

비축대칭 캠 볼트 단조의 유한요소 해석

조해용[†] · 김완종* · 이석진* · 박남기** · 이승헌**

Finite element analysis for forging of nonaxisymmetric cam bolt

Hae-Yong Cho[†], Wan-Jong Kim*, Seok-Jin Lee*, Nam-Ki Park** and
Seung-Hun Lee**

Key Words: Nonaxisymmetric shape(비대칭 형상), Finite element analysis(유한요소해석)
Cam bolt(캠 볼트), Forging(단조)

Abstract

The cold-forging process analysed in this paper deals with the cam bolt of a nonaxisymmetric shape which mainly is used as a part in the steering system of a vehicle for the purpose of adjusting shock absorb. So both strength and endurance are very important for the cam bolt.

In this study, cam bolt forging process is composed of four stage processes. For three forging stages, shape of workpiece will be eccentric. And then bolt head and washer of eccentric shape is created in last stage. 3D finite element analysis repeatedly has been performed with changing dimension of die to obtain adequate former multi forging process and die shape. Simulation results reviewed have influence on deciding design of die and forging process. As a result, Simulation results have provided a direction to improve the process.

1. 서 론

자동차의 캠 볼트는 자동차의 조향장치에 결합되는 요소로서 와서 부분이 편심된 형태이다. 와서의 형상은 자동차의 정비나 속업쇼버 앵글 변경을 위한 로워마운팅의 위치를 정밀하게 변경할 수 있게 하는 역할로 충분한 강도와 내구성이 요구된다. 한편, 캠 볼트는 와서부와 볼트부가 각각 단조성형한 후 용접하거나, 또는 프레스로 가압하여조립하는 방법으로 생산되어 많은 제작 시간과 생산원가가 소요된다. 그러나 캠 볼트의 기

계적요구조건을 충족시키고, 제조원가를 절감 할 수 있는 냉간 단조공정에 의한 시도는 미미하다.

냉간 단조에 의한 부품은 기계적 강도가 우수하여 많은 자동차용 부품으로 사용되지만, 공정 설계 시 설계자의 경험과 단조품의 특성에 따라 다른 설계 및 공정이 될 수 있으므로, 많은 시행착오와 그에 따른 시간 및 경비의 낭비를 초래한다. 최근 컴퓨터를 이용하여 설계 및 해석함으로써 시행착오를 줄여 시간과 경비를 절감할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Monaghan¹⁾ 등은 볼트의 냉간 단조 성형공정에서 볼트머리를 전단에 의하여 절삭하는 방법과 단조법을 조합하여 성형하는 공정에 대하여 유한요소법을 적용하여 다이의 응력 분포가 최소화되는 트리밍 다이를 설계하는 방법을 제시하였

[†] 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : hycho@chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-2464 FAX : (043)263-2448

* 충북대학교 대학원

** (주)선일다이캐스트

다. Choi²⁾등은 산업체 설계전문가들의 경험 지식과 유한요소해석을 통한 최적의 공정설계에 대한 규칙을 토대로 다단 포머에 의한 볼트류 제품의 냉간 단조 성형을 위한 공정 및 금형 설계 자동화 시스템을 구축 하였으며, Petrov³⁾등은 냉간페쇄 단조공정을 유한요소 시뮬레이션과 실험을 비교 하여 깊은 공동이 있는 불규칙한 형상을 겹침 결함 없이 성형하였고 겹침 결함의 크기와 다이형상과의 관계를 제시 하였다.

본 연구에서는 현재 리벳과 볼트가 용접과 조립에 의해 생산되고 있는 실정에서 제조원가와 시간을 줄이기 위하여 다단 포머에 의한 냉간 단조공정을 설계하였으며, 성형해석을 위해 상용 강소성 유한요소 해석 코드인 DEFORM 3D를 사용하였다. 성형하중, 금속유동 결함, 미충진, 금형에 따른 재설계를 통해 냉간 단조로 성형하는 자동차용 캠 볼트의 성형 공정을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

소성가공에 대한 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM 3D는 다음과 같은 강소성식을 사용하고 있다.

