

도그 피스 설치량에 따른 맞대기 용접 변형 연구

유현수**

* 대우조선해양 중앙연구원

A Study on the Butt Welding Deformation Considering Dog-Piece Setting

Hyun-Su Ryu**

* Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering R&D Institute, Seoul 100-210, Korea

요 약 : 본 연구에서는 도그 피스 설치량에 따른 용접 변형 실험을 수행하여 용접 변형 감소 효과를 정량적으로 평가하였고, 도그 피스 설치를 고려한 용접 변형 해석 방법을 제안하였다. 용접 변형 실험 결과, 도그 피스 설치량이 증가할수록 용접 변형이 감소하며 최대 74%의 변형 감소 효과가 있음을 확인하였다. 원판형 열속 모델을 사용한 열탄소성 유한요소 해석을 활용하여 도그 피스 설치를 고려한 용접 변형 해석 방법을 제안하고, 해석 결과와 실험 결과가 좋은 유사성을 보이고 있음을 확인하였다. 본 해석 방법은 현행 도그 피스 설치량에 대한 적정 여부를 평가하거나 도그 피스 사용량을 절감할 수 있는 설치 가이드를 마련하기 위한 해석적 툴로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 블록조립, 맞대기용접, 도그피스, 열탄소성해석, 입열량

Abstract : In this study, experiments of welding deformation considering dog-pieces setting were performed to assess the effect of dog-pieces on welding deformations quantitatively and an analysis method of welding deformations considering dog-pieces was proposed. Experimental results show the relationship between welding deformations and dog-pieces setting quantitatively. The maximum reduction of welding deformation was measured as 74%. The proposed numerical analysis method to predict welding deformations is one of thermal elasto-plastic analyses using a circular heat flux and finite elements model and has been verified through experiments of welding deformation. The proposed analysis method is expected to be used in a variety of fields as an analysis tool to assess or establish guidelines for a proper use of dog-pieces.

Key Words : Block assembly, Butt welding, Dog-piece, Thermal elasto-plastic analysis, Heat flux

1. 서 론

선박 건조 과정에서 블록과 블록의 용접 조인트 작업 시, 용접 개선 부위의 단차 조정과 블록 조인트 부위의 용접 변형 예방을 위하여 다량의 피스(piece)가 사용되고 있다. 이와 같은 용접 변형 방지용 피스는 각변형을 구속하면서 면내 변형은 자유롭게 발생시켜 용접 잔류 응력을 저감시키는 효과가 있다(Park, 2005). Fig. 1과 Fig. 2는 블록 조립 및 탑재 공정에서의 피스 작업 영역들을 보여 주고 있다.

Fig. 3의 (a)~(c)는 단차 조정 및 용접 변형 예방을 위해 사용되는 대표적인 피스 형상이다.

피스 시공 작업은 먼저 단차 조정 작업이 완료된 후, Fig. 1

과 같이 용접 변형 예방용 피스가 일정 간격으로 용접하여 설치된다. 그리고 본 용접 이후 이를 절단하고 육성 용접 및 사상 작업이 수행된다. 이와 같은 작업에 투입되는 시수만 하더라도 연간 약 123,000 MH에 이르는 것으로 조사되었다(Noh et al., 2008). 블록 조인트 용접의 작업 중요도와 블록 정도 관리 차원에서 단차 조정 및 용접 변형을 감소시키기 위한 피스 사용은 피할 수 없는 부분이다. 따라서 생산성과 품질을 함께 향상시키기 위해서는 적정 수준에서의 피스 사용량 절감 대책이 필요한 실정이다. 피스 사용량 절감 대책을 마련하기 위해서는 먼저 현행 피스 설치량이 적정 수준인지 여부를 평가해야만 한다. 즉, 피스를 고려한 맞대기 용접 변형 해석을 통해 피스 설치량에 따른 용접 변형량을 계산하여 정도 측면에서의 적정 수준 여부를 평가해야 한다. 맞대기 용접 변형 해석 연구 동향을 살펴보면 변형도 경계

