

# 열간단조에서 유한요소법과 유전 알고리즘을 이용한 예비성형체의 최적형상 설계 연구

염성호\*, 이종호<sup>+</sup>, 우호길<sup>++</sup>

(논문접수일 2007. 2. 28, 심사완료일 2007. 4. 23)

## A Study on the Optimal Preform Shape Design using FEM and Genetic Algorithm in Hot Forging

SungHo Yeom\*, JeongHo Lee<sup>+</sup>, HoKil Woo<sup>++</sup>

### Abstract

The main objective of this paper is to propose the optimal design method of forging process using genetic algorithm. Design optimization of forging process was doing about one stage and multi stage. The objective function is considered the filling of die. The chosen design variables are die geometry in multi stage and initial billet shape in one stage. We performed FE analysis to simulated forging process. The optimized preform and initial billet shape was obtained by genetic algorithm and FE analysis. To show the efficiency of GA method in forging problem are solved and compared with published results.

**Key Words** : Forging Process(단조공정), Genetic algorithm(GA)(유전자 알고리즘), Preform Design(예비성형체 설계)

## 1. 서론

금속성형은 현대의 산업사회에서 가장 중요한 생산가공 기술의 하나이다. 단조는 이러한 금속 성형 기술에 속하는 공법이다. 단조에서 결합이 없는 가공품의 성형에는 몇 가지의 중요한 변수에 의존하게 된다. 이러한 변수에는 소재의 초기형상, 소재와 금형의 초기온도, 단조속도, 마찰 계수 그

리고 블로커 금형의 형상과 공정 수에 의해 많은 영향을 받게 된다. 소재의 초기형상은 최종 형상이 복잡한 부품이라 할지라도 그 형상은 대단히 단순하다. 그러나 초기소재가 단순하다 하더라도 복잡한 마지막 형상으로 유동하지 않을 수 있다. 단조공정의 유한요소해석은 소재와 중간금형의 형상을 설계하는 방법에 기초하고 있다. 이러한 유한요소 해석에 의한 단조공정의 연구는 다양하게 발전해 왔다. 첫 번째는

\* 충남대학교 기계공학과 대학원

+ 충남대 기계공학과 대학원

++ 교신저자, 충남대 기계공학과, 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단 (hkwoo@cnu.ac.kr)

주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

역추적(Backward tracing) 방법으로 주어진 마지막 형상으로부터 단조공정에서 하중의 후방경로를 추적하는 방법이다. 이 방법은 몇 가지 결점이 있다. 후방 변형 경로가 유일하지 않기 때문에 해석과정에서 예비성형체의 형상이 주요 변수에 의해 많은 변화를 받을 수 있다. Kobayashi<sup>(1)</sup>는 후방추적기법을 이용하여 몇 가지 단조공정을 수행하였다. 이 외에도 많은 연구가 수행 되었는데 특히 복잡한 최종형상을 저역필터링을 통하여 비교적 단순한 형상을 만들어주는 저역필터법<sup>(2)</sup>, 해석을 수행한 후의 형상과 목표형상과 차이가 있을 경우 예비성형체의 형상을 수정해 목표형상을 얻는 민감도법<sup>(3)</sup>과 유전자 알고리즘<sup>(4-10)</sup> 등이 예비성형체 설계기법으로 활용되고 있다. 소성가공에서 유전자 알고리즘은 압출, 하이드로포밍 및 단조공정 등에 적용되어 활용되고 있다. 단조공정의 최적 형상 설계에 사용된 유전 알고리즘의 이점은 목적을 위해서 유전알고리즘의 목적함수를 적절히 만들 수 있다는 것이다. 즉, 목적함수에 사용될 변수들이 연속적이건 비연속적이건 모든 변수를 사용할 수 있다는 점과 변수의 영역이 넓더라도 모든 범위에서 찾을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 유전자알고리즘과 유한요소법이 결합된 최적화 기법을 이용하여 소성가공의 단조문제에서 일단 공정과 다단공정에서 소재의 최적형상을 찾는 것이 소개되어진다. 그리고 기존에 연구된 단조 문제의 결과와 비교하여 유용성을 보여 준다.

