

다층 맞대기용접의 셸 요소 기반 변형해석법 개발

하 윤 석*† · 양 진 혁*

*삼성중공업 산업기술연구소 용접연구

Development of Distortion Analysis Method for Multi-pass Butt-welding Based on Shell Element

Yunsok Ha*† and Jinhyuk Yang*

*Welding Research Part, Institute of Industrial Technology, SHI, Geoje 656-710, Korea

†Corresponding author : yunsok.ha@samsung.com

(Received August 18, 2009 ; Revised October 6, 2009 ; Accepted December 16, 2009)

Abstract

Ship Blocks are assembled by welding, and among them, welding between large blocks (Pre-erection stage) is used as feature of butt. In this process, local material has a experience of thermal cycle and become finally shrunk. As for inconsistency of shrunk weldments and adjacent regions, ship structure would be deformed locally and globally. Thermal distortion analyses are done for control of these processes, and methodologies capable of ship block size among them are using 2-D shell element in FEM. A shell element takes charge of plate, so it has its thickness which is important for angular distortion by welding. By the way, a butt-welding consists normally of several passes, and weldment thickness are different at each pass. If a calculated final one-time welding shrinkage is acting on the shell element whose thickness is same as it of plate, then deformation value must be underestimated. This research developed a methodology that total deformation after multi-pass welding can be analyzed by one time at shell element having original thickness of its plate. We use the SDB thermal distortion analysis method and verified by several experiment. The both experimental and analysis results showed good agreements.

Key Words : Ship block, Thermal distortion, FEM, Mutliti-pass, Butt welding, Shell element, Plate thickness, SDB, Angular distortion

1. 서 론

선박 건조시 내업의 용접 형태의 특징이 필릿(fillet)이라고 한다면, 블록간 용접이 이루어지는 외업에 대하여는 맞대기(butt) 용접이 특징이다. 용접이라는 작업이 항상 열변형을 수반하기 때문에 비교적 작은 크기로 모델링이 가능한 내업 생산품에 대하여는 정도제어의 방법으로 열변형 해석이 수행되어 왔다. 그런데 현재 선체 블록급에 해당하는 모델에 대해서도 용접 변형 해석을 위한 모델링 전산화¹⁾ 및 해석의 신속화²⁾가 어느 때보다도 빠르게 이루어지고 있어서 외업의 정도제어에도 용접변형 해석의 결과들이 큰 역할을 하고 있다. 이

를 가능하게 하는 몇가지 방법론 중의 하나가 유한요소 해석 내에서 선체구조물의 모델링에 셸(shell)요소를 사용하는 것인데, 선체가 대부분 후판으로 이루어진다고 하더라도 그 두께는 판폭이나 판장에 비해 일반적으로 1/100 이하이므로, 2차원 요소를 선택했다는 것이 공학적인 큰 무리로 이어지지 않는다.

열변형 해석시 쉽고도 신속한 모델링에 대한 인프라가 갖추어지면, 이제 용접부를 구성하는 절점에 어떠한 방식으로 입열 후의 수축을 모사할 것인지에 대한 경계조건을 연구하여야 한다. 그런데 외업에 적용되는 맞대기 용접의 경우 특수한 소수의 사례를 빼면 판이 얇은 경우라고 하더라도 최소 3패스 이상의 다층으로 이루어진다. 일반적으로 동일한 두께라도 용접자세에 따라 표

준작업시 패스 수는 두 배 이상의 차이를 보일 수 있고 그 차이는 변형의 차이를 만든다는 것이 경험적으로 알려져 있다. 즉, 채워 넣는 비드량은 동일하지만 한 패스에 만들어지는 비드 단면적의 넓이 차이에 의하여 변형이 달라지는 것이고, 이는 잘게 여러번 용접할수록 재료표질면에서 좋아지는 것과 반비례하여 변형측면에서는 그 양이 커지는 것으로 알려져 있다. 특히 그러한 변형량 변화의 특징은 용접선에 수직한 방향으로의 굽힘변형에서 가장 크게 발현된다는 것이 경험적으로 알려져 있으나, 현재 셸요소를 이용하여 맞대기를 해석하는 방법론은 비드의 단면 기하정보만을 이용하므로 패스 수에 대한 반응을 해주지 못하고 있다. 이 경우 대략적인 평균 변형량을 도출하는 것이 아니라, 무의미하게도 전 비드영역을 1패스로 용접하는 것으로 가정된 상황에서의 변형량이 도출된다.

