152 대한기계학회논문집 A권, 제27권 제1호, pp. 152~157, 2003

# 비대칭 리브-웨브형강으로부터 대칭 리브-웨브형강으로의 열간단조 공정설계

조해용† · 이기정* · 최종웅* · 조창용** · 이학규***

(2002년 5월 13일 접수, 2002년 10월 17일 심사완료)

# Process Design for Hot Forging of Asymmetric to Symmetric Rib-Web Shape Steel

Hae Yong Cho, Ki Joung Lee, Jong Ung Choi, Chang Yong Jo and Hak Kyu Lee

**Key Words**: Process Design(공정설계), Hot Forging(열간단조), Asymmetric(비대칭), Symmetric(대칭)

**Abstract**

*Process design of hot forging, asymmetric to symmetric rib-web shape steel, which is used for the turnout of railway express has been investigated. Owing to the big difference in shape between the initial billet and the final forged product, it is impossible to hot forge the rail in a single step. Therefore, multi step forging as well as die design for each step are necessary for the production. The deformation behavior during hot forging has been analyzed by the numerical simulation through commercial FEA software, DEFORM™-2D. Modification of the design and repeated simulation have been carried out on the basis of the simulation result. For comparison with the simulation results, flow analysis experiment using plasticine has been also carried out. The results of the flow analysis experiment showed good agreement with those of the simulation. Therefore, the developed process design could be applied to the actual production.*

## 1. 서 론

열간단조는 재결정온도 이상에서 간단한 형상의 소재로부터 하나 또는 둘 이상의 공정을 통하여 최종제품을 생산해 내는 소성가공법이다. 열간단조 공정설계는 체적 일정조건을 바탕으로 금속 유동의 예측, 항복조건, 금형과 소재사이의 열전달, 마찰거동 등의 많은 변수들로 인하여 난해하기 때문에 주로 현장 설계자의 경험과 직관에 의존하여 왔다. 그러므로 설계자의 경험과 특성에 따라 각기 다른 설계 및 공정으로 인하여 많은 시행착오에 따른 시간 및 경비의 낭비를 초래할 수 있다. 최근 컴퓨터를 이용하여 공정을 설계하고 시뮬레이션하므로써 산업현장에서 발생할 수 있었던 시행착오를 줄여 금형제작에 필요한 시간과 경비를 절감하는 연구가 활발히 진행되고 있다.[1~5]

DEFORM을 이용한 해석으로 Ward 등[2]은 열차바퀴의 다단 열간단조 공정에서 소재와 금형이 받는 열영향을 해석하였고 Qingbin 등[3]은 AISI1045 디스크 고속 열간단조의 열적거동을 시뮬레이션하여 금형온도와 단조속도의 영향에 관해 연구하였다. Doege 등[4]은 스퍼기어, 헬리컬기어 및 커넥팅로드 생산을 위한 각기 다른 밀폐형 열간단조 금형에 대하여 연구하였으며, 대칭형 및 평면 변형 열간단조 공정에 관한 연구로 Choi 등[5]은 리브-웨브 형태의 제품 단조 위한 블로커를 설계할 수 있는 자동화 시스템을 개발하였다. 그러나 이들 대부분은 축대칭 및 좌우 대칭인 일반적인 것에 대한 연구였다. 최근 비대칭 및 비축대칭 제품에 대한 관심이 높아지고 있으나 아

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부
E-mail : hycho@cbucc.chungbuk.ac.kr
TEL : (043)261-2464 FAX : (043)263-2448
* LG산전(주)
** 한국기계연구원
*** (주)강원레일테크

