

보론 강판의 핫 프레스 포밍 공정 시 재료 물성 모델러와 DEFORMTM-HT를 활용한 상 변태 예측

강경필¹ · 이경훈¹ · 김영석² · 지민욱³ · 서영성[#]

Prediction of Phase Transformation of Boron Steel Sheet during Hot Press Forming using Material Properties Modeler and DEFORMTM-HT

K. P. Kang, K. H. Lee, Y. S. Kim, M. W. Ji, Y. S. Suh

(Received February 18, 2008)

Abstract

Combined phase transformation and heat transfer was considered on the simulation of hot press forming process, using material properties modeler, JMatPro[®] and a finite element package, DEFORMTM-HT. In order to obtain high temperature mechanical properties and flow curves for different phases, a material properties modeler, JMatPro[®] was used, avoiding expensive and extensive high temperature materials tests. The results successfully show that the strength of hot press forming parts may exhibit different strength in the same parts, depending on the contact of blank with tooling. It was also shown effectively that the strength of the parts can be controlled by designing appropriate cooling paths and coolants. This was shown in terms of different heat convection coefficient in the calculation. Overall, current combination of software was shown to be an effective tool for the tool and process design of hot forming process, although the material modeler needs to be additionally verified by an appropriate set of high temperature materials test.

Keywords : Hot Press Forming, Boron Steel, Material Properties Modeler, Phase Transformation, Finite Element Analysis, JMatPro, DEFORMTM-HT

1. 서론

최근 들어 자동차 산업에서 차량의 경량화와 안전성 향상을 위해 전통적 경량재료인 알루미늄, 마그네슘 강판 외에, 초고강도 강판(ultrahigh-strength steel) 사용이 확대되고 있다. 기존 고강도 강판의 경우에는 수 차례의 점진 냉간 성형 공정으로 복잡한 형상을 제조할 수 있었다. 초고강도 강판은 고강도 강판보다 성형성이 더욱 낮고, 상온에서의 스프링백 양이 매우 크다. 이에 따라 냉

간 성형으로는 자동차의 B-필러와 같이 복잡한 형상을 가진 부품들을 성형하기가 어려워, 생산성과 제품 정밀도 및 강도를 높이기 위하여 1990년대 후반부터 혁신적으로 개발된 것이 보론강을 활용한 핫 프레스 포밍(Hot Press Forming: HPF)공정이다[1~2]. 이는 인장강도가 600MPa정도 되는 보론강 블랭크를 900℃ 이상의 고온에서 오스테나이트화하여 고온 성형한 후, 급속히 냉각시켜 마르텐사이트 조직을 얻는 방법이다. 열처리된 성형 부품은 인장강도가 통상 1600MPa 정도가 되어,

1. ㈜마케팅랩

2. 경북대학교 기계공학과

3. 한남대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 한남대학교 기계공학과, E-mail: suhy@hnu.kr

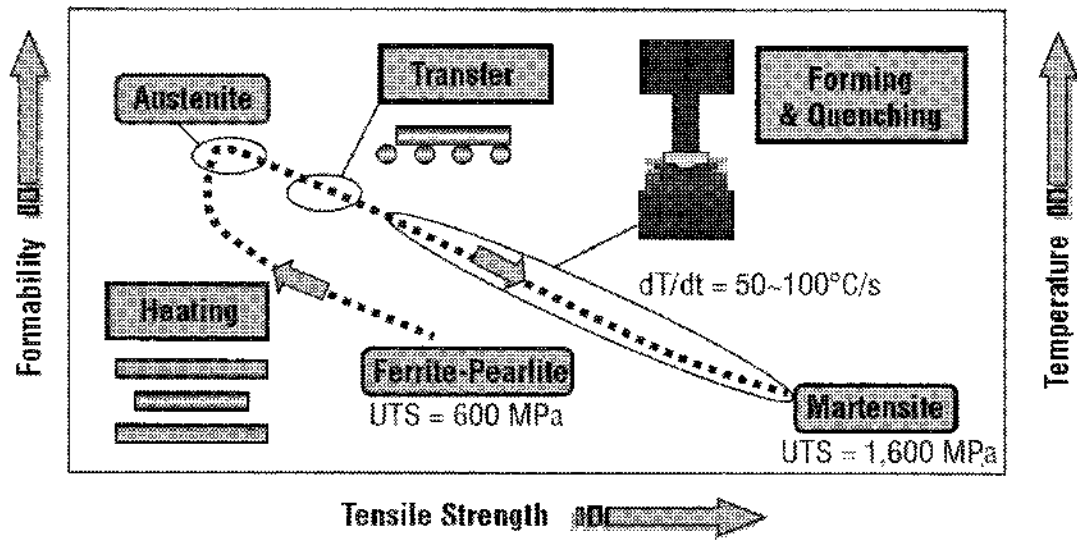


Fig. 1 Tensile strength and microstructure change of Boron steel during hot stamping(Cited from[2])

종래의 일반 자동차용 강판 부품보다 강도가 4~5 배 높으면서도 무게는 기존제품보다 최대 40%까지 줄일 수 있다. Fig. 1에 핫 프레스 포밍 공정중에 일어나는 인장강도와 미세조직의 변화를 도시하였다. 최근 자동차 산업에서는 이 공법으로 범퍼 빔, A-필러, B-필러, 측면 레일 부재, 도어 빔 등의 복잡한 형상과 높은 비강도를 요구하는 부품을 생산하고 있으며, 핫 프레스 포밍 공정 및 이 공정에 사용되는 보론강 소재의 기계적 성질에 관한 다양한 연구가 진행되어왔다[3~11].

M. Merklein 등[4~5]은 Arcelor에서 제조한 USIBOR 1500P를 사용하여, 온도, 변형율 속도 및 냉각속도가 오스테나이트 상태의 고온 성형 물성 값에 높은 영향을 미침을 실험적으로 확인하였으며 전산시뮬레이션의 경우에도 이러한 변수를 고려해야 한다고 제시하였다. Geiger 등[6]은 오스테나이트화하는 시간은 너무 짧거나 길지 않아야 함을 밝히고, 냉각속도가 접촉압력에 관계가 있음을 관찰하였다. A. Turetta 등[7]은 22MnB5 소재를 이용하여 기계적 물성 및 상 변화 데이터를 확인하고, 변형 중 및 변형 이후의 냉각속도와 상 분포로 판재성형 공정 조건을 재현하면서 판재의 성형성을 결정하는 새로운 시험 방법을 개발하였다. Eriksson 등[8]은 보론강의 고온 성형을 모델링하기 위한 기계적 성질을 측정하고 평가하는 방법을 보이고, 이들 데이터를 이용하여 고온 굽힘을 받는 얇은 두께의 튜브 보의 등은 유한요소 시뮬레이션과 연속 냉각 중 압축을 받는 원통형 시편의 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과들이 실험적 결과와 잘 들어 맞음을 보였다. Naderi 등[9]은 고온(600°C~900°C) 단축압축시험을 이용하여 보론강의 변형율, 변형율 속도 및 온도 의존성을 조사하고 Kocks 운동 모델과 Molinari-Ravichandran 현상 모델이 보론강의 소성거동을 잘 나타냄을 보였다. 보다 적합한 공정설계를 위하여

통상 유한요소법을 이용하여 공정을 시뮬레이션하여 유용한 정보를 얻는다. 김형섭 등[10]은 열-탄소 성 유한요소법을 이용하여 프레스경화 공정 중 제품의 온도변화, 변형과정, 상변화 과정 및 최종제품의 기계적 성질을 해석하였고 적절한 공정 조건을 제시하였다. Tekkaya 등[11]은 열과 기계적 거동을 분리(decoupled)하여 두 개의 유한요소 패키지(MARC 2005[®][12] 및 PAMSTAMP 2G[®] [13])로 핫 프레스 포밍 공정을 해석함으로써 열-기계적 거동 결합(coupled) 시뮬레이션의 경우에 비하여 계산 시간을 80% 단축하였다.

