

원통형 보론강을 사용한 가열-급냉공정에서의 열변형 해석

서창희¹ · 권태하¹ · 강경필² · 최현열³ · 김양수⁴ · 김영석[#]

Thermo-mechanical Simulation of Boron Steel Cylinders during Heating and Rapid Cooling

C. H. Suh, T. H. Kwon, K. P. Kang, H. Y. Choi, Y. S. Kim, Y. S. Kim

(Received July 3, 2014 / Revised November 3, 2014 / Accepted November 12, 2014)

Abstract

Water quenching is one method of cooling after hot forming, which is presently being used for the manufacturing of automobile parts. The formed parts at room temperature are heated and then cooled rapidly in a water bath to produce high strength. The formed parts may undergo excessive thermal distortion during the water quench. In order to predict the distortion during water quenching, a coupled thermo-mechanical simulation is needed. In the current study, the simulation of heating and cooling of boron steel cylinders was performed. The material properties for the simulation were calculated from JMatPro, and the convective heat transfer coefficient was obtained from experimental tests. The results show that the thermal distortion and the residual stresses are well predicted by the coupled simulation.

Key Words : Thermal Deformation, Boron Steel, Rapid Cooling, Phase Transformation, Heat Transfer Coefficient

1. 서론

열간성형(hot forming)은 경화능이 우수한 소재인 보론강을 사용하여 약 900℃ 내외의 온도로 가열한 뒤 가열된 소재를 급냉시켜서 고강도 특성을 얻는 기술이다[1,2]. 소재를 급냉시키는 방법에 따라서 열간성형은 금형냉각방식(die quenching method)과 수냉방식(water quenching method)으로 크게 나뉘어진다[2~5]. 금형냉각방식에서는 고온의 소재를 금형으로 성형 후 금형을 닫은 상태로 소재를 냉각시키기 때문에 냉각과정에서 발생하는 변형을 감소시킬 수 있는 장점이 있지만 고가의 금형제작비와 사이클타임의 증가 등으로 인해서 부품 제조비용이 증가하는 단점이 있다. 반면에 수냉방식에서는 냉간성형된

제품을 가열한 후 간단한 지그를 활용하여 냉각시키기 때문에 기존의 금형기술과 프레스 장비를 활용할 수 있으며, 급속한 냉각으로 인해서 사이클타임을 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 수냉방식에서는 소재의 냉각과정에서 발생하는 변형을 제어하기 어려운 단점이 있다. 현재 상용화되어 있는 열간성형방식은 대부분 금형냉각방식이나 형상이 단순하고 두께가 두꺼운 부품을 대상으로 수냉방식을 적용하려는 시도들이 시작되고 있다[5]. 수냉방식을 적용하여 부품을 제조하기 위해서는 급냉시 발생하는 변형을 정확히 예측할 수 있어야 하기 때문에 냉각과정에서 변형을 유발시키는 주요한 원인인 열전달, 열팽창, 상변태 등에 대한 정밀한 연구가 수행되어야 한다. 열전달, 열팽창, 상변태를 고려한 유

1. 대구기계부품연구원

2. 솔루션랩

3. ㈜화신정공

4. ㈜화신

Corresponding Author : Kyungpook Nat. Univ.,

E-mail : caekim@knu.ac.kr

한요소해석을 통해 급냉공정시 발생하는 변형을 예측하려는 시도들이 최근에 활발히 수행되어지고 있으며[6~8], 실험으로 얻기 어려운 재료의 물성들을 열역학 계산으로 도출하여 유한요소해석에 적용하려는 연구들도 수행되고 있다[9,10].

하지만 온도에 따른 소재 물성치들을 실험적으로 구하기에는 한계가 있기 때문에 다양한 소재에 대한 냉각공정에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다.

