

## 미세 박판 성형 특성에 대한 실험적 연구

구태완\* · 강범수\*\*

### An Experimental Approach of Milli-Structure Sheet Metal Forming

T.W.Ku and B.S.Kang

**Key Words:** Milli-structure(미세성형), FEM(유한요소법), Cellular Phone Vibrator(휴대폰용 진동모터), Rectangular Cup Drawing(사각컵 드로잉)

#### 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.

#### 1. 서론

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

이러한 소형화 추세는 고생산성 및 재료의 고효율성으로 특징지어지는 전통적인 성형 방법만으로는 소형부품 생산에 동일한 공정으로 적용되어질 수 없음을 나타내고 있다.<sup>(2)</sup> 또한, 소형부품은 미세조직과 입자크기(grain size) 등의 미세조

직적 특성(microscopic properties) 뿐만 아니라 전통적인 성형공정의 특성을 모두 지니고 있다.<sup>(3)</sup>

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 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.<sup>(4)(5)(6)</sup>

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 공정에의 적용에 대한 신뢰성 확보를 도모하였다.<sup>(7)</sup>

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 부산대학교 항공우주공학과

## 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 톱(twist)과 같은 복잡한 변형 조건하에서도 사각 컵 해석의 유효한 결과를 유도할 수 있는 벨리츠크-쯔이(Belytschko-Tsay) 셸/브릭(shell/brick) 요소를 해석에 적용하였다. 그리고 위의 적용되어진 요소들이 가지는 축소적분의 형태는 Flanagan 등이 제안한 아워그래스(hourglass) 제어 기법을 포함하고 있다.<sup>(8)</sup>

본 해석에서의 지배방정식은 가상일의 원리로부터 범함수식을 채용하였으며 아래와 같다.

$$\delta \Pi = \int_V \rho \dot{x}_i \delta x_i dv + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_V \rho f_i \delta x_i dv - \int_{S_i} t_i \delta x_i ds \quad (1)$$

여기서  $x_i$ 는 실제 좌표계,  $\sigma_{ij}$ 는 코시 스트레스(Cauchy stress),  $\rho$ 는 소재 밀도,  $f_i$ 는 체적력 밀도,  $S_i$ 는 벡터  $t_i$ 에서 정의되는 경계이다.

### 2.2 소형화 효과

재료의 성형과정에서 크기가 축소되었을 때, 금형이나 블랭크의 크기는 소형으로 변경되어지지만 블랭크의 미세구조는 변하지 않고 이전과 같이 유지되어진다. 이는 성형과정에 있어서 상대적으로 미세구조가 커지게 됨에 따라 결국에는 다른 재료 특성을 지니게 된다. 이러한 현상을 크기효과(scaling effect) 혹은 소형화 효과(effect of miniaturization)라고 한다.

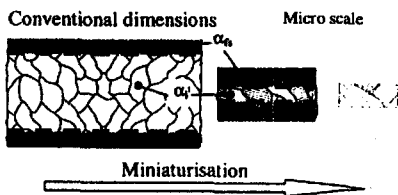


Fig. 1 Scale effect and the role of microstructure due to miniaturization

이 크기효과를 토대로 성형되어진 미세 혹은 소형 부품의 임의의 한 단면으로부터 두 종류의

입자(grain)를 구분할 수 있다. Figure 1에서와 같이, 미세 부품이나 소형 부품의 자유표면(free surface)과 이 자유표면에 의해 밀폐되어져 있는 외부 입자, 그리고 외부입자에 의해 둘러싸여 있는 내부 입자로 임의의 단면을 표현할 수 있다. 이때, 외부입자는 내부입자에 비해 어느 정도의 자유표면을 포함하게 된다. 이러한 외부입자와 내부입자의 자유표면을 포함하는 정도를  $\alpha_s$ 와  $\alpha_i$ 로 각각 나타낼 수 있게된다.<sup>(9)</sup>

크기가 큰 부품의 성형이라고 할 수 있는 '전통적'인 성형 공정에 있어서는 입자 크기보다 매우 큰 성형품의 치수를 포함하고 있기 때문에 유동 응력 측면에서의 자유 입자 경계(free grain boundary)상의 영향은 존재하지 않는다. 그러나, 고정된 미세구조를 갖는 성형품이나 요소(element)의 크기가 축소되어지면 외부 입자의 상대적인 수는 증가하게되며 자유 입자 경계가 변형 메카니즘에 중요한 변수로 작용하게 된다. 그러므로 내부 입자의 소성 유동 메카니즘은 단일 결정(crystal) 소성 거동이 외부 입자에 적용되고 있음에도 복합 결정의 소성 유동과 비교되어질 수 있게 된다. 결국, 크기가 축소되어져서 소형화되었을 때 미세요소(microelement) 체적으로써의 한 입자를 하나의 요소로 다룰 수 있게 되는 것이다.

