

미세 성형 부품의 성형 공정 해석 및 실험

구태완* · 강범수** · 오수익***

A Experimental Study and FE Analysis of the Forming Process with Milli-Component Forming

T. W. Ku, B. S. Kang, and S. I. Oh

Abstract

Milli-structure components are classified as a component group whose size is between macro and micro scales, that is, about less than 20mm and larger than 1mm. The forming of these components has a typical phenomenon of bulk deformation with thin sheets because of the forming size. In this study, milli-structure rectangular cup drawing is analyzed and measured using the finite element method and experiment. Generally, milli-structure containers or cases like cellular phone vibrator consist of rectangular-shaped drawing to save installation space. A systematic approach is established for the design and the experiment of the forming processes for rectangular milli-structure cases. To verify the simulation results, the experimental investigations were also carried out on a real industrial product. The numerical analysis by FEM shows good agreement with the experimental results in view of the deformation shape of the product.

Key Words : Milli-Structure, Cellular Phone Vibrator, Rectangular Cup Drawing, FEM.

1. 서론

오늘날 소형부품(milli-component) 제조 분야 뿐만 아니라 다른 제조 분야에서도 고집적·고밀도화에 따라 점진적으로 소형화 추세가 두드러지고 있으며, 소형 전자 제품들의 소형화 추세는 동시에 경량화, 슬림(slim)화 및 대용량 고기능화로 이어지고 있다.⁽¹⁾

이러한 소형화 추세는 고생산성 및 재료의 고효율성으로 특징지어지는 전통적인 성형 방법만으로는 소형부

품 생산에 동일한 공정으로 적용되어질 수 없음을 나타내고 있다.⁽²⁾ 또한, 소형부품은 미세조직(micro-crystal)과 입자크기(grain size) 등의 미세조직적 특성(microscopic properties) 뿐만 아니라 전통적인 성형공정의 특성을 모두 지니고 있다.⁽³⁾ 그러나, 오늘날의 미세성형(micro-forming)은 대부분이 각 부품 혹은 공정별로 경험자의 공정 설계에 의해 이루어지므로 그 장점을 적용할 수 있는 분야가 매우 제한적이다. 부품성형 과정에서 부품의 크기가 축소되어지면, 축소되어지기 전의

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 항공우주공학과

*** 서울대학교 기계항공공학부

블랭크 크기와 비교하였을 경우 다른 재료 유동 거동을 가진다고 할 지라도 앞서 언급한 블랭크 형상이나 표면 형태 등은 변하지 않은 채로 유지되어진다. 그러나 이러한 문제는 주어진 모델의 크기 효과를 조합하여 해석과정에 적용함으로써 해결할 수 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

본 논문에서는 10×10×4mm(가로×세로×높이)모델의 휴대폰용 사각 진동 모터 케이스의 해석 과정에 있어서 소요 시간과 비용을 절감하기 위해 범용 외연적 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA3D를 사용하여 사각 컵 드로잉 공정에서의 적용에 대한 신뢰성 확보를 도모하였다.⁽⁷⁾

2. 사각 컵 드로잉의 유한요소 해석

2.1 이론적 배경

본 연구에서의 유한요소 해석은 외연적 강·소성 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 해석과정에서는 요소의 심한 뒤틀림이 발생했을 경우 적절한 계산 시간을 유지하면서 벤딩(bending)이나 휨(twist)과 같은 복잡한 변형 조건하에서도 사각 컵 해석의 유효한 결과를 유도할 수 있는 벨리츠크-쯔이(Belytschko-Tsay) 쉘/브릭(shell/brick) 요소를 해석에 적용하였다.

본 해석에서의 지배방정식은 가상일의 원리로부터 범함수식을 채용하였으며 아래와 같다.

$$\delta \Pi = \int_V \rho \dot{x}_i dx_i dv + \int_V \sigma_{ij} \delta x_i dv - \int_V \rho f_i dx_i dv - \int_S t_i \delta x_i ds \quad (1)$$

여기서 x_i 는 실제 좌표계, σ_{ij} 는 코시 스트레스(cauchy stress), ρ 는 소재 밀도, f_i 는 체적력 밀도, S_i 는 벡터 t_i 에서 정의되는 경계이다.