이상의 방법들에서는 열 및 상변화를 결합하여 해석을 하지는 않았다. 핫 프레스 포밍 공정의 경우, 공정 중 조직 변화가 광범위하게 일어나므로 상변태를 고려하는 것이 바람직하다. 그러나 온도와 상의 변화에 따라, 그리고 변형율 속도 및 냉각 속도에 따라 재료의 고온 기계적 성질 데이터가 필요하고, 이를 얻기 위해서는 고온 거동을 측정하기 위한 특수 장비와 많은 시간과 비용이 요구된다. 본 연구에서는 최근에 개발된 JMatPro[®][14~16]라는 재료 물성 모델링 소프트웨어를 활용하여 전산적으로 예측된 물성 값을 확보하고, 이를 이용하여 상변태 및 열전달을 고려한 핫 프레스 포밍 공정을 DEFORMTM-HT [17]로 해석하였다.

2. 실험

유한요소해석에 적용한 공정은 파이프의 굽힘 성형으로서, 사용된 보론강 소재는 두께 2.5mm, 외경 90mm, 길이가 100mm인 짧은 파이프 형태이다. 이 시편을 Fig. 2 와 같이 핫 프레스 포밍 공정에 적용하여 V형 부품으로 성형하였다. 그림과 같은 원통형 보론강 블랭크를 전기로에서 900~910°C까지 가열, 10분을 유지하여 조직을 완전히 오스테나이트화한 후, 소재를 프레스로 이송하여 성형과 담금질을 동시에 실시하고 이후 스프링백을 허용하였다. 마르텐사이트 조직을 얻으려면 냉각속도가 비교적 빨라야 하며, 블랭크가 약 150°C 정도가 될 때까지 충분한 담금질이 이루어져야 한다. 스프링백의 정도를 비교하기 위하여 냉간 프레스 포밍과 핫 프레스 포밍 두 가지를 수행하였다. 금형의 굽힘 각도는 60°이므로 금형 각도에 대한 편차율이 각각 5.8%와 2.5%로서, 예측되는 바와 같이 핫 프레스 포밍에서의 스프링백 각도가 냉간 성형에 비하여 훨씬 더 작음을 관찰할 수 있었다(Fig. 3).

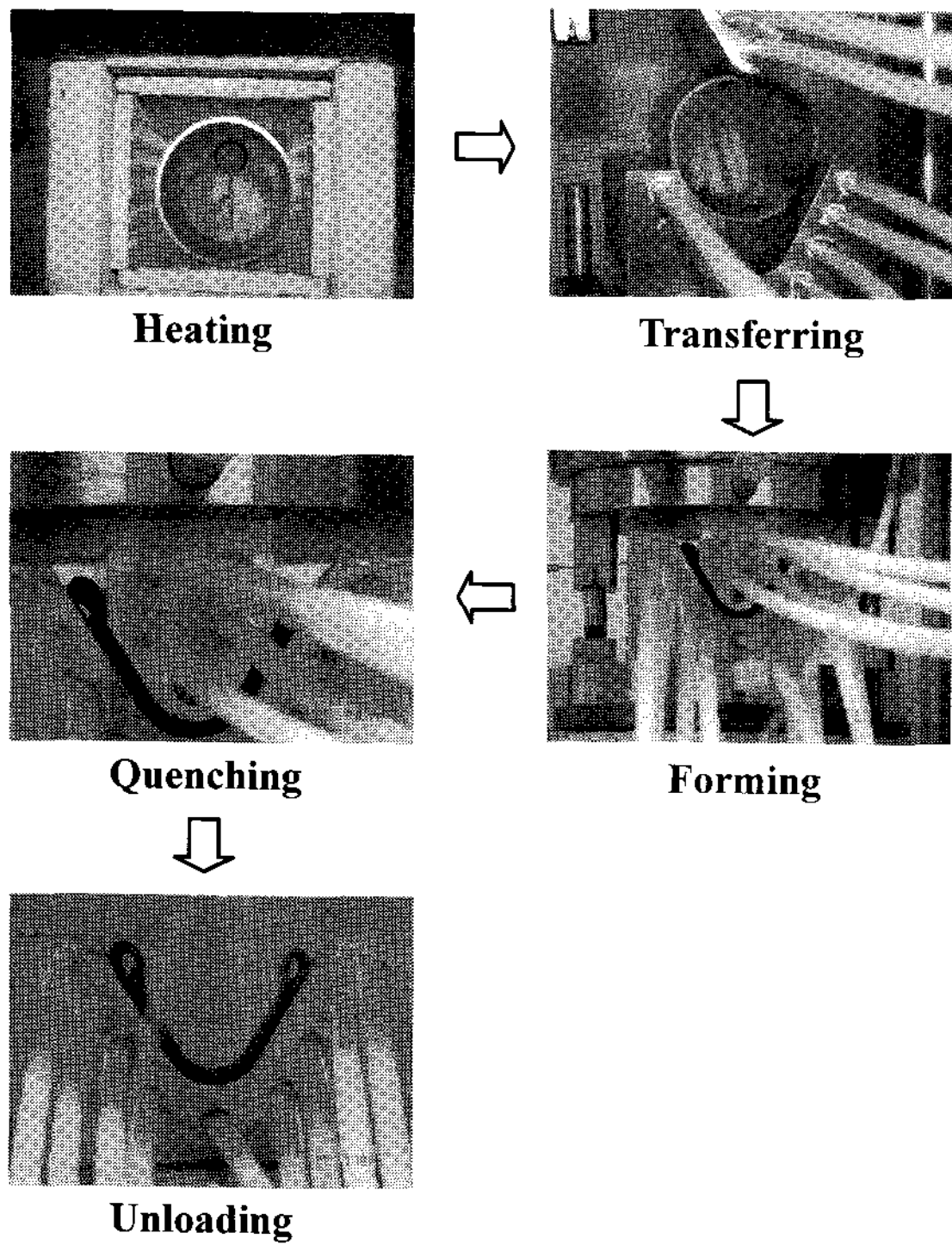


Fig. 2 Hot press forming of Boron steel blank

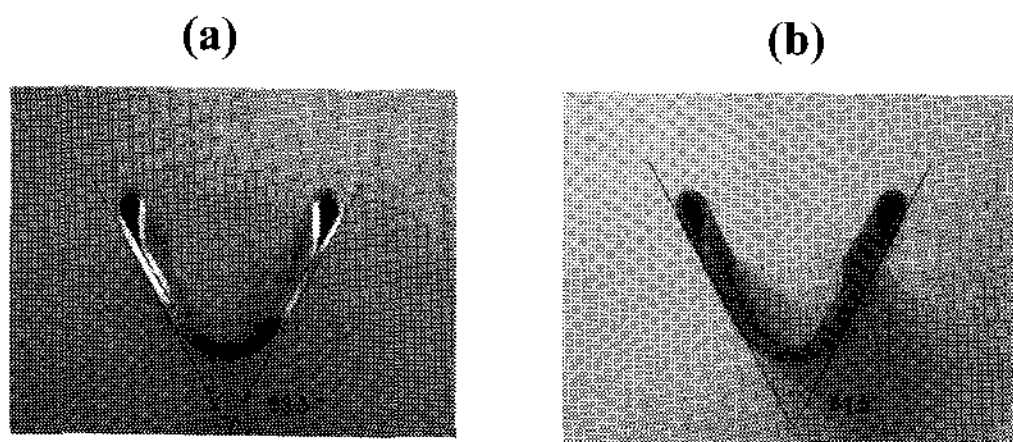


Fig. 3 Deformed shape after spring back from (a) cold press forming and (b) hot press forming

