

3차원 강소성 유한요소해석을 사용한 전자부품의 정밀단조공정 설계

박근, 강연식, 양동열 (한국과학기술원)

In order to increase the productivity of electrical parts, manufacturing processes using progressive die have been widely used in the industry. If closed-die forging process may be included in the series of the forming process, however, there arise many problems in the die design, such as determination of blank size, feeding method and formability, etc. For the proper design of a process, a prediction of the process is required to obtain many design parameters. In this work, three-dimensional rigid-plastic finite element analysis is carried out to simulate precision forging process. The forging process of STEM, a part of photo pick-up hologram device, is simulated with the two types of processes, open die forging and semi-closed die forging, respectively. From the results of analyses, the forging processes can be predicted successfully, which enables to design appropriately the die and the process.

1. 서론

최근들어 각종 전자부품에 요구되는 가장 큰 특징으로 부품의 경량화 및 고정밀화, 부품수의 감소화 등을 들 수 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위하여 소성가공, 즉 프레스 작업에 의한 부품 생산이 늘어나고 있는데, 특히 정밀한 소형 부품의 양산화를 위해 프레스가공의 고속자동화 작업의 설비나 기법이 도입되고 있다. 이러한 정밀 부품의 대량 생산에 가장 적합한 생산수단으로는 자동화가 용이하고 정밀도가 높은 프로그레시브(progressive) 금형을 들 수 있다.

프로그레시브 금형은 순차 이송 금형이라고도 불리며, 높은 작업능률 및 경제성을 보장할 수 있는 연속 생산용 프레스 금형이다. 프로그레시브 금형의 대상부품은 형상이 단순한 부품은 물론 대단히 복잡한 부품이라도 재료가 금형 속으로 송입되어 통과하는 동안에 원하는 제품 형상으로 신속하게 완성되게 된다⁽¹⁾. 따라서 프로그레시브 금형은 다른 종류의 금형과는 달리 여러 형태의 금형이 관련을 가지고 조합되어 있으므로 금형의 가격이 매우 높게 차지하는 것이 보통이지만, 대량 연속 생산 또는 지속적 양산 제품에 적용하면 생산성이 훨씬 향상되게 된다.

본 연구에서는 광 광학 휠로그램(photo pick-up hologram)의 부품인 스템(Stem)의 제작에 있어서 일체형의 부품으로 성형하기 위한 성형기술을 개발하고자 한다. 스템의 기하학적 형상을 고려해볼 때

원만한 성형을 위해서는 완전 밀폐단조(closed-die forging)에 의한 성형이 바람직하나, 이는 높은 성형 하중이 요구되고 금형의 수명도 단축되기 때문에 생산성이 저하되는 문제가 있다. 또한 스템의 성형공정은 단조공정뿐만 아니라 블랭킹, 퍼싱 등의 공정으로 이루어져 있어 생산성 향상을 위해서는 프로그레시브 금형에 의한 성형이 바람직하다. 그러나 프로그레시브 금형을 사용하려면 소재의 스트립과의 연결이 필요하기 때문에 완전 밀폐단조에 의한 성형은 사실상 불가능하다. 따라서 성공적인 성형이 이루어지면서도 생산성을 향상시킬 수 있는 방법으로의 금형설계가 이루어져야 하나, 관련된 설계변수를 설정하기 위해서는 설계된 공정의 검증 및 설계 변경의 여러번의 시행착오 과정이 필요하다.

이러한 관점에서 금속의 성형공정을 해석할 수 있는 유한요소해석 시스템을 구축하고 이를 응용하여 설계된 금형에 따른 스템의 생산공정을 해석하여 공정중 중요한 인자를 추출하고, 각 인자간의 상호 영향 및 공정에 미치는 영향 등을 파악하여 이를 이용하여 시행착오에 따른 경제적, 시간적 손실을 줄이면서 성공적인 공정을 설계하고자 한다. 이를 위해 3차원 강소성 유한요소해석 프로그램을 사용하여 성형해석을 수행하고, 해석 결과를 실제 성형실험 결과와 비교하여 해석 프로그램을 검증하고자 한다. 또한 설계 사양에 따른 해석 결과를 비교함으로써 공정의 특성 및 이에 따른 설계변수들을 추출해내고 이를 금형의 설계에 반영하고자 한다.

