

# 생산 공정을 고려한 선박용 커넥팅로드 예비성형체의 다단 최적설계

## Multi-level design preform shape optimization of ship connecting rod considering production process

#박영철<sup>1</sup>, 강정호<sup>2</sup>, 박준홍<sup>3</sup>, \*김승규<sup>4</sup>, 백동규<sup>5</sup>, 조영직<sup>6</sup>,

#Y. C. Park(parkyc67@dau.ac.kr)<sup>1</sup>, J. H. Kang<sup>2</sup>, J. H. Park<sup>3</sup>, \*S. G. Kim<sup>4</sup>, D. K. Baek<sup>5</sup>, Y. J. Jo<sup>6</sup>,  
<sup>1,2</sup>동아대학교 기계공학과, <sup>3</sup>동아대학교 신소재 RIC센터, <sup>4,6</sup>동아대학교 대학원 기계공학과, <sup>5</sup>(주)K.S.P Inc.

Key words : Preform shape optimization, Forging process, Connecting rod, Taguchi method

### 1. 서론

선박 엔진의 크랭크축에 연결되어 회전운동을 직선운동으로 전환해주는 커넥팅로드의 성형은 제품 생산시간의 단축, 소재비용의 절감, 대량생산 등의 장점을 위해 일반적으로 열간 단조공법(forging process)을 적용한다. 단조가공으로 생산된 제품의 기계적 성질이 우수함과 대량생산이 가능한 장점에 의해 선박용 또는 자동차용 커넥팅로드나 크랭크축, 그리고 각종 기어와 같은 기계요소들의 대부분의 생산에 단조공법이 적용된다.

최적의 예비성형체 형상을 선정 후 선정된 예비성형체의 형상과 같은 공동부를 가지는 금형을 제작하여 원소재를 예비성형체로 가공하는 것이 최적의 방법이지만 실제 현장에서는 제품 생산의 비용절감의 문제로 원소재로부터 예비성형체로의 가공시 형단조를 이용하지 않고 작업자의 숙련도와 경험치에 의존하여 원소재를 금형내에서 적절히 움직이며 자유단조를 수행하여 예비성형체를 생산한다. 이 같은 작업방법은 생산비용절감에 크게 기여하지만 숙련된 작업자가 필요하며, 작업자의 주관에 의해 공정이 이루어지므로 실제 원하는 예비성형체의 형상에 가까운 제품을 제작하는데 많은 시간을 요하며, 불량률도 높으므로 최종제품의 원활한 성형을 위하여 추가의 가공이 요구되게 된다. 그러므로 자유단조를 이용한 예비성형체의 최적 공정설계가 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 1차적으로 최종제품의 적절한 예비성형체의 형상을 선정 후 다구찌 기법을 이용하여 최적의 예비성형체의 치수를 얻고 이를 토대로 2차적으로 원소재를 예비성형체로 가공하기 위한 최적 공정을 자유단조를 이용하여 제안하였다.

### 2. 다구찌기법을 이용한 예비형상(Prefom)의 최적화

예비성형체의 형상은 Fig 1과 같이 최종 제품의 부분별 단면적의 체적과 금형공동부의 플래쉬 체적을 고려하여 원으로 환산한 단면적의 조합으로 선정하였다. 선정된 예비성형체의 중요 치수를 설계변수 두고 예비성형체의 유효변형율을 목적함수로 선정하고 다구찌 기법(Taguchi method)을 이용한 최적설계를 수행하였다.

다구찌 기법에서는 잡음인자의 영향으로부터 각각의 제어인자들을 강건하게 유지하기 위해서 S/N비(Signal to noise Ratio)를 사용한다. S/N 비는 신호 대 잡음의 비율을 의미하며, 정특성인 경우 다음의 세 가지 식으로 구할 수 있다.

(1) 망대특성: 목표치가 클수록 좋은 경우

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

(2) 망소특성: 목표치가 작을수록 좋은 경우

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

(1) 망목특성: 유한한 목표값이 있는 경우

$$S/N = 10 \log \left( \frac{\bar{y}}{\sigma} \right) \quad (3)$$

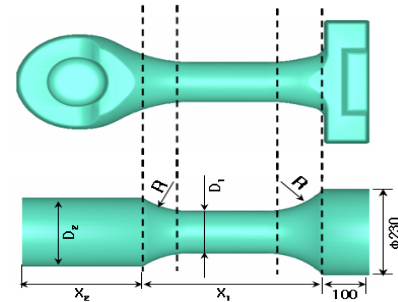


Fig. 1 Design variables for preform of connecting rod

Table. 1 Design variables and level

variables	D1 (mm)	D2 (mm)	X1 (mm)	X2 (mm)	R (mm)
Level					
1	114	175.75	370.5	247	142.5
2	120	185	390	260	150
3	126	194.25	409.5	273	157.5