본 연구에서는 열간성형용으로 널리 사용되는 보론강(PHT1470H)을 대상으로 급냉시 열변형 예측에 대한 해석적인 연구를 수행하였다. 열역학 기반의 물성계산 프로그램인 JMatPro를 활용하여 실험으로 구하기 어려운 다양한 물성치들을 도출하였으며[9,10], 냉각시 열전달에 지배적인 영향을 미치는 물과 소재의 대류 열전달 계수는 실험을 통해서 획득하여 해석에 적용하였다. 열변형 해석의 정확성은 Turetta[11]의 실험결과와 비교하여 검토하였다. 또한 시편의 크기에 따라 열변형 양상이 다르게 나타남으로 시편의 크기에 따른 열변형 양상의 변화를 해석적으로 검토하였다.

2. 열변형 이론

가열시 소재는 열팽창과 상변화를 겪으며 열변형이 발생하게 된다. 냉각시는 국부적인 수축과 팽창으로 인한 구속으로 탄성 및 소성변형이 발생하며, 온도변화에 따라서 열팽창과 상변태가 발생함으로써 이러한 변형을 모두 고려해야 열변형의 정확한 예측이 가능하다.

연속냉각상태에서 총 변형을 증분(strain increment)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij}^{\theta} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^{th} + \epsilon_{ij}^{tr} + \epsilon_{ij}^{tp} \quad (1)$$

여기서 ϵ_{ij}^e 는 탄성변형, ϵ_{ij}^p 는 소성변형, ϵ_{ij}^{th} 는 온도에 따른 열팽창, ϵ_{ij}^{tr} 는 상변태에 의한 체적변화, ϵ_{ij}^{tp} 는 변태소성에 의한 변형을 증분을 나타낸다.

열팽창에 의한 변형을 증분은 식 (2)와 같이 각 상의 온도에 따른 열팽창계수에 의하여 계산된다.

$$\epsilon_{ij}^{th} = \alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (2)$$

여기서 α 는 열팽창계수, T 는 온도, T_0 는 기준온도이다.

오스테나이트, 페라이트, 펄라이트, 베이나이트 등의 각 상들은 체적의 차이를 가지고 있으며, 상변태에 의한 변형을 증분은 식 (3)과 같이 계산된다[12].

$$\epsilon_{ij}^{tr} = \sum \beta_{IJ} \xi_J \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서 β_{IJ} 는 길이팽창계수, ξ_J 는 체적변화속도이다.

변태소성은 변태과정 중에 항복강도 이내의 작은 응력이 작용하는 경우에도 소성변형을 가져오는 구변형을 가져오는 현상으로, Desalos에 의해 제안된 식 (4)와 같이 계산된다[13].

$$\epsilon_{ij}^{tp} = \frac{3}{2} K_{IJ} h(\xi_J) \xi_J s_{ij}, \quad h(\xi_J) = 2(1 - \xi_J) \quad (4)$$

여기서 K_{IJ} 는 변태소성계수, ξ_J 는 체적변화속도, s_{ij} 는 편차응력, ξ_J 는 상분율을 나타낸다.

3. 유한요소해석 및 실험

3.1 해석 모델 및 조건

본 연구에서는 가열 및 급냉공정을 해석하였으며, 해석결과를 실험과 비교하기 위해서 단순한 원통형 시편을 모델링하여 사용하였다. 그리고 시편의 크기에 따른 열변형 차이를 확인하기 위해서 시편의 형상은 소형과 대형 2 가지로 모델링하여 해석하였다. 소형 시편은 지름이 5mm이고 길이는 10mm이며, 대형 시편은 지름이 38mm이고 길이는 76mm이다. 해석 모델을 Fig. 1에 나타냈으며, 해석시간의 단축을 위해 1/2 축대칭모델을 사용하였다.

본 연구에 사용된 소재는 보론강이며, 해석에 필요한 물성을 확보하기 위해서 열역학 기반의 물성계산 프로그램인 JMatPro를 사용하였다. JMatPro는 재료의 상평형, 열 및 물리적 성질들, 상변태, 미세조직, 온도의존적 기계적 성질 등을 계산할 수 있으며, 본 연구에서 JMatPro를 사용하여 구한 보론강의 물성은 다음과 같다.

