

핫 포밍을 이용한 고강도 보론 첨가 강의 기계적 및 성형 특성 평가

채명수¹ · 이기동² · 서영성³ · 이경훈⁴ · 김영석[#]

Mechanical and Forming Characteristics of High-Strength Boron-Alloyed Steel with Hot Forming

M. S. Chae, G. D. Lee, Y. S. Suh, K. H. Lee, Y. S. Kim

(Received December 23, 2008)

Abstract

In response to growing environmental and collision-safety concerns, the automotive industry has gradually used high-strength and ultra-high-strength steels to reduce the weight of automobiles. In order to overcome inherent process disadvantages of these materials such as poor formability and high springback at room temperature, hot forming has recently been developed and adopted to produce some important structural parts in automobiles. This method enables manufacturing of components with complex geometric shapes with minimal springback. In addition, a quenching process may enhance the material strength by more than two times. This paper investigates mechanical and forming characteristics of high-strength boron-alloyed steel with hot forming, in terms of hardness, microstructure, residual stress, and springback. In order to compare with experimental results, a finite element analysis of hot forming process coupled with phase transformation and heat transfer was carried out using DEFORM-3D V6.1 and also, to predict high temperature mechanical properties and flow curves for different phases, a material properties modeler, JMatPro was used.

Key Words : Hot Forming, High-strength Boron-alloyed Steel, Mechanical and Forming Characteristics, JMatPro, Finite Element Analysis

1. 서론

오늘날 자동차 산업은 배기가스 감소에 의한 지구 환경 문제의 개선과 충돌성능 향상에 의한 고안전성을 요구받고 있다. 따라서 완성 차 제조사들은 차체경량화와 고강성 차체를 실현하기 위해 알루미늄합금 강, 마그네슘합금 강 등의 신소재를 이용하거나 하이드로포밍, 용접블랭크 등의 신 공법을 이용하여 차체를 제작하고 있다.

그러나 알루미늄합금 강이나 마그네슘합금 강 등이 스틸 강에 비해 차체 중량을 줄이는 효과가 있지만, 가격이 비싸고 성형성이 열악하여 실제 차체 제작에는 적용상 제한이 많다. 이에 반해, 스틸 강의 특성을 유지하며 차체 중량을 줄이기 위해 강 제조사들은 Trip 강, DP 강 등의 고강도 강을 개발하여 보급하고 있으며, 최근에는 인장강도 1 GPa 급 이상의 초 고강도 강을 개발하여 적용하고 있다. 그러나 일반적으로 고강도 강은 상온에

1. 경북대학교 기계공학과

2. ㈜화신

3. 한남대학교 기계공학과

4. 마케팅랩

교신저자: 경북대학교 기계공학과,

E-mail: caekim@knu.ac.kr

서의 성형 시 낮은 연신율과 높은 항복강도 때문에 성형성이 열악하고 성형 후 잔류응력에 의한 스프링백 현상 등의 문제점을 안고 있기 때문에 차체 제작에 사용하기 위해서는 상당한 성형 기술이 요구된다. 이러한 고강도 강의 성형성 문제를 해결하고 성형 후 매우 높은 수준의 강성을 유지하는 자동차 차체 부품을 제조하기 위하여 핫 포밍(Hot forming)[1-4]이라는 새로운 공법이 개발되었다. 핫 포밍은 성형하기 전에 블랭크(Blank)를 Ac3 변태점 온도와 같거나 높은 온도 조건에서 조직을 완전히 오스테나이트(Austenite)로 만든 후, 프레스 성형 후 성형된 제품을 바로 냉매에 담구어 직접 퀘칭을 하거나(direct quenching), 성형된 제품을 금형 내에 일정시간 동안 위치시켜 금형내를 관통하는 냉매에 의한 간접 퀘칭(indirect quenching 또는 자주 다이 퀘칭(die quenching)이라고 불림)을 실시하여 오스테나이트 조직을 마르텐사이트 조직으로 변태시키는 공법으로서, 통상적으로 핫 포밍 공법에 의해 제조되는 부품은 원소재가 가진 강성 보다 더욱 높은 강성을 유지하여 자동차 충돌성능 향상에 의한 고안전성을 실현할 수 있다.

