

등전위면을 이용한 열간 단조에서의 예비형상 설계

이석렬* · 이영규* · 박철현* · 양동열*

Design of Preform using equi-potential lines in Hot Forging

S.R. Lee, Y.K. Lee, C.H. Park and D.Y. Yang

Abstract

The equi-potential lines designed in the electric field are introduced to find the preform shape in axisymmetric hot forging. The equi-potential lines generated between two conductors of different voltages show similar trends of the minimum work paths between the undeformed shape and the deformed shape. Base on this similarity, the equi-potential lines obtained by arrangement of the initial and final shapes are utilized for the design of preform, and then the artificial neural network is used to find the range of initial volume and potential value of the electric field.

Key Words : Hot Forging, Preform, Electric Field, Artificial Neural Network

1. 서 론

예비형상 금형은 대부분 숙련된 금형 설계 전문가에 의해 설계된다. 하지만 이 방법은 경험에 의해 시행착오 과정을 겪으며 설계가 진행되기 때문에, 값비싼 금형제작비는 물론 많은 시간과 경비가 소요된다. Subramanian⁽¹⁾과 Yu and Dean⁽²⁾은 예비형상의 금형설계 경험법칙들을 정리하여 축대칭 단조품의 자동 설계하였다. 수치적 계산방법이 발전되면서 유한요소법을 이용하여 최적예비형상을 찾으려는 연구가 이루어졌다. Park⁽³⁾등은 최종단조형상으로부터 역추적법(backward tracing)을 이용하여 셸노징(shell nosing)의 예비형상을 설계하였고,

Badrinarayanan⁽⁴⁾등은 형상차를 목적함수로 하고 부피가 일정하다는 것을 구속조건으로 두어 최적의 예비형상을 구하였다. 이러한 해석적인 방법은 최적의 예비형상을 찾기 위한 것이지만 많은 해석 시간이 필요하다. 또한 공정의 설계시에 여전히 설계자의 주관적 개입이 불가피하고, 이때 설계변수를 어떻게 정하느냐에 따라 결과값이 달라지게 되고 실제공정에는 쓸 수 없는 결과가 나올 수 있다. 최근에는 오수익⁽⁵⁾등이 저역필터를 이용하여 예비형상을 찾는 방법을 제안하였다. 이 방법은 주파수 성분을 제거하여 전체적으로 형상이 부드럽게 되도록 수정하는 방법이다.

본 연구에서는 기존의 방법에 비해 시간과 경비가 절

* 한국과학기술원

감되고 일반적인 3차원 형상에도 적용가능한 설계방법을 제안하였다.

2. 등전위면을 이용한 예비형상 설계

2.1 등전위면

3차원 평면상에 있는 두 도체 사이에 서로 다른 전압을 걸어주면 공간상에 전기장이 발생하게 된다. 이 공간상의 같은 전압을 갖는 점들로 연속되는 면을 구성할 수 있는데, 이 면들은 서로 겹치거나 중복되지 않는 특징을 가지고 있다. 이러한 등전위면을 이용하면 단조초기소재 형상과 최종형상 사이의 중간형상을 얻을 수 있는데, Fig. 1은 단조최종형상을 축소하여 초기형상 내부에 넣은 후 최종형상과 초기형상에 각각 0 V와 1 V를 걸어주면 두 형상 사이에서 구한 등전위면들을 보여준다.

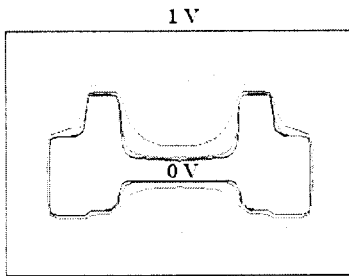


Fig. 1 Equi-potential lines generated between two conductors

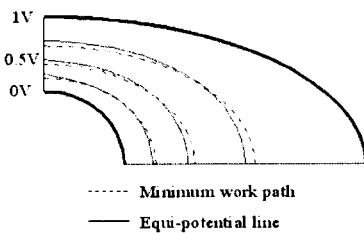


Fig. 2 Comparison of equi-potential lines and minimum work paths

Fig. 2는 원형 평판이 주변형을 방향이 바뀌지 않으면서 최소 에너지로 타원형상으로 변할 때 나타나는 중간형상들을 보여준다. 형상은 1/4만을 나타내었다. 그림에서 점선으로 최소에너지 경로로 변형되는 과정의 중간형

상을, 실선으로는 등전위면을 나타내어 비교하였다. 등전위면과 최소에너지경로를 거치는 중간형상은 지배방정식이 다르지만 유사한 경향을 보이고 있기 때문에, 등전위면을 이용한 예비형상 설계에 어느 정도 물리적 의미를 부여할 수 있다.