3. JMatPro를 활용한 물성 값 예측

재료의 물리적, 열-물리적 및 기계적 성질들은 공정 모델링을 하는데 필수적인 입력자료들이다. 그러나 이러한 물성 값들은 상온에서 측정하기는 쉬우나 고온에서 실험적으로 결정하기는 매우 어려워진다. 유동면에서도, 변형률 속도와 온도의 구배가 높을 경우 이러한 물성 값들을 측정하는 것은 매우 어렵다. 최근 이러한 난점을 극복하고 신뢰성있고 저렴한 비용으로 공정 모델링에 필요한 재료 물성 값 데이터를 예측할 수 있는 JMatPro®가 개발되었다. 이 프로그램은 통계적 방

법보다는 안전한 물리적 원리에 근거한다. 따라서 회귀 분석에 따르는 많은 문제점을 극복할 수 있다. 이 프로그램에서는 미세조직에 민감도를 허용함으로써 다양한 재료의 성질을 예측할 수 있고 재료간의 진정한 상호관계를 유도할 수 있다[15]. JMatPro®는 안정 및 준안정(metastable)재료의 상의 평형, 열-물리적 및 물리적 성질들, 상변태, 미세조직, 그리고 온도의존적 기계적 성질들을 모델링할 수 있다. 몇 개의 영역에서 계산 과정과 실험값과의 비교를 통한 프로그램의 신뢰도를 찾아보자면 다음과 같다.

• 열-물리적 성질: 온도 별로 각 상의 양과 구성 원소를 먼저 계산한 후, 필수 성질 데이터베이스를 불러내어 각 상의 성질을 추출한다. 각 상의 물성 값은 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

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

여기서 i 및 j 는 단상에서의 요소 인덱스이며, P^0 는 순수한 요소에서 상의 성질을 가리킨다. 또한 Ω 는 2성분의 상호작용 변수이고, x_i 및 x_j 는 요소 i 및 j 의 몰(mole) 분율이다. 그 다음에는 혼합 모델을 이용하여 상분율에 따라 합금의 물성 값을 계산한다. Fig. 4는 JMatPro®로 계산한 스테인리스강 STS 316의 열전도도를 실험 데이터와 비교한 것이다.

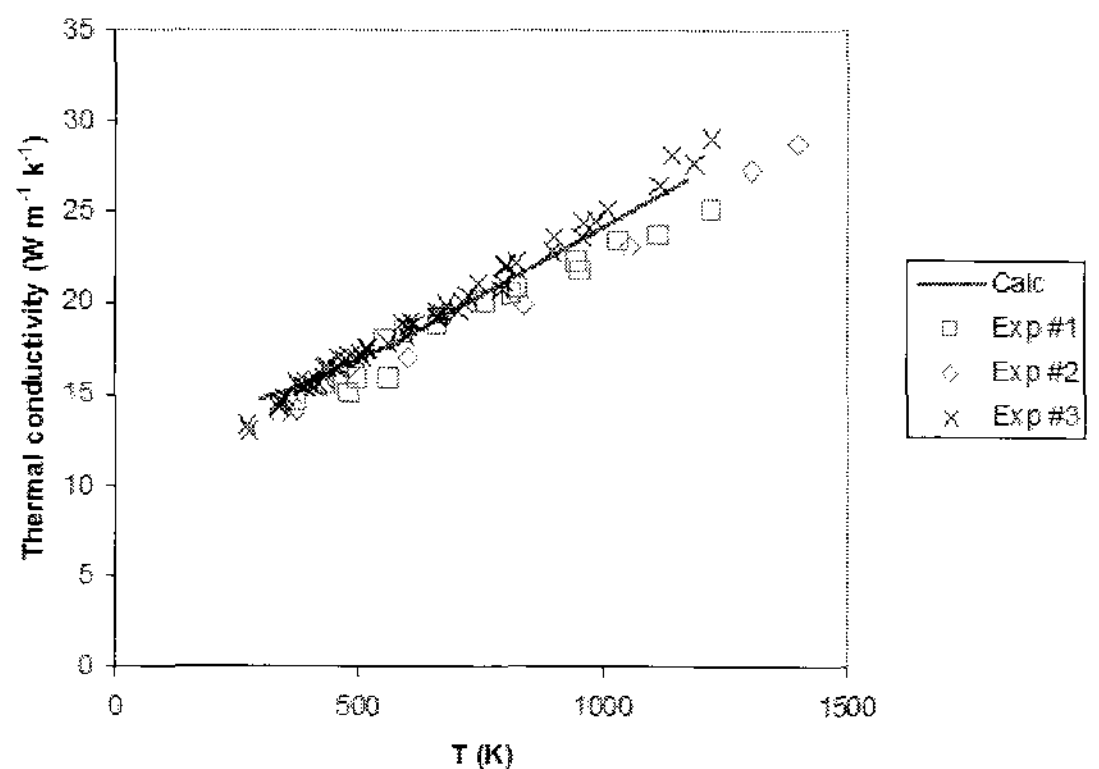


Fig. 4 Calculated(by JMatPro®) and measured thermal conductivity of STS316 stainless steels[15]

두 경우 모두에 있어서 계산값과 실험값이 매우 유사함을 보이고 있다.

◦ 고온 기계적 성질: 고온 기계적 성질 중 일반적인 크리프 식은 오스테나이트강 및 Ni합금과 같은 FCC 재료의 경우

$$\dot{\epsilon} = A D \{ (SFE) / (Gb) \}^m \{ (\sigma - \sigma_0) / E \}^n \quad (2)$$

페라이트강과 같은 BCC재료의 경우

$$\dot{\epsilon} = A D \{ (Gb) / (RT) \} \{ (\sigma - \sigma_0) / E \}^n \quad (3)$$

이며, A 는 재료상수, SFE 는 적층 결함 에너지, b 는 버거 벡터, σ_0 는 배응력(back stress), $m = 3$ 이며, D 는 유효확산계수(effective diffusion coefficient), G 는 전단탄성계수, σ 는 적용 응력, E 는 탄성계수, 그리고 n 은 크리프 지수이다. 이들 변수의 대부분은 JMatPro로 계산할 수 있다. 파단강도(rupture strength)는 많은 경우 대안적인 실제 설계 기준이 된다. 다음과 같은 관계식을 사용하여 응력 파단 수명을 계산할 수 있다.

$$t_r = \alpha \dot{\epsilon}^\beta \quad (4)$$

여기서 t_r 은 파단까지의 시간, α 및 β 는 경험적으로 결정한다. 크리프 계산과 다음과 같은 Hall-Petch식을 통합하여 고온에서의 유동 응력을 계산할 수 있다.