## 2. 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계

최적화 연구에 사용된 유전 알고리즘은 다윈이 주장한 자연 진화의 법칙인 적자생존(survival of fittest)과 자연도태(natural selection)의 원리를 토대로 하여 정립된 최적화 기법이다. 즉 유전적 계승과 다윈 생존경쟁이라는 자연의 현상을 모델링한 확률적인 탐색방법이다. 이 이론은 Holland가 체계화 시켰으며, 공학 분야에는 Goldberg에 의해 가스 송수관에 대한 최적설계가 시도된 이래 많은 연구가 행해지고 있다. 자연 진화의 원리에 의하면 일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률을 크게 가지며 교배(Crossover)와 돌연변이(mutation)의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태되어 간다. 결국 이와 같은 생태계의 환경에 최적으로 적응하고 순응하는 방향으로 진화의 과정을 되풀이하면 주어진 환경에 가장 적합한 형질의 개체들이 형성될 것이다. 유전알고리즘은 이러한 생명체의 자연 진화 과정을 일반 최적화 문제로

적용한 방법으로 이에 대하여 간단의 요약하면 다음과 같다.

유전 알고리즘은 현 세대의 집단 내에서 적합성(fitness)이 높은 설계가 다음 세대로 전달되며, 이들이 번식, 교배 그리고 돌연변이 등의 변화과정을 거쳐 새로운 세대를 이루게 된다.

일반적인 설계변수의 최적화 과정은 목적함수의 최소화로서 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f(p) && p \in H \\ &\text{subject to} && g_i(p) \leq 0 && i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $f(p)$ 는 최소화될 목적함수이며,  $p$ 는 설계변수이며,  $H$ 는 설계변수의 범위를 결정하는 영역이고,  $g_i(p)$ 는 제한조건이다. 유전 알고리즘의 탐색은 목적함수의 적합도만을 요구하기 때문에 제약 조건을 위반하는 비가능 설계 점들은 벌칙함수(penalty function)를 적용하여 생존할 확률을 적게 하여 진화의 과정에서 점차 도태되도록 해야 한다.

## 3. GA를 이용한 수치해석 예시

본 연구에서는 3가지의 단조문제에 관하여 GA를 적용하여 형상을 최적화 하였다. 첫째로 블로커 공정이 불필요한 일단 공정에서 초기 소재의 형상을 결정하여 금형에 충만될 수 있도록 형상을 결정하였다. 두 번째에서는 블로커공정이 필요한 다단 공정에서 블로커 공정을 삽입하여 최종공정에서 금형에 충만 되도록 예비성형체의 형상을 결정하였다. 그리고 마지막으로 실제 블로커 공정의 예비성형체를 이용하여 제품을 제작한 예비성형체의 형상에 대하여 Genetic Algorithms 기법을 적용하여 결정된 예비성형체의 형상과 비교하여 Genetic Algorithms 기법의 유용성을 확인하였다.

### 3.1 일단 공정에서 초기 소재의 최적 형상 설계

Fig. 1은 일 방향 변형이 심한 금형을 나타낸다. 금형의 깊이  $H$ 는 70mm이며,  $D_1$ 는 40mm,  $D_2$ 는 20mm이다. 한 번의 가공으로 소재를 금형에 충전 시킬 경우 소재의 초기 형상에 따라서 완충 여부가 결정된다. 소재의 형상을 결정하기 위해 유전알고리즘을 적용하여 형상을 결정하였다.

