

인발응력을 고려한 다단 형상인발 공정설계

김성민¹ · 이상곤² · 이찬주¹ · 김병민[#] · 정명식² · 이선봉³

Process Design of Multi-pass Shape Drawing Considering the Drawing Stress

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

(Received May 21, 2012 / Revised June 13, 2012 / Accepted June 20, 2012)

Abstract

In this study, a process design method for the multi-pass shape drawing is proposed with consideration of the drawing stress. First, the shape drawing load was calculated to evaluate the shape drawing stress, and the intermediate die shape was determined by using an electric field analysis and the average reduction ratio. In order to evaluate whether material yielding occurs at the die exit, the drawing stress was determined by using the calculated shape drawing load. Finally, FE-analysis and shape drawing experiments were conducted to validate the design of the multi-pass shape drawing process. From the results of the FE-analysis and shape drawing experiments, it was possible to produce a sound shape drawn product with the designed process. The dimensional tolerances of the product were within the allowable tolerances.

Key Words : Multi-pass Shape Drawing, Process Design, Drawing Load, Drawing Stress, Electric Field Analysis, FE-Analysis, Shape Drawing Experiment

1. 서 론

다단 형상인발공정은 단면형상이 일정한 길이가 긴 부품을 생산하기에 매우 적합한 성형공정이다[1]. Table 1에서 알 수 있듯이, 기존 기계가공에 비해 생산성이 높을 뿐만 아니라 가공경화에 의한 기계적 성질이 우수하며, 소재 손실을 최소화 할 수 있는 장점이 있다[2].

그러나, 형상인발공정의 경우 대부분 다단공정으로 이루어지며, 다이 형상설계를 포함한 공정설계가 상대적으로 어려운 단점이 있다. 현재까지 다단 형상인발 공정설계는 대부분 현장작업자의 노하우에 의존하고 있기 때문에 결함방지 및 신제품 개발 시 과도한 비용과 시간이 소요되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 보다 체계적인 공정설계방법이 필요하다.

본 연구에서는 다단 형상인발 공정설계 방법을 제안하였다. 전기장해석(EFA: Electric Field Analysis)과 평균단면감소율(average reduction ratio)을 이용하여 중간 패스 다이의 단면형상을 설계하였다. 또한, 축대칭 인발하중 예측모델을 이용하여 형상인발공정 하중을 계산하였다. 계산된 하중을 이용하

Table 1 Comparison of manufacturing processes

Machining process	Shape drawing process
Low productivity	High productivity
Excessive material loss	Minimum material loss
Poor material properties	Good material properties

1. 부산대 대학원 정밀가공시스템 전공
2. 한국생산기술연구원 녹색전환기술센터
3. 계명대 기계자동차공학부
교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

여 다이 출구부에서 소재의 응력을 계산하고, 이를 소재 변형저항과 비교하여 인발 가능성을 평가하였다. 본 설계방법을 가이드 레일 형상인발 공정설계에 적용하였으며, 성형해석 및 형상인발 실험을 통해 설계된 공정의 타당성을 검증하였다.

2. 형상인발 공정설계

2.1 형상인발 하중 예측

형상인발 시 다이를 빠져나온 소재에 발생하는 응력이 소재의 변형저항을 초과하면 인발된 소재에 소성변형이 발생하여 제품의 치수정도가 저하된다. 본 연구에서는 인발된 소재에 발생하는 응력을 평가하기 위하여 먼저 형상인발하중을 평가하였다. 인발하중은 단면요소분할법을 이용하여 계산하였다[3].

