

## 형상압연 공정설계의 자동화에 관한 연구

### A Study on the Automation of the Pass Schedule Design in Shape Rolling

문호근\*(H. K. Moon), 전만수\*(M. S. Joun)

이진현\*\*(J. H. Lee), 이성우\*\*(S. W. Lee)

\* 경상대학교 기계공학과, \*\* 삼성중공업 연구소

#### Abstract

An application-oriented approach to automatic pass schedule design in shape rolling was presented in this paper. The design approach and its related program are composed of several modules for input data, graphic display, data processing, calculation of design information, drawing of detailed pass shapes, database management and finite element analysis for design verification. The developed program was applied to automatic pass schedule design for a square-to-round bar shape rolling.

#### 1. 서론

형상압연 공정의 패스계획 설계(pass schedule design) 기술은 경험적·시행오차적 접근방법에 의존하여 발전해 왔다. 소성유동, 열전달, 재료학 및 재료역학 등에 관한 공학해석의 어려움, 설계 원칙을 비롯한 설계정보의 부족, 생산량·설비·경영상태 등의 설계환경적 요소를 고려해야 하는 복잡성, 100 개에 달하는 설계변수들의 높은 상호연관성 등이 패스계획 설계의 과학화를 가로막아 왔다. 경험에 바탕을 둔 패스계획 설계기술을 체계화하려는 노력의 대표적인 연구자로 Neumann[3]과 Wusatowski[4] 등을 들 수 있다. 패스계획 설계에서 가장 중요한 변수는 연신율(elongation)과 폭퍼짐(spread)이며, 이에 관한 실험적 및 해석적 연구가 1950년대부터 실시되어 왔다[7-12].

1980년대에 들어와 컴퓨터를 이용한 패스계획 설계기술의 개발이 본격화되었다[13-19]. 이 중에는 도면작업의 단순자동화에 관한 연구[13]도 있고, 설계원칙 또는 경험공식을 통한 부분적 자동화에 관한 연구[14]도 있으나, 전반적으로 상세한 내용이 결여되어 있다는 점을 지적할 수 있다. Kennedy 등[15]은 Akgerman 등[16]의 연구결과를 바탕으로 Shinokura 등[11]이 제안한 폭퍼짐(spread) 예측공식과 상계해법 및 스라브법을 이용하여 봉재 압연 공정설계 프로그램을 개발하였다. Yoshihiro 등[17]은 등가직사각형해석(equivalent rectangle analysis)에 근간을 둔 실험수식[11,12]을 이용하여 CAD 시스템을 개발하였다. Riegger 등[18]은 사각형소재의 평판압연(flat-rolling)공정에서 얻은 폭퍼짐 정보를 이용하여 에어포일(airfoil)과 같은 복잡한 형상의 형상압연 공정설계 프로그램을 개발하였다. Bursal 등[19]은 수직스라브법(vertical slab method)을 이용하여 폭퍼짐을 예측하였으며, 구조용 봉재의 CAD에 관한 연구를 실시하였다.

기존의 연구를 종합하면, 패스계획 설계의 CAD화에 관한 주요연구내용이 패스계획의 창성과 창성된 패스계획의 적합성 검증으로 나누어진다. 자동창성에서 중요한 역할을 하는 폭퍼짐의 계산을 위하여 상당압연 공정(equivalent rolling process)을 이용한 실험식·경험식을 사용한다는 점은 공통적이다. 패스계획 설계의 적합성 검증을 위한 압하력 및 소성유동의 예측 목적으로 경험식 또는 근사해법을 사용하고 있다. 1970년대 초반부터 발달한 수치해석 방법은 설계자가 필요로 하는 설계정보를 정확하게 예측할 수는 있지만, 계산시간이 많이 소요되므로 삼차원 등의 연구에는 사실상 크게 활용되고 있지 않았다. 최근의 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전과 가격 하락은 컴퓨터 시뮬레이션 기술이 가까운 장래에 소성가공 공정의 패스계획 설계를 위하여 활용될 수 있을 것이라는 기대를 낳고 있다. 저자 등[20]은 축대칭 또는 이차원 평면응력 소성가공 공정의 패스계획 최적설계에 관한 연구를 실시한 바 있다. 이 연구에서는 유한요소법과 최소에너지원리가 이용되었다. 그러나 이 기술이 삼차원 형상압연에 응용되기에는 어려움이 따르는 것이 사실이다. 첫째, 계산시간 문제이다. 이 문제는 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전에도 불구하고 사실상 삼차원 문제의 최적설계에 활용되는 것은 가까운 장래에는 불가능하다고 판단된다. 둘째는 설계의 원리를 어떻게 하느냐는 문제이다. 최적설계는 설계의 기준과 제약조건에 의하여 결정되기 때문에 비록 접근방법이 확립되었다고 하더라도 기준과 조건이 잘못되었다면, 그 결과 역시 잘못될 수밖에 없다.

