

온도분포 해석 해와 유한요소법을 이용한 대형 강판의 용접변형 해석

홍성빈* · 배강열** · 양영수***,†

*현대삼호중공업 품질경영부

**경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과

***전남대학교 기계공학과

Analysis of Welding Distortion of Large Steel Plate by Using Analytical Solution of Temperature Distribution and Finite Element Method

Sung-Bin Hong*, Kang-Yul Bae** and Young-Soo Yang***,†

*Quality Management Dept., Hyundai Samho Heavy Industries Co. Ltd., Youngam 526-701, Korea

**Dept. of Mechatronics, Gyeongnam National Univ. of Sci. and Tech., Jinju 660-758, Korea

***Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

†Corresponding author : ysyang@jnu.ac.kr

(Received : July 4, 2014 ; Accepted July 31, 2014)

Abstract

Welding distortions of large steel structures had mainly been estimated with some simplified formula obtained by lots of experience and numerical analyses for small steel structures. However, the large structures would have different characteristics of distortion with welding because of their own stiffness coming from the size itself. Therefore, in order to find some measures for preventing welding distortion of large structure, it is requisite in advance to precisely analysis thermal stress and distortion during welding of the structure. Numerical analysis for larger structure has been known to take large amount of calculation time and have a poor convergency problem during the thermo-elasto-plastic calculation.

In this study, a hybrid method is proposed to analysis the thermal stress and distortion of a large steel plate with the finite element analysis by incorporating with temperature distribution of the plate calculated by an analytical solution. The proposed method revealed that the thermo-mechanical analysis for welding of the large structure could be performed with a good convergence and produced precise results with much reduced time consumption.

Key Words : Thermal stress, Welding distortion, Large steel plate, Finite element analysis, Rosental equation

1. 서 론

용접공정은 조선, 해양플랜트 등 대형 구조물의 제작에 광범위하고 유용하게 활용되고 있으나, 공정의 특성상 열에 의한 구조물의 변형을 수반하게 되어 미관의 문제나 구조물의 치수 변화로 인한 문제를 야기하게 된다. 용접 구조물의 제작에 있어서, 용접 후에 잔류 변형을 줄이는 방법은 시간과 비용의 측면에서 효과적이

지 못한 방법으로 인식되고, 주로 용접 전에 변형을 저감할 수 있는 방법을 모색하게 된다. 용접에 의한 변형을 최소화하기 위해서는 우선 용접에 의해 발생할 수 있는 변형의 예측이 필요하게 된다. 변형의 예측을 통해 변형을 저감할 수 있는 공정 파라미터, 용접 순서 변화, 구속 적용 등의 방법을 선택할 수 있다. 변형의 예측은 이론적인 방법과 실험적인 방법을 적용할 수 있으며, 대부분 작은 규모의 구조물이나 시편의 용접을 대상으로 수행되고 있다¹⁾. 특히 공정 파라미터의 변화

