

# 고주파 유도 단일패스 선상가열 유기 후판 성형 기술

이광석<sup>#</sup>· 엄득하<sup>1,4</sup>· 김창원<sup>2</sup>· 변상윤<sup>2</sup>· 손동환<sup>3</sup>· 공경열<sup>3</sup>· 김병민<sup>4</sup>· 이정환<sup>1</sup>

## Deformation Technology for Thick Plate Using Single Pass Line Heating by High Frequency Induction Heating

K. S. Lee, D. H. Eom, C. W. Kim, S. Y. Pyun, D. H. Son, G. Y. Gong, B. M. Kim, J. H. Lee

(Received July 12, 2011 / Revised August 8, 2011 / Accepted August 10, 2011)

### Abstract

The temperature distribution and subsequent permanent deformation of SS400 carbon steel plate subjected to an induction-based line heating process were studied by a numerical method involving coupled 3-D electromagnetic-thermal-structural analysis. The numerical study revealed that the amount of permanent deformation is strongly related to the Joule loss caused by such process conditions as input power and moving speed of the heat source. To validate the numerical analysis results, line heating experiments were carried out with a high frequency(HF) induction heating(IH) equipment capable of bending thick plate with the moving accuracy of  $\pm 0.1\text{mm}$  in heating coil position. The amount of permanent deformation increased with decreasing moving speed and increasing input power.

**Key Words** : High-frequency Induction Heating, Electromagnetic-Thermal-Structural Coupling Analysis, Deformation

### 1. 서 론

최근 고주파를 이용한 급속 유도 가열 방법은 기존의 가스 토치식 가열에 비해 무공해로 짧은 시간에 정밀한 입열량을 구현할 수 있는 특징으로 인해 가공, 성형, 열처리, 의료, 반도체 등 산업 전반에 걸쳐 각광받고 있으며, 특히 조선 산업에서 선박 외판의 차세대 열간 유기 성형 공정 중 하나의 대안으로 고려되고 있다. 선체 구조 중 선체 곡면은 A. 각각의 판이 같은 형상과 치수를 갖고 있지 않다는 점과, B. 한 번에 원하는 형상으로 성형하기 곤란한 후판이고, C. 수학적으로 비전개 다중 곡률을 갖는 형상이 많다는 점 때문에, 동일 형상을 반복 생산하는 대량 생산 시스템을 선체 곡면 가공에 적용하기 어렵다. 따라서 냉간

가공과 열간 성형 가공을 반복 수행하는 경우가 많다. 이 중 냉간 가공이 주로 후판의 1차 성형에 적용된다면, 국부적으로 계획된 후판 표면부분을 가열하고 냉각시켜 열 이동 방향에 수직 방향으로 수축시키는 선상 가열 유기 열간 성형 공정은 3차원 곡면 가공의 2차 소성 변형 적용 성형법으로, 1960년대 이후 주로 가스 토치를 이용한 숙련된 노동자의 작업으로 인식되어 왔으며[1], 이는 고열 및 높은 소음 발생, CO<sub>2</sub> 방출 등의 이유로 기피되어 왔다. 이런 연유로 선박용 후판의 차세대 소성 가공 기술 중 하나로 관심을 모으는 고주파 유도 선상 가열 방식은 1990년대 이후 일본에서 처음 시도되었으며 현재까지 국내외적으로 관련 기초 연구 및 실험이 수행되고 있는 단계이다[2~6].

고주파 유도 가열은 도전체인 피가열체를 교류

1. 재료연구소 산업기술지원본부  
2. Simulink  
3. 경원벤처㈜ 기업부설연구소  
4. 부산대학교,  
# 교신저자: 재료연구소 융합공정연구본부, ksl1784@kims.re.kr

전류가 흐르는 코일 근방에 두어 전류를 유도할 때 와전류 손실과 히스테리시스 손실(강자성체에 한함)에 의한 줄(Joule)열을 발생시킴으로써, 피가열체를 가열하는 방식을 의미한다. 이와 같은 도전체 유도 가열 방법은 짧은 시간에 정밀한 입열량을 구현할 수 있는 특징이 있다. 이론적 배경을 살펴보면, 도전체에 유도되는 와전류는 소위 표피 효과(skin effect)에 의해 표피 두께 내에 집중되어 흐르게 되는데, 이는 전류의 세기가  $1/e$ 로 떨어지는 두께를 의미하며 그 두께는 주파수의 루트값에 반비례한다[7]. 예를 들어 40 kW의 에너지량이 원형 피가열체의 표피 두께에 집중되는 경우, 총 투입 에너지의 13.5% 만이 표피층에서 전기적으로 이용되고 나머지는 줄열로 방출된다. 이와 같이 방출되는 열에너지는 판재 표면에 집중되게 되므로, 선박용 후판 성형을 위한 선상 가열(line heating)에도 유용하게 적용 가능하다. 단, 이와 같은 줄열의 발생은 coil/core 디자인 형상, 판재 두께 및 이동 속도 등에 의해 민감하게 변한다.

본 연구에서는 고주파 유도 열원의 3 차원 위치 및 시간 변화에 따른 판재 표면 및 두께 방향의 온도 분포 및 변형량 예측을 위한 해석 연구를 우선 수행하였다. 일반적으로 재료의 비선형적인 자기적 특성과 온도 의존성을 같이 고려할 때 분석적으로 해를 구하는 것은 거의 불가능하므로, 유한요소해석법을 적용하여 자체 주파수 응답해석과 열해석의 연성해석을 이용한 반복계산을 통해 인가 파워 및 열원 이동 속도를 달리하여 피가열 판재의 온도 분포를 확보한 뒤, 열-구조 연성해석을 수행하여 판재의 두께 방향으로의 최종 변형량을 확보하였다. 또한 고주파 유도 곡가공 장치를 제작하여 20mm 두께 후판의 단일패스 선상가열 실험을 직접 수행하여 해석 결과와 비교, 공정 변수의 영향을 확인하고자 하였다.