2.2 유한요소 모델

사각 컵 드로잉 공정의 수치적 해석은 외연적 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D의 LS-940 버전(version)을 이용하여 수행하였다. 또한 유한요소 모델링은 상용 전·후처리 프로그램인 FEMAP을 사용하였다.

본 연구를 수행하기 위한 기본적인 재료의 물성치는 위의 Table 1에 나타내었다. 그리고 유한요소 해석을 위한 펀치와 다이를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서는 펀치와 다이의 코너 반경이 0.4mm, 블랭크 반경이 8.9mm로 설계되었다. 또한, 유한요소 모델링에서는 펀치와 다이, 그리고 블랭크 홀더를 4-절점 강체

셀 요소로 나타내었다. 해석하고자 하는 부품은 정사각 대칭 형상이므로 ¼ 모델을 묘사하였다.

Table 1 Mechanical properties of material

Specimen	SPCE
Yield strength(0.2%)	149MPa
Ultimate tensile strength	268MPa
n-value*	0.25
r-value	0.17
C-value*	537MPa

* The uniaxial true stress-true strain curve : $\sigma = C \epsilon^n$

강체로 정의된 펀치, 블랭크 홀더 및 다이의 요소수는 각각 904개, 27개, 그리고 1436개로 묘사하였으며, 펀치와 다이의 코너반경은 각각 0.4mm이고, 마찰계수는 0.12의 쿨롱 마찰계수로 정의하였다.

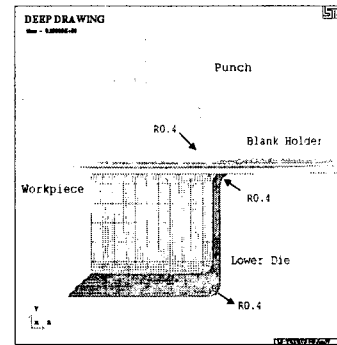


Fig. 1 FE-model for rectangular cup drawing

2.3 4-절점 쉘요소 타입의 유한요소해석

Fig. 2와 3은 유한요소해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 2는 성형 후의 유효변형률 분포를, Fig. 3은 두께분포는 각각 나타내고 있다. 유한요소해석에서 펀치의 변위는 4mm로 적용하였으며, 블랭크 홀더력은 200N에서 400N까지 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 해석 수행 결과로부터 블랭크 홀더력이 약 260N일 때 사각코너부의 최소두께가 0.194mm로 나타났다.

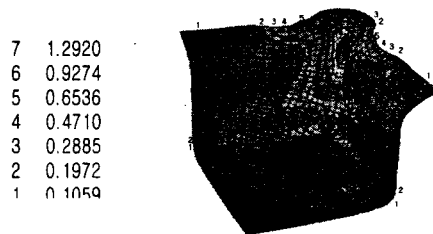


Fig. 2 The effective strain distribution at the BHF, 260N

Fig. 2에 보여지는 바와 같이 상부 코너부위에서 최대 변형률이 1.29로 나타났고, 이는 측면부에서 상부 코너에 재료가 유입되어 Fig. 3에서와 같이 초기 블랭크의 두께보다 상부 코너의 두께가 증가하였음을 알 수 있었다. 또한, Fig. 4에서는 각 블랭크 홀더력에 따른 사각 코너부의 최소 두께 분포를 나타낸 것이다.

