

소형부품의 사각 컵 드로잉 성형 해석에 관한 실험적 연구

구태완* · 강범수**

(2001년 4월 22일 접수)

An Experimental Approach and Finite Element Analysis on Rectangular Cup Drawing Process of Milli-Component Forming

T. W. Ku and B. S. Kang

Abstract

Milli-structure components are classified as a component group whose size is between macro and micro scales, that is, about smaller 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 experiments. Special containers or cases of cellular phone vibrator to save installation space are produced by rectangular-shaped drawing. 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. 서 론

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 소형부품 생산에 동일한 공정으로 적용되어질 수 없음을 나타

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원
** 부산대학교 항공우주공학과, ERC/NSDM

내고 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. 그리고, 수치적 해석방법 또한 일반적인 금속성형방법과는 달리 재료 유동(metal flow) 해석이나 금형 설계 방법 측면에서 미세성형 공정에 직접적으로 적용되기가 매우 어렵다.⁽⁴⁾ 또한 크기효과(size effect)라고 하는, 크기에 의존하는 미세성형 문제의 해결을 위해 기존의 해석 방법으로는 원활한 해석 과정 및 결과를 도출할 수 없다. 이 크기효과는 미세성형을 위한 블랭크 형상, 표면 형태 그리고 유효 상태와의 상관성에 관계되는 것으로 알려져 있다. 부품성형 과정에서 부품의 크기가 축소되면, 축소되어지기 전의 블랭크 크기와 비교하였을 경우 다른 재료 유동 거동을 가진다고 할 지라도 앞서 언급한 블랭크 형상이나 표면 형태 등은 변하지 않은 채로 유지된다. 그러나 이러한 문제는 주어진 모델의 크기 효과를 조합하여 해석과정에 적용함으로써 해결할 수 있다.^(5,6)

본 연구에서는 기존의 소성가공(macro-forming)에서 나타나는 성형 특성과 미세성형 과정에서 나타나는 사각 컵 드로잉에 있어서의 사각 코너부의 재료 거동과 기본적인 미세성형 과정의 특성을 파악하고자 하였다.

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.⁽⁷⁾

또한, 유한요소 해석 기법을 이용한 체계적인 접근법으로 매우 작은 사각 케이스의 성형 공정 설계를 수행하였다. 그리고 아주 얇은 판재의 두께에 따른 벌크(bulk) 변형 거동 등의 미세 성형 효과를 고려하기 위해, 4-절점 쉘 요소와 8-절점 육면체 요소를 미세 성형에서의 해석과 설계에 이용하였으며, 또한 시제품 제작 등의 실험을 통해 유한요소 해석 결과의 유효성을 입증하고자 노력하였다.

2. 사각 컵 드로잉의 유한요소 해석

2.1 이론적 배경

본 연구에서의 유한요소 해석은 외연적 강·소성 유한

요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 해석과정에서는 요소의 심한 뒤틀림이 발생했을 경우 적절한 계산 시간을 유지하면서 굽힘(bending)이나 휨(twist)과 같은 복잡한 변형 조건하에서도 사각 컵 해석의 유효한 결과를 유도할 수 있는 벨리츠크-짜이(Belytschko-Tsay) 쉘/브릭(shell/brick) 요소를 해석에 적용하였다. 그리고 위의 적용되어진 요소들이 가지는 축소 적분의 형태는 Flanagan 등이 제안한 아워글래스(hourglass) 제어 기법을 포함하고 있다.⁽⁸⁾

본 해석에서의 지배방정식은 가상일의 원리로부터 범함수식을 채용하였으며 아래와 같다.

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

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 백터 t_i 에서 정의되는 경계이다.

2.2 소형화 효과

재료의 성형과정에서 크기가 축소되었을 때, 금형이나 블랭크의 크기는 소형으로 변경되지만 블랭크의 미세구조는 변하지 않고 이전과 같이 유지된다. 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.

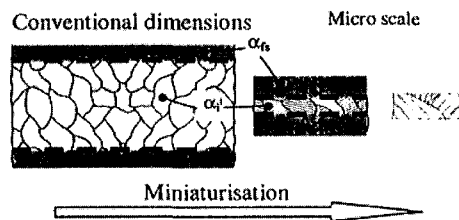


Fig. 1 Scale effect and the role of microstructure due to miniaturization

이 크기효과를 토대로 성형된 미세 혹은 소형 부품의 임의의 한 단면으로부터 두 종류의 입자(grain)를 구분할 수 있다. Fig. 1에서와 같이, 미세 부품이나 소형 부품의 자유표면(free surface)과 이 자유표면에 의해 밀폐된 외부 입자, 그리고 외부입자에 의해 둘러 쌓여 있는 내부 입자로 임의의 단면을 표현할 수 있다. 이때, 외부

