

압연 설비 설계를 위한 봉재 압연의 롤 패스 설계 시스템

윤성만* · 박승희* · 신상엽*

(1999년 6월 5일 접수)

Roll Pass Design System for Round Bars to Design Rolling Equipment

S.M. Yoon, S.H. Park and S.Y. Synn

Abstract

The roll Pass design is one of the most important processes to design the whole equipment for the rods and bars rolling system. In this study, the roll pass design program named RollFO(Rolling Factory Organizer) was developed. Conventional methods to design roll pass were analyzed and a new algorithm to design the dimension of the intermediate groove was introduced. Object oriented programming technology was implemented in this design program. It comprises GUI(Graphic User Interface), function of automatic pass design, function of modifying pass schedule and database of material properties. The developed program can be used to design roll pass with consistency for the rods and bars rolling system. The man-hours for the whole design can be drastically reduced. The design parameters of rolling system can be extracted quickly by this program.

Key Words : Rods and Bars Rolling, Roll Pass Design, Design Automation

1. 서론

압연 설비를 설계하기 위해서는 설비 전체의 크기, 용량, 수량, 배치 등을 결정하는 시스템 설계 단계를 거친 후, 설비의 각 구성 요소별로 상세한 설계를 하게 된다. 이 중 시스템 설계 단계에서 초기에 하게 되는 것이 롤 패스 설계이고 이를 바탕으로 각 요소의 용량, 크기 등이 결정된다.

봉재 및 형재 압연의 경우 생산하려는 제품의 크기와 수량에 맞게 롤 패스를 설계하는 것은 전체 설비를 결정하는데 기본적이고 중요한 부분이다. 롤 패스 설계는 처음 롤에 들어가는 빌렛이 마지막 제품이 되어 나오기까지 어떠한 패스를 거쳐 압연할 것인가를 결정하는 것으로, 전체 패스의 개수, 각 패스의 단면 감소율, 각 패스의 형상 및 치수 등을 결정해야 한다. 결정된 패스로부터 압연 하중, 토크, 동력, 압연 소재의 온도 등이 계산

* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

되고 이로부터 스탠드의 강도 설계, 감속비 결정, 모터의 선정 등이 이루어진다.

기존의 롤 패스 설계는 생산 경험에서 얻어낸 설계규칙과 계산식을 이용하여 설계자가 직접 시행착오를 거쳐 설계하는 방식으로 이루어졌다^(1~4). 경험식을 사용하는 기존의 방법에 비해 보다 정확한 롤 패스 설계를 위하여 1980년대에는 유한요소법을 이용하여 압연 공정을 해석하고 이를 바탕으로 설계함으로써 시행 착오를 줄이려는 연구가 수행되었으며^(5~8), 최근에는 CAD 시스템 또는 설계 전문가 시스템을 개발함으로써 롤 패스 설계의 과정을 컴퓨터를 이용하여 자동화하려는 다양한 연구가 수행되었다^(9~12).

설비 설계를 위한 롤 패스 설계에서는 그 설비의 신뢰성을 인정받을 수 있으려면 기존에 인정받고 있는 계산식 및 설계규칙을 사용하는 것이 필요하다. 또한 짧은 시간 내에 여러 가지 변수들을 변화시키면서 패스 설계를 할 수 있어야 하고, 새로운 패스 형상의 추가 등이 용이하여야 한다.

이러한 설비 설계의 특성을 고려하여 본 연구에서는 봉재압연 설비의 설계시 기본 설계 자료를 얻을 수 있는 RollFO(Rolling Factory Organizer)라는 롤 패스 설계용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

2. 이론적 배경

봉재압연의 전반부에서는 보통 2단 또는 3단 압연기를 이용하여 비연속적으로 일정 크기 이하로 압연한 후, 연속적인 압연을 거쳐 최종 제품을 생산하게 된다. 이중 연속적인 압연 공정의 롤 패스 설계를 본 연구에서 다루었다.

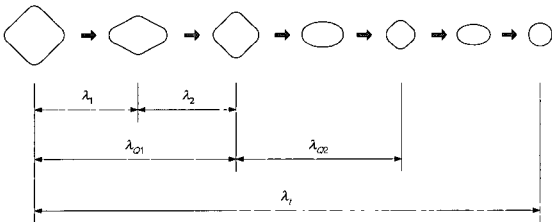


Fig. 1 Schematic drawing of roll pass to produce round bar

Fig. 1은 단면이 정사각 형태인 빌렛이 원형으로 되기까지의 과정을 개략적으로 도시한 것으로, 중간에 정사각 단면으로 압연되는 과정을 반복하면서 최종 형상으로 성형된다.

