

후방 충격압출 성형 공정의 FVM 과 FEM 의 적용성에 관한 연구

정상원(전남대 대학원 기계공학과), 조규중(전남대 기계공학과), 김성훈(한국 MSC.Software)

A Study on the comparison of FEM and FEM for Backward Impact Extrusion Process

S.W.Chung (Mecha.Eng.Dept.Chonnam National Univ.),
K.Z.Cho(Mechanical Eng.Dept.Chonnam National Univ.), S. H. Kim(MSC.Software Korea)

ABSTRACT

The backward extrusion process is one of the commonly used metal forming processes. In this paper, a battery case which has the rectangular section, is analyzed using a 3D metal forming package(MSC.Superforge). This package uses the finite volume analysis method. It is shown that the MSC.Superforge package using finite volume method provides result very close to those obtained from a finite element analysis package(MSC.Superform). However, the simulation time using the finite volume method was almost 10 % of the simulation time consumed by the other package using finite element method. Moreover, the finite volume method used in MSC.Superforge can eliminate the remeshing problems that make the simulating a metal forming process with severe deformation, such as the extrusion process, so difficult.

Key Words : FVM(Finite Volume Method), FEM(Finite Element Method), Backward Impact Extrusion(후방충격압출), 격자 재구성(Remeshing)

1. 서론

최근에 이르러 고도의 비선형 문제중 하나인 금속 성형의 금형과 공정설계에 대해서도 몇 가지 수치해석 예가 보이고 있으며 몇몇의 코드들이 상용화 되어있다. 하지만, 그 대부분이 라그랑제 유한요소법에 기초를 두고 있어 아직까지 금속성형 공정의 상황을 충실히 재현하기에는 무리가 있다고 보인다[1]. 즉, 유한 요소법만으로는 다음과 같은 산업계의 요망을 아직 만족시켜주지 못하고 있다.

- 각 공정별 재료흐름, 응력, 변형률 및 온도분포 등을 정확하게 예측할 수 있는 코드상의 알고리즘이 필요하다. 실제 금속 성형 공정에서는 소재의 체적 변화 없이 성형이 이루어지나 연속적인 경계 조건의 변화와 3차원적인 재료흐름을 고려해야 하는 수치해석에서는 때때로 수치적 최종결과를 위해 체적보정등과 같은 편법이 동원되기도 한다.
- 정확한 금형 형상과 치수를 얻기 위하여는, 여러 가지 치수변경에 따른 성형품 형상검증이 반드시 짧은 기간내 수행되어야 하나 기존의 상용코드로는 아무리 간단한 3차원 모델을 대상으로 하여도 EWS 에서 단일 공정 당 며칠간의 계산시간이 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 많은 연구가 이루어

어져 왔으며, 그 대표적인 방법은 격자재구성을 이용한 유한요소법(FEM) 방법과 라그랑제와 오일러 방법을 연성하는 유한체적법(FVM) 묘사에 의한 방법을 들 수 있다[2-3].

이중 유한 체적법에 의한 방법은 사용자가 격자를 임의대로 이동시켜 해석하는 것이 가능하기 때문에 메쉬 뒤틀림 문제의 해결성을 높일 수 있어 압출이나 단조 같은 대변형 소성가공을 해석하는데 효과적인 방법으로 인식되어 지고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재까지 다단계 디프 드로잉(Multi-stage deep drawing)과 아이어닝(Ironing)공정에 의해 생산되고 있는 직경과 길이 비가 큰 직사각형 용기를 생산원가 및 생산성측면에서 유리한 후방 충격압출 공정으로 대체하기 위한 가능성을 검토하기 위한 선결 과제인 현장 적용성이 높은 성형 해석기법을 개발하기 위해 각 해석기법을 이용한 직사각형 용기의 성형해석을 수행하고 결과를 비교 하였다.

