

선박엔진용 초대형 열간단조품, 피스톤크라운의 단조공정 및 금형 설계

황범철¹· 이우형²· 배원병²· 김철[#]

Process Planning and Die Design for the Super Hot Forging Product, the Piston Crown Used in Marine Engine

B. C. Hwang, W. H. Lee, W. B. Bae, C. Kim

(Received September 25, 2008)

Abstract

In closed-die hot forging, a billet is formed in dies such that the flow of metal from the die cavity is restricted. Some parts can be forged in a single set of dies, whilst others, due to shape complexity and material flow limitations, must be shaped in multi sets of dies. The purpose of a performing operation is to distribute the volume of the parts such that material flow in the finisher dies will be sound. This study focused on the design of preforms, flash thickness and land width by theoretical calculation and finite element analysis, to manufacture the super hot forging product, 70MC type piston crown used in marine engine. The optimal design of preforms by the finite element analysis and the design experiment achieves adequate metal distribution without any defects and guarantees the minimum forming load and fully filling of the cavity of the die for producing the large piston crown. The maximum loads obtained by finite element analysis are compared with the results of experiments. The loads of the analysis have good agreements with those of the experiment. Results obtained using DEFORM-2D enable the designer and manufacturer of super hot forging dies to be more efficient in this field.

Key Words : Flash, Forming Load, Preform, Super Hot Forging Product

1. 서 론

선박용 디젤엔진 구조를 나타내는 Fig. 1에 의하면 피스톤크라운은 피스톤의 상면에 위치하며 엔진의 구동에 따른 진동, 고온 고압의 가혹한 환경에 노출된 부품으로 높은 내열성 및 기계적 성질이 요구되어지는 초대형 부품이다.

현재 피스톤크라운의 제조 공법은 자유단조설비에서 롤링(Rolling)하여 제작한 환봉을 해당 길이만큼 절단한 후 선반가공을 통하여 최종제품을

제작하는데, 이런 공법은 원소재 비용이 과다하며 황삭의 추가 비용이 발생한다. 최근에는 피스톤크라운과 같은 선박용 디젤엔진의 초대형제품에 대해 제조 비용의 절감과 물리적 및 기계적 성질을 향상시키기 위한 단조공법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1~2]. Fig. 2에 피스톤크라운의 현재 제조 공법 및 단조 공법에 대한 주요 공정 및 공법 변경에 따른 기대 효과를 나타내었다.

