[논문] 열처리공학회지, 제13권 제3호(2000)
J. of the Korean Society for Heat Treatment, *Vol. 13, No. 3, (2000) pp. 163~169*

# 한국산업표준(KS)에 따른 로크웰 경도 시험기의 불확도 산정에 관한 연구

**방건웅 · 탁내형**
한국표준과학연구원 물질량표준부

# A Study on the Evaluation of Uncertainty of Rockwell Hardness C Scale According to the Korean Industrial Standards(KS)

**G. W. Bahng and Nae-Hyung Tak**
*Div. of Chemical Metrology and Materials Evaluation, Korea Research Institute of Standards and Science, #1, Doryong-dong, Yusoung-gu, Taejon, 305-600, Korea*

***Abstracts*** Recently, uncertainty of hardeness became a major concern for the people working on the laboratory evaluation and accreditation. It is required to indicate uncertainty of hardness tester on the report after calibration. In addition to this, uncertainty of certified hardness reference block is also required to indicate on the certification sheet. Method on the evaluation of uncertainty in hardness measurement is agreed only recently for Rockwell hardness C scale. In this paper, a preliminary calculation of uncertainty based on type B evaluation has been made for hardness testers which satisfies the requirements of Korean Standards. It was found that the tolerance limit of mean value specified in KS should be increased to be compatible with the calculated uncertainty.

*(Received April 7, 2000)*

***Key words***: *Uncertainty, Rockwell hardness, Korean Standards*

## 1. 서 론

표준은 국제적으로 합의된 기준이 설정됨으로써 이루어진다. 보통 이 기준은 영구불변이라고 생각되는 자연현상을 기초로 삼는 것이 일반적이다. 대표적인 예로서 빛의 속도를 들 수 있다. 빛의 속도는 진공 중에서는 항상 일정하다고 알려져 있기 때문에 이를 이용하여 길이 표준이 정의되어 있다. 빛이 진공 중에서 약 3 억분의 1초 (정확하게는 299,792,458 분의 1초) 동안에 진행한 거리를 1 m로 한다고 정의되어 있으므로 어떤 방법을 사용하건 주어진 시간동안 빛이 진행한 거리를 정밀하게 측정하기만 하면 된다.

그러나 경도의 경우는 절대적인 기준이 없다는 특성이 있다. 이 때문에 물질에 따라서, 혹은 목적에 따라서 시험방법이 달라진다. 이러한 연유로 경도시험방법은 다양하며 표준도 각 시험방법별로 따로따로 정의되어야 한다는 어려움이 있다. 그렇기 때문에 경도 표준이 확립되려면 각 시험방법별로 시험기기, 시험조건 등과 관련된 내용이 엄밀하게 정의되어야 하고 표준의 전달 수단으로서 경도 기준편이 있어야 한다. 이러한 이유로 인하여 어느 특정 경도와 관련된 규격을 찾아보면 시험기기의 사양에 대한 규격, 시험방법과 조건에 대한 내용이 적혀있는 규격, 그리고 기준편에 대한 규격의 3 가지가 필수적으로 있게 된다. 예를 들어 KS 규격 중에서 로크웰 경도에 대한 것을 찾아보면 로크웰 경도 시험기(KS B 5526), 로크웰 경도 시험방법(KS B 0806), 로크웰 경도 기준편(KS B 5530) 등의 3 가지가 있다. 이것은 다른 경도시험방법의 경우도 마찬가지이며 ISO 규격이나 다른 나라들의 규격도 같은 처지이다.

지금까지 경도 시험결과에 대한 신뢰도를 표시하는 방법으로서 오차와 흐트러짐의 개념이 사용되어 왔다. 그러나 측정값과 참값의 차이라는 오차의 개념은 참값을 알 수 없기 때문에 근본적으로 모호한 부분이 있는 것을 피할 수 없다. 이 때문에 오차가 아니라 측정된 결과를 바탕으로 참값이 존재할 범위를 추정하는 불확도의 개념으로 측정결과를 나타내는 작업이 진행되고 있다.[1,2] 불확도는 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산특성을 나타내는 파라미터라고 정의되고 있다. 최근 들어 ISO 9000 시리즈에 의한 품질시스템 인증이 전 세계적으로 확산되면서 측정 불확도의 평가와 표현방법

에 대한 중요성이 무게를 더하고 있다. 1993년에 ISO에서는 측정불확도 표현 지침서를 발간하여 통일적으로 적용할 수 있는 방법을 제시하였다.[1] 이에 따라 측정결과를 보고하는데 있어서 불확도를 병기하는 것이 필수적으로 되고 있다. 경도시험에서도 예외는 아니어서 경도시험기의 불확도, 경도 기준편의 불확도 등을 산정하여 나타내어야 하게 되었다. 국내의 교정업체들과 업계에서도 이에 대한 필요성을 크게 느끼고 있으나 구체적으로 경도의 불확도를 어떻게 산정하여야 하는지 잘 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 한국 산업표준의 내용을 바탕으로 경도 시험법 중에서 가장 널리 쓰이는 로크웰 경도 시험기의 불확도를 산정하였다.

