

보론강 핫 프레스 포밍 공정에 대한 가상생산 응용 및 검증

서 영 성^{*1)} · 지 민 욱¹⁾ · 이 경 훈²⁾ · 김 영 석³⁾

한남대학교 기계공학과¹⁾ · (주)솔루션랩²⁾ · 경북대학교 기계공학과³⁾

Application and Verification of Virtual Manufacturing to Hot Press Forming Process with Boron Steel

Yeong Sung Suh^{*1)} · Min Wook Ji¹⁾ · Kyung Hoon Lee²⁾ · Young Suk Kim³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

²⁾Solution-Lab Company, 1408 Doonsan-dong, Seo-gu, Daejeon 302-700, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Kyungpook University, Daegu 702-701, Korea

(Received 12 June 2009 / Accepted 6 October 2009)

Abstract : A virtual manufacturing system that is composed of JMatPro, a material modeler and DEFORMTM-HT, a finite element package is applied to the hot press forming process: high temperature material properties for each phase such as flow stress, elastic modulus, Poisson's ratio, thermal expansion coefficient, in addition to TTT curve are predicted by JMatPro and taken into DEFORMTM-HT to predict the material behavior considering phase transformation and heat transfer simultaneously. In order to verify the accuracy of computation, the residual stress and the springback were compared with the experimental measurements. Both the predicted and measured principal residual stresses and amount of springback were in good agreement. It was also found that the residual stresses generated from hot press forming are not negligible as it has been generally assumed, although the springback deformation is quite small.

Key words : Hot press forming(핫 프레스 포밍), Virtual manufacturing(가상 생산), Boron steel(보론강), Material properties modeler(재료 물성 모델러), Elastic-plastic finite element analysis(탄소성 유한 요소 해석), Residual stress(잔류 응력), Instrumented indentation test(계장화 압입 시험), JMatPro, DEFORMTM-HT

1. 서 론

자동차 산업의 발달에 따라 배기가스 저감을 위한 경량화와 승객의 안전을 동시에 만족시키기 위하여 점차로 고강도 및 초고강도 강판(ultra-high-strength steel) 사용이 확대되고 있다. 그러나 이러한 강판들은 큰 성형력이 요구되고, 스프링백이 작지 않으며, 성형성이 낮아 복잡한 부분을 성형하기 어려운 단점을 가지고 있다. 최근 들어 이러한 문제를 해결하기 위해 핫 프레스 포밍(Hot Press Forming, HPF) 공법이 개발되어 활발히 사용되고 있다.¹⁻³⁾ 이

는 22MnB5같은 보론강 블랭크를 900°C이상의 고온에서 오스테나이트화하여 성형한 후, 급랭 시켜(담금질) 마르텐사이트 조직을 얻는 방법이다. Fig. 1에 핫 프레스 포밍 공정시 온도 대 시간 선도를 보론강 조직의 상태변화와 함께 보인다.⁴⁾ 최근까지 발표된 핫 프레스 포밍에 관한 연구는 주로 재료의 고온 성형 모델링에 필요되는 공정변수, 기계적 물성 측정 및 평가 방법^{2,3)}이나, 김형섭,⁵⁾ Naderi⁶⁾ 등, Tekkaya⁷⁾ 등이 수행한 공정의 개선 및 모델링을 위한 실험 및 이를 검증하기 위한 전산적인 연구가 주를 이루었다. 그러나 이러한 연구에서는 고온 재료 물성값 및 상변태를 충분히 고려하지는 못하여 실무에 적용할

*Corresponding author, E-mail: suhy@hannam.kr

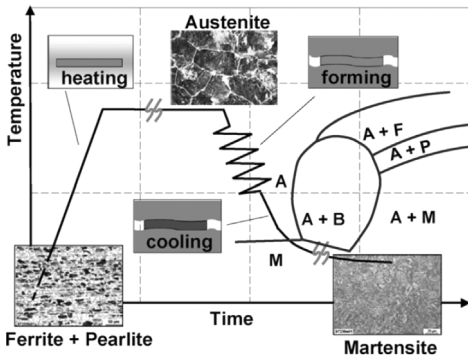


Fig. 1 Temperature vs. time diagram of the hot press forming process⁴⁾

수 있는 정확도를 보여주지는 못하였다. 최근 들어 강경필⁸⁾ 등은 재료의 물성값 모델러인 JMatPro와 열변형 유한요소해석프로그램인 DEFORMTM-HT를 활용하여 핫프레스 포밍의 전 공정을 강소성 가정으로 시뮬레이션 할 수 있음을 보여주었으며, 채명수⁹⁾ 등은 핫 프레스 포밍 부품 표면의 경도 값을 측정하고 이를 JMatPro 및 강소성을 가정으로 한 DEFORMTM-HT 계산으로부터 예측된 경도 값과 비교하여 부분적으로 계산을 검증한 바 있다.

