

저역 통과 필터를 사용한 예비가공형 설계

오수익, 윤성만, 박동진, 오진용

서울대학교 기계설계학과

A Blocker Design Using a Low Pass Filter

S. I. Oh, S. M. Yoon, D. J. Park and J. Y. Oh

Department of Mechanical Design and Production Engineering,
Seoul National University

Abstract

This paper investigates a new method to design blocker geometry in rib-web type closed die forging. By examining various forging and blocker geometries, it was found that blocker geometry can be generated by eliminating high frequency mode from finisher geometry. In order to formalize the procedure, low pass filters, which can convert finisher to blocker geometry, are proposed. Also discrete Fourier transform is used for computational efficiency. The blocker geometry designed by the present method are compared with the one by an experienced designer. The blocker geometries are also validated by using FEM simulation. Present results shows that the frequency approach may offer a promising method to design blocker automatically.

Keywords : metal forming, die design, blocker, low pass filter

1. 서론

단조 공정에서는 일반적으로 간단한 형상의 재료를 금형을 이용하여 보다 유용하고 복잡한 형상의 제품을 성형하게 된다. 이 과정에서 최종 성형품의 형상이 너무 복잡할 때에는 적절한 중간 단계의 형상을 성형함으로써 적절한 금속의 유동과 분포를 갖게 한다. 그렇기 때문에 원하는 최종 단조품의 형상은 연속된 여러 개의 금형을 사용하여 소성 가공을 함으로써 얻어진다. 이러한 과정에서 사용되는 금형을 예비가공형 (blocker 또는 preform) 이라고 하는데, 이 중간 단계의 형상 설계는 단조 공정 전체의 성패를 좌우하는 중요한 부분이다.

금형 설계는 대부분 숙련된 전문가에 의하여 이루어진다. 특히 적절한 예비가공형의 모양을 설계하는 것은 매우 어려워서 오랜 경험을 가진 전문가들이 여러 번의 시행착오를 거치면서 설계하는 것이 보통이다. 그러므로 예비가공형을 설계하기 위해서는 비싼 금형 제작비와 함께 설계, 제작을 위해 많은 시간과 노력이 들어간다.

이러한 비용과 시간을 줄이기 위해 예비가공형 설계를 자동화하려는 여러 가지 시도가 있었다. Subramanian^[1]의 경우 단조품의 단면을 “L 모양”으로 나누고 각각의 L 모양을 여러 가지 기하학적 변수들로 기술하였다. 단조 최종형의 L 모양의 여러 가지 기하학적 변수에 정해진 계수를 곱하고, 이로부터 예비가공형의 L 모양을 얻고, 얻어진 L 모양을 다시 결합함으로써 예비가공형의 단면을 얻어내었다. 그러나 이러한 방법은 Dean 등^[2]에 의해 지적되었듯이 명백한 한계를 갖고 있고 일반성을 결여하고 있다. 이와 유사하게 예비가공형의 반경을 결정하기 위해 Yu 와 Dean^[2]은 Bruchanow 와 Rebelski^[3]에 의해서 제안된 표현 방법을 동일하게 사용하였고, Biswas 와 Knight^[4]는 Chamouard^[5]에 의해 제안된 지수함수 곡선을 사용하였다. 컴퓨터를 이용한 이러한 예비가공형 설계 프로그램들은 다양한 기하학적 형상과 성형 조건에 관계없이 정해진 계수와 표현 방법을 사용하고 있다. 그러므로 이러한 접근들은 몇 가지 경우를 제외하고는 부적절함을 보였고 이러한 방법을 적용할 수 있는 범위가 매우 제한되는 결과를 보여주었다.

Kobayashi 등^[6, 7]은 유한요소법을 이용한 역 추적법을 이용하여 예비가공형의 형상을 얻으려는 시도를 하였다. 금형의 접촉 경계조건이 비선형적이기 때문에 이 방법은 비교적 단순한 형상에 대해서만 성공적인 결과를 보여주었다.

최근에 Vemuri 등^[8, 9]은 knowledge-based system (KBS)을 사용하여 예비가공형의 설계를 자동화하였다. 이 방법의 기본적인 접근 방법은 예비가공형 금형 설계에 사용되던 기존의 경험법칙들을 모아서 컴퓨터 프로그램의 형태로 만드는 것이었다. 그러나 이 방법은 경험법칙을 수집하는 것이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

이상의 고찰에서 보듯이 예비가공형 설계를 자동화하는데 있어서 가장 큰 문제점은 예비가공형 설계를 하는 일반적이고도 적용하기 쉬운 방법이 없다는 데 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 오 등^[14]은 예비가공형을 설계하는 새로운 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 이 제안된 방법을 이용하여 예비가공형을 설계하여 이의 타당성을 검증하려고 한다. 이를 위하여 간단한 형상에 대하여 예비가공형 설계를 한 후 유한요소 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 보이고, 그 후에 좀더 복잡하고 일반적인 경우의 예를 가지고 예비가공형 설계와 유한요소 시뮬레이션 그리고 실험을 통하여 이 방법의 적용 가능한 범위를 넓히려고 한다.

2. 접근 방법

2.1 예비가공형 설계의 기본

형 단조의 경우 적절한 금속 분포를 얻기 위해 고려해야 할 많은 중요한 것들이 있지만 가장 중요한 것 중의 하나가 바로 예비가공형 설계와 예비 성형 공정의 설계를 바르게 하는 것이다. 이를 통하여 단조품의 최종 형상을 성형하였을 때, 결합이 발생하지 않고 금속 유동이 적절히 금형을 채우며 플래시 부분을 최소화시킬 수 있다. 단조품의 최종 형상으로부터 예비가공형을 설계하는 정형화된 방법은 없지만 예비가공형 설계를 위한 정성적인 원칙들은 잘 알려져 있다. 그 중 몇 가지 기본적인 법칙들은 다음과 같다^[10]:

- 예비가공형의 모든 모서리 반지름은 단조 최종형의 모서리 반지름보다 커야 한다.
- 예비가공형의 길이 방향을 따라서 각각의 단면의 면적은 플래시 부를 포함한 단조 최종형의 단면 면적과 같아야 한다.

