

선체 Shell FE 모델 내 용접부의 Solid 요소변환 자동화 시스템

유진선^{*,†} · 하윤석^{*}

^{*}삼성중공업 생산연구센터 용접연구파트

Pre-processing System for Converting Shell to Solid at Selected Weldment in Shell FE Model

Jinsun Yoo^{*,†} and Yunsok Ha^{*}

^{*}Welding Research Part, Samsung Heavy Industries CO., LTD., Geoje 53261, Korea

[†]Corresponding author : js84.yoo@samsung.com

(Received March 15, 2016 ; Revised April 12, 2016 ; Accepted April 18, 2016)

Abstract

FE analyses for weldment of ship structure are required for various reasons such as stress concentration for bead tow, residual stress and distortion after welding, and hydrogen diffusion for prediction of low temperature crack. These analyses should be done by solid element modeling, but most of ship structures are modeled by shell element. If we are able to make solid element in the shell element FE modeling it is easily to solve the requirement for solid elements in weld analysis of large ship structures. As the nodes of solid element cannot take moments from nodes of shell element, these two kinds of element cannot be used in one model by conventional modeling.

The PSCM (Perpendicular shell coupling method) can connect shell to solid. This method uses dummy perpendicular shell element for transferring moment from shell to solid. The target of this study is to develop a FE pre-processing system applicable at welding at ship structure by using PSCM. We also suggested glue-contact technique for controlling element numbers and element qualities and applied it between PSCM and solid element in automatic pre-processing system. The FE weldment modeling through developed pre-processing system will have rational stiffness of adjacent regions. Then FE results can be more reliable when turn-over of ship-block with semi-welded state or ECA (Engineering critical assessment) of weldment in a ship-block are analyzed.

Key Words : Ship structure, Welding, PSCM, Glue-contact

1. 서 론

용접은 선박 제조의 기본적인 작업중의 하나로서, 재료의 고온 이력이 동반됨을 가장 큰 특징으로 한다. 이 특징으로 인하여 용접이 완료된 영역은 큰 잔류응력이 남을 수 있고, 용접부의 압축하려는 성질에 의하여 선체 블록의 정도가 훼손될 수 있다. 특정 공정에서 발생한 변형과 응력은 다음 공정에서 문제가 될 수 있기 때문에, 사전에 적절한 제어를 위한 조치를 취하거나 사후에 교정 및 후열처리 등으로 잔류한 변형과 응력의

수준을 낮추어야 한다. 이 과정에서 블록 형상이 인자가 되는 열변형의 제어나, 비파괴검사로는 실제 공정에서 측정이 쉽지 않은 응력 평가를 위하여 FE 시뮬레이션이 활용된다. 용접에 의한 열변형과 열응력은 모두 열탄소성 해석(Shin et al. 2002)에 의하여 동시에 구현되는 결과로서, 대형 모델인 선체 블록에 적용하기 위하여 쉘 요소를 사용하는 많은 방법론(Ha, 2008)에도 불구하고, 두께 방향의 잔류응력 도출을 위하여 솔리드 요소를 사용하는 해석의 수요도 줄고 있지는 않다.

용접 열탄소성 해석의 결과를 좌우하는 큰 요인 중의 하나는 용접부와 주변부의 강성비이고, 실제 선체 블록

전체가 모델링된다면 강성비 계산은 강성행렬에 의하여 처리된다.

그러나 전 모델을 모두 솔리드 요소로 처리하게 되면 Pre-Processing/Solving/Post-Processing 비용이 기하급수적으로 증가하여 선체 블록 규모에서는 실제 적용할 수 없는 방법이 된다. 이에 용접부 일부만 모델링하고 주변부 강성은 경계조건으로 처리하는 연구(Jin et al. 2010)결과도 있으나, 이 역시 실제 형상의 강성이 엄밀하게 반영되기 위하여 단위하중법(Lee, 2002) 등을 활용하는 연산은 전처리 작업에서 많은 시수를 필요로 한다. 일반 구조해석에는 이와 유사한 경우를 분석하기 위하여 쉘 모델에 글로벌-로컬 유한요소 해석기법 중 로컬 영역에 솔리드 요소를 활용하는 방법이 제시되어 있다. 이 두 요소는 절점자유도가 다르기 때문에 솔리드 요소에 모멘트를 전달하는 방법으로 PSCM (Perpendicular shell coupling method) element (Naoki et al., 2007)를 사용한다. 이 방법은 선체 수준의 모델링에서 솔리드 요소를 사용(Wolfgang & Sonja, 2014)하기 원하는 용접 열탄소성 해석에 매우 좋은 방법이 될 수 있으나, edge 길이 1mm 이하 수준의 용접부 솔리드 요소와 100mm 이상의 쉘 요소를 연결시키기 위한 작업에 여전히 과도한 전처리 작업이 필요하다.

