

# 사각판재 보론강을 사용한 유체냉각공정에서의 열변형 해석

서창희<sup>#</sup> · 권태하<sup>1</sup> · 전효원<sup>1</sup> · 오상균<sup>1</sup> · 박춘달<sup>1</sup> · 최현열<sup>2</sup> · 문원식<sup>2</sup>

## Thermal Deformation Simulation of Boron Steel Square Sheet in Fluid Cooling Process

C. H. Suh, T. H. Kwon, H. W. Jeon, S. K. Oh, C. D. Park, H. Y. Choi, W. S. Moon

(Received July 6, 2016 / Revised December 15, 2016 / Accepted December 29, 2016)

### Abstract

Fluid cooling is one of the manufacturing processes used to control mechanical properties, and is recently used for hot stamping of automobile parts. The formed part at room temperature is heated and then cooled rapidly using various fluids in order to obtain better mechanical properties. The formed part may undergo excessive thermal deformation during rapid cooling. In order to predict the thermal deformation during fluid cooling, a coupled simulation of different fields is needed. In this study, cooling simulation of boron steel square sheet was performed. Material properties for the simulation were calculated from JMatPro, and three convection heat transfer coefficients such as water, oil and air were obtained from the experiments. It was found that the thermal deformation increased when the difference of cooling rate of sheet face increased, and the thermal deformation increased when the thickness of sheet decreased.

**Key Words** : Thermal Deformation, Boron Steel Sheet, Fluid Cooling, Phase Transformation, Heat Transfer Coefficient

### 1. 서론

열간판재성형(hot stamping)은 경화능이 우수한 소재인 보론강 판재를 사용하여 약 900℃ 내외의 온도로 가열한 뒤 가열된 소재를 급냉시켜서 고강도 특성을 얻는 기술이다[1,2]. 소재를 급냉시키는 방법에 따라서 열간판재성형은 금형냉각방식(die quenching method)과 유체냉각방식(fluid quenching method)으로 크게 나뉘어진다[2~5]. 금형냉각방식은 일반적인 열간성형방식으로 알려져 있으며, 대부분의 자동차용 차체 부품은 금형냉각방식을 사용해서 제조되고 있다. 하지만 자동차용 서스펜션 부품과 같이 일부의 부품에서는 유체냉각방식을 사용하기도 한다. 또한 판재 성형품의 국부경화와 같은 기술을 적용하는 경우에

도 고주파와 같은 국부가열 기술을 활용하여 가열 후 냉각수를 분사하여 급냉시키는 연구들이 수행되고 있다[6]. 유체냉각방식은 금형냉각방식에 비해서 금형제작비가 감소하는 장점이 있지만 급냉시 과도한 변형이 발생하기 때문에 냉각속도 및 자세에 따른 변형발생을 예측하고 제어하는 것이 중요하게 여겨지고 있다.

본 저자는 앞서의 연구[7]에서 길이가 길고 원통형 형상을 가지는 시편에 대해서 가열과 급속한 냉각시 축방향의 열변형을 해석하였다. 해석과정에서 열전달 및 상변태를 고려하였으며, 열처리시 발생하는 내부응력도 계산하였다. 열역학 기반의 물성계산 프로그램인 JMatPro를 활용하여 실험으로 구하기 어려운 다양한 물성치들을 도출하여 사용하였으며[8,9],

1. 대구기계부품연구원

2. ㈜화신정공

# Corresponding Author: Daegu Mechatronics & Materials Institute, E-mail : suhch@dmi.re.kr

냉각시 열전달에 지배적인 영향을 미치는 물과 소재의 대류 열전달 계수는 실험을 통해서 획득하여 해석에 적용하였다. 연구결과 가열과 냉각시에 발생하는 축방향 변형율과 잔류응력을 해석적으로 거의 정확하게 표현할 수 있음을 확인하였다. 하지만 이러한 연구는 가장 기본이 되는 1축 상태의 열변형만을 예측한 것으로 실제 판재를 가지고 냉각을 수행할 시 발생하는 다양한 변형을 예측하지는 못하였다.

따라서 본 연구에서는 판재형 시편의 열처리 변형에 대한 기초연구로써 수냉, 유냉, 공냉의 냉각 방식의 종류에 따른 열전달 계수를 도출하였으며, 이를 활용하여 냉각시 열변형을 해석하였다. 그리고 실험을 통해 열변형을 계측하였으며, 해석 결과의 유효성을 검토하였다.

