

研 究 論 文

大韓熔接學會誌  
第6卷, 第3號, 1988年 9月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 6, No. 3, Sep., 1988

## 맞대기 용접시의 각변형 거동에 관한 연구

배 강 열\* · 김 희 진\*

### Behavior of Angular Distortion in Butt Joint Welding of Thin Plate Structure

K. Y. Bae, H. J. Kim

**Key Words:** Angular Distortion(각변형), Thin Plate(박판), Butt Joint(맞대기이음), Model Analysis(모델 해석), Free Joint(자유 이음), Restraint Joint(구속 이음)

#### Abstract

The behavior of angular distortion in butt joint welding of thin plate structure is investigated with an experimental model and partially with a computational model. The experimental model studying the effects of specimen size and degree of restraint on the angular distortion offers a good method for analyzing the behavior of the distortion. In addition, the distortion during welding was demonstrated by both experimental measurement and numerical prediction.

The facts revealed in this study are as follows:

- 1) Distortion angles were changed with variations of specimen width.
- 2) With the restraint, angular distortion was reduced to 20% to that of free joint.
- 3) After the restraint being removed, the effect of restraint was also remained.
- 4) Same heat input per unit thickness caused same amount of distortion.
- 5) The mode of angular distortion was expected to be changed with time, i. e., convex movement during heating and concave one during cooling.

#### 1. 서      론

선박의 벌크헤드(bulk head)등 박판구조물(두께 12mm 이하)의 제작에서 맨 처음 판부재간에 맞대기 용접(butt welding)을 하게 되는데, 이때 용접부를 중심으로 발생하는 각변형(angular distortion)은 구조물의 강도상이나 외관상의 문제로 엄격히 규제

되고 있어 심할 경우 조립후 극직(flame)작업 등을 통한 교정작업을 해야 한다. 이러한 비경제적인 교정작업을 최소화하기 위해서 사전에 각변형을 축소하려는 각종의 시도가 이루어져 온 것이 사실이다.<sup>1,2)</sup> 그러나 이들 방법에 대한 효율성 및 경제성을 명확하게 파악할 수 없기 때문에 이들의 무작정 적용은 곤란한 실정이다.

\* 현대중공업 용접기술연구소

즉 변형방지대책을 구상하기 위해서는 먼저 변형의 발생양상과 크기 등에 대한 파악이 충분히 이루어져야 하고, 이를 토대로 하여서만이 가장 효과적이고 경제적인 변형방지방법의 적용이 가능할 수 있다. 실제로 지금까지 맞대기 용접시의 각 변형에 대한 발생원인과 그 크기를 예측하는 계산식이 여러 문헌에서 제시되고 있지만<sup>3,4)</sup>, 실구조물의 변형을 파악하기에는 매우 미흡한 상태이어서 현장적용은 되지 못하고 있다.

본고에서는 간단한 모델(model)을 설정해서 모델 시편의 구속여부, 폭 그리고 두께 등의 요소가 각 변형의 크기에 미치는 영향을 조사하고, 또 용접도중의 변형양상을 조사하여 이에 따른 결과로써 각 변형을 축소할 수 있는 기초적 제안이 되도록 했다.

## 2. 시편 제작 및 변형 계측 방법

### 2.1. 시편 제작

용접구조물은 자체의 강성(stiffness), 받침목(roller) 위치 그리고 구조물 자체의 중량등이 용접변형에 대한 구속으로 작용할 수 있기 때문에 이들에 대한 고려를 하기 위해서는 모델실험에서도 구속의 효과가 얻어질 수 있도록 하는 것과 이 구속의 효과를 판별하는 것이 필요하다. 구속효과를 얻기 위해서 모델실험에서는 Fig.1과 같은 자체 구속부가 있는 연강 재질의 시편을 제작하였다. 시편의 제작은 가로 500mm, 세로 300mm, 두께는 8.3mm, 10.2mm 그리고 11.0mm 등 3가지의 판(plate)을 준비한 후, plate 내에 길이 360mm(또는 240mm), 폭 25mm의 slot을 시편의 양쪽에 만들고, 두 slot 사이에 용접을 할 수 있도록 I구르브(groove)를 내었다. 즉 내부

