

선상가열시 위빙방식의 효율성과 최적 가열조건 결정에 관한 연구

하윤석^{†*}, 장창두^{**}

서울대학교 조선해양공학과 박사과정^{*}, 서울대학교 조선해양공학과^{**}

The Effectiveness of Weaving Motion and Determination of Optimal Heating Condition in Line-heating

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

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University, Doctor Course^{*}
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University, Professor^{**}

Abstract

Inherent strain method for analyzing deformation of line-heating is substituting experiments of high cost, because of its high accuracy and quickness. Nowadays, the progressing forms of line-heating are not straight moving motions used to traditional studies, but weaving motions which can diversely input heat source. In shipyard, reasons of weaving motions are induction of a special characteristic by water cooling, maximum temperature limitation for keeping plates from melting, and rhythm for workman's maintaining velocity. On this study, a method which can obtain optimal weaving heating condition was presented, some examples were introduced, and the results corresponded to works of shipyard. Lastly, what the specifications of plates on efficiency are is presented, through the quality standard of shipyard and FEM heat transfer simulation. The ultimate purpose of line heating is the automation, so in case of plates which need weaving heating, the optimal heating condition suggested by this study can be used well in designing coil specifications of induction heaters which are heat input sources of new generation.

※Keywords: Thermal Elasto-Plastic(열탄소성), Line Heating(선상가열), Weaving(위빙), Inherent Strain(고유변형도), Nonlinear Programming(비선형 최적화)

1. 서론

접수일: 2004년 3월 3일, 승인일: 2004년 6월 28일

†주저자, E-mail: lunxi@daum.net
Tel: 02-880-7336

선상가열에 대한 해석법으로 가장 유용하다고
제시되는 방법은 용접 변형을 구하는데 사용되

단 고유변형도 해석법이다(장창두 등 1997). 고유변형도 해석법은 소성변형영역 내에서 소성 변형도와 열변형도를 두께에 대하여 적분하여 탄성력을 구한 뒤 변형을 구하는 방법으로서, 신속성과 효율성으로 장시간의 열탄소성 3D FEM 해석을 대체하였다(고대은 등 1999). 고유변형영역을 가정하는 방법도 계속 개량되어 강의 상변태 현상을 반영할 수 있게 되었으며(장창두 등 2001(a), 장창두 등 2002), 이로써 가열선을 추출하는 과정의 시뮬레이션도 합리적인 결과를 보여주게 되었다.

그런데 해석법이 정립되어 가는 중에서도, 정작 해석의 대상이 된 모델은 현장의 실제 작업을 반영하지 못했다는 점이 문제가 되고 있었다. 열탄소성 해석법들은 주로 용접에 적용되었기 때문에 대부분의 해석은 점열원의 정속 이동과정을 연구한 것이었다. 그러나 실제 조선소에서는 작업효율을 위하여 위빙방식으로 선상가열이 이루어지고 있는데, 고유변형도법을 선상가열에 적용하던 종래의 연구는 이 점이 간과되어 왔다. 또한 선상가열의 경우, 자동화를 목적으로 하여 변형을 도출하는 과정은 엄밀해를 요한다. 열변형의 엄밀해 도출을 위해서는, 해석에 상변태라는 금속적인 특성이 반드시 반영되어야 한다. 이는 변화된 물성치 및 상의 부피 팽창이라는 것들을 고려해야 하지만, 최근 Jang et al.(2003)에 의하여 개량된 고유변형도 계산의 형태로 제시된 바 있다.

본 연구는 최근의 개량된 고유변형도가 판변형을 매우 잘 예측한다는 것을 이용하여 판재를 최적으로 가공할 수 있는 가열조건을 찾으려고 하였다. 이에 목적함수는 단위시간당 최대곡 가공량을 사용하였다. 이 과정에서 열량의 평가만 이루어진다면 판재의 가열깊이비가 판두께에 상관없이 선상가열의 가장 지배적인 인자라는 것을 밝혔다. 따라서 판재에서의 최적의 가열깊이비를 도출하려고 하였다. 이를 박판에서 얻은 결과는 시뮬레이션을 통하여도 매우 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 검증에 위한 시뮬레이션은 대상이 되는 판의 두께가 깊어질수록 강판의 표면이 녹아버려서 계산된 가공조건의 합

리성의 유무를 확인할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 이유들을 포함한, 위빙가열의 생산적이고 효율적인 측면에서의 당위성을 조명하였다.