## 2. 자체-열-구조 연성 해석

Fig. 1은 고주파 유도 선상 가열을 가정된 무산소동 코일과 SiFe 코어 판재로 열원이 구성된 공정 3차원 모델링으로, 코어를 ‘C’자 형태로 정사각 코일의 두 변에만 씌운 뒤 피성형 후판과의 간격을 5mm로 고정시켰다. 해석 영역의 크기는  $500 \times 500 \times 20\text{mm}^3$  이고, 재료는 화학 조성이 Table 1

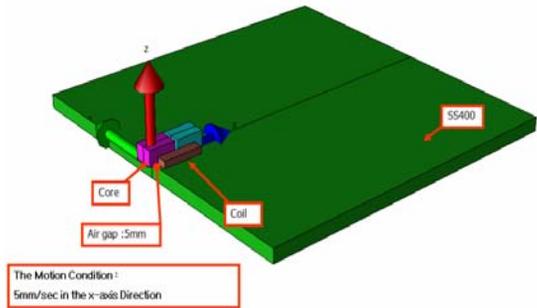


Fig. 1 Schematics of the high frequency induction-induced line heating model

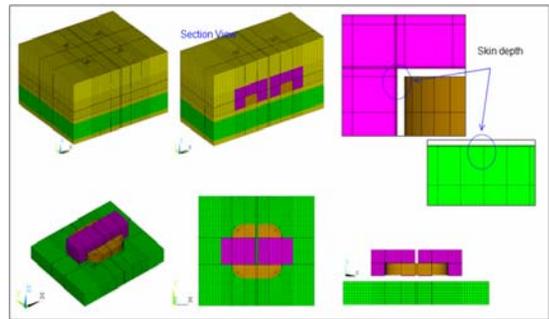


Fig. 2 Finite element model for coil/core/plate/air

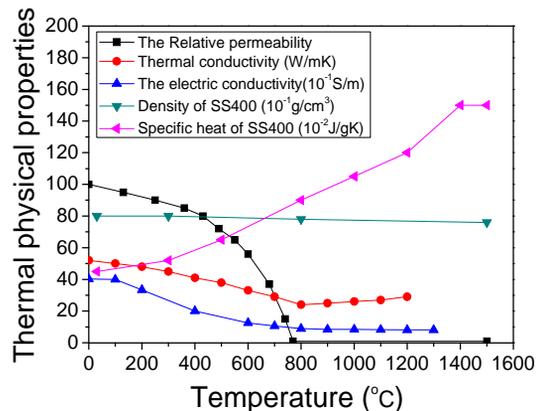
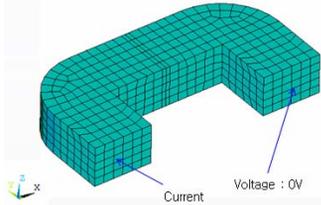


Fig. 3 Materials properties of the SS400 steel [4,8]

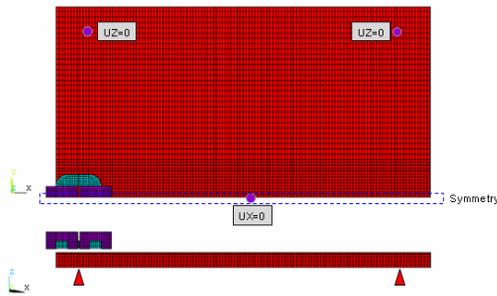
과 같은 SS400 강재를 대상으로 하였는데, 후판에 발생하는 와전류는 유도자가 전도성 있는 후판으로 이동할 때 표면에서 대부분 유도되는 관계로 전자기장 해석을 위해서는 ANSYS 12.0 version과 연동된 SOLID236을, 열-구조 연성해석을 위해서는 SOLID226을 적용하여 2층의 조밀한 3차원 20-node 메쉬를 코일에 인접한 후판 표면에 Fig. 2와

**Table 1 Chemical composition of the SS400 plate**

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
%	0.07	0.28	1.5	0.014	0.003	Bal.



**Fig. 4 Power input conditions for the HF IH process**



**Fig. 5 Boundary conditions for the HF IH process**



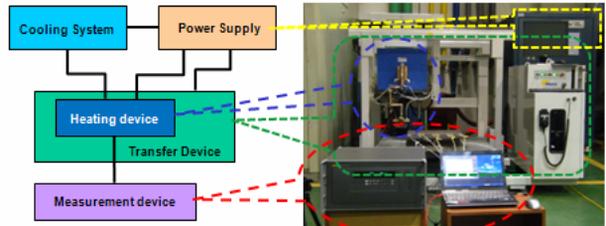
**Fig. 6 Flowchart for numerical analysis**

같이 형성시켰다. 유한요소 분석에 사용된 재료 특성은 Fig. 3과 같다. 열유동 해석 및 구조 해석은 대칭성을 고려, 반쪽을 해석 대상으로 하였다.

우선 코일 및 코어에 걸리는 와전류 및 줄열이 인가 파워에 따라 어떻게 변화되는지, 또한 후판에 와전류에 의해 유도되는 줄열의 분율을 유한요소 해석을 통해 확인하기 위하여, 열원 이동 속도를 5mm/s로 고정된 상태에서 인가 파워를 30, 40, 50kW로 변경하였고, 이는 Table 2의 2, 4, 5번 실험 조건과 같다. 또한 인가 파워가 동일(즉 와전류 및 줄열이 거의 일정)하더라도, 판재 표면에 열원이 머무르는 시간, 즉 전체 열입량에 따라 판재 온도 분포가 어떻게 변하는지를 확인하기 위해 인가 파워를 40kW로 고정된 채 열원 이동 속도를 각각 1, 5, 15mm/s로 변경한 조건은 Table 2의 1, 2, 3 번 실험 조건과 같다. 하중 조건은 Fig. 4와 같이 주파수 15 kHz를 coil의 한쪽 면에

**Table 2 Thermomechanical forming conditions adopted in this study**

No.	Heat input (kW)	Move speed (mm/s)	Peak Current (A)
1	40	1	4570.7
2	40	5	4570.7
3	40	15	4570.7
4	30	5	3668.3
5	50	5	5430.6