본 연구에서는 PSCM 요소 활용의 장점은 살리되, 쉘 요소가 로컬 영역에서 작아지는 것을 피하기 위하여 유한요소 비선형 경계조건 중 접촉해석시 미끄럼을 가상으로 강화할 수 있게 하는 것에 집중하였다. 이에 접촉면에서 수직한 방향으로도 떨어질 수 없도록 접촉 조건 (접합 접촉) (MSC, 2014)을 사용하여 PSCM 요소와 용접부 솔리드 요소를 연결하되, PSCM 요소의 크기는 기존 선체 모델인 쉘 요소의 평균 크기를 따라가도록 하였다. 이 과정에서 기존의 PSCM 요소가 도입된 연구에 대비하여, 전처리에 필요한 요소를 대폭 줄일 수 있었으며, 이 과정을 선체블록 용접해석을 위한 전처리 시스템 (Park et al., 2007) (Ha, 2013) (Ha & Yi, 2015)화하였다.

이 과정에서 용접부 단면의 정의를 수치화하는 작업이 이루어졌고, 전면부 등 일부만 용접된 상태로 턴-오버가 이루어지는 작업의 해석시 더 엄밀한 해를 도출할 수 있음을 보였다. 시스템은 최종적으로 용접부가 만나는 곳까지 국부적 솔리드 요소의 생성을 반자동화하였으며, 형상 정의된 비드 내부는 다층 용접 분석(Ha & Yang, 2010) 수요를 위하여 요소 단면적이 일반적인 FCAW 단면적의 이하가 되도록 조절되었다.

2. PSCM 소개 및 개정적용

최근 조선소의 해양구조물 제작 비중 증가는 판재의 사용면에서 극후판 사용의 비중증가로 이어졌다. 이러한 변화로 인하여, 건조중의 용접관련 성능해석 요구는 그 주종이 열변형량 파악에서 용접부 전진성 평가로 빠르게 변화하고 있다. 특히 공기 지연사태가 늘어나면서 이를 만회하기 위한 용접 미완료 블록의 리프팅 실시에 따른 용접부 강도 평가 요구 등 선체 블록 규모에서 용접부의 솔리드 요소가 사용되어야 하는 상황이 자주 발생한다. 이러한 해석의 경우, 주로 용접부만 모델링하여 평가하는 경우가 많은데, 이 경우 주변부의 강성은 극단적으로 모자라거나 극단적으로 과하게 될 소지가 있다. Fig. 1과 같이 용접부를 포함한 선체블록 모델을 활용하여 주변부의 강성을 단위하중법으로 유도(Jang & Lee, 2002)하고 이를 용접부 모델에 스프링 요소로 경계조건화할 수도 있으나, 이는 전처리 작업 시수가 과도하게 투입되는 문제점이 있다.

쉘 요소의 각(殼)구조물에서의 용접부 모사 한계와 솔리드 요소의 전산기 역량으로 인한 요소수 제한 때문에 두 요소를 동시 사용하는 것은 매우 유용할 것이다. 그러나 솔리드 요소가 절점에서 모멘트를 자유도로 가질 수 없기 때문에 이를 함의적으로 연결하는 방법이 문제가 되는데, PSCM 요소(Fig. 2)의 경우, 이 문제를 해결하는 좋은 방법 중의 하나이다.

본 연구에서는 이 방법을 근간으로 선체의 전산모델을 FE 모델로 만들어주는 전처리 시스템에 이 방법이 용접부의 형상 특성을 반영해 줄 수 있는 기능을 탑재하고자 하였다.

