

## 이형인발공정 하중예측에 관한 연구

이태규<sup>1</sup> · 이찬주<sup>1</sup> · 이상근<sup>2</sup> · 김병민<sup>#</sup>

### Prediction of Drawing Load in the Shape Drawing Process

T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim

(Received March 23, 2009)

#### Abstract

The prediction of drawing load is very important in the drawing process. However, it is not easy to calculate the drawing load for the shape drawing process through a theoretical model because of a complex arbitrary final cross section shape. The purpose of this study is to predict drawing load in shape drawing process. The cross section of product is divided with small angle as much as similar with fan-shape. The drawing load of each section was calculated by theoretical model of round to round drawing process. And the shape drawing load was determined by summation of drawing load of each section. The effectiveness of the proposed method was verified through the FE analysis and shape drawing experiment. It had a good agreement between proposed method, FE analysis and experiment within about 3% errors.

**Key Words** : Shape Drawing, Drawing Load, Cross Sectional Method, FE Analysis

#### 1. 서 론

인발공정은 다이를 통과시킨 소재를 잡아 당겨 원하는 단면형상을 가진 길이가 긴 제품을 생산하는 대표적인 냉간 소성가공공정이다. 단면형상이 복잡한 이형인발 제품의 경우 최근 자동차, 반도체, 로봇, 정밀 측정기기 등 모든 산업분야에 활발하게 이용되고 있다[1~2].

인발공정에 대한 이론 해석은 지금까지 많이 수행되어 왔다[3~5]. 인발하중은 인발응력, 소재의 넥킹 및 파단, 최적 인발조건 등을 설정하기 위해 필요한 매우 중요한 정보이다[6]. 인발하중 계산을 위한 많은 연구들이 수행되었으며, 특히 축대칭 인발공정의 경우 다양한 모델들이 제시되었다. Avitzur 는 상계법을 이용하여 인발공정의 하중을 예측하였으며[1], Lange 는 슬래브법을 이용하여 인

발공정의 하중을 예측하였다[6]. 축대칭 인발공정에 비해 단면 형상이 복잡한 이형인발 공정의 경우 Parkash 등이 정다각형단면 형상의 인발에 대한 상계해를 유도하였다[7]. Basily 등은 원형봉에서 정다각형 단면형상의 인발공정에 대해 상·하계해를 이용하여 최적의 금형형상을 제시하였다[8]. 그러나 이형인발공정 하중계산의 경우 계산식이 매우 복잡할 뿐만 아니라 하중계산을 위해서는 수치해석 등이 함께 적용되어야만 한다[7]. 최근에는 유한요소법을 이용한 성형해석이 많이 활용되고 있으나, 해석시간 등의 문제로 인하여 실제 현장에서는 쉽게 적용하지 못하고 있다. 본 연구에서는 축대칭 인발공정하중 예측모델을 이용하여 단면형상이 복잡한 이형인발공정 하중을 쉽게 예측할 수 있는 방법을 제안하였다. 이형인발공정에 대하여 단면형상을 분할하여 각 분할된

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템전공

2. 부산대-IFAM 국제공동연구소

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부,

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

단면에 대하여 축대칭 인발공정 하중예측모델을 적용함으로써 이형인발공정 하중을 예측하는 방법(이후 “단면요소분할법”이라 함)이다. 본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 Geleji[9]가 제안한 축대칭 인발공정하중 예측모델을 적용하여 두 가지 이형인발공정에 대한 인발하중을 평가하였으며, 동일한 조건에 대한 유한요소해석 결과와 이형인발 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

## 2. 단면요소분할법

본 연구에서는 이형인발공정의 단면을 유한개의 요소로 나누어 각 요소에 대하여 축대칭 하중예측 모델을 적용함으로써 이형인발하중을 간단하게 예측할 수 있는 방법을 제안하였다. Fig. 1에서 보듯이 임의의 초기소재 단면의 도심을 중심으로, 초기단면 및 인발 후 단면을 유한개의 요소로 나눈다.