2.2 예비형상 설계방법

예비형상 설계는 축대칭 단조품에 대한 것으로 한정하였고, 초기소재의 단면은 직사각형으로 가정하였다. 단조 초기형상과 최종형상으로 등전위면을 얻는 방법은 여러 가지가 있겠으나, 본 연구에서는 단조최종형상을 초기형상 내부로 들어갈 수 있도록 축소시킨 후, 형상 중심점이 같도록 위치시킨 후, 초기, 최종 형상에 각각 0 V와 1 V를 주어 등전위면을 얻었는데, 이는 나중에 설계변수로 사용될 전위값의 표현을 쉽게 하기 위한 것이다. 최종형상의 축소비는 1/2 ~ 1/3 으로 하였는데, 이 범위에서는 축소비에 따른 등전위면의 형상변화가 크지 않았다. 등전위면의 형상은 전위값이 0 V에 가까울수록 최종형상에 가깝고, 1 V에 가까울수록 초기형상에 가깝다는 것을 알 수 있다.

2.3 선행연구와 비교

등전위면을 이용한 예비형상 설계법의 유용성을 확인하기 위하여 선행연구에서 얻은 단조품의 예비형상과 비교를 하였다. Fig. 3에서는 전위값이 0.04 V인 등전위면을 현장도면과 일반설계법칙을 컴퓨터로 자동화한 Yu와

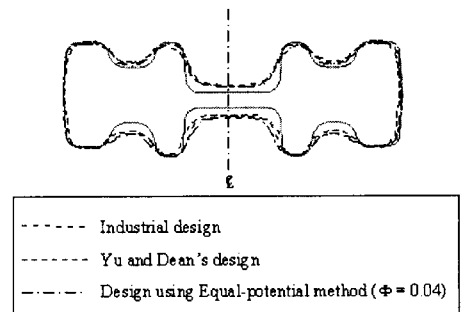


Fig. 3 Comparison with previous works

Dean[2]의 설계와 비교하였다. 이러한 비교를 통하여 적절한 전위값 선정으로 기존의 설계와 거의 유사한 예비형상을 얻을 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 하지만 아직 예비형상에 이용한 등전위면의 전위값을 선정하는 방

법이 제시되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하는 방안으로 추론기관을 도입하였다.

3. 전위값 추론방법

3.1 추론기관

등전위면을 이용한 예비형상 설계는 한가지 최종단조 제품에서도 등전위면의 전위값에 따라 무수히 많고 각기 다른 형상을 가진 예비형상을 구할 수 있다. 이 때, 어떠한 전위값의 형상들이 적절한 예비형상으로 사용될 수 있는지, 또는 이중에서 어떤 값이 최적의 값인지 알 수 없다. 그러므로 최적 예비형상의 전위값을 선택하는 구체적인 방법이 필요하다. 추론기관(inference engine)은 예측하기 어렵거나 수식으로는 표현할 수 없는 시스템 모델을 인식하기 위해 사용된다. 본 연구에서는 인공 신경망을 이용하여 예비형상을 결정하였다.

3.2 신경망의 설계변수 정의

신경망에 이용가능한 변수들 중 비교적 영향력이 큰 사용한 예비형상의 전위값, 소재의 충만도, 최종형상에 대한 초기형상 부피비를 신경망의 설계변수로 사용하였다. 이외의 나머지 변수들은 비독립적이거나 크게 영향을 주지 않는다고 가정하였다.

먼저, 충만도(ξ)는 다음과 같이 무차원값으로 정의하였다.

- 소재가 금형에 완전히 충만되지 않을 때

$$\xi = \frac{(\text{금형공동부내의 소재부피})}{(\text{최종단조제품의 부피})}$$

- 소재가 금형에 완전히 충만될 때

$$\xi = \frac{(\text{완전충진되는순간 금형공동부내의 소재부피})}{(\text{최종단조제품의 부피})}$$

이와 같이 설정한 설계변수를 신경망의 입력층과 출력층의 변수로 사용하였다. 입력층의 변수는 최종제품에 대한 초기소재부피비(r_v), 사용한 예비형상의 전위값(ϕ)으로 하였고, 출력층의 변수는 소재의 충만도(ξ)로 하였다. ξ 값이 1이상이면 금형내부가 소재로 완전충진되며, 따라서 이 결과를 얻는 r_v 와 ϕ 값을 구하였다.

3.3 신경망의 적용결과

Fig. 4는 스퍼기어 블랭크 등과 같이 단조에 많이 사용되는 제품들을 간략화한 기본형상이다. 이 형상의 예비형상을 얻기 위한 신경망의 학습에 필요한 정보는 유한요소해석을 통해 얻었다.

유한요소해석에서 소재는 AISI 1015를 사용하였으며, 마찰계수는 0.3, 소재의 초기온도는 1300 °C, 금형의 온도는 250 °C, 금형의 속도는 10 mm/sec 로 설정하였다. 초기소재는 형상비(지름/높이)가 1인 형상을 사용하였다. 각 경우 해석결과로 ξ 값을 구하였다. 이렇게 얻어진 데이터를 이용하여 신경망을 학습시키면, 각 제품에 대해 Fig. 5과 같이 r_v, ϕ 에 따른 ξ 값을 구할 수 있다. 이 그래프에서 r_v 값이 증가할수록, ϕ 값이 감소할 수록 ξ 값은 증가한다는 것을 알 수 있다. 소재가 금형내에 완전충진 되도록 하기 위해서는 ξ 가 1이상의 값을 가지고 있어야 한다. 신경망 학습을 통해 얻은 그래프를 토대로 ξ 값이 1.008인 각기 다른 r_v, ϕ 를 사용했을 경우 유한요소해석의 결과로 얻은 ξ 값을 Table 1에서 정리하였다. 이 결과에서 학습된 신경망은 유한요소해석을 하지 않고도 주어진 조건에 대한 ξ 값을 비교적 정확하게 예측한다는 것을 알 수 있다.