롤 패스를 설계하기 위해서는 먼저 패스의 스탠드별 연신계수를 결정해야 하고, 이로부터 그루브의 형상 및 치수를 결정하게 된다. 이러한 결정이 끝나면 압연 소재의 온도 계산 및 압연에 필요한 힘, 토크, 동력 계산을 하게 되고 그 외의 공정 변수 값도 계산하게 된다.

2.1. 연신계수 결정

연신 계수(elongation coefficient)는 패스를 지나면서 소재의 길이가 늘어나는 비율을 나타내는데 각 패스의 연신 계수 λ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{A_0}{A_1} \quad (1)$$

여기서 l 은 소재의 길이를, A 는 소재의 단면 면적을, 아래첨자 0은 입구측을, 1은 출구측을 나타낸다.

초기 빌렛과 최종 제품의 형상이 정해지면 전체 연신률 λ_t 가 정해지고 전체 패스의 평균 연신계수를 결정하면 전체 패스의 개수 n 이 다음과 같이 정해진다.

$$n = \frac{\ln \lambda_t}{\ln \lambda_m} \quad (2)$$

성형에 필요한 패스의 개수가 정해지면 전체 연신계수(λ_t)를 각 패스에 대한 연신계수(λ_1, λ_2 등)로 분배하는 작업이 필요하다. 이를 위해서 먼저 단위 패스에 대한 연신계수($\lambda_{01}, \lambda_{02}$)와 패스 형태를 결정하게 되는데 단위 패스는 단면이 정사각 또는 원인 패스를 기준으로 중간에 다른 단면 형상의 패스를 넣은 형태로 구성된다.

본 연구에서는 단위 패스의 형태를 일반적으로 많이 사용되는 SQ-DI-SQ와 SQ-OV-SQ, SQ-OV-RD, RD-OV-RD인 경우로 한정하였다. 소재의 단면 형상에 따라 SQ는 정사각(Square)을, DI는 마름모(Diamond)를, OV는 타원(Oval)을, RD는 원(Round)을 각각 의미한다. 즉 SQ-DI-SQ에서는 단면의 형상이 정사각형인 소재가 들어가서 마름모 형태의 단면이 되고, 다시 정사각형 단면으로 성형되므로 2개의 패스를 거치는 단위 패스가 된다. 본 연구에서 전체 패스는 이러한 4가지 종류의 단위 패스를 연속적으로 연결하여 설계하게 된다.

Fig. 2에는 본 연구에서 사용된 패스의 형상과 형상의 치수를 기술하는데 사용된 변수가 나타나 있다.

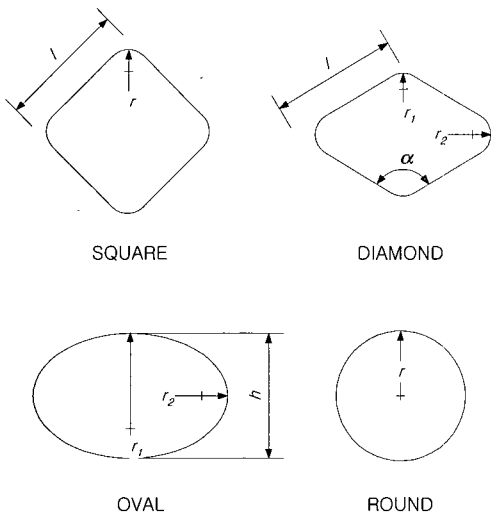


Fig. 2 Used pass groove shapes

본 연구에서 사용된 단위 패스의 형태들은 2개의 연속된 스탠드를 지나면서 성형되는 패스를 한 단위로 보았으므로 결정해야 할 패스 단위 패스의 연신계수 수는 전체 패스 수의 반이 된다.

실재의 압연 공정에서 사용되는 롤 패스를 살펴보면 성형 후반부의 연신 계수는 성형 전반부의 연신 계수에 비해 작게 설정함을 알 수 있다. 이는 성형 초기에는 단면적을 많이 감소시키면서 거칠게 성형하다가, 후반에 갈수록 정밀하게 형상을 조절하기 위한 것과, 후반으로 가면서 성형 속도가 빨라지므로 성형량을 줄여 설비에 요구되는 압연 동력을 되도록 균일하게 유지하기 위한 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 초기부터 최종 패스까지 단위패스별로 일정한 비율로 연신계수를 감소시켜서 전체 연신계수를 각 단위패스에 분배하였다.