$$\text{평형방정식} : \sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{적합방정식} : \dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{2}(\mu_{i,j} + \mu_{j,i}) \\ \dot{\epsilon}_v &= \mu_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{구성방정식} : \sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{경계조건} : \sigma'_{ij}n_i &= F_j & \text{on } S_F \\ \mu_i &= U_i & \text{on } S_U \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 σ'_{ij} 와 $\dot{\epsilon}'_{ij}$ 는 각각 변형재료의 응력과 변형률 속도를 나타내고 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 재료의 유효 응력과 유효변형률 속도를 나타내고 있는데 각각 $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})}$ 와 $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}'_{ij}\dot{\epsilon}'_{ij})}$ 로 정의 되며, F_j 는 재료의 경계면에 걸리는 힘을, U_i 는 경계면에서의 변형속도를 나타내고 있다. (1) ~ (4)식에 변분법을 적용하여 다음과 같은 약형을 구할 수 있다.

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (5)$$

V 와 S 는 각각 표면적을 나타내고, K 는 페널티 상수를 나타낸다.

3. 냉간 단조공정 설계

볼트 와셔 일체형 캠 볼트의 포머 단조공정을 설계하고 단조공정 중 소재의 유동 특성을 예측하기 위하여 DEFORM-3D를 활용한 강소성 유한요소해석 하였다. 공정은 체적일정조건을 기준으로 하여 최종 형상에 대한 블록커를 설계하고 초기소재 순으로 설계하였다. 캠 볼트의 최종 형상은 Fig. 1과 같으며 전체적으로 헤드부, 와셔부, 바디부를 갖는 구조이다. 와셔부가 편심된 형상이므로 우선 바디를 성형하고 헤드부와 와셔부의 편심을 유도 후 헤드의 육각 형상을 쉬어링하여 성형하는 방법을 고려하였다. 공정은 Fig. 2에 나타내었으며 블록커 형상에 따라 소재의 유동을 원활하게 하기 위해 다이부분의 모서리를 라운드형상으로 하였고 업셋팅 높이를 조절하여 블록커의 안착이 양호하도록 하고 폴딩현상이 발생하지 않도록 설계하였다. 그리고 캠 볼트의 형상이 편심된 형상이므로 편심을 유도하기 위해 Fig. 2의 (c)그림의 A금형과 (d)그림의 B금형을 따로 설계하였다.

