

등가하중법을 이용한 강구조물 용접변형 해석

Analysis of Welding Deformation By Equivalent Load Method on Steel Structures

박정웅* 이재원** 박길현*
Park Jeong-Ung Lee Jae-Won Park Kil-Hyun

ABSTRACT

This study presents a new method to derive the constraint coefficient from the degree of angular deformation caused by welding, as measured experimentally by varying the shape of welded joints and the magnitude of constraints and from analysis results given by the elastic FEM method. The equivalent load was then calculated with this constraint coefficient. The validity of the numerical analysis involved in this new method was confirmed by its agreement with the experimental results. As for the effects of the constraints based on the shape of the welded joints in the case of Butt welding when the constraint coefficients are not considered, the deformed quantity produced by analysis is larger than that produced by experiment and consequently is largely affected by the constraints.

1. 서론

강구조물 제작시 용접부 근방에서는 용접열원에 의해 급속가열·급속냉각의 열사이클을 받으며, 열원의 이동과 함께 온도장이 변화하므로써 용접부에 불균일한 온도분포가 생성된다. 이러한 불균일한 온도분포에 의한 용접부 근방의 열팽창·수축을 용접부로 부터 떨어져 있는 저온상태의 부분이 이를 구속하여 결과적으로 용접변형과 잔류응력이 발생한다. 또한 그 크기는 용접조건과 내적·외적구속의 정도에 따라 다르게 나타난다. 이러한 용접변형, 잔류응력은 구조물의 제작시의 조립정도, 미관, 좌굴강도, 피로강도 등에 악영향을 미치는 요인이 되고 있다. 특히 강구조물 제작시 각 조립단계에서 발생한 용접변형이 구조물의 치수를 변화시켜 이를 수정하는데 많은 시간과 경비가 소요되어 생산성 저하의 원인이 되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 방지하기 위해 설계단계에서 경험 및 실측DATA를 이용하여 용접에 의한 수축마진을 적용하고 있으나 용접방법, 용접재료 그리고 구조물 형상의 변화에 대해서는 대처하지 못하는 것이 현실이다.

본 연구에서는 용접이음부의 형상 및 구속의 크기를 변화시켜 실험을 통해 측정된 용접 각변형량으로부터 구속이 용접각변형에 미치는 영향을 밝혔다. 또한 시험에 사용한 시험편에 대해 탄성FEM해석을 수행하여 구한 해석결과와 실험에 의한 각변형량의 상관관계로부터 구속계수를 유도하여 구속계수를 고려한 등가하중을 결정하는 새로운 방법을 제시했다. 새롭게 제시한 등가하중 결정방법에 의한 수치해석결과는 시험편에 대한 실험결과와 잘 일치하여 그 타당성이 검증되었으며, 크기와 형상에 관계없이 대형구조물의 용접변형량을 예측하는데도 확대 적용할 수 있다.

* 정회원 조선대학교 토목공학과 교수

** 삼성중공업 거제조선소 용접도장연구 부장

2. 용접부 모델링

무구속상태인 경우 용접에 의해 발생하는 변형의 크기는 역학적문제에 있어서 외력에 상당하는 온도분포에 의해 결정된다. 이러한 온도분포는 구조물이 임계크기이상 되면 용접에 의해 발생하는 온도분포가 준정상상태를 이루어 발생하는 용접변형의 크기도 일정한 값을 갖는다. 따라서 실험에 의해 구한 용접변형량을 증가하중으로 치환하여 용접변형을 재현할 수 있다.

Fig.1은 Butt용접시 각변형을 유발시키는 증가굽힘모멘트를 적용한 Mechanical Model을 보여주고 있다. 용접에 의한 각변형량과 증가굽힘모멘트와의 관계는 다음과 같다.

$$M = K_{\theta} \times \theta \quad \text{-----(1)}$$

$$= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{l}{l_2}\right) \theta$$

여기서 M : 증가굽힘모멘트 (kgf · mm)
 K_θ: 용접부 굽힘강성 (kgf · mm)
 θ: 각변형량 (radian)

그러나 실제 구조물과 같이 구조물의 크기, 형상에 따라 외적구속이 다양하게 변하는 경우는 증가하중의 크기는 자유상태의 증가하중과는 차이가 있어 용접변형량도 다르게 나타난다. 따라서 임의의 구속상태하에서도 구속도를 고려하여 증가하중의 크기를 예측하는 방법이 요구되고 있다.

