

## 단조품 결함에 대한 삼차원 단조 공정 해석

박승희\* · 제정신\*\*

# Forging Defects Analysis by Full 3-Dimensional Simulation based on F.V.M.

S.H. Park and J.S. Che

### Abstract

Most important for meaningful forging simulation is the determination of correct process parameters. In addition a check and a compensation of the data base after the comparison between experiments and the computation of the developed process is necessary. The existence of a systematic process parameter data bank for special kinds of forming process in combination with forging specific simulation lifts the value of the products.

Finite volume method is applied to simulate the hot forging process to investigate the defects for the automobile product. Three typical forging processes have been investigated; Extrusion by hydrolic press, Upsetting by crank press and Inclined upsetting by hammer press. Simulated result has compared with the experiment and provided a direction to improve the process.

Key Words : Forging Process, Finite Volume Method, Forging defects

### 1. 서론

고도의 비선형 문제에 대한 수치해석법의 발달로 단조 공정 설계에 대해서 수치 해석적 접근이 많이 요구되고 있다. 그러나 실제 공정상의 흐름을 재현하기 위해서는 수치 해석적으로 많은 시간이 소요되고, 또한 그 결과를 현장 경험이 풍부한 금형 설계자와 수치해석 전문가간의 연계성을 충족시키기에 아직도 어려움이 많아 산업계의 요구를 만족시켜주지 못하고 있는 실정이다. 전통적인 금형 설계자와 수치해석 전문가간의 공정에 대한 이해차이로 문제가 발생 될 소지가 있다. 금형

설계자는 실제 공정상의 흐름을 증시하는 반면 수치 해석자는 공정의 역학적인 거동만을 보고 있다. 그러나, 현재까지 유한요소법의 지식이 없는 금형 설계자를 대상으로 한 상용코드는 발견하기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 산업계의 요구를 충족하기 위해서 금형설계자 및 수치해석 전문가 등 누구나 편리하게 사용할 수 있으면서도, 기존의 해석시간을 획기적으로 단축시킬 수 있게 개발된 MSC.SuperForge[1] 소프트웨어를 활용하여 국내 단조업체의 단조공정 분석한 결과를 설명한다.[2]

\* 씨멕스 (SIMECS Co.)

\*\* 한국엠에스씨소프트웨어 (MSC.Software KOREA)

## 2. 2차원 단조공정 해석

### 2.1 Spindle 단조공정의 다단계2차원 해석

일반적으로 대변형을 요구하는 단조공정 중에서도 전후방(Forward and Backward Extrusion)의 단조공정은 단조품의 겹침(Lap) 결함이 자주 발생한다. 특히, 다단계의 전후방 공정의 설계를 위해서는 기본적으로 각 공정의 금형 설계가 매우 중요하다. 그러나 기본 공정 설계 단계에서는 각 공정별로 성형 가능성에 대한 분석이 방영을 할 수 없기 때문에 반드시 각 공정별로 성형 해석을 수행하여야만 각 단계의 단조 공정 설계가 정확함을 판단할 수 있다. 다만 공정의 해석에서 중요한 변수는 금형과 소재의 마찰에 대한 분석이 매우 중요하고 할 수 있다.

따라서, 본 해석에서는 금형과 소재사이의 마찰에 대한 변화를 적용하여 자동차의 부품으로 사용되는 Spindle단조품의 전후방 압출 성형 중에 발생될 수 있는 결함을 분석하였다.

#### 2.1.1 해석 조건 및 공정(Hydraulic Press)

Spindle 단조품은 열간 단조 공정으로 총3단계 공정으로 해석하여 공정을 분석하였다. 단조공정에 사용된 프레스는 유압 프레스로 속도는 3000mm/sec.로 설정하였다. 또한 소재의 단조온도는 1200도 또한 단조 금형은 200도로 하였다. 단조에 사용된 재질은 S45C및 금형은 H-26으로 MSC.SuperForge 소프트웨어의 물성 데이터를 사용하였다.



