

전기장 이론을 이용한 3차원 단조공정에서의 예비형상 설계

신현기* · 이석렬* · 박철현* · 양동열*

(2002년 1월 22일 접수)

The Optimal Design of Preform in 3-D Forging by using Electric Field Theory

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

Abstract

The preform design of forging processes plays a key role in improving product qualities, such as defect prevention, dimensional accuracy and mechanical strengths. In the industry, preforms are generally designed by the iterative trial-and-error approach, but it results in significant tooling cost and time. It is thus necessary to minimize lead-time and human intervention through an effective preform design method. In this paper, the equi-potential lines designed in the electric field are introduced to find the preform shape, and then the optimization process is used to choose the equi-potential lines that will keep the die wear to a minimum. Because, in the forging process, the die wear is a function of various important factors, such as forming stress and strain, microstructure and mechanical properties of a product.

Key Words : Forging, Preform, Equi-potential line

1. 서론

예비성형은 최종성형시에 재료가 금형을 완전히 채울 수 있도록 할 뿐만 아니라, 금형의 마모를 감소시켜 금형의 수명을 연장시켜 주며, 재료의 유동과 조직성질을 개선시켜 주어 제품의 기계적 성질을 향상시킨다. 또한 플래시로 나가는 재료의 양을 줄여주며, 성형하중을 감소시켜 준다. 예비성형에 사용되는 예비형상은 단조초기품과 최종품의 중간형상으로, 지금까지 다양한 설계방법이 제시되었다. 기존의 설계방법들은 주로 전문가에 의한 경험적인 방법과 유한요소법을 이용한 해석적인 접근

방법이 있으나 많은 시간과 노력이 필요하며 최적화 관점은 배제되어 있는 단점을 가지고 있다. 3차원 형상의 단조품에서의 예비형상 설계의 최적화에 관한 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Park⁽¹⁾ 등은 유한요소법을 최종단조형상으로부터 역추적법을 이용하여 웰노징의 예비형상을 설계하였다. Bramley 등⁽²⁻³⁾은 UBET의 새로운 방법을 제안하여 소재상태의 최적화된 속도장의 방향을 반대로 하여 예비형상을 구하였다.

Takemasu⁽⁴⁾이 커넥팅로드에서 길이방향의 단면적을 계산하여 그 면적 정보를 바탕으로 최적의 예비형상의 형태를 제안하였고, Lapovok⁽⁵⁾는 제품의 기하학적 형상

* 한국과학기술원 기계공학과

을 변수들로 정의한 뒤, 이 변수들의 조합을 해석한 후 급형 마모치가 최소가 되는 변수의 조합을 갖는 예비형상을 찾았다. $Lcc^{(6)}$ 는 전압차에 의해 두 도체사이에 발생하는 등전위면을 이용하여 예비형상을 설계하는 방법을 제안하였고, 축대칭 제품에 적용하여 예비형상의 범위를 결정하였다. 그리고 플라스틱을 이용한 모사실험을 수행하여 제안된 방법의 유용성을 확인하였다. 본 연구에서는 전기장을 이용한 예비형상 설계방법을 사용하여 일반적인 3차원 제품의 예비형상 설계와 최적화에 관한 연구를 수행하였다.

2. 등전위면을 이용한 예비형상 설계

2.1 등전위면

공간상의 두 도체에 다른 전압이 걸렸을 때, 그 사이 공간 전위는 다음과 같은 Laplace 함수로 나타내어진다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

이때, 공간상의 같은 전압을 갖는 점들로 면을 구성할 수 있는데, 이러한 면들은 서로 겹치거나 중복되지 않는다는 특성을 가지고 있다. 이러한 등전위면의 특징을 이용하면 단조초기소재 형상과 최종형상 사이의 중간형상을 얻을 수 있는데, Fig. 1은 단조초기형상을 확대한 후, 최종형상을 확대된 초기형상의 내부에 넣은 다음 최종형상과 초기형상에 각각 0 V와 1 V를 걸어주어서 얻어진 등전위면들을 보여준다.

