

## DEFORM™을 이용한 SKH9 고속도공구강의 경도 예측

박준홍\* · 성장현\*\*† · 김영희\*\* · 이해우\*\* · 전언찬\*\*\* · 박영철\*\*\*

\*동아대학교 신소형재가공청정공정개발연구센터

\*\*동아대학교 신소재공학과

\*\*\*동아대학교 기계공학과

## Estimation of Hardness using DEFORM™ in SKH9 High Speed Steel

Joon Hong Park\*, Jang Hyun Sung\*\*, Young Hee Kim\*\*, Hae Woo Lee\*\*,  
Eun Chan Jeon\*\*\*, Young Chul Park\*\*\*

\*CANSMC, Dong-A University

\*\*Department of Materials Science and Engineering, Dong-A University,

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Dong-A University,

840 Hadan-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

**Abstract** The hardness of cold-forged products is in close relationship with its effective strain. This study presented the estimating method of hardness for cold-forged SKH9 products without hardness tests in view of resistance to plastic deformation using finite element code, DEFORM™. The flow stress equation obtained from the compression test was only used as a basic data to estimate the relationship between effective strain and hardness. In addition, this new estimating method was applied to the cold-forged product which was widely used in industrial field to show the feasibility. As a result, the predicted hardness numbers through FE simulation showed good agreement with the measured hardness numbers. It is possible to estimate the hardness not by hardness tests, but by only computer simulations for the deformed products. Also, effective strain values were possibly estimated by measuring hardness numbers, and vice versa.

(Received May 26, 2007; accepted June 13, 2007)

**Key words:** Brinell Hardness, High Speed Steel, Finite Element Method, Effective Strain

### 1. 서 론

펀치 및 다이와 같은 금형재료의 수명을 연장하기 위해 내마모성이 높은 고속도강(High Speed Steel)을 사용하고 있다. 고속도강은 온도가 상승하여도 경도 및 내마모성 저하가 적기 때문에 바이트와 같은 절삭공구로 개발되어 널리 이용되고 있고, 또한 인성이 높아 대량생산이 가능한 소형 펀치와 같은 프레스 금형용 공구로도 효과적으로 사용되고 있다[1, 2]. 고속도강을 사용한 공구는 나사용 펀치와 같이 냉간 성형하여 널리 사용되며, 유효변형률과 경도 사이의 관계를 알고 있을 경우, 냉간 성형품의 경도를 측정한 후 이를 관계식에 대입하여 변형률 분포를 얻을 수 있다는 점에서 중요하다. 반대로, 냉간 성형 품의 변형률 분포를 알고 있는 경우, 이를 관계식에

대입하여 경도 분포를 예측할 수 있다.

지금까지 냉간 단조품의 경도와 변형률 관계를 연구한 논문에 따르면, 변형률과 경도 사이의 관계식을 구하기 위해 변형에 따른 다수의 반복시험을 수행하거나, 실험횟수를 줄이기 위해 흄이 파진 금형(Compression test with grooved die)을 이용한 압축시험 관계식을 결정하였다[3].

본 논문에서는 고속도 공구강의 하나인 완전 어닐링(Full annealing)된 SKH9(AISI M2)강에 대하여 유한요소프로그램인 DEFORM™을 사용하여 경도시험을 시뮬레이션하고 이를 통하여 SKH9강의 유효변형률-경도 관계를 예측하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 보이기 위해 SKH9강으로 냉간 단조된 제품에 대하여 경도시험을 수행한 후, 제안한 방법으로 예측된 경도 값과 비교하고자 한다.

†E-mail : jhsung@dau.ac.kr

## 2. SKH9강의 경도 예측

본 논문에서 SKH9강의 경도-유효변형률 관계를 예측하는 방법을 Fig. 1에 나타내었다. 유한요소프로그램인 DEFORM™에서 경도시험을 시뮬레이션하기 위해 입력값으로 사용되는 SKH9강의 유동 응력식을 실험으로 구한다. 물론, 유동 응력식을 알고 있는 재료에 대해서는 실험을 수행하지 않아도 된다. DEFORM™ 프로그램에서 재료에 미리 예변형률(pre-strain)을 줄 수 있는 기능을 사용하여 예변형률 0에서부터 원하는 값까지 입력하여 각각 경도시험을 시뮬레이션한 후 경도값을 획득한다. 따라서 다양한 예변형률에 따른 시뮬레이션 경도값을 구할 수 있고 이는 곧 SKH9강의 경도-유효변형률 관계식이 된다.

