

시험하중의 변화가 순수한 Cu시편의 비커스 미소경도에 미치는 영향

조영래·이근호
고등기술연구원 플라즈마기술센터

Effects of Applied Load on the Vickers Microhardness in Pure Cu Specimen

Young-Rae Cho and Keun-Ho Lee

Institute for Advanced Engineering, Yongin P.O.Box 25, Kyonggi-Do 449-020

(1998년 8월 3일 받음, 1999년 3월 3일 최종수정본 받음)

초 록 기계적 방법으로 연마한 구리시편의 비커스 미소경도를 기존의 방법과 새로운 방법으로 측정하였다. 기존의 미소경도는 하중을 제거한 후 소성변형에 의해 생긴 압흔의 대각선길이를 주사전자현미경으로 관찰함으로써 측정하였으며, 새로운 방법의 미소경도는 하중을 인가한 상태에서 압입체가 시편에 침투한 압입깊이를 측정함으로써 측정하였다. 압입체의 침투깊이로부터 측정된 미소경도는 시험하중이 작아질수록 증가하였다. 시험하중이 5 mN에서 80 mN의 범위에서 측정된 구리시편의 탄성변형율은 대략 6 %였으며, 피라미드형의 다이아몬드 압입체의 무딘 깊이는 0.07 μm 으로 계산되었다. 두 가지 서로 다른 방법으로 측정된 미소경도의 차이는 시편의 탄성변형과 압입체의 비이상적인 형상 및 재료의 용기현상으로 설명할 수 있었다.

Abstract Vickers microhardness for polished Cu specimen has been measured by conventional and new methods. The conventional microhardness was measured by observing the diagonal of indentation after the load was removed. Whereas, the new method for microhardness was obtained by measuring the penetration depth of indenter into the specimen under the load. As the applied load was increased, the microhardness obtained by new method was increased. When the applied load was in the range of 5 mN to 80 mN, the rate of elastic to total depth of indenter was about 6 % and the calculated depth of rounded indenter was 0.07 μm . The difference in microhardness measured by two different methods such as conventional and new methods can be explained in terms of the elastic deformation of specimen, the shape of practical indenter and pile up of material.

1. 서 론

경도시험은 재료의 기계적 강도를 측정하는 방법 중 하나로 재료가 갖는 기본물성인 탄성율(young's modulus)을 측정하거나 코팅층의 부착강도(adhesion strength)를 측정하는 도구로도 사용되고 있다.^{1,2)} 브리넬경도(Brinell hardness)나 록크웰경도(Rockwell hardness)는 비록 동일한 시편을 사용해도 시험하중이 변하면 상당한 경도의 변화를 보인다. 반면 비커스경도(Vickers hardness)는 시험하중의 크기가 변해도 사용한 압입체(indenter)에 의해서 생긴 압흔(indentation)의 형상이 닳은꼴을 유지하기 때문에 이론적으로는 시험하중의 크기가 변해도 동일한 재료에 대해서는 같은 경도를 나타낸다. 그런데 최근의 여러 연구결과에 의하면 비커스경도 역시 시험하중이 수십 mN 이하로 작아지면 시험하중의 크기에 따라 서로 다른 경도를 나타낸다고 보고되고 있다.³⁻⁷⁾ 특히 최근에는 기판(substrate)에 코팅을 한 복합체의 사용이 여러 산업분야에서 급속히 증대되고 있으며, 이런 이유로 인해서 작은 시험하중을 사용한 경도시험의 필요성이 점점 더 커지고 있다. 그런데 복합체에서 코팅층만의 경도를 측정하기 위해서는 벌크재료(bulk materials)의 경도를 측정할 때 생기지 않던

여러가지 문제점이 발생한다. 즉 기판의 영향을 받지 않고 코팅층만의 경도를 측정하기 위해서는 매우 작은 하중을 사용해서 경도를 측정해야 하기 때문에 압흔의 크기가 매우 작아져서, 기존의 방법인 압흔의 대각선 길이를 관찰함으로써 경도를 측정하는 방법은 더 이상 사용하기가 어려워진다. 또한 기존의 방법으로는 고무(rubber)와 같은 재료, 즉 소성변형은 거의 일어나지 않고 탄성변형만 생기는 범위에서 사용하는 재료의 미소경도는 측정할 수 없다. 이런 문제를 해결하기 위해 최근에는 시편에 하중을 인가한 상태에서 압입체가 시편에 침투한 깊이를 측정함으로써 미소경도를 계산하는 방법이 보고되고 있다.⁸⁻¹⁰⁾

