

# 사각재 인발 공정에서 코너 채움에 관한 유한 요소 해석 및 실험

김영식\*, 김용철(부산대 원), 김병민(부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터)

## Finite Element Simulation and Experimental Investigation on the Corner Filling in the Drawing of Quadrangle Rod from a Round Bar

Y.S. Kim\*, Y.C. Kim(Graduate School, PNU), B.M. Kim(ERC for NSDM, PNU)

### Abstract

In this study, to investigate the effect of process variables such as reduction in area, semi-die angle and the rectangular ratio to the corner filling which influences the dimensional accuracy of the final product in the drawing of the quadrangle rod from a round bar, it has been simulated by three dimensional rigid-plastic finite element method. In order to reduce the number of simulation artificial neural network has been introduced. Also, through the experimental investigation, the present results have been implemented on the industrial product. In results, the main process variable is the combination of the semi-die angle in case of the irregular shaped drawing process and reduction in area in the event of regular shaped drawing process, respectively.

Keywords : Drawing of the Quadrangle Rod(사각재 인발), Corner Filling(코너 채움), RP-FEM (강소성 유한요소법), Artificial Neural Network(인공신경망)

### 1. 서론

인발 가공은 봉재, 선재 및 관재 등의 소재를 다 이를 통하여 잡아당김으로서 단면적을 감소시키면서 인발 방향으로 소재의 길이를 증가시키는 기본적인 소성가공 방법으로, 외력으로 인장력을 작용시키나 다이벽면과 소재간에는 압축력이 작용한다. 최근, 정사각형, 직사각형, 타원형 등의 비정다각형 단면을 가진 제품들이 전기제품에 많이 쓰이는 연결핀, 변압기의 평케이블 등에 많이 사용되어지고 있다. 이형제 인발에서는 제품의 치수 정도의 측면에서 최종 제품의 금형 내부로의 코너 채움이 아주 중요하다.

이형제 인발 공정에 대한 실험 및 이론적 연구들이 많이 행해져 왔다. Basily등[1]은 원형봉에서 정다각형 단면형상의 인발 공정에 대한 상·하계해를 이용하여 정다각형 단면의 인발 공정에 대한

최적의 금형 형상을 제시하였다. Yoshida등[2]은 원형봉에서 육각봉의 인발 공정에 대해 상용 비선형 유한요소 해석코드인 MARC를 이용하여 해석을 수행하고, 실험과 비교하였다. Kim등[3]은 3차원 강소성 유한요소법을 이용하여 원형봉에서 정사각형 단면의 인발 공정에 대한 성형한계 및 코너 채움에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 원형봉에서 정사각재 및 직사각재 인발 공정에 대해 동일한 마찰조건에 대해 공정변수를 변화시켜가면서 다이 반각과 단면적 감소율이 재료의 금형 내부로의 코너 채움에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 본 연구의 이론적 해석 결과를 검증하기 위하여 연구 결과를 실제 사각 단면 연결핀으로 사용되고 있는 제품의 인발 실험을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 유한요소 정식화

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수,  $K$ 를 도입한 강소성 재료에 대한 범함수의 일차변분은 다음과 같다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \bar{\epsilon}_v \delta \bar{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

### 2.2 신경망의 적용

본 연구에서는 공정변수 조합의 수를 효율적으로 줄여 적은 유한요소 해석으로 최적의 공정조건을 찾기 위하여 미해석 데이터에 대해서도 신뢰성이 높은 값을 예측할 수 있는 역전파 학습 알고리즘의 다층 퍼셉트론 신경망 학습 기능을 이용하였다 [4].

## 3. 유한요소 모델링 및 신경망의 적용

### 3.1 유한요소 모델링

유한요소 해석에 사용된 재료는 AISI 1045강이며, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 953.37 \bar{\epsilon}^{0.14} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

해석에 사용된 금형의 형상과 제품의 형상은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 긴 변의 다이 반각을  $\alpha_1$ , 짧은 변의 다이 반각을  $\alpha_2$ 로 하였으며, 직사각형의 긴 변과 짧은 변의 비를 직사각형 비 ( $b/a$ )로 정의하였고, 본 연구에서는 원형봉에서 직사각형 비가 1.0인 정사각재 인발 공정과 원형봉에서 직사각형 비가 1.5인 직사각재 인발 공정에 대하여 조사하였다.

