

# 냉간 가공 제품의 경도와 유효 변형률에 관한 연구

최영<sup>#</sup>, 박준홍<sup>\*</sup>

## A Study on Hardness and Effective Strain of Cold-Worked Products

Young Choi<sup>#</sup> and Joon Hong Park<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

It is already known that hardness number of cold-forged product is in close conjunction with its effective strain. This paper presents the method to predict the relation between effective strains and hardness by using FE-simulation of hardness test from the conception that hardness indicates resistance to plastic deformation. The results of FE-simulation for the materials are compared with those of experiments and also compared with those of experiments in reference to show the feasibility of the proposed method. In addition, the present method was applied to the cold-forged product to verify the relation between hardness and effective strain. As a result, the predicted hardness number by the present method is in good agreement with experimental values. Prediction of hardness for a cold-forged product comes to be possible by estimating the relation between effective strain and hardness using the proposed method in this study.

**Key Words** : Brinell Hardness(브리넬 경도), Vickers Hardness(비커스 경도), Effective Strain(유효 변형률), Rigid-Plastic FEM(강소성 유한요소법)

### 1. 서론

일반적으로 경도는 흔히 변형에 대한 저항성을 의미하며, 금속에서의 경도는 그들의 소성변형에 대한 저항성을 나타낸다. 경도는 압흔에의 저항을 뜻하며, 설계 공학자에게는 금속의 열처리나 강도에 관한 정보를 나타낼 수 있는 측정하기 쉽고 규정할 수 있는 양을 의미한다.<sup>1</sup> 경도시험은 제작된 제품의 기계적인 물성치(mechanical properties)를 측정하기 위해 자주 사용되는 시험법 중의 하나이다. 또한 냉간 단조의 공정설계가 원하는 기계적 성질을 갖는 제품을 성형하는 공정설계로 발전함에 따

라 냉간 단조품의 기계적 성질을 예측하는 것이 필요하게 되었고 이러한 요구에 대하여 냉간 성형 공정을 시뮬레이션하여 단조품의 경도값을 예측하는 연구가 보고되고 있다.<sup>2</sup>

냉간 단조된 제품의 경도값과 유효 변형률 사이에 깊은 연관관계가 있으며, 이러한 관계는 단조 공정에 의존하지 않음이 이미 알려져 있다.<sup>3,4</sup> 기존의 연구에서는<sup>2</sup> 유한요소법으로 냉간 단조된 제품의 유효 변형률 분포를 예측한 후, 이를 유효 변형률-경도 관계식에 대입하여 경도의 분포를 예측하는 방법을 사용하고 있다. 또한 반대의 경우로서, 단조품의 경도를 측정 후 이를 유효 변형

... 접수일: 2003년 12월 30일; 게재승인일: 2004년 6월 11일

# 교신저자: 인제대학교 수송기계부품기술혁신센터

E-mail ychoi@inje.ac.kr Tel. (055) 320-3755

\* 부산대학교 기계기술연구소

률-경도 관계식에 대입하여 냉간 단조품의 변형률 분포를 얻을 수 있다.<sup>5,6</sup>

이러한 유효 변형률-경도 관계식은 저마찰 압축시험(compression test)으로부터 결정될 수 있다.<sup>7</sup> 또한 Shiozaki<sup>8</sup> 등은 압축시험과 이에 관한 유한요소 시뮬레이션 기법을 적용하여 유효 변형률과 경도 사이의 관계식의 결정법에 관한 연구를 수행하였다. Altan<sup>2,9</sup> 등은 실험횟수를 줄이기 위해 홈이 파진 금형을 이용한 압축시험(compression test with grooved dies)과 유한요소 시뮬레이션을 이용하여 유효 변형률-경도 관계식을 결정하였다. 또한 Lee<sup>5,6</sup>는 유한요소 시뮬레이션을 이용하여 경도 시험에서 발생하는 변형경화 정도를 예측하고 유동 응력식으로부터 유효 변형률-경도 관계식을 작은 양의 실험 결과를 이용하여 결정하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 경도값이 소성변형에 대한 저항성을 나타내는 것에 착안하여 경도시험을 유한요소 시뮬레이션하여 유효 변형률-경도관계를 예측하는 방법을 제안한다. 제안한 방법의 타당성을 보이기 위해 예변형률(pre-strain)을 준 소재를 경도 시뮬레이션 함으로써 유효 변형률-경도관계를 예측하여 그 결과를 기존의 실험결과<sup>2</sup>와 비교하여 제안한 방법의 타당성을 보이려 한다.

