

## 밀리부품의 정밀도 향상을 위한 다단계 성형 및 금형 해석

윤종현\* · 허훈\* · 김승수\*\* · 나경환\*\* · 박훈재\*\* · 최태훈\*\*  
(2004년 2월 19일 접수)

### Multi-Stage Forming Analysis of a Milli-Component for Improvement of Forming Accuracy

J. H. Yoon, H. Huh, S. S. Kim, G. H. Na, H. J. Park and T. H. Choi

#### Abstract

Manufacturing process for milli components has recently gained researcher's focus with the increasing tendency toward highly integrated and micro-scaled parts for electronic devices. The milli-components need more precise manufacturing process than the conventional manufacturing process since the parts require higher dimensional accuracy than the conventional ones. In order to enhance the forming accuracy and productivity, various forming procedures proposed and studied by many researchers. In this paper, forming analysis of milli-components has been studied with a new micro-former. In modeling of progressive dies, multi-stage forming sequence has been analyzed with finite element analysis by LS-DYNA3D. The analysis proposes the sequential die and part shapes with the corresponding punch force and dimensional accuracy. The analysis also considers the effect of elastic dies on the dimensional accuracy of the formed parts. The analysis result demonstrates that the elastic analysis in the milli-forming process is indispensable for accurate forming analysis. The analysis procedure in the paper will provide good information in design of a new micro-former and milli-component

**Key Words** : Milli-Structure, Forming Analysis, Micro-Former, Backward Extrusion, Elastic Die

#### 1. 서 론

최근에는 컴퓨터 및 이동통신의 급속한 발전과 함께 전자, 통신부품을 비롯한 각종 부품들의 초소형화, 고기능화가 요구되고 있다. 이러한 추세에 따라 수  $\mu\text{m}$ 의 크기와 수  $\text{nm}$ 의 정밀도를 갖는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)기술과 NANO 기술에 대한 연구가 활발히 전개되고 있다. MEMS 기술의 경우 기존의 생산, 가공 공정과는 다른 전기도금(electroplating) 기술이나 리소그래피(lithography) 등의 기술을 사용하게 되며 NANO

기술 역시 분자, 원자 단위를 기초로 한 미세식각 공정(nanoimprinting) 기술 등의 새로운 기술을 접목시키고 있다. 그러나 MEMS나 NANO 기술의 경우 초미세 단위의 치수와 정밀도를 목표로 하므로 수  $\text{mm}$  크기와 수  $\mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는 부품을 대량 생산하기 위한 기술로는 적합하지 않다. 미세 성형가공 기술은 정보통신기기나 정밀기기, 미세수술 기구, 인공장기 같은 의료 시스템 등에 사용되는 부품 제작에 알맞은 기술로서 크게는 미세 박판 성형과 미세 체적 성형으로 구분할 수 있다.

\* 한국과학기술원

\*\* 한국생산기술연구원

그러나 대부분의 생산 공정 시 체적성형과 판 성형이 동시에 이루어지는 복합성형 양상을 띠게 되므로 공정이 복잡하고 정밀도 향상을 위한 후처리 공정 또한 매우 까다롭게 된다. 따라서 고가의 장비를 요구하게 되며 실제로 생산 공정 설계에 많은 비용이 들게 된다. 그러므로 미세성형 공정에서 유한요소 해석과 이를 기반으로 한 시뮬레이션 과정은 반드시 수반되어야 할 연구 방향이다. 본 논문에서는 이러한 수 mm의 직경을 갖는 원통형 소재를 다단계 성형하여 복잡한 형상을 만들어 내는 Micro-Former의 성형 부를 해석하며 이를 통하여 성형 정밀도 향상을 위한 방법과 금형의 탄성 해석의 필요성 등을 검토하였다. 또한 이러한 성형 해석 결과는 개발하려는 Micro-Former의 성형 용량을 결정하고 평가하는데 지표로 사용될 수 있다.