(a) 1 STEP (b) 2 STEP (c) 3 STEP  
Fig. 1 Initial Shape for Simulation

Fig. 1(a), (b), (c)는 각 단계별로 Spindle 해석을 수행하기 위해서 초기 성형 전의 모습을 나타낸 것으로 축 대칭 2차원의 해석 초기 모습이다.

각 단계의 성형 해석 수행 결과에서 소재 변형에 따른 기계적 성질의 변화를 다음 단계에서 반복적으로 해석하여 실제 단조작업에서 발생하는 현상과 동일하게 해석하였다.

#### 2.1.2 해석 결과

Spindle 단조품의 전후방 압출 성형 해석을 위해서 일반 PC장비를 사용하였으며, 하드웨어의 중앙처리장치(CUP)는 2.0GHz, 메모리(Memory)는 1GB의 장비로 MSC.SuperForge 소프트웨어를 활용하여 Spindle단조품 3단계 해석에 총1시간 8분이 소요되었다

Fig. 2는 전방압출 공정의 단조작업을 해석한 것으로 상부 금형이 소재를 금형에 하부 금형에 밀어서 성형하는 공정이다. 해석시간은 약 22분이 소요되었다. Fig. 3 공정은 전방 압출 단조공정 후 Spindle의 단조형상을 성형하기 위해서 상부 금형이 하부 금형 보다 작게 설계되어 상부 금형이 하부 금형으로 이동하여 소재는 전방 및 후방의 양 방향으로 단조하여 Spindle의 최종형상을 단조하기 위한 중간 과정이다. 이를 해석하는 시간은 24분이 소요되었다. Fig. 4는 최종의 Spindle을 단조하기 위한 공정으로 후방의 압출 단조 공정이 주로 작용되어 소재의 변형이 주로 상부 금형의 진행방향과 반대로 작용되어 성형하는 공정으로 해석 시간은 약 20분이 소요 되었다. 이러한 다단계 단조공정을 MSC.SuperForge소프트웨어를 이용하여 단조 공정의 해석 조건을 구분하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 2와 Fig. 3 및 Fig. 4는 전단마찰계수(Shear Friction Coefficient)를 0.2와 0.5로 변화하여 성형제품에 발생된 유효응력(Effective Stress) 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2 와 Fig. 3은 전후방 압출의 정도가 크지 않기 때문에 전단마찰계수가 변하여도 소재에 큰 영향을 주지 않아 결함이 발생되지 않음을 알 수 있었다.

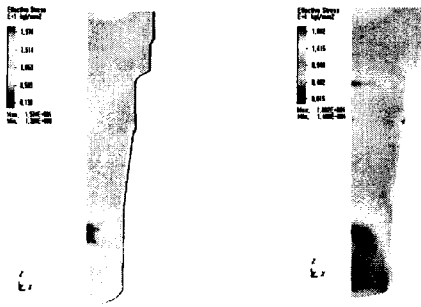
그러나, Fig. 4와 같이 다단계 전후방 압출공정에서는 전후방압출의 성형성이 커지면서 소재의 결함에 중요한 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

### 3. 3차원 단조공정 해석

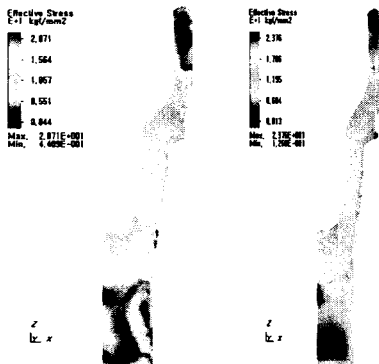
#### 3.1 CARRIER 단조품 3차원 해석

일반적으로 밀폐단조 방법은 동일한 형상의 제품을 다수 제조할 때 채용되는 생산성이 높은 가공법이다. 또한, 정확한 밀폐단조 설계에 의해서 만들어진 제품은 일반적으로 기계적 성질이 우수하며 매우 안전성이 높다. 이러한 밀폐단조에서 중요한 설계 변수는 단조 금형과 소재 사이의 밀폐성을 얻을 수 있는 정밀한 소재의 중량을 구하는 것이며, 단조에 필요한 적정 하중에 대한 평가 및 단조 금형과 소재의 변형과정에서 발생할 수 있는 소재의 충진도 부족여부 및 결함에 대한 정밀한 분석이 필요하고 할 수 있다