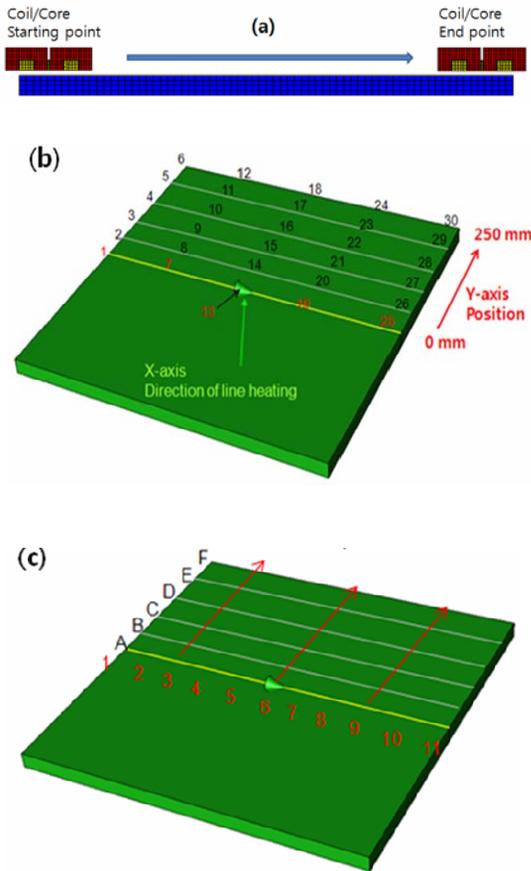


**Fig. 7 Photograph of automatic HF IH apparatus used in actual thermomechanical forming process**

피크 교류 전류를 입력하며 다른 면에 그라운드 값(0 V)을 입력하였다. 구속 조건은 Fig. 5와 같이 후판 내측으로 X, Y 방향 각각 50mm 안쪽의 4부분에서 판재를 지지하는 형태로, 해석 프로세스를 간단히 정리하면 Fig. 6과 같다.

### 3. 고주파 유도 단일패스 선상가열 실험

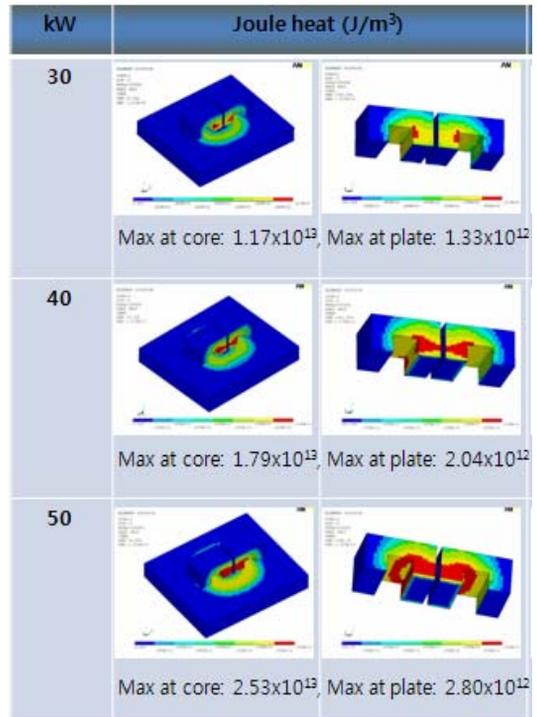
Fig. 7은 재료연구소에서 설계·제작한 실험실적 고주파 유도 곱가공 실험 장치이다. 본 장치는 크게 가열부, 이송부 및 온도-위치 측정부로 나누어져 있는데, 가열부의 경우 최대 20kHz-100kW의 사양을 갖추고 있으며, 이송부의 경우 열원이 XYZ plane 상에서 ±0.1mm의 정확도를 갖고 최대 1.2m/min의 이동속도로 움직일 수 있는 장치를 설계하였다. 또한 측정부의 경우 40 채널 동시 측정이 가능한 Fluke NetDAQ Hydra 2680A 데이터 로거를 이용, 30 곳 이상의 서로 다른 피성형 판재 위치에 K-type 열전대를 부착, 초당 1회의 속도로 실시간 온도 변화를 측정할 수 있도록 구성되어 있다. 더불어 접촉식 위치 측정 센서를 부착, 임의의 가열선을 가열 전에 미리 위치 파악하여 동작 프로그램에 자동 입력, offset 기능을 이용하여 열 유기 성형 후 z 축 방향으로의 영구 변형량을 측정할 수 있다. 초기 설정한 열원 이동 속도가



**Fig. 8 (a) Starting and end points of the heating source upon plate (b) points for measuring temperature as a function of time and (c) points to obtain the amount of permanent deformation along z-axis upon HF IH-induced line heating**

온도 및 변형량 변화에 미치는 영향을 확인하기 위해 Table 1 과 같은 조건에서 선상 가열 실험을 수행하였다. 이 때, 15kHz 주파수 조건에서 열원과 판재 표면과의 간격은 5mm 를 유지하였다.

실제 선상 가열 공정에서 와전류의 영향을 고려, coil/core가 이동하는 시작 및 끝 위치는 Fig. 8(a)와 같이 판재 끝 단으로부터 3cm 안에서 시작하고 종료하였으며, 온도 측정 위치는 Fig. 8(b)와 같이 판재 표면(XY-plane)상의 30 개의 점에서 온도 data를 확보하였는데, 선상 가열 선상의 점 1, 7, 13, 19, 25의 경우 열원이 직접 이동하는 관계로 표면 실제 온도가 아닌 판재 뒤쪽에 홀 가공을 하여 표면 아래 3mm 위치의 온도를 측정하였다. 더불어 선상 가열선 기준 좌우 대



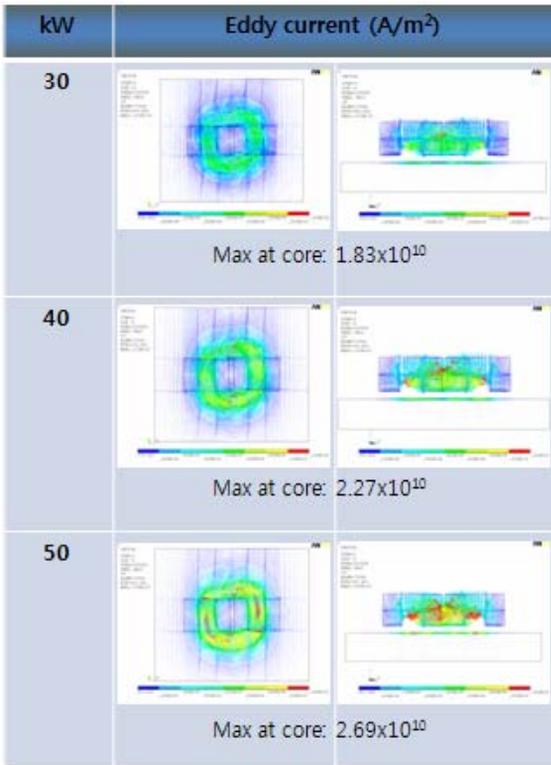
**Fig. 9 Steady-state Joule-heat distribution under different input power**

칭을 고려, Fig. 8(c)의 1A~11F에 해당하는 총 66개의 점에서 성형 전후 위치 data를 확보, 두께 방향으로의 최종 변형량을 확보하고자 했다.