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-0.5} \quad (5)$$

여기서 σ 는 항복응력, σ_0 는 고유유동응력, k 는 Hall-Petch 계수, 그리고 d 는 결정립의 크기 (grain size)이다. 상온 항복응력의 온도에 따른 감소는 다음 식을 사용하면 일치하는 경향을 나타낸다.

$$\sigma(T) = \alpha + \beta \{ -Q / (RT) \} \quad (6)$$

α , β 는 σ_{RT} 와 직접 관련된 상수이고, Q 는 회귀 분석을 통하여 경험적으로 결정한다. 고온에서의 합금은 인장 시험에서의 변형을 속도가 시험 온도에서의 크리프 속도와 같거나 낮은 경우에 크리프에 의해 항복이 일어나게 된다. 이를 앞의 관계식들과 합하여 상온으로부터 용융온도까지의 기계적 성질을 구할 수 있다. Fig. 5는, 상온~900°C 사이에서 다양한 스테인리스강들의 항복응력이 계산 및 측정된 결과와 유사함을 보인다.

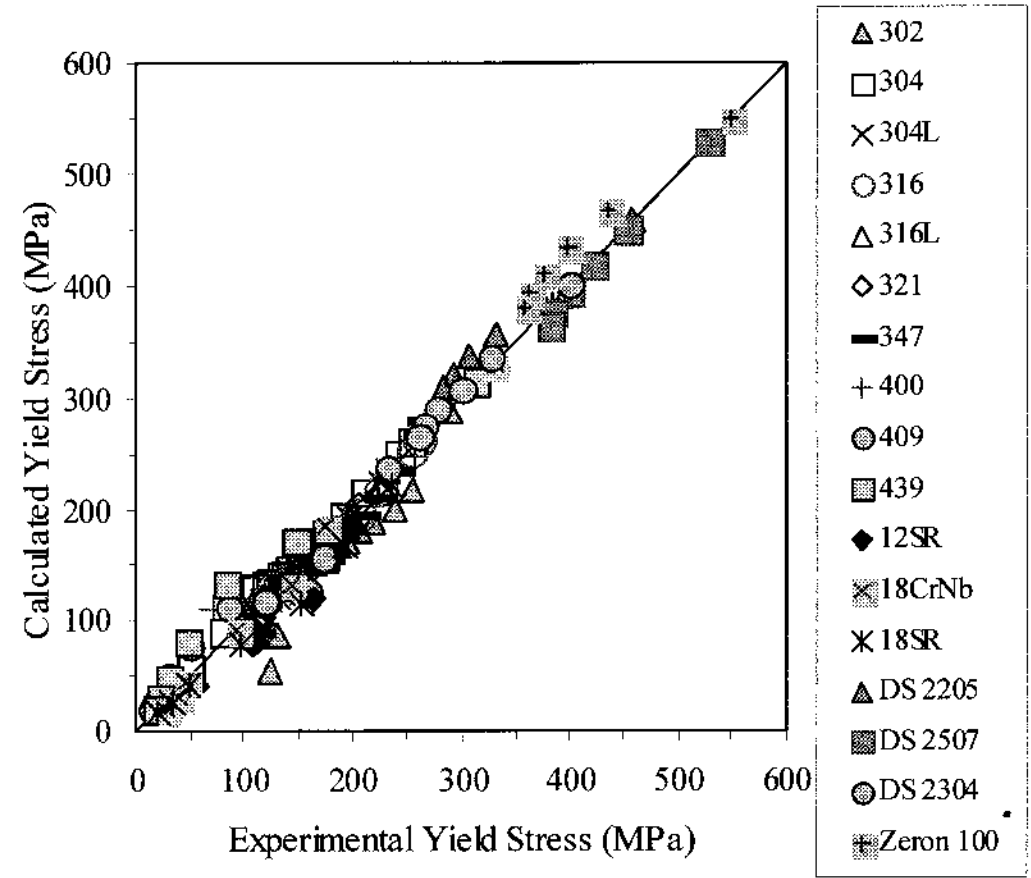


Fig. 5 Comparison between experimental and calculated (by JMatPro®) yield strength for various stainless steels between room temperature and 900 °C [16]

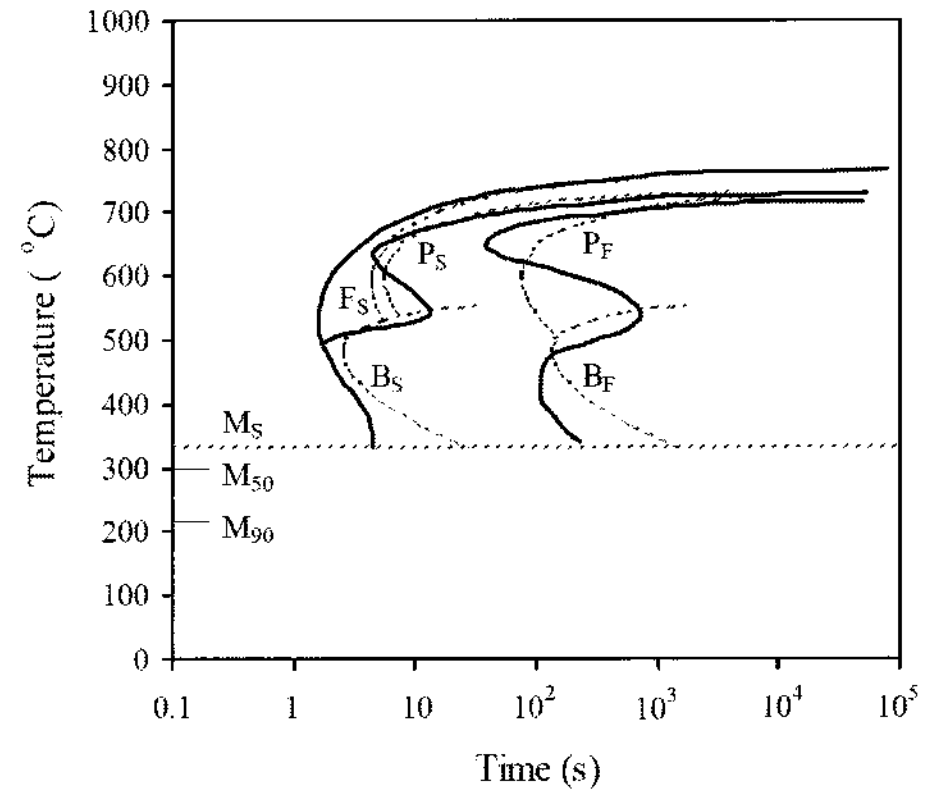


Fig. 6 TTT diagrams calculated for low alloy 5140 steel, including comparison with experiment [16]

◦ 상변태: 다양한 변태온도, 상의 성분, 구동력 등을 JMatPro®로 계산한 후, Kirkaldy 모델[18]을 수정한 식에 넣어 온도와 시간의 함수로 변태된 양을 계산하여 TTT/CCT도를 계산한다. 5140강에 대한 TTT 계산 데이터와 측정 데이터를 Fig. 6에 비교하였다. 여기서도 계산 결과가 실험 결과와 비교적 유사함을 볼 수 있다.