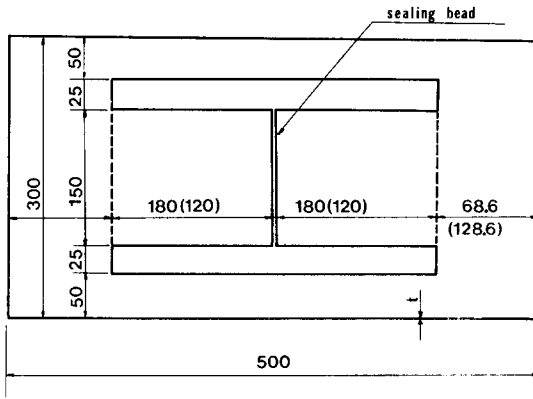


Fig. 1. Restrained butt joint specimen

에 I구르브를 따라 용접을 할 수 있는 맞대기 이음부가 있고, 외부에서 맞대기 이음부가 있는 내부 판(plate)의 양끝을 고정하게 되는 양상으로, 시편 자체내에서 구속효과를 얻을 수 있게 제작한 것이다. 구속이 없는 시편은 외부구속이 없는, 즉 그림에서 나타난 점선이내 부분과 같이 제작하였고, 시편의 폭은 120mm, 240mm 및 360mm 등 3가지로, 길이는 일률적으로 150mm를 선정했다. 이들 시편의 제작에서는 실제 구조물의 제작에서와 같이 sealing bead를 낸 후 1 pass의 '잠호용접(SAW)'을 하였고, 용접조건은 각 시편의 단위 두께당 입열량이 거의 같도록 선정하였다. Table 1에서는 사용된 용접조건을 나타낸다.

Table 1. Submerged arc welding condition for each thickness of plate

Thickness (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed(cm/sec)	Heat input per unit thickness (KJ/cm/mm)
8.3	400	38	55	2.0
10.2	500	38	55	2.03
11.0	650	39	65	1.98

### 2.2. 변형 계측 방법

#### 2.2.1. 용접도중의 변형 계측

효과적인 용접변형 방지방법을 알기 위해서는 용접부와 그 주위 모재의 이동에 의해 지배되는 각변형의 거동, 즉 변형이 완결될때까지의 변형거동을 시간에 따라 조사해 놓는 것이 기본적으로 필요하다. 여기서는 용접에 방해가 받지 않는 한도내에서 용접 seam에 가능한 근접하게, 용접부에서 40mm 떨어지게, 다이얼 게이지의 촉침(probe)을 위치시켜 그 점에서의 용접중 상하변위를 측정하였다. 구속이 없는 경우는 시편폭의 한쪽을 고정시켜 두고 시편외부에 설치된 다이얼 게이지로써 다른 한쪽의 변위를 측정하였고, 구속이 있는 경우는 Fig.2와 같이 구속부에 다이얼 게이지를 고착시켜서 측정을 행하였다.

변형은 구속이 없는 경우는 상향으로의 이동을 +로, 구속이 있는 경우는 하향의 이동을 +로 취하여 용접시작후 5초 간격으로 측정하였다.

#### 2.2.2. 용접후의 변형 계측

용접 변형 계측의 과정은 Fig.3에 나타나 바와 같이 먼저 시편준비를 하고 sealing bead를 낸 후, 초



Fig. 2. Test set-up used for studying the behavior of angular distortion during restraint butt joint welding

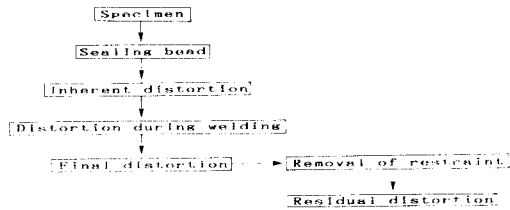


Fig. 3. Measure of welding distortion

기 변형을 측정하고, 용접을 행하면서 용접도중의 변형을 계속하며, 용접완료후의 변형을 계속하여 초기변형과의 차를 용접에 의한 변형으로 취했다. 초기변형과 최종변형의 측정은 정반상에서 행해졌는데, 정반상에 시편을 지지할 수 있는 세개의 지지점을 두고 그 위에 시편을 위치시킨 후, 정반위에 놓인 다이얼 게이지를 시편주위로 이동시켜 가면서 용접 seam으로부터 시편폭방향으로 10mm, 또는 20mm간격으로 측정하였다. 구속이 있는 시편의 경우는 최종 변형 계속 후 구속부를 제거한 상태 (Fig. 1의 점선부분을 절단)에서 다시 변형을 계속함으로써 구속제거후의 변형정도를 판정하였다. 구속 제거는 기계적인 방법, 즉 쇄톱을 사용함으로써 열에 의한 추가 변형의 발생 효과를 최소화했다.