PSCM 방법을 전처리 자동화 시스템에 적용함에 있어서 가장 큰 문제점은 응력 등의 평가를 위해 요구되

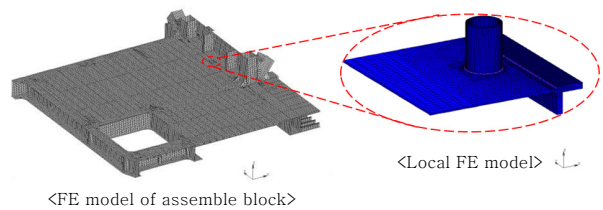


Fig. 1 FE model of assembly block and Local FE model

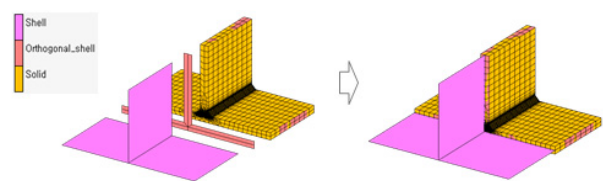


Fig. 2 Concept of the PSCM

는 조밀한 솔리드 요소와 주변부 쉘 요소와의 요소 밀도 정합을 위한 요소 수정 작업이다. 비 용접부 영역에서는 기존 모델링의 요소밀도로 존재해도 되는 부분을 솔리드 요소의 조밀한 요소와 절점일치를 위해서 인근 영역의 요소망을 조절하는 것은 요소수 절감의 큰 이득이 일부 훼손되며, 요소 품질 저하나 이를 시스템이 자동으로 향상시키기 위한 알고리즘의 난해성 등이 문제가 된다.

본 연구에서는 기존 쉘 요소망의 적은 수와 고품질을 그대로 유지하고자, PSCM 요소까지도 기존의 쉘 요소망의 평균 크기를 유지하되, 용접부를 모사하는 솔리드 요소망과는 접합-접촉 조건으로 모멘트를 전달하도록 하였다. 물론 연결면의 네 모서리나 중립축 등 핵심 영역에서는 노드 정합이 이루어지지만, 이 절점은 이 과정을 위하여 새로 생성된 것이 아닌 만큼 절점수가 늘지도 않고, 요소의 품질이 떨어질 필요가 없게 된다. 이러한 요소 밀도의 이원화는 전처리 시스템의 자동화가 강건하게 돌아갈 수 있는 핵심사항이 된다.

3. 시스템 개발을 위한 용접부 정의

Fig. 3은 용접부 해석을 위한 블록 단위 유한요소 모델 생성을 위해 카드 파일을 입력 받아 용접선 지정 및 쉘 요소망 생성을 수행하는 전처리 자동화 시스템의 한 예 (Ha, 2013)이다. 본 연구에서는 전체 모델 중 국부 용접부의 선택적 솔리드 요소 전환 기능을 이러한 전처리 시스템에 에드-온 될 수 있도록 개발하였다. 사용하는 방법은 각 용접단면의 기하를 지정 후, 용접이 시작되는 절점과 끝나는 절점을 클릭하면 자동 생성되도록 하였다. 곡선용접부나 부재가 직각 이외의 각도로 주판과 연결되어도 무방하도록 하였고, 현재의 쉘 요소망의 용접선 영역의 요소망의 정도와 무관하게, 솔리드 요소로 생성된 각 단면은 그 법선 방향이 용접선에 접하도록(tangential) 구현되었다.

또한 용접부 개선 형상은 매우 다양하다. 본 시스템에서는 개선형상의 다양성을 최대한 반영하면서도 사용은 간단하게 할 수 있도록 범주를 다음과 같은 네 가지 내에서 모두 적용될 수 있도록 구현하였다.