DEFORM™-HT에서 요구되는 TTT선도, 고온 물성 값 및 유동곡선 데이터를 얻기 위하여 Naderi et al[9]이 사용한 보론강(22MnB5)과 동일한 성분을 인용하였다. Table 1에 22MnB5의 화학적 성분을 수록하였다.

온도에 따른 물성 값을 핸드북이나 실험에서 얻기 어려우므로 본 연구에서는 JMatPro[®]를 활용하여 입력 데이터를 얻었다. Fig. 7에 JMatPro[®]에서 예측한 CCT선도를 보인다. 페라이트, 베이나이트, 마르텐사이트의 개시온도 등을 Fig. 8의 Naderi *et al*[9] 이 발표한 CCT선도와 비교해 보면 두 데이터 간의 유사성을 확인할 수 있다. 기타 온도 함수인 열전도계수나 탄성계수, 프와송비, 고온 유동곡선 등 해석에 필요한 데이터들도 JMatPro[®]로 얻었다. DEFORMTM-HT에서 상변태를 고려하려면 각 상(phase)에서의 물성 값이 필요한데, Fig. 9에는 계산된 각 상의 온도 별 열전도도를 보인다.

Table 1 Chemical components of the 22MnB5 steel (mass %)[9]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B
0.24	0.27	1.14	0.015	0.001	0.17	0.036	0.003

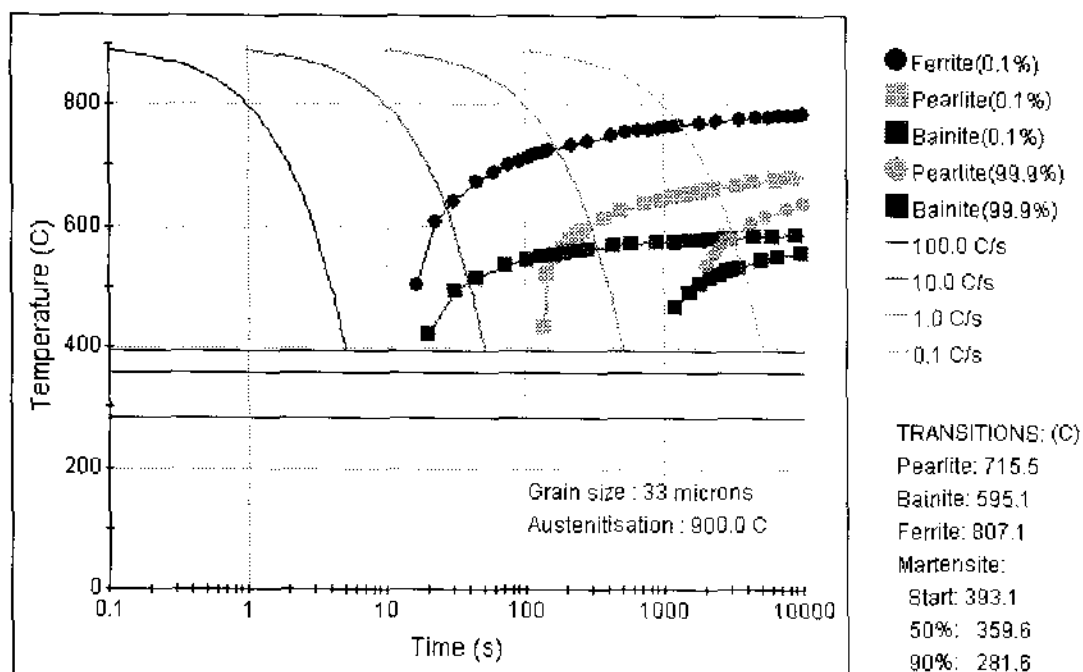


Fig. 7 Calculated CCT diagram of 22MnB5 steel (austenized at 900 °C)

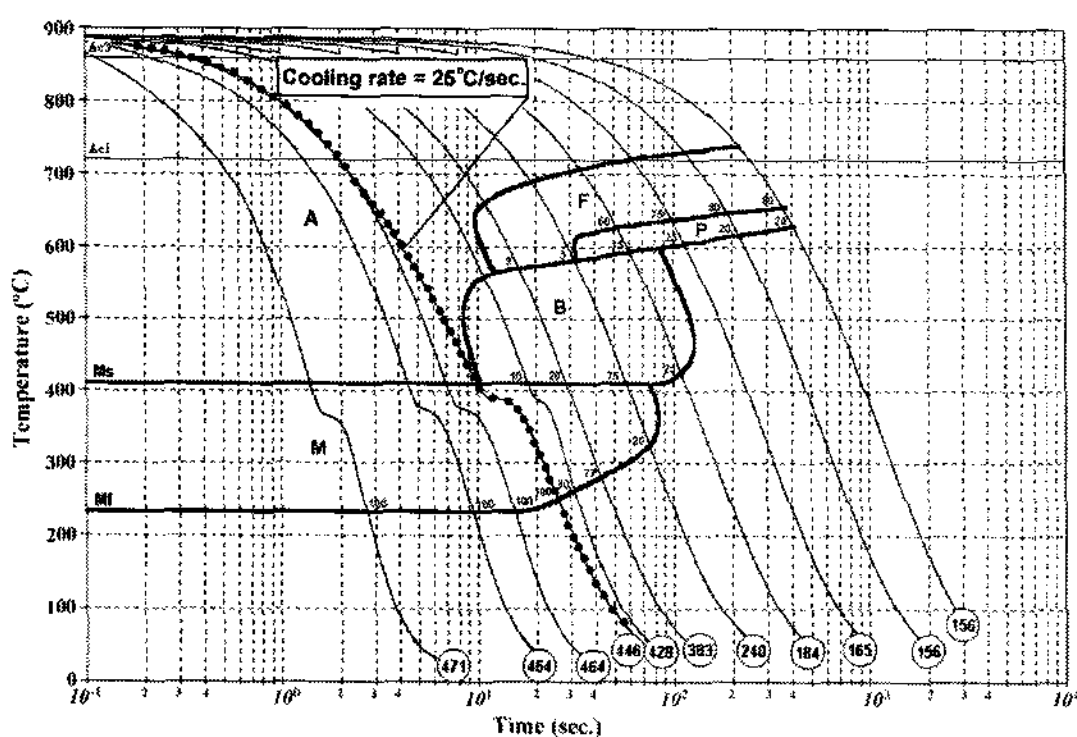


Fig. 8 CCT diagram of 22MnB5 steel austenized at 900 °C for 5 min. (Cited from [9].)

4. 유한요소 모델링

DEFORMTM-HT를 사용하여 열전달 및 상 변태를 고려한 변형거동을 예측하였다. 블랭크의 길이 방향으로 기계적 변형 및 열 변형이 없다고 가정하여 평면 변형율을 가정하였다. 대칭을 감안해서 1/2모델을 사용하여 해석에 적용하였다. 펀치와 다이는 강제요소로 가정하였고 펀치와 블랭크 그리고 블랭크와 하부 금형의 마찰계수는 0.2로 가정하였다. 노(furnace)에서 오스테나이트화 된 블랭크를 금형으로 올려놓는 시간을 30초로 하여 공냉 조건을 적용하고, 1초간 성형, 60초간 냉각하는 단계로 입력하였다(Fig. 10).