Table 2 Result of analysis according to orthogonal array

No.	Design Variables(mm)					Effective Strain		
	A	B	C	D	E	P1	P2	P3
1	1	1	1	1	1	0.704	0.219	0.814
2	1	1	1	1	2	0.725	0.129	1.230
3	1	1	1	1	3	0.712	0.073	1.590
4	1	2	2	2	1	0.931	0.154	1.200
5	1	2	2	2	2	0.843	0.165	1.120
6	1	2	2	2	3	0.998	0.157	1.100
7	1	3	3	3	1	0.513	0.134	0.924
8	1	3	3	3	2	0.606	0.132	0.745
9	1	3	3	3	3	0.493	0.134	1.260
10	2	1	2	3	1	0.645	0.112	1.150
11	2	1	2	3	2	0.537	0.102	1.110
12	2	1	2	3	3	0.694	0.081	1.200
13	2	2	3	1	1	0.625	0.125	1.135
14	2	2	3	1	2	0.720	0.143	0.814
15	2	2	3	1	3	0.497	0.121	1.400
16	2	3	1	2	1	0.290	0.044	1.550
17	2	3	1	2	2	0.525	0.043	0.400
18	2	3	1	2	3	0.348	0.043	1.030
19	2	1	3	2	1	0.323	0.084	2.050
20	3	1	3	2	2	0.355	0.076	1.970
21	3	1	3	2	3	0.699	0.177	1.380
22	3	2	1	3	1	0.960	0.177	1.430
23	3	2	1	3	2	0.830	0.169	1.800
24	3	2	1	3	3	0.740	0.193	1.510
25	3	3	2	1	1	0.591	0.087	1.300
26	3	3	2	1	2	0.644	0.119	1.000
27	3	3	2	1	3	0.653	0.092	1.160

본 연구에서의 설계변수는 D1, D2, X1, X2, R의 5개이며 각 설계변수의 수준은 3수준으로 Table 1과 같이 나타내었다. 실험을 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 넣을 수 있는 장점이 있는 직교배열표를 이용하여 Table 2와 같이 해석계획을 세우고, 강소성 유한요소해석프로그램 DEFORM-3D를 이용하여 총 27회의 유한요소해석을 수행하였다.

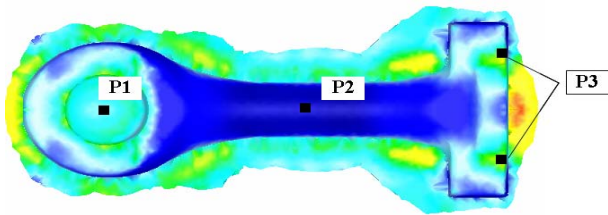


Fig. 2 Position of measuring effective strain of workpiece after 3-D simulation the

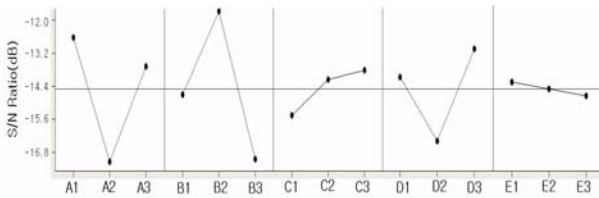


Fig. 3 Effect of Design variables on effective strain by S/N ratio

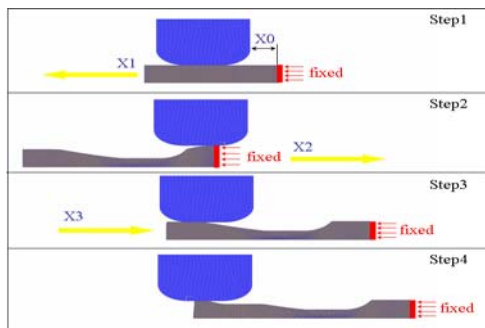


Fig. 4 2D-simulation for forging preform

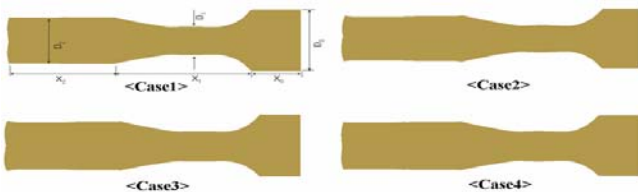


Fig. 5 Preform shape by 2-D simulation four case

Table 3 Displacement of workpiece movement

	Case1	Case2	Case3	Case4
X <sub>0</sub>	100	80	75	70
X <sub>1</sub>	200	200	140	130
X <sub>2</sub>	400	400	400	400
X <sub>3</sub>	520	520	530	540

Table 4 Displacement of preform shape by 2-D simulation four case

	X0	X1	X2	D0	D1	D2
Case1	125.3	356.8	281.6	230.4	117.2	170.4
Case2	110	357.4	307	231.6	109	178
Case3	96	362.8	316	240.7	115.8	172
Case4	103.3	382.9	278.5	230.6	112.2	182.2