## 2. 경도 시험의 시뮬레이션

일반적으로 경도값은 비커스(Vickers) 경도, 브리넬(Brinell) 경도, 로크웰(Rockwell) 경도 등이 이용된다. 여러 가지 시험재료 및 개인적인 오차 등을 고려할 때, 비커스 경도가 연구시 많이 사용되고 있다.<sup>2,5,6</sup> 그러나 비커스 경도시험은 밀면이 정사각형인 피라미드 압자를 이용하므로 이를 시뮬레이션하기 위해서는 3차원 유한 요소법을 이용해야 한다. 그러나 3차원 유한 요소법을 이용한 금속 성형공정의 시뮬레이션은 과도한 계산시간이 요구됨으로 본 연구에서와 같이 많은 시뮬레이션이 필요한 경우 적합하지 않은 방법이다. 그러므로 본 연구에서는 10mm 직경의 강구(鋼球)로 금속 표면에 압흔을 남기는 브리넬 경도 시험을 시뮬레이션하고 얻어진 브리넬 경도값(HB)을 비커스 경도값(HV)으로 환산하는 방법을 이용한다.<sup>10,11</sup> 이러한 경도값 환산은 열처리된 탄소강과 합금강, 그리고 단조되고, 어닐링되고, 표준화되고, 퀴칭 후 템퍼된

거의 모든 합금 구조강과 공구강에 적용할 수 있다.<sup>1,10,11</sup>

### 2.1 브리넬 경도

브리넬 경도는 ASTM 규격<sup>12</sup> 및 문헌<sup>1</sup>에 잘 정의되어 있다. 브리넬 경도값은 하중 P를 압흔 표면적(surface area)으로 나눈 값으로 표시된다. 이것은 다음과 같은 형태로 표시된다.

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

여기서, P [kgf]는 부과하중, D [mm]는 볼의 직경, d [mm]는 압흔의 직경이다. 일반적으로, P는 3000 [kgf], D는 10[mm]로서, 압흔의 직경을 측정하여 계산한다. 브리넬 경도 시험은 물체에 축대칭 하중을 가하여 압흔의 직경을 측정하는 것임으로 축대칭 2차원 유한요소 프로그램을 이용하여 시뮬레이션이 가능하다.

### 2.2 브리넬 경도 시험의 시뮬레이션

브리넬 경도 시험의 해석을 위해서 소성변형 해석용 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM을 이용하였다. Fig. 1과 같이, 직경 10mm 강구(Steel ball)로 표면에 압흔을 남기는 경도시험을 축대칭으로 모델링하였다. 강구와 접촉하는 부분의 유한요소 격자를 조밀하게 하였고, 강구의 속도는 단위속도(1mm/sec)로 하였으며, 소재의 요소는 1518개, 절점은 1589개로 하였다. 변형을 경도시험 부분에 국한시키기 위해 소재의 반경을 30mm, 높이를 30mm로 하였다.

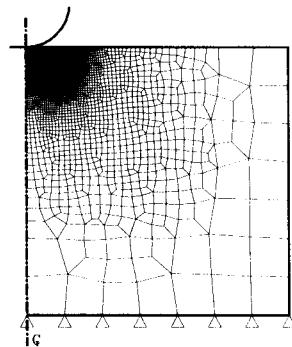


Fig. 1 Modeling of Brinell hardness test for FE simulation

### 2.3 비커스 경도값으로의 환산

앞 절에 기술한 축대칭 모델을 이용하여 유한 요소 시뮬레이션을 하고, 그 결과를 식(1)을 이용하여 평가하면, 브리넬 경도를 평가할 수 있다. 일반적으로 비커스 경도를 많이 이용함으로 브리넬 경도값을 비커스 경도 값으로 변환하여 사용코져 한다.

본 연구에서 사용된 변환 Table<sup>11</sup>을 Table 1에 보인다. 이러한 경도값 환산은 열처리된 탄소강과 합금강, 그리고 단조되고, 어닐링되고, 표준화되고, 킨칭 후 템퍼된 거의 모든 합금 구조강과 공구강에 적용할 수 있다.

