

3 차원 소성가공공정 해석 기술

양 동 열¹, 이 영 규¹, 박 근²

1: 한국과학기술원 기계공학과

2: 삼성전기(주)

1. 서 론

미분방정식의 근사적인 해를 계산하는 체계적인 방법론으로서 유한요소해석법이 개발된 이후, 유한요소법은 구조물의 해석, 유동의 해석, 전자기장의 해석 등에 광범위하게 이용되어 왔다. 금속의 소성가공 공정과 관련하여서도 유한요소 해석법은 그 일반성과 범용성, 또 해의 정확성과 풍부함 때문에 가장 널리 사용되는 해석 기법중의 하나이다. 특히 현재 2 차원 해석분야에서는 다양한 해석 프로그램이 개발되고 판매되고 있으며, 이러한 프로그램을 활용하여 공정 및 금형 설계를 검증하고 개선하고자 하는 현장적 노력이 국내외에서 진행되고 있다.

금속 성형공정의 성형해석을 위해서 현재 많이 사용되는 방법은 탄소성 해법(elastic-plastic FEM), 강소성 해법(rigid-plastic FEM) 그리고 열간 공정의 해석에 사용되는 점소성(visco-plastic FEM)이 있다. 강소성 해법은 소성 가공 공정중의 재료가 겪는 변형량이 매우 커서 탄성변형량이 무시할 만큼 작다는 가정을 도입하여 탄성변형을 무시하고 해석하는 기법으로 탄소성 해법에 비해 적은 계산시간으로 비교적 정확한 해를 구할 수 있다는 장점때문에 많이 사용되어 왔다. 그러나 가공 후의 재료의 후변형, 재료내의 잔류응력등의 예측을 위해서 좀더 정확한 해를 구할 필요성이 점점 대두 되고, 컴퓨터의 연산능력이 발전함에 따라서 탄소성 해법도 점점 현실적인 도구가 될것으로 예상된다.

본 연구에서는 그간 한국과학기술원에서 개발한 3 차원 유한요소해석시스템[1,2]인 FormSys3D 와 격자재구성장치, HexaGen 을 활용한 3 차원 유한요소해석의 활용 사례를 중심으로 관련연구의 동향, 향후 동향에 대해서 알아 보고자 한다. 개발된 시스템은 3 차원 소성가공 공정해석용 유한요소해석 시스템으로 강소성 및 점소성 성형해석 기능, 탄성회복 및 금형해석 기능을 포함하고 있으며 정상상태 및 비 정상상태 해석이 가능하다. 또한 해석 도중, 과도한 퇴화된 격자를 대체할 새로운 육면체 격자의 자동구성기능을 포함하고 있다.

2. 제품 성형성 평가를 위한 유한요소 해석

유한요소 해석을 통해서 얻을 수 있는 일반적이고 일차적인 정보는 공정의 제품 성형 여부를 판단하는 것이다. 냉간 단조의 경우에 제품과 금형의 온도 해석을 하지 않는다. 반해, 열간 해석의 경우에는 제품내의 열발생, 제품과 금형내의 전도, 제품과 금형 그리고 대기 사이의 열전달을 해

석한다. 그러므로 열간 해석의 경우에는 금형에 대한 격자도 구성해서 온도해석을 재료의 변형해석과 병행해서 수행한다. 그림 1은 전륜구동 자동차의 등속조인트에 사용되는 내륜을 냉간 폐쇄단조하는 공정을 개념적으로 보여주고 있다. 그림 2는 이러한 공정을 유한요소해석해서 예측된 변형 형상과 변형율의 분포를 보여주고 있다.[3]

