

유한요소해석과 다구찌방법을 이용한 단조피스톤의 성형조건 연구

유호영^{1*}

¹울산과학기술대학교 디지털기계학부

A Study on the Forming Conditions of a Forging Piston by using the Finite Element Simulation and the Taguchi Method

Ho-Young You^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Ulsan College

요 약 본 연구에서는 다구찌 방법을 이용하고 유한요소해석을 통해 알루미늄 피스톤 제조에 큰 영향을 미치는 설계변수의 적합한 조건을 도출하였다. 단조 최대 성형하중을 목적함수로 하고 설계변수로서 예비성형체, 소재온도 및 빼기구배를 선정하였으며 마찰을 잡음인자로 하는 직교배열표를 작성하고 시뮬레이션별 유한요소해석을 통해 하중을 평가하였다. 이를 통해 설계 변수들이 미치는 영향을 분석한 결과를 바탕으로 설계변수의 최적조합조건은 제안하였다. 이러한 방법은 여러 가지 금속성형공정에서 최종 단조품 전단계에서 여러 예비성형체에서 적합한 예비성형체를 결정할 때 도움을 줄 수 있으며 특히, 최적의 설계조합을 결정할 때 쉽게 적용할 수 있을 것이다.

Abstract This paper presents design methodology to determine the design parameters that affect the manufacture of aluminum forging piston using the FE simulation and the Taguchi method. Maximum forging load is used as the objective function, and preform, material temperature and draft angle are selected as the design parameters. Their combinations are implemented by orthogonal array, and forging load is evaluated through the simulation. From the analytic results of design parameters to minimize the load using signal to noise ratio, their optimal combinations are proposed. The proposed design methodology will be able to help in selecting proper preform among preforms and to be used in determining the optimal combination of the parameters in metal forming process

Key Words : Forging Piston, FE-Simulation, Taguchi Method, Orthogonal Array, Forging Load

1. 서론

자동차 엔진부품 중에서 피스톤은 엔진의 핵심부품으로서 자동차 산업 발전과 함께 경량화 및 성능향상에 대한 연구가 시작되면서 알루미늄 피스톤이 개발되었다. 이것은 실린더 내부의 고압을 크랭크축에 전달하는 역할을 수행하며 엔진의 성능에 큰 영향을 미친다. 또한 실린더 내부의 고압력과 고온을 견디기 위해서는 필요한 열적강도 및 특성, 기계적 강도를 지녀야 하고 피스톤의 상하양

복운동시 발생하는 실린더 내벽과의 마찰에 대한 내마모 정도 우수하여야 한다. 이러한 피스톤은 금형을 이용한 중력주조, 단조 등으로 제조 생산되며[1], 최근에는 금속 분말을 이용한 분말 단조[2], 반용융 금속을 이용한 단조 [3] 등을 통한 제조 가능성이 대두되고 있다. 그런데, 종래의 주조법으로 피스톤을 제작할 때는 제품의 내부에 가스에 의한 기공(hole)이 발생할 수 있고, 금속이 집중되는 부위에서 수축공동현상이 나타날 수 있으며, 냉각속도가 불균일할 때 잔류응력에 의한 뒤틀림 현상이 발생할

*Corresponding Author : Ho-Young You

Tel: +82-10-3882-7098 email: hyyou@uc.ac.kr

접수일 12년 04월 02일

수정일 (1차 12년 04월 17일, 2차 12년 04월 23일)

게재확정일 12년 05월 10일

수 있다. 따라서, 주조시 발생하는 이러한 문제점을 해결하고 금속조직을 미세화하고 균질화하여 제품의 강도를 높이고 연신율을 증가시켜 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있는 단조공정이 적합하다고 할 수 있다.

단조공정을 통해 피스톤처럼 복잡한 형상을 가진 제품을 제조할 때 금속유동에 따른 결함, 재료의 파단, 금형의 파손 등 공정 및 금형 설계 문제에 직면하게 되며 이러한 결함 발생을 억제하기 위해서 설계변수를 고려하는 것이 매우 중요하다. 여러 가지 설계변수들의 정확한 결정과 최적 변수값을 찾는 것이 단조공정설계에서 대단히 중요하고, 이러한 측면에서 유한요소해석은 유용한 도구라 할 수 있고 중요한 설계 정보를 제공한다.

