

알루미늄 주물을 이용한 단조 공정 연구

*김대용, 윤성만, 오수익
서울대학교 기계설계학과

A study of the Forging Process Using Aluminium Casting

Dae-Yong Kim, Sung-Man Yun, Soo-Ik Oh
Department of Mechanical Design and Production Engineering
Seoul National University, Seoul 151-742

Abstract

CFM(Cast Forge method) is widely used in manufacturing industry to produce aluminium parts with good mechanical properties and low production cost. CFM is the process which produces a final products by forging from the initial billet by casting. The study on this paper covers the automatic design method which finds a pertinent shape for initial billet using Fast Fourier Transform, low-pass frequency filtering and FEM simulation of the nonisothermal forging process by DEFORM. These works will give us an information to enhance the low strength of a aluminium casting.

Key Words : CFM, Fast Fourier Transform, filtering, DEFORM

1. 서론

최근 들어 자동차 경량화의 시대적 조류에 부응하기 위한 부품 재료로 각광받는 알루미늄 같은 금속은 경쟁대상인 철강재료에 비하여 훨씬 비싸고 기계적 강도, 인성, 내충격성 등이 떨어지므로 자동차 부품재료로 이용하는데 어려움이 있다. 알루미늄 재료를 자동차 부품재료로 이용하기 위한 노력의 일환으로 주조단조법(Cast Forge Method)이라 하여 단조 공정의 초기 재료 형상을 주물을 이용하여 만들고 이를 단조하는 방법이 사용되고 있다. 초기 형상을 주물을 이용하여 만들기 때문에 자유로운 형상을 얻을 수 있어 초기 형상을 적절하게 설계하여 곧바로 최종 형상 금형으로 단조한다면 공정수의 감소와 이로 인한 금형비의 감소, 그리고 플래쉬로 빠져나가는 재료의 손실을 줄이게 되어 생산비가 낮아지게 된다. 한편 단조제품의 기계적 성질을 높이기 위하여 주조결함(cast defect)으로 인한 주물 내부의 기공(pore)을 제거하기 위하여 재료가 충분한 변형을 받도록 적절한 주물의 초기 형상을 설계하였다. 이를 위하여 FFT(Fast Fourier Transform)와 저역 통과 필터링을 이용한 자동설계 기법[1]을 사용하였다.

2. 이론

기하학적인 영역에 어떤 함수 $h(x)$ 가 있다면 이는 Fourier변환에 의하여 다음과 같이 주파수 영역의 함수로 표현될 수 있고 이의 역변환도 가능하다. 이때 계산상의 편의를 위해서 Discrete Fourier Transform(DFT)를 도입함으로 함수를 이산화하여

처리하는 것이 가능하고 임의의 형상을 다룰 수 있게된다. $h(pT)$ 가 $h(x)$ 를 T 간격으로 샘플링하여 얻은 이산화된 함수라면 DFT는 다음과 같이 정의된다.

$$H(n/NT) = \sum_{p=0}^{N-1} h(pT)e^{-j2\pi np/N} \quad (4)$$

N 은 샘플링된 점의 총 개수이고 $p = 0, 1, \dots, N-1$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 이며 $j = \sqrt{-1}$ 이다.

IDFT(Inverse Discrete Fourier Transform)는 다음과 같이 정의된다.

$$h(pT) = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} H(n/NT)e^{j2\pi np/N} \quad (2)$$

만약 $N=2^R$ 이고 R 이 정수라면, DFT는 매우 효율적으로 계산될 수 있는데 이 과정을 Fast Fourier Transform(FFT)이라 한다. 본 연구에서는 낮은 주파수 영역의 신호들을 통과시키고 높은 주파수 영역의 신호들을 걸러낼 수 있도록 저역 통과 필터를 사용하며 이를 $W(n/NT)$ 라고 표시한다. 함수 $h(pT)$ 의 Fourier변환을 $H(n/NT)$ 라고 하면 주파수 영역에서 $H(u)$ 에 필터링 함수 $W(u)$ 를 곱하여 필터링을 하고 이것을 역변환함으로써 기하학적 영역에서 다음과 같은 함수 $h_f(x)$ 를 얻을 수 있다. 이 과정을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$h_f(pT) = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} H(n/NT)W(n/NT)e^{j2\pi np/N} \quad (3)$$

필터링 함수에는 다양한 종류가 있지만 본 연구에서는 다음과 같은 monotonic smooth필터를 사용하기로 하였다.

$$W(u) = [0.5 + 0.5 \cos(2\pi Tu)]^n \quad |u| \leq \frac{1}{2T} \quad (4)$$

여기서 T 는 형상 함수를 샘플링한 간격이다. 저역 통과 필터 $W(u)$ 는 다음과 같이 α 를 사용하여 cut-off frequency를 조절할 수 있는 새로운 필터 함수 $W(u, \alpha)$ 로 변환된다.

