연 구 논 문

산소-프로판 가스 곡가공 공정에서 강판의 변형예측을 위한 계산식 개발

배강열* · 양영수** · 현충민*** · 조시훈***

*진주산업대학교 메카트로닉스공학과
**전남대학교 기계공학과
***삼성중공업 생산기술연구소

Development of Simplified Formulas to Predict Deformations in Plate Bending Process with Oxy-Propane Gas Flame

Kang-Yul Bae*, Young-Soo Yang**, Chung-Min Hyun*** and Si-Hun Cho***

*Dept. of Mechatonics Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea
**Dept. of Mechanical Engineering, Jeonnam National University, Gwangju 500-757, Korea
***Samsung Heavy Industries Co., Ltd., Shihyeon-eup, Geoje 656-710, Koreaa

Abstract

Simplified mathematical formulas are presented to predict deformations during the plate forming process when the heating parameters are given. To obtain the formulas, firstly, the thermal analysis for steel plate is performed, and the thermo-mechanical analysis is followed with actual heating conditions. The analyses have been carried out by the commercial software MARC, which is programmed based on the FEM. Secondary, the results of the mechanical analysis are synthesized with their variables for a statistical approach, which results in simplified formulas. The results of the analysis are well compared with those of experimental measurements.

*Corresponding author : ysyang@chonnam.ac.kr

(Received February 2, 2007)

Key Words : Simplified formula, Prediction, Angular deformation, Lateral deformation, Line heating, FEM, Thermal analysis, Thermo-Mechanical analysis, Statistics

1. 서 론

선박의 선체 등을 이루고 있는 곡형 외판의 제작 공정은 강판을 원하는 형상으로 냉간 및 열가공하여 성형한다. 이때 열 가공 공정은 선상가열과 삼각가열로 나뉘며, 주로 산소-프로판가스 화염을 주로 이용하여 숙련된 작업자의 경험에 의존하여 판의 변형을 제어하는 방법을 사용하고 있다. 한편 최근에는 고기능, 고부가가치 선박 설계를 위하여 3차원 곡형 외판 형상이 더욱 복잡해 지고 있으며, 이의 생산과정에서 강판의 변형제어가 보다 정밀하게 요구되고 있다[1,2].

산소-프로판을 이용한 곡형제작 공정은 고도의 경험지식이 요구되는 작업으로써, 소음, 분진 등 작업환경도 열악하며, 숙련된 전문 인력의 노령화에 따른 인력확보 및 기술 전수의 어려움, 고비용 등의 문제가 제기되어, 이러한 복합적인 문제를 개선하기 위한 방안으로 공정 자동화가 절실히 요구되고 있다[2]. 선상가열 공정의 자동화를 위해서는 열원의 입열에 따른 열변형 정보를 쉽게 얻을 수 있는 가열정보 생성 시스템 이 필요하게 된다. 이를 위해서는 먼저, 평판의 단순 곡가공 등 초보적인 형태의 개발을 위한 단계의 예를 들어, 평판 형상 강판에 관한 열변형 데이터가 필요하고[3], 특히 강판의 두께와 열원 속도에 변화에 따른 열변형 데이터가 요구된다.

본 연구에서는 작업현장에서 사용 가능한 공정 조건

의 범위에서 강판 두께 및 열원 속도를 선정하여 열변형 해석을 수행하고, 강판의 두께와 가열속도를 입력하면 선상가열시의 열변형량을 예측할 수 있는 간이화된 수식을 유도하고자 하였다. 산소-프로판가스 선상가열 열유동 및 열변형 해석은 상용프로그램인 MARC를 이용하였다. 연강 판의 두께 및 열원속도를 변화시킨 49가지 가공조건에 대하여 열유동 및 열변형 해석을 수행하여, 강판 두께와 가열 속도를 변수로 열변형을 예측할 수 있는 간이화된 수식을 개발하고자 하였다.

