

브리넬 경도 표준 시험기 및 압입자국 자동 측정 장치의 장기 안정도 평가와 최적 시험조건에 관한 연구

방건용 · 탁내형 · 황농문
한국표준과학연구원 물질량표준부

A Study on the Evaluation of Long Term Stability of Brinell Standard Hardness Tester and Automatic Indentation Measurement System and Optimum Test Condition

G. W. Bahng, Nae-Hyung Tak and N. M. Hwang

Div. of Chemical Metrology and Materials Evaluation, KRISS, Taejeon 305-340, Korea

Abstract Evaluation of long term stability of the Brinell standard hardness tester was carried out to secure its application as a national standard in Brinell hardness. Accuracy and repeatability in load application were tested through evaluating errors in hardness measurement of certified reference blocks. All of those requirements in KS as well as ISO specifications were satisfied by this standard hardness tester. In addition to this, long term stability test of automatic indentation measurement system was carried out. The scattering range was almost the same with its error range. To figure out an optimum test condition for better repeatability and long term stability, the effect of load variation, load application speed and time have been studied using orthogonal array experimental plan. It was found that the best combination is 30 $\mu\text{m/s}$ of load application speed and 25 seconds of load application time.

(Received September 5, 1999)

Keywords: Brinell hardness, Loading speed, Load application time, Long term stability.

1. 서 론

브리넬 경도의 국가 표준을 확립하기 위하여 일차적으로 브리넬 경도 표준 시험기의 하중 발생량에 대한 정밀정확도를 평가하고 강구 누르개에 대한 변형량을 측정하였다. 측정 결과 하중의 정밀도는 관련 규격을 충분히 만족시키는 것으로 나타났으며 누르개의 변형량도 500회 이상 사용하여도 규격에서 벗어나지 않음을 확인하였다. 다음으로 압입 자국의 측정에서 유발되는 오차를 줄이기 위하여 압입 자국 자동 측정 장치를 활용하였으며 이 장치의 정밀정확도를 평가한 결과 공구현미경을 사용하여 측정할 경우보다 정밀도를 5배 높일 수 있는 것으로 나타났다[1].

재현성이 높은 시험 결과를 얻기 위해서는 경도 시험의 특성상 위와 같은 내용의 시험장치들에 대한 정밀정확도 평가 외에도 시험 조건에 대한 엄밀한 정의가 필요하다. 그러나 ISO 규격이나 KS 규격을 보면 시험기 자체에 대한 요구사항들은 별도로 자세하게 기록되

어 있지만 시험 조건들에 대해서는 분명하게 명기되어 있지 않다[2-4]. 그 한 예로서 부하 속도와 하중 유지 시간을 들 수 있는데 연구 결과를 보면 부하 속도와 하중 유지시간에 따라 경도값이 달라진다[5-7]. 현장에서는 빠른 시간 안에 결과를 얻어야 하므로 유지시간이나 부하속도를 빠르게 하는 경향이 있고 경도값이 안정되어 재현성이 높은 결과를 얻으려면 반대로 이들을 늦추거나 늘려야 한다.

위와 같은 문제는 브리넬 경도에서뿐만 아니라 로크웰 경도에서도 같은 상황이다[8,9]. 이 때문에 현재 국제적으로 로크웰 경도 시험 조건에 대한 표준화를 위하여 선진 표준기관들을 중심으로 최적 시험조건을 설정하는 작업이 진행 중에 있다[10]. 그 다음 단계로서 브리넬 경도에 대한 작업이 진행될 예정이다[11]. 본 논문에서는 브리넬 경도 표준기와 압입 자국 자동 측정 장치의 장기안정도를 평가한 다음에 브리넬 경도 표준을 최적으로 유지하기 위하여 시험조건과 관련된 내용인 부하 속도, 유지시간, 하중 등을 변화시키면서 연구한 결과를 실었다.