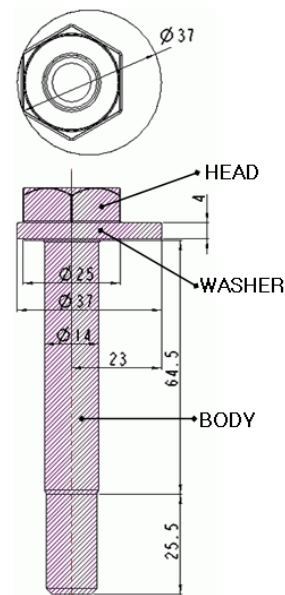


Fig. 1 Shape at finisher process

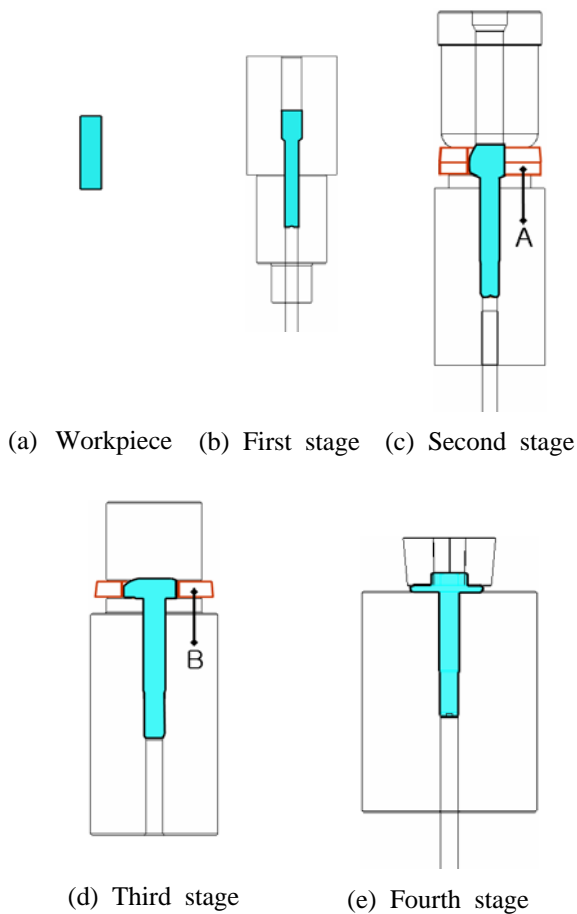


Fig. 2 Schematic description of a multi-stage forging process

4. 공정 해석

4.1 해석 모델 및 조건

본 연구의 성형해석을 위해 강소성 유한요소해석코드인 DEFORM-3D를 사용하였다. 실제 해석에 사용된 소재와 금형의 형상은 대칭성을 고려하여 1/2 단면을 사용하였다. 캠 볼트 소재는 내마모성, 내충격성을 가진 구조용 합금강 AISI 4140을 사용하였고, 금형 및 편치는 AISI H-13을 사용하였으며 Table 1에 해석조건과 함께 나타내었다. 그리고 Fig. 2에 표기된 A금형과 B금형의 중심축이 캠 볼트 바디 부의 중심축과 각각 2.5mm, 3.5mm 거리를 두어 편심을 유도 하였다. 해석에 사용된 재료의 부피는 1,1140mm³이다.

Table 1 Process conditions of FE analysis

Material	Young's modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Possion's ration	Flow stress (MPa)
AISI4140	211,000	415	0.29	$860\epsilon^{0.2439}$
WC(G7)	480,000	3,100	0.23	-
H-13	210,000	1520	0.3	-
Forging condition	Simulation mode		Isothermal	
	Shear friction factor		0.08	
	Velocity of punch down(mm/s)		600	
	Number of element		45,000	

4.2 유한요소 해석결과 및 공정 변경

주어진 조건에서 유한요소 해석결과 각 단조공정의 블록커 성형형상을 Fig. 3에 나타내었다. 1, 2단계 블록커 형상과 3단계 캠볼트 바디부분은 양호하나 4단계 단조공정 과정에서 폴딩현상이 발생하였으며, 캠 볼트 와셔바닥부분이 성형될 영역 즉, Fig. 3의 (e)에 표기한 부분에서 국부적으로 폴딩현상이 발생하였다. 캠 볼트의 헤드 부분과 와셔부가 성형되어야 할 재료의 부피가 과설계되어 소재가 금형사이로 올라온 것으로 판단된다. 그리고 3단계 단조 공정 중 캠 볼트의 바

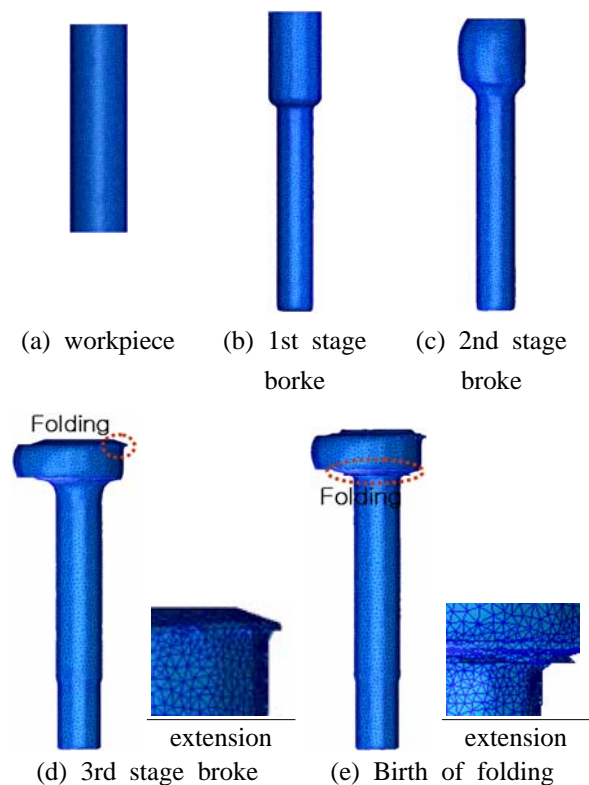


Fig. 3 Forged shape of the cambolt

디부와 와셔부가 생성되는 부분이 금형에 의해 쉬어링 되어 폴딩 현상이 발생한 것으로 판단된다. 해석 결과를 바탕으로 하여 다음과 같이 금형 설계변경을 하였다.