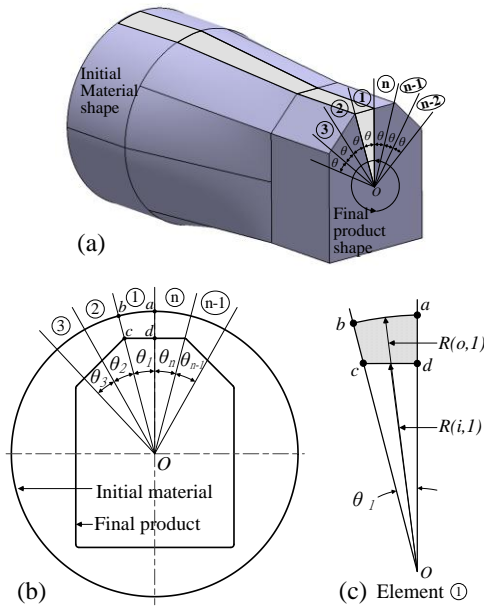


Fig. 1 Divided drawing material

Fig. 1 은 형상인발하중을 계산하기 위한 개략도이다. Fig. 1(a), (b)에서 보듯이 형상인발 공정을 중심각이 매우 작은 미소한 n 개의 요소로 단면을 분할한다. Fig. 1(c)는 분할된 미소요소 ①을 나타낸 것이다. Fig. 1(c)에서 보듯이 미소요소를 초기 반경이 $R(o,1)$ 이고, 인발 후 반경이 $R(i,1)$ 인 축대칭 인발공정으로 가정하면, 미소요소 ①의 인발하중은 전체 축대칭 모델(중심각: 2π)에 비례하여 다음의 식(1)로 계산이 가능하다.

$$DF_{1,ele} = ADF_{a,1} / (\theta_1 / 2\pi) \quad (1)$$

여기서, $ADF_{a,i}$ 은 전체 축대칭 모델(중심각: 2π)에 대한 인발하중, θ_i 은 미소요소 ①의 중심각, 그리고 $DF_{1,ele}$ 는 미소요소 ①의 인발하중이다[6].

현재까지 다양한 축대칭 인발하중 계산모델들이 제안되었다. 본 연구에서는 ①번째 미소요소의 축대칭 인발하중 계산을 위해 아래 식(2)로 표현되는 A. Geleji 모델을 이용하였다[7].

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

여기서, $ADF_{a,i}$ 는 ①번째 미소요소에 상응하는 전체 축대칭 모델(중심각: 2π)에 대한 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, μ_i 는 다이와 소재 사이의 마찰계수, $f_{2,i}$ 는 다이 출구부 단면적, α_i 는 다이반각이다.

따라서, 전체 형상인발하중은 식(3)과 같이 식(1)로부터 계산된 미소요소에 대한 인발하중을 모두 더함으로써 계산할 수 있다.

$$SDF = \sum_{i=1}^n DF_{i,ele} \quad (3)$$

여기서, SDF 는 전체 형상인발하중, $DF_{i,ele}$ 는 ①번째 미소요소의 인발하중, 그리고 n 은 미소요소의 개수이다.

2.2 중간 패스 다이 단면형상 설계

다단 형상인발 공정설계 시 적합한 중간 패스 다이형상 설계는 매우 중요하다. 본 연구에서는 전기장 해석 시 발생하는 등전위면과 평균단면감소율을 적용하여 중간 패스 다이형상을 설계하였다[4, 5]. Fig. 2 에서 보듯이 두 도체에 서로 다른 전압이 걸리면 두 도체 사이에 서로 교차하지 않는 등전위선(Equivalent-potential line)이 생성된다. 생성된 등전위선은 두 도체형상이 고려된 중간형상을 나타내게 되며, 본 연구에서는 이들 중간형상을 이용하여 중간 패스 다이 단면형상을 설계하였다.

형상인발 시 초기 원형소재의 크기가 최종제품보다 작을 경우 제품 모서리부의 미충전 영역이 발생하기 때문에 전기장 해석을 위한 초기 원형

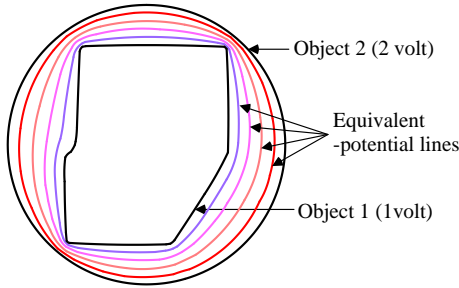


Fig. 2 Equivalent-potential line through EFA

소재의 직경은 최종제품의 최소외접원 크기보다 크게 설정하였다.