본 연구는 시험하중이 80 mN 이하로 작은 하중을 사용하여 두 가지의 서로 다른 방법으로 비커스 미소경도를 측정할 때 생기는 문제점에 대해서 살펴본다. 특정한 시편에 대해서 압입체의 침투깊이를 측정함으로써 얻은 경도(독일을 중심으로 유럽에서 Universal hardness라는 이름으로 사용되고 있음,^{9,10)} 여기서는 편의상 비커스 압입경도라고 칭함)와 기존의 방법인 시편에 하중을 가했다가 하중을 제거한 후 압흔의 대각선 길이를 관측하여 얻은 경도(이하 비커스 광학경도라고 칭함)의 측정시 생기는 미소경도 측정방법의 문제점을 살펴보았다. 또한 동일한 시편에 대해 압

입경도와 광학경도가 서로 다른 값을 나타내는 원인인 무엇인지를 살펴보고 상관관계를 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편의 제작

시편으로는 99.9 %의 순도를 갖는 다결정 구리(Cu)를 사용하였다. 다이아몬드 절단기(wheel cutter)를 사용해서 시편을 10x10x5 mm³의 크기로 절단한 후 콜드마운팅(cold mounting)하였다. 이어서 시편의 표면을 거울면처럼 평탄하게 하기 위해 기계적 연마(mechanical polishing)를 하였다. 시편의 절단시 다이아몬드 절단기에 의해서 시편의 표면에 생긴 내부응력을 제거하기 위해 처음에는 거친 실리콘카바이드(SiC) 입자(grain)가 도포된 연마지를 사용해서 시편의 표면을 1 mm 이상 제거하였다. 점차 실리콘카바이드 입자의 크기가 작은 연마지를 사용하면서 기계적 연마를 하였으며, 최종적으로 입자의 크기가 0.1 μm인 알루미나 분말을 사용해서 연마를 하였다. 이어서 알콜과 아세톤 용액을 사용해서 각각 15분씩 초음파 세척을 하였다.

2.2 비커스 미소경도의 측정

비커스 미소경도는 압입경도와 광학경도 두 가지 방법으로 측정하였다. 비커스 압입경도는 Helmut Fischer사의 비커스 미소경도계(모델명: Fischerscope H 100)를 사용하여 측정하였다. 미소경도계의 압입체는 136°의 각도를 갖는 피라미드형 다이아몬드였으며, 형상은 광학적 비커스 경도를 측정할 때 사용하는 압입체와 비슷하였다. 시험하중(load)은 1 mN에서 80 mN의 범위로 변화시켰으며 각각의 시험하중에서 시편에 침투한 피라미드형 압입체의 깊이(depth)를 센서가 장착된 컴퓨터(personal computer)를 이용해서 측정하였다. 그림 1은 비커스 압입경도를 측정할 때 나타나는 전형적인 하중과 압입체의 깊이 관계를 보여주는 그림이다. 그림에서 하중을 증가시키면 압입체의 침투깊이는 AB를 따라 커진다. 하중을 줄이면 압입체의 침투깊이는 작아져 BC를 따라 변한다. 그림에서 AD는 하중이 가해진 상태에서 압입체의 전체 침투깊이를 나타내며 본 연구의 비커스 압입경도를 측정할 때 사용된다. AC는 하중을 제거한 후에도 남아 있는 압흔(indentation)의 깊이로 소성변형과 관계가 있으며, CD는 하중을 제거함에 따라 압흔의 침투깊이가 회복된 것으로 탄성변형과 관계가 있다. 시편에 압입체가 침투한 깊이를 측정하는 장치의 분해능은 0.2 nm 정도였으며, 비커스 압입경도 HV_{ind}는 다음의 식에 의해 구했다.⁹⁾

$$HV_{ind} = \frac{F}{26.43h^2} \quad (1)$$

여기서 F는 시험하중이고, h_i는 그림 1에서 AD로 나타나며 하중을 인가한 상태에서 압입체가 시편에 침투한 깊이이다. 반면 비커스 광학경도 HV_{SEM}는 종래의 방법대로 다음의 식에 의해서 구했다.