2.2 스탠드별 형상 치수 결정

단위 패스별로 연신계수가 분배된 후 각 단위 패스별로 단위 패스의 연신계수를 각 패스의 연신계수로 분배하는 작업이 필요하다 (Fig. 1의 λ_{QI} 를 λ_1, λ_2 로 분배). 이 작업은 단위 패스별 연신 계수와 단위 패스 형태가 결정된 후 단위 패스 중간 단계의 형상 치수를 결정함으로써 수행될 수 있는데 Fig. 3는 SQ-DI-SQ 단위

패스에서 결정해야 할 마름모 치수를 보여주고 있다.

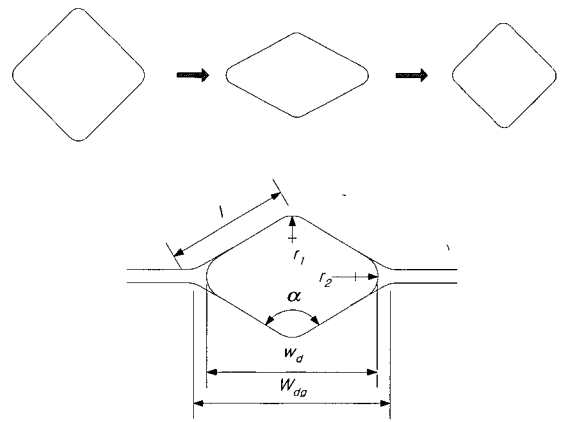


Fig. 3 Dimensions of the intermediate shape in unit passes

Fig. 3에서 보는 바와 같이 원하는 중간단계의 형상은 적절한 면적을 가지고 있어야 하고, 폭에 대한 높이의 비가 적절해야 한다. 이러한 두 조건을 만족시키기 위해서는 독립적인 형상 변수가 두개 필요하므로, 변경시켜가면서 각 형상에 대해 폭과 높이를 조절할 수 있는 형상 변수 두개를 정하고 그 외의 형상을 나타내는 변수들은 이 두 변수의 조합으로 나타내어야 한다. 중간단계 형상은 다음 단계의 형상이 나오도록 이 두 변수를 변화시켜 가면서 결정하게 된다.

Fig 4는 SQ-DI-SQ 단위 패스에서 중간 단계 형상인 마름모의 치수를 정하는 과정을 보여준다.

먼저 마름모의 둔각 α 값을 일정 값으로 초기화하고 l 값은 Fig. 3에서 마름모의 면적이 처음 정사각형의 면적과 나중 정사각형의 면적 사이에 일정 비율의 면적을 갖도록 초기화한다. 두 변수의 값이 정해지면 나머지 변수들의 값을 계산한 후, 마름모로 성형하면서 생기는 폭퍼짐을 계산한다. 계산에 의해서 나온 마름모의 폭 w_d 를 그루브 폭 w_{dg} 에 일정한 상수값 c_1 을 곱한 값과 비교하여 그 절대값이 한계 값 tol 보다 작으면 다음 단계로 넘어가고, 그렇지 않으면 한계 값보다 작아질 때까지 l 값을 변경하면서 반복 계산을 수행한다. 이 단계는 마름모의 각도 α 가 일정한 값으로 정해지면 정사각 단면을 마름모로 압연할 때, 압연된 마름모 형상이 그루브를 채울 수 있도록 l 값을 정하는 단계이다.