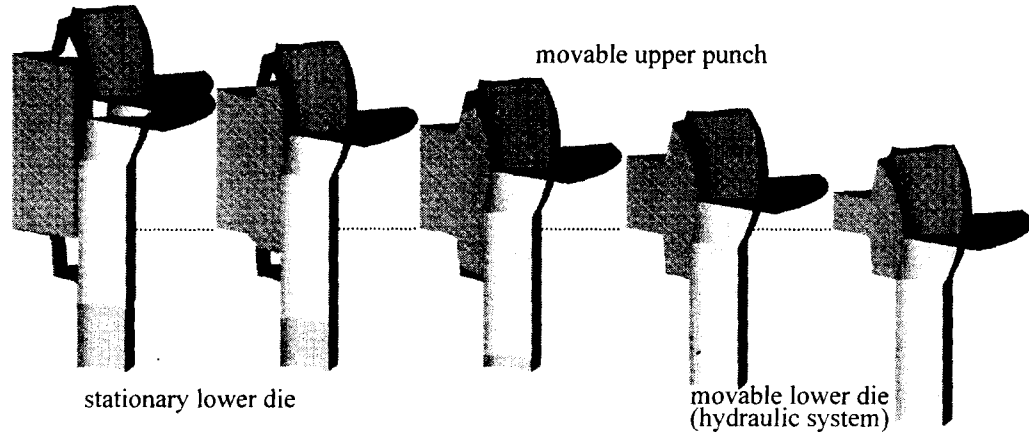


그림 1 내륜의 폐쇄단조 공정 개념도

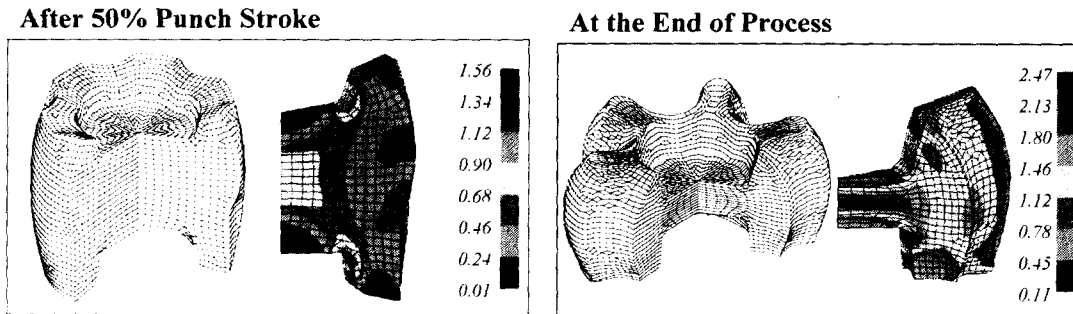


그림 2 예측된 변형형상과 유효변형율 분포

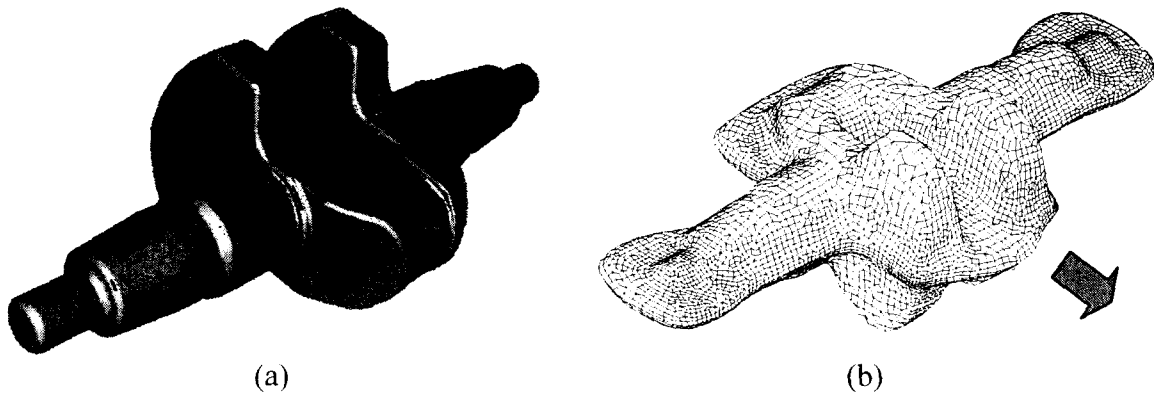


그림 3 크랭크 샤프트의 3 차원 모델과 성형형상

그림 3(a)는 크랭크 샤프트의 3 차원 모델을 보여주고 있다. 실제 제품은 열간 단조에 의해서 제작된다. 이때 제품과 금형사이의 열전달 효과를 무시하고 등온이라고 해석할 제품의 성형 형상은 그

림 3(b)와 같다. 실제 해석 결과, 제품의 성형시에 소재가 화살표 방향으로 상당량 이동하므로 초기에 소재의 위치를 적절히 조절할 필요성이 제기되었다.