2. 산소-프로판 가스열원 해석

2.1 온도분포 해석 및 실험

2.1.1 산소-프로판가스 열원분포 수식화

산소-프로판가스(LPG)는 다음의 반응식과 같이 1차 및 2차 발열반응에 의해 열이 생성된다[4].

$$C_3H_8+5O_2\rightarrow 3CO_2+4H_2O+104MJ/m^3 \quad (1)$$

$$C_3H_8+\frac{2}{3}O_2\rightarrow 3CO_2+4H_2+10MJ/m^3(\text{1차연소}) \quad (2)$$

$$3CO+4H_2+\frac{7}{2}O_2\rightarrow 3CO_2+4H_2O+94MJ/m_3(\text{2차연소}) \quad (3)$$

이론상 완전연소는 산소가 프로판가스에 비하여 5배 이상 공급되면 발생한다. 실제 현장에서는 프로판가스에 비하여 산소량은 5배 이하로 공급되며, 나머지는 대기 중의 산소를 이용하는 것으로 조사되었다. 특히 2차 연소의 상당부분이 대기 중의 산소를 이용하여 반응한다. 그러므로 발열량을 계산할 때는 완전연소로 가정하여 프로판가스 유량만을 고려한다. 유량을 열량으로 환산하면, 프로판가스 유량 A l/min일 때 완전연소에 의한 발열량 Q는 1519xA J/sec이 된다.

산소-프로판가스 열원은 1차 및 2차 연소가 일어나므로, 이중가우시안(Double Gaussian) 열원으로 모델링되고 있다[5]. Terasaki의 연구는 실험적 방법으로, 산소-프로판가스 열원 가열시 온도분포를 측정하여 다음과 같은 이중가우시안 열원모델을 실험적으로 구하였다.

$$q_1(r)=\frac{Q_1}{\pi a_1^2}\,e^{\left(\frac{-r^2}{a_1^2}\right)} \quad (4)$$

(Q_1=3110W, a_1=21.2mm)

$$q_2(r)=\frac{Q_2}{\pi a_2^2}\,e^{\left(\frac{-r^2}{a_2^2}\right)} \quad (5)$$

(Q_2=11750W, a_2=48mm)

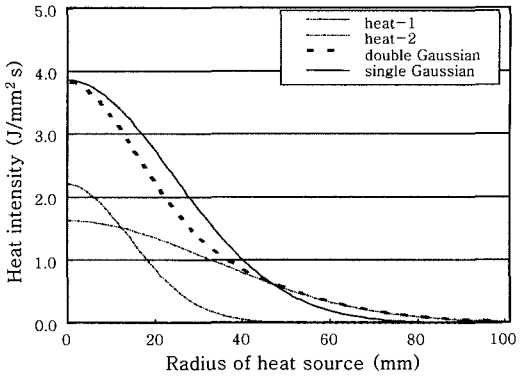

Fig. 1 Comparison of single and double Gaussian heat sources[5]

위의 열원분포를 계산하면 Fig. 1과 같이 나타나며, 여기서 q_1 과 q_2 열원을 합한 결과가 이중가우시안 열원이다. 그러나 열원 모델링에 관한 연구 결과를 검토하면, 산소-프로판가스 열원분포는 다소 복잡한 이중가우시안 모델보다 단순한 단순가우시안(Single Gaussian) 모델을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단되었다. 이중가우시안 분포형태를, 입열량을 동일하게 하고 열원반경을 35mm로 한 단순가우시안 열원분포와 비교하여 보면 큰 차이가 나타나지 않고 있다. 나아가 온도분포 계산결과는 단순가우시안 열원과 이중가우시안 열원과의 비교에서 차이가 더욱 적게 나타나게 된다. 본 연구에서는 산소-프로판가스 열원분포를 단순가우시안 열원으로 모델링하였다. 산소-프로판가스 열원을 이용하여 강판을 실제 가열하면서 강판의 온도변화를 측정하여 두고, 단순가우시안 열원분포의 열원반경과 효율을 변화시키면서 수치해석적으로 온도분포를 계산하여, 실험과 잘 일치되는 열원분포를 찾고 다음과 같은 수식으로 표현하였다.

$$q(r)=\frac{Q_2}{\pi r^2}e^{-3\left(\frac{r}{r}\right)^2} \quad (6)$$

2.1.2 산소-프로판가스 온도분포 해석 및 실험

산소-프로판가스 가열공정의 유한요소법을 이용한 3차원 열유동 해석은 상용소프트웨어 MARC를 이용하여 수행하였다. 해석에 사용한 재료의 열적 물성치는 온도에 따라 변화하는 값으로 입력하였으며, 강판은 열원을 중심으로 좌우대칭으로 가정하고, 대칭의 한 부분만을 해석영역으로 설정하여 Fig. 2와 같이 약 50,000개의 3차원 8절점 요소를 사용하여 요소분할을 하였다.

