

研究論文

필릿 용접부의 각변형량 예측에 관한 연구

양영수* · 이세환** · 위창욱*** · 조수형***

A study on the estimate of the angular distortion for a fillet weldment

Y. -S. Yang*, S. -H. Lee**, C. -W. Wee*** and S. -H. Cho***

key words : Angular distortion (각변형), SAW (서브머지드 아크용접), Finite element method (유한요소법), Fillet weldment (필릿 용접부), Constraint boundary condition (구속 경계조건)

Abstract

Welding distortion is more serious problem than any other problems caused by welding process, especially, in the heavy-industrial place. These welding distortions are caused by nonuniform heating and cooling of metal during and after welding operations. And these distortion quantities are must be known to worker in production line because distortions are important role in assembling part. Therefore an analytical model to explain and predict the welding distortion are needed. A numerical analysis of welding distortion which is inelastic behavior of weldment would require the three dimensional calculation. But computing time and memory would be very large, and the resulting cost might be unacceptable.

Therefore we use a numerical technique for two dimensional analysis in the section normal to the weld direction of weldment under an assumption of quasi-stationary conditions. But the result of the calculation under two dimensional (plane strain) assumption was not satisfied as compared with experimental result.

This paper proposed a technique for analysing the welding angular distortion by using a constraint boundary condition on the two dimensional finite element model. The simulation results revealed that the constraint boundary model could more reasonably describe the welding distortion than the plane strain model did.

※ 1996년 10월 7일 접수

* 정회원, 전남대학교 기계공학과

** 학생회원, 전남대학교 기계공학과

*** 정회원, 삼성중공업 전기부문 생산기술팀

1. 서 론

아크를 이용한 용접에서 국부적인 열의 입력으로 인하여 용접모재는 가열과 냉각을 겪는 동안 불균일한 온도분포를 가지게 된다. 이로 인해 모재 내에는 열응력이 발생하고 용접 후에 여러 형태의 변형이 잔류하게 된다. 용접시에 발생하는 이러한 변형 문제가 산업현장, 특히 중공업 분야에서는 오래 전부터 심각한 문제로 대두되고 있다. 이 중에서도 필렛 용접부의 각변형(angular distortion)으로 인하여 구조물의 조립 단계에서 치수가 부정확하고 단차가 발생하는 등의 어려움이 발생하는바, 현재 용접을 한 후에 변형 부위에 열을 가함으로써 변형을 바로 잡는 방법이 보편적으로 많이 사용되고 있다.¹⁾ 한편 이와같은 교정 방법은 작업자의 숙련된 기술을 요구할 뿐만 아니라 상당한 시간을 필요로 하기 때문에 시간과 경비의 손실을 가져오게 된다. 용접 변형을 제어하는 다른 방법으로는 용접 전에 예상되는 변형에 반대되는 방향으로 물리적인 힘을 가하거나 열을 가해서 미리 역변형을 준 다음에 용접을 하는 방법이 있다.²⁾ 이는 구조물이 완성되기 전의 공정이기 때문에 작업공정상의 이득을 볼 수 있는 장점이 있으나, 용접 전 어느 정도 크기의 변형량을 미리 주어야 하는지를 먼저 결정해야 하는 문제점이 있다. 용접후 최종 변형량을 예측하는 방법으로 실험을 통하여 확인하는 것이 가장 정확하겠지만 각기 다른 형상의 용접부에 대하여 실험을 하는 것은 경제적이지 못하다. 그래서 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 용접부의 최종 잔류 변형량을 예측하고자 하였다. 구조물의 형상은 용접구조물에 많이 사용되는 필렛용접부를 선택하여, 각변형량을 계산하였다. 이러한 계산은 유한요소 상용코드인 ABAQUS를 이용하였으며, 용접 시편의 두께를 각각 다른 4가지 경우(15mm, 18mm, 21mm, 25mm)에 대하여 해석을 하였고, 주 관심대상으로 계산한 변형량은 하판이 상방향으로 휘면서 발생하는 각변형량으로 하였다. 용접변형을 해석하기 위해서는 3차원 해석이 요구되나, 3차원 해석은 해석시간과 중앙 처리 장치의 용량문제로 비경제적이므로 2차원 해석 방법을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 평면 변형을 조건인 2차원 해석 방법은 실험값과 오차

가 크게 나타나 계산 결과를 신뢰할 수가 없는 상태이다.

