변형을 경계법을 이용한 다중 선상가열에 의한 판의 변형 예측

허 지 연* · 이 의* · 이 장 현*,†

*인하대학교 공과대학 조선해양공학과

Prediction of Plate Deformation by Multi-line Heating using SDB Method

Jeeyeon Heo*, Yi Li*, and Jang-Hyun Lee*,†

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

†Corresponding author : jh_lee@inha.ac.kr

(Received August 13, 2018 ; Revised September 18, 2018 ; Accepted December 18, 2018)

Abstract

The purpose of this study is to quickly and accurately predict the deformed shape of the curved plate located before and after the surface of the hull manufactured by multi line heating (or flame bending). Three dimensional thermo-elasto-plastic analysis takes long time and requires user's guidance to simulate the deformation. To overcome these drawbacks, this study employed the SDB(Strain as Direct Boundary) method based on thermal strain rather than the three dimensional finite element analysis using solid element. The thermal strain, including material phase transformation and volumetric expansion occurred during Martensite phase transformation, is specially considered by SDB. This study calculates the temperature dependent phase portion using material chemical composition and reflects the martensite portion dependent volumetric expansion. The Heat Affected Zone(HAZ) is obtained by thermal analysis and virtual temperature substituting the heat input is assumed by the size and shape of HAZ. In order to reflect the initial deformation due to the former heating lines to the post-deformation analysis, this study predicts the deformation by multi-line heating using the plastic material properties. Thereafter, comparing the deformation of the plate with the 3D solid elasto-plastic analysis and the SDB method, this study shows the accuracy and efficiency of the SDB method.

Key Words : Plate deformation, Heat Affected Zone(HAZ), Strain as Direct Boundary (SDB), Line heating, Flame bending

1. 서 론

ICT를 활용한 지능형 제조 기술이 확산되면서 조선 산업 또한 지능형 생산 기술이 확대하고 있다. 이러한 기술은 다양한 선박 생산 공정에 적용하고 있으나, 여전히 선체 외판의 곡면 가공은 자동화 자체가 어려운 공정에 속한다. 가공 작업자의 경험 지식에 의존하는 곡면 가공의 단점을 극복하기 위하여 여러 가지의 변형 예측법과 자동화 방법이 시도되었다¹⁻⁵⁾. 열간가공 자동화를 위해서 가장 먼저 선행되어야 할 것은 목표하는 곡면 형상에 도달하기 위한 가열선과 변형을 예측이다. 본 논문에서는 제시된 가열선의 검증 과정 중에서 다중

가열선을 적용하였을 때 나타나는 곡면의 최종 형상을 효과적으로 예측하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

가열에 의한 변형 형상을 예측함에 있어서 가장 이론적인 방법은 열전달 및 소성변형 현상을 고려한 유한요소해석이다. 그러나 이 방법은 컴퓨터의 연산 속도의 증가에도 불구하고 수 시간 이상의 계산 시간을 필요로 할 뿐만 아니라 가열선 위치를 고려하여 실시간으로 가열선 계산과 변형 예측을 수행해야 과정을 자동으로 수행하는 것이 어렵다. 그러므로 이러한 단점을 보완하여 신속하게 변형을 예측할 수 있는 간이 해석법이 필요하다.

다중의 이동 열원에 의한 변형을 신속하게 예측하는 방법으로 가장 대표적인 것이 고유변형률을 이용한 등가중첩법¹⁾이다. 이는 임계온도 이상을 겪은 영역을 영

구적인 변형이 남는 열영향부로 가정하고, 고유 변형률을 증가하중으로 치환하여 탄성 해석만으로 변형을 예측하는 방법이다. 그러나 이 방법은 고유변형률 계산에 있어서 재료의 강성이나 이방성 정의가 번거롭다. 또한 가열선을 증가 하중과 모멘트로 치환하여 경계조건으로 적용되기 때문에 변형 해석 모델을 구성함에 있어서 자동화된 하중 방향과 크기의 정의가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 잔류 변형률을 셀 요소의 열팽창 계수로 적용하고, 열영향부의 형상에 따른 증가온도를 계산하여 이를 가열선에 해당하는 절점에 경계조건으로 적용하는 변형률 경계법(SDB)을 사용하였다³⁾.