실험에 사용한 산소-프로판 화염과 가열 형태는 Fig. 3에 나타나 있으며, 온도분포는 다채널 온도측정 장치를 이용하여 강판의 이면에 열원 중심에서 일정거리에

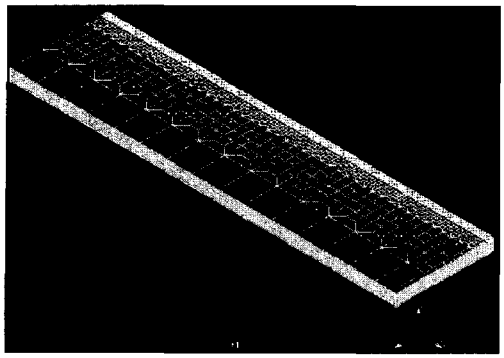

Fig. 2 Mesh generation for thermal and mechanical analysis (1000×250×t mm)

Fig. 3 Photograph of oxy-LPG flame in experiment system

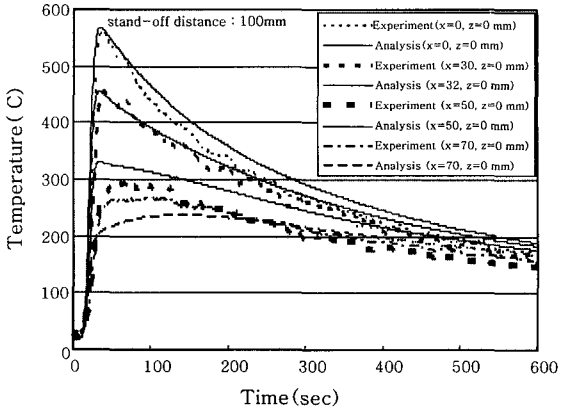

Fig. 4 Comparison of analysis and experimental results in temperature history

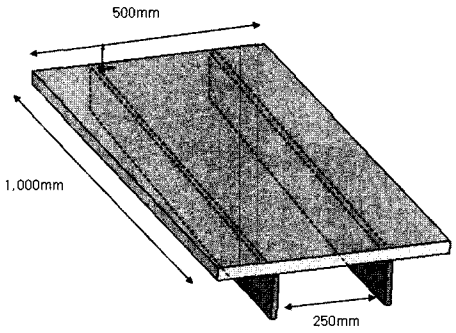

Fig. 5 Steel plate and boundary condition for FEM analysis

따라 열전대를 장착하여 시간에 따라 측정하였다. 먼저 열원반경을 도출하기 위한 과정으로, 산소와 프로판가스의 유량은 일정하게 고정하고, 토치와 강판사이의 거리 및 열원의 이동속도를 변화시키면서 온도측정을 하였다. 이때, 시편은 연강을 사용하였고 현장에서 사용중인 산소, 프로판유량 및 압력을 표준화하여 유량, 압력을 제어하였으며, 열원과 강판사이의 거리(stand-off)는 현장 작업자의 경험에 근거하여 100mm로 두었다.

열원의 반경과 효율을 변화시키는 등 여러 가지 입열조건에서의 온도분포 해석결과, 열원반경은 열원과 시편 간의 거리(stand-off)와 동일한 값을 사용하고 효율은 20%를 사용한 경우가 가장 실험결과와 유사하였다. Fig. 4는 실험과 이론값을 비교한 값으로 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그러므로 산소-프로판가스 가열 해석에서는 단순가우시안 열원모델을 사용하고 효율은 20%, 열원반경은 stand-off 거리와 같게 설정하였다.