DEFORMTM-HT에서는 열전달 해석을 위해서 온도에 따른 열전도계수, 열용량계수, 방사율 등을 입력하며, 변형해석에서는 역시 온도에 따른 탄성계수, 프와송비, 열팽창계수, 유동 곡선을, 상 변태해석을 위해서는 TTT선도와 마르텐사이트

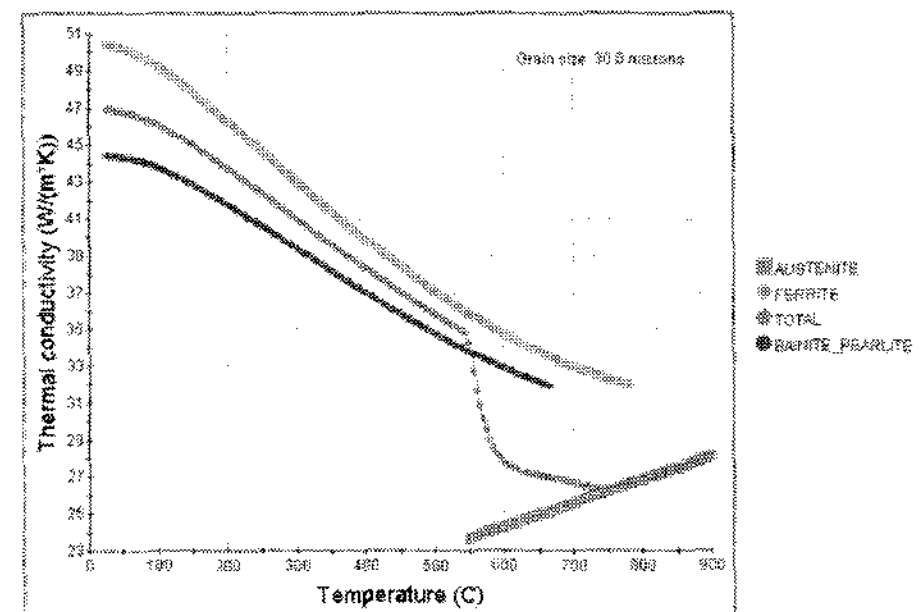


Fig. 9 Thermal conductivity coefficient of 22MnB5 calculated by JMatPro[®] for each phase for different temperature

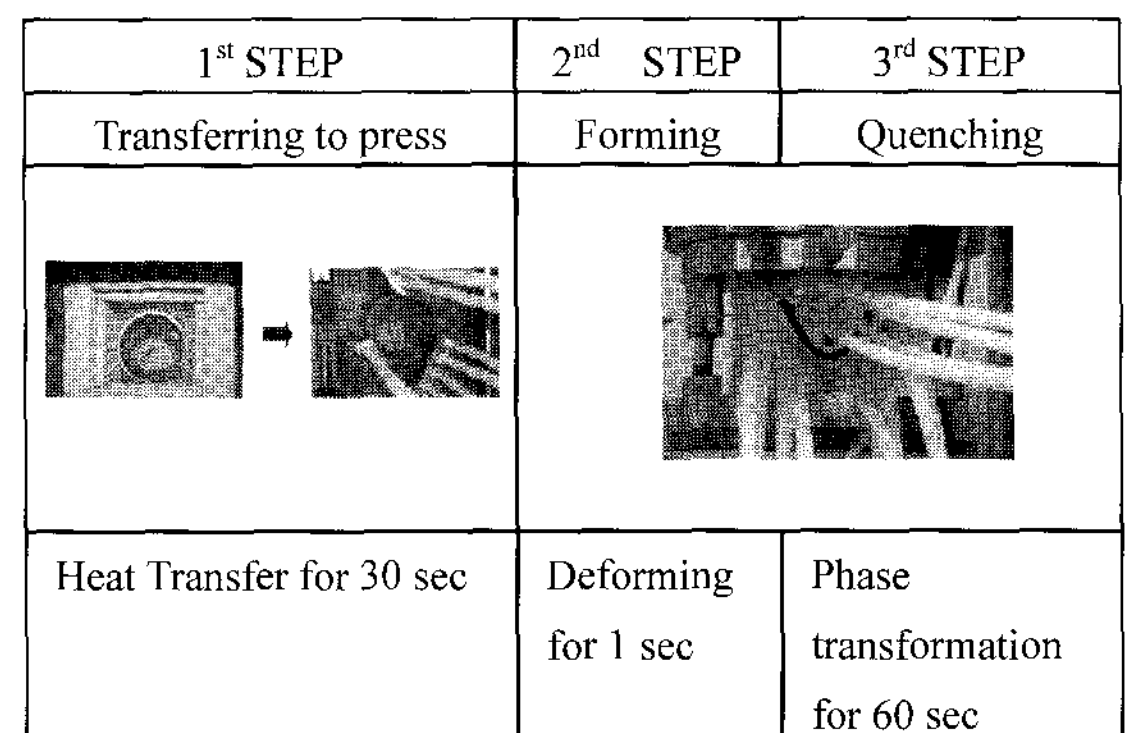


Fig.10 Analysis flow of hot forming process using DEFORMTM-HT

함수, 잠열, 상변태에 따른 체적 변화, 변태 소성 (transformation plasticity)들을 고려한다. 현 문제에서는 변태 소성 물성 값의 확보가 어렵기도 하였지만, 변형이 짧은 시간에 이뤄지는 것을 고려하여 성형 중의 변태 소성은 고려하지 않고 다만 성형 후 담금질 중의 상 변태만을 고려하였다. 또한 스프링백의 양이 작음을 고려하여 강소성(rigid plastic)으로 가정하여 변형거동을 예측하였다.

5. 결과 및 고찰

핫 프레스 포밍 전체 공정을 JMatPro[®] 와 DEFORMTM-HT를 활용하여 해석하였다. JMatPro[®]를 활용하여 TTT곡선, 고온 물성 값, 유동곡선 등 측정이 어려운 고온 데이터를 계산하여 DEFORMTM-HT의 입력데이터로 활용하였고, 열전달을 고려하여 비등온 변형거동을 예측하였다. Fig. 11은 1초간 성형을 한 직후에 나타낸 블랭크의 온도 분포이다. 아직 충분한 냉각이 일어나지 않은 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 담금질 중 온도 변화의 분포이다. 예측했던 대로 편치 및 하부 금형에는 수냉이 되므로 이들과 밀착되는 끝은 부분의 가운데 지점의 냉각속도가 빠르고(-62.4°C/s), 상부의 접힌 부분은 금형이 닿지 않아 공기에 의하여만 냉각되므로 냉각속도가 느리다(-6°C/s). 따라서 냉각속도가 빠른 부분부터 마르텐사이트 조직의 발생이 시작(395°C)되며, Fig. 12에서 보는 바와 같이 극히 일부분에서 마르텐사이트가 시작되고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 13는 성형을 마치고 60초간 냉각한 직후의 마르텐사이트의 분율을 CCT와 연계하여 보인 것이다. 금형과의 비접촉 부분은 냉각속도가 늦어서 마르텐사이트가 거의 나타나지 않고, 편치 및 하부 금형에 광범위하게 닿은 부분은 마르텐사이트의 함량이 높은 것을 보여준다.