그러므로 현실적으로 가능한 방법은 기존의 설계법칙을 분석하고 정리하여 그 결과를 효과적으로 접근할 수 있도록 하고 설계 업무 자체를 자동화 및 합리화하는 것이며, 설계된 각 패스계획의 타당성을 검증할 수 있는 설계보조시스템을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 문헌상의 패스계획 설계원리를 바탕으로 형상압연 공정 자동설계 프로그램을 개발하였다. 설계의 검증을 위하여 삼차원 형상압연 공정의 유한요소 시뮬레이션을 사용하였으며, 생성된 설계정보와 실제의 공정 데이터를 비교하였다.

## 2. 설계자동화

압연 패스계획 설계 자동화란 설계자가 컴퓨터 화면상에서 컴퓨터와 설계정보를 주고받는 과정을 통하여 목적으로 하는 설계를 실시하는 것을 의미한다. 여기서 자동화란 컴퓨터가 모든 것을 스스로 알아서 설계를 자동적으로 실시한다는 의미가 아니다. 형상압연 패스계획 설계에는 방대한 량의 자료, 복잡한 공학계산, 경험지식, 설계 기술자의 기술적 판단력 등이 요구된다. 설계자가 이를 종합하여 정보화하기란 쉽지 않다. 따라서 자료의 보관, 정리, 정보화, 활용, 공학계산 등을 돕는 조직화된 기능이 요구된다. 이 기능을 설계자동화 프로그램이 지원해 주는 것이다.

Fig.1은 이러한 기능을 조직적으로 나타낸 것으로 설계 과정을 개념적으로 도시한 것이다.

### 2.1 패스계획의 대화식 창성

압연 패스계획 설계의 시작과 함께 입력해야 할 기본 데이터는 최종제품의 형상 및 크기, 소재의 초기형상 및 크기, 소재의 성질(강종), 소재의 초기온도 등이다. 최종 형상과 초기형상의 크기는, 미리 입력되어 있는 형상을 선택한 후 대화식으로 기하학적 크기 즉, 형상변수를 입력함으로써 결정된다. 물론 임의의 제품 형상을 표현할 수 있으며, 자주 사용되는 특정한 제품의 형상을 추가하여 사용할 수도 있다.

기본 데이터의 입력이 끝나면, 패스의 수를 결정하고, 각 패스의 선정 목적에 적합한 형상을 선택한다. 이 과정에서 데이터베이스내의 기존 설계 데이터의 전체 또는 일부를 직접 사용하거나

참고할 수도 있으며, 설계원리와의 적합성 등을 검증할 수 있다. 현재, Altan 등[21]이 사용한 패스 형상들이 기본 형상으로 프로그램되어 있다. 그 한 예를 Fig.2에 나타내었다. 각 패스에 적합한 형상은 설계자가 경험에 의거하여 임의로 선택할 수 있으며, 설계자의 실수에 의하여 잘못된 선택된 형상은 수정이 가능하다.

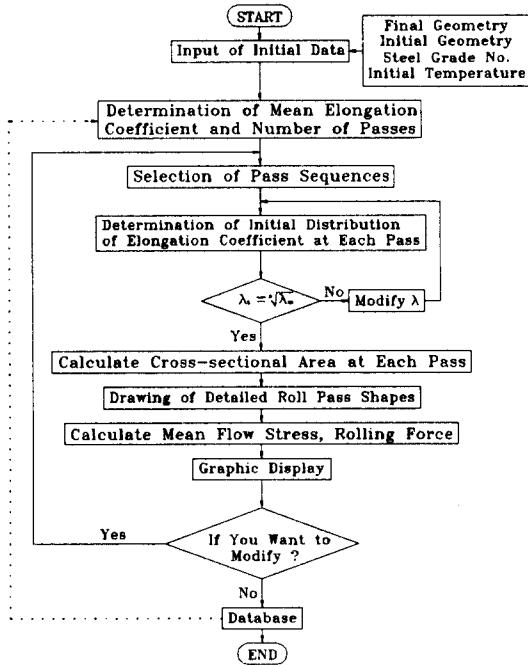


Fig.1 Roll pass schedule design procedures.

