

볼조인트 소켓 단조 공정의 예비형상 설계

박철현* · 이석렬* · 신현기* · 양동열* · 박용복**
· 안병기** · 김용환*** · 배명환**** · 정순철****

Design of Preform in the Forging Process of the Ball-Joint Socket

C. H. Park, S. R. Lee, H. K. Shin, D. Y. Yang, Y. B. Park,
B. G. Ahn, Y. H. Kim, M. H. Bae and S. C. Chung

Abstract

The preform design in metal forging plays a key role in improving product quality, such as ensuring defect-free property and proper metal flow. In industry, preforms are generally designed by the iterative trial-and-error approach, but this approach leads not only to significant tool cost but also to the down-time of the production equipment. It is thus necessary to reduce the time and the man-power through an effective method of preform design. In this paper, the equi-potential lines designed in the electric field are introduced to find the preform shape. The equi-potential lines obtained by the arrangement of the initial and final shapes are utilized for the design of the preform, and then applied for obtaining a fine preform in the forging process of the ball-joint socket.

Key Words : Forging, Preform, Equi-Potential Line

1. 서 론

예비형상은 단조초기소재와 최종단조품의 중간 형상으로, 재료의 유동특성과 기계적 성질을 향상시키고, 금형 마모를 감소시키는 역할을 한다. 예비형상 금형은 일반적으로 숙련된 금형 설계 전문가에 의해서 설계된다. 이 방법은 경험에 의해 시행착오 과정을 겪으며 설계가 진행되기 때문에, 값비싼 금형 제작비는 물론 많은 시간과 경비가 소모된다. 또한, 최적화 관점이 배제되어 있으므로, 설계 향상에 한계가 있다. 예비형상의 자동화에 대한 연구들을 살펴보면, 다음과 같다. Subramanian[1]은 축

대칭 단조품들을 리브-웨브의 기본형태로 형상을 분리하고, 각각의 형상을 기하학적 변수들로 기술하였다. 분리된 형상들의 예비형상을 구하고, 다시 결합하여 최종적인 예비형상을 얻어냈다. Yu and Dean[2]은 예비형상의 금형설계 경험법칙들을 정리하여 축대칭 단조품의 자동 설계하였다.

수치적 계산방법이 발전되면서 유한요소법을 이용하여 최적예비형상을 찾으려는 연구가 있었는데, 이러한 해석적인 방법은 최적의 예비형상을 찾기 위한 것이지만 많은 해석 시간이 필요하다. 또한 공정의 설계시에 여전히 설계자의 주관적 개입이 불가피하고, 이때 설계변수를

* 한국과학기술원 기계공학과
** 공주대학교 기계공학부
*** 충남대학교 기계설계공학과
**** (주) 센트랄 기술연구소

어떻게 정하느냐에 따라 결과값이 달라지게 되고 실제공정에는 쓸 수 없는 결과가 나올 수 있다. Lee[3]는 전압차에 의해 두 도체사이에 발생하는 등전위면을 이용하여 일반적인 3차원 형상에도 적용가능한 예비형상의 설계방법을 제안하였다. 본 연구에서는 볼조인트 소켓의 예비형상을 등전위면을 이용하여 제시하고자 한다.

2. 등전위면을 이용한 예비형상 설계

2.1 등전위면

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

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

공간상의 같은 전압을 갖는 점들로 면을 구성할 수 있는데, 이러한 면들은 서로 겹치거나 중복되지 않는다는 특성을 가지고 있다.

2.2 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. 2 는 원형 평판이 주변형을 방향이 바뀌지 않으면서 최소 에너지로 타원형상으로 변할 때 나타나는 중간형상들을 보여준다. 형상은 1/4만을 나타내었다.

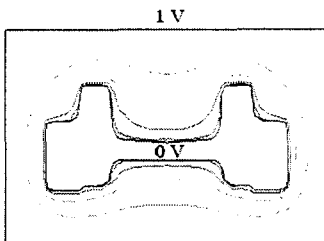


Fig. 1 Equip-potential lines generated between two conductors

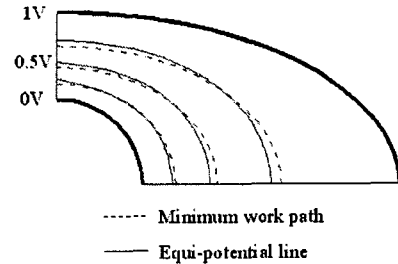


Fig. 2 Comparison of equipotential lines and minimum work paths

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.