† flame@snu.ac.kr, 02-2129-3575

도그 피스 설치량에 따른 맞대기 용접 변형 연구

법을 기반으로 쉘요소를 사용한 탄성 변형 해석 연구(Ha and Yang, 2010), V-개선 맞대기 용접 변형 실험과 열탄소성 해석을 통한 용접 변형 간이 예측 모델 연구(Kim, 2004), 용접 변형 간이 예측 모델을 사용하여 절점에 강제 변위 조건을 부여하는 방법으로 평블록의 용접 변형을 해석하는 연구(Lee, 2004) 등이 주를 이루고 있다. 그러나 기존 연구에서는 피스 모델이 생략된 유한 요소 해석 모델을 사용하였기 때문에 용접 변형 예방용 피스가 최종 변형 결과에 어떤 영향을 미치는가에 대한 논의는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 피스 설치를 고려한 맞대기 용접 변형을 계산하기 위한 방법으로 유한요소법 중 하나인 열탄소성 해석법을 활용하여 적합한 해석 방법을 제안하였다. 열탄소성 해석 방법은 입열 조건에 따른 열전달 해석을 통해 시간에 따른 온도 분포를 계산하고, 이 결과를 이용하여 단계 별로 탄소성 해석을 수행하여 변형 형상, 응력 분포, 잔류 변형률 및 그 이력과 같은 상세한 정보를 정성적으로 얻을 수 있다. 따라서 용접 완료 후 피스가 제거된 상태의 최종 변형을 계산하기 위해서는 열탄소성 해석 방법이 적합하다. 또한, 본 연구에서는 피스 사용량에 따른 맞대기 용접 변형 실험을 수행하여 피스 사용량이 용접 변형에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

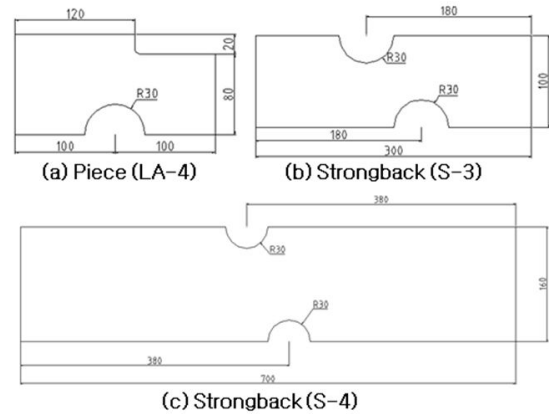


Fig. 3. Shape of pieces and strongback.

2. 피스 사용량을 고려한 맞대기 용접 변형 실험

본 실험은 평블록 조인트 맞대기 용접 시 사용하는 용접 변형 방지용 피스의 사용량에 따른 용접 변형량을 비교하고 분석하여, 용접 변형 해석 결과와 실험 결과와의 비교를 통해 맞대기 용접 변형 해석 방법을 정립하는 것을 목적으로 수행되었다. 실험 용접 조건은 FCAW(Flux Core Arc Welding) 현장 시공 지침을 참고로 다음 Table 1과 같이 선정하였다.

Table 1. Butt welding conditions

Item	Value
Current [A]	210 ~ 270
Voltage [V]	27 ~ 31
Speed [mm/min]	100 ~ 200
'V' groove angle [degree]	35
Root gap [mm]	8

시편 사이즈는 940×1100×15 mm이며, 실험 case는 피스 설치 개수에 따른 용접 변형량을 비교하기 위해 Fig. 4와 같이 피스 설치 개수가 0개, 3개, 5개의 3가지 case로 구분하여 실험을 수행하였다. Case1은 피스를 설치하지 않은 경우의 용접 변형량을 측정하여 피스를 설치한 경우의 용접 변형량과 비교하기 위한 일종의 대조군이다. Case2는 3개의 피스를 275 mm 등간격으로 설치한 실험군이다. 등간격 275 mm는 현장에서 경험적으로 사용하는 피스 설치 간격 250 mm-300 mm의 평균값이다. Case3은 5개의 피스를 약 183 mm 등간격으로 설치하여 case2보다 조밀한 간격으로 피스를 설치한 경우의 용접 변형량을 파악하기 위한 실험 조건이다.

