

압출금형 설계자동화에 관한 연구

이승훈*, 김창우*, 이춘만**

A Study on Computer-Aided Design of Extrusion Dies

S. H. Lee*, C. W. Kim*, C. M. Lee**

Abstract

This study presents development of an software for process and die design of hot extrusion through square dies. The design of extrusion dies is still an art rather than a science with increasing complexity of shape and thinness of section. Therefore, most of the die design is still dependent on personal judgement, intuition and experience. The objective of this study is to develop an software system which includes a design rule extracted from literatures and experts in the extrusion industry. The system also includes finite element simulation program. The developed system is effectively used to design extrusion processes and dies with lead time and trial extrusion.

Key Words : Hot Extrusion, Square Die, Computer-Aided Design

1. 서론

각종 설계의 설계자동화에 대한 연구는 경험이 많은 숙련기술자들에 의존해 온 설계의 노하우를 검토, 분석하여 체계화 시킴으로써 경험이 적은 비숙련기술자들에게도 훌륭한 설계를 할 수 있도록 하는데에 노력이 집중되고 있는 실정이다. 소성가공 공정설계와 금형설계는 재질, 윤활과 마찰, 응력과 재료유동 등 수많은 변수들을 복합적으로 고려해야 하는 어려운 문제이므로 이의 설계자동화는 필수적으로 요구되고 있으며, 압출에 대한 적용은 Purnell⁽¹⁾, Altan^(2,3), Choi⁽⁴⁾ 등에 의한 연구가 있다. 최근에는 Computer의 계산능력 향상과 더불어 소성가공 공정을 유한요소법으로 시뮬레이션(FEM Simulation)하는 기능을 통합하는 추세이며, 앞으로는 System의 유연성이나 학습기능을 추가시켜 새로운 제품의 공정추정, 공정평가 등에 대한 연구나 제품 결함 예측, 공구 수명 예측 등에 대한 체계적인 연구가 되어 나갈 것으로 보인다. 본 연구에서는 평금형을 통

한 열간압출에 대해 제품의 형상과 재질, 공구의 재질, 마찰 또는 윤활조건 등의 입력 Data가 주어지면, 금형과 금형 주변장치, 펀치(Punch) 등의 설계치수가 결정되고, 설계도면을 생성해 주는 설계자동화 system을 개발하였다. System의 각종 규칙(Rule)과 Data base는 각종 Handbook, 현장 전문가의 경험적 지식과 실험 등을 토대로 하여 구축하였고, 이를 기준으로 설계된 1차 설계 Data는 FEM Simulation에 의해 검토하고 재설계하도록 하였다. 개발된 system의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

2. System의 내용

2.1. Data 입력과 Data base구축

본 System에서는 입력 가능한 압출재의 단면 형상을 봉재(Rod or Wire), 둥근 튜브재(Round Tube), 형재(Solid Shape), 속이 빈 형재(Hollow Shape)의 4가지로 분류하였다. 입력된 형상에 따라 제품의 치수와 금형랜드(Die land) 길이 등이 입력되도록 하였다. 구축된 Data base는 개방된 구조를 취하여 수정과 보완이 용이하도록 하였고, 산업체 나름대로의 실정에 맞는 System 구축이 가능하도록 하였다. 주요 Data base는 1) 소

* 창원대학교 대학원

** 창원대학교 기계설계공학과

재(Material) 2) 프레스 제원 3) 빌렛(Billet) 규격 4) 압출구멍 보정 5) 공정 및 금형선정등에 관한 자료를 보관하도록 하였다.

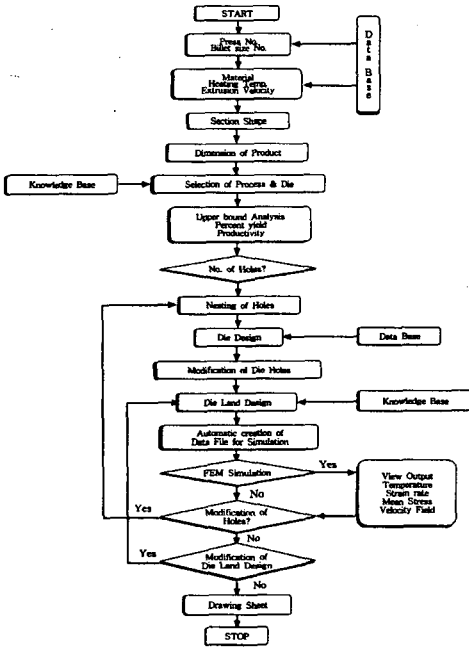


Fig. 1 Overall flowchart of the system.