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

2.2 예비형상 설계방법

단조초기형상과 최종형상으로 등전위면을 얻는 방법은 여러 가지가 있겠으나, 본 연구에서는 단조최종형상이 초기형상 내부로 들어갈 수 있도록 초기재료 형상을 확대하였다. 그 후, 무게 중심점이 같도록 일체화시키고, 초기, 최종 형상에 각각 0 V와 1 V를 주어 등전위면을

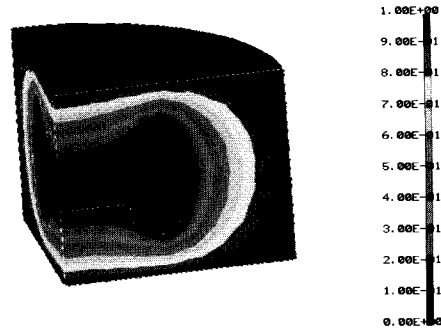


Fig. 1 Equipotential lines generated between two conductors

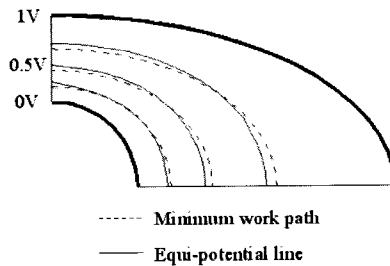


Fig. 2 Comparison of equipotential lines and minimum work paths

얻었는데, 이는 나중에 설계변수로 사용될 전위값의 표현을 쉽게 하기 위한 것이다. 초기재료 형상의 확대비는 2~3으로 하였는데, 이 범위에서는 축소비에 따른 등전위면의 형상변화가 크지 않다. 등전위면의 형상은 전위값이 0 V에 가까울수록 최종형상에 가깝고, 1 V에 가까울수록 초기형상에 가깝다.

등전위면을 3차원 예비형상 설계에 이용하기 위해서는 유한요소법으로 구해진 전위 결과로부터 원하는 등전위면의 형상을 추출해내어야 한다. 먼저, 사면체 요소로 격자를 나누고, 유한요소법으로 전기장 방정식을 풀었다. 이때, 각 사면체 요소는 절점에서 전위값을 결과로서 가지게 된다. 하나의 유한요소격자 내부에서 전위값은 각 절점 사이의 변을 따라 선형적으로 변한다고 가정하고 각 절점의 전위값으로부터 계산을 통해 원하는 전위값을 가진 점들의 위치정보를 알 수 있다. 하나의 사면체 요소의 변 위에서 같은 전위값을 가지는 점이 최대 4개까지 존재한다. 예비형상 설계에 필요한 정보는 이런 등전위 점으로 이루어진 등전위 면이므로 하나의 요소 내부

에서 원하는 전위값을 가진 점이 3개 이상인 요소만 고려하여 표면 데이터를 추출하면 된다. 즉, 어떤 사면체 요소 하나에 원하는 등전위면은 삼각형, 아니면 사각형의 형태로밖에 존재할 수 없음을 의미한다. 이런 면들을 모두 찾아내어 연결하면 등전위 표면 형상 데이터를 추출해 낼 수 있는 것이다.

본 연구에서는 사각형으로 얻어진 등전위면은 삼각형 2개로 나누어 등전위면의 형상을 삼각형 패치의 연속인 형태로 추출하였다. 이렇게 사면체 격자로부터 등전위면의 삼각형 패치를 얻어내는 알고리즘은 Fig. 3과 같다. 삼각형 패치의 연속으로 3차원 등전위 표면 형상을 추출한 이유는 삼각형이 데이터 추출이 쉽고 등전위면이 매우 복잡한 형태를 가지고 있더라도 삼각형들의 조합으로 쉽게 표현되기 때문이다. 그리고 이렇게 얻어진 삼각형 표면 데이터는 예비형상으로 사용하여 해석을 할 때 필요한 표면 격자 생성이나, 사면체 격자와 같은 3차원 솔리드 격자 구성에 유리하다.