- (1) 열전달 관련 : 온도에 따른 열전도계수 및 열용량

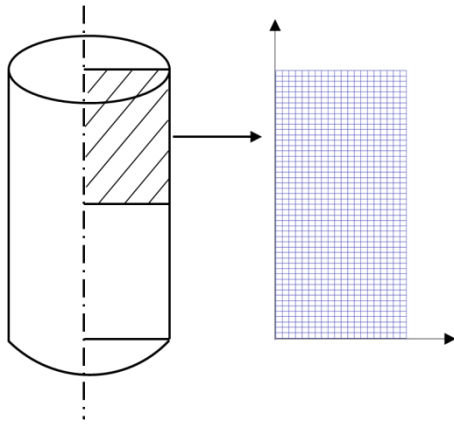


Fig. 1 Finite elements model for simulation

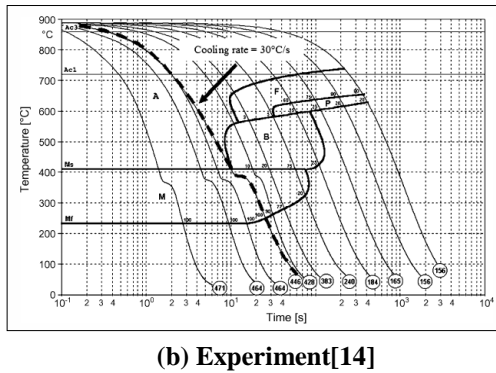
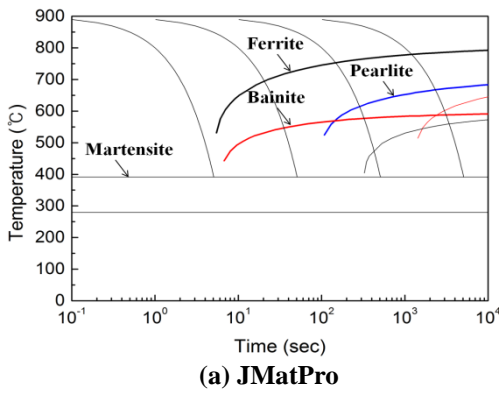


Fig. 2 Comparison of CCT curves obtained from JMatPro and experiment

- (2) 변형 관련 : 온도에 따른 탄성계수, 프와송비, 열팽창계수, 유동응력
 - (3) 상변태 관련 : TTT선도, 마르텐사이트 함수, 잠열, 상변태에 따른 체적변화
- 냉각과정에서 외부에서 가해지는 하중이 없기 때문에 변태소성은 고려하지 않았다.
본 연구에서는 DEFORM-2D를 이용하여 열전달과

상변태를 고려한 탄소성 해석을 수행하였다. 시편을 열간성형 온도인 900℃로 가열 후 급냉시켜 상온까지 도달시키는 공정을 해석하였다.

3.2 실험 방법

JMatPro에서 구해진 물성치 이외에도 열변형에 영향을 미치는 주요한 변수는 냉매인 물과의 대류 열전달이며, 대류 열전달 계수는 소재 자체의 물성이라기 보다는 냉매의 종류, 온도, 유속 등에 영향을 받는 변수임으로 실험을 통하여 구하였다. 두께가 3.2mm인 보론강 시편의 표면에 열전대를 용접하여 부착하고 데이터수집장치(Agilent 34970A)를 사용하여 가열로에서 900℃까지 보론강 소재를 가열 후 가열로를 열고 시편을 물속에 장입하면서 온도의 변화를 측정하였다. 실험에서 얻어진 온도 데이터를 활용해서 시편과 물과의 대류 열전달 계수를 역추적하여 해석시 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 소재 물성 및 대류 열전달 계수