Fig. 1의 나누어진 미소 요소 ①에 대하여 중심  $O$ 에서 초기소재의 외곽선  $ab$ 까지의 평균거리를 반경  $R_{(i,l)}$ , 인발 후 소재의 외곽선  $cd$ 의 평균반경을  $R_{(o,l)}$ 라고 하면 초기 소재반경이  $R_{(i,l)}$ 이고 최종제품의 반경이  $R_{(o,l)}$ 인 축대칭 인발로 가정할 수 있다. 각 단면분할요소에 대하여 축대칭 하중예측모델을 적용하여 각 요소에 대한 인발하중을 계산한 후 모두 더하여 전체 이형인발 하중을 계산한다.

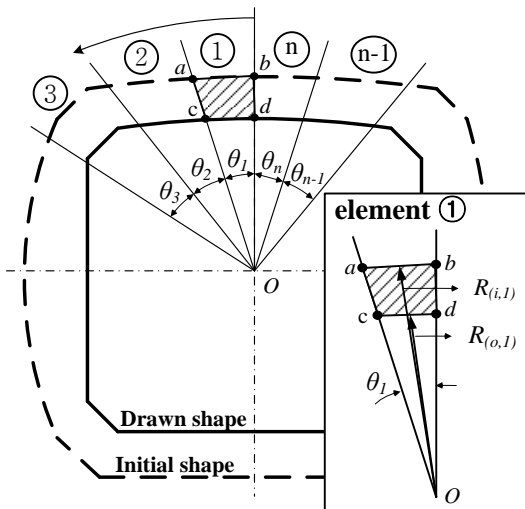


Fig. 1 Division of cross section

## 3. 하중예측모델

### 3.1 인발하중 예측모델

현재까지 다양한 축대칭인발하중 예측모델이 제시되었다. 본 연구에서는 하중예측식 중 하나인 Geleji[9]의 축대칭 인발하중 예측모델을 단면요소분할법에 적용하였다. Geleji는 소재의 이상변형에 필요한 힘, 소재와 다이 접촉면의 마찰극복력, 그리고 내부마찰극복력을 고려하여 축대칭인발하중을 계산하였다.

Geleji 식을 이용한 분할된 요소  $i$ 에 대한 인발하중은 식(1)로 계산된다.

$$Z_i = k_{m,i}(F_i + Q_i \cdot \mu_i) + 0.77 \cdot k_{fm} \cdot f_{2,i} \cdot \alpha_i \quad (1)$$

여기서  $Z_i$ 는 인발하중,  $k_{m,i}$ 는 재료의 평균변형저항,  $k_{fm}$ 은 재료의 평균변형강도,  $F_i$ 는 다이 입구부와 출구부의 단면적 차이,  $Q_i$ 는 소재와 다이 접촉면 길이,  $\mu_i$ 는 다이와 소재 사이의 마찰계수,  $f_{2,i}$ 는 다이 출구부 단면적,  $\alpha_i$ 는 다이반각이다.

Fig. 2에 임의의  $i$ 번째 단면의 요소형상을 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이  $i$ 번째 단면요소의 축대칭 모델에 대한 초기소재의 평균반경( $R_{(i,i)}$ )과 인발된 소재의 평균반경( $R_{(o,i)}$ )은 중심으로부터 두 점까지의 거리를 이용하여 다음의 식(2)로 계산된다.