### 3. 수치해석에 의한 용접도중의 변형예측

변형을 이론적으로 접근, 해석하고자 하는 시도는 실험적인 손실, 오차, 어려움등을 생각할 때 매우 타당한 것으로서, 오래 전부터 행해지고 있다.<sup>5,6)</sup> 그러나 이들 결과의 정확성과 실용성등의 문제가 크기 때문에 아직 보편화되어 있지는 않고, 각변형에 관해서도 Tsuji et al<sup>7)</sup>의 접근이 있었으나 매우 단

편적인 정보에 그치고 있다.

본고에서는 山田<sup>8)</sup>의 구조해석 프로그램에 용접에 의한 열적효과(thermal effect)를 고려하여 개조한 열탄소성 프로그램으로 용접도중에 발생하는 각변형의 크기 거동을 살펴 보고자 했다.

이 해석의 formulation은 가상일의 원리를 이용한 것으로 외부력(external force)을 0으로 두고 용접에 의한 열부하(thermal load)와 강성 matrix의 관계에서 변위가 구해질 수 있는 방법으로, 외부력이 0인 조건에서

$$\sum [B]^T \{d\sigma\} d(VOL) = 0 \quad (1)$$

이고,

여기서  $[B]$ 는 strain과 displacement의 관계를 나타내는 matrix이며, 용접시 발생하는 열응력과 변형률(strain)관계는

$$\{d\sigma\} = [D] (\{d\mathcal{E}^t\} - \{d\mathcal{E}_0\}) = [D] \{d\mathcal{E}^t\} - \{C\} dT \quad (2)$$

이고,

여기서  $[D]$ 는 응력과 변형률의 관계를 나타내는 matrix,  $\{d\mathcal{E}^t\}$ 는 총변형률(total strain),  $\{d\mathcal{E}_0\}$ 는 열변형률,  $dT$ 는 온도 증분, 그리고  $\{C\}$ 는  $[D]$ 와 열팽창계수의 곱이다.

$$\{d\mathcal{E}^t\} = [B] \{du\}$$

의 관계에서

$$\begin{aligned} \sum [B]^T [D] [B] \{du\} d(VOL) \\ = \sum [B]^T \{C\} dT d(VOL) \end{aligned} \quad (3)$$

인데, 이를 치환하여, 열부하( $\{dL\}$ ), 강성 matrix ( $[K]$ ) 그리고 변위( $\{du\}$ )의 관계를 나타내면

$$\sum [K] \{du\} = \sum \{dL\} \quad (4)$$

가 되고, 여기서 변위가 계산된다.

본고에서 각변형 해석에 사용된 가정은 다음과 같다.

- a. 평면 변형 문제로 접근한다.
- b. 면(plane)은 독립된 단위면(unit plane)의 합체로 본다. 즉 관심 단위면이 다른 단위면의 변형에 독립적으로 작용한다.
- c. 온도 분포의 계산에서는 준 정상상태를 가정한 Rosenthal 방정식에 mirror method를 첨가하여 두께효과를 보상했다.<sup>9)</sup> 특히 단위면에서의 온도는 그 면의 중앙부 온도를 취했다.
- d. 가공경화, 금속조직 변화와 잠열 등의 효과는

무시한다.

e. 항복조건은 Von Mises의 것을 이용한다.

사용한 FEM mesh는 Fig. 4와 같이 삼각형 요소(element)를 취하여 용접부 주위에서는 작게, 열의 영향이 덜한 부분은 크게 나누었다.

