

선체블록의 용접변형 해석에 대한 기술동향

윤진오*† · 오종인*

*한진중공업(TMS) 기술연구소 산업기술연구팀

Trends of Welding Deformation Analysis for Ship Structure

Jin Oh. Yun*† and Chong In. Oh*

*Hanjin Heavy Industries & Construction CO. LTD., Industrial R&D Team Technology Research Institute

†Corresponding author : joyun@tms2010.co.kr

1. 서론

용접은 금속을 접합하는 가장 효율적인 방법이다. 이러한 용접 공정은 금속의 접합을 위해 열을 이용하여 용융 상태까지 가열한다. 열에 의해 가열되는 용접부는 팽창하게 되고 열의 영향을 받지않는 모재가 팽창하고 있는 용접부를 구속하게 되어 열응력이 발생한다. 이때 생성된 열응력이 항복응력을 초과하게 되면 가열 부위는 수축 항복을 하게 된다. 용접이 끝나고 냉각하게 되면 용접부는 원래의 길이보다 수축하게 되어 용접변형을 수반한다¹⁾.

이러한 용접변형은 선박과 같은 대형 강구조물 건조시 부재 및 블록간 단차, 구조물의 치수를 변화시켜 허용 변형량이 기준치를 초과하는 경우 발생한 오차를 교정하는데 많은 작업시수가 소요 되어 비용 손실 및 생산성 저하의 원인이 된다. 이와 같은 문제의 해결을 위해서는 현장에서 작업되고 있는 용접구조물의 용접공정에 대한 이해를 필요로 하고 용접공정에 대한 이해를 바탕으로 용접변형의 예측이 필요하다.

선체블록의 형태는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 주로 평판과 보강재가 결합된 형태이며 보강재의 결합 위치에 따라 블록의 형태는 다양하게 나타난다. 각각의 소조립 부재는 주판과 보강재의 용접으로 이루어지며

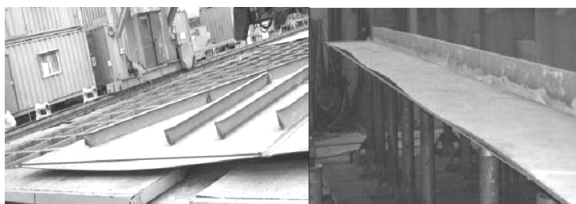


Fig. 1 Welding deformation of ship block

소조립 부재들의 결합으로 이루어진 대조립 부재에서는 복합적인 용접변형이 발생한다. 이러한 용접에 의한 변형은 부재의 형상과 결합형태, 용접수행 순서 등의 영향을 받기 때문에 용접변형을 예측하는 일은 매우 어려운 일이다. 따라서 조선산업에서는 용접변형을 최소화하기 위해 용접변형 제어기법을 확립하고자 꾸준히 연구를 진행하고 있다.

특히 용접변형을 효율적으로 제어하기 위해서 조선사들은 각 사의 실정에 맞게 기초적인 용접 시험편의 해석을 뛰어넘어 선체의 블록 단위의 해석을 수행할 수 있는 용접변형 예측 기법을 개발하여 설계 및 생산공정에 반영하고자 노력 하고 있다. 이에 본 보고에서는 조선산업에서의 용접변형과 관련된 연구들을 간략히 소개하고자 한다.

2. 용접변형 해석 연구동향

용접변형을 해석하기 위해서는 용접 현상을 반영하여 simulation 하여야 한다. 열탄소성 해석은 이와 같은 현상을 가장 정밀하게 반영해 주므로 좋은 결과를 얻을 수 있다. 하지만 시편 단위가 아닌 선체 블록과 같은 대형 구조물에 이러한 방법을 적용하는 것은 효율적이지 못하여 국내 조선사에서는 이러한 용접변형을 예측하기 위한 방법으로 고유변형도법, 등가하중법과 같은 간소화된 해석법을 현장에서 적용하고 있다. 고유변형도법은 용접부의 고유변형도의 영역 및 고유변형률을 구하고 이를 하중으로 환산하여 탄성해석을 수행하는 방법이며, 등가하중법은 용접부의 변형량에 상응하는 하중을 산출하여 해석모델에 부여하는 방법이다. 이러한 간소화된 해석법은 궁극적으로 비선형 과도해석을

탄성 해석으로 대체하는 방법이며 대형구조물의 용접변형을 해석하는데 적합한 방법이라고 할 수 있다.