## 2. 로크웰 경도 불확도의 산정

### 2.1. 경도 불확도의 산정 이론

현재 세계 어느 나라의 산업표준규격에서건 경도 시험기의 불확도산정에 대해서 구체적으로 언급된 것이 없다. 여러 가지 경도 시험방법 중에서도 가장 널리 쓰이고 있는 로크웰 경도에 대해서 유럽 연합 국가들이 서로 협력하여 경도의 불확도 산정을 위한 지침서를 공동으로 발간하였다. 1996년에 처음 발간된 지침서의 초안은 이태리의 IMGC, 독일의 PTB와 MPA NRW에서 공동으로 작성한 것이다. 이 지침서의 최종안이 99년 1월에 제출되었으며 곧 표준절차로 확정될 것으로 예상된다.[3]

불확도 계산 방법은 ISO지침 (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) 에 설명되어 있으며 활용 가능한 정보의 양에 따라 두 가지 다른 방법이 있다.[1] 예를 들어 경도시험기와 누르개에 대한 요소별 불확도가 기록되어 있는 교정성적서가 있는 경우와, 경도시험기와 누르개에 대해 규격에 명시되어 있는 인자들이 규격에서 요구하는 공차 범위 안에 들어 있다는 확인서만이 있는 경우의 불확도 계산방법이 달라진다. 뒤섞인 상황도 있을 수 있는데 예를 들어 누르개에 대해서는 불확도가 표시된 교정 성적서가 있고 경도시험기에 대해서는 표준규격을 만족한다는 확인서가 있는 경우가 이에 해당된다.

불확도 산정의 첫 번째 단계는 연관된 측정 인자들 (독립적인 변량) 에 해당하는 관련 분산을 계산하는 것이다. 불확도가 기재되어 있는 교정 성적서를 가지고 있는 경우에는 통상적으로 2σ 수준에서의 관련 불확도로 교정 성적서에 주어진 측정결과로 부터 A형의 표준 불확도(standard uncertainty)를 계산하며, 이 표준 불확도는 교정 성적서에 표시된 불확도, 엄밀하게는 확장불확도(expanded uncertainty)를 같은 성적서에 표시된 포함인자(coverage factor) $k$로 나누어도 된다. 교정 성적서가 없을 경우에는 각 요소별로 교정을 실시하여 교정에 사용한 측정기기의 불확도와 측정결과의 분산으로부터 얻어지는 불확도를 합성하여 요소별 표준 불확도를 구한다.

위와 달리 규격에 명시된 ±a의 허용 공차 범위를 만족한다는 정보만을 가지고 있을 때에는 ±a의 관련 공차 대역을 포함하는 B형의 표준 불확도를 계산하여 구하며 사각분포가정에 바탕을 둔 분산, $u^2=a^2/3$을 이용한다.

두 번째 단계는 각 인자들로부터 초래되는 불확도의 총합적 표현이라고 할 수 있는 합성 표준 불확도 (combined standard uncertainty)를 계산하는 것이다. 로크웰 경도의 경우, 경도 H가 측정된 양 (종속변량) 이라면 아래와 같이 측정변량들의 함수로 표현될 수 있다.

$$H=f(F_p, F, r, \alpha, t_p, t, v, d) \quad (1)$$

여기에서

| | |
|---|---|
| H 측정된 경도 | $t_p$ 기준하중 부하시간 |
| $F_p$ 기준하중 | t 시험하중 부하시간 |
| F 시험하중 | v 압입 속도 |
| r 누르개 곡률반경 | d 압입 깊이 |
| α 누르개 각도 | |

위의 8 가지 측정변량들은 상호 연관성이 없는 독립변량이다. 서로 상관 관계가 없는 경우의 합성 표준 불확도 $u_c(H)$는 합성 분산(combined variance)인 $u_c^2(H)$의 양의 제곱근으로서 $u_c^2(H)$는 아래의 근사식으로부터 구해진다.

$$u_c^2(H) = \sum\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

여기에서 $u(x_i)$는 $x_i$의 표준 불확도이다. 편도함수 $\partial f/\partial x_i$ 는 함수 $f$ 를 $x_i$에 관하여 미분한 것으로서 $x_i$의 변화에 대한 H의 변화를 나타내는 것이며 감도계수 (sensitivity coefficient)라고 불린다. 위의 식을 아래와 같이 풀어 쓸 수 있다.