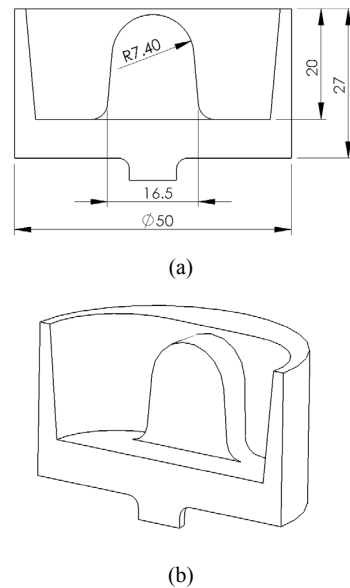
그러나 유한요소해석을 통한 공정설계는 여러 가지 설계변수에 대한 해답을 찾기 위해서 최소한의 시행착오적 시뮬레이션 절차가 반드시 필요하며, 공정의 최적화를 위해서는 더 많은 시뮬레이션이 요구된다[4]. 따라서 실험(시뮬레이션) 횟수를 줄여 시간과 비용을 최소화하고 각 변수들에 영향을 분석하여 최적의 설계조건을 도출할 수 있는 방법이 제안되었다[5,6].

본 연구에서는 금형성형공정해석에 많이 이용되는 유한요소해석과 다구찌 방법을 적용하여, 설계자의 경험에 의존한 직관적 설계를 탈피하고 알루미늄 단조 피스톤을 제조할 때 최적의 성형 조건을 제시하는 데 목적을 둔다. 최대 성형하중을 목적함수로 하여 이에 영향을 미치는 설계변수를 선정하고 다구찌방법에 의해 설계변수조합을 구하고 각각에 대해 유한요소해석을 수행하여 설계변수들이 미치는 영향과 최적의 설계변수조합을 구하고자 하였다. 이를 통해 피스톤의 단조 성형하중을 최소화하는 설계변수값을 제안하였다.

2. 성형해석 방법

2.1 제품도면

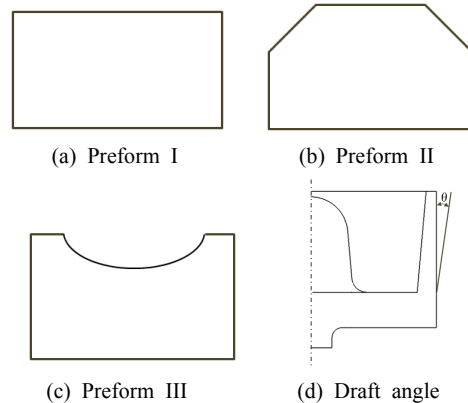
단조 공정을 통해 제조되는 피스톤의 단조 단면 도면은 그림 1(a)와 같으며, 단조의 완성품 형상은 그림 1(b)와 같다. 이렇게 단조된 피스톤은 최종적으로 기계가공을 통해 최종 제품을 얻는데 단조품의 가공을 최소화시킬 수 있도록 단조는 정형에 가까운 제품이 나오도록 단조품을 설계하는 것이 바람직하다.



[그림 1] 단조피스톤 최종 치수 및 형상
[Fig. 1] Drawing of final product and its shape

2.2 변수정의

제품 공정에서 성형하중은 금형의 파손이나 마멸 등에 영향을 미치는 인자 중 대표적인 인자이므로 최종공정에 이르기까지의 최대 성형하중을 목적함수로 선정하였다.



