

재료 물성 모델러와 Abaqus를 활용한 핫 프레스 포밍 후의 보론 강판내 잔류응력의 예측

지민욱¹ · 서영성² · 김영석³

Prediction of Residual Stresses in the Boron Steel Sheet after Hot Press Forming using Material Properties Modeler and Abaqus

M. W. Ji, Y. S. Suh and Y. S. Kim

Abstract

The residual stress generated in the boron steel blank formed via hot press forming process was predicted by JMatPro, a material property modeler, and Abaqus. The numerical predictions were compared by the experimental measurements obtained by the instrumented indentation. Both the predicted and measured principal stresses monitored at the outer surface of central bending position were qualitatively in good agreement. It was concluded that the residual stresses generated from hot forming process is not negligible as it has been generally assumed, although the spring back deformation is quite small. This should be specially considered from the part design stage since the tensile nature of the residual stress exhibited on the surface may lead to the stress corrosion cracking.

Key Words : Hot Press Forming(핫 프레스 포밍), Boron Steel(보론강), Material Properties Modeler(재료 물성 모델러), Finite Element Analysis(유한요소해석), Spring Back (스프링 백), Residual Stress(잔류응력), Instrumented Indentation(계장화 압입시험), JMatPro, Abaqus

1. 서론

최근 들어 자동차 산업에서 차량의 경량화와 안전성 향상을 동시에 만족시키기 위해 핫 프레스 포밍(Hot press Forming) 공법을 활용하고 있다 [1-2]. 이는 열간 프레스 가공 직후에 급속냉각을 수행하여 마텐사이트(Martensite) 조직을 고온 성형된 블랭크에 형성하게 함으로써 강판의 강도를 향상시키는 방법으로서, 이 공정을 거친 블랭크는 통상 인장강도가 1600 MPa정도가 되어 기존의 자동차용 강판 부품보다 강도가 4~5배 높으면서 무게 또한 40%까지 줄일 수 있다. 이렇게 산업계에 핫 프레스 포밍 공법이 활용됨에 따라 금형

및 공정설계를 효과적으로 수행하기 위한 전산적 해석에 대한 연구도 진행되어 왔다. Eriksson[3] 등은 보론강의 고온 성형을 모델링하기 위한 기계적 성질을 측정하고 평가하는 방법을 보이고, 이들 데이터를 이용하여 고온 굽힘을 받는 얇은 벽 튜브 보의 등은 유한요소 시뮬레이션과 연속 냉각 중 압축을 받는 원통형 시편의 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과들이 실험적 결과와 잘 들어 맞음을 보였다. 김형섭[4] 등은 열-탄소성 유한요소법을 이용하여 프레스경화 공정 중 제품의 온도변화, 변형과정, 상변화 과정 및 최종제품의 기계적 성질을 해석 하였고 적절한 공정 조건을 제시하였다. Tekkaya[5] 등은 열과 기계적 거동을

1 발표자: 한남대학교 대학원 기계공학과

2 교신저자: 한남대학교 기계공학과

E-mail: suhy@hnu.kr

3 경북대학교 기계공학과

분리(decoupled)하여 두 개의 유한요소 모델(MARC 2005[®][6] 및 PAMSTAMP 2G[®] [7])로 핫 프레스 포밍을 해석함으로써 열-기계적 거동 결합(coupled) 시뮬레이션의 경우에 비하여 계산 시간을 80% 단축하였다. 강정필 등[8]은 최근에 개발된 JMatPro[®][9-11]라는 재료 성질 및 거동 모델러 소프트웨어를 활용하여 전산적으로 예측한 물성값을 확보하고, 이를 이용하여 상변태 및 열전달을 고려한 핫 프레스 포밍 공정을 DEFORMTM-HT 2D [12]로 해석하였다.

본 연구에서는 상기 연구들에서 다루지 않은 스프링백 후의 잔류응력을 예측 및 확인하는데 있다. 통상 핫 프레스 포밍에서는 스프링백 후의 기하적 형상 변화가 작아 해석에서 무시하지만, 템칭 후 유동응력이 급격히 증가하기 때문에 잔류응력의 크기는 무시할 수 없을 것으로 추정되어, Abaqus v.6.7을 활용한 유한요소법과 계장화 압입시험으로 측정된 실험 결과로 규명하고자 한다.

2. 실험

유한요소해석에 적용한 공정은 파이프의 굽힘 성형으로서, 사용된 보론강 소재는 두께 2.5 mm, 외경 90 mm, 길이가 100 mm인 짧은 파이프 형태이다. 이 원통형 보론강 블랭크를 전기로에서 900~910℃까지 가열, 10분을 유지하여 조직을 완전히 오스테나이트화한 후, 소재를 프레스로 이송하여 V형으로 성형한 직후 담금질을 실시하고 이후 스프링백을 허용하였다. 블랭크에 마텐자이트 조직을 형성시키려면 냉각속도가 비교적 빨라서, 블랭크가 약 150℃ 정도가 될 때까지 충분한 담금질이 이루어져야 한다. 스프링백의 정도를 비교하기 위하여 냉간 프레스 포밍과 핫 프레스 포밍 두 가지를 수행하였다. 금형의 굽힘 각도는 60°이며, 금형 각도에 대한 스프링백 변화율이 각각 5.8%와 2.5%로 측정되어, 예측되던 바와 같이 핫 프레스 포밍에서의 스프링백 각도가 냉간 성형에 비하여 훨씬 더 작음을 관찰할 수 있었다(Fig. 2).

