

6 시그마 기법과 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 이용한 금속유동선도를 고려한 열간 단조공정의 최적화

문호근¹ · 문석찬¹ · 엄재근² · 전만수[#]

Optimization of a Hot Forging Process Using Six Sigma Scheme and Computer Simulation Technology Considering Required Metal Flow Lines

H. K. Moon, S. C. Moon, J. G. Eom and M. S. Joun

(Received July 20, 2005)

Abstract

In this paper, the six sigma scheme together with the rigid-viscoplastic finite element method is employed to obtain the optimal metal flow lines of a hot forging according to the six sigma processes, *i.e.*, five steps such as define, measure, analyze, improve and control. Each step is investigated in detail to meet customer's requirements through improvement of product quality. A forging simulator is used for analysis of the metal flow lines of the hot forging, manufactured by a hot press forging machine, under various conditions of major factors determined at each step. The analyzed results are examined in order to reveal the effects of major factors on the metal flow lines and the formed shapes. The effects are then used to find an optimal process and the optimal process with die is devised and tested. The comparison between the required metal flow lines and the experiments shows that the approach is effective for optimal process design in hot forging considering metal flow lines.

Key Words : Hot Forging, Six Sigma Scheme, Computer Simulation, Process Design, Metal Flow Lines, Double Angular Ball Bearing with Frange

1. 서 론

자동차 변속기에 사용되는 구름베어링은 변속 조건에 따른 엔진의 변동 회전력을 지지하며, 기어의 상대운동으로 발생하는 마멸분(wear debris) 등에 노출되어 있다. 이러한 이유로 변속기에 사용되는 구름베어링은 이론수명보다 훨씬 짧기 때문에 베어링의 수명을 향상시키는 것은 중요한 연구과제 중의 하나이다[1].

최근 고객들이 변속기용 구름베어링에 대한 품질 및 수명 향상을 위하여 베어링 웨도(raceway)에 평행한 금속유동선(metal flow line)을 갖는 제품을 요구하고 있다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해서는 베어링 제조공정 중 열간 단조공정의 최적설계가 필수적이다.

열간 단조공정 중 금속유동선도의 제어 및 공정 설계의 목적으로 소성가공 CAE 기술이 사용되고 있다[2~3]. 그러나 플랜지불이 복렬 볼베어링

1. FAG베어링코리아(유) 연구소
2. 경상대학교 대학원 기계공학과
교신저자 : 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : msjoun@gsnu.ac.kr

(double angular ball bearing with flange) 형태의 제품은 열간 프레스 단조공정 설계 자체가 어려울 뿐만 아니라 금속유동선을 고려하여 최적의 단조공정을 얻기 위해서는 여러 가지 조건에 대해 반복 해석과 설계가 불가피하기 때문에 공정 설계에 매우 많은 시간이 소요된다. 따라서 소성가공 CAE 기술과 연계한 공정설계 생산성 향상, 즉 설계 업무의 효율화가 절실히 필요한 실정이다.

한편, 새로운 시대의 흐름에 맞춰 고객의 요구 조건이 날로 복잡하고 다양화되어 가고 있는 시점에서 신속하고 차별화된 가격으로 고객을 만족시킬 수 있는 고품질의 제품을 만들어 내는 것은 많은 기업들이 직면하고 있는 과제이다. 이러한 목표를 달성하기 위해 도입하고 있는 것이 6 시그마 기법이다[4]. 1990년대 후반 Motorola, GE 등에서 많은 성공사례를 발표한 이후, 6 시그마에 대한 연구는 많이 이루어졌으며, 6 시그마의 적용과 추진 프로세스에 대한 것들이 대부분이다. 국내에서도 최근 대기업을 중심으로 급속히 확산되고 있으며, Park 등[5]은 대용량의 제조공정 데이터의 체계적 관리와 통계적 분석을 위하여 6 시그마 기법을 이용하였으며, Seo 등[6]은 생산조립라인에 효율적인 6 시그마 구축을 위한 연구를 수행하였다. 하지만, 설계단계에서 해석에 필요한 CAE 기술과 연관된 연구결과는 아직도 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 6 시그마 기법의 핵심단계에 대하여 소성가공 공정설계 중 CAE 기술의 접목과정과 고객의 요구조건과 원가절감을 위한 공정설계의 핵심인자의 도출 방법을 기술하고자 한다. 적용예제로 플랜지볼이 복렬 볼베어링을 선택한다. 그리고 도출된 핵심인자를 바탕으로 실험계획법(Design of experiment)을 작성하여 AFDEX-2D[7]를 이용하여 해석을 수행하고자 한다. 해석결과를 바탕으로 최적 열간 단조공정을 설계하고 실 공정에 적용함으로써 6 시그마기법의 타당성을 검증하고자 한다

2. 열간 단조공정의 해석모델

본 연구에서 적용 대상으로 선정한 플랜지볼이 복렬 볼베어링을 Fig. 1에 도시하였다.