앞에서 언급한 바와 같이, 열간단조공정을 좀더 정확하게 해석하기 위해서는 제품내의 열발생, 제품과 금형간의 열전달과 이에 의한 각 부분의 온도 변화, 그리고 이를 반영한 재료의 유동응력의 변화등을 종합적으로 고려해서 유한요소 해석을 수행해야 하며, 이때는 소재와 금형을 연계해서 해석한다. 그림 4는 코넥팅로드의 성형공정을 해석해서 예측된 최종적인 변형형상과 그때의 금형의 온도 분포를 보여주고 있다.[4]

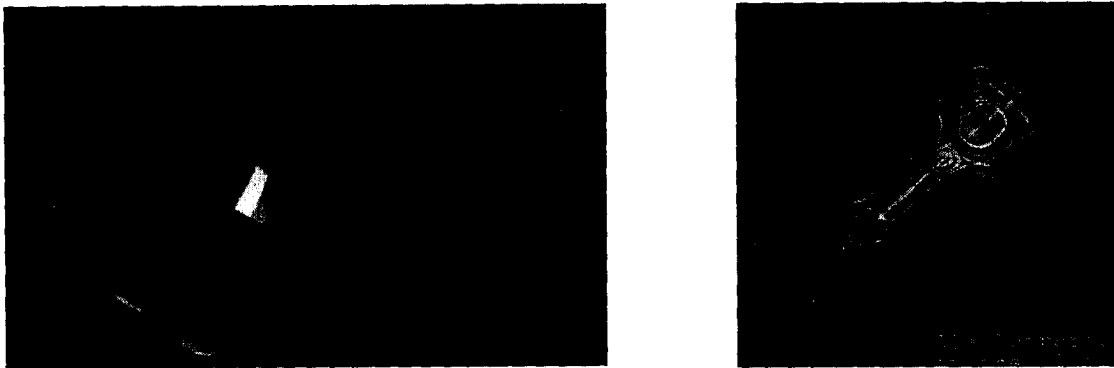


그림 4 예측된 코넥팅로드의 변형형상과 금형의 온도 분포

3. 탄성회복 해석을 통한 제품 정밀도 예측

앞장에서는 단조 공정의 해석의 일반적인 예를 제시하였다. 일반적으로 유한요소해석을 통해 얻을 수 있는 가장 일차적인 정보는 설계된 공정이 금형을 원활히 충만 시켜서 과연 원하는 제품을 성형할 수 있는가이다. 제품의 변형 형상과 함께 유한요소 해석을 통해서 얻을 수 있는 정보로는 제품과 금형내의 응력, 변형

율, 이를 이용한 예측된 제품내의 경도 분포 등이고 이와 더불어 현재 제품내의 결함 분포의 확률, 금형의 수명, 미소조직에 관련한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

그림 5는 전자총 조립품에 들어가는 부품의 프로그래시브 성형과정의 개략도를 보여주고 있

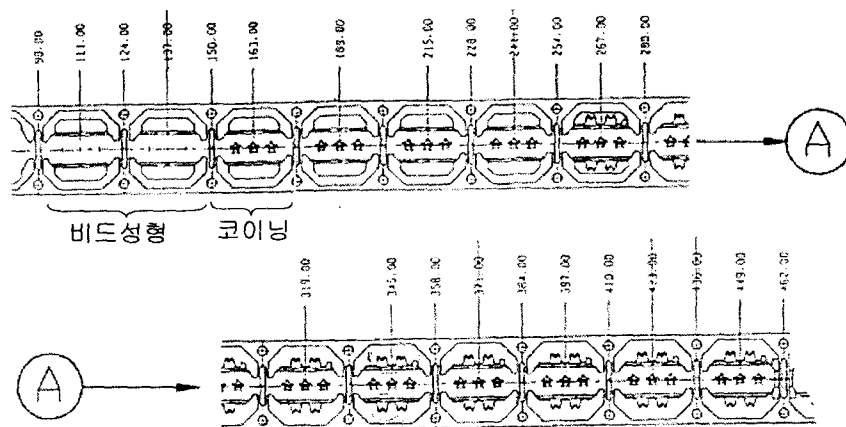


그림 5 전자총 부품의 프로그래시브 성형 공정

다.[5] 전자총은 열에 의해 발생된 자유전자를 전기장을 이용하여 가속 시키고 굴절시켜서 화면의 목표하는 위치의 색세포에 충돌 시킴으로서 화상을 출력시키는 과정에서 매우 중요한 역할을 수행하며 그림의 제품은 전자총에 사용되는 한 부품으로 정밀도가 매우 중요하다. 특히 초기 설계된 해당 제품의 평탄도를 개선할 필요성이 제기되었다. 이를 위해서 본 연구에서는 우선 제품의 프로 그래시브 성형 과정 중, 대부분의 변형이 이루어지는 코이닝(coining) 공정을 해석하였으며 이때 제품의 변형형상과 성형의 최종단계에서 제품내의 응력분포는 그림 6(a)와 같았다.