① 캠 볼트의 헤드부와 와셔부가 생성될 영역의 부피가 크게 설계되었으므로 부피를 감소시키기 위하여 1단계 단조 공정에서 펀치의 스트로크 완료 시 캠 볼트 도입부의 라운드와의 거리가 37mm에서 31mm가 되도록 하였다.

② 2단계 단조공정은 1단계 공정으로 성형된 블록커의 헤드 하단 부분이 잘 안착되도록 헤드 부분의 부피를 계산하여 첩퍼 각도를 45°에서 20°로 수정하였다.

③ 4단계 공정에서 헤드 하단부분이 쉬어링되는 현상이 나타났으므로 해당 부분의 부피를 줄이면서 금속 유동이 원활히 될 수 있도록 하기 위하여 라운드를 7에서 1로 수정하였다.

설계변경 전 후 금형의 형상을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

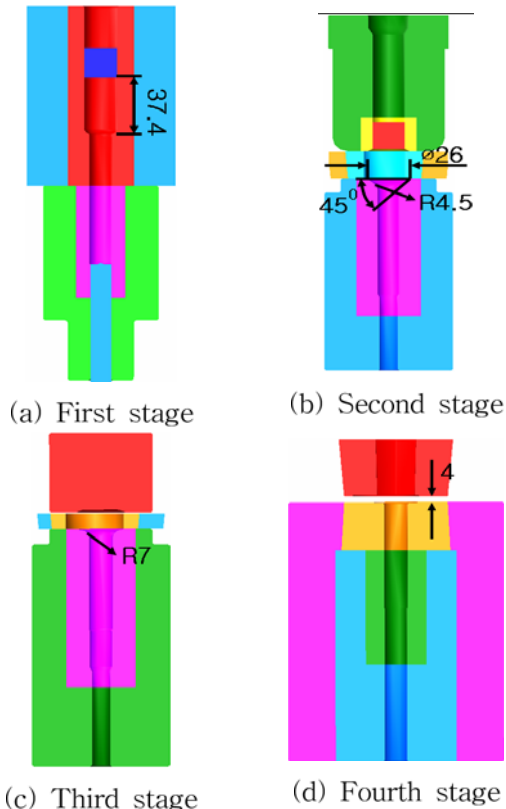


Fig. 4 Previous design of die

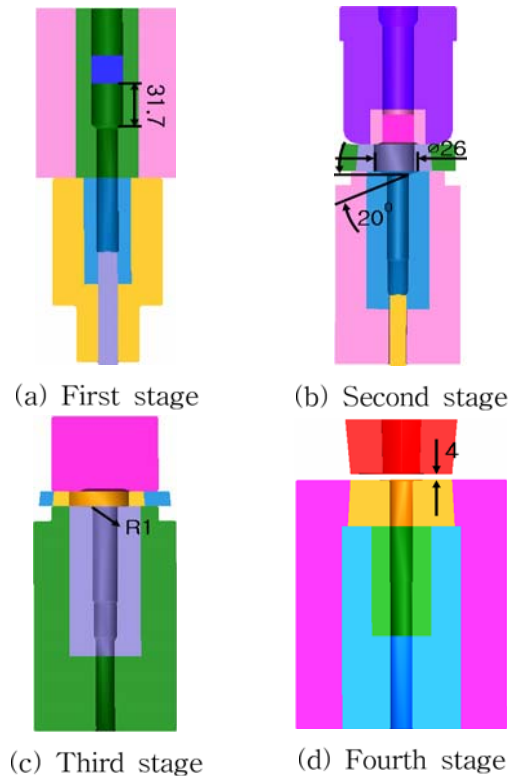


Fig. 5 Redesign of die

4.3 유한요소 해석결과

단조공정 변경 후 결과는 Fig. 6과 같다. 공정 변경 후 성형된 블록커의 형상은 양호하나 피니셔의 와셔부위 중 뒤쪽 아래 부분에 재료가 차지 않는 것이 관찰 할 수 있다. 그러나 마지막 5단계 트리밍 과정에서 와셔부 가장자리부분 지정된 치수만큼 남기고 제거 할 것이므로 양호한 형상으로 판단된다. 단조품의 경우 단류선 방향의 기계적 성질이 좋아 주요 부품으로 사용되므로 단류선의 평가는 반드시 필요하다.⁴⁻⁵⁾ Fig. 7은 피니셔의 단류선을 나타낸 것이다. 몸체부분에서 균일한 단류선을 볼 수 있으며, 겹침부는 발견되지 않았다. 