압연기술의 미래개척, 이준정, 황상무 편
한국소성가공학회, 대한금속학회 1999 pp.88~97

강열점소성 유한요소법을 적용한 봉형상압연 공정설계에서의 공형 설계 및 롤속도 설정

권혁철, 김수영, 임용택
전산재료성형설계연구실
기계공학과, 한국과학기술원

Roll Groove Design and Roll Speed Set-up in Bar Rolling Process Design using Rigid-thermo-viscoplastic FEM

H. C. Kwon, S. Y. Kim and Y. T. Im
CAMP Lab., Department of Mechanical Engineering, KAIST

Abstract

In this study, a systematic approach for roll pass design in bar rolling was studied. To minimize the trial and errors in the process design, a roll CAD system and a FE analysis system were combined. Based on the system, a methodology for roll pass design by FEM was studied. At first, designed process was compared with the FE analysis results and process redesign based on the FEM results was performed to obtain the specified final geometry. Then, empirical formula for roll speed set-up was compared with the FE analysis results. Further study on various simulations for bar rolling will help in making up for the inaccuracy in the currently used empirical roll speed rules. In addition, verification of the accuracy of the FE analysis system must be performed using experimental data in the industry.

Key words: Roll groove, process design, bar rolling, effective roll radius, rigid-thermo-viscoplastic FEM

1. 서론

형상압연 공정은 일정한 단면을 갖는 구조용 혹은 기계부품용 소재를 생산하는 생산공정이다. 원형, 사각형 등의 비교적 단순한 단면 형상을 갖는 제품으로부터 H, L 등의 복잡한 단면 형상을 갖는 구조용 강에 이르기까지 다양한 소재가 생산되는데, 형상압연 산업이 국가 전체의 기간산업에서 차지하는 비중을 볼 때 그 중요성이 매우 높다고 할 수 있다. 따라서 형상압연에서의 공정설계기술의 과학화 및 체계화는 매우 중요한 과제라고 할 수 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 형상압연의 공정설계는 현장에서의 시행착오에 의한 방법에 의존하는 바가 크다. 최근 다품종/소량생산으로의 제조업의 변화의 추이에 맞추어 형상압연산업 또한 공정설계 기술의 합리화를 통해 대외적으로 제품의 경쟁력을 제고하는 것이 무엇보다도 절실한 과제라고 할 수 있다.

형상압연에 관한 기존의 연구는 현장실험을 기반으로 한 연구, 공정설계시스템 개발에 관한 연구, 그리고 유한요소법을 적용한 공정해석에 관한 연구로 나뉘어질 수 있다.

현장에서의 실험을 기반으로 한 연구로서, Wusatowski 등의 평판압연의 폭퍼짐식을 이용한 연구에서 출발한 많은 연구가 수행되었고(1-3), Shinokura 등은 봉형상압연 공정에서의 소재의 폭퍼짐 예측, 압하력 예측, 롤속도 설정 등에 관한 연구를 수행한 바가 있다(4-6). 이러한 실험결과 및 현장 경험식 등을 이용하는 공정설계 시스템의 개발에 관한 연구는 문헌에 소개된 것은 많지

않지만, Perotti 등의 설계자동화에 관한 연구(7)가 소개되고 있으며, 국내에서는 문 등과 권 등이 공정설계 시스템 개발에 관한 연구(8,9)를 수행하였다. 그리고 기존 경험식보다 더 상세한 소재유동, 압하력 등의 설계정보를 제공할 수 있는 유한요소법을 형상압연에 적용한 연구는 봉형상압연(선재 압연, bar rolling), 형강압연, 롤포밍 (roll forming) 등의 압연공정에 활발히 적용되고 있다(10-15). 유한요소해석으로부터 압연공정에 관한 상세 정보를 얻을 수 있지만 해석에 소요되는 과도한 계산시간으로 인해, 현재의 컴퓨터 속도로는 공정해석만으로 반복적인 설계안의 생성 및 수정이 필요한 공정설계를 수행하기는 어렵다. 따라서 효율적인 공정설계를 위해서는 Fig. 1과 같이 해석의 범위를 줄여줄 수 있는 초기설계 시스템과 유한요소해석 시스템의 상호 연계가 중요하며, 또한 공정설계안의 현장 적용성을 증가시키기 위해서는 현장 설계자의 설계경험이 공정설계 시스템에 반영될 수 있어야 한다. 그리고 해석결과와 설계결과는 설계자에게 피드백 되어야 한다.