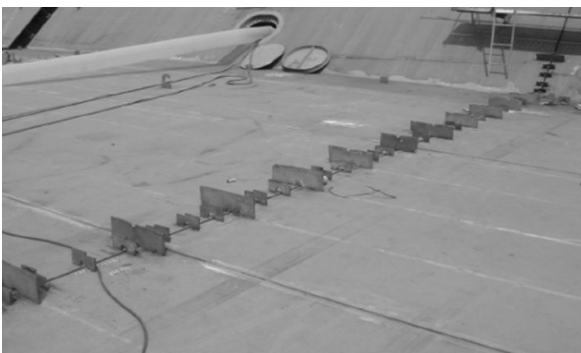


Fig. 1. Set up pieces by welding at block assembly stage.

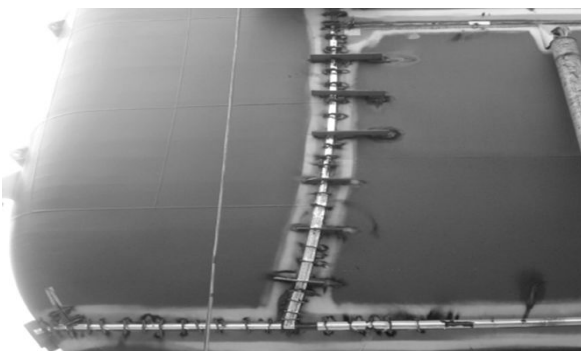


Fig. 2. Set up pieces by welding at block erection stage.

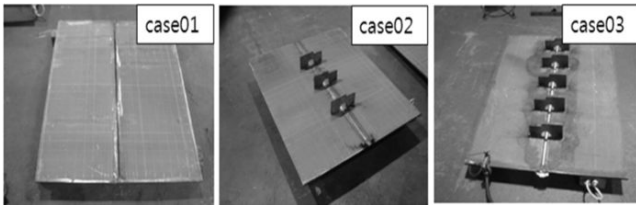


Fig. 4. Specimens by experimental cases.

시편 구속 방법은 자유 상태 정반 조건을 사용하였고, 용접 라인 양 끝 단에 태그 용접을 하여 시편을 고정하였다. 용접 변형량은 3차원 접촉식 계측기를 사용하여 마킹 포인트의 3차원 좌표 값을 획득하여 그 차이를 비교하여 산출하였다. 마킹 포인트는 피스 설치 면의 반대 면에 격자 형태로 50 mm 간격으로 표시하였고, 용접 비드 인근 부분은 20 mm로 보다 조밀하게 표시하였다. 용접 변형 실험은 각 case별로 Fig. 5와 같이 용접, 피스 제거, 변형 계측의 순서로 진행하였고, 용접 조건 모니터링 결과와 용접 비드의 외관 검사 결과 모두 양호함을 확인하였다.

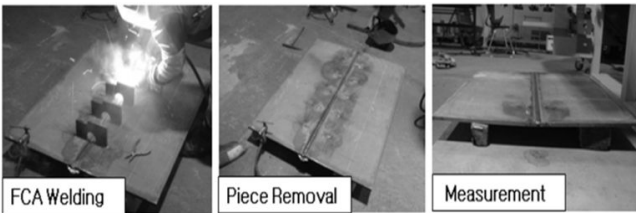


Fig. 5. Procedure of experiments.