$$R_{i,i} = \frac{\overline{OP_{i,i}} + \overline{OP_{i,i+1}}}{2}$$

$$R_{o,i} = \frac{\overline{O'P_{o,i}} + \overline{O'P_{o,i+1}}}{2} \quad (2)$$

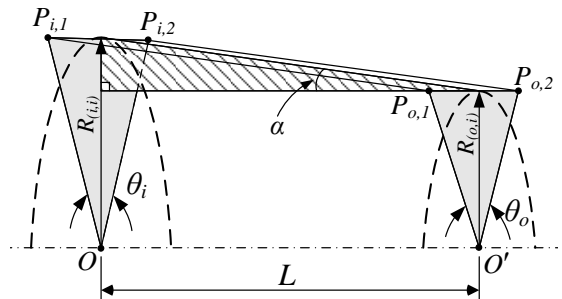


Fig. 2 Considering the (i)th section

여기서  $R_{i,i}$  는  $i$  번째 요소의 초기소재 반경,  $R_{o,i}$ 는  $i$  번째 요소의 인발 후 반경을 나타낸다.

식(2)에 의한  $i$  번째 요소에 대한 축대칭 모델의 다이반각은 다음의 식(3)으로 계산된다.

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left( \frac{R_{i,i} - R_{o,i}}{L} \right) \quad (3)$$

축대칭 모델의 입구부 소재의 면적 및 출구부 소재의 면적은 식(4)로 나타내어진다.

$$f_{i,i} = \frac{1}{2} R_{i,i}^2 \theta_{i,i} \quad f_{o,i} = \frac{1}{2} R_{o,i}^2 \theta_{o,i} \quad (4)$$

따라서, 출구부와 입구부의 단면적 차이는 식(5)와 같이 계산된다.

$$F_i = f_{i,i} - f_{o,i} \quad (5)$$

또한,  $i$  번째 요소의 소재와 다이 사이의 마찰면적은 식(6)과 같이 나타내어진다.

$$Q_i = \frac{F_i}{\sin \alpha_i} \quad (6)$$

마지막으로, 각 요소에 대하여 계산한 인발하중을 모두 합하면 식(7)과 같이 전체 이형인발 공정에 대한 하중( $Z_{total}$ )을 계산할 수 있다.

$$Z_{total} = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (7)$$

이상의 방법으로 축대칭 인발공정 하중예측 모델을 이용하여 비축대칭인 이형인발공정에 대한 인발하중을 간단하게 구할 수 있다.

### 3.2 마찰면적 계산

위의 방법을 그대로 실제 다이에 적용하기에는 문제가 있다. Fig. 3 과 같이 실제 이형인발공정의 경우 다이와 소재가 하나의 평면이 아닌 다양한 위치에서 접촉이 시작된다. 따라서, 분할된 요소마다 다이와 소재의 접촉면적은 달라지며, 하중계산시 이를 고려해야만 한다.

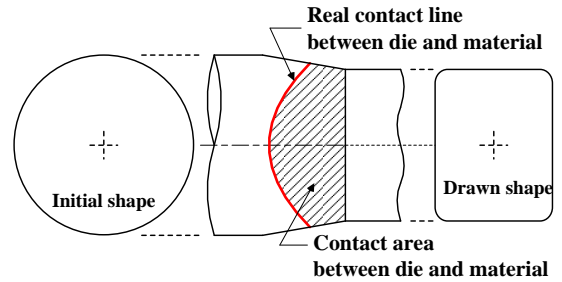


Fig. 3 Contact line between die and material

$i$  번째 요소의 접촉점  $R_i$  는 초기소재 직경과 같고,  $i$  번째 분할단면에 대한 다이반각  $\alpha_i$  는 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left( \frac{H - R_{o,i}}{L} \right) \quad (8)$$

따라서, 다이반각으로부터 계산되는 접촉길이  $L_{c,i}$  는 다음의 식(9)와 같다.

$$L_{c,i} = \frac{R_{i,i} - R_{o,i}}{\tan \alpha_i} \quad (9)$$

따라서,  $i$  번째 미소요소와 다이의 실접촉면적  $A_i$  는 다음의 식(10)으로 계산된다.