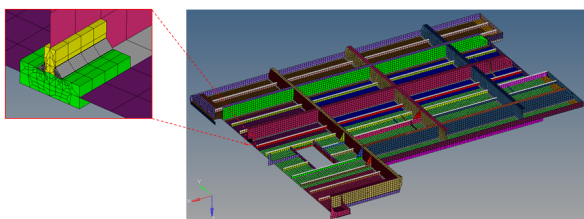


Fig. 3 FE model of the assembly block using PSCM

3.1 필릿 용접부 모델링

필릿 용접부와 T-butt 용접부를 편의상 각각 Fillet-bead 와 Fillet-Groove로 구분하고 필릿은 Web 두께의 60%를 각장으로 자동 반영하여 요소 생성되게 진행하였으며, Fig. 4와 같이 루트(root)부 사이의 갭에서는 실제 절점이 같은 높이를 갖고 있더라도, 서로 연결이 되지 않도록 (detach) 하였으며, 침점이 존재하는 각 영역에서의 요소 사이즈는 토우(toe)에서 반지름 1mm 기준 15°당 요소 1개를 반영하도록 하여 피로 해석에서 참조할 수 있는 구조해석이 가능하도록 구현하였다.

3.2 T-butt 모델링

T-butt 용접부 (Fig. 5)의 경우 Web 두께 중심에서 45° 개선으로 CJP 용접부로 모델링 하였으며 각장은 5mm로 고정하였다. HAZ 부는 비드에서 2mm로 반영되었으며 토우부 요소 사이즈는 Fillet-bead 와 동일하게 구성되었다.

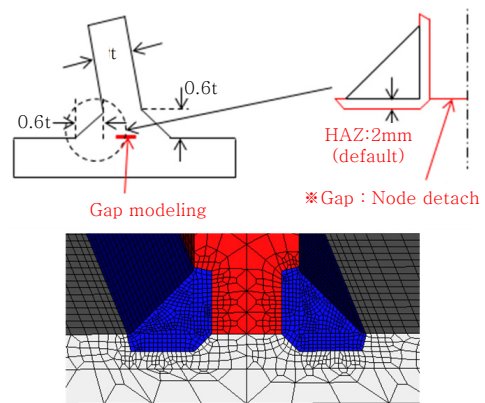


Fig. 4 Geometry variables of the fillet-bead weldment

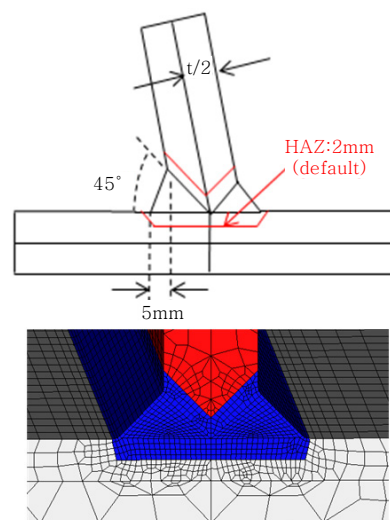


Fig. 5 Geometry variables of the T-butt weldment

3.3 맞대기 용접부 모델링 (SAW)

맞대기 용접부의 경우 작업안전상 구조해석이 빈번히 일어나는 잠호용접 (SAW)이 일면만 진행된 경우 (Fig. 6)만 묘사하는 것이 포함되었다.

용입깊이는 두께의 절반으로 구현하였고, 여성 높이를 모재 두께에 따라 결정되도록 하였으며, 해당 높이에서 코너부 입사각이 150°를 만족하도록 비드의 형상 구현을 자동화하였다. 이 상황도 필릿의 내부처럼 용입되지 않은 면의 절점은 서로 정합 되지 않고 (갭이 없더라도), 서로 침투할 수 없도록 접촉조건이 부여되었다.

3.4 일반적인 맞대기 용접부 모델링

일반적인 맞대기 용접부의 단면은 V, K, X 등 기본 형상구조가 다양하다. 본 연구에서는 이를 Fig. 7과 같은 통일된 규격으로 묶어서 표현하였다. 또한 선박생산시의 맞대기 용접은 두께가 다른 판에서 이루어질 수 있는데, 이 때 두께편차의 3배거리에 걸쳐서 모따기 (Fig. 8)되어 작업이 실시된다. 본 연구에서는 기본 셀 요소 구조의 맞대기 두께가 다르면 이 전과정이 모두 자동화되어 솔리드 요소로 전환되도록 하였다.

