

# 계장화압입시험법을 이용한 비압흔관찰 브리넬 경도 평가

김성훈\* · 최열\* · 권동일\*\*

(2003년 8월 18일 접수, 2004년 2월 25일 심사완료)

## Determination of Brinell Hardness through Instrumented Indentation Test without Observation of Residual Indent

Sung-Hoon Kim, Yeol Choi and Dongil Kwon

**Key Words:** Instrumented Indentation Test(계장화 압입시험), Brinell Hardness(브리넬 경도), Contact Depth(접촉깊이), Yield Strength(항복강도), Elastic Modulus(탄성계수), Work Hardening Exponent(가공경화지수)

### Abstract

Hardness test is performed for determination of the other properties, such as strength, wear resistance and deformation resistance, as well as hardness itself. And it is performed for prediction of residual lifetime by analysis of hardness reduction or hardness ratio. However, hardness test has limitation that observation of residual indent is needed for determination of hardness value, and that is the reason for not to be widely used in industrial field. Therefore, in this study, we performed researches to obtain Brinell hardness value from quantitative numerical formula by analysing relationship between indentation depths from indentation load-depth curve and mechanical properties such as work hardening exponent, yield strength and elastic modulus.

### 기호설명

HB : 브리넬경도  
 L : 압입하중  
 A : 압입자국의 표면적  
 D : 압입자 직경  
 d : 압흔 직경  
 $h_{max}$  : 최대하중에서의 최대압입깊이  
 $h_f$  : 하중제거 후 최종압입깊이  
 $a^*$  : 압입자와 재료의 접촉 반경  
 $a$  : 재료쌍임을 고려한 접촉 반경  
 $n$  : 가공경화지수

$E$  : 탄성계수  
 $Y$  : 항복강도  
 $\epsilon_y$  : 항복변형률  
 $h_{pile}$  : 재료쌍임 높이  
 $h_m$  : 하중제거 후 접촉 깊이  
 $h_c$  : 최대하중에서의 접촉 깊이  
 $d_m$  : 하중제거 후 압흔 직경  
 $d_{m0}$  : 기준면 높이에서의 압흔 직경  
 $d_{mp}$  : pile-up 최고점 간의 거리  
 $R$  : 압흔 곡률 반경

### 1. 서론

경도시험은 일반적으로 경도 값 그 자체 뿐만 아니라 강도, 내마모성, 변형저항 등 재료의 다른 성질들을 알기 위해서 수행된다. 또한 경도 값 자체 또는 경도의 감소량 혹은 경도비를 이용하여 재료 및 소재의 잔여 수명을 예측할 수 있기

† 서울대학교 대학원 재료공학부  
 E-mail : iljiok@plaza.snu.ac.kr  
 TEL : (02)880-8025 FAX : (02)889-4380

\* 서울대학교 대학원 재료공학부  
 \*\* 서울대학교 재료공학부

때문에 경도 시험이 산업 현장에서 유용하게 사용된다. 하지만 브리넬, 비커스 경도 값을 평가하기 위해서는 압흔 관찰 과정이 필수적으로 수반되어야 하므로 (비록 압흔 관찰 없이 사용될 수 있는 휴대용 경도 시험기가 일부에서 사용되고 있지만 경험적인 환산식을 사용하는 것에 불과하다) 현장에서 다양하게 활용되는 데는 한계를 가지고 있다.

경도가 갖는 이러한 단점을 극복하기 위하여 제시된 시험기법이 계장화압입시험법이다. 계장화 압입시험법은 압입자에 의해 소재에 가해지는 하중과 압입자가 소재를 파고드는 깊이를 연속적으로 측정하여 압입하중-깊이곡선을 기본 데이터로 한다. 이 곡선은 하중을 가하는 부분과 하중을 제거하는 부분으로 나눌 수 있으며, 각각의 부분에 대한 다양한 분석을 통해 항복강도, 인장강도와 같은 유동특성을 비롯하여 경도, 잔류응력 등 소재의 다양한 기계적 물성 값을 얻을 수 있다.<sup>(1-3)</sup>