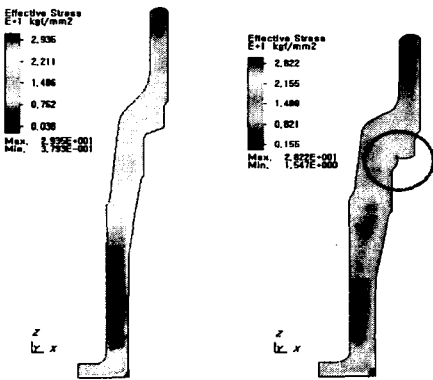
본 해석에서는 자동차의 부품으로 사용되는 CARRIER 단조품의 밀폐단조 공정을 분석하기 위해서 업셋팅(Upsetting) 과정에서의 소재의 성형 변화를 분석하고, 요구되는 단조품을 성형하는 밀폐 단조 공정인 피니싱(Finishing) 공정에서 발생할 수 있는 금형과 소재의 충진성 문제와 충진성을 높이기 위해서 과도한 단조를 수행하였을 경우에 발행될 수 있는 문제점을 분석하기 위해서 전체 형상에 대한 3차원 해석을 수행하였다.



(a) Shear Friction 0.2 (b) Shear Friction 0.5  
Fig. 2 Effective Stress according to Shear Friction Coefficient after 1 step Forging simulation

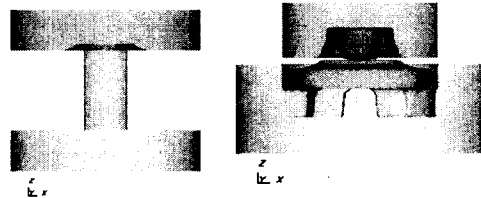


(a) Shear Friction 0.2 (b) Shear Friction 0.5  
Fig. 3 Effective Stress according to Shear Friction Coefficient after 2 step Forging simulation



(a) Shear Friction 0.2 (b) Shear Friction 0.5  
Fig. 4 Effective Stress according to Shear Friction Coefficient after 3 step Forging simulation

#### 3.1.1 해석 조건 및 공정 (Crank Press)



(a) Upsetting (b) Finish  
Fig. 5 Initial Shape for Simulation

CARRIER 단조품은 열간 단조 공정으로 업셋팅 및 피니싱 공정으로 해석하여 공정을 분석하였다. 공정에 사용된 프레스는 크랭크프레스(Crank Press)로 설정하였다. 또한 소재의 단조온도는 1230도로 단조 금형은 상온으로 하였다. 단조에 사용된 재질은 SCr440 및 금형은 SKD61로 MSC.SuperForge 소프트웨어의 물성 데이터를 사용하였다. Fig. 5 (a)는 업셋팅 단조 공정을 나타낸 것이고, Fig. 5 (b)는 업셋팅 단조 공정후에 피

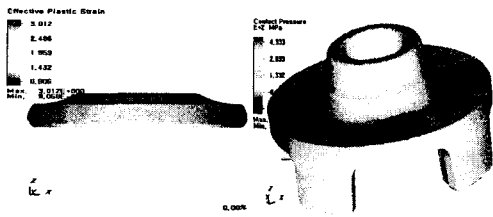
니싱 단조공정을 연계하여 해석하는 것을 나타낸 것이다.

각 단계의 성형 해석 수행 결과에서 소재 변형에 따른 기계적 성질의 변화를 다음 단계에서 반복적으로 해석하여 실제 단조작업에서 발생하는 현상과 동일하게 하였다.

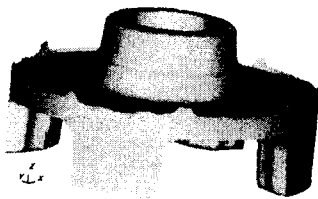
### 3.2.2 해석 결과

CARRIER 단조품의 밀폐단조 성형 해석을 위해서 일반 PC장비를 사용하였으며, 하드웨어의 중앙처리장치(CPU)는 2.0GHz, 메모리(Memory)는 1GB의 장비로 MSC.SuperForge소프트웨어를 활용하여 업셋팅과 피니싱 단조 공정 3차원 해석에 총15시간이 소요되었다.