[그림 2] 예비성형체와 빼기구배
[Fig. 2] Preforms and draft angle

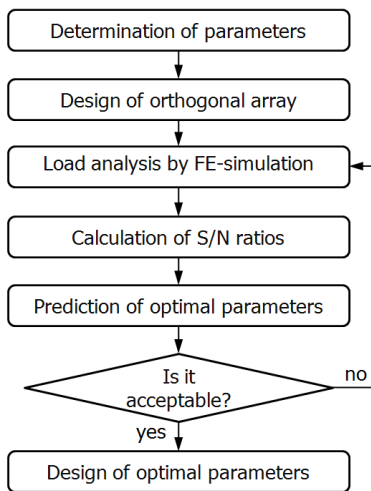
단조피스톤의 성형하중은 최종제품 전단계의 예비성형체의 형상, 소재의 온도, 단조품의 빼기구배 등에 큰 영향을 받는데, 특히 예비성형체인 경우는 단조품의 기계적 성질에 영향을 크게 미칠 뿐만 아니라 최종 단조품의 정형(Net-shape) 설계에도 매우 중요한 역할을 하는 인자이므로 예비성형체의 설계는 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 설계변수로서 위의 3가지 인자를 고려하였다. 그리고 금형과 소재표면사이의 마찰 가변성을 잡음인자로 설정하여 이러한 잡음아래에서 설계변수의 영향을 살펴 보았다.

그림 2는 예비성형체의 형상과 최종 단조제품의 빼기 구배를 보여주고 있다.

2.3 해석절차

형상이 복잡한 피스톤의 경우 한번의 가공으로 제품을 만들기가 쉽지 않기 때문에 최종제품을 얻기 위해 예비 성형체를 두어 성형하중을 감소시키고, 응력과 변형률을 작게 하여 파괴가 이루어지지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 다구찌방법과 유한요소해석을 적용하여 적합한 예비성형체의 설계를 비롯하여 단조피스톤 성형에 요구되는 설계 변수를 도출하고자 하였다.



[그림 3] 최적변수 설계 절차
 [Fig. 3] Design procedure of optimal parameters using FE-Simulation

[표 1] 설계 변수(인자)와 수준

[Table 1] Levels of design parameters

Design parameters	Parameters	Preform(A)	Material temperature(B, °C)	Draft angle(D, °)
	Level			
	0	I	400	0.5
	1	II	440	1.0
	2	III	480	1.5
Noise factors	Factors	Friction coefficient(M, 0.3)		
	Level			
	0		-3%	
	1		+3%	

그림 3에서 최적 변수를 설계하기 위한 해석절차를 보여주고 있다. 최초로 설계 변수와 변수 수준을 결정하고 직교배열표를 구성한다. 직교배열표상의 설계변수 조합으로 유한요소해석을 수행하고 최대성형하중을 분석한다.

그리고, 각 설계변수조합이 가지는 특성치를 다구찌 방법을 사용하여 SN(Signal to noise)비를 계산하고 최적의 변수를 예측한다. 예측된 설계조합 변수에 대해 유한요소해석을 수행하여 SN비를 다시 계산하고 수락할 수 있는 범위라면 최적 설계 변수 조합으로 선정한다.

2.4 다구찌방법 적용

다구찌 방법은 모든 산업분야에 적용 가능한 최적화 실험 설계 기법으로 대상 실험의 수행시간과 비용을 최소화시키고, 그 분석에서도 기존 방법보다 더욱 효율적인 최적조건을 도출할 수 있다. 이것은 SN비를 중심으로 한 통계적 분석을 사용하여 기존 데이터 분석보다 효율적인 효과를 얻을 수 있는데, 설계 목적에 따라 망목특성, 망대 특성, 망소특성이 있다. 본 연구에서 고려한 망소특성은 아래식과 같다.

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

여기서, n 은 잡음인자를 고려하여 설계변수조합으로 반복 수행한 시뮬레이션 횟수를 나타내며, y 는 특성치를 나타낸다.

표 1은 설계변수(제어인자)와 잡음인자를 나타내고 있다. 설계변수는 예비성형체, 소재온도, 빼기구배로 3수준으로 적용하였으며 잡음인자로서 금형과 소재사이의 마찰계수로 2수준으로 설정하였다. 설계변수가 3개이고, 모두 3수준이므로 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 선택하였다.