## 3. SKH9강의 압축시험

본 논문에서 SKH9강의 경도를 예측하기 위한 응력-변형률 관계식을 구하기 위하여 압축시험을 수행하였다. 시료는 시판되고 있는 완전 어닐링(full annealed) 된 고속도 공구강 SKH9 강을 사용하였으며, 그 화학조성을 Table 1에 나타내었고, Fig. 2는 링압축시험 전과 후의 시편 사진을 나타낸 것이다.

위의 링 압축 시험 결과로부터 SKH9고속도공구강의 소성(강도)계수(K)와 가공 경화 지수(n)를 결정하였으며, 그 식은 다음과 같다.

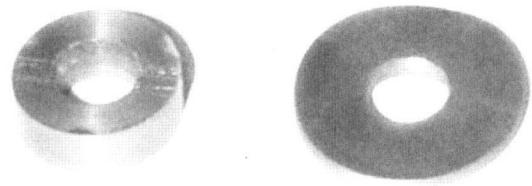


Fig. 2. Photograph of initial billet (left hand side) and billet after ring compression test (right hand side).

$$\bar{\sigma} = 5990.8 \bar{\varepsilon}^{0.3814} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

## 4. DEFORM™을 이용한 경도시험의 시뮬레이션

경도 값은 소성변형에 대한 저항성을 나타내고, 이 경도 값은 유효 변형률과 깊은 관계가 있다고 알려져 있다[4, 5]. 여기에 착안하여 유한요소 시뮬레이션에 의해 경도-변형률 관계를 예측하고, 그 결과를 실험 값과 비교하여 타당성을 검토하였다.

### 4.1 브리넬 경도

브리넬 경도는 ASTM 규격[6]에 정의되어 있으며, 본 논문에서는 10 mm 직경의 강구로 금속 표면에 압흔을 남기는 브리넬 경도(하중 29.4 kn)를 이용하여 2차원 시뮬레이션을 하였다. 브린넬 경도 값(HB)은 하중(P)를 압입 면적으로 나눈 값으로 표현되며 식(2)와 같다.

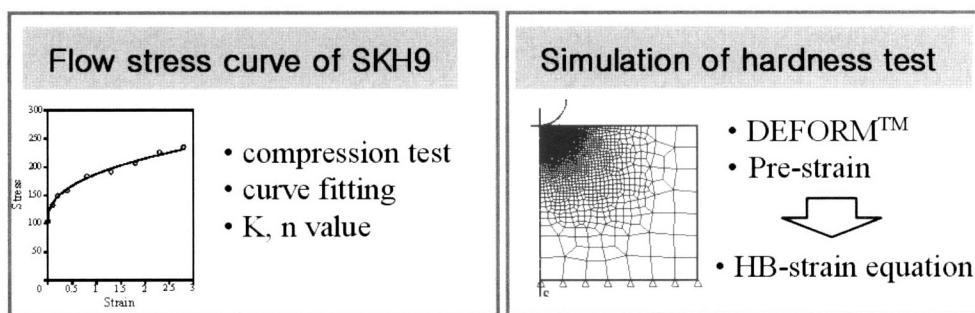


Fig. 1. Estimation method of hardness for SKH9.

Table 1. Chemical composition of SKH9 high speed steel.

(wt. %)

SKH9	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V
Specification	0.80-0.90	0.40 ↓	0.40 ↓	0.03 ↓	0.03 ↓	3.80-4.50	4.50-5.50	5.50-6.70	1.60-2.20
Sample	0.85	0.21	0.28	0.01	0.02	4.14	5.03	6.03	1.82

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

여기서  $P$ 는 작용 하중(kn),  $D$ 는 강구(indenter)의 직경(mm),  $d$ 는 압입 흔적의 직경(mm)이다.

#### 4.2 경도시험의 시뮬레이션

고속도 공구강의 경도 시험을 시뮬레이션 하기 위하여 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM<sup>TM</sup>을 사용하여 Fig. 3과 같이 모델링하였으며, 강구는 강체(Rigid body)로 가정하였다. 강구의 근처에는 유한요소 격자를 조밀하게 설정하였으며, 강구의 하강 속도는 1 mm/sec로 설정하고, 유한 요소(element)의 수와 노드(node)의 수는 각각 1518와 1589이며, 축 대칭으로 모델링하였다.