**Table 1.** Sensitivity coefficients at different hardness levels for each parameter in Rockwell hardness C scale.

| | Sensitivity coefficient at different hardness levels, $\frac{\partial H}{\partial x_i}$ | | |
|---|---|---|---|
| Hardness level (HRC) | 20~25 | 40~45 | 60~65 |
| $F_p$ (N) | $1.2\ 10^{-1}$ | $7.0\ 10^{-2}$ | $5.0\ 10^{-2}$ |
| F (N) | $-4.0\ 10^{-2}$ | $-3.0\ 10^{-2}$ | $-2.0\ 10^{-2}$ |
| α(°) | $1.3\ 10^{+0}$ | $8.0\ 10^{-1}$ | $4.0\ 10^{-1}$ |
| r (mm) | $1.5\ 10^{+1}$ | $3.0\ 10^{+1}$ | $5.0\ 10^{+1}$ |
| d (μm) | $-5.0\ 10^{-1}$ | $-5.0\ 10^{-1}$ | $-5.0\ 10^{-1}$ |
| v (μm/s) | $-2.0\ 10^{-2}$ | $0.0\ 10^{+0}$ | $3.0\ 10^{-2}$ |
| $t_p$ (s) | $1.0\ 10^{-2}$ | $5.0\ 10^{-3}$ | $4.0\ 10^{-3}$ |
| t (s) | $-7.0\ 10^{-2}$ | $-4.0\ 10^{-2}$ | $-3.0\ 10^{-2}$ |

$$u_c^2(H) = \left(\frac{\partial H}{\partial F_p}\right)^2 u^2(F_p) + \left(\frac{\partial H}{\partial F}\right)^2 u^2(F_i) + \left(\frac{\partial H}{\partial r}\right)^2 u^2(r) + \left(\frac{\partial H}{\partial \alpha}\right)^2 u^2(\alpha) + \left(\frac{\partial H}{\partial t_p}\right)^2 u^2(t_p) + \left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)^2 u^2(t) + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2 u^2(y) + \left(\frac{\partial H}{\partial d}\right)^2 u^2(d) \quad (3)$$

감도계수는 직접 측정하여 점증비율의 기울기로부터 구해야 하며 만약 $x_i$와 경도 H의 상관관계가 수식적으로 표현될 수 있다면 수식을 미분하여 구할 수도 있다. 예로서 압입 깊이 d(μm)와 경도 H(HRC) 의 관계식은 정의에 의하여 $H = 100 - 0.5d$ 이며 이를 미분하면 압입깊이에 대한 경도의 감도계수가 얻어지고 그 값은 $-5.0 \times 10^{-1}$ 이 된다. 로크웰 경도(HRC)의 경우에는 각 인자별 감도계수가 보고된 바 있으며[4,5] Table 1은 이들 감도계수를 경도 수준별로 정리한 것이다.

## 2.2. 한국산업표준(KS)에 따른 경도 시험기 불확도의 계산

식 (3)을 이용하여 합성 표준 불확도를 구하려면 각 인자별 표준 불확도를 구하여야 한다. 각 인자별 표준 불확도는 데이터의 종류나 조건에 따라 A형 평가를 거치거나 B형 평가를 거쳐 구한다. 본 논문에서는 한국산업표준에 명시되어 있는 경도 시험기의 허용 공차를 바탕으로 B형 평가를 거쳐 구하였다. Table 2는 경도 시험기와 누르개에 대해 한국산업표준 KS B5526 (로크웰 경도 시험기)[6]과 KS B5530 (로크웰 경도 기준편)[7]에서 일반 시험기와 기준편을 교정하는데 사용하는 고정밀 시험기에 대해 명시되어 있는 허용 공차 범위(±a)를 정리한 것이다.

기준하중, 시험하중, 누르개 각도, 누르개 곡률 반경, 경도 지시장치 등에 대한 허용 공차는 Table 2에서 보듯이 한국 산업표준에 분명하게 명시되어 있다. 그러나 압입 속도, 기준하중 유지시간, 시험하중 유지시간 등의 경도 시험 절차와 관련된 내용에 대해서는 이에 해당하는 규격인 KS B 0806 (로크웰 경도 시험 방법)[8]을 살펴보아도 허용 공차가 명시되어 있지 않다. 편법으로 이들 인자들의 허용 공차를 아래와 같은 방법으로 구하였다.