2.5 유한요소해석

금속재료의 소성가공시 발생하는 변형률은 매우 작으므로 소성가공해석시 탄성변형률을 무시하여 강소성(rigid-plastic)으로 가정할 수 있다. 본 연구에서는 알루미늄 단조 피스톤의 성형해석을 위해 상용 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D™를 사용하였다. 이 프로그램은 금속성형 해석을 위해 범용적으로 사용되는 소성변형 해석 도구이다[7,8]. 유한요소해석은 잡음인자를 고려하여 동일한 설계조합에 대해 2번의 시뮬레이션을 수행하였다. 아래 표 2는 재료의 물성치와 해석에 사용된 입력 데이터를 나타낸다.

[표 2] 유한요소해석 데이터

[Table 2] Data for FE-simulation

Heat Capacity($N/mm^2/^\circ C$)	2.4337
Heat Conductivity($N/s/^\circ C$)	180.181
Convection Coefficient ($N/s/mm/^\circ C$)	0.02
Emissivity	0.7
Heat Transfer Coefficient ($N/s/mm/^\circ C$)	11.0
Material Temperature($^\circ C$)	400, 440, 480
Die Temperature($^\circ C$)	210
Environment Temperature($^\circ C$)	20
Friction Coefficient	0.3
Die Velocity(mm/s)	40

본 해석에서는 피스톤의 대칭성을 고려하여 1/2형상에 대하여 해석이 수행되었다. 격자의 크기는 모든 공정에서 동일하게 적용하였으며 소재의 각 예비성형체 온도는 400 $^\circ C$, 440 $^\circ C$, 480 $^\circ C$ 로 하였다. 금형의 온도는 210 $^\circ C$ 로 하고 속도는 40mm/s로 모든 공정에서 동일하며, 금형은 강체이고 소재의 탄성변형은 무시하였다. 상형과 소재 및

하형과 소재사이에서 마찰조건은 일정하다고 보고 금형과 소재의 접촉면에 일정단단마찰이 작용하는 것으로 하였다. 마찰계수는 열간단조일 경우에 있어서 윤활제가 사용시 0.2~0.3정도이고, 미사용시는 0.7~0.9정도 사용하는데 여기서는 윤활제를 사용하는 것으로 보고 0.3으로 책정하였다.

또한 소재와 금형사이의 간격을 0.002mm이하로 하여 해석하였다. 해석에 사용된 소재는 일반적으로 피스톤 소재로 많이 사용되고 있는 Al 7075 계열로 선정하였으며, 소재의 열처리 전의 인장강도는 276 MPa, 항복강도는 145 MPa로 알려져 있고, 열처리 후의 인장강도는 520 MPa, 항복강도 475 MPa로 알려져 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석을 통한 다구찌방법 적용 결과

단조피스톤의 설계변수인 예비성형체, 소재온도 및 빼기구배를 제어인자로 하고 마찰을 잡음인자로하여 최대성형 하중을 목적함수로 한다. 그리고 이 목적함수로 하는 직교배열표와 잡음인자를 고려한 각각의 유한요소해석의 최대성형 하중값과 설계변수조합의 최대성형하중값을 SN값으로 변환시킨 데이터가 표 3에 나타내었다.

설계변수가 3개이고 3수준이므로 직교배열표 $L_9(3^4)$ 를 선택하였고 인자 A,B,D는 설계에 영향을 미치는 설계변수로 할당하고 C는 오차항으로 보고 해석을 수행하였다.

표 3과 각 인자별 수준에 대한 SN비를 나타내는 그림 4의 분석결과로부터 SN값이 최대가 되게 하는 각 인자의 수준을 찾을 수 있으며 따라서 최적의 설계 변수 조합은 표 4와 같이 예측됨을 알 수 있다.