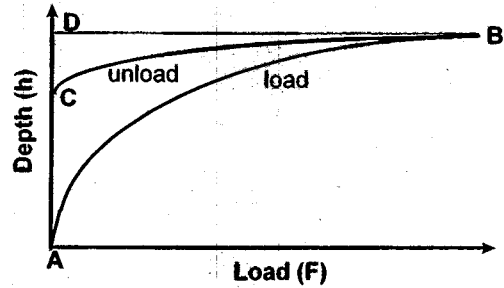


Fig. 1. Schematic diagram of load-depth profile in Vickers microhardness measurement.

$$HV_{SEM} = \frac{1.854F}{d_{SEM}^2} \quad (2)$$

여기서 F는 시험하중이고, d_{SEM}은 시편에 일단 시험하중을 인가했다가 다시 제거한 후에 남아있는 소성변형에 의해서 생긴 압흔의 대각선길이를 써 주사전자현미경(SEM)으로 측정하는 값이다.

3. 결과 및 고찰

비커스 광학경도와 압입경도의 상관관계를 알아보기 위하여 구리를 시편으로 사용하여 미소경도와 탄성변형에 의한 압입체의 깊이 회복율을 측정하였다. 그림 2는 구리기판을 사용해서 측정된 시험하중의 변화에 따른 미소경도의 변화와 이때 탄성변형에 의한 침투깊이 회복율(그림 1에서 CD/AD로 표시되며, 이후는 편의상 k₀로 표시한다)을 나타낸 것이다. 비커스 광학경도는 시험하중이 80 mN에서 5 mN으로 작아져도 거의 비슷한 정도인 75 정도를 보인다. 반면 비커스 압입경도는 시험하중이 80 mN에서 5 mN으로 감소하면 167에서 318로 정도가 대략 2배 증가한다. 시험하중이 80 mN에서 40 mN의 범위에서는 시험하중이 감소해도 정도의 변화가 거의 없지만, 시험하중이 30 mN 이하로 감소하면 비커스 압입경도는 증가하고 있다. 특히 시험하중이 20 mN 이하로 작아지면 압입경도는 증가하기 시작해서 시험하중이 5 mN인 경우 압입경도는 318로 급격하게 증가한다. 표 1은 그림 2의 광학경도와 비커스 압입경도 측정시 하중의 변화에 따른 압흔의 대각선길이 d_{obs}와 압입체가 시편에 침투한 전체 침투깊이 h_i를 나타낸 것이다. 시험하중이 5 mN인 경우 압입체의 침투깊이는 0.244 μm 정도로 매우 작다.

비커스 광학경도와 압입경도의 측정시 나타나는 가장 큰 차이는 광학경도는 하중을 제거한 후 소성변형에 의해 생긴 압흔의 대각선길이를 기준으로 하지만, 압입경도는 하중을 가한 상태에서 압입체가 시편에 침투한 전체 깊이를 기본으로 해서 경도를 측정한다는 것이다. 따라서 시험하중을 인가했다가 제거할 때 회복되는 압입체의 침투깊이 회복율은 서로 다른 두 가지의 방법으로 측정된 정도의 상관관계를 파악하는데 중요한 자료가 된다. 그림 2의 아래쪽에 있는

값들은 구리시편을 사용하였을 때 침투깊이 회복율 (K_{el})을 나타낸 것으로 시험하중의 크기에 상관없이 대략 6 % 내외의 값을 갖는다. 그림 1에서 구리시편을 사용해서 최대 시험하중을 5 mN으로 조절한 후 연속적으로 하중을 증가시켰다가 다시 하중을 제거하면 하중이 인가된 상태에서 나타나는 전체 침투깊이에 AC에 대한 하중을 제거했을 때 탄성변형에 의해서 회복된 압입체의 침투깊이 CD는 대략 6 %가 된다. 또한 최대 시험하중을 20 mN으로 조절하든지 혹은 80 mN으로 조절하든지, 두 경우 모두 시편에 하중을 인가했다가 다시 제거했을 때 나타나는 탄성변형에 의해 회복되는 압입체의 깊이는 대략 6 %로 나타난다.