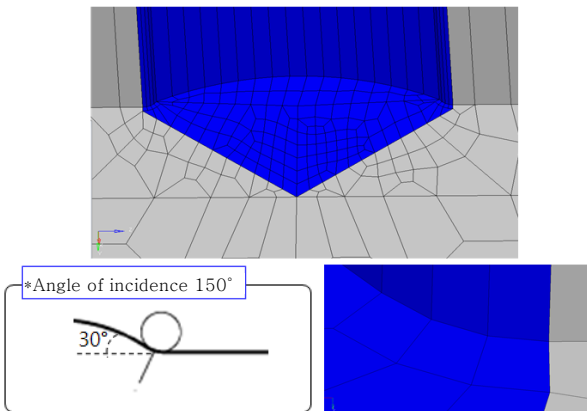


Fig. 6 The section of 1-sided submerged arc welding and its bead tow having radius (1mm)

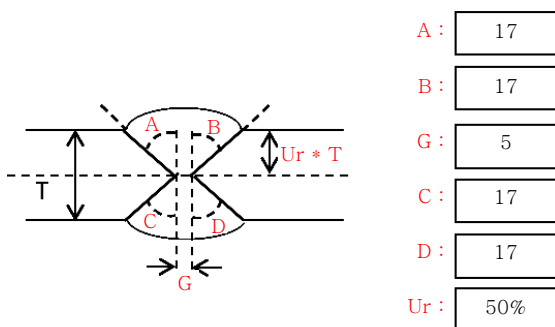


Fig. 7 Geometry variables of the butt-groove weldment

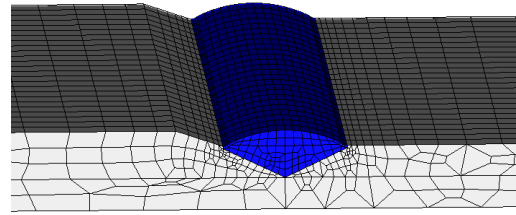


Fig. 8 Example of butt having chamfering

4. Case Study

용접부 단면에서 물리적으로 떨어져 있는 영역에 대하여, 본 연구에서 개발한 전처리 자동화 시스템의 결과물과 같이 유한요소 모델링에 노드 미정합 및 접촉이 구현되었을 때, 이를 노드 정합 처리한 기존의 일반적인 모델과의 결과비교를 Fig. 9를 통해 나타내었다. SAW를 전면만 실시 후 블록 이동을 수행할 때는 안전성평가가 가장 중요한데, 용접되지 않은 루트면에서 이를 연결해버린 모델은 변형/응력 모두 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 해양 블록 (Pontoon) 용접부에서 특정이유로 갭(gap)량이 설계 대비 매우 벌어진 상황에서의 변형/응력평가를 요구하는 경우에 대하여, 본 연구 결과를 활용한 해석 대응전략을 보여주고 있다. 셀요소 망 상태에서는 기존 설계와 현재 상태의 차를 쉽게 반영할 수 없으나, 본 개발에서는 갭을 고려한 자동 모델링 및 다층용접 정의를 가능하게 하기 위한 비드내 요소 크기 정의에 의하여 전처리가 가능하다. Fig. 11과 같은 결과는 고찰에 의하여, 수정 없는 합리적인 공사 진행을 가능하게 하거나, 건정성에 대한 의미 있는 위험을 미리 알릴 수 있게 해준다.