- 단조 되는 방향으로 예비가공형의 치수가 단조 최종형의 치수보다 커야 된다. 이는 급속의 유동이 압출에 의하지 않고 업세팅에 의해 일어나게 하기 위한 것이다. 등

Fig. 1 은 H 형상의 단면을 가지고 있고 rib 사이의 간격이 넓은 경우의 예비가공형 형상의 예를 보여주고 있다^[11]. Fig. 1로부터 다음과 같은 점을 제외하고는 예비가공형과 단조 최종형이 비슷한 모양을 가지고 있음을 알 수 있다.

- 예비가공형의 rib 이 더 짧다.
- 예비가공형의 web이 더 두껍다.
- 예비가공형의 모서리 반지름이 더 크다.
- 예비가공형과 단조 최종형의 단면적이 거의 비슷하다.

또한 f_3 과 f_4 의 면적에서 보이는 것과 같이 국부적으로 체적이 균형을 이루고 있음도 볼 수 있다.

Fig. 2 는 다른 경우의 예비가공형 형상의 예를 보여주고 있다. 이 경우는 rib의 높이가 rib 사이의 넓이의 두 배 이상이고 rib 사이의 거리가 적당한 경우이다. 이 경우도 Fig. 1 과 마찬가지로의 경향들을 볼 수 있다.

Fig. 1 과 Fig. 2로부터 예비가공형의 형상은 단조 최종형의 형상에서 각 부분의 면적을 이동하면서 평균을 내는 기법을 이용하여 얻을 수 있음을 알 수 있다. 좀 더 명확하게 말하면, 예비가공형은 단조 최종형의 형상을 Fourier 급수 형태로 전개한 후 높은 주파수 영역을 제거함으로써 얻어질 수 있다. 높은 주파수 성분은 신호처리 분야에서 널리 쓰이는 low pass filter를 사용함으로써 제거할 수 있다.

2.2 수학적 기초

기하학적 영역에 어떤 함수 $f(x)$ 가 있다면 이는 Fourier 변환에 의하여 주파수 영역의 $F(u)$ 로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-i2\pi ux) dx \quad (1)$$

여기서 $i = \sqrt{-1}$. 역 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$f(u) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x) \exp(i2\pi ux) dx \quad (2)$$

계산상의 편의를 위해서 Discrete Fourier Transform(DFT)^[12] 를 도입한다. N 개의 복소수가 $\{f_j\}_{j=0}^{N-1}$ 와 같이 주어졌을 때 N 개의 DFT 는 $\{F_k\}$ 로 표시되고 다음과 같이 정의된다.

$$F_k = \sum_{j=0}^{N-1} f_j \exp(-i2\pi jk / N) \quad (3)$$

여기서 $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N/2$. DFT의 역변환은 다음과 같이 정의된다.

$$f_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k \exp(i2\pi jk / N) \quad (4)$$

여기서 $j = 0, 1, \dots, N-1$. 만약 $N = 2^R$ 이고 R 이 정수라면, DFT는 매우 효율적으로 계산될 수 있는데 이 과정을 Fast Fourier Transform(FFT)라 한다.

Fourier 변환과 DFT의 관계를 살펴보기 위해서 Fourier 변환으로 주어진 식 (1) 이 다음과 같이 근사화 될 수 있다고 하면

$$F(u) = \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} f(x) \exp(-i2\pi ux) dx \quad (5)$$

여기서 Ω 는 충분히 큰 숫자이면 Fourier 변환은 DFT로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F\left(\frac{k}{\Omega}\right) \approx \frac{\Omega}{N} \sum_{j=0}^{N-1} g\left(j\frac{\Omega}{N}\right) \exp(-i2\pi jk/N) \quad (6)$$

여기서 $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 이고 함수 $g(x)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$g(x) = \begin{cases} f(x) & 0 \leq x < \Omega/2 \\ (f(\Omega/2) + f(-\Omega/2))/2 & x = \Omega/2 \\ f(x-\Omega) & \Omega/2 < x \leq \Omega \end{cases}$$

$\{G_k\}$ 가 $\{g_j\}$ 의 DFT 라면, 주기성에 의해 식 (6) 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F\left(\frac{k}{\Omega}\right) &\approx \frac{\Omega}{N} G_k & k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} \\ F\left(\frac{-k}{\Omega}\right) &\approx \frac{\Omega}{N} G_{N-k} & k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1 \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 Filter 함수

앞에서 언급된 바와 같이 여기서는 low pass filter가 필요하다. low pass filter란 그 이름이 암시하듯이 낮은 주파수 영역의 신호들은 통과시키고 높은 주파수 영역의 신호들은 걸러 낸다. filter 함수는 주파수 영역에서 정의된다. 이를 $H(u)$ 라고 표시하자. 함수 $f(x)$ 의 Fourier 변환을 $F(u)$ 라고 하면 $f(x)$ 로부터 filtering 을 통하여 얻어지는 함수는 다음과 같다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(u) H(u) \exp(i2\pi ux) du \quad (8)$$

filter 함수에는 다양한 종류가 있지만 본 연구에서는 특별히 다음과 같은 monotonic smooth filter를 사용하기로 한다.

$$H_0(u) = [0.5 + 0.5 \cos 2\pi u]^n, \quad -0.5 \leq u \leq 0.5 \quad (9)$$

여기서는 $n = 20$ 으로 선택하였다. 괄호 안의 수식은 잘 알려진 Hanning Filter를 나타낸다. 위의 함수에 다음과 같이 α 를 도입함으로써 cut-off frequency를 조절할 수 있는 새로운 filter 함수 $H(u, \alpha)$ 를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 H(u, \alpha) &= H_0\left(\frac{u}{\alpha}\right) & |2u| \leq \alpha, \\
 H(u, \alpha) &= 0 & \alpha < |2u| \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

