

선상가열시 수냉이 유발하는 막비등 현상을 고려한 판의 변형 예측

하윤석^{†*}, 김정수^{**}, 장창두^{*}

서울대학교 조선해양공학과^{*}
두산중공업^{**}

Prediction of Plate Deformation Considering Film Boiling in Water Cooling Process after Line Heating

Yun-Sok Ha^{†*}, Jung-Soo Kim^{**} and Chang-Doo Jang^{*}

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University^{*}
Doosan Heavy Industries and Construction Co., LTD.^{**}

Abstract

From a rapid cooling to a slow cooling in the actual cooling process in shipyards, the phase of steel becomes martensite, bainite, ferrite, and pearlite. In order to simulate the cooling process, heat transfer analysis was performed considering the effects of impinging water jet, film boiling, and radiation. From above simulation it is possible to find the cooling speed at the inherent strain region and volume percentage of all phases in that region. By the suggested method based on the precise material properties calculated from volume percentage of all phases, it will be possible to predict the plate deformations by line heating more precisely. It is verified by comparing with some experimental results that the present method is very effective and efficient.

※Keywords: Impinging jet(충돌제트), Inherent strain(고유 변형도), Phase transformation(상변태), Film boiling(막비등), Line heating(선상가열)

1. 서론

선체외판의 국가공은 숙련공의 시행착오에 의한 반복작업에 의해 이루어졌고 국가공의 자동화는

선박 생산성 향상을 위한 시급한 과제이며 이를 위한 열간가공 변형의 정확한 예측이 필요하다.

열간가공 변형의 정확한 예측은 가공부의 정확한 물성치가 도출될 때 계산이 가능한데, 가열부의 상은 여러 가지로 변화되는 상변태 현상을 수반하며 생성된 상들은 서로 다른 물성치를 가지고 있으므로 국가공 작업이 만들어내는 강재 가열부의 상변태 변화의 정확한 규명이 요구된다. 선상

접수일: 2005년 1월 16일, 승인일: 2005년 7월 1일

† 주저자, E-mail: lunxi@daum.net

Tel: 02- 880 - 8497

가열부의 상은 모두 냉각 중에 변태되므로, 냉각 시의 이론적인 열전달 모사로 변태된 상들을 규명해야 한다. 지금까지 선상가열이 가열과정의 규명에 연구가 집중되어 열탄소성에 의한 변형 메커니즘은 많이 밝혀졌으나, 상변태에 의한 변형(하윤석과 장창두 2004)은 열탄소성과 같은 정도의 변형을 발생시키나 냉각시의 메커니즘이 모사가 안 되면 규명이 어렵다.

본 연구에서 곡가공의 냉각과정 중 조명하려고 하는 부분은 수냉과 관련한 충돌제트와 막비등 현상(Fig. 1)이다. 일반적으로 수냉은 곡가공의 작업 속도 효율을 위해서 가해지는 과정이지만, 가열된 강판 표면의 온도가 물의 비등점을 넘어서면 판표면에서 기체가 발생하여 후류가 표면에 접근하지 못하게 하는 막비등 현상이 발생하여 대류가 잘 일어나지 못하고 급냉이 완화된다.

반면에 냉각수 노즐과 인접한 부위에서는 판표면에 수직으로 떨어지는 충돌수가 막비등의 원인인 증기막까지 깨뜨리며 상당한 대류효과로 판을 냉각시킨다. 이러한 현상들은 현장에서 위빙의 형태로 넓고 얇게 가열되는 선상가열 단면의 가열부의 냉각속도에 영향을 미치고 그것은 다시 최종 냉각상태에서 상변태 분율에 영향을 미치고, 결국에는 판변형량에 상당한 정도의 차이를 낳게 될 것이다.