핫 포밍은 유럽 자동차 제조사와 강관 제조사에 의해 개발되었으며, 현재에도 활발한 연구가 진행되고 있다. A. Turetta[5] 등은 22MnB5 소재를 이용하여 기계적 물성 및 상 변화 데이터를 확인하고, 변형 중 및 변형 이후의 냉각속도와 상 분포로 판재성형 공정 조건을 재현하였다. C. R. Simcoe[6] 등은 일반적으로 저 탄소·저 합금강에서 극소량의 보론 첨가는 시간 - 온도 - 변태곡선에서 초석 페라이트의 석출을 현저히 지연시켜, 초석 페라이트의 C 곡선을 오른쪽으로 이동시킨다고 보고하였다. M. Merklein[7-8] 등은 동일 소재에 대해 열, 기계적 물성값이 온도와 시간 특성에 의해 좌우됨을 확인하였고, 전산적 해석의 경우에도 이러한 변수를 고려해야 한다고 제시하였다. M. Suehiro[9] 등은 알루미늄 피막을 도포한 핫 포밍 전용 소재(USIBOR1500)에 대해 고온 물성값의 특성을 평가하였다. M. Eriksson[10] 등은 보론강의 고온 성형 모델링에 필요로 되는 기계적 성질을 측정하고 평가하는 방법을 제안하였고, 이들 데이터를 바탕으로 고온 굽힘을 받는 얇은 두께의 튜브보의 등은 유한요소해석과 연속 냉각 중 압축을 받는 원통형 시편의 유한요소해석을 수행하여 해석 결과들이 실험 결과와 잘 일치함을 보였다.

본 연구에서는 핫 포밍을 이용한 소재의 고 강도화를 목적으로 자동차 용 CTBA(Coupled Torsion Beam Axle) 제품에 적용되는 고강도 보론 첨가 강에 대해 다이 퀘칭을 이용한 핫 포밍 공법을 적용한 V-bending 실험을 실시하였고, 이에 대한 소재의 기계적 및 성형특성을 평가하였다. 또한 실험결과의 검증을 위해 재료 성질 및 거동 예측 소프트웨어 JMatPro[11~12]를 활용하여 전산적으로 예측된 소재의 고온 물성 값을 확보하고, 이를 이용하여 변형, 상 변태, 열전달을 연계한 핫 포밍 공정을 DEFORM-3D V6.1[13~14]로 해석하였다.

2. 실험 및 유한요소 모델링

2.1 소재

본 연구에서는 일본의 JFE사에서 개발된 핫 포밍 전용 소재를 사용하였다. 소재의 기계적 및 성형 특성을 평가하기 위해 두께가 2.5mm, 지름이 90mm, 길이가 90mm 인 실린더 형상의 관재가 사용되었고, 본 소재에 대한 화학적, 기계적 물성치와 CCT 곡선을 Table 1 과 Fig. 1 에 각각 나타내었다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tested material

Chemical composition (mass %)						
C	Si	Mn	Ni	B	Mo	Cr
0.20	0.19	1.38	0.01	0.0013	0.01	0.15
Mechanical properties						
YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HV			
535	644	23	175			

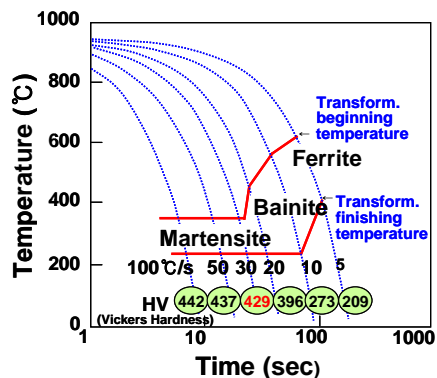


Fig. 1 Continuous Cooling Transformation (CCT) diagram for test material

2.2 실험방법

실험공정을 Fig. 2 에 나타내었다. 소재를 완전 오스테나이트화 하기 위해 열처리 로에서 Ac3 변태점 이상인 910℃에서 10 분간 가열한 후 금형으로 옮겨져(5 초) 2 초 내에 성형이 이루어지고 성형과 동시에 금형 내에서 25℃의 냉각수를 흘려 15 초간 퀴칭을 실시하였다.

실험 후 Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 소재의 기계적 및 성형특성을 평가하기 위하여 다양한 시험을 실시하였다. 성형된 시편의 길이 방향으로 인장시편을 채취하여 만능 재료시험기(Instron Model 5592-Hvv)를 이용한 단축인장시험을 실시하였고, 고른 냉각 실현 여부를 평가하기 위해 마이크로 비커스 경도시험기(Instron Model Tukon-2100)를 이용해 시편 단면 전체에 걸쳐 1cm 간격으로 경도 측정을 실시하였으며, 잔류응력의 크기를 측정하기 위하여 X 선 회절장치(X-ray diffraction)를 사용하였다. 그 외에도 시편에 대한 미세조직 관찰과 핫 포밍과 냉간 포밍으로 인한 스프링 백 크기를 측정하여 서로 비교하였다. Table 2 는 회절각을 측정하기 위한 X 선 회절조건을 나타낸 것이다. X 선 회절을 이용한 잔류응력 측정[15~16]은 회절선 최대 강도(Peak intensity)를 찾아서 그 값을 기준으로 강도의 이동된 회절각 2θ 값을 반가폭 중점법(Middle point method of half value width)으로 측정하였고, 면간 거리 d 의 변화에 대한 $\sin^2\psi$ 선도를 그려서 그 기울기로 응력을 산출하였다.

2.3 유한요소모델링

실험결과의 검증을 위해 DEFORM-3D V6.1을 이용하여 핫 포밍공정 중 재료의 소성변형에 대한 상 변태와 열진달 유한요소해석을 실시하였다.