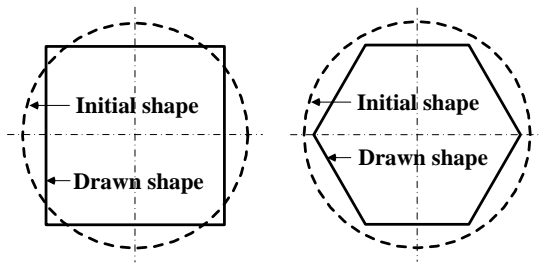
$$\begin{aligned} A_i &= \frac{\beta_i}{2} \left( \frac{L_{c,i}}{\cos \alpha_i} \right)^2 \left( \frac{R_{i,i} + R_{o,i}}{R_{i,i} - R_{o,i}} \right) \\ &= \left( \frac{L_{c,i}(R_{i,i} + R_{o,i})}{2 \cos \alpha_i} \right) \cdot \theta_i \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $\beta_i$  는 미소요소의 접촉곡면을 평면으로 펼쳤을 때의 중심각이다.

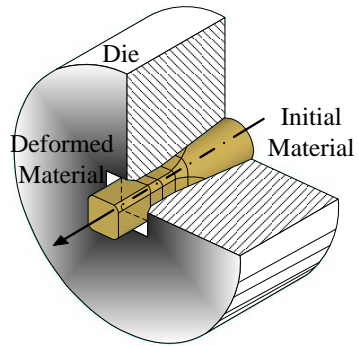
## 4. 이형인발공정 하중계산

### 4.1 이형인발공정 하중계산

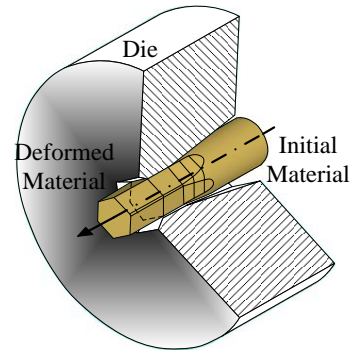
이형인발공정 하중계산을 위해 본 연구에서 제안한 단면요소분할법의 타당성을 검증하기 위하여 사각 및 육각단면 이형인발공정 하중을 계산하여, 유한요소해석결과 및 이형인발실험결과와 비교하였다. Fig. 4 에 적용한 두 단면형상을 나타내었다.



(a) Square (b) Hexagon  
Fig. 4 Applied shape drawing processes



(a) Square from round



(b) Hexagon from round

Fig. 5 Initial model and final shape of FE analysis

Condition	Value
Diameter(mm)	12.0
Die angle(°)	8.0
Friction factor(m)	0.1
Material	AISI 1020
Velocity(mm/sec)	100.0

Classification	Load(ton)
Round → square	2.32
Round → hexagon	3.11

초기소재 형상은 모두 원형으로 설정하였으며, 사각 및 육각단면 이형인발공정의 단면감소율은 각각 20%, 30%이다.

하중예측식과 성형해석 및 인발실험 조건은 모두 동일하며, Table 1 에 이형인발 공정조건을 나타내었다.

적용된 소재는 AISI 1020 이며, 인장시험을 통해 확보한 소재의 유효응력-변형률 곡선은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 942.53 \cdot \bar{\epsilon}^{-0.23} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

마찰상수는 실제 이형인발공정에서 쓰이고 있는 인산염 피막제의 윤활마찰실험에 의해 얻어진 Data Base 값을 사용하였다.

본 연구에서는 사각 및 육각단면 이형인발 모두 중심각이 50 인 72 개의 요소로 분할하여 단면요소분할법을 적용하였다.

Table 2 에 각 이형인발공정에 대하여 단면요

Table 3 Drawing load of FE analysis

Classification	Load(ton)
Round→square	2.45
Round→hexagon	3.10

소분할법으로 계산한 이형인발하중을 나타내었다.

#### 4.2 이형인발공정 유한요소해석

본 연구에서 제안한 단면요소분할법을 이용한 이형인발하중 계산방법의 타당성을 검증하기 위해 이형인발공정에 대한 유한요소해석을 수행하여 이형인발하중을 비교하였다. 유한요소해석은 상용유한요소해석 S/W 인 DEFORM-3D 를 이용하였으며, Fig. 5 에 두 이형인발공정에 대한 해석 모델을 나타내었다.