비커스 경도값(HV)이 100~300 범위에서는 브리넬 경도값(HB)과 5만큼 차이가 난다. 그러므로, 본 연구에서는 아래의 식(2)와 같이 단순화 하여 사용하였다.

$$HV = HB + 5 \quad (100 \leq HV \leq 300) \quad (2)$$

Table 1 Approximate conversion of hardness values<sup>11</sup>

Vickers Hardness No. (HV)	Brinell Hardness No. (HB)
100	95
120	115
140	135
160	155
180	175
200	195
220	215
240	235
260	255
280	275
300	295
320	311
340	328

### 3. 브리넬 경도의 예측

상용 프로그램인 DEFORM을 이용, Fig. 1에 보인 유한요소 모델을 해석하면, 브리넬 경도를 예측할 수 있고 이를 식(2)를 이용하여 비커스 경도로 환산하여 재료의 비커스 경도값을 예측하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위한 실험에 사용될 소재는 상용 알루미늄과 SCM415 소재로서 식(3)과 식(4)는 상용 알루미늄 소재<sup>13</sup>와 SCM415 소재<sup>14</sup>의 유동 응력식을 나타내고 있다.<sup>15,16</sup>

$$\bar{\sigma} = 287.74\bar{\epsilon}^{0.12} \quad (MPa) \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = 768.06\bar{\epsilon}^{0.139} \quad (MPa) \quad (4)$$

실험에 사용된 소재의 크기는 상용 알루미늄과 SCM415 모두 높이 50mm, 직경 50mm의 시편을 사용하였다. 브리넬 경도 시험기로는 Detroit Co.에서 제조된 HB-2를 사용하였고 경도 시험 하중은 SCM415 소재에 대해서는 29400N을 부하하였고, 알루미늄 소재에 대해서는 과도한 압입을 방지하기 위해 4900N를 부하하였다.<sup>1</sup> Table 2는 알루미늄과 SCM415 소재에 대하여 브리넬 경도 시험을 수행하여 측정된 경도값을 나타내고 있다. 경도 시험시 압입자와 소재 사이에 윤활 처리는 하지 않았으며 소재는 충분히 연마(polishing)된 상태이다.

Table 2 Measured Brinell hardness number of commercial aluminum alloy and SCM415

	SCM 415 with 29400N	Commercial Aluminum alloy with 4900N
HB	142.9	62.75

SCM415 소재에 대한 경도 시험의 유한 요소 해석의 결과를 Fig. 2에 나타낸다. 이 때, 최종 하중은 29405.88N이다. 마찰 상수는 0.1로 가정하였다. Fig. 2와 같은 유한 요소 해석 결과로부터 반경(R)을 측정한 후, 식(1)로부터 브리넬 경도를 계산하여 이 값을 실험값과 비교한다.

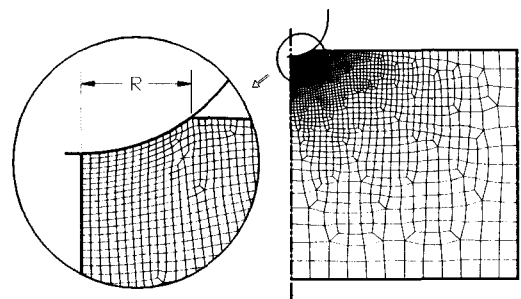


Fig. 2 Results of the FE-simulation for the Brinell hardness test

Table 3은 상용 알루미늄과 SCM415 소재에 대하여 브리넬 경도 시험에 대한 Fig. 2와 같은 유한 요소 해석 결과로부터 계산된 경도 값을 나타내고 있다. Table 2의 실험값과 Table 3의 예측된 값은 오차가 각각 0.44%와 1.38%로서 아주 양호한 결과를 나타내고 있다.

