

열간 단조에서의 최적 예비형상 설계

이석렬*·이영규**·박철현**·양동열**

Optimal Design of Preform in Hot forging

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

Key Words: Hot Forging(열간 단조), Preform(예비성형체), Electric Field(전기장), Artificial Neural Network(인공 신경망)

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.

기호설명

- ϕ : 전기장 내의 전위값
- ξ : 총만도
- r_v : 단조 최종형상의 부피에 대한 초기소재의 부피

1. 서 론

단조가공은 기계적 성질이 우수한 제품들을 대량생산 할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 크랭크축과 커넥팅로드의 자동차 부품이나 터빈 디스크, 기어 등의 각종 기계 요소들을 생산하는데 이용되고 있다. 단조는 작업방식에 따라 크게 자유단조, 형단조로 구분되며, 소재의 온도에 따라 열간 단조, 냉간 단조, 온간 단조로 나누어진다. 단조공정 중 형단조는 소재가 두 개의 금형

에 의해 압축되면서, 금형 공동부의 형상으로 성형이 이루어지게 된다. 복잡한 제품의 경우, 결함이 없는 적절한 재료분포를 얻기 위해 소재는 단단계의 예비형상(preform)을 거치기도 한다. 예비형상은 초기소재와 단조최종형상의 중간형상으로 단조최종형상보다 부드러운 면으로 이루어진다.

예비형상금형은 대부분 숙련된 금형 설계 전문가에 의해서 설계되었다. 이 방법은 경험에 의해서 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, Badrinayanan[4]등은 형상차를 목적함수로 하고 부피가 일정하다는 것을 구속조건으로 두어 최적의 예비형상을 찾았다. 이러한 해석적인 방법은 최적의 예비형상을 찾기 위한 것이지만 많은 해석 시간이 필요하다. 또한 공정

* 한국과학기술원 기계공학과
 ** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

의 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 단조최종형상을 주파수로 분리한 다음 저역필터에 통과시켜 높은 주파수 성분을 제거하여 전체적으로 형상이 부드럽게 수정하는 방법이다.

본 연구에서는 기존의 방법에 비해 시간과 경비를 절감하고 일반적인 3차원 형상에도 적용가능한 설계방법을 제안하였다.

2. 등전위면을 이용한 예비형상 설계

2.1 등전위면의 특징

3차원 평면상에서 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. 1 은 단조최종형상을 축소하여 초기형상 내부에 넣은 후 최종형상과 초기형상에 각각 0 V와 1 V를 걸어주면 두 형상 사이에서 등전위면들을 구할 수 있다.

Fig. 2는 원형 평판이 주변형을 방향이 바뀌지

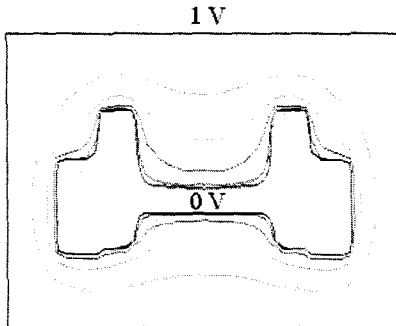


Fig. 1 Equipotential lines generated between two conductors

않으면서 최소 에너지로 타원형상으로 변할 때 나타나는 중간 형상들을 보여준다. 형상은 1/4만을 나타내었다. 그림에서 점선으로 최소에너지 경로로 변형되는 과정의 중간형상을, 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. 단조초기형상과 최종형상으로 예비형상을 설계하는 방법은 크게 두 가지가 있을 수 있다. 최종형상을 축소하여 초기형상 내부에 넣어 등전위면을 얻는 방법과 이와 반대로 초기형상을 축소하여 최종형상 내부에 넣어 등전위면을 얻는 방법이다.

