

FEM 을 이용한 RECTANGULAR CAN 후방압출 해석

이상승*(전남대 대학원 기계공학과), 조규종**(전남대 기계공학과 교수)

Rectangular can backward extrusion analysis using FEM

S. S. Lee(Mecha. Eng. Dept. CNU), K. Z. Cho(Professor of Mechanical Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

The increasing demand in industry to produce rectangular cans at the reduction by the rectangular backward extrusion process involves better understanding of this process.

In 2-D die deflection and dimensional variation of the component during extrusion, punch retraction, component injection and cooling was conducted using a coupled thermal-mechanical approach for the forward extrusion of aluminum alloy and low-carbon steel in tools of steel.

Backward extrusion FE simulation and experimental simulation by physical modeling using wax as a model material have been performed. These simulations gave good results concerning the prediction of the flow modes and the corresponding surface expansions of the material occurring at the contact surface between the can and the punch.

There prediction are the limits of the can height, depending on the reduction, the punch geometry, the workpiece material and the friction factor, in order to avoid the risk of damage caused by sticking of the workpiece material to the punch face. The influence of these different parameter on the distribution of the surface expansion along the inner can wall and bottom is already determined.

This paper deals with the influence of the geometry changes of the forming tool and the work material in the rectangular backward using the 3-D finite element method .

Key Words : Backword Extrusion(후방 압출), Rectangular Can, FEM

1. 서론

후방압출은 일반적으로 Tube, 케이스로 쓰이는 Can, 자동차의 용품을 생산하는데 열간 성형과 냉간 성형을 적용하여 만들고 있으며 냉간 성형을 하면 강도를 증가시킬 수 있는 장점이 있어 핸드폰 배터리 케이스 같은 캔 제작에 적합하다.

FEM 해석은 압출에서 다이와 펀치의 제작, 설계 비용을 줄이고 생산성을 향상시켜왔다. 많은 금속성형은 대변형과 소성변형이 포함되어 있어 냉간 성형을 해석 하기 위해서는 기하학적 변화와 금속의 비선형성이 고려된 함수를 사용하여야 한다.

후방 압출 성형의 해석에서 가장 중요한 면은 모델의 Contact 과 금속과 도구의 접촉면 사이의 마찰이다. 최근 후방 압출에 대한 실험적 해석은 Bay 와 Lassen⁽¹⁾에 의해 steel 을 이용한 후방 캔 압출의 punch 의 기하학적 형상, strain-hardening 과 friction factor, 압출비가 같은 재료의 punching 시 재료의 표면의 확장등에 관한 연구가 이루어졌고, 후방 캔 압출의 tool 강도와 압출 압력에 의한 다이 변형의 연구가 Murata 와 Yabiki⁽²⁾등에 의하여 연구되었다. FEM 을 이용한 원형 캔 후방 압출의 금속 성형중의 tool 의 온도에 따른 변형을 해석은 Miles 와 Fournent⁽³⁾에 의하여 이루어 졌고, Kim 과 Yagi⁽⁴⁾는 steel 캔 후방 압출의 냉각시 재료와 도구 사이의 치수적 변화를 고려한 FEM 해석을 하였다.

Bennami 와 Bay⁽⁵⁾는 캔의 후방 압출시 윤활한계에 따른 가공재료와 punch 의 고착에 관한 연구를 실험과 FEM 을 비교 분석하였고 Long 과 Bakebdra⁽⁶⁾는 후방 압출 시 die 나 punch 의 탄성과 온도 효과에 따른 변화를 FEM 을 이용하여 해석하였다.

기존의 캔에 관한 FEM 해석은 원형 캔의 축 대칭 해석이 주를 이루고 있고 근래에 3 차원 원형 캔에 관한 해석이 이루어지고 있다.