위에서 나타난 결과들을 종합해 보면 광학경도는 소성변형 성분만에 의한 압흔의 대각선길이에 의해서 경도가 계산되기 때문에 동일한 시편을 사용한 경우 압입경도 보다 더 큰 경도를 나타낼 것으로 예상된다. 이유는 구리를 시편으로 사용한 본 연구의 경우 탄성변형에 의한 압입체의 침투깊이 회복율이 시험하중에 상관없이 대략 6 %로 나타났기 때문에 하중을 인가한 상태에서 측정된 압입체의 전체 침투깊이는 소성변형에 의한 압흔의 깊이보다 크기 때문에 당연히 미소경도는 작게 나타날 것이다. 그런데 그림 2에서 보는 바와 같이 시험하중의 전 영역에서 측정된 구리의 미소경도는 비커스 압입경도가 광학경도 보다 훨씬 크게 나타났다. 따라서 압입경도와 광학경도의 상관관계를 좀더 정확하게 설명하기 위해서는 탄성변형에 의한 깊이 회복을 이외에 또 다른 인자를 고려해야 한다는 것을 알 수 있으며, 시편에 압입체를 침투시킬 때 압흔의 주변에 나타나는 재료의 융기현상 (pile up)을 생각할 수 있다. 구리보다 좀더 경도가 낮은 재료인 알루미늄 (Al)의 비커스 광학경도 시험결과에 의하면 소성변형에 의해 생긴 압흔은 압입체가 시편에 침투함에 따라 압흔 주변에 재료의 융기현상이 나타난다고 한다.¹¹⁾ 그런데 압흔에 나타나는 융기현상은 비커스 압입경도의 측정시는 원리상 전혀 영향을 미치지 않지만, 압흔 주변의 융기현상은 압흔의 대각선길이에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 비커스 광학경도에는 크게 영향을 미친다.

지금까지는 비커스 미소경도를 측정할 때 사용한 다이아몬드 압입체가 이상적인 피라미드 형상을 갖는다고 가정하였다. 그러나 실제의 다이아몬드 압입체를 수천배 혹은 수만배 확대해서 관찰해 보면 이상적인 피라미드 형상에서 벗어나 있다. 그 이유는 피라미드형 압입체를 제작할 때 4면이 만나는 꼭지점을 하나의 점으로 만들기는 어렵기 때문이다. 그래서 실제로는 꼭지점을 구성하는 4개의 면 중에서 서로 마주보는 2개의 면만 서로 만나게 제작하여 사용하고 있다. 실제의 피라미드형 압입체에서 가장 예리한 부분은 4개의 면이 만나서 생기는 꼭지점이 아니라 서로 마주보는 2개의 면이 만나서 생기는 선으로 나타난다. 그런데 ASTM

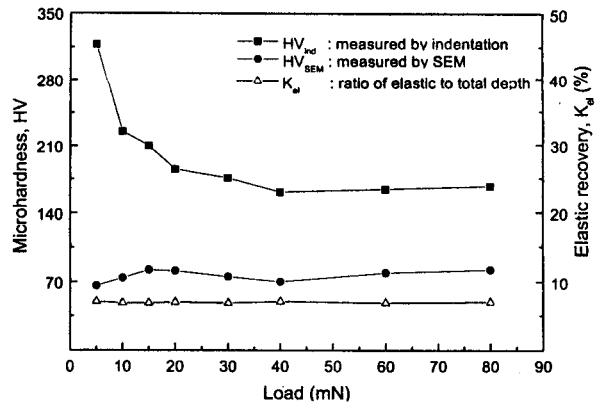


Fig. 2. Change of Vickers microhardness and rate of elastic to total depth of pure Cu dependence on applied loads.

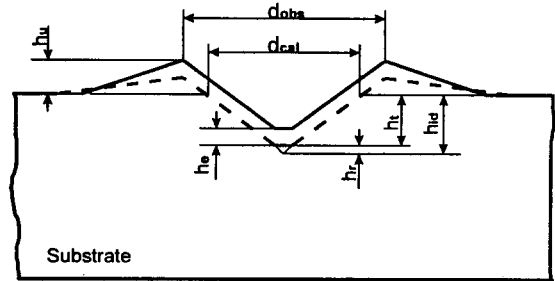


Fig. 3. Change of indentation shape during Vickers micro-hardness measurement.