### 2.3 유한요소 모델

본 연구를 수행하기 위한 기본적인 재료의 물성치는 아래의 Table 1에 나타내었다. 그리고 유한요소 해석을 위한 펀치와 다이를 Fig. 2에 나타내었다.

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 :  $\sigma = C \epsilon^n$

Figure 2에서는 펀치와 다이의 코너 반경이 0.4mm, 블랭크 반경이 8.9mm로 설계되었다. 또한, 유한요소 모델링에서는 펀치와 다이, 그리고 블랭크 홀더를 4-절점 강체 쉘 요소로 나타내었다. 해석하고자 하는 부품은 정사각 대칭 형상이므로

¼ 모델을 묘사하였다. 또한, SPCE 재질의 블랭크는 판재 성형후의 사각 코너부의 두께 분포를 비교하기 위해 4-절점 사각 쉘 요소와 8-절점 육면체 요소로 각각 모델링 하였다. 이 두 가지의 요소 형태들은 미세 부품 성형 과정에서의 벌크(bulk) 성형 특성을 고려하기 위해 블랭크의 요소 형태로 정의한 것이다.

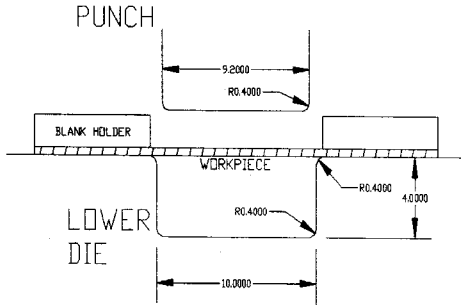


Fig. 2 A schematic diagram of the rectangular drawing (unit:mm)

#### 2.4 4-절점 쉘요소 타입의 유한요소해석

Figure 3은 블랭크의 메쉬 시스템과 경계조건을 나타내고 있다. 쉘 요소로 묘사된 블랭크의 요소수는 1680개이며 블랭크의 두께는 0.4mm이다.

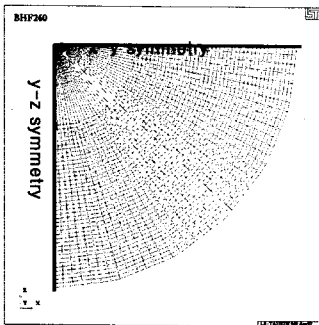


Fig. 3 The workpiece mesh system and boundary condition

Figure 4와 5는 유한요소해석 결과를 보여주고 있다. Figure 4는 성형 후의 유효변형률 분포를, Fig. 5는 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.

7	1.2920
6	0.9274
5	0.6536
4	0.4710
3	0.2885
2	0.1972
1	0.1059

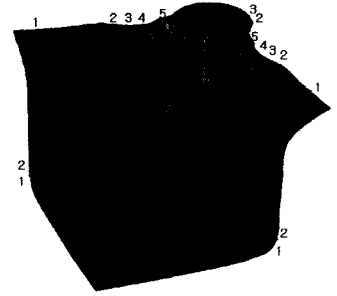


Fig. 4 The effective strain distribution at the BHF, 260N

9	0.5103
8	0.4718
7	0.4485
6	0.4252
5	0.3787
4	0.3332
3	0.2856
2	0.2391
1.	0.1945

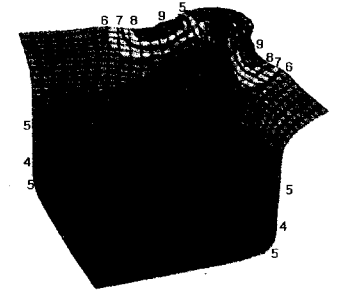


Fig. 5 The thickness strain distribution at the BHF, 260N

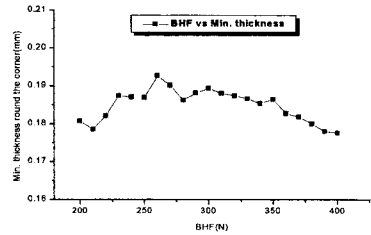


Fig. 6 The minimum thickness distribution at each BHF

Figure 4에 보여지는 바와 같이 상부 코너부위에서 최대 변형률이 1.29로 나타났고, 이는 측면부에서 상부 코너에 재료가 유입되어 Fig. 5에서와 같이 초기 블랭크의 두께보다 상부 코너의 두께가 증가하였음을 알 수 있었다. 또한, Fig. 6에서는 각 블랭크 홀더력에 따른 사각 코너부의 최소 두께 분포를 나타낸 것이다.

