

핫프레스포밍 공정의 냉각치구 설계에 관한 연구

이경훈^{#1} · 곽은정¹ · 김현영² · 이기동³ · 박종규³ · 서창희⁴

Study on the design of quenching fixture in hot press forming process

K. Lee, E.J. Kwak, H. Y. Kim, Gi-Dong Lee, Jong-Kyu Park, Chang Hee Suh

Abstract

In hot press forming process, the desired high strength can be obtained through quenching process after cold forming of product. The quenching process, however, accompanies undesired distortion due to the volume change during the phase transformation as well as by thermal contraction. In this study the numerical simulation with DEFORM3D-Microrstucture is used to predict the deformed shape during the quenching for the quenching fixture design.

Key Words : Hot Press Forming, Phase Transformation, FEA, quenching, fixture design

1. 서론

최근 자동차산업은 환경규제에 따른 차량의 경량화 및 승객의 안전성 강화를 위해 초고강도 강판의 사용이 확대되고 있다. 초고강도 강판은 기존의 고강도 강판보다 성형에 더욱 불리하며, 과도한 스프링백으로 기존의 냉간 성형 방법으로는 복잡한 부품에 적용하기 어려웠다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 1990년대 후반에 핫프레스포밍(Hot Press Forming; HPF) 공법이 개발되었다. 핫프레스포밍 공법은 초고강도 강판의 낮은 성형성 문제와 과도한 뒤틀림 문제를 해결할 수 있을 뿐 아니라, 금형의 마모감소 등의 이점도 가지게 된다. 현재 자동차 구조용 부품의 대부분이 이 공정에 의해 제조될 수 있으며 그 활용도가 점차 확대되어 가고 있다 [1].

핫프레스포밍 공정은 900도 이상의 고온에서

오스테나이트화한 후 성형하고 이후 금형 내에서 급속히 냉각시키는 직접 핫프레스 포밍 공정[3]과 상온에서 대부분의 성형을 완료하고 일부의 변형을 고온 가열후의 냉각 중에 완료하는 간접 핫프레스 포밍 공정이 있다. 간접 핫프레스 포밍 공정의 경우 보다 높은 냉각 특성을 얻을 수 있는 반면 냉각 시 발생하는 변형을 제어해야 하는 문제점이 있다.

본 연구는 간접 핫프레스 포밍 공정에서 발생하는 변형을 최소화할 수 있는 치구 형상 설계 방안 개발을 목적으로 한다. 상변태를 고려한 유한요소해석을 수행함으로써 공정 조건에 따른 형상의 변화를 예측하고 치구 설계에 필요한 정보를 얻고자 한다.

HPF 공정의 유한요소해석과 관련하여 열전달, 상변태와 변형해석을 연계한 해석이 필수적임에도 불구하고, 일부 박사논문[3]을 제외하면 발표

1. ㈜솔루션랩
 2. 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부
 3. (주)화신
 4. 대구기계부품연구원
- # 교신저자: ㈜솔루션랩, E-mail: klee@deform.co.kr

된 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[2]. 본 연구에서는 이전 연구와 같이 CALPHAD 법에 기반한 물성계산 소프트웨어인 JMatPro 를 활용하여 물성 확보하였다. 또한 냉각 해석에 필요한 냉매의 냉각 특성을 파악하기 위해 실험과 유한 요소 해석을 이용한 역추적 기법을 사용하였다.

2. 상변태 공정의 이론적 고찰

2.1 핫프레스포밍 공정의 이론적 고찰

변형적 측면에서 해석적으로 고려할 사항은 켈칭후 금형제거시의 스프링백 현상모사와 잔류응력 평가를 위해 탄소성 변형을 고려해야 한다는 점이다(식1, 2). 또한 온도에 의한 체적의 감소 외에도 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 묘사할 수 있다. 그리고 변태과정중 외부에서 작용하는 하중이 항복강도 이내인 경우에도 영구변형을 가져오는 변태소성도 고려사항이 될 수 있다(식5).

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

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

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

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

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

여기에서 $\dot{\epsilon}_{ij}^e, \dot{\epsilon}_{ij}^p, \dot{\epsilon}_{ij}^\theta, \dot{\epsilon}_{ij}^{tr}, \dot{\epsilon}_{ij}^{sp}$ 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), 소성 포텐셜, 열팽창 계수, 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.

3. 접근 방법

3.1 해석에 필요한 물성 확보

상변태를 수반하는 공정 해석의 경우 각 독립상의 물성뿐만 아니라 상들 간의 변태를 정의하는 변태식, 잠열, 체적변화 등에 따른 물성을 구할 필요가 있다. 본 연구에서는 열역학 계산에 기초한 물성 예측 소프트웨어 JMatPro 를 사용하여 필요한 물성을 구하였다. 사용한 재료는 자동차 강판용 보론강이다.