따라서 본 연구에서는 압흔 관찰 과정 없이 계장화압입시험으로부터 얻어지는 압입하중-깊이곡선만의 분석으로부터 브리넬 경도를 평가하고자 하였다. 압입하중-깊이곡선으로부터는 다양한 압입깊이들이 정의되며, 이들 압입 깊이들은 재료가 갖는 항복강도, 탄성계수 및 가공경화지수와 같은 물성들과 상호연관성을 가진다. 이러한 상호연관성을 정량적으로 수식화하고, 압입 깊이들을 이용하여 압흔 크기를 정의함으로써 압흔 관찰 없이 브리넬 경도를 평가하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 전통적 브리넬 경도

브리넬경도 시험은 1900년 스웨덴의 J.A. Brinell에 의해 개발된 것으로 현재 공업적으로 널리 이용되고 있다. 이 시험법은 구형의 압자를 일정한 하중으로 시편에 압입시켜 시험하는 것으로서, 이 때 생기는 압입 자국의 표면적으로 시편에 가한 하중을 나눈 값을 브리넬 경도로 정의하며 단위는 HB이다.

Fig. 1과 같이 직경이  $D(\text{mm})$ 인 구형 압자를 사용하여  $L(\text{kgf})$ 의 시험 하중으로 시편을 압입하고 난 뒤 하중을 제거하면 시편에 영구 자국이 남게 되는데,

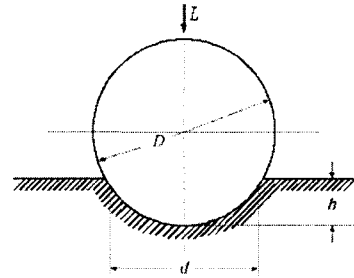


Fig. 1 Schematic diagram of Brinell hardness test

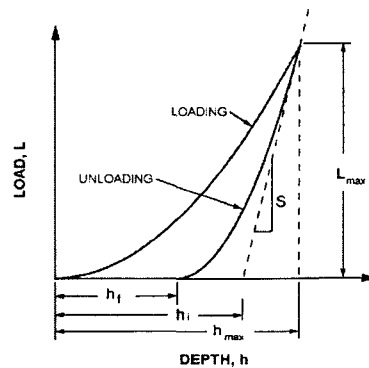


Fig. 2 Indentation load-depth curve

$$HB = \frac{L}{A} = \frac{2L}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

이 압입자국의 직경을  $d(\text{mm})$ , 압입자국의 표면적을  $A(\text{mm}^2)$ 라고 하면 브리넬 경도식은 아래와 같이 주어진다. 2.2 비압흔관찰 브리넬경도 평가

#### 2.2.1 압입하중-깊이곡선

계장화 압입시험에서 기본 데이터로 얻어지는 압입하중-깊이곡선은 Fig. 2와 같다.

압입하중-깊이곡선은 그림과 같이 하중부가, 하중제거의 두 부분으로 나뉘어진다. 이 중 하중 제거 부에서 최대하중이 가해질 때 압입된 최대 깊이를  $h_{max}$ 로 정의한다. 또한 하중이 완전히 제거된  $L=0$ 일 때의 압입깊이를  $h_r$ 로 정의한다. 하중 제거 곡선의 초기부의 접선과  $L=0$ 인 직선과 만나는 깊이를  $h_i$ 로 정의한다.

### 2.2.2 이상적인 경우의 브리넬 경도 평가

Fig. 3과 같이 재료가 압입될 때, 압입자와 재료가 접하는 부분에서의 탄성적인 굽힘이나 재료의 쌓임 현상 등이 전혀 없다면, 하중이 완전히 제거된 후의 압입깊이  $h_f$ 와 압입자 직경  $D$ , 압흔 직경  $d$ 는 기하학적 관계로부터 아래와 같이 손쉽게 구해진다.

$$d = 2a^* = 2\sqrt{Dh_f - h_f^2} \quad (2)$$

이러한 관계로부터 압흔직경  $d$ 가 계산됨으로써 압흔면적이 평가되어 브리넬 경도 값을 얻을 수 있다. 그러나 이와 같은 방식으로 평가된 브리넬 경도 값은 실제 경도 값보다 크게 나타나며, 이는 압흔면적이 과소평가되고 있음을 의미한다.