최상부의 굽은 부분을 보면 마르텐사이트 57%, 베이나이트 5%, 페라이트가 38%로서, 충분한 담금질이 이루어지지 않은 것을 볼 수 있으며, 이와 같이 조직의 함량이 다르므로 같은 성형 부품 내에서 동일한 강도를 유지할 수 없음을 보여준다. Fig. 14는 성형을 마치고 60초간 냉각한 직후의 냉각 성능에 따른 마르텐사이트 분율을 나타낸다. 열대류계수의 차이에 따라 냉각속도가 다르고, 이에 따른 마르텐사이트의 분포를 보였다. Fig. 14 (a) 같은 경우 대류계수가 6N/sec/mm/K로서 냉매를 물로 사용한 경우, 그리고 (b)에서는 대류계수를 0N

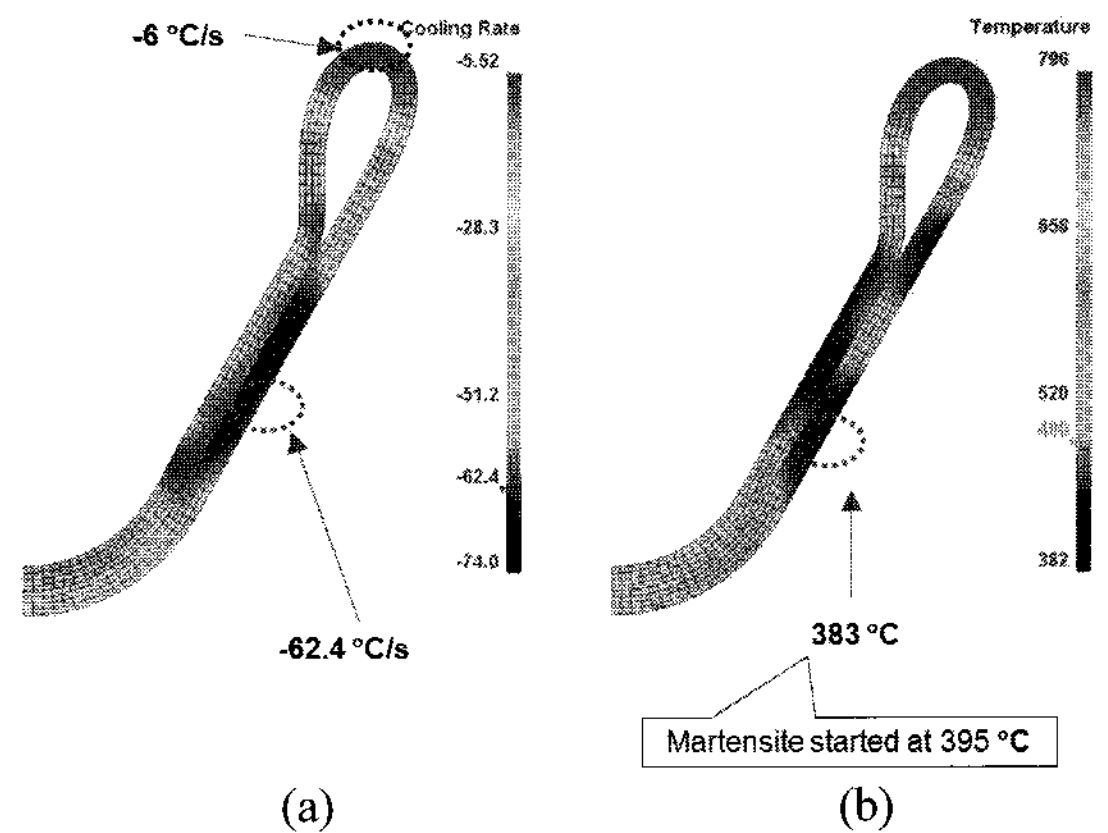


Fig.11 Distribution of (a) cooling rate and (b) temperature on the blank during quenching

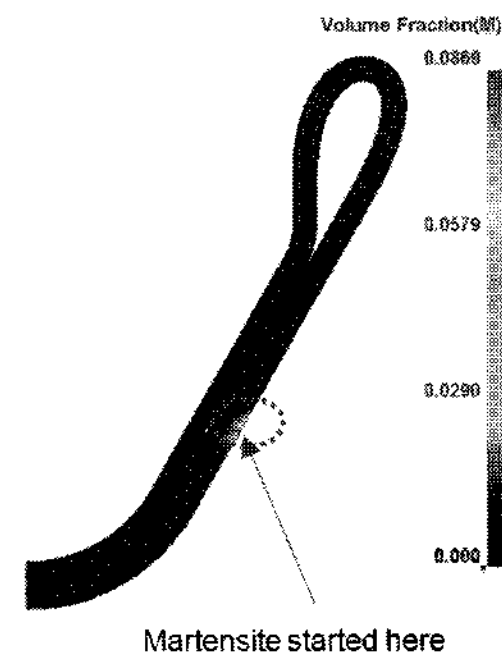


Fig.12 Volume fraction of martensite on the blank during quenching

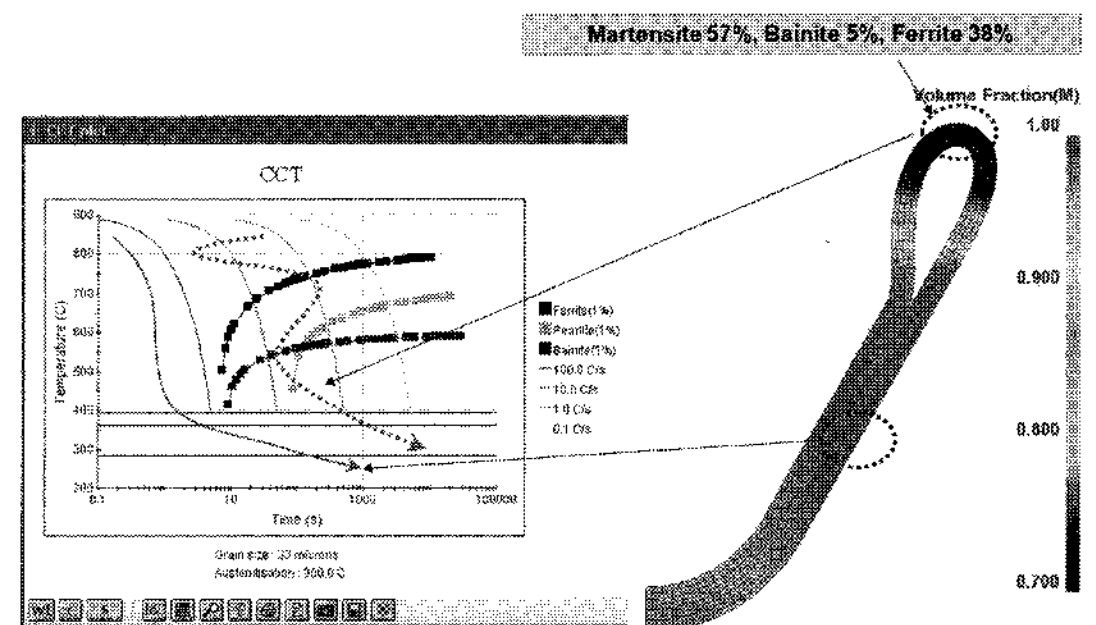


Fig. 13 Volume fraction of martensite in association with the CCT of 22MnB5 after cooling for 60 seconds

