

# 상변태를 고려한 핫프레스포밍 공정의 유한요소해석

강경필<sup>#</sup>, 이경훈<sup>1</sup>

## FE Analysis of Hot Press Forming Process considering the Phase Transformation

Gyeongpil Kang , Kyunghoon Lee

### Abstract

Hot press forming is an advanced forming technology for manufacturing of complex and crash-resistant automotive parts using ultra high strength steels. The 3-dimensional FE analysis of hot press forming process, in which process the deformation, heat transfer and phase transformation behavior are fully coupled, is carried out. The vast amount of material properties for the FE analysis is obtained from material properties calculation software which is based on thermodynamic calculations. The overall methodology for the FE analysis of HPF process and the analysis results are discussed here.

**Key Words** : Hot Press Forming, Phase Transformation, FEA, Thermodynamic Calculation, Boron Steel

### 1. 서 론

최근 자동차산업은 환경규제에 따른 차량의 경량화 및 승객의 안전성 강화를 위해 초고강도 강판의 사용이 확대되고 있다. 초고강도 강판은 기존의 고강도 강판보다 성형성이 더욱 불리하며, 스프링백량이 커서 냉간성형 방법으로는 자동차의 B-pillar 와 같은 복잡한 부품에 적용하기 어려웠다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 1990 년대 후반에 보론강을 활용한 핫프레스포밍(Hot Press Forming; HPF) 공법이 개발되었다. 이에 따라 초고강도 강판의 낮은 성형성 문제와 과도한 뒤틀림 문제를 해결할 수 있을 뿐 아니라, 금형의 마모감소, 적은 합금을 사용함에 따른 우수한 용접성 확보 등의 이점도 가지게 된다. 현재 자동차 구조용 부품의 대부분이 이 공정에 의해 제조될 수 있으며, 유럽에서는 2008~2009 년 경에는 보론강판의 수요를 30 만톤으로 예측하고 있으며 점진적으로 증가하리라 예측하고 있다[1].

핫프레스포밍 공정은 900 도 이상의 고온에서 오스테나이트화한 후 성형하고 이후 급속히 냉각시켜 인장강도 1600 MPa 수준의 마르텐사이트 조직을 얻는 방법이다. HPF 공정의 유한요소해석과 관련하여 열전달, 상변태와 변형해석을 연계한 해석이 필수적임에도 불구하고, 일부 박사논문[2]을 제외하면 발표된 사례가 적다. 이는 근본적으로 연계해석에 필요한 열 및 기계적 물성들을 냉각에 따라 발생하는 각 상별로, 그리고 각 상에 대해서도 온도별로, 또한 상변태 과정을 묘사하는 변태선도 등의 물성을 확보하기에는 특수장비의 가용여부 외에도 시간, 비용적 측면에서 많은 어려움이 있기 때문이다[3].

본 연구에서는 HPF 공법의 이론적 고찰과 함께 CALPHAD 법에 기반한 물성계산 소프트웨어인 JMatPro 를 활용한 물성 확보방안을 살펴보고, 성형 소프트웨어인 DEFORM<sup>TM</sup>-3D,-HT 를 사용하여 가열로에서 금형까지의 이송중 열전달해석, 성형공정 및 퀴칭공정 해석과 스프링백 해석을 수행한 결과를 논의한다.

1. ㈜마케팅랩

# 교신저자: ㈜마케팅랩, E-mail: kkpil@deform.co.kr

## 2. HPF 공정의 이론적 고찰 및 해석 물성 확보

### 2.1 핫프레스포밍 공정의 이론적 고찰

변형적 측면에서 해석적으로 고려할 사항은 퀘칭후 금형제거시의 스프링백 현상모사와 잔류응력 평가를 위해 탄소성 변형을 고려해야 한다는 점이다(식1, 2). 또한 온도에 의한 체적의 감소외에도 상변태 과정에서의 체적변화도 고려해야 한다(식3, 4). 즉 오스테나이트로부터 생성되는 펄라이트, 마르텐사이트, 페라이트, 베이나이트 등 부생성물이 만들어지며 겪게 되는 결정구조의 변화(마르텐사이트의 경우에는 FCC→BCT, 그 외는 FCC→BCC)에 따른 체적의 변화가 고려되어야 정확한 열처리 거동을 모사할 수 있다. 그리고 변태과정중 외부에서 작용하는 하중이 항복강도 이내인 경우에도 영구변형을 가져오는 변태소성도 고려사항이 될 수 있다(식5).