2. 정밀 전자부품의 성형공정 설계

본 연구의 대상 제품인 스템은 光피업(pick-up) 용 허로그램의 부품으로서 여기에 레이저 다이오우드(laser diode)가 부착되는 핵심 부품이다. Fig. 1에 스템의 형상 및 치수를 나타내었다. 실제로 스템의 성형공정은 블랭킹, 단조, 피어싱 등의 여러 공정이 프로그레시브 금형에 의해 연속적으로 진행되는데, 본 연구에서는 이중 단조 공정만을 대상으로 설정하였다. 이중 단조공정에 의해서는 평평한 소재(sheet metal)가 성형되어 'J'자 모양의 돌기부가 이루어지는데, 여기에 다이오우드가 부착되게 된다. 따라서 돌기부에 대한 정밀한 성형이 이루어지도록 금형이 설계되어야 한다.

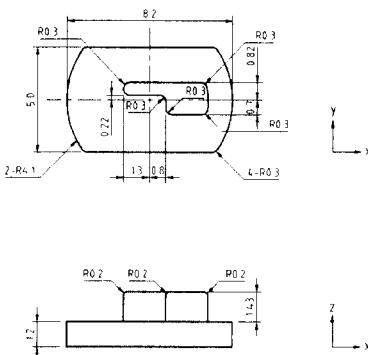


Fig. 1 Dimension and shape of STEM

단조 공정은 다른 공정에 비해 소재의 많은 변형을 유발시킨다. 따라서 높은 하중에 의한 금형 수명의 단축, 소재의 변형에 의한 파일럿(pilot)의 위치 변화 및 이에 따른 이송시의 문제점 등이 발생할 가능성이 있다. 이러한 문제점은 전체 공정에 치명적인 영향을 미치게 되므로 스트립 레이아웃(strip layout) 작성시 블랭크의 배열 방법 및 블랭크 치수의 계산, 공정수의 결정, 이송 피치 및 파일럿의 위치 선정, 재료폭 및 여유폭의 설정시 단조공정의 소재의 변형 특성을 고려하여야 한다.

성공적인 단조공정의 수행을 위해서는 여러 가지 요건을 만족해야 한다. 우선 소재가 금형에 완전히 충만되어야 원하는 정밀도의 제품을 생산할 수 있다. 또한 성형 하중이 프레스의 용량을 초과하지 않아야하며, 이에 따른 금형의 수명 또한 고려되어야 한다. 이밖에 소재의 유동에 따른 성형품의 기계적 성질, 작업환경의 특성 등 여려가지 인자들을 고려

하여 공정을 설계해야 한다. 전술한 바와 같이 스템은 프로그레시브 금형에 의해 순차적으로 성형이 되며, 소재는 스트립에 연결되어 이동하게 된다. 소재의 완전한 충만을 위해서는 소재의 전면을 구속한 채로 성형하는 밀폐단조 공정을 선택해야 하나, 소재와 스트립간의 연결부위가 존재하기 때문에 완전 밀폐단조가 불가능해진다. 또한 밀폐단조로 성형할 경우 성형하중이 급격히 증가하게 되는데 이에 따른 금형의 마모로 인해 금형 수명이 감소하게 되고, 결과적으로 대량 생산이 요구되는 제품의 경우 경제성이 떨어지게 된다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 되도록이면 금형에 의한 재료의 구속조건을 줄여 성형하중을 감소시키는 방향으로 다음과 같은 2가지 공정에 대한 금형설계 및 해석을 수행하고자 한다.

2.1 완전 개방형(Open type) 단조

첫번째 시도로써 소재의 측면을 전혀 구속하지 않은 경우에 대해 공정을 설계해보았다. 측면의 개방에 의해 상당량의 소재가 옆쪽으로 빠져나갈 것이 예상되므로 초기 소재의 부피를 여유 있게 설정해주어야 한다. Fig. 2에 초기 블랭크의 형상을 나타내었고, 이때의 두께는 2.7mm로 여유 있게 설정하였다. Fig. 3에 금형의 구조 및 치수를 나타내었다. 개방형 단조의 경우 금형설계가 용이하고 적은 성형하중이 요구되어 작업 용량이나 금형의 수명 등의 측면에서 유리하나, 구속조건이 적은 관계로 성형이 완전하게 되는가에 대한 검토가 필요하다.