2. 해석 기법

금속재료의 성형 해석으로는 유한 요소법이 가장 정확한 해석 기법으로 알려져 있으나, 연산 작업의

수행을 위해서는 상당히 긴 계산시간을 필요로 할 뿐더러 극심한 변형을 동반하는 일부 금속 성형의 해석에서는 해석의 완료에 상당한 상당한 어려움이 있으나, 금속 성형 해석을 위해서 탄소성 혹은 강소성이론에 근거한 몇몇의 유한요소 해석 프로그램들이 개발되어 있다. 개발된 유한 요소 해석 프로그램들은 격자 재구성의 문제점들을 상당히 해결하였으나, 여전히 계산시간의 단축에는 어려움을 겪고 있다. 또한 격자 재구성 기법에서도 추가의 계산시간과 약간의 소재 체적 변화를 동반하므로 결국 유한요소법에 의한 시뮬레이션이 정확한 결과를 내지 못하는 원인이 될 수도 있다.

일반적으로 유한요소 해석 프로그램은 유동응력을 변형률, 온도 그리고 변형률 속도의 함수로 정의하며, 탄성변형을 무시하는 강소성이론은 단조 등과 같은 부피가 큰 성형체의 성형에는 탄성 거동이 무시할 수준이므로 탄성거동은 무시한다는 가정을 두고 개발되었으며 대부분의 금속 성형에 활용되고 있다. 하지만 판재 성형과 같은 경우에는 강소성이론을 적용하기에 무리가 따르므로 탄소성 이론이 적용된 유한요소 해석 프로그램을 적용하여야 한다.

반면 유한 체적법은 액체 상태의 유동을 해석하는데 장기간 사용되어 왔다. 최근에 일부 프로그램들은 고체 상태의 금속성형 해석에 활용할 수 있도록 개발하였으며 MSC.Superforge도 그 중 하나이다.

유한 체적법은 재료 자체의 변형을 대상으로 하는 전통적인 유한요소법과는 달리, 고정된 공간상을 재료가 유한 체적요소간에 자유로이 이동 또는 흐름으로써 소재의 변화하는 형상을 표현한다. 즉, 공간상을 이동하는 소재의 체적은 변하지 않고 형상만이 변화하는 유한체적법의 특징이 MSC/Super Forge를 금속 성형공정에 적합한 해석 도구로 사용될 수 있다.

3. 해석

3.1 해석 모델

후방 충격압출 성형에서의 유한요소 신뢰성 검증을 위하여 FEM의 해석적 접근과 FVM의 계산결과를 비교하여 보았다. 비교를 위한 후방압출 공정에 대한 FVM과 FEM의 해석 모델을 생성하였으며, 본 연구의 모델을 성형하기 위한 후방 충격압출 공정은 Fig.1과 같이 구성하였다.

FVM과 FEM 두 가지 방법에 대한 해석 결과의 비교를 위하여 슬러그(Slug) 성형물은 해석비교가 가능한 최소한의 크기를 사용하였으며, 펀치는 유압식 성형기를 사용하였으며, 행정은 -Z 방향으로 50mm 이고, 이때의 펀치의 속도는 260mm/sec이다. 비교해석에 사용한 성형물의 형상은 6.1×29.75×2mm 이고 성형물의 두께를 1mm 까지 압출하였을 때 성형 결과를 비교하도록 한다. 해석에 사용한 상용 프로그램은 FEM은 MSC.Super form을 사용하였으며,

FVM은 MSC.Super forge 를 사용하였다. 본 해석들은 FVM과 FEM 기법의 비교가 주목적이므로 해석에서는 마찰의 영향을 무시하고 계산하였다. 또한 해석에 사용한 재료는 일반적으로 충격압출에 가장 많이 사용되고 있는 Table 1의 AL 1060-O를 사용하였다.

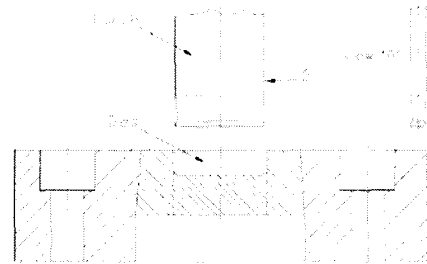


Fig. 1 Shape of Battery Case.