2.2.1 일체형 설계법

먼저 단조최종형상을 초기형상 내부로 들어갈 수 있도록 축소시킨다. 최종형상을 넣는 방법은 여러 가지가 있겠으나 형상의 분포를 고려하여 형상중심점이 같도록 하였다. 본 연구에서는 축소비를 1/2~1/3으로 하였는데, 이 범위에서는 축소비에 따른 등전위면의 형상변화가 크지 않았다. 다음으로 초기, 최종 형상에 각각 0 V와 1 V의 전압을 주었다. 이는 나중에 설계변수로 사용될 전위값의 표현을 쉽게 하기 위한 것이다. 등전위면의 형상은 전위값이 0 V에 가까울수록 최

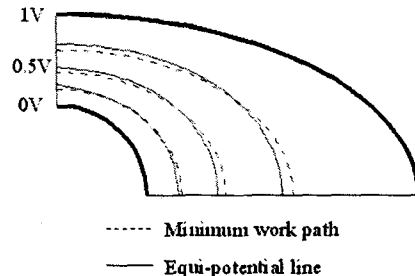


Fig. 2 Comparison of equipotential lines and minimum work paths

중형상에 가깝고, 1 V에 가까울수록 초기형상에 가깝다는 것을 알 수 있다.

2.2.2 분리형 설계법

비슷한 방법으로 초기형상과 최종형상의 위치를 바꾸어서 예비형상을 얻을 수 있다. 그러나 최종형상이 복잡하다면 초기형상의 위치를 적절히 배치할 수 없다. 이 경우는 예비형상의 상부와 하부형상을 각각 구한 후 결합하여 완성시키는 방법으로 예비형상을 얻었다. 최종형상을 형분리선을 중심으로 상하부로 나눈 후 이 상부형상을 초기형상의 상부형상과 적절히 배치시켜 그 사이에 발생하는 등전위면을 얻어 예비형상의 상부형상으로 사용하였다. 하부형상도 마찬가지로 구하였다. 이 설계법에서는 앞의 일체형 설계법으로 얻은 예비형상과 구분하기 위해 초기형상에 0 V, 최종형상에 -1 V를 주어 등전위면의 전위값이 -1에서 0사이의 값을 갖도록 하였다.

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 Dean[2]의 설계와 비교하였다. 또 다른 제품에 대해서도 예비형상 설계도면들을 Fig. 4에서 비교하였다. 이 경우에는 현장도면과 Yu and Dean의 설계가 차이가 있었으나 각기 다른 예비형상의 전위값을 선정하여 유사한 형상을 모두 얻을 수 있었다.

결국 적절한 전위값 선정으로 기존의 설계와

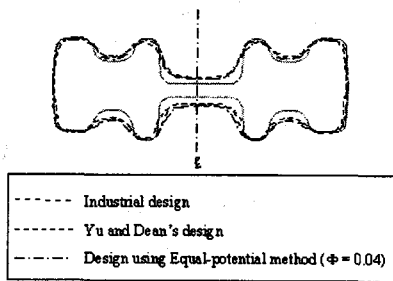


Fig. 3 Comparison with previous works(1)

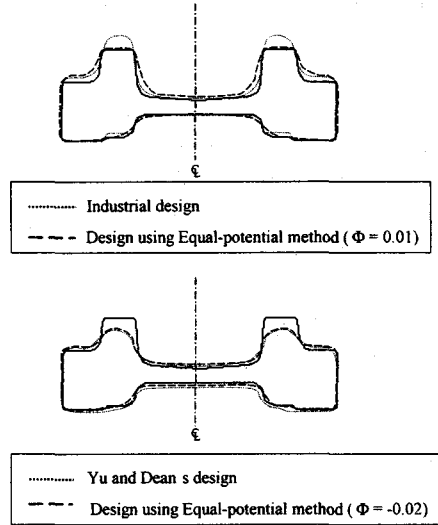


Fig. 4 Comparison with previous works(2)

거의 유사한 예비형상을 얻을 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 등전위면을 이용한 예비형상 설계는 빠르고 쉬우며, 3차원 형상에도 적용가능하다. 또한 컴퓨터를 이용한 자동설계를 구현할 수 있다. 하지만 아직 예비형상에 이용한 등전위면의 전위값을 선정하는 방법이 제시되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하는 방안으로 추론기관을 도입하였다.