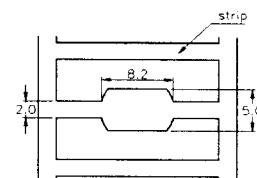


Fig. 2 Initial blank for open die forging

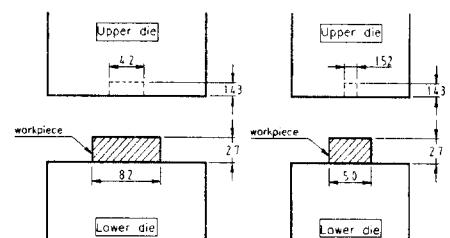


Fig. 3 Schematic description of open die forging

2.2 반밀폐형(Semi-closed type) 단조

완전 개방형 성형이 만족스럽지 못할 경우 어느 정도의 추가적인 구속이 필요하다. 그러나 너무 많은 구속조건은 금형의 수명을 단축시킬 가능성이 있으므로 적당한 수준의 구속이 필요하다. 이때 초기 블랭크는 소재의 트리밍 여유(약 2mm 정도)를 고려하여 설계하였으며, Fig. 4에 형상 및 치수를 나타내었다. 한편 Fig. 5에 이때의 금형의 형상 및 치수를 도시하였는데, 이때 소재의 장면은 하부금형에 의해 완전히 구속시키고, 단변쪽을 상부 금형의 돌출부에 의해 부분적으로 구속조건을 부여하였다. 반밀폐형의 경우 완전개방형에 비해 플래시(flash)로 빠져나가는 소재의 양이 상대적으로 적을 것으로 예상되므로 초기소재의 두께를 2.3mm로 설계하였고, 결과적으로 재료의 손실량을 절감할 수 있었다. 특히 프로그레시브 금형에 의한 성형의 경우 전체 스트립이 동일한 두께인 점을 감안할 때, 상당량의 재료가 절감되어 제품의 경쟁력을 높일 수 있는 효과가 있다.

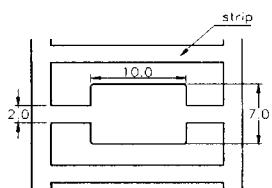


Fig. 4 Initial blank for semi-closed die forging

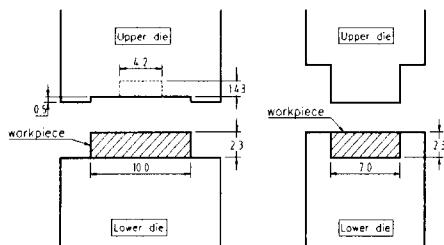


Fig. 5 Schematic description of semi-closed die forging

3. 정밀 전자부품의 성형해석

본 연구에서는 금속의 성형공정을 해석하기 위해 강소성 유한요소법을 사용하였으며⁽²⁾, 비정상상태 해석을 효과적으로 수행하기 위해 가공경화 효과를 고려한 수식화를 사용하였다⁽³⁾. 이때 변분방정식은 다

음과 같이 표현된다.

$$\int_V (\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \bar{\epsilon} H) \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_i} (f_i + \alpha \Delta f_i) \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 K는 비압축성 조건을 부과하기 위한 벌칙상수(Penalty Constant)이며 f_i 는 외력을 의미한다. 금속성형공정에서 f_i 의 대표적인 예로 금형과 재료간의 마찰력을 들 수 있는데 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$f_i = -\frac{2}{\pi} mk \tan\left(\frac{|V_s|}{u_0}\right) t \quad (2)$$

여기서 m 은 마찰계수, k 는 해당 접촉점에 있는 재료의 국부적 전단항복응력(Shear Yield Stress), u_0 는 V_s 에 비해서 매우 작은 양의 상수값이며, V_s 는 재료와 금형간의 상대속도의 벡터이고, t 는 V_s 방향의 단위벡터이다.

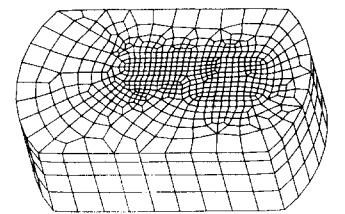
본 연구에서는 소재의 측면 부위를 완전히 개방한 경우와 부분적으로 구속한 2가지 경우에 대해 금형을 설계하고 각각에 대한 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 비교함으로써 각 공정의 장단점을 비교하고 이를 설계에 반영하고자 한다. 소재는 냉연 강판(SPCC)이며 상온에서의 응력-변형률 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma} = 45.505 \bar{\epsilon}^{0.184} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (3)$$

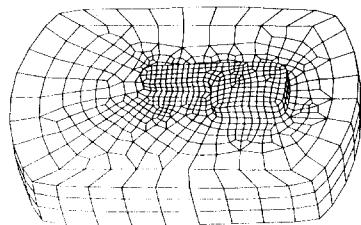
한편 편치의 이동속도는 130mm/sec이며 윤활유를 사용하여 윤활처리를 하였고, 이때의 마찰계수(m) 값은 0.1로 설정하였다. 실제 성형은 상온에서 이루어지며, 해석은 Cray Y-MP를 사용하여 수행하였다.