핫 포밍 공정해석은 실험에서와 동일하게 가열-이송-성형-퀴칭 공정 순으로 수행하였고, 해석시간의 단축을 위하여 대칭조건을 적용한 1/4 모델을 사용하였다.

DEFORM-3D 를 이용한 핫 포밍 유한요소해석에서는 열진달 해석을 위해서 온도에 따른 열진도계수, 열용량계수, 방사율 등을 입력하며, 변형 해석에서는 온도에 따른 탄성계수, 프와송비, 열팽창계수, 유동 곡선을, 상 변태해석을 위해서는 TTT 선도와 마르텐사이트 함수, 잠열, 상변태에 따른 체적 변화, 변태 소성(transformation plasticity) 들을 고려한다. 그러나 본 연구에서는 변태 소성물성 값의 확보가 어렵기도 하였지만, 변형이 짧

은 시간에 이뤄지는 것을 고려하여 성형 중의 변태 소성은 고려하지 않고 다만 성형 후 담금질 중의 상 변태만을 고려하였다. 또한 스프링백의 양이 작음을 고려하여 강 소성(rigid plastic)으로 가정하여 변형거동을 예측하였다.

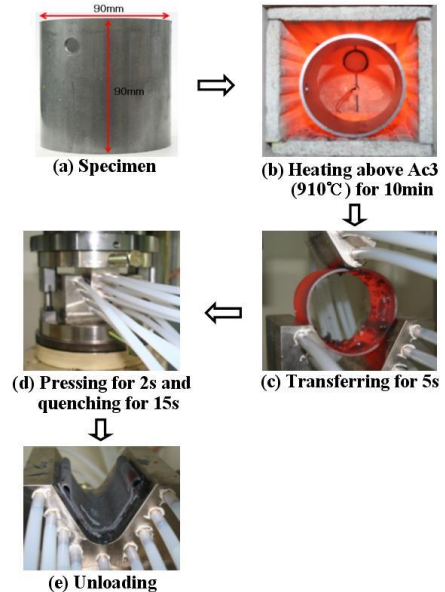


Fig. 2 Experimental procedures used for hot forming

Table 2 Conditions of X-ray diffraction

X-ray target	Cu-Kα
Diffraction plane	(211)
Filter	Ni
Voltage	40 kV
Current	20 mA

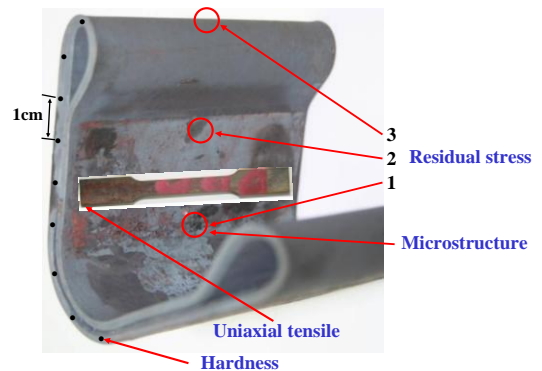


Fig. 3 Measured position of a V-shape hot-formed specimen

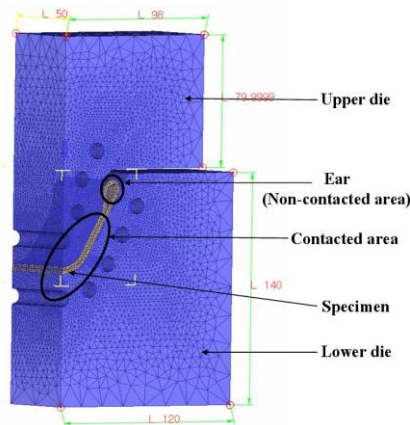


Fig. 4 Finite element model for hot forming simulation

Table 3 Process parameters used in simulation

Heating temperature	910℃
Environment temperature	20℃
Cooling water temperature	25℃
Friction coefficient	0.3
Convection coefficient	0.005 N/sec/mm/℃
Conduction coefficient	1.5 N/sec/mm/℃

상, 하형 다이는 강체(Rigid body)로 가정하였고, 소재는 변형체(Deformable body)로 설정하였으며 Fig. 4 와 Table 3 에 핫 포밍 해석 모델과 유한요소 해석에 사용된 공정변수 입력 값을 각각 나타내었다. 유한요소모델링은 현재 보유하고 있는 핫 포밍용 프레스의 크기를 기준으로 설계하였고, 지름이 10mm 인 냉각수 홀을 이용하여 금형 표면으로부터의 홀 위치 10mm, 홀 간 간격 10mm, 냉각수 홀의 개수는 상형다이 7 개, 하형다이 9 개로 설계하였다.