에 따른 변형 예측 결과를 통계적으로 처리하여, 변형 예측을 일반화할 수 있도록 간이화된 수식으로 나타내고, 용접 조건에 따라 변형을 예측할 수 있는 방법을 제시한 바 있다^{2,3)}. 이와 같은 방법으로 얻은 결과는 대형 구조물의 용접에서 나타나는 변형의 예측과 대책에도 확대되어 적용되고 있다. 한편으로는 작은 구조물의 용접에서 나타나는 열응력 및 변형의 해석 결과를 활용하여 용접에 의한 등가 하중과 모멘트로 변환하고, 대형 구조물의 용접 접합부 위치에 외부 하중과 모멘트로 적용하여, 탄성해석으로써 대형 구조물의 변형을 예측하는 사례가 있다^{4,6)}. 이와 같은 해석과 예측 방법은 작은 구조물의 용접실험을 통해 비교한 사례가 있으나, 실제 대형 구조물의 변형 측정결과와 비교한 사례는 찾아보기 어렵다. 그럼에도, 작은 구조물이나 2차원 해석의 결과에서 도출한 간이화된 변형 예측식이나 등가 하중은 대형 구조물의 용접공정에서 나타나는 열적 및 기계적 현상을 적합하게 묘사할 수 없다고 판단할 수 있다. 직접 대형 구조물의 용접에 대한 해석을 통해서만 자체의 강성에 의한 용접 변형의 구속효과 그리고 길이 방향의 굽힘변형(bowing)과 수축량 등 3차원적인 변형의 특성을 정확하게 알 수 있다. 대형 구조물의 용접 공정에서 나타나는 변형의 직접적인 실험과 해석은 수반되는 시간과 비용이 매우 크기 때문에 쉽게 수행하기 어렵다. 특히 용접 열응력 및 변형에 대한 수치해석의 경우, 용접 입열에 의한 온도해석과 응력해석이 동시에 연계되어 수행되므로, 급격한 온도변화를 수용하여 해의 수렴을 보장하기 위해 해석 시간 간격이 매우 짧아야 하므로, 현재의 전산처리 속도와 용량으로는 시간과 경제적인 관점에서 대형 구조물에 대한 해석은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 한편, 구조물의 온도분포에 대한 수치해석 결과를 활용하여 열응력 해석을 순차적으로 수행하게 되면, 용접부 전후에 나타나는 급격한 온도분포를 수렴하여 해를 구하는 시간이 전체 해석 소요 시간에서 매우 큰 부분을 차지할 것으로 판단할 수 있다. 따라서 온도분포 해석에 소요되는 시간을 줄임으로써 대형 구조물의 용접 열변형에 대한 수치해석의 적용이 가능할 수도 있게 된다.

본 연구에서는, 이론적인 수식으로써 용접부 온도분포를 예측하고 동시에 유한요소해석으로써 구조물의 열변형을 계산하는 방법을 제안하여, 대형 구조물의 용접 변형을 해석하고자 하였다. 이를 위해 먼저 소형 구조물을 대상으로 유한요소해석과 이론적 온도분포식에 의한 열응력 및 변형의 예측 정도를 각각 규명하고, 구조

물의 열변형 해석 시간을 비교하고자 하였다. 다음으로, 제안된 방법을 대형 구조물의 용접 공정에 적용하여, 대형 구조물의 용접 변형이 직접 예측될 수 있음을 보이고자 하였다.

2. 소형 구조물을 이용한 온도분포 및 용접 변형 해석

이론해를 활용한 온도분포 해석 결과와 유한요소방법을 적용한 온도분포 해석 결과를 각각 활용한 경우, 소형 구조물에 대한 열응력 및 변형 해석을 유한요소방법으로 수행하여, 용접에 의한 변형의 예측 정도를 비교하고자 하였다. 해석에 활용한 구조물의 재질은 연강(mild steel)이고 형상은 판재로, 폭 방향 200mm, 길이 방향 500mm, 두께 20mm이었다. 용접은 bead on plate 공정으로, 강재의 폭 방향 중앙부에서 길이 방향을 따라 수행되는 것으로 가정하였고, 대칭성을 고려하여 용접선을 기준으로 반 폭에 대한 해석만을 수행하였다. 이론해에 의한 온도 분포해석은 Rosental의 방정식을 적용하였고, 유한요소방법에서의 온도해석, 열응력 및 변형해석은 상용패키지 프로그램을 활용하였다.

2.1 온도 분포 해석

강관 위에서 용접 열원이 이동하게 될 때, 열원으로부터 x, y, z 만큼 떨어진 위치에서의 온도를 나타내는, 온도분포에 관한 Rosental 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다⁷⁾.

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k R} e^{-\frac{v(x+R)}{2\alpha}} \quad (1)$$

여기서, T 는 현재 온도, T_0 는 초기온도, v 는 용접속도, k 는 열전도도, α 는 열확산도, Q 는 점열원으로 $Q = \eta \times V \times I$ 를 나타내고, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, x, y, z 는 현 위치의 좌표를 나타낸다.