단조공정에서 예비성형체는 최종금형 내에서 재료의 유동을 제어하기 위한 것으로, 적합하게

1. 부산대학교 기계기술연구원

2. 부산대학교 기계공학부

교신저자: 부산대학교 기계기술연구원,

E-mail: chulki@pusan.ac.kr

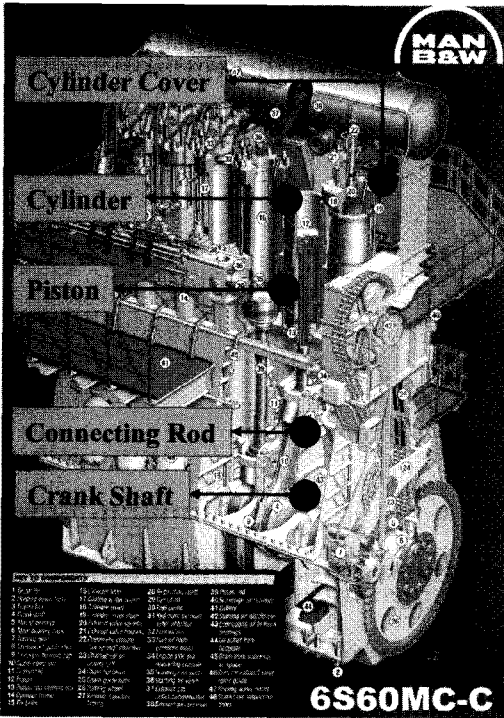


Fig. 1 Diesel engine construction for marine engine

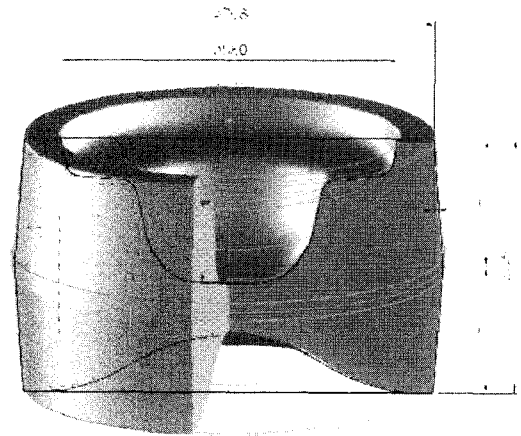


Fig. 3 The shape and dimensions of the piston crown

랜드부 형상설계에 따라 최대 성형하중을 줄일 수 있다[4~6].

본 연구에서는 70MC Type 피스톤크라운에 대하여 유한요소해석을 수행하여 소재 접힘 및 미충만 등의 성형결함이 발생하지 않고, 최종공정에서 성형하중이 최소가 되도록 예비성형체 및 최종 금형의 플래시 랜드부 형상을 얻고자 한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 피스톤크라운 제품의 단조 시 예비성형체는 유압프레스에서 한번에 성형을 하고, 최종제품은 해머로 성형을 하게 되므로 예비성형체 설계 시에 유압프레스에서 한번에 성형이 가능하며 최종공정에서 최소화중이 요구되는 팬케익(Pancake) 형상을 구하고, 최종 금형의 플래시 랜드부의 최적 형상은 실험계획법을 이용하여 구한다. 이러한 과정을 통하여 70MC Type 피스톤 크라운 초대형 단조 제품에 대한 공정 및 금형설계를 수행하고자 한다.

2. 유한요소해석

피스톤크라운은 초대형형상으로 단조공정에 대한 유한요소해석을 위하여 소성가공 전용 해석 프로그램인 DEFORM-2D를 사용하였다. 이를 이용한 유한요소해석을 통하여 35ton 해머에서 접힘 및 미성형 등의 성형 결함이 발생하지 않는 공정 및 금형을 설계하고자 한다.

2.1 해석 조건

2.1.1 해석 모델 및 성형 장비

70MC Type 피스톤크라운의 형상 및 주요 치수

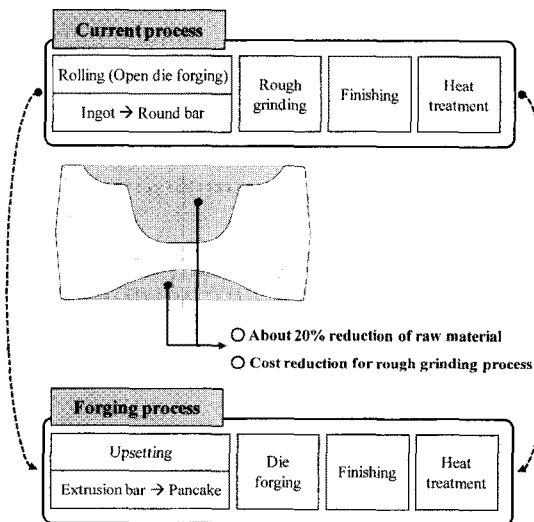


Fig. 2 The manufacturing processes of the piston crown

설계된 예비성형체는 최소의 하중 및 재료손실로 형내부의 완전 충만을 보장하며, 금형벽면의 압력 분포와 온도 등에 의존하는 금형의 마멸 수명을 향상시킨다[3]. 또한 최종 금형에서의 플래시량 및

는 Fig. 3과 같으며, 본 연구에 사용된 35ton 해머에 대한 사양을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 The specification of 35ton air drop hammer

Maximum Energy	350 KJ
Efficiency during stroke	0.9
Mass	45 ton
Maximum Stroke	231 mm

해머 타수 당 성형력은 식 (1)에 의해 구할 수 있다[7].

$$P = \frac{3E_A}{2h} \quad (1)$$

여기서, E_A 는 성형에너지, h 는 작업행정거리를 나타낸다.

본 연구에 사용된 35ton 해머의 타수당 최대 성형력은 식 (1)에 의해 약 204ton이며, 성형장비를 유압프레스로 가정하여 유한요소해석을 수행한 결과를 타수 당 성형력으로 분배하므로써 제품 성형을 위해 필요한 타수를 예측할 수 있다. 35ton 해머에 대한 유압 프레스로의 상당 하중은 17000ton 정도로 유한요소해석 시 성형 가능 여부에 대한 판단 기준으로 사용된다.