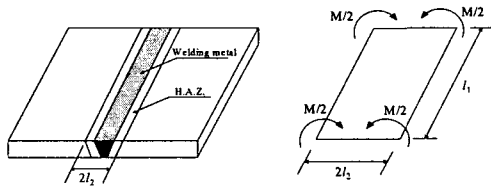
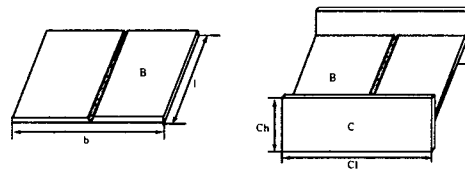
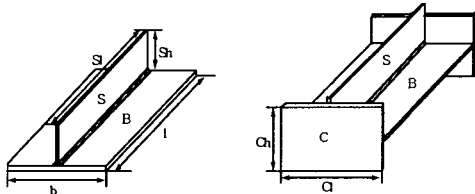


Fig.1 용접부 역학적 모델링



(a) 자유시험편 (b)구속시험편
 Fig. 2 Butt용접부



(a) 자유시험편 (b)구속시험편
 Fig.3 Fillet용접부

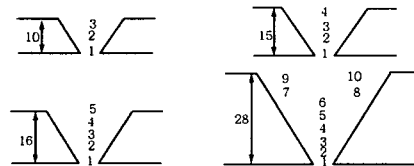


Fig.4 두께에 따른 적층형상(Butt)

3. 실험과 해석에 의한 구속도

구속상태의 구조물의 용접시 용접변형에 영향을 미치는 구속도를 유도하기 위해 다음과 같이 구속재가 붙어있는 시험편으로부터 용접각변형량과 동일 시험편에 대해 탄성FEM해석을 통해 구한 해석결과의 상관관계로부터 구속계수를 유도하였다. 여기서 구속도란 자유상태 시험편의 용접부에 단위모멘트에 의한 발생하는 각변형량과 구속부재가 있는 부재의 용접부에 단위모멘트를 부가하여 구한 각변형량과의 비로 나타내었다.

3.1 실험방법

Butt와 Fillet시험편을 Fig.2, Fig.3에 보여주고 있으며 (a)는 자유상태의 경우이고 (b)는 구속재가 있는 경우이다. 실험에 사용한 모재와 구속재의 두께 및 치수는 Butt용접은 Table 1, Fillet용접은 Table 2에 보여주고 있다.

Butt용접은 반자동 FCA용접, 와이어는 DW-100(1.4φ) 그리고 백킹재는 세라믹 BS-1를 사용하였다. Table 3은 용접조건을 보여주고 있다. Fig. 4은 두께에 따른 용접Pass간 적층형상을 보여주고 있다. 가접은 간격은 500mm, 길이는 50mm로 하였다. Fillet용접은 반자동 FCA용접, 와이어는 DW-100(1.4φ) 그리고 각장은 4.5mm(1Pass)를 기준이며, 용접조건은 전류(A) 240, 전압(V) 26 그리고 속도(v) 7.8(mm/s)를 사용하였다.

Table 1 Butt 시험편 크기

| Specimen Name | Dimension(mm) | | | | | | Groove angle | Quantity |
|---------------|---------------|-----------|----------|------------------|------------|------------|--------------|----------|
| | Base Plate | | | Constraint Plate | | | | |
| | thickness(t) | length(l) | width(b) | thickness(Ct) | length(Cl) | height(Ch) | | |
| B10-f | 10 | 1000 | 600 | - | - | - | 40° | 1EA |
| B10-c1 | " | " | " | 10 | 600 | 200 | " | 2EA |
| B15-f | 15 | " | " | - | - | - | 42° | 1EA |
| B15-c1 | " | " | " | 15 | 600 | 200 | " | 2EA |
| B16-f | 16 | 500 | " | - | - | - | 40° | 1EA |
| B16-c1 | " | " | " | 22 | 600 | 200 | " | 1EA |
| B16-c2 | " | " | " | 10 | 300 | 100 | " | 1EA |
| B16-c3 | " | " | " | " | " | 50 | " | 1EA |
| B28-f | 28 | 500 | " | - | - | - | " | 1EA |
| B28-c1 | " | " | " | 22 | 600 | 200 | " | 1EA |
| B28-c2 | " | " | " | 22 | 600 | 80 | " | 1EA |
| B28-c3 | " | " | " | 10 | 300 | 100 | " | 1EA |
| B28-c4 | " | " | " | " | 300 | 50 | " | 1EA |