KS B 0806 (로크웰 경도 시험 방법)의 규격에 의하면 경도가 대략 HRC 60 되는 시료의 C 경도 시험을 하였을 때 누르개 압입 소요시간이 2~3 초가 되도록

**Table 2.** Tolerance limits(±a) according to the Korean Standards(KS).

| $x_i$ | KS B5526* | $a_j$ | KS B5530** | $a_j$ |
|---|---|---|---|---|
| $F_p$ (N) | ±0.20 kg (±1.96 N) | 1.96 | ±1% (±0.1 kg, ±0.98 N) | 0.98 |
| F (N) | ±0.90 kg (±8.8 N) | 8.8 | ±0.3 % (±0.45 kg, ±4.4 N) | 4.4 |
| α(°) | ±30' (±0.5) | 0.5 | ±10' (±0.17°) | 0.17 |
| r (mm) | ±0.02 mm | 0.02 | ±0.003 mm | 0.003 |
| d (μm) | ±0.5 HRC (±1 mm) | 1.0 | ±0.3 HRC (±0.6 μm) | 0.6 |
| v (μm/s) | [Calculated from the indentation time specified in KS, 2~3 s] | 17.5/16/13.5 | [Calculated from the indentation time for HRC 60 block as specified in KS, 3 s at HRC 60] | 5.4 |
| $t_p$ (s) | Not specified. | 2 | Not specified. | 2 |
| t (s) | 2~6 s. | 2 | 10 s. | 0.1 |

*For Rockwell and Rockwell Superficial Hardness Testing machines
**For certified reference blocks of Rockwell and Rockwell Superficial Hardness

하며 또한 시료가 없는 상태에서 100 kgf (980.7 N)의 하중으로 부하 조작을 하였을 때 부하 작동 시간이 4~5초가 되도록 한다고 되어 있다. 압입 깊이를 구해야 압입 속도를 알 수 있으므로 기준 하중을 가한 다음에 다이알 계기를 0으로 맞추어 놓고 부가하중을 가하면서 다이알 계기상의 바늘이 움직인 눈금을 들어간 깊이로 환산하여 깊이를 구하였다. 통상적으로 HRC 20 수준에서는 부가하중을 가하면 바늘이 105 HRC눈금만큼 이동하고 40수준에서는 95 눈금, 그리고 60수준에서는 80 눈금만큼 이동한다. HRC 한 눈금은 깊이로 환산하여 2 μm에 해당하므로[6] 부가하중을 가할 때 들어가는 깊이는 각 경도수준에서 210, 190, 160 μm이 된다. 압입 소요 시간이 2~3 초로 규정되어 있으므로 압입 속도는 각 경도수준에서 70~105 μm/s, 63~95 μm/s, 53~80 μm/s 이 된다. 허용 범위의 중심 값을 기준으로 한다면 압입 속도는 87.5±17.5 μm/s, 79±16 μm/s, 66.5±13.5 μm/s 라고 표현할 수 있으며 이로부터 $a_j$ 값을 정하였다.

이와 달리 KS B 5530 (로크웰 경도 기준편)에서는 시험하중의 부하속도를 누르개의 평균 압입 속도로서 약 10 μm/s 로 한다고 되어 있으나 로크웰 경도에 대해서는 HRC 60 의 시료를 측정할 때의 압입 시간이 3초가 되도록 설정한다고 되어 있다. 이 경우의 압입 속도는 위와 같은 방식으로 계산하면 53 μm/s가 된다. 허용 범위에 대해서는 언급이 없으나 표준시험기에는 타이머가 부착되어 있어 압입 속도를 제어할 수 있다. 타이머의 작동 오차 범위를 ±0.3 초로 가정한다면 압입 속도는 48.5~59.3 μm/s가 된다. 이것은 중심값을 기준으로 하면 53.9±5.4 μm/s이 되므로 5.4 μm/s 을 압입 속도의 허용 공차로 삼았다.

기준 하중의 유지시간에 대해서는 어느 곳에도 명시된 내용이 없다. 기준하중을 가한 다음에 다이알 계기의 0 점을 맞추는데 걸리는 시간이 경험적으로 보아 3±2 초이므로 허용 공차를 2 초로 하였다. 시험하중 유지시간은 2~6 초로 되어 있으므로 4±2 초로 간주하고 허용 공차를 2 초로 잡았다. 경도 기준편을 교정할 때는 10 초로 한다고 명기되어 있다. 표준시험기에는 일반 시험기와 달리 타이머가 설치되어 있어 10±0.1 초 이내로 조절하는 것이 가능하다. 따라서 시험 하중 유지시간에 대한 허용 공차를 0.1 초로 하였다.