3.1 개방형(Open type) 단조의 성형해석

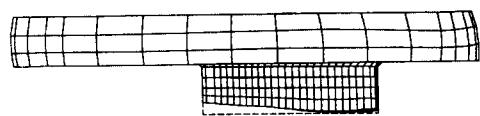
Fig. 6에 초기 블랭크에 대한 격자구조, 압하량 0.9mm일 때의 결과 및 최종 성형시(압하량 1.5mm)의 변형형상(측면도)을 도시하였다. 해석중 1번의 격자생성 기능과 3차원 표면 사상(surface mapping)기법⁽⁵⁾을 병용하여 수행하였다. 여기서 소재가 금형을 충만하지 못했고, 또한 돌기부의 폭이 얇은 부분에서 성형성이 더욱 좋지 않음을 알 수 있다. 이때 금형과 소재 사이의 간격은 협용가능한 형상오차를 벗어나며, 이는 최종 성형된 제품이 소재로서의 기능을 수행하지 못함을 의미한다. 따라서 개방형 단조



(a) initial mesh



(b) stroke : 0.9mm



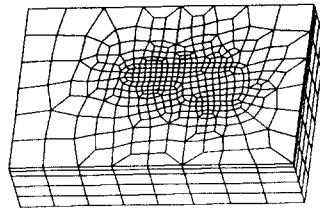
(c) final stage (stroke : 1.5mm)

Fig. 6 Deformed shape (open die forging)

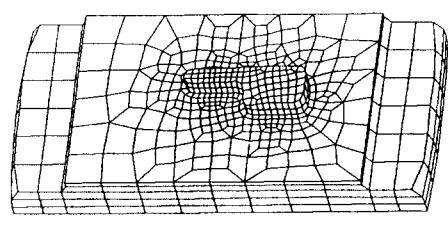
로는 본 제품을 성형하기가 불가능하며, 만족스러운 성형을 위해서는 소재 측면으로의 구속이 필요하다. 다음 절에서 이러한 추가적인 구속조건을 부과하였을 경우의 성형공정에 대해서 해석을 수행하고, 그 결과를 비교해보도록 하겠다.

3.2 반밀폐형(Semi-closed type) 단조의 성형해석

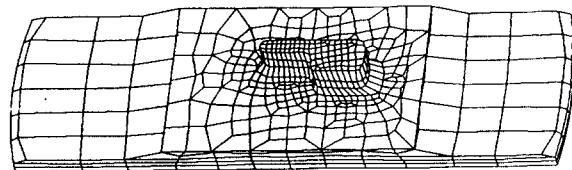
Fig. 7에 각각 초기 블랭크에 대한 격자구조, 압하량 0.6mm일 때의 결과 및 최종 성형시(압하량 1.1mm)의 변형형상을 도시하였다. 해석중 총 3번의 격자재구성이 요구되었으며, 전술한 방법을 사용하여 수행하였다. (c)의 최종 성형후의 변형 형상을 보면, 돌기부 표면의 절점이 모두 금형면과 접촉하여 성형이 성공적으로 이루어졌음을 알 수 있었다. 즉, 완전 밀폐형이 불가능한 프로그래시브 금형에 적절한 반밀폐형 구속조건을 적용하여 원하는 형상의 제품을 생산할 수 있음을 알 수 있다.



(a) initial mesh



(b) stroke : 0.6mm



(c) final stage (stroke : 1.1mm)

Fig. 7 Deformed shape (semi-closed die forging)

3.3 결과 비교 및 분석

개방형 금형을 사용했을 경우와 반밀폐형 금형을 사용했을 경우의 돌기부의 성형 정도를 비교하기 위해 동일한 압하량에서의 성형된 돌기부와 금형간의 간격(gap)을 절점값(nodal value)으로 정의하여 등고선(contour)으로 비교해보았다. Fig. 8에 금형과 소재와의 간격(gap)을 정의하였는데, 물론 이 값이 적을 수록 성형이 잘된 것이라 할 수 있겠다.