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{\theta} = \alpha(T - T_0) \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^r = \sum \beta_{IJ} \dot{\xi}_J \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{tp} = \frac{3}{2} K_{IJ} h(\xi_J) \dot{\xi}_J s_{ij}, \quad h(\xi_J) = 2(1 - \xi_J) \quad (5)$$

여기에서  $\dot{\epsilon}_{ij}^e, \dot{\epsilon}_{ij}^p, \dot{\epsilon}_{ij}^{\theta}, \dot{\epsilon}_{ij}^r, \dot{\epsilon}_{ij}^{tp}$  는 각각 탄성변형, 소성변형, 온도, 변태에 의한 체적변화 그리고 변태소성에 의한 변형율속도 성분을 나타낸다.  $\lambda, F, \alpha, T, T_0$  는 각각 비례계수(positive proportionality), 소성포텐셜, 열팽창계수, 온도, 기준온도를,  $\beta_{IJ}, \dot{\xi}_J, s_{ij}$  는 각각 I상에서 J상으로 변태시 길이팽창계수, J상의 변태 체적증가속도, 편차응력을 나타낸다.

열전달 측면에서는 변태과정중의 잠열의 발생과 변형에 의한 소성가공열을 고려해주어야 한다(식6).

$$\rho c \dot{T} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p + \sum L_{IJ} \dot{\xi}_J \quad (6)$$

여기에서,  $\rho C, K, L_{IJ}$  는 열용량, 열전도계수, I상에서 J으로 변태시 발생하는 잠열을 나타낸다.

### 2.2 공정개요

해석 공정은 소재를 가열로에서 꺼내서 프레스로 이송시 냉각, 프레스에서의 성형, 금형내에서의 냉각에 의한 퀘칭, 제하후 스프링백, 공기중 서냉과정으로 나누어 진행하였다. Table 1 에 공정을 요약하였다.

Table 1 Simulation Procedure of Hot Press Forming Process

Operation Number	Operation	Comment
1	Heat Transfer From Furnace to Press	t=0~5sec, $T_{\text{furnace}} = 900^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{environment}} = 20^{\circ}\text{C}$
2	Press Forming	t=5~7sec
3	Quenching	t=7~65sec, $T_{\text{water}} = 20^{\circ}\text{C}$
4	SpringBack	t=65sec
5	Air Cooling	t=65sec~750sec, $T_{\text{environment}} = 20^{\circ}\text{C}$

## 2.3 HPF 공정 해석을 위한 물성값 예측

### 2.3.1 해석에 필요한 물성 개요

상변태를 모사하기 위해서는 각 상별로 물성을 부여할 필요가 있다. 또한 HPF 공정이 오스테나이트화 온도에서부터 상온까지 온도변화가 나타나므로, 각 상에 대해서도 온도별로 물성을 부여해주어야 한다. 각 상별로 필요한 물성은 온도와 변형률 속도에 따른 유동응력과 온도별 탄성계수, 뽀와송비, 열팽창계수, 열용량계수, 열전달계수가 필요하다. 변태와 관련하여, 확산변태에 대한 TTT 선도와 마텐사이트 변태를 나타내는 함수가 필요하고, 각 변태과정에서 발생하는 잠열의 크기, 체적변화와 변태소성관련 물성이 필요하다.

### 2.3.2 JMatPro를 활용한 물성 확보

HPF 공정을 해석하기 위한 물성확보를 위해 JMatPro 라는 물성계산 소프트웨어를 사용하였다. 이는 CALPHAD(Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry)법에 기반한 열역학계산 프로그램의 일종이다. 이 프로그램의 작동 기본 구조는 각 상에 대한 여러 열물리적 물성 및 기계적 물성에 대한 기초 물성을 데이터베이스로 가지고 있으면서, 특정 물성을 모델링하는 식에 따라 각각의 상의 물성을 계산한다. 열역학 계산결과에 따른 평형상태에서의 상의 분율과 물성을 조합하여 전체 물성을 계산하게 된다. 또한 변태를 나타내는 TTT/CCT 선도를 계산하여 줌으로써, 상변태 관련 여러 물성의 확보가 가능하다. HPF 공정해석에 있어 필요한 여러 물성중 변태소성을 제외한 대부분의 물성을 JMatPro 를 통해 확보하였다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 모델

