

유한요소해석과 다변수해석에 의한 선상가열 변형관계식

이장현*, 신종계**

Relations between Input Parameters and Residual Deformation in Line Heating process using Finite Element Analysis and Multi-Variate Analysis

Jang Hyun Lee* and Jong Gye Shin**

요 약

선박의 곡외판은 냉간가공과 열간가공(선상가열) 과정을 거쳐 제작된다. 선상가열의 자동화 및 기계화에 대한 연구가 다양하게 수행되어 오고 있다. 특히 가열조건과 잔류 변형 사이의 관계 규명은 자동화 및 기계화를 위한 주요 요소로 생각된다. 본 연구는 그러한 관계를 규명하기 위하여 일련의 체계적인 과정을 제시하고 관계식을 제안하였다. 선상가열에 의한 변형은 3차원 열탄소성 변형현상으로 정식화될 수 있으며, 열탄소성 변형현상을 유한요소해석을 이용하여 다양한 가열조건에 대한 수치해석을 수행하였다. 유한요소법의 유용성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였고 그 유용성을 확인하였다.

변형관계식에 사용된 입력변수는 차원해석을 통하여 선정하였다. 유한요소법을 이용하여 얻어진 결과를 활용하여 선상가열에 의한 변형관계식을 추정하기 위하여 다변수해석과 다차원 보간 과정을 예시하였다. 일련의 과정을 통하여 본 연구는 선상가열의 가열조건과 잔류 변형 사이의 관계식을 선정하기 위한 방법을 제안하였다.

※Keywords: Line Heating(선상가열), Finite Element Analysis(유한요소해석), Multi-Variate Analysis(다변수해석), Residual Deformation(잔류변형)

Abstract

Sequential process of roll-bending and line heating has been used to deform the curved hull-plates in shipyards. A growing interest for the mechanization or automation of the line heating process has been noted. Relations between heating conditions and residual deformations are important components needed for the mechanization.

The residual deformations are investigated by using a thermal elastic-plastic analysis based on the finite element analysis(FEA). Several experiments are also performed to examine the validity of the results of FEA.

접수일자: 2001년 2월 20일, 승인일자: 2002년 1월 2일

* 정회원 서울대학교 디지털선박신기술 센터, 공학연구소 연구원 (jhlsk@gong.snu.ac.kr)

** 정회원 서울대학교 조선해양공학과 부교수, 해양시스템공학연구소(jgshin@snu.ac.kr)

The input parameters of line heating are suggested by dimensional analysis of line heating. The dimensional analysis can extract the primary input-parameters of line heating. The relations between the heating conditions and the residual deformations are set up by multi-variate analysis and multiple-regression method. This study suggests a method for the relations between the heating conditions and the deformations lying under the line heating.

1. 서언

선체 곡외판(曲外板)의 성형작업은 선상가열법과 냉간가공을 이용하여 이루어져왔다. 특히 선상가열법의 자동화/기계화를 이루기 위하여 많은 연구와 노력이 이루어져 왔다. 그 자동화/기계화를 위한 구성 요소로서는 가열정보 시스템과 정보 구현을 위한 자동화 기기를 들 수 있다. 가열 정보 시스템은 가열선의 위치 정보와 가열 조건, 가열 순서 추론부 등으로 구성되고 가열 자동화 기기는 변형 정보 계측 기기, 가열 기기, 기기 제어부 등으로 구성될 수 있다.

신중계(1992)는 선상가열의 시뮬레이터에 관한 기본적인 방법론을 제안하였다. Shin et al.(1998)은 선체 곡외판 제작을 위한 전산화 방안을 제시하였으며 김원돈(1998)은 선상가열의 자동화를 위한 정보 시스템의 객체 지향 모델을 구성하였다.

김병일/장창두 (1997), Shin et al.(1996), 장창두 등(1997), 고대은 등(1999), 그리고 장창두 등(2001)은 선상가열의 변형량 계산을 위한 연구와 변형량 특성 파악을 위한 연구를 수행하였다. 또한 강중규 등(2000)은 고주파 열원을 이용한 선상가열 변형 해석에 관한 절차를 예제로 보였다.

류철호 등(1997)은 가열선의 위치계산을 위한 기하해석 과정을 정립하였으며, Ueda et al.(1993)과 Jang et al.(1997)은 고유변형도법에 기초하여 각각 가열조건과 변형량 사이의 관계 규명을 시도하였으며 Shin et al.(1998)은 선체외판의 곡면가공을 위한 체계적인 정보 및 해석 시스템의 구성요소를 제시하였다.

박성건 등(1997)은 인공지능 기법을 이용하여 가열조건과 변형량 사이의 관계를 규명하고자 노력하였다. 그러나 이러한 연구 중에 곡면가공 변

형 해석의 결과를 가열선의 위치 정보와 결합하기 위한 가열조건과 잔류 변형량의 관계 설정에 관한 것은 많지 않았다. 이는 변형량 예측을 위한 계산 과정이 매우 어려운 기술이었으며 또한 많은 계산 시간을 요구하는데 그 원인을 찾을 수 있다.

본 연구에서는 유한요소법과 다변수해석을 이용하여 가열조건 추론부의 근거가 되는 가열 조건과 잔류 변형 관계식 규명을 위한 과정을 제시하고자 한다. 이를 위하여 유한요소해석을 이용하여 변형량을 계산하는 과정을 보이고, 다변수해석 및 차원 해석을 통하여 변형 관계식 정립 과정을 제안하였다.