2.3 예비형상 설계방법

단조초기형상과 최종형상으로 등전위면을 얻는 방법은 여러 가지가 있겠지만, 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.

2.4 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. 이러한 비교를 통하여 적절한 전위값 선정으로 기존의 설계와 거의 유사한 예비형상을 얻을 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

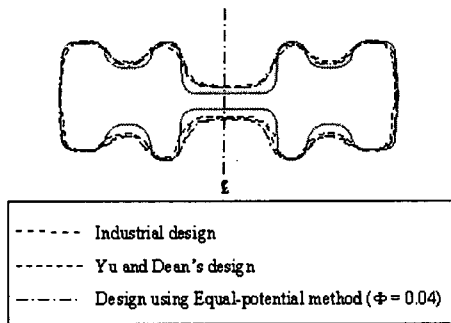


Fig. 3 Comparison of preform design between equi-potential lines and other methods

3. 볼조인트 소켓의 예비형상 설계

Fig. 4는 볼조인트 소켓의 제품 형상과 예비형상을 보여준다. 이 디자인은 최종형상의 부피분포를 고려하지 않아 전체적으로 일정한 두께를 가지고 있고, 리브-웹 부분에서 금형의 심한 마모가 예상된다. 실제 실험결과도 전체적으로 재료의 유동이 심하였고, 한쪽 부분에만 있는 리브-웹 형상 부분의 충진이 불충분하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 볼조인트 소켓 제품의 예비형상을 등전위면을 이용하여 제시하고자 한다. 먼저 재료의 초기 실린더 형상을 확대한 후, 최종단조형상을 그 안에 넣는다. 그 후, 각각을 도체로 생각하고, Fig. 5 에서와 같이 초기실린더 형상에는 1 V, 최종단조형상에는 0 V 를 걸어준다. 이렇게 얻어진 형상으로 유한요소를 구성한 후, 경계조건을 포함하여 유한요소해석을 하여 등전위면을 얻어내게 된다. Fig. 6 은 소켓의 초기실린더 형상과 최종단조 형상을 사이에서 발생되는 등전위면을 나타낸 것으로 대칭성을 이용해 전체의 1/2 만 나타내었다. 이러한 등전위면 중 예비형상으로 사용하고자 하는 형상을 추출하기 위해서는 다음과 같은 단계를 거친다. 요소 절점에서 가지고 있는 전위값에 따라 요소를 절단하고, 각 절단된 면으로 전체 형상을 구성한다. 본 연구에서는 형상을 절단되는 경우 수가 적은 사면체 요소를 사용하였다. Fig. 7 은 전위값이 0.3 V 인 경우에 사면체 요소가 절단되는 경우를 분류한 것이다. 전위값은 연속 값이므로, Type 4, 5 만 고려하였다. Type 5의 경우 발생하는 사절점 면은 두 개의 삼각형으로 나누었다. 각 사면체 요소에서 추출된 삼각형 표면 형상 데이터를 종합하여 전체 형상을 구성한 결과가 Fig. 8의 형상이다.

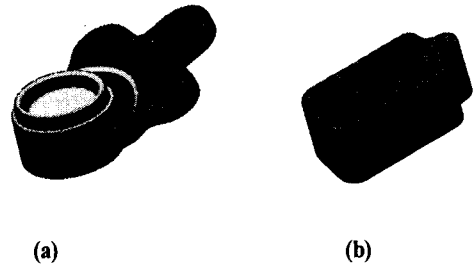


Fig. 4 (a) Forged shape of the socket forging (b) Previous shape of preform

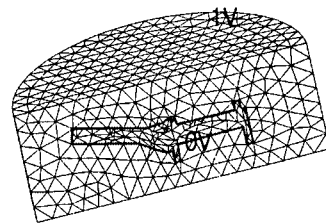


Fig. 5 Generated meshes of unified shape for the initial and the final shape

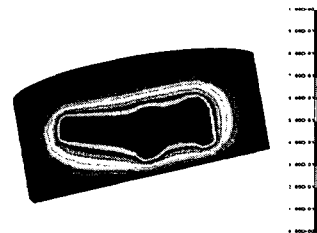


Fig. 6 Equi-potential lines between initial and final shapes of the ball-joint socket