3. JMatPro 를 이용한 소재 고온 물성값 예측

Fig. 5 는 핫 포밍 유한 요소해석을 위한 변형, 상변태와 열전달 사이의 상호관계를 나타내고 있다. 이를 고려한 핫 포밍 유한요소해석을 위해서는 고온에서의 재료의 열적, 기계적 물성값 및 쿨링 시의 상변태와 물성 변화에 대한 자료 입력이 필수적이다[17]. 그러나 이와 같은 소재의 고온 물성값을 실험으로 얻기에는 난점이 있어, 본 연구에서는 고온 물성 실험을 대체하는 물성 확보 방법인 JMatPro software 를 이용하여 소재의 고온 물성치를 확보하였고, 유한요소해석의 입력데이터로 사용하였다.

3.1 JMatPro

JMatPro 는 통계적 방법이 아닌 물리적 원리에 근거한 프로그램이다. 다 원계 합금을 대상으로 하여 평형, 비 평형 구조를 예측하기 위한 열역학적 데이터베이스 구축을 시작으로 다양한 물리적, 역학적 물성을 계산할 수 있다. 또한 미세조직에 민감도를 허용함으로써 다양한 재료의 성질을 예측할 수 있고 재료간의 진정한 상호관계를 유도할 수 있다.

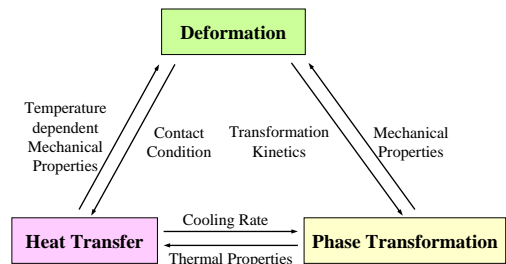


Fig. 5 Interrelation of parameters for hot forming simulation

JMatPro 에서 재료의 물성을 계산하기 위한 방법은 다음과 같다.

온도에 따른 열전도 계수, 열팽창 계수, 밀도, 탄성 계수 등의 열적-물리적 특성은 먼저 각 상의 양과 구성원소를 EQLib 이라 불리는 열역학 엔진을 이용하여 계산한 뒤 식 (1)을 이용하여 각 상의 물성을 추출하고 그 다음 혼합 모델을 적용하여 합금의 물성을 계산한다.

$$P = \sum_i x_i P_i^0 + \sum_{i,j>i} x_i x_j \sum_v \Omega_{ij}^v (x_i - x_j)^v \quad (1)$$

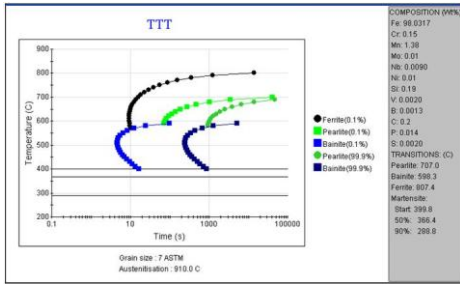
여기서 i 와 j 는 요소 지수, x_i 와 x_j 는 몰 분율, P^0 는 순수 요소에 대한 상의 성질, Ω 는 2 성분의 상호작용 변수를 각각 나타낸다.

고온에서의 유동응력은 식 (2)의 Hall-Petch 식과 크리프 계산을 통합하여 식 (3)과 같이 계산된다.

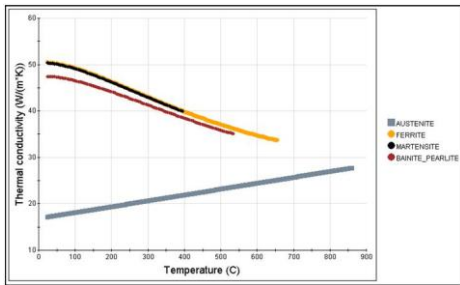
$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-1/2} \quad (2)$$

$$\sigma(T) = \alpha + \beta \{-Q/(RT)\} \quad (3)$$

여기서 식 (2)의 σ 는 항복응력, σ_0 는 고유 유동응력, k 는 Hall-Petch 계수, d 는 결정립 크기를 각각 나타내고, 식 (3)의 Q 는 회귀분석을 통하여 경



(a) TTT diagram of test material



(b) Thermal conductivity coefficient for each phase at different temperatures

Fig. 6 Various material properties calculated by JMatPro

험적으로 얻어진다. 또한 TTT 및 CCT 선도와 같은 상 변태 계산의 경우는 다양한 변태 온도, 상의 성분 등을 먼저 계산한 후 Kirkaldy 모델[18]을 수정한 방정식에 넣어 계산하게 된다.

Fig. 6 에 본 연구에서 채택한 소재에 대해 JMatPro 에서 계산한 고온 물성값을 나타내었다.

Fig. 6 (a)는 JMatPro 에서 구한 소재의 TTT 선도를 나타낸다. 각 상에 대한 변태 시작과 종료온도를 알 수 있으며, 마르텐사이트 시작온도는 399.8℃, 종료온도는 288.8 ℃로 계산되었다. (b)는 온도에 따른 각 상의 열전도 계수를 나타내고 있다.