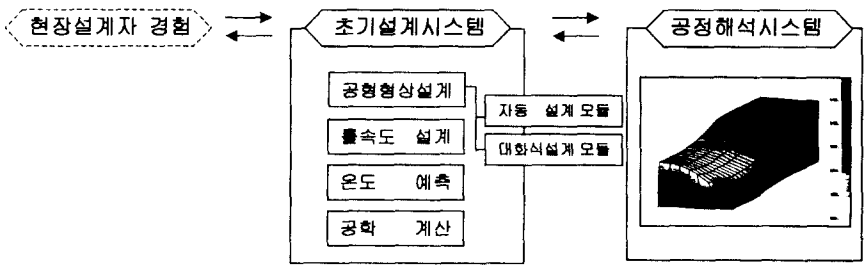


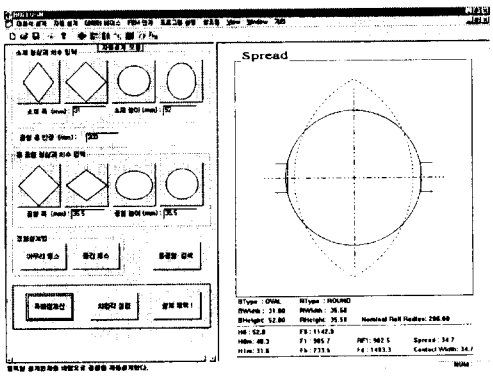
Fig. 1 Schematic flow of a systematic approach in roll pass design.

본 연구에서는 공정설계용 초기설계시스템과 유한요소해석 시스템과의 연계를 통해 봉형상압연 공정에 있어 체계적으로 공정설계를 수행할 수 있는 방안을 모색하였다. 공정설계시스템은 문헌에 소개된 실험식들을 이용하였으며, 현장에서의 설계 방법론이나 현장 설계자의 경험 등은 공정설계시스템에 고려되지는 못했다. 초기설계시스템은 크게 4개의 모듈로 이루어져 있으며 공정설계가 완료되면 해석시스템과 자동적으로 연계되어 수행된 공정안에 대한 해석을 수행할 수 있다. 이러한 접근법에 기반하여 해석결과로부터 공형의 재설계를 수행하고 이를 다시 해석을 통하여 검증해 보았으며, 또한 유효롤반경을 예측하는 경험식을 보완하는 연구의 일부로서 오발-라운드 패스의 몇 가지 공정에 대해 경험식에 의한 예측값과 유한요소해석 결과를 비교하였다.

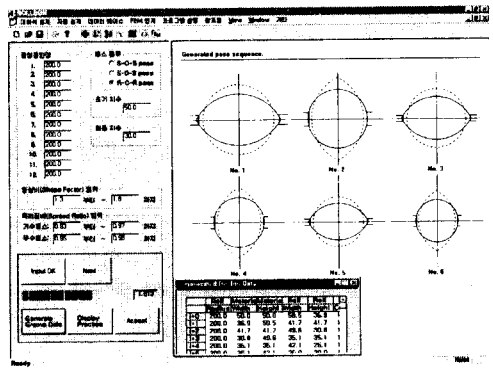
초기설계시스템은 윈도우용 프로그램으로 개발되었으며, 설계안에 대한 해석은 3차원 강열점소성 유한요소해석 코드를 이용하여 공학용 워크스테이션에서 수행하였다. 공정재설계를 위한 연속공정해석에 있어서는 해석시간의 단축을 위하여 온도 해석부분을 제외한 변형해석만을 수행하였으며, 속도설정을 위한 해석 예에서는 열전달 효과가 고려되었다. 우선 초기설계용 공정설계시스템의 개요는 다음과 같다.

2. 봉형상 압연공정 초기설계

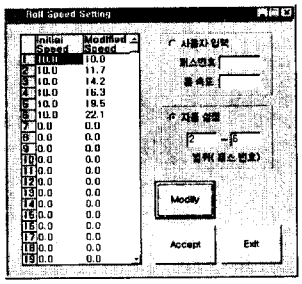
개발된 공정설계 시스템은 형상설계 모듈, 롤속도 설정 모듈, 온도예측 모듈, 그리고 공학계산 모듈로 구성되어 있다. 형상설계 모듈에서의 폭퍼짐 (spread) 예측과 공학계산 모듈에서의 공학계산은 Shinokura 등의 실험식(4,5)을 기반으로 한다. 공학계산이 수행되면 압연 공정에 대한 초기설계가 완료되며, 유한요소해석과의 연계모듈을 이용하여 유한요소 해석을 위한 입력화일이 자동적으로 생성된다. 공정설계 시에 적용되는 각 모듈의 적용 예들을 Fig. 2에 나타내었으며, 각각 대화식 공형설계 모듈, 자동설계모듈, 롤속도 설정 모듈, 온도예측 모듈, 공학계산 모듈, 그리고 유한요소해석 연계 모듈의 적용 예를 보이고 있다.



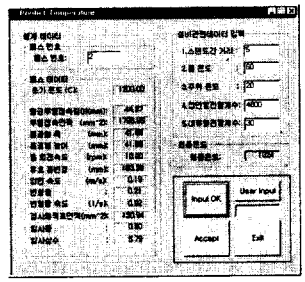
(a)



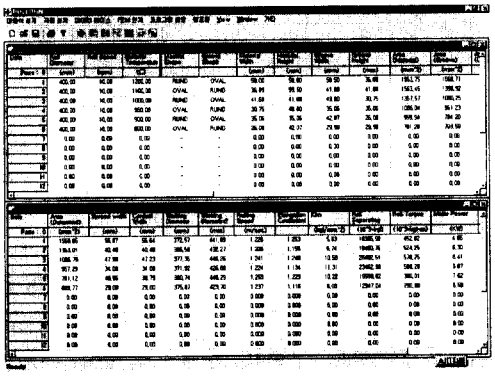
(b)