국내의 조선산업에서 블록단위의 용접변형 예측은 아직까지 완전하지 못하며 각 사의 생산현장에 맞는 해석법을 개발하여 사용하고 있는 실정이다.

3. 열탄소성 해석

상기에서 언급했던 용접변형 예측을 위한 해석법은 유한요소법을 이용한 열탄소성 해석이 가장 정확한 결과를 제공한다. 용접은 국부적인 가열로 인해 불균일한 온도분포로 생성된 열응력이 항복응력을 초과하여 소성변형을 발생시킨다. 이후의 냉각으로 인해 최종적인 잔류변형과 잔류 응력이 발생한다. 이와 같은 현상을 simulation 하는 방법이 열탄소성 해석이다. 열탄소성 해석은 실제 용접 현상을 반영할 수 있고, 또한 용접순서의 변화에 따른 차이를 고려할 수 있어서 좋은 결과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 용접현상에 대한 온도해석을 선행하여 해석영역의 실 시간 온도분포를 구하게 되면 온도분포 결과를 이용하여 열탄소성 해석을 수행할 수 있다. 유한요소 수식화 과정을 대략적으로 표현하면 다음과 같다.

변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\epsilon] = [\epsilon]_e + [\epsilon]_p + [\epsilon]_{th} \tag{1}$$

좌변은 전변형률(total strain)을 의미하고 우변의 첫 번째 항부터는 각각, 탄성변형률, 소성변형률, 열변형률을 의미한다.

$$[\epsilon] = [B][U] \tag{2}$$

$$[\sigma] = [C][\epsilon]_e = [C]([B][U] - [\epsilon]_p - [\epsilon]_{th}) \tag{3}$$

Stress 항을 전변형률과 소성변형률, 열변형률의 행렬식으로 표현하면 위와 같다.

가상일의 원리를 이용하여 유한요소 수식화를 수행하고 외부하중과 Body Force 항을 제거하면 결과식은 아래와 같이 표현된다

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV = 0 \tag{4}$$

행렬형태의 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\int_V [B]^T [C][B] dV [U] = \int_V [B]^T [C]([\epsilon]_p + [\epsilon]_{th}) dV \tag{5}$$

$$[K][U] = [F] \tag{6}$$

$$[K] = \int_V [B]^T [C][B] dV \tag{7}$$

$$[F] = \int_V [B]^T [C]([\epsilon]_p + [\epsilon]_{th}) dV \tag{8}$$

위의 선형행렬식을 계산함으로써 유한요소 해석을 수행할 수 있다. 위의 수식을 수치해석적으로 푸는 일은 가열, 냉각하는 전체과정을 미소 시간으로 나누어 계산하는 과도상태의 문제이며, 비선형 열탄소성 문제가 된다²⁻³⁾. 이와 같이 신뢰도가 높은 결과를 제공해 주는 용접해석을 위해 열탄소성 해석 연구들이 꾸준히 진행되었다⁴⁻⁷⁾. 특히 용접공정은 열적, 기계역학적, 금속재료적인 현상이 연계되어 있다. 이와 같은 사실을 고려하여 더 정밀한 해석을 위해 재료적인 현상까지도 고려한 연구 결과들도 소개 되었다⁸⁻⁹⁾.

현재 컴퓨터의 발달로 인해 용접해석은 과거와 비교해서 더 빠른 계산이 가능해져 보다 더 정밀하고 많은 시간을 요하는 열탄소성 유한요소 해석이 가능해 졌다. 하지만 이와 같이 컴퓨터의 발달에도 불구하고 선체와 같은 대형구조물의 열탄소성 해석은 아직까지도 원활하게 수행되고 있지 못하다. 용접현상의 특징중의 하나인 급격한 온도구배로 인해 용접토치가 진행되는 가열 부위는 미세한 요소분할을 필요로 하게 된다. 선체블록과 같이 해석하고자 하는 모델이 비대해 지면 요소의 수는 당연히 많아지게 된다. 또한 해석영역이 3차원으로 확장되게 되면 요소의 수는 기하급수적으로 늘어나게 되며 해석하는 과정도 비선형 과도 열탄소성 해석을 해야 하기 때문에 해석의 수행 여부가체가 불확실하다.