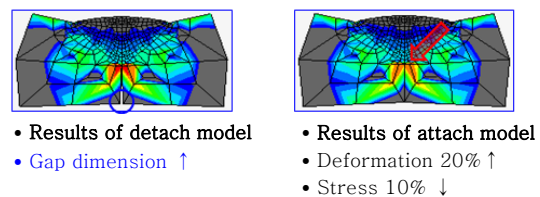


Fig. 9 Results of the SAW welding analysis

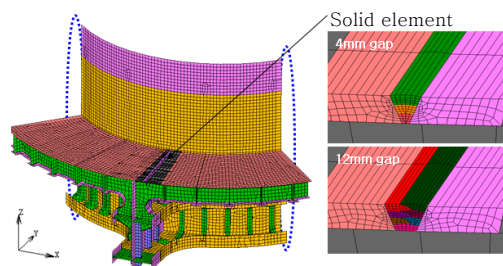


Fig. 10 Root gap variation of the assembly block

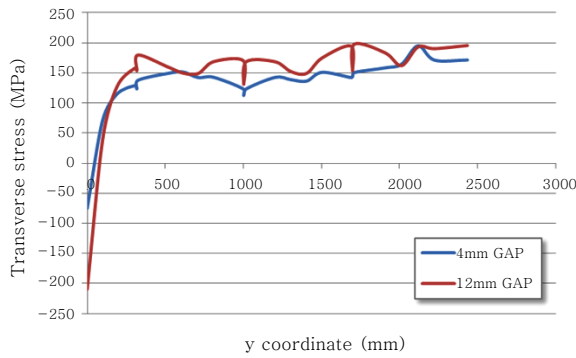


Fig. 11 Results of the root gap influence analysis

5. 결 론

본 연구에서는 선체블록 내 용접부의 합리적인 FE 해석을 위하여, 해당 작업을 전처리 자동화 시스템으로 구현하였다. 이 과정에서

- 1) 용접부를 모사하는 조밀한 솔리드 요소와 선체 블록을 모사하는 보통의 셸 요소를 PSCM 기법으로 연결하되 접합 조건의 접촉을 통하여 선체모델에서의 수정이 발생하지 않도록 하였다.
- 2) 해당 과정의 시스템화를 위하여 용접 단면의 정의를 수치화하였고, 크게 T-Joint와 맞대기로 구분하였다.
- 3) 활용도가 높은 SAW 전면용접 후 거동 분석을 위하여, 루트면의 물리적 상황을 모사하고 효과를 확인하였다.
- 4) 용접부 피로해석이 참고할 수 있는 구조해석 결과도 본 시스템을 통하여 가능할 수 있도록, 비드부 침점에 대하여는 Rule 기반으로 요소망이 만들어지도록 하였다.

References

1. Ha, Y. S., 2008. Development of Thermal Distortion Analysis Method on Large Shell Structure Using Inherent Strain as Boundary Condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(1), 93-100

2. Ha, Y. S., 2013. Analytical Methodology Obtaining an Optimal Welding Sequence for Least Distortion of Welded Structure, *Journal of KWJS*, 31(3), 54-59 (in Korean)
3. Ha, Y. S. & Yang, J. H., 2010. Development of Distortion Analysis Method for Multi-pass Butt-welding Based on Shell Element, *Journal of KWJS*, 28(1), 54-59 (in Korean)
4. Jin, H. K. Lee, D. J. & Shin, S. B., 2010. Effect of Distance and Restraint Degree between Fillet and Butt Weldment on Residual Stress Redistribution at each Weldment, *Journal of KWJS*, 28(3), 59-64
5. Jang, C. D. & Lee, C. H., 2002. 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), 127-136
6. MSC.Marc 2014-Reference manual, vol. A. MSC, Software Inc., 2014
7. Naoki, O. Kiyoshi, H. Junji, S. Toehi, N. & Shota, S., 2007. Study on shell-solid coupling FE analysis for fatigue assessment of ship structure. *Marine Structures*, 20(3), 143-163
8. Park, J. G. Heo, H. Y. Ha, Y. S. Jang, T. W. Han, K. H. Lee, S. H. Moon, S. S. Narayan, T.K., 2007. 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, United States of America, 1(5) (2007)
9. Shin, J. G. Lee, J. H. & Kim, J. H., 2002. Three Dimensional Thermal-Elastic Plastic Analysis of GMAW Considering the Melting of Weld Bead. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(1), 49-60
10. Fricke, W. & Zacke, S., 2013. Application of Welding Simulation to Block Joints in Shipbuilding and Assessment of Welding-Induced Residual Stresses and Distortions. *PRADS 2013*, Changwon, Korea 20-25 October 2013
11. Yi, M. S. Ha, Y. S. Rajesh, S.R. & Hyun, C.M., 2015. Development of FE Preprocessing System for Welding Deformation Analysis in Hull Ship. *11th International Seminar Numerical analysis of weldability*, Graz, Austria, September 2015, 27-30