

용접순서와 자중이 소조립 부재의 용접변형에 미치는 영향

Effect of Welding Sequence and Self-Weight on Welding Deformation in Ship's Small Component Fabrication

박 정 응* 한 명 수**
Park, Jeong-Ung Han, Myoung-Soo

ABSTRACT

Welding deformations are affected by various factors. This research investigates effects of welding sequence and self-weight on welding deformation. According to the results by equivalence load method, magnitude of welding deformation with self-weight is about twice one without self-weight on parallel weld path component. But welding deformation with the components used in this research are not affected by welding sequence

1. 서 론

용접프로세스에 의해 발생한 불균일한 온도분포로 인해 생긴 열응력은 최종적으로 잔류응력과 용접변형을 초래한다. 특히 용접변형^{1,2)}은 강구조물의 형상을 변화시키거나 강도를 저하시킬 뿐 아니라, 이를 교정하는 작업은 생산성 저하의 주된 요인이 되고 있다. 최근에는 생산성 향상을 위해 용접공정의 자동화가 활발히 진행되고 있다. 그러나 자동화에 이용되는 로봇의 경우는 인간과 같은 완벽한 시각센서가 없어 용접변형이 발생할 경우 이를 자체적으로 감지하지 못해 용접불량이 발생하거나, 각 단계별 용접위치에 대한 정보를 작업자가 직접 제공해야 하는 문제점이 있다. 그러므로 공장자동화의 효율은 용접변형의 정확한 예측에 따라 좌우된다고 할 수 있다.

용접변형을 예측하는 방법으로는 정밀 열탄소성해석, 등가하중법^{3,4)}, 그리고 고유변형도법⁵⁻⁷⁾ 등과 같은 방법이 있다. 이러한 방법들은 각각 장점과 단점을 가지고 있으므로 해석대상에 따라 적절히 선택하여 적용함으로써 타당한 결과를 도출할 수 있다. 강구조물의 치수가 크고 복잡한 형상을 하고 있는 부재의 용접변형을 예측하는 경우 막대한 계산시간 및 해석상의 어려움(비선형Contact문제)으로 자중⁸⁾을 고려하지 않고 용접변형을 예측하는 경우가 있다. 하지만 구조물의 형상에 따라 해석시 자중의 영향이 크게 발생하여 정확한 용접변형을 예측할 수 없는 경우가 많다.

따라서 본 연구에서는 먼저 Parallel weld path 형상의 소조립 부재를 대상으로 자중이 용접변형에 미치는 영향에 대해 검토하고, 그 후 Parallel weld path 형상과 H-Shaped weld path 형상을 대상으로 단위 모멘트법에 의해 용접순서를 도출하고, 도출된 용접순서에 따라 실험과 등가해석을 수행하여 용접순서가 용접변형에 미치는 영향을 검토하였다.

* 정회원· 조선대학교 토목공학과 교수

** 대우조선해양(주) 과장

2. 자중이 용접변형에 미치는 영향

2.1 실험조건 및 결과

용접조건은 전류 280A, 전압 31.5V, 속도 10mm/s 이며, 필렛용접시 각목은 3.5mm 이다. 이후 모든 실험에서는 동일한 용접조건에 따라 실험을 실시하였다. 또한 가접길이와 가접간격은 각각 500mm, 50mm로 하였다.

Fig. 1은 Parallel weld path (P Type) 시험편의 형상과 치수를 보여주고 있다. 실험에 사용한 Base 부재의 두께는 15mm이고, Stiff. 의 두께는 12mm, 높이는 모두 150mm로 하였다. 실험에 앞서 초기변형을 측정하고, 용접 후 최종변형을 측정하여 초기변형에 의한 영향을 고려할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 용접순서를 보여주고 있으며, P_t1은 밖에서 안으로 용접하고, P_t2는 안에서 밖으로 용접순서를 결정하였다. 이는 용접순서에 따라 과도변형의 형상과 최종변형이 용접순서에 미치는 영향을 검토하기 위함이다.