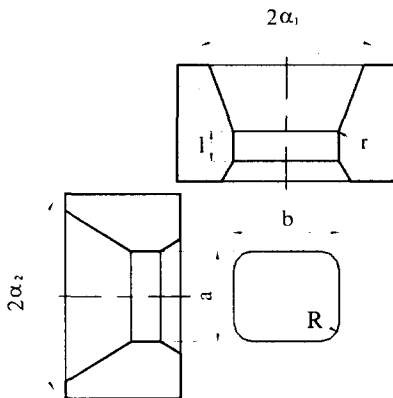


Fig. 1 The exit cross-sectional shape of the die for simulation

해석에 사용된 금형의 출구 형상은 정사각재 인발 공정에 대해서는  $a=b=1.40\text{mm}$ 이며,  $R=0.3\text{mm}$ 로 하였고, 직사각재 인발 공정에 대해서  $a=1.14\text{mm}$ ,  $b=1.72\text{mm}$ 이며,  $R=0.3\text{mm}$ 로 설정하였다. 일반적으로 직사각형 인발 금형을 제작할 때 짧은 변의 다이 반각  $\alpha_2$ 보다 긴 변의 다이 반각  $\alpha_1$ 이 작거나 같도록 설계하므로 본 연구에서는 직사각재 인발에 대해서 긴 변과 짧은 변의 다이 반각을  $5^\circ \leq \alpha_1 \leq 15^\circ$  와  $5^\circ \leq \alpha_2 \leq 20^\circ$  범위로 고려하였다. 하지만 정사각재 인발과 같이 정사각재 인발 공정의 경우  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 원형봉에서 원형봉 인발과 같이 일반적으로 동일한 값으로 된다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 사용되고 있는 범위인  $5^\circ \leq \alpha_1 = \alpha_2 \leq 25^\circ$  범위에서 고려하였다. 단면적 감소율 또한 현장에서 사용되고 있는 범위에서 선택하였으며, 직사각형 비 1.5인 직사각재 인발 공정에 대해서는 30%, 40%를 고려하였으며, 직사각형 비 1.0인 정사각재 인발 공정에 대해서 각각 20%, 25%로 해석을 수행하였다. 공정조건을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Drawing process conditions of rectangular section for simulation

Friction factor m	Die exit corner radius R (mm)	Die radius r (mm)	Bearing length l (mm)
0.1	0.3	0.25	0.6

### 3.2 신경망을 이용한 미충만 출구 면적 예측

직사각형 비 1.5에 대해서는 고려된 다이 반각 범위에서 등간격으로  $\alpha_1$ 은 3등분  $\alpha_2$ 는 4등분하였으며, 각각의  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 를 조합한  $12(3 \times 4=12)$ 번의 유한요소 해석을 각각의 단면적 감소율에 대해 수행하였으며, 직사각형비 1.0에 대해서는 다이 반각을 고려된 범위에서 5등분으로 나누어 각각의 단면적 감소율에 대해 5번의 해석을 수행하였다.

## 4. 해석 결과 및 고찰

접촉한 절점의 절점력이 인장인 경우 그 절점을 자유 절점으로 처리하였다. 인발시 금형 출구부의 소재의 절점은 항상 인장력을 받게되어 금형으로부터 떨어져 자유 절점이 된다. 그러므로 유한요소 해석결과는 언제나 양인 미충만 출구 면적을 가지

게 된다. 본 연구에서는 신경망 적용 시 유한요소 모델링 오차를 고려하여 미충만 출구 면적의 한계값을  $0.01\text{mm}^2(0.53\%)$ 로 설정하였으며, 따라서 미충만 출구 면적이  $0.01\text{mm}^2(0.53\%)$ 이하에서는 완전한 코너 채움이 이루어진다고 가정하였다.

#### 4.1 직사각형 비 1.5인 직사각재 인발공정

직사각형 비가 1.5인 경우, 단면적 감소율에 따라서 완전한 코너 채움이 이루어지는 적절한 다이 반각의 조합이 존재하였으며, 단면적 감소율 30%일 경우, 완전한 코너채움이 발생하는 다이 반각  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 의 범위는  $8^\circ \leq \alpha_1 < 14^\circ$  와  $7^\circ < \alpha_2 < 13^\circ$ 로 나타났고, 이 때 최적의 다이 반각 조합은  $\alpha_1=10^\circ$  와  $\alpha_2=10^\circ$  이다. 최적의 다이 반각 조합에 의해 유한요소 해석을 수행하였으며, 그 결과 검증값과 신경망 결과값은 각각 0.47%와 0.47%로 잘 일치하였다.

단면적 감소율 40%의 경우, 미충만 출구 면적을 최소로 하는 완전한 코너 채움이 이루어지는 다이 반각 범위는  $6^\circ \leq \alpha_1 \leq 9^\circ$ ,  $13^\circ \leq \alpha_2 \leq 15^\circ$ 이며, 최적의 다이 반각 조합은  $\alpha_1=8^\circ$ ,  $9^\circ$  와  $\alpha_2=15^\circ$  이다. 최적의 다이 반각 조합에 대해 유한요소 해석을 수행하였으며, 검증값과 신경망 결과값이 각각 0.49%와 0.51%로 미소한 차이를 보이나 두 경우 모두 완전한 코너 채움이 발생하였다.