셸요소는 두께방향으로는 차원이 없고 단지 상수의 두께정보만을 갖고 있다. 다층 용접의 경우, 특정 패스의 용접이 끝났을 때 그 용접에 대한 변형은 용접부에 누적된 그 단계까지의 두께에 의해서 결정된다. 그런데 판의 굽힘강성은 두께의 세제곱에 해당하므로 용접수축을 담당하는 비드는 층방향으로의 각 영역이 굽힘에 있어서 매우 다른 조건에서 그 역할을 담당하고 있다. 그러나 해석에서 이를 담당하는 셸요소는 용접이 완료된 후의 두께와 비슷하다고 할 수 있는 인접 판의 두께를 속성으로 지니고 있으므로, 비드형상으로부터 추출된 해석의 입력인자는 평균적으로 자신이 굽힘에 역할을 담당했던 조건보다 매우 강성이 커진 상태에서 해석이 이루어지게 된다.

본 연구는 셸요소를 사용하여 대형화된 모델링에서 이 부분에 대한 해석이 합리적으로 이루어지도록 해석의 입력인자가 패스 수를 반영하여 설계되도록 고안하였다. 이렇게 굽힘량이 나오도록 설계하는 과정에서 수축이 과장되지 않게 하는 부분 역시 배려되었으며, 실험으로는 정성적 경향을 확인하기 위한 동일두께 패스 수 변경 실험과, 정량적 정확성을 판단하기 위하여 80t 후판처럼 50여 패스가 필요한 맞대기 용접에 대하여 해석과 실험을 병행하였다.

2. 변형도 경계법

셸요소를 사용하여 구조물의 용접변형을 평가하는 방법은 긴 역사를 가진 등가하중법³⁾이 가장 대표적이다. 등가하중법은 용접부의 수축을 모사하기 위한 수축력을 결정하기 위하여, 고유변형도를 사용하거나 실험에서 구한 총변형도를 적분한다. 비구속 시편상태에서는 두 변형도가 동일하고, 구속상태라고 하더라도 강의 탄성

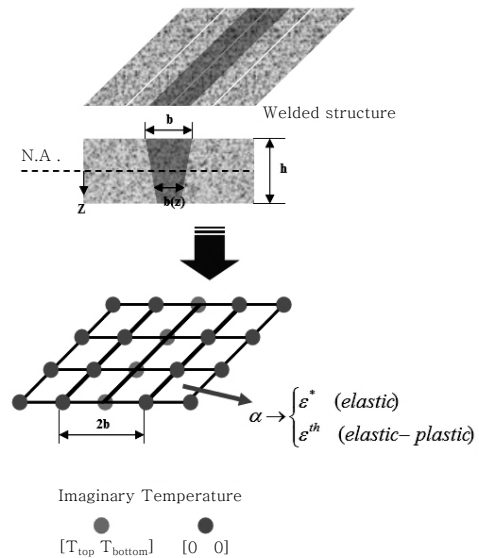


Fig. 1 A Section of welded joint and its idealization in SDB Method

계수가 매우 큰 관계로 유한요소해석의 변형값은 유사하게 도출된다. 본 연구에서는 최근에 상변태 및 재료 하드닝을 반영하여 정밀하게 계산되고 있는 고유변형도⁴⁾⁵⁾를 바탕으로 하며 입력하중을 스칼라로 받아 내적수축에 의한 응력장의 도출도 가능한 변형도 직접 경계법(SDB Method)²⁾를 사용하여, 제시한 문제를 해결하려고 한다.