해석 모델은 파이프 형상을 V형 굽힘형상으로 만드는 공정을 선정하였다[3]. 유한요소해석 소프트웨어인 DEFORM<sup>TM</sup>-3D, -HT를 사용하여 열전달 및 상변태를 고려한 변형거동을 예측하였다. 스프링백량을 검토하기 위해서는 잔류응력평가가 수반되어야 하므로, 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 소재는 육면체 요소를 사용한 탄소성체로 선정하였다. 금형의 경우는 강체로 선정하였고, 또한 소재와의 열전달이 중요하기 때문에 비등온 해석을 수행하였다. 모든 공정 해석은 대칭을 감안해 1/4모델로 수행하였다.

### 3.2 결과 고찰

Fig. 1 에는 금형내에서 켄칭 시작단계와 58 초간 켄칭공정을 거쳤을 때의 마르텐사이트 분포를 보였다. 성형직후에도 오스테나이트 100%였으나, 금형과의 접촉점에서 냉각이 빨리 이루어져 마르텐사이트의 생성이 시작되고, 이후 비접촉 지점인 귀부위를 제외한 대부분의 영역에서 마르텐사이트를 생성시키고 있다.

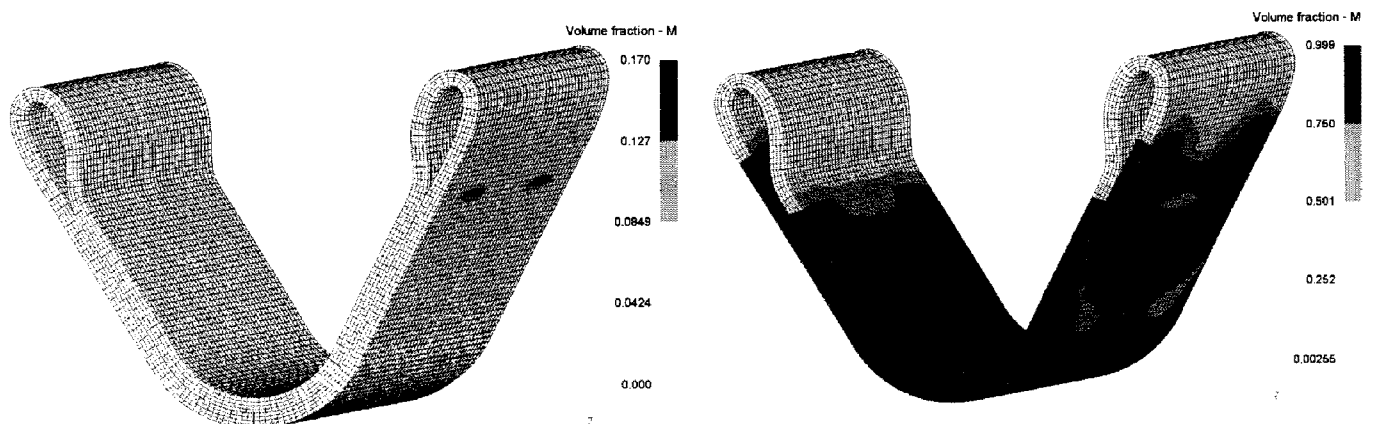


Fig. 1 Martensite volume fraction distribution. Left: at the onset of martensite formation(quenching time = 2sec), Right: at the final step of quenching(quenching time = 58 sec)