본 연구에서는 전기장해석으로 확보된 등전위선 중에서 평균단면감소율을 만족하는 등전위선 형상을 중간 패스 다이의 단면형상으로 선정하였다. 평균단면감소율은 아래의 식(4)로 계산된다.

$$R_{avg} = [1 - (A_f / A_o)^{1/m}] \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

여기서, R_{ave} 는 평균단면감소율, A_f 는 최종제품 단면적, A_o 는 초기소재 단면적, 그리고 m 은 총 패스 수를 나타낸다.

3. 형상인발 공정설계 적용

본 연구에서 제시한 형상인발 공정설계 방법의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 3의 겐츨리(gentry) 로봇 직선이송부에 적용되는 직선형 가이드 레일 제조를 위한 형상인발공정을 설계하였다.

Fig. 4는 가이드 레일의 단면형상 및 치수를 나타낸 것이다.

원형소재 형상인발 시 초기 소재 직경은 최종제품의 최소 외접원 직경보다 커야만 한다. 본 연구에서는 가이드 레일 단면의 최소 외접원 직경인 40.42mm를 고려하여 초기 소재는 직경 42.00mm인 상용소재를 적용하였다. 따라서, 총단면감소율은 36.4%이다.

인발하중 및 응력 계산을 위하여 우선 적용 소재인 58CrMoV4에 대한 인장시험을 실시하였다. 시험결과 확보된 유동응력식은 식(5)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 1068.5 \cdot \bar{\epsilon}^{0.180} \quad [MPa] \quad (5)$$

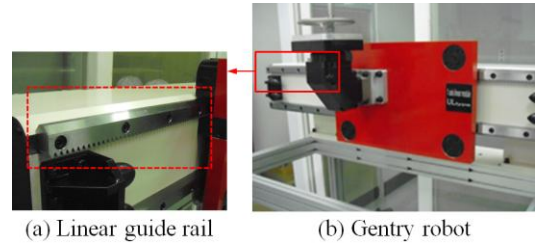


Fig. 3 Gentry robot and linear guide rail

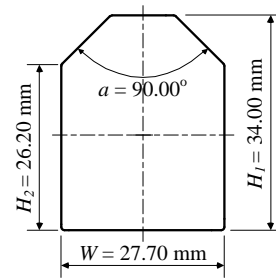


Fig. 4 Dimension of linear guide rail for gentry robot

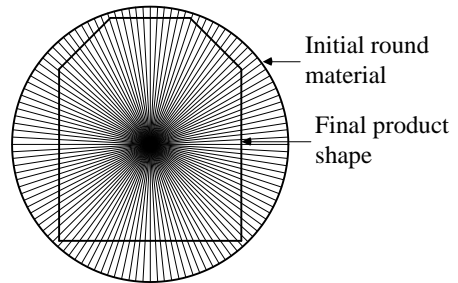


Fig. 5 Divided sections with 3° of central angle

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 중심각이 3°인 120개의 미소요소로 분할하여 인발하중을 계산하였다. 식(1)과 식(2)로 계산된 형상인발하중은 약 46.3ton이었다. 또한 각 미소요소의 인발응력은 110~1042MPa 사이의 값을 나타내었으며, 일부 요소의 인발응력은 형상인발 후 소재의 평균변형저항보다 높게 나타났다. 이는 다이 통과 후 인발된 소재에 소성변형이 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서, 1 패스 형상인발로는 직선형 가이드 레일 인발이 불가능함을 의미하며, 다단 형상인발공정이 적용되어야 한다.