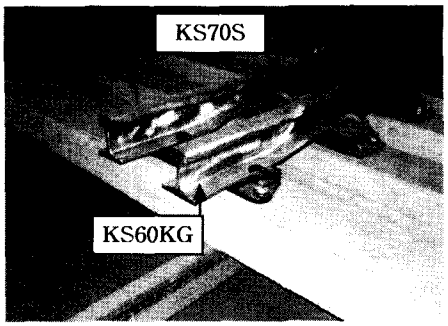
직까지 이와 관련된 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 일정한 형상으로 규격화되어 생산되는 리브-웨브형 고속철도용 비대칭 레일인 KS70S가 분기기에서 대칭 레일인 KS60KG로 형상변화하는 구간의 레일의 열간단조 공정을 강소성 유한요소 해석프로그램인 DEFORM$^{TM}$-2D로 시뮬레이션하여 공정설계 한 후, 플라스티신(plasticine)을 이용하여 유동거동을 관찰함으로써 시뮬레이션에 의한 공정설계를 검증하고자 하였다.

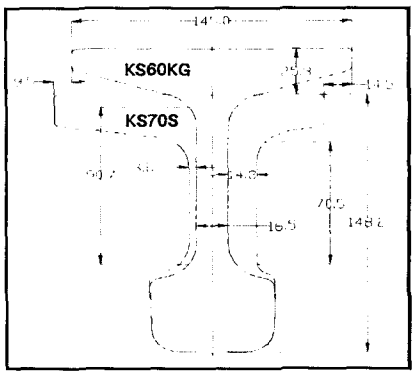
## 2. 유한요소 해석

### 2.1 해석방법

고속철도 레일의 분기기는 Fig. 1과 같은 리브-웨브형 비대칭 레일인 KS70S에서 대칭 레일인 KS60KG로의 형상변화 구간을 갖는다. Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 두 형상의 높이 차이가 크기 때문에 한번의 단조 공정으로는 성형이 불가능하다. 따라서 다단 공정을 위한 공정설계가 요구된다.




(a) Photograph of turnouts




(b) Schematic comparison of the two rail shapes

**Fig. 1** Shape of transformed parts from KS70S to KS60KG in turnouts

DEFORM$^{TM}$-2D 시뮬레이션은 Fig. 2와 같이 하부금형(Bottom_die) 위에 기본이 되는 측면금형(right & left_die) 및 상부금형(top_die)을 위치 시키고 그 위에 다시 인서트(Insert)를 삽입하여 최종형상이 되도록 하였다. 이때 KS70S는 Fig. 1(b)에서처럼 편심되었기 때문에 좌측금형 높이를 높게하고 우측을 낮게 함으로써 집중하중으로 인한 성형량을 다르게 하였다.

시뮬레이션을 위한 Pre-process로써 각각의 다이는 강체로 가정하고 좌측금형 고정, 우측금형 및 상부금형의 이송속도는 2 ㎜/s로 설정하였다. 경계조건으로써 레일의 초기온도는 1050 ℃, 금형의 예열온도는 100 ℃～200 ℃로 하였다. 레일의 예열부는 대류를 고려하지 않을 정도로 충분히 길기 때문에 금형, 인서트 및 레일에 대하여 표면 전체와 내부에서 열전도만을 고려하였다. 금형과 금형사이의 마찰상수는 0.1, 레일과 금형사이의 마찰상수는 0.3으로 설정하였으며, 재료의 열특성은 Table 1과 같다.

소재의 변형저항식으로는 유동응력(Flow stress) 식인 $\bar{\sigma} = C\,\bar{\varepsilon}^{N}\,\dot{\bar{\varepsilon}}^{M}$ 를 적용하였으며, C, N, M값은 온도에 따른 상수로써 프로그램내에 실험값으로 Data Base화 되어있는 값을 사용한다.

### 2.2 해석결과

Fig. 3은 측면금형 및 인서트의 필렛각을 45°로 했을 경우 후속공정에서 접힘현상(folding)이 발생하는 것을 나타낸 그림이다. 후속공정시 소재에서의 접힘현상 방지 및 금형과 인서트에서의 응력집중에 의한 마모를 최소로 하기 위하여 필

**Table 1** Thermal properties of materials

| Material | Thermal conductivity (N/K· s) | Heat capacity (N/m$^2$· K) |
|---|---|---|
| AISI 1055 (rail) | 27.56 | 550 |
| AISI H-13 (die) | 30 | 650 |