#### 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 하였

다. 이 해석에서는 경계 조건 및 펀치와 다이, 블랭크 홀더 등은 앞서 수행된 4-절점 쉘 요소의 유한요소 해석 조건과 동일하게 적용하였다. 블랭크를 구성하는 요소(element)의 총 수는 3360개이고, 소재의 두께는 0.4mm로 정의되었다.

Figure 7은 육면체 요소에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 육면체 요소의 경우 실제 제작한 시제품과 유사한 형태의 변형 모습을 보이고 있다. 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 변형율은 0.73으로 이때의 두께는 0.22mm였다.

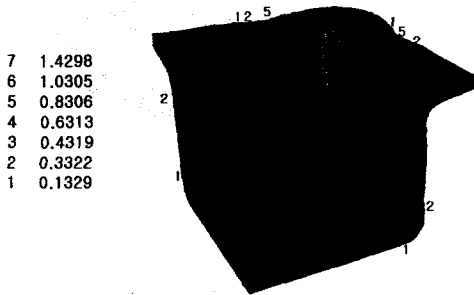


Fig. 7 The effective strain distribution of the brick element type at the BHF, 260N

### 3. 미세성형 실험

#### 3.1 미세성형 실험

Figure 8은 미세 성형 부품인 휴대폰용 진동모터 케이스의 성형 실험을 위한 전진 금형 (progressive die)을 보여주고 있다. 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. 또한, Fig. 2에서 나타내어진 바와 같이 펀치는 9.2×9.2mm<sup>2</sup>, 아랫 다이는 10×10mm<sup>2</sup>의 정사각형 상이며, 펀치와 아랫 다이의 각 코너 반경은 0.4

mm로 해석과 동일하게 설계하였다. 이는 전통적인 성형 방법에 있어서 일반적으로 코너 반경이 소재 두께(t)의 약 4배에서 12배 사이에서 결정되어지는 것과는 달리 미세 성형에서는 코너 반경이 소재 두께와 동일한 수준으로 설계되어져야 함을 나타낸다. Figure 9에서는 미세 성형 부품인 진동모터 케이스의 각 치수 및 최종 형상을 나타내었다.

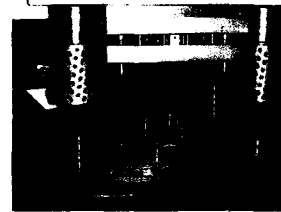


Fig. 8 The progressive dies for the manufacturing of the rectangular cup drawing

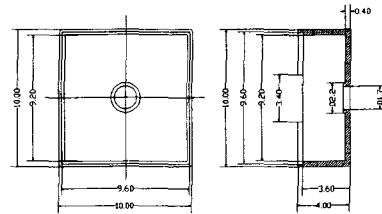


Fig. 9 The final product geometry(unit: mm)

#### 3.2 미세성형 실험 결과

Figure 10은 미세 성형 부품인 휴대폰용 진동모터 케이스의 최종 제품을 보여주고 있다. 실험으로부터 얻어진 최종 제품의 형상 및 치수는 설계 치수와 비교하였을 때 매우 양호한 결과를 도출할 수 있었다.

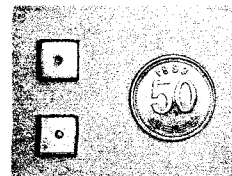


Fig. 10 The final product of rectangular vibrator case

그리고 미시적 관점에서 미세 성형 전·후의 미소 입자의 분포와 두께 분포를 알아보기 위해 시편의 사각코너부를 절단하여 이를 관찰하였다. Figure 11에는 시험 시편의 절단 부위를 나타내

었다. 측정 부위는 사각 모서리 부를 대각선으로 절단하여 두께 측정 실험을 수행하였다.



Fig. 11 The cutting line of experimental specimen



Fig. 12 The treated experimental specimen

사각 코너부의 두께 측정을 위한 시편의 제작 과정에서의 시험시편 처리과정은 Table 2에 나타내었다.

Cleaning Oil	제3종 유기용제
Equipment	SEM(JSM-6300F)
Mounting	25N(Load), Heating : 5 min, Cooling : 3 min
Cutting	Specimen : micro cutter Surface : diamond cutter
Grinding	No. 300, 500, 1000
Polishing	Diamond Cutter : 3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m
Etching	2% Nital, 50 sec.

Figure 13에서는 사각 코너부를 절단하여 그 형상을 측정 장비인 SEM을 이용하여 획득한 단면의 모습이다. 이 단면 자료를 토대로 사각 코너부의 두께 분포를 측정하였으며 이 측정 결과를 Fig. 14에 나타내었다. Figure 14에서 나타나는 바와 같이 사각 코너부에서의 두께 변화가 가장 많이 일어나 약 0.24mm 정도의 두께를 보여주고 있으며 이는 유한 요소 해석을 통한 해석 결과와 유사한 수치를 나타내고 있다. 그리고, Fig. 15에서와 같이 단면상에 나타나는 입자의 분포를 보면 사각 코너부에서 코너부 안쪽으로는 입자가 압축력을 받음으로 인한 입자의 원형화가 두드러

지게 나타나고 있으며, 중간부에서는 원래의 입자 형태와 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나, 코너부 바깥쪽에서는 입자가 높은 국소적 인장력에 따라 매우 큰 변형에 따른 입자의 장대화 현상을 보여주고 있다. 또한, Figure 16은 사각 코너부의 입자의 위치별 분포 특성을 나타낸 것이다.