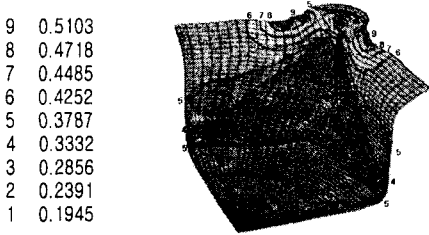


Fig. 3 The thickness strain distribution at the BHF, 260N

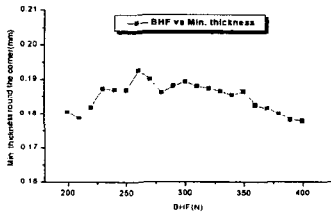


Fig. 4 The minimum thickness distribution at each BHF

2.4 8-절점 육면체요소 타입의 유한요소해석

블랭크의 8-절점 육면체 요소 타입에 대한 유한요소 해석을 위해 두 개의 층(layer)을 가지는 대칭 조건의 1/4 모델을 유한요소 모델링 하였다. 이 해석에서는 경계 조건 및 펀치와 다이, 블랭크 홀더 등은 앞서 수행된 4-절점 쉘 요소의 유한요소 해석 조건과 동일하게 적용 하였다. 블랭크를 구성하는 요소(element)의 총 수는 3360개이고, 소재의 두께는 0.4mm로 정의되었다.

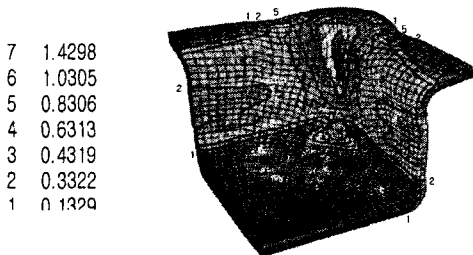


Fig. 5 The effective strain distribution of the brick element type at the BHF, 260N

Fig. 5는 육면체 요소에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 유한요소 해석은 펀치 변위 4mm이었으며, 블랭크 홀더력을 200N에서 400N까지 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 그 결과 블랭크 홀더력이 약 260N일 때 유효 변형율은 상부 코너에서 1.31로 나타났으며 사각 코너부의 유효 변형률은 0.73으로 이때의 두께는 0.22mm였다.

3. 미세 성형 실험

3.1 미세성형 실험

미세 성형 부품인 휴대폰용 진동모터 케이스의 성형 실험을 위한 전진 금형(progressive die)을 제작하였다. 초소형 진동모터 케이스의 성형 공정은 블랭킹, 드로잉, 사이징, 피어싱, 그리고 트리밍의 총 5단계의 공정으로 이루어져 있다. 본 부품을 제작하기 위해 실제 전진 금형을 제작하였다. 실험에 사용된 블랭크 소재는 냉간압연 강인 SPCE이었으며, 윤활제는 태핑유(tapping oil)를 사용하였다. 미세 성형 공정에 사용된 소재는 폭 30mm, 판재 두께 0.4mm인 스트립(strip)을 사용하였다.

3.2 미세성형 실험 결과

Fig. 6은 미세 성형 부품인 휴대폰용 진동모터 케이스의 최종 제품을 보여주고 있다. 실험으로부터 얻어진 최종 제품의 형상 및 치수는 설계 치수와 비교하였을 때 매우 양호한 결과를 도출 할 수 있었다. 또한 2.4절에서의 유한요소 해석 결과와 최종 제품의 실제 두께를 비교하였을 때 최종 부품의 사각 사각 코너부의 최소 두께가 0.24mm 정도로 유한요소 해석의 결과인 0.22mm와 매우 유사한 값을 지니고 있었다.

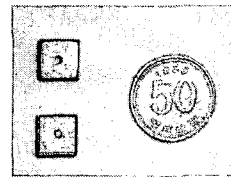


Fig. 6 The final product of rectangular vibrator case

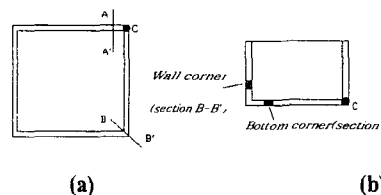


Fig. 7 The measurement positions of the grain size and thickness of the rectangular cup drawing process
(a) top view (b) side view

그리고 미시적 관점에서 미세 성형 전·후의 미소 입자의 분포를 알아보기 위해 시편의 각 부분별로 종단면 표면의 금속 결정을 관찰하였다. Fig. 7에는 금속 결정 측정부위를 나타내었다. 측정 부위는 측벽부 측정을 위해서는 section A-A', 코너부 측정을 위해서는 section B-B', 그리고 사각 코너부의 두께 측정을 위해 C 점을 정하였다.