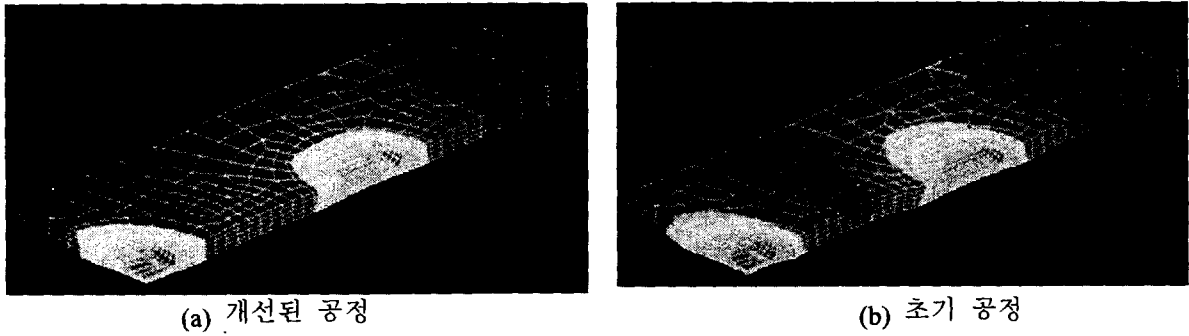


그림 6 제품의 성형 후 제품의 변형형상과 응력 분포

성형의 최종단계에서 제품에서 발생한 응력은 금형이 가하는 외력과 정확하게 평형을 이루고 있으며 금형이 성형을 완료하고 상승하면 제품내에 응력은 약간의 변형을 수반하며 새로운 평형상태로 전이하게 되는데 이를 탄성회복(elastic recovery)라 한다. 이때, 예측된 응력을 이용해서 이러한 성형후의 변형과정을 예측할 수 있다. 이때 제품의 상하부에는 굴곡이 진 홈과 같은 부분이 성형되어 있는데 이 부분은 코이닝 공정 전에 성형된다. 이러한 홈이 재료의 성형중 제품의 면 내에서 재료의 유동을 구속하여 제품내의 전반적인 응력상태를 높일 수 있고 이는 탄성회복량을 크게 만들수 있다. 이러한 홈의 영향을 파악하기 위해서 본 연구에서는 홈이 재료의 변형을 구속한다고 가정하고 이를 경계조건을 부여해서 재해석을 수행하였으며 이때 예측된 최종 제품의 응력분포는 그림 6(b)와 같다. 그림 7은 탄성회복에 의한 제품의 변형을 과장해서 보여주고 있다. 해석한 결과, 비드의 영향에 의해서 제품내의 최대 응력치가 $1012 N/mm^2$ 에서 $1021 N/mm^2$ 로 상승하였으며 이에 의해 탄성변형량도 약 $80\mu m$ 에서 약 $130\mu m$ 로 증가하여 비드가 제품의 정밀도에 악영향을 미침을 확인하였다. 결론적으로 비드의 성형을 코이닝 공정 후에 실시함으로써 제품내의 응력을 낮추어 탄성 회복량을 줄일 수 있고, 이로써 이후에 제품의 평탄도의 보강을 위해서 실시하던 몇개의 공정을 줄일 수 있다.