입자는 내부입자에 비해 어느 정도의 자유표면을 포함하게 된다. 이러한 외부입자와 내부입자의 자유표면을 포함하는 정도를 α_B 와 α_i 로 각각 나타낼 수 있게된다.⁹⁾

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 메커니즘에 중요한 변수로 작용하게 된다. 그러므로 내부 입자의 소성 유동 메커니즘은 단일 결정(crystal) 소성 거동이 외부 입자에 적용되고 있음에도 복합 결정의 소성 유동과 비교되어질 수 있게 된다. 결국, 크기가 축소되어 소형화되었을 때 미세요소(microelement) 체적으로서의 한 입자를 하나의 요소로 다룰 수 있게 되는 것이다. 그리고 미세요소의 유동 응력인 σ_f 는 내부 입자와 외부 입자 유동 응력의 평균값으로써 계산하게 된다.

2.3 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 FEMB를 사용하였다.

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 : $\sigma = C \epsilon^n$

Fig. 2에서는 펀치 코너 반경은 0.4mm, 다이의 클리어런스(clearance)는 편축 5%, 소재 반경은 8.9mm로 설계되었다. 또한, 유한요소 모델링에서는 펀치와 다이, 그리고 블랭크 홀더를 4-절점 강체 쉘 요소로 나타내었다. 해석하고자 하는 부품은 정사각 대칭 형상이므로 1/4 모델을 묘사하였다. 또한, SPCE 재료의 블랭크는 판재 성형후

의 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.

강체로 정의된 펀치, 블랭크 홀더 및 다이의 요소수는 각각 904개, 27개, 그리고 1436개로 묘사하였으며, 펀치의 코너반경은 각각 0.4mm이고, 사각 컵 드로잉 해석에서의 마찰계수는 0.12의 쿨롱 마찰계수로 정의하였다. 또한, 유한요소 해석 과정에서는 드로잉 공정을 제외한 중앙부 홀 및 단차 가공 공정은 생략하였다.

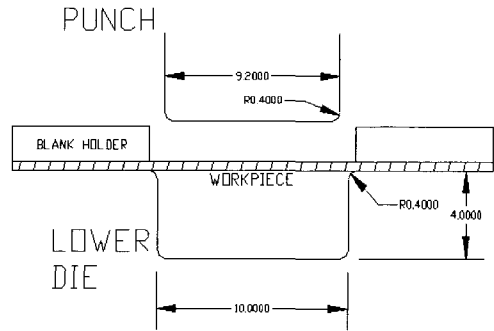


Fig. 2 A schematic diagram of the rectangular drawing (unit:mm)