3. Abaqus를 활용한 스프링백 거동 및 잔류응력 예측

3.1 보론강의 기계적 성질

본 연구에서 사용된 보론강의 화학적 조성과

기계적 물성을 각각 Table 1 과 Table 2에 나타내었다. 상온과 고온의 물성은 단축인장 시험을 수행하여 물성을 확보했으며 담금질시의 물성은 승온 과정에서의 물성과 다르기 때문에 물성확보의 난점이 있어 재료물성치 모델러인 JMatPro[®]를 사용하여 상변화를 고려한 물성치를 확보하였다.

Table 1 Chemical composition, melt analysis (mass%)

Alloy	C	Mn	Si	Cr	B
Boron	0.19	1.39	0.18	-	0.002

Table 2 Material properties

Modulus of elasticity	200 GPa
Poisson's ratio	0.29
Yield stress	485 MPa
Ultimate strenght	578 MPa
Elongation	26 %

3.2 유한요소모델링

스프링백 현상을 해석하고 잔류응력을 예측하기 위해 상용 소프트웨어인 ABAQUS 6.7을 이용하여 블랭크 및 금형 형상을 각각 탄소성 및 강체 평면변형을 가정하여 모델링하였다. 대칭을 고려하여 1/2모델을 해석에 적용하였다. 편치와 하부 금형은 강체로 가정하였고 편치와 시편 사이, 그리고 시편과 하부 금형 사이의 마찰계수는 0.2로 가정하였다. 상온 성형과 핫 프레스 포밍의 두 가지 조건을 고려하였고 소프트웨어 활용의 제약상 블랭크 이송, 성형 및 스프링 백의 경우, 등온 변화를 가정하였다.

3.3 잔류응력 측정

잔류응력을 측정하기 위하여 계장화 압입 시험기 AIS3000(Advanced Indentation System 3000)[13]을 이용하여 스프링 백 후의 잔류응력을 측정하였다. 계장화 압입 (instrumented indentation) 시험법[14]은 재료의 기계적 성질, 잔류응력 및 파괴인성을 평가하는데 있어 X-Ray 방법, 홀 드릴링(hole drilling) 방법이나, 절단법 등, 다른 시험법에 비해 간편하고 비파괴적이며 국소취약부분의 평가 등에 있어 유리하다. 이 방법의 가장 큰 장점은 비파괴적인 방법이라는 점과 실제 소재의 직접적인

변형거동으로 잔류응력을 측정하는 것이다. 실험 대상에 100 μ m 정도의 작은 압흔만을 남기고 시험하는 것이 특징이며, 기계적인 측정법이기에 정량적인 값을 찾을 수 있다는 장점을 지니고 있다.

시험위치는 Fig. 1 과 같이 변형이 가장 많이 일어나는 시편의 정 중앙 굽힘 부분으로 설정하였다.

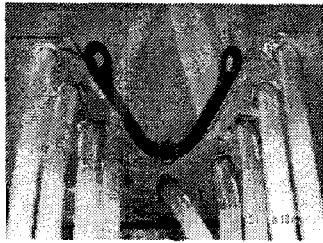
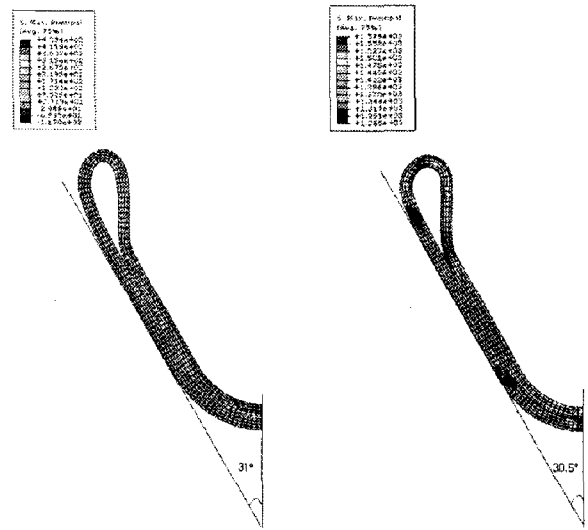


Fig. 1 Position for the residual stress measurement

4. 결과 및 고찰

고온 및 상변태 이후의 물성데이터를 JMatPro를 이용하여 예측한 후, Abaqus v.6.7에 적용함으로써 스프링백 거동과 잔류응력을 예측해 보았다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 상온과 고온조건의 스프링백이 각각 31°와 30.5°로 나타났으며, 1/2모델링을 적용하여 해석하였기에 스프링백 각도는 각각 62°와 61°이다. 상온조건에서 성형한 시편의 스프링백 각도와는 약간의 차이를 보이고 있지만 고온조건을 적용한 스프링백 각도는 거의 유사하게 예측되었다. Fig. 2에서는 또한 두 가지 경우의 주응력 방향 잔류응력 분포를 보여주며, 잔류응력 측정 위치인 굽힘 부분의 주응력은 상온과 핫프레스 포밍 조건하에서 각각 108 MPa와 1567 MPa로 예측 되었다.