Table 2 Fillet 시험편 크기

| Specimen No. | Dimension(mm) | | | | | | | | | Quantity |
|--------------|---------------|------------|-----------|----------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|----------|
| | Base Plate | | | Stiffener | | | Constraint Plate | | | |
| | thickness (t) | length (l) | width (b) | thickness (St) | length (Sl) | height (Sh) | thickness (Ct) | length (Cl) | height (Ch) | |
| F10-f | 10 | 1000 | 300 | 10 | 1000 | 100 | - | - | - | 2EA |
| F10-c1 | " | " | " | " | " | " | 10 | 300 | 120 | 2EA |
| F10-c2 | " | " | " | " | " | " | " | " | 50 | 2EA |
| F15-f | 15 | 1000 | " | 15 | 1000 | " | - | - | - | 2EA |
| F15-c1 | " | " | " | " | " | " | 15 | 300 | 120 | 2EA |
| F15-c2 | " | " | " | " | " | " | 10 | " | 50 | 2EA |

Table 3 Butt용접조건

| | 전류 (A) | 전압 (V) | 속도 (mm/s) |
|-------|--------|--------|-----------|
| 초층 | 220 | 28 | 3 |
| 2층 이후 | 290 | 32 | 5 |

3.2 구속도

Fig.5은 Butt용접에서의 구속계수를 보여주고 있다. 동일 시험편에 대해 종축은 구속상태의 시험편에서 측정된 각변형량(δc)을 자유상태의 시험편에서 측정된 각변형량(δf)으로 나눈 값이고, 횡축은 동일 구속시험편을 Modelling하여 열영향부 끝단에 단위굽힘모멘트를 가해 탄성FEM해석에 의해 구한 각변형량(δuc)을 식(1)에 의해 구한 자유상태의 단위굽힘모멘트에 의한 각변형량(δuf)으로 나눈 값이다. 모든 시험편에 대해 동일한 방법으로 종축과 횡축의 값을 구한 후 서로 만나는 점들을 최소자승법에 의해 구속계수를 구했다.

Fig.6은 Fillet용접시 구속계수를 보여주고 있다. Butt용접과 동일하나 각변형 측정위치만 용접선 직각방향으로 150(mm)로 해서 구했다.

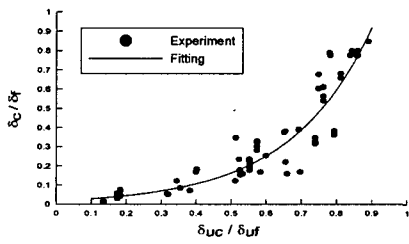


Fig. 5 Butt구속계수

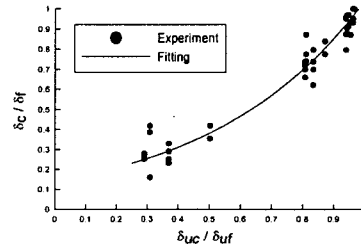


Fig. 6 Fillet 구속계수

3.3 등가하중계산방법

Fig.7는 등가하중 계산방법과 구속계수의 물리적 의미를 고찰하기 위해 모식적 나타낸 구속계수이다.

실험에 의한 각변형량과 용접부에 단위굽힘모멘트를 가하여 구한 각변형량으로부터 구속계수가 그래프①을 따르는 경우, 자유상태의 시험편을 용접하여 측정된 각변형량으로부터 구한 등가굽힘모멘트를 구속상태의 구조물에 적용하여도 각변형량을 예측할수 있다는 것을 의미한다. 실제 용접 구조물의 구속계수는 다소 크기의 차이는 있으나 그래프②와 같은 형태를 따른다. 이것은 용접시 발생하는 내적구속(용접부 근방의 온도이력과 외적구속에 의해 열탄소성거동의 영향)와 외적구속의 영향을 받기 때문이다.