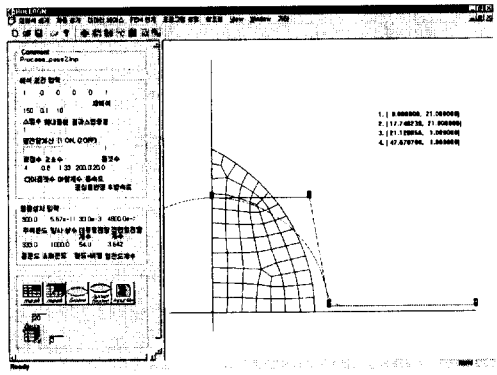
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 2 Each modules of the developed design system : (a) Interactive roll groove design, (b) Automatic roll groove design, (c) Roll speed setting, (d) Temperature prediction, (e) Engineering calculation, and (f) FEM input file generation.

롤공형 자동설계 모듈에서는 소재 형상과 설계인자들이 설정되면 자동적으로 공형설계가 수행된다. 자동설계 알고리즘의 전체적인 흐름은 Fig. 3과 같으며, 현재 설계시스템에는 라운드-오발-라운드, 스퀘어-오발-스퀘어, 스퀘어-다이아몬드-스퀘어 패스에 대한 자동설계가 가능하다. 자동설계를 위해서 소재의 초기 형상과 최종 형상이 주어지고 중간패스에서의 롤 공형의 형상비 (SF, shape factor)의 범위와 폭퍼짐비 (SR, spread ratio)의 범위가 입력되면, 폭퍼짐의 반복계산을 통해 해당 설계조건을 만족하는 모든 공정에 대한 설계안이 생성되어 디스플레이 된다. 생성된 설계

안이 두 개일 경우에는 설계안 중 하나를 사용자가 선택할 수 있으며, 자동설계 모듈은 대화식 설계모듈과 병렬적으로 적용되어 전체 공정의 설계가 수행될 수 있다.

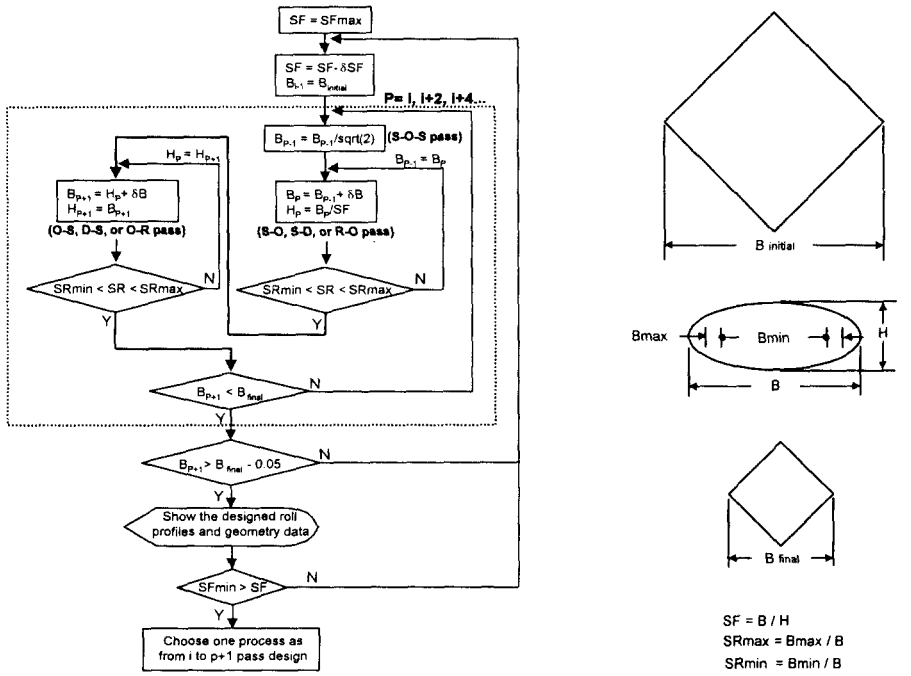


Fig. 3 Flow chart for automatic roll groove design.

자동설계의 예로서 Table 1에 나타낸 설계조건 하에서 오발-라운드-오발 패스 시퀀스에 대해 설계된 각 패스별 공형 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 이때 롤간극 및 롤간극에서의 필렛반경은 모든 패스에서 2.0mm라고 가정하였다.

