

셸 요소를 이용한 K 및 X 개선 용접구조물의 열변형 해석방법에 관한 연구

하 윤 석^{*,†} · 최 지 원^{*}

^{*}삼성중공업 산업기술연구소 재료접합연구센터 용접연구파트

A Study on the Thermal Distortion Analysis of Welded Structures having K/X Groove using shell elements

Yunsok Ha^{*,†} and Jiwon Choi^{*}

^{*}Welding Research Part, Samsung Heavy Industries CO., LTD., Geoje 656-710, Korea

[†]Corresponding author : yunsok.ha@samsung.com

(Received December 7, 2012 ; Revised December 17, 2012 ; Accepted December 31, 2012)

Abstract

Because ships and offshore structures have very large dimensions and complicated shapes, it is difficult to determine the deformation or internal stress in the structure by simple lab tests. Thus, a rigorous analysis by using the computer simulation technology is essential for obtaining their distortions by considering the entire production process characteristics. The rapid development of computer technology made it possible to analyze the heat transfer phenomena, deformation and phase transformation in the welded joint. For large shell structures, shell elements modeling contributed primarily to this development. But if a welding is done by multi-pass, shell elements whose thickness are unchangeable can hard to describe the local situation. Recently, it was researched how to introduce the imaginary temperature for V grooved multi-layer butt welding in strain-boundary method (a kind of shrinkage methodologies). In the present study, we formulated the imaginary temperature for the double bevel and double V groove by considering the thickness change of each pass through the bead and the thickness directions simultaneously and also demonstrated the feasibility of the formula by applying it to the thermal distortion analysis of the erection process of crane pedestal.

Key Words : Thermal distortion, FEM, Multi-pass, Butt welding, Shell element, K groove, X groove

1. 서 론

매년 컴퓨터 성능이 비약적으로 발전하여, 최근에는 선체블록과 같은 대형 각(shell) 구조물의 용접과 관련한 여러 가지 해석이 가능 하게 되었다. 특히 선체 건조 분야와 관련하여서는, 특수선의 건조 비율이 높아지면서 변형 공차를 매우 작게 허용하는 중요 의장품이 늘어나고 있는데, 이에 의장-선체간 용접변형 해석의 수요가 대폭적으로 증가하고 있다. 이 요구에 신속하게 대응하기 위해서는 컴퓨팅 속도의 발전 이외에 해석 방법론에 대한 개발도 뒤따라야 한다.

용접의 여러가지 물리적 현상 중 대형 구조물의 용접 열변형을 빠르게 해석할 수 있는 방법론으로는 변형을 경계법⁸⁾을 들 수 있다. 이는 다시 용접부의 고유한 수축을 하중으로 치환하여 적용하는 등가하중법¹⁾과 고온-상온간 열변형도를 내재시키는 수축법²⁾으로 구분할 수 있다. 전자는 잘 알려진 하중-변형 공식을 활용³⁾하여 간단한 구조물에서는 FEM 등을 이용하지 않고도 해를 얻는 데에 유용하다. 후자는 가상온도라는 스칼라 물리량을 사용⁴⁾하기 때문에, 모델링이 필요한 유한요소 해석에 유리하고, 실제와 같은 방향의 응력결과를 도출할 수 있다. 수축법에서 면외 변형을 얻는 방법은 알려진 SDB⁴⁾/STEP⁵⁾등의 방법에서는 상용 코드의 층간 온도

차를 활용하며, 상용 코드인 Weld-Planner²⁾ 등에서 요소의 offset을 조절한다.

각술한 방법론이 특히 선박과 같은 대형 각(shell) 구조물에 사용되는 경우에는 모델링에 사용하는 요소도 대부분 셸요소이다. 이 요소로 용접부를 모사할 때에는, 면내 용접부 면적에 대비하여 실제 모델링한 요소의 크기로 하중이나 온도를 조절할 수 있다. 그러나 면외방향의 굽힘변형에 대하여는 문제가 있을 수 있다.