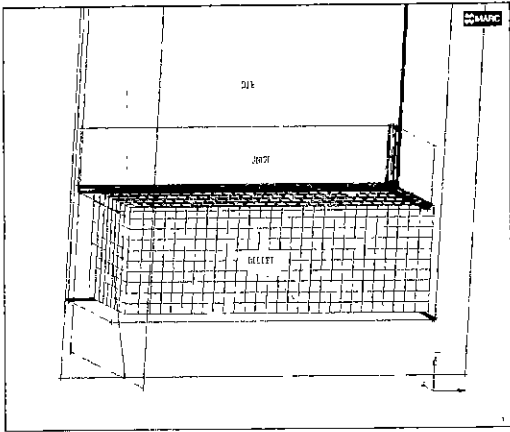
본 논문은 3 차원 Rectangular Can 해석을 하여 펀치 속도에 따른 응력 분포와 변형량을 알아보고 펀치의 형상, 즉 펀치의 벽면의 길이, 펀치의 rounding 부분의 크기에 따른 압출 유동을 여러 가지 모델을 만들어서 어떠한 차이가 나는지를 비교, 분석하고자 한다.

2. FEM 해석의 모델링

2.1 Tools geometry

펀치와 다이, Billet 의 형상은 symmetric 조건을 사용하여 4 분의 1 모델을 사용하여 해석하였다. punch 와 die 그리고 Billet 의 기하학적 형상은 아래 그림과 같다.

Rectangular 펀치의 형상은 Billet 과 접촉하는 펀치 밑 부분, 펀치 edge rounding, 펀치의 높이만을 고려하여 모델링하였다.



편치의 형상은 14.5×4.5×3mm 이고 편치의 옆면의 높이를 3-5mm 로 변화를 주었고 edge fillet rounding 도 0.3-0.5mm 로 하여 모델링하였다.

다이 의 형상은 15×5×50 이고 edge fillet rounding 는 0.1mm 로 설정하였다.

2.2 workpiece geometry

workpiece 는 AL1101 을 사용하였다.

Young's modulus : 69000 N/mm² ,

Poisson's ratio : 0.3

Mass density : 2.7 kg/mm³

Initial yield stress : 140 N/mm²

형상은 15×5×5mm 이고 edge fillet rounding 은 0.5mm 로 하였다.

재료의 workharding 은 아래표와 같다.

	log strain	Flow Stress
1	0	140
2	0.011	163.94
3	0.0231	184.84
4	0.03641	204.42
5	0.051051	222.89
6	0.067156	240.28
7	0.084872	256.57
8	0.10436	271.69
9	0.12579	285.58
10	0.14937	298.19
11	0.17531	309.47
12	0.20384	319.40
13	0.23523	328.00
14	0.26975	335.30
15	0.30772	341.36
16	0.3495	346.29
17	0.39545	350.18
18	0.44599	353.17

3 FEM 해석을 위한 기본 이론

소성가공은 금형(die)을 이용하여 재료(material)

을 성형하는 생산 기술이며, 공정의 역학해석이 긴요하게 적용되는 분야이다.

소재는 강소성 성질을 지니고 있으며 von Mises 항복이론과 관련 유동 법칙을 따르고 가속도 영향은 무시 가능하다고 가정한다.

소성가공 공정 해석 문제는 속도장 v_i (경우에 따라서 경수압 분포 p 도 미지함수임)를 구하는 문제로 수식화되며, 다음과 같다.

기본 이론은 아래와 같다.

Equilibrium condition : $\frac{\partial \sigma_y}{\partial x_j} + b_j = 0$

Compatibility condition : $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

Constitutive relation : $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \sigma'_{ij}$
 $\sigma'_{ij} = \left(\frac{2\tau}{3\epsilon} \right) \delta_{ij}$
 $= \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{\frac{2}{3} \delta'_{ij} \delta'_{ij}}}$

Incompressibility conditions : $\dot{\epsilon}_{kk} = 0$

Boundary condition :

$\sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i$ on s_{t1}

$v_i = \bar{v}_i$ on s_{v1}

$v_n = \bar{v}_n$ on s_c

$\sigma_i = -\mu \sigma_n g(v_i)$ on s_{c1} (Coulomb friction)

$\sigma_i = mkg(v_i)$ on s_{c1} (Constant shear friction)

$v_i = \bar{v}_i$ on s_{c2} (sticking)

위 식들은 변분 이론을 사용하여 풀면

$$\delta \phi = \int_V \bar{\sigma} \delta \epsilon dV + \int_V k \dot{\epsilon}_{kk} \delta \epsilon_{kk} dV + \int_{s_1} \bar{F}_i \delta v_i dS = 0$$

얻을 수 있고 비선형 해석식은 Newton-Raphson method로 해에 접근 할 수 있다.