2. 차원해석에 의한 선상가열의 변수 선정

선상 가열을 거친 판의 잔류 변형량에 영향을 미치는 인자는 가열 속도, 판의 두께, 판의 재료 특성값, 열원의 입열량 등이 있다. 차원 해석은 이러한 많은 인자들이 관여하고 있는 물리적 현상의 주요 변수 추적을 위한 하나의 방법으로 유용하다(Szirtes 1998). 차원 해석은 무차원 변수를 이용한 체계적인 실험뿐만 아니라 물리적 현상의 특성 파악을 위한 초기 연구단계에서 사용할 수 있는 방법의 하나이다. 실험을 통하여 얻은 결과를 무차원 변수를 이용한 설계식(design curve)를 얻을 수 있으며, 주어진 현상의 물리적 특성을 수학적 인 형태로 표현할 수 있는 근거를 제공한다(Ranghunath 1967, Bridgman 1920, and White 1986).

차원해석법은 Rayleigh가 제안한 차원법(Method of dimensions)과 파이 이론(Buckingham pi-theorem)이론으로 대별된다. 두

방법은 정식화 과정은 차이가 있으나 대부분의 경우에 동일한 결과를 준다. 본 장에서는 차원법을 이용하여 선상가열의 잔류 변형에 미치는 주요 인자를 탐색하고자 한다.

선상가열과 관련된 기본 물리 값은 세 개의 기본 변수로 표현된다. 예를 들면 질량 $[M]$, 길이 $[L]$, 그리고 시간 $[T]$, 또는 힘 $[F]$, 길이 $[L]$, 그리고 시간 $[T]$ 로 표현된다. 열전달 현상이 포함되면 $[\theta]$ 가 온도를 표현한다.

선상 가열의 열원이 판과의 거리가 일정하게 유지되면서 가열하고 가열 토오치의 직경이 일정하며, 판의 초기 곡률이 영이라고 가정하면 선상 가열과 관련된 변수들은 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [T] &= [\theta] \\
 [Q] &= [FLT^{-1}] \\
 [k] &= [FT^{-1}\theta^{-1}] \\
 [C] &= [FL^2\theta^{-1}] \\
 [v] &= [LT^{-1}] \\
 [\delta] &= [L] \\
 [Q_0] &= [F] = [MLT^{-2}] \\
 [q_{max}] &= [FL^{-1}T^{-1}] = [MT^{-3}] \\
 [B] &= [L] \\
 [E] &= [FL^{-2}] = [ML^{-1}T^{-1}] \\
 [h] &= [L] \\
 [l] &= [L]
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 T 는 온도, Q 는 유효입열량(heat input rate 또는 effective power), k 는 열전도율, $C (= \rho C_p)$ 는 단위 체적당 열용량 (heat capacity per unit volume), v 는 열원의 이동 속도, δ 는 잔류 처짐량, $Q_0 (= Q/v)$ 는 단위 길이당 입열, $q_{max} (= Q/\pi)$ 는 표면의 최대 입열량, B 는 판의 폭, E 는 탄성계수, h 는 판의 두께, 그리고 l 은 판의 길이를 뜻한다. ρ , C_p , 그리고 γ 는 각각 밀도, 비열, 그리고 열원의 집중 계수를 뜻한다.

2.1 온도 분포의 차원해석

온도 분포는 다음과 같은 변수들의 지수로 표현된다고 가정할 수 있다 (Ueda et al. 1993).

$$T = f(k^a C^b h^c Q^d v^e T_{max}^f) \tag{2}$$

여기서 f 는 결정되지 않은 미지 함수이며, T_{max} 는 표면의 최고 온도이다.

식(2)는 Rayleigh의 방법(Bridgman 1931)에 의하면 다음과 같은 지수의 형태로 정리된다.

$$[T] = [k^a C^b h^c Q^d v^e T_{max}^f] \tag{3}$$

지수의 차원 상사성(dimensional homogeneity)을 만족하도록 정리하면 다음과 같다.

$$[\theta] = [(FT^{-1}\theta^{-1})^a (FL^{-2}\theta^{-1})^b (L)^c (FLT^{-1})^d (LT^{-1})^e (\theta)^f] \tag{4}$$

각 지수의 합이 영이 되도록 하는 지수의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \theta: & -a - b + f = 1 \\
 F: & a + b + d = 0 \\
 T: & -a - d - e = 0 \\
 L: & -2b + c + d + e = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

위의 방정식은 6 개의 미지수와 4 개의 방정식으로 이루어져 있다. 임의의 두 변수를 선택하여 무차원 변수식을 표현하면 다음과 같이 4 가지의 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T &= T_{max} f\left(\left(\frac{Q}{khT_{max}}\right)^d, \left(\frac{Cv}{k}\right)^e\right) \\
 &= T_{max} f\left(\left(\frac{Cv}{k}\right)^c, \left(\frac{Qv}{k^2 T_{max}}\right)^d\right) \\
 &= \frac{Q}{Cvh^2} f\left(\left(\frac{k}{Cv}\right)^a, \left(\frac{vT_{max}}{Q}\right)^f\right) \\
 &= T_{max} f\left(\left(\frac{khT_{max}}{Q}\right)^c, \left(\frac{CQv}{T_{max}}\right)^e\right) \\
 &= T_{max} f\left(\left(\frac{khT_{max}}{Q}\right)^a, \left(\frac{Cv^2 T_{max}}{Q}\right)^b\right)
 \end{aligned} \tag{6}$$

선상가열의 물리적 현상의 특징을 고려한다면 온도는 입열량에 비례하고 가열 속도와 두께에 반비례하므로 식(6)은 다음과 같이 변형시킬 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{T}{T_{max}} &= f\left(\frac{Q}{khT_{max}}, \frac{k}{Cv}\right) \\
 \frac{T}{T_{max}} &= f\left(\frac{k}{Cv}, \frac{Qv}{k^2 T_{max}/C}\right) \\
 \frac{T}{Q/cvh^2} &= f\left(\frac{k}{Cv}, \frac{Q}{vT_{max}}\right)
 \end{aligned}$$

$$\frac{T}{T_{\max}} = f\left(\frac{Q}{khT_{\max}}, \frac{QCv}{T_{\max}}\right)$$

$$\frac{T}{T_{\max}} = f\left(\frac{Q}{khT_{\max}}, \frac{Q}{Cvh^2T_{\max}}\right) \quad (7)$$