## 2. 실험 및 유한요소해석

### 2.1 실험 방법

실험에 사용된 판재형 시편은 Fig. 1과 같이 가로, 세로 및 두께가 80mm, 40mm 3.2mm이며, 시편의 전면부 중앙에 열전대를 용접하여 준비하였다. 준비된 시편은 900℃로 가열한 후 수냉, 유냉(실리콘오일), 공냉의 3가지 냉각조건으로 냉각시켰다. 수냉과 유냉시는 욕조에 물과 오일을 충분히 채워두고 시편은 Fig. 1과 같이 수직방향으로 집게로 고정하여 가열로에서 욕조로 이송시켜 물과 오일에 담그어 냉각시켰으며, 공냉시는 시편을 가열로에서 집게로 꺼내어 대기상태에서 수직한 방향으로 유지하였다. 가열 및 냉각시에 열전대와 연결된 데이터수집장치(agilent 34970A)를 사용하여 시편의 온도를 계측하였다. 실험에서 얻어진 온도 데이터를 활용해서 시편과 유체 사이의 대류 열전달 계수를 역추적하여 해석시 사용하였다. 그리고 Fig. 1에 보여지듯이 시편의 좌측면(left face, LF)과 우측면(right face, RF)의 냉각속도를 다르게 하기 위해서 우측면에는 노즐을 통해 물을 분사하여 접촉시키고 반대쪽 좌측면은 공냉 상태로 두는 실험을 추가로 수행하였다. 이러한 실험에서는 판재면에 서로 다른 속도의 냉각이 발생할 때 변형에 미치는 영향을 확인 할 수 있을 것으로 기대된다. 냉각 후 변형된 시편을 정반위에 놓혀두고 하이트게이지를 사용하여 최대 높이를 측정하여 두께를 뺀값으로 굽힘 변형량(bending deformation)을 정의하였다.

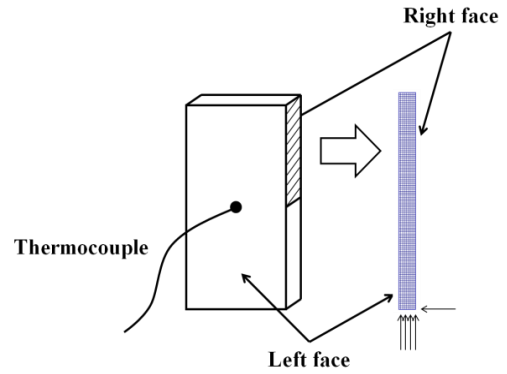


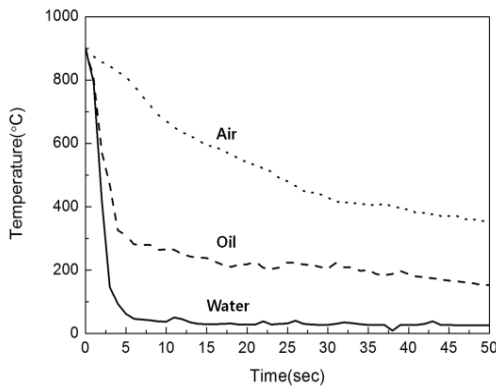
Fig. 1 Finite elements model for simulation

Table 1 Simulation conditions

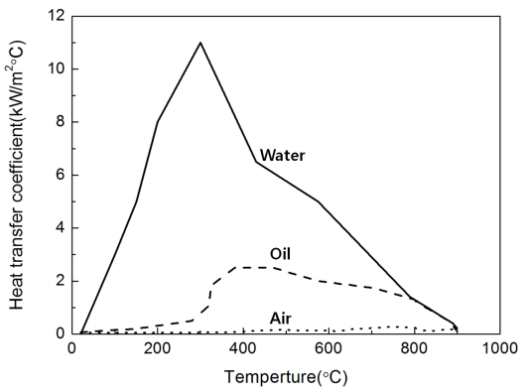
No.	Thickness (mm)	Conditions
1	3.2	LF : RF = WH : WH
2		LF : RF = OH : OH
3		LF : RF = AH : AH
4		LF : RF = AH : OH
5		LF : RF = AH : WH
6	1.2	LF : RF = AH : WH
7	5.2	LF : RF = AH : WH