2.2 형재의 단면형상 입력

형재의 단면형상을 System에 입력하는 데는 2 가지 방법이 가능하도록 하였다. 첫째는 Auto-CAD에서 주어지는 DXF File을 읽어서 System의 Data로 바꾸는 Interface program을 개발하였고, 둘째는 임의 형상의 형재 단면 모양을 그리거나 수정할 수 있는 Graphic editor를 개발하였는데, 이들 Data가 입력되면 화면상에 단면형상이 그려지고, 단면적, 원주길이, 단중, 최대 외접원 직경등이 자동으로 계산된다. 임의 형상의 단면적은 Green's theorem에 의해 직선과 원호의 경계선을 따르는 선적분을 이용하여 계산하였다.

2.3 공정 및 금형선정의 추론

본 연구에서는 현장 전문가 면담과 각종 자료를 참고하여 공정 및 금형선정의 체계를 구축하고 공정 및 금형을 탐색하고 선정할 수 있도록 하였다. 공정선정은 압출형재의 외접원 직경(Circumscribing Circle Diameter, CCD), 재질, 빌

렛의 표면가공, 치수정밀도등을 기초로 하여 직접압출과 간접압출을 추론할 수 있도록 하였다. 금형선정은 단면형상, 형상비(Shape factor), 텅비(Tongue ratio), 재질의 용착여부등을 기초로 하여 추론 대상을 평금형(Flat die), 유동가이드를 가진 평금형(Flat die with flow guide), Semi-hollow die, Porthole die, 만드렐을 가진 평금형(Flat die with mandrel)과 압출 불가능인 경우 등으로 하였다.

2.4 압출구멍 갯수 및 빌렛규격 선정과 압출 하중의 계산

압출구멍의 갯수와 빌렛 규격의 선정은 압출비, 프레스 제원등에 의해 제한을 받으며, 재료 생산률(Yield)과 생산성(Productivity)에 큰 영향을 주게 되므로 이런 요소들을 계산하고 검토한 후에 결정되어야 한다.

본 연구에서는 Fig. 2에서와 같은 계산 알고리즘을 사용하여 최적의 금형 압출구멍의 갯수와 빌렛길이를 선정할 수 있도록 하였다.

빌렛직경과 길이가 주어지고, 제품길이 L_f , 허용길이 L_a , 런아웃길이(Runout length) L_R , 단중(Weight per unit extrude length) W_u , 최대 압출중량(Maximum extrude weight) W_t 라고 할 때 최소 및 최대 압출구멍의 갯수는 다음과 같다.

$$N_{h_{min}} = \text{정수값}\left(\frac{W_t}{W_u L_R}\right), \quad (1)$$

$$N_{h_{max}} = \text{정수값}\left(\frac{W_t}{W_u (L_f + L_a)}\right)$$

그리고, 한개의 압출 구멍당 생산되는 제품 갯수의 최소 및 최대값은 다음과 같다.

$$N_{f_{max}} = \text{정수값}\left(\frac{L_R - L_a}{L_f}\right), \quad (2)$$

$$N_{f_{min}} = 1$$

위의 계산에서 제품 갯수는 최대값에서 시작하여 1개씩 줄여가면서 조건에 맞는 갯수를 찾도록 하였고, 압출구멍의 갯수는 최소값에서 시작하여 1개씩 늘려가며 반복 계산하도록 하였는데, 최대 압출구멍의 갯수는 산업현장에서 통상적으로 8개 정도까지 작업하는 것을 고려하여 8개로 한정하

였다. 각 빌렛길이에 대해 계산한 생산률과 생산성등의 결과를 한 화면씩 보여주어 사용자가 최적의 압출구멍수를 결정할 수 있도록 하였다.

FEM Simulation과정에서도 압출하중이 계산되지만, 계산시간이 적게 걸리는 상계해법(Upper bound method)에 의한 방법과 경험식에 의한 방법으로 계산하여 압출구멍수를 결정하는데 도움을 주도록 하였다.

