

열간 단조를 이용한 플랜지의 항복강도 향상 방법에 관한 연구 An Investigation of Improving Yield Strength of Flange Using Hot Forging

*김성진¹, 이현우¹, #김철², 한승무³, 조해용⁴

*S. J. Kim¹, H. W. Lee¹, #C. Kim(chulki@pusan.ac.kr)², S. M. Han³, H. Y. Cho⁴

¹ 부산대학교 창의공학시스템 협동과정, ² 부산대학교 기계기술연구원, ³ 경희대학교 동서의료공학과, ⁴ 충북대학교 기계공학부

Key words : Hot forging, Flange, Grain size, Yield strength, Taguchi method

1. 서론

플랜지 중 용접 넥 플랜지(Welding Neck Flange)^[1], [2]는 열간 단조 공정으로 제작되는 플랜지로 파이프간의 상호연결에 사용되며 현재 공조설비, 산업기계 등의 분야에 널리 적용되고 있다. Fig.1 과 같이 용접 넥 플랜지는 플랜지 기저부의 높은 응력집중을 줄이도록 설계되어있다. 특히 심해에서 고압이 요구되는 분야에 사용되는 경우 플랜지 기저부 및 목 부분의 높은 항복강도가 요구된다. 그러나 현재 국내에 항복강도 향상을 위한 연구 및 기술 개발 현황은 미흡한 실정이며, 작업자의 경험이나 시행착오에 의존하고 있기 때문에 많은 어려움을 겪고 있다.

일반적으로 항복강도 향상을 위해 탄소함유량을 높이면 고 강도를 얻을 수 있으나, 용접이 요구되는 제품의 특성상 탄소함유량을 최대 0.47 로 제한함으로써 고용체 강화에 의한 강도 향상에는 한계가 있다. 이러한 경우 결정질 재료의 조성변화 없이 강도를 향상시킬 수 있는 결정립(Grain) 미세화 강화를 이용하여 제품의 항복강도를 향상시킬 수 있다.

최근 열간 단조를 이용한 용접 넥 플랜지 생산에 있어 소재의 화학적 조성 변화 없이 공정 조건의 최적화를 통해 항복강도를 향상시키는 방안이 요구되고 있다. 이를 위해 열간 단조의 여러가지 변수들에 대하여 최적 단조효과를 얻을 수 있는 공정 설계가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 플랜지 열간 단조에 있어 가장 중요한 업세팅비, 소재온도, 편치속도에 따른 내부 결정입자의 크기를 유한요소해석을 통해 분석하고 다구찌법을 이용하여 각 공정 변수들(업세팅비, 소재온도, 편치속도)이 결정입자의 크기에 미치는 영향도 분석을 통해 입자의 크기가 최소화되는 열간 단조공정을 제시하였다.

2. 열간 단조 공정 해석

주조 공정을 통해 얻어진 소재는 코킹, 단조, 피어싱, 열처리 공정 등을 통해 완제품이 얻어진다. 이에 대한 개략적인 공정도를 Fig.1 에서 보여주고 있다.

특히 소재에 대한 열간 단조 공정에서는 어떠한 공정조건이 적용되는지에 따라 최종 제품의 항복강도를 결정하는 중요한 단계이므로 업세팅비, 소재온도, 편치속도에 따른 결정입자의 크기를 조사하여 최적의 열간 단조 공정이 설계 되어야 한다. 업세팅비는 단조 공정후의 소재 높이에 대한 공정 전 소재의 높이비로 한다.

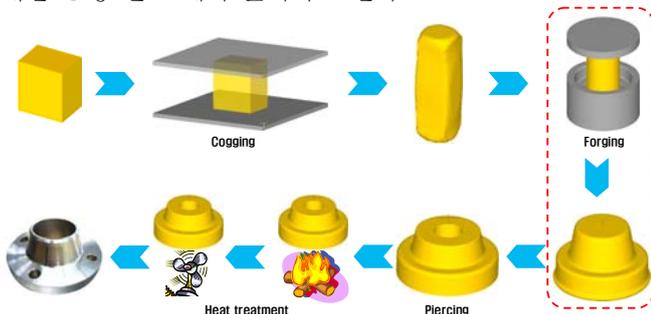


Fig. 1 Schematic diagram of hot forging process for flange

해석 모델은 원통형상의 소재로 축대칭을 고려하여 1/10 단면에 대한 단조공정 해석을 수행하였다. 단조 공정에서는 기존 단조공정에 적용되고 있는 업세팅비, 소재온도, 편치속도에 따른 플랜지 내부 결정입자의 크기를 분석하였다.