판 표면의 최고 온도 T_{\max} 도 다음과 같은 변수의 지수식으로 표현할 수 있다.

$$T_{\max} = f(k^a C^b h^c q_{\max}^d v^e) \quad (8)$$

Rayleigh 방법을 적용하면 다음과 같은 지수식으로 표현될 수 있다.

$$[T_{\max}] = [k^a C^b h^c q_{\max}^d v^e] \quad (9)$$

지수의 상사법칙에 의하여 다음과 같은 지수식이 얻어진다.

$$[\theta] = [(FT^{-1}\theta^{-1})^b (FL^{-2}\theta^{-1})^b (L)^c (FL^{-1}T^{-1})^d (LT^{-1})^e] \quad (10)$$

각 변수에 대한 지수를 정리하면,

$$\begin{aligned} \theta: & -a-b=1 \\ F: & a+b+d=0 \\ T: & -a-d-e=0 \\ L: & -2b+c-d+e=0 \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)을 하나의 미지수에 대하여 정리하면 아래와 같은 식들이 얻어진다.

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{hq_{\max}}{k} f\left(\frac{Cvh}{k}\right) = \frac{hq_{\max}}{k} f\left(\frac{Cvh}{k}\right) \\ &= \frac{q_{\max}}{Cv} f\left(\frac{Cvh}{k}\right) = \frac{q_{\max}}{Cv} f\left(\frac{Cvh}{k}\right) \\ &= \frac{q_{\max}}{kv} f\left(\frac{q_{\max}}{kv}\right) = \frac{q_{\max}}{kv} f\left(\frac{Cvh}{k}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 잔류변형(처짐과 각변형)의 차원해석

2.2.1 각변형량의 차원 해석

가열된 판의 잔류 처짐변형량은 다음과 같은 변수의 식으로 표현될 수 있다.

$$\delta = f(Q, v, h, B, I, E, \sigma_y, \alpha, \nu, T, T_{\max}) \quad (13)$$

여기서, $\delta, l, \sigma_y, \alpha$, 그리고 ν 는 각각 잔류 처짐 변형, 판의 가열 방향 길이, 소성 응력, 열팽창 계수, 그리고 Poisson 비를 뜻한다. 식(13)에서 Q 는 단순히 단위 시간당 입열량 [cal/sec]을 뜻하므로 단위 길이당 입열량으로 바꾸는 것이 타당하

다. 따라서 단위 길이당 입열량 $Q_0(=Q/v)$ 변수를 도입하였다. 또한 처짐량은 굽힘변형에 의하여 발생하므로 굽힘강성 $D=Ek^3/12(1-\nu^2)$ 을 이용하는 것이 타당하다. 따라서 식(13)은 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\delta = f(Q_0, B, l, D, \sigma_y, \alpha, T, T_{\max}) \quad (14)$$

가열을 거친 판에는 소성변형이 발생하며, 재료 특성값이 온도에 따라 변화한다. 따라서 잔류변형량과 재료 특성값 사이에는 유일한 관계식이 성립하지 못한다. 단위 길이당 입열량이 단위 길이 l 에 작용할 경우를 고려하면 $Q_0 l$ 을 도입할 수 있다. 따라서 소성응력, 열팽창 계수, 온도, 최고 온도를 무시하면 위 식은 아래와 같이 간략화된다.

$$\delta = f(Q_0 l, D, B) \quad (15)$$

위에서 굽힘 강성 D 는 변형량의 물리적 의미를 유지하기 위한 최소한의 변수로서 선택하였다. 지수형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$[\delta] = [(Q_0 l)^a D^b B^c] \quad (16)$$

지수의 동일성 법칙을 적용하면 아래와 같이 표현된다.

$$[L] = [(FL)^a (FL)^b (L)^c] \quad (17)$$

식(17)으로부터 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} F: & a+b=0 \\ L: & a+b+c=1 \end{aligned} \quad (18)$$

식(18)은 3개의 미지수와 2개의 방정식으로 이루어져 있으므로, Langhaar(1951, p.91)가 제안한 것과 같이 물리적인 특성을 감안하여 값을 결정하는 것이 좋다. 식(15)는 굽힘 하중을 받는 판의 변형을 표현하는 식과 매우 유사하다. $Q_0 l$ 은 하중, D 는 굽힘강성의 물리적 의미를 갖는다. 따라서 다음과 같은 해를 구하는 것이 합리적이다.

$$a=1, b=-1, c=1 \quad (19)$$

식 (19)의 결과를 식(16)에 대입하면 처짐량에 대한 무차원 식을 얻는다.

$$\delta = f\left(\frac{Q_0 B l}{D}\right) = f\left(\frac{Q B l}{E v h^3 / 12 (1 - \nu^2)}\right) \quad (20)$$

l 은 단위 길이이므로 생략할 수 있으며, 각 변형량은 식(20)을 아래의 형태로 변환하여 얻을 수 있다.

$$\delta/B = f\left(\frac{Q}{E v h^3 / 12 (1 - \nu^2)}\right) \quad (21)$$

식(21)에서 재료는 온도 의존성을 가지므로 각 변형량은 Q/vh^3 의 함수로 표현할 수 있다. 각 변형량의 변수는 Satoh 등 (1979)이 용접 변형 실험의 각 변형량의 변수로 사용하였던 Q/vh^2 과 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있다.