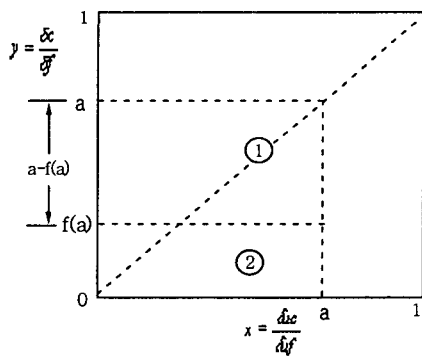


Fig. 7 구속계수모식도

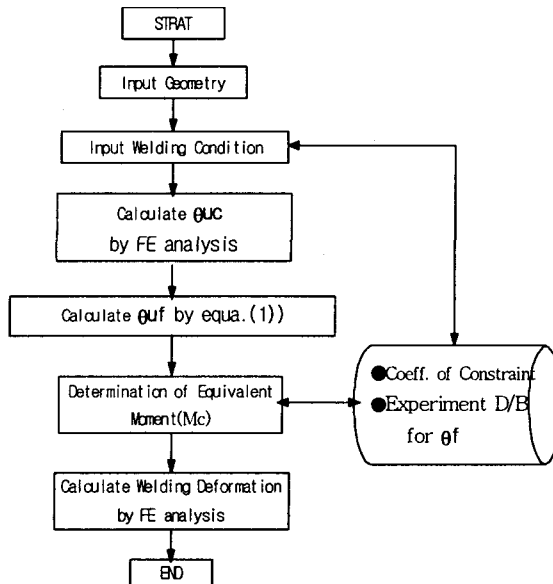


Fig.8 용접변형 해석흐름.

따라서 그래프②의 경우 실제 등가굽힘모멘트(Mc)는 x=a인 경우 "a-f(a)"가 구속에 의한 영향이므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_c = \beta x M_f \quad \text{--- (2)}$$

여기서 β 는 구속에 의한 등가하중 수정계수

구속에 의한 등가하중 수정계수(β)는 그래프①이 등가하중의 변화가 없는 경계선이기 때문에 임의의 x값 x=a에 대해 y=a일 때를 기준으로 다음과 같은 비례식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} a: f(a) &= M_f : \beta x M_f \\ \therefore \beta &= f(a) / a \end{aligned} \quad \text{--- (3)}$$

4. 해석결과

용접변형을 예측하는 위한 해석계산 흐름을 Fig.8에 보여 주고 있다. 먼저 Fig.5,6에서 구한 구속계수와 구조물 제작시 사용하는 용접형상에 따른 자유상태의 변형량(θf)을 D/B화한다. 다음 변형을 예측하고자 하는 구조물을 모델링하여 용접부에 단위하중을 가하여 θ_{uc} 를 구한다. 자유상태의 단위하중에 의한 변형(θ_{uf})은 식(1)에 의해 구한다. 이상으로부터 구한 각변형으로부터 등가하중 수정계수(β , M_f)를 계산할 수 있다. 최종적으로 등가하중으로 적용되는 M_c 를 식(2)에 의해 구하여 이를 하중으로 하는 탄성FEM해석을 수행하여 용접변형을 예측한다.

Fig.9는 두께 10, 15mm의 Butt용접에 의한 실험결과, 구속계수를 고려하지 않은 해석결과 그리고 구속계수를 고려한 해석결과를 보여주고 있다. 결과에 의하면 구속계수를 고려하지 않은 해석 결과는 실험결과보다 크게 발생하여 등가굽힘모멘트가 과대평가 되었음을 보여주고 있다. 한편 구속계수를 고려하여 등가굽힘모멘트를 결정하여 각변형을 예측하는 경우 모재의 두께, 적층방법 그리고 용접길이에 관계없이 실험값과 잘 일치하여 본 연구에서 제안한 구속계수를 고려한 등가굽힘모멘트의 결정방법이 타당함을 보여주고 있다.