비대칭 형상을 유도하는 과정과 쉬어링 단계인 4단계에서 와셔부와 헤드부에서 복잡한 단류선이 발생된 것으로 판단된다. 해석 결과 코너부 충전 상태는 양호하게 나타났다. Fig. 8은 공정해석에서 얻어진 단조하중을 나타낸 것이다. 1단계에서 4단계까지 최대 하중은 각각 270,000N, 190,000N, 500,000N, 480,000N으로 3단계와 4단계 공정에서 많은 하중이 소요되는 것을 알 수 있다. 3단계는 헤드 부분을 엷셋팅 시, 4단계는 와셔부분 성형 시 많은 부하가 걸렸다. 한편, 다단

단조 포머의 용량은 각각단계의 최대 하중의 합보다 커야 하므로 150ton 정도로 예상 된다. 단조 공정 중 4단계 금형에서 가장 큰 응력이 걸릴 것으로 예상이 된다. 볼트 헤드를 성형하기 위하여 펀치 부에서 쉬어링 과정을 수행하며, 동시에 비대칭 와셔 부를 4mm까지 업셋팅을 하기 때문이

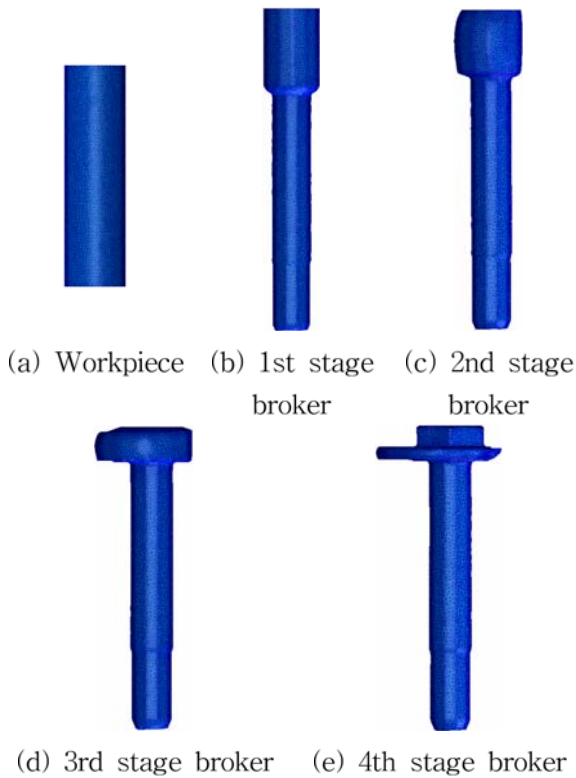


Fig. 6 Finite element analysis result of the cam bolt forging process

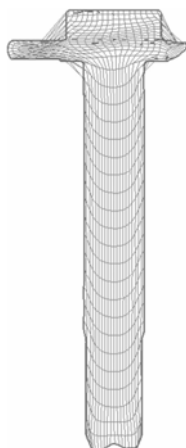


Fig. 7 Metal flow of finisher

다. 응력해석 대상은 캠 볼트의 와셔부와 직접 접촉하는 금형과 펀치이며, 금형을 보강하는 다이에 대해서는 영향이 적은 것으로 예상하여 제외 시켰다. Fig. 9는 금형과 펀치에 대하여 응력 해석한 결과이다. 와셔부와 직접 접촉하는 다이는 응력분석상 안전한 것으로 판단되나 펀치의 최대 응력이 1490MPa이므로 항복강도에 근접하므로 펀치에 대한 재료를 다시 선정해야 할 것으로 판단된다.