길이방향으로 용접부가 일정하다고 가정하였을 때, 이 해석법의 입력인자는 Fig. 1과 관련하여 식 (1)과 같다. 고유변형도는 가상의 물성치(열팽창계수)로 대입되어 있다. 여기에 셸요소 절점에 대하여 상용코드가 지원하는 상/하로 다른 온도의 경계조건을 활용하면, 식 (1)의 평균값은 용접부의 수축을, 그 차이는 굽힘을 모사⁶⁾하게 된다. 용접부 인근 절점에는 역시 가상의 온도의 0도가 부여되어 열영향부의 범위를 설정하므로, 본 해석법은 요소 분할단계에서 열영향부를 미리 고려하여야 한다.

$$T_{top} = \frac{1}{b \times h} \times \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} b(z) \cdot \left(1 - \frac{4z}{h}\right) dz \quad (1)$$

$$T_{bottom} = \frac{1}{b \times h} \times \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} b(z) \cdot \left(1 + \frac{4z}{h}\right) dz$$

3. 다층용접용 가상온도 정식화

3.1 굽힘변형

본 연구에서는 맞대기 다층용접의 단면을 Fig. 2와 같이 이상화하였다. 개선각으로 인하여 실제로는 다층

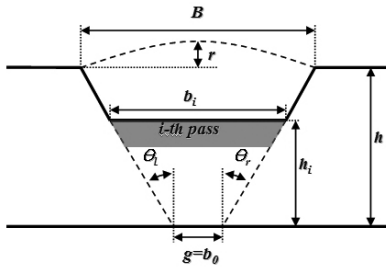


Fig. 2 The standard section of multi-pass butt-welding

용접의 마지막으로 갈수록 한 패스가 한 층을 모두 담당할 수는 없는 등 용접과정을 이상화하는 것은 쉽지 않으나, 여기서는 다음과 같은 가정들이 사용되었다.

- 각 패스는 모두 동일한 단면적(A_{pass})을 갖는다.
- 모든 패스는 층방향으로 쌓여나간다.
- 각 패스가 만들어내는 HAZ의 면적은 무시된다. 그러나 비드의 덧살(reinforcement)은 고려한다.
- 덧살부로 인한 굽힘은 국부적인 비드 높이가 아닌 판두께의 높이에 해당하는 강성의 지배를 받는다.
- 이중 판두께의 결합은 두꺼운 쪽이 챔퍼링(chamfering)되었다고 가정하여 얇은 쪽을 기준으로 계산한다.
- 패스별 층간온도 차이가 유발하는 내부의 잔류응력에 기인한 변형차는 무시한다.

Fig. 2에서와 같이 i -번째 패스가 진행되었을 때에는 두 판의 굽힘변형을 진행하는 두께인자는 h_i 이고 폭은 b_i 이다. 용접전 비드 공간의 기하학적 정보만으로 i -번째 패스 후의 비드 폭과 두께정보는 사다리꼴 넓이 공식으로부터 2차 방정식의 해로 식 (2)와 같이 도출할 수 있다.

$$i \times A_{pass} = \frac{1}{2} \times h_i \times (2g + h_i \times (\tan \theta_r + \tan \theta_l)) \quad (2)$$

$$\therefore h_i = \frac{-g + \sqrt{g^2 + 2iA_{pass} \times (\tan \theta_r + \tan \theta_l)}}{\tan \theta_r + \tan \theta_l}$$

$$\therefore b_i = \sqrt{g^2 + 2iA_{pass} \times (\tan \theta_r + \tan \theta_l)}$$

이제 최종두께에서 변형을 맞추기 위하여 각 패스의 용접이 실시된 이후 그 두께에 대하여 가상의 온도쌍을 구하고, 이 값을 식(3)과 같은 상사의 과정만 거쳐서 최종적으로는 판두께로 이루어진 모델링에 적용시킨다. 식 (3)의 경우, 맞대기 용접간 루트갭이 없는 경우에는 내부의 어떤 패스 직후라도 얇은 삼각형이 되어 계산결과가 '1'이 된다.

최종 패스 수를 n 이라고 하고, 판두께의 강성 지배를 받는 덧살부와 자체 비드두께의 강성 지배를 받는 일반 비드부를 분리하기 위하여, 다시 내부 비드 공간을 채우기 직전까지의 패스 수를 m 으로 두면, 1~ m 패스는 식 (4)와 같이 해석용 가상온도를 구할 수 있다. 이때, 식(1)의 '1'에 해당하는 부분은 수축을 담당하는 부분인데, 단계별로 과장된 굽힘으로부터 도출된 가상온도를 수축에도 그대로 적용할 필요는 없다. 따라서, 식 (4)에서는 일단 '0'으로 두고 다음절에서 이 부분을 완성할 것이다.