2.4 4-절점 쉘요소 타입의 유한요소해석

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

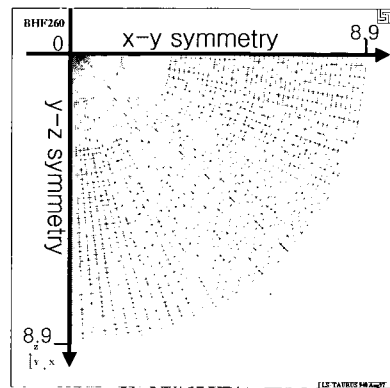


Fig. 3 The workpiece mesh system and boundary condition

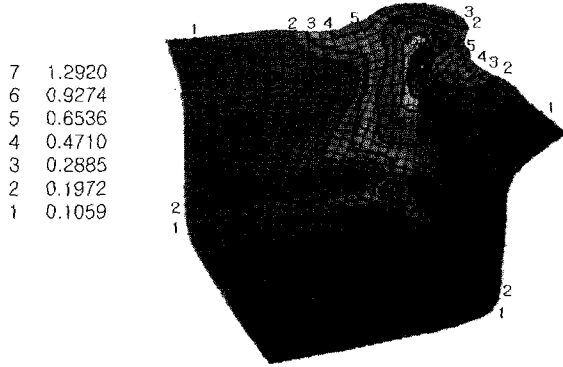


Fig. 4 The effective strain distribution at the BHF, 260N

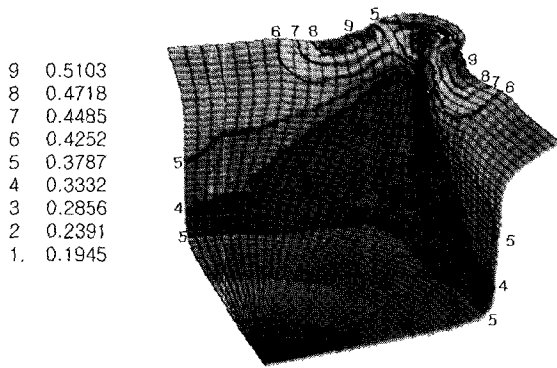


Fig. 5 The thickness strain distribution at the BHF, 260N

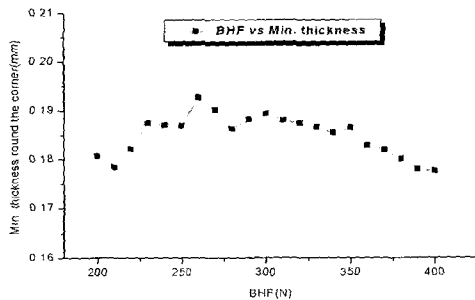


Fig. 6 The minimum thickness distribution at each BHF

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

각각 나타내고 있다. 유한요소해석에서 편치의 변위는 4 mm로 적용하였으며, 블랭크 홀더력은 200N에서 400N까지 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 해석 수행 결과로부터 블랭크 홀더력이 약 260N일 때 사각코너부의 최소두께가 0.194mm로 나타났다.

그리고 성형 해석과정에 있어서 굽힘(bending)에 의한 두께변형률은 5-절점 적분점(five through-thickness integration points)을 이용하여 변형된 요소로부터 측정하였다. 또한 LS-DYNA3D의 아위그래스 제어 기법은 zero-energy의 운동학적 변형 모드를 적용하였다.

Fig. 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 홀더력(BHF)에 따른 사각 코너부의 최소 두께 분포를 나타낸 것으로, 사각 코너부에서 약 260N의 BHF일 때 성형 후 소재의 두께가 가장 두껍게 나타남을 알 수 있다.

2.5 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 편치와 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.

Fig. 7은 육면체 요소에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 육면체 요소의 경우 실제 제작한 시제품과 유사한 형태의 변형 모습을 보이고 있다. 유한요소 해석은 편치

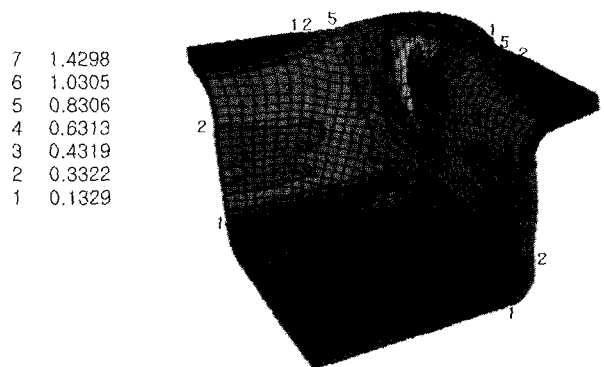


Fig. 7 The effective strain distribution of the brick element type at the BHF, 260N

변위 4mm이었으며, 블랭크 홀더력을 200N에서 400N까지 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 그 결과 블랭크 홀더력이 약 260N일 때 유효 변형률은 상부 코너에서 1.31로 나타났으며 사각 코너부의 유효 변형률은 0.73으로 이때의 두께는 0.22mm였다.

3. 미세 성형 실험

3.1 미세성형 실험

Fig. 8는 미세 성형 부품의 성형 실험을 위한 프로그레시브 금형(progressive die)의 다이 형상을 도식적으로 나타낸 것이고, Fig. 9는 실제 제작한 금형을 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 냉간 압연 강인 SPCE이었으며, 윤활제는 태핑유(tapping oil)를 사용하였다.

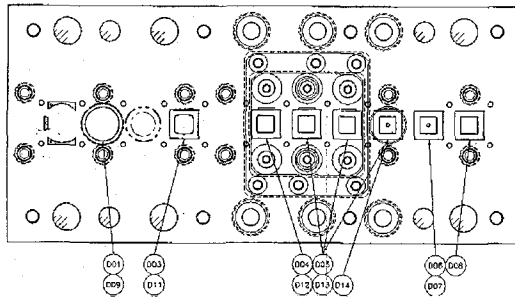


Fig. 8 The progressive die layout for the manufacturing of the rectangular vibrator case

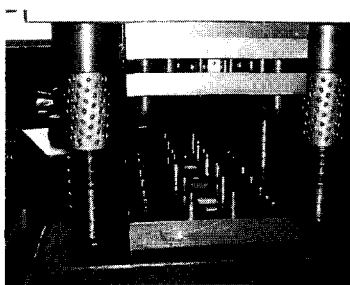


Fig. 9 The progressive dies for the manufacturing of the rectangular vibrator case

Fig. 8에서와 같은 금형에서의 성형 공정은 고속으로 이루어지고, 또한 블랭크 캐리어(blank carrier)의 브릿지(bridge) 폭이 작기 때문에 발생할 수 있는 문제를 해결

하기 위해 버튼 (button) 방식에 의한 pin-spring 쿠션을 이용하여 스트립이 원활히 이동되도록 하였고, 브릿지에 의한 영향을 최소화할 수 있도록 금형을 제작하였다.