2.1.2 소재

초대형 열간단조품의 해머 성형에 있어서 금형과 소재의 접촉 시간은 매우 짧으며 성형과정 중 대부분은 소재가 공기에 노출된다. 따라서 금형과의 열전달에 의한 소재의 온도변화는 무시할 수 있으며, 또한 성형 중 소재의 온도 저하를 최소화하기 위해 성형 타수마다 톱밥을 소재 표면에 뿌려주게 되므로 대기와의 대류열전달 계수를 구하기가 어렵다. 이에 본 연구에서는 열전달에 의한 소재의 온도변화를 무시하여 등온해석을 수행하였다.

금형의 소재는 등온해석을 수행하였기 때문에 강체로 하였으며, 단조품의 소재는 S17Mos로 해석 시에는 DEFORM 데이터베이스에 저장된 물성 중 가장 유사 재질인 AISI 8120을 사용하였다. 또한 금형과 단조 소재 사이의 마찰상수는 일반적인 열간단조에서의 건마찰 조건인 $m=0.7$ 을 적용하였다.

2.2 단조공정 및 예비성형체 설계

2.2.1 제조 공정 및 성형가능성

사용된 소재의 구매 가능한 최대 직경은 $\varnothing 470\text{mm}$ 이며, 최종 제품의 체적은 0.128m^3 이므로, 초기 소재의 크기는 $\varnothing 470\text{mm} \times H740\text{mm}$ 로 결정하였다. 결정된 초기 소재의 크기로 예비성형체 공정 없이 단조공정을 수행한 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

A부에서 소재의 접힘 현상이 발생하였다. A부의 접힘 현상은 상부 금형에 의해 소재가 다시 내측으로 유동되면서 발생하게 되므로 70MC Type 피스톤 크라운을 제작하기 위해서는 예비성형체가 필요함을 알 수 있다.

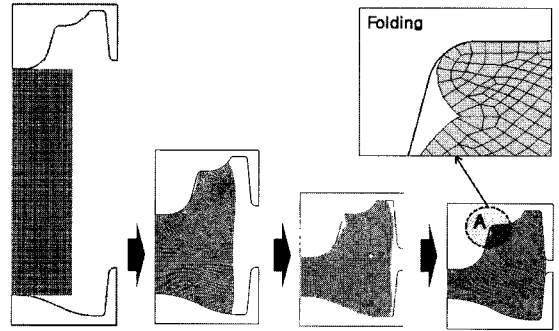


Fig. 4 Analysis result carried out without preform

2.2.2 예비성형체 설계

예비성형체의 형상의 금형 제작 비용을 고려하여 팬케익 형상을 선택하였으며, 35ton 해머로의 성형가능성을 검토하기 위하여 팬케익의 최대 직경을 단조품의 최대 직경인 $\varnothing 740\text{mm}$ 정도가 되도록 하여 최종 공정에 대한 해석을 수행하였다. 또한 최종 공정에서 미충진을 방지하기 위해 초기 소재의 크기는 플래시 체적을 고려하여 $\varnothing 470\text{mm} \times H760\text{mm}$ 로 하였으며, 이에 대한 해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 해석결과 최대 성형하중은 11000ton으로 35ton 해머에서 성형이 가능함을 알 수 있었다.

또한 팬케익의 형상에 따른 최종 공정에서의 성형하중을 검토하기 위하여 팬케익의 높이를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. Fig. 5의 경우 팬케익의 최대 직경이 $\varnothing 726\text{mm}$ 로 팬케익의 높이는 330mm이며, 이는 초기 소재 높이의 약 55%의 성형량을 나타낸다. 일반적으로 팬케익 공정의 경우