Fig.10는 두께 15mm의 Fillet용접에 의한 실험결과, 구속계수를 고려하지 않은 해석결과 그리고 구속계수를 고려한 해석결과를 보여주고 있다. 결과에 의하면 실험결과와 해석결과는 거의 일치하고 있어 등가하중 결정시 구속계수의 영향을 거의 받지 않는 것을 알수있다. 이것은 Fig.6에서 알수 있는 것과 같이 구속계수가 거의 y=x곡선을 따르고 있어 구속에 대한 영향이 작기 때문이다.

5. 결론

대형 강구조물의 용접변형을 예측하기 위해 구속계수를 고려한 등가하중법을 새롭게 제안하고, 이를 이용하여 임의의 구속상태에서 용접부에 대해 실험과 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구속상태의 시험편을 용접했을 때 발생하는 각변형량과 동일 시험편을 Modelling하여 열영향부 끝단에 단위굽힘모멘트를 가하여 구한 각변형량과의 상관관계로부터 구속계수를 유도하고 이를 고려한 등가굽힘모멘트 결정방법을 제안하였다.
- 2) 본 연구에서 제안한 등가굽힘모멘트 결정방법에 의한 해석결과와 실험결과가 잘 일치하여 제안한 등가굽힘모멘트 결정방법이 타당함을 보여 주었다.
- 3) 맞대기용접의 경우 구속계수의 영향을 크게 받아 기존의 자유상태의 각변형량으로부터 등가굽힘모멘트를 결정하여 해석하는 경우 실험결과와 많은 차이를 보였다.
- 4) 필렛용접의 경우 구속계수의 영향이 작으므로 자유상태의 각변형량으로부터 등가굽힘모멘트를 결정하여 적용하여도 임의의 구속상태에서의 각변형을 예측할 수 있다.

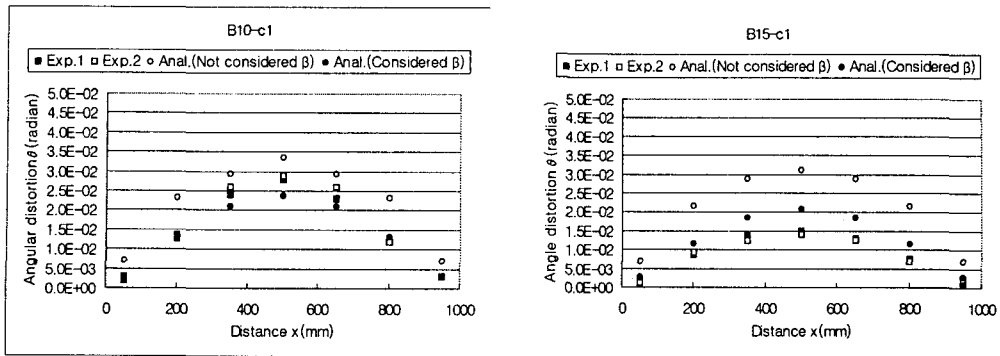


Fig. 9 Butt 해석결과

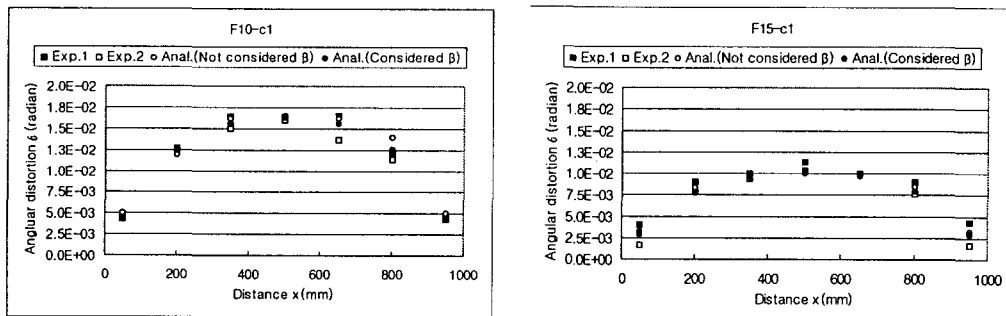


Fig. 10 Fillet 해석결과