이와같은 현실적인 어려움으로 인해 가열부위를 시간에 따라 재분할하거나 Shell 요소를 사용하여 해석을 수행하는 연구도 진행되고 있다¹⁰⁾.

4. 조선산업에서의 용접변형

4.1 블록단위의 용접변형 예측

조선산업에서의 선체의 조립공정은 대부분이 용접에 의해 접합되므로 용접변형을 수반한다. 선체블록은 용접공정의 복합체이며 발생하는 변형은 발생하는 용접변형들의 중첩된 형태로 생각할 수 있다. 생산현장에서는

용접변형의 예측 및 제어를 위한 연구를 지속해 왔으며 열변형 현상을 이용하여 선체의 선수부나 선미부의 곡면을 건조하는 곡 가공에 대한 연구도 병행하여 진행하여 왔다¹¹⁻¹³⁾. 앞에서 설명한 바와 같이 열탄소성 해석으로 시편단위 용접 구조물의 용접변형은 예측할 수 있으나 선체 블록의 전체적인 변형을 열탄소성 해석을 이용하여 계산하는 일은 해석적으로 불가능하다고 할 수 있다. 열탄소성 해석은 신뢰도가 높은 정밀한 결과를 줄 수는 있으나 수치해석의 가장 궁극적인 목표인 결과를 도출해 내는 역할을 하지 못 하므로 생산현장에서는 적용할 수가 없다.

생산현장에서 열탄소성 해석은 선체블록의 용접 변형 예측에는 직접적으로 적용되지 못하고 부분적인 보완수단으로 사용되고 있다. 선체의 용접 해석을 열탄소성 해석으로 계산하지 못하는 이유는 해석하고자 하는 모델이 너무 비대하여 비선형 과도해석을 하기에는 컴퓨터의 용량이 부족하기 때문이다. 따라서 이와 같은 한계를 극복하고자 적절한 이론들과 가정을 이용하여 궁극적으로 탄성해석을 수행하는 방법들이 연구 되었다. 용접된 부위는 최종적으로는 수축한다는 사실로부터 최종 수축하는 영역과 수축량만을 고려하여 변형량을 계산하는 방법이다. 탄성해석의 장점은 결과의 정확성 유무를 떠나 선체의 블록과 같은 대형구조물의 해석에도 결과를 도출해 준다는 점이다. 결과를 계산해 낼 수 있기 때문에 실제 현장 상황과의 비교를 통해 계산 결과들의 개선 및 더 나은 방법들로 발전할 수 있다. 이와 같이 대형구조물에 적용이 가능한 간소화 해석법인 고유변형도법과 등가하중법을 이용해 변형해석을 수행한 연구들이 진행되었다¹⁴⁻¹⁷⁾.

Fig. 2는 실제로 블록단위의 해석을 위한 모델을 보여주고 있다. 우선적으로 주판에 보강재가 결합된 상태의 용접변형 해석을 위해서는 접합된 부위에 대한 등가하중을 산출하고 탄성해석을 수행한다. 가장 간단한 해석은 조립이 완성된 상태에서 모든 용접부에 그에 해당되는 등가 하중을 부과하여 탄성해석을 수행하는 방법이다. 위의 해석은 보강재가 이미 결합된 상태에서의