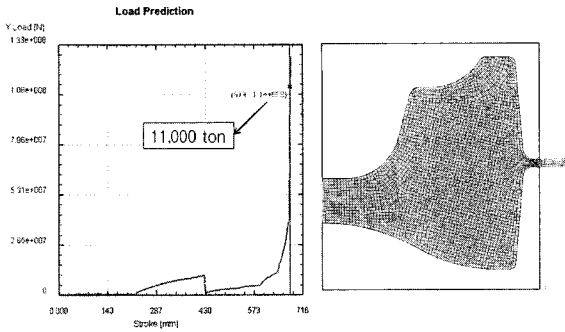


Fig. 5 Analysis result carried out with pancake preform

Table 2 Analysis results carried out according to the height of preform

Height [mm]	330	395	450
Diameter [mm]	726	672	616
Load [ton]	11000	10700	11000

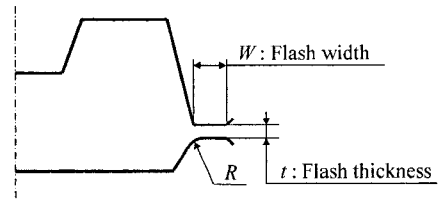
초기 소재 높이의 40~50%를 성형하므로 40%에 해당하는 높이 450mm 및 330mm와 450mm의 중간 높이인 395mm에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 Table 2 및 Fig. 6에 나타내었다.

해석결과로부터 팬케익의 높이가 395mm일 때, 최종 공정에서의 최대 성형하중이 가장 작게 나타났으므로, 최종 팬케익의 형상은 높이 395mm로 결정하였다.

2.3 최종 공정에서의 금형 설계

2.3.1 플래시 형상 설계

최종 단조공정에서 성형 하중을 결정하는 인자로는 플래시의 두께, 랜드부의 길이 및 랜드부의 입구 반경이 있으며, 제품의 형상에 대해 플래시의 두께 및 랜드부의 길이는 일반적으로 다음 식으로 결정할 수 있다.[7]



$$t = (0.017 \times D) + \left(\frac{1}{\sqrt{D+5}} \right) \quad (2)$$

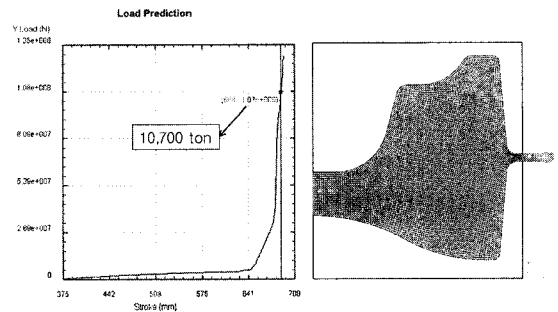
$$\frac{W}{t} = \frac{30}{\sqrt[3]{D \left[\frac{2D^2}{H(2R_n + D)} \right]}} \quad (3)$$

여기서, D 는 제품의 최대 직경, H 는 리브부의 높이, R_n 는 중심축에서 리브부 중심까지의 반경을 나타낸다.

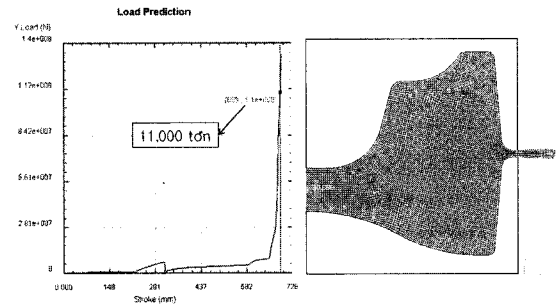
식 (2) 및 (3)에 70MC Type 피스톤크라운의 치수인 최대 직경 742mm, 리브부의 높이 385mm, 중심축에서 리브부 중심까지의 거리 322mm를 대입하면, 플래시의 두께는 12.6mm, 랜드부 길이는 28.8mm이다.

2.3.2 실험계획법에 의한 플래시 형상 결정

식 (2) 및 (3)에 의해 계산된 설계인자값의 유효성을 검증하기 위해 플래시 두께, 랜드부의 길이 및 플래시 입구의 반경을 제어 인자로 하여 실험