3. 전위값 추론방법

3.1 추론기관

등전위면을 이용한 예비형상 설계는 한가지 최종단조제품에서도 등전위면의 전위값에 따라 무수히 많고 각기 다른 형상을 가진 예비형상을 구할 수 있다. 이 때, 어떠한 전위값의 형상들이 적절한 예비형상으로 사용될 수 있는지, 또는 이 중에서 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. 현재 퍼지논리와 인공지능망이 광범위한 분야에서 이용되고 있다.

소성가공분야와 관련하여서도 이러한 퍼지논리나 인공지능망을 적용한 연구들이 있었다. 정낙면[6]은 퍼지논리를 이용하여 리브-웹 형태의

축대칭 제품의 적절한 초기형상의 형상비를 얻었고, Peng[7]등은 강점소성체의 축방압출을 유한요소로 해석하고, 그 결과들로 신경망을 구성하여 압출조건이 변할 때 결함의 발생유무를 예측하였다. Ko[8]등은 편형 제품에서 실험계획법을 통해 적합한 데이터를 추출하고, 다층 퍼셉트론 신경망을 사용하여 목적함수를 최소화하였다.

본 연구에서는 논리적인 기반을 구축해야 하는 퍼지논리보다 학습능력을 가지고 있어 시스템을 쉽게 표현할 수 있는 인공신경망을 사용하였다.

3.2 신경망의 설계변수 정의

신경망의 입력층과 출력층의 뉴런을 구성하려면 시스템에서 적절한 설계 변수를 찾아야 한다. 단조최종형상으로부터 형상복잡성, 전체 폭, 전체 높이, 중심축에서 단면의 무게중심까지의 거리, 단면 넓이와 사용한 예비형상과 유한요소해석 결과로부터 예비형상의 전위값, 소재의 충만도, 결함발생여부, 또한 단조최종형상에 대한 초기형상의 부피비 등을 신경망 설계변수에 사용할 수 있다.

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

충만도(ξ)는 다음과 같이 무차원값으로 정의하였다.

- 소재가 금형에 완전히 충만되지 않을 때

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

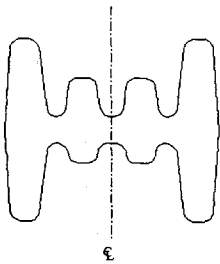


Fig. 5 Finisher shape

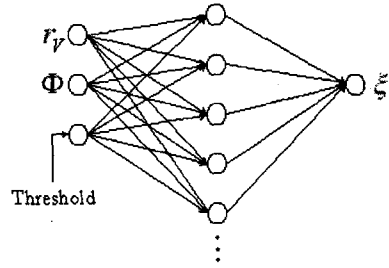


Fig. 6 Data allocation to train a neural network

- 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. 5는 스퍼기어 블랭크 등과 같이 단조에 많이 사용되는 제품들을 간략화한 기본형상이다. 최종형상을 성형하는데 필요한 예비형상은 Fig. 6과 같은 구조를 가지고 있는 신경망을 학습시켜 구하였다. 신경망 학습에 필요한 정보는 유한요

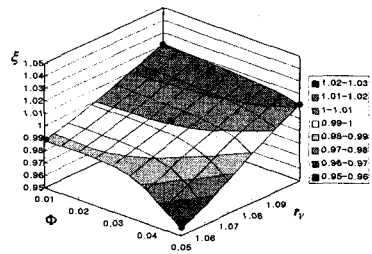


Fig. 7 Training data and resultant filling map

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

소해석을 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. 7과 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 가져야 하므로 이러한 조건을 만족시키는 예비형상은 Fig. 의 빗금친 부분이다. 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.