열간 단조에서 최적 공정을 설계하고 결함이 없는 최종 제품을 생산하기 위해서는 금형 공동부내의 충전도와, 응력과 변형률, 변형 속도, 온도분포 등이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 그 중 변형률 값을 목적함수로 하여 최적의 예비형상의 설계 변수를 선정하였다. Fig 2에 나타낸 3지점의 해석 수행 각각의 최종 유효 변형률을 Table 2에 나타내었다. 이를 토대로 망소특성의 S/N비를 구하고 그래프로 나타내면 Fig 3과 같다. Fig 3의 S/N비 값으로부터 본 연구에서 열고자 하는 최적의 형상을 나타낼 수 있는 변수의 조합을 A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>E<sub>1</sub>로 선정하였으며, 이는 예비형상의 설계변수의 최적 설계값이 각각 D<sub>1</sub>=114mm, D<sub>2</sub>=185mm, X<sub>1</sub>=409.5mm, X<sub>2</sub>=273 R=142.5mm임을 의미한다.

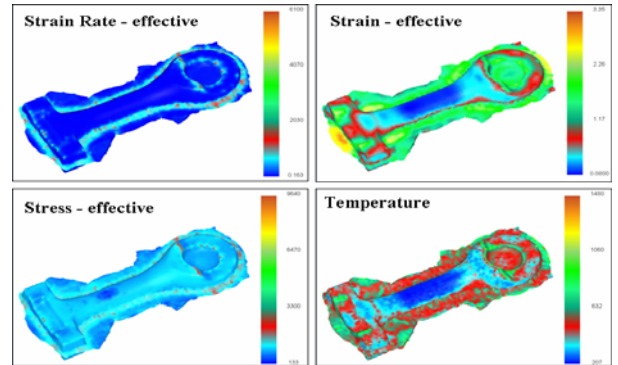


Fig. 6 Result of final 3-D simulation

### 3. 예비성형체 가공의 최적 공정 설계

실제 현장에서 예비성형체의 제작 시 예비성형체를 위한 별도의 형간조 공정이 없고 평평한 금형을 이용한 자유단조로 원통형이나 직육면체 모양의 원소재를 가공하는 경우가 대부분이다. 그러므로 최적의 치수 조건을 구하였다 하더라도 실제 현장에서는 이 치수들이 무시되고 공정이 진행되거나 추가의 가공비용 및 시간을 필요로 하게 된다. 따라서 이번 연구 단계에서는 자유단조 공정 시 금형의 타점위치를 제어함으로써 별도의 금형이나 가공비용 및 시간을 줄이고자 하였다.

커넥팅로드의 예비성형체(preform) 제작을 위한 자유단조 공정 시 원통형 원소재를 X축을 기준으로 회전시키고, 적절히 금형의 타점을 이동시키며 공정을 진행시킨다. 본 연구에서는 소재 회전에 대한 변수는 제어하지 않고 타점만을 제어하여 최적의 공정을 찾고자 DEFORM-2D를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

Fig 4는 해석의 각 단계를 나타내며 Table 3은 각 단계별 초기 원통형소재의 가로방향 이동 범위를 해석별로 나타낸다. 2차원 해석의 결과는 Fig. 5와 Table 4로 정리되며 분석결과 네 번째 해석 결과(Case4)가 1단계 연구에서 수행한 결과에 가장 근접하므로 네 번째 해석의 2차원 소재 형상을 3차원 형상으로 변환하여 최종 해석을 수행하였다. 그 결과는 Fig 6과 같다.

### 결론

본 연구에서는 선박용 커넥팅로드의 단조공정시 필요한 예비형상의 최적 치수를 다구찌 기법을 이용하여 도출하고, 도출된 예비성형체의 성형을 위한 자유단조 공정 시 요구되는 적합한 소재의 가로방향 이동량을 제어하여 예비성형체 공정의 최적설계를 수행하였다.

### 후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-01-03)지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

- H. Grass, C. Kremaszky and E. Werner, "3-D FEM-simulation of hot forming processes for the production of connecting rod", Computational Materials Science 36, 480-489, 2006
- Nagarajan Thiyagarajan and Ramana V. Grandhi, "Multi-level design process for 3-D preform shape optimization in metal forming" Journal of Materials Processing Technology 170, 421-429, 2005
- P.F.Bariani and S.Bruschi, "Modeling the forging and post-forging cooling of C70S6 conrods", Journal of Materials Processing Technology 167, 529-535, 2005
- Teruie Takemasu, Victor Vazquez, Brett Painter and Taylan Altan, "Investigation of metal flow and preform optimization in flashless forging of a connecting rod", Journal of Materials Processing Technology 59, 95-105, 1996
- Kurt Lange, "Handbook of metal forming" 3.15 - 3.23, 11.8, 11.78-11.84, 1985