이에 본 연구는 후판에서 특정 두께와 특정 입열량에 대하여, 판재에서 작업속도와 위빙폭을 변수로 하는 최적 위빙가열 조건을 산출하는 과정을 제약이 있는 비선형 최적화 과정을 통하여 그 해석 방법과 여러 판두께와 입열량에 대한 해석 결과들을 소개하였다. 또한 이 결과들이 장인들의 오랜 경험에서 나온 조선소 현장의 작업지침과 매우 유사함을 보였다. 이 결과들은 현재 연구중인 열간가공용 회전도치(김세환 2003)나 선상가열용 유도가열기(Jang et al. 2002)의 코일 제원설계에 이용되어 선상가열 작업의 자동화를 이끌어 낼 수 있을 것이다.

2. 박판의 최적가열조건 결정과정

고대은 등(1999)은 네 가지 종류의 등가하중을 고유변형도(ϵ^*)로서 구할 수 있도록 하였는데, 그 중에서 단위길이당 횡굽힘 분포모멘트(식 (3))가 굽힘각(θ)에 가장 큰 영향을 끼친다. 단위길이당 횡굽힘 모멘트에 영향을 주는 것은 가열선과 수직인 방향의 고유변형도(식 (4))이다. 냉각시 변형이 더 이상 진행하지 않음을 가정하는 평형온도(식 (5))의 수준에 따라 고유변형도는 세가지로 다르게 적용될 수 있는데 식(4)의 경우는 가열깊이비(d/h ; 가열깊이 / 판두께)가 21~74%에 해당하는 평형온도 대역에서 사용 가능한 식이다. 이를 같은 빔의 양단모멘트 공식에 적용하면 각변위량의 근사값을 알 수 있고, 다시 여기에 속도(v)를 곱하면 단위시간당 가공 가능한 단위 길이 판의 각변위량이 도출(식 (1))된다. 이는 단위시간당 입열량(q)과 판두께가 정해진 상태에서는 가열깊이비만의 함수로 표현이 가능하다.

식에 사용된 가열부의 폭(b)(식(2)), 가열선 방향의 판길이(L) 등은 기존의 연구(고대은 등 1999)와 같은 기호를 사용하였고, 마르텐사이트 상변태 효과를 반영하기 위한 냉각시(L_c) 온도

의존성 물성치들($E(T)$, $v(T)$, $\sigma_y(T)$, $\alpha^m(T)$)은 Jang et al.(2003)의 결과를 이용하였다. 하첨자 H 는 가열중인 즉, 일반적인 온도의존성 물성치를 나타내며, 고유변형도 영역으로 가정되는 임계온도(식 (6))와 냉각시 마르텐사이트 상변태 시작온도(식 (7))는 외판용 선급강종 A 의 화학 조성을 나타내는 Table 1 을 사용하여 구하였다.

$$f = \theta \cdot v$$

$$= -\frac{180}{\pi} \frac{m_y \left(\frac{d}{h}, h\right) \cdot L \cdot b}{2E_C \left(\frac{d}{h}\right) \frac{Lh^3}{12}} \times \frac{1}{40} \frac{q}{\frac{d}{h} \cdot h^2} \quad (^\circ/\text{sec})$$

Where, θ : angular deformation per line ($^\circ$)
 v : torch velocity (cm/sec)

$$b = 20 \sqrt{\frac{q \cdot 0.234}{v \cdot T_c - T_i}} \quad (\text{mm})$$

Where, T_c : critical temperature ($^\circ\text{C}$)
 T_i : room temperature ($^\circ\text{C}$)

$$m_y = \frac{1}{6} E_C(T_y) \varepsilon_y^* h^2 \frac{d}{h} \left(\frac{3\pi}{4} - 2 \frac{d}{h} \right)$$

$$\varepsilon_y^* = \frac{\sigma_{Y-H}(T_c)}{E_H(T_c)} \left(\frac{E_H(T_c)}{E_H(T_i)} \times \frac{1+v(T_i)}{1-v(T_c)} + 1 \right) - \frac{\sigma_{Y-C}(Ms)}{E_C(Ms)} \left(\frac{E_C(Ms)}{E_H(T_i)} \times \frac{1+v(T_i)}{1-v(Ms)} + 1 \right) + \int_{Ms}^{T_y} \alpha_C^m(T) dT$$

$$T_y = T_c \frac{\pi d}{4 h} \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_c \equiv Acl = 723 - 10.7Mn - 16.9Ni + 29.1Si + 16.9Cr + 290As + 6.38W$$

$$Ms = 512 - 453C - 16.9Ni + 15Cr - 9.5Mo + 217(C)^2 - 71.5(C)(Mn) - 67.6(C)(Cr) - 20Si$$