본 연구에서는 계장화 압입시험으로 핫 프레스 포밍 부품의 잔류 응력을 측정하고, 이를 탄소성을 가정으로 한 가상생산 결과와 비교하였으며, 이와 더불어 스프링백의 크기도 비교하였다. 선행 연구에서와 마찬가지로 JMatPro를 활용하여 전산적으로 예측된 고온 물성 값을 확보한 후, 상변태 및 열전달을 고려하여 전 공정을 DEFORMTM-HT로 해석하였다.

2. 실험

2.1 핫 프레스 포밍 및 스프링백 측정

강경필⁸⁾ 등과 채명수⁹⁾ 등, 그리고 본 연구에서 사용된 보론강 소재는 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 두



Fig. 2 Hot Press Forming Process: (a) heated blank starting to form and (b) quenched and unloaded blank

께 2.5 mm, 외경 90 mm, 폭이 90 mm인 짧은 파이프 형태이다. 이를 핫 프레스 포밍하여 V형 부품으로 성형하였다. 원통형의 보론강 블랭크를 전기로에서 900~910°C까지 10분간 가열을 하여 오스테나이트 화한 후, 소재를 이송하여 성형과 급랭을 동시에 실시한 후 하중을 제거하였다(Fig. 2(b)). 스프링백의 크기를 비교하기 위하여 냉간 및 핫 프레스 포밍 두 가지를 수행하였다. 금형의 곡률부 각도는 60°이며, 금형 각도에 대한 스프링백 변화율이 각각 5.83% 와 2.5%로 측정되어, 예측되던 바와 같이 핫 프레스 포밍에서의 스프링백 각도가 냉간 프레스 포밍에 비하여 훨씬 더 작음을 관찰할 수 있었다.

2.2 잔류 응력 측정

잔류 응력을 측정하기 위하여 본 연구에서는 최근에 한국에서 개발되어 KS(KS B 0951) 및 ISO 표준(ISO TR 29381)에 등재된 계장화 압입 시험법(Instrumented indentation test)을 수행하였다. 계장화 압입시험법은 소재에 가해지는 하중과 변위를 연속적으로 측정하여 얻어지는 압입하중-변위곡선의 분석을 통해 잔류 응력을 비파괴적으로 측정하는 방법이다.¹⁰⁾ Fig. 3과 같이 시험 대상에 동일한 하중으로 압입을 진행하게 될 경우, 잔류 응력의 존재에 따라 그 압입 깊이는 변화하게 된다. 압축 잔류 응력이 존재하게 되면 압입 깊이가 작아지고, 인장 잔류 응력이 존재하게 되면 압입 깊이가 커지게 된다. 이러한 기본 개념을 도입하여 압입 하중과 변위를 동

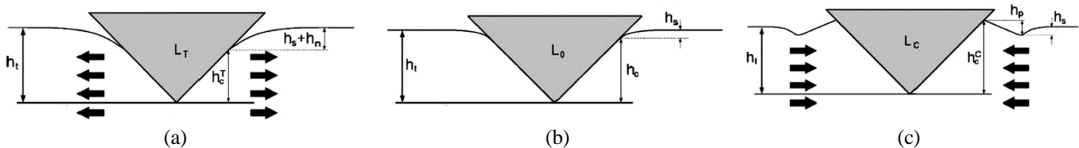


Fig. 3 Theoretical surface morphologies around the contact for (a) tensile, (b) stress-free and (c) compressive stress states¹¹⁾