2.2 열변형 해석 및 실험

열유동 해석 결과를 이용하여 열변형해석을 수행하였다. 시간에 따른 온도 해석결과를 구하였으므로, 이를 이용하면 시간에 따른 3차원 열탄소성 해석이 가능하고 열응력 및 열변형을 구할 수 있다. 상용소프트웨어 MARC를 이용하여 Fig. 5와 같은 강판에 대하여 지지부를 경계조건으로 하여 열변형 해석을 수행하였다.

요소분할은 열유동 해석의 경우와 동일하며 온도에 따라 변화하는 기계적 물성치를 고려하였다. 산소-프로판 열원을 이용하여 강판을 성형하는 곡가공 현장에서 숙련된 작업자들의 작업조건을 근거로 해석조건을 결정하였고, Table 1과 같은 조건으로 대표할 수 있었다. 시편의 두께와 열원의 속도를 변화시켜 49가지 경우에 대한 열변형 해석을 수행하였다.

Table 1 Analysis conditions for thermal deformation

specimen thickness (mm)	heat source velocity (mm/sec)	LPG flow rate (l/min)	stand-off distance (mm)
20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	3, 5, 7, 9, 11, 13, 15	90	100

3. 해석결과 및 고찰

3.1 열변형 결과

두께가 35mm일 때 속도변화에 따른 각변형 결과를, 선상가열에 의해 나타나는 일반적인 각변형 형태와 유사하게 Fig. 6에 나타내었다. 속도가 증가하면 각변형이 감소하고 있는 경향을 보이며, 9mm/s 이상의 속도에서는 각변형의 변화가 미미함을 알 수 있다. Fig. 7에는 속도를 9mm/s로 일정하게 하고 두께 변화에 따른 각변형을 나타내고 있다. 두께가 증가함에 따라 각변형량이 감소하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 설정한 가열조건 영역 내에서는 두께가 증가하면 구속력이 증가하여 각변형이 감소하고 있음을 보여주고 있으며, 최소두께 20mm에서도 깊이방향으로 충분한 온도구배를 갖고 있기 때문에 각변형량이 크게 나타났다. 그러나, 두께를 계속 감소시키면 깊이방향으로 온도구배가 감소하여 각변형량이 감소하게 될 것으로 예측할 수 있다. 실험에서 폭방향 수축량은 시편의 폭 500mm에 비하여 너무 미소하게 나타나 측정의 정밀도를 신뢰하기 어렵다고 판단되어, 해석결과만으로 수축 변형의 특성을 분석하였다.