성형해석 Tool 은 강소성 유한요소해석 상용코드인 DEFORM-3D 를 사용하였고, 소재는 ASTM A694-F65 으로 JMatPro 를 이용하여 900℃, 1000℃, 1250℃ 온도에서 변형률 속도 0.01, 0.1, 1, 30sec⁻¹에 대한 유동응력을 획득하였다. 단조 공정 전의 소재 치수는 $\phi 411 \times 864\text{mm}$ 이며 소재 온도는 1250℃, 금형의 온도 200℃, 주위 온도는 25℃로 하여 단조 중 열전달을 고려하였다. 결정입자 크기변화를 관찰하기 위해 입자의 크기는 임의로 100 μm 로 초기화하였다.^[3] 편치 속도는 10mm/s, 업세팅비는 0.49 로 설정하였다.

Fig. 2 에 유한요소해석을 위한 금형과 소재의 형상을 나타내었다.

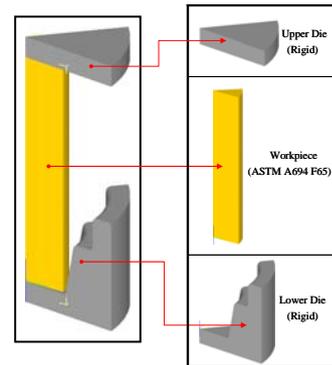


Fig. 2 Shape of die and workpiece

Fig. 3(a)는 플랜지 결정입자의 크기 분포로서 현장에서 적용 중인 경계조건을 이용하여 FEM 을 수행한 결과이다. 결정입자의 평균 크기는 69.8 μm 이며, 플랜지 기저부에서 국부적으로 결정입자가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 평균 결정입자의 크기는 Fig. 3(b)에 나타나 있듯이 27 개 위치의 평균값으로 결정하였다.

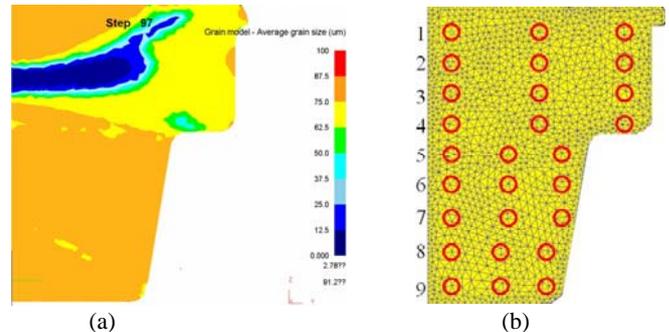


Fig. 3 Average grain size in the current process

3. 다구찌법을 이용한 열간 단조 공정 최적화

플랜지의 기저부 및 목부위의 항복강도를 높이기 위해, 결정입자 크기를 최소화 하기 위하여 열간 단조 공정에서 중요 설계인자로 선정된 업세팅비, 소재온도, 편치속

도에 대한 수준을 Table 1 과 같이 결정하였다.^{[4], [5]} 그리고 Minitab 을 이용하여 직교 배열표(L16)를 얻었다.

Table 1 Design factors for optimization

No.	Upsetting ratio	Punch speed(mm/s)	Temperature of billet(°C)
1	0.46	16	1000
2	0.43	19	1033
3	0.41	22	1066
4	0.39	25	1100

현장에 적용되고 있는 설계 기준, 경험 그리고 가공 장비의 용량을 근거로 업세팅비, 소재온도, 펀치속도의 수준을 결정하였다.

총 16 번의 유한요소해석을 통하여 평균 결정입자 크기에 대한 결과값을 얻었다. Fig. 4 는 각 인자의 결정입자 크기에 대한 주 효과를 나타내고 Table 2 는 SN 비 결과를 수치화하여 결정입자의 크기에 영향을 미치는 인자들의 순위를 나타내었다. 업세팅비가 작을수록 결정입자의 크기가 작아지는 경향을 보이며 소재온도는 1033°C, 펀치속도는 19mm/s 에서 결정입자의 크기가 가장 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이 표로부터 결정입자 크기에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 단조 공정 전의 소재온도와 업세팅비가 됨을 알 수 있었다.

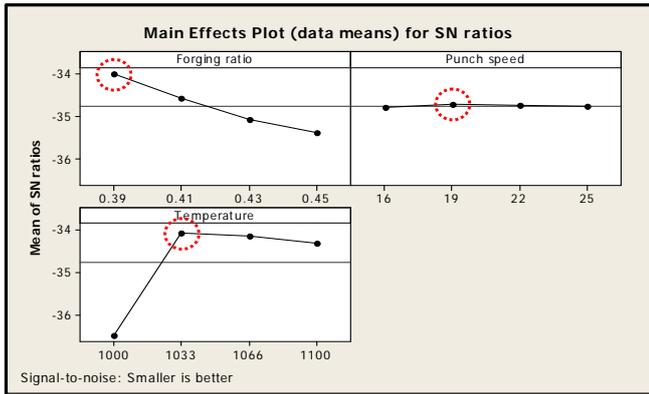


Fig. 4 Main effects plot for SN ratios

Table 2 Response Table for Signal to Noise Ratios

Level	Upsetting ratio	Punch speed(mm/s)	Temperature of billet(°C)
1	-35.40	-34.79	-36.48
2	-35.08	-34.73	-34.09
3	-35.47	-34.75	-34.15
4	-34.00	-34.77	-34.33
Delta	1.40	0.06	2.39
Rank	2	3	1