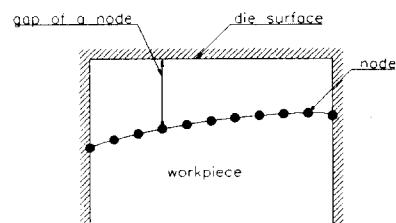
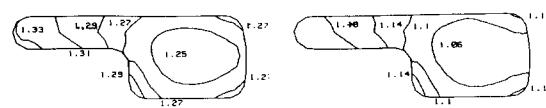


Fig. 8 Definition of the gap

제 5 장 결 론

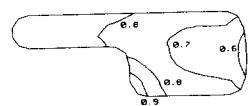
Fig. 9, 10에 각각 개방형 단조공정과 반밀폐형 단조공정에 대해 압하량에 따른 금형과 소재와의 간격을 도시하였다. 각 경우의 결과(Fig. 9, 10의 (a))를 비교해보면 초기 상태에서는 간격값은 큰 차이는 없으나, 반밀폐형 공정의 경우가 약간 적어 어느 정도의 성형성이 향상되었음을 알 수 있다. (b), (c)를 비교해보면 반밀폐형 공정의 경우가 개방형 공정의 경우에 비해 간격의 차이가 점점 증가함을 알 수 있는데, 이는 해석이 진행됨에 따라 측면구속의 효과가 커져 그만큼 반구속형의 경우가 성형성이 증가함을 의미한다.

한편 최종 성형후의 결과(Fig. 9, 10의 (d))를 비교해보면 개방형의 경우는 금형과 접촉된 절점이 한 개도 없었고, 간격이 0.2~0.5mm의 정도로 분포하여 원하는 형상으로의 성형이 어려웠음을 알 수 있다. 반면에 반밀폐형의 경우는 거의 모든 절점이 금형면과 접촉하였으며, 나머지 절점도 금형과의 간격이 0.05mm 이내로 허용 가능한 범위 내로의 정밀도를 유지할 수 있었음을 알 수 있다. 즉 반구속형 금형을 사용했을 경우 원하는 형상의 성형이 성공적으로 이루어졌다고 판단된다.

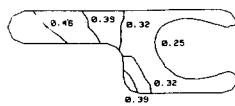


(a) stroke : 0.3mm

(b) stroke : 0.6mm

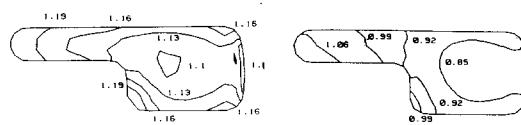


(c) stroke : 0.9mm



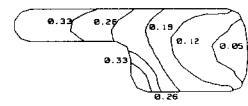
(d) stroke : 1.5mm

Fig. 9 Gap contour (open die forging)

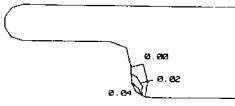


(a) stroke : 0.3mm

(b) stroke : 0.6mm



(c) stroke : 0.9mm



(d) stroke : 1.1mm

Fig. 10 Gap contour (semi-closed die forging)

본 연구에서는 **광 광업 홀로그램**의 부품인 스템의 제작을 위해 프로그래시브 금형을 사용한 성형공정 설계 및 유한요소해석에 관한 연구를 진행하였다. 프로그래시브 금형을 사용한 스템의 성형공정 중 단조공정에 대해 개방형 금형을 사용한 경우와 반(半)구속형 금형을 사용한 경우의 2가지 안에 대해 금형 설계변수를 도출하였다. 또한 3차원 강소성 유한요소해석 시스템을 사용하여 2가지 경우에 대해 성형 해석을 수행하였고, 해석 결과를 비교하였다. 개방형 금형을 사용했을 경우는 원하는 형상으로 성형이 이루어지지 못한 반면, 반구속형 금형을 사용했을 경우 성공적인 성형이 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 이때의 변형 형상 및 소재의 금형 충만 여부 등을 예측하여 공정 설계에 반영하였다.

후 기

본 연구는 LG전자(주) 생산기술센터의 지원을 받아 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김 세환, "Progressive 금형설계", 기전연구사 (1987)
2. C. H. Lee and S. Kobayashi, "New Solution to Rigid Plastic Deformation using a Matrix Method", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 95, pp. 865-873 (1973)
3. Y. J. Kim and D. Y. Yang, "A Formulation for Rigid-Plastic Finite Element Method Considering Work-Hardening Effect", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 27, pp. 487-495 (1985)
4. C. C. Chen and S. Kobayashi, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression, Applications of Numerical Methods to Forming Processes", ASME, AMD., Vol. 28, pp. 163-174 (1978)
5. Y. S. Kang and D. Y. Yang, "Investigation into the Thermal-Visco Plastic Finite Element Analysis of Square Die Extrusion of Square Section with Lagrangian Description", Int. J. of Machine Tools and Manufacture", Vol. 36, No. 8, pp. 907-924 (1996)