본 연구에서는 2 패스 형상인발공정을 적용하기 위해 공정설계를 수행하였다. 2 패스 형상인발의 경우 1 패스의 다이 단면형상을 설계해야만 한다. 앞서 기술한 전기장해석과 식(4)의 평균단면감소

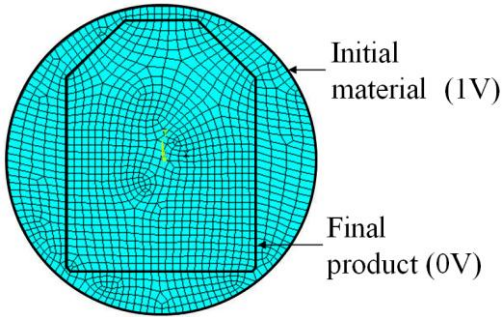
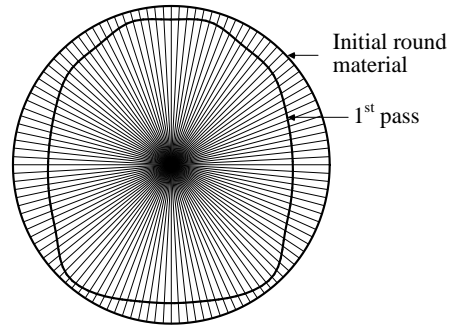
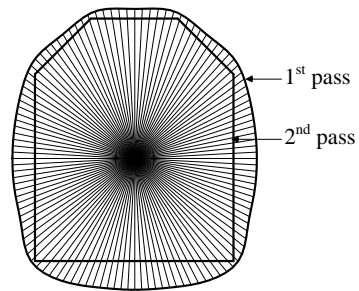


Fig. 6 Initial FE model for EFA



(a) 1st pass



(b) 2nd pass

Fig. 9 Divided section of 2pass drawing process

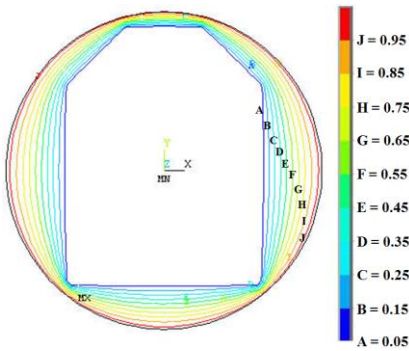


Fig. 7 Result of EFA

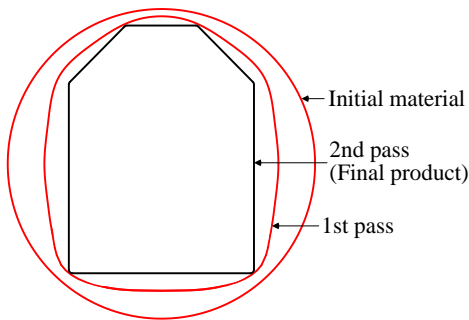


Fig. 8 Designed die shape

을 적용하여 1 패스 다이 단면형상을 설계하였다. 먼저, 전기장 해석을 위한 해석모델을 Fig. 6에 나타내었다. 전기장 해석은 ANSYS로 수행되었으며, 초기소재 및 최종제품에 각각 1V와 0V의 전압을 설정하였다.

Fig. 7에 전기장 해석결과 생성된 등전위선을 나타내었다. 초기소재와 최종제품 형상 사이에서 교차하지 않는 등전위선들이 생성됨을 알 수 있다. 뿐만 아니라 생성된 등전위선들은 초기소재와 최종제품 형상의 중간 형상들을 나타내고 있

음을 알 수 있다.

본 연구에서는 생성된 등전위선들 중에서 식(4)로 계산된 평균단면감소율을 만족하는 등전위선을 1 패스 다이의 단면형상으로 설계하였다.

식(4)로 계산된 평균단면감소율은 약 20.2%이며, 1 패스 다이 단면적은 1104.7mm^2 이다.

Fig. 8에 초기 소재, 최종제품(2 패스), 그리고 설계된 1 패스 다이 단면형상을 함께 나타내었다.