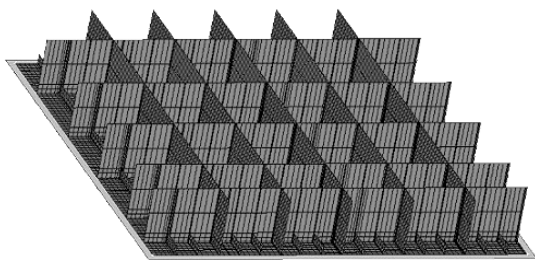


Fig. 2 Block model of final state

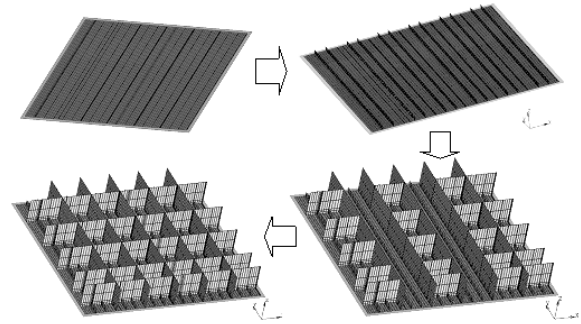


Fig. 3 Block model considering welding sequence

하중을 부과한 상태이기 때문에 보강재로 인한 강성이 반영되어 변형량이 작은 값이 얻어진다. 하지만 실제 공정에서는 보강재가 모두 결합된 상태가 아닌 현장의 사정에 따른 부재의 조립 순서가 존재하기 때문에 실제현장에서의 공정 순서를 고려하여 해석이 이루어져야 한다. Fig. 3은 블록의 대략적인 조립 순서를 반영한 모델을 보여주고 있다. 실제의 조립순서를 상세하게 반영할수록 현장상황을 반영한 결과를 얻을 수 있으나 조립 단계를 많이 반영하게 되면 모델링과 해석 작업이 증가하게 되므로 현장 Data와 해석 결과를 분석하여 적절한 조립단계를 고려하는 작업이 필요하다.

4.2 용접변형 제어를 위한 노력

용접변형의 해석적인 예측이 가능해지면서 용접변형을 미리 파악할 수 있고 문제가 발생할 수 있는 특정부분에 대한 대처를 해석적인 방법으로 구현하는 것이 가능하게 된다. 이와 같이 조선산업에서는 용접변형 해석 기술의 발전과 더불어 용접변형을 제어하고자 하는 연구도 진행되고 있다. 설계적인 측면에서의 방법인 보강재를 특정한 부분에 추가로 설치하거나¹⁸⁾, 기계적인 인장법을 이용한 변형의 교정¹⁹⁾, 역변형을 가하여 용접변형을 상쇄시키는 방법²⁰⁻²¹⁾, T-bar 형태의 구조물 제작 시 보강재의 특정한 부분을 동시에 가열하여 변형을 줄이는 방법 등이 제안되었다²²⁾.

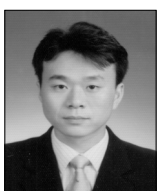
5. 결 언

조선산업에서의 용접변형은 꾸준히 발생하고 있으며 이에 대한 연구도 지속되고 있다. 용접변형을 예측하기 위한 유한요소 해석에 기반을 둔 수치해석 모델이 지속적으로 발전해 오고 있으나 공통적으로 적용될 수 있는 해석 모델은 아직까지는 없으며 용접변형을 방지하기 위한 체계적이고 정형화된 방법도 없는 상황이다. 이는