본 연구에 열변형 해석에 필요한 보론강의 다양한 물성을 JMatPro를 사용하여 계산하였다. 강 등 [10]의 연구에서 열전도 계수, 항복강도, CCT선도 등을 실험과 JMatPro에서 계산된 값의 비교를 통해서 JMatPro에서 계산된 물성치들의 유효성을 검토하였다. 본 연구에서는 JMatPro에서 계산된 여러 물성치들 중 대표적으로 계산된 CCT선도와 본 연구에서 사용한 보론강과 거의 유사한 성분을 가지는 22MnB5 소재의 실험으로 구해진 CCT선도[14]를 Fig. 2에 비교하여 나타냈다. 마르텐사이트 시작온도가 약 400℃로 유사하게 나타났으며, 페라이트와 베이나이트 생성 시점이 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3에 실험으로 구해진 온도 데이터와 이 데이터를 활용하여 역추적된 열전달계수 분포를 나타냈다. Fig. 3(a)에 보여지듯이 900℃까지 가열된 후 물속에서 시편은 급격한 온도 감소를 보이게 된다. 시편은 가열로에서 나온지 약 3초만에 마르텐사이트 종료 온도인 200℃이하까지 급격히 온도가 감소하였다. 이 온도 데이터를 활용하여 시편의 표면과 냉매인 물과의 대류 열전달 계수를 역추적하였으며, Fig. 3(b)와 같은 결과를 얻었다. 본 연구에서 구해진

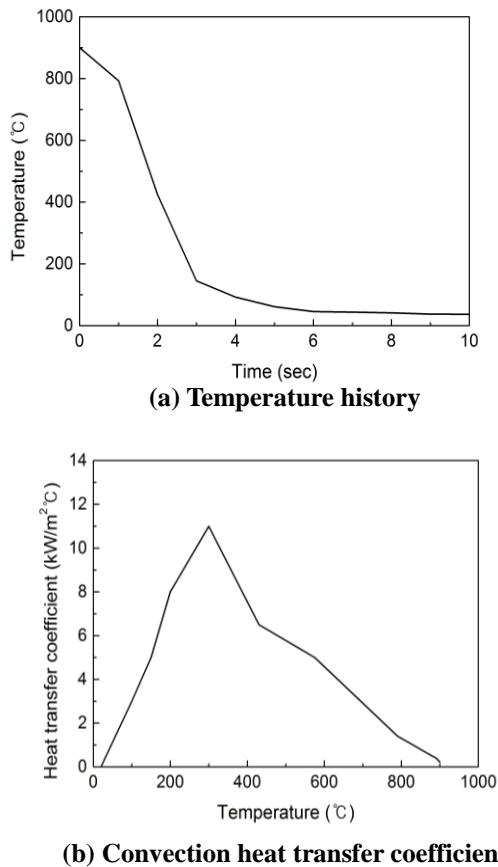


Fig. 3 Measured temperature history at the specimen surface during cooling and calculated convection heat transfer coefficient

대류 열전달 계수의 분포는 다른 연구[6]에서 구해진 결과와 거의 동일하게 정규분포의 형태를 가지고 있음을 확인하였다. 이러한 정규분포형태의 열전달 계수가 나타나는 원인은 다음과 같다. 고온으로 가열된 시편이 물에 담긴 직후 시편의 표면에서 증기막(vapor blanket)이 형성되어 물과의 열전달을 방해하게 된다. 이후 일정한 시간이 지나면서 증기막이 일부 파괴되기 시작하면서 대류 열전달 계수는 증가하게 된다. 증기막이 급격히 파괴되면서 대규모의 비등(boiling)이 발생하는 단계에서는 시편 표면 주위의 물들이 공기와 같이 급격히 상승하며 시편의 열을 빼앗아가게 되며 이때 가장 높은 대류 열전달 계수를 가지게 된다. 비등과정이 끝나면 자연 대류(free convection)에 의해서 열전달이 발생하게 되며 이때는 온도가 감소함에 따라서 서서히 대류 열전달 계수가 감소하게 된다. 이렇게 실험에서 구해진 대류 열전달 계수를 열변형 해석을 위해서 사

용하였다.