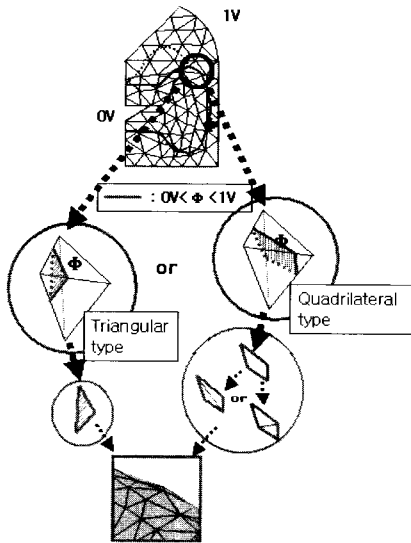


Fig. 3 Extraction of equi-potential surface data from FE results

Fig. 4 에서 유한요소법으로 구해진 등전위면 형상과 삼각형 패치로 따로 떼어낸 등전위면 형상이 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 등전위면 정보가 정상적으로 추출되어져서 예비형상 설계와 해석에 적용할 수 있음을 의미한다. 이렇게 얻어진 등전위 삼각형 패치들과 대칭면에 만든 삼각형 패치들로 Fig. 4와 같은 완전한 3차원 표면형상 정보를 완성한다.

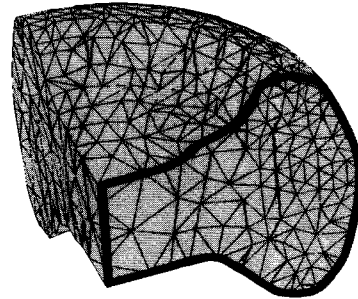
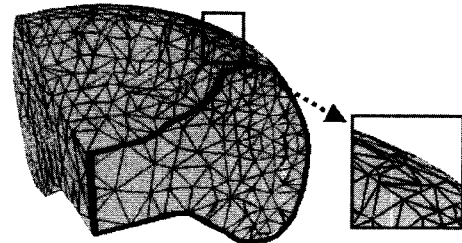
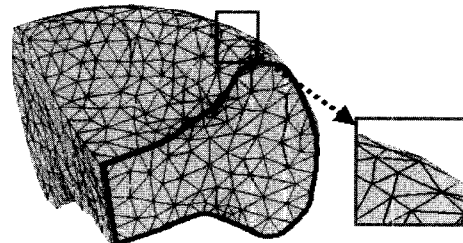


Fig. 4 Final equi-potential surface by triangular patches



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Surface patches of bad conditions
(b) Surface patches after reconstruction

대칭면의 삼각형은 Delaunay 방법을 사용하여 완성하였다. 하지만 이렇게 구해진 등전위 표면을 구성하는 삼각형들은 Fig. 5(a)에서 보듯이 크기가 일정치 못할 뿐만 아니라, 유한요소의 격자로 사용될 경우, 격자질 또한 매우 좋지 못하다. 때문에 이러한 격자를 직접 사용하여 솔리드 격자구성을 할 경우 큰 계산 오차를 유발할 수 있다. 때문에 격자질 향상을 위해 재구성 과정을 수행하였고, 이를 수행한 결과는 Fig. 5(b)와 같다.

3. 3차원 제품의 예비형상 설계 최적화

Park⁽⁷⁾은 등전위면을 이용하여 볼조인트 소켓의 예비형상을 설계하였다. 설계된 예비형상을 이용하여, 성형시의 금형마모량을 1/10 정도로 감소시켜, 3차원 예제에서도 등전위면을 이용하여 예비형상을 설계하는 방법이 타당하다는 것을 보였다. 본 연구에서는 등전위면을 이용하여 예비형상을 설계하는데 있어서 어떠한 전위값의 등전위면이 예비형상으로 적합한지를 판단할 기준을 제시한다. 이에 Fig. 6과 같은 리브-웹 형태의 단조 예제를 선정하여 연구를 진행하였다.