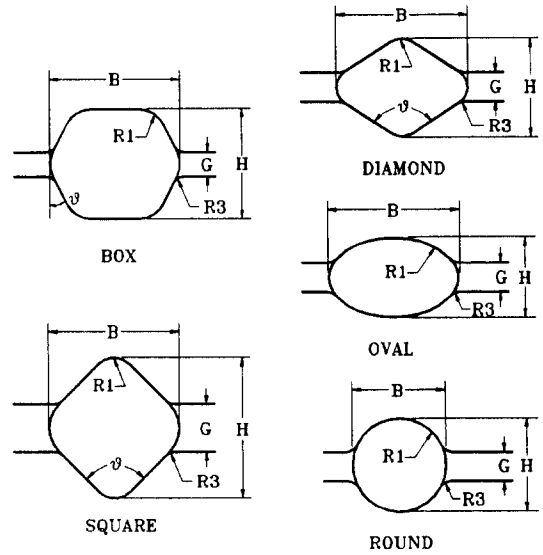


Fig.2 Various pass shapes.

패스 형상이 결정되면, 각 패스 열에 해당하는 연신계수(coefficient of elongation)가 경험데이터와 공학계산에 의해 구해진다. 계산된 연신계수는 설계자가 적절히 수정할 수 있다. 적절한 연신계수가 선택되면 이 값을 바탕으로 각 패스 형상의 단면적이 구해진다. 각 패스 형상마다 단면적이 구해지면 각 패스 형상의 연신계수와 단면적으로부터 퍼짐 공식[7-12]에 의하여 각 패스의 롤 형상에 사용되는 형상인자를 결정하게 된다. 이러한 형상인자로는 패스의 폭(b)과 패스의 높이(h), 롤 사이의 간극(roll gap) 등이 있다.

각 패스열의 상세설계가 끝나면 근사해법 및 유한요소법 등에 의하여 압하력, 소요동력 및 토오크, 유동응력 등을 계산하여 종합적으로 비교·분석을 할 수 있다. 그 결과, 설계가 부적절하면, 다시 패스열을 선택하여 설계작업을 반복한다.

롤 패스설계가 성공적으로 끝나면 전체 형상의 흐름을 한 눈에 확인할 수 있도록 프로그램되어 있으며 각 변수들에 대한 값들을 수치와 CAD 도면으로 동시에 볼 수 있다. 그 한 예를 Fig.3에 나타내었다.

## 2.2 공학계산 기능

압연 패스계획설계에는 다양한 공학해석 결과들이 필요하다. 패스 수의 계산, 각 패스당 연신량의 계산, 단면적 및 폭퍼짐량의 계산, 형상변수의 계산, 압하력의 계산, 소요동력 및 모터토크의 계산 등이 주요 설계 정보이다. 이에 관한 계산 방법은 설계 경험법칙으로 일반화되어 있는 것도 있고, 그렇지 않은 것도 있다. 상세한 계산은 유한요소법 등에 의하여 이루어질 수 있지만, 개념설계부터 이 기법에 의존할 수는 없는 일이다. 따라서 근사적으로 설계에 필요한 해석 결과를 얻는 것은 불가피하다. 현재의 자동설계 프로그램에는 이러한 기능이 충분히 갖추어져 있다.

패스의 수를 결정하는 데는 초기형상의 단면적, 최종제품의 단면적이 주요 고려 대상이 되며 Trinks[4]가 제안한 패스 수 결정 수식에 의하여 패스 수가 결정이 되거나 설계자가 경험과 설계 요구조건에 바탕을 두고 각 패스당 평균단면적감소율을 입력하여 패스 수를 결정할 수도 있다.

각 패스당 연신량의 계산 및 폭퍼짐량의 계산은 Wusatowski 등[7-11]의 공식에 의하여 계산이 된다.