## 2. Micro-Former의 형상 및 구조

### 2.1 Micro-former

Fig. 1에서 보는 바와 같이 Micro-Former의 경우 mm 단위의 직경을 갖는 원통형 소재를 다단계 성형 단계를 거쳐 복잡한 형상의 미세 구조물을 만들어 내는 시험기로서 모터를 통하여 구동되는 구동부와 펀치와 다이로 구성되는 성형부로 크게 나눌 수 있다. 성형부의 경우 주 모터에 연결된 주 샤프트(shaft)가 회전하면서 편심 캠(cam)이 샤프트의 회전운동을 펀치의 상하 운동으로 전달하여 성형 공정을 수행하게 된다. 성형부의 각 단계는 7단계로 구성되며 한 단계의 성형 공정이 수행되면 다음단계의 성형공정을 위하여 이송기구를 통하여 다음단계의 금형 위치로 옮겨 지게 된다.

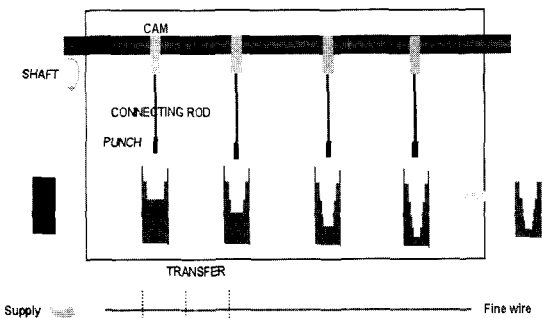


Fig. 1 Schema of a Micro-Former

다. 이와 같은 방식의 다단계 성형 공정을 통하여 최종적으로 복잡한 형상의 성형물을 만들게 된다. 구성된 단계별 성형 모델은 Fig. 2와 같으며 본 논문에서는 이 과정을 통하여 핀 모델 부품을 성형하게 된다.