고온의 열을 겪는 열간가공의 경우 상변태²⁾가 불가피하게 일어나게 되는데, 특히 가열과정에서 오스테나이트로 변태한 상이 빠른 냉각 과정으로 인해 마르텐사이트로 변태하게 된다. 이 과정에서 일어나는 부피변화는 잔류 변형률에 영향을 미치게 된다. 때문에 본 연구에서는 재료의 화학 성분률을 이용해 각 온도에 따른 상의 분율을 계산하고, 마르텐사이트 분율에 따른 부피팽창을 재료의 변형률에 반영하여 변형 예측의 정확도를 높이하고자 하였다. 가열에 따른 판의 열영향부는 열원의 이동에 따른 열전달 해석을 통해 얻었으며, 임계온도는 재료의 성분함량에 따라 계산된 값을 사용하였다⁴⁾. 또한 열간가공의 경우 가열선이 여러 개인 경우가 보편적이다. 따라서 이전 가열선의 영향을 반영하기 위하여 재료를 소성으로 가정하는 열변형률 기반 탄소성 해석 방법을 사용하였다^{5,11)}.

본 논문에서는 지금까지 제시된 이동 열원에 의한 판의 잔류 열변형을 예측하는 방법 중 가장 적합하다고 판단되는 열변형률 기반의 탄소성 변형률 경계법을 종합적으로 정리하여 적용하였다. 그리고 위 방법의 효율성과 정확성을 검증하기 위하여 3차원 솔리드 요소를 사용한 열탄소성 해석으로 구한 변형 형상을 비교하였다.

2. 열변형 예측

2.1 열변형 해석법

변형 해석법에는 가장 일반적으로 유한요소 해석의 솔리드 요소를 사용한 열탄소성 해석 방법이 있다. 위 방법은 열전달 해석을 통해 열원의 이동에 따른 판의 온도 이력을 계산한 후, 이에 따른 판의 변형을 탄소성 해석을 통해 도출하게 된다. 이 방법은 열원의 형상과 크기를 모두 정의하고 온도에 따른 재료의 물성치를 모두 고려하기 때문에 정확한 예측이 가능하고, 냉각 후 잔류 응력 또한 확인할 수 있다. 하지만 컴퓨터 하드웨어의 발전에도 불구하고 열탄소성 해석은 여전히 수 시

간의 해석 시간을 요구한다. 그러므로 신속한 예측이 가능한 셀 요소를 이용한 변형률 기반 등가 경계조건 방법을 이용하는 것이 해석시간을 단축할 수 있다. 대표적인 사용 변형률은 고유 변형률과 열변형률이 있으며, 등가 경계조건 방법은 증가하중법과 변형률 경계법이 있다. 본 연구에서는 열변형률에 기반한 변형률 경계법을 이용하여 해석을 수행하였다.

2.2 잔류 변형률

2.2.1 잔류 변형률 생성 과정

열원에 의한 판의 변형은 열영향부(HAZ)를 중심으로 일어난다. 잔류 변형률이 생성되는 과정을 2단계로 나눌 수 있는데, 고온의 열을 겪는 가열단계와 고온에서 상온으로 식어가는 냉각단계로 나눌 수 있다.

먼저 가열단계에서는 재료 특성상 항복응력과 탄성계수가 0에 가까워지기 때문에 소성 응력과 변형률이 발생하지 않는다고 가정하였다. 그러므로 판의 변형은 냉각단계를 중심으로 일어나게 된다. 이때 발생하는 열변형률을 열영향부의 초기 변형률로 가정하고, 주변부를 열 영향부를 구속하는 요소로 가정하여 해석을 수행하였다.

$$\epsilon^* = \epsilon - \epsilon^e = \epsilon^p + \epsilon^{th} + \epsilon^{ph} \quad (1)$$

위 식(1)은 고유변형률(ϵ^*)을 총변형률(ϵ)과 탄성변형률(ϵ^e), 소성변형률(ϵ^p)과 열변형률(ϵ^{th})과 상변태변형률(ϵ^{ph})로 표현한 식이다⁵⁾. 이 관계를 Fig. 1에 나타냈다.