형상변수의 계산은 체적일정의 법칙에 따라 각 패스당 연신량과 폭퍼짐량에 의해 구해진 단면적으로부터 평균높이와 평균넓이의 개념으로 계산된다.

압하력(roll separating force) 및 토크(roll torque)의 계산은 Geleji 등[22,4,6]의 공식에 의해 마찰계수, 압연개시온도, 물의 평균직경, 소재의 평균높이와 평균넓이, 접촉각의 길이 등의 데이터로부터 계산된다. 계산된 예를 Fig.4에 나타내었다.

개념설계가 경험공식들을 이용하여 실시된 후, 상세설계검증은 유한요소해석 기능을 이용하여 실시된다. 이에 관한 내용은 2.6절에서 취급한다.

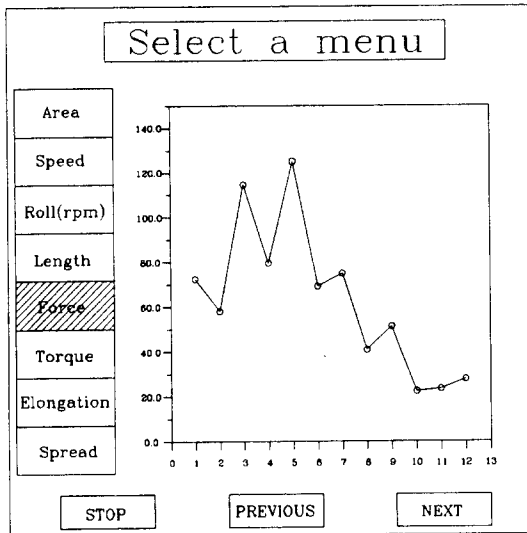


Fig.3 Graphic curves of design parameters and information.

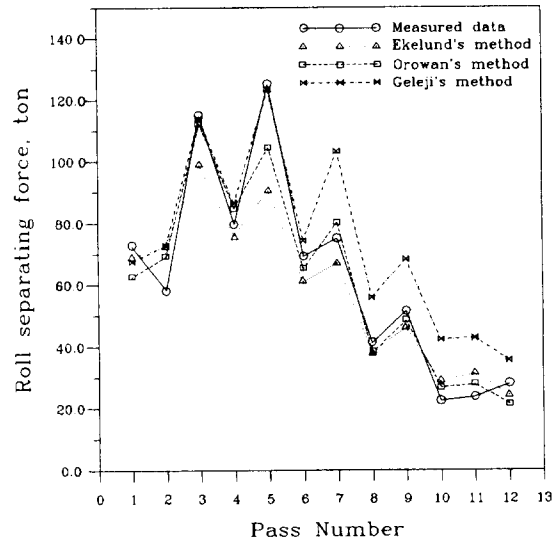


Fig.4 Variation of roll separating forces, measured and predicted.

## 2.3 정보화 및 판단 기능

전술한 바와 같이 형상압연 패스계획 설계는 현실적으로 기존의 자료 및 경험에 크게 의존할 수밖에 없다. 현재 제한적이기는 하지만, 관련 문헌으로부터 경험 기술을 접할 수 있다. 이러한 경험 기술들은 유사한 경향성을 가지고 있으나 부분적으로 큰 차이가 있는 경우도 있다. 그 원인은 생산량, 기존설계 활용여부, 신공정설계 등의 여건에 따른 환경적 요인에 기인하는 경우가 많다고 판단된다. 따라서 이러한 다양한 정보를 종합하여 가시화하고 이로부터 설계정보를 추출하는 것은 매우 중요한 문제이다. 이를 위하여 기존의 설계자료의 효율적인 관리·접근·활용을 위하여 데이터베이스를 구성해야 하며, 필요한 통계처리 기법 등이 갖추어져야 한다. 현재 본 연구 목적에 효율적인 데이터베이스를 구축하였다.

데이터베이스에는 실제공정의 데이터뿐만 아니라 참고문헌의 데이터 그리고 형상압연 패스계획 설계 자동화 프로그램으로 얻어진 데이터들이 저장되어 있다. 대화식으로 프로그램이 요구하는 변수들을 입력하면 자동적으로 데이터베이스가 구축되며, 형상압연 패스계획 설계 자동화 프로그램에 의해 얻어진 설계 데이터는 사용자의 요구에 따라 데이터베이스에 저장할 수 있다.