Table 3 Brinell hardness number of commercial aluminum alloy and SCM415 by the simulation

Material	Commercial aluminum alloy with 4904.9N		SCM 415 with 29405.88N	
	HB	Error [%]	HB	Error [%]
m=0.1	63.03	0.44	144.9	1.38

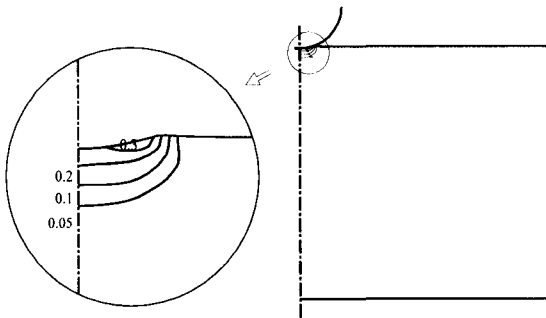


Fig. 3 Distribution of effective strain in SCM415 obtained by the FE-simulation

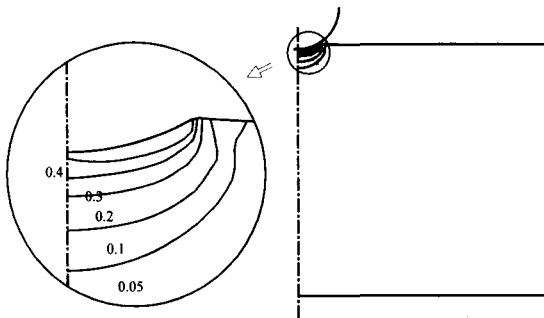


Fig. 4 Distribution of effective strain in commercial aluminum alloy obtained by the FE-simulation

Fig. 3은 SCM415 소재인 경우 최종 하중이 29405.88N 일 때의 유효 변형률 분포를 나타내고 있다. 압입자 부근에는 큰 변형을 나타내고 있고 나머지 부분은 변형이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 압입자 부근에서 변형률이 0.56으로서 최대를 나타내고 있다.

Fig. 4는 상용 알루미늄 소재에 대하여 최종 하중이 4904.9N 일 때의 변형률 분포를 나타내고 있다. 이러한 유한 요소 해석은 실제 경도 시험에서 압입자 부근 이외의 부분에서는 변형이 발생하지 않아야 한다는 조건을 잘 만족하고 있다.

#### 4. 유효 변형률-경도 관계 예측

본 연구에서 제안한 방법으로 예측한 경도값이 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 시뮬레이션 시 손쉽게 예변형률(pre-strain)을 고려할 수 있으므로 유효 변형률-경도관계를 결정할 수 있다. 즉, 예변형률값을 바꾸어서, 브리넬 경도시험의 시뮬레이션을 수행하고 예측된 경도값과 예변형률 관계를 구하게 된다. 이를 Fig. 5에 정리하여 나타내었다.

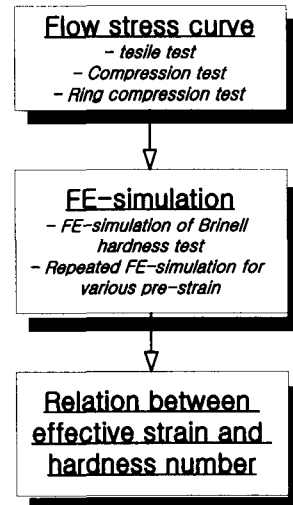


Fig. 5 Flowchart for prediction of relation between effective strain and hardness value

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 유효 변형률-경도 관계를 예측하고, 이 결과를 Altan<sup>2</sup>

등이 AISI1010소재에 대하여 실험한 값과 비교하였다. Altan<sup>2</sup> 등은 실험 횡수를 줄이기 위해 홈이 파진 금형을 이용한 압축시험(compression test with grooved dies)과 유한요소 시뮬레이션을 이용하여 유효 변형률-경도 관계식을 결정하였다. 즉 시뮬레이션으로 유효 변형률 값을 예측하고 이에 대한 경도를 측정하여 유효 변형률-경도 관계식을 결정하였다. 얻어진 유효 변형률-경도 관계를 Fig. 6에 보인다.