선박 건조 공정시 외업에서 일어나는 대부분의 용접은 맞대기 형태이다. 만일 이 맞대기 용접이 단 한 패스로 개선부가 채워진다면, (수축법의 하나인 SDB법에서는) 단면의 고유수축이 있는 영역(Bead + HAZ)의 형상을 중립축을 중심으로 분석하여 하나의 인자쌍을 설계한다. 이 인자는 중립축으로부터 판두께 양방향으로 멀어지는 가중치(두께에 대한 평균은 1)가 반영된 무차원 수축비율로서, 그 평균은 수축을 모사하고 그 차이는 굽힘을 모사⁶⁾한다. 해석기구로 수축비율 인자의 쌍을 효과적으로 전달하기 위하여, SDB법에서는 이를 가상의 온도쌍으로 복합재료 셸 요소의 절점에 상하방향으로 대입하고, 용접재의 냉각 열변형도를 열팽창계수로 입력한다. 이후 본문에서의 '가상온도쌍'이란 단어는 그 편차가 용접부의 각변형과 정비례하도록 셸 요소 모델링을 위해 설계된 일종의 용접부 상하면의 수축비율을 지시하는 의미로 전개할 것이다.

그런데, 대부분 다층용접으로 이루어지는 맞대기 용접은 초기 패스에서 국부적으로 낮은 두께에 기인하여 큰 변형이 유발되므로, 같은 개선형상이라도 패스를 나눌수록 각변형이 커지는 것이 알려져 있다. V개선의 경우, 각 패스가 유발하는 가상온도쌍을 각 용접 패스가 진행된 직후의 높이별로 따로 도출(Fig. 1)한 뒤, 그 총합을 각 절점에 부여⁷⁾하는 방법이 이미 연구된 바 있다.

한편, 선각에 의장품 탑재시, 선각쪽이 평평하고 의장품에 개선이 있는 K개선의 형태가 많이 이용된다. 이 경우 전면부 용접의 각 패스가 진행된 직후의 단면에서, 각 패스의 상부 비드면을 판 방향과 평행하게 가정을 하더라도, 반대편의 개선 때문에 국부적인 두께를 상수로 정의할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 각 패스 별로 양쪽방향으로 증가하는 두께를 고려하여 K 및 그와 기하학적으로 좌우 대칭인 X개선에 대한 가상온도를 계산하는 방법을 제시하였다.

본 계산 과정이 정성적으로 옳음을 보이기 위하여, 일부 형상이 동일한 V, X, Y 개선 형상에서의 가상온도차 결과를 소개하였다. 또한 Crane Pedestal의 선각설치시 평탄도 확인을 위한 용접변형 해석사례를 소개하였다.

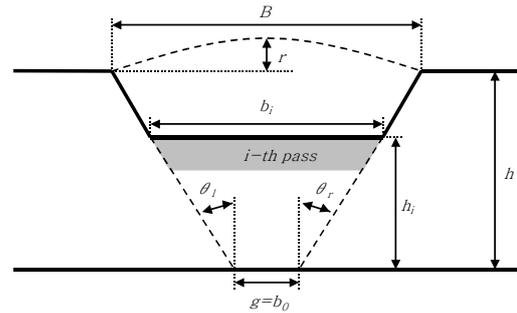


Fig. 1 The schematic diagram of the butt weld modeling (multi pass V groove)

Where,

- B : Breadth of the bead (mm)
- r : Height of the reinforcement (mm)
- b_i : Breadth of the bead after i^{th} pass (mm)
- h_i : Height of the bead after i^{th} pass (mm)
- h : Plate thickness (mm)
- g : Root gap (mm)
- θ : Groove angle (rad)

2. 다층 용접 K개선 가상온도 정식화를 위한 절차와 가정

용접부 단면 형상을 수학적으로 모델링 하기 위해 V개선에서 정의했던 가정들은 K 및 X개선의 정식화에도 동일하게 적용된다. 즉,

- 각 패스는 모두 동일한 단면적(A_{pass})을 갖는다.
- 모든 패스는 층방향으로 쌓여나간다.
- 각 패스가 만드는 HAZ의 면적은 무시된다. 그러나, 비드의 덧살(reinforcement)은 고려한다.
- 이중 판두께의 결합은 두꺼운 쪽이 챔퍼링(chamfering) 되었다고 가정하여 얇은 쪽을 기준으로 계산한다.
- 패스별 층간온도 차이가 유발하는 내부의 잔류응력에 기인한 변형차는 무시한다.

K개선의 가상온도 정식화 과정은 각 패스 별 두께 및 폭에 대한 변화를 반영해야 할 뿐만 아니라 상면 용접 후 가우징 작업에 의한 하면 용접 개선 면의 변화, 하면 용접에 의한 역방향 굽힘 등을 모사해야 하기 때문에 V개선의 용접보다 복잡한 과정을 거치게 된다. 따라서, K개선에 대한 가상온도의 정식화 과정은 다음의 4단계로 구분한다.