2. 수냉에 의한 풀비등 모드

Fig. 2에 선상가열이 진행 중인 토치에 의한 열속반경(장창두 등 2001)과 노즐에 의한 냉각반경을 그에 따른 대류 열전달의 특성대로 나타내었다. 노즐의 반경에 따라 정해지는 충돌제트 영역

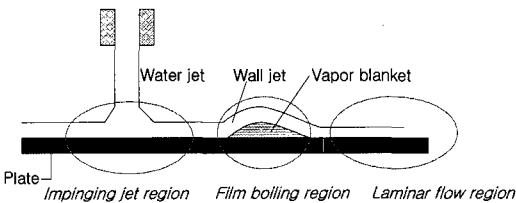


Fig. 1 Regions for considering heat transfer analysis in water cooling

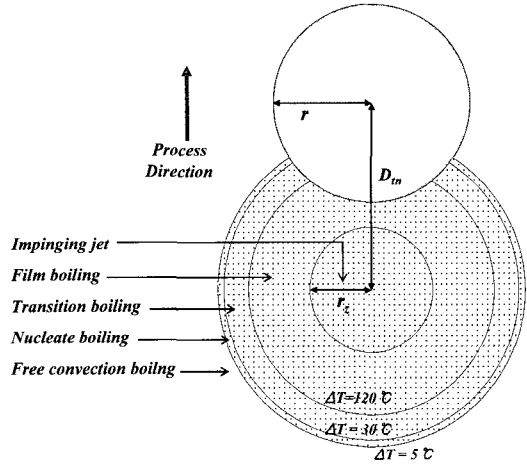


Fig. 2 Boiling modes in line heating

과는 달리 비등 영역들은 물의 비등점에 대해 그 초과 온도로 정의되기 때문에 일단 대류계수를 산정하게 되면 냉각시물레이션은 쉽게 구현할 수 있다.

가장자리의 영역에 해당하는 자유대류구간(식 (1))이 가장 일반적인 대류에 해당하지만 선상가열에서 그 부분이 냉각에 일임하는 영역은 매우 좁다. 이 구간에서 일반적인 강제대류에 의한 계산식을 적용하면 대류계수는 강판표면온도에 대한 함수로써 식 (1)(Incropera and Dewitt 2003)과 같다.

$$h^c(T_s) = 0.332 \frac{k(T_f)}{2r_{wet}} Pr(T_f)^{1/3} \frac{u_\infty}{\nu(T_f)} \times \int_{r_{wet}}^{3r_{wet}} \frac{1}{\sqrt{x}} dx \quad (W/m^2K) \tag{1}$$

- T_f : 강판과 유체의 평균온도 (°C)
- k : 유체 열전달 계수 (W/m sec °C)
- Pr : Prandtl 수
- r_{wet} : 비등구간 반경 (m)
- u_∞ : 유체의 유속 (m/sec)
- ν : Poisson 수

또한 비등의 시작인 핵비등 영역에 대해서도 대류계수는 Incropera and Dewitt(2003)이 제시한 식(2)를 사용 가능하다. 단, 여기에는 액체-표면

조합계수가 필요한데, 조선소에서는 국가공 전 기계적 연마로 강재의 표면처리가 이루어지므로 그에 해당하는 값을 상정하였다. Shot blasting 처리된 조선용 강재의 조도 수준은 100 μ m 정도이며 Miyake et al.(1994) 등은 실제 이 조도에서 Nusselt 수를 이용한 대류정도를 파악한 바 있다.

$$h^c(T_s) = 1424670 \times \mu_f(T_s) h_{fg}(T_s) \times \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_v}{\sigma_f(T_s)}} \times \frac{T_s - T_i}{T_s - T_i} \times \left(\frac{c_p(T_s) T_e}{h_{fg}(T_s) Pr_f(T_s)} \right)^3 \quad (W/m^2 K) \quad (2)$$

- μ : 동점성계수 (N sec/m²)
- h_{fg} : 증발열 (J/kg)
- ρ : 밀도 (kg/m³)
- σ_f : 표면 장력 (N/m)
- c_p : 비열 (J/g K)
- T_e : 초과온도 (강판온도 - 물의 비등점) (°C)
- T_i : 상온 (°C)

마지막으로 선상가열부의 냉각시 주된 물리적 대류현상을 나타내는 막비등에 대하여는 체류수에 대한 Hatta and Osakabe(1989)의 실험식(식 (3))을 사용하였다.