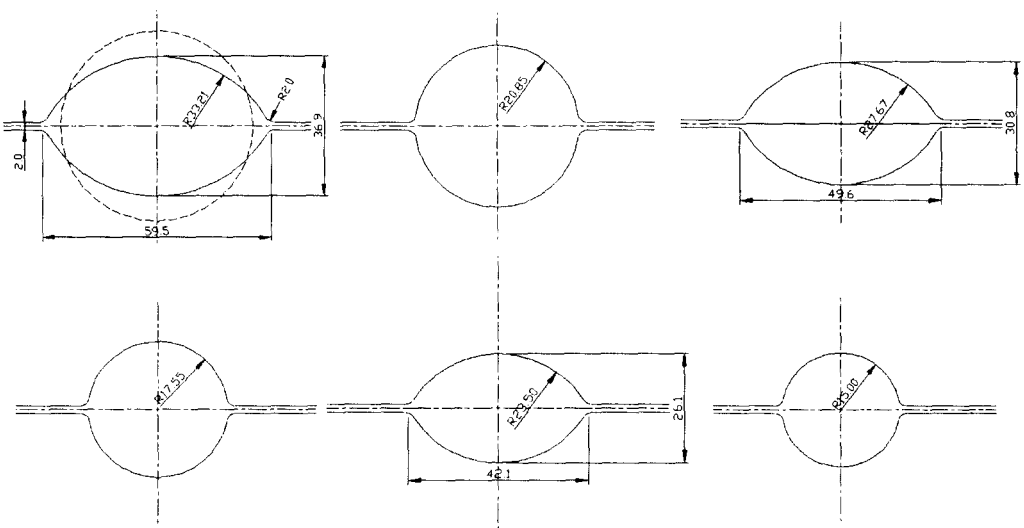


Fig. 4 Designed roll profiles using round-oval-round pass sequence.

Table 1 Design parameters used in process design in Fig. 4.

내용	설계조건	내용		설계조건
초기치수	50.0 (mm)	형상비 (SF)		1.30 ~ 1.80
최종치수	30.0 (mm)	폭퍼짐비 (SR)	기수패스	0.93 ~ 0.97
공칭 롤반경	200/200/200/200/200/200 (mm)		우수패스	0.95 ~ 0.98

형상설계가 수행된 후에 공형 형상을 이용하여 연속적으로 압연이 수행될 수 있는 각 스탠드의 롤 속도가 설정된다. 설정된 롤속도 및 압연설비 조건을 고려하여 각 스탠드의 소재의 온도가 예측되며, 이를 바탕으로 최종적으로 압하력, 롤토오크, 그리고 모터동력 등의 공학 계산이 수행된다. 설계 데이터는 공용파일의 형태로 저장되어 차후 설계에서 수정 및 활용이 가능하도록 하였다. 설계시스템으로 생성된 초기설계안의 검증을 위해 자동적으로 유한요소해석으로의 연계가 이루어지게 되는데, 이때 소재 격자 (mesh)는 스퀘어, 라운드, 오발, 다이아몬드 등의 기본 형상에 대한 2차원 격자에 대한 패턴별 매핑 (mapping)을 통하여 생성되며, 생성된 이차원 격자는 압연방향으로 지정한 격자 크기 및 개수만큼의 삼차원 격자가 생성된다. 생성된 입력파일을 이용하여 유한요소해석이 수행되는데, 이에 관련된 수식 및 내용들은 다음과 같다.

3. 강열점소성 유한요소해석

3.1 관련 이론

해석에 적용된 강열점소성 모델은 다음의 힘 및 에너지 평형식이 연계된 모델로서, 강점소성 구성방정식의 변형률속도와 편차응력의 관계인 $\sigma_{ij}' = (2\bar{\sigma}/3\bar{\dot{\varepsilon}})\dot{\varepsilon}_{ij}$를 기본으로 한다.

$$\text{힘 평형식} \quad : \quad \sigma_{ij,j} = 0 \text{ in V.} \tag{1}$$

$$\text{에너지 평형식:} \quad kT_{,ii} - \rho C_p \dot{T} + \dot{r} = 0 \text{ in V.} \tag{2}$$

여기서, σ_{ij}는 응력 텐서, T는 온도, $\dot{r}$는 마찰 및 소성일에 의한 열발생률, k, ρ, C_p는 각각 소재의 열전도계수, 밀도, 비열을 나타낸다. σ_{ij}'는 편차응력 성분, $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\dot{\varepsilon}}$ 는 각각 유효응력과 유효변형률을 나타내며 각각 $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2\,\sigma_{ij}'\,\sigma_{ij}'} = f(\bar{\varepsilon}, \bar{\dot{\varepsilon}}, T)$, $\bar{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{2/3\,\dot{\varepsilon}_{ij}\,\dot{\varepsilon}_{ij}}$로 표현된다. 여기서 $\dot{\varepsilon}_{ij}$는 $\dot{\varepsilon}_{ij} = (1/2)(v_{i,j} + v_{j,i})$로 정의되며 $v_{i,j}$는 속도성분의 편미분 값이다.

소재와 롤의 접촉면에서 수직 방향성분은 0이며, 마찰에 의한 표면력은 소재와 롤의 상대운동의 반대방향으로 결정되는데, 이에 관한 변위 및 표면력 경계조건은 다음과 같다.

$$v_n = 0 \quad \text{on} \quad S_U. \tag{3}$$

$$t_i = t_i^* \text{ on } S_F.$$

$$\mathbf{t}_f^* = -m_f k_s \frac{2}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{|\mathbf{v}_r|}{\psi}\right)\frac{\mathbf{v}_r}{|\mathbf{v}_r|} \quad \text{on} \quad S_C. \tag{4}$$

여기서 m_f와 k_s는 일정전단마찰계수 값과 소재의 전단항복응력 값이고, $\mathbf{v}_r$은 소재와 롤의 상대속도이며, ψ는 $|\mathbf{v}_r|$에 비해서 작은 크기를 갖는 양의 값으로 본 연구에서는 0.05로 설정하였다.

