

# 피스톤크라운의 열간단조공정 최적화를 위한 유한요소해석

민규영<sup>1</sup>· 임성주<sup>2</sup>· 최호준<sup>2</sup>· 최석우<sup>2</sup>· 박용복<sup>#</sup>

## FEM Analysis for Optimization of Hot Forging Process of Piston Crown

K. Y. Min, S. J. Lim, H. J. Choi, S. O. Choi, Y. B. Park

(Received June 15, 2009 / Revised September 21, 2009 / Accepted September 21, 2009)

### Abstract

Piston crown to the hot forge a unified nature of the product has a shape with multi-level step forging process, so if you are not a mechanical professional, this process could lead to a significant loss to the material. Therefore, material technology in minor terms; continue to improve the collection rate that undamaged the product material. The piston crown and the manufacturing products such as marine diesel engines are being forged to reduce costs and to improve mechanical properties. Piston crown molding is a hot forging process that works in large volume forging products. Because of the size of the hard plastic material flow process for improving the design and actual field experience through advanced plastic technology, it is important to interpret the results. Also for many experimental plastic procedures, the accumulation of results is very important.

**Key Words** : Finite Element Method, Hot Forging Process, Near Net Shape

### 1. 서 론

선박용 피스톤크라운은 Fig. 1 처럼 피스톤의 상부에 위치하며 선박엔진 부품 중에서 핵심 부분으로 연소실 내 구동부이다. 엔진의 작동으로 고압 고온의 어려운 환경에서 높은 내열성과 기계적 성질을 요구되는 제품이다.

최근 피스톤크라운과 같은 선박용 엔진 부품에 대해 제조 비용 절감과 기계적 성질을 향상시키기 위한 단조공법에 대한 연구가 진행되고 있다 [1, 2].

피스톤크라운 열간단조 공정은 제품이 크고 성형량이 많기 때문에 취급이 어렵고 성형시 재료 유동성 향상을 위한 공정설계 및 실제 현장적인 경험을 통한 고도의 성형기술 확보가 중요하다.

이를 위해서는 성형해석과 많은 실험적 결과의 축적이 매우 중요하다.

선박 엔진에서 피스톤 기능을 수행하는 피스톤 크라운에 대해 정밀도와 표면조도가 우수하고 품질이 향상된 고부가가치의 제품을 생산하기 위한 열간단조 정밀성형공정을 연구하였다.

피스톤크라운의 단조공정에서 예비성형체의 역할은 최종 금형 안에서 소재의 유동을 적절하게 제어하여, 금형 내부의 완전한 채움이 일어나게 해주고 하중 및 소재의 손실을 최소화 하는 역할을 한다. 또한 금형 측면의 내부압력분포와 온도 분포에 의존하는 금형의 마모수명을 보다 향상시킬 수 있다[3].

70MC 선박용 피스톤크라운에 대해 유한요소해석을 수행하여 결함이 발생하지 않고 최소의 성

1. 민규영 공주대학교 대학원 기계공학과  
2. 임성주, 최호준, 최석우 한국생산기술연구원  
# 교신저자: 박용복 공주대학교 기계자동차공학부,  
E-mail: ybpark@kongju.ac.kr

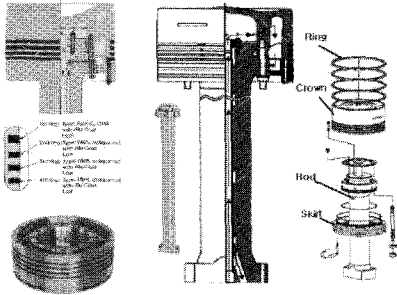


Fig. 1 Piston crown construction and assembly

형하중을 얻을 수 있도록 예비성형체 및 최종제품의 형상을 얻고자 한다.

Fig. 1은 피스톤크라운 조립도이다. 그림처럼 피스톤크라운에 4 개의 링을 결합하고 피스톤 헤드와 커넥팅 로드의 연결부인 피스톤 로드를 장착하고, 피스톤 스커트를 부착하는 구조이다.