### 2.2.3 압흔 주변 재료 쌓임 현상

일반적으로 금속재료의 압입에서는 소성변형이 발생할 경우 Fig. 4와 같이 압흔 주변에 재료가 쌓이는 pile-up 현상이 발생하게 된다. 재료 쌓임 현상이 발생하게 되면, 이상적인 경우에서의 압흔 반경  $a^*$ 와 달리  $a$ 로 평가되어야 한다. 이는 압입면적의 증가를 의미하며, 이를 고려하지 않을 경우 접촉면적을 과소평가하게 된다.<sup>(3,4)</sup>

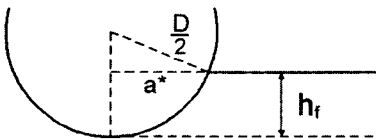


Fig. 3 Ideal indentation morphology

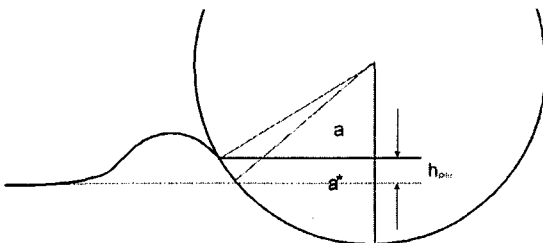


Fig. 4 Pile-up phenomenon

따라서 pile-up에 의한 접촉면적의 증가분을 고려할 필요가 있다. 이러한 pile-up에 의한 접촉면적의 증가분은 하중이 최대가해진  $L_{max}$  상황에서 아래와 같이 가공경화지수의 함수로 주어지는 것으로 알려져 있다.<sup>(3,5-8)</sup>

$$c^2 = \frac{a^{*2}}{a^2} = f(n) \quad (3)$$

$f(n)$ 은 Hill, Matthews 등에 의한 유한요소해석 연구로부터 다음과 같이 주어진다.

$$f(n) = \frac{5}{2} \left( \frac{2n-1}{4n+1} \right)^{n-1} \quad (4)$$

$$f(n) = \frac{1}{2} \left( \frac{2+n}{2} \right)^{\frac{2}{n}-2} - 1^{(6)} \quad (5)$$

이와 더불어 접촉면적 증가분은 탄성계수  $E$ 와 항복강도  $Y$ 의 비인  $E/Y$  또는 항복변형률  $\epsilon_y$  및 압입자 크기와 압입깊이 비인  $h_f/D$ 의 함수인 것으로 알려져 있다.<sup>(9-11)</sup>

## 3. 실험 방법

### 3.1 시험재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 시험재료는 상용으로 사용되는 강재들인 API X42, KP, NAK, SCM400, SM45C, STB2, STC3, STC4, STD11, STD61, SKH51 등 11종의 강재이다. 이들 재료는 250×300×200의 크기의 압입 시험편과 직경 6.25mm를 갖는 봉상 sub-size 인장 시험편으로 가공되었다.

### 3.2 구형압자를 이용한 계장화압입시험

비압흔관찰 경도 평가의 기본 활용 데이터인 압입하중-깊이곡선을 얻기 위해, 직경 1mm의 텅스텐카바이드 압자를 사용하여 계장화압입시험을 행하였다. 계장화압입시험은 (주)프로텍스사에서 개발된 AIS 2000장비를 사용하여 수행하였다. 시험하중은 시험하중-압자 지름비를 고려하여 30kgf의 최대하중을 사용하였다. 한국산업규격 KS B 0805에서 강재, 니켈합금, 티타늄합금에 대해서 시험하중-압자 지름비를 30으로 정하고 있는 바에 따른 것이다. 최대하중에 이르기까지 8초 동안 하중을 증가시키고, 최대하중에서 15초 동안 하중을 유지하였다.

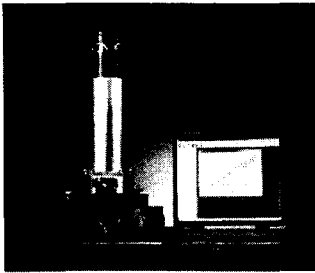


Fig. 5 Advanced Indentation System 2000

3.3 압입깊이와 압흔크기의 상관성 분석  
 압입이 끝난 시편의 잔류 압흔크기와 압입하중-깊이곡선에서의 압입깊이들 간의 상관성 분석이 필요하다. 이를 위해 Tencor사의 alpha-step을 통해 압흔에 대한 profile을, 광학현미경을 통해 압흔크기를 동시에 측정하고, 이를 분석하여 압입하중-깊이곡선으로부터 얻어지는 다양한 압입깊이들과의 상관성을 분석하였다.