2. 실험방법 및 결과

2.1. 시험기의 종합오차 측정 및 평가

브리넬 경도의 오차는 브리넬 경도의 참값 HB와 측정값 HB'간의 차이로서 다음의 식 (1)과 같이 표현된다[12].

$$\frac{\Delta HB}{HB} = \frac{HB' - HB}{HB} \cong \frac{\Delta P}{P} - \frac{d^2}{2D^2} \left(1 - \frac{d^2}{4D^2} \right) \frac{\Delta D}{D} - 2 \left(1 + \frac{d^2}{4D^2} \right) \frac{\Delta d}{d} \cong -\frac{\Delta P}{P} - \frac{d^2}{2D^2} \cdot \frac{\Delta D}{D} - 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (1)$$

압입 자극의 측정오차는 측정장치의 오차 Δd_m 과 개인 오차 Δd_e 로 분해할 수 있고 규격에 따라 $d = 0.24D \sim 0.60D$ 의 조건을 만족시켜야하기 때문에 식 (1)은 식 (2)로 표시된다.

$$\frac{\Delta HB}{HB} \cong -\frac{\Delta P}{P} - (0.03 \sim 0.18) \frac{\Delta D}{D} - 2 \frac{\Delta d_m}{d} - 2 \frac{\Delta d_e}{d} \quad (2)$$

따라서 식 (2)로부터 경도시험기의 종합오차는 $\Delta P/P$, ΔD , Δd_m , Δd_e 의 각각의 양에 따라 바뀌는 것을 알 수 있다. 이 네 가지 요인들 중에서 표준시험기의 시험하중의 오차 ΔP 는 규격범위를 만족시키는 것으로 나타났다[13]. 누르개의 경우에는 90회 사용한 후의 직경 변화량 ΔP 가 $0.3 \mu m$ 이었으며 이 이후에는 500회 이상 사용하여도 변동이 없었다. 따라서 누르개의 변동에 의한 오차는 무시할 수 있는 수준이다. 지금까지 브리넬 경도를 측정하는데 있어서 가장 큰 오차원으로 알려진 것은 압입 자극 측정으로서 목적(目測)에서 생기는 오차 Δd_m 이 큰데다가 개인별 오차 유발량 Δd_e 또한 개인별로 다르기 때문이다. 그러나 이 문제는 압입 자극 자동측정장치를 이용하여 사용할 경우 쉽게 해결될 수 있는 것으로 나타났다[13].

경도시험 결과 나타나는 오차는 위에서 설명한 바와 같은 경도시험기의 정밀정확도에 의해서 뿐만 아니라 시험조건에 의해서도 영향을 받으므로 장기 안정도에 대한 평가에 더하여 최적조건을 파악하기 위해 하중, 압입 속도, 부하 유지시간 등에 의한 영향을 평가하였다.

2.2. 압입 자극 자동 측정 장치의 장기 안정도 평가

압입 자극 자동 측정장치의 장기안정도를 평가하기 위

하여 브리넬 경도 기준편에 압입 자극을 만든 다음, 최소눈금이 0.0001 mm인 삼차원 공구현미경으로 압입 자극의 직경을 측정하여 기준 직경이 각각 4.87 mm (HB 151)와 3.42 mm (HB 315)인 압입 자극이 만들어진 것을 확인하고 이를 이용하여 압입 자극 자동 측정 장치의 장기 안정도를 평가하였다.

같은 압입 자극을 하루에 3반복 측정하면서 2달 동안에 걸쳐 30회 측정하였다. 총 90번 측정한 결과 2달 동안에 걸친 변동폭은 Table 1에 정리된 바와 같이 각기 0.02 mm와 0.01 mm이었다. 이 결과는 자동 측정 장치의 정밀도인 0.01 mm와 대등한 수준으로서 자동 측정장치의 재현성이 매우 우수함을 시사하는 결과이다. 이 값을 브리넬 경도로 환산하여 HB 150과 HB 300 범위에서의 오차로 계산하면 각기 0.8% 및 0.6%이다.