경도 시험기의 기계적 구조와 관련된 5 가지 인자들, 즉 기준하중, 시험하중, 누르개 각도, 누르개 곡률 반경, 경도 지시장치에 대한 검사 결과가 허용 공차 범위 안에서 각기 규격에 부합하는지 여부를 근거로 하여 시험

**Table 3.** Evaluation of the uncertainty propagation in the case of conformity assessment for the hardness testing machine and for the indenter according to the KS B 5526-1981, for general purpose of use.

| $x_i$ | $a_j$ | $u^2(x_i) = \frac{a_i^2}{3}$ | Sensitivity coefficients at different hardness levels, $\frac{\partial H}{\partial x_i}$ | | | Contributions to $u^2(H)$ at different hardness levels, $u^2(H) = \left(\frac{\partial H}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 20-25 | 40-45 | 60-65 | 20-25 | 40-45 | 60-65 |
| $F_p$ (N) | 1.96 | $1.3\ 10^{+0}$ | $1.2\ 10^{-1}$ | $7.0\ 10^{-2}$ | $5.0\ 10^{-2}$ | $1.9\ 10^{-2}$ | $6.4\ 10^{-3}$ | $3.3\ 10^{-3}$ |
| F (N) | 8.8 | $2.6\ 10^{1}$ | $-4.0\ 10^{-2}$ | $-3.0\ 10^{-2}$ | $-2.0\ 10^{-2}$ | $4.2\ 10^{-2}$ | $2.3\ 10^{-2}$ | $1.0\ 10^{-2}$ |
| α(°) | 0.5 | $8.3\ 10^{-2}$ | $1.3\ 10^{+0}$ | $8.0\ 10^{-1}$ | $4.0\ 10^{-1}$ | $1.4\ 10^{-1}$ | $5.3\ 10^{-2}$ | $1.3\ 10^{-2}$ |
| r (mm) | 0.02 | $1.3\ 10^{-4}$ | $1.5\ 10^{+1}$ | $3.0\ 10^{+1}$ | $5.0\ 10^{+1}$ | $2.9\ 10^{-2}$ | $1.2\ 10^{-1}$ | $3.3\ 10^{-1}$ |
| d (μm) | 1.0 | $3.3\ 10^{-1}$ | $-5.0\ 10^{-1}$ | $-5.0\ 10^{-1}$ | $-5.0\ 10^{-1}$ | $8.3\ 10^{-2}$ | $8.3\ 10^{-2}$ | $8.3\ 10^{-2}$ |
| v (μm/s) | * | ** | $-2.0\ 10^{-2}$ | $0.0\ 10^{+0}$ | $3.0\ 10^{-2}$ | $4.1\ 10^{-2}$ | $0.0\ 10^{+0}$ | $5.5\ 10^{-2}$ |
| $t_p$ (s) | 2 | $1.3\ 10^{+0}$ | $1.0\ 10^{-2}$ | $5.0\ 10^{-3}$ | $4.0\ 10^{-3}$ | $1.3\ 10^{-4}$ | $3.3\ 10^{-5}$ | $2.1\ 10^{-5}$ |
| t (s) | 2 | $1.3\ 10^{+0}$ | $-7.0\ 10^{-2}$ | $-4.0\ 10^{-2}$ | $-3.0\ 10^{-2}$ | $6.4\ 10^{-3}$ | $2.1\ 10^{-3}$ | $1.2\ 10^{-3}$ |
| Total $u_c^2 = \sum u_i^2$ | | | | | | 0.36 | 0.288 | 0.50 |
| Combined standard uncertainty, $u_c$ | | | | | | 0.60 | 0.54 | 0.70 |
| Expanded uncertainty, $U = ku_c$ | | | | | | 1.20 | 1.07 | 1.40 |

* It is 17.5, 16, and 13.5 for each hardness level, respectively.
** It is $1.02\times10^2$, $8.5\times10^1$, and $6.1\times10^1$ for each hardness level, respectively.

**Table 4.** Evaluation of the uncertainty propagation in the case of conformity assessment for the hardness testing machine and for the indenter according to the KS B 5530-1981, for calibration of standard blocks.