3.4 시험재료의 가공경화지수, 항복강도, 탄성계수 측정  
 압흔크기와 압입깊이의 상관성 분석을 위해 필요한 재료물성인 가공경화지수와 항복강도는 인장시험에서 얻어지는 응력-변형률 곡선의 분석을 통해 결정하였다. 인장시험은 Instron사의 5582model을 사용하였으며, 인장시험 절차는 KS B 0802에 따라 이루어졌다. 탄성계수는 Tektronix사의 two-channel digital real-time oscilloscope를 통해 초음파 분석으로부터 결정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 하중부가 및 제거시 압흔 형상 분석  
 압입하중이 증가함에 따라 압입깊이가 증가하고 소재에 생기는 압흔 크기는 점차 증가하며, 일정 시간 최대하중을 유지함으로써 충분한 소성변형이 일어나게 된다. 이후 압입하중이 제거됨에 따라 압흔은 하중이 부가되는 방향과 그 수직방향에서 동시에 탄성적인 회복이 일어난다. Fig. 6과 같이 실선으로 나타나는 최대압입하중시의 압흔 형상에 비해 점선으로 나타나는 하중제거후의 압흔 형상은 깊이 방향으로의 많은 탄성회복

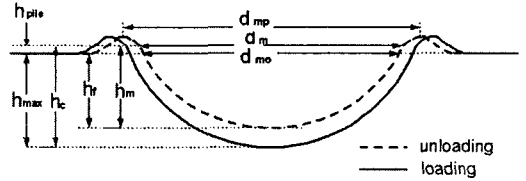


Fig. 6 Indent morphology under loading and after unloading

Table 1 Measured indent diameters by optical microscopy and alpha-step

	API X42	KP	NAK	SCM400	SKH51	SM45C
dm(mm)	0.462	0.377	0.304	0.363	0.408	0.444
	STB2	STC3	STC4	STD11	STD61	-
dm(mm)	0.435	0.464	0.451	0.388	0.431	-

이 일어나고 있으며, 그에 비해 직경 방향으로의 탄성회복은 상대적으로 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.1.1 압흔크기 측정

광학현미경을 통해 관찰되는 압흔의 크기  $d_m$ 은 표 1과 같다. 이는 압흔에 대한 프로파일에서 기준면(original plane)과 동일한 위치에서 평가된 직경인  $d_{mo}$ 에 비해 큰 값으로, pile-up최고점에서 평가된 직경인  $d_{mp}$ 에 비해 작은 값으로 평가되고 있다.

이는 광학에서 관찰되는 위치가 pile-up의 최고점이 아니며, 또한 기준위치에 해당하는 압입직경 위치도 아닌 중간에 어느 위치에 해당됨을 알 수 있다. 이는 앞서 이론적 배경에서 설명한 pile-up에 의한 접촉면적의 증가와 유사하다. 즉, 하중이 최대로 가해진 상태에서의 접촉면적은 pile-up에 의해 기준면 보다 높은 위치에서 결정되는 것과 마찬가지로, 하중이 제거되기 직전까지 압자와 재료가 접촉하고 있던 부분은 탄성회복에도 불구하고 기준면보다 높은 위치에서  $d_{mo}$ 가 아닌  $d_m$ 으로 측정되는 것이다. 이로 인해 압흔면적이 압입깊이  $h_p$ 에 해당되는 위치에서보다 더 크게 나타났음을 알 수 있다.

4.1.2 압흔의 기하학적 형태 분석

압입깊이와 압입직경과의 연관성을 규명하기 위해서는 압흔이 가지는 기하학적 특성에 대한 분석이 선행되어야 한다. 최대압입하중 하에서 재료와 압자의 접촉형상은 1mm직경의 구 형태를 유지하고 있지만 하중이 제거된 후 압흔은 깊이 방향으로의 큰 탄성회복으로 인해 기하학적 형태가 변하게 되므로 이에 대한 평가가 이루어져야 한다. 최종 압입깊이  $h_f$ 와 기준위치에서의 압입직경  $d_{m0}$ 를 통해 잔류압흔이 나타내는 곡률반경  $R$ 은 다음과 같은 연관성을 가진다.

$$R = \frac{h_f^2 + \left(\frac{d_{m0}}{2}\right)^2}{2h_f} \quad (6)$$

이와 같은 관계에 대해, STD61, SCM400, STB2 등의 3종의 강재에 대해서 압흔 곡률반경을 구해보았다. 여기에서  $h_f$ 는 압입하중-변위곡선으로부터,  $d_{m0}$ 은 스케닝으로부터 각각 얻어졌다.