$$f_i = \frac{b_i}{B} \times \frac{h}{h_i} \quad (3)$$

$$T_{top} = \frac{f_i}{h_i \times b_i} \times \int_{-\frac{h_i}{2}}^{\frac{h_i}{2}-h_{i-1}} (b_i + \frac{z + \frac{h_i}{2}}{h_i - h_{i-1}} \times (b_{i-1} - b_i)) \times (-\frac{4z}{h}) dz$$

$$T_{bottom} = \frac{f_i}{h_i \times b_i} \times \int_{-\frac{h_i}{2}}^{\frac{h_i}{2}-h_{i-1}} (b_i + \frac{z + \frac{h_i}{2}}{h_i - h_{i-1}} \times (b_{i-1} - b_i)) \times (\frac{4z}{h}) dz$$

($1 \leq i \leq m$)

$$h_0 = 0$$

$$b_0 = g \quad (4)$$

$m+1$ 패스 이후부분에 대해서는 판두께 요인은 동일하다고 하더라도, 깊이방향으로의 폭함수 $b(z)$ 를 Fig. 3과 같이 선형구간과 원형구간⁷⁾으로 나누어 기술되어야 한다. 따라서 총합을 구하기 위한 단계별 표현은 무의미하지만, $b(z)$ 함수의 특성에 따른 두 항으로 나누어진 적분 계산이 필요하다. 가상의 상부온도 및 하부온도를 벡터로 표현하고 복호는 순서대로 상/하를 지칭한다고 하면, 식 (4)에서 제외된 덧살이 포함된 부분의 굽힘을 맞추기 위한 가상온도는 식 (5)와 같다. 식 (5)는 기준분모($h \times B$)가 변하지 않는 상태이므로, 식 (3)의 지배를 받지 않는다.

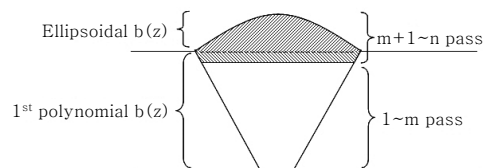


Fig. 3 A concept drawing of butt-welded section for dividing integration intervals

$$\vec{T}_{m+1 \sim n} = \frac{1}{h \times B} \times \left(\int_{-\frac{h}{2}}^{-\frac{h}{2}+h-h_m} (B + \frac{z+\frac{h}{2}}{h-h_m} \times (b_m - B)) \times (\mp \frac{4z}{h}) dz + \int_{-\frac{h}{2}-r}^{-\frac{h}{2}} \frac{2b}{r} \times \sqrt{r^2 - (z + \frac{h}{2})^2} \times (\mp \frac{4z}{h}) dz \right) \quad (5)$$

이제 식 (4)와 식 (5)를 더하면 식 (6)과 같고, 굽힘에만 관심이 있는 경우는 식 (6)을 SDB 해석에 그대로 사용하여도 무방하다. 용접 단면 기하 정보 및 용접재의 물성정보가 동일할 때, 굽힘량의 크기는 식 (6)의 두 원소간 차이인 식 (7)에 비례하며, 같은 영역을 몇(n)패스로 나누어서 용접하느냐에 따라 이 값은 수십 배까지도 차이를 보일 수 있다.

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} T_{top} \\ T_{bottom} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^m \vec{T}_i + \vec{T}_{m+1 \sim n} \quad (6)$$

$$\Delta T = T_{top} - T_{bottom} \quad (7)$$

3.2 수축변형

용접부의 수축에 저항하는 인자는 굽힘의 판두께 인자처럼 초기 패스의 수축이 최후의 수축량에 지배적인 결과를 주는 것이 아니라, 단지 그 두께에 비례하여 줄어들어 간다. 각 패스별로의 해당 두께에서의 적분은 불필요하며, 마치 단일 패스의 용접처럼 한번만 계산하면 된다. SDB 해석의 가상의 온도장은 평균값이 수축을 가리키므로, 최종 완성된 형태의 온도장은 식 (8)과 같이 수축량 위주로 계산된 형태에 식 (7)의 원소간 차이의 절반을 각기 더하고(용접면) 빼준(용접 이면) 값이 된다.

$$\vec{T} = \frac{1}{h \times B} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (B + (\frac{z}{h} + \frac{1}{z})(g - B)) dz \pm \frac{\Delta T}{2} \quad (8)$$