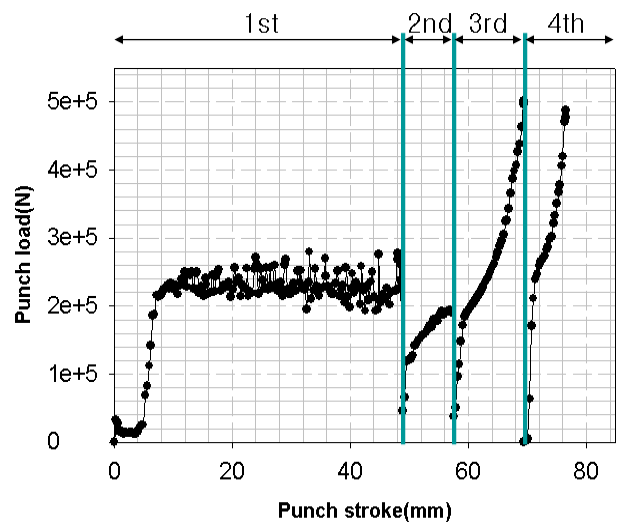


Fig. 8 Predicted load for multi forging process

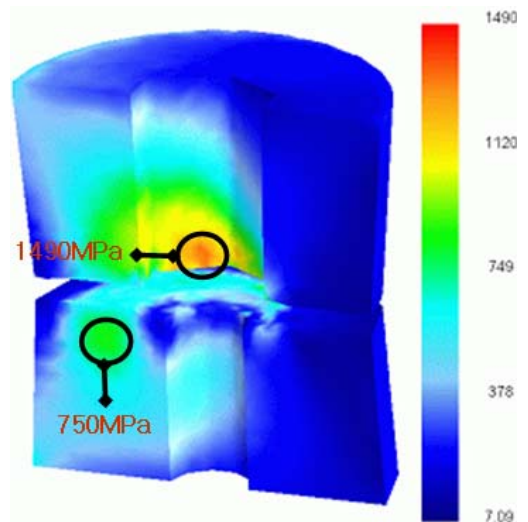


Fig. 9 Structural analysis result of the die in fourth forging process

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 캠 볼트의 냉간 단조 공정에 대한 유한요소법을 적용 하였으며 적정 공정조건 및 금형 형상을 찾기 위해 비대칭 캠 볼트단조 공정을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 비대칭 와셔를 갖는 캠 볼트의 단조공정과 금형 형상을 설계하였다. 비대칭 형상을 유도하기 위하여 추가금형을 설계 하였고 금형의 읍셋 크기는 볼트바디부의 동심 축과 추가 금형의 동심 축 사이 거리가 2단계 공정에서는 2.5mm 3단계 공정에서는 3.5mm가 적절했고 이 공정의 활용으로 비대칭 캠 볼트 제품 생산에 있어서 원가 절감과 제품 생산 시간을 단축 시킬 수 있을 것이다.

(2) 단조공정에서의 총 소요되는 하중을 유한요소 해석 하여 예측 할 수 있었으며, 결과적으로 장비 선정 기준이 될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 본 연구의 대상인 캠 볼트의 단조 시 소요되는 하중이 3단계 4단계에 전체의 70%를 차지하지만 추후 해석적 연구를 통해 효율적인 개선이 가능 할 것이다.

(3) 응력해석 결과 마지막 4단계 단조 공정의 편차에서 응력이 항복응력에 근접하므로 편차를 보강하거나 재료를 다시 선정해야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 지원을 받아 수행되었고 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) McCormack C. and Monaghan J, 2001, "A finite element analysis of cold-forging dies using two-and three dimensional model," *Journal of Materials Processing Technology*, pp.286~292.
- (2) Kim C. C., Jae C., Kim M. S., Park C. W., Kang J. H. and Lee J. H., 2003, "A Study of Automated Process Planning and Die Design for Multi Former-Bolt Products," *Journal of the*

Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 4, pp29~38.

- (3) Petrov P., Perfilov V. and Stebunov, S., 2006, "Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of aluminium alloy A92618," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 218~223.
- (4) Moon H. k., Moon S. C. and Joun M. S, 2005, "Optimization of a Hot Forging Process Using Six Sigma Scheme and Computer Simulation Technology Considering Required Metal Flow Lines," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 14, No. 9, pp.199~202.
- (5) Balendra R and Qin Y., 2000, "Identification and classification of flow-dependent defects in the injection forging of solid billets," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 199~203.