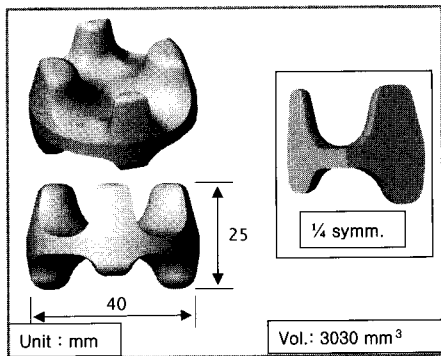


Fig. 6 Shape of example forging product

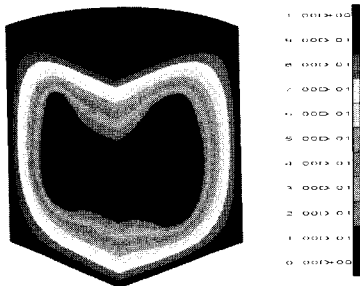


Fig. 7 Equi-potential lines generated between initial and final shape

초기재료는 원형빌렛을 사용하였고, Fig. 7은 초기재료 형상을 2.5 배 확대한 뒤 최종형상과 무게중심점을 일체화시킨 후 등전위면을 나타낸 결과이다. 등전위면을 이용하여 예비형상을 설계하기 위해선 예비형상으로 사용하기 위한 적절한 전위값을 선정 하여야 한다. 우선 전위값과 등전위면의 형상관계를 확인하기 위하여 다음과 같은 형상복잡성이라는 무차원수를 도입하였다.

$$k = b \frac{A}{V^{2/3}} \quad (2)$$

여기서 A는 표면적, V는 부피, b는 구의 형상복잡성 k가 1이 되게 하는 상수로 약 0.2068의 값을 갖는다 Fig. 8은 이 예제의 전위에 따른 형상복잡성의 관계를 나타낸 것이다.

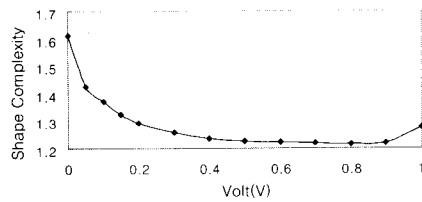


Fig. 8 Shape complexity of example

이 결과에서는 전위 값이 0 V에 가까울수록 전위 변화량에 따라 형상복잡성이 급격히 변함을 알 수 있는데, 이는 이 부분에서 예비형상의 모양이 급격히 변함을 의미한다. 그리고 0.3 V의 전위 값 이상에서는 형상복잡성의 변화량이 급격히 줄어들음을 확인할 수 있어, 어느 특정 전위값 이상부터는 예비형상의 모양이 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 이 사실로부터 등전위면을 이용하여 예비형상을 설계하는데 있어서 0~1 V사이의 범위를 다 고려하여 예비형상을 설계하는 것은 효율성 측면에서 유리할 것이 없음을 말해준다. 따라서 형상이 급격히 변하는 최종형상에 가까운 전위 범위에 가중치를 주고, 형상 변화가 거의 없는 전위 범위는 가중치를 낮게 주거나 예비형상 설계범위에서 제외함으로써 설계 효율성을 증진시킬 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 전위값에 대한 형상복잡성을 선형화하였다. 즉, 형상이 급격히 변하는 0 V에 가까운 부분에 가중치를 주기 위하여 다음과 같은 함수를 도입하여 선형화하였다.

$$x' = c(1 - f(x)) \quad (3,a)$$

$$f(x) \approx \frac{1}{(1-x)^n} \quad (3,b)$$

여기서 n은 형상복잡성 함수의 복잡성에 따라서 정해지는 지수인데, 본 예제에서는 n은 5로 하였다. c는 최종형상은 0 V, 초기재료는 1 V에 대응시켜 주기 위한 상수이다. Fig. 9는 형상복잡성을 선형화시킨 결과이다.