렛각을 60° 로 크게 설계함으로써 필렛각이 작았을 때 발생하였던 접힘현상 방지 및 응력집중을 줄일 수 있었다. Model_1,2는 접힘현상이 발생하지 않는 필렛각 60° 로 한 시뮬레이션 결과이다. Fig. 4는 상부금형에 의한 웨브 성형시 리브와 웨브가 만나는 위치에서 소재에 접힘현상이 발생하는 것을 나타낸 그림으로 상부금형의 테이퍼진 모서리의 시작 위치에 따라서 금속의 유동양상 및 접힘현상의 여부를 가늠하였다. Model_1,2는 이러한 관점에서 테이퍼 시작위치를 우측에 위치시킨 시뮬레이션 결과이다.

**Fig. 2** Schematic illustration of forging dies

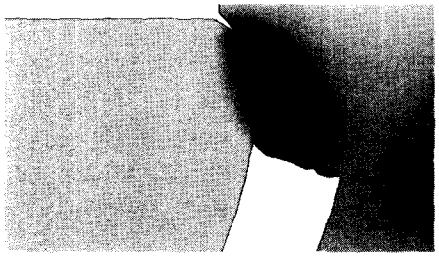


**Fig. 3** Folding initiation by small fillet angle( 45 ° ) of moving die and inserts initiation

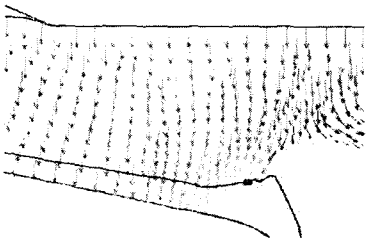
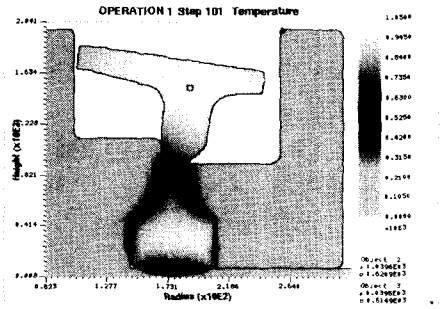
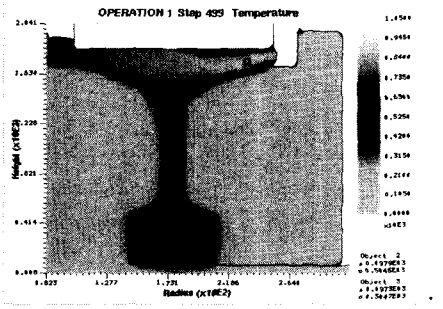


**Fig. 4** Folding initiation between rib and web by top die

시뮬레이션 결과는 전체 표면에 대한 가공여유 0.6 ㎜(model_1)와 두부쪽 가공여유 1 ㎜, 나머지 부분 0.6 ㎜(model_2)에 대한 두가지 경우에 대하여 기술하였으며, 최종형상으로의 성형과 프레스 용량을 줄이는 것에 중점을 두었다. Fig. 5는 전체 가공여유 0.6 ㎜, 다이 예열온도 100℃인 Model_1에 대한 시뮬레이션결과이다. 시뮬레이션된 최종형상은 가공여유인 0.6 ㎜내에 들었다. 그러나 Fig. 6의 하중그래프에서 제 1공정이 마무리될 때 하중이 급격히 증가함을 알 수 있었다. 이는 레일 두부의 성형이 완 료되어 금속이 다이내부를 채움으로써 접촉면적 이 증가하여 하중이 급격히 증가되었다고 판단 되었다. 따라서 성형하중 증가에 따른 프레스 용량의 증가를 피하기 위해 보다 효율적인 금형설계가 필요하다.