그러므로 본 연구에서는 2차원 평면 변형을 모델의 부정확성을 해결해 보고자 새로운 개념의 구속 경계조건을 사용하여 용접부 각변형을 계산하는 방법을 제시하였다. 또한 제안된 방법의 정확성을 검증하기 위해서 앞에서 설명한 네 가지 시편편에 대하여 실험을 수행하여 실제 변형량을 측정하고 해석 결과와 비교하였다.

2. 유한요소 해석

실제 중공업 분야에서 많이 사용되는 후판의 필렛 용접부를 해석이 용이하게 단순화시켜 모델링하였다. 이러한 전 과정을 해석하려면 3차원 비정상상태의 계산이 요구된다.³⁾ 본 연구에서는 용접길이 방향을 준정상상태로 가정하여 길이 방향과 수직단면을 해석영역으로 한 평면 변형을 조건의 2차원 해석을 수행하였다. 유한요소 계산은 상용 코드인 ABAQUS를 사용하였다.

2.1 해석영역 및 경계조건

해석대상은 굴삭기 상판 center frame으로 복잡한 3차원 형상을 이루고 있다. 이를 단순한 형상으로 Fig.1과 같이 가정하고, 해석시에는 Fig.2와 같이 해석영역을 2차원화하여 평면 변형을 조건으로 계산하였다. 해석영역은 온도분포해석과 응력/변위 해석의 경우, 동일한 요소분할(mesh generation)을 하여 사용하였다.

온도분포 해석에서 아크로부터 용접모재가 받는 열원의 입력은 각장 요소에 수직한 방향 전면에 상당(equivalent) 반경(\bar{r})이 4mm인 Gaussian 형태로 분포한다고 가정하였다.⁴⁾ 또한 아크로부터 모재로의 열입력시 손실을 고려한 아크의 효율은 SAW의 경우인 90%로 하여 입력 하였다.

열원의 국부적인 입력에 의해 온도구배가 심한 각장부위 주변에는 보다 미세하게 요소분할을 하였으며 온도분포 해석시 경계조건은 먼저 초기에 주어지는 모든 절점에서의 온도를 대기의 온도와 동일하게 20℃로 하였고, 주위로의 대류에 의한 열손실도 고려하였다. 응력해석시 경계조건은

Fig. 2와 같이, 고정되어 있는 가운데의 두 점에서 x와 y방향으로의 변위를 구속하여 강제 운동을 구속하는 조건을 만족하게 하였다. 또한 Fig. 3과 같이 작업대 위에서 용접을 진행하였으므로 실험시와 동일한 구속을 위해서 용접부 하단에서 y방향으로 구속하였다.