#### 4. 자계-열 연성 해석 및 온도 실측 결과

Fig. 9는 Table 1의 실험 조건 2, 4, 5번에서 얻은 steady-state에서의 줄열(Joule heat, J/m<sup>3</sup>) 분포 유한 요소 해석 결과이다. 기본적으로 coil 안쪽에 위치한 전기강판 코어 영역에서 가장 많은 줄열이 발생하였음을 확인할 수 있다. 또한 코일 아래 위치한 후판 표면에서 유도된 와전류에 의해 코어에서의 최대값 대비 약 11% 전후의 줄열이 발생하여, 실제 해석에서는 이 값 또한 매우 얇은 skin depth를 고려해서 적용해야 함을 예상할 수 있다. 전체적으로 인가 파워가 30kW에서 50kW로 증가할수록 후판 표면에서의 줄열이 1.33x10<sup>12</sup>J/m<sup>3</sup>에서 2.80x10<sup>12</sup>J/m<sup>3</sup>으로 두 배 이상 증가함을 확인할 수 있다.

같은 조건에서 steady-state에서의 와전류(eddy current, A/m<sup>2</sup>) 해석 결과는 Fig. 10과 같다. 기본적



**Fig.10 Steady-state eddy current distribution under different input power**

으로 줄열과 비슷한 위치, 즉 코일 안쪽에 위치한 코어 영역에서 발생하는 와전류가 가장 강하며, coil 아래 부분을 따라 후판 표면에서도 와전류가 발생하였다. 또한 인가 파워가 높을수록 높은 와전류가 발생하였다.

파워 인가 후 열원 이동에 따른 판재 표면 및 두께 방향 온도 분포 변화를 얻기 위한 자체-열연성 해석 결과를 대표적으로 확인하면 Fig. 11과 같다. 파워 인가 직후의 온도는 Figs. 11(a), (d), (g)에서와 같이 상대적으로 낮으나, 열원 이동이 steady-state로 접어들어 판재 중앙 부위까지 이동하였을 때(Fig. 11(b))의 최대 온도는 열원 이동 속도가 1mm/s, 5mm/s, 15mm/s로 증가함에 따라 각각 3492.3°C, 1287.7°C, 477.0°C까지 상승할 것으로 Figs. 11(b), (e), (h)와 같이 예측되었다. 열원 이동이 각각의 열원 이동 속도에서 440초, 88초, 30초 후 종료된 뒤 인가 파워를 0로 돌리고 360초, 712초 및 770초 후, 즉 초기 파워 인가 후 800초가 경과한 뒤의 판재 표면 온도는 910.8°C, 112.1°C 및 51.9°C까지 냉각되었다.

위의 결과를 정리하면, 열원 이동 속도가 1 mm/s로 낮을 때는 판재 표면 온도가 SS400 강재의 용점(~1570°C)의 두 배 이상까지 상승, 선상 가열 도중에 판재 표면의 국부 용융이 발생할 것으로 예측되었다. 열원 이동 속도가 5mm/s일 때 열원이 판재 중앙에 위치하였을 때의 최고 온도는 1287.7°C로, SS400 강재의 A3( $\gamma$ ) 변태 온도(~875°C) 이상으로 가열되었다가 냉각될 것으로 예측된다. 즉 이는 판재의 열팽창 계수가 급격히 변화하는 A3 온도 이상으로 승온-냉각이 진행되어 상당한 변형량을 겪게 됨을 의미한다. 반면 열원 이동 속도가 15mm/s로 증가하여 단위 면적당 입열량이 감소하였을 때는 표면 최고 온도가 SS400 판재의 급격한 열팽창계수 차이를 보이는 A1 온도(~723°C)보다 상당히 낮은 477.0°C로 해석되어, 결국 판재의 변형량이 감소할 것으로 예측할 수 있다.

열원 이동 속도가 온도 분포에 미치는 영향을 확인하기 위해 Table 1의 조건 1~3에 대해 실제 고주파 유도 선상 가열 실험을 수행하여 확보한, 가열선상에서 열원 위치에 따른 step별 온도 분포 곡선은 각각 Fig. 12(a)~(d)와 같다. 40kW 파워 인가 조건에서 이동속도가 1mm/s로 낮은 경우 온도 실측이 불가능하였는데, 이는 해석상의 최고온도가 1600°C 이상까지 올라가 Fig. 12(a)와 같이 판재 및 K-type 열전대가 고온에 견디지 못하여 표면 용해가 발생하였기 때문이다.

반면 40kW 파워 인가 조건에서 이동 속도가 5 mm/s로 증가하였을 때 선상 가열선에서 3mm 하부 실측 온도 분포는 Fig. 12(c)와 같다. 정사각 형태로 디자인한 코일의 가열선 방향과 수직인 두 번 위에만 ‘ㄷ’자 형태의 코어를 삽입한 결과, 열원이 판재 중앙부를 지나갈 때, 즉 Fig. 12(b)의 coil/core (A) part가 통과할 때 열원의 이동거리가 증가함에 따라 코일의 첫 변이 통과할 때 온도가 1차적으로 증가하다 다소 떨어진 뒤, 최종적으로 두 번째 변이 통과할 때, 즉 Fig. 12(b)의 coil/core part(B)가 통과할 때 최대 온도에 도달하는 현상을 확인할 수 있다. 반면 이러한 현상은 이동 속도가 15mm/s로 더욱 증가하면 거의 관찰되지 않았으며, 이는 열원 이동 속도가 1차 온도 상승-국부 최소-최대 온도 도달과 같은 2단계의 측정 반응 속도 대비 너무 빠르기 때문이다. 이와 같은 결과를 정리하면, 판재 표면을 녹이지 않는 조건에서는 열원의 이동속도가 낮을수록 피가열체에 온도가 높게 전달됨을 알 수 있었고, 이는 단위 면적당