설계된 다이를 적용하여 Fig. 9와 같이 중심각 3° 로 나누어 각 패스에 대한 인발하중 및 인발응력을 평가하였다. 1 패스와 2 패스의 인발하중은 각각 40.0ton과 29.4ton으로 예측되었다. 미소요소의 인발응력 평가결과, 1 패스는 120~680MPa, 2 패스는 96~721MPa를 나타내었다. 이는 1 패스 및 2 패스 인발 후 소재 평균변형저항인 600~807MPa와 571~811MPa보다 낮기 때문에 인발 후 소재의 소성변형은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

4. 성형해석 및 형상인발 실험

4.1 성형해석

설계된 다단 형상인발공정에 대한 타당성을 검

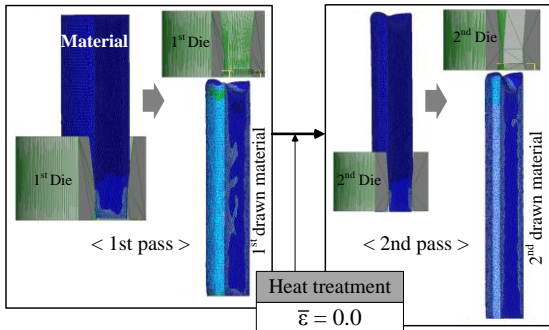


Fig.10 FE analysis model

증하기 위하여 성형해석을 수행하였다. 성형해석은 상용해석 프로그램인 DEFORM-3D로 수행되었다. 인발속도는 100mm/s, 소재와 다이 사이의 마찰계수(μ)는 0.06으로 설정하였다. Fig. 10에서 보듯이 성형해석은 제품의 대칭성을 고려하여 1/2 단면해석을 적용하였다. 또한, 1 패스 인발 후 소재의 성형성 확보를 위한 풀림 열처리를 고려하기 위하여, 1 패스 인발 후 소재의 유효변형률을 0으로 재설정 후 2 패스 인발해석을 수행하였다.

성형해석결과 1 패스와 2 패스의 인발하중은 각각 42.1ton과 31.0ton이었다.

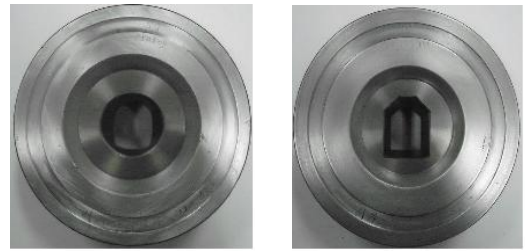
4.2 다단 형상인발 실험

마지막으로 공정설계방법과 성형해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 다단 형상인발 실험을 실시하였다. Fig. 11과 Fig. 12에 제작된 형상인발 다이와 사용된 인발기를 나타내었다.

실험 결과 각 패스의 인발하중은 41.5ton과 30.2ton이었다. Table 2에 인발하중을 비교하여 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 각 하중은 약 5% 이내의 차이를 보이며, 이는 이론식과 성형해석을 통해 예측된 인발하중이 실험결과와 잘 일치함을 보여주는 결과이다.

Fig. 13은 현장 실험 후 각 패스의 제품 단면형상을 나타낸 것이다. 단면형상은 각 패스의 다이 단면형상과 잘 일치하였다.

Fig. 14는 최종 인발된 제품을 나타낸 것이며, 최종제품에 대한 단면치수 측정결과는 Table 3에 나타내었다. 최종 제품의 치수공차 측정결과 모든 치수공차는 수요가 요구 허용 한계값인 ± 0.150 mm 이내였다. 이는 본 연구에서 제안한 다단 형상인발 공정설계 방법이 타당함을 보여주는 결과이다.