시에 수집하여 잔류 응력이 존재하지 않는 상태의 곡선과 비교하여 Fig. 4와 같이 잔류 응력을 평가할 수 있게 된다. 잔류 응력이 존재하지 않는 무응력 상태와 존재하는 상태의 곡선으로 특정한 변위에서의 하중 차를 응력 계산 기본 수식에 넣어 최종 잔류 응력을 계산한다.¹¹⁾ 본 연구에서는 표면 조도를 확보하기 위해 폴리싱을 수행하였다. 하중 인가 속도는 0.3 mm, 최대 압입 하중은 50 kgf, 최대 압입변위는 150 μm 이며, 하중인가- 제거를 15회 반복하였다. 시험 위치는 Fig. 5에서 보인 바와 같이 평면 변형율이 가장 잘 구현되고, z방향으로 최소(최대 압축) 잔류 주응력($\sigma_3 = \sigma_z$)이 발생하는 바닥 표면의 정 중앙 굽힘 부분으로 선정하였다. Table 1에 보인 바와 같이 냉간 성형된 시편과 핫 프레스 포밍된 시편 모두 잔류 응력 상태가 압축이며, 핫 프레스 포밍된 시편의 잔류 응력이 냉간 성형 시편에 비해 약 2배 이상 큰 것을 보이고 있다. 통상 스프링백 양이 작아 그 영향을 무시하는 핫 프레스 포밍에서 오히려 냉간 성형

Table 1 Measured residual stress in z direction(σ_z) as shown in Fig. 5

Tested Blank	Cold Forming	Tested Blank	Hot Press Forming
RT_001	-313.3 MPa	HT_001	-685.8 MPa
RT_002	-311.8 MPa	HT_002	-686.6 MPa
RT_003	-306.1 MPa	HT_003	-693.9 MPa
Average	-310.4 MPa	Average	-688.7 MPa

시보다 잔류 응력이 더 큼을 주목할 필요가 있다. 또한, 이렇게 높게 평가된 압축 잔류 응력은 핫 프레스 포밍된 재료의 내구특성에 영향을 미칠 수 있다.¹²⁾

3. 가상생산 모델링

핫 프레스 포밍 가상 생산의 엔진인 유한요소해석을 위하여 먼저 JMatPro에 보론강의 성분과 상온 항복강도, 결정립 크기 등을 입력하여, DEFORMTM-HT에서 요구되는 TTT선도, 각 상에서의 고온 물성 값 및 유동곡선 입력 데이터를 얻은 후, 열전달 및 상 변태를 고려한 탄소성 유한요소해석을 실시하였다. Fig. 6과 같이 블랭크 및 금형 형상을 각각 탄소성 및 강제요소로 모델링 하였다. 블랭크의 폭 방향으로 변형 및 열 변형이 없다고 가정하여 평면 변형을 가정하였고, 대칭을 감안해서 1/2모델을 해석에 적용하였다. 가열로에서 900°C의 온도를 유지하여 오스트나이트화 된 블랭크를 금형까지 이송되는 시간은 5초로 설정하였고, 2초 성형, 금형 내에서 급랭 과정을 55초로 적용하였다. 펀치를 제거한 후 스