2.2.2 수축량의 차원 해석

단위 폭, 단위 길이를 가지고 임의의 두께를 가진 판의 수축변형을 고려하면 다음과 같은 변수의 함수로 표현할 수 있다.

$$\delta_c = f(Q, v, h, E, \sigma_y, \alpha, \nu, T, T_{max}) \quad (22)$$

식(14)에서 사용하였던 가정을 사용하여 Q_0 변수를 도입한다. 식(22)는 인장력이 작용하는 판의 수축/인장 변형현상과 유사함을 가짐을 보여준다. 따라서 면내 강성 $D_c = Eh / (1 - \nu^2)$ 을 도입한다. 식(22)을 면내 강성을 도입하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\delta_c = f(Q_0, B, D_c, \sigma_y, \alpha, T, T_{max}) \quad (23)$$

그러나 식(15)를 유도하는 과정에서 보였듯이 재료 특성값의 온도 의존성 때문에 식(23)은 하중과 면내 강성의 함수만으로 표현된다. 다만, 면내 강성은 면내 변형의 물리적 의미를 유지하기 위한 최소의 변수이므로 생략하지 않았다.

$$\delta_c = f(Q_0, D_c) \quad (24)$$

윗 식(24)의 지수 동일성을 적용하면 다음과 같은 무차원 식을 얻을 수 있다.

$$\delta_c = f\left(\frac{Q_0}{D_c}\right) = f\left(\frac{Q}{E v h (1 - \nu^2)}\right) \quad (25)$$

식(25)에서 재료 특성값을 무시하면 단위 두께

당 수축량 δ_c/h 은 Q/vh^2 의 함수이다. 이는 Satoh 등 (1979)이 용접 수축 변형량의 실험식 정리에 사용하였던 수축변형의 변수 Q/vh^2 와 일치한다.

2.3 변형 관계식

선상가열을 거친 판은 가열선 방향 (≡길이 방향) 및 가열선에 수직인 방향 (≡폭 방향)으로 각각 각변형과 수축변형이 발생한다. 따라서 다음과 같은 4개의 잔류 변형 변수 (길이방향 및 폭방향의 각변형 및 수축변형량)를 가정하였다.

$$\theta_x, \theta_y, \delta_x, \delta_y \quad (26)$$

지금까지 살펴본 바와 같이 온도, 최고 온도, 각변형, 수축변형은 각각 무차원 변수의 함수식으로 표현됨을 식(8), 식(12), 식(21), 그리고 식(25)에 보였다. 그러나 무차원 변수를 구하는 과정에서 재료의 온도 의존성을 무시하였으며, 잔류 변형량(각변형 및 굽힘 변형)들은 서로 연성되어 있다고 가정할 수 있음을 고려하여 다음과 같은 잔류 변형의 변수를 가정할 수 있다.

$$\frac{Q}{k h T_{max}}, \frac{k}{C v h}, \frac{Q v}{T_{max} k^2 / C}, \frac{Q}{v T_{max}}, \frac{Q C v}{T_{max}}, \frac{Q}{C v h^2 T_{max}}, \frac{Q (1 - \nu^2)}{E v h^3 / 12}, \frac{Q (1 - \nu^2)}{E v h / 12} \quad (27)$$

따라서 위의 변수들을 독립변수로 하는 잔류 변형 관계식을 아래와 같이 가정할 수 있다.

$$A_i = f_i\left(\frac{Q}{k h T_{max}}, \frac{k}{C v h}, \frac{Q v}{T_{max} k^2 / C}, \frac{Q}{v T_{max}}, \frac{Q C v}{T_{max}}, \frac{Q}{C v h^2 T_{max}}, \frac{Q (1 - \nu^2)}{E v h^3 / 12}, \frac{Q (1 - \nu^2)}{E v h / 12}\right) \quad (28)$$

여기서 A_i ($i=1,2,3,4$)는 잔류변형으로 각각 $\theta_x, \theta_y, \delta_x, \delta_y$ 으로 정의한다.

3. 유한요소 해석 및 실험

3.1 열전달 해석 및 열응력 해석 과정

열확산 지배 방정식과 경계조건은 variational method를 사용하여 얻을 수 있다. 절점에서 온도

벡터를 T 라고 하면 다음과 같은 유한요소 정식화를 얻을 수 있다(Bathe 1982).

$$CT + (K^b + K^c)T = Q^f + Q^c + Q^s \quad (29)$$

이때, C 는 비열(specific heat)로부터 얻어지는 행렬이고, K^b, K^c 는 각각 열전도 계수 행렬과 대류 계수 행렬과 형상 함수로 이루어진 강성행렬이다. Q^f, Q^c, Q^s 는 각각 열 유속과 대류 경계 조건, 에너지 발생에 의한 하중 행렬이다.

선상가열의 열원에 대한 Moshaiov & Latorre (1985)가 제안한 정규 열유속 (Gaussian heat flux) 함수를 사용하였다.

$$q''(r) = q_{\max} e^{-r^2} \quad (30)$$

주변 공기에 의한 대류 효과는 Brown & Song (1992)이 제안한 온도 의존성을 가지는 대류계수 (h)를 사용하였으며, 열유속이 작용하지 않는 부위에서 공기에 의한 대류 효과가 발생한다고 가정하여 다음과 같은 대류 계수에 의한 경계조건으로 모델링하였다.

$$h(T) = 0.466336 \times T^{0.21607} \quad (31)$$

열전달과 관련된 재료 특성값(이동욱, 1995)은 온도의존성을 고려하였으며, 시간 증분법은 음적(implicit)적분법을 사용하였으며, 재료 특성값의 비선형성으로 인한 비선형 방정식은 Newton Raphson 방법을 사용하였다. 열전달 해석을 위한 유한 요소는 8 절점 solid element를 사용하였다.

열변형 해석을 위한 유한 요소 정식화는 아래와 같은 형태로 표현된다(Bathe 1982).

$$KU = F^{th} + F^{pr} + F^{nd} \quad (32)$$

여기서, K 는 강성 행렬, U 는 절점 변위, F^{th}, F^{pr}, F^{nd} 는 각각 열 변형에 의한 하중, 표면력과 절점력에 의한 하중 벡터이다.