계장화 압입시험을 통하여 잔류응력을 측정된 결과, Table 3과 같이 상온에서 성형한 시편의 주응력 방향 잔류응력의 평균은 147 MPa 이며, 핫프레스 포밍으로 실험한 시편의 잔류응력의 평균은 1592 MPa 를 나타냄으로써, 상온의 경우, 유한요소해석과 실험을 통한 잔류응력의 값의 차이가 그리 작지 않지만, 상대적으로 그리고 정성적으로 일치하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 핫프레스 포밍 제품의 경우, 비록 스프링백의 양은 작지만, 성형된 부품 속에 내재된 잔류응력의 크기가 무시할 수 없는 크기임을 보였다.



(a) Cold forming

(b) Hot press forming

Fig. 2 Spring back and residual stress of ABAQUS

Table 3 Assessment of residual stress (RT: Room Temperature, HT: High Temperature)

Room Temperature	Residual Stress	Hot Temperature	Residual Stress
RT_001	140 MPa	HT_001	1580 MPa
RT_002	157 MPa	HT_002	1594 MPa
RT_003	144 MPa	HT_003	1602 MPa
Average	147 MPa	Average	1592 MPa

5. 결론

핫 프레스 포밍 공정에서 보론강 블랭크의 스프링백 후 잔류응력에 대해 전산적인 방법(Abaqus)과 실험적 방법(계장화 압입시험법)으로 고려하였다. 고온 및 상변화 물성 데이터를 확보하기 위해 JMatPro[®]를 활용하였다. 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 상온 및 핫 프레스 포밍 조건에 따라 보론강 블랭크에 내재된 잔류응력 값이 큰 차이를 보이고 있으며, 예측치와 실험치가 정성적으로 잘 들어 맞음을 관찰하였다.

(2) 이를 통해 핫 프레스 포밍 제품의 경우, 비록 스프링백의 양은 작지만, 성형된 부품 속에

내재된 잔류응력의 크기가 종래에 가정하던 바와 같이 무시할 수 없는 크기임을 입증하였다. 잔류응력의 크기가 크고 그 방향이 인장이므로, 응력부식 균열(stress corrosion cracking)이 일어나기 쉬워, 이에 대한 대책이 부품 설계 단계에서부터 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] T. Altan, 2006, Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts Part I: Process methods and uses, Stamping Journal, December, pp. 40-41.
- [2] 조열래, 오진근, 김홍기, 박성호, HPF용 강재 요구 특성 및 개발 동향, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집 (2007) pp. 92-102.
- [3] M. Eriksson, M. Oldenburg, M. C. Somani, L. P. Karjalainen, 2002, Testing and evaluation of material data for analysis of forming and hardening of boron steel components, Modelling and simulation in materials science and engineering, Vol. 10, pp. 277-294.
- [4] 김형섭, 서민홍, 김성주, 백승철, 방원준, 2001, 프레스경화 공정 시 강판 열-변형 거동의 유한 요소해석과 실험적 연구, 대한금속학회지 39권 9호, pp. 1076-1083.
- [5] A. E. Tekkya, H. Karbasian, W. Homberg, M. Kleiner, 2007, Thermo-mechanical coupled simulation of hot stamping components for process design, Production Engineering Research and Development, Vol, 1, pp. 85-89.
- [6] Marc 2005, 2005, <http://www.mscsoftware.com/products/marc.cfm>.
- [7] PAMSTAMP 2G, 2007, <http://www.esi-group.com/newsite/products/metal-forming/pam-stamp-2g>.
- [8] 강경필, 이경훈, 김영석, 지민욱, 서영성, 2008, 보론 강판의 핫 프레스 포밍 공정 시 재료 물성 모델러와 DEFORMTM-HT 를 활용한 상 변태 예측, 한국소성가공학회 논문집, 심사 중.
- [9] JMatPro[®], 2007, <http://www.sentessoftware.co.uk>.
- [10] Sente Software, 2007, JMatPro introductory manual.
- [11] N. Saunders, Z. Guo, X. Li, A. P. Miodownik, J. - Ph. Schillé, 2003, Using JMatPro to model materials properties and behavior, JOM, December, pp.60-65.
- [12] DEFORMTM-HT 2D HT, 2008, <http://www.deform.com/>.
- [13] AIS3000, <http://www.frontics.com/kor/products/products01.php>.
- [14] J. Jang, D. Son, Y. H. Lee, Y. Choi and D. Kwon, 2003, Assessing welding residual stress in A335 P12 steel welds before and after stress-relaxation annealing through instrumented indentation technique, Scripta Materialia, Vol. 48, pp. 743-748.