Table 1 The chemical composition of mild A grade steel of class rule

grade	A	We set
C	0.21 % Max (locally 0.23 % Max)	0.18 %
P	0.035 % Max	0.02 %
Mn	2.5 x C % min	0.45 %
Si	0.5 % Max	0.2 %
S	0.035% Max	0.02 %
C + 1/6 Mn : 0.4 % Max		

식(1)을 가열깊이비에 따라 식(4)가 유효한 범위에서 도시하면 Fig. 1 을 얻는다. 이 그림의 결론은 대략 28% 깊이까지 가열하면 판두께와 단위시간당 입열량에 무관하게 단위시간당 최대의 굽힘각을 얻을 수 있다는 것이다. 현장에서 하나의 가열선에서 얻을 수 있는 굽힘각은 매우 작기 때문에 최대각 굽힘정보에 대한 도출은 매우 유용하다. 그런데 이 영역을 모두 하나의 변형도 값으로 계산하려면 이 깊이까지는 모두 마르텐사이트로 상변태되었다는 보증이 필요하다. 이는 식 (3)의 단위길이당 횡방향 굽힘모멘트가 고유변형도를 두께에 대해 적분하여 얻은 값인데, 최근의 상변태 효과가 반영되어 개량된 고유변형도를 본 연구가 사용하였기 때문이다. 이는 Fig. 2 (Atkins 1977)를 통하여 밝힐 수 있다. 선급강종 A 에 해당하는 강(C=0.18%)은 수냉면 13mm 아래까지 마르텐사이트로 100% 상변태된다. 이는 유속을 배제한 최소의 값으로서, 실제와 같이 유속을 주거나 염수 등을 이용하여 더 깊은 마르텐사이트 상변태의 깊이 보증을 할 수가 있다. 따라서, 본 연구결과를 접목하면 다른 제약이 없는 경우, 두께 47mm 이하(판두께의 28%가 13mm 이하)의 판들은 모두 최대각가공이 가능하다는 결론이 된다.

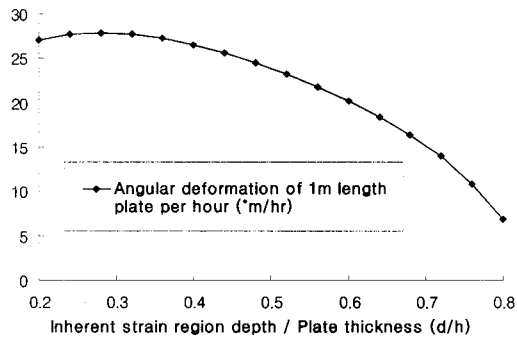


Fig. 1 Angular deformation of 1m length plate per time about d/h

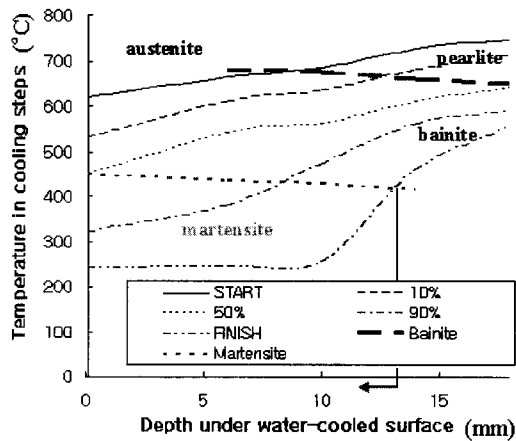


Fig. 2 Continuous cooling transformation diagram (0.017~0.022wt C mild steel)

$$v = 0.091 \frac{q}{h^2} \text{ (cm/sec)} \quad (8)$$

입열원의 시간당 입열량(q)이 결정되면 본 연구에서 계산된 가열깊이비 0.28로부터, 식(1)의 속도항을 통하여 최적의 가공속도(식(8))를 구할 수 있다. 이는 FEM 열전달 해석(장창두 등 2002)을 통하여 실제 임계온도구간(최고도달온도가 Tc 인 구간)이 그와 같은지 확인할 수 있다.