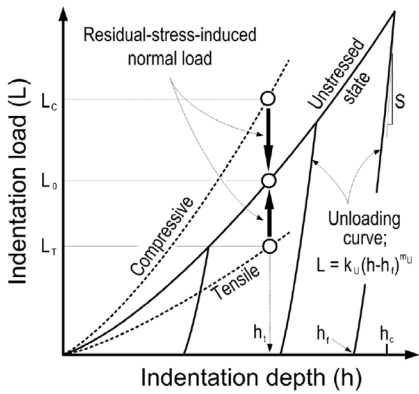


Fig. 4 Variation of indentation loading curves with changes in stress states¹¹⁾

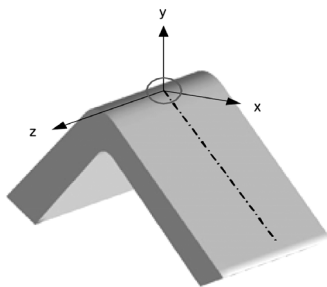


Fig. 5 Position for the residual stress measurement

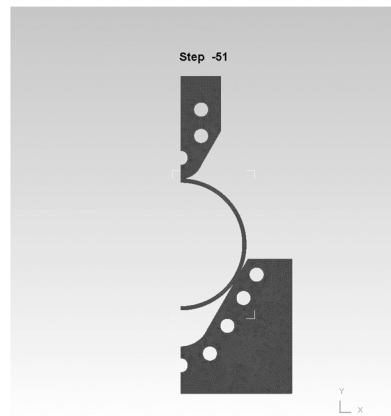


Fig. 6 Finite element model of hot press forming process

프링백이 일어나며 20분의 공랭 과정을 적용하였다. 주변 대기 온도는 25°C, 냉각수 온도는 20°C, 모든 접촉부위의 마찰계수는 0.3으로 가정하였으며, 대류계수는 6 N/sec/mm²/°C, 객체간 열전달계수는 11 N/sec/mm²/°C로 가정하였다. 열전달 해석을 위해서는 각 상의 온도에 따른 열 물성 값인 열전도계수, 열용량을 입력하였다. 또한 변형해석을 위하여 각 상의 온도별 탄소성 물성 값인 탄성계수, 프와송비, 열팽창계수, 고온 유동응력 곡선을 입력하였고, 상변태 해석을 위해 TTT선도, 마르텐사이트 함수, 잠열, 상변태에 따른 체적변화 등을 고려하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 7은 성형 이후 급랭이 시작되는 시점의 냉각 속도 분포(a)와 온도 변화 분포(b)를 나타낸다. 펀치 및 하부 금형에 수냉이 되므로 이들과 밀착되는 블랭크 끝은 부분의 중간 지점의 냉각속도가 빠르며 (-132 °C/s), 날개 상부의 접힌 부분은 금형과의 접촉이 없어 냉각속도가 느린(-16.2 °C/s) 것을 확인하였다. 따라서 냉각속도가 빠른 부분부터 마르텐사이트 조직의 발생이 시작(Ms = 395 °C)되며, 블랭크 끝은 부분의 중간 지점에서 마르텐사이트가 형성되기 시작하는 것을 관찰하였다.

급랭 시간에 따른 마르텐사이트 분포를 Fig. 8에 보인다. 금형이 잘 닿는 부위는 마르텐사이트가 신속히 형성되었으며, 접촉이 되지 않은 날개 부분은 급랭을 30초간 실시한 경우(a) 마르텐사이트 분율

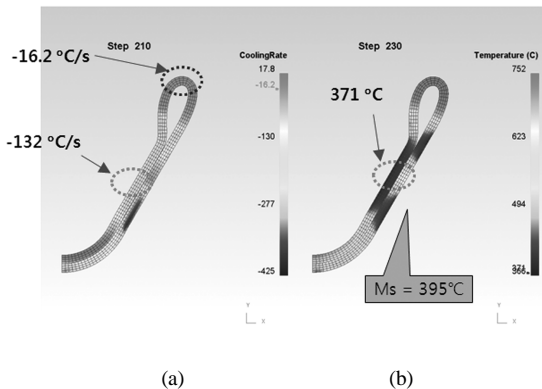


Fig. 7 Distribution of (a) cooling rate and (b) temperature on the blank at the beginning of quenching

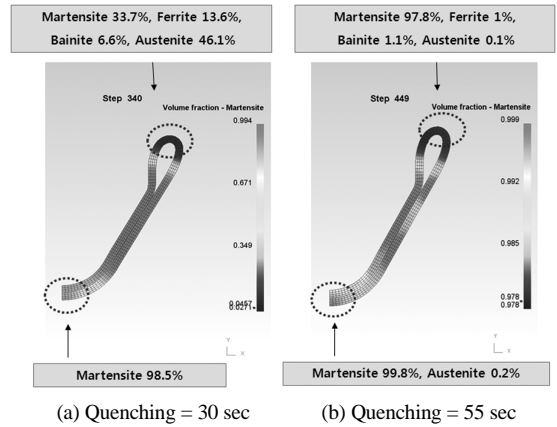


Fig. 8 Volume fraction of martensite depending on the performance of quenching time

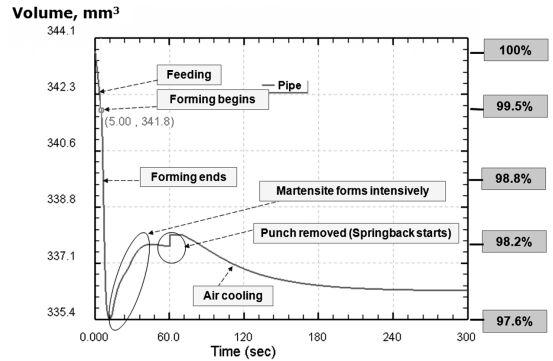


Fig. 9 Volume fraction of martensite depending on the performance of quenching time