[표 3] 성형하중에 대한 직교배열표와 SN비

[Table 3] Orthogonal array and SN ratios for forming load

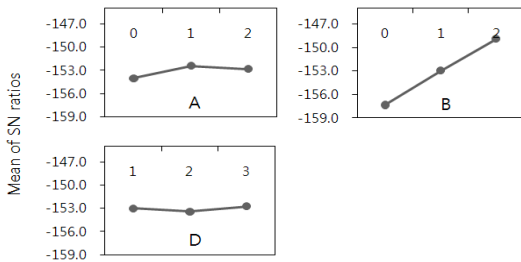
Factor	Inner Array				Outer Array(kN)		S _{Ni}
	A	B	C	D	Friction		
Parameter	Preform	Material Temp.	Error	Draft angle	M0	M1	
Column no.	1	2	3	4			
No.							
1	0	0	0	0	428.8	430.4	-52.66
2	0	1	1	1	366.2	378.1	-51.42
3	0	2	2	2	311.4	318.1	-49.96
4	1	0	1	2	398.8	407.4	-52.11
5	1	1	2	0	345.3	353.2	-50.86
6	1	2	0	1	291.7	300.7	-49.43
7	2	0	2	1	426	427.4	-52.60
8	2	1	0	2	329.4	355.1	-50.69
9	2	2	1	0	290.8	307.3	-49.52

[표 4] 최대성형하중에 대한 유한요소해석을 사용한 제안된 인자 수준의 SN비

[Table 4] SN ratio of the proposed factor levels using FE-simulation for maximum forming load

Design parameters			Forming load(kN)		SN
Preform	Material Temp.	Draft angle	Friction(-3%)	Friction(+3%)	
II	480	1.5	273.6	281.3	-48.86

즉, 예비성형체 II이고, 소재의 온도가 480℃이며, 빼기구배가 1.5°일 때 단조피스톤의 성형하중이 더 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 즉 단조피스톤의 최적변수의 성형 조건이 $A_1B_2D_2$ 이다. 여기서 설계변수가 단조피스톤의 성형하중에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 소재온도(B)이고 다음으로 예비성형체(A), 빼기구배(D) 순위임을 알 수 있었다.



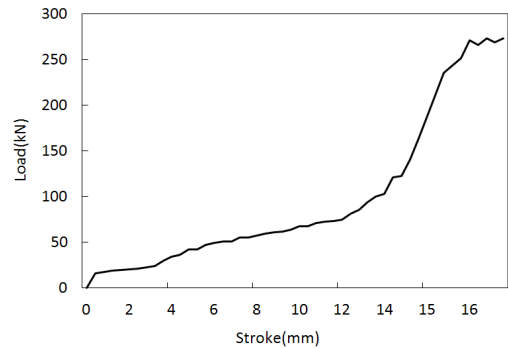
[그림 4] 각 요인별 SN비

[Fig. 4] SN ratios for each factor

3.2 성형해석 결과

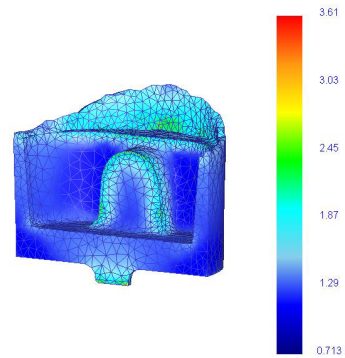
단조피스톤의 최대성형하중을 최소화하는 예측된 설계변수조합에 대해서 유한요소해석을 수행하였다. 그림 5는 유한요소해석에서 예측된 단조피스톤의 성형하중을 나타낸다. 단조 초기부터 하중이 서서히 증가하다가 스트로크가 12mm되는 시점에서 즉, 피스톤의 핀보스(Pin boss) 부위가 완전히 채워지는 단계에서 하중이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며 특히, 플래시가 생성되는 단계인 스트로크 14.5mm시점에서 가파르게 상승하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 단조하중은 약 30ton으로 나타났다.

그림 6과 그림 7은 피스톤 성형에서 유효변형률과 유효응력 분포를 나타내고 있다. 단조 압축이 발생하는 핀보스 부위와 플래시가 발생하는 스커트의 끝단 부위에서 유효변형률값이 약 1.8정도로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 국부적으로 이 부위에서 큰 변형률을 나타내지만 알루미늄 열간가공에서 연신율이 증가하고 그림 7의 유효응력의 범위가 약 70~80MPa이기 때문에 파손이 일어나지 않을 것으로 판단된다.