본 논문에서 연구하려고 하는 피스톤크라운의 예비성형체는 3ton air drop hammer 성형하고 형단조공정은 16ton air drop hammer 에서 성형하며, 최종제품은 1600 톤 트리밍 프레스에서 얻게 된다. 예비성형체 설계시 해머에서 한번에 성형이 가능하므로 최소하중이 요구되는 형상을 구하고 최적의 예비성형체는 실험계획법을 이용하여 구한다.

## 2. 유한요소해석

피스톤크라운의 형단조 공정에 해석을 위해 소성가공전용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를[4] 사용하였다. 본 연구는 유한요소해석 결과를 통하여 성형공정에서의 결함이 발생하지 않도록 예비성형체 및 금형을 설계하는데 목적을 두었다.

### 2.1 유한요소해석 모델

피스톤크라운의 형상은 Fig.2와 같다.

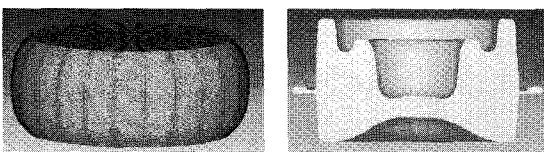


Fig. 2 Shape and dimensions of piston crown

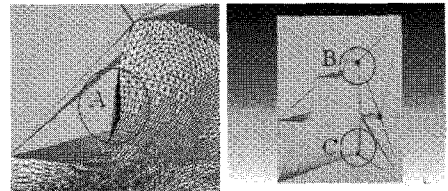
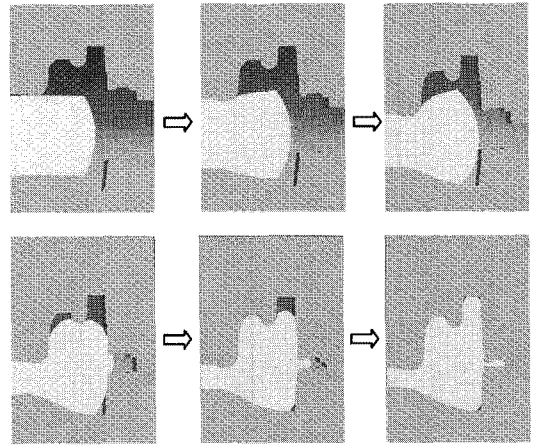


Fig. 3 Analysis result simulated without preform

### 2.2 예비성형체 공정 설계

예비성형체 설계에 사용된 소재의 직경은  $\varnothing 500$ 이며, 최종 제품의 체적은  $0.128m^3$  이므로 초기 소재의 제원은  $\varnothing 500 \times 622mm$ 로 결정하였다.

성형속도는  $1mm/sec$  경계조건으로는 축대칭  $15^\circ$  전단마찰 정수 0.3으로 하였고, 열간단조로 소재의 온도는  $1250^\circ$ 로 열전달 계수는 정수  $5mms/NC$ 이다.

결정된 초기 소재의 제원으로 예비성형체의 성형공정 없이 단조공정을 수행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

성형해석을 수행한 결과 A 부에서 접힘 현상이 발생하였고, B, C 부에서는 미충진 현상이 발생하였다. 접힘 현상은 상부 금형의 영향에 의해 성형 중에 소재가 안쪽으로 유동되면서 발생하게 된다. 따라서 피스톤크라운을 제작하기 위해서는 예비성형체를 성형하는 공정이 필요함을 알 수 있다.

성형해석을 수행한 결과 A 부에서 접힘 현상이 발생하였고, B, C 부에서는 미충진 현상이 발생하였다. 접힘 현상은 상부 금형의 영향에 의해 성형 중에 소재가 안쪽으로 유동되면서 발생하게 된다. 따라서 피스톤크라운을 제작하기 위해서는 예비성형체를 성형하는 공정이 필요함을 알 수 있다.