Table 2와 같이 곡률반경이 약 0.5 mm인 구형 압흔 형상을 보임을 알 수 있다. 탄성적인 회복이 일어나는 거동이 구형의 압흔 형상 및 크기에 영향을 주지 않았다는 것을 의미한다. 하지만 깊이 방향에서의 큰 탄성회복과 수평 방향에서의 약간의 탄성회복이 일어나는데 이는 하중 부가시 재료에서 발생하는 탄성적인 굽힘에 의한 것으로 생각된다. 탄성 굽힘에 관해서는 이미 Oliver 등에 의해 제시된 바 있으며,<sup>(3)</sup> 최대하중에서의 정확한 접촉 면적을 평가하기 위해서 도입되는 하나의 깊이 개념이다.

Table 2 Radii of curvatures of the residual indent after unloading for STD61, SCM400 and STB2 steels

	$h_f$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{m0}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R$ ( $\mu\text{m}$ )
STD61	41.77	202	509.31
SCM400	27.18	164	508.37
STB2	41.52	199	497.65

그림과 같이 소재가 압입될 경우 탄성적인 굽힘이 발생하고, 그 굽힘 깊이를  $h_d$ 로 정의한다<sup>(2)</sup>. 하중이 제거될 경우 탄성적인 굽힘 깊이는 회복되며, 이것이 수직 방향의 큰 탄성적인 회복이 일어나는 것과 같은 효과를 나타내게 되는 것이다.

4.2 Pile-up 효과 보정

일반적으로 pile-up에 의해 접촉면적이 증가하며, 이는 가공경화지수와 항복변형을 및 압입자/압입깊이비의 함수임을 앞서 설명한 바 있다. Pile-up에 의한 접촉면적 증가분은 pile-up 높이  $h_{pile}$ 을 측정함으로써 정량화 할 수 있으며, 최대 압입하중 상황에서  $h_{pile}$ 과  $h_{max}$ 의 비가 가공경화지수  $n$ 과 탄성계수/항복강도비  $E/Y$  등의 함수임을 앞서 언급하였다. 하중제거 후 회복이 일어난 후  $h_{pile}$ 과  $h_f$ 사이에도 그러한 관계가 성립하는 것으로 판단하여 연구를 진행하였으며, 이들 압입깊이들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립될 수 있다.

$$\frac{h_{pile}}{H_f} = \frac{h_m - h_f}{h_f} = f\left(n, \frac{E}{Y}, \frac{h_f}{D}\right) \quad (7)$$

11종의 강재에 대해 평가된 최종압입깊이, 재료쌓임 높이와 재료의 기계적 물성들은 표 3과 같다.

이들 11종의 재료에 대해, 가공경화지수와 같은 재료 물성과  $h_{pile}$ ,  $h_f$ 비 사이에는 Fig. 8과 같은 관계가 주어진다.

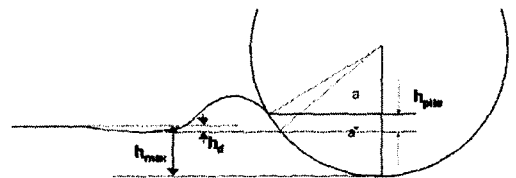
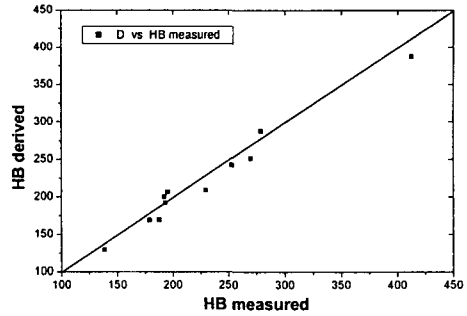


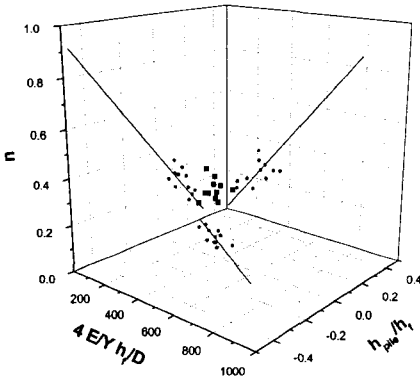
Fig. 7 Morphology of residual indent containing both elastic deflection and pile-up