해석에서는 입열효율 η 는 0.6, 용접전압 V 는 20[V], 용접전류 I 는 200[A], α 는 9.0[mm²/s], v 는 3[mm/s]를 적용하였고, R 이 1mm 이하인 경우의 온도는 1mm의 값으로 대체하였다.

유한요소해석에서 용접 중 강판에서의 열전달은 다음과 같은 지배방정식으로 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (2)$$

여기서 $[C]$ 는 비열, $[K]$ 는 열전도도 매트릭스를 나

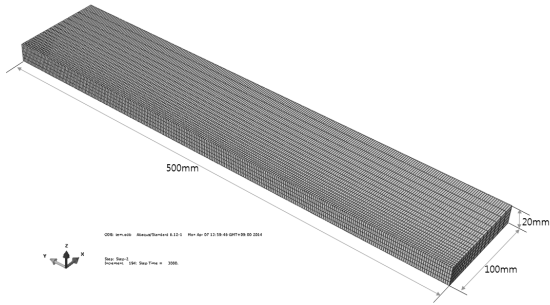


Fig. 1 Finite element model of solution domain

타내고, $\{T\}$ 는 온도 벡터, $\{\dot{T}\}$ 는 온도의 미분값 벡터, $\{Q\}$ 는 입열량의 벡터를 나타낸다. 입열량은 가우시안 분포를 나타내며, 유효열원반경(\bar{r})은 5(mm)로 가정하였다.

Fig. 1은 해석영역의 크기와 요소분할을 보여 주고 있다. 절점(node)은 31,626개, 요소(element)는 25,000개의 육면체로 분할하였다. 이 때, 용접부 주위의 요소는 작은 크기로 나누어 최소의 유한요소길이를 2mm가 되게 하였고, 거리가 멀어질수록 더 큰 크기의 요소로 나누었다. 용접선 아래의 대칭면에서는 폭 방향으로의 단열 조건을 적용하였으며, 해석영역의 나머지 표면부에서는 자연대류가 발생한다고 가정하였다.

2.2 열응력 및 변형 해석

용접 중 강판의 열탄소성 변형에 대한 유한요소의 지배방정식과 구성방정식은 다음과 같이 매트릭스 형태로 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$\sum_v^n \int [B]^T \{\sigma\} dV = \{R\} \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [C] (\{\epsilon\} - \{\epsilon^p\} - \{\epsilon^{th}\}) \quad (4)$$

$$\{\epsilon\} = [B] \{U\} \quad (5)$$

여기서, $[B]$ 는 전체 변형률-변위 변환 매트릭스, n 는 요소 수, v 는 요소의 체적, $\{\sigma\}$ 는 응력 벡터, $\{R\}$ 은 외력 벡터, $[C]$ 는 응력-변형률 변환 매트릭스, $\{\epsilon\}$ 는 전체 변형률, $\{\epsilon^p\}$ 는 소성변형률, $\{\epsilon^{th}\}$ 는 열변형률 벡터를 각각 나타내고, $\{U\}$ 는 변위 벡터를 나타낸다. 구성방정식을 위 식에 대입하면, 유한요소방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$[K] \{U\} = [R] + \int_v [B]^T [C] (\{\epsilon^p\} + \{\epsilon^{th}\}) dV \quad (6)$$

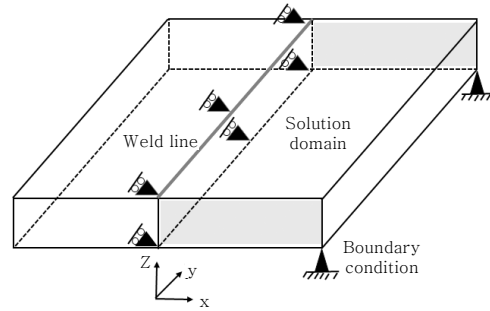


Fig. 2 Solution domain of steel plate for finite element analysis

$$[K] = \int_v [B]^T [C] [B] dV \quad (7)$$

여기서, $[K]$ 는 강성 매트릭스, V 는 해석영역의 체적이다.