정식화에서 변형율은 대변형 효과를 고려하기 위하여 Henky strain을 사용하였으며, 재료의 소성 조건은 Bilinear isotropic hardening 조건을 사용하였다. 또한 비선형 행렬식의 수치해석법은 Newton Raphson 방법을 사용하였다.

가열 열원의 연속적인 이동 효과는 길이 방향의 한 요소별로 열원이 작용하는 시간을 시간증분으로 사용하여 이산화시켰으며 각 시각 별로는 이전(以前) 시각에서의 조건을 초기조건으로 사용하여 과도효과를 모델링하였다. 열응력과 관련된 재료 특성값은 이동욱(1995)이 제시한 온도 의존성 특성을 고려하였다. 해석 시간을 줄이기 위하여 대칭된 반쪽만을 모델링하였으며, 사용한 요소는 8 절점 solid element이다. 해석을 위한 코드로서는 ANSYS5.3을 사용하였다.

3.2 유한요소 해석 결과

유한 요소 해석은 길이와 폭이 $200 \times 600 \text{ mm}$ 인 판의 두께를 달리하며 수행하였다. 아래의 그림은 두께 18 mm 인 평판에 유효 입열량 3.36 KW 인 열원이 속도 1.2 mm/sec 로 작용할 때 길이 방향의 중간 점에서 시각에 따른 온도 변화의 예(Fig. 1)와 잔류 처짐량 변화의 예(Fig. 2)를 보이고 있다.

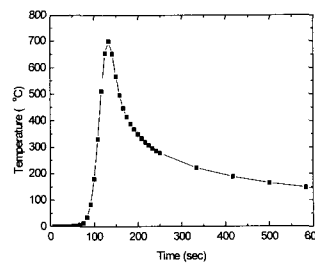


Fig. 1 History of temperature at mid point of plate

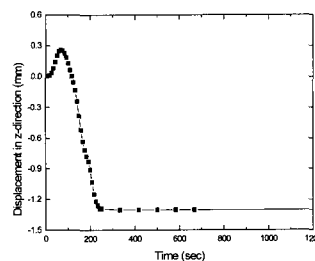


Fig. 2 History of deflection at the mid point of plate

3.3 선상 가열 실험

수치 해의 타당성 및 그 활용성을 검증하기 위하여 평판의 선상가열에 의한 변형 실험을 수행하였다¹⁾. 본 연구에서는 선상가열에 의한 잔류변형량을 추정하는 것이 목적이므로 잔류 변형률의 계측은 이루어지지 않았으며, 길이 방향과 폭 방향의 처짐량만을 계측하였다. 계측은 Probe type의 접촉식 변위 계측계를 사용하여 이루어졌다.

실험에 사용된 조건은 아래의 표(Table 1)와 같다.

Table 1 Condition of experiments

열원	Oxygen-Propane gas
토오치의 산소 압력	3.0Kgf/cm ²
산소 용기의 압력	9.0Kgf/cm ²
토오치의 프로판 가스 압력	0.9Kgf/cm ²
프로판 가스의 압력	0.4Kgf/cm ²
토오치와 판의 거리	30mm
냉각법	자연 대류

3.4 실험 및 수치해석 결과의 비교

Fig. 3은 유한요소 해석과 실험을 통하여 얻은 판의 폭 방향 각변형(angular distortion)을 보이고 있다. 유한요소법과 실험의 결과의 전체적인 성향은 일치하고 있다고 판단된다. Fig. 4는 GMAW 실험을 거친 판의 폭 방향 각변형을 보인 것이다. Fig. 3 과 Fig. 4의 결과를 비교한 결과 그 경향과 변형량의 크기가 매우 유사함을 알 수 있었다. 엄밀한 열량산정을 통하여 선상 가열 실험을 수행한 기존의 연구 결과가 없으므로 본 연구에서는 선상 가열과 비슷한 현상인 용접 현상의 실험 자료를 인용하여 비교하였으며 본 연구의 유한요소해석과 용접 실험결과와의 유사성으로부터 결과의 타당성을 확인할 수 있다. Fig. 5는 유한요소법을 통하여 얻은 횡수축량의 값을 보인 것이다. Fig. 6은 GMAW에 의한 판의 폭방향 수축량에 대한 실험 결과를 보이고 있다. Fig.5 와 Fig. 6의 결과를 비

교하면 두 결과가 모두 비슷한 경향 및 잔류 변형값의 범위를 보이고 있으며 이를 통해 본 수치 해석 모델의 타당성을 검증하였다.

Fig. 7은 수치해석과 실험을 통하여 얻은 길이 방향의 각변화량을 동시에 비교한 것이다. 폭 방향의 각 변화량은 수치 해와 실험의 결과가 크게 벗어나지 않고 있으나, 길이 방향의 각변화량은 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 길이 방향의 각변화량의 값이 폭 방향의 그것과 비교하여 값이 작기 때문에 심각한 수준의 오차 범위는 아니라고 판단된다.

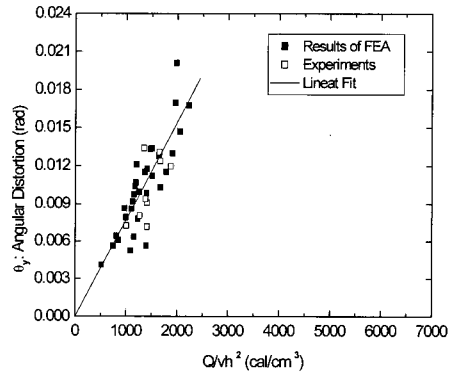


Fig. 3 Angular distortion of line heating (present study)

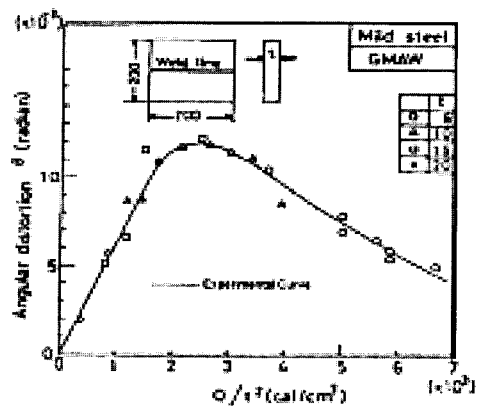


Fig. 4 Angular distortion of GMAW (Sato et al. 1979)

1) 실험은 서울대학교 조선해양공학과에서 개발한 선상가열 장치를 사용하여 수행하였다.