경계치 문제에서 비압축조건을 처리하기 위하여 벌칙기법을 사용할 경우

$$\int_V \sigma'_{ij} w_{ij} dV + \int_V k c_{ij} w_{ij} dV - \int_V k f_i w_i dV - \int_{s_1} k f_i w_i dV - \int_{s_1} \sigma_i w_i dS = 0$$

Lagrange 변수법을 사용하는 경우

$$\int_V \sigma'_{ij} w_{ij} dV - \int_V p w_i dV - \int_V f_i w_i dV - \int_V v_i q dV - \int_{s_1} \bar{t}_i w_i dV - \int_{s_1} \sigma_i w_i dS = 0$$

여기서 가중함수 w_i 는 경계 S_{v1} 에서 영의 값을 갖고, S_c, S_{c1}, S_{c2} 상에서 $w_n = w_{,n} = 0$ 의 조건을 만족하는 임의의 함수이다

따라서 경계치 문제를 푸는 것은 Lagrange 변수법을 사용할 경우에는 임의의 가중함수 w_i 와 q 에 대하여 약형을 항상 만족시키는 속도장 v_i 와 압력장 p 를 구하는 문제이며, penalty method 을 사용할 경우에는 임의의 가중함수 w_i 에 대하여 weak form 을 만족시키는 속도장 v_i 를 구하는 문제로 수식화 된다.

3.1 Friction and Contact

소성 역학에서는 마찰력을 전통적으로 Coulomb 마찰법칙과 일정 전단 마찰법칙으로 수식화하고 있다. Coulomb 마찰 모델에서는 접촉면에서 상대적인 운동이 발생할 경우 마찰력이 법선력에 비례한다고 간주하는 반면, 일정 전단 마찰법칙에서는 전단항복응력의 일정비율의 전단응력이 작용한다고 간주하고 있다. 즉, 미끄러움이 발생할 때, 마찰 응력(접선 응력)은 각각 마찰 상수(friction factor)와 전단 항복 응력이다. 일정전단마찰법칙은 계산시간, 수식화의 단순함 등의 장점 때문에 단조, 압연, 압출, 인발 등의 체적 소성가공 공정의 해석을 위하여 광범위하게 사용된다.

마찰 전단 응력은 τ_f 은 일반적으로 아래와 같이 표현된다.

$$\tau_f = m \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 은 변형 급형의 상당 유동 응력을 나타낸다. FE 모델에서는 billet 과 도구사이의 contact 조건으로 penalizing form 을 이용한 node penetration 과 상호 면의 관계 sliding 속도와 윗 식에 의한 마찰 효과를 고려하여 계산한다.

3.2 Nonlinear analysis in MARC

요즘 비선형 해석은 the metal forming industry 와 manufacturing processes 에서 주로 사용되고 있다. 비선형형에는 material, geometric, nonlinear boundary conditions 3 가지의 비선형이 있다. Material 비선형성은 stresses 와 strains 사이의 비선형 관계식으로 실험적 data 로 유도되는 관계식이다. 실제로 중요한 부분은 plasticity 에 의한 비선형성이 중요하다.

geometric nonlinearity 은 한쪽 부분에서의 strains 와 변위의 관계와 다른 부분에서의 stresses 와 forces 의 관계의 비선형성에서 유도되는 결과이다. contact 과 friction 문제들은 비선형성 경계조건을 유도한다. 이러한 타입의 비선형성은 metal forming 문제에 중요한 역할을 한다. 비선형 문제의 해는 언제나 incremental solution schemes 을 요구하고 MARC 에는 4 가지의 iterative procedures 가 있다. Newton-Raphson, Modified Newton-Raphson, Newton-Raphson with strain correction modification, and a secant procedure 가 있다.