유전 알고리즘에 적용될 목적함수는 3가지 목적함수를 선형 조합하여 결정하였다. 첫 번째 목적함수 식 (2)는 초기소재의 반지름  $R$ 에서 새로이 결정될 소재의 반지름  $x_r$ 을 뺀 값으로 하였다. 소재가 금형에 충만할 경우  $x_r$ 과  $R$ 의 차는 0으로 최소화 되어 목적함수를 만족 시킨다.

$$f_1(x_r) = (x_r - R)^2 \quad (2)$$

두 번째 목적함수 식 (3)은 소재가 금형에 완충되지 않을 경우 소재와 금형 사이의 거리를 나타낸다. 단조완료 후 소재의 임의의 점을  $x_m$  그리고 소재의 임의의 점에서 금형에 투영한 점을  $x_d$ 라 한다.

$$f_2(x_r) = (x_m - x_d) \quad (3)$$

세 번째 목적함수 식 (4)는 플래시의 최소량을 나타낸다.  $x_f$ 는 플래시의 길이를 나타내고  $H$ 는 금형의 플래시부 두께를 나타낸다.

$$f_3(x_r) = \pi x_f^2 h \quad (4)$$

식 (2,3,4)의 선형 조합에 의해 최적화 목적함수를 다음과 같이 식 (5)로 구성하였다.

$$\text{Min } f_{opt}(x_r) = \alpha f_1(x_r) + \beta f_2(x_r) + \gamma f_3(x_r) \quad (5)$$

Subject to

$$\pi x_r^2 H = V, \quad 15\text{mm} < x_r < 40\text{mm},$$

$$70\text{mm} < H < 300\text{mm}$$

식 (5)에서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 각각의 목적함수의 중요도에 따른 가중치를 의미한다. 소재의 부피( $V$ )는 결정 되어 있으며 최적화 함수에 의해 결정된 소재의 반지름  $x_r$ 에 의하여 소재의 높이  $H$ 가 결정 된다. 소재의 반지름  $x_r$ 와 소재의 높이  $H$ 는 일정 범위 내에서 결정되도록 제약 조건을 부여 하였다.

식 (2~5)로 정의된 제약조건과 목적함수를 유전 알고리즘

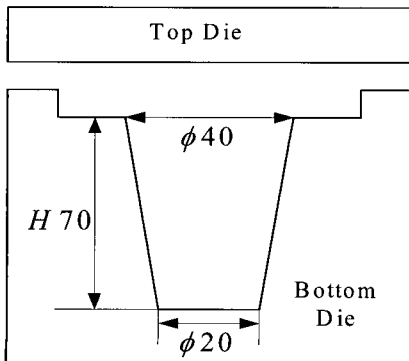


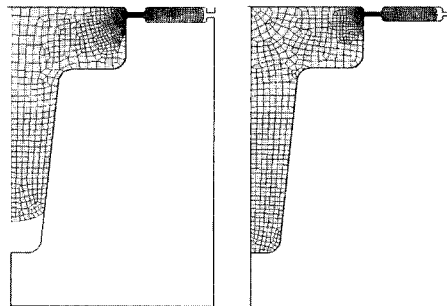
Fig. 1 Die shape of one direction flow part

에 적용하기 위해 적합함수를 구성하여야 한다. 식 (6)과 같은 적합함수를 구성하여 적합도를 계산하고 설계변수를 결정한다. 식 (6)의 적합함수는 최대값으로 수렴하고  $F_{max}$ 는 음의 값이 계산되는 것을 피하기 위해 값이다.

$$\text{Max } F(x) = F_{max} - f_{opt}(x) \quad (6)$$

임의의 초기 값을 대입하여 유한요소 해석을 수행하고 해석결과를 식 (6)으로 구성된 적합함수에 대입하여 새로운 설계변수값을 유전알고리즘을 수행하여 계산한다. 소재의 재질은 Al 5052, 가공온도는 200°C 이다. 유한요소 해석프로그램은 DEFORM -2D를 사용하였다. 상부금형의 이동 속도는 0.5mm/s, 금형사이의 거리가 2mm이면 상부금형의 이동을 정지하였다.  $x_r$ 의 초기값은 34mm, 소재의 부피  $V$ 는 217901mm<sup>3</sup>이다. 이러한 과정을 반복수행하여 소재가 금형에 충전 되었을 때 최적화 과정을 중단하였다.