Table 1. Material Properties of AL-1060-O

Tensile Strength Ultimate	70 MPa
Tensile Strength Yield	30MPa
Modulus of Elasticity	69GPa
Elongation	4%
Density	2705 Kg/m ³
Heat Capacity	0.9 J/g °C
Thermal Conductivity	234W/m·K

해석 대상은 변형과 하중조건이 X-Z 평면과 Y-Z 평면에 대하여 대칭인 특성을 보이므로 Fig.2, 3에 보인 바와 같이 실제 모델을 1/4로 축소한 대칭 모델을 생성하도록 한다. 이는 해석 시간 및 메모리의 사용에 대해 유리한 점을 갖는다. 1/4 모델에 사용된 대칭면에서의 재료의 거동은 면내의 변형은 가능하지만 면의 변형을 불가능하도록 구속되도록 하였다.

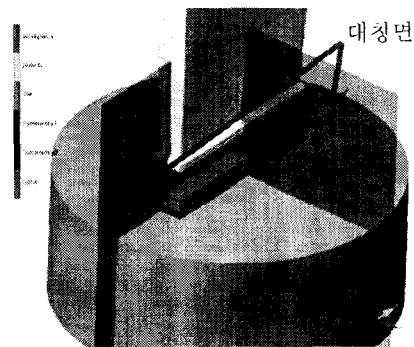


Fig. 2 Definition of Symmetry Planes of Model.

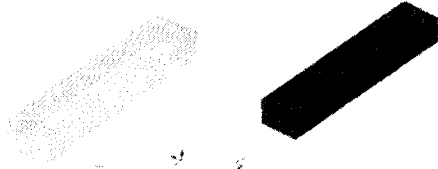


Fig. 4 Initial Analysis Model of Workpiece.

3.2 해석 수행

생성된 해석모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 계산에 사용한 H/W 의 사양은 중앙 연산 장치가 Pentium IV 2.1 Ghz, 가용 메모리는 3 GB 이다. FEM 의 해석에서는 계산 중에 발생하는 요소의 과도한 찌그러짐 문제를 해결하기 위하여 해석 중간에 자동 요소 재분할(Remehsing)을 하도록 설정하였으며, FVM 에서도 변형 체적 형상을 새롭게 재구성 하여 계산하도록 하는 재 시작(Restrat)기능을 사용하였다. 해석에 사용된 CPU 시간과 메모리를 Table 2 에 나타내었다.

Table 2. Calculation Time and Memory Usage.

Calculation Method	CPU Time (Sec.)	Memory Usage
FEM	23,726.46	1.2 Gb
FVM	5,915	100 Mb

FEM 에서 사용한 초기 해석 모델은 절점이 3,003 개, 요소는 2,340 개로 구성되었으나, 해석 도중 자동 요소 재구성에 의해서 절점이 23,092 개, 요소는 14,158 개로 변경되었다. 이상의 자동 요소 재구성 방법은 해석 중간에 과도한 요소 변형에 의해서 계산의 수행이 어려워지는 문제를 해결할 수 있는 기법이지만 자동 요소 재구성을 위한 요소 생성기의 성능에 의하여 해석 모델이 너무 커지거나 아예 해석을 계속하는데 필요 되는 새로운 해석 모델을 구성할 수 없는 경우가 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다. FVM 의 방법으로는 이러한 문제가 없으나 일부분만 세밀한 변형을 계산 할 필요가 있는 경우에는 전체적으로 균일하게 만들어지는 FVM 요소의 크기에 따라 많은 FVM 의 요소가 생성되는 단점이 있다. 해석 과정을 비교해보면 후방 충격압출 해석의 경우 FVM 가 FEM 에 비하여 계산시간은 약 12 % 정도, 해석에 사용되는 메모리는 약 10 % 정도 밖에 사용하지 않는 것으로 계산의 효율성에서 FVM 가 탁월한 장점을 가지는 것으로 판단 할 수 있다.

4. 해석 결과

Fig. 4 는 FEM 과 FVM 으로 계산된 최종 성형 형상을 보이고 있다.