열간 단조공정 중 소재의 유동특성을 예측하기 위하여 강점소성 유한요소해석을 실시하였다. 이 기술에 관한 이론적인 배경은 참고문헌으로 대신한다[2~7].

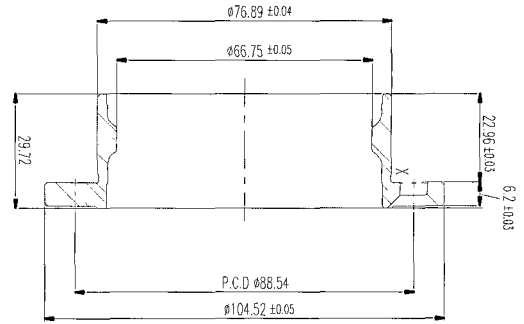
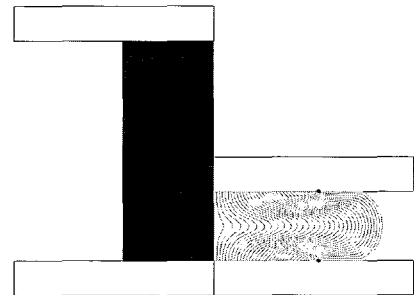
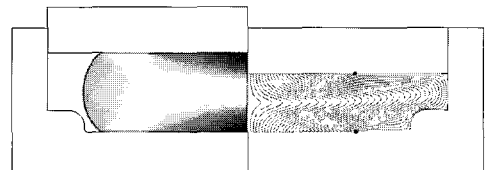


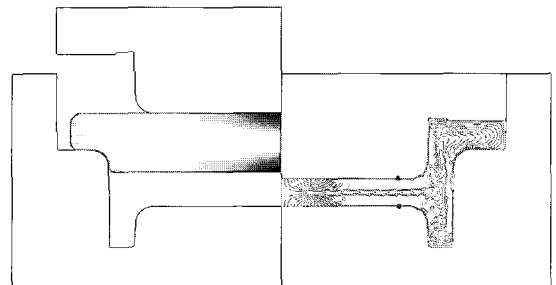
Fig. 1 A sectional diagram of the double angular ball bearing with flange



(a) First stage



(b) Second stage



(c) Third stage

Fig. 2 Schematic description of a multi-stage hot forging process

Table 1 Material property and process conditions

Material	STB2
Mean die velocity	$v = 300\text{mm/s}$
Material temperature	$T = 1150^\circ\text{C}$
Coefficient of Coulomb friction	$\mu = 0.3$
Flow stress	$\bar{\sigma} = 88.4\bar{\epsilon}^{0.136} \text{MPa}$

Fig. 2 에 변속기용 플랜지볼이 복렬 앵글러 볼 베어링에 대한 다단 열간 단조공정도를 단조시물레이션 결과를 바탕으로 나타내었다. 단조 공정 해석을 위하여 사용된 주요 공정변수와 공정조건을 Table 1 에 나타내었다. 소재는 연속단조공정 이후에 피어싱 공정을 거치게 된다.

본 연구에서는 금속유동선도가 주요 관심사이기 때문에 피어싱 공정의 해석은 생략하였으며 등은공정 가정하에서 해석을 실시하였다.

3. 6 시그마 기법의 적용 및 결과 고찰

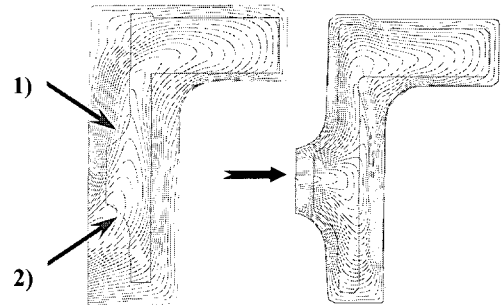
변속기용 플랜지볼이 복렬 앵글러 볼베어링에 대한 고객의 요구조건은 베어링 레도에 평행한 금속유동선도이다. 베어링의 열간 단조공정의 해석에 대하여 6 시그마 기법을 적용한다. 6 시그마에 대한 자세한 설명은 참고문헌^[4]으로 대신하며, 예제로 품질개선과 설계단계에 적용되는 일반적

인 프로세스인 정의, 측정, 분석, 개선 그리고 관리 단계에 대한 각 단계별 주요지표를 서술하고 적용방법을 기술한다.