이 33.7% 밖에 되지 않으나, 급랭시간을 증가시켜 55 초까지 실시한 경우(b) 마르텐사이트 분율이 97.8%까지 증가하는 것을 보여준다. 앞의 결과들과 강경필(8) 등이 보인 결과를 통하여, 금형의 접촉 정도, 급랭 시간, 냉각수의 냉각 효과(8) 등이 최종 성형부품의 강도 및 정도에 작지 않은 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. Fig. 9는 가열로 출구에서부터 공냉단계까지의 블랭크 체적을 추적한 그래프를 나타낸다. 가열로에서 프레스까지의 이송과정에서 약 80°C의 온도가 감소하여 체적이 전체적으로 감소하며, 이후 성형이 시작되면서 금형과의 접촉이 광범위해짐에 따라 냉각속도가 커지면서 체적이 급격히 감소한다. 블랭크가 급랭되면서 395°C 이하에서 마르텐사이트 변태가 시작되고 마르텐사이트 형성과 함께 체적이 증가한다. 성형 및 급랭 후 펀치를 제거

하면 체적이 추가로 상승한다. 날개 끝 부분을 제외한 대부분의 블랭크 영역에서 마르텐사이트 형성이 거의 완료되는 시점인 급랭 후 30초 이후에는 온도 감소에 의한 체적 감소만이 나타나고 이후 공랭에 의해 체적이 감소하게 된다.

공정단계에 따른 블랭크의 하단 부분의 잔류 응력을 살펴보니, 성형 직후 블랭크의 하단 잔류 응력 측정 지점(Fig. 5)에서의 σ_z 는 113 MPa로 예측되었다. 급랭 직후, 마르텐사이트 형성이 광범위하게 이루어져, 강도 및 체적이 증가하나, 블랭크가 계속 급랭과 펀치 사이에서 구속되어 있기 때문에 압축되므로 동일 부분에서의 σ_z 는 -809 MPa로 변화하였다. 펀치를 제거하면서 탄성회복이 일어나고, 체적이 약간 더 상승한 후, 공랭에 의해 체적이 서서히 감소하면서 잔류 응력의 크기는 -715 MPa로 낮아지는 것이 예측되었다. 이와 같은 관찰을 통해 상변태 및 온도에 의한 체적의 변화가 잔류응력의 크기에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

핫 프레스 포밍 공정에서 발생하는 잔류응력과, 동일한 보론강을 냉간 성형(cold forming)으로 가공하는 경우에 발생하는 잔류 응력도 계산하여 비교해 보았다. 블랭크와 하부 급형 사이의 마찰계수를 0.05로 가정할 경우, 성형 직후의 측정지점에 걸리는 σ_z 는 -704 MPa이며, 스프링 백을 거친 후에는 -272 MPa로 예측되었다. Table 2에 잔류응력 및 스프링백의 실험값과 가상생산으로부터의 예측 값을 나타낸다. 냉간가공의 경우 오차가 더 크지만, 두 경우 모두 실험과 유사한 결과를 보여줌으로써 제한적으로나마, 가상생산에서의 예측 결과가 비교적 정확한 것임을 확인하였다. 냉간 성형일 때 더 큰 차이를 보이는 부분적 이유는 시편이 제조될 때 파이프가 굽힘 소성가공을 거쳤기 때문에 초기 잔류 응력을 내재하고 있으며, 또한 판재가 제조될 때 필수적으로 갖게 되는 소성이방성을 가지고 있기 때문인 것으로 짐작할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 정보가 없어, 초기 잔류 응력이 0이며, 재료가 등방성임을 가정하여 계산하였다. 핫 프레스 포밍에서는 재료를 오스테나이트 온도까지 올리면서 잔류 응력이나 소성이방성이 없어지게 되어 이러한 부분을 고려하지 않아도 된다.