Fig. 6 (a)는 업셋팅 단조공정을 해석한 것으로 전체 형상을 3차원 해석한 결과로 해석시간은 약 3시간 30분이 소요되었다. Fig. 6 (b)는 피니싱 공정을 해석한 것으로 업셋팅 단조공정 해석에서 발생한 기계적 성질의 변화를 연속하여 해석한 것으로, 전체 형상을 3차원 해석한 시간은 약 11시간 30분 소요되었다.



(a)Result of Upsetting (b)Result of Finish



(c) Result of Over Fill after Finish

Fig. 6 Forged Shape of CARRIER after 3D Simulation

Fig. 6 (a)는 3차원 CARRIER단조품을 성형하기 위해서 1차 업셋팅 단조공정을 해석하여 얻은 결과이다. 업셋팅 단조공정에서는 특별한 결함이 없음을 알 수 있었다. Fig. 6 (b)는 소재와 금형

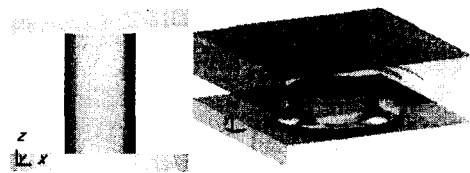
의 접촉이 변형하면서 크게 발생한 부위가 소재에 압력을 높게 변화시키는 것을 나타낸 것으로, CARRIER 단조품의 요구되는 형상을 성형할 수 있는지에 대한 중요한 결과를 확인하여 금형 설계에 반영할 수 있음을 나타낸 것이다. Fig. 6 (c)는 실제 작업에서는 피니싱 단조용 상부 금형이 하부 금형에 비하여 직경이 작게 설계되어 소재가 상부 금형 사이로 올라오는 모습을 나타낸 것이다. 단조 후 상부 금형과 하부 금형사이에 소재가 충전 되어 단조작업에 상당한 어려움이 발생됨을 확인하였다.

### 3.2 RING 단조품 3차원 해석

자동차의 부품으로 사용되는RING단조품의 단조 공정을 분석하기 위해서 업셋팅(Upsetting) 및 피니싱(Finish) 공정으로 분류하여 3차원 해석하였다.

#### 3.2.1 해석 조건 및 공정(Hammer Press)

RING 단조품은 열간 단조 공정으로 업셋팅 및 피니싱 공정으로 해석하여 공정을 분석하였다. 공정에 사용된 프레스는 햄머 프레스(Hammer Press)로 설정하였다. 또한 소재의 단조온도는 1200도로 단조 금형은 상온으로 하였다. 단조에 사용된 재질은 SCM440및 금형은 SKD61로 MSC.SuperForge의 물성 데이터를 사용하였다. Fig. 7 (a)는 업셋팅 단조 공정으로 연속 3타 공정을 해석하기 위한 것이고, Fig. 7 (b)는 피니싱 단조공정을 연속 7타 공정으로 연계하여 해석하는 것을 나타낸 것이다. 특히, 햄머 프레스는 각각의 공정에서 연속하여 여러 타격하여 단조할 수 있는 특성이 있다.



(a) Upsetting

(b) Finish

Fig. 7 Initial and Final Shape for Simulation

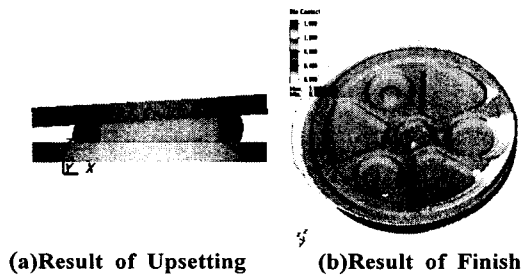
### 3.2.2 해석 결과

Fig. 7은 업셋팅 공정을 해석하기 위해서 성형 해석 전에 모습을 나타낸 것이다. 일반적으로 업

셋팅 단조공정은 상부 금형과 하부 금형이 수평을 이루고 있으나, 본 해석에서는 특수하게 상부금형이 기울어 있을 경우에 업셋팅 단조를 해석하여 최종 RING 을 단조하여 그 결함을 예측하였다.