#### 4.3 시뮬레이션과 시험 경도의 비교

브리넬 경도값은 Fig. 3과 같은 모델에 대하여 강소성 유한요소 해석을 수행하여 예측할 수 있다. 또한 본 연구에서는 예측된 경도 값과 실제 실험값을 비교하여, 본 연구에서 제시한 고속도 공구강의 경도 예측 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

Fig. 4는 DEFORM<sup>TM</sup> 프로그램에서 경도 시험을

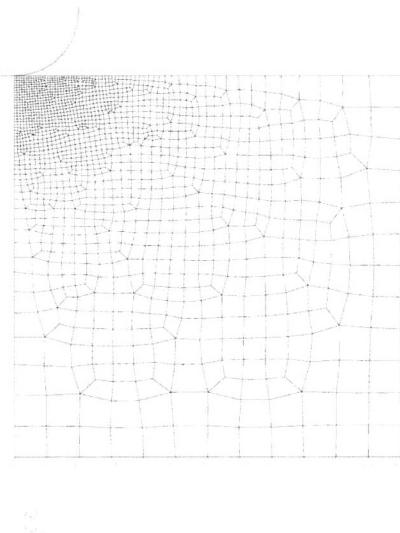


Fig. 3. Initial modeling of Brinell hardness test for FE-simulation of high speed steel.

시뮬레이션한 결과이며, Fig. 5는 경도 시험 후 변형률 분포를 나타내고 있다. 이 때 시뮬레이션 결과로부터 압입 흔적의 반경  $R$ 을 구하여 식 (2)에서 고속도 공구강의 브리넬 경도를 예측하였다.

Table 2에 위와 같은 방법에 의해 얻은 브리넬 경도의 시뮬레이션 예측값과 실제 브리넬 경도시험으로 측정한 실험값을 비교하여 보았다. 오차가 0.18%로서 본 연구에서 제안한 방법으로 예측한 경도 값이 타당함을 알 수 있다.

#### 5. 고속도 공구강의 경도-변형률 관계식

완전 어닐링된 SKH9강의 경도 예측방법에 대한 타당성을 앞에서 검증하였고, 이와 같은 방법으로 고속도 공구강의 DEFORM<sup>TM</sup> 시뮬레이션에서 재료에 미리 예변형률(pre-strain)을 줄 수 있는 기능을 사용하여 다양한 예변형율을 가진 SKH9강에 대한 경도 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 SKH9강의 경도와 변형율의 관계식을 유도할 수 있다. Table 3은 유한요소 시뮬레이션에 의해 여러 가지 예변형률

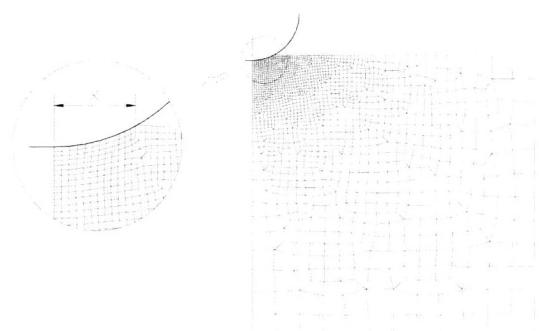


Fig. 4. Results of FE-simulation for Brinell hardness

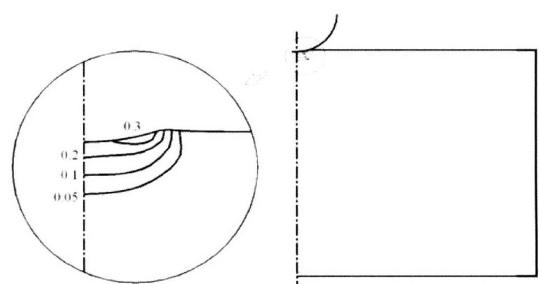


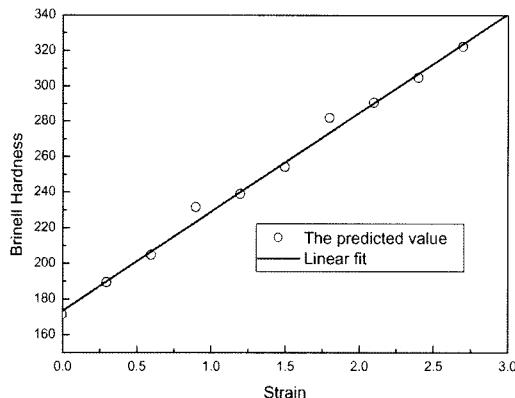
Fig. 5. Distribution of effective strain obtained by FE-simulation in KSH9.