3.2 고온 단축인장 시험을 통한 예측 물성값의 비교 평가

JMatPro 를 이용하여 예측된 고온 물성치의 정확도를 평가하기 위하여 MTS(Material Test System) 810 장비를 이용하여 고온에서 단축인장 시험을 수행한 후 서로 비교하였다. 인장 시편은 고온인장을 위한 KS-13B 규격에 맞추어 제작되었고, 시편의 양 끝단에 구멍을 뚫어 핀을 결합한 뒤 400℃, 500℃, 700℃, 900℃에서 시험을 수행하였다. 인장시험 시 고온에서의 신율계 사용 제한으로 인

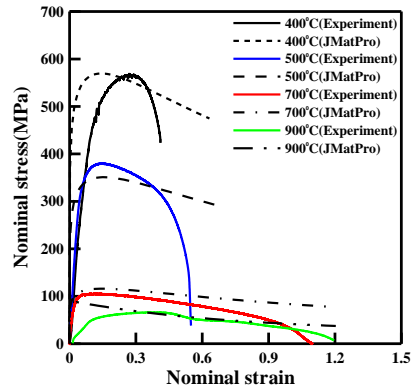


Fig. 7 Nominal stress-strain curves between JMatPro and experiment

Table 4 Mechanical properties at elevated temperature

	Temp (°C)	E (GPa)	YS (MPa)	TS (MPa)
JMatPro	400	185	370	569
	500	172	219	350
	700	147	74	116
	900	121	68	88
Experiment	400	5.1	398	569
	500	7.7	267	379
	700	3.7	87	104
	900	1.7	50	66

해 크로스 헤드(Crosshead)로 변위를 측정하여 변형률을 계산하였다.

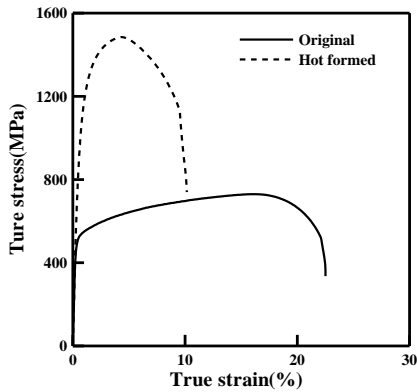
Fig. 7 과 Table 4 에 고온 단축인장 실험결과와 JMatPro 를 이용하여 예측된 결과를 비교하여 나타내었다. 비교결과 항복응력과 인장강도는 실험결과와 계산결과가 잘 일치하는 경향을 보였지만, 탄성계수에 있어서는 오차가 크게 나타났다. 이는 고온 인장 시에 시편의 그림용으로 사용하는 핀 결합 부위에서의 국부적 인장과 크로스 헤드의 변위 측정으로 인한 오차로 판단된다.

4. 결과 및 고찰

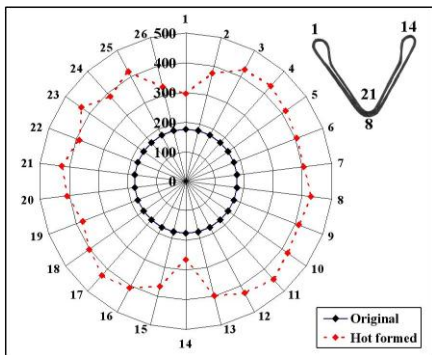
4.1 실험

4.1.1 기계적 특성 평가

Fig. 3 에 나타난 바와 같이 각각의 위치에 대하여 시험을 수행한 후, 소재의 기계적 특성을 Fig. 8 에 나타내었다. 비교 결과 Fig. 8 (a)에서 나타난 바와



(a) Uniaxial tensile test

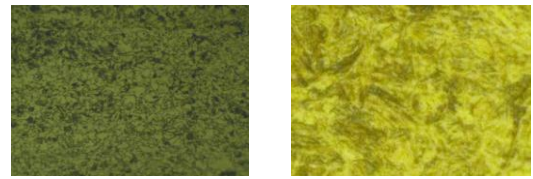


(b) Hardness test (HV)

Fig. 8 Test results under hot forming condition

같이 핫 포밍 후 소재의 인장강도는 600MPa 급의 원 시편이 약 1400MPa 까지 상승하여 200%이상의 상승효과를 보였다. 또한 Fig. 8 (b)에서와 같이 핫 포밍된 시편의 단면 경도측정 결과, 평균 약 HV 400 의 경도 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 원 소재가 HV 175 의 경도 값을 가지는데 비하여 2 배 이상의 상승효과를 가져왔지만, 금형과의 비접촉부위에서는 냉각속도 저하로 인하여 경도 값이 평균보다 낮은 현상을 보였다. 그러나 본 연구에서는 핫 포밍을 이용한 소재의 고강도화에 중점을 두었으므로 실험결과를 바탕으로 핫 포밍을 이용한 자동차 부품 제조 시 소재의 고 강도화를 통해 자동차 충돌성능 향상에 의한 고안전성을 실현할 수 있을 것으로 판단이 된다.