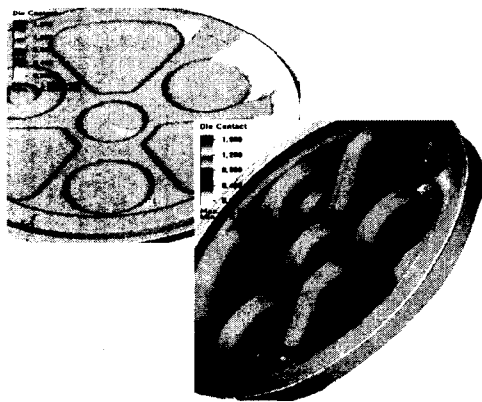
Fig. 8 (a)는 기울어진 업셋팅 단조공정을 해석하여 얻은 결과를 나타내 것으로, 업셋팅 단조 공정에서는 소재의 결함을 발생되지 않았다.

그러나, Fig. 8 (b)는 업셋팅 단조후의 기울어진 소재를 피니싱 단조공정에 연계하여 해석한 결과를 나타낸 것으로, 업셋팅 단조후의 기울어진 소재가 피니싱 공정에서는 소재의 변형 거동이 한쪽 방향으로 치우쳐서 발생되어 RING의 요구되는 형상을 만족하지 못했다. 또한 Fig. 8 (c)에서 나타난 것처럼, 한쪽 부위가 언더 필(Under Fill) 현상이 나타나고 일부분에서는 랩(Lap)이 발생됨을 확인할 수 있었다.



(a)Result of Upsetting

(b)Result of Finish



(c) Result of Under Fill after Finish  
Fig. 8 Forged Shape of CARRIER after 3D Simulation

#### 4. 결론

지금까지 MSC/SuperForge소프트웨어에 의한 2차원 및 3차원 단조 공정을 국내의 업체에 단조품

에 적용하여 사용자가 편리하게 사용할 수 있고, 빠른 시간 안에 해석을 수행하여 단조품의 결함을 분석할 수 있다는 새로운 가능성을 보여주었다.[3]

MSC.SuperForge소프트웨어를 적용한 많은 해외 자료뿐만 아니라, 국내 업체의 단조품에 적용하여 유한요소법과 유한체적법을 연계시킴으로서 체적요소내의 재료변형을 정확히 추적함[4][5]과 동시에 변형된 재료의 자유표면을 연속적으로 경신할 수 있어 소재의 체적변화가 거의 발생되지 않기 때문에 일반 단조는 물론 정밀 성형 단조에 적용도 가능함을 확인되었다. [6][7][8]

즉, 산업현장에서 요구하는 새로운 단조공정 설계 및 단조금형의 다양한 평가가 수치해석에 의해 이루어 질 수 있음을 확인하게 되었다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Jungsin Che., 1999, 유한체적법에 의한 3차원 단조가공해석, KSME, pp 413-417
- (2) Bramley A.,1995, "Forging Modelling", Proc. of the 9th Intern. Cold Forging Congress, pp. 165-168.
- (3) 단조기술개발협동조합, 1997, 비축대칭 단조품의 엑스퍼트시스템 구축, MITI Project.
- (4) Aalborg C., 1996, "Experiments in minimizing numerical diffusion across a material boundary", University of Michigan.
- (5) Koren B., 1996, "Computational forging in the Eulerian formulation at MacNeal-Schwendler (EDC) BV.", Technical Report, Center of Mathematics and Computer Science, Amsterdam.
- (6) Reinikainen T., etc.,1994,"Comparison of two commercial FEM codes in cold extrusion simulation",J. Materials Proc. Tech., Vol.42, pp.137-146
- (7) Hirsh C., 1988, "Numerical computation of internal and external flows", Fundamentals of Numerical Discretization, Vol. 1.
- (8) Roe P., 1981, "Approximate Riemann Solvers, parameter vectors, and different schemes", J. of Computational Physics, V43,pp.357-372.