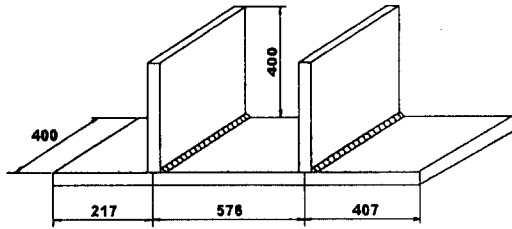


Fig. 1 Size of the experimental specimen

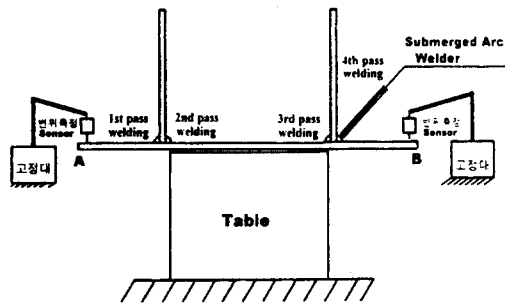


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

2.2 해석 순서

유한요소법을 이용한 용접과정의 해석은 먼저 온도분포 해석을 수행하게 되는데, 가열과정과 냉

각 과정을 거쳐 상온에 도달하게 되는 시간까지를 전체 해석시간으로 하여 계산한다.⁵⁾ 본 연구에서는 각각 두께를 달리한 네 가지의 시편에 대해서, 네 군데의 용접 pass를 갖고 있는데, Fig. 3에서 보여주는 바와 같은 순서대로 각 pass 용접 후 전체 해석영역이 상온으로 냉각하는 시간인 200초까지 하여 한 가지 두께의 시편에 대해 모두 4 pass 용접을 모델링하였다. 유한요소 해석에 사용된 열적, 기계적 성질은 온도변화에 따라 변화하는 값으로 입력하여 사용하였고, 잠열의 효과도 고려하였다.⁶⁾

3. 실험

3.1 용접재료와 용접조건

해석과 실험에 사용된 재료는 일반 구조용 압연강재로 많이 사용되는 SS41을 사용하였고, 재료의 성분과 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

용접공정은 각 pass에서 동일하게 SAW였고, 이때 용접조건은 전류 550A, 전압 43V, 속도 5 mm/s로 설정하였다. 용접 wire는 $\phi 4\text{mm}$ 인 UC-36을 사용하였다.

Table 1. Chemical composition and mechanical property of the SS41

C	Mn	Si	P	S	yield stress	tensile stress
0.142	0.721	0.021	0.015	0.015	32kg/mm ²	41kg/mm ²

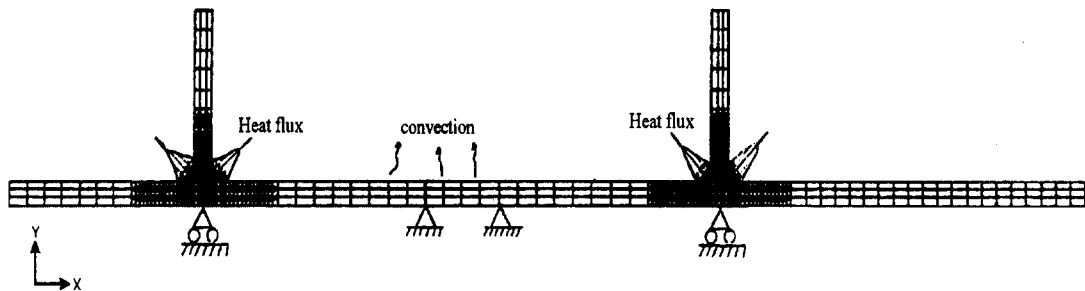


Fig. 2 Mesh generation and boundary condition

3.2 실험장치 및 용접순서

Fig. 3에 실험 장치의 개략도를 나타내고 있는데 각 부위의 길이는 두께를 다르게 한 4가지의 경우 모두 동일하게 하였다. 용접 순서는 그림에서 pass로 표시된 부분의 네 개의 pass를 순서대로 수행하였으며, 각 pass의 용접을 한 후에는 해석 시간과 동일한 200초 이상, 상온까지 완전히 냉각을 시킨 후에 다음 pass 용접을 진행하는 순서로 하였다.

3.3 각변형량의 측정

실험을 통하여 각변형량을 용접과정과 용접 후 냉각하는 시간까지를 포함하는 전체 실험 시간에 대해 측정하였다. 본 연구에서 주 관심 대상으로 한 변형량은, 앞에서 언급한 바와 같이 하판의 각 변형량이다. 각변형량의 측정 위치는, 측정의 용이함을 위하여 용접과정 중 변형량이 가장 크게 나타날 것으로 예상되는 맨 끝단(Fig. 3의 A, B점)으로, 용접 진행방향 전체 길이(400mm)의 중앙인 200mm 되는 지점이었다. 또한 각변형량의 계측은 선형변위의 계측이 가능한 COPAL사의 센서를 각 변형의 계측이 가능하도록 받침대에 고정시킨 후, 변형에 따른 전압의 변화치를 AD converter를 사용하여 PC로 읽어들이고 후 변위량으로 보정하여 얻어 내었다.