3.1 정의 단계

먼저, 정의 단계(Define step)는 문제의 주제를 선정하고 목표 설정 및 지표화, 평가기준 등을 설정하는 단계이다.

본 연구에서는 고객의 요구조건을 만족하기 위하여 열간 단조공정의 최적화를 주제로 선정하였으며, Fig. 3 에 고객의 요구조건을 나타내었다. 그리고 주요품질특성치(CTQ, critical to quality)를 베어링 레도에 평행한 금속유동선도의 비율로 정하였다.



(a) Conventional part (b) Desirable part
Fig. 3 Customers' requirement on metal flow lines

Table 2 X-Y matrix

		Y's	Outer diameter	Thickness of flange	Metal flow	External defect	Internal defect	Side face burr	%
X's		weight	10	9	8	7	6	5	
Method	Analysis method	27	1	1	1				1.9%
	Number of element/node	54	2	2	2				3.8%
	Remesh	63	3	1	3				4.5%
	Isothermal analysis	108	3	3	4	1	2		7.7%
	Contact treatment scheme	102	3	2	5	2			7.2%
	Contact allowance limit	106	4	3	4	1			7.5%
	Friction coefficient	172	5	3	7	3	3		12.2%
	Number of stage	225	3	3	8	8	8		16.0%
	Die shape of each stage	288	4	4	10	9	9	3	20.5%
Die velocity	68	2			6			4.8%	
Material	material shape	106			7		5	4	7.5%
	flow stress	89			5	7			6.3%
Total		1408							100.0%

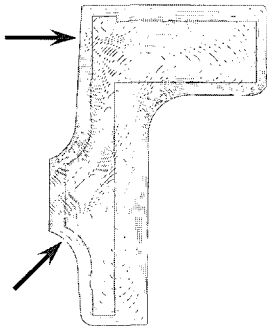


Fig. 4 Analysis result of an improved design

Fig. 3 (a)에서 1)과 2)는 베어링궤도 영역을 나타낸다. 기존의 단조품에서 궤도 1)과 2)에 평행한 금속유동선이 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 금속유동선도를 개선하기 위하여 궤도와 평행한 금형을 설계하여 해석한 결과, Fig. 4에서 보는 바와 같이 화살표로 표시된 부분에서 재료의 접침이 발생하였다. 이것이 프로젝트 선정의 동기이다.

본 연구에서는 개선 목표를 대부분의 금속유동선이 궤도와 평행한 수준인 95%로 설정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 현재의 수준은 0%이다. 즉, 기존 공정에서는 궤도에 평행한 금속유동선도가 거의 없는 상태이다.

3.2 측정 단계

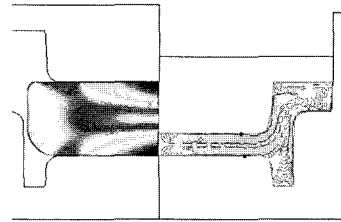
측정 단계(Measurement step)에서는 평가기준에 따른 고객의 의견을 수집하고 CTQ에 영향을 미치는 인자를 여러가지 기법(Brain storming, Process map, X-Y matrix 등)으로 조사하는 단계이다.

본 연구에서는 해석시 CTQ에 영향을 미치는 제조공정의 공정변수 및 공정조건을 정의하여 입력변수와 출력변수의 주요 관계를 단조설계전문가와 해석전문가가 브레인 스토밍에 의해 검토하였다. 그 과정을 Table 2에 나타내었다. 검토결과 CTQ에 영향을 미치는 주요 입력변수는 단조공정의 수와 단계별 단조금형의 형상으로 나타났다.

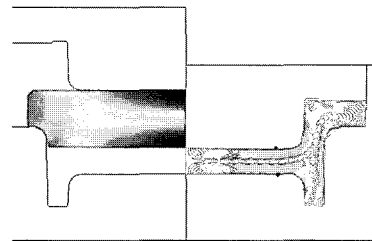
3.3 분석 단계

분석 단계(Analysis step)에서는 결함의 발생 원인을 요인별로 분석하여 핵심인자를 찾아내는 단계이다.