앞에서 제품의 제조공정에 대한 성형해석과 성형후의 탄성회복을 연계하여 제품의 최종 정밀도를 예측하고 이를 이용하여 설계변경에 반영한 사례를 제시하였다. 본 연구에서 한 성형공정은 특성상, 제품의 굽힘이 지배적이지 않고 예측된 결과와 실제 실험 결과 사이에도

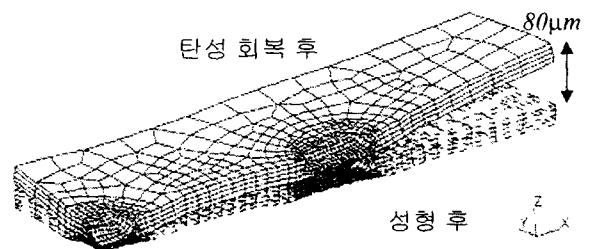


그림 7 제품의 탄성회복 예측 예

약간의 차이를 볼 수 있었다. 좀더 정확하고 일반화된 해석을 위해서는 제품의 성형공정과 탄성회복공정을 모두 탄소성해법으로 해석하게 되면, 제품내의 응력분포를 좀더 정확하게 예측할 수 있고, 또, 성형공정과 탄성회복공정을 동일하게 처리할 수 있어서 일관되게 해석할 수 있다. 그러나 이 경우에는 본 연구에서 사용한 것과 같은 강소성 성형해석-탄성 후변형해석에 비해서 좀더 많은 계산시간이 소요될 것이다.

이상으로 소성가공 공정의 해석시, 제품의 변형형상과 함께 예측되는 응력 등을 이용해서 공정을 평가하고 개선한 사례를 제시하였다. 현재는 이러한 일차적인 정보와 더불어, 제품내의 미세조직, 금형의 파손인자 등을 좀더 정확하게 예측하려는 시도가 활발하게 이루어지고 있으며, 향후에는 이러한 정보를 활용하여 좀더 최적화된 공정을 설계할 수 있으리라 기대된다.

4. 압출공정의 유한요소 해석

앞의 두절에서는 주로 제품의 성형양상이 공정 중에 시시각각으로 변화하는 비정상상태(nonsteady state) 해석과 관련하여 언급하였다. 이에 비해, 압출공정과 같이 단면의 형상이 일정하고 매우 긴 제품을 생산할 때, 제품을 생산하기 시작하는 초기 단계와 마지막 단계를 제외하면 공정중 재료의 변형과정이 시간이 변해도 거의 일정한 공정의 경우에는 이러한 특성을 반영하며 공정중 재료의 변형이 시간에 따라서 일정하다는 가정을 도입한 정상상태(steady state) 해석을 할 수 있다. 이러한 가정을 도입함으로써, 전체 공정에 대한 각 순간순간의 해석을 수행하지 않고 신속하게 유용한 공정정보를 구할 수 있다.

그림 8은 압출공정을 비정상상태로 보고 해석한 한 예를 보여주고 있다.[6] 이 경우, 재료가 시간이 경과함에 따라 변형되는 형상을 예측할 수 있으나, 각 단계의 해석을 위해서는 많은 시간이 소요된다. 실제 압출공정에서 대부분의 제품은 거의 정상상태에 가까운 영역에서 생산되며, 또 많은 경우 처음 생산된 초기부분과 최종부분은 제거해 버리므로 공정의 정확한 진행양상을 파악하고자 하는 경우가 아니면 정상상태 해석이 매우 효과적일 수 있다.