이번 해석에서는 contact 문제는 automated contact 을 사용하여 node 대 3 차원 patch 의 접촉을 통한 contact 과 friction 은 일정 전단응력을 사용하여 해석하고 이때 m 값은 임의로 정한 값 0.16 을 주었고 경계조건은 펀치를 일정 속도로 하강시키고 이때의 billet 의 응력과 plastic strain 을 보았고 해석은 Newton-Raphson 의 iterative procedures 를 사용하여 해석하였다.

billet 의 변화는 step 을 100 개로 나누어서 일정 속도로 변형이 일어난다는 가정 하에 한 step 당 0.045mm 가 내려오고 최종적인 punch 의 위치는 4.5mm 내려온 위치로 billet 의 두께가 0.5 mm 가 되도록 하였다. 실제로 모든 과정을 해석해야 하는데

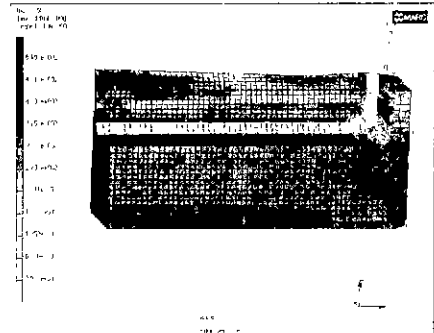
시간과 비용의 문제로 먼저 increment 가 30 까지만 해석과정을 분석하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

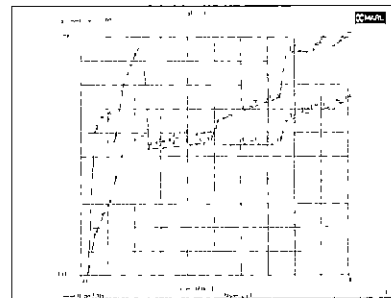
실제로 해석하는데 고려해야 할 사항은 많지만 먼저 billet 와 펀치에 관해서만 고려하였다.

펀치의 형상을 billet 과 실제로 접촉하는 부분인 펀치의 끝부분만을 고려하여 펀치의 형상 중 roundness, billet 과 펀치 가 접촉하는 헤드의 높이 그리고 펀치의 속도에 관하여 여러 가지로 해석하였다. 먼저 펀치의 속도를 10, 50, 100mm/s 하여 비교하였을 때 펀치의 속도에 따른 응력의 증가량과 equivalent plastic strain 의 영향을 고려하였고 다음으로 billet 의 ironing 에 영향을 끼치는 펀치 헤드부 높이의 차이에 따른 응력 분포를 비교하였다.

4.1 펀치 속도에 따른 변화



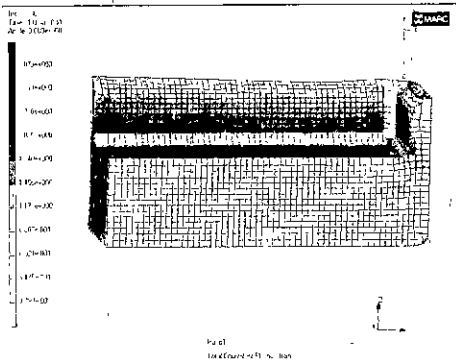
위 그림은 펀치의 속도가 100mm/s 일 때의 해석한 그림이다. 펀치의 속도가 증가함에 따라 상당 응력이 증가함을 알 수 있다. 펀치 헤드부 edge 가 만나는 모서리 부분에서 응력 집중이 일어나는데 이 부분에서 파열이 일어나지 않으면 소성가공이 가능하다. 이 점에 위치한 node 와 옆 node 의 상당 응력을 보면 아래 그림과 같다.