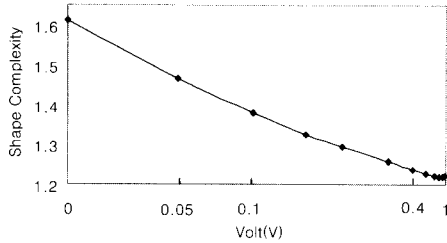


Fig. 9 Linearization of shape complexity

결과로부터 형상이 급격히 변하는 최종형상 부근 즉, 0 V 부근의 정보를 자세히 표현해주며 반대로 형상변화가 거의 없는 초기재료에 가까운 1 V 부근에서의 정보는 거의 의미가 없어짐을 알 수 있다. 설계 변수를 선형화함으로써 설계 예측 및 경향 파악, 설계 제시에 용이함을 제공해 준다.

실제 단조 제품을 성형하는데 있어서 가장 우선 고려되어야 할 점은 소재가 금형내부에 완전 충전이 되어서 결함이 없는 제품이 성형되느냐 하는 것이다. 예비형상을 이용하여 성형할 때에 마찬가지로 고려되어야 할 사항이며 완전 충전이 이루어지는 범위 내에서 예비형상을 설계해야 한다. 등전위면을 이용하여 예비형상을 설계할 때는 완전 성형이 이루어지는 전위 값을 가지고 최적의 예비형상 설계에 적용해야 한다. 최적설계 문제에서 이러한 사항들은 제한조건으로 사용된다. 먼저, 충전율은 다음과 같이 무차원수로 정의하였다.

- 소재가 금형에 완전히 충전되지 않을 때

$$\xi = \frac{(\text{금형공동부내의 소재부피})}{(\text{최종단조품의 부피})} \quad (4,a)$$

ξ 값은 0에서 1사이의 값을 갖게 된다. 또 소재가 완전히 충전되는 경우 충전율은 다음과 같이 정의하였다.

- 소재가 금형에 완전히 충전될 때

$$\xi = \frac{(\text{완전 충전되는순간 금형공동부내의 소재부피})}{(\text{최종단조품의 부피})} \quad (4,b)$$

이 경우 값은 1보다 크게 된다. 결국 특정 전위값의 등전위면을 예비형상으로 사용하여 성형하였을 때 충전율은 1이상이 되어야 예비형상으로서 의미를 가지게 되고, 본 연구에서는 이를 만족하는 범위를 해석을 통해 제시함으로써 등전위면을 사용하여 예비형상을 설계하는

기준으로 삼았다. 성형해석을 통하여 본 예제의 타당한 예비형상 설계 범위를 선정하였는데, 3차원 해석에는 많은 시간이 소요되므로 최소의 해석을 수행해야 될 필요가 있다. 3개의 전위를 선정하여 해석을 수행하고 그 결과를 앞에서 제안한 선형화 과정을 통하여 분석하였다. 3점 선정은 Fig. 9의 형상복합성의 선형화 결과로부터 0.4 V이상은 형상 변화가 거의 없어 의미가 없다고 판단하여, 초기형상에 가까운 0.4 V, 최종형상에 가까운 예비형상은 0.04 V, 그리고 그 중간 형상인 0.1 V, 이렇게 3개의 전위를 선정하였다.

소재는 AISI 1045를 사용하였고, 10절점 사면체 요소를 사용하는 FormSys3D 해석프로그램으로 등온 열간 해석을 하였다. 소재온도는 900 °C, 마찰계수(m)는 0.3으로 하였다. 해석은 초기재료에서 예비형상으로 성형하는 과정, 예비형상으로 성형하는 과정을 모두 수행하였다. Table 1은 해석결과로부터 얻어진 최대 유효변형을 결과이다.