$$h^c(T_s) = \frac{158500}{(T_s - 95)^{0.8}} \quad (W/m^2 K) \quad (3)$$

3. 수냉에 의한 총돌제트

Fig. 2의 냉각동심원의 정중앙에 위치하는 부분은 냉각수가 강판을 수직하게 때려서 매우 심한 냉각효과를 유발하는 총돌제트 영역이라고 불린다. 이 영역은 새로운 촉진된 열전달계수로 냉각 과정이 시뮬레이션 되어야 상변태를 파악하는데 필요한 냉각속도를 정확하게 구할 수 있다. 또한 이 영역은 풀비등 구간과는 달리 초과온도보다는 노즐의 영향을 가장 많이 받는다. 따라서 열전달 계수는 온도의존성이 아닌 거리의존성이므로 과도

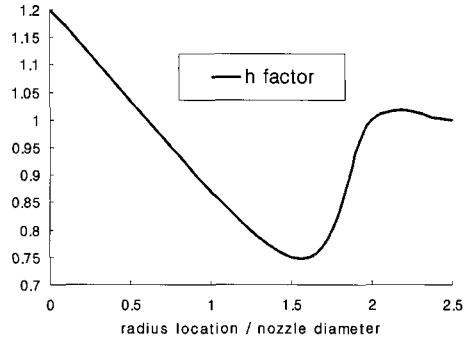


Fig. 3 Heat convection coeff. factor in small radial region about $r_w = 2.5D_w$ standard

해석의 매 단계마다 변화된 값을 시뮬레이션에 입력해야 한다. Martin(1977)은 단일 원형 노즐에 대해 총돌제트에 대한 가용한 대류 열전달 계수를 추천식 (4)하였으며, 이보다 내부의 범위에 대하여는 Fig. 3의 가중치를 곱하여 사용할 수 있다.

$$h^c(T_s) = \frac{2Pr^{0.42}(T_i)k(T_i)(1 - 1.1\frac{D_w}{r_w})}{r_w(1 + 0.1(\frac{H_w}{D_w} - 6)\frac{D_w}{r_w})} \times \sqrt{\frac{4W_f}{\pi D_w \nu(T_i)} + 0.043 \left(\frac{W_f}{\pi D_w \nu(T_i)} \right)^{1.55}} \quad (4)$$

$$\left[\begin{array}{l} 2,000 \leq \frac{4W_f}{\pi D_w \nu(T_i)} \leq 400,000 \\ 2 \leq \frac{H_w}{D_w} < 5 \\ 2.5 \leq \frac{r_w}{D_w} \leq 7.5 \end{array} \right]$$

- r_w : 수냉중심으로부터의 반경 (m)
- D_w : 냉각수 노즐 직경 (m)
- H_w : 냉각수 노즐의 높이 (m)
- W_f : 냉각수 유량 (m³/sec)

4. 복사에 의한 열전달

가열로 인해 뜨거워진 강판의 표면은 복사에 의해서도 냉각이 된다. 복사는 800°C 이상에서 지배

적인 냉각 인자가 된다. 특히 냉각시 상변태를 지배하는 온도대역이 800~500°C 근방(임계냉각)이므로, 열전달 해석은 복사과정을 반드시 반영해야 한다. 복사를 지배하는 스테판-볼츠만 법칙의 온도에 관한 4차 항의 차는 온도차가 인수로 나올 때까지 인수분해가 되므로 나머지 항을 모아서 등가의 복사 열전달 계수라고 상정하면 대류 열전달 계수와의 단순 합(식 (5))으로 시뮬레이션시 온도의존성 물성치처럼 구현이 가능하다.

$$\begin{aligned}
 h(T_s) &= h^c(T_s) + h^r(T_s) \\
 &= h^c(T_s) + \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_i^2)(T_s + T_i) \quad (5)
 \end{aligned}$$