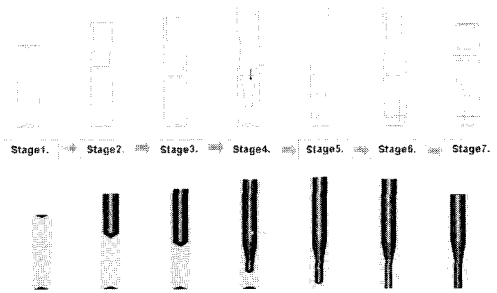


Fig. 2 Sequential formed shape of a forming model at each stage

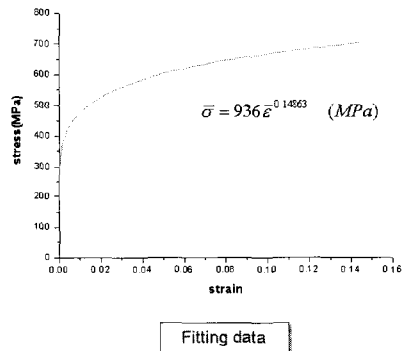


Fig. 3 Stress-strain curve for C2600W

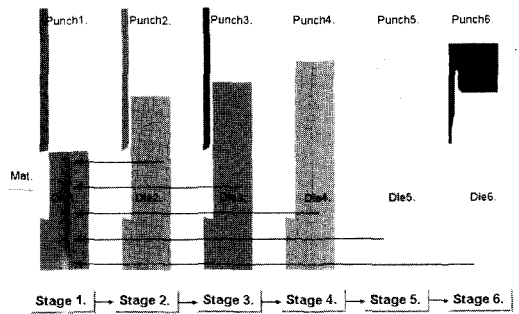


Fig. 4 Modeling of progressive die for sequential analysis

### 3. 성형 해석

#### 3.1 해석조건

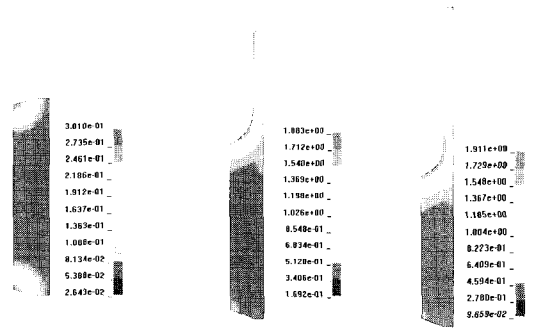
해석은 탄소성 해석 코드인 LS-DYNA3D를 사용하였으며 적용된 재료의 물성은 황동 계열(C2600W)이며 재료에 대하여 실험으로부터 얻은 Fig. 3의 물성치를 적용하였다. 총 7단계로 구성되는 본 예제는 전형적인 후방 압출의 예제가 되며 6단계 성형 공정의 경우 5단계까지의 순차적인 펀치의 진행으로 초기 소재의 안쪽에 흠을 내게 되고 다음 6단계 공정에서는 이 흠 끝 단의 살을 밀어내어 구멍을 뚫게 되는 펀칭 과정이 된다. 그러나 6단계의 펀칭 공정은 펀치에 걸리는 반력이 상대적으로 낮고 최종 형상의 결정에 지배적인 영향을 미치지 않으므로 이를 생략하고 전체를 6단계 공정으로 가정하여 해석하였다. 또한 사용된 요소로는 축대칭 요소를 사용하였으며 다단계 성형공정 시 소재가 이송되면서 각 단계의 성형과정을 거치므로 이러한 이송다이(progressive die)의 효과를 고려하기 위하여 Fig. 4와 같이 모델링하여 매 전단계의 유효소성 변형률 등의 상태 변수들을 다음 단계의 성형해석에 고려할 수 있도록 하였다. 즉, 기준점을 중심으로 각 단계의 펀치와 다이를 정렬한 뒤 금형간의 접촉 조건을 조절하여 단계별 다이와 펀치간의 침투와 간섭을 무시하도록 한 뒤, 각 단계의 성형 해석이 끝나는 시점에서 그 단계에 사용된 다이와 펀치를 제거해주는 방법으로 해석을 진행시키게 된다. 초기 소재의 반경이 대략 1.1mm의 작은 치수를 이루므로 초기격자 수는 격자크기 0.1mm 정도의 947개 요소를 사용하였으며 해석 도중에 소재의 왜곡과 변형이 극심해 지므로 적응적 격자분할 방법(adaptive remeshing)을 추가하여 해석의 효율을 높였다. 또한 해석 방법에 따른 부품의 치수 정밀도를 검증하기 위하여 다이를 탄성체로 가정하여 추가로 해석하였다.

#### 3.2 단계별 성형해석

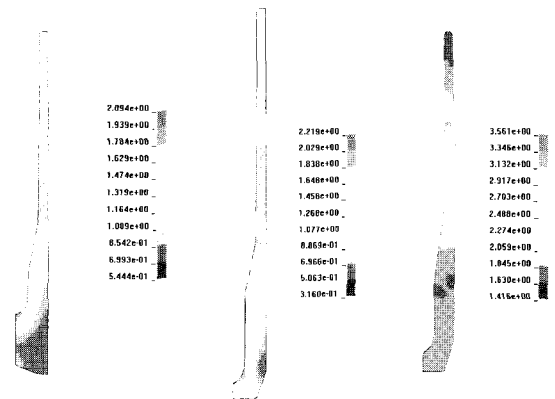
성형 해석 시 다이와 펀치는 강체로 가정하였으며 각 단계의 성형 해석을 통하여 펀치에 걸리는 하중과 성형 후 최종형상을 계산하였다. 또한 펀치를 제거한 뒤에 소재의 탄성 복원에 따라 치수가 어떻게 달라지는지를 평가해 보았다.