Fig. 3은 P Type의 최종변형을 보여 주고 있다. P_t1과 P_t2 모두 전체변형은 거의 비슷한 형상을 하고 있으며, 단부에서 변형이 크게 발생되었고, Stiff. 사이는 각변형이 발생하였다. 전체변형은 아래로 볼록한 형태로 발생되었다.

2.2 등가하중법에 의한 탄성해석

Parallel weld path 타입의 소조립 부재를 모델링하여, 단위 모멘트법을 적용하여 용접순서 P_1과 P_2를 도출하였다. 모델의 밀판과 Stiff.는 2차원 4절점 shell요소를 사용하고, 가접 및 용접부는 8절점 3차원 solid 요소를 사용하였으며, 처음 가접시에는 가접된 부분만 solid요소를 생성시키고, 용접이 완료되면 가접된 부분을 포함한 용접부 전체를 solid 요소로 생성시킴으로써 용접순서에 의한 용접부의 강성변화를 고려하였다. 또한 자중을 고려하기 위해 밀판에 접하도록 강제 Surface를 생성시켜 자중에 의해 중력방향으로 발생하는 변형을 비선형 Contact문제를 해석하였다.

Fig.4(a)는 자중을 고려하지 않고 탄성해석한 결과로, 중앙부와 단부의 변형의 차이는 약 24mm로 실험에 의해 구한 8mm 내외의 변형과는 약 3배정도 발생한 것을 알 수 있다. 따라서 대형 강구조물의 해석시 자중에 대한 효과를 고려하지 않으면 실험결과 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig.4(b)는 P_Type 소조립부재에 대해 자중을 고려한 등가하중법에 의해 용접변형을 해석한 결과이다. 3가지 용접순서 모두 최종변형은 최대 4mm로 실험에서 측정한 최대 8mm 와는 4mm의 오차가 발생하나, 자중을 고려하지 않은 탄성해석시 24mm 변형결과 보다는 실험값과 잘 일치하고 있다.

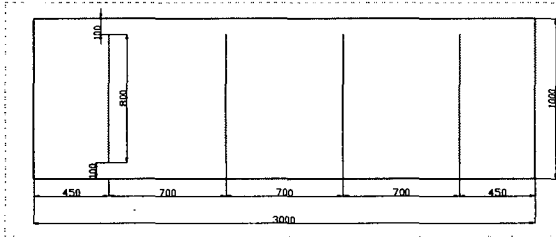
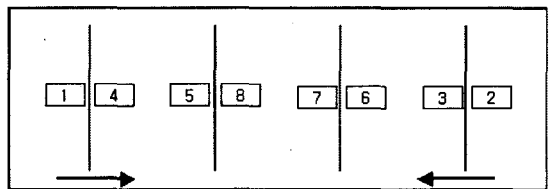
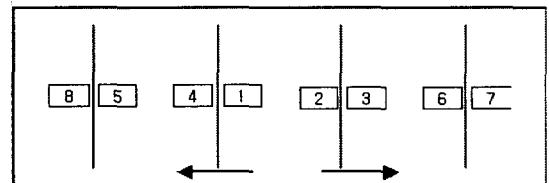


Fig.1 부재의 형상과 치수(P-Type)