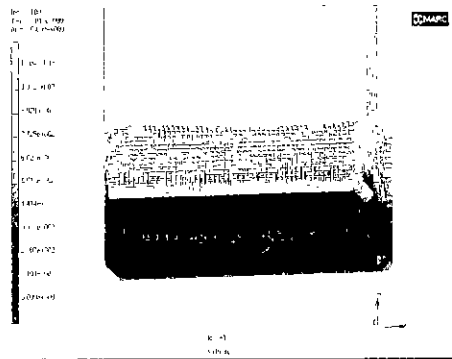
펀치 헤드 edge roundness 가 .3mm 일 때 펀치 헤드 edge 에서는 increment 증가에 따른 billet 의 상당 응력을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 보는 것과 같이 billet 은 파괴가 일어나지 않고 소

성변형이 일어남을 볼 수 있다.

4.2 펀치 헤드 높이



위 그림은 펀치 헤드 높이가 4mm 일 때 total plastic strain 을 해석한 그림이다. 펀치 헤드 높이가 증가함에 따라 마찰력이 증가로 flow stress 가 변하게 된다. 최적의 높이는 펀치 헤드부의 flow stress 와 다이 벽면의 flow stress 가 같을 때 최적의 높이로 정하게 된다.



위 그림은 펀치 속도가 100mm/s 일때 billet 의 유동 속도를 나타낸 것이다.

5. 결론

펀치의 속도, 헤드부의 높이, 헤드부 모서리 edge roundness 등에 따라 변하게 된다.

- 1) 펀치의 속도에 따라 상당 응력이 증가하고 flow stress 의 속도도 증가함을 알 수 있다.
- 2) 펀치 헤드부 높이에 따라 마찰력에 의해 ironing 이 일어나고 flow stress 가 일정하게 되는 높이를 구하는 것, 즉 최적의 길이는 펀치 헤드부의 flow stress 와 다이 quraus 의 flow stress 가 같을 때 최적의 형상이 나온다.
- 3) 펀치 헤드 edge roundness 는 펀치 헤드 높

이와 같이 펀치의 형상 설계에서 고려해야 할 중요한 요소로서 roundness 가 증가하면 전단 응력이 감소로 flow stress 가 감소함을 알 수 있다.

후 기

이번 해석은 해석의 일부분에 관한 것이고 최종 발표 때는 전체적으로 해석한 부분을 발표할 것입니다. 보다 시간적 여유가 있다면 펀치와 다이에 관하여 보다 심도 있게 해석해 보고자 합니다.

이번 논문을 통하여 많은 공부할 하게 되어서 기쁘고 부족한 면이 많지만 계속 공부하여 다음 논문 게재 때는 보다 나은 논문이 되도록 노력하겠습니다.

참고문헌

1. N. Bay, S. Lassen and K. B. Pedersen, "Lubrication limits in backward can extrusion at low reduction.", Ann CIRP 40(1), 239(1991)
2. Y. Murate, Y. Yabuki, "Measurement of die deformation in forging by capacitive displacement transducer." Proceedings of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity, 1993, pp.1216 ~ 1221.
3. M. P. Miles, L. Fourment, J. L. Chenot, "calculation of tool temperature during periodic non steady-state metal forging, J. Mater. Process. Technol.45, 1994, pp.643 ~ 648.
4. H. Kim, T. Yagi, "Estimation of dimensional differences between cold forging and tools in backward cup extrusion of steels.", Proceedings of the Fifth International Conference on Technology of Plasticity, 1996, pp.433 ~ 436.
5. B. Bennani, N. Bay, "Limits of lubrication in backward can extrusion: analysis by the finite-element method and physical modelling experiments.", Journal of Materials Processing Technology 61, 1996, pp.275 ~ 286.
6. H. Long, R. Balendra, "Evaluation of elasticity and temperature effects on the dimensional accuracy of back-extruded components using finite element simulation.", Journal of Materials Processing Technology 80-81, 1998, pp.665 ~ 670.
7. M.N. Ravindranath, R. Krishna Kuymar, "simulation of cold forging using contact and practical adaptive meshing algorithms.", Journal of Materials Processing Technology 104, 2000, pp110 ~ 126.
8. 김태준, "후방압출을 통한 반응용 재료의 유동 응력식 결정", 한국소성가공학회, 98 춘계학술대회논문집, pp.214-219, 1998
9. 김세환, "프레스 금형설계기법", 대광서립
10. J. Wly, Ssons "Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures".1997.