$$\begin{aligned} W(u, \alpha) &= W_0\left(\frac{u}{\alpha}\right) & |u| \leq \frac{\alpha}{2T} \\ W(u, \alpha) &= 0 & \frac{\alpha}{2T} < |u| \leq \frac{1}{2T} \end{aligned} \quad (5)$$

3. 예비형 주물 설계 및 유한 요소 해석

단조용 예비형 주물의 2차원 형상 설계는 평면 변형을 조건을 가정한다. 우선 주어진 최종 단조품의 형상을 수치화하는 것으로 예비성형체의 형상설계를 시작한다. 최종 단조품 형상의 수치화는 FFT와 필터링을 수행하기 위한 목적으로, 주어진 형상을 일정한 간격으로 샘플링하여 수치로 나타내는 작업이다. Table 1에는 수치화에 사용될 리브-웹 유형의 최종 단조품 형상을 모서리의 좌표(x, y)와 반지름의 값(r)으로 나타내었다. 여기서는 단조품의 상하가 대칭이므로 윗부분만 예비형 주물의 형상 설계에 사용한다. 이렇게 수치화된 점들을 FFT를 이용하여 주파수 영역의 값으로 변환시킨후 여러 가지 α 값을 가지는 필터 함수를 곱하여 필터링한 후 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 통해 기하학적 영역의 값으로 변환한다. 필터함수를 사용하여 얻은 예비형 주물의 형상 설계를 완료하기 위하여 다음과 같은 작업을 하였다.

- 예비형 주물의 체적이 최종 단조품의 체적보다 일정 비율 많도록 필터링을 통해 얻어진 형상곡선의 높이를 높여주었다. 이는 플래시로 나가는 체적을 최종 단조품의 체적에 더하여 예비형 주물의 체적을 결정하기 위함이다.

- 예비형 주물의 형상이 최종 단조품의 형상과 교차되는 점으로부터 바깥쪽에 있는 경계면의 형상을 보간(interpolation)기법을 이용하여 각각의 재료에 따라 기존에 설계된 형상과 유사하게 처리하였다.

이러한 방법을 사용하여 얻은 예비형 주물의 형상들은 Fig. 1에 예시하였다.

예비형 주물의 형상이 유용한 가를 확인하기 위하여 몇 가지 형상 모델에 대하여 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM[2]을 사용하여 해석하였다. 소재는 Al 7075를, 금형은 실리콘 카바이드를 사용하고, 평면 변형률 조건에서 비등온 과정(nonisothermal)으로 하였다. 주물에 약 1%정도의 기공이 존재한다고 가정하고 상대 밀도를 0.99로 하였다. 금형과 재료 사이의 마찰인자는 0.3으로 하였으며, Al 7075의 적절한 단조 온도는 $382^{\circ}\text{C}\sim 438^{\circ}\text{C}$ 로 알려져 있으므로, 금형 온도는 180°C , 소재 온도는 410°C 로 하였다. Al 7075의 용력-변형률 관계식은 실험에서 얻어진[3] 온도와 변형률 속도와 변형률의 값을 Table 2와 같이 주고 이를 보간하여 사용하였다. 그리고 알루미늄과 실리콘 카바이드의 열전달에 관련된 물성치는 Table 3에 실었다. Fig.1에서는 자동 설계된 4개의 초기형상 모델을 보여주고 있다.

본 연구에서는 모든 모델의 체적비($\Delta V/V$)를 최종 제품의 108%로 정하였는데, 이는 계산 결과 금형내에 재료가 잘 충전되도록 하기 위하여 선택된 값이다. Fig. 1에 나오는 4개의 모델 중 3개는 예비 성형용 금형의 자동 설계에서 cut-off frequency를 0.02, 0.05와 0.1을 주어 얻은 형상이고 다른 하나는 cut-off frequency를 0.05으로 하고 prescale ratio를 3.0으로 하여 얻어낸 것이다. 이러한 모델들을 대상으로 열간 단조 공정을 컴퓨터 시뮬레이션 해석하여 유효변형률, 상대밀도, 온도, 손상도 등의 분포와 금형에 충전되는지의 여부를 알 수 있었다. 이 중 변형률 분포를 Fig. 2에 실었다.

4. 고찰 및 결론

금형내 재료의 충전성을 만족하는 cut-off frequency값의 범위($0.01 < f \leq 0.1$)에 해당되는 예비형 주물 형상으로 열간 단조를 행하였을 때 재료가 전체적으로 얼마나 많은 변형을 받는지를 알기 위하여 각 요소의 유효변형률들에 대한 평균값을 취하여 평균 유효변형률($\bar{\epsilon}_{avg}$) 값을 구하고 이들로부터 Fig. 3과 같은 관계를 얻어내었다.