Fig. 3는 특정 가공조건에 이동열원을 선열원으로 가정(Amiram/William 1987)한 후, 단면 모델의 최고도달온도 결과를 임계온도로 경계

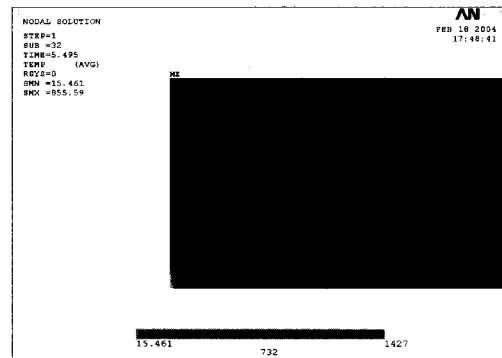


Fig. 3 Maximum Tc region (q=1200 cal/sec, h=10mm)

를 나눈 그림이다. FEM 열전달 해석결과는 임계온도의 최대 침투 깊이가 판두께의 25~30%에 달하는, 즉 본 연구에서 구한 가열깊이비에 매우 부합하는 결과를 보여주고 있다. 이는 본 연구가 구한 최적 가열깊이비로부터의 가공속도 결정값이, 실험식에서부터 제안된 것임에도 불구하고, 그 역의 과정을 시뮬레이션한 것과 잘 일치하고 있음을 보여준다.

여기서 이를 바탕으로 Fig. 4의 판두께별 최적가공속도를 도시하였다. 이런 관계를 규명하기 위해서는 열량추정 과정이 반드시 필요하다. 본 연구는 기본선 가열로부터 추정하는 방법(고대은 등 1999)을 택하여, 본 연구와 병행하여 이루어진 실험용의 토치를 판급힘량(장창두 등 2002)과 고유변형도(Jang et al. 2003)로부터 2250 cal/sec를 얻을 수 있었다. 실제 선상가열시에 사용되는 열량은 일정하지는 않지만 일반적으로 3000 cal/sec 이상의 높은 수준으로 알려져 있다.

그런데 Fig. 4에 함께 도시된 현장작업표준 자료들은 실험시 가해진 조금 낮은 수준의 열량 때문이라고 보기에, 최적가공속도로 표기된 자료들과 후판 영역에서 너무도 일치하지 않는다. 이는 후판에 열전달 과정을 시뮬레이션했을 때, 그 원인을 찾을 수 있었다. 문제는 강의 표면이 녹는점 이상이 되는 것인데, 선상가열은 품질과 효율성의 문제(장창두 등 2002)로, 현장에서는 녹는점 이상으로는 절대로 가열하지 않는다.

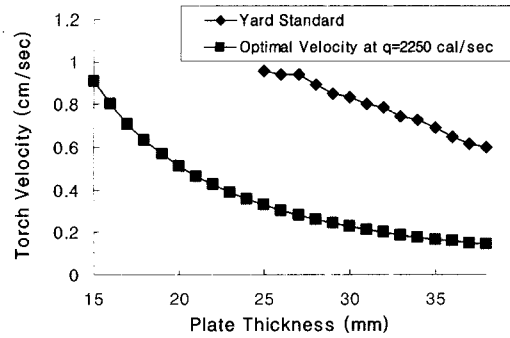
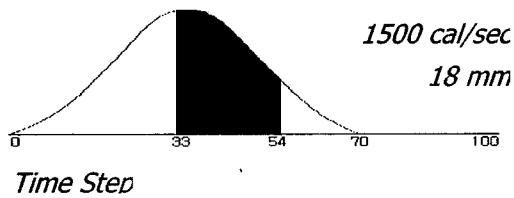


Fig. 4 Standard torch velocity of shipyard and optimal velocity (at q=2250cal/sec)



(a) Case of thick plate



(b) Case of high heat flux

Fig. 5 limits of straight pass heating

Fig. 5 는 열속의 진행을 70step 으로 해석하였을 때, 강판 표면이 녹는점 이상의 결과가 나오는 구간을 도시하고 있다. 판두께가 두꺼워지거나 시간당 입열량이 증가하면 비록 그에 따라 최적 가공 속도가 빨라졌다고 하더라도 판재가 가공도중 녹는 것을 볼 수 있다. 하지만 곡가공의 대상이 되는 외판은 대부분이 후판이고, 작업시의 입열량은 실험시보다 높은 수준임을 고려할 때, 후판 열간 곡가공의 효율을 위해서는 입열을 넓은 폭에 나누어서 하는 위빙가열이 필수적이라고 할 수 있다. 또한 이렇게 함으로써

가열부의 깊이는 알아지고 폭은 넓어지는 효과가 동반되어 전 영역이 수냉의 효과를 가질 수 있게 되는 부수적인 효과도 거둘 수 있다.