용접변형 자체가 풀기 어려운 문제이기도 하지만 생산 현장마다 상황이 상이하게 다른 것에 기인한다고 할 수 있다. 생산현장에서는 각 사의 실정에 맞는 용접변형 예측 및 제어방안 등이 꾸준히 연구되고 있으므로 용접 변형과 관련된 학술적인 의견 및 경험적인 용접변형 관리방안 등의 상호교류가 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Y.-S. Yang : Generation Mechanism and Analysis of Welding Distortion, Journal of KWJS, **23-4** (2005), 317-321 (in Korean)
2. M. D. Snyder and K.-J. Bathe : A Solution Procedure for Thermo-Elastic-Plastic and Creep Problems, Nuclear Engineering and Design, **64** (1981), 49-80
3. J.-W. Kim and Y.-S. Yang : Welding Residual Stress and Distortion, The Korean Welding and Joining Society, 2011, 133-135 (in Korean)
4. K. Y. Yoo and D. S. Um : The Studies on the Prediction of Residual Stress by Thermal Elasto-Plastic Analysis and its Effect for circumferential welded cylinder, Journal of KWJS, **15-5** (1997), 489-497 (in Korean)
5. C. D. Jang and S.I. Seo : Calculation of Residual Stress by Thermal Elasto-Plastic Analysis, Journal of KWJS, **6-4** (1988), 35-43 (in Korean)
6. H. S. Bang : Study on the Mechanical Behavior of Welded part in thick Plate, Journal of KWJS, **10-4** (1992), 250-258 (in Korean)
7. H.-G. Suk : A Study on Welding Deformation of I-Beam Steel Structure by FEM Method, Journal of KWJS, **21-5** (2003), 561-567 (in Korean)
8. S.-H. Cho and J.-W. Kim : A Study on the phase Transformation Model for the Analysis of Residual Stress in Weldment, Proceedings of the KWS conference, April, (2000), 232-234 (in Korean)
9. S. Y. Im, Y. S. Han, K. H. Lee, M.-S. Han and K. H. Choi : Recent Development in computational Welding Mechanics, Proceedings of the KWS conference, November, (2009), 87-91 (in Korean)
10. Y.-C. Jeon and M.-S. Han : A Study on distortion prediction model for panel structure using shell element, Proceedings of the KWS conference, June, (2005), 270-272 (in Korean)
11. K. J. Son, Y.-S. Yang and S. G. Jang: Estimation of Plate Deformation in Thermal Processing using the Eigenstrain Concept, Journal of KWJS, **21-1** (2003) 54-59 (in Korean)
12. C. D. Jang, Y. S. Ha, D. E. Ko and S. C. 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 (in Korean)
13. K.-Y. Bae, Y.-S. Yang, C.-M. Hyun and S.-H. Cho : Development of Simplified Formulas to Predict Deformations in Plate Bending Process with Oxy-Propan Gas Flame, Journal of KWJS, **25-2** (2007), 172-177 (in Korean)
14. 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 Naval Architects of Korea, **37-2** (2000), 127-136 (in Korean)
15. J. T. Kim, Y. S. Ha and C. D. Jang : Analysis of Post Weld Deformation at HAZ by External Forces Based on Inherent Strain, Journal of the Society Naval Architects of Korea, **43-2** (2006), 220-227 (in Korean)
16. J. S. Lee : Welding Deformation Analysis of Plates using the Inherent Strain-based Equivalent Load Method, Journal of KWJS, **28-2** (2010), 39-46 (in Korean)
17. J. U. Park, J. W. Lee and H. W. Lee : Analysis of Welding Deformation by Equivalent Load Method on Steel Structures, Journal of KWJS, **20-3** (2002), 129-137 (in Korean)
18. S. I. Kim, J. K. Kang and J. M. Han : Prediction and control of Welding Deformation for panel Block Structure, Journal of KWJS, **20-2** (2002), 21-26 (in Korean)
19. S. K. Kang, J. S. Yang, R. S. Lim, H. G. Kim and J. Y. Park : A Study on Simulation for Weld Distortion Reduction in Fillet Weld of Thin Plate using Tension Method, Journal of KWJS, **26-5** (2008), 22-28 (in Korean)
20. J. H. Heo and S. I. Kim : Development of Welding Distortion Control Method for Thin Panel Block Structure(I), Journal of KWJS, **21-4** (2003), 445-449 (in Korean)
21. H.-G. Kim, S.-B. Shin and K.-G. Kim : A Study on the Control Technology for Global Distortion of the Deck in the Superstructure during Manufacturing Process, Journal of KWJS, **28-5** (2010), 556-560 (in Korean)
22. D. J. Lee and S. B. Shin : Distortion Control of Curved Built-up T bar during Fabrication, Proceedings of the KWS conference, May, (2002), 152-154 (in Korean)



- 윤진오
- 1974년생
- 한진중공업(TMS) 산업기술연구팀
- 용접해석
- e-mail : joyun@tms2010.co.kr



- 오종인
- 1974년생
- 한진중공업(TMS) 산업기술연구팀
- 용접강도
- e-mail : cih74@tms2010.co.kr