2.2.2 잔류 변형률 계산

본 연구에서는 상변태를 포함하는 열변형률을 열변형 예측에 사용하였다. 이는 셀요소를 이용한 해석을 수행할 때도 재료의 소성 특성을 고려하여 이전 가열선의 영향을 반영하고자 한 것이다. 상변태를 포함하는 열변

Fig. 1 Stress strain curve of HAZ(Heat Affected Zone)

형률(ϵ^{th+ph})은 아래 식(2)⁴⁾를 사용하여 계산할 수 있다. 이때 열팽창계수(α^{mod}) 또한 상변태를 고려한 열팽창계수이며, 상변태를 포함하는 열변형률을 미분하여 얻을 수 있다.

$$\epsilon^{th+ph} = \int_{T_c}^{T_i} \alpha^{mod} dT \quad (2)$$

위 식으로 계산한 상변태를 포함하는 열변형률은 셀 요소의 재료 물성치인 열팽창계수로 입력되며 셀 절점에 입력된 가상온도와 곱해져 최종 변형률로 나타나게 된다. 이때 가상온도는 아래 식(3)⁴⁾을 이용하여 계산할 수 있다. 이는 열영향부 형상에 따른 수축 변형과 굽힘 변형을 모두 고려한 식이다.

$$T = \begin{cases} T_{top} = \frac{1}{bh} \int_{d-\frac{h}{2}}^{-\frac{h}{2}} b_z \times (1 - \frac{4}{h} \times z) dz \\ T_{btm} = \frac{1}{bh} \int_{-\frac{h}{2}}^{-\frac{h}{2}} b_z \times (1 + \frac{4}{h} \times z) dz \end{cases} \quad (3)$$

위 식에서 b , b_z 와 h 는 각각 열영향부의 최대 폭, 판의 깊이에 따른 열영향부의 폭 그리고 판의 두께를 뜻한다.

3. 열변형률 기반 변형률 경계법

3.1 상변태를 포함하는 열변형률

3.1.1 상변태에 따른 부피 팽창률

본 연구에서는 저탄소강인 Grade A steel를 해석에 사용하였다. 재료의 화학 조성 성분율은 Table 1에 정리하였다.

일반적으로 선상가열에 의해 가공되는 선박의 후판은 상온에서 베이나이트(Bainite)만이 존재하고, 열원에 의한 가열단계를 겪으며 오스테나이트(Austenite)로 변태한다. 이때 오스테나이트로 변태하기 시작하는 온도($Ac1$)는 아래 식(4)를 이용하여 계산할 수 있다. 이 오스테나이트는 수냉에 의한 냉각단계를 겪으며 마르텐사이트(Martensite)로 변태하게 되는데, 이때 상변태 시작 온도(Ms)는 식(5)를 이용하여 계산할 수 있다^{6,7)}. $Ac1$ 는 판의 변형률에 직접적으로 영향을 미치며, 해당 온도를 열영향부의 경계를 정의하는 임계온도(T_c)로 사용하였다³⁾.

Table 1 Chemical composition of grade A steel

Grade A	C	Mn	Si	P	S
Wt%	0.18	0.45	0.02	0.02	0.02

$$Ac1 = 512 - 453C - 16.9Ni + 15Cr - 9.5Mo + 217(C)^2 - 71.5(C)(Mn) - 67.6(C)(Cr) - 11.1Si \quad (4)$$

$$Ms = 512 - 453C - 16.9Ni + 15Cr - 9.5Mo + 217(C)^2 - 71.5(C)(Mn) - 67.6(C)(Cr) - 11.1Si \quad (5)$$

각 상변태 시작 온도를 이용하면 냉각과정에서 온도에 따른 오스테나이트(γ)와 마르텐사이트(M)의 분율을 계산할 수 있다. 단, 임계온도 이상의 영역은 가열단계에서 모두 오스테나이트로 변태한다고 가정하였으며, 오스테나이트 역시 냉각과정에서 모두 마르텐사이트로 변태한다고 가정하였다⁸⁾. 냉각과정에서 각 온도에 따른 오스테나이트, 마르텐사이트 분율은 아래 식(6)^{8,9)}을 이용하여 계산할 수 있다.

$$X_\gamma(T) = e^{k \times \max[(Ms - T), 0]} \quad (6)$$

$$X_M(T) = 1 - X_\gamma(T) = 1 - e^{k \times \max[(Ms - T), 0]}$$

이때 k 는 상변태 속도이며 탄소 함량이 0.2Wt% 이하인 저탄소강에서는 -0.026으로 가정할 수 있다. 특히 상변태에 의한 부피 팽창은 냉각과정에서 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 과정에서 발생하며 부피 팽창률은 아래 식(7)¹⁰⁾을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{\Delta V}{V} (\%) = X_M(T_i) \times \frac{(2.86 + 0.117C) \times (2.86 - 0.0143C)^2}{2.86^3} + X_{F-P} - 1 \quad (7)$$

여기서, X_{F-P} 는 페라이트(Ferrite)와 펄라이트(Pearlite)의 분율이다. 본 논문에서는 열영향부에 오스테나이트 또는 마르텐사이트만 존재한다고 가정하였으므로 X_{F-P} 를 0으로 가정한다.