해석과정에서 열전달 효과를 고려하기 위해 복사에 의한 외부로의 열전달, 주위로의 대류열전달, 그리고 소재와 롤의 접촉에 의한 열전달 세 가지를 고려하였으며 이에 관한 경계에서의 열전

달 조건은 다음과 같다. 여기서 radi, conv, 그리고 cond는 각각 복사, 대류, 전도를 의미한다.

$$q_n = q_n^* = k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) \text{ on } S_q \ , \quad q_n^* = q_n^{radi} + q_n^{conv} + q_n^{cond}. \tag{5}$$

$$q_n^{radi} = \sigma_o \varepsilon_o \left(T_{env}^4 - T_{surf}^4 \right) \text{ on } S_{radi} \ , \quad q_n^{conv} = h_{env}(T_{env} - T_{surf}) \text{ on } S_{conv} \ ,$$

$$\text{and } \quad q_n^{cond} = h_{lub}(T_{roll} - T_{surf}) \text{ on } S_{cond} \ , \quad S_q = S_{radi} + S_{conv} + S_{cond}. \tag{6}$$

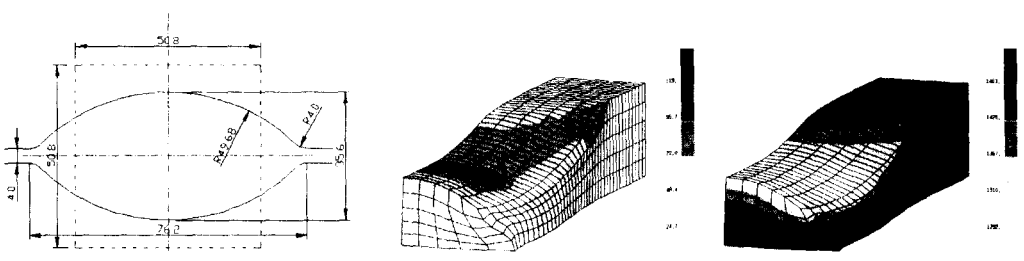
여기서 σ_o와 ε_o는 Stefan-Boltzman 상수와 방사률을 나타내고, h_{env}와 h_{lub}는 대류열전달 계수 및 소재와 롤의 접면열전달계수이며, T_{roll}, T_{surf}, T_{env}는 각각 롤의 온도, 소재표면의 온도, 그리고 주위 대기의 온도를 나타낸다. 롤 전체의 온도는 일정하다고 보고 해석을 수행하였다. 그리고 마찰 및 소성변형에 의해 발생하는 열발생률은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{r} = \dot{r}_v + \dot{r}_s \ , \quad \dot{r}_v = c\,\bar{\sigma}\,\dot{\bar{\varepsilon}} \ , \text{ and } \ \dot{r}_s = \left| \mathbf{t}_f^* \cdot \mathbf{v}_f \right| \text{ on } S_{cond}. \tag{7}$$

여기서 소성변형에너지의 90 %가 온도변화에 영향을 미친다고 가정하여 c는 0.9로 설정하였다.

3.2 공정해석 예제

위에서 언급한 구성방정식 및 경계조건들을 이용하여 공정해석을 수행하였으며 그 예로서 스퀘어-오발 패스에 대한 공정해석을 수행하였다. 이때 소재와 롤공형의 초기온도는 각각 1200 ℃와 60 ℃로, 그리고 대기의 온도는 20 ℃로 가정하였다. Fig. 5는 각각 소재 및 공형 형상, 압하 방향의 응력분포 (Mpa)와 온도분포 (K)를 나타내는데 응력의 경우 가장 많은 압하량을 갖는 부분에서 최고치를 보이며, 온도 분포의 경우 저온인 롤과의 접촉으로 인해 롤과 소재의 접촉부에서 비교적 낮은 온도가 예측되고 있다.



(a) (b) (c)

Fig. 5 FE analysis example for square-oval pass rolling : (a) Rolling geometries, (b) Stress distribution (Mpa), and (c) Temperature distribution (K).

4. 롤 공형 재설계

초기설계가 수행된 Fig. 4의 압연공정에 대한 검증을 위해 공정해석을 수행하였으며 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 해석과정에서 계산시간을 줄이기 위해 대칭조건을 적용하여 1/4 모델로 해석을 수행하였으며 격자는 460개 (23×20, 단면×길이방향)를 사용하였다. Table 2는 해석에 관련된 조건 및 소재의 물성치를 나타내었다. 소재의 응력식으로는 비교적 광범위한 열간 압연 조건에 대해 적용 가능한 Shida에 의해 제안된 유동응력식(16)을 적용하였다.

Table 2 FE analysis conditions.