##### 3.2.1 성형해석 결과(shape)

해석 초기에 사용된 격자는 947개 이며 해석 도중에 remeshing 조건에 따라 6900개 까지 증가되어 변형이 집중되는 부분의 형상을 정확히 묘사하였다. 각 단계별로 성형 해석을 통하여 얻은 최종 형상은 Fig. 5와 같다. 펀치가 진행함에 따라 소재 안쪽 부분이 깊게 눌러지게 되어 변형의 대부분이 이 곳에서 일어남을 알 수 있다. 또한 후방으로 밀려나오는 살이 펀치의 진행에 따라 길어지고 있는 것이 관찰되었으며 실제로 이 부분의 반경 방향 요소 수는 최소한 4개가 되도록 해석하여 해석의 정확도를 높였다. 6단계 성형 해석을 거친 후 얻어진 최종형상은 Fig. 5의 그림과 같으며 이는 5단계까지 해석을 통해 얻어진 소재의 형상을 반경방향으로 유동하도록 하여 불룩한 형상의 벽면을 갖도록 하는 레디얼 압출과 크러싱(crushing)이 복합된 예제이다.



(a) stage1~stage3



(b) stage4~stage6

Fig. 5 Distribution of the effective plastic strain

### 3.2.2 성형해석 결과(punch force)

성형해석을 통하여 펀치와 소재 사이에 발생하는 반력을 계산한다. 이렇게 계산된 펀치 반력은 개발 중인 Micro-Former의 성형용량을 결정하는 지표가 되며 성형물의 변화에 따라 적응적으로 공정변수를 설계하고 평가하는 가이드라인을 제공하게 된다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 1단계 성형공정은 성형 전에 예비성형체를 만드는 단계로서 드로잉 양이 상대적으로 작기 때문에 펀치반력 또한 작게 평가되고 있다. 전반적으로 비슷한 펀치반력을 나타내고 있으며 6 단계 공정에서는 펀치와 다이가 닫히는 과정에서 반력이 증가하지만 다소 작은 펀치반력을 보이게 된다. 또한, 드로잉 후 펀치가 빠지면서 소재에 걸리는 높은 압력과 응력으로 인하여 소재의 치수가 달라지는 결과를 볼 수 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 변형이 집중되는 펀치 끝단과 소재가 접촉하는 영역에서의 소재 복원량이 가장 크게 되며 크기는 대략 6% 정도까지 최종 치수와의 차이를 보이게 된다. 그러므로 정확한 성형정밀도를 요구하는 해석의 경우 탄소성해석을 통한 탄성 복원량에 대한 효과를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

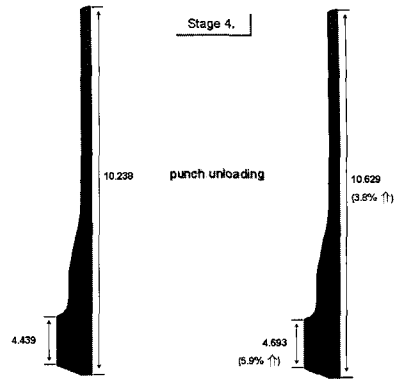


Fig. 7 Difference in dimensions between the loading and unloading states

### 3.3 다이(Die)의 탄성해석

금형의 탄성 효과에 따른 영향을 살펴보기 위하여 다이 금형을 탄성체로 가정하여 해석을 수행하였다. 즉, 이전의 해석과 동일한 조건과 형상을 갖는 금형을 두고 다이를 강체가 아닌 탄성체로 가정하여 해석을 수행하였으며 해석도중에 펀치의 진행으로 인하여 소재에 걸리는 압력이 상승