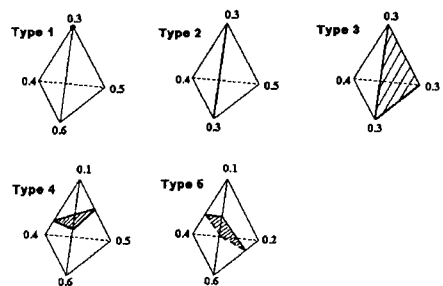


Fig. 7 Category for the cutted shapes of tetrahedron

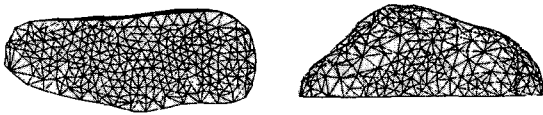


Fig. 8 Shapes of equi-potential surface of 0.4V

유한요소해석을 하기위해, Fig. 8의 표면 형상 데이터를 이용하여 표면에 삼각형 요소를 구성하고, 이를 이용해 Delaunay 방법을 이용하여, 내부에 사면체 요소를 구성하였다. 해석을 위한 금형 형상은 Fig. 9와 같다.

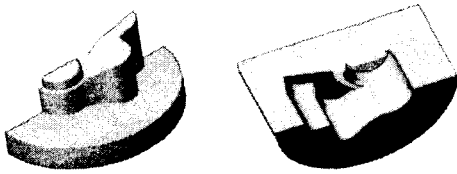
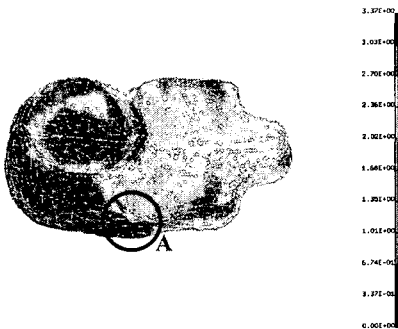
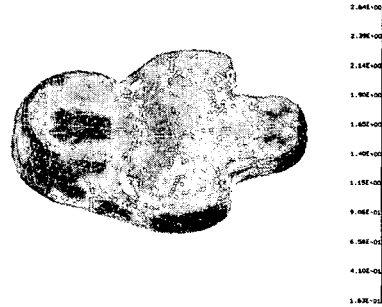


Fig. 9 Shape of upper and lower dies

소재는 AISI 1045, 10절점 사면체 요소를 사용하였고, FormSys3D 해석프로그램을 이용하여 등온 열간 해석을 하였다. 소재온도는 900 °C, 마찰계수(m)는 0.3 으로 하였다. 그림 10(a) 은 기존의 예비형상을 사용하였을 때의 해석 결과이고, 그림 10(b)는 등전위면을 이용하여 예비형상을 결정한 경우의 해석 결과이다. 기존의 예비형상을 사용하였을 경우에는 그림에서와 같이 A부분에서 폴딩이 발생되었다. 반면 등전위면을 이용한 예비형상을 설계한 10(b)의 경우는 폴딩이 발생하지 않았을 뿐 아니라, 최대 유효변형률도 3.37에서 2.64로 낮아져 균형적인 재료의 유동이 있었음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 10(a) Effective strain distribution - by previous preform

Fig. 10(b) Effective strain distribution - by equi-potential preform

4. 결론

등전위면을 이용한 예비형상 설계는 빠르고 간단하며, 일반적 형상에 적용가능하다. 따라서, 컴퓨터를 이용한 자동설계 구현이 가능한 방법이다.

(1) 이러한 등전위법을 이용하여 볼조인트 소켓의 예비형상을 설계하였다. 등전위법은 최소에너지경로를 거치는 중간형상과 비슷한 경향을 보이기 때문에, 초기의 예비형상이 재료분포가 최종금형의 형상과 달라 심한 재료의 유동이 있었으나, 등전위법은 금형형상, 즉 단조 최종형상과 초기 빌렛 형상을 보간하는 특징을 가지고 있기 때문에 균형적인 부피분포를 하고 있다.

(2) 유한요소 해석결과, 등전위면을 이용한 예비형상을 이용하였을 경우, 금형 형상에 재료의 유동이 원활해져 폴딩 현상이 없어졌을 뿐 아니라, 전체적으로 균형적인 분포를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- (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. Mech. Tool Des. Res., Vol.25, No.1, pp.1-13, 1985.
- (3) 이석렬, 2000, "열간 단조에서의 최적 예비형상 설계," 한국과학기술원 석사학위 논문