내용	해석조건	비고
마찰계수(m)	0.8	모든 패스
소재온도(℃)	1000.0	모든 패스
롤속도(rpm)	10.0	모든 패스
소재 물성치	탄소함유량(%) = 0.2	formula by Shida(16)

해석과정에서 5번 패스에서 소재 격자의 과도한 변형으로 더 이상의 해석은 수행할 수 없었다. 따라서 공정설계안의 최종 패스까지의 설계 결과를 검증할 수는 없었으며 대신 4번 패스까지의 공정에서의 공형에 대한 해석결과로부터 공형의 재설계를 시도하였다. 초기설계안의 해석결과에서 Fig. 6과 같이 공형 좌우측에 미충만 (underfilling) 현상이 발생하였다.

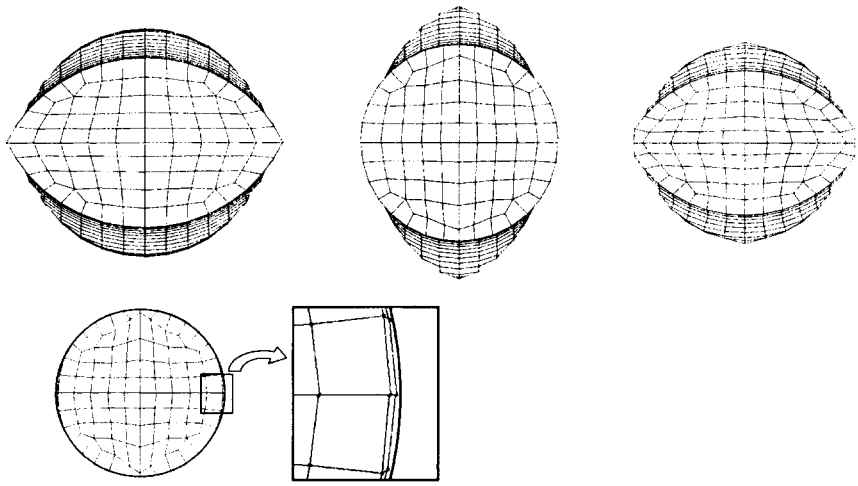


Fig. 6 Deformed mesh layouts from the initial FE analysis results for the process design in Fig. 4.

이러한 미충만 현상을 최소화하기 위한 재설계로서 3번 패스의 공형의 형상비 (공형높이/공형폭)를 증가시키는 재설계를 수행하였으며, 초기설계 및 수정된 설계안을 Fig. 7에 나타내었다. 재설계안에 따른 3번 및 4번 패스에 대한 해석결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서와 같이 미충만 현상이 많이 해소되어 최종형상인 직경 35.1mm인 원 형상에 거의 일치하여 한번의 재설계로 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

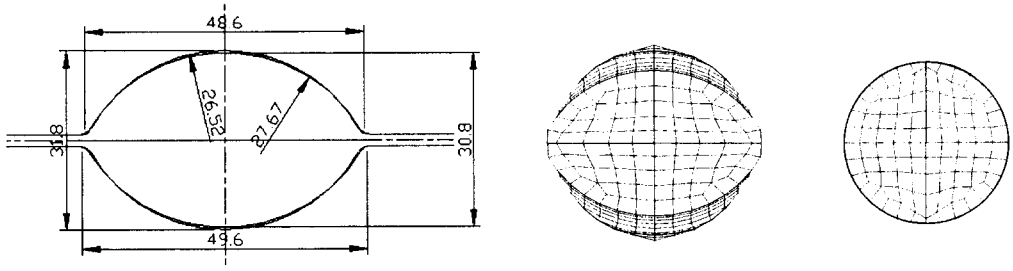


Fig. 7 Modified groove design in the 3rd pass and deformed mesh layouts.

그런데 해석과정의 과도한 계산시간을 줄이기 위해 격자 수를 비교적 작게 설정하였기 때문에 1번 패스의 소재 변형 형상에서 좌우측부에 첨단부와 같은 실제 압연 공정에서는 나타날 수 없는 형상이 예측되었다. 이는 소재 모델링 시 격자수를 증가시킬 경우 해결될 수 있으리라 생각된다. 그리고 이러한 초기설계-해석-재설계-해석이라는 접근법의 적용을 통해 유한요소해석을 이용한 방법이 초기설계안의 검증 및 재설계를 위한 유용한 툴이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 롤속도 설정

설계된 공형 형상으로부터 롤 회전속도를 설정하는데, 압연이 연속적으로 이루어지기 위해서는 각 스탠드에서의 롤속도 균형이 이루어져야 한다. 생산성은 공정설계에서 중요한 설계관점이므로 롤 속도설정에서의 정확성은 공정설계에서 중요한 고려사항이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 사용되는 기존의 경험식과 유한요소해석결과와의 비교를 통해 기존의 경험식을 보완 및 세분화하기 위한 선행연구로서 몇 가지 라운드-오발 패스에 대한 해석을 수행하였다. 먼저 현장에서 사용되는 롤 속도 설정 방법을 살펴보고 해석결과와 비교한다.