다구찌법에서 제시한 최적 공정 조건을 Table 3 에 나타내었다. 이 조건으로 FEM 시뮬레이션을 수행한 결과 평균 결정입자의 크기가 45.32 μ m 로 가장 작은 값을 얻을 수 있었다. Fig. 5(a)는 최적 공정 조건에서의 결정입자 크기 분포이며, Fig. 5(b)는 평균 결정입자 크기를 얻기 위해 결과값을 측정할 위치로 Fig. 3(b)와 동일하다. Fig. 3 과 Fig. 5 를 비교 분석한 결과 입자 미세화가 기존 공정에서는 플랜지 기저부에 집중되었으나 최적 공정조건에서는 기저부와 목부위에 걸쳐 넓게 분포하여 일어났음을 확인할 수 있다. 따라서 최적 공정조건에서 생산된 플랜지는 결정립 미세화 강화에 따라 항복강도가 증가할 것으로 판단된다.

Table 3 Optimal design values of hot forging

	Upsetting ratio	Punch speed(mm/s)	Temperature of billet(°C)
Optimal design values	0.39	19	1033

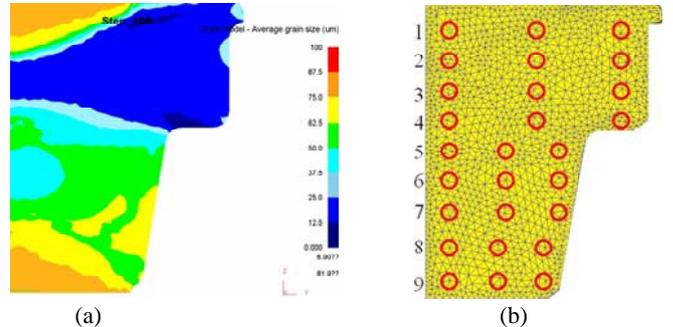


Fig. 5 Average grain size in the optimal process

4. 결론

본 연구에서는 열간 단조를 이용하여 Flange 의 항복강도를 향상시키는 방법을 결정립 미세화 측면으로 접근하였고, FEM 과 다구찌법을 이용하여 평균 결정입자 크기를 최소화하는 열간 단조 공정설계에 대한 연구를 수행하였다.

FEM 을 이용한 공정해석과 다구찌법을 통하여 플랜지의 항복강도와 밀접한 관련이 있는 결정입자 크기에 대하여 중요 설계변수의 영향도를 분석하였다. 그 결과, 결정입자의 크기에 큰 영향을 미치는 중요설계변수가 소재 온도와 업세팅비임을 알 수 있었으며, 다구찌법의 결과를 바탕으로 플랜지 기저부와 목부분의 항복강도를 향상시킬 수 있는 최적의 열간 단조 공정을 제시하였다.

결론적으로 기존의 열간 단조 공정에 의한 평균 결정입자 크기 69.8 μ m 에 비해 본 연구에서 제안한 최적 단조 공정에서의 결정입자 크기가 45.32 μ m 로서 초기 입자크기 100 μ m 를 기준으로 25%가량 더 감소함을 확인할 수 있었다. 입자 미세화 분포도 최적 공정조건에서 상대적으로 넓은 영역에 걸쳐 일어났으며 이는 플랜지의 항복강도 향상을 가져올 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- 장용석, 최진화, 고병두, 이호용, 황병복, “숫넵 플랜지의 공정설계에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 17, 127-134, 2000.
- 최간대, 강우진, 배원병, 조종래, “긴 관을 이용한 통넵플랜지 성형공정 개발에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 19, 212-219, 2002.
- 강경필, 이경훈, 이승욱, “Waspaloy 의 열간 단조 공정중 재결정 거동과 결정립 성장에 대한 유한요소해석,” 한국소성가공학회지, 17, 113-116, 2008.
- 황범철, 이우형, 배원병, 김철, “선박엔진용 초대형 열간단조품, 피스톤크라운의 단조공정 및 금형설계,” 한국소성가공학회지, 17, 600-606, 2008.
- 문호근, 문석찬, 엄재근, 전만수, “6 시그마 기법과 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 이용한 금속유동선도를 고려한 열간 단조공정의 최적화,” 한국소성가공학회지, 14, 798-803, 2005.