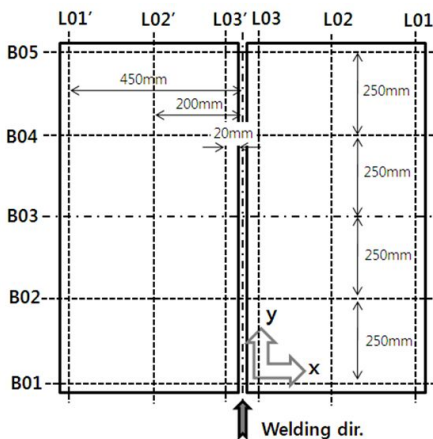


Fig. 6. Positions of lines for comparison of welding deformations.

각 시편 별로 총 504개의 마킹 포인트를 계측한 후, Fig. 6에 보인 횡방향(B01~B05)과 종방향(L01~L03')으로의 각 비교 라인 위치에서의 용접 변형량을 Fig. 7과 Fig. 8의 예와 같이 도시하여 분석하였다.

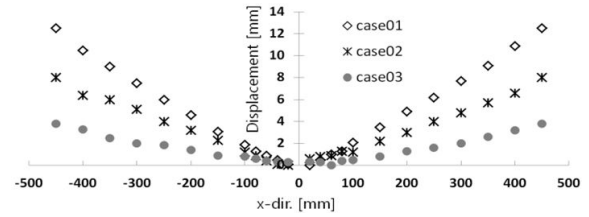


Fig. 7. Comparison of welding deformations in x-direction (B03).

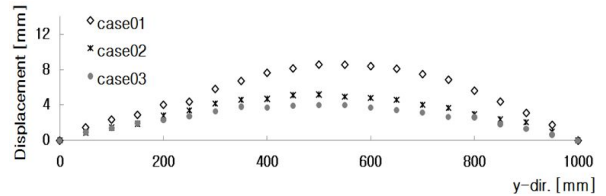


Fig. 8. Comparison of welding deformations in y-direction (L01).

용접선 수직 방향으로 각 비교 라인 별 최대 변위 값을 비교하면 위의 Table 2와 같다.

Table 2. Comparison of max. displacements in x-dir. [mm]

Item	B01	B02	B03	B04	B05	Avr.	Remark
case01	12.8	12.1	12.4	12.8	13.2	12.7	0 piece
case02	7.5	8.0	8.0	7.8	7.7	7.8	3 pieces
case03	3.7	3.2	3.7	2.9	3.2	3.3	5 pieces

Table 2에서 각 case 별 평균값을 기준으로 피스가 없는 경우(case01)와 비교하여 피스 3개 설치 시 38%, 피스 5개 설치 시 74%의 각 변형 감소 효과가 있음을 알 수 있다. 아울러 case01의 경우, 모서리 효과(edge effect)로 인해 용접선 시작(B01)과 끝(B05)부분에서 상대적으로 각 변형이 증가하는 것을 확인할 수 있지만 case02와 case03의 경우에는 피스 구속 효과로 인하여 case01과는 다른 각 변형 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 한편, 용접선 평행 방향으로 각 비교 라인 별 최대 변위 값을 비교하면 다음 Table 3과 같다.

Table 3. Comparison of max. displacements in y-dir. [mm]

Item	L01	L02	L03	L01'	L02'	L03'	Avr.	Remark
case01	8.6	9.0	8.6	7.6	8.2	8.3	8.4	0 piece
case02	5.2	5.5	5.0	6.1	6.3	5.9	5.7	3 pieces
case03	4.0	4.1	4.4	5.8	5.4	5.0	4.8	5 pieces

Table 3에서 볼 수 있듯이 용접선 평행 방향의 경우, case01과 비교하여 case02는 32%, case03은 43%의 종굽힘 변형 감소 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이는 각 변형 감소 효과

수치보다는 작은 값으로 기존 용접 예방용 피스 설치는 주로 용접 각 변형을 감소시키는 효과가 있음을 의미한다. 아울러 중급힘 변형의 경우에는 case02와 case03의 변형량 차이가 각변형의 경우와 비교하여 미미하다는 것을 확인할 수 있다. 이상의 용접 변형 실험 결과를 토대로 용접 변형 예방용 피스 설치량에 따른 용접 변형 감소량을 정량적으로 분석하였고, 맞대기 용접 변형 해석 방법 정립을 위한 검증 실험 데이터를 마련하였다.