규격에 의하면 2개의 면이 만나서 생기는 선의 길이는 0.5 μm 이하로 규정하고 있으며, 다이아몬드 압입체가 이상적인 피라미드 형상에서 벗어난 정도가 클수록 시험하중이 작아질 때 경도의 증가현상은 커진다고 보고되고 있다.¹²⁾

그림 3은 비커스경도의 측정시 사용한 피라미드형 다이아몬드 압입체가 라운딩 (rounding) 되어 꼭지점을 갖는 대신 평면으로 되었다고 가정하고, 탄성변형과 소성변형을 동시에 갖는 시편에 압입시험할 경우 압흔의 변형을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 d_{obs} 는 광학경도를 측정할 때 주사전자현미경으로 관찰한 압흔의 대각선길이 d_{SEM} 과 대응된다. 반면 비커스 압입경도를 측정할 경우는 하중을 인가한 상태에서 압입체의 침투깊이만 측정하면 된다. 이때 측정된 압입체의 침투깊이로부터 압흔이 갖는 대각선길이를 환산해 보면 $d_{cal} = 7 h_i$ 의 관계를 가지며,¹³⁾ 표 1과 그림 3에서 알 수 있듯이 d_{cal} 은 광학경도를 측정할 때 사용되는 대각선길이 d_{obs} 보다 작은 값을 갖는다. 따라서 압입체의 침투깊이로 측정된 비커스 압입경도와 압흔의 대각선길이로 측정된 광학경도를 비교하기 위해서는 다음의 몇 가지 현상들을 고려해야 한다. 첫째는 다이아몬드 압입체의 비이상적인 형상에서부터 오는 꼭지점의 무딘 깊이 h_r 를 고려해

Table 1. Changes of indentation diagonal(d_{SEM}) and depth(h_i) dependence on applied loads.

Load (mN)	5	10	15	20	30	40	60	80
$d_{SEM}(\mu\text{m})$	3.75	4.9	5.8	6.7	8.6	10.0	12.4	13.8
$h_i(\mu\text{m})$	0.244	0.41	0.52	0.64	0.8	0.97	1.17	1.35

야 하고, 둘째는 시편에 압입체가 침투함에 따른 압흔 주변에 용기된 재료의 높이 h_u 를 고려해야 하며, 셋째는 시험하중을 인가하였다가 제거함에 따른 압입체의 탄성변형에 의한 압흔의 회복된 깊이 h_r 를 고려해야 한다. 식 1에 위에서 언급한 세 가지의 항들을 고려해서 대입하면 비커스 보정압입경도 HV_{cor} 를 구할 수 있으며 비커스 보정압입경도 HV_{cor} 는 다음과 같이 표시된다.

$$HV_{cor} = \frac{F}{26.43 [h_s(1+k_u+k_v) + h_r]^2} \quad (3)$$

여기서 F 는 시험하중, h_s 는 하중을 가한 상태에서 측정된 압입체의 전체 침투깊이, k_u 는 h_s 에 대한 압흔 주위에 생긴 용기된 높이 h_u 의 비율 h_u/h_s , k_v 는 전체 침투깊이에 대한 탄성변형에 의한 회복된 침투깊이의 비율 h_r/h_s 를 나타내며, 그림 1의 CD/AD 또는 그림 2의 K_0 과 같은 의미를 갖는다. 압입체의 비이상적인 부분을 나타내는 h_r 는 비커스 다이아몬드 압입체의 꼭지점이 이상적인 압입체에 비해 무디어서 생긴 깊이를 나타낸다.

먼저 다이아몬드 압입체가 이상적인 피라미드 형상에서 벗어난 정도를 알기 위해서 꼭지점이 무딘 깊이 h_r 를 구할 수 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 실제로 사용한 압입체의 침투깊이 h_{id} 와 이상적인 압입체를 사용하였을 때 압입체의 침투깊이 h_{is} 의 관계는 다음의 식으로 표시된다.

$$h_{id} = h_s + h_r \quad (4)$$

여기서 h_{id} 는 이상적인 압입체를 사용했다고 가정했을 때의 침투깊이로 실제로 사용한 압입체의 전체 침투깊이 h_{id} 보다 압입체가 무디어서 생긴 깊이 h_r 만큼 크다. 식 1에 h_{id} 를 대입하면 이상적인 압입체를 사용했을 때의 비커스 압입경도 HV_{is} 는 다음과 같이 표시된다.