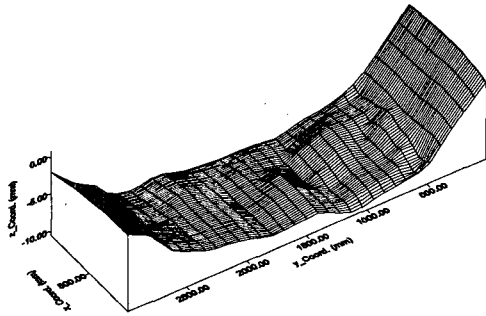


(a) 용접순서 P_t1

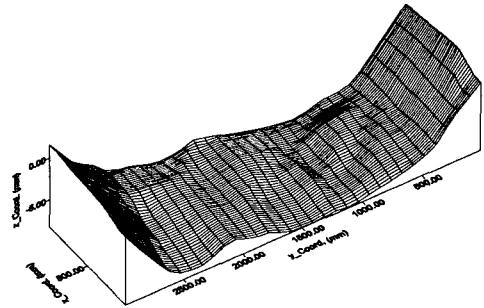


(b) 용접순서 P_t2

Fig.2 P-Type의 용접순서

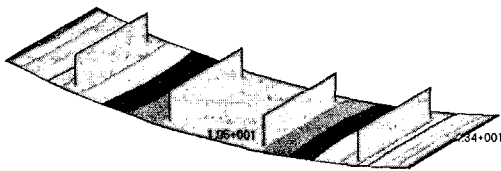


(a) P_t1의 실험에 의한 용접변형

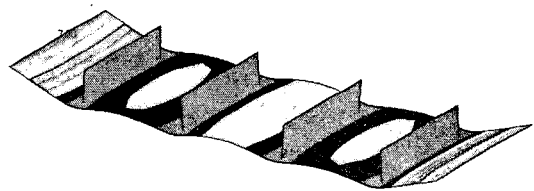


(b) P_t2의 실험에 의한 용접변형

Fig.3 Parallel weld path 부재의 용접변형(실험결과)



(a) 자중무시해석(최대변형량 23.9mm)



(b) 자중고려해석(최대변형량 4.01mm)

Fig. 4 자중의 고려 유/무에 따른 용접변형형상

3. 용접순서가 용접변형에 미치는 영향

3.1 실험조건 및 결과

Fig.5 는 H-Shaped weld path (H_Type) 시험편의 형상과 치수를 보여주고 있다. 실험에 사용한 Base 부재의 두께는 15mm이고, Stiff. 의 두께는 12mm, 높이는 모두 150mm로 하였다. Fig. 6은 단위 모멘트범에 의한 용접부 강성과 그 강성으로부터 용접순서를 결정하여 보여주고 있으며, H_t1은 강성이 강한 순으로 용접변형이 최소화시키기 위함이고, H_t2는 강성이 약한 순으로 용접변형이 최대로 발생할 수 있도록 하였다.

Fig.7(a), (b)는 실험에 의해 구한 전체 용접변형을 보여 주고 있다. H_t1 과 H_t2 모두 Stiff.가 조밀하게 모여 있는 곳은 비슷한 변형형상을 보여주고 있으나, y 방향의 중앙부에서 x방향으로 놓여있는 필렛 용접부를 기점으로 H_t1 용접순서는 아래방향으로 처지고, H_t2 용접순서는 올라가는 경향을 보이고 있다. 따라서 용접순서 측면만을 생각한다면 용접순서에 의해 용접변형이 영향을 크게 받은 것을 알 수 있다. 이 부분에 대해서는 추후 해석적 방법에 의해 실험에 의한 오차인지 용접순서의 영향인지에 대해 검토하였다.

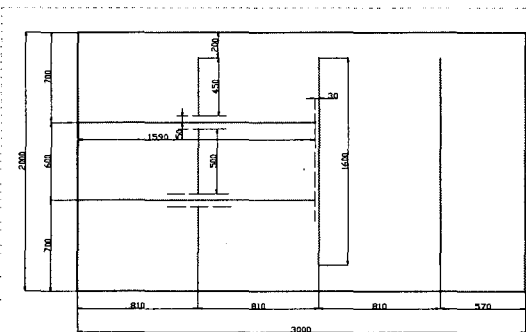
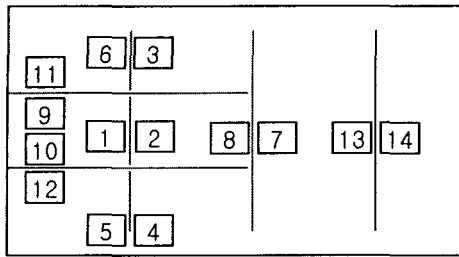
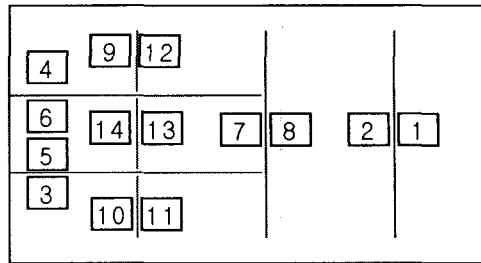