| $x_i$ | $a_j$ | $u^2(x_i) = \frac{a_i^2}{3}$ | Sensitivity coefficients at different hardness levels, $\frac{\partial H}{\partial x_i}$ | | | Contributions to $u^2(H)$ at different hardness levels, $u^2(H) = \left(\frac{\partial H}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 20-25 | 40-45 | 60-65 | 20-25 | 40-45 | 60-65 |
| $F_p$ (N) | 0.98 | $3.2\ 10^{-1}$ | $1.2\ 10^{-1}$ | $7.0\ 10^{-2}$ | $5.0\ 10^{-2}$ | $4.6\ 10^{-3}$ | $1.6\ 10^{-3}$ | $8.0\ 10^{-4}$ |
| F (N) | 4.4 | $6.5\ 10^{+0}$ | $-4.0\ 10^{-2}$ | $-3.0\ 10^{-2}$ | $-2.0\ 10^{-2}$ | $1.0\ 10^{-2}$ | $5.9\ 10^{-3}$ | $2.6\ 10^{-3}$ |
| α(°) | 0.17 | $9.6\ 10^{-3}$ | $1.3\ 10^{+0}$ | $8.0\ 10^{-1}$ | $4.0\ 10^{-1}$ | $1.6\ 10^{-2}$ | $6.1\ 10^{-3}$ | $1.5\ 10^{-3}$ |
| r (mm) | 0.003 | $3.0\ 10^{-6}$ | $1.5\ 10^{+1}$ | $3.0\ 10^{+1}$ | $5.0\ 10^{+1}$ | $6.8\ 10^{-4}$ | $2.7\ 10^{-3}$ | $7.5\ 10^{-3}$ |
| d (μm) | 0.6 | $1.2\ 10^{-1}$ | $-5.0\ 10^{-1}$ | $-5.0\ 10^{-1}$ | $-5.0\ 10^{-1}$ | $3.0\ 10^{-2}$ | $3.0\ 10^{-2}$ | $3.0\ 10^{-2}$ |
| v (μm/s) | 5.4 | $9.7\ 10^{+0}$ | $-2.0\ 10^{-2}$ | $0.0\ 10^{+0}$ | $3.0\ 10^{-2}$ | $3.9\ 10^{-3}$ | $0.0\ 10^{+0}$ | $8.7\ 10^{-3}$ |
| $t_p$ (s) | 2 | $1.3\ 10^{+0}$ | $1.0\ 10^{-2}$ | $5.0\ 10^{-3}$ | $4.0\ 10^{-3}$ | $1.3\ 10^{-4}$ | $3.3\ 10^{-5}$ | $2.1\ 10^{-5}$ |
| t (s) | 0.1 | $3.3\ 10^{-3}$ | $-7.0\ 10^{-2}$ | $-4.0\ 10^{-2}$ | $-3.0\ 10^{-2}$ | $1.6\ 10^{-5}$ | $5.3\ 10^{-6}$ | $3.0\ 10^{-6}$ |
| Total $u_c^2 = \sum u_i^2$ | | | | | | 0.065 | 0.046 | 0.051 |
| Combined standard uncertainty, $u_c$ | | | | | | 0.26 | 0.22 | 0.23 |
| Expanded uncertainty, $U = ku_c$ | | | | | | 0.52 | 0.44 | 0.46 |

기의 합격 여부를 가린다면 합격된 시험기의 경우 5가지 인자들의 측정값이 $+a_j$와 $-a_j$의 구간 안에 있을 확률은 1이고 이 구간 밖에 있을 확률은 0이 된다. 측정값에 대한 별다른 정보가 없다면 이 구간 안의 어디에서나 검사 결과가 있을 확률은 똑같다고 가정할 수밖에 없으므로 확률 분포는 직사각형 분포가 된다. 직사각형 분포에서 기대값 $x_i$는 구간의 중앙점, $x_i = (a_- + a_+)/2$ 가 되고 분산은 $u^2(x_i) = (a_+ - a_-)^2/12$ 가 된다. 만일 $(a_+ - a_-)$를 2a라고 나타내면 분산은 $u^2(x_i) = a^2/3$ 이 되며 표준 불확도는 분산의 양의 제곱근인 $a/\sqrt{3}$ 가 된다.

시험 과정과 관련된 3가지 인자들, 즉 압입 속도, 기준하중 유지시간, 시험하중 유지시간과 관련된 허용 공차로부터 유발되는 분산과 표준 불확도도 위와 같은 방법으로 구할 수 있다. 8가지 인자들로부터 유발되는 표준 불확도를 합성하는 것은 식 3과 같은 방법으로 구한다. 각 인자별 감도계수의 제곱에 인자별 표준 불확도를 제곱한 값을 곱하여 얻은 값을 모두 더한 다음에 이 값의 양의 제곱근을 구하면 합성 표준 불확도가 된다. 이 과정을 나타낸 것이 Table 3과 4이다. Table 3은 일반기급의 로크웰 경도 시험기를 기준으로 구한 것이며 Table 4는 경도 기준편을 인증하는데 쓰는 고정밀 로크웰 경도 시험기를 기준으로 하여 구한 것이다. 합성 표준 불확도를 구한 다음에는 포함인자인 $k$ 값으로서 2를 취하여 곱하면 확장 표준 불확도를 얻게 된다. 기준편 교정용 시험기는 확장 불확도가 0.44~0.52 HRC 로서 일반 시험기의 확장 불확도 1.07~1.40 HRC 보다 낮다.