Fig. 9 는 원 소재와 핫 포밍으로 인해 얻어진 조직을 나타내고 있다. 원 소재의 조직은 (a)에 나타난 바와 같이 초정 페라이트와 펄라이트 그리고 구상화 탄소물로 이루어져 있지만, (b)와 같이 핫 포밍의 경우는 급속 쿨링으로 인해 대부분의



(a) Original specimen (b) Hot-formed specimen

Fig. 9 Comparison of microstructures between original and hot-formed specimens

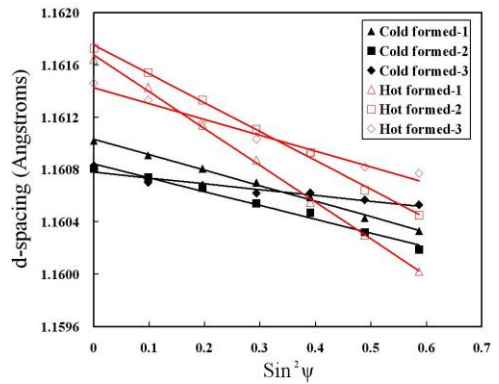


Fig.10 D-spacing versus $\sin^2 \psi$ diagram by Cu-K α characteristic X-ray

Table 5 Residual stresses at measured positions

	Position	Residual stress (MPa)
Cold formed	1	-169.5 ± 4.7
	2	-148.8 ± 8.2
	3	-62.4 ± 8.9
Hot formed	1	-398.9 ± 6.9
	2	-310.6 ± 7.6
	3	-176.4 ± 7.2

영역에서 마르텐사이트가 생성되었으며, 국부적으로 냉각이 느린 일부 영역에서 잔류 오스테나이트가 남아 있음을 알 수 있었다.

4.1.2 X선 회절을 이용한 잔류응력 측정

Fig. 3 에 나타난 각각의 잔류응력 측정위치에 대해 X-선 회절장치를 이용하여 잔류응력을 측정하였다.

Fig. 10 과 Table 5 는 Cu-K α 를 사용하여 측정된 (211) 결정면의 면간거리 d 와 입사각 ψ 에 대한 $d \cdot \sin^2 \psi$ 선도와 그에 따른 부위별 잔류응력 측정 결과를 각각 나타낸 것이다.

그 결과 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 핫 포밍된 시편과 냉간 포밍된 시편 모두 음의 기울기를 나타내어 압축 잔류응력상태임을 알 수 있었고, Table 5에 나타낸 바와 같이 핫 포밍된 시편이 냉간 포밍된 시편에 비하여 약 2 배 이상의 높은 압축 잔류응력 분포를 나타내었다. 따라서 핫 포밍에서의 퀴칭 시 소재의 급랭으로 인한 압축잔류응력 상승으로 인해 피로강도 증가와 균열발생억제로 인한 피로 수명 증가가 예상된다.

4.1.3 스프링백

Fig. 11에 냉간 포밍과 핫 포밍에 따른 스프링백 측정결과를 나타내었다. 금형의 굽힘 각도는 60°이며 핫 포밍에서의 스프링 백 크기가 냉간 포밍에 비하여 훨씬 더 작음을 관찰할 수 있었다. 특히 핫 포밍의 경우 스프링 백 발생이 0.1°로서 거의 발생하지 않아, 핫 포밍이 스프링 백 발생을 억제하여 성형제품에 대한 치수 정밀도를 향상시키는 데 효과적인 공법이라 생각된다.

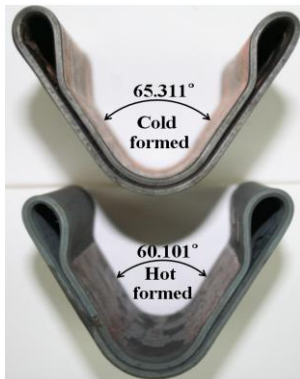


Fig.11 Results of springback between cold-formed and hot-formed specimens

4.2 유한요소해석

Fig. 12에 핫 포밍 공정별 온도분포를 나타내었다. 소재를 910°C까지 가열하여 금형으로 이송하는 동안 공기와의 대류로 인해 온도가 약 80°C 떨어지고, 2초간의 성형 후 소재의 온도는 다이와의 접촉부위에서 739°C까지 떨어지게 된다. 그 다음 퀴칭 시작과 동시에 금형과의 접촉부위는 빠른 냉각속도(-45°C/s)로 인해 온도는 급속하게 떨어지며, 비 접촉부위에서는 공기에 의한 열전달에 의해 냉각되므로 냉각속도(-16.6°C/s)가 상대적으로 느리게 나타났다. 퀴칭 완료 시간인 15초 후에는