Fig.5 H-Shaped weld path의 형상 및 치수

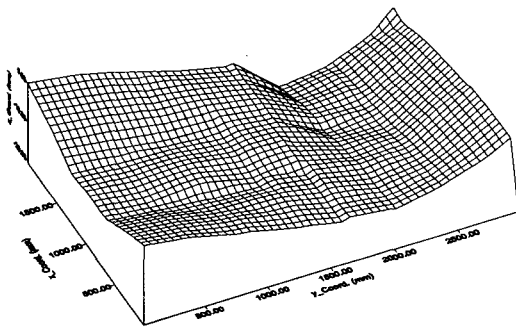


(a) H_T

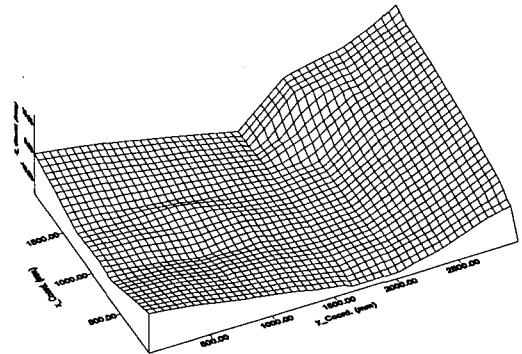


(b) H_T2

Fig.6 H_Shaped weld path의 용접순서



(a) 용접순서 H_t1 전체 용접변형



(b) 용접순서 H_t2 전체 용접변형과

Fig.7 H_type 전체용접변형 실험결과

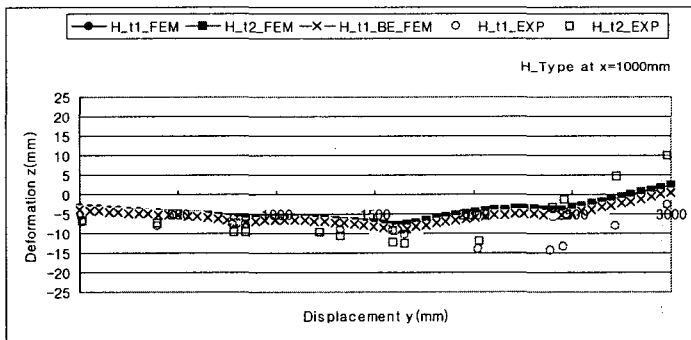


Fig.8 H_type 용접변형 실험/해석결과 (x=1,000mm)

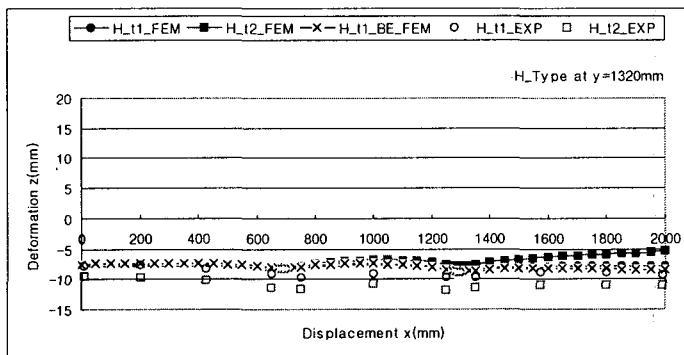


Fig.9 H_type 용접변형 실험/해석결과 (y=1,320mm)

Fig.8은 y축 방향에 따라 발생한 용접변형을, 그림.9는 x축 방향에 따라 발생한 용접변형을 용접순서 H_t1과 H_t2에 대해 보여 주고 있다. 용접변형은 단부에서 H_t1이 +10mm, H_t2도 -10mm로 차이를 보이고 있다. 그러나 이상의 결과만으로는 용접순서가 용접변형에 영향을 준다고 판단하기 어렵다. 따라서 본 실험결과를 Table.1과 같이 표준편차를 이용해서 평가하고, 이를 등가하중법에 의해 수치해석하여 비교분석하였다. 실험결과를 표준편차로 분석한 결과 67%의 차이를 보여 실험에 의한 결과만으로 판단하는 경우 용접순서가 용접변형에 영향을 준다고 판단된다.