2.3. 시험기의 장기 안정도 평가

경도값의 추이를 일정기간동안 관찰하면 시험기에 이상이 발생되지 않는 한 측정값은 일정한 범위 내에 있게 된다. 이 범위 내에서 항상 시험기의 측정값이 일치하도록 관리하는 것이 시험기의 장기 안정도 유지에 필수적인 사항이며 이 때의 관리폭이 경도시험기의 지시 정밀도가 된다. 일반적으로 장기 안정도검사를 위해서는 1회에 최소한 3반복 측정을 하면서 1일 1회나 2일 1회 등의 일정한 간격을 두고 최소한 20회 이상 측정하여야 한다[12]. 본 연구에서는 장기안정도 관찰 시험을 수행하기 위하여 HB 150과 HB 300 범위의 경도 기준편을 열처리한 후 가공만 완료된(경도측정을 하지 않은 것) 것을 일본의 Asahi사에 주문하여 사용하였다.

브리넬 경도의 정의에 따라 압입 자극의 지름 d 와 경도값 간에는 다음과 같은 관계식이 성립한다. 아래의 식에서 P 는 시험하중, D 는 강구 누르개의 직경이다.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

Table 1. Results of indentation diameter measurement which were obtained from the long term stability test of the automatic indentation system

Indentation diameter (mm)	Accuracy (Error, %)	Variation (Max.-Min.)	Standard deviation (2σ)
3.42	0.6	0.01	0.01
4.87	0.8	0.02	0.01

위의 식으로부터 시험하중 3,000 kgf에서 직경 10 mm의 강구를 사용하여 브리넬 경도를 구할 경우, 경도가 HB 150이면 압입 자국의 지름 d 는 4.8 mm이고 HB 300이면 3.5 mm가 된다. 기준편 사용면의 유효지름은 100 mm이므로 압입 자국 중심간의 거리가 최소한 4d 이상이어야 한다는 규정을[2] 만족하도록 유효사용면적을 기준으로 하여 계산하면 적정 사용횟수가 HB 150에서는 20회, HB 300에서는 40회가 된다. 그러나 측정점 간의 거리를 정확히 측정하여 다음 측정점을 선택하는 것이 여간 번거로운 일이 아니기 때문에 실제로는 산출된 사용회수보다 적은 각 18회, 32 회밖에 사용할 수 없었다.

한번에 3회 측정하므로 하나의 기준편으로는 경도 범위별로 각기 6일과 10일 밖에 사용할 수 없다. 즉 로크웰 경도 기준편과 달리 하나의 시편을 장기 안정도 관찰이 끝날 때까지 계속해서 사용할 수 없으므로 여러 개의 기준편을 사용할 경우에 대한 기준편 간의 경도값 차이를 보정하지 않으면 안 된다. 따라서 30번의 반복 실험을 위해서 준비한 기준편의 사용순서를 정한 다음에 현재 사용하고 있는 시험편의 사용가능 횟수가 1/2 이 남아 있는 시점에서 그 다음 사용할 시편을 투입하여 동시에 측정을 실시하였다. 이렇게 하여 현재 사용하고 있는 시편의 사용회수가 완료되는 시점에서 그 다음 사용할 시편의 측정값이 얻어지므로 이 두 측정값의 차이를 구해 시편간 경도값 차이를 보정하였다.

장기 안정도 평가에 사용된 경도 기준편으로는 하중 3000 kgf, 압입 속도 50 $\mu\text{m/s}$, 유지 시간 10초, 강구의 지름 10 mm의 브리넬 경도 표준 시험조건에서 3점을 측정하여 경도값의 호트러짐이 HB 1이내인 시편을 사용하였고 HB 150과 300의 경도 범위에 속하는 시편을 각 6개 사용하였다. 시험 결과를 Table 2에 정리하였으며 지시 정밀도가 HB ± 1 에서 모두 일치하고 있어 표준 시험기의 장기 안정도가 매우 양호한 것으로 나타났다.