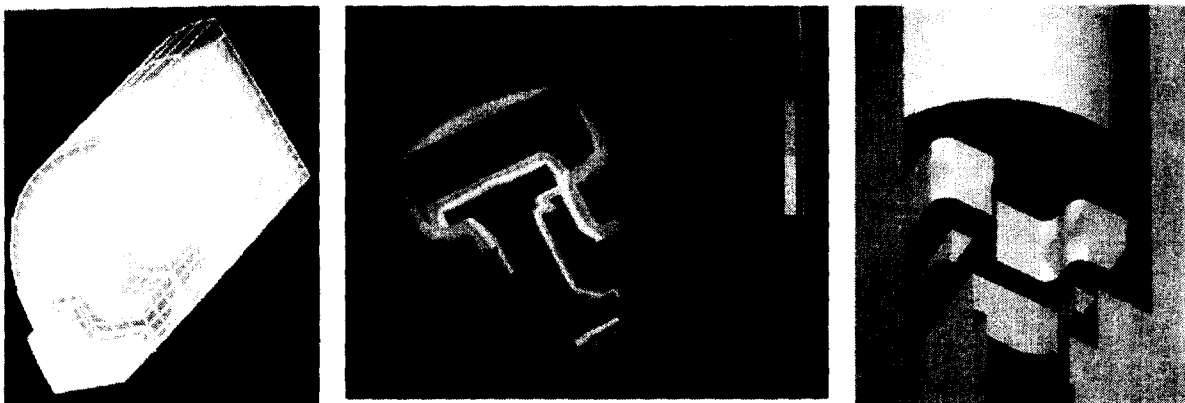


그림 8 H형 압출공정 해석에 의한 유요변형율, 금형마모 예측과 프로우가이드 설계형상

그림 9는 앞에서 언급한 것과 같이 공정을 정상상태로 가정하고 일자 단면형상 제품의 압출공정을 해석한 결과를 보여주고 있다.[7] 일자형상의 압출 해석 시, 특징은 그림 8의 H형상은 중실형 제품의 압출인데 반해서 일자형상은 중공형 제품의 압출이라는 점이다. 그러므로 이러한 제품은 포트홀(porthole)과 만드렐(mandrel)을 조합하여 매우 복잡한 성형원리로 제품이 생산된다. 그림 9의 좌측은 일자형상 제품의 생산시 금형내의 재료 형상을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 제품의 형상이 매우 복잡하고 압출비가 크면 격자를 미세하게 구성해야만 하므로 해석을 위해서 많은 절점과 요소를 구성해야 하며, 이러한 경우 비정상상태 해석은 엄청난 계산을 요구하게 된다. 그림 9의 우측은 정상상태를 가정하여 해석한 재료의 압출속도의 분포를 보여주고 있다.

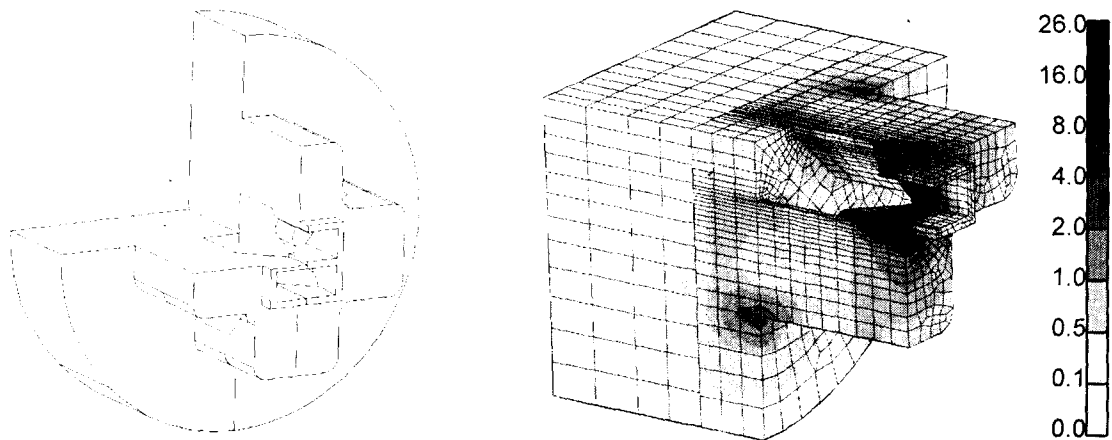


그림 9 일자형상의 금형내 변형형상 및 예측된 정상상태의 재료 속도 분포

그림 11에서는 이러한 정상상태 해석을 이용해서 얻을 수 있는 정보와 이를 활용한 예를 보여주고 있다. 그림 10은 고속철도 차량 마루부 부재사용 위치와 상세 형상, 그리고 이를 압출할 때의 금형내에서 재료의 성형형상을 보여주고 있다.