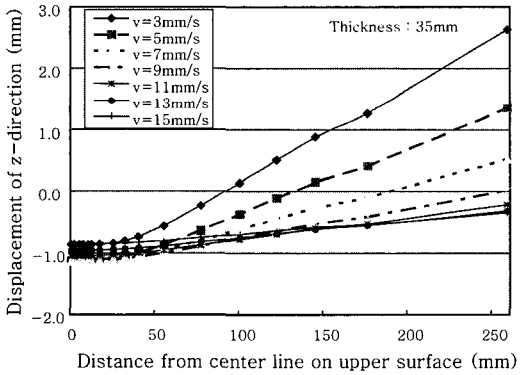

Fig. 6 Angular deformation predicted by FEM analysis with various velocities

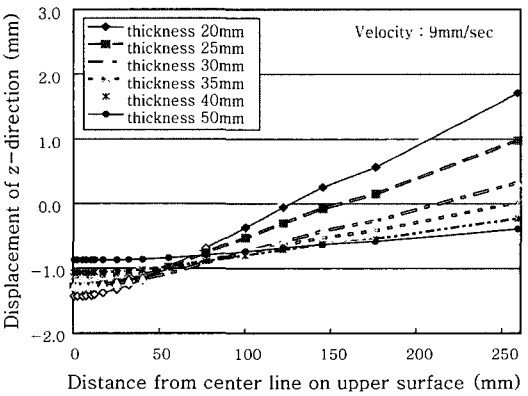

Fig. 7 Angular deformation predicted by FEM analysis with various thicknesses

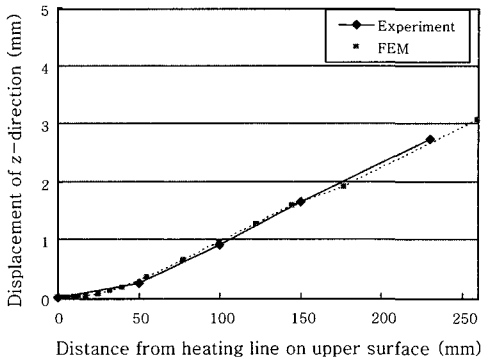

Fig. 8 Angular deformations obtained by FEM and experiment

변형해석결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 가열 속도가 5mm/sec이고 두께가 25mm인 강판의 실험과 유한요소해석 결과를 Fig. 8에 동시에 나타내었다. 해석결과는 실험결과에 비교하여 비교적 잘 일치하고 있다고 판단된다.

3.2 열변형의 통계처리 및 수식화

각변형에 대한 가열 속도와 강판 두께의 상관관계를 구하기 위하여 다음과 같은 과정을 수행하였다. 먼저 속도와 두께가 각변형에 어떠한 지수함수로 관계되는지를 구하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

$$\theta = a\, v^x\, t^y \tag{7}$$

a, x, y, 는 상수
v=velocity(mm/sec)
t=thickness(mm),
θ=angular distortion(mm)

위의 수식에 log를 취하면

$$\log(\theta) = \log(a) + x\log(v) + y\log(t) \tag{8}$$

여기서

$\Theta = \log(\theta)$, $A = \log(a)$, $V = \log(v)$, $T = \log(t)$

라 하면, 다음과 같은 1차 선형 수식이 유도된다.

$$\Theta = A + x\,V + y\,T \tag{9}$$

Θ, A, V, T 에 각각 유한요소해석과 실험의 결과값을 입력하고, 회기분석을 이용한 통계처리를 수행하면 x, y 값을 구할 수 있다. 통계처리 소프트웨어 SPSS을 이용하여 처리한 결과, x=-1.051, y=-1.761을 얻었다. 그러므로 각변형은 $v^{-1.051}$, $t^{-1.761}$의 함수임을 알 수 있다. $v^{-1.051}$ $t^{-1.761}$ 를 독립변수로 하고, 입열량 Q

를 고려하면, 각변형 θ는 종속변수로, 다음과 같은 다항식으로 표시할 수 있다.

$$\theta = a_1 + a_2(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}}) + a_3(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}})^2 + a_4(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}})^3 + \cdots\cdots \quad (10)$$

위의 식에서, 회기분석을 이용하여 계수 a_1, a_2, a_3, a_4, ... 을 구할 수 있다.

유한요소 해석 및 실험의 각변형 결과 데이터를 이용하여 a_1, a_2, a_3, a_4 등을 구할 수 있으나, 계산 결과, 3차항 이상인 a_4 값은 크기가 미미하고 거의 0(zero)에 가까워 의미가 없음을 알 수 있다. 그러므로 최종적으로 속도와 두께가 주어진 조건에서의 각변형 예측식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta = a_1 + a_2(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}}) + a_3(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}})^2 \quad (11)$$

회기분석을 이용하여 계수 a_1, a_2, a_3을 구하고 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\theta = -1.4848 + 1.2964(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}}) - 0.0237(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}})^2 \quad (12)$$

여기서

θ = *angular distortion* $(rad\ X\ 10^{-3})$
$Q = 27038\ J/s$
v = *velocity* $(mm/\sec)$ v = *velocity* $(mm/\sec)$
t = *thickness* (mm)

해석결과 데이터와 통계처리에 의해 구한 수식의 관계를 Fig. 9에 나타내었다.