3.2 열전달 계수의 역추적

켈칭 공정시의 냉각매체의 열전달 특성은 전체 공정 해석의 정확도를 결정하는 가장 중요한 파라미터이다. 이번 연구에서는 열전달 계수 역추적 모듈(DEFORM-Inverse HTC)을 사용하여 실험으로 측정된 온도 이력을 통해 보다 정확한 냉각매체의 열전달 특성을 구하고자 하였다. 냉각 치구를 장착하지 않은 예비 실험을 통해 특정 위치의 온도 이력을 기록하고 이와 가장 일치하는 냉각매체의 열전달 계수를 반복적 해석을 통해 구하였다. 관 형태의 소재 형상에 의해 소재 내부와 외부에서의 열전달 특성이 크게 차이가 날 것

으로 예상되어 내부와 외부 2 개의 영역으로 나누어 열전달 계수를 예측하였다.

3.2 치구 형상 및 위치 변화에 따른 변형 특성 예측

치구 형상 및 위치 변화에 따른 제품 형상 변화의 영향을 예측하였다. 먼저 중심부 치구의 폭을 변화시키면서 중요 치수의 변화를 비교하여 치구폭 변화에 따른 영향도를 분석하였다.

4. 결과

4.1 해석 모델

해석 모델은 성형이 완료된 CTBA (coupled torsion beam axles)의 3차원 형상을 대칭 조건을 고려하여 1/4 만 사용하였다. 해석 공정은 이미 성형된 소재를 가열로에서 가열, 꺼내서 이송 및 치구 체결시의 공냉, 냉각수 내에서의 퀘칭, 제하 후의 스프링백으로 나누어 진행하였다. Table 1에 공정을 요약하였다.

Table 1 Simulation Procedure of Quenching Process

Operation Number	Operation	Comment
1	Heating	t=0~360sec, T _{furnace} = 930 °C
2	Fixture assemble	t=360~375sec, T _{environment} =20 °C
3	Quenching	t=375~385sec, T _{water} =10 °C
4	Spring Back	t=385sec
5	Air Cooling	t=385-3600sec

4.2 예비 실험 및 해석

해석의 정확도 향상과 열전달 조건의 파악을 위하여 냉각 치구를 고려하지 않은 예비실험 및 해석을 실시하였다. 실험에 의해 측정된 온도 이력을 사용하여 본 해석에 필요한 파이프 내부 및 외부의 열전달 계수를 역추적 하였다. Type A은 퀘칭 공정에서의 상변태 현상을 고려하지

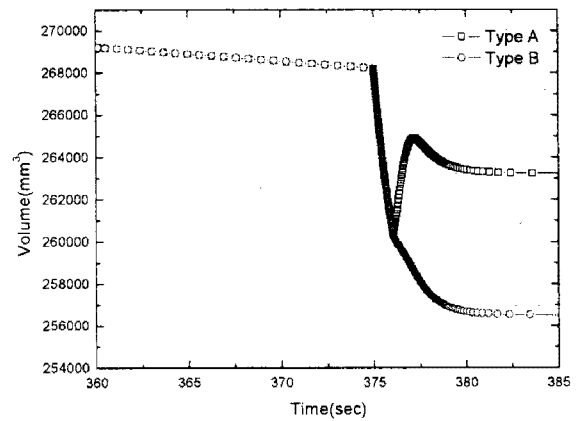


Fig.1 Effect of the phase transformation during the quenching process (a) volume change, (b) Length changes

않은, Type B는 상변태 현상을 고려한 결과이다. Fig 1에서는 냉각공정에 따른 체적 변화를 볼 수 있다. 상변태를 고려한 경우 변태과정에서 발생한 체적 변화로 인해 377초부터 체적 증가를 볼 수 있다. Table 2에 정리된 소재 길이 변화 역시 상변태를 고려하지 않은 경우는 냉각이 종료된 시점에 초기 형상과 거의 유사한 크기로 돌아감을 볼 수 있으나 상변태가 고려된 경우는 1% 정도 증가함을 알 수 있다.