4. 해석 결과와 실험 결과 비교

시편 양쪽 끝단 A, B점에서 4th pass 용접 후 잔류 변형량을 측정된 결과와 2차원 유한요소 해석 결과가 Fig. 4와 Fig. 5에 나타나 있다. A점은 용접부(1st pass)에서 변형량 측정점인 끝단까지의 거리가 217mm이고 B점은 용접부(4th pass)에서 거리가 407mm이므로 B점의 변형량이 크게 나타나고 있다. A, B점 모두 주어진 두께 변화에 대해서는 두께가 증가함에 따라 잔류 변형량이 감소하고 있음을 알 수 있고, 이론해석과 실험이 큰 차이가 나타남을 보여주고 있다.

해석과 실험값의 차이가 크게 나타난 근본적인

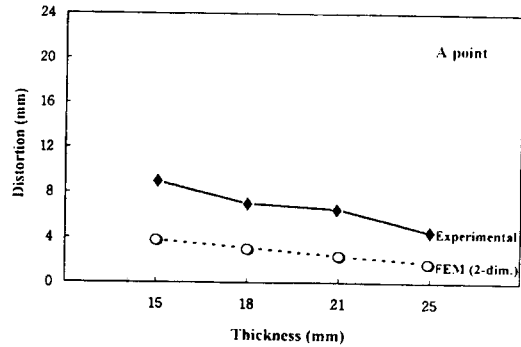


Fig. 4 Comparison of the experimental and 2-dim. FEM data for various thickness (A point)

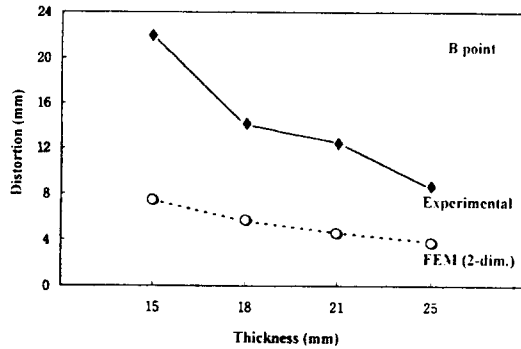


Fig. 5 Comparison of the experimental and 2-dim. FEM data for various thickness (B point)

원인을 알아보기 위해, 특히 변형량이 크게 나타난 B point 3rd pass 경우, 각 pass가 거의 동일한 양상을 나타내었지만, 시간변화에 따른 각변형량의 이력을 조사하였다. 2차원 형상의 가열, 냉각에 의한 변형 양상은 Fig. 6과 같이 초기상태에서 가열과정 동안 팽창에 의해 끝점이 아래로 변형 후 냉각과정을 거치면서 수축이 일어나므로 다시 위로 올라온다. 열응력에 의해 소성변형이 발생하므로 초기상태보다도 끝점이 위로 올라와 Fig. 6의 (C) 형상과 같이 된다. 두께가 18mm인 경우, 3rd pass 용접 전을 초기 상태로, 즉 그 이전까지의 변형량을 고려하지 않고 변형량을 zero로 설정하여 용접이 이루어지는 동안 B 점에서 변형량의 이력이 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나 있다. 해석은 2차원 형상의 가열, 냉각이고 실험은 3차원 평판의 길이방향 중간의 B점에서 측정된 것이므로 시간 간격이 일치하지

않고 있다. 위의 Fig. 6에서 설명한 용접 각변형 원리에 의하면 해석결과인 Fig. 7은 당연한 것이다. 즉, 가열시 팽창이 발생하여 하단으로 처짐이 일어나고 냉각과정을 거치면서 수축이 일어나 위로 변형이 일어나고 있다.

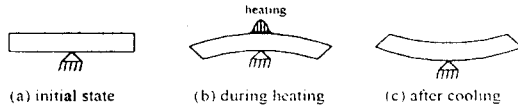


Fig. 6 Schematic diagram of angular distortion mechanism in 2-dimensional analysis

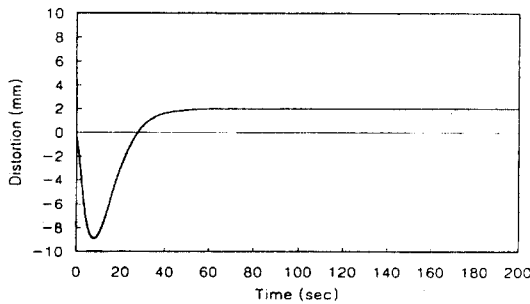


Fig. 7 Angular distortion history at 3rd pass welding in 2-dimensional FEM analysis (B point)