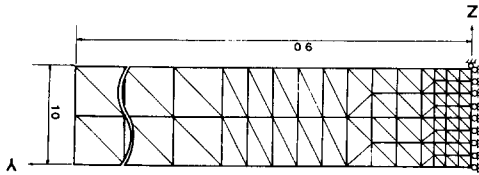


Fig. 4. Finite-element mesh pattern

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 시편폭, 두께 및 구속도의 영향

시편폭, 두께 그리고 구속도 등은 각변형에 미칠 수 있는 대부분의 효과를 집한다고 판단되어 이들 효과를 실험적 결과로서 살펴 보고자 했다. Fig. 5에서는 두께 10.2mm 시편에서 폭이 120mm, 240mm 그리고 360mm인 각각의 경우에 구속없이 용접했을 때 용접 seam을 중심으로 좌측인 면의 폭에 따른 각변형 형태를 나타내고 있다. 시편의 폭이 360mm 일 때 각변형은 대략  $1.63^\circ$  정도이나, 시편의 폭에 따라 변형의 차이가 존재하고 있고 시편의 폭이 커질수록 변형각의 크기가 크게 나타났다. 시편폭에 따른 변형각의 차이는 각변형의 기구(mechanism)상 시편 폭의 증가에 따른 강성의 증가에 의한 변형 억제 효과보다는 더 빠른 냉각속도로 인한 보다 큰 온도 구배가 용접부 주위에서 발생됨에 기인한 것으로 생각되나, 이 결과만 가지고는 강성과 온도 불균일 정도 중 어떤 효과가 지배적인가에 대한 기준은 제시하기 어렵고, 다만 지금까지 나타난 경험식에 고려하지 않았던 폭에 대한 효과를 고려하면 더욱 정확한 접근이 될 수 있다는 사실만을 강조하고자 한다.

폭 240mm 그리고 360mm의 각 경우에 대해 구속이 가해진 상태에서 용접한 후의 변형량을 Fig. 6에 좌측쪽에 따라 나타내었다. 이 결과에서, 용접부가 구속부보다 아래로 치지는 변형이 나타났고, 구속위치의 변화 즉 시편폭의 크기차에 대한 변형각의 차는 전체 변형크기에 대비하여 구속이 없는 경우와 동일하였다. 즉 시편의 폭이 증가하면 변형각의 크기가 증가했다. 그러나 구속이 가해진 경우의 변형

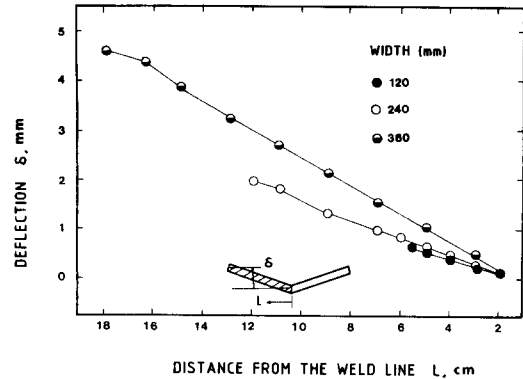


Fig. 5. Effect of plate width on angular distortion of butt weld

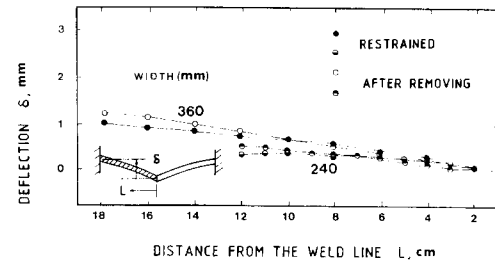


Fig. 6. Effect of the restraint and the specimen width on angular distortion of butt weld

량은 구속이 없는 경우의 약 20% 정도로 감소되었음을 보여 주고 있는데, 이로부터 구속에 의한 변형 감소효과를 확인할 수 있으며, 구속위치의 변화 즉 구속위치를 용접부 근처에 옮겨 갈수록 총 변형량은 물론 변형각의 축소효과를 부가적으로 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 구속이 존재하는 경우는 시편 폭이 특히 용접부 주위에서 실험적으로 나타나지 않아 국부적인 소성변형이 발생했다고 생각할 수 있고 이와 같은 사실은 구속부를 기계적으로 제거한 상태에서의 변형량 측정에서 잘 나타나 있다. 구속부를 제거했을 때의 변형량은 구속이 존재하고 있는 경우보다 약 25% 정도 증가되었는데(Fig. 6), 이때 증가된 양이 탄성변형, 즉 잔류변형량이고, 구속이 없는 경우와의 차이는 구속에 의한 소성변형의 결과라고 판단된다. 즉 구속에 의해서 소성변형이 발생하고 이로 인해 용접도중의 변형방지효과를 얻을 수 있는 것이다.