Table 2. Results of hardness measurement which were obtained from the long term stability test of the standard hardness tester

Nominal hardness (HB)	Variation (Max.-Min.)	Standard deviation (2σ)	Total number of measurements
150	2 HB	1	30
307	2 HB	1	30

2.4. 최적 시험 조건에 대한 실험

표준을 안정적으로 유지하기 위해서는 하중, 부하속도, 유지시간이 표준값에 미치는 효과를 분석하여 영향이 큰 요인에 대해 유의할 필요가 있고, 재현성이 높도록 시험조건을 설정한다면 이들 조건의 이상적인 조합에 의해 경도시험의 신뢰성을 높일 수 있으므로 각 변수의 영향도를 평가하기 위해 Table 3에서처럼 L9 직교표에 각 조건들을 배열하여 효과를 분석하였다[14]. 시험 인자로서는 하중, 유지 시간, 압입 속도, 시편의 4 가지를 설정하였으며 구체적인 내용은 아래와 같다.

1) 하중 : 표준 시험 하중인 호칭 하중 3000 kgf을 중심으로 ± 10 kgf ($\pm 0.3\%$)씩 변화시켜 L1 = 2990 kgf, L2 = 3000 kgf, L3 = 3010 kgf 로 설정하였다.

2) 유지시간 : 시험하중을 완전히 시편에 가한 후 하중을 유지하는 시간을 T1 = 5초, T2 = 12초, T3 = 25초로 설정하였다.

3) 압입속도 : SHT-5의 압자축이 하강하는데 걸리는 시간과 하강 거리로부터 하강속도를 산출하여 V1 = 30 $\mu\text{m/s}$, V2 = 50 $\mu\text{m/s}$, V3 = 70 $\mu\text{m/s}$ 로 설정하였다.

4) 강구의 지름 : 지름이 9.9983 mm인 강구를 HB 300에서 90회 시험을 반복하여도 직경 변형량이 1 μm 로 ISO의 허용범위 $\pm 1 \mu\text{m}$ 이내이고 무시할 수 있는 크기인 것으로 나타났기 때문에 고려하지 않았다.

5) 측정장치 및 개인오차 : 압흔 자동측정 장치의 정밀도가 평가 결과 ± 0.001 mm이고 이 장치를 사용했을 경우 측정자의 개인오차는 없다고 볼 수 있으므로 고려하지 않았다.

이상의 조건으로 시험하여 얻은 경도값은 Table 4

Table 3. L9 orthogonal array for the experiment on the effects of loading velocity, time, weight and hardness level

Test number	Load (L)	Holding time (T)	Loading velocity (V)	Specimen (S)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Table 4. Results of hardness measurement according to the L9 orthogonal array on HB 310 standard block

Specimen		Block number		Hardness (HB)				
A		30004		312.3				
B		30022		315.4				
C		30035		312.9				
Load (kgf)	Time (sec)	Velocity (μm/s)	Hardness (HB)					Specimen
2991.8	5	30	315.8	316.0	315.2	315.6	314.1	A
2991.8	12	50	313.7	314.8	315.6	314.4	317.5	B
2991.8	25	70	312.9	314.8	314.8	314.8	314.8	C
3001.9	5	50	316.2	315.0	314.5	315.0	315.0	C
3001.9	12	70	313.0	311.9	310.8	315.1	312.9	A
3001.9	25	30	313.0	313.3	313.0	313.0	312.9	B
3011.4	5	70	314.6	313.9	313.4	314.9	314.9	B
3011.4	12	30	311.9	312.7	311.4	313.7	311.4	C
3011.4	25	50	309.2	308.9	311.1	311.6	310.1	A

및 Table 5와 같았다. 이 시험에서 사용한 기준편들의 경도는 HB 312.3, 315.4, 312.9와 HB149.0, 151.1, 149.2이었다. 각 시험조건별로 얻어진 경도값들을 분산 분석(ANOVA)하여 시험인자별로 신호대 잡음의 비율(S/N비)을 구하였다. S/N비를 구하는 공식은 요인들의 특성에 따라 달라지는데 본 연구에서는 특정 목표치에 근접하는 것이 유리하므로 망목특성(nominal-is-best)을 갖는다고 보았다. 이 경우의 공식은 아래와 같으며[15]