**Table 2** Comparison between the measured hardness value and the predicted value.

Material	Measured value(HB)	Predicted value(HB)	Error(%)
SKH9	171.0	171.3	0.18

**Table 3.** Changes in Brinell hardness with pre-strain obtained by FE-simulation in SKH9.

Pre-strain	HB	Pre-strain	HB
0.0	171.0	1.5	253.9
0.3	189.0	1.8	281.6
0.6	204.5	2.1	290.3
0.9	231.2	2.4	304.5
1.2	238.6	2.7	322.0



**Fig. 6.** Relationship between predicted Brinell hardness and effective strain.

을 설정한 상태에서 예측된 경도값을 나타내고 있다. Fig. 6은 Table 3의 브리넬 경도의 예측 값을 그 래프로 표시한 결과이며 이를 선형 보간하여 고속도 공구강의 브리넬 경도와 유효 변형률 사이의 관계를 식 (3)과 같이 구하였다.

$$HB = 173.3 + 55.8\bar{\epsilon} \quad (3)$$

## 6. 냉간 단조품에의 적용

본 연구에서 구한 SKH9고속도 공구강의 브리넬 경도와 유효 변형률에 대한 관계식을 검증하기 위하여 산업 현장에서 사용되고 있는 실제 고속도 공구강 제품에 대하여 경도 시험과 유한요소 해석을 하여 검토하였다. Fig. 7은 고속도 공구강 편치 제품을 냉간 단조하기 위한 금형 및 설계도를 나타내고 있다.

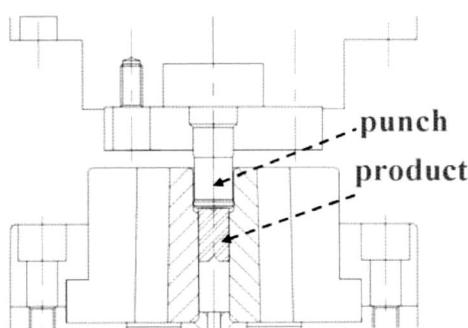
Fig. 8은 검증을 위해 사용한 고속도 공구강 시험 편의 사진이다.

Fig. 8의 시험 재료의 임의의 변형지점에 대하여 브리넬 경도 시험을 수행하였으며, 유한요소 해석한 예측 경도 값과 비교하였다. 또한 Fig. 8의 시험 재료에 대하여 유한 요소 해석을 수행하여 유효 변형률 분포를 Fig. 9에서 나타내었다.

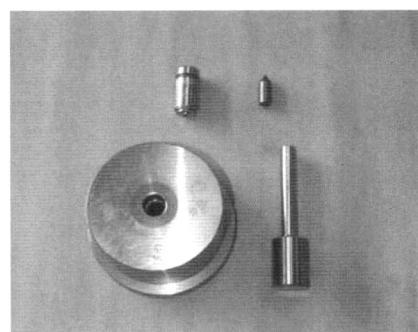
Fig. 10은 완전어닐링된 SKH9 공구강의 조직사진을 나타내고 있으며, 브리넬 경도 시험 후의 현미경 사진을 나타내었다.

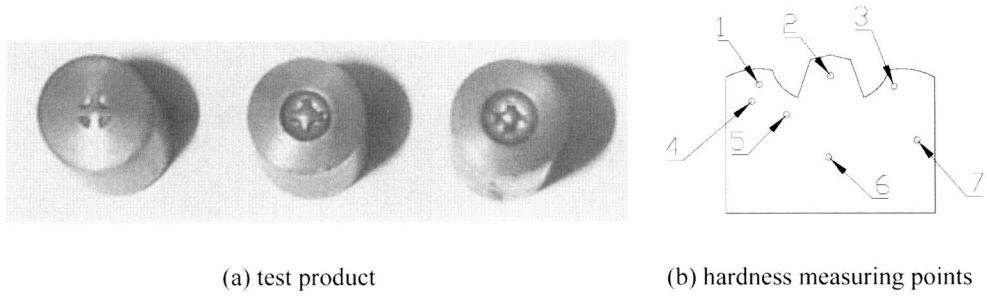
Fig. 8(b)에 표시된 지점에서 측정한 브리넬 시험 경도 값과, 동일한 위치에서 해석에 의한 유효변형률 값을 식(3)에 대입하여 예측한 브리넬 경도 값을 Table 4에 비교하여 나타내었다.