Fig. 2는 강판 위 폭 방향 중앙에 bead on plate 용접을 수행하는 경우, 해석영역과 경계조건을 보여 주고 있다. 온도분포 해석에서와 동일하게 대칭성을 고려하여, 해석 대상 강재의 반 폭을 해석영역으로 설정하였다. 용접선 아래의 대칭면에서는 폭 방향으로의 변형을 구속하였고, 해석영역의 강재 이동을 방지하기 위하여 폭 끝의 상하방향 변위를 길이방향 시작점과 끝점인 두 곳에서 제한하였다.

온도분포의 이론식에 의한 해와 유한요소방법에 의한 해를 각각 활용한 용접 열응력 및 변형 해석은 다음과 같이 구별하여 수행하였다. 첫째, 유한요소방법을 이용한 온도분포 및 열응력 및 변형해석(case-1), 둘째, 이론해에 의한 온도분포 및 유한요소 방법에 의한 열응력 및 변형해석(case-2)으로 구분하였다.

3. 대형 구조물의 열응력 및 변형 해석

대형 구조물은 폭 2,000(mm), 길이 10,000(mm), 두께 50(mm)의 강판으로 가정하였고, 강판의 폭 방향 중앙에서 길이방향으로 수행하는 bead on plate 용접에 대하여 열응력 및 변형을 해석하고자 하였다. 가정된 용접공정의 대칭성을 고려하여, 강판의 반 폭에 대한 해석을 수행하였다. 온도분포의 해석은 Rosental 이론해를 적용하였고, 예측된 온도분포를 활용하고 유한요소 방법을 적용하여 열응력 및 변형 해석을 수행하였다(case-3). 유한요소 해석에서의 경계조건은 소형 구조물의 해석에서와 동일한 조건을 적용하였다. 이 때 해석영역은 절점수 56,992개, 요소수는 41,025개의 육면체 유한요소로 분할하였고, 최소요소길이는 5mm로 설정하였다.

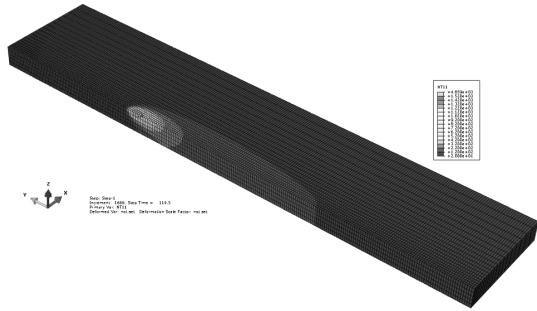


Fig. 3 Transient temperature distribution in steel plate during bead on plate welding predicted by finite element method

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 유한요소해석으로 수행한 소형 강판에 대한 용접진행 중 온도분포 해석의 결과를 보여 주고 있다. 용접열원이 놓이는 위치 주위에서는 급격한 온도변화가 발생하므로, 각 시간 단계의 열응력 및 변형의 계산에 앞서, 이에 대한 해가 수렴하기 위한 반복 계산에 많은 시간이 소요된다. 따라서 이론해를 이용하여 용접 중의 온도를 계산함으로써, 온도계산에 소요되는 시간을 줄여, 용접 열응력 및 변형해석의 전체 시간을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4는 열응력 해석 결과에서 나타난 길이방향 잔류응력(S_{22})의 폭 방향 분포를 보여주고 있다. 해석 결과에서는 유한요소방법에 의한 온도분포(case-1)와 이론해에 의한 온도분포(case-2)의 적용 결과를 각각 보이고 있으며, 최대 응력이 약 30kg/mm^2 이고, 인장응력의 폭이 약 20mm로 나타나는 등 유사한 분포를 보이고 있다.