데이터베이스에 저장된 변수들은 다음과 같다.

- 데이터베이스 파일에 저장된 압연 공정의 총 수
- 초기빌렛의 단면형상, 최종제품의 단면형상
- 초기빌렛의 기하학적 크기, 최종제품의 기하학적 크기
- 소재 번호(강종), 소재의 초기온도
- 데이터의 유형
- 총 패스의 수
- 각 패스의 롤 형상 및 형상인자
- 설계변수와 공학계산 결과치

압연 패스계획 설계 목적으로 현재 사용중인 설계원리 및 방법을 문헌[1-19]으로부터 발굴하여 프로그램하였으며, 하드웨어 입장에서 유연성을 확보하여 사용자가 손쉽게 새로운 원리 및 원칙의 추가가 가능하도록 하였다.

## 2.4 도면화 기능

패스계획 설계 결과를 설계기준에 의하여 도면화하였으며 전체 롤 패스형상을 한 눈에 보기 위하여 적절한 사이즈로 나타내었다. 물론 실제의 패스열의 변화과정을 실감나게 볼 수 있게 하기 위하여 동일 척도로 축소 또는 확대하여 볼 수 있도록 하였다. 각 롤의 형상을 가시화할 때 필요한 롤의 변수 값들도 함께 볼 수 있도록 하였다.

패스열의 롤 형상을 도면으로 작성하는데 필요한 데이터는 형상인자로서 다음과 같다.

- 패스 형상의 폭(b)
- 패스 형상의 높이(h)
- 롤 사이의 간극(roll gap)

- 패스의 측면과 롤 칼라부 사이의 경사각( $\theta$ )
- 롤의 모서리의 반경

이러한 롤 형상인자를 이용하여 각 패스의 롤 형상을 실제 현장에서 사용되는 도면을 원칙으로 도면화하였다. 모든 도면은 직선과 곡선으로 표현되었다.

각 패스의 롤 형상을 도면화하여 저장하는 것은 아니다. 필요한 형상인자만이 각 형상에 대하여 저장되며 필요한 형상인자만 저장된 데이터로부터 부르기만 하면 도면화 할 수 있도록 프로그램되어 있다. Fig.5에 그 한 예를 나타내었다.

## 2.5 데이터베이스의 가시화

형상압연 패스계획 설계를 할 때 설계자는 기존의 패스설계 자료를 바탕으로 경험식들을 사용하여 설계를 한다. 이러한 패스설계 자료가 문서로 보관되어 있다면 참고하기에 별 어려움이 없을 것이다. 하지만 데이터가 많거나 정리되어 있지 않다면 참고하기에 어려움이 많을 것이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 데이터베이스를 구축하게 된다.

설계자가 데이터베이스에 저장된 형상압연 공정설계들을 보기 원할 때, 다음의 과정을 수행한다.

- 1) 데이터베이스 파일을 선택한다.
- 2) 데이터 유형을 선택한다.
- 3) 초기빌렛의 단면형상을 선택한다.
- 4) 초기빌렛의 치수를 선택한다.
- 5) 최종제품의 단면형상을 선택한다.
- 6) 최종제품의 치수를 선택한다.

위 순서로 선택된 형상압연의 공정은 다음과 같이 차례로 설계자에게 가시화된다.

- 1) 초기 및 최종형상의 단면적, 평균연신계수, 단면감소율, 총 패스의 수 등을 보여준다.
- 2) 전체 패스형상 즉, 각 패스에 해당하는 형상을 보여준다.
- 3) 설계변수와 공학계산 결과치를 보여준다.
- 4) 설계자가 원하는 변수를 선택하면 선택된 변수의 결과치를 그래픽곡선과 수치로 보여준다.
- 5) 각 패스열중 설계자가 원하는 패스를 선택하면 거기에 해당하는 패스의 롤 형상과 압하력 등을 보여준다.

설계자가 원하는 정보를 모두 보았을 때 다음으로 넘어가면 데이터베이스의 처음으로 되돌아가도록 되어 있으므로 계속 다른 공정들도 선택하여 볼 수 있다.