Table 5. Results of hardness measurement according to the L9 orthogonal array on HB 150 standard block

Specimen		Block number		Hardness(HB)				
A		10018		149.0				
B		10045		151.1				
C		10032		149.2				
Load (kgf)	Time (sec)	Velocity (μm/s)	Hardness(HB)					Specimen
2991.8	5	30	154.8	154.1	154.1	153.5	153.5	A
2991.8	12	50	152.1	152.1	150.8	152.1	152.1	B
2991.8	25	70	150.1	149.5	150.8	149.5	149.5	C
3001.9	5	50	149.5	149.5	151.4	150.1	152.1	C
3001.9	12	70	150.1	149.5	149.5	145.0	149.5	A
3001.9	25	30	150.8	149.5	150.1	150.8	150.1	B
3011.4	5	70	152.1	152.8	151.4	152.1	150.8	B
3011.4	12	30	149.5	149.5	148.1	150.1	149.5	C
3011.4	25	50	138.1	137.1	137.1	137.1	138.3	A

Table 6. ANOVA level average table of the signal-to-noise ratio

Level	HB150	HB310
L1	48.59	50.17
L2	43.10	55.38
L3	46.39	51.02
T1	45.75	53.65
T2	43.82	47.53
T3	48.52	55.38
V1	48.46	56.25
V2	45.87	49.71
V3	43.77	50.59
S1	44.42	48.92
S2	48.15	55.84
S3	45.52	51.79

n은 데이터의 개수, S_m은 데이터의 총합을 제공한 다음에 n으로 나눈 값이며 V는 분산이다.

$$S/N = \frac{\frac{1}{n}(S_m - V)}{V} \tag{4}$$

Table 6은 시험인자의 수준별 S/N비를 구한 결과이며 이를 Fig. 1과 2에 나타내었다. S/N비가 크면 클수록 신호의 힘이 크고 잡음의 힘이 작아지므로 이 값을 크게 하는 것이 재현성을 높이는데 유리하다. Fig. 1과 2에서 하중 유지시간과 압입속도에서 S/N비가 가장 크게 나오는 조건을 보면 HB 150과 HB 310 수준 모두에서 T3와 V1임을 알 수 있다. 따라서 재현성이 높게 하려면 조건 T3 (25초)와 V1 (30 μm/s)에서 시험하는 것이 바람직하다. 하중요인은 규격에 명시된 값을 유지하여야 하므로 이에 대해서는 고려할 필요가 없다.

이 결과는 경도 시험이 결국 외부에서 가해진 외력에 의한 소재의 소성변형 정도를 나타내는 것이므로 소성변형이 충분히 일어나도록 압입 속도를 낮추고 유지시간을 길게 하는 것이 안정된 결과를 얻는데 유리하다는 것을 의미한다. 따라서 압입 속도를 빠르게 하고 유지시간을 적게 하면 그만큼 경도 측정 결과의 흐트러짐이 커질 것으로 예상된다.

Table 7은 시험인자의 수준별 분산분석을 시행한 결과이며 이를 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3과 4의 가운데 점선은 측정값의 전체평균을 목표치로 삼아 나타낸 것으로서 목표치에 근접한 결과를 내는 시험조

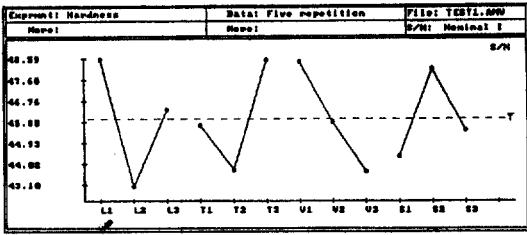


Fig. 1. ANOVA level average of the signal-to-noise ratio of hardness which was measured according to the L9 orthogonal array on HB 150 standard block.