/sec/mm/K로 가정함으로써 냉매를 사용하지 않은 경우로 가정하여 비교해보았다. 예측하였듯이 대류가 잘 일어나도록 냉각 성능을 높일 경우 마르텐사이트 조직으로 변태가 잘 이루어 짐을 볼 수 있다. 이는 냉각 성능이 높은 냉각수를 사용하거

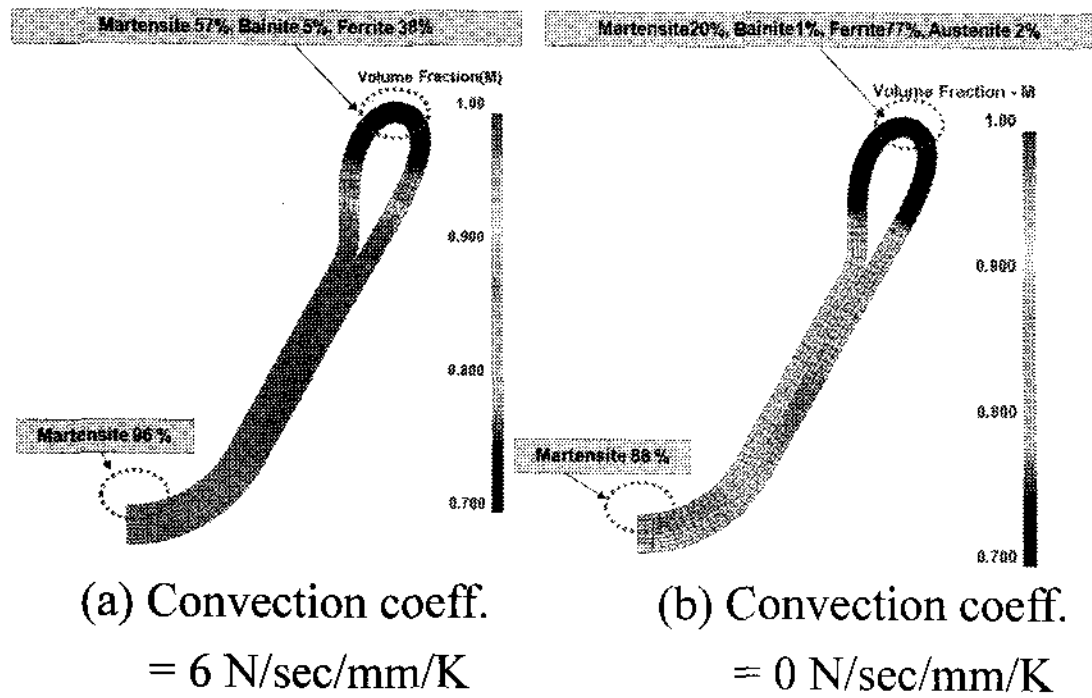


Fig.14 Volume fraction of martensite depending on the performance of the coolant after cooling for 60 seconds

나, 냉각수가 지나는 유로 설계를 최적화함으로써 얻을 수 있겠다.

비록 JMatPro[®]가 재료의 고온 물성 값 및 거동을 제공할 수 있음을 보여주었으나, 현재까지는 일부 재료에 대한 실험적 검증만 진행되어 있고, 본 연구에서도 시편 및 측정 장비의 제약상, CCT만을 정성적으로만 비교하였으므로, 보다 신뢰할 만한 재료 모델러로 인정받기 위해서는 다양한 시편을 활용하여 광범위한 고온 실험을 거쳐 계산의 신뢰도를 입증할 수 있어야 할 것이다. 또한 본 논문에서는 상 변태와 열 전달을 결합하여 계산할 수 있음을 보이는 것에 초점을 두어 강소성 가정으로 모든 과정을 계산하였으나 비록 핫 프레스 포밍 공정에서 스프링백에 의한 치수 변동이 작을 지라도 담금질을 거치면서 유동응력이 높아지기 때문에 잔류응력이 증가하므로 탄소성 가정으로 스프링백 해석까지 포함하여 이를 분석해보는 것이 바람직하다.

6. 결론

본 연구에서는 최근에 개발된 재료 물성 값 및 거동 모델러인 JMatPro[®]를 활용하여 광범위하고 고비용이 드는 고온 실험 대신에 전산적으로 예측된 실험값을 확보하고, 이를 이용하여 상변태 및 열전달을 고려한 핫프레스 포밍 공정을 DEFORM™-HT로 해석하였다. 이와 같은 과정을 통해서

(1) JMatPro[®]를 활용하여 고비용의 실험 종목을 대폭 줄일 수 있으므로 신속하고도 정확한 핫 프레스 포밍 공정 설계를 진행할 수 있음을 보였다.

(2) 상변태 해석을 열전달 해석과 결합하여 적용할 수 있음을 보임으로써, 동일 부품 내에서도 금형의 접촉상태에 따라 강도가 다를 수 있음을 효과적으로 명확히 보여주었다.

(3) 서로 다른 열대류계수, 즉, 냉매의 종류에 따라 열처리 조직의 분율이 함께 변화함을 보임으로써, 냉매 또는 수냉을 위한 유로 설계에 따라 부품강도를 조절할 수 있음을 관찰할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한남대학교 2007년도 교비학술연구비에 의해 부분적으로 지원되었습니다.

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] T. Altan, 2007, Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts Part II: Microstructure, material strength changes during hot stamping, Stamping Journal, January, pp. 14~15.
- [3] Y. R. Cho, J. G. Oh, H. G. Kim, S. H. Park, 2007, Developing Trends and Required Properties of Steel for Hot Press Forming, Conference proceeding of 2007 KSTP spring annual meeting, pp. 92~102.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M. Geiger, M. Merklein, C. Hoff, 2005, Basic Investigations on the Hot Stamping Steel 22MnB5, Advanced Materials Research Vol. 6-8, pp. 795-802.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] M. Naderi, L. Durrenberger, A. Molinari, W. Bleck, 2008, Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperature, Materials Science & Engineering A, Vol. 478, pp. 130~139.
- [10] H. S. Kim, M. H. Seo, S. J. Kim, S. C. Baik, W. J. Bang, 2001, 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.
- [11] 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.
- [12] Marc 2005, <http://www.mscsoftware.com/products/marc.cfm>
- [13] PAMSTAMP, 2007, <http://www.esi-group.com/newsite/products/metal-forming/pam-stamp-2g>
- [14] JMatPro, 2007, <http://www.sentessoftware.co.uk>
- [15] Sente Software, 2007, JMatPro introductory manual.
- [16] N. Saunders, Z. Guo, A. P. Miodownik, J. -Ph. Schillé, 2004, Modelling the material properties and behavior of multicomponent alloys, 22nd CAD-FEM User's Meeting 2004, International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX & ICEM CFD Conference, pp. 1~8.
- [17] DEFORMTM-HT, 2008, <http://www.deform.com/>
- [18] J. S. Kirkaldy, B. A. Thomson, E.A. Baganis, 1978, Hardenability concepts with applications to steel, eds. J.S. Kirkaldy and D.V. Doane,(Warrendale, PA: AIME, 1978), 82.