3. 피스 모델을 고려한 맞대기 용접 변형 해석

피스를 고려한 맞대기 용접 변형 실험 결과를 토대로 맞대기 용접 열탄소성 해석 방법을 정립하기 위하여 다음과 같은 일련의 과정을 통해 용접 입열 모델 및 경계 조건 등의 해석 조건을 선정하였다.

(1) 상용 유한 요소 해석 프로그램인 MSC MARC를 사용하여 맞대기 용접 열탄소성 해석을 수행하였다.

(2) 열전달 해석 시 4-node bilinear shell(heat transfer element)를 사용하였고, 두께 방향으로선 선형 온도 구배를 표현할 수 있도록 적분점(integration point)를 9개로 설정함으로써 solid element를 사용하는 경우와 비교하여 계산 시간 효율을 향상시켰다. 사용된 shell element는 면내(plane)방향으로는 이중선형보간법(bilinear interpolation)으로 온도 분포를 계산하고, 두께 방향으로선 선형(linear) 또는 이차(quadratic) 온도 분포를 가정하여 최대 11개의 적분점을 갖는 심슨 룰(Simpson's rule)에 의해 온도 구배를 표현할 수 있다.

(3) Young's modulus, yield stress, tangent modulus, specific heat, thermal expansion coefficient, conductivity의 경우, 온도의존성 물성치(Shin et al., 2007)를 사용하였다.

(4) Fig. 9와 같이 용접선을 기준으로 좌우 대칭 모델을 생성하고, 대칭 경계 조건과 시편 고정용 태그 용접 부위의 절점에 강체 운동을 방지하기 위한 경계 조건을 적용하였다.

(5) 해석 용접 조건은 용접 속도 150(mm/min), 전류 240(A), 전압 29(V)의 값을 사용하였다. 일반적으로 수동 아크 용접의 경우, 자동 용접에 비해 작업자의 기량과 주위 환경에 따라 용접 속도, 전류, 전압이 불규칙적이다. 본 연구에서는 용접 속도, 전류, 전압의 변화값이 가급적 Table 1의 현장 시공 지침 범위 내에 포함될 수 있도록 모니터링과 반복적인 예비 실험을 수행하여 비교적 안정적인 수동 용접을 실시하였다. 해석에 사용된 용접 조건은 실제 용접 실험에서의 시간에 따른 용접 조건 변화값을 사용하는 대신 해석 스텝(step)의 수를 줄여 해석 시간 효율을 높이기 위해 범위의 평균값을 사용하였다.

(6) case01의 실험 결과를 토대로 해석 변수값을 변화시키면서 해석 결과와 실험 결과와의 유사도를 Table 4와 같이 계산한 결과, 유사도가 가장 높은 해석 변수값인 R135를 해석 조건으로 결정하였다.

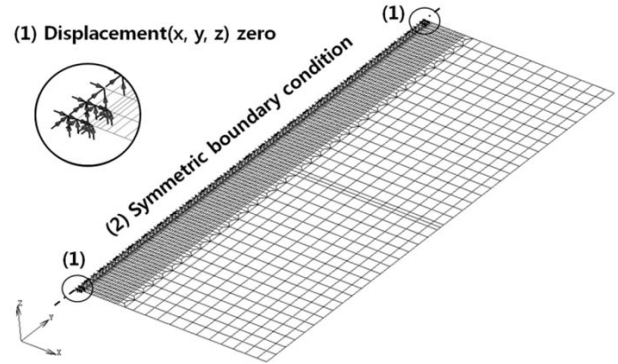


Fig. 9. Finite element model and boundary conditions.