식 (10) 에 의해 주어진 filter 함수의 cut-off frequency (변곡점) 는 다음과 같다.

$$f_c = \frac{\alpha \cdot \cos^{-1}(1 - 1/n)}{2\pi}$$

기하학적 형상에 filtering 한 영향을 보기 위해 다음과 같이 정의되는 함수 $\text{rec}(x)$ 를 살펴보자.

$$\begin{aligned}
 \text{rec}(x) &= 1 & \text{for } |x| \leq 1, \\
 \text{rec}(x) &= 0 & \text{for } |x| > 1
 \end{aligned}$$

Fig. 3 에서 보는 것과 같이 3개의 filter 함수, $H(u, 0.5)$, $H(u, 0.125)$, $H(u, 0.0625)$ 가 사용되었다. $\text{rec}(x)$ 와 filtering 된 함수들이 Fig. 4 에 나타나 있고 filtering 전, 후의 주파수 영역의 모습이 Fig. 5 에 나타나 있다. Fig. 4 에서 filtering 된 형상을 보면 다음과 같은 것들을 관찰할 수 있다.

- 직사각형 모양의 함수는 좀 더 부드러운 모양으로 바뀐다. 그리고 이러한 모양은 예비가공형의 설계시의 rib 모양에 더 가깝다.
- filtering 된 함수의 면적은 보존될 뿐 아니라 국부적으로도 균형을 이룬다. 이것은 앞에서 언급되었듯이 예비가공형의 설계에 있어 중요한 성질이다.

3. 결과와 고찰

3.1 예비가공형 형상의 설계

Fig. 6 은 복잡한 형상의 3차원 단조품의 예비가공형의 단면을 보여주고 있다. 이 예비가공형들은 각각 aluminum 과 titanium에 대해서 경험 있는 설계자가 설계한 것이다. 단조품의 단면 형상은 Table 1 과같이 모서리 점과 그 반경들로 나타낼 수 있다. filtering 방법을 사용하여 Fig. 6 과 같은 예비가공형 형상을 얻어내는 것이 일차적 목표이다. 이를 위하여 식 (10) 의 low pass filter 를 cut-off frequency 를 변화시켜가면서 사용하였다. FFT 기법을 사용하기 위하여 x 의 범위를 $-101.6 \leq x \leq 101.6$ 으로 잡았다. 이는 단조품과 예비가공형의 단면이 모두 포함될 만큼 충분히 넓은 영역이다. 이 영역은 $N = 1024$ 의 부분으로 나누어져서 단조품의 단면은 $x_j = 2 \cdot 101.6 \cdot j / N$, $j = 0, \pm 1, \dots, \pm N/2 - 1$ 에서 이산화(digitize) 되었다. 대칭형상이기 때문에 윗부분만 다루는 것으로 충분하다. Fig. 7 은 filter 함수 $H(u, 0.089)$, $H(u, 0.129)$, $H(u, 0.198)$ 를 사용하여 단조품의 단면을 filtering 한 모양을 보여준다. Fig. 7 에서 다음과 같은 것들을 관찰할 수 있다 :

- cut-off frequency 가 감소함에 따라 rib 은 더 부드러운 모양으로 변환된다. 그리고

rib 과 web의 경계가 불분명해진다.

- 전체적인 체적이 보존되면서 rib 의 면적이 재분배되고 있다.

filter 함수 $H(u, 0.129)$ 를 사용하여 얻은 예비가공형의 모양과 전문가에 의해 설계된 예비가공형의 모양을 Fig. 8 에서 비교하고 있다. 두 곡선이 약간의 틀린 부분을 제외하고는 단조 최종형 안의 영역에서 ($P' - P$ 영역) 상당히 잘 일치함을 볼 수 있다 [Fig.8]. filtering 으로 얻은 예비가공형의 rib 끝의 반지름이 기존의 방법으로 설계된 것보다 더 날카롭다. 또한 rib 의 안쪽 변곡점 부분의 경사가 기존의 설계보다 완만함을 볼 수 있다. 단조 최종형의 바깥부분의 영역에서는 ($P - Q$ 영역) 얻어진 모양이 기존의 방법으로 설계된 모양과 상당히 틀림을 볼 수 있다. 기존의 방법으로 설계된 예비가공형의 모습을 살펴보면, Titanium 의 경우에는 rib 의 바깥쪽 면은 단조 최종형과 같은 경사각을 가지고 있고, Aluminum 의 경우에는 Fig. 6 에서 보는 것과 같은 곡선의 모양을 하고 있다. filtering 을 이용한 예비가공형 설계를 완료하기 위하여 다음과 같은 작업들을 하였다 :

- 예비가공형의 체적이 단조 최종형의 체적의 6-7 % 정도 많게, filtering 을 통해 얻어진 곡선의 높이를 조절하였다.
- rib 바깥쪽의 모양을 기존의 방법으로 설계된 것과 비슷하게 처리하였다. 다시 말하면 titanium 의 경우는 단조 최종형의 경사각과 같게 rib 의 바깥부분을 처리하였고, aluminum 의 경우는 interpolation 기법을 사용하여 비슷한 모양을 갖도록 처리하였다.

이러한 방법을 사용하여 얻은 예비가공형의 모습이 Fig. 9 에 나와 있다. 기존의 방법으로 설계된 예비가공형의 경우 단조 최종형보다 25% 정도 더 체적을 갖고 있는데(6-7 % 가 아니고) 이것은 이 단면이 실제 3차원 물체의 가장자리 부분이기 때문이다.

3.2 예비가공형 형상의 유용성 검토

예비가공형의 형상이 유용한가를 확인하기 위하여 세가지 단조 공정을 FEM 프로그램 DEFORM^[13] 을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 첫번째 경우는 직사각형 모양의 초기소재 (넓이 61 mm, 높이 67.8 mm) 를 예비가공형 없이 단조하였다. 대칭형상이기 때문에 단면적의 1/4 만 해석하였다. 재질은 Al 7075^[10]와 Ti 6242^[15] 를 사용하였고 평면 변형을 조건에서 비등온과정으로, 금형과 재료 사이의 마찰인자는 $m = 0.3$ 으로 하였으며 Aluminum 경우 초기의 금형온도는 180 °C, 소재온도는 410 °C, titanium의 경우 금형온도는 750 °C, 소재온도는 950 °C로 해석하였다.