Fig. 8의 실험 결과는 가열시 하단으로 처짐이 일어난 값이 미미하며 냉각시 수축량은 유한요소 해석과 비슷하다. 실험과 유한요소 해석이 큰 차이가 나타난 것은 가열과정 동안 팽창에 의한 변형값이 다르기 때문으로 생각된다. 실험의 Fig. 8에서 팽창량이 적게 나타난 이유는 Fig. 9에서 다음과 같이 이해할 수 있다. 용접길이 방향으로 영역을 zone D, E로 나누어 생각하여, 용접토치가 zone D를 지나갈 때 측정점 B 점 주위는 가열과정으로 팽창이 일어난다. 그러나 zone E는 상온상태를 유지하고 있으므로 Zone D가 팽창하지 못하도록 구속하게 된다. 그러므로 Fig. 8에서 팽창에 의해 하단으로 처짐량이 미미하게 나타나고 있다.

Fig. 9에서 용접토치가 C점을 지나는 시간이 40sec 이다. 그런데 Fig. 8을 보면 40sec 에서는 이미 수축이 진행되고 있음을 알 수 있다. 이것은 C 점 주위는 가열과정을 겪고 있으나 zone D에서 냉각에 의한 수축으로 큰 힘이 작용하여 이 시간에

C점에서 상단 방향으로 각변형이 일어나고 있음을 알 수 있다.

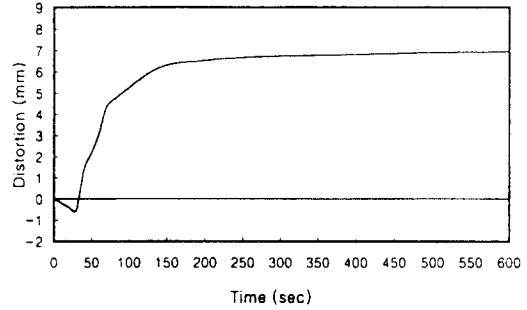


Fig. 8 Angular distortion history at 3rd pass welding in experiment (B point)

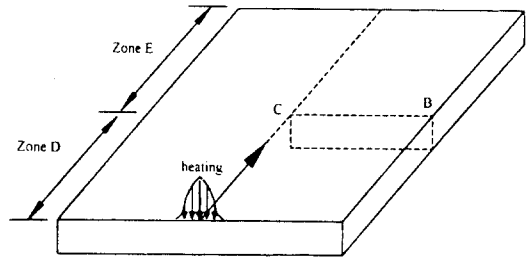


Fig. 9 Schematic diagram of 3-dimensional plate welding

5. 구속 경계조건

2차원 유한요소 해석과 실험값이 상당한 차이를 나타내고 있으므로 새로운 해석기법이 요구된다. 3차원 해석을 하면 문제를 간단히 해결할 수 있으나 계산시간과 컴퓨터의 중앙 처리 장치의 용량문제로 어려움이 있다. 그러므로 본 연구에서는 2차원 해석에 새로운 개념의 구속 경계조건을 도입하였다.

2차원 해석시 문제점은 가열시 팽창에 의한 처짐량이다. 즉 실제 용접의 경우 가열시 팽창량이 용접을 진행함에 먼저 용접된 부분에 의해서 나중에 용접되는 부분을 구속하게 되므로 Fig. 10(a)와 같이 가열하는 동안에는 평판끝단의 y 방향 변위를 구속하는 경계조건을 유지하고, 열원이 해석영역

을 통과한 직후부터는 끝단의 구속이 제거되어 원래의 2차원 경계조건이 된다. 실제 평판에서 가열되지 않은 부분이 가열된 해석영역을 구속하고 있는 조건임을 착안, 구속 경계조건을 적용함으로써 해석 결과의 정확성을 더욱 향상하고자 한 것이다.