직사각형 비 1.5에 대해 각각의 단면적 감소율에 대해 살펴보면, 단면적 감소율 30%일 경우 각각의 다이 반각이 최적의 범위에서 서로 같거나,  $1^\circ \sim 2^\circ$  정도 차이가 날 때 코너 채움이 잘 이루어짐을 알 수 있고, 단면적 감소율이 40%일 경우  $\alpha_1$ 이  $\alpha_2$ 보다 작은 편이 코너 채움이 잘 이루어지는 경향이 있으나, 너무 큰 차이는 오히려 미충만 출구 면적이 증가하였고, 또한 단면적 감소율이 작더라도 다이 반각의 조합을 적절히 선택함에 따라 재료가 금형 내부로 잘 채워졌다.

#### 4.2 직사각형 비 1.0인 정사각재 인발공정

단면적 감소율 20%의 경우 고려된 다이 반각 범위( $4^\circ \leq \alpha_1 = \alpha_2 \leq 26^\circ$ )내에서 완전한 코너 채움이 발생하는 범위는 존재하지 않고, 미충만 출구 면적이 최소가 되는 다이 반각은  $\alpha_1 = \alpha_2 = 15^\circ$ 였으며, 이 때의 미충만 출구 면적은  $0.012\text{mm}^2(0.64\%)$ 이었다.

단면적 감소율 25%에 대해 완전한 코너 채움이

발생하는 범위는  $6^\circ \leq \alpha_1 = \alpha_2 \leq 16^\circ$ 였으며, 미충만 출구 면적이 최소가 되는 다이 반각은  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ 이며, 미충만 출구 면적은  $0.004\text{mm}^2(0.21\%)$ 이었다.

단면적 감소율에 대해서 살펴보면, 단면적 감소율이 20%일 경우 고려된 다이 반각 범위, 즉,  $4^\circ \leq \alpha_1 = \alpha_2 \leq 26^\circ$  내에 코너가 완전히 채워지는 범위가 존재하지 않았다. 하지만 단면적 감소율이 25%로 증가함에 따라 완전한 코너 채움이 발생하는 범위가 존재함을 알 수 있다. 따라서 직사각형 비 1.0인 정사각재 인발의 경우 단면적 감소율이 증가함에 따라 코너 채움이 잘 이루어진다는 것을 알 수 있다.

## 5. 실험 및 고찰

### 5.1 실험 조건 및 금형 형상

본 연구의 결과를 실제 연결핀으로 사용되고 있는 제품의 인발 공정에 적용하여 보았다.

실험에 사용된 소재는 해석에 사용된 소재와 같은 재료인 AISI 1045 강이며, 직사각형 비 1.0과 직사각형 비 1.5를 갖는 사각재 인발 공정에 관한 실험을 수행하였다. 해석에 사용된 금형 형상을 Fig.2에 나타내었다.

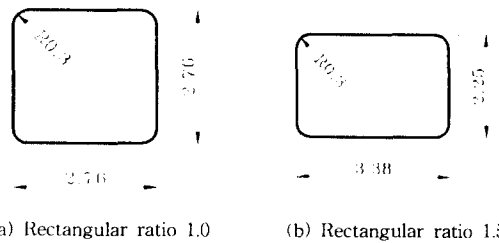


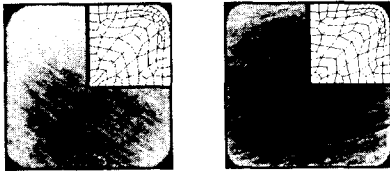
Fig. 2 The exit cross-sectional shape of the die for experiment

모든 직사각형 비에 대해 단면적 감소율 30%와 40%를 고려하였으며, 다이 반각의 경우 직사각형 비가 1.0일 경우  $\alpha_1 = \alpha_2 = 15^\circ$ 를 고려하였으며, 직사각형 비 1.5일 경우, 단면적 감소율 30%와 40%에 대해  $\alpha_1=10^\circ$ ,  $\alpha_2=10^\circ$  와  $\alpha_1=8^\circ$ ,  $\alpha_2=15^\circ$ 로 고려하였다.