Table 1 FEM analysis results - Max. effective strain

Volt(V)	Preform forming	Final forming
0.04	Folding defect	1.29
0.1	1.378	1.59
0.4	0.93	1.92

Table 2 는 충전율을 계산한 결과이다.

Table 2 FEM analysis results - Filling ratio

Volt(V)	Preform forming	Final forming
0.04	Folding defect	1.0717
0.1	1.0158	1.0336
0.4	1.0534	0.9416

해석결과로부터 얻어진 충전율을 선형화하면, Fig. 10과 같이 된다.

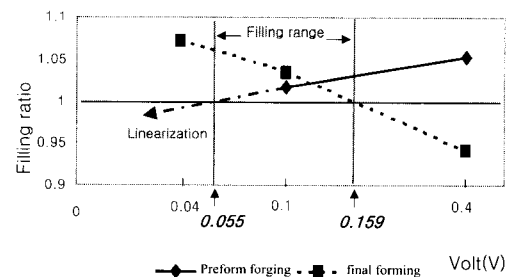


Fig. 10 FEM analysis results - Filling ratio and range

선형화 된 충진을 결과로부터 성형 제한범위를 구할 수 있다. 즉, 충진율이 1.0 이상이 되는 전위의 범위를 정할 수 있다. 성형해석 결과로부터 초기재료에서 예비형상으로 성형될 수 있는 전위한계는 0.055 V이다. 즉, 0.055 V보다 작은 전위의 등전위면 예비형상은 초기재료에서부터 예비형상으로 성형이 완전히 이루어지지 않음을 의미한다. 그리고, 예비형상에서 최종형상으로의 성형한계 값은 0.159 V이다. 결국 등전위면을 이용하여 이 예제의 예비형상을 설계할 때, 소재가 금형에 완전 충진되는 전위값의 범위는 0.055 V - 0.159 V라는 결론을 내릴 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반적인 3차원 제품의 예비형상 설계 방법으로써 전기장의 등전위면을 이용한 설계 방법을 제시하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 등전위면을 이용하여 예비형상을 설계하기 위하여 형상복잡성과 선형화 개념을 도입하여 빠르고 응용이 쉬운 설계방법을 제안하였다.

(2) 충진성을 기준으로 예비형상 설계 범위에 관한 연구를 수행하였고, 3차원 예제를 통하여 방법의 타당성을 확인해 보았다.

실제 성형에서는 금형내의 예비형상 위치선정 및 예비성형체의 제작난이도 문제들로 설계된 예비형상을 직접 사용하지 못하는 경우가 있다. 이러한 사항들은 수치적인 계산으로 고려하기가 어려운, 즉, 전문가의 경험이나

작업지침 등에 의존하는 것들이다. 따라서 설계자는 제작 난이도, 사용장비, 작업상태 등을 고려하여 제안된 예비형상을 알맞게 수정해야 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- (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, No. 1, pp. 71~79.
- (2) Osman, F. H. and Bramley, A. N., 1984, "Frogging and preform design using UBET", *Advanced Tech. of Plasticity*, Vol. 1, pp. 563~568.
- (3) Bramley, A. N., "Computer aided forging design", 1987, *Annals of the CIRP*, Vol. 36/1, pp. 135~138.
- (4) Takemasu, T., Vazquez, V., Painter, B. and Altan, T., 1996, "Investigation of metal flow and preform optimization in flashless forging of a connectingrod", *J. of Mater. Pro. Tech.*, Vol. 59, pp. 59~105.
- (5) Lapovok, R., 1998, "Improvement of die life by minimization of damage accumulation and optimization of preform design", *J. of Mater. Pro. Tech.*, Vol. 80-81, pp. 608~612.
- (6) 이석렬, 2000, "열간 단조에서의 최적 예비형상 설계," 한국과학기술원 석사학위 논문.
- (7) 박철현외, 2001, "볼조인트 소켓 단조 공정의 예비형상 설계," 한국소성가공학회, 추계학술대회 논문집, pp. 224~227.