Fig. 2는 초기소재의 형상에 대한 최적화 설계를 수행하여 결정된 초기의 형상으로 성형을 했을 경우 금형에 충전된 소재를 확인 할 수 있다. Fig. 3은 최적화가 진행되는 과정에



(a) Initial analysis (b) 6th analysis

Fig. 2 FE analysis of one stage forging

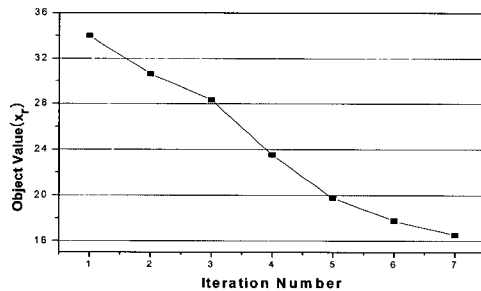


Fig. 3 Object value at one stage forging

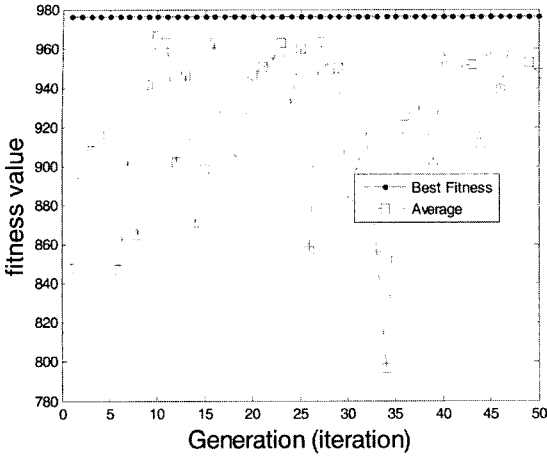


Fig. 4 Evolution of fitness function(one stage forging)

서 목적함수값을 나타낸 것이다. 전체적으로 5번의 반복과정을 수행하여 금형에 충만 되는  $x$ , 값이 결정되었다.

유전알고리즘에 의한 해석결과  $x_r, H$ 는 16.5211, 254.1mm에서 소재가 금형에 충만 되었다. Fig. 4는 GA과정에서 적합값에 수렴되는 과정을 보여주고 있다. 수렴과정이 뚜렷하게 나타나고 있지는 않지만 반복횟수가 많아지면서 적합값에 가까워지고 있음을 확인 할 수 있었다.

### 3.2 다단공정에서 예비성형체의 최적 형상 설계

일 방향 변형이 심한 단조품에서 한 번의 가공으로 소재가 금형에 충만 되는 경우는 Fig. 2에서 처럼 플래시가 과다하게 발생하게 되며 과다한 플래시의 생성과 함께 금형에서는 많은 압력이 발생하며 이로 인해 금형이 파손될 정도의 응력을 받는 경우도 생기게 된다. 과대한 압력에 의한 응력발생으로 인한 금형의 파손 예방하고 플래시의 양을 줄이기 위해 Fig. 5처럼 단조공정의 중간 단계인 블로커 공정을 거쳐 피니시 과정을 수행하여 종료한다.

블로커 공정에 대하여 유전 알고리즘을 적용하여 블로커 공정에서 예비성형체의 형상을 최적화하였다. 다단공정에서 예비성형체의 중요한 변수는 2개로 설명 할 수 있다. Fig. 5처럼  $h$ 와  $\alpha$  두 개의 설계변수를 결정해야 한다. 일단공정과 같이 여러 개의 목적함수를 적용하여 설계변수를 결정하였다. 첫 번째 목적함수는 예비성형체의 높이( $h$ )와 관련된 것으로 식 (7)과 같다.