4. 실험을 통한 검증

4.1 정성적 평가

본 연구의 주안점은 같은 단면기하를 가진 용접부라도 패스 수에 의해 다른 변형을 보이는 것을 웰요소를 사용한 유한요소해석으로 모사해내는 것이다. 수축량은 다층으로 이루어진다는 것의 영향을 크게 받지 않기 때문에 결국 본 연구의 핵심은 식 (7)을 검증받는 것에 있다. 이를 위하여 용접재나 해석법의 정도 등의 영향을 받지 않고 순수하게 패스 수 조절에 의한 변형비율

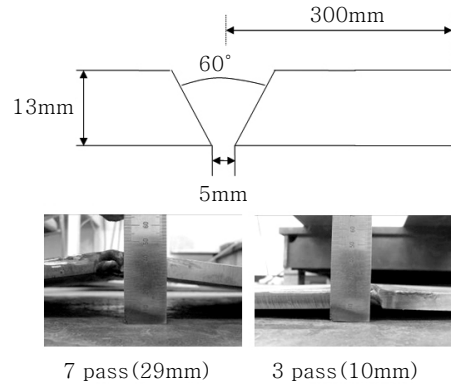


Fig. 4 Deformation aspect according to total pass number

Table 1 The results comparison between experiments and analyses (I)

Plate thickness(mm)	13	
Total Pass	3	7
Measured distortion(mm)	10	29
Distortion growth rate(%)	-	190 %
T _{top}	1.236	1.898
T _{bottom}	0.469	-0.330
ΔT	0.767	2.228
ΔT Growth rate(%)	-	190.5 %

을 파악하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험이 기획되었다. 두 스테인리스강(SUS304)의 시편은 동일한 단면에 동일한 용접재(SUS308)로 패스 수의 차이만 두어 용접되었고, 많은 패스 수로 작업된 시편에 대하여 적은 패스 수로 작업된 시편의 굽힘량의 결과를 Fig. 4 내의 사진 및 Table 1에 정리하였다. 굽힘량을 평가하기 위한 실험이므로, 최종 변형된 용접구조물을 얻어서 처짐량을 구하여 비교 대상인 굽힘량으로 삼았다.

서로 다른 두 층 패스수에 의한 같은 용접구조물은 해석에 들어갈 입력인자의 비가 실험과 거의 동일한 수치로 계산된 것을 확인할 수 있다. 또한 서로간 3배에 달하는 실험값의 차이로부터 층 패스수에 대한 변형량의 차이는 재료나 입열량 등 그 어떤 전통적인 인자보다 월등히 중요한 요인이라는 것을 확인할 수 있다.

4.2 정량적 평가

이제 본 연구에서 제시한 방법론이 해석을 통해 정량적인 부분을 얼마나 만족시키는지도 확인하기 위하여 새로운 실험이 기획되었다. 변형량 수치가 나오는 과정은 해석법 자체의 정도 및 용접재의 불균질성 등 정도

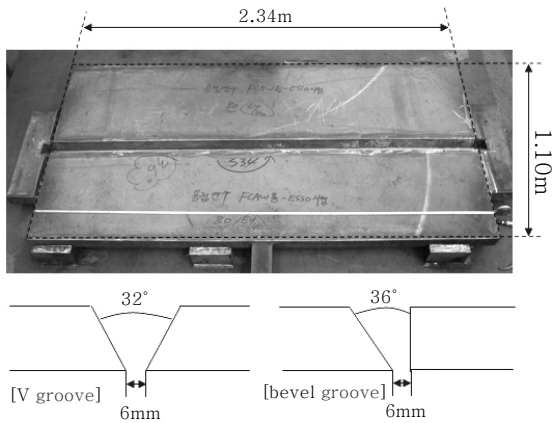


Fig. 5 Thick plate specimen (80t)