- 1) 상면 용접부에 대한 가상온도 정식화
- 2) 하면 용접부 가우징 처리 과정 모사
- 3) 하면 용접부에 대한 가상온도 정식화
- 4) 전체 가상온도의 합산

특별히 상면 용접부에 대한 가상온도 정식화는 세 부분으로 나누어 이루어진다. 이 구분은 일단 개선과 비드 공간이 만들어내는 형상이 용접 패스의 진행에 따라 각기 다른 (깊이에 따른 폭) 함수의 형태에 의하여 나누어 진다. 또한 개선면이 채워지는 사다리꼴 함수를 폭 함수로 사용하는 구간에 대해서도, 패스의 진행에 따라 (순간적인) 판 두께가 일정한 규칙에 의하여 높아지는 구간과, 판 두께를 채우는 패스에 대한 구간으로 나누어 진다.

3. 상면 용접부에 대한 가상온도 정식화

K개선 맞대기 다층용접과정을 Fig. 2와 같이 이상화하였다.

하면 용접부의 두께 $h_y(y)$ 는 다음과 같이 정의된다. 식(1)이 본 연구의 핵심을 나타내고 있는 부분으로써, 각 패스가 평행하게 쌓인다는 가정 하에서도, 개선형상에 의해 각 패스가 쌓일 때마다의 두께가 폭방향에 대하여 달라짐을 보여주고 있다.

$$h_y(y) = \begin{cases} 0 & : 0 < y < g \\ (y - g) / \tan \theta_2 & : g < y < g + h_L \cdot \tan \theta_2 \\ h_L & : y > g + h_L \cdot \tan \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

따라서, 식 (1) 가운데 부분을 해결하기 위하여는 얇은 한 층을 가정 한 용접패스를 다시 폭방향으로 잘게 나누어 고려해야 할 것이다. 본 연구에서는 이 과정에 대한 가상온도 도출과정을 식 (2)와 같이 정식화하였다. 이 과정에서는 기존 V개선 연구 결과에 대비하여, 패스가 정해지면 국부적인 두께가 정해지던 부분이 폭방향으로

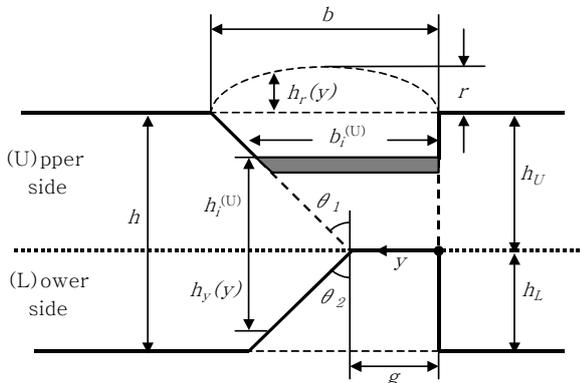


Fig. 2 The schematic diagram of the butt weld modeling (K, upper side)

Where, h_U : Upper side thickness (mm)
 h_L : Lower side thickness (mm)

변하는 두께를 적분하는 것으로 변경되었고, 결과적으로 정식화 과정은 중적분 계산을 필요로 하게 된다.

$$T_i^{K1} = \int_0^{b_i^{(U)}} \frac{1}{(h_i^{(U)} + h_y(y)) \cdot b} \times \left\{ \int_{h_1}^{h_2} \left(\frac{h_i^{(U)} + h_y(y)}{h} \mp \frac{4z}{h_i^{(U)} + h_y(y)} \cdot \frac{h}{h_i^{(U)} + h_y(y)} \right) dz \right\} dy$$

where, $h_1 = -\frac{h_i^{(U)} + h_y(y)}{2}$
 $h_2 = -\frac{h_i^{(U)} + h_y(y)}{2} + (h_i^{(U)} - h_{i-1}^{(U)})$ (2)

식 (2)에서 적분 식 내부의 부호 (±) 중 (-) 부호는 셸 요소의 top온도, (+) 부호는 bottom온도를 나타낸다. $h_i^{(U)}$ 과 $b_i^{(U)}$ 은 각각 i-패스 용접완료 후 상면 용접부의 비드 두께와 폭을 의미한다.