## 2.6 유한요소해석을 통한 설계의 검증

형상압연 공정의 설계 단계에서 시행오차의 최소화와 공정설계의 최적화는 매우 중요한 문제

이다. 이러한 이유로 형상압연 공정의 컴퓨터 시뮬레이션 기술이 다년간 연구되어져 왔다. 80년대 초기의 연구들은 컴퓨터 계산시간을 고려한 실용적인 차원에 연구의 초점이 맞추어진 결과, 근사 해석법이 다수 개발되었으며, 이중 일부는 공정적용에 활용되고 있다. Li 등[23]은 속도장에 대한 제한을 가함으로써 폭퍼짐을 강소성 유한요소법으로 예측하였고, Mori 등[24]은 스파브나 후판의 해석목적으로 단순화된 삼차원요소를 제안하였다. Kiefer[25]는 압연방향에 대하여 접착마찰조건으로 가정하고, 폭퍼짐방향을 접착 또는 무마찰조건으로 간주하여 후판압연 공정의 탄소성 유한요소 해석을 실시하였다. Kiuchi 등[26]은 유한요소법과 스파브법을 접목시킨 복합요소법(complex element method)을 개발하였으며, 이 방법은 Kim 등[27]에 의하여 유한스라브요소법(finite and slab element method)으로 발전되어 공정적용 연구에 사용되었다.

최근에는 컴퓨터 하드웨어의 발달로 단순화 과정이 없는 정상적인 유한요소해석 기법을 이용한 접근이 주류를 형성하고 있다. 80년대 말에는 컴퓨터의 성능 제약으로 주로 정상상태의 형상압연 공정에 관한 연구가 주류를 형성하였다[30,31]. 최근에는 비정상상태의 형상압연 공정의 유한요소해석이 컴퓨터 하드웨어 기술의 발달에 힘입어 실용화 단계에 이르렀다. Park 등[32]은 강소성 유한요소법과 일정전단마찰법칙을 사용하여 임의형상의 롤을 가진 형상압연 공정에 대한 비정상상태의 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 압연은 본질적으로 마찰구동 문제에 속하며 열간압연의 경우 마찰계수가 0.212-0.675에 이른다[4]는 사실에 비추어 마찰현상의 취급은 예측결과를 좌우할 수 있다[33]. 황상무[34]는 이러한 문제를 해결하기 위하여 별칭강소성 유한요소법을 개발하였으며, 후판압연 공정의 실수율 개선 연구에 활용하였다. 그러나 지금까지 연구의 대부분은 단일 패스의 해석에 집중되었으며, 막대한 계산시간으로 인하여 정상적인 유한요소해석 기술을 형상압연 패스계획 설계용으로 직접 활용하지는 못하였다.

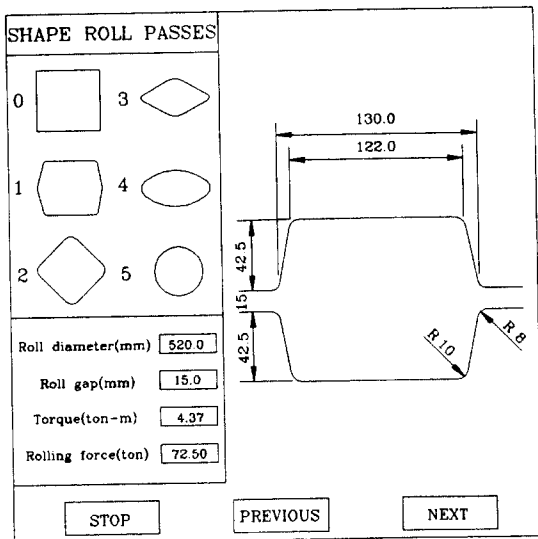


Fig.5 Drawing of detailed pass shapes.

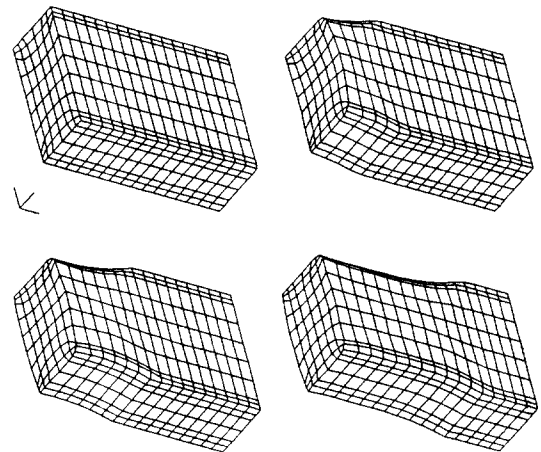


Fig.6 Finite element analysis of a box pass.