초기소재의 형상비가 예비형상 설계에 미치는 영향을 알아보기 위해 형상비(높이/지름)가 2/3인 경우에 대해 연구를 수행하였다. 예를 들어 전위값이 0.01 V인 예비형상을 사용하기 위해 초기형

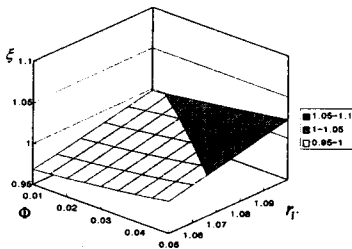


Fig. 8 Resultant filling map of preforming

상비가 2/3인 소재를 예비성형을 하면, 유한요소 해석결과 리브의 끝부분에 소재가 충전되지 않는다. 이와 같이 초기형상비가 변화하면 예비성형시 재료가 금형에 완전히 충전되지 않을 수 있기 때문에 사용할 수 있는 예비형상이 제한되게 된다.

초기형상비에 따른 예비성형의 결과를 ξ 로 나타낼 수 있다. 초기형상비가 1인 경우와 2/3인 경우를 신경망을 이용하여, r_V, ϕ 값에 따른 ξ 를 구하였다. 초기형상비가 1인 경우 전 범위에서 ξ 값이 1보다 큰 값을 가졌으나, 2/3인 경우는 Fig. 8과 같이 ξ 값이 1보다 작은 영역이 존재하였다. 결국 예비형상으로 사용가능한 r_V 와 ϕ 값은 예비형상이 완전충진되는 ξ 가 1이상의 범위에서 찾아야 한다. 결국 예비성형과 최종성형시 모두 완전 충전되어야 한다는 조건으로 변수들의 범위가 Fig. 9의 빗금친 부분으로 제약되게 된다. Table 2는 형상비가 2/3인 초기소재를 사용하여 1,2점의 예비형상을 사용하였을 경우 최종단조시 충만도를 비교한 결과이다. 1에서 예비형상이 완전충진되지 않아 최종단조품 역시 완전충진되지 못했다.

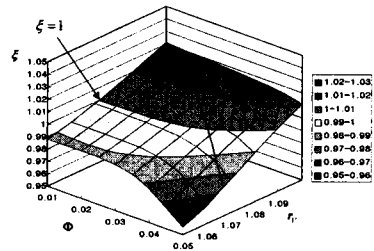


Fig. 9 Resultant filling map restricted by the aspect ratio of initial billet

Table 2 Comparison of FEM simulation results and neural network outputs when the range of the factors of preform is restricted by the aspect ratio of an initial billet

ϕ	r_V	ξ (FEM)	ξ (신경망)	filling
0.020	1.080	0.979	1.005	×
0.035	1.090	1.008	1.010	○

다. 2에서는 예비형상과 최종단조품 모두 충전되었고, 또한 ξ 값이 신경망의 출력결과와 거의 차이가 없었다.

4. 결론

본 연구에서는 두 도체사이에 서로 다른 전압이 걸렸을 때 발생하는 전기장의 등전위면을 도입한 예비형상 설계방법을 제시하였다. 등전위면의 형상을 예비성형체의 형상으로 사용하였는데, 이렇게 설계된 예비형상을 현장 도면과 비교하여 유용성을 확인하였다. 인공신경망 회로를 이용하여 임의의 단조품에 대한 예비형상을 결정하는 방법을 제시하였고 초기형상비의 변화에 따라 사용할 수 있는 예비형상의 범위가 제약된다는 결론을 얻었다. 이러한 설계방법은 시간과 경비를 절감할 수 있고, 3차원 형상에서도 쉽게 등전위면을 구할 수 있어 적용가능하다.

참고문헌

- (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., Zabarar, 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.
- (6) 정낙면, 1992, "축대칭 유한요소해석에서 단위

체 격자 재구성법과 퍼지논리를 이용한 전방 투사법," 한국과학기술원 석사학위논문

- (7) Peng, Y., Ruan, X., Zhou, F. and Wang, Z., 1996, "Defects prediction during metal forming process by FEM," Proceedings of the 5th international Conference in Technology of Plasticity, Columbus, Ohio, U.S.A., pp. 419-428.
- (8) Ko, D. C., Kim, D. H., Kim, B. M. and Choi, J. C., 1998, "Methodology of preform design considering workability in metal forming by the artificial neural network and Taguchi method," J. Mater. Pro. Technol., Vol. 80-81, pp. 487-492.