## 2.3. 논의 및 고찰

한국산업표준(KS)에서 허용된 공차를 기준으로 불확도를 산정할 경우, 95% 신뢰 수준에서의 확장 불확도 값이 일반시험기는 HRC 60~65의 경도 범위에서 1.40 HRC 이었다. 불확도의 개념을 입력량의 변동에 의한 측정값의 변동이라고도 볼 수 있으므로 이것은 KS규격을 만족하는 시험기를 수십 대 제작하였다고 가정할 경우 이 시험기들을 사용하여 HRC 60인 경도기

**Table 5.** Tolerance limit of average value(average-nominal value) and scattering range(max.-min.) after 5 times of measurement on certified reference block at different hardness level specified in KS B 5526 and ISO 6508-2.

| Hardness level (HRC) | Tolerance limit of average | | Tolerance range of scattering | |
|---|---|---|---|---|
| | KS | ISO | KS | ISO |
| 60-65 | ±0.8 | ±1.5 | 0.8 | 1.2 |
| 45-50 | ±0.8 | ±1.5 | 0.8 | 1.8 |
| 30-35 | ±1.2 | ±1.5 | 1.0 | 2.1 |

**Table 6.** Comparison of Rockwell hardness C scale standards.

| | ISO (97) | EN (94) | ASTM (97) | JIS (92/93) | KS (91) |
|---|---|---|---|---|---|
| Preliminary test force ($F_o$) | ±2.0% | ±2.0% | ±0.2kgf | ±2.0% | ±0.2kgf |
| Test force (F) | ±1.0% | ±1.0% | ±0.9kgf | ±0.7% | ±0.9kgf |
| Indenter angle ($\alpha^o$) | ±0.35° | ±0.35 | ±0.35 | ±0.5 | ±30' |
| Indenter radius ($\gamma$) | ±0.01 nm | ±0.01 nm | ±0.01 nm | ±0.02 nm | ±0.02 nm |
| Indentation depth (d) | ±0.001 nm | ±0.001 nm | ±0.001 nm | 0.5 HRC | 0.5 HRC. |
| Indentation velocity (v) | 1~8 s | 2~8 s | 1~8 s | 2~3 s | 2~3 s |
| Preliminary test force dwell time | within 3 s | over 2 s | within 3 s | Not specified. | Not specified. |
| Test force dwell time | 4±2 s | 4±2 s | within 3s, 5~6 s | 2~6 s | 2~6 s |
| Angle between the diamond cone axis and indenter holder axis | within 0.5° | within 0.5° | Not specified. | Not specified. | Not specified. |
| Difference in readings before and after applying the additional test force | 1.5 HRC or within 0.5 HRC | Not specified. | Not specified. | within ±0.5 HRC | within ±0.5 HRC |

준편을 측정하였을 때 각 시험기로부터 얻어진 평균값들이 HRC 60을 중심으로 ±U, 즉 +1.4 HRC 에서 -1.4 HRC 의 구간에 측정결과의 대부분인 95%가 포함될 것으로 기대된다고 하는 의미가 된다. 이것은 시험기를 제작한 다음에 간접교정을 실시하여 보정값을 구한다면 보정값들의 95%가 ±1.4 HRC 이내의 범위에 걸쳐 퍼져 있을 것이라고 예측할 수 있다는 뜻이 되기도 한다. 따라서 KS규격에서 허용된 공차로부터 구한 확장불확도는 개념적으로 KS규격을 만족하는 시험기들을 이용하여 구한 각 평균값들의 흐트러짐과 같다고 볼 수 있다. 보정을 하지 않은 상태에서 KS규격을 만족한다는 자료만이 있다면 이 시험기의 불확도는 HRC 60 범위에서 1.4 HRC 가 된다. 그러나 각 시험기를 직접 교정하여 A형 불확도를 구하거나 간접교정을 통하여 보정값과 불확도를 구할 경우, 불확도는 실질적으로 많이 줄어들 것이다.

KS B 5526 에 명시된 바에 따르면 일반 경도 시험기의 종합오차는 경도 기준편을 5회 측정하여 구하며 경도 수준별 평균값의 오차 및 흐트러짐(최대값-최소값)의 허용값은 Table 5와 같다. Table 5에서 보면 60~65 HRC 의 경도 범위에서 허용되는 평균값의 오차 범위는 ±0.8 HRC 이다. KS규격을 만족하는 일반기급 경도 시험기의 확장 불확도가 1.4 HRC 이므로 95% 신뢰 수준에서의 포함인자 값을 2라고 가정한다면 표준불확도는 1.4 HRC를 2 로 나눈 0.7 HRC 가 될 것이다. 이것은 대략적으로 평균값들의 68% 가 ±0.7 HRC 의 범위 안에 포함된다는 것을 뜻하며 KS에서 규정된 평균값의 허용 오차인 ±0.8 HRC 와 근사하다. 그러므로 KS에 명기된 허용 공차를 만족하는 시험기들의 규격 사양이 직사각형 분포를 이룬다고 가정하면 대략적으로 1/3 정도가 종합교정과정에서 불합격 판정을 받을 가능성이 있다고 추정할 수 있다.