3.1.2 열영향부 형상에 따른 가상온도

냉각과정에서 상변태 변형률은 상변태에 의한 부피 팽창으로 인해 발생한다. 때문에 각 온도에 따른 마르텐사이트의 분율과 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 과정에서 부피 팽창률의 곱으로 나타낼 수 있다. 이 값에 열팽창계수를 적분한 열변형률을 더해주면 식(8)과 같이 수정된 열변형률을 계산할 수 있다. 또한 계산된 열변형률을 미분하면 온도에 따른 열팽창 계수를 계산할 수 있다. 이를 Fig. 2에 나타냈다.

$$\epsilon^{th+ph}(T) = \int_0^T \alpha dT + \frac{\Delta V}{3V} \times X_M(T) \quad (8)$$

(a) Thermal strain

(b) Thermal expansion coefficient

Fig. 2 Modified material properties

Fig. 3 Trapezoid HAZ (Heat Affected Zone)

3.2 열영향부 형상에 따른 가상 온도

열영향부는 임계온도(T_c)이상의 영역을 나타내며 일반적으로 반 타원형상으로 정의한다. 하지만 판을 천천히 깊게 가열할수록 역삼각형 꼴로 나타나는 경향이 있어 본 연구에서는 열영향부를 사다리꼴 형상으로 정의하였다. 이를 Fig. 3에 나타내었다. 판의 깊이에 따른 열영향부 폭의 값의 식(9)과 같다

$$b_z = \begin{cases} \frac{b_2 - b_1}{d} \left(z + \frac{h}{2} \right) + b_1 & z \leq d - \frac{h}{2} \\ 0 & d - \frac{h}{2} < z \end{cases} \quad (9)$$

Fig. 4 Temperature boundary conditions imposed on the shell element used by SDB method

Fig. 5 Nonuniform temperature applied to nodes

식(3)과 식(9)를 이용하면 가열에 의한 잔류변형을 모사할 수 있는 등가의 가상온도를 계산할 수 있다. Fig. 4와 같이 쉘 요소의 크기는 열영향부 최대 폭과 동일하며, 가열선이 하나인 경우 가열선이 지나가는 절점에만 계산한 상부/하부 온도를 입력하고 이외의 절점에는 영을 입력해야한다. 하지만 가열선의 개수가 증가하고, 서로 겹치게 되면 균일한 폭을 갖는 요소를 생성하기 불가능하다. 이러한 이유 때문에 불규칙하게 만들어진 요소의 절점에 대해 추가적인 가상온도 계산이 필요하다. 이는 단일 가열선에 의한 변형을 비교하여 쉘 요소의 크기가 같지 않아도 온도장만 동일하게 적용한다면 변형 결과가 같다는 사실을 이용하였다. 먼저 가열선이 지나가는 자리에 절점이 위치하게 한 뒤, 이외의 요소는 유한요소 프로그램 내 자동 요소 기능을 사용하였다. 이렇게 생성된 절점 중 가열선으로부터 거리가 열영향부 폭 보다 작은 절점만 가려내어 각 절점에 해당하는 온도를 계산한 후 적용하였다. 이 계산과정은 Fig. 5에 나타나있으며 식(10)은 임의의 절점(k)에 적용할 가상 온도를 계산하는 식이다.

$$T^{(k)} = \begin{cases} T_{top}^{(k)} = T_{top} \frac{b-a}{b} \\ T_{btm}^{(k)} = T_{btm} \frac{b-a}{b} \end{cases} \quad (10)$$

가열선 주위에 적용되는 가상온도장이 선형적임을 이용하였으며 b 는 열영향부의 폭, a 는 가열선으로부터 직선거리를 뜻한다. 또한 가열선이 교차하는 지점에 존재

Fig. 6 Heating lines applied to case studies

하는 절점은 각 가열선에 대해 계산한 가상 온도를 선형적으로 합하여 사용하였다. 그러므로 가열선이 두 번 지나가는 곳에 위치한 절점은 최종적으로 각각 상부, 하부 온도로서 식(3) 계산 결과의 2배 값인 $2T_{top}$, $2T_{btm}$ 을 적용하였다.

4. 변형 예측 결과 및 비교

4.1 해석 모델

본 연구에서는 두 가지 경우에 대한 열 변형 예측을 수행했다. 가열선 경로를 Fig. 6에 나타내었으며, 판의 크기는 두 가지 경우 모두 동일하게 $650 \times 600 \times 20\text{mm}$ 이며, 열원 모델은 가우시안(Gaussian) 열유속(heat flux) 분포로 가정하였다. 최대 열유속은 2.5W/mm^2 , 열원 반경은 30mm 으로 가정하였다. 그리고 열원의 이동 속도는 1.5mm/sec 로 가정하였다.