4.2 축방향 열변형

Turetta[11]는 두께가 1.5mm 인 보론강(22MnB5)을 사용해서 가열과 냉각시 보론강의 변형율을 측정할 수 있는 장치를 고안하였다(Fig. 4). 이 장치에서 시편을 고주파유도가열 방식으로 가열한 후 고압의 공기분사 시스템을 장착하여 시편을 급냉시켰다. Fig. 5(a)에 Turetta의 실험에 의해서 측정된 변형율의 변화를 나타냈다. 초기에 소재가 가열되기 시작하면서 열팽창의 영향으로 시편의 변형율이 증가하게 된다. 이후 A_1 변태 온도에 도달하게 되면 상온에서의 페라이트와 펄라이트 복합상이 오스테나이트로 변태가 시작되면서 변형은 감소하게 된다. 이는 오스테나이트가 페라이트나 펄라이트에 비해서 작은 체적을 가지고 있기 때문에 나타나는 결과이다. 오스테나이트 변태가 계속되는 A_3 온도까지 체적감소로 인해서 변형율이 감소하다가 오스테나이트 변태가 완료되면 다시 열팽창에 의해서 변형율이 증가하게 된다. 냉각시는 압축공기에 의해서 급격히 냉각되기 때문에 열팽창에 의해서 변형율이 급격히 감소하다가 마르텐사이트 시작온도인 약 400°C 근처에서 변형율이 증가하게 된다. 이러한 결과는 마르텐사이트의 체적이 오스테나이트에 비해서 크기 때문에 나타나는 현상이다. 마르텐사이트의 생성이 종료되는 온도인 약 200°C 근처까지 변형율이 증가하며 이후에 열팽창에 의해서 변형율이 감소하게 된다. Fig. 5(b)에는 소형시편을 사용해서 해석으로 얻어진 변형율 변화를 나타냈다. 실험에서 구해진 실제 변형율 변화를 열전달과 상변태를 고려한 해석으로 거의 정확하게 표현할 수 있음을 확인하였다. 하지만 일부 수치에 있어서 차이를 나타내고 있다. 900°C까지 가열되었을때 실험에서는 변형율이 약 0.012 이나 해석에서는 약 0.015정도로 다소의 차이를 나타냈다. 이러한 차이는 실험과 JMatPro에서 구해진 열팽창계수가 미세하게나마 차이가 나기 때문에 나타난 결과로 여겨진다. 또 900°C에서 마르텐사이트 시작온도인 약 400°C 근처까지 냉각하는 과정에서 곡선의 형태가 다소의 차이를 나타냈다. 실험에서는 거의 직선의 형태를 나타내며, 해석에서는 다소 곡선의 형태를 나타내고 있다. 이러한 차이는 실험에서는 인장시편의 평행부에서 변형율을 측정하고 해석에서는 원통형 시편의 상하부를 기준으로