3.2 등가하중법에 의한 용접변형해석

H_Type의 소조립 부재를 모델링하여, 단위 모멘트법을 적용하여 용접순서 H_1과 H_2를 도출하였다. 모델의 밀판과 Stiff.는 2차원 4절점 shell요소를 사용하고, 가접 및 용접부는 8절점 3차원 solid요소를 사용하였다. P_Type부재와 같이 용접조건은 동일하며, 용접순서에 의한 용접부 강성변화를 고려하기 위해 Solid요소를 이용하였다.

Fig.8과 9는 실험과 해석을 통해 구한 용접변형을 비교하여 보여주고 있다. 두 결과 값은 단부에서는 약간의 차이를 보이고 있으나 전체적으로 잘 일치하고 있다. 비드 단부에 단위모멘트를 재하하여 구한 용접순서 H_T1_BE은 전체적으로 안정된 변형을 보이고 있으며 Table.1의 표준편차로 구한 값도 제일 작게 나타났다. 그러나 전체적으로 용접변형량의 차이가 작아 해석에 의해 구한 용접변형은 용접순서에 의해 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

Table.1 용접변형량에 대한 표준편차

부재타입	용접순서	평균(실험)		표준편차(실험)		표준편차(해석)	
		계산 값	%	계산 값	%	계산 값	%
H_Type	T1	8.84	100	4.14	100	2.51	100
	T2	7.82	90	6.93	167	2.45	97.6
	T1_BE	-	-	-	-	2.25	89.6

4. 결 론

소조립 부재에 대해 자중과 용접순서가 용접변형에 미치는 영향을 규명하기 위해 실험과 등가하중법에 의해 용접변형해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접순서에 따른 용접부의 강성변화 효과를 재현하기 위해 용접부를 Solid요소로 모델링하였고, 비선형 Contact 문제로 해석하여 자중효과를 반영하였다.
- 2) Parallel weld path 부재에 대해 등가하중법에 의한 자중에 대한 효과를 검토한 결과 자중 고려 유무에 따라 용접변형량은 약 3배 정도 차이를 보였다.
- 3) H_shaped weld path 부재에 대한 실험결과는 표준편차로 평가한 결과 용접순서에 의해 용접변형량이 67%가 발생하여 중점적으로 해석을 실시하였다. 또한 용접순서를 결정하는 방법도 기존의 용접부 중앙에 단위모멘트를 재하하는 방법과 비드단부에 단위모멘트를 재하하는 2가지 방법을 적용하여 용접순서를 결정하여 해석을 실시하였다. 그러나 해석결과는 표준편차를 이용하여 평가한 결과 용접순서에 의해 영향을 받지 않았다.
- 4) 따라서 본 해석대상부재에서는 용접순서가 용접변형에 영향을 주지 않은 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 寺奇侯夫：構造用材料の溶接残留応力溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響に関する研究，大阪大学博士論文，pp. 53-54,1976
2. 辻勇、小川量也：日本溶接學會誌，Vol.45 No.1, 36, 1976.
3. T. Nomoto, S. Takechi, and K. Aoyama, "Basic Studies on Accuracy Management System Based on Estimating of Weld Deformations", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 181, No.4, pp.249-260, 1997.
4. S.I. Seo, C.D. Jang, "A Study on the Prediction of Deformations of Welded Ship Structures", Journal of Ship Production, Vol. 15, No.2, pp.73-81, 1999.
5. H. Murakawa, Y. Luo, and Y. Ueda, "Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain (First Report) Mechanism of Inherent Strain Production", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 180, pp.739-751, 1996.
6. H. Murakawa, Y. Luo, and Y. Ueda, "Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain (Second Report) Deformation and Residual Stress under Multiple Thermal Cycles", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 182, pp.873-793, 1997.
7. H. Murakawa, Y. Luo, and Y. Ueda, "Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain (Third Report) Deformation and Residual Stress in Narrow Gap Welding ", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 183, pp.323-333, 1998.
8. C.L.Tsai, S.C. Park and W.T. Cheng : Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure, Welding Journal,74(2)(1999)