미세 성형 공정에 사용된 소재는 폭 30mm, 블랭크의 크기는 반경 8.9mm, 판재 두께 0.4mm인 스트립(strip)을 사용하였다. 또한, Fig. 2에서 나타내어진 바와 같이 펀치는 9.2×9.2mm이며, 펀치의 코너반경은 앞서 언급된 바와 같이 0.4mm, 아래 다이는 10×10mm²의 정사각형 상이며, 다이의 클리어런스는 편축 5%로 설계하였다.

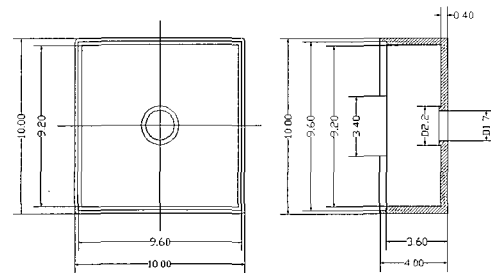


Fig. 10 The final product geometry(unit: mm)

이는 전통적인 성형 방법에 있어서 일반적으로 코너 반경이 소재 두께(t)의 약 4배에서 12배 사이에서 결정되어지는 것과는 달리 미세 성형에서는 기존의 방법으로 코너 반경을 설정할 경우 과도한 코너 반경으로 인해 성형하고자 하는 부품의 형상을 얻기가 매우 어렵기 때문에 앞으로 미세 성형에서의 코너 반경 설계를 위한 최적화 기법 등의 개발이 필요하다. Fig. 10에서는 미세 성형 부품인 진동모터 케이스의 각 치수 및 최종 형상을 나타내었다. 그리고 실험 시편의 두께 측정은 1/100mm 까지 측정 가능한 마이크로 미터(micro-meter)를 사용하였다.

3.2 미세성형 실험 결과

Fig. 11은 미세 성형 부품인 휴대폰용 사각 케이스의 성형 과정 및 최종 제품을 보여주고 있다. 실험으로부터 얻어진 최종 제품의 형상 및 치수는 설계 치수와 비교하였을 때 매우 양호한 결과를 도출 할 수 있었다. 또한 2.5절에서의 유한요소 해석 결과와 최종 제품의 실제 두께를 비교하였을 때 최종 부품의 사각 코너부의 최소 두께가 0.24mm 정도로 유한요소 해석의 결과인 0.22mm와 매우 유사한 값을 지니고 있었다.

그리고 미시적 관점에서 미세 성형 전·후의 미소 입자의 분포를 알아보기 위해 시편의 각 부분별로 단면 표면의 금속 결정을 관찰하였다. Figure 12에는 금속 결정 측정부위를 나타내었다. 측정 부위는 사각 코너부 상단 측면부 측정을 위해서는 section A-A', 바닥 코너부 측

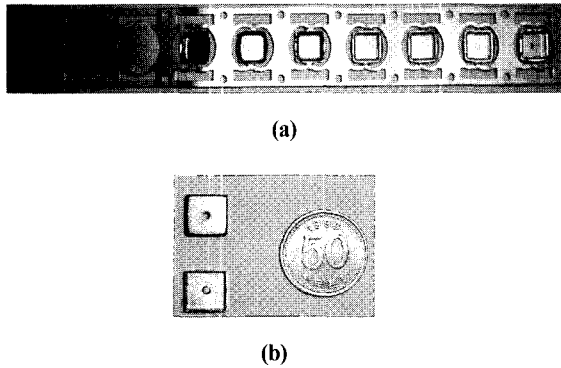


Fig. 11 The deformed shape of rectangular vibrator case
 (a) the deformed shape in the processes
 (b) the final product

정을 위해서는 section B-B', 그리고 사각 코너부의 두께 측정을 위해 C 점을 정하였다.