### 2.2 해석 모델 및 조건

해석에서 굽힘 변형량을 관찰하기 위해서 Fig. 1과 같이 평면변형 조건으로 가정하고 시편의 측면을 1/2만 모델링 하였다. 본 연구에 사용된 소재는 보론강이며, 해석에 필요한 물성은 이전의 연구[7]와 동일하게 사용하였다. 해석은 변형, 열전달, 상변태를 고려하여 진행하였다. 판재시편의 두께에 따른 열변형 영향을 검토하기 위해서 시편의 두께를 1.2mm, 3.2mm, 5.2mm의 3가지 조건으로 해석하였다. 해석의 단순화를 위해서 가열해석은 생략하였으며, 시편의 온도를 900℃로 설정하였다. 냉각시 열변형 해석을 수행하였으며, 냉각시에 사용한 대류 열전달 계수는 수냉, 유냉, 공냉시의 실험에서 얻어진 온도 값을 사용하여 역추적하여 계산되었다. 수냉, 유냉, 공냉에서 얻어진 대류 열전달 계수를 각각 WH, OH, AH로 표기하였다. 그리고 해석에서는 실험과 동일하게 좌측면과 우측면의 열전달 계수를 같게 혹은 다르게 설정하여 실험과 비교하였다. 자세한 해석 조건은 Table 1에 나타내었다.



(a) Temperature history



(b) Convection heat transfer coefficient

Fig. 2 Measured temperature history at the specimen surface during cooling and calculated convection heat transfer coefficient

본 연구에서 사용된 해석프로그램은 DEFORM-2D이며, 열전달과 상변태를 고려한 탄소성 해석을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대류 열전달 계수

Fig. 2에 실험으로 구해진 수냉, 유냉, 공냉시의 온도 데이터와 이 데이터를 활용하여 역추적된 대류 열전달 계수 분포를 나타내었다. 수냉의 경우 가장 높은 대류 열전달 계수 분포를 나타내었으며, 유냉, 공냉 순으로 열전달 계수 분포가 낮아지는 경향을 나타내었다.

#### 3.2 열변형

Table 2에 냉각이 완료된 후의 해석과 실험에서의 굽힘 변형량을 나타내었으며, 실험결과 수치는 3회

Table 2 Thermal deformation results

No.	Deformation in the thickness direction	
	Simulation	Experiment
1	0.026	0.05
2	0.0158	0.07
3	0.0149	0.04
4	0.299	-
5	0.352	0.27
6	0.862	-
7	0.331	-

실험을 실시하여 평균한 값을 나타내었다. 1~3번 해석의 경우는 좌측면과 우측면의 열전달 계수가 동일하였으며, 이러한 조건에서는 냉각속도에 상관없이 굽힘 변형이 발생하지 않았다. 발생하는 변형량은 단순히 두께 방향의 수축에 의해서 발생하였으며, 이러한 변형은 그 양이 미미하였다. 대표적으로 Fig. 3에 1번 해석조건에서 냉각하는 과정에서의 열변형 양상을 나타냈다. 냉각과정에서 양쪽면에서 냉각이 대칭적으로 진행되면서 온도와 상변화가 대칭적으로 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 시편은 냉각완료 후에도 수직한 상태를 그대로 유지하고 있으며, 고온에서 냉각시 최종 변형은 양쪽면에서 대칭적으로 수축만 발생하고 굽힘은 발생하지 않았다. 실험결과에서도 동일한 조건에서 변형이 거의 발생하지 않아 해석결과와 잘 일치하고 있음을 보였다. 실험에서 해석결과보다 다소 높은 변형이 발생하였는데 이는 실험자가 집게로 시편을 집어서 액체에 담그는 과정에서 완벽한 수직상태를 유지하지 못하였기 때문에 발생한 실험오차로 여겨진다. 즉, 판재시편의 양쪽면의 대류 열전달 계수가 동일한 경우는 양쪽면에서 식으면서 발생하는 열팽창 및 상변태 과정이 동일하기 때문에 발생하는 열변형도 대칭적으로 동일하여 굽힘 변형 발생이 억제된 것으로 판단된다.

양쪽면의 열전달 계수가 차이가 발생하는 4번 해석의 경우는 굽힘 변형이 발생하였으며, 열전달계수의 차이가 5번 해석보다는 크지 않기 때문에 열변형이 5번에 비해서는 작게 나타나고 있다.

5번 해석의 경우는 한쪽면은 수냉이고 다른쪽면은 공냉 상태로 비대칭적인 냉각이 발생하는 경우를 나타낸다.