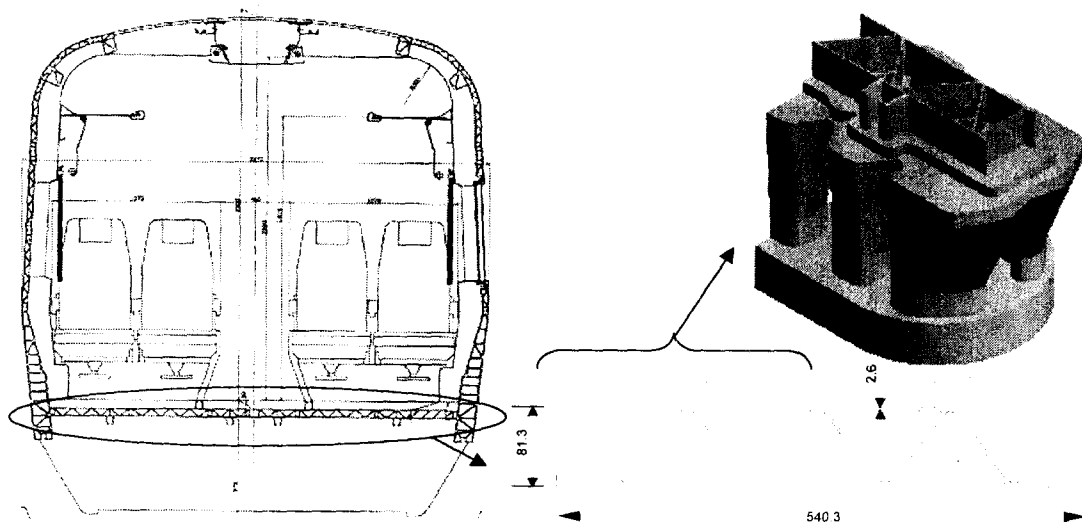


그림 10 고속철도 차량 마루부 부재의 용도와 형상

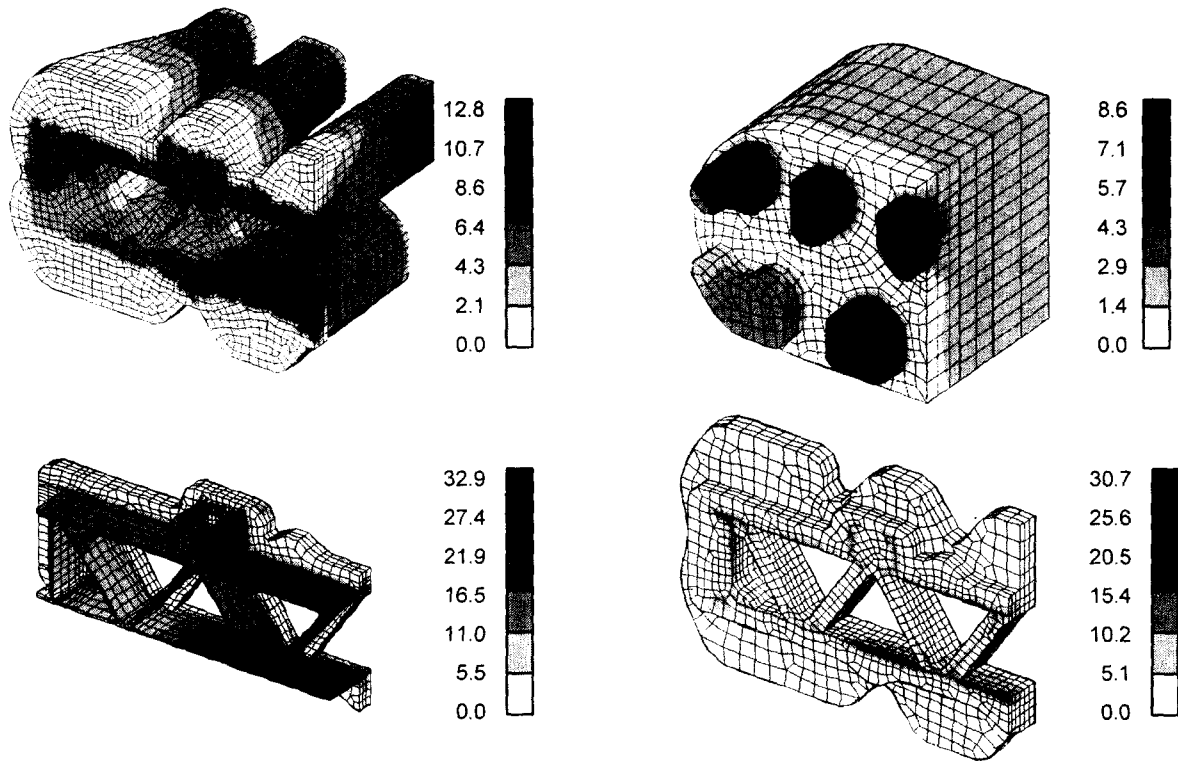


그림 11 마루부재 압출 공정 중 재료 유동 속도 분포

현재 설계된 공정으로 제품을 시험 생산한 결과, 제품의 국부적인 두께차이가 문제점으로 대두되었다. 즉 최종 압출제품의 두께가 균일하지 않고 일부 부분에서 소재가 충분히 공급되지 않아서 구조적으로 취약한 부분이 나타나고 있다. 이러한 현상을 출구부에서 예측된 압출 속도 분포도로 분석해 보면 그림 12와 같다. 즉 두