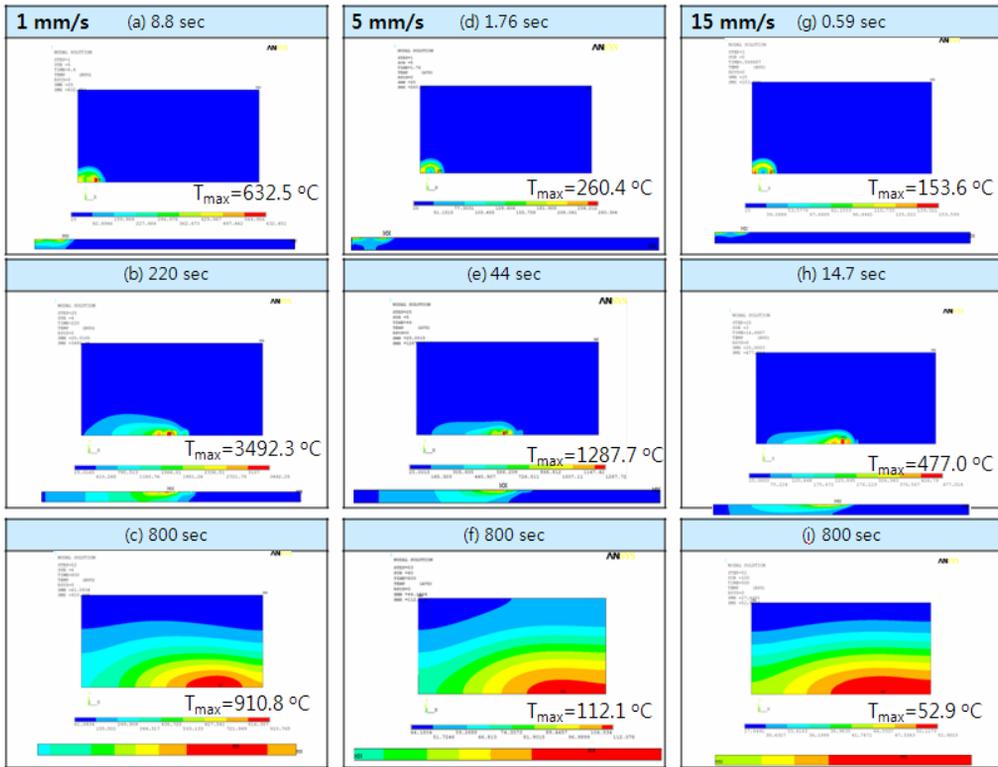


Fig.11 Expected temperature distributions along the direction of thickness as well as on the plate surface by elapsing time obtained under 40 kW, 5 mm/sec HF-IH condition

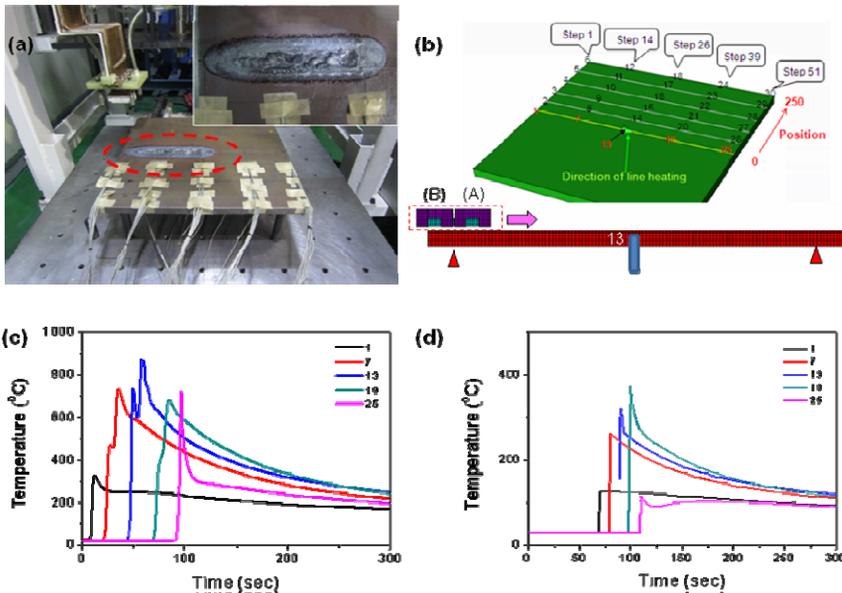


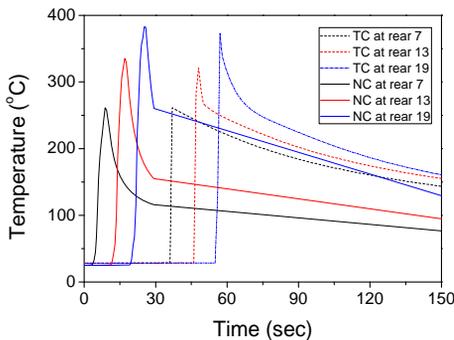
Fig.12 (a) Local melting feature during HF IH-induced line heating with the moving speed of 1mm/s. The result of actual temperature measurement at the center line of the plate (b) can only be obtained as a function of time under different moving speed of (c) 5mm/s and (d) 15mm/s

열입량을 증가시켜 높은 변형량을 야기하는 주요 인자로 작용할 것으로 판단된다.