(a) H395mm



(b) H450mm

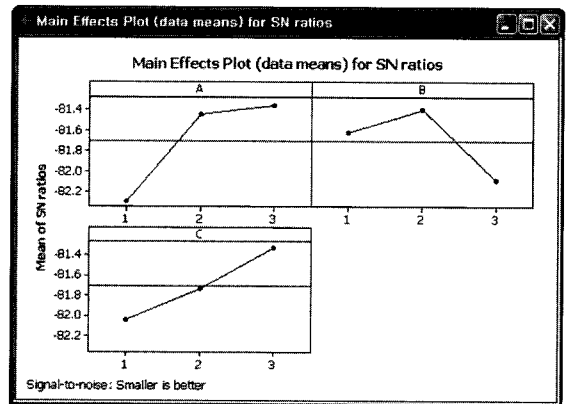
Fig. 6 Deform simulation carried out according to the height of preform

Table 3 L9(3³) orthogonal array for design of experiments

Case	t	W	R	Load [ton]	Number of forging blows
1	10	23	10	12900	63
2	10	29	15	13200	65
3	10	35	20	13000	64
4	13	23	15	11700	57
5	13	29	20	10500	51
6	13	35	10	13400	66
7	16	23	20	11600	57
8	16	29	15	11700	57
9	16	35	10	11800	58

Table 4 Analysis of variance for each variable

Factors	Sum of Squares	Degrees of freedom	Mean square	F
t	1.62	2	0.81	2.05
W	0.74	2	0.37	0.93
R	0.76	2	0.38	0.96
Error	0.79	2	0.40	
Total	3.91	8		



계획법을 수행하였다. 목적 함수는 성형 하중으로 하였으며, 성형 하중은 작을수록 좋으므로 망소특성(smaller-the-better characteristics)을 손실함수로 선정하였고 이 때 SN값은 식 (4)에 의해 구할 수 있다[8].

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (4)$$

여기서, n은 데이터의 개수, y는 측정치를 나타낸다.

실험계획법을 수행하기 위해 제어 인자는 3수준으로 하였고 이론적으로 계산된 결과를 토대로

플래시 두께 13mm, 랜드부의 길이 29mm를 기준으로 약 20%씩 가감하여 각 수준별 치수를 결정하였다. 3인자 3수준에 대한 L9(3³) 직교배열표를 Table 3에, 분산분석 결과를 Table 4에 각각 나타내었다.

Table 4에 의하면 성형하중에 가장 큰 영향을 주는 인자는 플래시의 두께로 나타났으며, 성형하중을 최소화 시키는 최적의 조합은 SN비를 크게 하는 조건[8]인 플래시의 두께 16mm, 랜드부의 길이 29mm, 랜드부의 입구 반경 20mm가 되며, 이에 대한 해석결과를 Fig. 7에 나타내었는데 최대 성형하중이 10200ton으로 35ton 해머 사용 시 예상 타수는 50타이다.

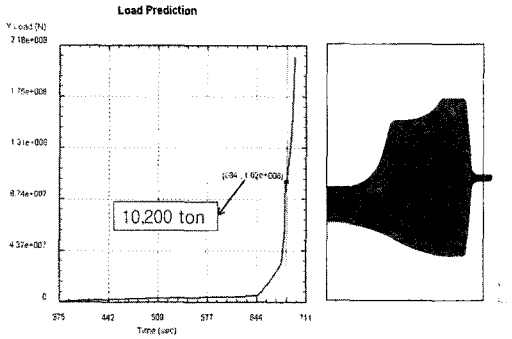
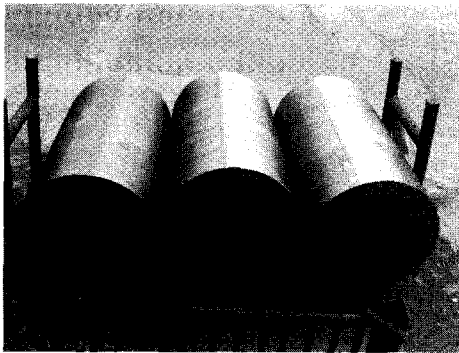


Fig. 7 The analysis result carried out with the optimal perform and the optimal die obtained from simulation results



(a) Initial material



(b) Preform



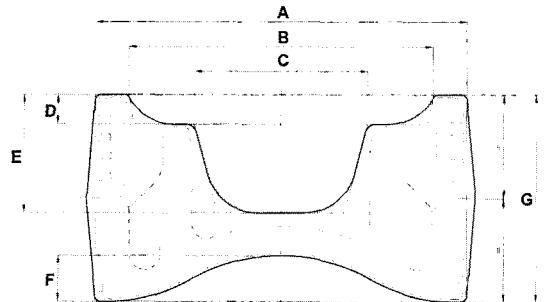
(c) Product

Fig. 8 Photographs of the prototypes formed at each process

Table 5 Comparison between analysis results and prototypes

	Prototype	Analysis results
Preform height [mm]	390	395
Flash thickness [mm]	16.3	16
Number of forging blows	47	50