### 2.2.1 예비성형체 설계

예비성형체는 금형 제작의 비용을 고려하여 3ton에서 업셋팅하여 형상을 얻었으며 16ton air drop hammer에서의 성형 가능성을 예측하기 위해 예비성형체의 직경을 Ø630, Ø650, Ø670으로 변화를 주어 마지막 공정에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 이에 대한 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 해석 결과 성형하중이 가장 작은 예비성형체는 직경 Ø650이었고, 스트로크는 590mm 최대 성형하중은 2920톤으로 16ton air drop hammer에서 성형이 가능함을 예측할 수 있다.

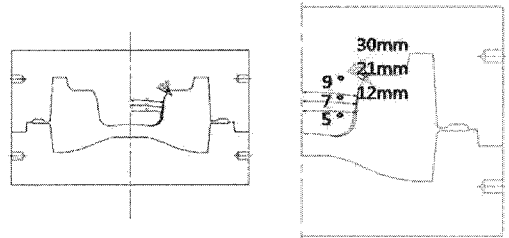
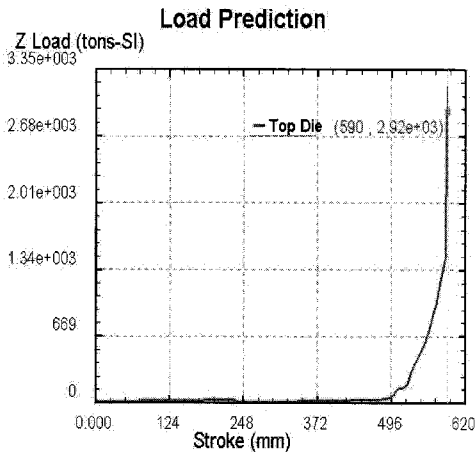


Fig. 5 Optimization design for shape change



Diameter [mm]	630	650	670
Height [mm]	436	416	396
Load [ton]	3250	2920	3230

Fig. 4 Simulation according to height of preform

### 3 실험계획법에 의한 예비성형체 선정

Fig. 5 은 설계 인자값의 유효성을 검증하기 위해서 예비성형체의 직경, 금형 내측의 반경(30mm, 21mm, 12mm)과 각도(9°, 7°, 5°)를 제어인자로 선정하여 실험계획법을 실행하였다.

성형하중을 목적함수로 선정하였고, 성형하중이 작을수록 좋기 때문에 망소 특성(Smaller-the-better characteristics)을 손실함수로 선정하였다. 이때 SN 비는 식(1)에 의해서 구할 수 있다[5].

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

Table 1 Process parameter for experiments design

Process parameter		Level		
		1	2	3
A	Diameter	630	650	670
B	Radius	12	21	30
C	Angle	5	7	9

Table 2 L9 (3<sup>3</sup>) Orthogonal array for design

Case	Diameter	Radius	Angle	Load [ton]
1	630	12	5	3110
2	630	21	7	3140
3	630	30	9	2990
4	650	12	7	3410
5	650	21	9	3380
6	650	30	5	3560
7	670	12	9	3840
8	670	21	5	3440
9	670	30	7	3480

여기에서 n은 데이터의 개수, y는 측정치를 나타낸다. 실험계획법을 수행하기 위해서 제어인자는 3수준으로 설정하였고, 계산된 결과를 바탕으로 예비성형체의 직경을 Ø650, 금형 내측의 반경 21mm과 각도 7°을 기준으로 가감하여 각 수준별 치수를 결정하였다. 실험계획법의 수준과 인자를 Table 1에 나타내었다. 3인자 3수준에 대한 L9(3<sup>3</sup>) 직교배열표를 Table 2에 나타내었고, Table 3에 분산 분석 결과를 나타내었으며 Fig. 6는 SN비를 보여주고 있다.