$$f_2(x_h) = (x_h - h)^2 \quad (7)$$

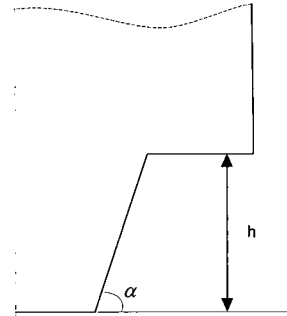


Fig. 5 Design parameter of two stage forging

두 번째 목적함수는 금형과 소재와의 각을  $\alpha$ 라 하면 이와 관련된 식은 다음과 식 (8)과 같다.

$$f_1(x_\alpha) = (x_\alpha - \alpha)^2 \quad (8)$$

세 번째 목적함수 식 (9)는 단조완료 후 소재의 임의의 점을  $x_m$  그리고 소재의 임의의 점에서 금형에 투영한 점을  $x_d$ 라 한다. 이에 대한 목적함수를 표현하면 식 (9)와 같다.

$$f_3(x_\alpha, x_h) = (x_m - x_d) \quad (9)$$

식 (7,8,9)의 선형 조합에 의해 최적화 목적함수를 다음과 같이 식 (10)으로 구성하였다.

$$\text{Min } f_{opt}(x_\alpha, x_h) = \alpha f_1(x_\alpha, x_h) + \beta f_2(x_\alpha, x_h) + \gamma f_3(x_\alpha, x_h) \quad (10)$$

Subject to

$$30\text{mm} < h < 50\text{mm}$$

$$50^\circ < \alpha < 90^\circ$$

식 (10)에서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 일단공정에서와 동일하게 각각 목적함수의 중요도에 따른 가중치를 의미하며  $h, \alpha$ 에 대한 제약 조건을 나타내었다.

식 (7~10)으로 정의된 제약조건과 목적함수를 유전 알고리즘에 적용하기 위해 적합함수를 구성하고 식 (11)과 같은 적합함수를 구성하여 적합도를 계산하여 설계변수를 결정하였다. 식 (11)의 적합함수는 최대값으로 수렴하고 여기서  $F_{max}$ 는 음의 값이 계산되는 것을 피하기 위한 값이다. 임의의 초기 값  $h, \alpha$ 를 대입하여 유한요소 해석을 수행하고 해석 결과를 식 (11)로 구성된 적합함수에 적용하여 유전알고리즘을 수행 새로운 설계변수값을 계산한다.