(a) The end of the 1st process




(b) The end of the 5th process

**Fig. 5** Simulated forging process Model_1 (die velocity 2.0 ㎜/s, preheating 100℃)

Model_1의 레일 헤드부에 의한 성형중 급격한 하중 증가를 방지하기 위한 금형이 설계되어졌으며, 이에 대한 시뮬레이션인 Model_2의 결과는 Fig. 7과 같다. 이 모델은 레일 두부쪽의 가공여유가 1 ㎜이고 두부를 제외한 전체 표면에 대해서는 0.6 ㎜ 이다. 하지만 두부쪽의 가공여유를 크게 설계함으로써 리브부분을 통해 웨브쪽으로 유동했던 두부쪽의 금속유동량이 줄어 웨브가 짧은 쪽으로 유동시켜야 할 금속량이 줄어 웨브성형을 3공정에 걸쳐 함으로써 더 많은 금속을 유동시키고자 하였다. Fig. 8은 모든 공정이 완료되었을 때 최종형상과 단조품과의 두부형상을 비교한 그림이다. 그림에서와 같이 가공여유를 포함한 최종단조품은 최종형상과 비교하여 가공여유 내에 있음을 알 수 있다.

Fig. 9(a)는 각각의 공정에서 우측다이에 작용한 하중으로 최대 하중은 약 30,000 N/㎜이다. 그림에서 알 수 있듯이 레일 헤드가 완전히 성형되는 제 1공정(Fig. 5(a), Fig. 7(a))인 경우 Model_1에서 나타난 하중의 급격한 증가는 나타나지 않았으나 제 2,3공정에서는 비슷한 양상을 보이고 있다. 이는 후속 공정으로 갈수록 성형량은 줄어들지만 소재냉각 및 접촉면적의 증가로 급격한 하중 증가에 따른 결과이다. Fig. 9(b)는 상부다이에 작용하는 하중으로 우측다이와 거의 같은 결과값이 나타났다. 따라서 요구되는 프레스 하중은 30,000 N/㎜ × 720 ㎜ / 9.8 N/kg$_f$ = 2,204,081 kg$_f$ 가 된다. 여기서 프레스 여유하중을 약 300 t$_f$를 주면 프레스 하중은 약 2500 t$_f$ 가 필요하다.

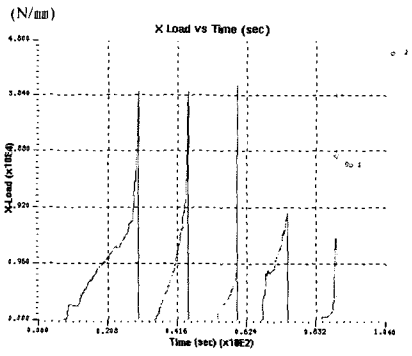
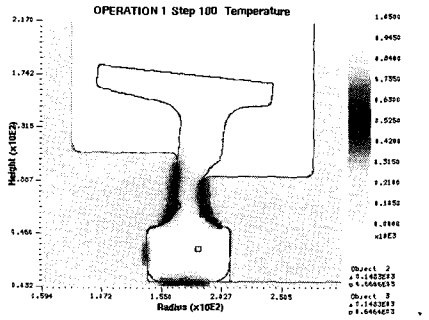
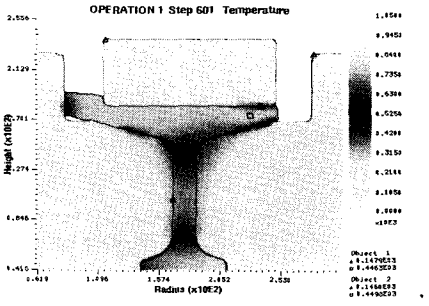