Table 2 에 유한요소해석에 의한 이형인발하중을 나타내었다.

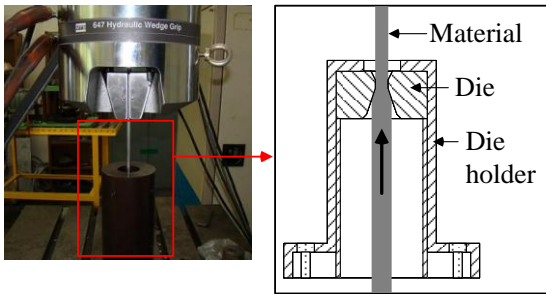


Fig. 6 Equipment for drawing experiment

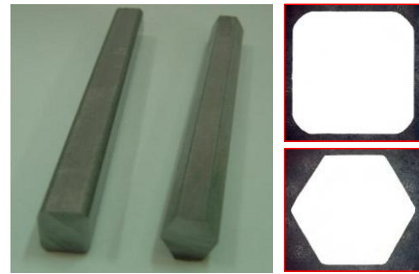
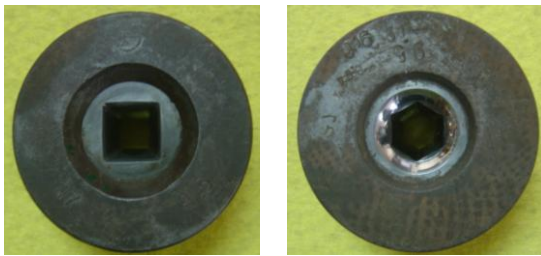


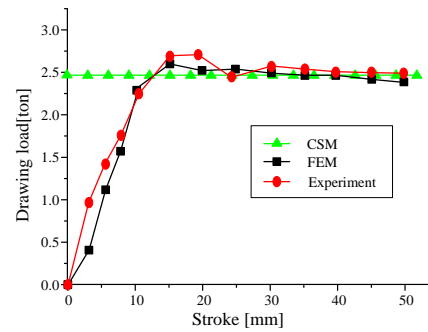
Fig. 8 Section of products



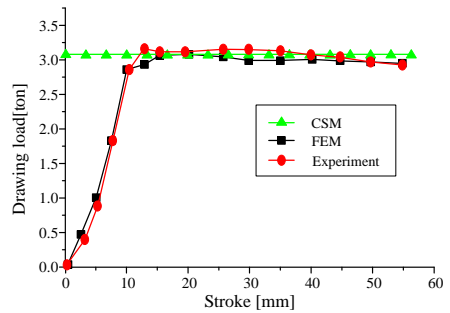
(a) Square die

(b) Hexagon die

Fig. 7 Shape drawing dies



(a) Square from round



(b) Hexagon from round

Fig. 9 Drawing load

## 5. 이형인발실험

### 5.1 실험조건

본 연구에서 제시한 단면요소분할법 계산에 대한 성형해석결과를 검증하기 위해 이형인발실험을 수행하였다. 인발시험은 다이를 고정시키기 위한 치구를 제작하여 MTS(25 ton)를 이용하여 수행하였다. Fig. 6에 실험장치와 방법을 나타내었다. 실험은 하중예측식 및 유한요소해석과 동일한 조건으로 소재의 직경은 12.0mm 이고 MTS의 기계특성상 길이는 700.0mm로 제한하여 설정하였다.

소재와 다이는 현장에서 직접 생산하고 있는 것으로 확보하여 사용하였고, 감겨져있는 Wire Rod에서 롤 교정에 의해 진직도를 확보했다. 그 다음 소재의 한쪽 끝부분을 다이를 통과하여 MTS 지그가 충분히 물릴 수 있도록 Pointing 작업을 수행하였다.