(a) 1st pass

(b) 2nd pass

Fig.11 Manufactured shape drawing dies



Fig.12 Cold drawing machine

Table 2 Comparison drawing load (ton)

	Calculation	FE analysis	Experiment
1 st pass	40.0	42.1	41.5
2 nd pass	29.4	31.0	30.2



(a) 1st pass



(b) 2nd pass

Fig.13 Manufactured shape drawing dies

5. 성형해석 및 형상인발 실험

본 연구에서는 인발하중 및 인발응력 예측을 이용하여 다단 형상인발 공정설계를 수행하였으

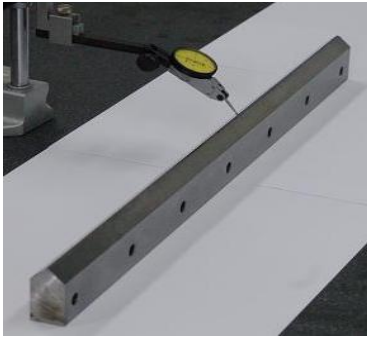


Fig.14 Linear guide rail

Table 3 Dimensional tolerance (mm)

	Allowable tolerance	Measured tolerance
H1	±0.150	±0.033
H2	±0.150	±0.035
W	±0.150	±0.110
α	±0.300°	±0.130°

며, 이를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 단면요소분할법을 적용하여 형상인발공정에 대한 인발하중을 계산하였다. 계산된 인발하중은 다이 출구부 소재의 소성변형을 판단하기 위한 인발응력 계산에 활용하였다.

(2) 다단 형상인발공정의 중간 패스 다이 단면형상 설계를 위하여 전기장해석을 적용하였다. 전기장 해석을 통해 초기 형상과 최종 제품형상 사이에 생성되는 등전위선과 평균단면감소율을 이용하여 중간 패스 다이 단면형상을 설계하였다.

(3) 제안된 공정설계방법을 이용하여 겐츨리 로봇의 직선이송부의 레일로 사용되는 직선형 가이드 레일 제조를 위한 형상인발공정을 설계하였다. 단면 감소율이 36.4%인 단패스 형상인발 적용 시 다이 출구부 소재에서 과도한 인발응력이 발생하여 소재의 소성변형이 예측되었기 때문에 본 연구에서는 2 패스 형상인발 공정에 대한 공정설계를 수행하였다.

(4) 설계된 2 패스 형상인발공정의 경우 평균단면감소율이 20.2%이며, 이 경우 다이 출구부에서 소재의 소성변형은 발생하지 않는 것으로 예측되었다.

(5) 설계된 공정의 타당성을 검증하기 위하여 성형해석과 실제 형상인발 실험을 수행하였다. 그 결과 각 패스의 예측 인발하중, 성형해석 하중, 그리고 형상인발 실험 하중값이 최대 오차 약 5% 이내로 잘 일치하였다. 또한 최종제품의 치수공차 측정결과 모든 치수가 허용 치수공차 이내였으며, 이를 통해 설계된 다단 형상인발공정의 타당성을 검증할 수 있었다.

후 기

본 논문은 부산대-IFAM 국제공동연구소 및 한국생산기술연구원의 대경권 중소기업 생산기술 고도화 지원사업의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] M. Kobayashi, 1988, The Present Situation of Cold Drawn Special Section, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 39, No. 447, pp. 335~337.
- [2] K. Yoshida, E. Hosaka, E. Miyazaki, Y. Taki, J. Shinbe, 1992, Proc. 43rd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Japan, pp. 371~374.
- [3] T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2009, Prediction of Drawing Load in the Shape Drawing Process, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 4, pp. 323~328.
- [4] H. K. Shin, S. R. Lee, C. H. Park, D. Y. Yang, 2002, The Optimal Design of Preform in 3-D Forging by using Electric Field Theory, Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 2, pp. 165~170.
- [5] J. E. Lee, T. K. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2008, Design of the Cross Sectional Shape of Intermediate Die for Shaped Drawing of Spline, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 8, pp. 627~632.
- [6] JSTP, 1990, Wire Drawing, Corona, Japan, p. 44.
- [7] A. Geleji, 1995, Die Berechnung der Kräfte und des Arbeitsbedarfs bei Formgebung im Bildsame Zustande der Metalle, Akademi-Verleg, Budapest, p. 10.