Fig. 5는 해석된 강재의 폭 방향 가장자리에서 길이

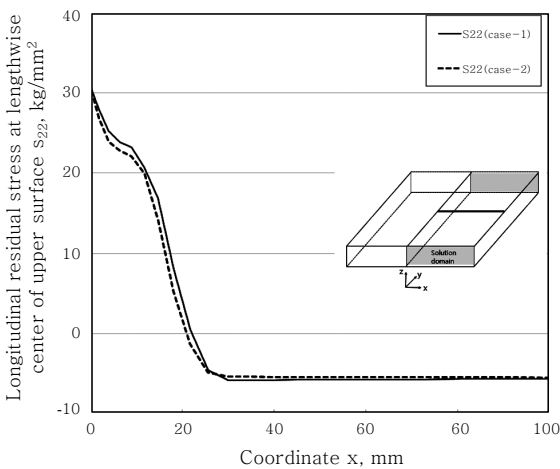


Fig. 4 Residual stress distribution on the surface of the steel plate

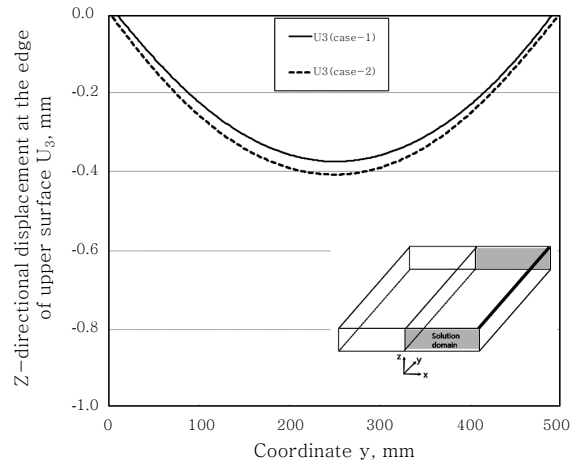


Fig. 5 Bowing distortion at the edge line of the steel plate

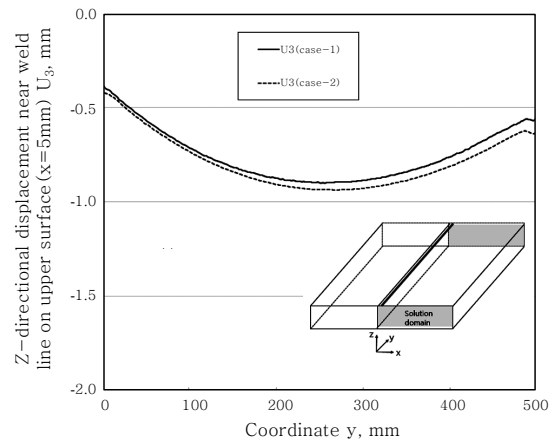


Fig. 6 Bowing distortion at the center line of the steel plate

방향으로 나타낸 높낮이 변형(bowing)의 크기를 보이고 있다. 시작부와 종료부에서 z 방향 변위를 구속한 결과, 길이 방향 두 끝의 변위는 0의 크기로 나타나고 있고, 길이 방향 중앙부에서 최대 약 0.4mm의 변위가 나타나고 있다. 즉 중앙부를 기준으로 길이방향 두 끝이 상대적으로 높은 변형이며, 용접된 위치의 수축으로 인한 결과로 판단할 수 있다. 유한요소방법에 의한 온도분포를 이용한 경우(case-1)와 이론해에 의한 온도분포를 이용한 경우(case-2)의 잔류응력 및 변형 계산 결과에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 6은 열변형 해석결과로, 용접부에서 폭 방향으로 5mm 떨어진 폭 위치에서 길이방향 높낮이 변위(bowing)를 나타내고 있다. 폭 방향 가장자리에서의 변위와 유사한 크기를 나타내고 있으나, 중앙부를 기준으로 할 때, 길이방향 굽힘 변형이 용접 시작부에서 상