4.2 수직 변형량 비교

솔리드 요소를 이용한 열탄소성 해석 결과와 쉘 요소를 이용한 변형률 경계법의 예측 결과를 3차원 형상도 Fig. 7에 나타냈다. 또한 예측 결과의 최대 변형량 수치와 해석 시간의 차이를 Table 2에 정리하였다. 해석을 수행한 두 가지 경우 모두 5% 내외의 오차를 보였다. 해석시간은 약 3,000배 단축된 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 열변형률 기반의 변형률 경계법을 이용하여 선상가열에 의한 후판의 변형을 예측하였다. 유

Fig. 7 Comparison of SDB with 3D thermal elasto-plastic deformation analysis

한요소 해석을 단순화하는 과정에서 예측 정확도를 높이기 위해 상변태를 포함하는 열변형률을 사용하였으며, 재료 성분의 따른 차이를 변형 예측에 반영하였다. 가열선을 중심으로 비균일 요소에 가상 온도장을 부여하여 등가 열하중을 반영하였다. 3차원 열탄소성 변형 해석과 변형률 경계법을 이용한 변형 예측 결과에서 최대 변형량과 해석시간을 비교함으로써 열변형률 기반의 변형률 경계법이 3차원 열탄소성 해석에 근접하는 정확한 예측이 가능하며, 예측 시간이 신속함을 검증하였다. 추후에 실제 실험을 통해 예측 방법을 적용하고 비교하는 연구를 진행할 예정이다.

후 기

이 연구는 KIAT 지원의 2018년 조선해양산업 퇴직 인력활용 전문인력양성사업 (과제번호: N0002361), 산

Table 2 Comparison of FEM and SDB method

		FEM	SDB method	Error & efficiency
Max. deformation	Case1	-3.23mm	-3.33 mm	3.1 % error
	Case2	-4.60 mm	-4.80 mm	4.3 % error
Computation time		21,542 s	7 s	Approximately 1/3,000

업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (과제번호: 10077588)

ORCID: Jeeyeon Heo: <https://orcid.org/0000-0002-1820-5368>

ORCID: Jang-Hyun Lee: <https://orcid.org/0000-0002-7164-1732>

References

1. Chang Doo Jang, A study on the prediction of deformations of plates due to line heating using a simplified thermal elasto-plastic analysis, *Journal of Ship Production*, 13 (1) (1997), 22-27
2. Chang Doo Jang, Yun Sok Ha and Dae Eun Ko, An Improved Inherent Strain Analysis for the Prediction of Plate Deformations Induced by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel, *The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, (2003)
3. Yunsok Ha, Jinhyuk Yang, Seokhee Won and Myungsu Yi, Development of Thermal Distortion Analysis Method Based on Inherent Strain for TMCP Steels, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 26 (3) (2008), 61-66
<https://doi.org/10.3744/SPAK.2008.45.1.93>
4. Chang Doo Jang, Yun Sok Ha, Dae Eun Ko and Sung Choon Moon, Determination of Inherent Strain Regions to Estimate Plate Deformation by Line Heating, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39 (1) (2002), 82-89
<https://doi.org/10.3744/SPAK.2002.39.1.082>
5. Yunsok Ha, A Study on Weldment Boundary Condition for Elasto-Plastic Thermal Distortion Analysis of Large Welded Structures, *Journal of KWJS*, 29(4) (2011), 48-53
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.4.410>
6. P. Payson and C.H. Savage, Martensite Reactions in Alloy Steels, *Transactions ASM*, 33 (1944), 261-275
7. K. W. Andrews, Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures, *J. Iron Steel Inst.* (1965), 721-727
8. G. Krauss, and A. R. Marder, The morphology of martensite in iron alloys, *Metallurgical Transactions* 2, 9 (1971), 2343
9. D. Koistinen and R. Marburger, A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels, *Acta Metallurgica*, 7 (1959), 59-60
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(59\)90170-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(59)90170-1)
10. E. C. Bain and H. W. Paxton, Alloying Elements in Steel, *American Society for Metals*, (1966)
11. Yunsok Ha, Analytical methodology obtaining an optimal welding sequence for least distortion of welded structure. Analysis, *Journal of KWJS*, 31(3) (2013), 54-59
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.3.54>