Fig. 10 - Fig. 12 는 aluminum 재료를 사용하여 시뮬레이션한 결과인데 Fig. 10 은 초기에 10x10 의 직사각형 모양의 선들이 단조 후에 변화된 모습을 보여주고 있다. 이 경우에는 예비가공형이 없이도 성공적으로 단조가 수행되었지만 원래의 3차원 최종형은 예비가공형이 필요하다. 두번째 경우는 첫번째 경우와 동일한 초기 소재를 가지고 기존의 방법으로 설계된 예비가공형을 사용하여 단조를 수행한 것이다. 그 후에 플래시 부분을 잘라 내고 그 예비가공형 형상을 단조 최종형을 얻기 위한 소재로 사용하였다. 단조 후의 금속 유동은 Fig. 11 에 나타나 있다. 첫번째 경우와 비교하면 예비가공형을 사용하였을 때 rib의 안쪽부분과 web부분의 변형이 좀 더 균일하여 금형과 재료 사이의 변형에 있어서 불필요한 일이 감소되는 것을 볼 수 있다. 세번째의 경우는 filtering 기법을 이용하여 설계한 예비가공형을 사용하여 단조를 수행한 것이다. 단조 후의 금속 유동은 Fig. 12 에 나타나 있다. 이 경우의 금속 유동은 두번째 경우와 거의 유사함을 볼 수 있다. 두번째와 세번째의 시뮬레이션에 사용된 예비가공형의 형상이 거의 유사하기 때문에 이러한 결과는 이미 예상하던 것이었다.

Fig. 13 - Fig. 15는 동일한 과정을 titanium 재료를 사용하여 시뮬레이션한 결과이다. 이 경우에는 예비가공형을 사용하였을 때, web 부분의 변형이 더욱 균일함을 볼 수 있고 Fig.14와 Fig. 15를 비교하면 두번째와 세번째의 금속의 유동이 거의 유사함을 볼 수 있다.

본 연구의 목표가 예비가공형을 설계하는 것을 자동화하는데 그 강조점이 있으므로 기존의 방법으로 설계된 것과 유사한 형상으로 결과를 얻을 수 있다는 것은 이 filtering 방법이 예비가공형 설계의 자동화에 유용하게 사용될 수 있다고 할 수 있다.

4. 결론

filtering 방법을 사용하여 rib-web 형태의 형단조 공정에 있어서 예비가공형의 설계를 자동화할 수 있는 가능성을 제시하였다. 실제의 예비가공형 설계에 있어서는 여기서 예로 든 간단한 rib-web 형태의 단조보다는 훨씬 더 복잡하며 고려해야 할 많은 인자들이 있다.

이 방법은 예비가공형을 얻기 위해 계산하는 과정을 계산 효율이 좋은 FFT로 처리하기 때문에 3차원 rib-web 형태의 예비가공형 설계에 적용하기에도 적합하다.

이 방법을 3차원의 예비가공형을 자동적으로 설계하는데 적용하고 이 방법의 적합성을 검증하기 위하여 모의 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하려고 한다. 이러한 여러 가지 시도를 통하여 다양한 형상과 여러 가지 인자들을 동시에 고려할 수 있는 자동화된 금형 설계 방법을 개발할 예정이다.

5. 참고 문헌

1. Subramanian, T. L., et. al., Application of Computer-Aided Design and Manufacturing to Precision Isothermal Forging of Titanium Alloys, Tech. Report AFML-TR-77-108, Air Force Material Labs., 1977
2. Yu, G. B. and Dean, T. A., A Practical Computer-Aided Approach to Mold Design for Axisymmetric Forging Die Cavities, Int. J. M.T.D.R., Vol. 25, 1985, pp. 1-13
3. Bruchanow, A. N. and Rebelski, A. W., Gesenk-schmieden und Warmpressen, Veb Verlag Technik, Berlin, 1955
4. Biswas, S. K. and Knight, W., Towards an Integrated Design and Production System for Hot Forging Dies, Proc. 3rd Int. Conf. on Production Research (Amherst), 1976
5. Chamouard, A., Estampage et Dunod, Paris, 1, 1964
6. Hwang, S. M. and Kobayashi, S., Preform Design in Plane-Strain Rolling by the Finite Element Method, Int. J. Machine Tool Des. Res., Vol. 24, 1984, p. 253
7. Hwang, S. M. and Kobayashi, S., Preform Design in Disk Forging, Int. J. Machine Tool Des. Res., Vol. 26, 1986, p. 231
8. Vemurk, K. R., Oh, S. I., and Altan, T., BID - A Knowledge-Based System to Automate Blocker Design, Int. J. Machine Tools Manufact., Vol. 29, 1989, p. 505
9. Vemuri, K. R., A Knowledge-based Approach to Automate Geometric Design with Application to Design Blockers in the Forging Process, Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, 1986

10. Altan, T., Oh, S. I., and Gegel, H., Metal Forming: Fundamentals and Applications, ASM, 1983
11. Altan, T., et. al., Forging Equipment, Materials, and Practices, MCIC, Air Force Materials Laboratory, 1973
12. Walker, J. S., Fast Fourier Transforms, CPS Press, 1991
13. Oh, S. I. et. al., Capabilities and applications of FEM code DEFORM: The perspective of the developer, J. Mat. Proc. Tech. Vol. 27, 1991, p. 25
14. Oh, S. I. and Yoon, S. M., 1994, A New Method to Design Blockers, Annals of the CIRP, Vol. 43/1/1994, pp. 245-248
15. Dadras, P. and Thomas, J. F. JR., Characterization and Modeling for Forging Deformation of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si, Matallurgical Transactions A, Vol. 12A, November 1981, p. 1874