Fig. 3에서 cut-off frequency가 높아지면 평균유효변형률이 낮아짐을 알 수 있다. 단조품이 충분한 강도를 가지기 위해서는 30% 이상의 변형이 일어나야 한다고 알려져 있다. 국부적으로는 이를 만족하지 않는 부분이 있더라도 전체적으로 많은 변형을 받도록 하는 것이 강도를 높이는 데 유리하다. 따라서 평균유효변형률이 30%보다는 커지도록 하는 frequency값을 찾아 주물의 형상을 설계하는 것이 바람직하다. 국부적으로 충분한 변형을 받지 못하는 부분은 잠재적으로 취약한 부분이므로 제품의 하중조건에서의 취약부를 피하도록 설계하여야 한다. 이 밖에 온도분포, 손상치, 상대밀도 등의 재료내 분포를 복합적으로 고려하여 자동 설계되어질 초기형상의 형상설계 변수들의 값을 선택하여야 한다.

지금까지 예비형 알루미늄 주물의 자동설계 기법과 열간 단조공정에 대한 유한요소해석을 통하여 재료의 금형내 충전성, 유효변형률 분포, 평균유효변형률 등을 조사하였고 이로부터 적절한 알루미늄 주물의 초기 형상을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

후기: 이 논문은 1996년도 교육부 학술연구조성비 기계공학분야 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Oh S.I., and Yoon S.M., "A New Method to Design Blockers", CIRP Annals, p.245, 1994
- [2] Oh S.I., et al., "Capabilities and Applications of FEM Code DEFORM : The Perspective of The Developer", J. Mat. Proc. Tech., Vol.27, p.25
- [3] Altan T., Oh S.I., and Gegel H.L., "Metal Forming : Fundamentals and Application", American Society of Metals, 1983

Table 1 Geometry of rib-web type Finisher (mm)

	X	Y	R
1	-53.34	0.00	0.00
2	-50.29	37.59	3.81
3	-33.02	37.59	3.81
4	-30.48	5.08	12.70
5	30.48	5.08	12.70
6	33.02	37.59	3.81
7	50.29	37.59	3.81
8	53.34	0.00	0.00

Table 2 Flow stress(MPa) data in given strains and strain-rates at temperature 400°C

		strain-rate			
		0.10	1.00	5.00	10.00
strain	0.1150	66.02	68.92	79.66	87.79
	2.6800	51.3	66.85	80.44	87.12

Table 3 Material properties related to heat transfer

Material	Silicon Carbide	Al7075
Interface heat transfer coefficient (N/sec/mm/°C)	17.5	17.5
Thermal conductivity (N/sec/°C)	21.06	231(at 327°C)
		19.4(at 873°C)
		19.7(at 1073°C)
Heat capacity (N/mr/°C)	3.9	2.48(at 673°C)
		2.66(at 873°C)
		2.849(at 1073°C)
Emisivity	0.6	0.7

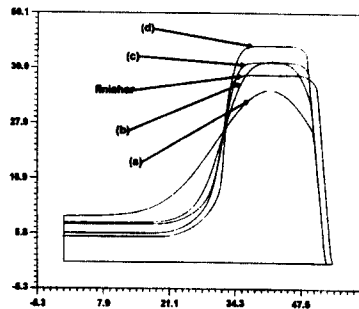


Fig. 1 Four FE analysis models (a) cut-off frequency 0.02, (b) cut-off frequency 0.05, (c) cut-off frequency 0.05 / prescale 3.0, (d) cut-off frequency 0.1

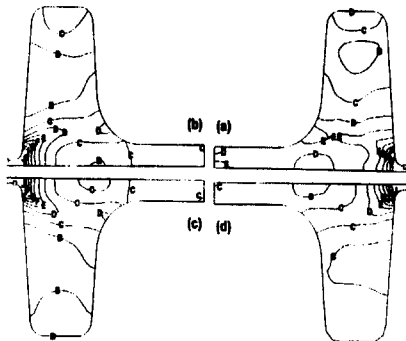


Fig. 2 The distribution of effective strain of various models by DEFORM simulation (A= 0.0, B = 0.2, C = 0.4, D = 0.6, E = 0.8, F = 1.0, G = 1.2, H = 1.4, I = 1.6, J = 1.8)

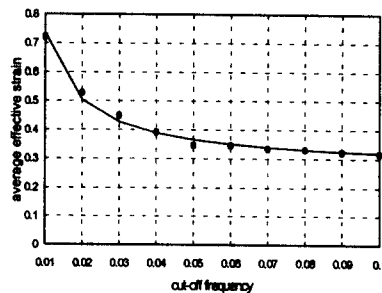


Fig. 3 Cut-off frequency vs. average effective strain