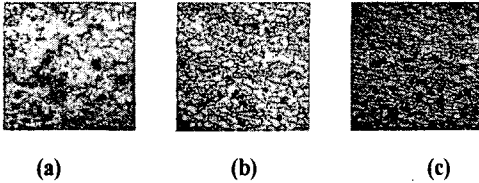


Fig. 8 Microphotograph of the deformed part($\times 400$)
(a) initial blank (b) section A-A' (c) section B-B'

Fig. 8은 각 단면 부위에서의 성형 전·후 소재의 그레인 분포를 보여주고 있다. Fig. 8(a)에서와 같이 초기 블랭크의 평균 그레인 크기는 약 $13.20\mu\text{m}$ 이었으며, 미세 성형 후 Fig. 8(b)에서는 약 $14.65\mu\text{m}$ 이었다. 그러나, Fig. 8(c)에서 나타나는 평균 그레인의 크기는 약 $29.87\mu\text{m}$ 로 증가하였으며, 이는 초기 블랭크의 평균 그레인 크기보다 약 2배 정도 증가되어진 수치이다. 이러한 그레인 크기 증가 현상의 원인으로는 이 B-B' 단면 부근에서 큰 신장이 발생하면서, 동시에 표면 마찰에 의한 국부적인 소성변형에 의한 결과라 할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 기존의 성형 방법과 비교하여 수 mm 크기의 부품에 대한 미세 성형시의 특성에 대한 연구를 수행하였다.

유한요소 해석 결과 미세 성형 해석 후 4-절점 쉘 요소와 8-절점 육면체 요소 모두 두께분포의 차이는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 약간의 벌크 성형 특성을 갖는 미세 판재 성형에서 육면체 요소를 적용할 수 있다는 것을 의미한다.

미세 성형 실험에서는 스프링 백의 영향은 무시할 수 있을 정도로 매우 작았으며, 결국 벌크 성형 특성을 갖는 이러한 종류의 판재 성형에서 강·소성 유한요소 기법이 적용되어질 수 있음을 알 수 있었다.

향후 미소 인장 실험을 통하여 보다 정확한 미세 성형품의 기계적 성질을 파악하여 크기 효과를 고려한 유

한요소 해석을 수행 할 것이다. 또한, 미세 성형품의 완성도를 나타내는 전체적인 코너부의 두께 분포 및 두께 방향의 평균 그레인 크기를 조사하여 미세 성형시의 재료 거동 특성 등의 연구를 수행 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) Geiger, M., Vollertsen, F., and Kals, R., 1996, "Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Microparts", Annals of the CIRP, Vol. 45, p. 227.
- (2) Miyazaki, S., Fujita, H., and Hiraoka, H., 1979, "Effect of specimen size on the flow stress of polycrystalline Cu-Al alloy", Scripta Met., Vol. 6, p. 447.
- (3) Jimma, T., and Adachi, T., 1993, "Recent trends in precise pressworking of electronic components", Proc. of the 4th Int. Conf. On Technology of Plasticity, p. 1547.
- (4) Messner, A., Engel, U., Kals, R., and Vollertsen, F., 1994, "Size effect in the FE-simulation of micro-forming processes", J. of Materials Processing Technology, Vol. 45, p. 371.
- (5) Harpell, E.T., Worswick, M.J., Finn, M., Jain, M., and Martin, P., 2000, "Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet", J. of Materials Processing Technology, Vol. 100, p. 131.
- (6) Yoshito, M.N., 1979, "Influence of microstructural inhomogeneity on the formability and fracture of a Carbon Steel", Transaction of the ASME, Vol. 101, p. 18.
- (7) LS-Dyna Keyword Users Manual, 1997, Livemore Software Technology Corporation, Livemore, CA, USA, June.