Table 3에 의하면 성형하중에 가장 영향을 미치는 인자는 예비성형체의 직경으로 나타났다. 성형하중을 최소화시키는 최적의 조합은 SN비를 크게 하는 조건인 예비성형체의 직경을 Ø630, 금형 내측의 반경 21mm, 각도 7°이 되며 스트로크는 592.3mm 최

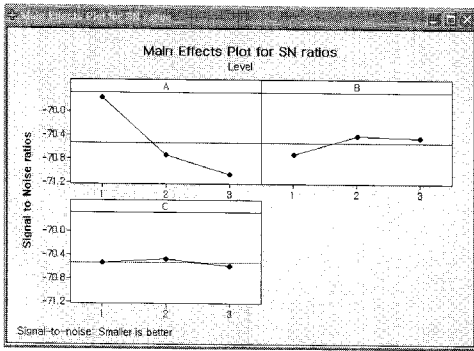


Fig. 6 Main effects plot for SN ratios

Table 3 Analysis of variance for each variable

Factors	Sum of Squares	Degrees of freedom	Mean square	F
Diameter	412289	2	206144	4.46
Radius	30422	2	15211	0.03
Angle	5422	2	2711	0.06
Error	92422	2	46211	
Total	540556	8		

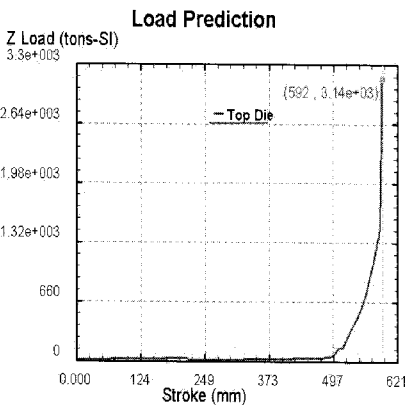


Fig.7 Analysis result simulated with perform

대성형 하중은 3140톤이며 이에 대한 해석결과를 Fig. 7에 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 선박에 사용되는 70MC의 피스톤크라운에 대한 단조공정 및 금형 설계와 제작을 위한 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최종 제품형상을 기준으로 예비성형체의 직경, 금형 내측의 반경과 각도를 주요 인자로 하여 실험계획법을 수행하였으며, 그 결과 성형하중에게 가장 큰 영향을 주는 인자는 예비성형체의 직경이었고, 금형 내측의 반경 21mm, 각도 7°의 최적형상을 설계하였다.

(2) 예비성형체 및 최종 금형의 형상으로 유한요소해석을 수행하였고 단조공정에서 결함이 발생하지 않도록 최적화된 성형하중을 얻을 수 있도록 예비성형체 및 최종제품의 형상을 얻을 수 있었다.

(3) 70MC 피스톤 크라운의 정밀성형을 위해서 기존의 기계가공방법에서 단조방법으로 전환함으로써 소재 및 가공비 절감을 통한 제품의 제조원가를 절감할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 대형 잉곳의 단조합리화를 위한 Near Net Shape 성형기술개발과제의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 주신 (주)KSP와 한국생산기술연구원 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. H. Park, S. M. Yoon, S. Y. Synn, L. W. Park, J. K. Park, E. G. Lee, T. D. Kim, 1999, A study of forging equipment for one body crankshaft of medium sized marine engine, Trans. Mater. Process., Vol. 8, No. 3, pp. 237~244.
- [2] M. C. Song, S. B. Shin, B. H. Kim, S. H. Ju, M. G. Lee, 2005, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., KSTP, Jinju, Kor., pp. 180~183.
- [3] H. Y. Kim, J. J. Kim, N. S. Kim, 1993, An Analysis of Hot Closed-Die Forging to Reduce Forging Load, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 17, No. 12, pp. 2970~2981.
- [4] J. L. Bassani, 1977, Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties, Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 651~156.
- [5] P. J. Ross, 1996, Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill, New York, USA.