Altan<sup>2</sup> 등이 실험으로부터 구한 경도 값과 유한요소해석으로부터 구한 유효 변형률의 관계는 식(5)와 같으며, AISI1010 소재에 대한 유동 응력식은 식(6)과 같다.

$$HV = 102.8 + 84.9\bar{\epsilon}^{0.4} \quad (5)$$

$$\bar{\sigma} = 96.5\bar{\epsilon}^{0.255} \text{ (ksi)} \quad (6)$$

Table 4는 AISI1010 소재에 대하여 예변형률을 0.0에서부터 2.8까지 주어 브리넬 경도 시험을 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있는데, 하중, 압흔의 직경, 식(1)에 의해 계산되어진 브리넬 경도, 식(2)에 의해 환산된 비커스 경도, Altan<sup>2</sup> 등이 구한 식(5)로 계산한 비커스 경도를 나타내고 있다.

본 연구에서 제안된 방법으로 예측되고 변환되어진 비커스 경도와 Altan<sup>2</sup> 등에 의해 실험으로 구해진 비커스 경도와의 오차가 4% 이하로 나타나서 제안된 경도 예측 방법이 아주 유효함을 알 수 있다.

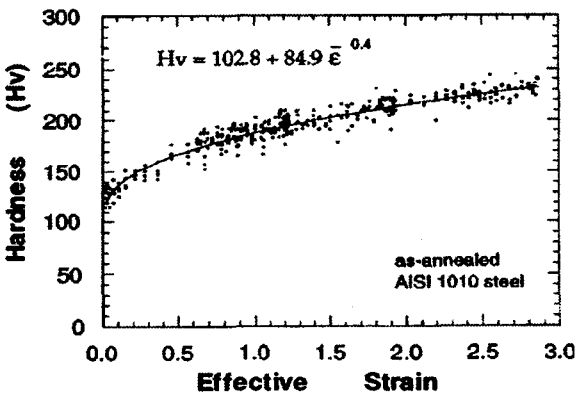


Fig. 6 Relation between hardness from experiment and effective strain from FE-simulation by Altan<sup>2</sup>

Table 4 The results of the FE-simulation for the Brinell hardness test for AISI1010

Pre-strain	Load [N]	d [mm]	HB	HV (Eq.2)	HV <sup>2</sup> (Eq.5)	Err. [%]
0.0	29401.96	5.900	99.2	104.2	102.8	1.36
0.1	29410.78	5.264	127.6	132.6	136.6	2.93
0.2	29431.36	4.970	144.6	149.6	147.8	1.22
0.3	29464.68	4.836	153.5	158.5	161.6	1.96
0.8	29401.96	4.498	178.7	183.7	180.5	1.77
1.3	29402.94	4.410	186.0	191.0	197.2	3.14
1.8	29400.98	4.246	201.9	206.9	210.2	1.57
2.3	29408.82	4.064	221.4	226.4	221.3	2.30
2.8	29425.48	3.988	230.4	235.4	231.0	1.90

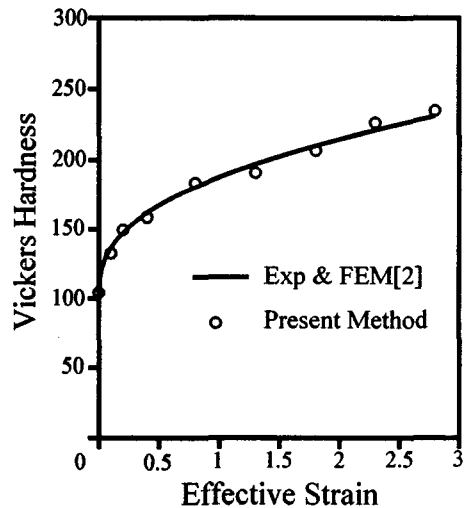


Fig. 7 Comparison between experimental values<sup>2</sup> and the predicted Vickers hardness by the present study

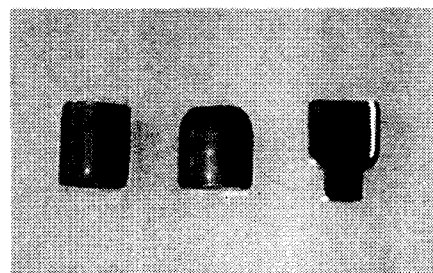


Fig. 8 Photograph of a cold-forged product

Fig. 7은 위의 결과를 그래프로 나타내었는데, 실선은 Altan<sup>2</sup> 등이 실험으로 구한 경도와 변형률의 그래프이고, 중공원으로 표시된 그래프는 본 연구에서 제안된 방법으로 예측되어진 결과이다. 이 결과를 보간하여 구한 경도와 변형률의 관계식을 식(7)에 나타내고 있다.