따라서 가열깊이비 0.28 을 통해 얻은 최적가공속도는 박판에만 한정해야 하며 사용이 극히 제한되어야 할 것이다. 이는 우리가 간접 추정 한 열량의 시간대에 따른 분포 역시 완전하지 못하기 때문이다. 열전달 시뮬레이션은 열속이 한 지점을 통과하는 시간동안 기 추정량(투입 열량 - 대류 방출 열량 - 복사 방출 열량)을 가우스 분포로 나누어서 입열된다. 그러나 가우스 분포는 투입열량과 상관있는 분포이며 대류와 복사로 빠져 나가는 양은 가열 시작에서 후반부로 갈수록 증가하는 양이기 때문에 토치가 다 지나가기 전에 이미 실제 열량 투입기간은 종료된다. 따라서 열량은 가정된 시간대보다 좁은 시간대역에 집중적으로 쏠렸을 것이므로, 토치가열에서 시뮬레이션을 통한 위빙가열이 명확히 권고되는 경계를 정하는 것은 우리가 있다. 실제로 이러한 이유에 위빙이 갖는 작업자의 정속 유지를 위한 리듬감이라는 것이 더해져서 두께 10mm 이상의 판은 모두 위빙 입열 방식으로 제작되고 있는 것이 실제 현장의 모습이다.

3. 후판의 위빙가열 최적화 과정

가열을 위빙방식으로 택하게 되면 결정변수로 위빙가열폭(b_w)이 추가(식 (9))된다. 최적화 과정은 먼저 목적함수를 설정함으로써 시작된다. 본 연구에서는 단순히 각변형량을 사용하지 않고 단위시간당 단위폭을 가진 판의 각변형량을 사용하여 조선소의 작업지침과 비교할 수 있도록 하였다. 단위시간당 각변형량은 각변형량에 속도를 곱하여 단위길이에 대한 값으로 표현하였다.

제한조건은 세가지 정도를 고려할 수 있는데, 우선 강판이 녹으면 안된다. 따라서 실험시의 입열량이 추정되면 매 입열폭당 가능한 최소 속도를 수차례의 열전달 시뮬레이션으로 구해야 한다. Fig. 6 은 특정 입열조건에서 그 결과로 최고도달온도가 녹는점에 도달하지 않음을 보여서



Fig. 6 Example of heat transfer transient analysis (q=3000 cal/sec, h=25mm, b_w=46mm)

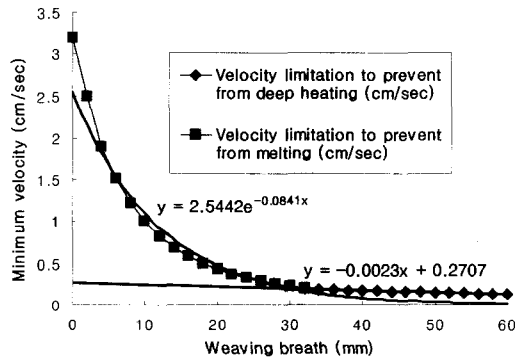


Fig. 7 Minimum velocity limitation (x → b_w, y → v)

그것이 실현가능한 가공속도임을 입증하는 시뮬레이션의 한 예이다. 이것은 주로 좁은 위빙 폭을 사용하여 입열량이 집중되는 경우에 중요한 제약이 된다.