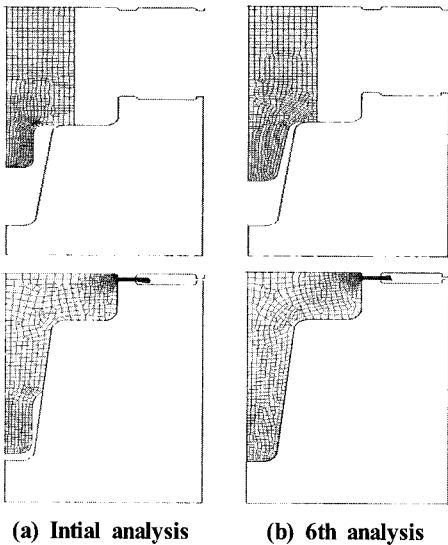


Fig. 6 FE analysis of two stage forging

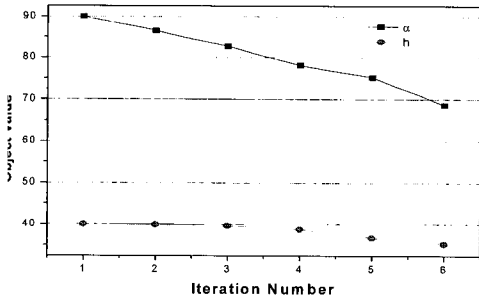


Fig. 7 Object value at two stage forging

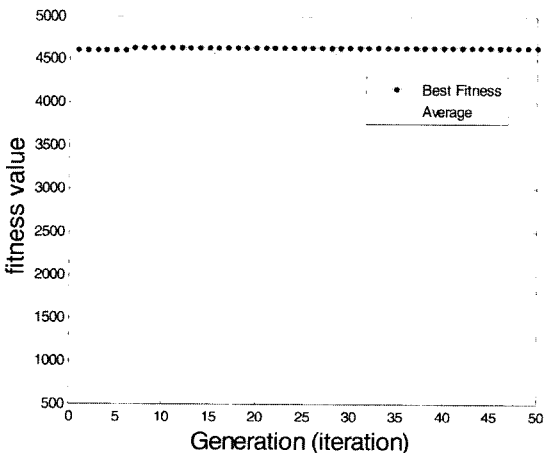


Fig. 8 Evolution of fitness function(two stage forging)

$$\text{Max } F(h, \theta) = F_{\max} - f_{opt}(h, \theta) \quad (11)$$

이러한 과정을 반복수행하여 소재가 금형에 충만 되었을 때 최적화 과정을 중단하였다. Fig. 6은 다단공정에서 유전 알고리즘을 적용하여 설계한 예비성형체가 금형에 충만함을 해석결과로 보여주고 있다. 계산결과 Fig. 7처럼 6번의 계산 과정을 거치면서 수렴하였다.  $h$ 는 34.7mm,  $\alpha$ 는 68.17도에서 금형에 소재가 충만하였으며 플래시의 양은 최소가 되었다. Fig. 8은 GA과정에서 적합값에 수렴되는 과정을 보여주고 있다. 수렴과정이 초기에 뚜렷하게 나타나고 있다.

### 3.3 단조피스톤의 예비성형체 설계

접합피스톤(Articulated Piston)은 디젤엔진에 사용되는 피스톤으로 기존에 사용되던 알루미늄(AL)피스톤의 기계적 열적 강도의 취약성을 해결하기 위해 개발된 피스톤이다. Fig. 9와 같은 형상을 한 번에 가공 할 수 없기 때문에 중간 단계인 블로킹공정을 거치게 되며 이에 대한 연구<sup>(11)</sup>는 이미 수행 된 바 있다. 단조피스톤은 단조과정에서 수평방향의 재료 변형 보다는 수직방향의 재료변형이 크기 때문에 예비성형체의 길이방향에 대한 설계가 필요하다. 그래서 쿨링 젤리 리부와 핀 보스 부분의 길이에 대하여 유전알고리즘을 이용하여 설계변수를 결정하고 이에 대해 앞서 연구된 결과와 비교한다. 유전자 알고리즘을 이용하여 피스톤의 단조에서 예비성형체 설계를 위한 목적함수는 다음과 같이 구성한다. 첫 번째 목적함수 식 (12)는 피스톤 젤리부의 길이  $x_g$ 와 단조 전 소재와 금형과의 거리  $p_g$ 를 나타내고 두 번째 목적함수 식 (13)은 피스톤 보스 부분의 길이  $x_b$ 와 단조 전 소재와 금형과의 거리  $p_b$ 를 나타낸다. 그리고 세 번째 목적함수 식 (14)는 단조 후 피스톤 핀 보스 부분에서 소재와 금형과의 거리를 나타낸다. 이에 대하여 선형조합으로 목적함수를 결정하면 식 (15)와 같다.

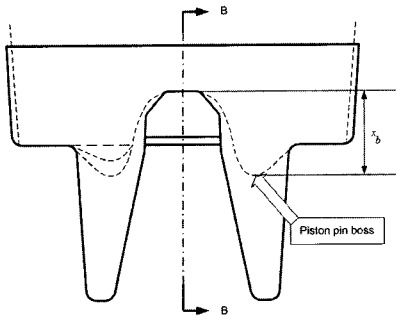
$$f_1(x_g) = (x_g - p_g)^2 \quad (12)$$

$$f_2(x_b) = (x_b - p_b)^2 \quad (13)$$

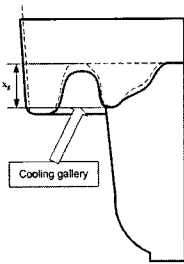
$$f_3(x_b, x_g) = (x_m - x_d) \quad (14)$$

$$f_{opt}(x_g, x_b) = \alpha f_1(x_g, x_b) + \beta f_2(x_g, x_b) + \gamma f_3(x_g, x_b) \quad (15)$$

설계변수에서 피스톤 핀 보스 부와 젤리부에 대한 길이 방향의 제한 조건은 다음과 같다.