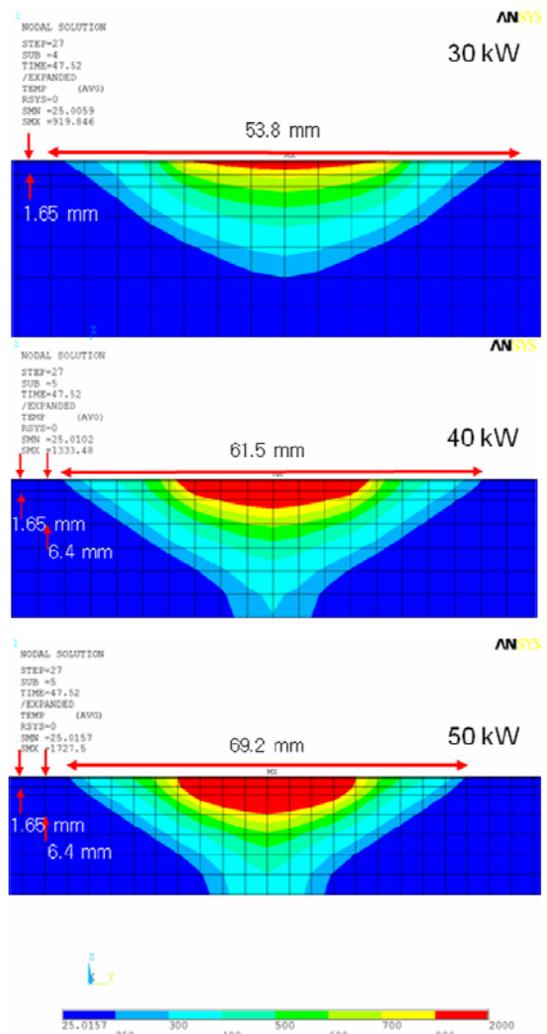
앞에서 언급한 Fig. 11는 ANSYS 적용 40 kW 인가 파워 조건에서 고주파 유도 선상 가열시 열원의 위치 및 열원 이동 속도 변화에 따른 판재 표면 온도 분포로, 이는 선상 가열 표면 mesh를 추적해 얻은 판재 표면에서의 온도 해석 결과인 관계로 Figs. 12(c) 및 12(d)의 실측 온도(판재 표면에서 3mm 아래에서 열전대 적용 측정)와 직접 비교는 불가능하다. 따라서 자체-열 연성 해석의 유효성을 본 실험 결과와 대비하기 위해서는 판재 표면에서 3mm 아래 mesh들의 온도를 추적, 직접적으로 비교하여야 한다.

Fig. 11(b)의 7, 13, 19 위치에서 두께 방향으로 판재 표면에서 3.3mm 아래 위치한 메쉬에서의 온도 분포를 추출, 실측 결과와 비교한 그래프는 Fig. 13과 같다. 여기서 점선은 40kW, 15mm/s 공정 조건에서 열전대(TC) 부착 실측 결과, 실선은 열유동 온도 해석(NC) 결과이고, 실측 결과는 해석 결과와의 비교 편의를 위해 30sec만큼 평행 이동하였다. 냉각 패턴에는 약간의 차이가 있으나, 최대 온도 기준으로 해석 결과는 Fig. 11(b)의 7, 13, 19 위치에서 각각 261.3°C, 335.3°C, 382.8°C, 실측 결과는 각각 261.5°C, 321.0°C, 373.0°C으로, 해석과 실측간 온도 차이는 0.2~14.3°C 범위에서 비교적 정확한 열유동 해석이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

최종적인 판재 곡률을 결정할 두께 방향으로의 온도 차이는 5mm/s의 열원 이동 속도 조건에서 인가 파워가 커짐에 따라 증가하고, 동일 조건 실험 후 확보한 열영향부의 크기 또한 해석 결과와 일치하며 증가함을 Fig. 14로부터 확인 가능하다.



**Fig.13** The result of actual temperature measurement at 3mm beneath the center line of the plate along the direction of heating line on 3 difference positions for case No. 3(40kW-15 mm/s)



**Fig.14** Numerically calculated temperature distribution along the thickness direction exhibited together with heat affected zone obtained from actual high frequency induction heated samples under different input power conditions

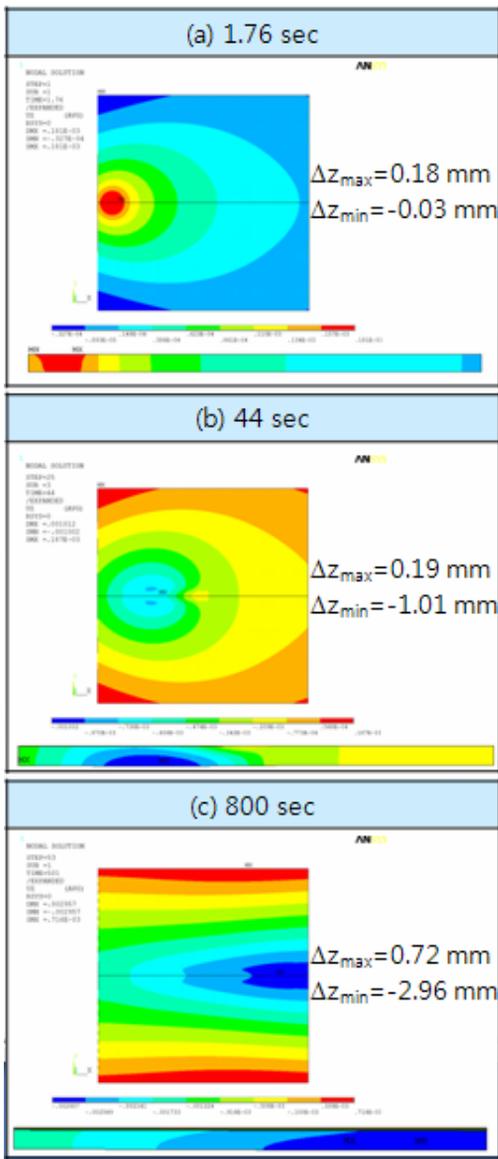


Fig. 15 Numerically simulated vertical deformation distribution under the constant input power of 40kW at 5mm/s

### 5. 열-구조 연성 해석 및 변형량 실측 결과

Fig. 15는 40kW, 5mm/s 조건에서의 열-구조 연성 해석을 통해 얻은 열원 이동 시간에 따른 z축 방향으로의 수직 변형량 변화 분포도이다. 열원이 지나감에 따라 최대 변형량이 얻어지는 지점이 열원 바로 밑으로 따라가는 경향을 확인할 수 있

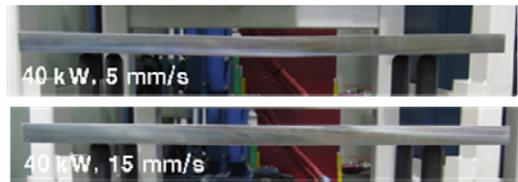


Fig.16 Curved feature for the HF-induction heated plate followed by cross-sectioning