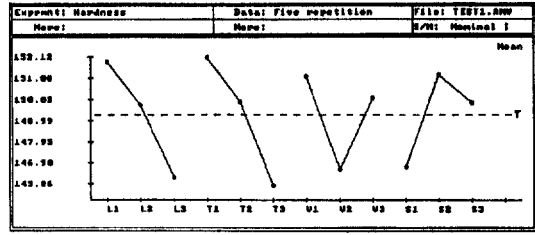


Fig. 3. ANOVA level average of the mean data of hardness which was measured according to the L9 orthogonal array on HB 150 standard block.

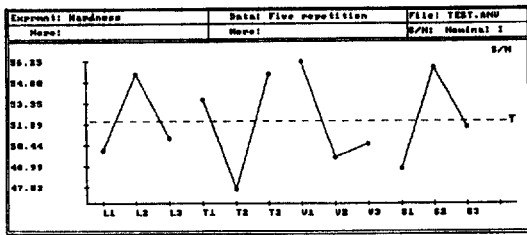


Fig. 2. ANOVA level average of the signal-to-noise ratio of hardness which was measured according to the Lq orthogonal array on HB 310 standard block.

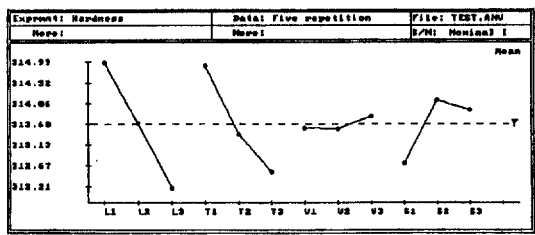


Fig. 4. ANOVA level average of the mean data of hardness which was measured according to the L9 orthogonal array on HB 310 standard block.

건은 L1(3,000 kgf)과 T2(12초)임을 알 수 있다. 경도 측정 결과에 대해 시험하중과 유지시간은 체계적인 영향을 미치며 시험하중이 클수록, 그리고 하중 유지시간이 길수록 경도값이 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 이것은 그만큼 소성변형이 많이 일어나 압입 자국이 크게 생긴다는 것을 뜻한다. 이와 달리 압입 속도의 경우에는 체계적인 변화의 경향성이 보이지 않으며 Fig. 4에서 보듯이 HB310 수준에서는 거의 그 영향이 없는

것으로 나타나고 있다.

3. 결 론

브리넬 경도 표준시험기에 대한 특성평가 결과 하중정밀도는 0.063%로 ISO규정을 충분히 만족하고 있다. 브리넬 경도 기준편을 이용하여 장기안정도를 평가한 결과 변동폭은 ± 1 HB 이내이었으며 이것은 HB 150과 HB 300 경도 범위에서 각기 1.3%와 0.7%의 오차에 해당된다. 그러나 이 오차는 표준 시험기의 높은 하중정밀도를 고려할 때 하중의 변동에서 오는 것이라기보다 경도 기준편 자체의 흐트러짐에서 유발되는 것이라고 보는 것이 타당하다.

측정시간 개인 오차를 최소화하기 위하여 사용된 브리넬 경도 압입 자국 자동 측정 장치의 장기 안정도 평가 시험 결과 변동폭이 경도 범위에 따라 달랐으며 그 값은 0.01~0.02 mm이었다. 이것은 자동 측정 장치의 분해능과 같은 수준이다. 이로 인한 브리넬 경도 오차는 HB 150과 HB 300 범위에서 각기 0.8% 및 0.6%에 해당된다. 경도가 낮을수록 오차가 커지는 경향을 보이는데 이것은 경도가 낮을수록 소재가 연하여서 압입 자국과 표면간의 경계가 선명하지 못하기 때문인 것으로 추정된다.