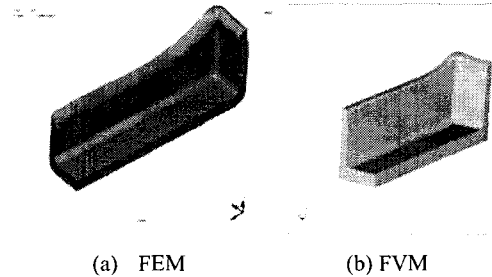


Fig. 4 Final Formed Shape by FEM and FVM.

성형 형상을 보면 FVM 나 FEM 에서 동일하게 장변부 보다는 단변부의 성형 길이가 길어지는 이어링(Earing) 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 코너 부분의 성형길이가 가장 길게 나타나는 경향을 동일하게 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 FVM 과 FEM 후방 압출성형 해석의 성형형상 경향이 유사하게 나타남을 알 수 있다. Fig. 5 는 장변부분, 단변부분 및 코너 부분의 성형 길이를 두 가지 방법에 대해 비교하였는데, 각 부분의 성형 길이를 보면 장변부분-단변부분-코너부분의 순서로 커지는 동일한 경향을 보이지만 성형길이의 비는 상당한 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 FEM 의 해석에서는 다이의 라운드(Round)를 표현한 모델을 사용하여 해석하였지만 FVM 에서는 라운드 부분이 표현되지 않은 모델을 사용하여 해석한 결과 때문으로 보여지며 이는 성형 길이가 길어지면 그 차이가 길어지지만 현 해석과 같이 짧은 성형길이에 대해서는 큰 차이를 보일 것으로 판단된다. 따라서 FEM 의 해석이 전체적으로 성형 길이가 길어야 하지만 장변 부분의 경우에는 FVM 이 더 길게 성형되는 것으로 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig.6 은 계산 방법에 따른 소성 변형율의 분포를 보이고 있는데 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다

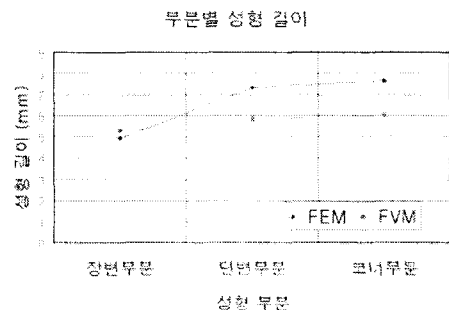
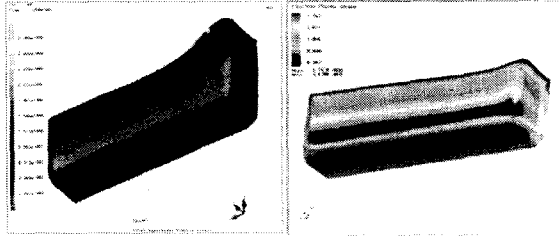


Fig. 5 Comparison Forming Length of Long, Short and Corner Parts.



a) FEM (b) FVM
Fig. 6 Distribution of Eq. Plastic Strain.

Fig.7 은 계산 방법에 따른 성형하중을 비교 하였는데, 최대 성형 하중이 FEM 이 10.7ton 이고, FVM 가 10.3ton 으로 계산되었다. 계산된 하중 값이 약 4 % 정도의 차이가 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이 정도의 차이로는 해석 기법간의 신뢰성에 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다.

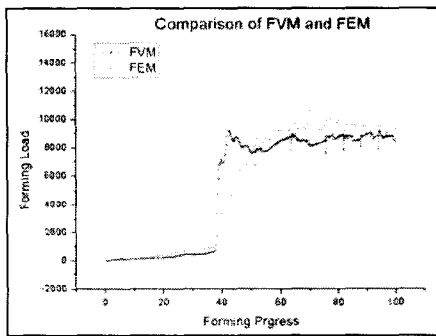


Fig. 7 Comparison of Forming Load between FVM and FEM.