둘째, 위빙폭의 증가하여 입열이 분산된 상태로 속도가 줄어들면 재료를 녹이지 않고 입열이 깊이 진행되어 상변태 영역 또한 수냉의 영향을 받을 수 없도록 깊어질 수 있다. 이때는 강판이 녹는 것을 기준으로 하는 경우보다 더 큰 값의 최소속도가 필요하다. 이는 위빙폭이 큰 경우에 중요한 제약이 되나 절대적인 제약은 아니다. 수냉 호스의 위치와 물분사 속도 등을 고려하여 열대류계수를 키움으로써 제약은 완화될 수 있으나 본 연구에서는 유동이 없는 수냉시 대류계수값의 최소치로 최적화 계산을 수행할 것이다. 이러한 우선적인 두 가지 제약을 Fig. 7 처럼 도시하였고, 이를 각각 그 형태에 따라 지수함수와 일차함수로 회귀한 꼴을 제약식으로 사용하

였다. 이 자료들은 모두 본 연구에서 동일 열속을 각기 다른 위빙 폭에 시뮬레이션하여 얻은 값들이다.

셋째, 위빙폭은 토치 열속의 가우스 분포의 99% (60 mm) (장창두 등 2001(b))보다 작도록 하였다. 토치 열속의 폭은 두 가지의 임계값을 결정할 수 있게 해주는데, 첫째는 그 전폭에 대한 것으로써 입열폭이 그보다 작아야 위빙폭 내에 열속이 닿지 않는 부분이 생기지 않을 것이다. 이는 언급한 제약조건이 된다. 다음으로는 그 반폭으로써 이는 위빙폭 내에 항상 열속이 존재하도록 만드는 임계값(이를 임계입열폭이라고 하고식(11)의 위빙폭 증가에 따른 입열 효율 감소계수결정에도 활용하였다.)이 된다. 위빙폭이 이보다 커지면 가열 효율은 급감할 것이고 이는 식(9)에 반영하였다. 마지막으로 변수들은 모두 양수를 가지도록 하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } f(b_w, v) = 36 \theta v \quad (^\circ\text{m} / \text{hour}) \\
 & \text{subject to } 0 \leq b_w \leq 60 \\
 & \quad v \geq 2.5442e^{-0.084b_w} \\
 & \quad v \geq -0.0023b_w + 0.2707
 \end{aligned} \tag{9}$$

추가된 변수인 위빙폭은 가열깊이비(식(10))(식(1)로 부터)와 위빙폭 끝에서부터 더 추가된 만큼의 고유변형도 영역의 폭(식(11))(식(2)로부터), 그리고 굽힘각(식(12))(식(1)로 부터)을 나타내는 식에 포함되어 사용할 것을 제안한다. 식(10)은 종래의 연구가 고유변형도 영역을 타원형으로 가정(장창두 등 1997)하고 있는 것에서 착안하여, 동일 열량에서는 고유변형도 영역의 넓이도 동일함을 가정하는 것이다. 즉, 같은 입열량에서 넓어진 위빙 폭에 기인하여 직선 가열형태에서 얻어진 가열깊이비의 실험식의 값이 작아지는 비율을 수식화한 것이다. 이를 수식화한다는 것은 가열깊이비를 얻기 위한 열전달 유한요소 해석과정의 생략을 의미하므로, 본 연구의 최적화 해석 및 일반 위빙을 이용한 선상가열 단순 시뮬레이션에도 큰 역할을 하는 셈이다. 가열깊이비는 냉각시 온도구배(Ty)(식(5)) 결정에 핵심적인 인자로서, 냉각

물성치 결정시와 굽힘모멘트 적분에 사용(장창두 등 1997)된다.

식(11)도 종래의 실험식에 바탕을 두고 있다. 이는 직선가열과 같은 집중가열을 상정한 실험식이므로, 제약조건에서 언급한 위빙폭 증가에 따른 입열 효율 저하의 문제를 반영해야만 한다. 이에 단위시간당 입열량에 위빙폭 증가에 따라 가우스 분포함수 형태의 감소함수를 곱하여 효율이 표현된다고 가정하였고, 감소율은 고유변형도 영역의 폭에서 위빙폭을 뺀 부분(b)의 위빙폭에 대한 감소 형태가 임계 입열폭을 기준으로 변곡점이 되도록 설정하였다.

$$\frac{d}{h} = \min\left[\frac{q}{40vh^2}\left(\frac{b}{b_w + b}\right), 1\right] \tag{10}$$

$$b = 20\sqrt{\frac{qe \frac{1}{2}\left(\frac{b_w}{30}\right)^2}{v} \frac{0.234}{T_c - T_i}} \tag{11}$$

$$\theta = \frac{180 m_y(\epsilon_y^*) \cdot L \cdot (b + b_w)}{\pi \cdot 2E_C(T_y) \frac{Lh^3}{12}} (\circ) \tag{12}$$