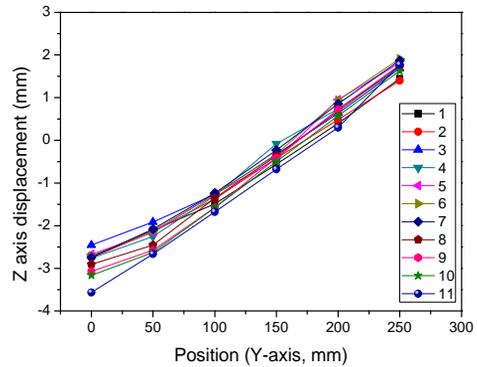


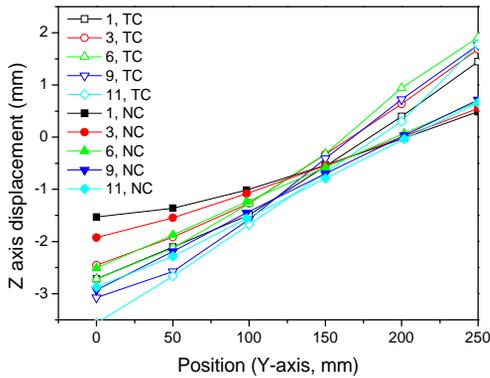
Fig.17 The amount of permanent deformation along the z-axis at various points measured after line heating under 40 kW at 5mm/s

으며, 시간이 증가함에 따라 영구 변형량 또한 증가함을 확인할 수 있다. 파워 인가 후 800 초 경과 이후 가열선에서 가장 먼 판재의 양 끝단에서는 초기 위치 대비 약 0.72mm의 위치 상승이, 판재 중단 가열선 위치에서는 절대값 기준으로 최대 -2.96mm의 위치 하강이 예측되었다.

Fig. 16은 40kW, 5 및 15mm/s 조건에서 고주파 유도 곡가공 실험을 수행한 뒤, 가열선에 수직인 방향으로 중앙에서 절단한 단면으로, 열원 이동 속도가 빠를수록 두께 방향으로의 변형량이 감소함을 육안으로도 충분히 확인할 수 있다. 또한 40 kW, 5mm/s 선상 가열 전후 Fig. 7의 접촉식 위치 감지기를 적용해서 Fig. 8(c)에서의 z축 방향으로의 변위 측정 결과를 정리하면 Fig. 17과 같다. 40kW, 5mm/s의 조건에서는 y축 방향으로 매우 균일한 변형량을 가지며, 가열선상에서는 -2.5~3.5mm, 가열선에서 가장 먼 판재 끝단에서는 1.2~2mm의 최종 변위 값을 보임을 측정 결과 확인하였다.

Fig. 18은 40kW, 5mm/s 조건에서 고주파 유도 선상가열 성형 해석(solid marked as NC) 및 변형량 실측(open marked as TC) 비교 그래프이다. 위치별 오차는 다르나, 두께 방향의 영구 변형량을

$$\Delta z_{total} = \Delta z_{max} - \Delta z_{min} \quad (1)$$



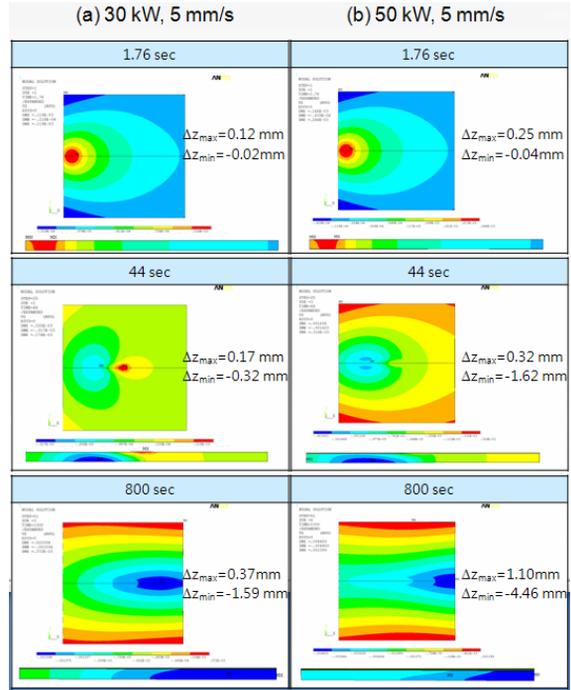
**Fig.18** The variation of permanent displacement along the direction of z-axis obtained from both numerical analysis and experimental measurement

**Table 3** The comparison between numerically calculated and experimentally measured permanent vertical deformation along the direction of thickness

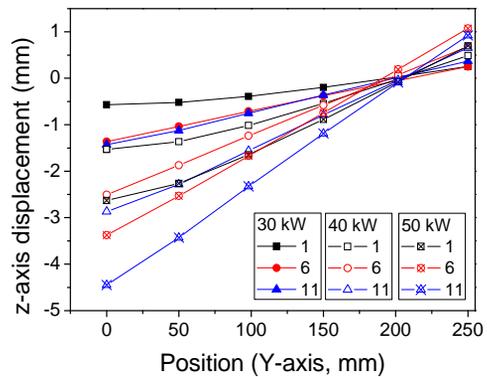
Pos.	Numerically calculated $\Delta z_{total}$ (mm)	Experimentally measured $\Delta z_{total}$ (mm)
1	2.02	4.06
3	2.48	4.14
6	3.19	4.62
9	3.68	4.84
11	3.53	5.34

로 정의하면, Fig. 8(c)의 1, 3, 6, 9, 11line을 따른 해석 및 실측 영구 변형량( $\Delta z_{total}$ )은 Table 3과 같다. 전체적으로 해석치가 실측치 대비 위치별 변위차도 작으나 영구 변형량 또한 작게 나타났다. 판재 중앙 부위에서의 해석-실측 오차는 1.19~1.66mm, 판재 좌우 대칭 적용시 폭 500mm임을 감안하면 2.38~3.32mm/m 수준으로 상대적으로 낮으나, 판재 끝단, 특히 line 1에서의 해석-실측 오차는 4.08 mm/m 수준으로 상대적으로 높았다. 이는 자계-열-구조 연성해석시 충분한 냉각 효과를 고려하지 못하였기 때문이다. 냉각 효과를 고려한 장시간의 자계-열-구조 연성 해석의 경우 본 실험에서 적용한 크기 및 디자인과 유사하다는 가정하에 많은 시간과 비용이 투입되어야 할 것으로 판단되며, 추후 이 부분에 대한 보완이 필요할 것이다.