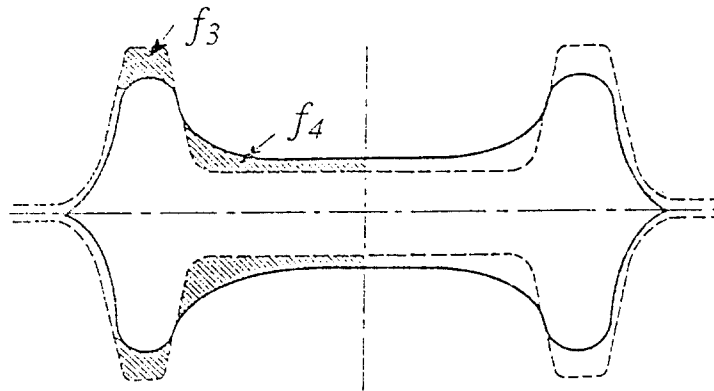


Fig. 1 Preform shape for an H cross section with a large distance between the ribs^[11]

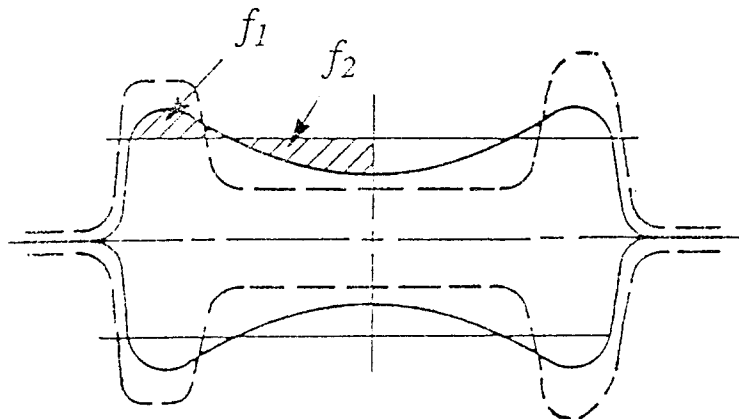


Fig. 2 Suggested preform shape for H cross section with moderate rib distances^[11]