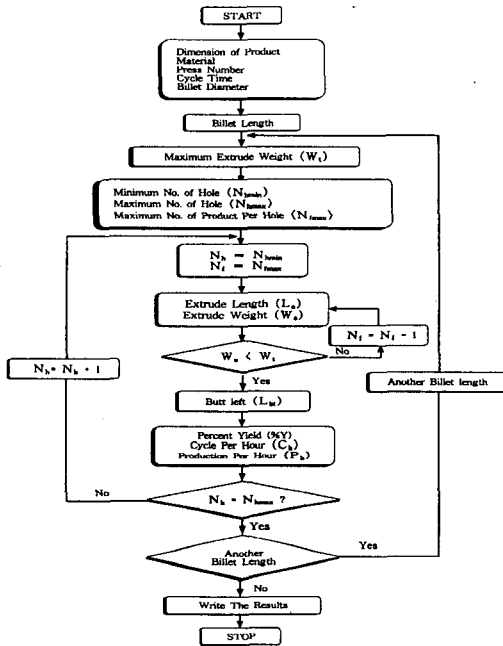


Fig. 2 Flowchart for determination of optimal number of die holes

2.5 금형랜드(Die land)부의 설계와 금형압출구 수정

꼬임이나 굽힘등의 불규칙적인 소성유동을 방지하기 위해서는 금형랜드(Die land)부의 설계는 대단히 까다롭고 어려운 문제이다. 본 연구에서는 각 단면 형상에 대하여 각종 자료와 현장 전문가의 경험적 지식을 체계화하여 일반적이고 모순이 없는 몇가지 규칙을 만들어 금형랜드부의 길이를 결정하였다.

공정이 열간 상태에서 이루어지므로 수축율과 응력에 의한 금형의 굽힘(Dishing)현상을 고려하여 치수보정을 해야 하는데, 제품형상의 치수에 경험치를 곱하여 압출구멍을 자동적으로 수정하도록 하였다. 또한 앞에서 언급한 금형랜드

부의 설계규칙과 압출구멍 보정율은 사용자가 직접 입력 및 수정할 수 있도록 하여 산업체 나름대로의 실정에 맞도록 System구축이 가능하도록 하였다.

2.6 FEM Simulation과 재설계

본 연구에서는 3차원 압출공정을 동일한 압출비를 갖는 축대칭 압출공정으로 근사화시켜 해석할 수 있는 근사해석 프로그램과 3차원 해석용 프로그램을 개발하고, 유동해석과 온도해석을 행하여 공정 및 금형설계에 이용하였다. 유한요소 해석을 위한 격자생성은 두가지 프로그램 모두 자동격자 생성이 되도록 하였다. 개발된 프로그램은 소성유동과 온도해석 모두 정상상태(Steady-state)로 해석하였는데, 사용된 방법은 소성유동을 강소성 FEM으로 정상상태 해석하고, 그 결과를 넘겨서 온도 해석을 하는 비연계(Decoupled)방법을 사용하였다. 온도해석은 금형과 빌렛에 대해 가능하도록 하였으나, 금형장치가 매우 복잡하므로 빌렛만 해석하였다. 실제 산업체에서는 생산성을 높이기 위해 금형을 냉각시키고 있으므로 금형은 거의 일정한 온도를 유지하고 있다. 금형과 빌렛사이에는 대류연결(Convection link)요소를 사용하여 열전달을 고려하였으며 접촉절점이 일치하도록 하였다. 정상상태 온도 문제를 해석하기 위한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$K_1 T_{,ii} + k^* \bar{\sigma} \bar{\epsilon} = 0 \quad (3)$$

여기서, K_1 은 열전도 계수, T 는 빌렛온도, k^* 는 소성변형 에너지의 열로 바뀌는 비율이며, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력(Effective stress), $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률 속도(Effective strain rate)를 나타낸다. 이를 유한요소 분할화(Finite element discretization)하고 행렬식으로 나타내면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$(K + K_h + K_{h_{ub}})T - Q - Q_r = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$K_h = \int_{S_c} h N^T N dS,$$

$$K_{h_{ub}} = \int_{S_i} h_{ub} N^T N dS,$$

$$Q_r = \int_{S_c} h T_\infty N^T dS + \int_{S_i} h_{ub} T_d N^T dS$$

$$+ \int_{s_i} a_n^f N^T ds$$

이다

2.7 자동 도면 생성

본 연구에서는 Expert system에 의해 설계된 자료를 넘겨주면, Data base로 저장된 부품들과 결합되어 자동으로 도면이 생성되도록 하였다. 또한, 자료관리를 쉽게 하도록 하기 위해 압출구멍 형상과 각 부품 Data가 저장된 File을 종합관리하는 File을 두어 계층구조(Tree structure)로 만들었다. 이 종합관리 File중의 하나를 선택하면 금형, 유동가이드, 지지대(Backer)등의 치수 및 치수공차와 함께 압출구멍의 치수, 치수공차, 금형랜드의 길이, 각 부품의 직경과 두께등이 Graphic화면에 나타나고, 문서화 또는 도면화하여 출력할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 토론

본 System의 효용성을 검증하기 위해 국내에서는 설계기술이 초보단계에 있는 II형의 대형형재와 II형의 소형형재 그리고, 클램프형(Clap shaped section)의 중공형재 3가지 경우에 대해 압출공정과 금형의 설계를 해 보았다.