고주파 유도 인가 파워가 판재 영구 변형량에

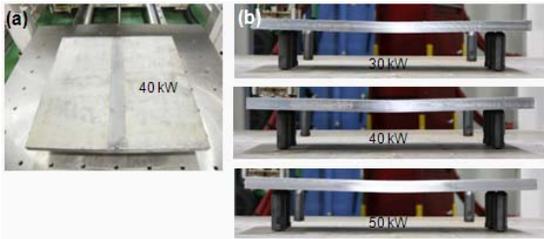


**Fig.19** Numerically simulated vertical deformation distribution under the constant moving speed of 5mm/s with various input power of (a) 30 kW and (b) 50kW



**Fig.20** The variation of permanent displacement along the direction of z-axis obtained by numerical analysis under various input powers

미치는 영향을 확인하기 위해 열원 이동 속도를 5mm/s로 고정하고, 30kW 및 50kW를 인가하였을 때 수치 해석 결과로부터 확보한 수직 변형량 변화 분포도는 Fig. 19와 같다. Fig. 15의 40kW 인가



**Fig.21 Curved feature by cross-sectioning for the HF-induction heated plates deformed under different input powers of 30, 40 and 50kW**

결과와 종합해 보면, 충분한 냉각이 이뤄진 뒤의 두께 방향으로의 최대 영구 변형량( $\Delta z_{total}$ )을 식 (1)로부터 계산하면, 인가 파워가 30kW  $\rightarrow$  40kW  $\rightarrow$  50kW로 증가할수록,  $\Delta z_{total}$ 이 1.96mm  $\rightarrow$  3.68mm  $\rightarrow$  5.56mm로 증가하는 현상이 예측되었다.

Fig. 20은 판재 양 끝단 및 중앙 부위에서 y축 방향을 따라 도시한 영구 변형량 해석 결과로, 파워 인가 직후의 위치인 Fig. 8(c)의 line 1 위치 대비 steady-state에 들어선 이후인 판재 중앙(line 6) 및 파워 인가 종료 위치(line 11)에서 영구 변형량이 훨씬 커서 큰 곡률을 형성할 것으로 예측된다. 또한 각 위치별로 공히 인가 파워가 증가할수록 영구 변형량, 특히 선상 가열선에 해당하는 위치에서의 판재 영구 처짐 변형량 또한 증가하였다. 이와 같은 현상은 Fig. 21의 판재 절단면 변형 형상으로부터 확인 가능하다.

## 6. 결론

본 연구에서는 고주파 유도 선상가열 후판 성형 시 열원의 이동 속도 및 인가 파워가 온도 분포 및 영구 변형량에 미치는 영향을 실험 및 해석적 방법으로 확인하고, 해석 기술 및 자체 제작한 고주파 유도 곡가공 장치의 유효성을 검증하고자 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 인가 파워가 40kW로 고정 조건에서 열원의 이동속도가 15mm/s  $\rightarrow$  5mm/s  $\rightarrow$  1mm/s로 감소함에 따라, 판재의 선상 가열상의 표면 최대 온도가 열원이 판재 중앙에 도달하였을 때 477.0°C  $\rightarrow$  1287.7°C[A3( $\gamma$ ) 변태 온도 이상]  $\rightarrow$  3492.3°C[판재 용점 이상]로 상승할 것으로 예측되었다. 실제 고주파 유도 선상가열 실험 결과 1mm/s 조건에서는 국부 용융이 발생하였고, 온도 실측-해석 정확도를 오차 14.3°C 이하 수준으로 확보하였다.

(2) 판재의 z축 방향으로의 영구 변형량은 열원 이동 속도가 5mm/s로 고정되었을 때, 인가 파워가 30kW  $\rightarrow$  40kW  $\rightarrow$  50kW로 증가할수록  $\Delta z_{total}$ 이 1.96 mm  $\rightarrow$  3.68mm  $\rightarrow$  5.56mm로 증가할 것으로 예측되었다.

(3) 단, 판재 영구 변형량 해석-실측 오차는 40 kW, 5mm/s 조건에서 판재 중앙부가 2.38~3.22mm/m, 판재 끝단이 4.08mm/m 수준으로 다소 높았다. 이는 냉각 효과를 고려한 장시간의 차계-열-구조 연성 해석을 추후 수행함으로써 보정이 가능할 것으로 예상되고, 이와 같은 일련의 해석-실험 결과는 추후 다양한 목적 형상을 갖는 이중곡률 형상의 선상 가열 유기 조선용 후판 성형 공정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 재료연구소 기본사업 및 중기청 기업부설연구소 업그레이드 사업의 지원으로 수행된 결과의 일부로 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Moshaiov, R. Latorre, 1985, Temperature Distribution during Plate Bending by Torch Flame, J. Ship Res., Vol. 29, pp. 1~11.
- [2] K. W. Bae, Y. S. Yang, C. M. Hyun, S. H. Cho, 2008, Derivation of Simplified Formulas to Predict Deformations of Plate in Steel Forming Process with Induction Heating, Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, pp. 1646~1662.
- [3] H. Shen, Z. Q. Yao, Y. J. Shi, J. Hu, 2006, Study on Temperature Field Induced in High Frequency Induction Heating, Acta Metall. Sinica, Vol. 19, pp. 190~196.
- [4] V. Adan, R. Sherif, S. Higashi, M. Hidekazu, 2007, Influential Factors Affecting Inherent Deformation During Plate Forming by Hine Heating(Report 1), Trans. of JWRI, Vol. 36, pp. 57~64.
- [5] J. H. Lee, K. Lee, J. S. Yun, 2006, An Electromagnetic and Thermo-mechanical Analysis of High Frequency Induction Heating for Steel Plate Bending, Key. Eng. Mater., Vol. 326-328, pp. 1283~1286.
- [6] K. J. Son, J. O. Yun, Y. W. Kim, Y. S. Yang, 2007, Analysis of Angular Distortion in Line-heating, Int.

J. Mech. Sci., Vol. 49, pp. 1122~1129.

- [7] Y. S. Seo, D. H. Son, K. Park, 2009, Improvement of Weldlines of an Injection Molded Part with the Aid of High-Frequency Induction Heating, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., pp. 437~440.
- [8] ASM International Handbook Committee, 1990, Physical Properties of Carbon and Low-Alloy Steel, in ASM Handbook Volume 1, 10<sup>th</sup> edition, ASM International, pp. 145~151.