로 변형율을 측정하였기 때문에 나타나는 결과로 생각된다. 또한 마르텐사이트 생성시 변형율이 실험과 해석에서 미세한 차이를 나타내는데 이는 각 상의 체적값을 일부 수정하면 보정할 수 있을 것으로 판단된다. JMatPro에서 계산된 물성치를 사용한 해석결과는 실험결과와 미세한 차이를 나타내고 있지만 전체적으로 유사한 결과를 얻었다. 즉, JMatPro로 계산된 열물성의 사용과 실험에서 구한 대류 열전달 계수를 사용한 경우 보론강 시편의 열변형 거동을 거의 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에 소형시편과 대형시편을 사용하여 동일한 조건에서 급냉해석을 수행한 후 냉각이 완료된 상태의 마르텐사이트 분율 및 변형양상을 나타냈다. 소형시편의 경우 심부와 표면 모두에서 100% 마르텐사이트 변태가 완료되었으나, 대형시편의 경우는 심부에서 마르텐사이트 변태량이 약 95% 정도로 나타났다. 이러한 결과는 시편의 크기에 따른 결과로 표면의 대류 열전달이 동일하게 발생한다고 하여도 소재의 열전도 계수가 대류 열전달 계수에 비해 아주 낮은 값을 가지기 때문에 심부의 냉각속도는 시편이 대형화 될수록 느려지게 된다. 즉, 심부는 느린 냉각속도로 인해 마르텐사이트 분율이 적어지게 된다. 이러한 크기 차이는 변형의 측면에서도 많은 차이를 가져오게 된다. 소형의 경우는 심부와 표면의 냉각속도 차이가 작기 때문에 거의 균일한 변형을 나타내지만 대형시편의 경우는 마르텐사이트 분율이 높은 표면에서의 체적 증가로 인해서 표면쪽이 팽창하고 내부가 다소 수축된 것처럼 보이는 불균일한 변형을 나타내게 된다. 즉, 동일한 소재 물성치와 대류 열전달 계수를 사용한 경우도 시편의 크기가 달라지면 열변형 양상은 차이를 나타내게 됨을 확인하였다. 실제 제품은 크기 및 두께가 다른 경우들이 많으며, 이러한 제품의 열변형 예측에 본 해석 기술이 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 열변형이 정확히 예측되면 금형 및 지그 등을 통한 열변형 보정 기술이 개발되어 열변형의 보정이 가능 할 수 있을 것으로 예상된다.

4.3 잔류응력

잔류응력 분포는 대형시편을 사용한 해석결과와 실험결과[6,15]를 비교하여 검토하였다. 실험에서는 본 연구에서 사용한 대형시편과 동일한 크기의 탄소함량이 약 0.79wt%인 탄소강을 사용해서 급냉

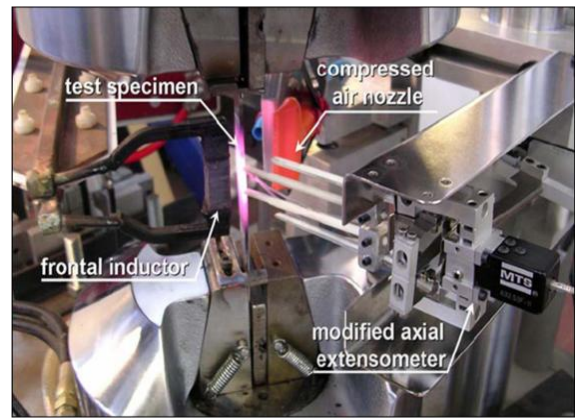
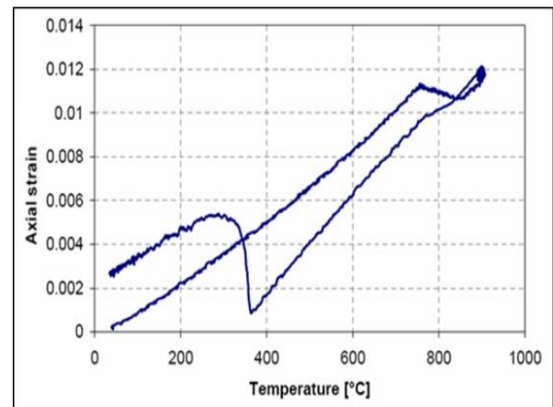
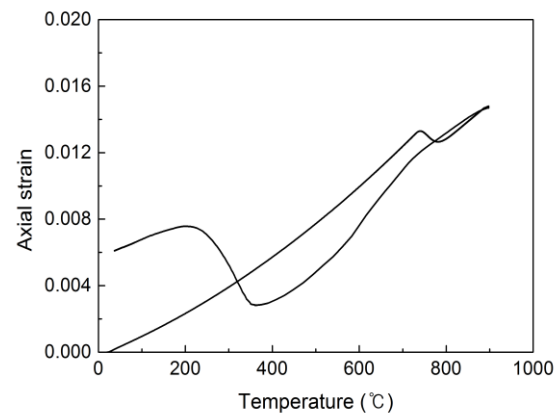