개선면을 채우기 직전까지의 pass수를 총 m이라고 하면, 그 직후 과정의 분석 및 정식화는 한 패스가 아닌 실제 판두께를 채우는 단면적에 대해서만 이루어졌다. 이것은 판두께 바깥에 있는 덧살영역 역시 패스수에 무관하게 한 차례에 걸쳐 수행할 것이므로, 덧살 가정의 분석을 쉽게 하기 위한 목적으로 세워진 정식화의 전략이다.

$$T^{K2} = \int_0^b \frac{1}{h_{sum}(y) \cdot b} \times \left\{ \int_{h_3}^{h_4} \left(\frac{h_{sum}(y)}{h} \mp \frac{4z}{h_{sum}(y)} \cdot \frac{h}{h_{sum}(y)} \right) dz \right\} dy$$

where, $h_{sum}(y) = h_U + h_r(y) + h_y(y)$
 $h_3 = -\frac{h_U + h_y(y)}{2}$
 $h_4 = -\frac{h_{sum}(y)}{2}$ (3)

여기서 함수 $h_r(y)$ 는 Fig. 2에 정의되어 있으며 덧살부의 형상을 나타내는 함수이다. 식(2)와 (3)에서 적분 구간은 해당 패스에서의 비드 두께와 폭의 시작 및 끝점으로 정의된다. 이상으로부터 상부 개선면을 채우기 직전까지 1~m^(U) 패스와 개선면을 채우는 패스의 판 두께 구간, 그리고 덧살부 가상온도를 합산하면, 식 (4)와 같이 셸 요소에 적용할 수 있는 K개선 상면 용접부 전체의 가상 온도를 얻을 수 있다.

$$T^{KU} = \sum_{i=1}^{m^{(U)}} T_i^{K1} + T_{m^{(U)}+1}^{K1} + T^{K2} \quad (4)$$

4. 하면 용접부에 대한 가상온도 정식화

상면 용접완료 후 하면의 가우징이 처리 과정의 개략도를 Fig. 3에 보이고 있다. 가우징 실시 후 변화된 개선면은 주어진 값 l_1, l_2, l_3 에 의해 결정된다고 가정한다. 이 경우, 하면 용접부에 대한 가상온도의 계산시에는 상면에 대한 용접이 이미 완료되어 있는 상태이므로, 루트면이 h_U-l_3 (Fig. 4)인 V개선의 공식⁷⁾을 그대로 적용할 수 있다. 이 계산결과를 K개선의 전면부 계산 결과와 유사하게 비드 공간 내부와 외부의 가상온도 계산결과를 각각 T^{K3}, T^{K4} 라고 하면, 하부 용접이 만들어내는 용접부 형상의 가상온도 결과는 최종적으로 식

(5)와 같다.

$$T^{KL} = \sum_{i=1}^{m^{(L)}} T_i^{K3} + T_{m^{(L)+1}}^{K3} + T^{K4} \tag{5}$$

상면과 하면 용접부에 대한 각각의 가상온도 식(4)와 (5)를 더하면 K개선의 용접부에 대한 가상온도를 얻을 수 있다. 단, 용접부 하면의 가상온도 계산시에 V개선의 규정(개선면이 TOP)을 따랐다면, 최종 셀 요소에 그 결과를 적용할 때에는 K개선의 상면을 기준으로 식 (5)의 Top/Bottom 결과를 바꾸어서 더해져야 할 것이다.

$$\bar{T}^K = \begin{bmatrix} T_{Top}^K \\ T_{Bottom}^K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{Top}^{KU} + T_{Bottom}^{KL} \\ T_{Bottom}^{KU} + T_{Top}^{KL} \end{bmatrix} \tag{6}$$

5. 다층용접 X개선으로의 확장

3, 4장에서 유도한 K개선 가상온도 공식을 응용하면 X개선의 형상에 대해서도 유사하게 가상온도를 정식화할 수 있다. X개선은 기하학적으로는 K개선의 좌우대칭형상이다. 따라서 일단 식 (2)와 (3)에서 y방향(폭방향) 적분구간은 K개선에 비해 두 배가된다. 여성을 모사하는 형상함수 역시 K개선에서 폭만 확장된 타원함수 등을 그대로 사용할 수 있다. X개선의 하면 용접 전 가우징에 대한 개선공간의 모사에 대하여도, 해당 형상이 좌우 대칭 및 삼각형이라는 가정을 그대로 유지하면, K개선보다도 더 적은 변수로 가우징 공간을 정의할 수 있다.