Table 2 Experimental and numerical residual stress in z-direction(σ_z) at the position shown in Fig. 5, and springback angle(θ_s) (HPF: Hot Press Forming, CF: Cold Forming)

		Experiment	Numerical	Variation (%)
σ_z	HPF	-689 MPa	-715 MPa	3.82%
	CF	-310 MPa	-272 MPa	12.1%
θ_s	HPF	61.5°	62°	0.8%
	CF	63.5°	64.6°	1.7%

앞에서 설명한 바와 같이 측정위치의 제약 상 z 방향만 측정하였지만, Fig. 5의 x 방향으로 예측된 잔류응력은 76 MPa로서 인장 방향이므로, 이러한 경우 응력 부식 균열에 대한 대책이 부품 설계 단계에서부터 고려되어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 핫 프레스 포밍 가상생산의 선행 연구^{8,9)}와 연계하여 계장화 압입시험을 통해 비교적으로 잔류 응력을 측정하고, JMatPro와 탄소성 가정 DEFORMTM-HT를 활용하여 열전달과 상변태를 동시에 고려한 가상생산 결과와 비교하였다. 이와 같은 과정을 통해서

- 1) 핫 프레스 포밍 조건에 따라 보론강 성형 부품에 내재된 최소(최대 압축) 주방향의 잔류 응력과 스프링백 값을 비교할 때, 예측 값과 실험치가 비교적 잘 들어맞음을 관찰하였다. 이를 통하여 고온 물성값 모델러와 열전달 및 상변태를 동시에 고려하는 유한요소해석시스템으로 구성된 가상생산 시스템의 정확도를 제한적으로 검증하였다.
- 2) 상변태와 열전달에 의한 블랭크의 체적 변화가 잔류 응력 예측에 영향을 미칠 수 있음을 보였으며, 이는 가상생산을 핫 프레스 포밍에 적용할 경우 이러한 점을 고려해야하는 것이 중요함을 시사한다.
- 3) 핫 프레스 포밍 제품의 경우, 비록 스프링백의 양은 작지만, 성형된 부품 속에 내재된 잔류 응력의 크기가 오히려 냉간가공시보다 2배 이상이 되므로, 종래에 가정해오던 바와 같이 무시할 수는 없는 크기임을 관측하였다. 이러한 크기의 압축 잔

류 응력은 핫 프레스 포밍된 재료의 내구특성에 영향을 미칠 수 있다

후 기

교신저자는 2010학년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구를 수행하였으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) T. Altan, Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts Part I: Process methods and uses, *Stamping Journal*, December, pp.40-41, 2006.
- 2) M. Eriksson, M. Oldenburg, M. C. Somani, L. P. Karjalainen, 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, 2002.
- 3) M. Merklein, J. Lechler, M. Geiger, Characterisation of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5, *Annals of the CIRP*, Vol.55, pp.229-232, 2006.
- 4) P.F. Bariani, S. Bruschi, A. Ghiotti, A. Turetta, Testing formability in the hot stamping of HSS, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.57, pp.265-268, 2008.
- 5) H. S. Kim, M. H. Seo, S. J. Kim, S. C. Back, W. J. Bang, Finite element analysis and experimental investigation on the thermal deformation behavior of steel sheets during press hardening, *J. Kor. Int. Met. & Mater.*, Vol.39, No.9, pp.1076-1083, 2001.
- 6) M. Naderi, L. Durrenberger, A. Molinari, W. Bleck, Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperature, *Materials Science & Engineering A*, Vol.478, pp.130-139, 2008.
- 7) A. E. Tekkya, H. Karbasian, W. Homberg, M. Kleiner, Thermo-mechanical coupled simulation of hot stamping components for process design, *Production Engineering Research and Development*, Vol.1, pp.85-89, 2007.
- 8) 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-TM-HT, *Transactions of Materials Processing*, Vol.17, No.4, pp.249-256, 2008.
- 9) M. S. Chae, B. C. Pack, Y. S. Suh, Y. S. Kim, Mechanical and forming characteristics of high strength boron alloyed steel in hot forming, *Korean Society of Automotive Engineers 2008 Annual Conference*, Vol.08, No.01, 2008.
- 10) Y. H. Lee, J. Y. Kim, J. S. Lee, K. H. Kim, J. Y. Koo, D. Kwon, Using the instrumented indentation technique for stress characterization of friction stir-welded API X80 steel, *Philosophical Magazine*, Vol.86, Nos.33-35, pp. 5497-5504, 2006.
- 11) J. I. Jang, D. I. Son a, Y. H. Lee , Y. Choi, D. I. Kwon, 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, 2003.
- 12) Balamurugan. R, Narayanan. R, K. J. Moon, C. D. Park, Y. S. Kim, Fatigue analysis of chassis tubular torsion beam axle including the sheet metal forming effects, *Spring Proceedings of Korean Society of Automotive Engineers*, No.4, pp.1913-1917, 2007.