(a) half cutting view



(b) B-B cutting view

Fig. 9 Design parameter of piston forging

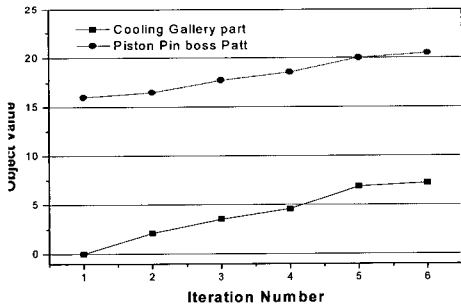


Fig. 10 Object value at piston blocker forging stage

Subject to

$$0mm < x_g < 14mm$$

$$16mm < x_b < 24mm$$

단조피스톤은 1/4단면에서 축대칭이기 때문에 이에 대한 유한 요소해석은 DEFORM-3D를 사용하였다. 상부금형의 성형 속도는 2mm/s, 소재는 AISI4140, 소재온도 1200도, 소재와 금형간의 마찰계수는 0.4로 가정하여 해석을 수행하였으며, 첫 번째 예비성형체의 핀 보스부분 16mm, 갤러리는 0mm로 하여 해석을 수행하였다. 해석결과를 목적함수

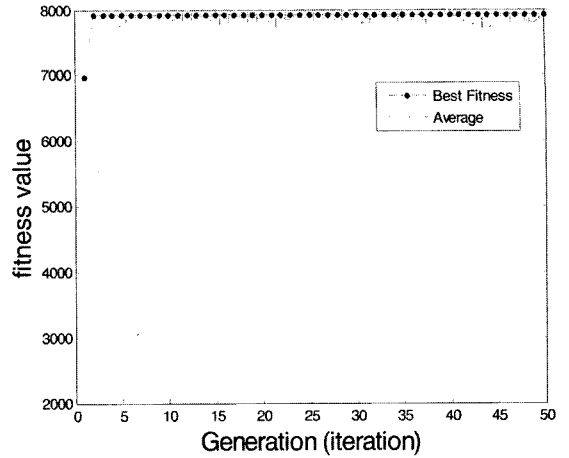
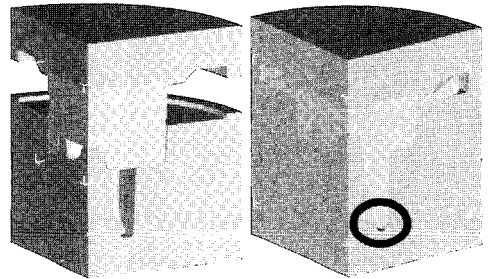
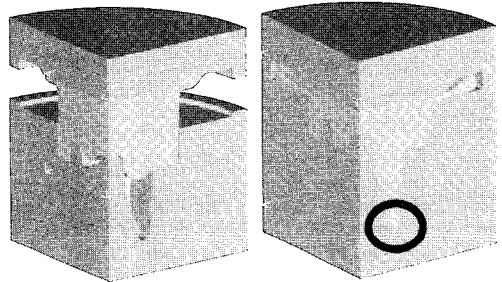


Fig. 11 Evolution of fitness function(forged piston forging)



(a) Unfilled at  $p_g:0mm$ ,  $p_b:16mm$



(b) filled at  $p_g:7.21mm$ ,  $p_b:20.56mm$

Fig. 12 FE analysis of forged piston forging

에 적용하여 유전알고리즘에 의해 새로운 변수값을 결정하였다. Fig. 11은 목적함수의 평균값이 적합값에 빠르게 수렴하고 있음을 확인 할 수 있다. GA에 의해 결정된 변수를 다시 모델링하여 유한요소 해석을 수행하였다. 이 과정을 반복하여 수행한 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 결과 핀 보스부의 길이 20.56mm, 갤러리의 길이 7.21mm일 때 금형에