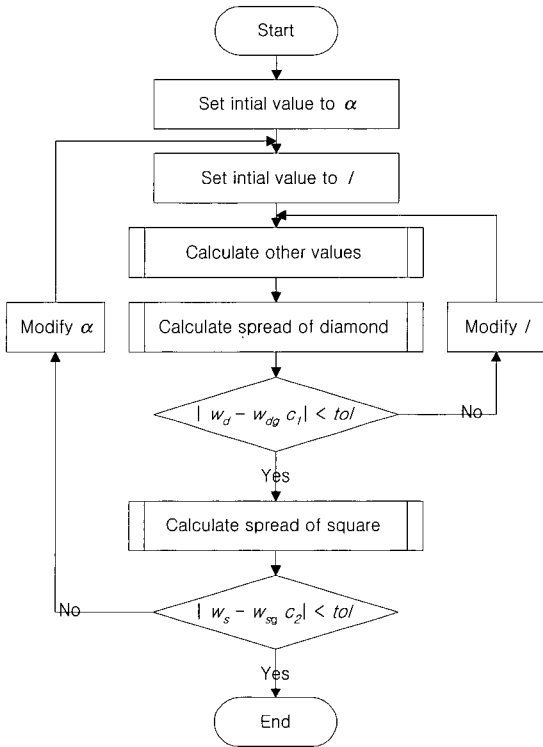


Fig. 4 Determination of the intermediate diamond dimension

한계값이 만족되면 마름모에서 정사각형으로 압연되는 다음 단계에서 일어나는 폭퍼짐을 계산한다. 계산에 의해서 나온 정사각의 폭 w_s 를 그루브 폭 w_{sg} 에 일정한 상수값 c_2 를 곱한 값과 비교하여 그 절대값이 한계 값 tol 보다 작으면 다음 단계로 넘어가고, 그렇지 않으면 한계 값보다 작아질 때까지 값을 변경하면서 반복 계산을 수행한다. 한계값이 만족되면 처음 정사각 형상에서 마지막 정사각 형상이 나올 수 있는 중간 단계의 마름모 치수가 그 때의 α 와 l 값으로 결정된다. 본 연구에서는 l 을 정하는 안쪽 반복 계산과 α 를 구하는 바깥쪽 반복 계산에서 한계값을 만족하는 값을 구하기 위하여 Secant 방법을 사용하였다⁽¹³⁾.

SQ-OV-SQ, SQ-OV-RD, RD-OV-RD 단위 패스에서의 중간 단계 형상인 타원의 치수는 위의 SQ-DI-SQ에서 마름모의 치수를 구하는 것과 유사하게 결정한다.

2.3 기타 설계과정

정해진 연신 계수에 따라 각 패스의 형상 치수를 결

정하기 위해서는 패스를 지난 후의 폭퍼짐을 계산하여야 한다. 일반적으로 폭퍼짐을 계산하기 위하여 평판 압연의 경우는 Wusatowski, Marini, Roux, Ekelund 등에 의해 여러 가지 식들이 사용되고, 형상 압연의 경우에는 A. E. Lendle이 제안한 등가 높이 계산식을 사용하여 등가 높이를 구한 후에 이를 기존의 평판 압연의 폭퍼짐 계산식에 대입하여 폭퍼짐을 계산하게 된다^(3, 4, 14).

압연 공정 중의 소재 온도를 계산을 위해서는 대기로의 복사열, 롤에 전달되는 전도열, 변형에 의해 생성되는 열 등을 계산하게 된다. 또한 압연 하중을 계산하기 위하여 Ekelund식 또는 SMS에 의하여 보정된 Ekelund의 식을 사용할 수 있도록 하였다⁽¹⁴⁾.

3. 롤 패스 설계 프로그램 구조

3.1 전체 구조

프로그램은 크게 설계 관련 부분과, 프로그램 사용자와의 연결 부분(User Interface Part)으로 나눌 수 있고 가능한 한 이 둘이 분리 될 수 있도록 설계되었다.

설계 관련 부분에는 각 패스를 단계별로 설계하여 전체 패스를 설계할 수 있는 기능과, 설계된 결과의 여러 가지 그래프를 생성하는 기능이 포함되어 있고, 압연 공정 자체를 모사할 수 있도록 여러 클래스가 정의되어 있다.

프로그램 사용자와의 연결 부분에는 기본 설계 변수의 입력에서부터 사용자와의 대화를 통하여 필요한 설계 변수들을 입력하는 입력 부분과 설계된 결과를 화면에서 확인하고 이를 저장하거나 출력하는 기능이 포함되어 있다.

이 두 부분을 결합하여 패스 설계를 수행하는데 이를 흐름도로 나타내면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에는 패스 설계에 필요한 부분만을 나타내었고, 이 외에 설계된 결과의 형상이나 그래프를 화면상에서 확인하는 모듈, 설계된 결과의 출력, 설계된 결과를 파일로 저장 또는 열기 등의 모듈이 있다.

Fig. 5의 흐름도 왼쪽에 "Input"으로 표시된 부분에서 설계자와의 대화를 통하여 여러 가지 입력값들을 결정하게 되고 실질적인 설계 과정이 이루어진다. 이 부분은 기본 변수 입력, 연신계수 결정, 스탠드 변수의 입력으로 나누어지는데 각각의 과정에서 입력값의 수정을 위해 전후로의 이동이 가능하다.