두께가 얇아지는 양쪽 끝 부분에서 소재의 압출속도가 상당히 낮게 예측되고 있으며, 해당 부분이 균일한 두께로 성형되기에 충분한 소재가 공급되고 있지 못하다. 그러므로 속도가 낮은 부분에서 제품의 두께가 얇아진다고 판단된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 포트홀등의 급형 형상을 수정하여 재료의 유동을 적절히 제어해야 하며, 개선된 설계안에 대해서는 현재 해석을 진행 중에 있다.

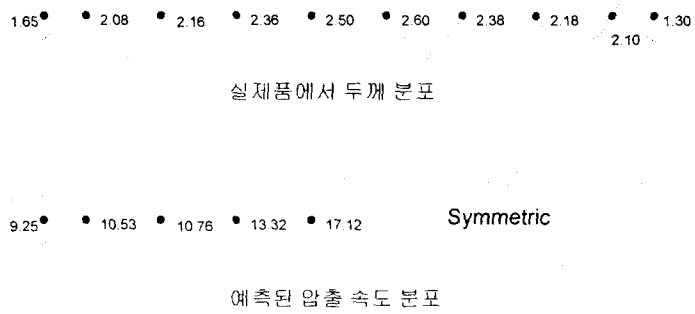


그림 12 제품의 두께 분포와 예측된 압출속도 분포

4. 결 론 및 향 후 과 제

본 연구에서는 그 동안 한국과학기술원에서 개발한 소성가공공정 해석용 3차원 유한요소해석 프로그램 FormSys3D를 적용 사례를 중심으로 소개하였다. 개발된 시스템은 비정상상태의 강소성, 점소성 유한요소해석 기능 및 탄성회복 기능을 포함하고 있으며, 해석 중에 격자의 과도한 퇴화시 새로운 육면체 격자를 재구성하는 기능의 HexaGen 프로그램과 연계해서 활용된다. 구축된 시스템을 활용함으로써 소성가공 공정에 중의 재료의 유동, 최종 제품의 형상, 금형의 변형 및 응력등을 해석할 수 있다. 그간 시스템을 적용하여 생산 공정의 개선, 제품의 정밀도 향상을 위한 연구를 진행해 왔으며 향후에는 이러한 일련의 과정을 시스템화하는 작업이 필요할 것으로 판단된다. 이와 관련하여 프로그램의 효율성을 높여 계산시간을 줄이는 노력, 사용 편의성 향상을 위한 입출력 기능의 보완, 각 세부 시스템의 연계 및 통합화를 위해 노력할 것이다. 시스템이 완성되면 적용연구를 좀더 광범위하게 수행하여 좀더 안정적이고 활용도가 높은 시스템으로 지속적으로 개선할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] Yoon, J. H. and Yang, D. Y., (1988), Rigid-plastic finite element analysis of three-dimensional forging by considering friction on continuous curved dies with initial guess generation, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.30, pp.887-898
- [2] Yoon, J. H. and Yang, D. Y., (1990), A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using a remeshing technique, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.32, pp.277-291
- [3] Lee, Y. K. and Yang, D. Y. (1996), A new automatic mesh generation technique and its application to the finite element analysis of practical forging process, 5th Int. Conf. on Tech. of Plasticity, Columbus, USA, pp.409~413
- [4] Cho, J. R. (1997), Three-dimensional finite element simulation of connecting rod forging using a new remeshing scheme, *Engineering Computation*,
- [5] Kim, S. G., Lee, J. J., Seo, J. W., Lee, Y. K. and Yang, D. Y., (1995), Application of finite element method to controlling flatness in sheet metal forming, ASME 95 Int. Mech. Eng. Congress and Exposition, Dimensional Measurement and Control for Sheet Metal Forming and Assembly Symposium.
- [6] Kang, Y. S. and Yang, D. Y., (1998), A numerical investigation into hot square die extrusion of an L-section considering the variation of die bearing length, *Trans. ASME-B, J of Manuf. Sci. and Eng.*,
- [7] Park, K., Yang, D.Y. and Kang, Y. S., (1998), Precision forging design and analysis in electronics part manufacturing. *Trans. ASME-B, J of Manuf. Sci. and Eng.*,