이상과 같이 FVM 와 FEM 을 이용하여 동일한 후방 압출 성형에 대하여 해석을 수행하였다. 해석 결과를 분석한 결과, 장변부분의 성형길이가 적게 나타나고, 다음으로 단변부분, 코너 부분의 순서로 성형 길이가 계산되는 경향은 일치하지만 값의 차이는 상당한 차이를 보이고 있는데 60%의 성형 공정에서 성형 형상 중, FEM 의 해석 결과를 보면 장변 부분의 요소 분할이 적합하지 않는 것을 확인할 수 있었으므로 이 부분에서 체적의 손실 혹은 계산상의 오류가 발생하여 장변부의 성형 길이가 짧아진 것으로 판단된다. 따라서 적절한 격자 재구성 기법을 적용하여 추가 해석을 수행하여 이를 보정하면 FVM 와 FEM 의 해석 경향이 비슷하게 나타날 것으로 예측된다. 접촉 압력의 분포는 FVM 와 FEM 의 해석 결과에서는 동일하게 펀치의 중앙부분이 가장 높은 것으로 나타나므로 접촉 압력의 계산은 거의 동일하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 등가응력의 분포와 소성 변형율도 거의 동일한 분

포 양상을 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다.

성형 하중의 경우 FEM 이 FVM 에 비해 상대적으로 큰 경향을 보이나 값의 차이가 미소하므로 성형 하중의 차이는 없는 것으로 판단 할 수 있다.

5. 결론

후방 충격 압출 성형 공정에 대한 적절한 해석적 기법에 대한 비교검토를 위해 직사각형용기의 성형 해석을 수행하고 결과를 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 해석 시간과 사용 메모리의 양은 FEM 에 비해 FVM 은 계산시간은 12% 정도, 메모리는 10% 정도 밖에 사용하지 않으므로 계산 측면에서 보면 FVM 이 탁월한 장점이 있는 것을 확인할 수 있었다.
2. FEM 과 FVM 의 성형 형상은 상당히 유사한 경향을 보였으므로 성형 형상에 대해서는 두 가지 기법의 적용에 문제가 없을 것으로 판단된다. 하지만 FEM 의 경우 적절한 격자재구성 기법의 선택이 매우 중요한 해석 인자임을 확인할 수 있었다.
3. 잔류응력의 분포와 소성 변형율도 거의 동일한 분포 양상을 보이고 있으므로 FVM 과 FEM 의 해석결과는 거의 유사하므로 후방 충격 압출 해석에 어느 기법을 사용에도 문제가 없을 것으로 판단된다.
4. 성형하중 이력의 경우도 두 해석 결과가 비슷한 수준과 경향을 나타내고 있으나, FEM 은 해석초기에 구성한 요소의 수가 해석도중 자동요소 재구성에 의하여 해석모델이 너무 커지거나 해석모델을 구성할 수 없는 경우가 발생할 수 있는 단점을 보여서 복잡한 형상의 성형에 있어서는 FVM 이 유리할 것으로 판단되었다.

후방 충격 압출 성형의 경우, 다이와 펀치의 내구성에 대한 연구가 필수적이거나, 본 연구에서는 수행하지 못하였으므로 이에 대한 비교 검토를 추가적으로 수행해야 하나 FVM 은 이를 직접 수행하지 못하므로 성형 해석은 FVM 을 사용하고 펀치와 다이의 응력검토는 FEM 을 사용하는 하이브리드(Hybrid) 해석기법의 연구가 필요할 것이다.

6. 참고문헌

1. Bramley A.,1995, "Forging Modelling", Proc. of the 9th Intern. Cold Forging Congress, pp. 165-168.
2. Cheng. J. H. 1988, "Automotive Adaptive Remeshing for Finite Element Simulation of Processes ", Int. J. Num. Meth. in. Eng., Vol. 26. PP 11
3. R.B. Haber " A Mixed Eulerian-Lagrangian Displacement Model For Large Deformation Analysis In Solid Mechanics" Comput. Meths. Appl. Mech Eng, 43, pp.277-292, 1984.5.