본 미세 성형 실험에서 원활한 내부 접촉면 사이의 마찰을 위해 사용한 윤활제는 태핑유이다. 프레스는 펀치가 변위 제어되는 동안 블랭크 홀더력 제어를 통해 실험을 수행하였다. 미세 성형 실험에서 블랭크 홀더력은 250N~350N 범위에서 수행하였으며 펀치의 변위는 4mm로 일정하게 적용시켰다.

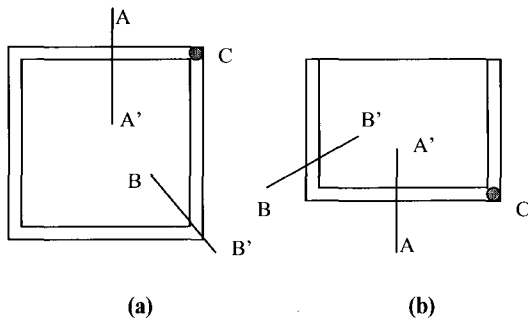


Fig. 12 The measurement positions of the grain size and thickness of the rectangular cup drawing process
 (a) top view (b) side view

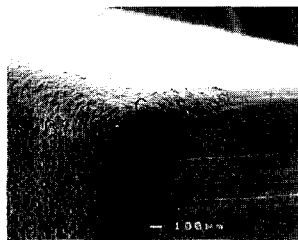


Fig. 13 The exterior surface microphotograph of the deformed part(× 100)

미세 성형 후의 변형 양상과 성형품의 미세구조(micro-structure)의 변화를 조사하기 위해 앞서 정의된 각 단면의 표면 입자 분포를 전자현미경을 통해 측정하였다. Fig. 13은 측정 단면을 구체적으로 나타낸 것이며, Fig. 14은 각 단면 부위에서의 성형 전·후 소재의 입자 분포를 보여주고 있다. Fig. 14(a)는 성형 전의 초기 블랭크의 입자 분포를 보여주고 있으며, Fig. 14(b), (c)는 각각 성형 후의 A-A' 단면과 B-B' 단면에서의 성형품의 입자 분포를 보여주고 있다. Fig. 14에서 보여지는 바와 같이 초기 블랭크와 비교하였을 때 B-B' 단면에서는 약간의 입자 변형이 발생하였으나, A-A' 단면에서는 초기 블랭크와 거의 유사한 입자 분포를 보여주고 있다. Fig. 14(a)에서와 같이 초기 블랭크의 평균 입자 크기는 약 13.20 μm 이었으며, 미세 성형 후 Fig. 14(b)에서는 약 14.65 μm 이었다. 그러나, Fig. 14(c)에서 나타나는 평균 입자의 크기는 약 29.87 μm 로 증가하였으며, 이는 초기 블랭크의 평균 입자 크기보다 약 2배정도 증가되어진 수치이다. 이러한 입자 크기 증가 현상의 원인으로서는 이 B-B' 단면 부근에서 큰 신장이 발생하면서, 동시에 표면 마찰에 의한 국부적인 소성변형에 의한 결과라 할 수 있다.

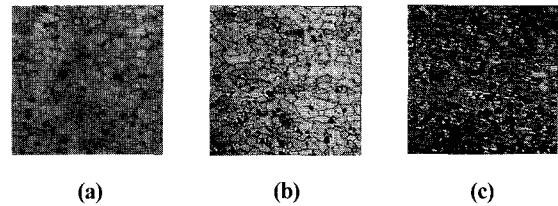


Fig. 14 Microphotograph of the deformed part(×400)
 (a) initial blank (b) section A-A' (c) section B-B'

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. 또한, 유한요소 해석 결과로는 상부 코너부에서의 최대 유효 변형률은 4-절점 쉘 요소와 8-절점 육면체 요소가 블랭크 홀더력이 약 260N 일 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 적

용할 수 있다는 것을 의미한다.

미시 구조에서의 평균 입자 크기 측정 실험의 결과로는 B-B' 단면이 A-A' 단면에서의 크기보다 약 2배정도 더 큰 것으로 조사되었다. 이는 A-A' 단면에서의 소재는 충분한 국소 소성 변형의 영향을 받지 않은 반면에, B-B' 단면에서의 소재는 펀치력과 아랫 다이의 마찰, 그리고 국소 소성 변형에 영향을 상대적으로 많이 받은 때문이다.

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 적용되어 질 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 입자 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, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA, June.
- (8) Flanagan, D.P., and Belytschko, T., 1981, "A uniform strain hexahedron and quadrilateral with orthogonal hourglass control", *Int. J. of Numerical Method in Engineering*, Vol. 17, pp. 679~706.
- (9) Kals, T.A., and Eckstein, R., 2000, "Miniaturization in sheet metal working", *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 103, pp. 95~101.