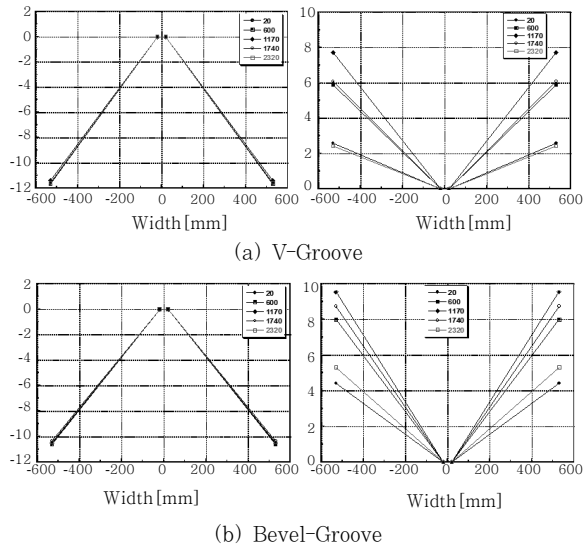


Fig. 6 Level deflection of specimen before/after welding

를 절대비교하기에 어려운 요인이 많다. 하지만 많은 수의 패스에서 변형량이 매우 커지고 있는 것을 정성적 평가에서 확인한 바, 50패스에 육박하는 후판에서는 외부 노이즈들의 영향이 상대적으로 작아질 것이라고 가정하고, 실험과 해석을 병행하였다. 준비된 시편(Fig. 5)은 80t의 EH강재 두 쌍(V개선, bevel 개선)이며, 그에 사용된 용접재(CSF-71S)에 준한 고유변형도 계산이 선행되었다.

시편 처짐의 해석결과는 양단 탭피스의 효과로 중앙부에서 가장 크고, 따라서 Fig. 6의 각 개선별 용접후 용접선 길이 방향에 대한 굽힘변형량의 가장 큰 값이 중앙부가 된다. 이 값을 용접전 역세팅량과 더하게 되면 실험의 최종변위가 된다. 또한 실험의 초기 세팅시, 극후판인 시편이 뒤틀림에 민감할 것에 대비하여, 70% 이상의 용접이 진행될 때까지 폭방향 양단에 정반과 가

Table 2 The results comparison between experiments and analyses (II)

(mm)	Experimental result	By assumption as 1-pass	By developed methodology
V	> 19.6	2.7	26.1
bevel	> 20.1	3.0	29.3

접(Fig. 5)을 하였다가 제거하였다. 따라서 최종 계측된 계측값은 실제 아무 저항이 없는 상태(Table 2에서는 부등호로 표시)에 비해 저평가된 값이다. Fig. 6의 결과는 Table 2로 정리되었다. 예를 들어 Table 2의 V-개선 실험계측값 19.6mm는 Fig. 6의 사진 역세팅량 11.9mm와 최종 중앙부 변형량 7.7mm의 합이다. Table 2의 해석결과를 보면, 다층용접에 대한 본 방법을 변형도경계법에 적용하기 전인 기존의 단일 패스 용접으로 가정하여 해석한 결과는 매우 적은 변형량을 도출하고 있다. Table 2 가장 좌측열의 해석결과는 본 연구에서 제안한 방법으로 해석한 결과이다. 이 값은 변형량의 order가 실험계측값과 유사할 뿐 아니라, 그 편차가 큰 쪽에서 나타나고 있는 것은 앞서 기술한 정반과의 가접을 고려하면 합당하다고 할 수 있다.

5. 사례 연구

선체블록을 구성하는 주판이 후판인 경우, 혹은 합판 과정에서 판을 뒤집기 어려운 특수한 경우에 대하여 I 개선의 잠호용접(SAW)이 포기되고 V개선으로 FCAW가 수행될 수 있다. 이 경우 강성이 갖춰지지 못한 주판에 두께에 비대칭인 V개선의 용접은 과도한 면외변형을 일으키게 된다. 이를 해결하는 방법으로 용접을 약 3패스만 수행하고, 주판용접선에 스캘러된 횡부재의 필릿용접으로 선체블록의 강성이 만들어진 후, 나머지 비드를 용접하는 것을 생각할 수 있다.

이 때, 블록이 형성된 후 잔여패스에 의한 용접변형을 미리 예측할 수 있다면, 교정에 대한 작업효율에 따라 전/후 패스 수의 비율을 사전에 합리적으로 선정할 수 있을 것이다. Fig. 6은 60t 주판에 대하여 잔여 17패스(총 21패스 예상)가 되는 비드 공간에서 4패스까지 용접이 이루어진 상황을 남겨둔 상황의 단면 모식도이다. 이 단면을 기준으로, 기존에 용접된 부분은 이미 교정되어 다음 공정으로 진행된 것으로 가정하면 식 (6)을 식 (9)와 같이 5패스 이후 부분만을 계산하여 블록 모델링에 반영할 수 있다.