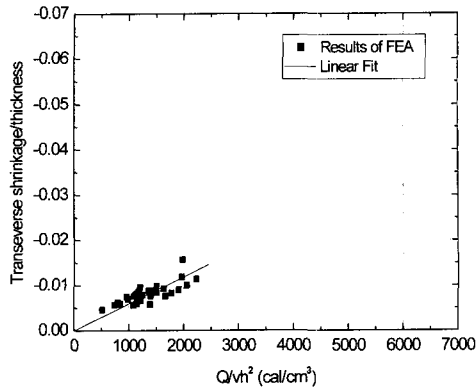


Fig. 5 Transverse shrinkage of line heating (present study)

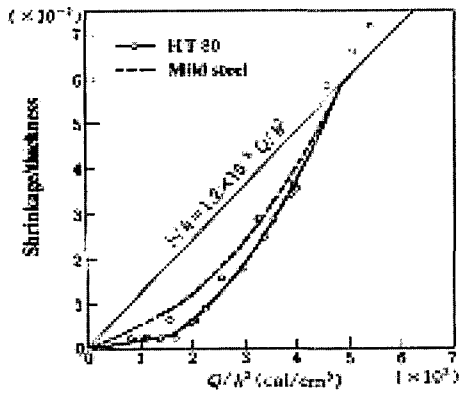


Fig. 6 Transverse shrinkage of GMAW (Sato et al. 1979)

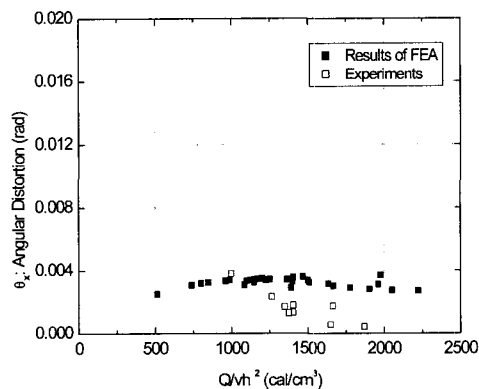


Fig. 7 Comparison of longitudinal angular-distortion

4. 다변수해석(MVA)에 의한 선상 가열 변형 관계식

지금까지 선상가열의 변형 관계식을 위한 무차원 변수 탐색 과정, 수치해석 과정, 실험 결과와 수치해의 비교에 대하여 기술하였다. 무차원 변수와 수치해석의 결과를 이용한 변형 관계식을 구성하기 위한 방법으로 다변수 해석 방법을 이용하였다. 다변수 해석 중에서 입력 변수(무차원 변수)와 출력 변수(잔류 변형) 사이의 연관성 계산을 위하여 상호 연관계수 값을 구하고 연관성이 큰 변수와 출력변수 사이의 관계식을 다차원 보간법을 이용하여 제안하고자 한다.

4.1 다변수 해석

다변수 해석은 여러 개의 입력 변수와 출력 변수 사이의 관계를 추정하는 방법으로 유용한 특징을 가지고 있다(Dillon & Goldstein 1984). 또한 다변수 해석은 입력변수들과 출력변수들 사이의 정량적인 관계 파악을 위한 도구로서 사용될 수 있다. 다변수 해석을 위한 자료 집합은 아래와 같이 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{ip} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nj} & \dots & X_{np} \end{bmatrix} \quad (33)$$

행렬 X 는 변수 p 개에 대해서 n 번의 서로 다른 측정 자료를 뜻한다. 행렬 X 의 열 벡터(row vector)의 평균 벡터 (mean vector)를 \bar{x} 라고 정의하면 \bar{x} 는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{x}^T = \frac{I^T X}{I^T I} \quad (34)$$

여기서 I 는 n 개의 성분을 가진 단위 벡터 이며, \bar{x} 는 p 개의 성분을 가진 평균 벡터이다.

Mean corrected vector는 식(34)으로 부터 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{X} = X - I \bar{x}^T \quad (35)$$

벡터 \bar{x} 의 분산(variance)은 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma^2 = \frac{\bar{x}^T \bar{x}}{I^T I} \quad (36)$$

각 행에 대한 분산이 구해지면 각 분산값을 대각행렬 D로 정리하고 정규화(normalization) 시키면 다음과 같은 표준 데이터 z가 구해진다.

$$Z = \bar{X}D^{-1/2} \quad (37)$$

각 변수들 사이의 상호 연관(correlation) 계수 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{Z^T Z}{I^T I} \quad (38)$$

이 때 상호 연관계수 행렬의 성분 R_{ij} 는 i, j 열 변수 사이의 관련성을 나타내는 값이다.

다변수 해석을 통해 각 변수들 사이의 상호 연관성을 파악한 후, 입력 변수와 출력 변수 사이의 관계식을 다차원 보간을 통하여 구하고자 한다. 다차원 보간의 출력 변수(종속 변수)를 벡터 Y라 정의하고 독립 변수를 각각 X_2, X_3, \dots, X_p 라고 하면 독립 변수와 종속 변수 사이의 관계식은 다음과 같은 다차원 보간식으로 표현될 수 있다.

$$Y_i = b_1 + b_2 X_{2i} + b_3 X_{3i} + \dots + b_p X_{pi} + e_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (39)$$

행렬식으로 간략하게 표현하면 다음과 같다.

$$Y = Xb + e \quad (40)$$

여기서, $b = [b_1, b_2, \dots, b_p]^T$ 는 구해야할 $p \times 1$ 열 벡터이고 b_1 은 intercept 항이며, b_2, b_3, \dots, b_p 는 보간 계수이다. $e = [e_1, e_2, \dots, e_p]^T$ 는 잔차 벡터(residual vector)이다. 최소 잔차법(least square method)을 적용하면 벡터 b는 다음과 같이 구해진다.