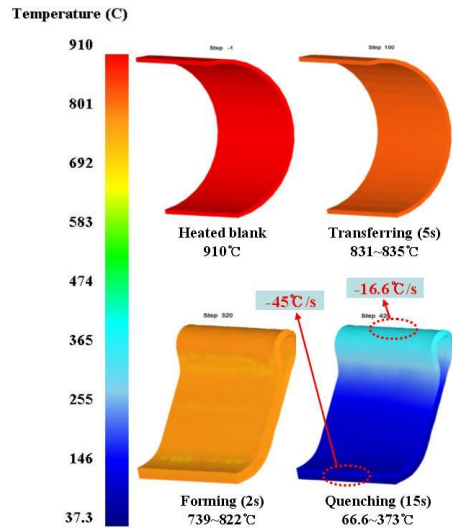


Fig.12 Temperature distribution on the specimen at each process

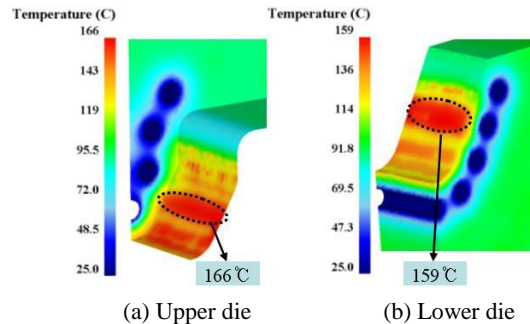


Fig.13 Temperature distribution on the dies after quenching

금형과의 비 접촉부위(324~373°C)를 제외하고 전체적으로 66.6~200°C의 온도분포를 나타내었다. 따라서 JMat-Pro로부터 계산된 TTT 선도에서의 마르텐사이트 시작온도(399.8°C)와 종료온도(288.8°C)를 퀴칭 완료 후 소재의 온도(66.6~373°C)와 비교했을 때 충분한 마르텐사이트 조직이 얻어 졌다고 판단이 된다.

퀴칭 완료 후 금형의 온도분포를 Fig. 13에 나타내었다. 냉각수가 지나는 유로는 25°C의 온도를 나타내고 있고, 냉각수 유로를 중심으로 온도 분포가 점점 증가하고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 특히, 소재와의 접촉부위에서 가장 높은 온도를 나타내었는데, 상형다이의 경우는 최고온도 166°C, 하형다이의 경우는 최고온도 159°C를 나타

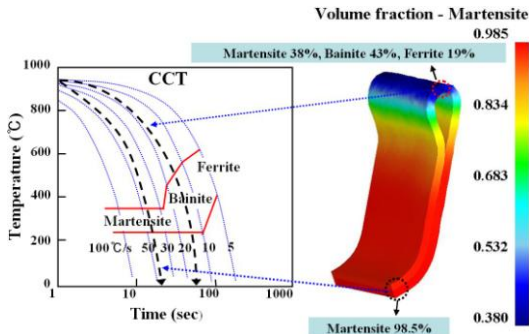


Fig.14 Volume fraction of martensite in association with CCT diagram after quenching

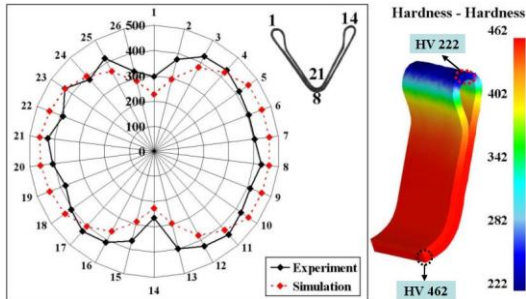


Fig.15 Comparison of Vickers hardness between experiment and simulation

내었다. 따라서 핫 포밍 용 금형 설계 시 금형의 열적 특성을 고려하는 설계가 이루어져야 할 것으로 판단이 된다.

Fig. 14 에는 퀴칭 완료 후 시편의 마르텐사이트 체적분율을 CCT 곡선과 연계하여 나타내었다. 대부분의 영역에서 약 90% 이상의 충분한 마르텐사이트 체적분율을 얻었지만, 비 접촉 부위(Fig.8 의 1 과 14 위치)에서는 마르텐사이트 38%, 베이나이트 43%, 페라이트가 19%로서 충분한 퀴칭이 이루어지지 않았다는 것을 알 수 있다. 이는 V-형상으로 성형된 관재에서 모든 영역에서 동일한 강도를 유지할 수 없음을 나타내고 따라서 다이와의 비 접촉부위인 1 과 14 위치에서의 마르텐사이트 체적분율을 높이기 위한 추가적인 검토가 필요할 것으로 생각된다. 가능한 해결 방법으로는 1 과 14 위치에서 냉각성을 향상시키기 위한 국부적으로 냉각수의 분무 등을 생각할 수 있다.