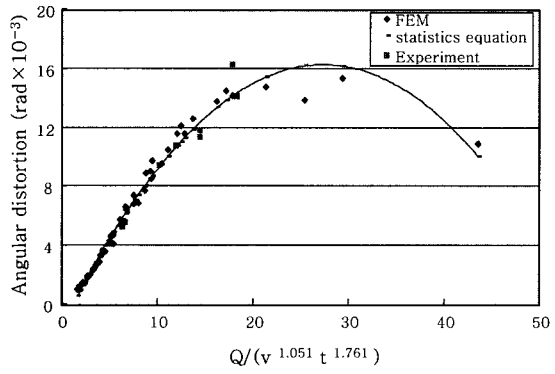

Fig. 9 Comparison of angular deformations obtained by statistics equation and analysis

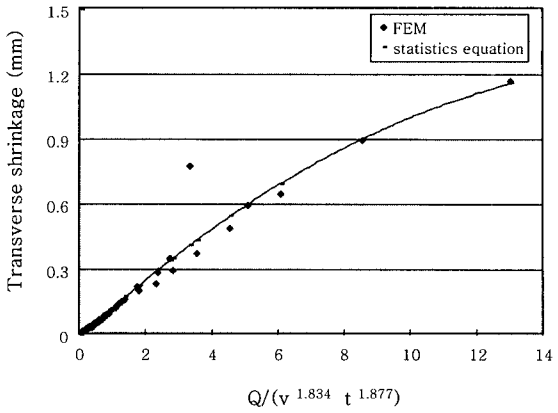

Fig. 10 Comparison of transverse shrinkages obtained by statistics equation and analysis

각변형의 통계처리 방법과 동일한 과정으로 횡수축의 유한요소 해석결과를 통계 처리하였다. 횡수축량 δ는 속도와 두께에 관하여 $v^{-1.834}$, $t^{-1.877}$의 함수임을 알 수 있고 2차 수식으로 표현하면 식(13)과 같이 나타낼 수 있다. 통계처리에 의해 구한 수식과 해석결과 데이터를 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

$$\delta = -0.0129 + 0.1393(\frac{Q}{v^{1.834}\,t^{1.877}}) - 0.0038(\frac{Q}{v^{1.834}\,t^{1.877}})^2 \quad (13)$$

여기서

δ = *transverse srinkage* (mm)
$Q = 27038\ J/s$
v = *velocity* $(mm/\sec)$
t = *thickness* (mm)

4. 결 론

선상가열 공정에서 강판의 변형을 용이하게 예측하기 위한 간이화된 수식을 도출하기 위하여, 산소-프로판 가스열원에 의해 가열되는 강판의 열유동 및 열변형 해석을 수행하였다. 실제 열 가공 공정의 범위에서 선정된 49가지 경우의 가공조건에 대한 해석과 실험결과 데이터를 먼저 확보하고, 통계처리와 회기분석법을 이용하여, 연강판의 두께와 열원 속도에 따른 각변형 및 횡수축의 관계식을 다음과 같이 구하였다.

$$\theta = -1.4848 + 1.2964(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}}) - 0.0237(\frac{Q}{v^{1.051}\,t^{1.761}})^2$$

$$\delta = -0.0129 + 0.1393\left(\frac{Q}{v^{1.834}\,t^{1.877}}\right) - 0.0038\left(\frac{Q}{v^{1.834}\,t^{1.877}}\right)^2 \mathrm{S}$$

여기서

$\theta = angular\,distortion\,(rad\,X\,10^{-3})$

$\delta = transverse\,srinkage\,(mm)$

$Q = 27038\,J/s$

$v = velocity\,(mm/\mathrm{sec})$

$t = thickness\,(mm)$

후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G. Yu, R. J. Anderson, T. Maekawa and N. M. Patrikalakis, "Efficient simulation of shell forming by line heating, Int. Jour. of Mech. Sci., **43-10**(2001), 2349-2370
2. S. J. Hemmati and J. G. Shin, "Estimation of flame parameters for flame bending process, Int. Jour. of Mach. Tools and Manufacture, Article in Press.
3. K. J. S, Y. S. Y and S. G. C : Estimations of Plate Deformation in Thermal Processing using the Eigenstrain Concept. Journal of KWS. **21-1**(2003), 54-59 (in Korean)
4. Welding handbook, Vol.2, 8th ed., American Welding Society, 1991
5. Toshio Terasaki, Nobuo Kitamura and Masayuki Nakai : Predictive Eqation for Thermal Cycle Generated by Line Heating Method, 日本西部造船會, **99**, 321-329