서는 인장응력의 증가에 따른 반발 경도값의 감소율은 재료의 영률의 영향을 받는다.

참 고 문 헌

1. 町田周郎, 生形俊二, 市川純也 : 材料試驗技術,

- vol.24, No.1, 1979, p.4.
2. 西畠三樹男, 菱山光正 : 材料試驗技術, vol.25, No.4, 1980, p.29.
3. 小林浩康 : 材料試驗技術, vol.23, No.1, 1978, p.30.
4. 吉野利男外 5人 : 材料試驗技術, vol.27, No.1, 1982, p.53.
5. 小野浩二, 一柳三郎 : 防衛大學理工學研究報告, vol.16, No.3, 1975, P.239.
6. D. Tabor : The Hardness of Metals, clarendon Press, 1951, p.119.
7. 吉況武男編 : 硬さ試験法とその應用, 裳華房, 1964, p.131.