"Generate"으로 표시된 부분에서는 정해진 입력 값에 맞게 패스를 생성하고 이의 결과로 얻어지는 여러 가지 그래프를 생성하게 된다.

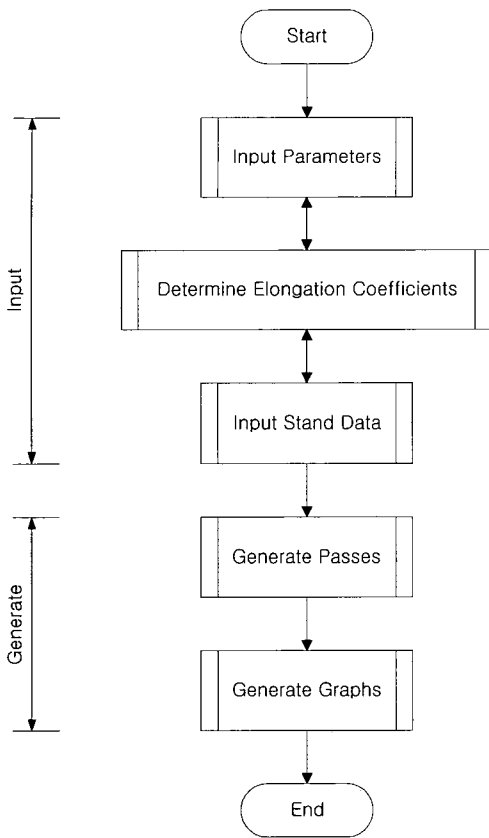


Fig. 5 Flow chart of design

3.2. 주요 클래스

RollFO의 각 기능을 구현하기 위하여 객체지향형 프로그래밍 기법을 사용하여 필요한 클래스를 정의하였는데 Fig. 6는 RollFO에 사용된 주요 클래스들을 보여주고 있다.

프로그램의 설계 관련 부분의 클래스는 대부분 직접 설계하여 사용하였고, 사용자와의 연결 부분의 클래스는 대부분 MFC(Microsoft Foundation Classes)에서 정의된 클래스를 상속받아 사용하였다.

Fig. 6의 User Interface Related Classes 부분에서 CRollFoApp, CMainFrm, CChildFrm, CRollFoDoc, CRollFoView, CAboutDlg 클래스는 MFC 응용 프로그램을 만들 때 자동적으로 생성되는 클래스를 수정하여 만든 클래스들이다. CAutomaticDesignSheet 클래스는 CAutomaticDesignPage1~3까지의 클래스를 활용하기 위한 클래스이고, CAutomaticDesignPage1~3은 각각 Fig. 5에서 Input Parameters, Determine Elongation Coefficients, Input Stand Data 부분에 해당하는 클래스

들이다. CEquationsDlg는 계산식 선택에 사용되는 클래스이고 이름에 Edit이란 단어가 들어가 있는 클래스들은 자동으로 생성된 입력값들을 수정하는데 사용되는 클래스이다.

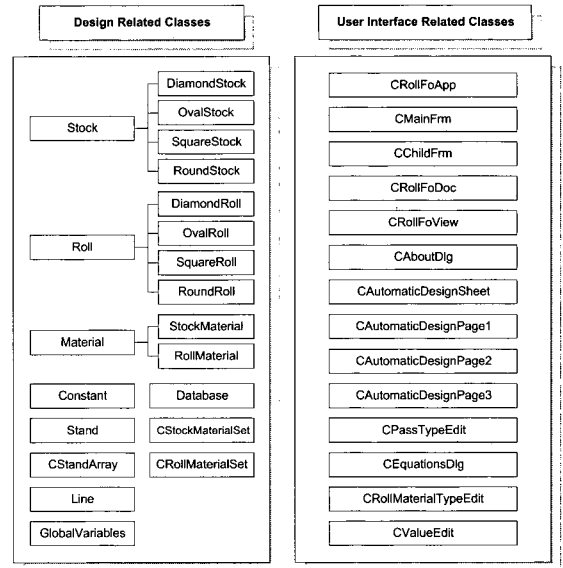


Fig. 6 Classes of RollFO

Design Related Classes 부분의 클래스들은 Fig. 5의 Generate 부분에 해당되는 역할을 수행하는데 필요하며 롤 패스의 설계를 마친 후 설계된 패스의 형상을 보는 데도 필요하다.