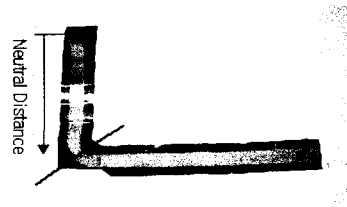


Fig. 13 The cross section configuration

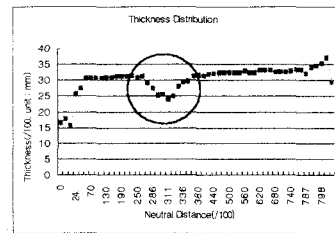


Fig. 14 The thickness distribution of the cross section

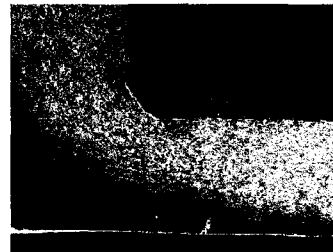


Fig. 15 The cross section configuration by SEM( $\times 100$ )

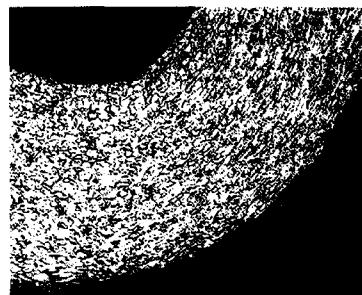


Fig. 16 The photograph of the grain distribution( $\times 200$ )

#### 4. 결론

#### 참고문헌

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. 또한, 유한요소 해석 결과로는 상부 코너부에서의 최대 유효 변형률은 4-절점 쉘 요소와 8-절점 육면체 요소가 블랭크 홀더력이 약 260N일 때 각각 1.31과 1.29로 나타났다. 그리고, 사각 코너부에서의 유효 변형률은 각각 0.84와 0.73으로 나타났고, 이때의 두께는 각각 0.19mm와 0.22mm로 조사되었으며, 미세 성형 실험 후의 두께는 0.24mm로 이는 약간의 벌크 성형 특성을 갖는 미세 판재 성형에서 육면체 요소를 적용할 수 있다는 것을 의미한다.

미세 성형품의 유한요소 해석의 결과와 미세 성형 실험의 결과를 본 논문에서 비교 검토하였다. 주된 비교의 대상은 사각 코너부에서의 두께 분포이었다. 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 유한요소 해석을 수행 할 것이다. 또한, 미세 성형품의 완성도를 나타내는 전체적인 코너부의 두께 분포 및 두께 방향의 평균 그래인 크기를 조사하여 미세 성형시의 재료 거동 특성 등의 연구를 수행 할 것이다.

#### 후기

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.

- (1) M. Geiger, F. Vollertsen and R. Kals, 1996, "Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Microparts", Annals of the CIRP, Vol. 45, pp. 272~282.
- (2) S. Miyazaki, H. Fujita and H. Hiraoka, 1979, "Effect of specimen size on the flow stress of polycrystalline Cu-Al alloy", Scripta Met., Vol. 6, pp 447~451.
- (3) T. Jimma and T. Adachi, 1993, "Recent trends in precise pressworking of electronic components", Proc. of the 4th Int. Conf. on Technology of Plasticity, pp. 43~51.
- (4) A. Messner, U. Engel, R. Kals and F. Vollertsen, 1994, "Size effect in the FE-simulation of micro-forming processes", J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 45, pp. 371~376.
- (5) E.T. Harpell, M.J. Worswick, M. Finn, M. Jain and P. Martin, 2000, "Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet", J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 100, pp. 131~141.
- (6) M.N. Yoshito, 1979, "Influence of micro-structural inhomogeneity on the formability and fracture of a Carbon Steel", Trans. of the ASME, Vol. 101, pp. 18~21.
- (7) LS-Dyna Keyword Users Manual, 1997, Livemore Software Technology Corporation, Livemore, CA, USA, June.
- (8) D.P. Flanagan and T. Belytschko, 1981, "A uniform strain hexahedron and quadri-lateral with orthogonal hourglass control", Int. J. of Numerical Method in Engineering, Vol. 17, pp. 679~706..
- (9) T.A. Kals and R. Eckstein, 2000, "Miniaturization in sheet metal working", J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 103, pp. 95~101.