5.1 롤속도 설정에 관한 경험식

봉형상 압연의 공정설계에서 롤 속도를 설정하기 위해서는 소재와 롤의 상대운동인 슬립 (slip) 양이 고려되어야 한다. 이러한 슬립 정도는 유효롤반경 (effective roll radius)으로 표현되는데, 유효롤반경은 소재의 압연시 롤의 회전속도와의 곱으로서 소재의 압연 속도(출구측 소재 이송속도)를 결정짓는 값이다. 유효롤반경을 결정짓는 현장 경험설계법을 Fig. 8에 나타내었다.

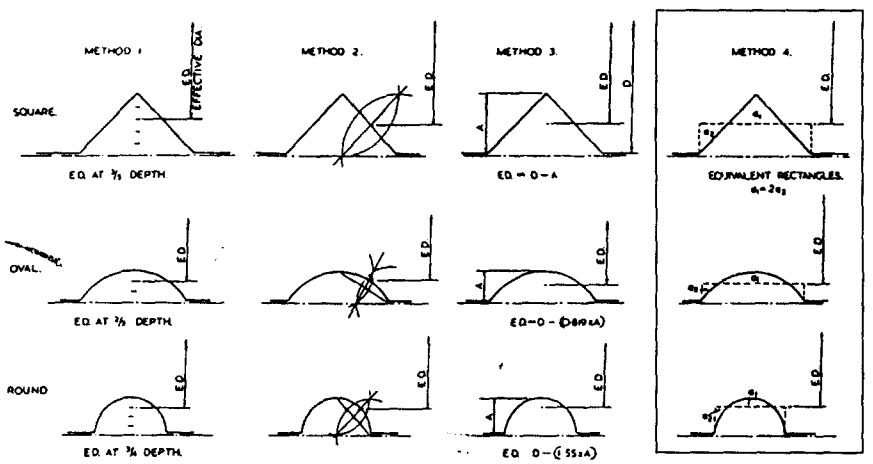
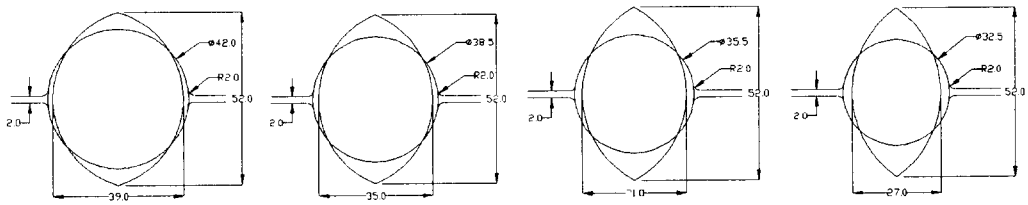


Fig. 8 Empirical formula for determination of effective roll diameter (2).

현장 설계에서는 마지막 방법인 등가사각형 변환법을 이용한 유효롤반경 결정법을 많이 적용하고 있다. 이 방법은 그림에서 보는 바와 같이 롤 공형의 형상을 동일한 면적을 갖는 등가사각형 (equivalent rectangle)로 변환한 후 소재의 중심에서 롤 중심축까지의 거리 즉 공칭롤반경 (nominal roll radius)에서 등가사각형의 높이를 제외한 값을 유효롤반경으로 결정한다. 그런데 롤과 소재의 슬립의 정도는 롤 공형형상 뿐만이 아니라 소재의 크기 및 형상에 의해서도 영향을 받을 것이므로 경험식에서 고려하지 못하는 슬립정도의 정확한 예측을 위해서 오발-라운드 패스에 관한 유한요소해석을 수행하여 경험식에 의한 예측 값과 비교하였다.

5.2 유한요소해석에 의한 유효롤반경

유효롤반경 예측을 위해 Fig. 9과 같은 소재 및 롤공형 형상을 갖는 오발-라운드 공정에 대해서 유한요소해석을 수행하였으며, 롤반경에 따른 영향을 고찰하기 위해 공칭롤반경을 200mm, 180mm, 160mm로 변화시켰다.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 9 Geometries of material and roll groove for FE analysis : (a) Case ①, (b) Case ②, (c) Case ③, and (d) Case ④.

다음은 해석이 수행된 12 가지 공정에 대한 유한요소해석 결과 및 경험식에 따른 유효롤반경 계산결과인데, 해석과정에서 4가지 공정은 과도한 격자변형으로 인해 결과를 얻지 못했다.

Table 3 Comparisons of effective roll radius between FE analysis and empirical formula.