ε : 강표면의 방사율

σ : 스테판-볼츠만 상수

h^r : 복사에 의한 열전달 계수

실제 현장에서의 선상가열의 경우, 수냉노즐은 심한 상변태를 피하기 위하여 강제적으로 토치와의 거리를 10cm이상 두게 되어 있으므로 언급된 여러 가지 수냉현상 중, 주로 막비등 상태에서 임계냉각이 된다. 그런데 막비등의 경우 복사는 막 두께를 증가시키는 역할을 하므로 식 (3)에 대해서는 단순 합이 아닌 Bromley(1950)가 제안한 초월항수식(식 (6))을 총 열전달 계수에 사용해야 한다.

$$\begin{aligned}
 h(T_s) &= \\
 &\left(h^c(T_s)^{\frac{4}{3}} + h^r(T_s)h^c(T_s)^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (6)
 \end{aligned}$$

5. 비등 구간의 열전달 해석

앞서 구해진 냉각단계마다의 열전달 계수는 냉각과정의 시뮬레이션을 가능하게 해준다. 이 절에서는 특정조건의 가열과 냉각을 통하여, 실험과의 변형 결과를 맞춰보기 전에, 중간 단계인 열전달 해석 결과를 검증하려고 한다. 비등구간이 초과온도로 정의되어 있으므로, 열전달 해석 결과 중 온도분포가 바로 비등구간을 제시해줄 수 있다.

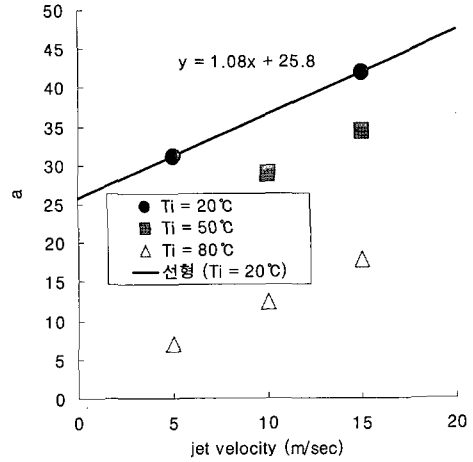


Fig. 4 The relationship between constant a and jet velocity

Mitsutake and Monde(2001)는 강판의 여러 조도에서 비등구간의 반경을 측정하 바 있다. 선상가열은 냉각수 노즐이 이동하는 경우이므로 측정된 실험식에서 냉각수의 이동거리를 빼주면 진행방향과 수직인 방향의 시간에 따른 비등구간을 알 수 있을 것이다. 이 구간을 시간에 대해 미분하고 극점에 해당하는 시간을 구하여, 최대 비등반경을 나타내는 결과를 식 (7)과 같이 도출하였다. 실험으로 결정되는 계수a의 값은 Fig. 4와 같다. 냉매의 온도가 얼마로 선정되더라도 실험계수a와 유속의 관계 기울기는 일정하다는 것이 알려져 있다.

다음절에 소개될 선상가열 실험의 사양에 따른 식 (7)의 결과와 본 연구에 따른 열전달 계수를 사용하여 해석한 비등 구간의 결과를 Fig. 5에 보였다. 해석 결과는 실험식의 94%정도를 나타내고 있다.

$$\begin{aligned}
 r_{wet} &= at^{1/2} - \sqrt{u_{\infty}^2 + 19.6H_w} \quad (mm) \\
 &\left[\begin{array}{l} 2 < \sqrt{u_{\infty}^2 + 19.6H_w} < 3.4 \\ T_{sat} - T_i = 80^{\circ}C \\ T_{max} = 900^{\circ}C \\ C = 0.45\% \end{array} \right] \quad (7) \\
 &= \frac{a^2}{40\sqrt{u_{\infty}^2 + 19.6H_w}} \\
 at &= \frac{a^2}{400(u_{\infty}^2 + 19.6H_w)} \quad (\because \frac{dr}{dt} = 0)
 \end{aligned}$$