$$HV = 104.2 + 82.715\bar{\epsilon}^{0.435} \quad (7)$$

위의 결과로부터, 어떠한 소재의 경도와 유효 변형률의 관계식을 구하기 위해 수많은 실험을 수행하지 않고도 유동 응력식과 유한 요소 해석만으로 관계식을 구할 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 냉간 단조품에의 적용

경도와 유효 변형률과의 관계식을 구하기 위해 본 연구에서 제안된 방법의 적용을 위해 Fig. 8과 같은 냉간 단조품에 본 방법을 적용하였다.

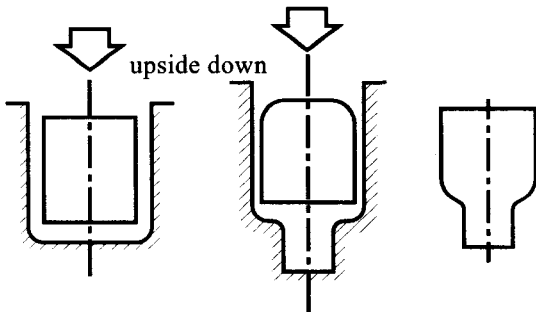
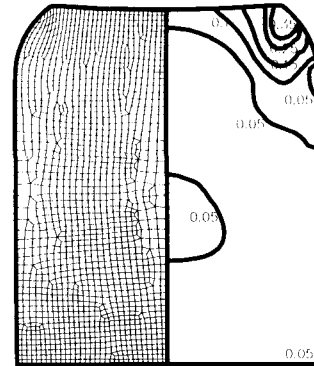


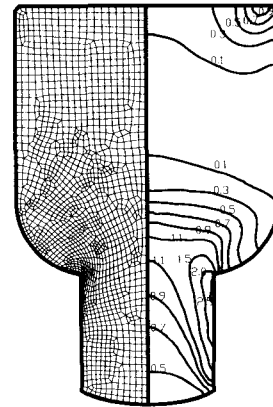
Fig. 9 Process to make the cold-forged product

Fig. 8과 같은 냉간 단조품에 대한 제조 공정을 Fig. 9에서 나타내고 있는데, 첫 공정에서는 원형 빌렛으로부터 성형하여 필렛 부분을 만들어 취출하고 두 번째 공정에서는 첫 공정에서 취출한 제품을 역방향으로 압출하게 된다.

Fig. 10은 위의 냉간 단조품에 대한 유한 요소 해석 결과를 나타내고 있는데, Fig. 10 (a)는 첫 공정에서의 유효 변형률 분포를 나타내고 있으며, Fig. 10 (b)는 두 번째 공정의 유효 변형률 분포를 나타내고 있다. 앞에서 구한 식(7)의 유효변형률-경도 관계식을 사용하여 Fig. 8의 냉간 단조 제품의 두 번째 공정, 즉, Fig. 10 (b)에서 나타낸 냉간 단조 제품의 공정에 적용하여 보았다.



(a) The first process



(b) The second process

Fig. 10 Distribution of effective strain for the cold-forged product

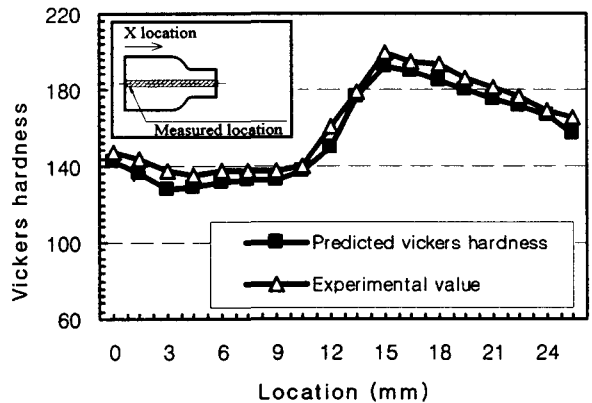


Fig. 11 Comparison between the predicted Vickers hardness values and the experimental values