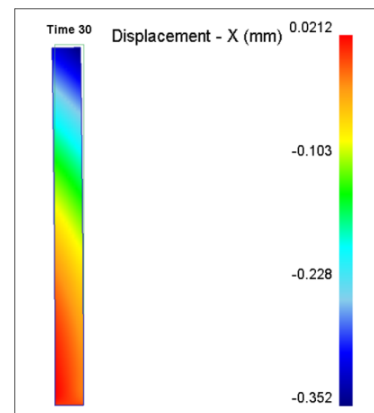
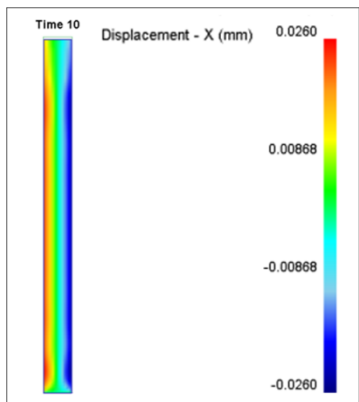
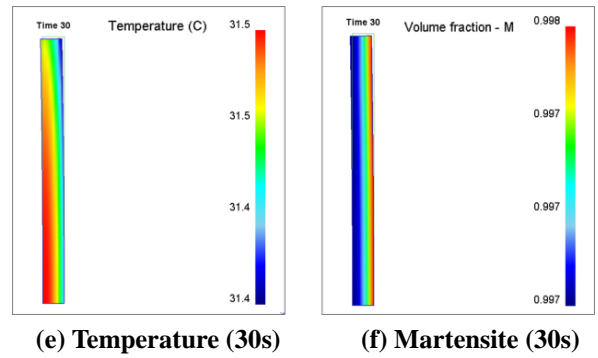
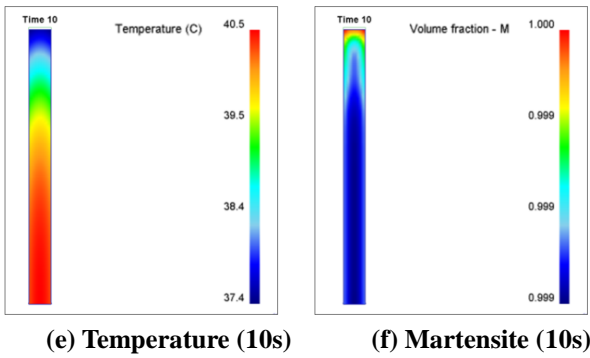
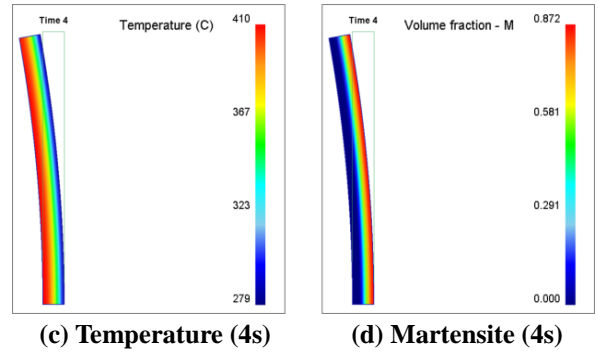
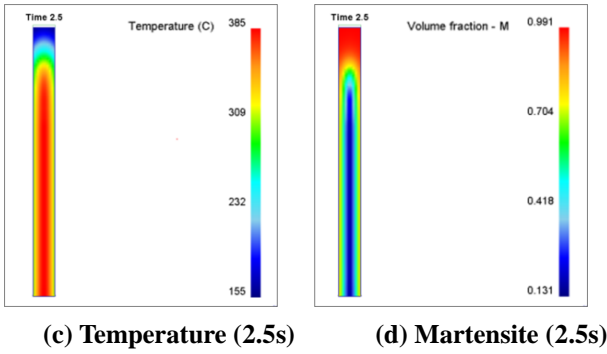
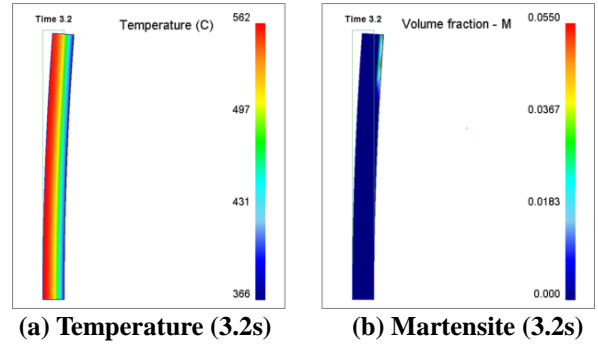
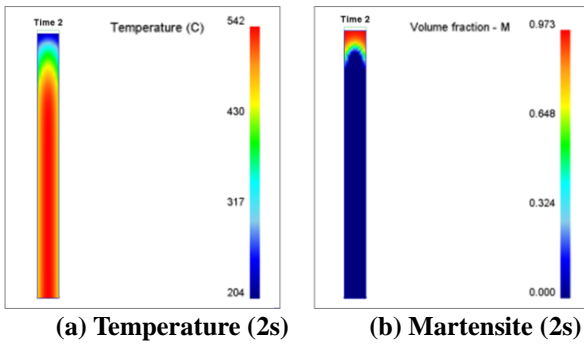