$$HV_{is} = \frac{F}{26.43 h_{is}^2} = \frac{F}{26.43 (h_s + h_r)^2} \quad (5)$$

시험하중이 큰 경우 압입체의 침투깊이는 매우 크기 때문에 h_r 은 h_s 에 비해 매우 작아서 무시할 수 있기 때문에 h_{id} 은 h_s 와 같다고 놓아도 된다. 즉 h_r 가 h_s 에 비해서 매우 큰 경우는 다이아몬드 압입체의 비이상적인 형상에서 오는 영향을 무시할 수가 있기 때문에, 시험하중이 무한대로 매우 큰 경우의 비커스 압입경도 HV_{is} 은 HV_{id} 과 같다고 놓을 수 있다. 따라서 시험하중이 작은 경우, 꼭지점 부분이 무딘 실제의 압입체를 사용한 압입경도와 이상적인 압입체를 사용한 경우의 압입경도는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{HV}{HV_{is}} = \frac{HV}{HV_{cor}} = \left[\frac{h_{id}}{h_s} \right]^2 = \left[\frac{h_s + h_r}{h_s} \right]^2 = \left[1 + \frac{h_r}{h_s} \right]^2 \quad (6)$$

식 6과 그림 1의 경도변화를 조합해보면 압입체의 비이상적 형상에서 오는 깊이인 h_r 를 구할 수가 있다. 예를 들면, 그림 1에서 시험하중이 60 mN일때 시편인 구리에 생

기는 압입체의 전체 침투깊이 h_s 는 1.3 μ m이었고 비커스 압입경도는 164이다. 시험하중의 크기가 80 mN에서 40 mN까지 변해도 압입경도가 거의 일정한 크기를 갖기 때문에 압입체의 라운딩에 의한 영향은 무시될 수 있을 정도로 압입체의 전체 침투깊이 h_s 는 h_r 에 비해서 충분히 크다고 볼 수 있기 때문에 h_s 는 h_{id} 와 같다고 두어도 된다. 즉 본 연구에서 순수한 구리를 시편으로 사용하였을 때 시험하중이 40 mN보다 클 경우는 시험하중의 크기에 무관하게 압입경도가 일정하게 나타났기 때문에 HV_{is} 와 HV_{cor} 는 같다고 볼 수 있으며 압입경도는 대략 164이다. 그런데 동일한 시편인 구리시편에 대해 시험하중을 10 mN으로 작게 하여 압입경도를 측정할 경우 HV 는 225이고, 이때 압입체의 전체 침투깊이 h_s 는 0.4 μ m으로 나타났다. 여기서 구한 값들을 식 6에 대입하면 압입체의 무딘깊이 h_r 를 구할 수 있으며 h_r 는 0.07 μ m로 계산된다.

위에서 구한 압입체의 전체 침투깊이 h_s 를 비커스 보정압입경도 HV_{cor} 를 구하는 식 3에 대입하면 비커스 압입경도와 광학경도와의 상관 관계를 구할 수 있다. 식 3에서 F 는 사용한 시험하중이고, h_s 는 압입체의 전체 침투깊이이고, h_r 은 계산에 의해 구해진다. 압입체의 전체 침투깊이 h_s 에 대한 압흔 주변의 용기된 높이 h_u 의 비율인 k_u 는 깊이 프로파일러를 사용해서 구할 수 있다. 시험하중이 변해도 압흔 주변의 형상은 닳은꼴을 유지한다는 가정을 전제로 본 연구에서는 편의상 하중을 1000 mN으로 크게 인가해 압흔을 형성시켰으며, 측정된 k_u 는 0.2로 나타났다. 시험하중의 제거에 따른 탄성변형에 의한 압입체의 깊이회복의 정도를 나타내는 값인 k_v 는 5 mN에서 80 mN의 범위에서 0.06의 값을 나타냈다. 위에서 구한 h_r 은 0.07 μ m과 k_u 은 0.2, k_v 은 0.06를 보정압입경도를 나타내는 식 3에 대입하고 각각의 시험하중과 압입체 전체 침투깊이 h_s 를 대입하면 각각의 하중에서 보정압입경도 HV_{cor} 를 구할 수 있다. 그런데 Samuels와 Muhlhearn의 연구에 의하면 압흔의 주변에 생기는 재료의 용기현상은 재료의 특성에 따라 변화하며, 고속도강처럼 경도가 높은 재료에서는 재료의 용기현상이 생기지 않는다고 한다.¹⁴⁾ 특히 세라믹재료처럼 경도가 매우 높고 소성변형이 거의 일어나지 않는 시편일 경우는 압흔의 주변에 재료의 용기현상이 생기는 대신 미세한 균열이 발생해서 정확한 미소경도를 측정하기가 어려워진다.¹⁰⁾