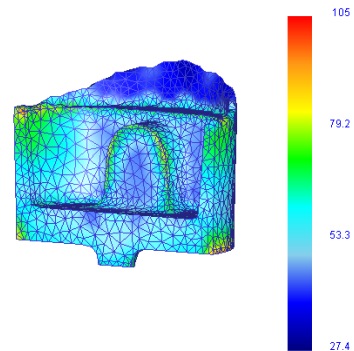
[그림 5] 성형 하중 변화

[Fig. 5] Forming load



[그림 6] 유효변형률 분포

[Fig. 6] Distribution of effective strain



[그림 7] 유효응력 분포

[Fig. 7] Distribution of effective stress

4. 결론

본 연구에서는 다구찌 방법을 이용하고 유한요소해석을 통해 알루미늄 피스톤 제조에 미치는 영향을 알아보았으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 단조 최대 성형하중을 목적함수로 하고 설계변수로서 예비성형체, 소재온도 및 빼기구배를 선정하였으며 마찰을 잡음인자로 하는 직교배열표를 작성하고 시뮬레이션별 유한요소해석을 통해 단조하중을 예측하였다.
- 2) 다구찌 방법의 SN비 개념을 이용해 설계 변수들이 미치는 영향을 분석한 결과를 바탕으로 최대 성형하중에 가장 큰 영향을 주는 것은 소재온도이며 다음으로 예비성형체, 빼기구배인 것을 알 수 있었다.
- 3) 각 설계변수의 최적조합조건은 예비성형체는 1수준, 소재온도는 2수준 그리고 빼기구배는 2수준임을 알 수 있었다.

이러한 방법은 여러 가지 금속성형공정에서 최종 단조품 전단계에서 예비성형체를 인자에 포함할 경우 적합한 예비성형체를 결정할 때 도움을 줄 수 있으며 특히, 최적의 설계조합을 결정할 때 쉽게 적용할 수 있을 것이다.

the Shaped Drawn Product based on the FE Simulation and the Taguchi Method," Trans. of the KSME(A), Vol. 32, No. 6, pp.474-480, 2008.

- [7] Hong-Seok Byun, "Finite Element Analysis for the Forging Process Design of a Blind Rivet", J. of the KAIS, Vol. 10, No. 10, pp.2577-2582, 2009.
- [8] Chang-Bum Wang et al., "Finite Element Analysis of TEE forming for HDPE Pipe", J. of the KAIS, Vol. 7, No. 3, pp.298-307, 2006.

유 호 영(Ho-Young You)

[정회원]



- 1985년 2월 : 부산대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 울산대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1998년 8월 : 울산대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 디지털기계학부 부교수

<관심분야>

금형설계자동화, 고등소성가공

References

- [1] Young-Ho Kim et al., "An Experimental Study on the Manufacturing Technology of an Engine Piston", J. of the KSPE, Vol. 15, No. 11, pp.83-92, 1998.
- [2] Chul Woo Park et al., "A Study of the AI Power Forging Process Piston with Forming Analysis Using of FEM", Proc. of the KSME, pp.309-314, June 2010.
- [3] Jung il Choi, "A Study on Manufacture of Aluminum Automotive Piston by Thixoforging", J. of the KSPE, Vol. 23, No. 1, pp.136-144, 2006.
- [4] Dong-Hwan Kim et al., "Design Methodology of Preform in Multi-Stage Metal Forming Processes Considering Workability : Application of Artificial Neural Network by the Taguchi Method", Trans. of the KSME(A), Vol. 22, No. 9, pp.1615-1624, 1998.
- [5] Dong Hee Lee et al., "A Study on the Design of the Keel in the Energy Storing Prosthetic Foot Using the Finite Element Analysis and the Taguchi Method", Trans. of the KSME(A), Vol. 24, No. 3, pp.613-624, 2000.
- [6] Sang-Kon Lee et al., "Optimization of Dies Angles to Improve the Dimensional Accuracy and Straightness of