Table 4. Similarity of analysis and experimental results (case01)

Similarity [%]	R100	R125	R135	R150
Angular deformations	52 %	95 %	100 %	18 %
Longitudinal deformations	87 %	92 %	98 %	52 %

해석 변수값(heat flux parameter)는 본 해석에서 사용한 원판형 열속 모델(Goldak et al., 1984)의 반경(radius)을 의미하며, 이동 열원을 모사하기 위해 선택한 열속 모델은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$q(x, y, z) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{3x^2}{r^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

여기서, q는 단위 면적당 입열량을 의미하며 Q는 입열 효율과 전압 및 전류의 곱으로 표현되는 입열 파워(heat source power)이고, r은 원판의 반지름이다. 열속 모델의 직교 좌표계(x,y,z)에서 z는 용접선 길이 방향, x는 용접선에 수직인 방향, y는 아크(arc)방향을 의미한다. 한편, 유사도(similarity)는 계측 포인트의 수직 변위 값과 해석 곡선에서 계측 포인트에 대응되는 포인트의 수직 변위 값의 차이가 허용 오차(tolerance) 이내인 포인트들의 개수를 전체 비교 포인트 개수로 나눈 값을 백분율로 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11은 해석 변수값에 따른 각변형과 중급힘 변형의 해석 결과와 case01의 실험 데이터를 비교한 예시이다. R135인 해석 결과가 case01의 실험 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있다.

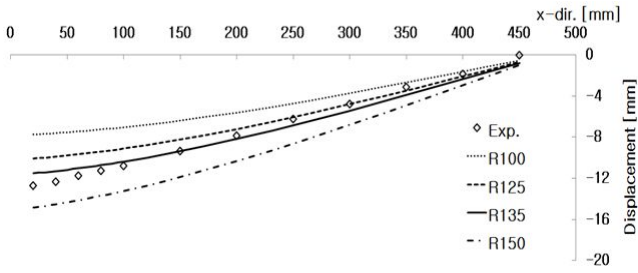


Fig. 10. Analysis results by heat flux parameters (B01).

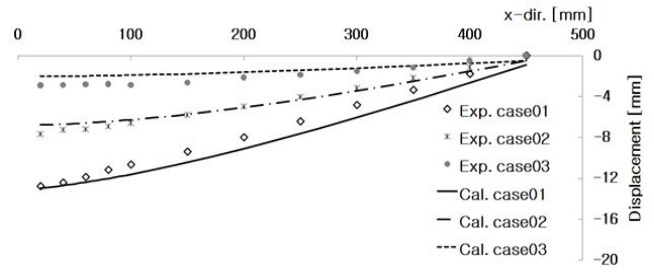


Fig. 13. Comparison of analysis and experimental results (B04).

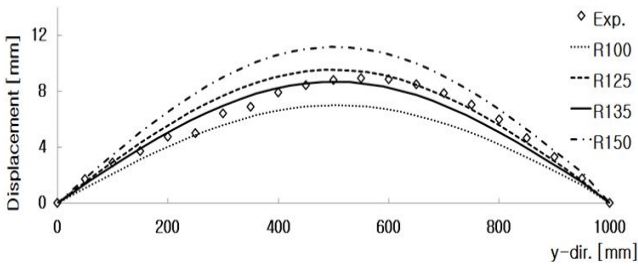


Fig. 11. Analysis results by heat flux parameters (L02).

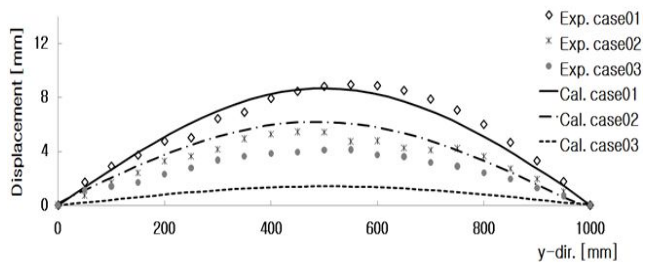


Fig. 14. Comparison of analysis and experimental results (L02).