**Table 3** Analytic parameters and mechanical properties for the materials used in this study

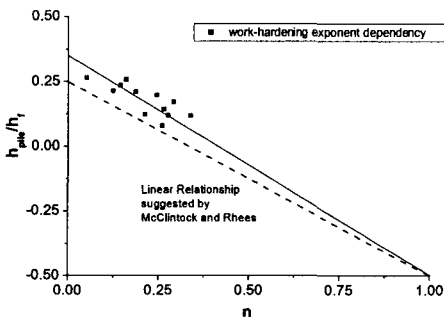
	$h_f$ ( $\mu\text{m}$ )	$h_m$ ( $\mu\text{m}$ )	$n$	E (GPa)	Y (MPa)
API X42	45.74	56.53	0.144	206.52	436.20
KP	30.33	36.82	0.124	211.18	764.07
NAK	18.75	23.72	0.051	202.62	1213.87
SCM400	27.18	34.19	0.160	210.64	654.07
SKH51	40.31	43.51	0.259	246.80	263.85
SM45C	46.60	52.07	0.338	209.05	374.14
STB2	41.52	49.71	0.244	214.85	322.80
STC3	50.00	57.13	0.264	208.74	244.10
STC4	47.90	53.76	0.212	209.15	311.15
STD11	35.12	39.28	0.276	215.66	242.89
STD61	41.77	48.92	0.291	221.48	350.25



**Fig. 10** Comparison between Brinell hardness values derived and measured



**Fig. 8** Relationships between various materials and indentation parameters



**Fig. 9** Pile-up as a function of work-hardening exponent

Fig. 8에서 투영면에 비친 데이터들의 경향을 통해 분석해 보면,  $h_{pile}/h_f$ 는  $n$ 과  $(E/Y)(h_f/D)$ 에 각각 직선적으로 비례하는 관계가 성립함을 알 수 있다. 한편  $n$ 과  $(E/Y)(h_f/D)$ 가 서로 비례관계가 성립하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가공경화지수  $n$ 에 관한 함수만으로  $h_{pile}/h_f$ 를 표현할 수 있다고 판단하였으며, 그 결과는 Fig. 9와 같이 표현되었다.

앞선 연구에서 McClintock 등은 Fig. 9의 점선에서와 같이  $h_{pile}/h_{max}$ 와  $n$ 이 직선적인 상관관계를 가짐을 보고한 바 있다.<sup>(6)</sup> 특히 강제 등과 같이 가공경화지수가 작은(0.1~0.3) 범위에서 거의 직선적으로 잘 일치하는 것으로 보고하였다. 또한 앞서 소개한 Hill, Matthews 등의 연구결과에서도 가공경화지수가 작은 금속소재에 대한 결과는 직선적인 관계로도 충분히 표현될 수 있음을 알 수 있다<sup>(7,8)</sup>. 이와 유사하게 하중제거 후의 pile-up 높이 계수인  $h_{pile}/h_f$  역시 가공경화지수에 대해 직선적인 관계가 성립함을 알 수 있다. 하중제거 후에서의 관계 직선 기울기가 더 급한 것은 앞서 언급된 탄성적인 굽힘 현상과 관련이 있다. 재료 쌓임은 소성적인 현상으로 하중 제거 후 높이가 변화되지 않는 반면 탄성적인 회복에 의해  $h_{max}$ 는  $h_f$  까지 회복되므로 그 기울기는 더 급하게 나타나게 되는 것이다.

이러한 직선적인 관계로부터  $h_{pile}/h_f$  과  $n$ 은 다음과 같은 관계를 가지고 성립하였다.

$$\frac{h_{pile}}{h_f} = -0.85768n + 0.35768 \quad (8)$$

수식을 바탕으로 소재의 가공경화지수와 최종 압입깊이 정보만으로 압흔 깊이를 알 수 있는 것이다. 이를 통해 평가된 브리넬 경도는 실제 압흔 크기 측정으로부터 얻어진 브리넬 경도와 Fig. 10에서 비교 되고 있다.