본 연구에서는 단조공정의 수(2 단 공정, 3 단 공

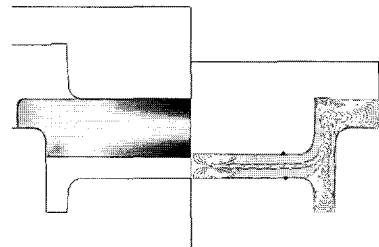


(a) 2 stages

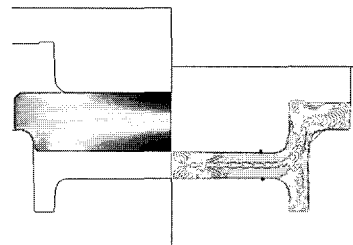


(b) 3 stages

Fig. 4 Effect of number of forging stages



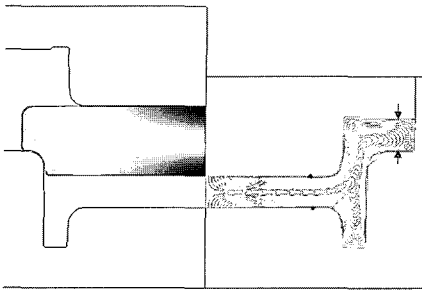
(a) Thin



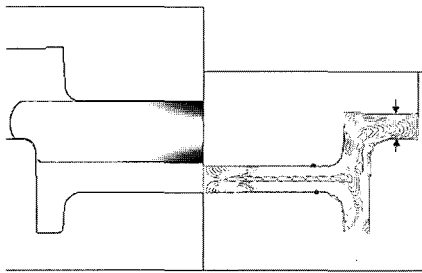
(b) Thick

Fig. 5 Effect of blank shape

정), 블랭크 형상의 차이(개방형, 밀폐형), 플랜지 두께의 차이(8.2mm, 7.2mm), 소재 투입중량의 차이(0.9kg, 1.0kg)에 따라 해석을 실시하여 핵심인자를 구하였다. Fig. 4~7에 걸쳐서 핵심인자의 영향에 관한 분석 결과를 나타내었다.

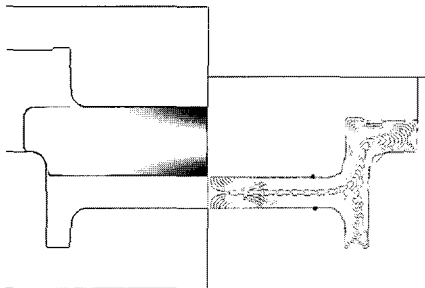


(a) 8.2mm

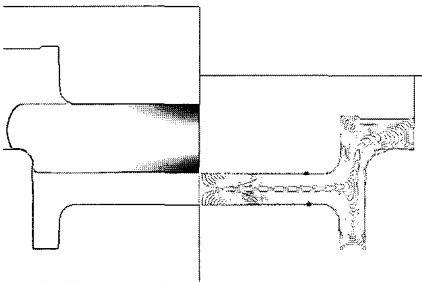


(b) 7.2mm

Fig. 6 Effect of flange thickness

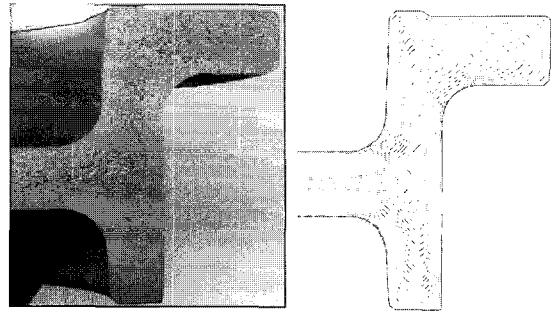


(a) 0.93kg



(b) 1.0kg

Fig. 7 Effect of weight of material



(a) Experiment

(b) Analysis

Fig. 8 Comparison of the experimental result with the analysis result of the optimal process design

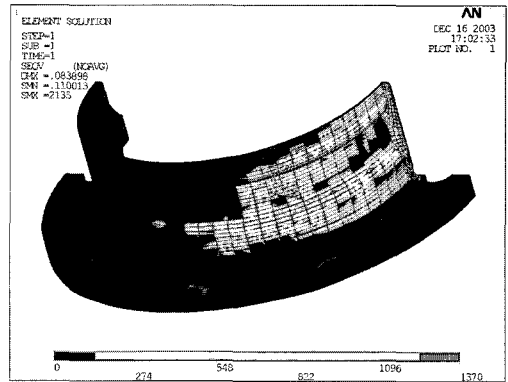


Fig. 9 Structural analysis result of the new design improved by flange thickness reduction

3.4 개선 단계

개선 단계(Improvement step)에서는 핵심인자를 설정하고 핵심인자별 인자수준을 설정하여 실험 계획법을 작성한다. 그리고 실험을 실시하여 획득한 데이터를 분석하여 최적조건을 설정한다. 마지막으로 설정된 최적조건으로 실험을 실시하여 타당성을 검증한다.