**Fig. 6** Impressed load according to the side die




(a) The end of the 1st process




(b) End of the 5th process

**Fig. 7** Simulated forging process Model_2 (die velocity 2.0 ㎜/s, preheating 200℃)

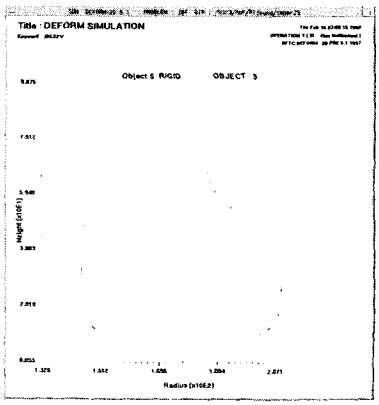
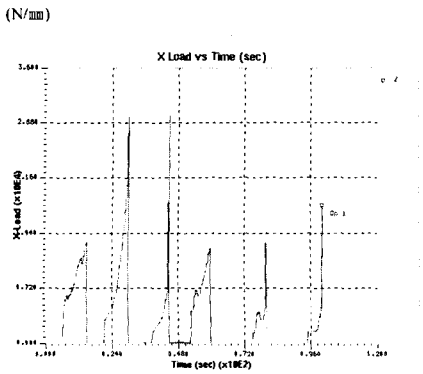
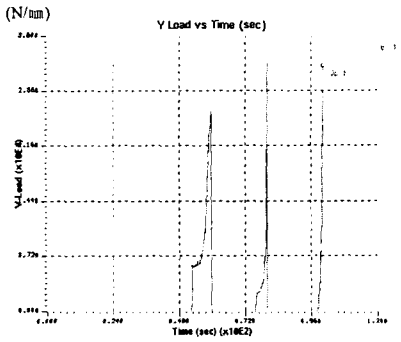



**Fig. 8** Comparisons of final forged product and desired shape




(a) Side die




(b) Top die

**Fig. 9** Impressed load according to the side and top die

## 3. 실 험

### 3.1 실험장비 구성 및 실험조건

금형 및 인서트는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 크기의 70 %로 축소하여 알루미늄합금(Al5052)으로 제작하였으며, 프레스에 고정하기 위한 지그와 측면 프레스 역할을 할 금형 이송장치를 제작하였다. 이렇게 제작된 다이 및 장치들을 Fig. 10과 같이 프레스위에 설치하였다.

시편은 플라스티신을 이용하여 흑색과 백색을 두께 3 ㎜ 판으로 만든후 Fig. 11(a)와 같이 유동방향으로 적층하고 레일 형상으로 제작하였다.

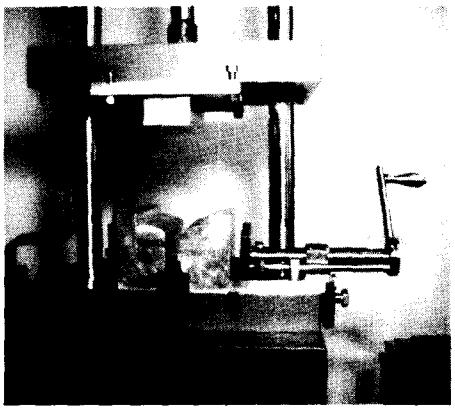
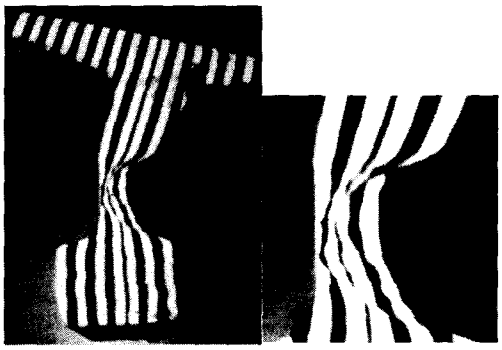
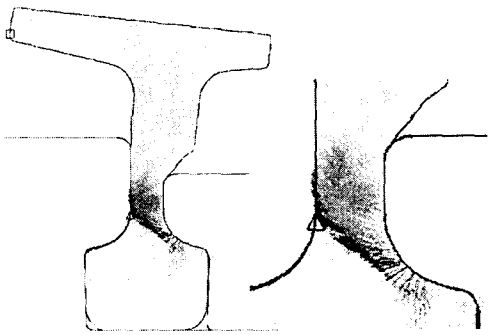