Case01의 실험 결과를 토대로 정립한 해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 case02와 case03에 대한 해석 모델을 Fig. 12와 같이 생성하고 case01의 경우와 동일한 해석 조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

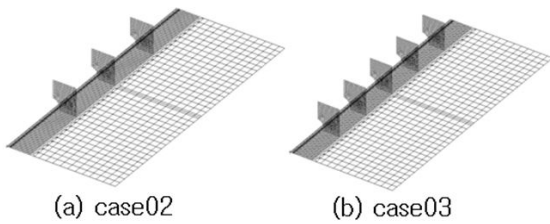


Fig. 12. Finite element models considering piece elements.

Fig. 13과 Fig. 14는 각 case에 대하여 각변형(B04)와 종굽힘 변형(L02)를 도시한 것으로 다른 비교 라인에서도 유사한 경향을 보인다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 각변형(B04)는 실험 결과와 해석 결과가 비교적 잘 일치하고 있지만, Fig. 14의 종굽힘 변형(L02)는 case03의 경우에 다소 차이를 보인다. 하지만 L02 비교 라인의 case03 종굽힘 변형 실험 결과가 최대 4.1 mm 이하로 그 값이 비교적 작다는 것을 고려하면 해석 결과 역시 변형 자체가 미미하다는 것을 고려할 때 정성적인 측면에서는 해석 방법이 실험 현상을 모사할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 평블록 조인트 용접 시 사용되는 다량의 용접 변형 방지용 도그 피스의 사용량을 절감할 수 있는 가능성을 검토하기 위해 피스 설치량에 따른 맞대기 용접 변형 실험을 수행하고 피스 설치를 고려한 맞대기 용접 변형 해석 방법을 정립하였다. 피스 설치량이 증가할수록 각변형과 종굽힘 변형이 감소하는 것을 정량적으로 평가하였고, 피스 모델을 고려한 맞대기 용접 변형 해석 방법을 제안하여 실험 결과와 해석 결과와의 비교를 통해 해석 방법이 피스 설치를 고려한 맞대기 용접 변형 현상을 충분히 모사할 수 있음을 확인하였다.

향후, 본 연구에서 제안한 해석 방법을 활용하여 평블록 조립 시의 도그 피스 설치량에 따른 맞대기 용접 변형 시뮬레이션을 수행하고, 평블록 조인트 용접 라인의 변형량을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하는 등의 연구를 추가로 수행하여 해석법의 활용 범위를 확장시킬 필요가 있다. 평블록 수준의 모델까지 확장된 해석법을 활용한다면, 도그 피스 배치 도면 작성 및 설치 간격을 포함하는 도그 피스 설치 가이드 작성 등의 실질적인 도그 피스 사용량 절감 방안을 궁극적으로 마련할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Goldak, J., A. Chakravarti and M. Bibby(1984), A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, Metallurgical Transactions B, Vol. 15, No. 2, pp. 299-305.
- [2] Ha, Y. S. and J. H. Yang(2010), Development of Distortion Analysis Method for Multi-pass Butt-welding Based on Shell Element, Journal of the Korean Welding and Joining Society, Vol. 28, No. 1, pp. 54-59.
- [3] Kim, S. I.(2004), Development of Simple Prediction Model for V-groove butt welding deformation, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 106-113.
- [4] Lee, J. S.(2004), Simulator for Weld-Induced Deformation Prediction of Panel Blocks, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 1, pp. 55-63.
- [5] Noh, H. Y., K. J. Kim, R. S. Leem and H. K. Kim(2008), A Study on a Development of the Grinding Robot to Remove Welding-bid of Working Pieces, Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 136-143.
- [6] Park, J. U.(2005), Prevention and Correction of Welding Deformation, Journal of the Korean Welding Society, Vol. 23, No. 4, pp. 12-16.
- [7] Shin, D. H., S. B. Shin and J. S. Lee(2007), A Study on the Prediction of Welding Distortion and Residual Stress for Channel I Butt SA Weldment Using FE Analysis, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 6, pp. 598-604.

Received : 2015. 02. 25.

Revised : 2015. 04. 03.

Accepted : 2015. 04. 27.