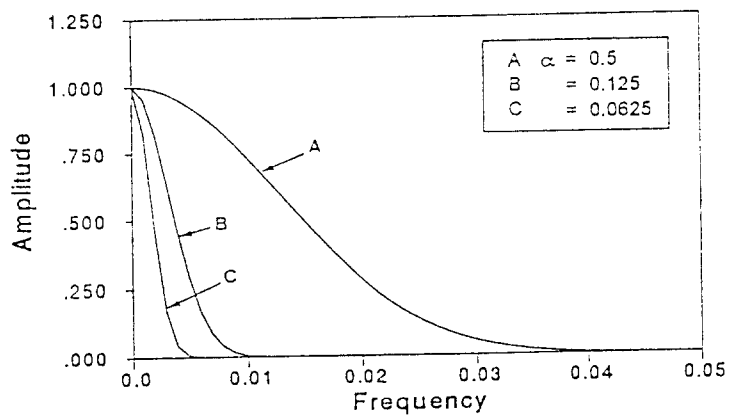


Fig. 3 Low pass filters with various cut-off frequencies

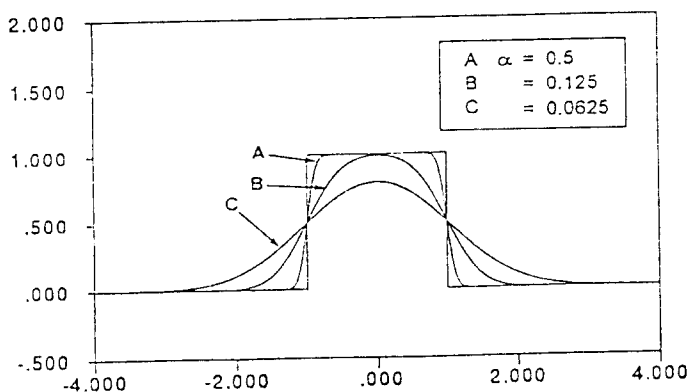


Fig. 4 Geometry changes due to filtering by various cut-off frequencies

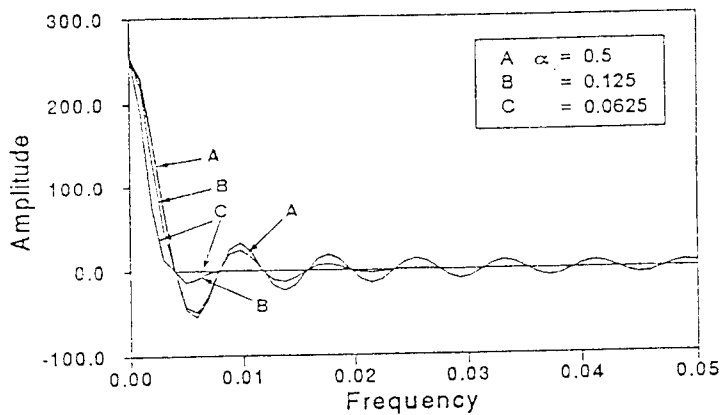


Fig. 5 Frequency spectrum before and after filtering

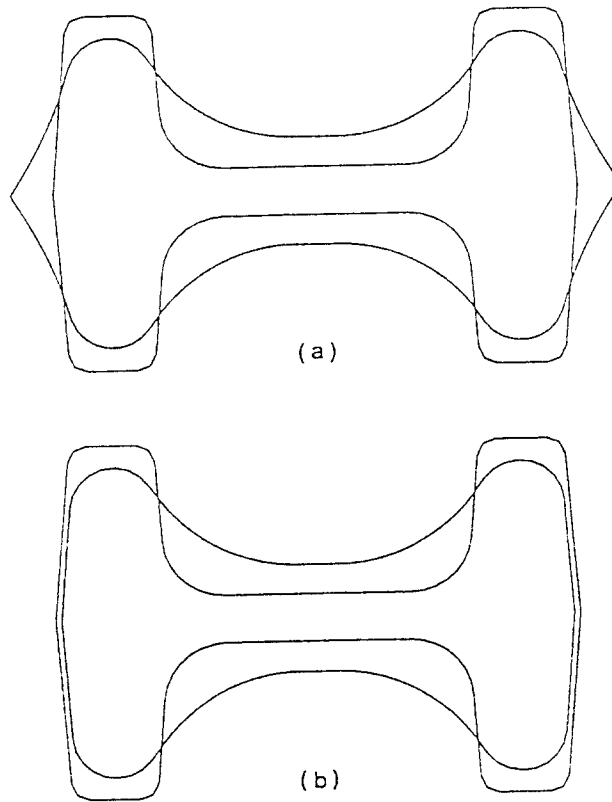


Fig. 6 Cross section of a forging with conventionally designed blocker
 (a) Aluminum, (b) Titanium

Table 1. Geometry of Finisher (mm)

	X	Y	R
1	-53.34	0.00	0.00
2	-50.23	37.53	3.81
3	-33.02	37.53	3.81
4	-30.48	5.08	12.70
5	30.48	5.08	12.70
6	33.02	37.53	3.81
7	50.23	37.53	3.81
8	53.34	0.00	0.00

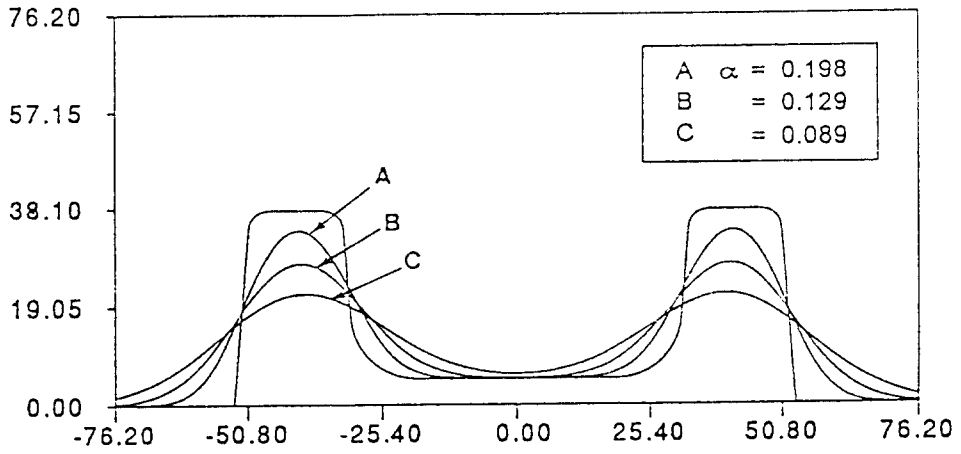


Fig. 7 Geometry changes due to filtering with various cut-off frequencies

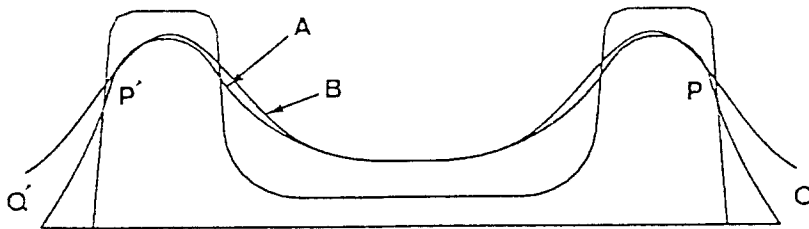


Fig. 8 Comparison of the conventional blocker (A) and filtered curve (B)

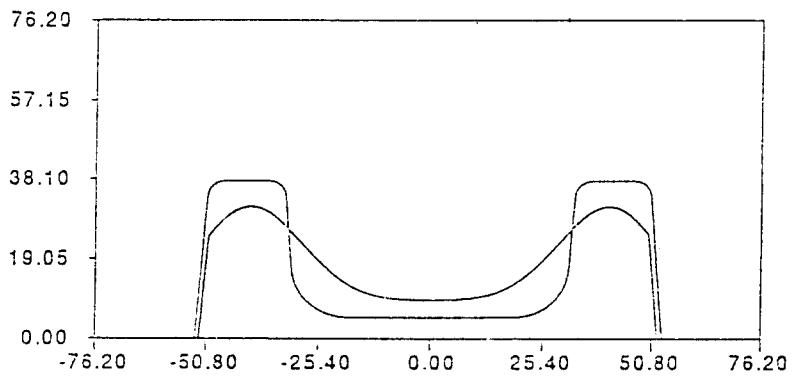
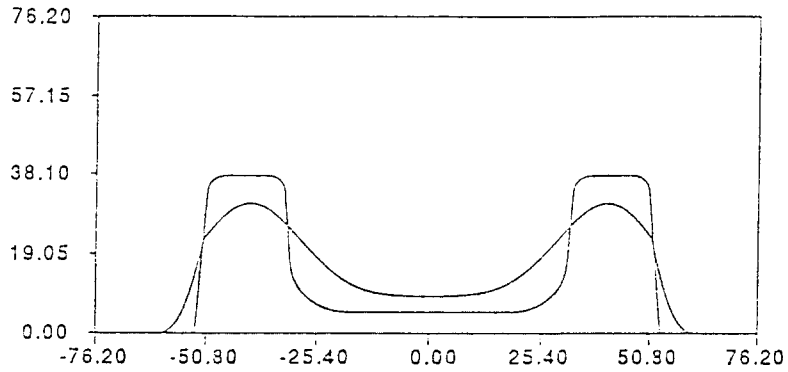


Fig. 9 Blocker geometries designed by filtering method
 Top : Aluminum, Bottom : Titanium