본 연구에서 제시된 계산방법 중 전면부 용접에 대한 부분은 같은 개선 공간(및 동일 패스 수)을 갖는 V개선 (Fig. 5) 대비 하부의 경사 두께로 인하여 직관적으로 더 작은 가상온도차 (Table 1)를 입력인자로 가져야 할 것이다. 또한 루트면이 긴 Y개선(혹은 chipping, Fig. 5)에 대비해서는 더 큰 편차를 보여야 한다.

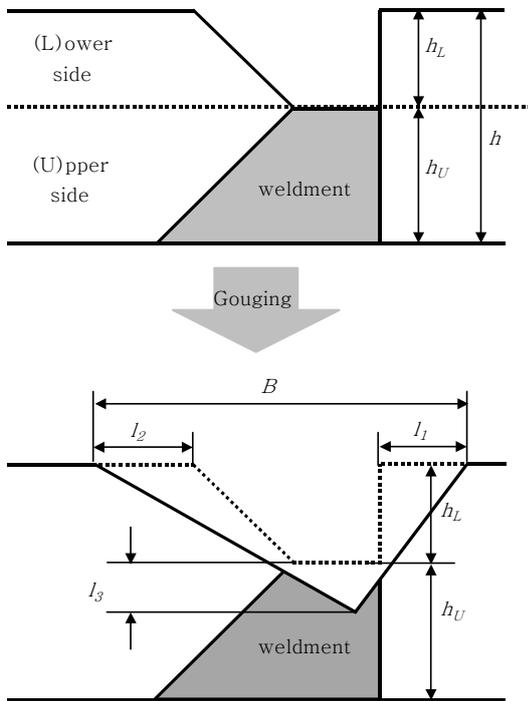


Fig. 3 Definition of the geometrical quantities after the typical gouging operation

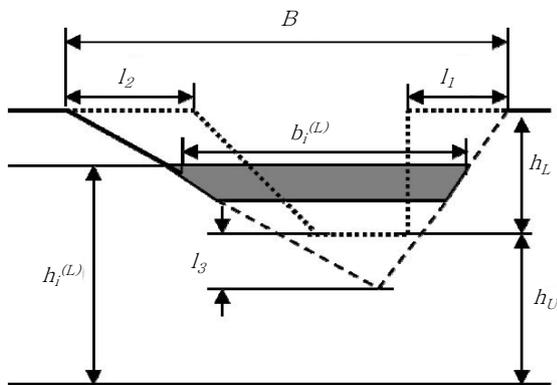


Fig. 4 The schematic diagram of the butt weld modeling (K, lower side)

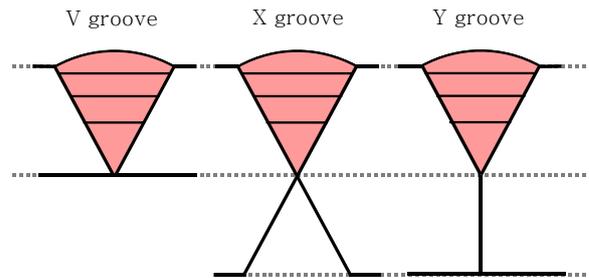


Fig. 5 Various weldment types having a same groove shape

Table 1 Imaginary temperature differences for various types having a same groove shape & a pass number

	Groove type		
	V	X	Y
Temp _{TOP}	1.679	1.459	0.831
Temp _{Bottom}	-1.179	-1.066	-0.438
ΔT	2.858	2.525	1.269

이를 검토하기 위하여 가상 37t(전면부 깊이 25mm 및 이면부 깊이 12mm)의 90도 개선형상에 대하여, 본 연구결과에 의한 가상온도 입력인자 및 25t V개선과 37t Y개선의 기존 가상온도 계산결과를 Table 1에서 비교하였다. 한 패스의 단면적을 위보기 수준에 해당하는 약 24mm² (25pass)으로 하여 비교적 많은 패스를 두었고, 갭이 없다고 가정하여 결과 차이가 쉽게 드러나도록 비교 계산을 설계하였다.

Table 1의 결과는 미리 예상한 바와 같이 웰 요소의 굽힘을 모사하는 가상온도차의 크기가 V > X > Y의 순서로 계산되어 있다. 본 논문에서 계산 방법으로 제시한 X(K)개선의 굽힘해석을 위한 입력인자 설계방법은 적절한 효율을 보여준다고 할 수 있다.