본 연구에서는 경험법칙에 바탕을 둔 형상압연 패스계획 설계 결과의 검증 목적으로 벌칙강소성 유한요소법을 사용하였다. 이를 위하여 기개발된 삼차원 벌칙강소성 유한요소법에다 임의형상의 압연롤 처리 기능을 추가하였으며, 패스계획 설계 프로그램과 자동적으로 연결되도록 하였다. Figs.6-8은 현장의 실제 공정조건하에서 등온공정이란 가정하에 얻은 결과이며, 각각 박스(box) 패스와 스퀘어-오발(square-oval)패스, 오발-라운드(oval-round)패스에 대한 유한요소해석 결과이다.

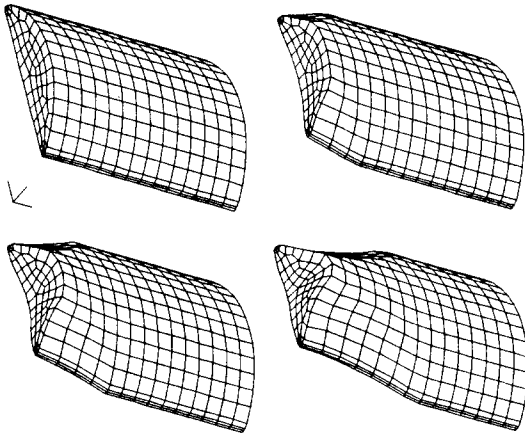


Fig.7 Finite element analysis of a square-to-oval pass.

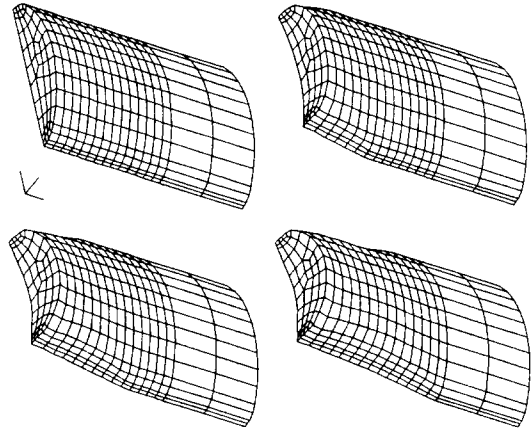


Fig.8 Finite element analysis of an oval-to-round pass.

### 3. 결론

본 연구에서는 형상압연 패스계획 프로그램을 개발하였다. 설계자가 경험을 바탕으로 대화식 방법에 의해 설계할 수 있도록 하였고, 문헌에 소개된 각종 설계 원리중 타당성이 높은 다수의 설계원리를 제공함으로써 부분적인 자동설계도 가능하도록 하였다. 경험식에 바탕을 두고 창성된 패스에 대한 소성유동 검증과 계산공식의 상세한 검증을 위하여 삼차원 벌칙강소성 유한요소법이 사용되었다. 본 연구에서 개발된 형상압연 공정설계 프로그램을 기존의 공정에 적용하여 실측결과와 비교하였다. 그 결과, 하중 등이 측정결과와 잘 일치하였다.

사실, 형상압연 공정설계는 수많은 경험의 뒷받침이 필수적이다. 설계 실패에 따른 위험 부담이 개인과 기업에 매우 크기 때문이다. 그렇다고 이 분야의 후발국가인 우리 나라에서 장비의 단순 시공/설치에만 머물러 있을 수 없는 것이 최근의 경향이다. 설계/엔지니어링 분야가 차지하는 경제적 비중이 매우 크고 고임금으로 단순 시공의 채산성이 날로 떨어지고 있기 때문이다. 따라서 연구자와 기술자의 역할은 설계/엔지니어링 기술의 자립을 위하여 모든 노력을 경주하여야 한다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 설계 보조 도구로 사용한다면, 이러한 노력에 큰 보탬이 될 것으로 기대된다.

### 후기

본 연구에서 형상압연 공정설계에 관한 내용은 삼성중공업과의 공동연구로, 형상압연 공정의 유한요소해석에 관한 연구는 학술진흥재단의 일부 지원으로 실시되었습니다.