C : 강의 탄소 함유량 (%)
 T_{sat} : 물의 증발온도 (°C)
 T_{max} : 강판의 최고 도달온도

6. 판변형 결과에 의한 검증

정남호 등(1985)은 동일한 가열 조건의 선상가열에 대하여 냉각조건만 달리한 모델에 대해 판 및 온도변화부의 재질에 대하여 실험한 바 있다. 실험의 모식도는 Fig. 6과 같고, 일반 선상가열 실험과 큰 차이는 없으나, 냉각조건에 대한 대조군을 가지고 있는 점이 본 연구에서 제안하는 냉각과정의 메카니즘이 반영된 변형결과를 비교하는 데는 매우 좋은 자료가 된다. 이 실험에서의 변수는 가열 토치와 냉각수 노즐과의 거리이다. 이것은 토치에 의해 가열되었던 영역이 어느 정도의 임계거리를 기준으로 충돌제트 또는 막비등이라는 상이한 물리적 현상으로 냉각이 되는 것을 생각할 때에, 본 연구에서 주장하는 바를 확인하기 용이하다. Table 1에 두 선상가열 실험의 공통된 인자를 정리하였고, Table 2에는 차이를 정리하였다.

장창두 등(2002)은 온도 이력을 겪은 강의 최종 상변태가 고유변형도를 결정하는 영역에 영향을 준다는 것을 밝혔고, 하윤석과 장창두(2004)는 고유변형도의 구체적인 계산 방법을 상변태가 가져오는 부피팽창까지 고려하여 도출한 바 있다. 변형 계산시 재료의 물성치를 결정하는 것이 최종 상태의 상의 분율이고, 상변태된 분율의 결과는 고온을 경험한 강의 냉각속도에 의해 결정된다.

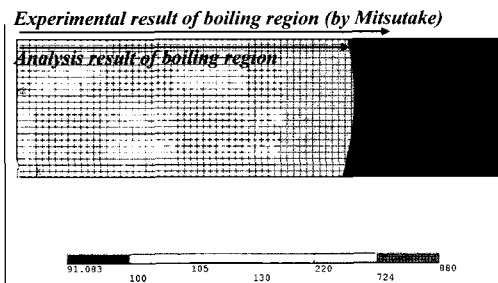


Fig. 5 Nucleate region result of heat transfer analysis

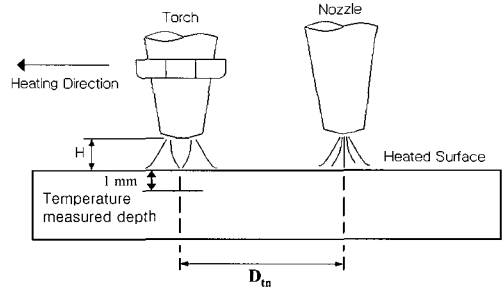


Fig. 6 Processing direction of torch and nozzle

Table 1 Line heating conditions

Items	condition
Height of nozzle	20 mm
Water flow	2.1 liter/min
nozzle(torch) moving speed	0.315 cm/s
Maximum Temp. 1mm depth. under surface	870~880 °C

Table 2 Cooling condition of Line heating

	distance
Case(I)	50mm
Case(II)	35mm

Table 3 Chemical compositions test plate

Chemical Composition (%)					
C	Si	Mn	Mo	P	S
0.18	0.27	1.54	0.01	0.017	0.007

일반적으로 강의 가열부의 최종 상변태율은 가정해서 사용되기도 하지만, 강종 및 가열방법 및 냉각방법 등에 따라 그 차이가 매우 심하므로 여기서 제안하는 것과 같이 냉각과정이 시뮬레이션 되어 정밀한 냉각속도를 도출하는 것이 중요하다. 여기에 사용된 강종은 50kgf/m²급의 고장력강이며 화학조성은 Table 3에 나타내었다.