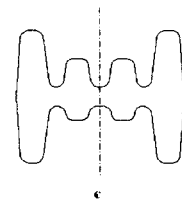


Fig. 4 Finisher shape

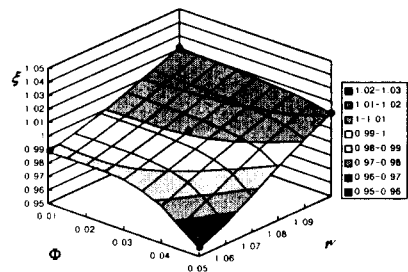


Fig. 5 Training data and resultant filling map

Table 1 Comparison of FEM simulation results and neural network outputs

ϕ	r_V	ξ (FEM)	ξ (신경망)
0.01	1.078	1.008	1.008
0.03	1.080	1.008	1.008
0.05	1.093	1.005	1.008

4. 모델 실험

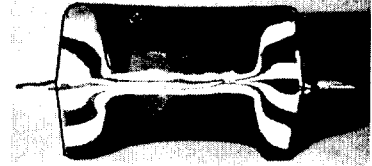
모델 실험은 실제 공정을 대신하여 재료의 유동과 성형하중을 예측함으로써 성형공정을 결정하는데 도움을 준다. 해석결과 r_V 가 1.08이고, ϕ 가 0.03인 예비형상을 사용하였을 때, 두 경우 완전충진되는 결과를 얻었다. 모사 실험은 이 신경망 결과를 기반으로 하여, 예비형상의 전위값을 0.03으로 사용하였다. 시편의 형상비(높이/지름)는 1:1인 원기둥 형태이고, 실험에 쓰인 금형은 투명 아크릴로 제작하였다. 모사실험은 2개의 리브를 가지고 있는 단조품에 적용하였고, 이로부터 등전위면으로 설계된 예비형상의 유용성을 확인하고자 한다. 초기소재의 부피는 최종형상의 1.08배로 하였다. 초기소재를 최종금형으로 성형하였을 경우, Fig. 6(a)와 같이 리브의 끝부분에 미충진 부분이 발생하였지만, 등전위면을 이용한 예비형상을 사용하였을 경우, Fig. 6(c)와 같이 소재가 금형에 완전충진되었다. 재료의 유동을 살펴보면, 최종성형만 했을 경우는 단류선이 곧게 뻗어나가고, 예비성형을 거쳤을 경우 단류선이 물결모양으로 형성되어, 재료의 흐름이 원활하게 진행되었다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

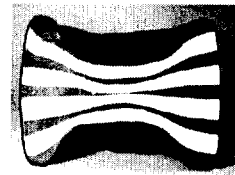
본 연구에서는 두 도체사이에서 서로 다른 전압이 걸렸을 때 발생하는 전기장의 등전위면을 도입한 예비형상 설계방법을 제시하였다. 또한, 이러한 방법으로 설계된 예비형상을 현장 도면과 비교하여 유용성을 확인하였다. 인공지능망 회로를 이용하여 임의의 단조품에 대한 예비형상을 결정하는 방법을 제시하였고, 플라스틱을 이용한 모델실험을 통하여 그 유용성을 확인하였다. 이러한 설계방법은 시간과 경비를 절감할 수 있고, 3차원 형상에서도 쉽게 등전위면을 구할 수 있어 적용가능하다.

참고 문헌

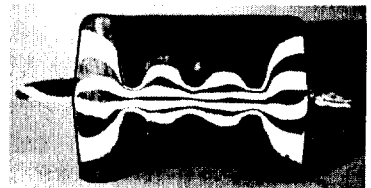
- (1) Subramanian, T. L., 1977, "Application of computer-aided design and manufacturing to precision isothermal forging of titanium alloys," Tech. Report, Air-Force Material Labs.
- (2) Yu, G. B. and Dean, T. A., 1985, "A practical computer-aided approach to mould design for axisymmetric forging die cavities," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, No. 1, pp. 1~13.
- (3) 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, No. 1, pp. 71~79.
- (4) Badrinarayanan, S., Zabaras, N. and Constantinescu, A., 1995, "Preform design in metal forming," Simulation of Materials Processing : Theory, Methods and Application, Shen & Dawson(eds), pp. 533~538.
- (5) Oh, S. I. and Yoon, S. M., 1994, "A new method to design blocker," Annals of the CIRP, Vol. 43, pp. 245~248.



(a) A forged part without preforming



(b) preform shape



(c) A forged part with preforming

Fig. 6 A cross section of specimens made of plasticine