그림 4는 비커스 압입경도를 광학경도와 비교하기 위해서 압입체의 비이상적인 형상과 탄성변형 및 용기현상을 고려해서 계산한 비커스 보정압입경도를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 계산에 의한 비커스 보정압입경도는 HV_{cor} 은 시험하중이 80 mN에서 5 mN 범위에서 압입경도 HV_{id} 보다 훨씬 광학경도 HV_{SEM} 에 근접한 값을 보이고 있다. 그런데 시험하중이 15 mN보다 작은 범위에서 광학경도가 보정압입경도에 비해서 작게 나타난 이유는 주사전자현미경을 사용해 압흔의 대각선길이를 측정할 때 압흔의 경계가 명확하게 관찰되지 않아서 생긴 측정오류 때문으로 생각된다. 즉 시험하중이 작아지면 압흔의 크기도 작아지기 때문에 압흔의 대각선길이도 수 μ m 이내로 작아지게 되고, 이런

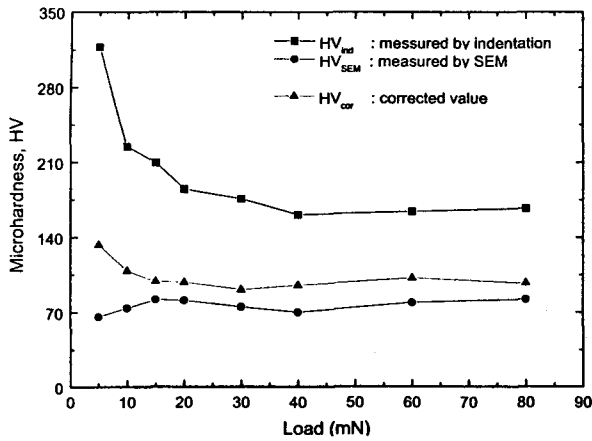


Fig. 4. Change of Vickers microhardness of pure Cu dependence on applied loads.

경우 광학현미경 뿐만아니라 주사전자현미경을 사용해도 압흔의 대각선길이를 정확하게 측정하기가 힘들어 수 mN의 작은 시험하중을 사용해서 광학경도를 측정하는 데는 문제가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

소성변형에 의한 압흔의 대각선길이를 주사전자현미경으로 관찰해서 측정한 광학경도와 탄성변형 및 소성변형에 의한 압입체의 침투깊이를 측정해서 비커스 압입경도를 측정하였다. 비커스 미소경도 측정용 다이아몬드 압입체의 형상이 피라미드형에서 벗어난 정도와 재료의 탄성변형 및 용기현상으로 광학경도와 비커스 압입경도의 상관관계를 설명할 수 있었다. 여기서 구한 압입체의 무딘깊이 h_r 은 시험하중이 감소할 때 압입경도가 증가하는 원인을 설명하며, 압흔 주변의 용기현상과 탄성변형률의 크기는 비커스 압입경

도에는 영향을 미치지 않지만 광학경도에는 매우 큰 영향을 미친다.

참 고 문 헌

1. G. M. Pharr, W. C. Oliver and F. R. Brotzen, *J. Mater. Res.* **7**, 613 (1992).
2. D. S. Rickerby and P. J. Burnett, *Thin Solid Films*, **157**, 195 (1988).
3. Feldman, F. Ordway and J. Burnstein, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A8**, 117 (1990).
4. T. A. Laursen and J. C. Simo, *J. Mater. Res.*, **7**, 618 (1990).
5. J. B. Pethica, R. Hutchings and W. C. Oliver, *Phil. Mag. A*, **48**, 593 (1983).
6. H. A. Jehn, Uwe Kopacz and S. Hofmann, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A3**, 2406 (1985).
7. D. Mueller, Y. R. Cho, E. Fromm, *Surface and Coating Technology*, **75**, 849 (1995).
8. D. Dengel, *Materialpruefung*, **32**, 310 (1990).
9. DIN50359-1, DEUTSCHE NORM, Oktober 1997.
10. G. D. Quinn, *Advanced Materials & Process Vol 8*, 23 (1998).
11. Y. R. Cho, PhD Thesis, University of Stuttgart, 1994.
12. ASTM 384-84, *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, **3**, 342 (1986).
13. J. L. Loubet, J. M. Georges, O. Marchesin and G. Meille, *Journal of Tribology*, **106**, 43 (1984).
14. L. E. Samuels and T. O. Muhlhearn, *J. Mech. Phys. Solids*, **5**, 125 (1957).