이 계산 과정은 제약이 있는 비선형 최적화이므로 이러한 경우에 매우 효율적인 것으로 알려진 SUMT(Sequential Unconstraint Minimization Technique)를 사용하려고 한다. 내부벌칙(1/g)에 곱해진 r 값을 0 으로 수렴시키는 과정에서 매단계마다 비선형 최적화 방법중의 하나인 Newton method 를 사용하였고, 준식은 수식적인 미분이 되지 않으므로 계산과정 중에 필요한 gradient 와 Hessian 은 수치해석법의 하나인 전진 유한차분법을 사용하였다.

식 (13)이 문제의 SUMT 로의 정식화를 나타낸다. 열량은 앞서 2250 cal/sec 로 추정되었고, 강판은 두께 20, 25, 30mm 의 세 종류가 실험에 사용되었다. 이 조건대로 조선소의 선상가열

가공 전문 장인에게 변형 최대화를 꾀하는 최적 곡가공을 요구하는 실험이 의뢰되었으며, 따라서 이 실험에 사용된 가공조건이 본 연구의 최적화 결과와 부합하는지를 볼 것이다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f(b_w, v) = -36\theta v \\ & \text{subject to } g_1(b_w, v) = -bw \leq 0 \\ & \quad g_2(b_w, v) = bw - 60 \leq 0 \\ & \quad g_3(b_w, v) = 2.544e^{-0.084bw} - v \leq 0 \\ & \quad g_4(b_w, v) = -0.0023bw + 0.2707 - v \leq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \Phi(b_w, v) = -36\theta v - r \sum_{i=1}^4 \frac{1}{g_i} \quad (r \ll 1) \\ & \text{by Newton Method} \end{aligned} \tag{13}$$

4. 최적 가열 조건 결과

현장의 작업 표준지침은 가공 판두께에 대하여 작성되어 있다. 본 연구의 최적화 계산 결과는 단위시간당 단위길이에 대한 각가공량인데 그 최대값을 결정하는 변수중 하나인 가공속도의 값으로 이 기준과 비교해 볼 수 있다. 위빙폭의 경우는 정확한 지침이 정해져 있지 않고, 작업자마다 그 형태도 조금씩 다른 것으로 알려져 있으나, 본 연구가 가정한 원형 위빙 진행방식이 대부분인 것으로 알려져 있다. 실험 대상이 된 세 종류 두께의 판에 선상가열 작업이 이루어질 때, 판두께별 최적 위빙폭의 시뮬레이션의 결과를 작업자가 경험을 바탕으로 가한 위빙폭의 정보 및 가공 속도와 비교해 보기로 한다.

Fig. 8 에 식 (13)의 최적해의 결과(X 마크)를 도시하였다. 시간당 각가공량은 판의 두께가 20mm 에서 30mm 로 1.5 배 두꺼워진 조건에서 효율은 절반 이하로 떨어지는 것으로 나타났다. 본 연구가 가열조건의 인자로 결정한 가공속도와 위빙폭은 의뢰된 실험과 정도와 경향면에서 좋은 일치를 보여주고 있다. 속도의 경우는 판두께가 두꺼워질수록 줄어들고, 위빙폭의

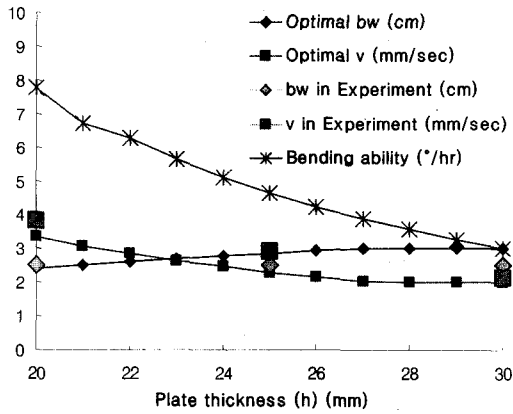


Fig. 8 Results of optimal heating condition

(Y-axis has several meaning, according to data)

경우는 반대로 늘어나고 있으며 이것은 두꺼워진 판의 깊이의 일정부분까지 입열하기 위한 당연한 결과일 것이다. 그러나 그 정도가 심하지 않음이 밝혀졌으며, 27mm 이후부터는 각기 30mm의 위빙폭과 0.2 cm/sec의 속도로 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 의뢰된 실험의 위빙폭은 최적해의 결과와 거의 동일한 값으로 가공되었으며, 속도는 경향과 정도면에서 후판으로 갈수록 본 연구의 최적해와 매우 흡사하였다.