**Fig. 10** Experimental set-up



(a) Result of experiment



(b) Result of simulation

**Fig. 11** Comparisons of experimental result and FEM simulation after the first process

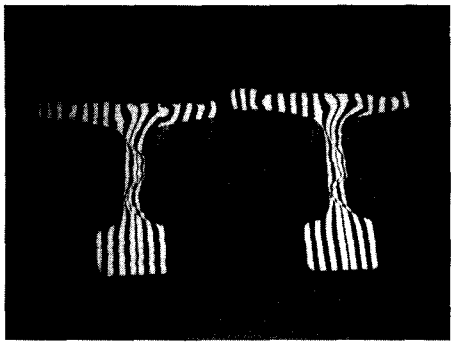


**Fig. 12** Experimental result after final stage

또한 시편과 금형간의 윤활제로 비눗물을 이용하였으며, 금형의 한쪽을 밀폐시켜 소재의 유동을 억제함으로써 평면변형 조건을 만들어 실제 공정과 잘 일치하였다.

3.2 실험결과

실험은 시뮬레이션에서의 공정 및 실험조건에 준하여 진행하였다. Fig. 11(a)는 제 1공정 완료시 플라스티신의 유동을 나타내는 그림이다. 소재는 그림에서 보는 것과 같이 고정금형이 있는 쪽으로 유동하면서 동시에 웨브쪽으로 유동하고 웨브가 짧은 쪽으로 휜다. 실험결과는 DEFORM™-2D에 의한 시뮬레이션에서 소재의 유동을 나타내는 Fig. 11(b)와 잘 일치하였다.

Fig. 12는 동일한 조건하에 실험한 두 개의 시편에 대하여 모든 공정이 끝났을 때의 단면형상이다. 소재의 유동은 공정이 진행되면서 측면고정다이 쪽으로 이동하면서 동시에 웨브쪽으로 이동하고 다시 거의 수직으로 이동한 뒤 웨브가 긴 쪽으로 이동한다. 상부금형에 의한 단조시 웨브가 긴쪽은 길이 방향으로의 축소를 나타내고 있으며 레일의 중심을 기준으로 웨브가 짧은쪽으로 소재가 유동되면서 길이 방향으로 축소하였다. 이는 시뮬레이션에서의 소재 유동과 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서의 공정설계는 시뮬레이션과 실험이 잘 일치하므로 현장적용이 가능할 것이다.

## 4. 결 론

(1) 성형중 측면 인서트 및 금형의 필렛각에 의해 생길수 있는 접힘 현상은 각을 크게 함으로써 방지 할 수 있으며 상부금형에 의해 리브와 웨브가 만나는 곳에서 생길수 있는 접힘현상을 방지하기 위해서는 금속 유동을 위한 금형의 테이퍼 시작위치를 중심선을 기준으로 웨브가 짧은 쪽에 위치하도록 설계해야 한다.

(2) 프레스 용량을 줄이기 위해서는 레일 두부의 가공 여유를 크게 해야하고 제 1공정에서 두부 성형을 완료하게 공정을 설계하여야 한다.

(3) 시뮬레이션 결과와 유동해석 실험 결과에서 유동양상이 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 설계한 공정은 현장적용이 가능할 것이다.

## 참고문헌

(1) Rodrigues, J.M.C. and Martins, P.A.F., 2002, "Finit Element Modeling of the Initial Stages of a Hot Forging Cycle," *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 38, pp. 295~305.

(2) Ward, M.J. and Miller, B.C., 1998, "Simulation of a Multi-Stage Railway Wheel and Firming Process," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 80~81, pp. 206~212.

(3) Qingbin, L. and Zengxiang, F., 1997, "Coupled Thermo-Mechanical Analysis of the High-Speed Hot-Forging Processs," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 69, pp. 190~197.

(4) Doege, E. and Bohnsack, R., 2000, "Closed Die Technologies for Hot Forging," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 98, pp. 165~170.

(5) Choi, J.C., Kim, B.M. and Kim, S.W., 1995, "Computer-Aided Design of Blockers for Rib-Web Type Forgings," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 54, pp. 314~321.