Fig. 6의 Stock, Roll, Material의 오른쪽에 연결된 클래스들은 왼쪽의 클래스로부터 상속을 받아 정의된 클래스들이다. Stock은 롤을 통과하여 압연되는 소재를, Roll은 압연에 사용되는 롤을, Material은 소재와 롤의 재료를, Constant는 여러 가지 계산에 필요한 상수들을, Stand는 롤을 장착하는 스탠드를, CStandArray는 스탠드의 배열을, Line은 롤 패스 전체를 모델링 하고 있다. Database는 프로그램에서 사용되는 데이터베이스를, CRollMaterialSet과 CStockMaterialSet은 각각 롤과 소재에 대해서 저장된 데이터베이스 파일과의 연결을 위해 사용되는 클래스이다. GlobalVariables는 클래스는 아니지만 프로그램 전체에서 사용되는 공통 변수를 담고 있는 부분이다.

여러 클래스 중에서 Stock 클래스를 예로 들면 다음과 같이 구성되어 있다. 이 클래스는 압연되는 여러 단면 형상의 소재에 대해 공통 부분을 모델링 하는데 Table 1은 Stock 클래스의 주요 구성 변수와 구성 함수

를 보여준다.

Table 1의 구성 변수에서 mass는 소재의 질량을 나타내며, materialPointer는 소재의 재료를 가리키는 포인터이고, rotateAngle은 소재가 돌아간 각도를 의미하는데 소재의 단면 형상에 따라 0, 45, 90의 값을 가진다. speed는 소재가 가지는 속도를 의미하고, temperature는 소재의 평균 온도를 의미한다.

Table 1 Structure of Stock Class

Class Name	Stock
Base Class	None
Member Variables	mass materialPointer rotateAngle speed temperature
Member Functions	boundedSectionArea length prepareDraw radiationHeatTransfer radiusAccordingToWidth rotate saveResults sectionArea sectionCircumference sectionHeight sectionWidth setDependentVariables setDimensionWithArea volume waterCoolingHeatTransfer

구성 함수에서 boundedSectionArea는 Lendle의 식에서 등가높이를 구하기 위하여 두 형상이 만나는 점에 의해 둘러싸인 면적을 구할 때 사용된다. prepareDraw는 설계를 마친 후 결과를 화면에 표시할 때 소재의 단면 형상을 보여주기 위한 함수이고 radiationHeatTransfer는 주어진 시간 동안 복사 열전달에 의하여 하강 되는 온도를 계산한다. radiusAccordingToWidth는 Fig. 4에서 폭 퍼짐을 계산한 뒤에 폭에 맞게 소재의 옆면 반지름의 크기를 결정할 때 사용된다. rotate는 소재를 축을 중심으로 돌려주는 역할을 하고 saveResults는 설계결과 요약에 출력하는데 사용된다. sectionArea, sectionCircumference, sectionHeight, sectionWidth, length, volume는 각각 단면의 면적, 둘레길이, 높이, 폭, 길이, 부피를 계산한다. setDependentVariables는 Fig.4에서 calculate other values를 수행하기 위해서 사용되고, setDimension

-WithArea는 Fig. 4에서 l 과 r_1 의 초기값을 구하기 위해 사용된다. waterCoolingHeatTransfer는 수냉에 의한 온도 강하를 계산하는데 사용된다.

4. 롤 패스 설계

개발된 RollFO 프로그램을 사용하여 사각 단면의 소재로부터 원 단면의 제품을 압연을 통해 생산하는 압연 공정의 롤 패스를 설계한 예를 보았다.

설계는 마법사 형식의 대화창에서 Fig. 5의 세단계를 수행하게 되는데 Fig. 7은 Fig. 5의 연신 계수의 결정 단계의 입력을 마친 상태를 보여준다.

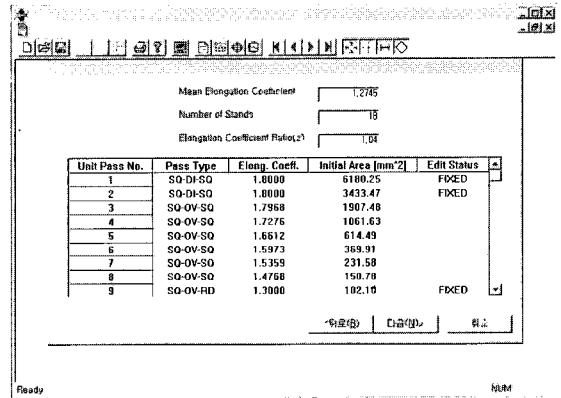


Fig. 7 Determine elongation coefficients

주어진 입력값에 따라 프로그램이 자동적으로 각 단위 패스에 연신계수가 분배되는데 각 값을 더블클릭 하면 값 수정을 위한 입력창이 열리고 값을 수정하면 "Edit Status" 열에 "FIXED"라고 표시되면서 그 값은 고정되게 된다. 그 값을 다시 프로그램이 자동적으로 선택하게 하려면 변경하려는 줄의 "FIXED"를 더블클릭하면 된다.