소재가 충분 하였다. 이는 앞서 연구된 20mm, 7mm의 값과 결과에 있어서 매우 유사하였다. Fig. 12는 초기소재에 성형하였을 때 금형에 소재가 미충진된 것과 GA에 의해 수렴된 값으로 성형하였을 경우 금형에 소재가 충전된 것을 보여 주고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소법과 유전 알고리즘을 이용하여 일 방향 유동성을 갖는 단조형상에 대하여 예비성형체 형상의 최적화를 수행하였다. 이에 대한 연구를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 최적화 설계기법인 유전 알고리즘을 이용하여 예비성형체의 주요 부위에 대한 형상을 결정하는 방법을 제시하였다.
- (2) 일단공정에서 초기소재의 반지름과 높이 결정을 위해 소재의 금형에 충전 정도와 플래시 생성량을 목적함수로 하여 초기소재의 형상을 결정하였다.
- (3) 다단공정에서 중간단계의 볼록키 공정의 예비성형체를 결정하기 위해 금형과 소재의 기울기각도와 금형과 소재와의 충전 정도를 목적함수로 설정하여 예비성형체의 형상을 설계하였다.
- (4) 기존에 연구된 단조피스톤의 예비성형체 형상 설계에서 소재의 금형에 충전 정도에 대한 목적함수를 설정하여 예비성형체의 형상을 설계하였고 이를 기존에 연구된 방법과 비교하여 유용성을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2005년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고 문헌

- (1) Park, J. J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1983, "A new approach to preform design in metal forming with the finite element method," *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.*, Vol. 23, pp. 71~79.
- (2) Han, S. H., Rhim, S. H. and Oh, S. I., 2003,

"Blocker Design of Closed Die Forging with Wavelet Transform," *Transactions of Materials processing*, Vol. 12, No. 4, pp. 277~283.

- (4) Shim, H. B., Noh, H. C. and Suh, E. K., 2001, "Preform Design by the Sensitivity Method," *Transactions of Materials processing*, Vol. 10, No. 4, pp. 294~301.
- (5) Kusiak, J., 1996, "A technique of tool-shape optimization in large scale problems of metal forming," *Material processing technology*, Vol. 57, pp. 79~84.
- (6) Roy, S., Ghosh, S. and Shivpuri, R., 1995, "A New Approach to Optimal Design of Multi-Stage Metal Forming Processes With Micro Genetic Algorithms," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, No. 1, pp. 29~44.
- (7) Conceicao Antonio, C. A. and Magalhaes Dourado, N., 2002, "Metal-Forming process optimization by inverse evolutionary search," *Material processing technology*, Vol. 121, pp. 403~413.
- (8) Guoqun Zhao, Xinwu Ma, Xinhai Zhao, Ramana V. Grandhi, 2004, "Studies on optimization of metal forming processes using sensitivity analysis methods," *Material processing technology*, Vol. 147, pp. 217~228.
- (9) Castro, C. F., Anonio, C. A. C. and Sousa, L. C., 2004, "Optimization of shape and process parameters in metal forming using genetic algorithms," *Material processing technology*, Vol. 146, pp. 356~364.
- (10) Yeom, S. H., Lee, J. H. and Woo, H. K., 2006, "A Study on the Preform Design of One direction flow forged part using Genetic Algorithm," *Autumn Conference of Transactions of Machine Tool Engineers*, pp. 386~391.
- (11) Yeom, S. H., Lee, B. S., Rho, B. R., Seo, K. S. and Hong, S. I., 2004, "A Study on Forging Process about Preform of Articulated Piston for Diesel Engine," *Transactions of Materials processing*, Vol. 13, No. 7, pp. 635~641.