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (41)$$

4.2 선상 가열의 입력 변수와 잔류 변형 사이의 관계

지금까지 유한요소법에 의하여 선상 가열 후 판의 잔류 변형을 구하는 과정, 선상 가열 변수의 무차원 해석, 다변수 해석 및 다차원 보간에 대한 과정을 정리하였다. 본 장에서는 선상 가열의 무차원 변수와 잔류 변형사이의 다변수 해석 과정을 거쳐 주요 변수를 선정하고 변형 관계식을 제안하고자 한다.

식(33)과 식(38)의 다변수 행렬 및 상호 연관계수 행렬을 이용하여 선상 가열의 주요 변수를 선정하고자 한다. 식(28)에서 재료 특성값은 온도에 따라 변하는 값이므로 온도의존성 재료특성값을 정확하게 반영하는 것은 불가능하다. 따라서 재료 특성값과 관련된 변수는 단위 상수로 가정하는 것이 합리적이다. 따라서 다음과 같은 잔류 변형(출력 변수)과 가열 조건 변수(입력 변수)를 가정하였다.

·Output variables (residual deformations)

$$\{\theta_x, \theta_y, \delta_x, \delta_y\}$$

·Input variables (variables of line heating)

$$\left\{ \frac{Q}{h}, \frac{1}{vh}, Qv, \frac{Q}{v}, \frac{Q}{vh^2}, \frac{Q}{vh^3}, \frac{Q}{vh} \right\}$$

유한요소해석 및 실험을 통하여 얻은 잔류 변형 자료를 이용하여 변수들 사이의 상호 연관계수를 구하였다. 각 변수들 사이의 상호 연관 계수는 다음과 같다.

Table 2 Correlation coefficients

	$\frac{Q}{h}$	$\frac{1}{vh}$	Qv	$\frac{Q}{v}$	$\frac{Q}{vh^2}$	$\frac{Q}{vh^3}$	$\frac{Q}{vh}$
θ_x	-0.23	0.16	-0.20	0.47	-0.15	-0.36	0.23
θ_y	0.46	0.88	-0.26	0.56	0.85	0.68	0.96
δ_x	-0.05	-0.87	0.56	-0.86	-0.57	-0.30	-0.94
δ_y	0.35	-0.74	0.75	-0.99	-0.23	0.06	-0.77

상호 연관계수는 $-1 \sim 1$ 사이의 값이며 변수 자신과 자신 사이의 상호 연관 계수는 1이다. 예를 들어 위에서 θ_y 와 $1/vh$ 의 관계는 0.88 이다. 횡방향 각변화량 (θ_y)과 연관계수가 가장 큰 Q/vh

의 그래프를 Fig. 8에 보이고 있으며 횡방향 수축량 (δ_y)과 Q/v 와 관계를 단위 두께에 대한 값으로 변화시킨 결과를 Fig. 9에 보이고 있다. 그림에서 보듯이 연관계수가 클수록 강한 선형(linear) 증가 관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

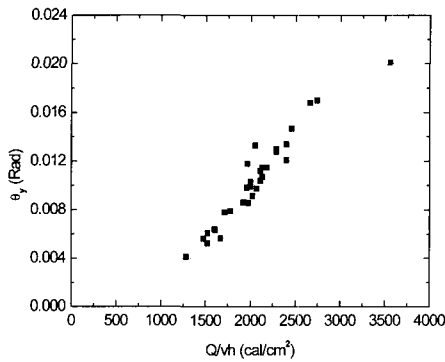


Fig. 8 Transverse angular-deformation versus Q/vh

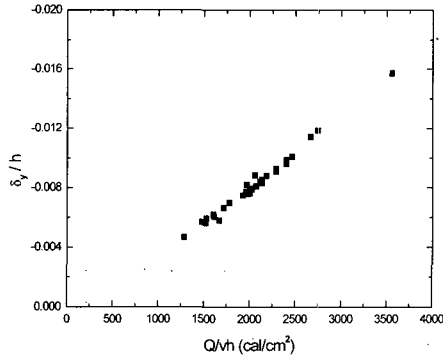


Fig. 9 Normalized transverse-shrinkage versus Q/vh

위에서 구한 상호 연관 계수값을 토대로 연관 계수값이 큰 두 개의 변수들만으로 보간을 수행하여 얻은 잔류 변형량과 입력 변수 사이의 관계식은 아래의 식(42)와 같다. 관계식에 사용된 Q 의 단위는 $Kcal$, 속도와 두께의 단위는 cm 와 cm/sec 이다. 이때 관계식의 계수는 Table 3과 같다.