6. 사례 연구

해양구조물의 top side에 탑재되는 의장품들은 대체로 정밀한 작업을 요하는 설비들이 많으므로 일반적으로 허용되는 공차가 매우 작다. 따라서 탑재 전 용접에 의한 기계 가공면(Fig. 6)의 변형량을 사전에 정밀하게 예측하고 예상 문제에 대해 미리 대응하는 것은 매우 중요한 과정이다. 본 연구에서는 크레인의 pedestal을 탑재하는 과정에서 발생하는 용접 변형량이 어느 정도 발생하는지를 예측하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 이때 pedestal이 탑재되는 부분은 K개선 면으로 가공된 후 용접이 수행되므로 본 연구에서 제시된 K개선의 가상온도 식을 적용하였다. Crane의 레일면에 발생하는 연직편차를 예측한 사례를 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과는 탑재전에 사전 역가공량을 결정할 수 있

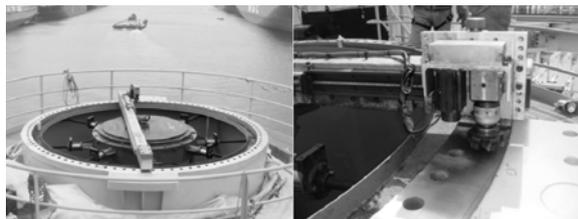


Fig. 6 Fabrication of pedestal crane for its flatness

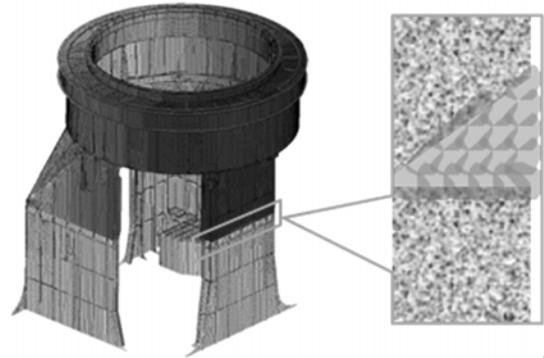


Fig. 7 The thermal distortion of a crane pedestal predicted by suggested methodology

도록 해주므로, 탑재 이후 도크 내에 밀링장비가 들어갈 필요가 없어져서, 건조 공정 시수 및 비용을 크게 절감할 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 기존의 다층 맞대기 V개선 용접부에 대한 가상온도의 개념을 확장하여 해양구조물의 Top side의 탑재에 주로 사용되는 K/X개선 형상에 대한 가상온도를 정식화 하였다.

정식화된 각변형 유발 가상온도 인자가 유효함을 보이기 위하여 개선형상이 동일한 V 및 Y 개선의 기존 정식화 결과와 비교하였고, 그 순서가 직관을 통한 순서와 동일함을 보였다.

마지막으로 K개선의 가상온도 수식을 적용 하여 크레인의 pedestal 탑재 과정 중 발생하는 용접 변형량을 예측한 결과를 보였다.

참 고 문 헌

1. Changdoo Jang, Seungil Seo and Daeun Ko : A Study on the Prediction of Deformations of Plates Due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis, *Journal of Ship research*, **13-1** (1997), 22-27
2. Mohd Shahar Sulaiman, Yupiter HP Manurung, Esa Maruman, Mohammad Ridzwan, Abdul Rahim, Mohd Ridhwan Rezda, Robert Ngendang Ak. Lidam, Sunhaji Kiyai Abas, Ghalib Tham and Chan Yin Chau : Simulation and Experimental study on Distortion of Butt and T-joints using WELD PLANNER, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **25-10** (2011), 2641-2646
3. Yunsok Ha, Jinhyuk Yang, Seokhee Won and Myungsu Yi : Development of Thermal Distortion Analysis Method Based on Inherent Strain for TMCP Steels, *Journal of KWJS*, **26-3** (2008), 61-66

4. Yunsok Ha, Sihoon Cho and Taewon Jang : Development of Welding Distortion Analysis Method Using Residual Strain as Boundary Condition, Materials Science Forum, **580~582** (2008), 649-654
5. Sangbeom Shin and Dongju Lee : Control Technology for Excessive Welding Distortion of the Deck House during Manufacturing Process, Metals and Materials International, **17-1** (2011), 123-130
6. Koichi Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980, 245
7. Yunsok Ha, Jinhuk Yang : Development of Distortion Analysis Method for Multi-pass Butt welding Based on Shell Element, Journal of KWJS, **28-1** (2009), 68-73
8. Sungku Kang, Jongsoo Yang : Overview of Research Works Regarding Welding Distortion, Journal of KWJS, **30-1** (2012), 37-42