마지막으로 소재표면을 깨끗하게 하기 위해 Shot blast 처리와 부식성 물질로부터 소재를 보호하기 위해 Salt coating 처리를 하였다.

소재가 다이를 지나 실험 제품이 나오는 방향은 위쪽이며, MTS의 속도는 100mm/s로 설정하였

다. 윤활제는 실제 현장에서 쓰는 인산염 피막제를 사용하였으며, 소재의 길에 적절한 양으로 도포한 뒤 최종적으로 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 실험에 사용된 이형인발 다이를 나타내었다.

### 5.2 실험결과

Fig. 8에 인발실험을 통해 인발된 제품 및 단면형상을 나타내었다. Fig. 9와 Table 3에 단면요소분할법, 유한요소해석 및 인발실험으로 평가한 인발하중을 비교하여 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있

**Table 4 Comparison of drawing loads**

Classification	Drawing Load(ton)		
	CSM	FEA	Experiment
Round → square	2.41	2.45	2.47
Round → hexagon	3.11	3.1	3.09

듯이 육각형상의 경우 세 하중이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 사각형상의 경우 인발초기 단계에서 하중차이가 다소 크며, 이는 단면요소분할법의 경우 인발초기단계에서 초기 원형소재가 다이 모서리부분을 채우는 과정을 고려하지 못하기 때문이다. 그러나, 소재가 다이를 완전히 통과한 이후에는 하중이 잘 일치함을 알 수 있다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 이형인발공정의 인발하중을 간단하게 예측할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서는 축대칭 인발하중 예측모델을 이용하여 이형인발하중을 간단하게 예측할 수 있는 단면요소분할법을 제시하였다. 단면요소분할법은 단면형상이 복잡한 이형인발공정 시 단면을 유한개의 미소요소로 나누어 각 요소에 대하여 축대칭 인발하중 모델을 적용하여 이형인발하중을 평가하는 방법이다.

(2) 단면요소분할법을 이용하여 사각단면과 육각단면 이형인발공정에 대한 인발하중을 평가하였다. Geleji 가 제안한 축대칭 인발하중 예측모델을 적용하였으며, 유한요소해석을 수행하여 예측한 인발하중과 비교하였다. 그 결과 두 인발하중이 잘 일치하였다.

(3) 사각 및 육각단면 이형인발실험을 수행하여 그 타당성을 검증하였다. 이형인발실험결과 본 연구에서 제안한 단면요소분할법으로 예측한 인발하중과 실험결과가 잘 일치하였으며, 향후 보다 다양한 이형인발공정에 적용하여 단면요소분할법의 유용성을 검증할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업 및 교육과학기술부의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. K20601000004-08E0100-00410).

### 참 고 문 헌

- [1] M. Kobayashi, 1998, The Present Situation of Cold Drawn Special Section(in Japan), J, JSTP, Vol. 39, No.447, pp. 335~337.
- [2] J. E. Lee, T. K. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2008, Transactions of Materials Processing, Vol. 17, No.8, pp. 627~632.
- [3] B. Avitzur, 1968, Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill Book Company, New York.
- [4] G. Sachs, 1927, On the Theory of the Drawing Process(in German), Z. angew. Math. U. Mech., 7, pp. 235~236.
- [5] E. Siebel, 1932, Metal Forming in Plastic Condition (in German), Düsseldorf, Verlag Stahleisen.
- [6] K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill company.
- [7] R. Parkash, Q. M. Khan, 1979, An analysis of plastic flow through polygonal converging dies with generalized boundaries of the zone of plastic deformation, Int. J. Mach. Tool des. Res. Vol. 19, pp. 1~19.
- [8] B. B. Basily, D. H. Sansome, 1976, Some theoretical Considerations for the direct drawing of section rod from round bar, Int. J. mech. Sci. Vol. 18, pp. 201~209.
- [9] A. Geleji, 1967, Shaping of Metals(in German), Berlin, Akademie Verlag.