본 연구에서는 분석단계에서 밝혀진 결과를 바탕으로 단조공정의 수와 플랜지의 두께는 각각 3단 공정과 7.2mm 로 고정하였으며, 블랭크 형상과 소재 투입중량을 2 인자수준으로 설정하여 해석을 실시하였다. 해석결과를 바탕으로 최적의 단조공정을 다음 같이 설정하였다.

- 1) 단조공정의 수 : 3 단
- 2) 블랭크 형상 : 밀폐형

- 3) 플랜지 두께 : 7.2mm
- 4) 소재의 투입중량 : 0.82kg

설정된 최적 단조공정으로 금형을 제작하여 실험을 실시하였다. Fig. 8에 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타내었다. 금속유동선도와 성형형상이 거의 일치함을 알 수 있다. 최적화 결과, 플랜지 두께의 설계 변경이 필요하여 소성 유동해석 결과와 Fig. 9의 변경된 베어링 외륜 플랜지의 강도 해석결과를 고객에게 제출하였다. 그 결과, 고객으로부터 동의를 얻어 Fig. 1의 6.2mm 플랜지 두께를 5.2mm 로 변경할 수 있었다.

3.5 관리 단계

관리 단계(Control step)에서는 프로세스가 변경된 이후 주요 변수가 최대 허용한계 영역에 들어가 있는지를 통계적 프로세스로 관리하고 개선된 결과가 계속 유지될 수 있도록 관리하는 단계이다.

본 연구에서는 최적화 결과를 바탕으로 고객에게 요청하여 플랜지 두께를 변경하였으며, 새로운 선삭도면과 단조도면을 설계하였다. 그리고 본 연구의 효과분석을 실시하였다. 분석결과, 유형효과로는 원재료비 절감과 금형비 절감효과가 있었으며, 고객요구 품질 확보, 개발기간의 단축, 선삭가공 시간 단축, 관련기술의 축적과 활용 등의 무형효과가 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 플랜지불이 복렬 앵글러블베어링에 대한 고객 요구조건의 충족, 열간 단조공정의 최적화, 금속유동선도의 제어 등을 위하여 6 시그마기법과 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 이용한 설계기법을 제안하였다.

다만 열간 단조공정의 해석에 6 시그마기법을 적용함으로써 금속유동선도를 제어할 수 있는 핵심인자를 설정할 수 있었으며, 설정된 핵심인자를 바탕으로 최적의 조건을 설정할 수 있었다. 이러

한 최적 조건은 단조공정 및 금형설계에 성공적으로 활용되었다.

본 연구를 통하여 최적 공정을 개발하는데 소요되는 단조공정 해석의 수를 줄임으로써 공정개발 생산성을 크게 향상시키는 결과를 얻었다.

후 기

본 논문은 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 및 BK21 지역대학육성사업단의 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- [1] 현준수, 문호근, 박태조, 2001, 자동차 변속기용 구름베어링의 파손현상고찰(1), 한국윤활학회 춘계학술대회 논문집.
- [2] M. S. Joun, H. K. Moon, R., Shivpuri, 1998, Automatic Simulation of a Sequence of Hot-Former Forging Processes by a Rigid-Thermo viscoplastic Finite Element Method, Trans. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 120, pp. 291~296.
- [3] 문호근, 이재성, 유선준, 전만수, 2002, 베어링강의 고온변형특성과 열간 단조조건에 관한 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 159~162.
- [4] 창원특수강 6 시그마 연구회, 2002, 실행하기 쉬운 6 시그마 기법, 한국능률협회.
- [5] 박재홍, 변재현 2001, 6 시그마를 위한 대용량 공정데이터 분석에 관한 연구, 한국경영과학회 추계학술대회 논문집, pp. 411~415.
- [6] 서영주, 신현수, 함효준, 2000, 6 시그마 수준 설정에 관한 연구, 대한설비관리학회지, Vol. 5, No. 4, pp. 49~60.
- [7] M. S. Joun, M. C. Lee, 1997, Quadrilateral finite-Element Generation and Mesh Quality Control for Metal Forming Simulation, Int. J. Num. Meth. Engrg., Vol. 40, pp. 4059~4075.