Fig. 4 Experimental apparatus to measure thermal deformation by Turetta[11]



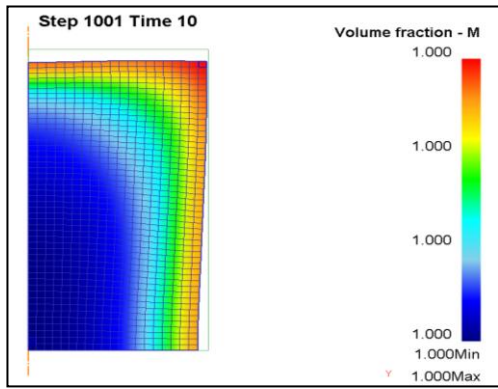
(a) Turetta's experiment[11]



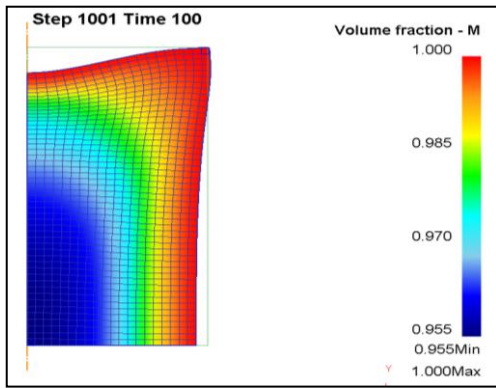
(b) Simulation

Fig. 5 Thermal deformation curves obtained by Turetta's experiment and simulation

실험을 수행하였다. 냉각이 완료된 후 X선 회절법을 사용하여 냉각된 시편의 잔류응력을 표면에서 깊이 방향으로 측정하였다. Fig. 7에 본 연구의 해석



(a) Small size specimen



(b) Large size specimen

Fig. 6 Thermal deformation and martensite volume fraction after rapid cooling

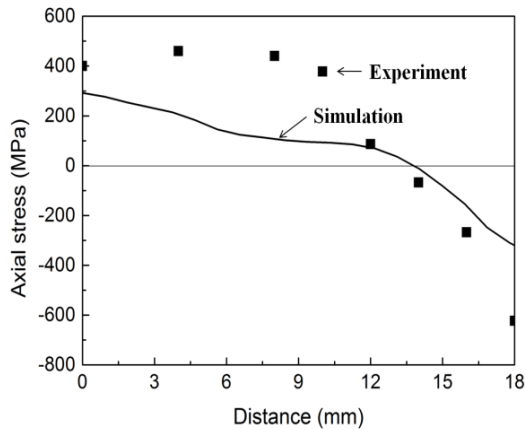


Fig. 7 Axial stresses obtained from experiment[6] and simulation using large size specimen

에서 보론강을 사용해서 도출된 냉각완료 후 잔류응력 분포와 0.79wt%인 탄소강을 사용해서 냉각실험 후 측정된 잔류응력 분포를 나타냈다. 해석과 실험 모두에서 심부에서는 인장잔류응력이 나타났으

나 표면에서는 압축잔류응력이 나타났다. 이러한 분포 경향은 이전의 연구 결과[6,15]와 거의 유사하였다. 다만, 실험과 해석값에서는 다소의 차이를 나타냈다. 이러한 차이는 보론강과 탄소강 소재의 경화능 및 CCT 차이에서 오는 결과로 예상되며 향후 좀 더 세부적인 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다. 하지만, 본 연구에서 수행된 해석이 열변형뿐 아니라 잔류응력의 예측에서도 어느 정도 정확함을 알 수 있었다.

5. 결론

보론강 시편을 사용하여 급냉공정에 대한 열전달과 상변태를 고려한 해석을 수행하여 다음과 같은 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) JMatPro로 계산된 물성치들과 실험에서 구해진 대류 열전달 계수의 사용은 열변형을 예측하는데 매우 효과적임을 확인하였다.

(2) 가열과 급냉 과정에서의 열변형 거동을 해석적으로 거의 정확하게 예측할 수 있었다.