	공칭롤반경	case	롤속도	압연속도	유효롤반경	유효롤반경**
	mm		rad/sec	mm/sec	mm	mm
1	200.0	①	8.36	1551.0	185.6	183.2
2	200.0	②	8.36	1581.9	189.3	184.8
3	200.0	③	8.36	-	-	185.8
4	200.0	④	8.36	1590.7	190.3	187.0
5	180.0	①	8.36	1381.9	165.4	163.1
6	180.0	②	8.36	1406.8	168.2	164.7
7	180.0	③	8.36	-	-	165.8
8	180.0	④	8.36	1422.2	170.2	166.9
9	160.0	①	8.36	1207.7	144.5	143.1
10	160.0	②	8.36	1237.2	148.0	144.6
11	160.0	③	8.36	-	-	145.7
12	160.0	④	8.36	-	-	146.8

(** : empirical rule - : analysis failed)

표에서 볼 수 있듯이 유한요소해석으로 예측된 유효롤반경은 등가사각형변환법에 의한 경험식에 따른 유효롤반경 값에 비해 약간씩 크게 예측되고 있다. 경험식의 경우 롤공형의 형상만이 고려되게 되어있으므로 유효롤반경 예측에 있어 일반성과 함께 정확성을 동시에 갖기에는 어렵다고 여겨진다. 즉 일정한 범위의 공정조건에 대해서는 정확히 예측할지라도 일반적인 경우들에 대해서 정확한 예측은 어렵다고 여겨진다. 이러한 문제를 해결하고자 Shinokura 등은 다양한 공정에 대한

실험을 통해서 일반성을 갖는 롤속도 설정에 관한 연구(6)를 수행한 바가 있다. 본 연구에서의 접근법인 유한요소해석을 통한 유효롤반경 예측결과는 동일한 조건하에서의 실제 실험결과와의 비교는 수행되지 못했지만 추가 연구를 통해서 실험결과와의 비교/검증을 수행하고 다양한 압연조건에 관한 해석을 수행한다면 보다 정확한 롤속도 설정식을 도출할 수 있을 것으로 생각된다.

6. 결론

본 논문에서는 봉형상압연 공정설계의 합리적 접근법을 모색하고자 공정설계시스템과 공정해석 시스템을 연계시키는 연구를 수행하였다. 이러한 연구를 통해 봉형상압연 공정설계를 지원할 수 있는 초기설계용 설계시스템을 개발하였으며, 개발된 설계시스템과 유한요소해석시스템과의 연계를 통해 초기설계안의 검증이 가능하도록 하였다. 그리고 롤속도 설정에 관한 기존의 현장 경험식을 보완 및 세분화하려는 연구의 선행연구로서 오발-라운드 패스에 대한 해석을 수행하였으며 해석결과를 경험식에 의한 예측 결과와 비교하였다.

그러나 이러한 연구에서 선행되었어야할 해석결과와 현장 실험결과와의 비교를 수행하지 못했으며, 이는 향후 추가 연구를 통해 수정 및 보완되어야 할 것으로 생각된다.

형상압연 공정설계기술의 확립을 위해서 무엇보다도 중요한 것은 문 등(8)이 언급한 바와 같이 현장 설계 경험의 뒷받침이라고 할 수 있다. 먼저 유한요소해석의 과도한 계산시간 문제는 초기설계시스템과의 연계를 통해 어느 정도 완화될 수 있지만, 수행된 설계안이 실제 공정에 적용되기 위해서는 무엇보다도 현장설비의 사양 및 특성을 알고 있는 현장 롤 설계자의 설계 노하우가 공정 설계에서 직접적 혹은 간접적으로 반영될 수 있어야 한다. 다음으로 국내에서 많은 연구가 진행중인 공정해석시스템의 신뢰성을 검증하기 위해서는 현장에서의 다양한 조업결과 및 실험결과들이 공유될 수 있어야 할 것이다. 이러한 현장데이터의 공유를 통해서 공정해석으로 해결할 수 있는 현장에서의 문제점들을 명확히 규정할 수 있을 것이며, 이를 통해서 시행착오법에 대한 의존도가 높은 국내 형상압연산업의 공정설계기술 합리화에 일조할 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

1. Z. Wusatowski, Fundamentals of Rolling, Pergamon Press. (1969)
2. British Steel Corporation, Roll Pass Design, Chorley & Pickersgill Ltd.. (1979)
3. F. Bursal et. al, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol. 28, no. 4, pp. 475-482. (1988)
4. T. Shinokura et. al, ISIJ, vol. 15, pp. 221-226. (1981)
5. T. Shinokura et. al, ISIJ, vol. 14, pp. 58-64. (1986)
6. T. Shinokura et. al, Adv. Tech. of Plasticity, vol. 11, pp. 1299-1304. (1984)
7. G. Perotti et. al, Annals of CIRP, vol. 39, no. 1. (1990)
8. H. K. Moon et. al, J. KSTP, vol. 6, no. 1, pp. 21-28. (1997)
9. H. C. Kwon et. al, Trans. KSME, vol, 22, no, 7, pp. 1336-1347. (1998)
10. T. Okada et. al, Trans. JSME, vol. 56, no. 528, pp. 173-178. (1990)
11. J. J. Park et. al, Trans. ASME, J. Engng. Ind., vol. 112, pp. 36-46. (1990)
12. H. J. Kim et. al, Proc. KSTP, pp. 134-137. (1998)
13. J. J. Park et. al, J. KSTP, vol. 4, no. 4, pp. 375-389. (1995)
14. S. M. Hong et. al, Proc. KSTP, pp. 207-212. (1999)
15. S. Y. Kim et. al, AMPT'98, pp. 950-957. (1998)
16. S. Shida, J. JSTP, vol. 10, no. 103, pp. 610-617. (1969)