Table 6은 각 나라의 로크웰 경도 규격을 비교하여 작성한 표이다. 이를 살펴보면 우리 나라의 KS규격이나 다른 나라의 규격이 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 ISO 규격에서 허용된 시험기 평균값의 최대 허용오차 범위와 흐트러짐 평가기준은 KS와 다르며 KS와 비교한 결과를 Table 5에 같이 실었다. 이 결과를 보면 ISO의 기준에 따른 평균값 오차의 허용 폭이 60 HRC 범위에서는 ±1.5 HRC로서 KS의 ±0.8 HRC보다 훨씬 넓다. 일반기급 시험기의 경우 KS규격에 명시된 허용공차 조건에 따라 제작된다면 고경도 영역에서 95% 신뢰 수준에서의 불확도가 1.4 HRC 임에 비추어 ISO 규격을 따른다면 국산 시험기가 종합 교정에서도 대부분 합격될 것으로 예상할 수 있다. 이로부터 ISO의 기준이 보다 현실적이며 한국산업표준을 개정할 필요성이 있는 것으로 결론지을 수 있다.

ISO 규격이 아니라 KS규격에 따른다면 경도시험기를 만들 때 요소별 품질관리를 하는 과정에서 허용 공차를 만족하기만 하면 된다는 정도가 아니라 될수록 기준 값에 맞도록 제작하여야 합격률을 높일 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

각 시험기별 흐트러짐의 허용값(=최대값-최소값)을 비교하기 위해서는 개별 경도 시험기의 요소별 실측을 통하여 요소별 불확도를 구하고 다음에 합성 표준불확도를 구하여야 한다. 이로부터 하나의 시험기를 이용하여 경도를

시험할 경우 얻어지는 데이터들의 분산 정도를 추정할 수 있다. 이 과정은 A형 불확도 평가를 거쳐서 얻어지며 이에 대해서는 다음 논문에서 상세하게 밝힐 예정이다.

## 3. 결 론

한국 산업표준(KS)에 명시된 허용 공차로부터 경도 시험기의 불확도를 계산한 결과 종합교정에서 허용하고 있는 평균값의 허용 오차보다 넓은 것으로 나타났다. 이것은 허용 공차를 만족하는 시험기라 하여도 간접교정에서 요구되는 조건을 만족하지 못하는 경우가 생길 수 있음을 의미한다. 따라서 한국 산업표준에 따라 경도시험기의 합격 여부를 가릴 때는 시험기의 요소별 허용 공차를 만족한다는 조건뿐만 아니라 종합교정 결과에 대한 성적서도 같이 검토하여야 모든 요구조건을 만족하는 시험기라고 평가할 수 있다.

그러나 ISO 규격에 따를 경우에는 평균값의 허용 오차 폭이 KS 규격에 명시된 것보다 약 2배 이어서 KS에 명시되어 있는 요소별 허용 공차를 만족하는 시험기이면 대부분의 시험기가 종합검사에서도 합격될 것으로 예상되며 따라서 ISO 규격의 허용 범위가 보다 합리적이라고 할 수 있다.

보다 정밀도가 높은 시험기를 제작할 경우에는 허용 공차를 더 엄하게 적용하는 것 외에도 시험기를 요소별로 직접 교정하여 A형 불확도 평가 과정을 거치는 작업이 필요하다. 또한 KS 규격의 내용을 ISO와 마찬가지로 보다 현실적인 내용이 되도록 수정할 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 지원에 의한 기관고유사업으로 수행된 것임을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", ISO, 1993
2. "측정불확도 표현 지침", 한국표준과학연구원, KRISS-98-096-SP, 1998
3. "Uncertainty in Hardness Measurement", EA Group "Mechanical Measurements", Ad-hoc group "Uncertainty in Hardness measurement", Final draft, Jan. 1999.
4. Barbato G., Desogus S., The meaning of the geometry of Rockwell indenters, IMGC technical report n. R128, 1978, 6
5. Petik F., The Unification of Hardness Measurement, BIML, Paris, 1991. pp. 66-69
6. KS B 5526, 로크웰 경도 시험기
7. KS B 5530, 로크웰 경도 기준편
8. KS B 0806, 로크웰 경도 시험 방법
9. ISO/DIS 6508-2, Metallic Materials - Rockwell hardness test, Part 2, Verification of testing machines.