Fig. 2 에는 가열로 출구에서부터 서냉단계까지의 체적을 추적한 그래프를 도시하였다. 프레스까지의 이송과정에서는 약 80 도 정도의 온도감소가 있어 이에 의한 체적감소가 있고, 이후 성형이 시작되면서는 금형과의 접촉면이 더 많아지게 되어 냉각속도가 더 커지게 되면서 체적감소가 급격한 기울기로 나타나고 있다. 이후 소재는 급격히 냉각이 되면서 395 도 이하에서 마르텐사이트 변태가 시작 된다. 냉각에 의해서는 체적감소가, 마르텐사이트 변태에 의해서는 체적증가가 나타나게 되는데, 퀴칭 초기단계에서는 체적감소가 계속 일어나나, 퀴칭 후 약 10 초 경과 후부터는 마르텐사이트 발생에 의한 체적증가가 지배적이 되어 온도는 떨어지지만 전체적인 체적은 증가하고 있음을 알 수 있다. 마르텐사이트 형성이 거의 완료되는 시점인 퀴칭후 30 초 이후에는 온도감소에 의한 체적감소만이 지배적으로 나타나고 이후 공기중의 서냉에 의해 체적감소가 나타나게 된다. 이러한 변화에 대한 정보는 공정설계에 매우 유용할 것이다.

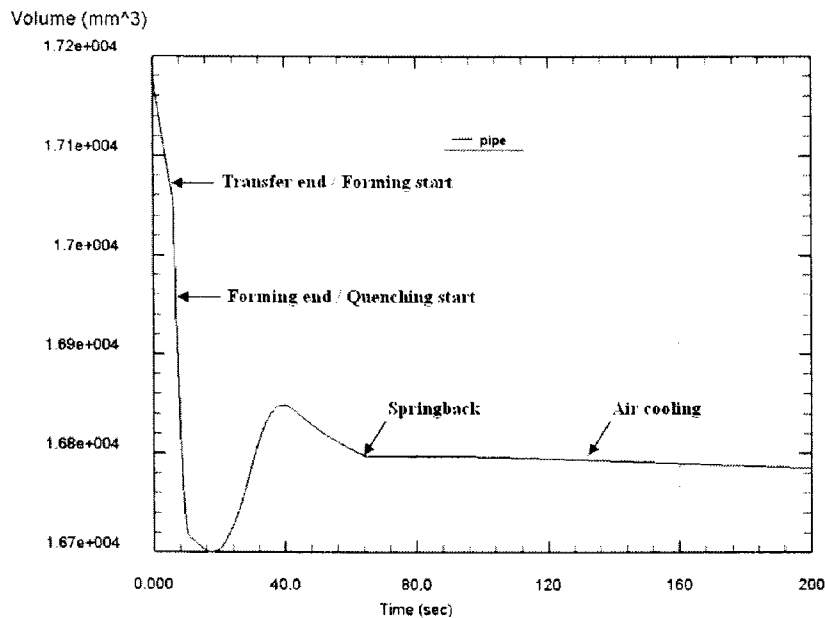


Fig. 2 Volume change of pipe throughout the simulation (1/4<sup>th</sup> model)

#### 4. 결론

HPF 공정에 대해 변형거동과 열전달에 따른 상변태를 동시에 고려한 유한요소해석을 수행하였다. 공정 해석에 필요한 복잡 다양한 물성들은 열역학계산에 기반을 둔 물성계산프로그램을 통해 확보하여 시간적 경제적으로 큰 비용을 들이지 않고 해석을 수행할 수 있었다. HPF 공정에 대한 유한요소해석이 가능하게 됨으로써, 다양한 공정변수와 설비에 대한 검증이 설비제작 전에 이루어질 수 있게 되었다. 이를 통해 마르텐사이트 변태가 완료되는 최적의 공정조건을 도출하여 대량생산의 효율향상에 기여할 뿐 아니라, 금형 내부 채널의 설계, 금형 응력평가를 통한 수명의 예측도 가능하게 되었다. 향후 도전해 볼 과제는 금번에 검토되지 않았던 변태소성의 영향 검토, 응력에 따른 마르텐사이트 시작온도의 변화 고려 등이 될 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Taylan Altan, 2006, Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts Part I: Process methods and uses, Stamping Journal, December, pp. 40~41.
- [2] Paul Åkerström, 2006, Modeling and simulation of hot stamping, Ph. D. Thesis, Lulea University of Technology, Sweden
- [3] 강경필, 이경훈, 김영석, 지민욱, 서영성, 2008, 보론 강판의 핫프레스포밍 공정시 재료 물성 모델러와 DEFORM<sup>TM</sup>-HT를 활용한 상변태 예측, 한국소성가공학회지, 제17권, 제4호, pp. 249~256.