선상가열 시뮬레이션 과정에서 필요한 시간당

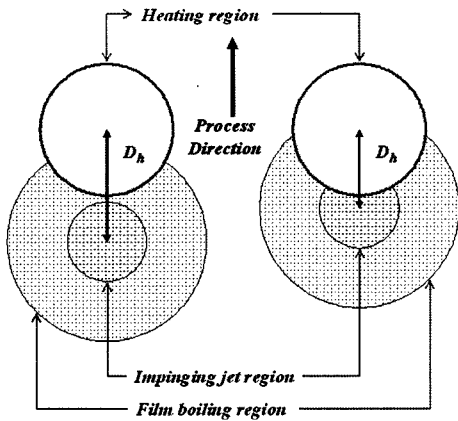


Fig. 7 Water cooling processes about distances of torches and nozzles

투입열량은 제공된 속도와 예측된 최고도달온도로 부터 구하여 사용하였다. Table 2에서 제시된 두 실험간의 토치와 노즐간의 거리 차이는 Fig. 2를 간략화시킨 Fig. 7과 같이, Case(I)의 경우는 막비 등에서 Case(II)의 경우는 충돌제트 영역에서 냉각이 이루어진다.

가열부의 냉각속도는 각 노드별로 표면에 가까운 순서대로 빠르게 나타나겠지만, 노드별로 다른 상변태율 및 물성치로 변형 계산을 하는 것은 효율성을 강조하는 고유변형도법의 본질을 흐릴 수 있다. 또한 선상가열은 가열이 표면 쪽에 집중되므로, 본 연구에서는 고유변형도 영역이 결정되면 그 도심에서의 냉각속도를 전체의 평균으로 삼아 냉각속도 및 변태율, 그리고 물성치를 계산하였다. 가장 관심을 가지는 상은 마르텐사이트로써, 이것은 항복응력 등에서 기존의 페라-펄라이트 구조와는 많은 차이를 보이므로, Table 4에 각 경우의 결과를 마르텐사이트를 기준으로 정리하였다. 온도의존성 물성치 함수는 이 결과를 이용하여 각 상들의 물성치에 분율을 가중치로 하여 합한 것 (식 (8))을 사용하였다. 식 (9)는 화학조성이 결정되면 Table 4의 계산근거를 보여주는 임계냉각속도(°C/h)에 대한 식(Atkins 1977)이며, 냉각 중 700°C에서 계산되었다. 선상가열 판변형에 대한 고유변형도 영역은 타원형으로 가정하는 것이 장창두 등(1997)의 연구에서부터 알려져 있으며, 그

Table 4 Critical velocity and martensite rate of case(I) and case(II)

	임계냉각속도 (°C/sec)	마르텐사이트분율 (%)
Case(I)	71.325	65.8
Case(II)	196.875	100

$$f_c(T) = \sum_i^n X_i(T) \cdot f_i(T)$$

\rightarrow Ferrite, Austenite, Pearlite, Bainite, Martensite (8)

$$X_M = 1 \text{ when } V_M = 10^{8.6424 - (4.62C + 1.05Mn + 0.50Cr + 0.66Mo + 0.54Ni)}$$

$$X_M = 0.9 \text{ when } V_M = 10^{7.5924 - (4.04C + 0.96Mn + 0.58Cr + 0.97Mo + 0.49Ni)}$$

$$X_M = 0.5 \text{ when } V_M = 10^{7.3324 - (4.13C + 0.86Mn + 0.41Cr + 0.94Mo + 0.57Ni)}$$

$$X_M = 0 \text{ when } V_M = 10^{4.5113 - (0.43C + 0.49Mn + 0.26Cr + 0.38Mo + 2\sqrt{Mo})} \times 10^{-0.78Ni}$$
 (9)

TEMP_2

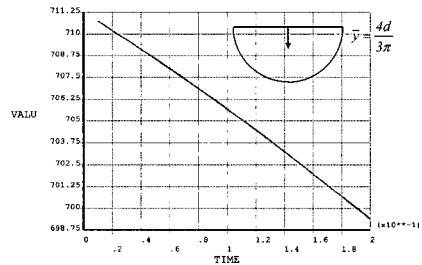


Fig. 8 Cooling speed at the centroid of elliptic inherent strain region

러한 경우 냉각속도의 기준이 되는 도심과 과도해석의 결과는 Fig. 8에 같이 도시하였다.