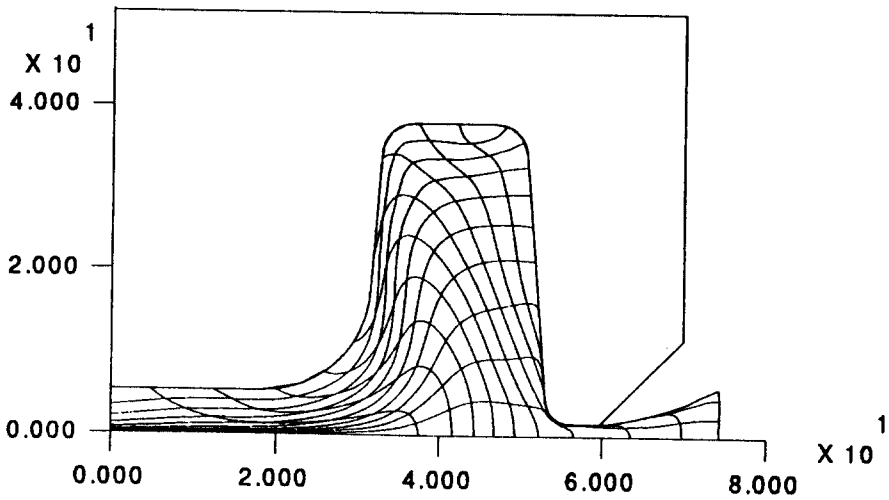


Fig. 10 Predicted flow net when no blocker is used (aluminum case)

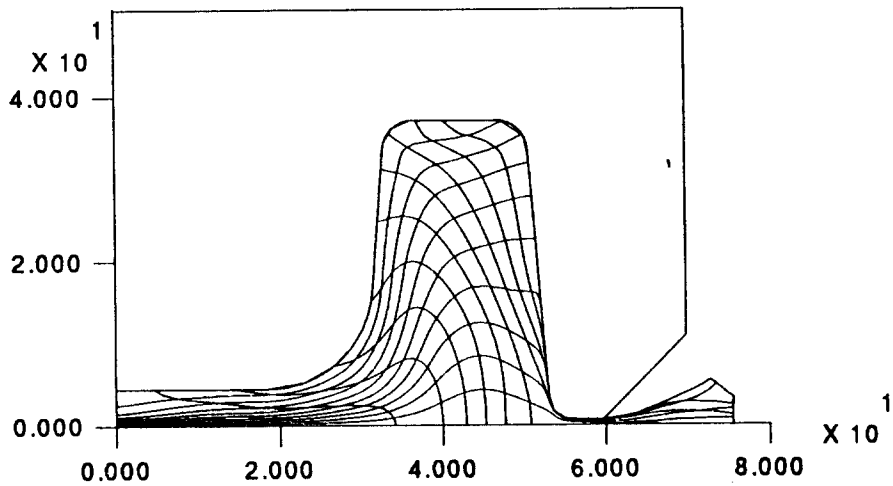
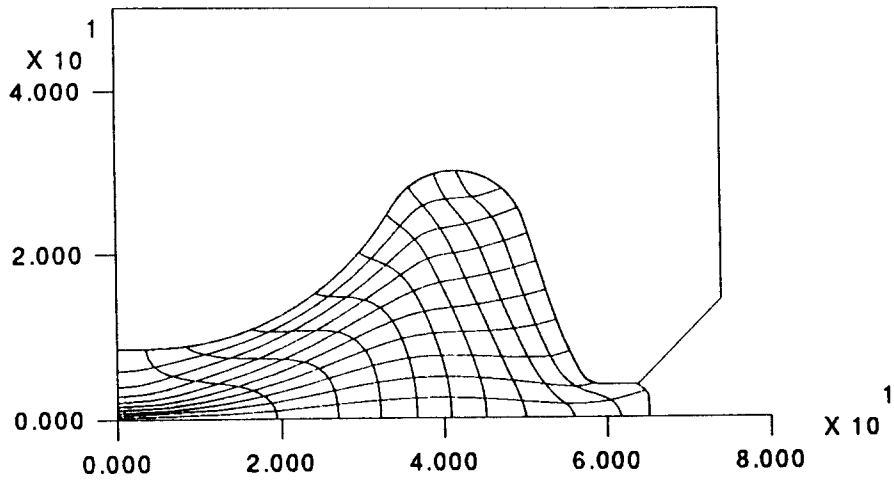


Fig. 11 Predicted flownet at the end of blocking and finishing operations when the conventional blocker is used (aluminum case)

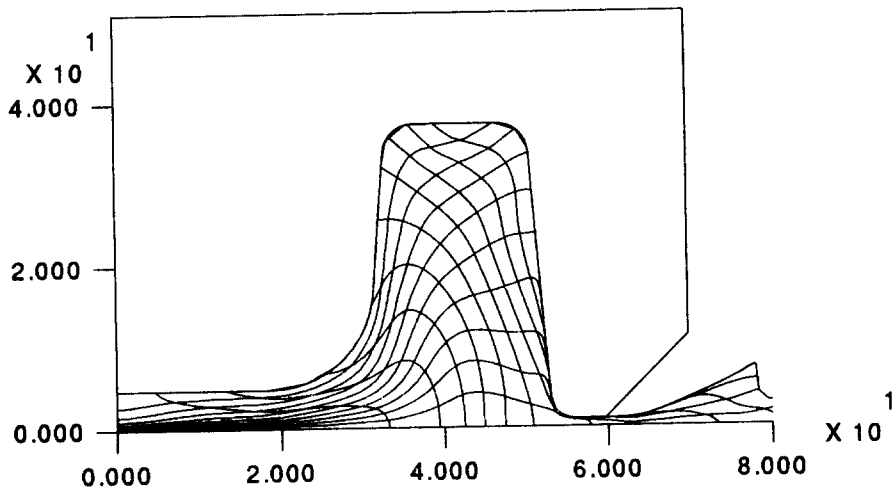


Fig. 12 Predicted flownet at the end of finishing operation with blocker generated by the filtering method (aluminum case)