구속을 가한 상태에서 시편의 폭을 360mm로 두고, 두께를 8.3mm, 10.2mm 그리고 11.0mm로 변화하여 용접을 행한 후 최종 변형을 측정했을 때의 변형

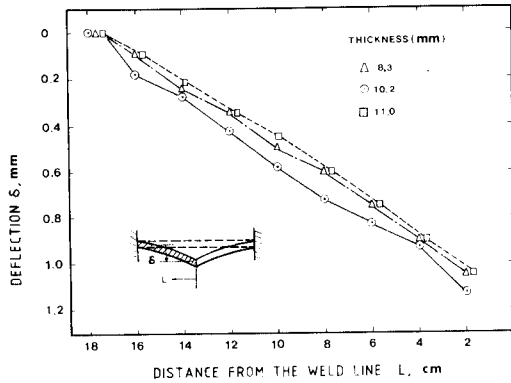


Fig. 7. Effect of plate thickness on angular distortion

형태는 Fig. 7과 같이 두께 변화에 따라서 변형각의 차가 거의 나타나지 않았고, 평균적인 변형각은 0.42° 정도였다. 이 결과에서 단위 두께당의 입열이 같은 실구조물에서는 두께 차이에도 불구하고 변형의 차이가 크지 않다는 사실을 알 수 있었다.

4. 2. 용접도중의 각변형

구속이 있는 경우와 없는 경우 공히 용접부에서 40mm 떨어진 곳의 변위를 용접과 동시에 5초 간격으로 1분간 측정하였다.

Fig. 8는 용접도중의 변형거동을 나타내고 있는데, 자유 이음(free joint)의 경우는 용접부를 기준위치(0점)로 두고 측정 한 결과이고, 구속이 있는 경우는 구속부를 기준위치로 두었을 때의 결과다. 이 결과에서 보듯이 용접변형은 용접이 끝난 후 약간의 시간이 경과한 후에 최대의 크기가 나타났으며, 열이 모재로 확산됨에 따라 변형이 완만히 줄어드는 변위가 발생했다. 그리고 변형의 크기는 구속이 없는 경우에 크게 발생했으나 회복되는 크기의 비는 구속이 있는 경우가 컸다. 이는 변형발생의 형태가 다르므로 해서 나타난 결과로, 용접중에는 용접부가 있는 쪽이 팽창하고 냉각중에는 수축을 하게 되는데, 구속이 있는 경우는 수축을 할때 변형의 크기를 상쇄시키는 이동을 하는 것이고, 구속이 없는 경우는 그 수축변위가 곧 변형의 크기이기 때문이다. 그런데 구속이 없는 경우, 가열중 발생하는 빠른 팽창운동은 잘 측정되지 못했다. 이때 최종적으로 나타나는 변형의 크기는 용접중에 나타나는 최대 변형크기의 50%(구속이 있는 경우), 또는 90%(구속이 없는 경우) 정도였으며, 구속이 없는 경우가 변형이 완성되는 시간이 빨랐으나, 구속이 있는 경우와 공히 용접열이 지

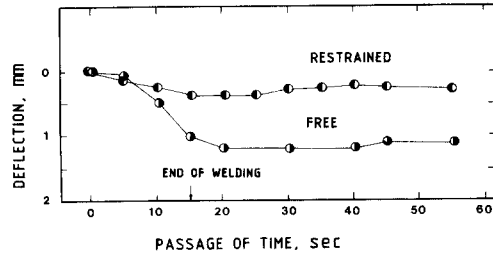


Fig. 8. Deflection profiles measured during welding

난 후 수십초 이내에 변위가 완료되었다. 이들의 크기를 다시 정리하여 Table 2에 나타내었다.