예측 경도 값과 시험 경도 값이 전체 부위에 대하여 아주 근사한 값을 나타내고 있으며, 이를 통하여 식 (3)에 의하여 유효 변형률 값을 시뮬레이션을 통해 알면 실제 경도 값을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

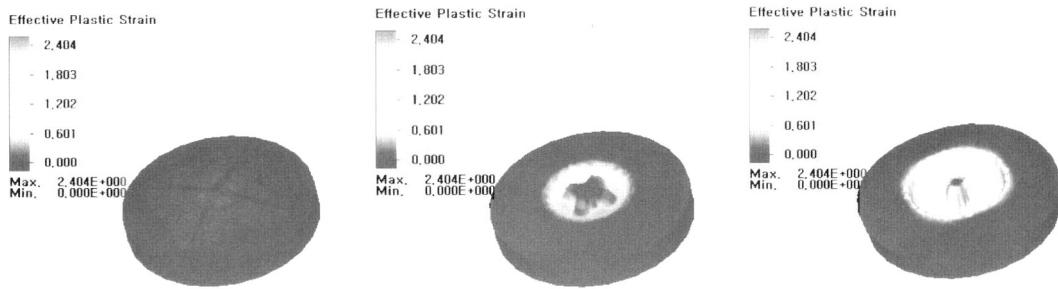


**Fig. 7.** Photograph of high speed steel test product.

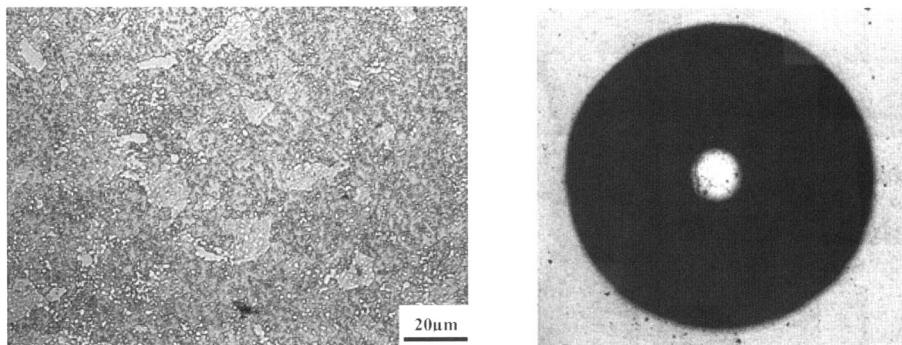




**Fig. 8.** Photograph of high speed steel test product.



**Fig. 9.** Distribution of effective strain for the test material



**Fig. 10.** Microstructure and indentation of Brinell hardness of SKH9

**Table 4.** Comparison between the predicted hardness values and the measured hardness values for the test material

Measuring points	Tested hardness values	Predicted hardness values
1	209.0	195.6
2	198.3	197.4
3	214.7	209.57
4	190.1	183.2
5	195.6	190.7
6	178.8	170.5
7	175.6	169.4

## 7. 결 론

본 논문에서는 경도가 소성변형에 대한 저항성을 나타내는 것에 착안하여 경도 시험을 유한요소 시뮬레이션하여 경도를 예측하고, 또한 경도와 유효변형율 사이의 관계를 구하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. SKH9 공구강에 대해 실험없이 브리넬 경도시험을 DEFORM™으로 유한요소 시뮬레이션하여, 경도값을 예측할 수 있는 방법을 제안하였다.
2. 예변형율을 준 재료에 대해 경도 시험을 시뮬레이션 함으로써 경도-유효변형율 관계를 예측하였으며,

그 결과를 SKH9 냉간 단조품에 적용한 실험 경도  
값과 비교하여 제안한 방법의 타당성을 보였다.

3. 본 논문에서 제안한 방법으로 냉간 단조품의 경  
도 분포 예측이 가능하며, 또한 제품의 경도를 측정  
하여, 냉간 변형시 발생한 유효변형율을 예측할 수  
있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지정 지역혁신센터사업 신  
소형재가공청정공정개발연구센터 지원으로 수행되  
었음.

## 참고문헌

1. L. A. Dobrzanski : J. Mater. Process. Tech., **48** (1995) 727.
2. L. A. Dobrzanski : J. Mater. Process. Tech., **109** (2001) 44.
3. H. K. Kim, S. M. Lee, and T. Altan : J. Mater. Process. Tech., **59** (1996) 113.
4. T. Altan, S. I. Oh, and H. L. Gegel : Metal Forming Fundamentals and Applications, 1st ed., Metals Park OH44073 (1983) 299.
5. G. E. Dieter: Mechanical Metallurgy, 1st ed, McGraw-Hill (1986) 196.
6. ASTM E10-84, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.