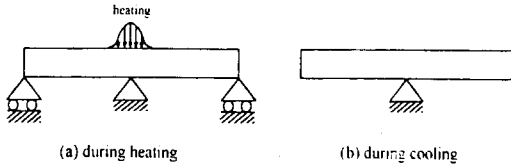


Fig. 10 Constraint 2-dimensional boundary condition

6. 결과 및 고찰

구속 경계조건을 이용한 해석 결과가 Fig. 11과 Fig. 12에 나타나 있다. 새로운 경계조건을 이용한 해석결과가 실험값과 비교하여 잘 일치되고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 2차원 해석에서 실험과 차이를 나타내고 있는 가장 큰 원인은 가열시 팽창을 구속하는 효과였음을 알 수 있다. 그러므로 평판의 각변형 해석은 새로운 경계조건의 2차원 해석으로 충분히 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 4th pass 용접후 잔류 각변형을 나타낸 값으로 많은 오차가 축적 되었을 것으로 예상되나 결과가 실험과 잘 일치하고 있음은 구속 조건에 의한 새로운 유한요소 해석이 상당히 정확함을 알 수 있다.

평판 용접시 각변형량은 시편의 두께를 변화시키에 따라 초기 박판에서는 두께가 증가함에 따라 각변형량이 증가하나, 두꺼운 영역에서는 두께 증가에 따라 각 변형량이 감소함을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 시편 두께의 영역(15-25mm)에서는 두께 증가에 따라 각변형량이 감소하고 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

두께가 다른 4가지의 필렛 용접 시편에 대해 용접 진행 과정과 용접 후 냉각과정까지의 각변형량

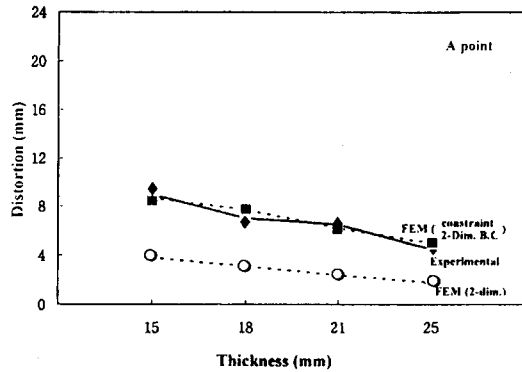


Fig. 11 Comparison of the experimental and FEM data for each thickness (A point)

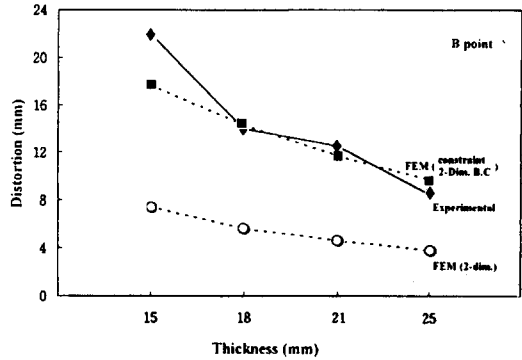


Fig. 12 Comparison of the experimental and FEM data for each thickness (B point)

을 2차원 비정상상태의 유한요소 해석을 하였고, 해석결과를 실제 실험으로부터 얻은 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두께가 다른 4가지 (15mm, 18mm, 21mm, 25mm) 중에서 용접시 발생하는 각변형량의 크기는 시편의 두께가 얇을수록 크게 나타남을 알 수 있었다.

(2) 용접부 가열시의 팽창을 구속하여 주는 새로운 구속 경계조건을 적용하여 각변형량 해석을 한 결과, 실험으로부터 얻은 최종 각변형량의 결과와 거의 일치하였다.

참 고 문 헌

1. Koichi Masubuchi, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980
2. 千葉 貞治, "線狀加熱法の建機部品溶接ラインへの導入", (株)日立建機 土浦事業本部, 1995
3. P. Tekriwal and J. Mazumder, "Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding", *Welding Journal*, July. 1988, pp. 150-s~156-s
4. Rosenthal, D., "Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting", *Welding Journal*, 20(5), May. 1941, pp. 220-s~234-s
5. Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., ABAQUS User Manual, 1992
6. Metal Handbook, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, Vol. 1, 10th edition, 1978