두 결과는 오차 범위 5%이내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 기존 브리넬 정도 평가법에서 요구되던 압흔 관찰의 과정 없이, 소재의 가공경화지수에 관한 정보만으로 압입하중-깊이곡선 정보로부터 브리넬 경도를 정확히 평가할 수 있다. 한편, 소재의 가공경화지수는 구형압입자를 이용한 유동특성 평가법으로부터 손쉽게 얻을 수 있다.<sup>(1,12)</sup> 이로 인해 압흔 관찰이 어려운 다양한 소재에 대한 정도 평가가 가능하여, 브리넬 정도 평가법의 현장 적용성이 크게 증가 될 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

기존 브리넬 정도 시험법은 압입된 구형 압흔의 관찰을 통한 크기 측정이 요구된다는 한계점 극복을 위해 계장화압입시험법을 도입하였다.

구형 압입자에 의해 압입된 시험편에서는 소성 변형인 재료 쌓임 효과에 의해 단순히 최종압입 깊이와 압흔크기와의 상관관계로부터 브리넬 정도가 평가될 수 없다. 가공경화지수, 항복변형률, 압입비 등과 같은 재료 특성 및 압입 변수들이 재료 쌓임 높이와 같은 상관관계를 분석하여, 가공경화지수만으로 재료 쌓임 높이가 정량화 될 수 있음을 확인하였다. 재료 쌓임 높이와 가공경화지수의 정량화된 상관관계로부터 압흔크기를 유도하여, 브리넬 정도를 평가할 수 있었다. 이 값은 실제 압흔크기 측정으로부터 얻어진 값과 5% 이내에서 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

따라서, 압흔 관찰이 요구되었던 기존 브리넬 정도 평가법과 달리, 소재의 가공경화지수와 압입하중-깊이곡선만으로 브리넬 정도를 손쉽게 평가할 수 있었다. 이로 인해 브리넬 정도의 현장 적용성이 더욱 커질 것으로 기대 된다.

#### 참고문헌

- (1) Ahn, J. A. and Kwon, D., 2001, "Derivation of Plastic Stress-Strain Relationship from Ball Indentations: Examination of Strain Definition and Pileup Effect," *J. Mater. Res.*, Vol. 16, No. 11, pp. 3170~3178
- (2) Doerner, M. F. and Nix, W. D., 1986, "A Method for Interpreting the Data from Depth-Sensing Indentation Instruments," *J. Mater. Res.*, Vol. 1, No. 4, pp. 601~609.
- (3) Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 1992, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," *J. Mater. Res.*, Vol. 7, No. 6, pp. 1564~1583.
- (4) Lim, Y. Y., Chaudhri, M. M. and Enomoto, Y., 1999, "Accurate Determination of the Mechanical Properties of Thin Aluminum Films Deposited on Sapphire Flats Using Nanoindentation," *J. Mater. Res.*, Vol. 14, No. 6, pp. 2314~2327.
- (5) Norbury, A. L. and Samuel, T., 1928, "The Recovery and Sinking-in or Piling-up of Material in the Brinell Test, and the effects of these factors on the correlation of the Brinell with Certain Other Hardness Tests," *J. Iron steel Inst.*, 117, pp.673~687.
- (6) Rhee, S. S. and McClintock, F. A., 1962, "On the Effect of Strain Hardening on Strain Concentrations," *Proc. 4th US Nat. Conf. Applied Mechanics*, ASME, Berkeley California.
- (7) Hill, R., Storkers, B. and Zdunek, A.B., 1989, "A Theoretical Study of the Brinell Hardness Test," *Proc. R. Soc. London*, A423, pp.301~330.
- (8) Matthews, J. R., 1980, "Indentation Hardness and Hot Pressing", *Acta Metall.*, 28, pp.311~318.
- (9) Taljat, B. and Pharr, G.M., 1998, "Pile-up Behavior of Spherical Indentations in Engineering Materials," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 522, pp.33~38.
- (10) Alcalá, J., Barone, A. C. and Anglada, M., 2000, "The Influence of Plastic Hardening on Surface Deformation Modes Around Vickers and Spherical Indents," *Acta Mater.*, Vol. 48, No. 13, pp. 3451~3464.
- (11) Malzbender, J. and de With, G., 2002, "Indentation

Load-Displacement Curve, Plastic Deformation, and Energy," *J. Mater. Res.*, Vol. 17, No. 2, pp. 502~511.

(12) Haggag, F. M., 1993, "In-Situ Measurements of

Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System," *ASTM STP 1204*, ASTM,

Philadelphia, pp. 27~44.