식(8)의 결과를 고유변형도 기반의 등각 하중법에 마르텐사이트 분율을 고려한 하윤석과 장창두(2004)의 제안식에 의하여 변형을 기존의 해석방법과 마르텐사이트 분율을 고려한 해석방법과의 변형을 비교하면 Fig. 9와 같다. 즉, 실험에서도 냉각시점이 다른 것만으로 변형차이를 보이고 있는데, 제안한 방법 역시 그에 따른 차이를 낼 수

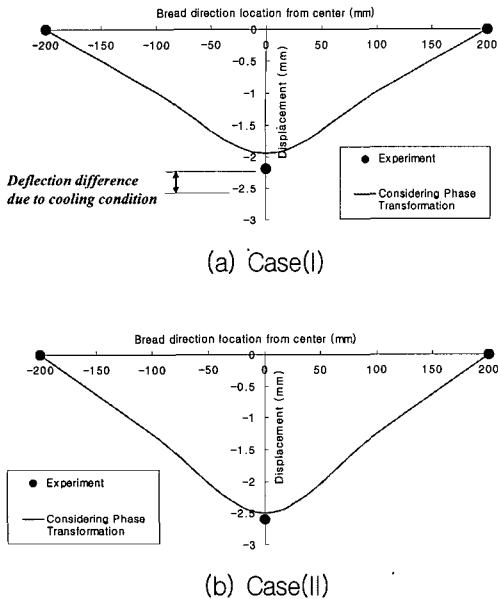


Fig. 9 Analytic and experimental results of plate deformation

있도록 되어 있을 뿐 아니라 실험 결과와도 좋은 일치를 보이고 있다.

7. 결론

냉각속도에 의해 마르텐사이트의 생성비율이 결정되고 급냉의 경우에는 마르텐사이트의 분율이 높아 변형이 크게 일어나고 서냉의 경우에는 마르텐사이트의 생성 비율이 낮아 변형이 적게 일어난다. 이것은 선상가열의 판변형 해석시 상변태 및 그를 확인하기 위한 냉각 과정의 열전달 해석이 중요해진 것을 의미한다. 본 연구에서는 선상가열 냉각수의 충돌제트와 막비등을 고려해, 보다 정확한 열전달 해석을 함으로써 냉각속도를 예측하고, 이를 통해 계산된 상변태율로 보다 정확한 곡변형의 예측을 가능케하는 물성치를 도출을 이루었다.

후 기

본 연구는 국가지정실험실(NRL) 프로젝트 재원의 도움을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 장창두, 고대은, 문성춘, 서용록, 2001, "상각가열에 의한 판 변형의 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 4호, pp. 66-74.
- 장창두, 서승일, 고대은, 1997, "간이 열탄소성 해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제 3호, pp. 104-112.
- 장창두, 하윤석, 고대은, 문성춘, 2002, "선상가열 판변형 해석을 위한 고유변형도 영역의 결정법," 대한조선학회 논문집, 제 39권, 제 1호, pp. 82-89.
- 정남호, 최병길, 박종은, 1985, "50kg/mm² 급고장력 강판의 선상가열에 따른 판상변형과 임질변화," 대한용접학회지, 제 3권, 제 1호, pp. 11-21.
- 하윤석, 장창두, 2004, "선상가열시 강의 상변태를 고려한 개선된 고유변형도 기반의 등가하중법," 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 6호, pp. 65-74.
- Atkins, M., 1977, Atlas of CCTD for engineering steels, British Steel Corp.
- Bromley, L.A., 1950, "Heat Transfer in Stable Film Boiling," Chem. Eng. Prog. 46, pp. 221
- Hatta, N. and Osakabe, H. 1989, ISIS Int, Vol. 29, no. 11, pp. 919
- Incropera, F.P. and Dewitt, D.P. 2003, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edition, WILEY
- Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," Jr., Eds., Advances in Heat transfer, Vol. 13, Academic Press, New York
- Misutake, Y. and Monde, M. 2001, "Heat transfer during transient cooling of high temperature surface with an impinging jet, Heat and Mass Transfer 37, pp. 321-328
- Miyake, G., Hirata, M. and Kasagi, N., 1994, "Heat Transfer Characteristics of an Axisymmetric Jet Impinging on a Wall with Concentric Roughness Elements, Experimental Heat Transfer, 7:121-141.