Table 7. ANOVA level average table of the mean data

Level	HB150	HB310
L1	151.91	314.99
L2	149.80	313.64
L3	146.24	312.21
T1	152.12	314.90
T2	149.97	313.39
T3	145.86	312.55
V1	151.17	313.53
V2	146.63	313.51
V3	150.15	313.79
S1	146.75	312.75
S2	151.28	314.15
S3	149.91	313.93

경도 기준편을 이용하여 측정된 장기안정도 내지 종합 정밀도는 경도 범위에 따라 대략적으로 1.0~1.5%로서 시험기와 측정기기에서 유발되는 오차를 합한 것보다 최대 2배 큰 값이다. 따라서 브리넬 경도의 정밀도를 국가 전체적으로 향상시키기 위해서는 고품질의 기준편 개발을 우선적으로 추진하여야 하는 것으로 결론지을 수 있다.

시험조건이 브리넬 경도값에 미치는 영향을 보고자 직교 좌표법으로 4가지 인자들에 대해서 시험한 결과 시험하중과 하중유지시간의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며 압입속도는 상대적으로 적었다. 이 인자들 중에서 시험하중은 규격에 명시되어 있으므로 최대한 정밀하게 조정하면 그 영향을 최소화할 수 있으나 하중 유지시간과 압입 속도는 규격에 명시되어 있지 않으므로 시험 조건에 따라 경도 측정 결과가 달라질 수 있게 된다. 재현성을 높이기 위해서는 시간을 길게 하고 속도를 높게 하는 것이 유리하였으며 본 논문에서 연구한 조건 범위 내에서는 각기 25초와 30 $\mu\text{m/s}$ 가 되나 이 조건들을 무작정 늘릴 수만은 없는 것이 시험의 신속성과 목표치에 가까운 값을 얻는 것도 고려하여야 하기 때문이다. 실제로 유지시간의 경우 목표치에 가까운 값을 얻기 위해서는 12초로 설정하는 것이 좋은 것으로 나타났다. 앞으로 이 부분들에 대해서는 집중적인 연구가 필요하며 국제적으로도 이 부분의 표준 규격화를 위하여 BIPM을 중심으로 2000년부터 작업이 개시될 예정으로 되어 있다[11].

후 기

본 연구는 과학기술처의 후원아래 수행된 연구결과임

을 밝힙니다.

참고문헌

1. 방건웅, 탁내형, 브리넬 경도 표준 시험기 및 압입자극 자동측정장치의 특성평가에 관한 연구, 열처리공학회지, 12(4), (1999) 1-9.
2. 브리넬 경도 시험 방법, KS B 0805 (1983).
3. Brinell hardness test, Part 1, Test method, ISO/DIS 6506-1 (1997).
4. Brinell hardness test, Part 2, Verification of testing machine, ISO/DIS 6506-2 (1997).
5. 秦 勝一郎, 樋田 並照, 矢野 宏, 브리넬 경도 표준의 설정과誤差評價, 精機學會誌, 45(3), (1979) 318-323.
6. Edward T. Tobolski, Factors that affect the accuracy of indentation hardness tests, ASTM STP 1025 (1989) 46-51.
7. (財)日本産業技術振興協會 産業計測標準委員會, 硬さ試験技術, JIMS 技術基準 NO. 4 (1977) 30.
8. Ference Petik, The effects of a change of loading cycle parameters in hardness testing, Bulletin OIML, No. 113(12), (1988) 35-40.
9. J. F. Song, J. H. Smith, T. V. Vorburger, A metrology approach to unifying Rockwell C hardness scales, VDI Berichte NR. 1194 (1995) 19-31.
10. G. Barbato, A. Germak, Some considerations on hardness measurement, Presented at the 2nd meeting of the AHWGH(Ad-Hoc Working Group on Hardness), BIPM, Paris, 1999. 5.
11. Summary of the Second Meeting of the AHWGH, 10 May, 1999, BIPM - Paris
12. 문한규 외, 정밀측정교재 85-006, 경도, 공업진흥청, 서울 (1985) 21.
13. 방건웅 외, 국가표준분야확대, KRISS-97-005-IR, 과학기술처 (1997) 537.
14. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 서울 (1984) 423.
15. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 서울 (1984) 635.