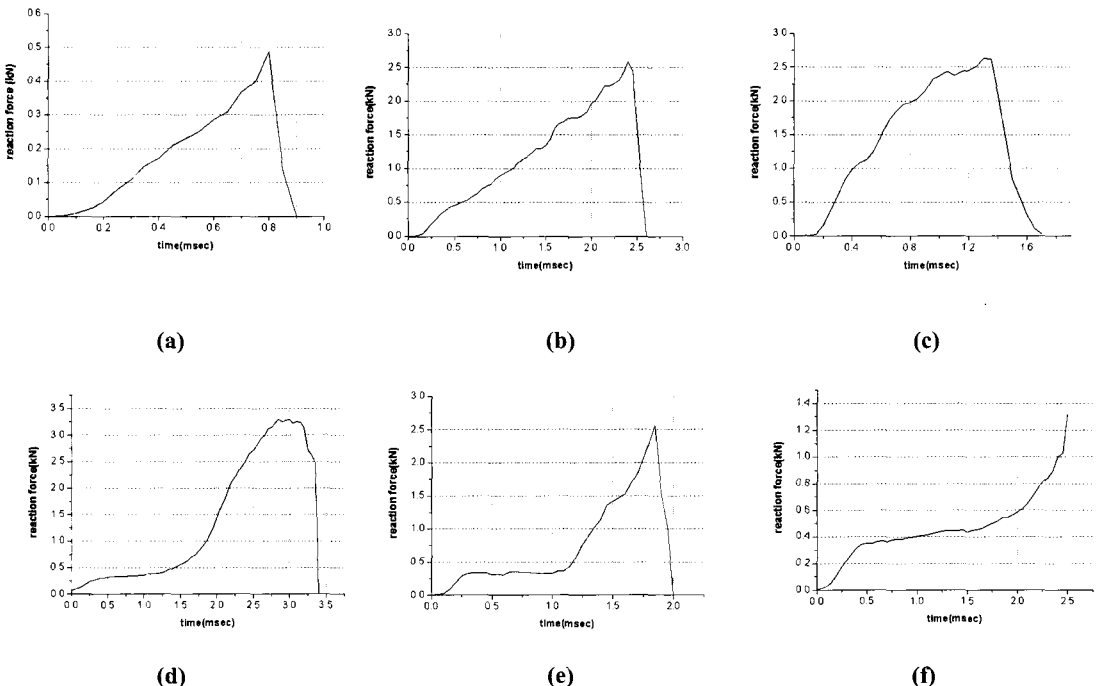


Fig. 6 Punch force vs.time for each process(stage 1~6)

함에 따른 다이의 변형을 도시하였다.

이러한 다이의 변형 양을 정량적으로 표현하기 위하여 Fig. 8과 같이 펀치의 진행에 따라 해석 단계를 나누는 뒤, 정해진 시점에서 다이 벽면과 소재의 바깥쪽 벽면의 위치를 그려보았다. 앞의 3단계는 펀치가 전진함에 따른 상태를 선정하였으며 뒤의 3단계는 펀치가 빠지는 단계를 선정하여 다이 벽면의 변형 양상을 살펴보았다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 펀치가 진행되는 동안 소재는 초기 다이의 위치보다 원주 방향으로 더 많은 양 변화하는 것을 볼 수 있다. 즉, 펀치가 진행되는 동안 다이의 탄성 변형으로 인해 소재와 다이가 다소 벌짐(bulging)과 같은 변형을 하고 있는 것으로 판단된다. 이를 자세히 살펴보면 Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 1단계 성형 과정에서는 다이의 변형이 일어난 뒤, 펀치가 빠지는 과정에서 다이가 다시 복원되는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 9(b), (c)에서는 펀치가 빠지고 난 뒤에도 소재가 초기 다이 위치보다 원주방향으로 불룩해져 있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 이유는 해석 도중에 발생하는 다이에서의 응력 집중이 2, 3단계에서 가장 크게 나타나기 때문에 펀치가 언로딩(unloading) 된 후에도 소재의 가운데 부분이 원주방향으로 불룩해진 형상을 유지하게 되는 것으로 판단된다. 그렇지만 이러한 2, 3단계를 제외한 다른 단계의 해석 과정에서는 펀치의 언로딩 후에 다이의 벽면은 초기상태로 복원되는 것을 볼 수 있다.