(3) 급냉이 완료된 잔류응력 분포는 실험에서 구해진 값과 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

(4) 동일한 물성과 대류 열전달계수를 사용한 경우에도 시편의 크기에 따라 다른 열변형 양상을 나타냈으며, 시편의 크기가 증가할 수록 심부의 마르텐사이트 분율이 감소하였다.

후기

이 논문은 2013 산업부/지역특화산업육성사업(경북)의 사업비를 지원받아 연구 되었음(과제번호: R0002155)

REFERENCES

[1] M. S. Chae, G. D. Lee, Y. S. Suh, K. H. Lee, Y. S. Kim, 2009, Mechanical and Forming Characteristics of High-strength Boron-alloyed Steel with Hot Forming, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 3, pp. 236~244.

[2] H. Karbasian, A. E. Tekkaya, 2010, A Review on Hot Stamping, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, No.

- 15, pp. 2103~2118.
- [3] M. G. Lee, S. J. Kim, H. N. Han, W. C. Jeong, 2009, Application of Hot Press Forming Process to Manufacture an Automotive Part and Its Finite Analysis Considering Phase Transformation Plasticity, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 21, No. 11, pp. 888~898.
- [4] A. D. ds Silva, T. A. Pedrosa, J. L. Gonzalez-Mendez, X. Jiang, P. R. Cetlin, T. Altan, 2012, Distortion in Quenching an AISI4140 C-ring – Predictions and Experiments, *Mat. Design*, Vol. 42. pp. 55~56.
- [5] J. K. Park, Y. S. Kim, O. S. Seo, M. G. Lee, H. Y. Kim, 2013, Improved Hot-stamping Analysis of Tubular Boron Steel with Direct Measurement of Heat Convection Coefficient, *Int. J. Auto. Technol.*, Vol. 14, No. 5, pp. 717~722.
- [6] S. H. Kang, Y. T. Im, 2007, Thermo-elasto-plastic Finite Element Analysis of Quenching Process of Carbon Steel, *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 192-193, pp. 381~390.
- [7] S. H. Kang, Y. T. Im, 2007, Three-dimensional Thermo-elastic-plastic Finite Element Modeling of Quenching Process of Plain-carbon Steel in Couple with Phase Transformation, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 49, No. 4, pp. 423~439.
- [8] P. Carlone, G. S. Palazzo, R. Pasquino, 2010, Finite Element Analysis of the Steel Quenching Process: Temperature Field and Solid-solid Phase Change, *Comp. Math. Appl.*, Vol. 59, No. 1, pp. 585~594.
- [9] S. Y. Lee, K. Lee, Y. H. Lim, W. C. Jeong, 2013, Study on Heat Transfer Characteristic in Hot Press Forming Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22. No. 2, pp. 101~107.
- [10] 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 DEFORM-HT, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, No. 4. pp. 249~256.
- [11] A. Turetta, 2008, Ph. D. Thesis, Universita' Degli Studi Di Padova, pp. 39~82.
- [12] J. B. Leblond, G. Mottet, J. C. Devaux, 1986, A Theoretical and Numerical Approach to the Plastic Behaviour of Steels during Phase Transformations-I. Derivation of General Relations, Vol. 34, No. 4, pp. 395~409.
- [13] Y. Desalos, F. Gunsberg, 1982, Deformations et Contraintes Lors du Traitement Thermique de Pieces en Acier, Report No. 902, IRSID, St-Germain-en-Laye.
- [14] M. Naderi, L. Durrenberger, A. Molinari, W. bleck, 2008, Constitutive Relationships for 22MnB5 Boron Steel Deformed Isothermally at High Temperatures, *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 478, No. 1, pp. 130~139.
- [15] K. F. Wang, S. Chandrasekar, H. T. Y. Yang, 1997, Experimental and Computational Study of the Quenching of Carbon Steel, *J. Manuf. Sci.*, Vol. 119. No. 3, pp. 257~265.