Fig. 3 Results of simulation No. 1

Fig. 4 Results of simulation No. 5

Fig. 4에 5번 해석시 냉각하는 과정에서의 열변형 양상을 나타내었다. 냉각이 시작되는 초기에는 수냉 쪽면에서 냉각이 급속히 진행되면서 수축이 발생한다. 이때는 시편전체가 여전히 오스테나이트상을 나타내고 열수축에 의해서 변형이 발생하게 된다. 수냉되는 면쪽의 수축량이 크기 때문에 수냉되는 면 쪽으로 휘어지게 되며 이후에 수냉쪽면은 마르텐사이트가 생성되면서 팽창하게 되고 반대쪽인 공냉면은 여전히 냉각되면서 수축이 발생하게 된다. 이러한 이유로 변형의 방향은 공냉쪽으로 변하게 된다. 이후 공냉쪽면이 전도에 의해서 급격히 냉각되면서 마르텐사이트 변태가 진행되면서 변형은 다시 수냉 쪽으로 바뀌게 되지만 원래 상태까지 변형하지 못하고 변형이 종료되어 잔류변형을 남긴다. 이러한 잔류변형이 남게되는 이유는 수냉쪽에서 먼저 생성된 단단한 마르텐사이트가 공냉쪽에서 마르텐사이트가 생성되면서 팽창되는 변형을 일부 억제하기 때문으로 여겨진다. 이러한 잔류변형은 실험에서도 확인할 수 있었으며, 해석결과와 유사한 경향을 나타내었다. 시편의 조직은 대부분이 동일하게 마르텐사이트를 나타내지만 부분적으로 냉각되는 속도의 차이가 발생하게 되면 조직이 생성되는 시점의 차이가 발생하게 되고 이로인해서 열변형을 일정부분 방해하는 장벽으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

6번 해석의 경우는 공냉과 수냉이 발생하는 경우에 두께가 얇아진 경우이며, 열변형이 급격히 증가하였다. 판재가 얇아 질수록 동일한 냉각조건에서 변형이 증가함을 알 수 있었다.

7번 해석의 경우는 공냉과 수냉이 발생하는 경우에 두께가 두꺼워진 경우이며, 두께의 증가에 비해서 열변형의 증가는 미미하게 나타났다.

#### 4. 결론

보론강 판재 시편을 사용하여 유체냉각공정에 대한 열전달과 상변태를 고려한 열변형 해석과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 판재시편이 수직으로 물과 오일에 담겨지는 경우나 수직으로 공냉되는 경우는 양쪽면의 대류 열전달 계수가 동일하여 급히 열변형이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

(2) 판재의 양쪽면이 비대칭적으로 냉각될 때 급히 열변형이 발생하였으며, 실험과 해석에서 유사한

변형량을 나타내었다.

(3) 판재의 양쪽면에서 냉각속도의 차이가 증가할 때 열변형량은 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

(4) 판재의 두께가 3.2mm인 경우보다 두께가 증가하는 경우에는 열변형이 크게 증가하지 않았지만 두께가 감소하는 경우에는 열변형량이 급격히 증가함을 알 수 있었다.

(5) JMatPro를 활용한 열물성 계산과 역추적된 대류 열전달 계수의 사용으로 판재의 열처리 변형을 정확히 예측할 수 있었다.

#### 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. 51, No. 11, pp. 888~898.
- [4] A. D. da 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, *Mater. Des.*, Vol. 42, pp. 55~61.
- [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] J. H. Son, Y. J. Yum, W. H. Kim, J. B. Hwang, S. U. Kim, S. J. Yoo, H. W. Lee, 2008, Development of High Strength Center-pillar by High Frequency Induction Heating, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 6, pp. 533~539.
- [7] C. H. Suh, T. H. Kwon, K. P. Kang, H. Y. Choi, Y. S. Kim, Y. S. Kim, 2014, Thermo-mechanical Simulation of Boron Steel Cylinder during Heating and Rapid Cooling, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 8, pp.

- 475~481.
- [8] 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.
- [9] 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.