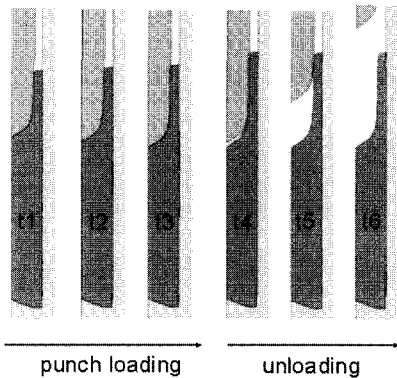
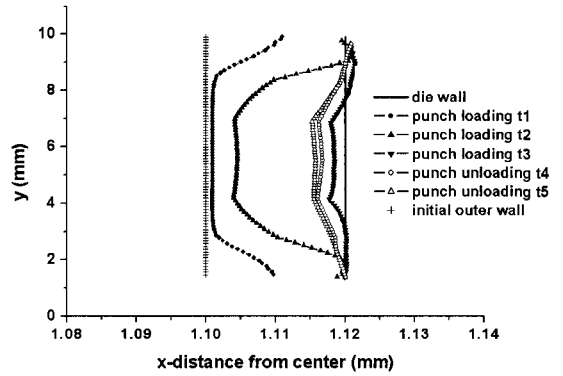
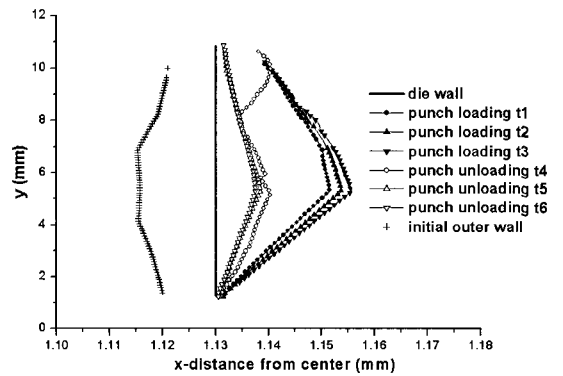


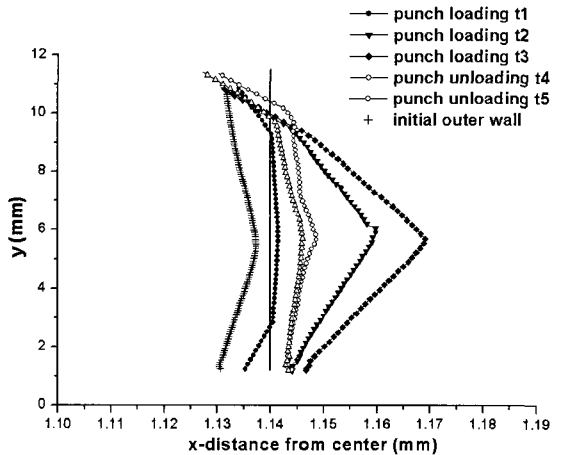
Fig. 8 Progressive time steps during the analysis for loading and unloading