Fig. 11은 식(7)로 예측된 비커스 경도값과 Fig. 8의 두 번째 공정의 단조품에 대하여 측정된 경도값을 비교하고 있다. 실험값과 예측된 값 사이의 오차가 약 5% 이내로 아주 근접한 결과를 나타내고 있으며, 본 연구에서 제안된 예측 방법이 아주 유용함을 알 수 있다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 실험 값이 예측된 값보다 약간 높게 나타남을 알 수 있는데, 이는 초기 시편의 절단 과정과 연마 과정에서의 미소한 경화로 기인된 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 경도 값이 소성변형에 대한 저항성을 나타내는 것에 착안하여 경도 시험을 유한요소 시뮬레이션하여 경도와 유효 변형률 사이의 관계를 구하였으며 그 결론은 다음과 같다.

유동 응력식을 아는 재료에 대해 실험 없이 브리넬 경도 시험을 유한요소 시뮬레이션하여, 유효 변형률-경도 관계를 예측하는 방법을 제안하였다.

상용 프로그램인 DEFORM을 이용, 예변형률(pre-strain)을 준 소재에 대해 경도시험을 시뮬레이션 함으로써 유효 변형률-경도 관계를 예측하였으며, 그 결과를 기존의 실험<sup>2</sup>과 비교하여 제안한 방법의 타당성을 보였다.

본 연구에서 제안된 방법을 실제 냉간 단조 제품에 적용하였으며, 본 연구에서 구해진 경도와 유효 변형률 관계식으로부터 예측된 경도 값이 측정된 경도 값과 아주 근접함을 알 수 있었다.

제안한 방법으로 쉽게, 변형률-경도 관계를 예측하여, 단조품의 경도예측이 가능하며, 또한 제품의 경도를 측정하여, 냉간 변형시 발생한 유효 변형률을 간접적으로 측정할 수 있으리라 생각된다.

## 참고문헌

1. Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, 1986.
2. Kim, H. K., Lee, S. M. and Altan, T., "Prediction of Hardness Distribution in Cold Backward Extruded Cups," J. of Mater. Process. Technol. Vol. 59, pp. 113-121, 1996.
3. Hartley, P., Struggess, C. E. N. and Rowe, G. W., "Prediction of deformation and homogeneity in rim-disc forging," J. of Mechanical Working Technology, Vol. 4, pp. 145-154, 1980.
4. Kudo, H., Sato, K. and Aoi, K., "On Cold Forgrability Test," Annals of CIRP, Vol. 16, pp. 309-318, 1967.
5. Lee, C. H., "An Experimental Study on the Relation between Flow Stress and Vickers Hardness," Spring Proc. of KSTP 97, pp. 65-68, 1997.
6. Lee, C. H., "A Study on the Theoretical Relation between Flow Stress and Vickers Hardness," Spring Proc. of KSTP 97, pp. 69-72, 1997.
7. Wilhelm, "Investigation on the relation between Vickers hardness and equivalent strain for cold forming process," Berichte aus dem Institut fr Umformtechnik, Universitt Stuttgart, No. 9, Essen, Girardet, 1969.
8. Shiozaki, T. and Kawasaki, T., "Flow stress and ductility in carbon steels for cold forging," J. of the JSTP, Vol. 27, pp. 568-572, 1986.
9. Lee, S. M., Kim, H., Shivpuri, R. and Altan, T., "Estimation of Hardness Distribution for Cold Forged Parts by the Finite Element Method," Autumn Proc. of KSTP 93, pp. 56-62, 1993.
10. ASTM E140-84, Standard Hardness Conversion Tables for Metals.
11. Smithells, Metals Reference Book (Sixth ed.).
12. ASTM E10-84, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.
13. Choi, J. C., Choi, Y., Tak, S. J., "The Forging of Helical Gears (I): Experiments and Upper-Bound Analysis," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 40, No. 4, pp. 325, 1998.
14. Choi, J. C. and Choi, Y., "Precision Forging of Spur Gears with Inside Relief," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, No. 10, pp. 1575, 1999.
15. Yeo, H. T., Choi, Y. and Hur, K. D., "Stress Analysis of the Prestressed Dies by Using FEM," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 114-122, 1999.
16. Cho, H. Y., Hur, J. H. and Min, K. S., "Development of Automated Forging Design System for Forging Process Design of Stepped Asymmetric Parts," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 102-107, 2000.