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} T_{top} \\ T_{bottom} \end{bmatrix} = \sum_{i=5}^m \vec{T}_i + \vec{T}_{m+1 \sim 21} \quad (9)$$

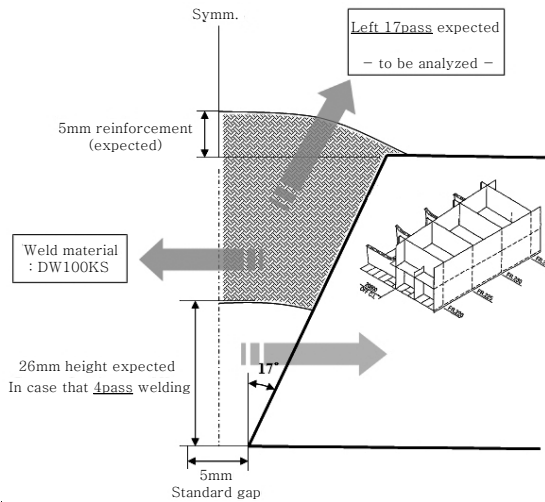


Fig. 7 A Section of butt-welding line in 60mm ship block plate

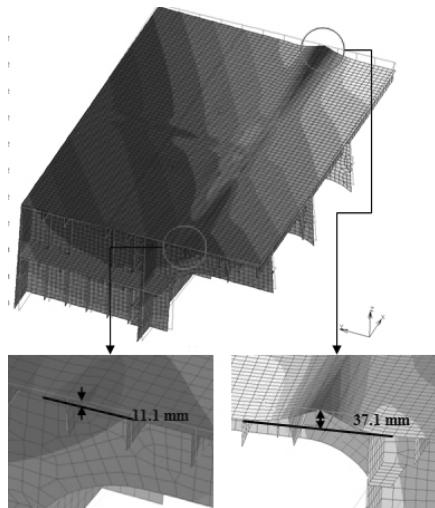


Fig. 8 A result of ship-block distortion analysis by multi-pass butt welding

Fig. 7에 잔여 패스에 대한 블록변형결과를 보였다. 사후에 교정하기에 부담스러울 정도의 변형이라고 판단이 된다면, 내부재 조립전의 용접 패스 수를 더 늘리는 결정이 가능할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

1) 대형 셸 구조물의 열변형 해석법에 특화된 변형도 경계법을 근간으로 하여, 맞대기 다층용접의 수축 및 굽힘변형을 해석할 수 있는 적정 입력값의 설계를 하였다.

2) 이에, 동일 비드홈에 대해서도 패스 수를 어떻게 분할하느냐에 따라서 최종 변형이 달라질 수 있는 현상을 해석적으로 보일 수 있게 하였다.

3) 본 방법론을 통한 분석결과들은 정성적/정량적인 부분에서 비교실험을 통하여 좋은 일치율을 보였다.

4) 후관 외관을 포함한 블록의 seam 부분의 변형제어 과정에 본 방법론을 활용한 부분을 소개하였다.

후 기

본 연구의 내용은 2009 춘계 대한용접접합학회 학술 발표회에서 공개되었고, 이에 당시의 토의 내용 등을 참고로 하여 보완되었다.

참 고 문 헌

1. Junggoo Park, Heeyoung Heo, Yunsok Ha, Taewon Jang, Kyeonghee Han, Sangheon Lee, Songsoo Moon and T.K. Narayan : Development of Automatic Computer-Aided Engineering System for Weld Distortion Analysis in Ship Production, 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Houston, Texas, United states of America, ©2007 American Bureau of Shipping
2. 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
3. Changdoo Jang, Seungil Seo and Daewun 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
4. Yunsok Ha and Changdoo Jang : An Improved Inherent Strain Analysis for Plate Bending by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 17-2 (2007), 139-144
5. Yunsok Ha, Changdoo Jang, Jongtae Kim and Hyungsuk Mun : Analysis of Post-Weld Deformation at the Heat-Affected Zone Using External Forces Based on the Inherent Strain, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 8-4 (2007), 56-62
6. Koichi Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980, 245
7. Yongsuk Seo and Sangmin Han : Fatigue Strength Assessment and Improvement of Butt Welding Bead, Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea (2005), 192-197