(a) stage 1



(b) stage 2



(c) stage 2

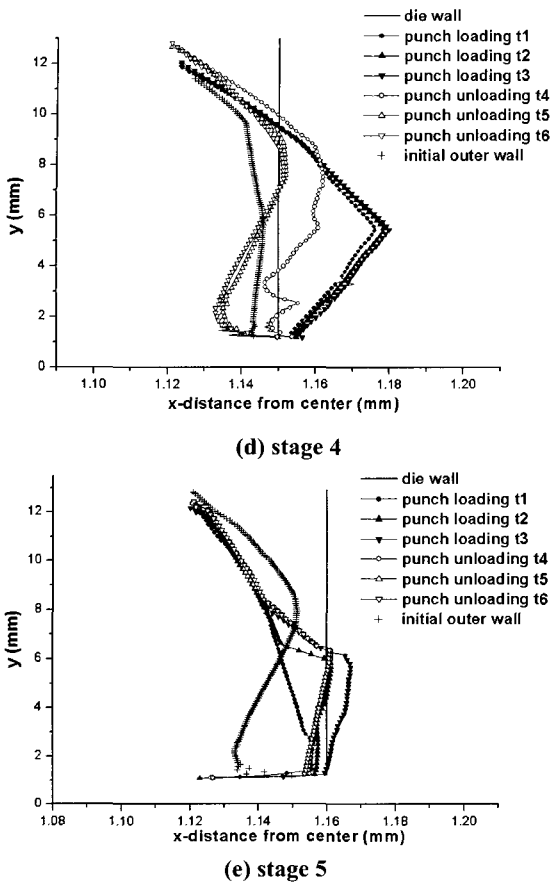


Fig. 9 Dimension change of die and material outer wall during each stage

#### 4. 결론

본 논문의 결과에 의하면 수  $\mu\text{m}$ 의 정밀도를 요구하는 미세 밀리 구조(milli-structure)에 대하여는 성형 정밀도 향상을 위하여 탄소성 해석이 필요하며 펀치와 다이의 연로딩 후에 발생하는 탄성 복원량에 대한 고찰도 필요할 것으로 판단된다. 또한 금형의 탄성 효과에 따른 소재의 치수 변화에 대한 고찰이 필요함을 확인하였다. 정량적인 비교를 해보면 3.3절에서 제시한 그래프와 같이 이 경우 원주 방향으로 최대 0.04mm 정도의 탄성 복원이 일어나고 있음을 알 수 있다. 그러므로 보다 정확한 밀리 구조물의 성형 해석을 수행하기

위하여 반드시 금형의 탄성 해석을 수반해야 할 것이다. 또한 소재의 크기 효과(size effect)를 고려한 물성 실험과 보다 정밀한 금형의 모델링 기법이 확립되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

- (1) H. Long and R. Balendra., 1998, "Evaluation of elasticity and temperature effects on the dimensional accuracy of back-extruded components using finite element simulation." J. Materials Processing Technology, Vol. 80, pp. 665~670.
- (2) 장동환, 최호준, 최진화, 2000, "후방압축과 연계한 레이디얼 압출의 성형특성에 관한연구" 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 7 호, pp. 754~760.
- (3) Y. S. Lee, J. H. Lee and T. Ishikawa, 2002, "Analysis of the elastic characteristics at forging die for the cold forged dimensional accuracy", J. Materials Processing Technology, Vol. 130, pp. 532~539.
- (4) 나경환, 2002, "미세 성형 개발 기술 현황", 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 3 호, pp. 217~222.
- (5) 이진희, 강범수, 김병민, 이정환, 1994, "등속조인트 하우징의 냉간단조 공정설계", 대한기계학회지, 제 18 권, 제 9 권, pp. 2234~2244.
- (6) H. J. Choi, J. H. Choi and B. B. Hwang., 2001, "The forming characteristics of radial-backward extrusion" J. Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 141~147.
- (7) Y. Qin and R. Balendra., 1997, "FE simulation of the influence of die-elasticity on component dimensions in forward extrusion", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 37, No. 2, pp. 183~192.
- (8) B. Bennani and J. Oudin., 1995, "Backward can extrusion of steel: Effects of punch design on flow mode and void volume fraction" Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35, No. 6, pp. 903~911.
- (9) H. Y. Cho, G. S. Min, C. Y. Jo and M. H. Kim, 2003, "Process design of the forging of a billet by forward and backward extrusion", J. Materials Processing Technology, Vol. 135, pp. 375~381.
- (10) LS-DYNA 970 Keyword User's Manual.