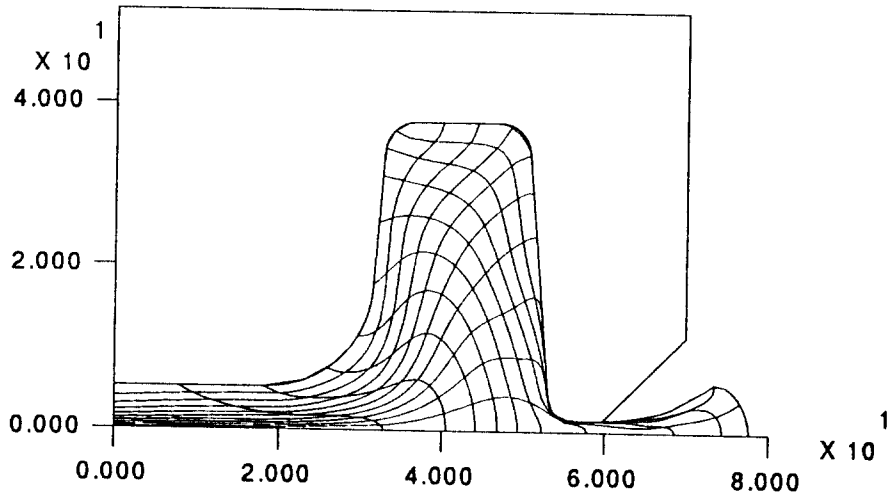


Fig. 13 Predicted flow net when no blocker is used (titanium case)

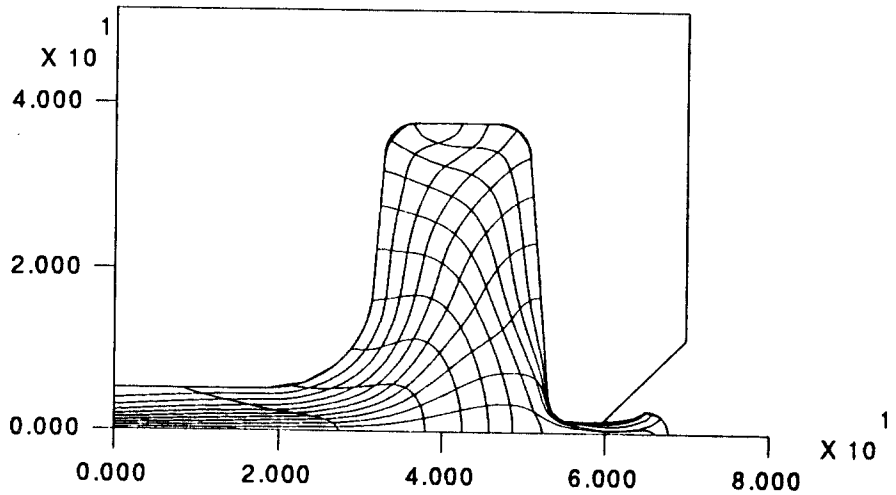
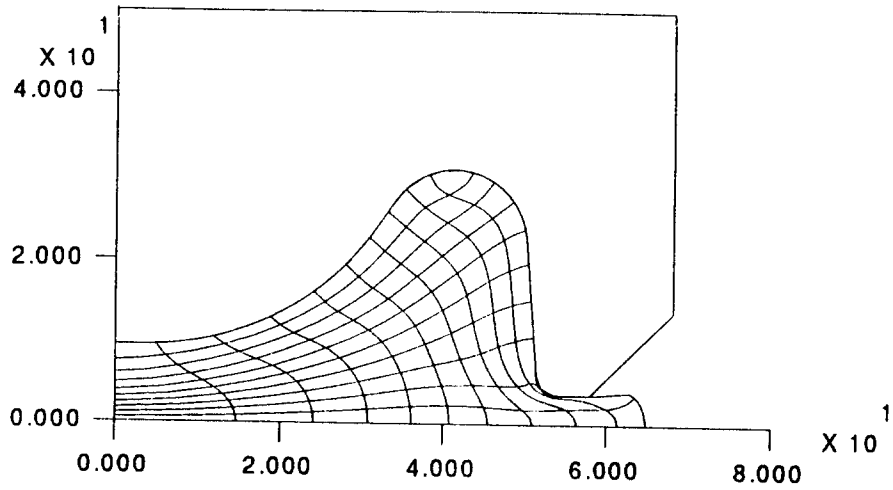


Fig. 14 Predicted flownet at the end of blocking and finishing operations when the conventional blocker is used (titanium case)

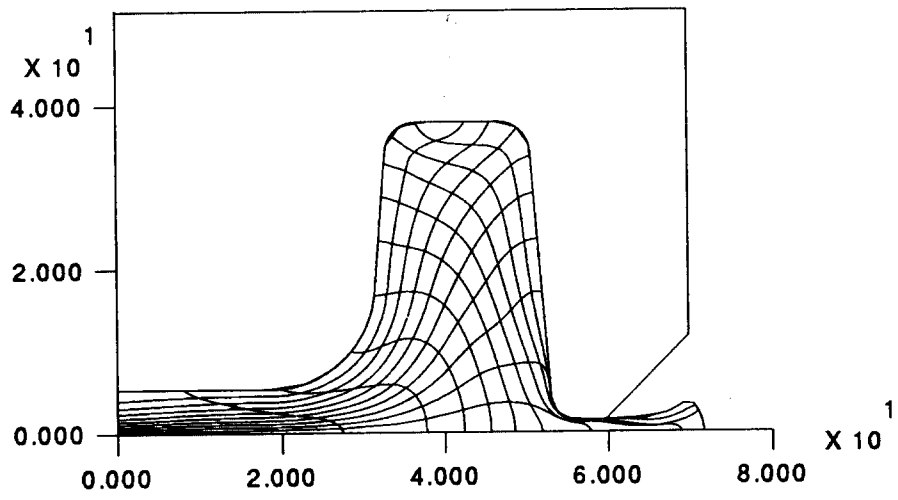


Fig. 15 Predicted flownet at the end of finishing operation with blocker generated by the filtering method (titanium case)