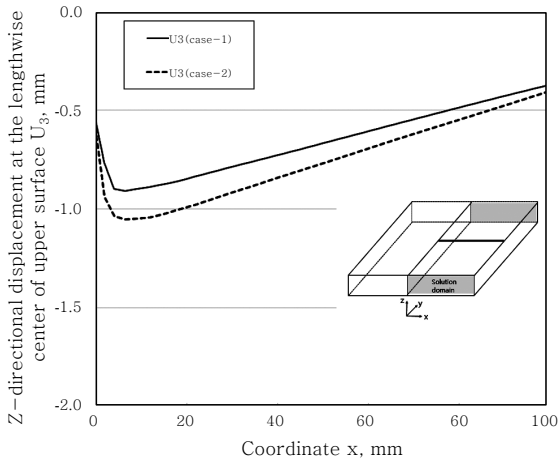


Fig. 7 Angular distortion of the steel plate

Table 1 CPU times for thermal stress analyses in three different cases

Case	CPU time(sec)		
	Thermal analysis	Stress analysis	Total analysis
1	17,205	8,081	25,286
2	0	12,569	12,569
3	0	117,299	117,299 (33hour)

대적으로 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 역시 case-1과 case-2의 두 경우에 대한 결과는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 7은 길이 방향 중앙부에서 폭 방향으로의 높낮이 방향 변위인 각변형을 나타내고 있다. 중앙부에서 약 5mm 정도 떨어진 위치에서 최저값이 나타나고, 이후에는 전형적인 각변형의 형태가 나타나고 있다. 이러한 현상은, 중앙부 상부에서는 용접 도중의 높은 온도에 의해 비교적 이동이 용이한 높이 방향으로 팽창하여¹⁾, 높이가 상대적으로 높아진 상태에서, 냉각 단계에서 주위 부분의 수축을 야기하게 되어 나타난 결과임을 알 수 있다. 각변형의 경우에도 case-1과 case-2의 두 해석 결과는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Table 1에서는 개인용 컴퓨터를 활용한 온도 분포 및 열응력 해석의 수행에 소요된 CPU 시간을 비교하여 보여 주고 있다. 유한요소법을 적용한 온도분포해석의 경우(case-1)에서는 대부분의 해석시간이 온도분포의 계산에 할당되고 있음을 알 수 있다. 이론해를 적용한 온도분포해석의 경우(case-2)에서는 응력해석 시간이 다소 증가 되었으나 전체 해석시간을 크게 줄일

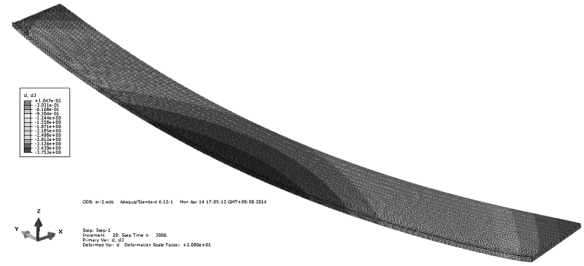


Fig. 8 Deformed shape of the large steel plate after bead on plate welding(z directional displacement, × 200)