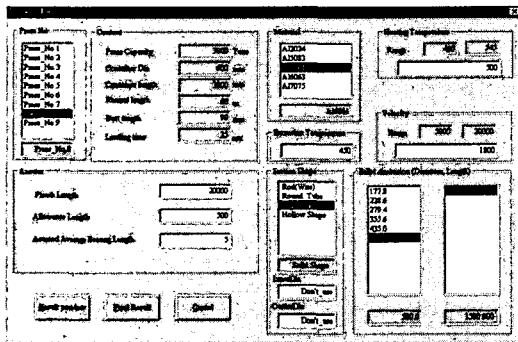


Fig. 3 Input of system information

Fig. 3은 II형의 대형형재에 대하여 프레스 고 유번호, 소재를 입력하는 과정을 보여주는데, 알루미늄 6061계열을 선택하면 Data base에서 불러온 컨테이너의 가열온도, 압출온도, 압출속도의 추천값을 참고로 보여준다. 이를 참조하여 각각 500°C, 450°C, 2000 mm/min을 입력시키는 과정을 보여준다. 또한, 제품치수, 허용길이, 평균 금형랜드길이를 입력한다. 여기서, 금형랜드의

길이를 가정한 이유는 이 값을 기준으로 개략적인 계산을 하고, 나중에 수정이 가능하기 때문이다. 그리고, 빌렛의 규격을 선정하는데, 빌렛직경을 580mm을 선정하면 같은 직경이면서 길이가 다른 빌렛 규격을 보여준다.

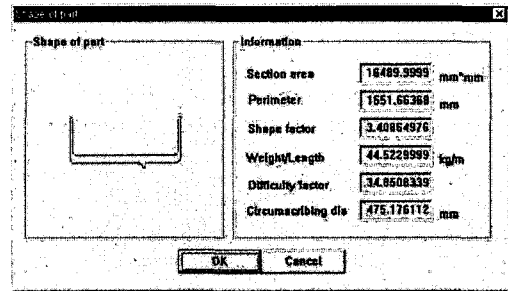


Fig. 4 Information of section shape

Fig. 4는 입력한 단면 형상, 최대 외접원, 단중, 형상계수, 면적등의 여러 정보를 화면상에 보여주는과정이다. Fig. 5와 Fig. 6은 공정선정과 금형선정 과정을 나타내는데 숙련된 사용자는 직접 선정할 수 있으나, 미숙련자가 공정과 금형을 선정할 경우, 몇가지 질문을 하고 적절한 공정과 금형을 추천해 주는 과정을 보여주고 있다. 이 경우에는 간접압출과 평금형이 추천되었다.

Fig. 7은 앞에서 입력된 Data에 의해 최적의 압출구멍수를 선정하기 위해서 경험식과 상계해법에 의해 압출하중을 계산하고, 재료의 생산률과 생산성을 서로 비교하여 사용자가 최적의 빌렛길이와 압출구멍수를 선정할 수 있도록 도표로 보여주는 과정이다. 본 예제의 경우에는 압출하중이 6025ton이고, 압출비가 16이며, 압출구멍수와 제품의 갯수는 1개, 압출길이는 20500mm, 압출중량은 912.7kg, 재료의 생산률은 83.2%로 계산되었다. Fig. 8은 이 단계까지 사용자에게 입력된 Data와 계산된 결과값을 모두 요약하여 나타내었다. 그 다음 단계는 FEM Simulation인데, Simulation결과를 보고 나서 압출구멍의 갯수나 위치, 금형랜드부를 재설계할 것인지 여부를 물어보고, 재설계를 원할 경우에는 설계 과정중의 적당한 위치로 되돌아가고, 설계에 만족할 경우에는 Graphic editor에서 금형위에 압출구멍을 배치하고, 치수를 입력하여 Fig. 9와 같이 도면을 완성할 수 있다. 7000ton 프레스와 600Ø 컨테이너를 사용하여 본 예제의 대형형재를 압출하는