### 5.2 실험 결과 및 고찰

원형봉에서 직사각형 비 1.0인 정사각재 인발 공정의 실험 및 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 단면적 감소율 30%, 다이 반각이 각각

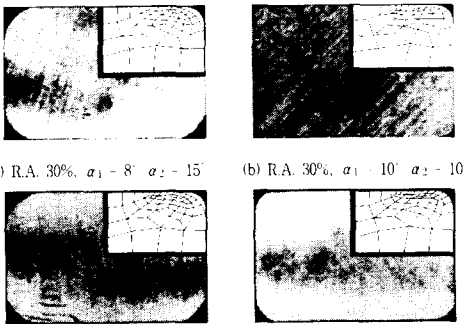
$\alpha_1 = \alpha_2 = 15^\circ$  일 경우의 결과로 코너부가 채워지지 않았음을 알 수 있다. 단면적 감소율 40%, 다이 반각  $\alpha_1 = \alpha_2 = 15^\circ$  일 경우의 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었으며, 단면적 감소율 30%일 때와는 달리 재료가 코너부로 채워졌음을 알 수 있다. Fig.3에서 직사각형 비 1.0, 즉 원형봉에서 정사각재 인발 공정인 경우 단면적 감소율이 30%에서 40%로 증가함에 따라 코너채움이 잘 이루어짐을 알 수 있다.



(a) R.A. 30%,  $\alpha = 15^\circ$       (b) R.A. 40%,  $\alpha = 15^\circ$

**Fig. 3 Intermediate cross-sectional shape for shaped drawing process with the rectangular ratio 1.0**

원형봉에서 직사각형 비 1.5인 직사각재 인발 공정에 대한 실험 및 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a),(b)에서 단면적 감소율이 30%일 경우, 유한요소 해석결과에서 단면적 감소율 30%에 대한 최적의 다이 반각 조합인  $\alpha_1 = 10^\circ$ ,  $\alpha_2 = 10^\circ$  일 경우가 유한요소 해석 결과로부터 단면적 감소율 40%에서의 최적의 다이 반각 조합인  $\alpha_1 = 8^\circ$ ,  $\alpha_2 = 15^\circ$  일 경우보다 코너부가 더 잘 채워졌음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(c), (d)에서 단면적 감소율이 40%일 경우는 단면적 감소율 30%와는 달리 다이 반각 조합이  $\alpha_1 = 8^\circ$ ,  $\alpha_2 = 15^\circ$  일 경우, 코너가 잘 채워짐을 알 수 있다.



(a) R.A. 30%,  $\alpha_1 = 8^\circ$   $\alpha_2 = 15^\circ$       (b) R.A. 30%,  $\alpha_1 = 10^\circ$   $\alpha_2 = 10^\circ$   
(c) R.A. 40%,  $\alpha_1 = 10^\circ$   $\alpha_2 = 15^\circ$       (d) R.A. 40%,  $\alpha_1 = 8^\circ$   $\alpha_2 = 15^\circ$

**Fig. 4 Intermediate cross-sectional shape for shaped drawing process with the rectangular ratio 1.5**

## 6. 결론

원형봉에서 직사각형 비가 1.0인 정사각재 인발 공정 및 직사각형 비가 1.5인 직사각재 인발 공정에 대해 단면적 감소율과 다이 반각이 재료의 금형 내부로의 코너 채움에 미치는 영향을 조사하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 유한요소 해석 회수를 줄이기 위하여 신경망을 도입하였다. 또한 본 연구의 결과를 실제 제품의 인발 공정에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 직사각형 비가 1.5인 직사각재와 같은 비정다각재 인발 공정의 경우 다이 반각의 조합이 재료의 금형 내부로의 코너 채움에 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 직사각형 비가 1.0인 정사각재와 같은 정다각재 인발 공정에 있어서 재료의 금형 내부로의 코너 채움을 조절할 수 있는 주 공정변수는 단면적 감소율임을 알 수 있었다.
- (3) 이상의 결과를 바탕으로 실제 제품의 인발 공정에 적용하였으며, 본 연구의 결과가 타당함을 알 수 있다.

## 7. 참고 문헌

- [1] B.B. Basily and D.H. Sansome, "Some Theoretical Consideration for the Direct Drawing of Section Rod from Round Bar", Int. J. Mech. Sci., Vol. 18, pp. 201-208, 1976
- [2] Kazunari Yoshida, Shiro Yamada, Seiichiro Suzuki, Kazuhiro Maeda, "Mechanics of Deformation in Round-to-Hexagon Drawing by FEM", 第45回塑性加工連合講演會, pp.161-164, 1994
- [3] 김호창, 김용철, 최영, 김병민, "강소성 유한요소법을 이용한 원형봉에서 정사각재 인발공정에 관한 연구", 정밀공학회, 제 15권 제 11호, pp.145-151, 1998
- [4] D.H. Kim, D.C. Ko, B.M. Kim, "Application of neural network and Taguchi method to preform design in metal forming considering workability", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, Issue 5, pp.771-785, May 1999