Fig. 8은 이상의 과정을 거쳐 설계된 전체 패스의 소재 단면 형상을 보여준다. 설계에 사용된 압연 재료는 SD35를 사용하였고, 상온 상태에서 소재의 한 변 길이는 80mm, 소재의 모서리 반지름은 16mm, 소재의 질량은 1000kg, 최종 제품인 봉재의 지름은 10mm로 하였다.

설계를 마치면 설계된 각 패스에 대해 형상과 치수를 볼 수 있는데 Fig. 9은 설계된 패스의 1번 패스의 형상을 보여주고 있다. 입구측으로 들어가는 정사각 단면의 소재와 출구측으로 성형 되어 나오는 마름모 단면의 소재, 그리고 마름모 형상으로 성형하는 롤의 축방향 단면

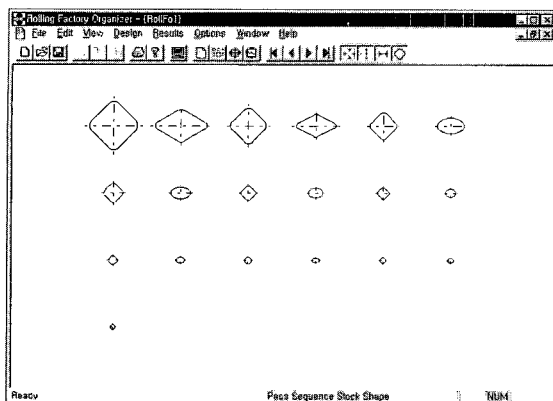


Fig. 8 Designed whole pass

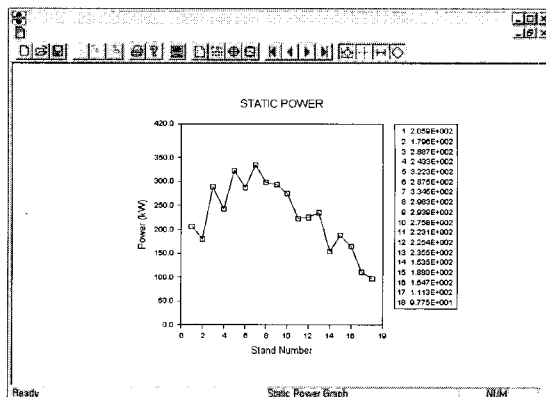


Fig. 10 Graph of static power

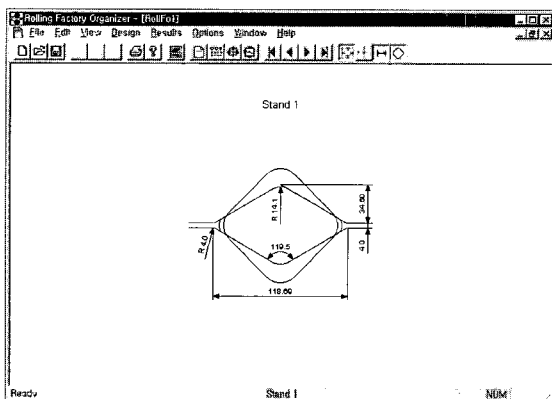


Fig. 9 Groove shape of pass 1

의 형상이 그루브 치수와 함께 겹쳐서 나타나 있다.

각 패스에 대해 계산된 값들은 그래프로 볼 수 있는데 Fig. 10은 정적 동력 그래프를 보여준다. 압연 초기에는 작다가 중반기에 가장 큰 값을 가지고 후반기에 다시 작아지는 형태를 보인다. 이러한 동력 그래프는 감속기와 전동기 사양 선정에 사용된다. 이 외에도 압연 하중, 정적 토크, 정적 동력, 출구부 소재 속도, 롤의 분당 회전수, 물림각, 전방 미끄러짐, 연신률, 소재 단면 감소율, 폭퍼짐, 압하량, 출구부 소재 단면적, 출구부 소재 온도를 그래프로 볼 수 있다.