Table 6 Inspection data of prototypes



Case	Specification	Inspection results
A	Ø708 [-2.0/+5.0]	+1.7
B	Ø580 [-5.0/+2.0]	-4.6
C	Ø330 [-5.0/+2.0]	+3.7
D	55 [-5.0/+2.0]	+0.2
E	220 [-5.0/+2.0]	-0.6
F	85 [-5.0/+2.0]	+0.3
G	385 [-35.0/+10.0]	+9.6

3. 시제품 제작 및 고찰

유한요소해석을 통하여 설계된 예비성형체 형상 및 최종 금형 형상을 토대로 시제품을 성형하였으며, Fig. 8에 초기소재, 프리폼 및 단조품의 사진을 나타내었다.

시제품 성형 시 예비성형체의 높이는 390mm로 유한요소해석에 의해 설계된 395mm보다 5mm 더 성형되었으며, 이는 예비성형체 제작을 위한 업셋팅 공정에서 금형으로의 열전달을 최소화하기 위해 소재와 금형사이에서 석면포와 같은 단열재를 끼우고 성형을 하므로 정확한 스트로크 조절이

어렵기 때문이다.

해석결과와 시제품제작결과를 비교하여 Table 5에 나타내었으며, 중요부의 치수를 측정된 결과를 Table 6에 나타내었다. 실험결과 플래시의 두께가 16.3mm로 해석결과와 잘 일치하였으며, Table 6의 측정 결과 모든 치수가 설계공차를 만족함을 알 수 있다. 따라서 양산품 제작 시에는 공법 전환에 따른 원가 절감을 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 선박용 디젤엔진에 사용되는 70MC Type의 피스톤크라운에 대한 초대형 단조공정 및 금형설계를 위한 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이론식에 의해 설계된 최종 금형의 플래시 형상을 기준으로 플래시의 두께, 랜드부의 길이 및 랜드부의 입구 반경을 주요 인자로 하여 실험 계획법을 실시하였으며, 그 결과 성형하중에 가장 큰 영향을 주는 인자는 플래시의 두께였으며, 플래시의 두께 16mm, 랜드부의 길이 29mm, 랜드부의 입구 반경 20mm의 최적 형상을 설계하였다.

(2) 설계된 예비성형체 및 최종 금형의 플래시 형상으로 시제품을 제작하였으며, 47타수에서 플래시의 두께는 16.3mm로 50타수에서 플래시의 두께가 16mm인 해석결과와 잘 일치하였다.

(3) 초대형 단조품 70MC Type 피스톤 크라운 제조를 위한 기존의 선반가공공법에서 단조공법으로 전환함으로써 소재비 및 가공비 절감을 통한 제품의 원가를 절감할 수 있었다.

후 기

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

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, Transactions of Materials Processing, Vol. 8, No. 3, pp. 237~244.
- [2] M. C. Song, S. B. Shin, B. H. Kim, S. H. Ju, M. G. Lee, 2005, A study on the application of closed-die forging method for the large crank throw, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, May, 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, Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 17, No. 12, pp. 2970~2981.
- [4] B. Tomov, R. Radev, V. Gagov, 2004, Influence of flash design upon process parameters of hot die forging, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 157-158, pp. 620~623.
- [5] F. Fereshteh-Saniee, A. H. Hosseini, 2006, The effects of flash allowance and bar size on forming load and metal flow in closed die forging, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 261~265.
- [6] B. I. Tomov, V. I. Gogav, R. H. Radev, 2004, Numerical simulations of hot die forging processes using finite element method, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 352~358.
- [7] T. Altan, G. Ngaile and G. Shen, 2005, COLD AND HOT FORGING-Fundamentals and Applications, ASM International.
- [8] P. J. Ross, 1996, Taguchi techniques for quality engineering : loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design 2nd Edition, McGraw-Hill.