Table 3 Coefficients regression equations

	θ_x	θ_y	δ_x	δ_y
b_0	2.961e-3	-5.360e-3	-1.318e-4	2.919e-5
b_1	1.421e-4	-1.387e-2	2.474e-4	-4.056e-5
b_2	-2.018e-4	1.494e-5	-3.135e-4	-1.331e-5

식(42)를 통해 목적하는 잔류변형을 얻기 위한 입열 조건(Q)와 가열 속도(v)를 산정 하는 것이 가능하다. 유한요소해석에 의한 수치해와 다차원 보간식에 의한 예측값의 차의 평균은 약 5.1% 이하로 얻어졌다.

$$\begin{aligned}
 \theta_x &= b_0 + b_1 \frac{Q}{v} + b_2 \frac{Q}{vh^3} \\
 \theta_y &= b_0 + b_1 \frac{1}{vh} + b_2 \frac{Q}{vh} \\
 \delta_x &= b_0 + b_1 \frac{1}{vh} + b_2 \frac{Q}{vh} \\
 \delta_y &= b_0 + b_1 \frac{Q}{v} + b_2 \frac{Q}{vh}
 \end{aligned} \tag{42}$$

5. 결론

본 연구에서는 유한요소 해석법을 이용한 선상 가열의 변형 해석 과정을 기술하고 그 유용성을 실험을 통하여 일부 확인하였다. 유한요소 해석 과정을 거친 수치해의 결과를 이용하여 선상가열의 변형 관계식을 제안하기 위한 방법으로 무차원 변수 해석 및 다변수 해석과정을 거쳐 주요 변수를 선정하였으며 최소 자승법을 이용하여 주요 변수를 독립변수로 하는 다차원 보간법을 제시하였다. 이를 통하여 선상 가열의 변형 관계식 도출을 위한 일련의 과정을 제시하고 변형에 미치는 주요 인자를 찾는 하나의 방법을 제안하였다.

본 연구의 결과는 기하해석을 통하여 구해진 곡면가공을 위한 가열선의 가열정보를 결정하는 자료로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 강중규, 이장현, 신중계 2000 "선상가열을 위한 고주파 유도가열의 수치 해석," 대한조선학회 논문집

- 문집, 제37권 제3호, pp. 110-121.
- 고대은, 장창두, 서승일, 이해우 1999 "국가공 자동화시스템을 위한 선상가열에 의한 변형의 실시간 시뮬레이션," 대한조선학회논문집, 제36권 제4호, pp. 116-127.
 - 김병일, 장창두 1997 "판구조물의 열탄소성 해석," 대한조선학회논문집, 제34권 제1호, pp. 68-76.
 - 김원돈 1998 "선체외판 국가공을 위한 변형기하 해석 정보모델," 서울대학교 박사학위논문
 - 류철호, 이장현, 신종계 1997 "선상가열 자동화를 위한 판의 기하학적 변형을 분석," 대한조선학회 1997 추계연구발표회 논문집, pp. 416-421.
 - 박성건, 김원돈, 신종계 1997 "인공신경망을 이용한 선상가열 공정의 역학정보모델," 대한조선학회논문집, 제34권 제1호, pp. 122-129.
 - 신종계 1992 "선상가열(Line Heating)에 의한 평판가공 Simulator 연구," 대한조선학회논문집, 제29권 1호, pp. 191-200.
 - 이동욱 1995 "유한요소법을 이용한 GMAW의 열탄소성 모델링," 서울대학교 박사학위논문
 - 장창두, 고대은, 김병일, 박정웅 2001 "열간가공에 의한 판의 변형특성에 관한 실험적 연구," 대한조선학회 논문집, 제38권 제2호, pp. 62-70.
 - 장창두, 서승일, 고대은 1997 "간이 열탄소성 해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측에 관한 연구," 대한조선학회논문집, 제34권 제3호, pp. 104-112.
 - Bridgman, P. W. 1931 "Dimensional Analysis," Yale University Press
 - Bathe, K. J. 1982 "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall, Inc.
 - Brown, S. and Song, H. 1992 "Finite Element Simulation of Welding of Large Structures," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 144, pp. 441-451.
 - Dillon, W. R. and Goldstein, M. 1984 "Multivariate Analysis: Methods and Applications," John Wiley & Sons, Inc.
 - Jang, C. D., Seo, S. I., and Ko, D. E. 1997 "A Study on the Prediction of Deformations of Plates due to Line Heating using a Simplified Thermal Elasto-plastic Analysis," Journal of Ship Production, Vol. 13, No. 1, pp. 22-27.
 - Langhaar, H. L. 1951 "Dimensional Analysis and the Theory of Models," John Wiley & Sons, Inc.
 - Moshaiov, A., and Latorre, R. 1985 "Temperature Distribution During Plate Bending by Torch Flame Heating," Journal of Ship Research, Vol. 29, No. 1, pp. 1-11.
 - Raghunath, H. M. 1967 "Dimensional Analysis and Hydraulic Model Testing," Asia Publishing House, Bombay, India
 - Satoh, K., Mukai, Y., and Tyoda, M. 1979 "熔接工學," 理工學社, Tokyo, Japan
 - Shin, J. G. and Kim, W. D. 1997 "Kinematic Analysis of the Process Planning for Compounding Ship Hull Plates," Journal of Ship Production, Vol. 13, No. 1, pp. 28-35.
 - Shin, J. G., Kim, W. D., and Lee, J. H. 1998 "An Integrated Approach for the Computerized Production Process of Curved Hull Plates," Journal of Ship Production, Vol. 14, No. 2, pp. 124-133.
 - Shin, J.G., Kim, W.D., Lee, J.H. 1996 "Numerical Modeling for Systematization of Line Heating Process" Journal of Hydrospace Technology, Vol.2, No.1, pp. 41-54.
 - Szirtes, T. 1998 "Applied Dimensional Analysis and Modeling," McGraw-Hill, Inc.
 - Tekriwal, P., and Mazumder, J. 1991 "Transient and Residual Thermal Strain-Stress Analysis of GMAW," AMSE Journal of Engineering Material Technology, Vol. 113, pp. 336-343.
 - Ueda, Y., Murakawa, H., Rashwan, A. M., Neki, I., Kamachika, R., Ishiyama, M., and Ogawa, J. 1994 "Development of Computer Aided Process for Plate Bending by Line-Heating (3rd Report) Relation between Heating Condition and Deformations," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 173, pp. 409-418.

- White, F. M. 1986 "Fluid Mechanics," McGRAW-Hill, Inc.



< 이 장 현 >



< 신 종 계 >