이러한 설계 결과는 여러 창을 열어 동시에 볼 수 있고, 화면에 나타난 결과는 그대로 프린터로 출력 가능하다. 이 밖에 설계된 사양을 문서의 형태로 볼 수 있고, 이를 파일의 형태로 저장할 수 있다. 또한 옵션 선택을 통해 폭퍼짐 계산에 사용된 식, 압연 하중 계산에 사용

된 식, 재료 데이터베이스 등을 선택할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 봉재압연 설비를 설계하는데 가장 기본이 되는 롤 패스 설계를 컴퓨터를 이용하여 수행할 수 있는 RollFO(Rolling Factory Organizer)라는 롤 패스 설계 프로그램을 개발하였다.

개발된 RollFO 프로그램은 객체지향형 프로그래밍 기법을 사용하여 새로운 롤 형상이나 패스 형태를 추가하기 쉽고, 프로그램의 수정 또는 확장이 편리하다. 롤 패스의 설계는 기본적인 설계 변수의 입력을 받아 자동적으로 설계를 수행하며 사용자가 대화식으로 이를 수정하면서 설계를 진행할 수 있다. 설계 과정에서 설계자에 의해 설계 변수의 값이 수정되면 그에 따라 수정되는 다른 설계 변수의 값을 즉시 확인하면서 설계를 진행할 수 있으며 설계의 결과로 롤의 형상과 결과 그래프를 화면 상에서 확인할 수 있다.

개발된 RollFO 프로그램을 사용하여 롤 패스 설계를 함으로써 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

(1) 기존에는 설계 필요한 여러 변수값을 만족시키기 위하여 시행착오를 거쳐가며 설계를 진행하였다. 이에 비해 RollFO는 이 과정을 컴퓨터를 이용하여 수행하므로 빠른 시간에 설계를 완료할 수 있다. 따라서 설계에 필요한 시간과 인력을 절약할 수 있다

(2) 설계의 결과로 압연공정에 사용되는 롤의 형상, 압연 동력, 압연 온도 등 압연 설비 설계에 필요한 기본적인 자료를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Beynon, R. E., 1956, "Roll Design and Mill Layout", Association of Iron & Steel Engineers, Pittsburgh.
- (2) Wusatowski, Z., 1955, "Hot Rolling: A Study of Draught, Spread, and Elongation", Iron and Steel, Vol.28, pp.49-89.
- (3) Wusatowski, Z., 1969, "Fundamentals of Rolling", Pergamon Press, New Yourk.
- (4) British Steel Corporation, 1960, "Roll Pass Design", British Steel Corporation, England.
- (5) Kiuchi, M. and Yanagimoto, J., 1988, "Computer Aided Simulation of Shape Rolling Processes", Proc. Of 16th NAMRC, pp.34-40.
- (6) Mori, K. and Osakada, K., 1989, "Finite Element Simulation of the Three-Dimensional Deformation in Shape Rolling", Numiform 89, Balkhema Press, Rotterdam, pp.337-342.
- (7) Park, J. J. and Oh, S. I., 1990, "Application of Three Dimensional Finite Element Analysis to Shape Rolling Processes", Trans. ASME, Vol.112, pp.36-46.
- (8) Bursal, F., Sevenler, K. and Raghaupathi, P. S., 1988, "Computer-Aided Analysis Flow in the Rolling of Rods and Structural Profiles", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.28, pp.475-482.
- (9) Kennedy F., Altan, T. and Lahoti, G. D., 1983, "Computer-Aided Analysis of Metal Flow Stresses and Roll Pass Design in Rod Rolling", Iron and Steel Engineer, June, pp.50-53.
- (10) Perotti, G. and Kapaj, N., 1990, "Roll Pass Design for Round Bars", Ann. CIRP., Vol.39, pp.283-286.
- (11) 문호근, 전만수, 이진현, 이성우, 1995, "형상압연 공정 설계의 자동화에 관한 연구", 한국소성가공학회 95 추계학술대회 논문집, pp.7-15.
- (12) 김신희, 임용택, 1996, "형상압연 롤 경로 및 롤 형상 설계의 자동화에 관한 연구", 제2회 압연 심포지엄, pp.607-627.
- (13) Press, W. H., Elannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., 1988, "Numerical Recipes in C", Cambridge University Press, , pp.263-266
- (14) SMS, 1991-93, "Manual : Roll Pass Design Training", SMS Schloemann-Siemag AG Düsseldorf