실험의 최적 속도가 구한 해보다 조금 빠른 쪽에서 차이를 보인 것은 기 서술한 바와 같이 실제 입열은 가정된 폭보다 대류와 복사에 기인하여 더 좁은 시간대역의 폭 내로 들어가기 때문이다. 따라서 표면의 녹는 것을 방지하는 제약은 실제보다 강화되어야 하며, 그럴 경우 속도는 더 빠른 값에서 결정되게 되어 있다. 이러한 개념은 선상가열의 입열량 평가를 정확히 내릴 수 있는 유도가열원으로 대체될 경우에, 정확한 열전달 해석이 가능케 됨으로써, 훨씬 적은 오차율로써 변형을 추정하고 가공방침을 정할 수 있게 해줄 것이다.

5. 결론

본 연구는 선상가열의 최적가공조건을 결정하고자 하였다. 이에 시간당 단위길이의 각가공량이라는 목적함수에 대하여 최대가공이 가능하게 되는 작업변수들의 값을 확인하였다. 이에 박판에서는 일정 입열량 하에서 속도만으로 최적가공을 조절할 수 있음과 그 값을 판두께에 따라 식으로 제시하였다.

후판에서는 가공시 뒤따르는 제약으로 인하여 직선가열이 아닌 위빙가열이 필수라는 것을 입증하였고, 이에 위빙폭도 추가적인 가공변수로 처리하여 최적화 계산을 수행하였다. 이 과정에서 현장의 가공조건들을 모두 제약으로 두어 실제적인 값이 도출되도록 하였고, 직선가열에 사용되던 실험식들을 분산된 열속에 대해 합리적으로 수정하였다.

연구와 함께 수행된 가공시험에 대하여는 가공 조건을 정하지 않고 현장의 조건대로 조선소 현장에 가열 가공 의뢰를 부탁하여 최적해와 비교해 보았고 잘 부합하는 것을 확인하였다.

본 연구결과는 자체적인 결과만으로도 선상가열의 지침이 될 수 있으며, 더욱이 위빙가열의 자동화를 꾀하는 회전 열속 입열 장치나 선상가열용 유도가열기의 코일 제원 설계에 유용하게 사용될 것이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 고대은, 장창두, 서승일, 이해우, 1999, “ 곡 가공 자동화 시스템을 위한 선상가열에 의한 변형의 실시간 시뮬레이션, ” 대한조선학회 논문집, 제 36 권, 제 4 호, pp. 116-127.
- 김세환, 2003, 회전 아크를 이용한 고속 필렛 용접에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학

위논문

- 장창두, 고대은, 김병일, 박정웅, 2001(a), “열간가공에 의한 판의 변형특성에 관한 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 2 호, pp. 62-70 .
- 장창두, 고대은, 문성춘, 서용록, 2001(b), “삼각가열에 의한 판 변형의 시뮬레이션,” 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 4 호, pp. 66-74.
- 장창두, 서승일, 고대은, 1997, “간이 열탄소성 해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 34 권, 제 3 호, pp. 104-112.
- 장창두, 하윤석, 고대은, 문성춘, 2002, “선상가열 판변형 해석을 위한 고유변형도 영역의 결정법,” 대한조선학회 논문집, 제 39 권, 제 1 호, pp. 82-89.
- Amiram, M. and William, S. V., 1987, “The Mechanics of the Flame Bending Process: Theory and Applications,” Journal of Ship Research, Vol. 31, No. 4, pp. 269-281.
- Atkin, M., 1977, Atlas of continuous cooling

transformation diagrams for engineering steels, British Steel Corp, pp 1-23

- Jang, C. D., Ha, Y. S. and Ko, D. E., 2003, “An Improved Inherent Strain Analysis for the Prediction of Plate Deformations Induced by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel,” ISOPE-2003, Honolulu, Hawaii, USA,
- Jang, C. D., Kim H. K. and Ha Y. S., 2002, “Prediction of Plate Bending by High-Frequency Induction Heating,” Journal of Ship Production, Vol. 18, No. 4, pp. 234-244.



< 하 윤 석 >



< 장 창 두 >