## 참고문헌

- [1] W. Trinks, Roll-Pass Design, Volumes I and II, The Penton Publishing Company, Cleveland, Ohio, 1941.
- [2] H. Hoff, T. Dahl, Rolls and Roll Pass Design (in German), Verlag Stahleisen m.b.H./Dusseldorf, 1954.
- [3] H. Neumann, Roll Pass Design (in German), VEB Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie, Leipzig, 1969.
- [4] Z. Wusatowski, Fundamentals of Rolling, Pergamon Press, Oxford, 1969.
- [5] British Steel Corporation, Roll Pass Design, Sheffield, England, 1979.
- [6] P. S. Raghupathi, T. Altan, Roll Pass Design in Shape Rolling, German Technical Literature.
- [7] Z. Wusatowski, : Iron and Steel, Vol. 28, pp.49-54, 1955.
- [8] L. G. M. Sparling, : Proc. Inst. Mech. Eng., Vol 175, pp.604-640, 1961.
- [9] A. K. E. H. A. El-Kalay and L. M. G. Sparling, : J. Iron Steel Inst., pp.152-163, 1968.
- [10] A. Helmi , J. M. Alexander, : J. Iron Steel Inst., pp.1110-1117, 1968.
- [11] T. Sinnokura, K. Takai, : J. Applied Metalworking, Vol. II, No.2, pp.94-99, 1982.
- [12] Y. Saito, et al. : J. of the Japan Society for Tech. of Plasticity, Vol. 24, No. 273, p.1070, 1983.
- [13] G. Perotti, N. Kapaj, : Annals of the CIRP Vol. 39, pp.283-286, 1990.
- [14] P. H. Cohen, et al. : Proceedings of NAMRC-IX, Pennsylvania State College, 1982.
- [15] K. F. Kennedy, et al. : Iron and Steel Engineer, pp.50-54, 1983.
- [16] N. Akgerman, et al. : J. Applied Metalworking, Vol 1, pp.30-40, 1980.
- [17] Y. Yoshihiro, et al., "Application of Computer-aided Roll Pass Design for Rolling Bars," 1986.
- [18] H. Riegger, et al. : ASM, Vol. 3, No. 4, pp.432-438, 1985.
- [19] F. Bursal, et al. : Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 28, No. 4, pp.475-182, 1988.
- [20] 황상무, 전만수, 류성룡, 문호근 : 한국소성가공학회 '94추계학술대회논문집, pp.95-104, 1994.
- [21] T. Altan, et al., Metal Forming-Fundamentals and Applications, ASM, 1983.
- [22] A. Geleji : Archiv f.d. Eisenguttenwesen(in German), Vol. 31, NO. 10, pp.571, 1960.
- [23] G. J. Li and S. Kobayashi : Proc. NUMIFORM 82, Swansea, UK, pp.777-787, 1982.
- [24] K. Mori and K. Osakada : Int. J. Mech. Sci., 26, pp.515-525, 1984.
- [25] B. V. Kiefer, "Simulation of Three-Dimensional Deformation in Rolling by the Finite-Element Method," Tokyo, Japan, pp.1116-1125, 1984.
- [26] M. Kiuchi and Yanagimoto : Proc. 16th NAMRC, pp.34-40, 1987.
- [27] N. Kim and T. Altan : ERC/NSM-B-90-10, The Ohio State Univ., 1990.
- [28] S. M. Lee, et al. : Int. J. Mach. Tools and Manuf., 1990.
- [29] W. Shin, S. M. Lee, et al. : Int. J. Materials Processing, 1990.
- [30] K. Mori and K. Osakada, "Finite Element Simulation of Three-Dimensional Deformation in Shape Rolling," 30 1431-1440, 1990.
- [31] Y. S. Lee and P. R. Dawson, "Bulge Predictions in Steady State Bar Rolling Processes," Int. J. Num. Methods Eng., 30, 1403-1413, 1990.
- [32] J. J. Park and S. I. Oh : Trans. ASME, J. Eng. Ind., 112, 36-46, 1990.
- [33] 전만수, 문호근, 황상무 : 한국소성가공학회 '95추계학술대회, pp.233-237, 1995.
- [34] 황상무 외 2인, 고온후판압연공정의 시뮬레이션을 위한 FEM 코드의 개발, 연구보고서, 산업과학기술연구소, 1989.