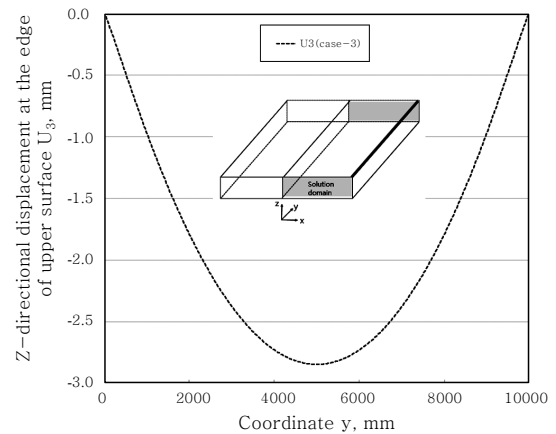


Fig. 9 Bowing distortion at the edge line of the large steel plate

수 있음을 알 수 있다. 따라서 해석의 결과 정도의 차이와 해석시간의 차이를 감안하면, 이론해를 적용한 온도분포 해석과 유한요소법을 적용한 열응력 해석을 결합하면 대형의 구조물에 대한 용접 열응력 해석이 충분히 가능할 것으로 판단할 수 있다.

폭 2,000[mm], 길이 10,000[mm], 두께 50[mm]인 대형 강판의 bead on plate 용접에 의한 변형해석의 경우, Table 1에서 보인 바와 같이 117,299sec의 CPU 시간이 소요되었다. 대형 강판의 변형해석에서, 온도해석을 동시에 유한요소법으로 수행하는 경우와는 달리, 이론해를 이용하는 경우는 계산 도중에 반복해의 수렴이 무난하게 달성되었다.

Fig. 8은 높낮이 방향의 변위를 200배로 확대하여 예측한 대형 강판의 변형 형상을 보여 주고 있다. 대형 구조물은 자체가 크기 효과로 용접 중에 구속효과를 가한 것이며, 이는 작은 구조물을 대상으로 해석한 변형의 양상과 차이가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 길이 10m인 대형 강판 가장자리의 길이방향 굽힘 변형(bowing)을 나타내고 있고, 중앙부에서 약 2.8mm의 최대 굽힘 변형을 보이고 있다.

5. 결 론

대형 강판의 용접에서 발생하는 열응력과 변형의 유한요소해석에 있어, 계산시간을 단축하기 위하여, 이론해를 이용한 온도분포계산 결과를 활용하는 방법을 제안하였고, 이를 활용한 해석으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 소형 강판의 용접에서 발생하는 열응력과 변형의 유한요소해석에서, 이론해를 이용한 온도분포계산 결과와 유한요소법을 적용한 온도분포해석 결과의 활용을 비교한 바, 이론해의 계산결과를 적용하여도 응력과 변형의 예측에는 큰 차이가 발생하지 않았다.

2) 온도분포의 해석에서 이론해를 적용함으로써 전체 열응력 및 변형의 해석시간을 50% 이상 크게 줄일 수 있었다.

3) 대형 강판의 용접에 대한 열응력과 변형의 유한요소해석에서, 이론해를 이용한 온도분포를 이용함으로써, 해의 수렴이 가능하였고 단축된 시간 내에 해석 결과를 확보할 수 있었다.

후 기

본 논문은 2013년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

Reference

1. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Ch. 7 (1980), 235-317
2. M. Watanabe and K. Satoh : Effect of Welding Conditions on the Transverse Shrinkage Distortion of Bead-on Plates, Journal of JWS, **25-4** (1956), 211-216 (in Japanese)
3. K. Satoh and T. Terasaki : Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials, Journal of JWS, **45-4** (1976), 302-308 (in Japanese)
4. C.D. Jang and C.H. Lee : A Study on the Prediction and Control of Welding Deformations of Ship Hull Blocks, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **37-2**(2000), 127-136 (in Korean)
5. J.U. Park, J.W. Lee and H.W. Lee : Analysis of Welding Deformation by Equivalent Load Method on Steel Structures, Journal of KWJS, **20-2**(2002), 129-137 (in Korean)
6. J.S. Lee : Welding Deformation Analysis of Plates using the Inherent Strain-based Equivalent Load Method, Journal of KWJS, **28-2** (2010), 159-166 (in Korean)
7. D. Rosenthal : Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting, Welding Journal, **20-5** (1941), 220s-234s
8. ABAQUS User's Manual, Ver. 5.5, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., 1995