Table 2 Length changes during the Quenching Process

		product length(mm)
Initial(before heating)		1175.00
Before quenching		1194.36
After quenching	Type A	1176.63
	Type B	1187.47

4.3 치구 폭 변화에 따른 형상 변화

치구의 형상 변화에 따른 제품 형상 변화의 첫번째 시도로 중심부의 치구 폭을 변화 시켜가며 냉각 해석을 실시 하였다. Table 3에 보인 바와 같이 퀘칭 후의 주요 부위의 치수는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. Fig 3 (a)에서는 냉각 시작 후

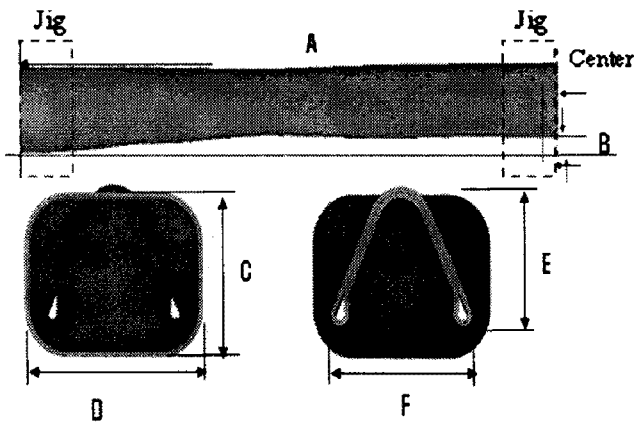


Fig 2. Dimension of quenched product

1.35초 경과 후의 마텐사이트 발생을 보여주고 있다. 소재 끝단과 중심부에서 상대적으로 먼저 마르텐사이트의 발생을 볼 수 있다. 시간에 따른 마르텐사이트의 발생은 각 부위에 따라 큰 차이가 없음을 Fig 3(b)로 확인할 수 있다.

Table 3 Dimensional changes of CTBA with different center jig width (a) 19.5mm, (b) 38.9mm

		A	B	C	D	E	F
Initial		1175.00	15.11	76.90	103.30	65.79	82.10
Final	Center jig (a)	1197.35	15.89	78.13	104.64	66.94	83.73
	Center jig (b)	1197.25	15.86	78.13	104.63	66.8	83.53

4. 결론

HPF 공정의 냉각 공정을 유한요소해석을 사용하여 모사함으로써 냉각치구의 설계에 유용한 데이터를 얻고자 하였다. 제품 부위에 따른 냉각 특성을 파악함으로써 보다 해석의 정확도를 향상할 수 있었다. 냉각 공정에서 발생하는 상변태에 의한 체적 변화를 해석에 고려함으로써 보다 유용한 해석 정보를 찾아 낼 수 있었다. 다양한 설계 변수를 고려한 해석을 통해 최적의 냉각 치구 설계가 가능하리라 생각된다.

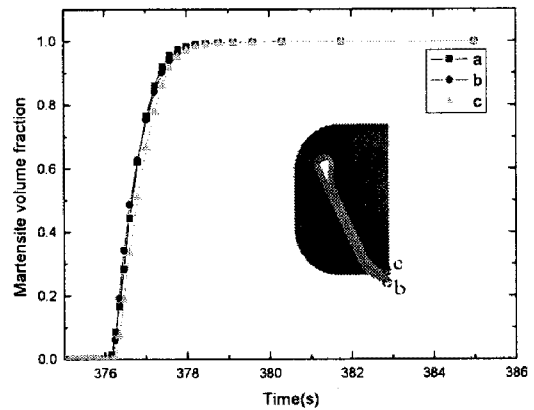
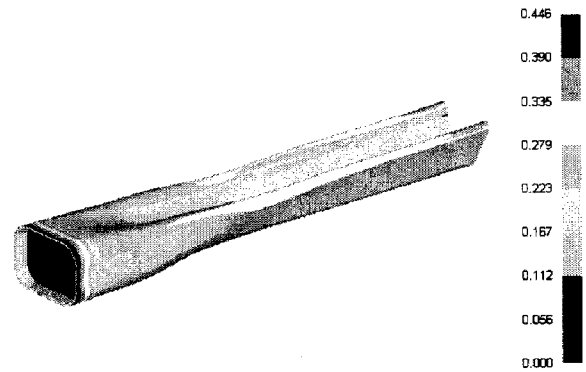


Fig. 3 (a) Martensite volume fraction distribution at the onset of martensite formation(quenching time = 1.35sec). (b) Martensite volume fraction change during the quenching.

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] K.P. Kang, K.H. Lee, Y.S. Kim, M.W. Ji, Y.S. Suh, Prediction of Phase Transformation of Boron Steel Sheet during Hot Press Forming using Material Properties Modeler and DEFORM-HT, Transactions of Materials Processing, Vol. 17, No. 4, pp. 249~256.
- [3] Paul Åkerström, 2006, Modeling and simulation of hot stamping, Ph. D. Thesis, Lulea University of Technology, Sweden