구속이 없는 폭 180mm, 두께 10mm인 단위 길이의 시편에, 용접속도 60cm/sec., 용접입열 2250J/cm의 조건으로 용접을 행한 경우를 가상하여 행한 수치해석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 변형의 크기 변화는 폭끝부분의 용접부에 대한 상대운동을 나타낸다. 이 결과로부터 측정결과에서는 알 수 없었던 초기가열부분의 변형형태를 알 수 있었다. 변형형태를 살펴 보면, 용접중에는 용접선을 중심으로 폭이 아래로 치지는 변형을 하다가 최대 용접열이 단위 길이를 벗어난 다음에 약간 더 치진후 다시 반대방향의 변형이 진행되고, 최종에는 용접선을 중심으로 시편폭이 위로 솟게되는 변형으로 나타났다. 그러나 이 결과는 2차원 해석, 즉 단위 길이에 대한

Table 2. Comparison of maximum and final distortion in each joint

Joint Type	Maximum Distortion (mm)	Final Distortion (mm)	Distortion Recovered (mm)
Free	1.2	1.1	0.1
Restraint	0.4	0.2	0.2

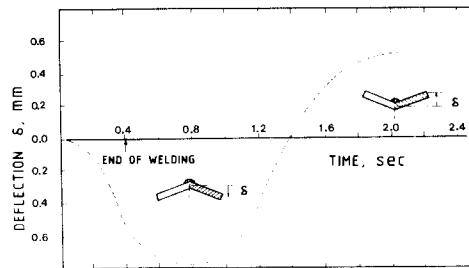


Fig. 9. Deflection profile expected by FEM

해석이었고 3절에서 가정된 바와같이 여러가지 요소들이 정확치 못한 상태이기 때문에 실제 측정된 결과와는 비교할 단계는 되지 못했고, 단지 변형경향의 파악이 가능했던 정도이어서 정확한 변형예측에 적용을 하기 위해 점진적인 프로그램의 보강이 이루어져야 하겠다.

## 5. 결 론

모델실험과 수치해석으로써 각변형거동을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접 이음부의 폭이 클 때 변형각의 크기가 증가했다.
- 2) 구속의 효과가 있는 경우, 각변형의 크기가 구속이 없는 경우의 20%정도로 나타났고, 구속의 위치가 용접부에 가까울수록 변형각의 크기가 감소되었다.
- 3) 구속을 제거했을 경우 변형의 회복효과는 25% 정도였다.
- 4) 두께의 변화가 있을지라도 단위 두께당의 입열량이 같으면 변형량은 같게 나타났다.
- 5) 최종변형은 용접 도중 최대 변형의 50%(restraint joint) 또는 90%(free joint) 정도였고, 최종변형의 완성은 용접열이 지나간 후 수십초 이내에 결정된다.

## 후 기

본 연구의 진행에 있어 많은 도움을 주신 용접기술연구소 공작실의 관계자 여러분들께 깊은 감사를 드린다.

## 참 고 문 헌

1. K. Masubuchi, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980.
2. 熔接變形の發生とその防止, 垣川浩甫外, 熔接學會誌(連載講義1~8), 第52卷 第4號~第53卷 第1號, 1983-1984.
3. O. W. Blodgett, Distortion, The Lincoln Electric Company, 1980.
4. M. Watanabe and K. Satoh, Effect of Welding Conditions on the Shrinkage and Distortion in welded Structures, Welding Journal, 40(8), Research Supplement, 377s-384s, 1961.
5. K. Masubuchi, B. Andrews and A. Urushihara, Finite Element Analysis of Thermo-elastoplastic Deformations in Butt Welding, IIW Autumn Meeting, Paper No. IIW-X-692-73, Dusseldorf, 1973.
6. Y. Ueda and T. Yamakawa, Analysis of Thermal Elastic-plastic Stress and Strain During welding by Finite Element Method, Transactions of the JWS, Vol., No. 2, Sep. 1971, pp. 90-98.
7. I. Tsuji and K. Ogawa, Analyses on Transient Stresses and Deformations of Steel Strips subjected to Local Heating, JWS, Vol. 46, No. 4, 1977, pp. 197-202.
8. 山田嘉昭, 塑性·粘彈性, 培風館.
9. D. Rosenthal, Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting, The Welding Journal, Vol. 20, 1941, res. suppl.