Fig. 15 에서는 퀴칭 후 해석과 실험에서 측정된 비커스 경도 값을 비교하였다. 유한요소해석 결과 경도 값은 HV 222~462 로 얻어졌다. 여기서 HV

222 는 측정 최소값으로 다이와의 비 접촉부위에서의 값이고, 이는 앞서 언급한 바와 같이 냉각속도 저하로 인한 마르텐사이트 체적분율의 감소와 일치되는 결과를 나타낸다. 또한 실험에서 얻어진 경도 측정값은 HV 264~433 로 측정이 되어 해석에서와 동일하게 비 접촉부위에서 경도 최소값을 나타냈었고, 해석결과와 비교적 잘 일치함을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고강도 보론 첨가 강에 대해 핫 포밍 공법을 적용한 V-bending 실험을 실시하여 이에 대한 소재의 기계적 및 성형특성을 평가하였다. 또한 실험결과를 검증하기 위해 재료 성질 및 거동 예측 소프트웨어 JMatPro 를 활용하여 전산적으로 예측된 소재의 고온 물성 값을 확보하고, 이를 이용하여 변형, 상 변태, 열전달을 고려한 핫 포밍 공정을 DEFORM-3D V6.1 로 해석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 핫 포밍 프레스 공법개발을 통하여 이를 이용한 소재의 고강도화를 통해 자동차 부품 제조시 충돌성능 향상에 의한 고안전성을 실현할 수 있을 것으로 생각된다.

(2) 핫 포밍은 스프링 백 발생을 억제하여 제품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있는 효과적인 공법이다.

(3) 잔류응력 측정결과 핫 포밍된 시편이 냉간 포밍된 시편에 비하여 약 2 배 이상의 높은 압축 잔류응력 분포를 나타내었고, 이로 인해 피로강도 증가와 균열발생 억제로 인한 피로 수명 증가가 예상된다.

(4) 해석과 실험에서 측정된 비커스 경도 값의 비교를 통해 실험과 해석결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였지만, 성형 부품 전체에 대한 고강도화를 위해 비 접촉 부위에서의 마르텐사이트 체적분율을 높이기 위한 추가적인 검토가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 경북대학교 BK21 사업과 산업자원부에서 시행한 부품소재기술개발사업(200712380000)으로 진행된 결과이며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] T. Altan, 2006, Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts, *Stamping Journal*, pp. 40~41.
- [2] T. Altan, 2007, Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts, *Stamping Journal*, pp. 14~15.
- [3] C. Federici, S. Maggi, S. Rigoni, 2006, The use of advanced high strength steel sheets in the automotive industry, Fiat Auto, *Engineering & Design-Materials Engineering*, Turin, Italy, pp. 1~12.
- [4] J. S. Lee, M. S. Chae, C. D. Park, Y. S. Kim, 2007, Mechanical and microstructural characteristics of a high-strength boron-alloyed steel for hot press forming, *The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference*, pp. 344~349.
- [5] A. Turetta, S. Bruschi, A. Ghiotti, 2006, Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 396~400.
- [6] C. R. Simcoe, A. R. Elsea, G. K. Mainning, 1955, Study of the effect of boron on the decomposition of austenite, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 206, pp. 193~200.
- [7] M. Merklein, J. Lechler, 2006, Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 452~455.
- [8] M. Merklein, J. Lechler, M. Geiger, 2006, Characterisation of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5, *Annals of the CIRP*, Vol. 55, pp. 229~232.
- [9] M. Suehiro, K. Kusumi, T. Miyakoshi, J. Maki M. Ohgami, 2003, Properties of aluminium-coated steels for hot-forming, *Nippon Steel Technical Report*, Vol. 88, pp. 16~21.
- [10] 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, *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 10, pp. 277~294.
- [11] N. Saunders, Z. Guo, A. P. Miodownik, J. Schile, 2007, Material properties of process simulation, Sente software.
- [12] K. H. Lee, K. P. Kang, 2008, Calculation of material properties with JMatPro for the process simulation, *The Korean Society for Technology of Plasticity Spring Conference*, pp. 142~145.
- [13] DEFORMTM-3D Version5.1 User's manual, <http://www.deform.com/>
- [14] K. P. Kang, K. H. Lee, Y. S. Kim, M. W. Ji, Y. S. Suh, 2008, Prediction of phase transformation of boron steel sheet during hot press forming using material properties modeler and DEFORMTM-HT, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 17, No. 4, pp. 249~256.
- [15] S. Chowdhury, M. T. Laugier, J. Henry, 2007, XRD stress analysis of CVD diamond coatings on SiC substrates, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 25, pp. 39~45.
- [16] S. H. Hong, D. W. Lee, S. S. Cho, W. S. Joo, 2002, A study on the measurement of residual stress in rolled steel for automobile using X-ray diffraction, *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 10, No. 6, pp. 150~157.
- [17] Y.S.Kim, 2009, *Engineering Plasticity-2nd*, Chap.9, Sigma Press, Korea.
- [18] N. Saunders, Z. Guo, A. P. Miodownik, J. Schile, 2007, The calculation of TTT and CCT diagrams for general steels, Sente software.