

열영향부 적층 특성을 고려한 고유변형도 기반의 다층 맞대기 용접 해석 Prediction of Angular Distortion of Multi Pass Butt Welding by inherent strain analysis based on Laminated Beam Modeling for the Inherent Region and Heat Equilibrium Zone

*# 문형석¹, 김용태², 장창두³, 서승일⁴

*# H. S. Mun¹ (hsmun@krii.re.kr), Y.T. Kim², C.D.Jang³, S.I.Seo⁴

¹ 한국철도기술연구원선임연구원, ² 서울대학교조선해양공학과 박사과정, ³ 서울대학교조선해양공학과 교수, ⁴ 한국철도기술연구원 책임연구원

Key words : Multi Pass, Butt Welding, Laminated Beam Modeling

NOMENCLATURE

- m_{y1} = Transverse bending moment distributed along weld line in inherent strain area
- m_{y2} = Transverse bending moment distributed along weld line in heat equilibrium area
- f_{y1} = Transverse shrinkage force distributed along weld line in inherent strain area
- f_{y2} = Transverse shrinkage force distributed along weld line in heat equilibrium area
- k_{disk} = Spring constant of disk type area
- k_{outer} = Spring constant of rigid area
- k_{ring} = Spring constant of ring type area
- b_1 = Maximum breadth of the inherent strain region
- d_1 = maximum depth of the inherent strain region (advanced method)
- E_1 = Young's modulus of inherent strain area
- ϵ_{r1}^* = Inherent strain of inherent strain region
- z = Section modulus
- b_{z1} = Breadth of the inherent region
- b_2 = Maximum breadth of the heat equilibrium region
- ϵ_{disk}^* = Inherent strain of disk type area in heat equilibrium region
- b_{z2} = Breadth of the heat equilibrium region
- E_2 = Young's modulus of heat equilibrium area
- ϵ_{ring}^* = Inherent strain of ring type area in heat equilibrium region
- b_{z2} = Breadth of the heat equilibrium region
- d_2 = maximum depth of the heat equilibrium region
- d = maximum depth of the inherent strain region (general method)
- ϵ_{disk}^* = Inherent strain of disk type area in heat equilibrium region

1. 서론

고유변형도 법은 복잡한 용접구조물의 용접후 발생하는 변형 및 특성을 온도상승과 온도하강을 고려한 열탄소성 해석 없이 간단한 탄성해석 방법으로 그 결과를 구하는 방법이다. 고유변형도 법은 고유 변형도 영역의 결정에 따라 그 값이 결정되는데 1차원 bar-spring 모델의 경우 열영향부와 주위를 구속하는 부분과의 힘의 평형관계를 정의할 수 있다. 온도 변화 과정에서 bar는 spring의 구속에 의해 내부 응력을 받게 된다. 고유변형도 이론은 이러한 과정에 의해 발생하는 bar의 최종고유변형도의 전개에서 bar에 작용하는 spring에 의한 외력과 그에 따른 부재 내력의 크기가 같다는 가정에서 출발 한다

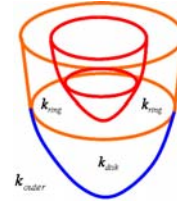


Fig.1 Spring constants in heat equilibrium region

2. 열영향부 적층특성을 고려한 고유변형도법 및 등가하중법

열평형 영역의 표현은 Fig. 1과 같으며 열평형영역은 고유변형도를 포함하는 영역과 고유변형도를 포함하지 않는 영역으로 구분되는데 위 그림의 원통의 중간선 이상의 영역이 고유변형도를 포함하는 열평형 영역으로 원통의 중심선으로부터 고유변형도 영역, 열평형 영역 그리고 상온영역으로 분포하고 원통의 중앙선 하부의 열평형영역 즉 고유변형도 영역을 포함하지 않는 영역은 열평형영역 그리고 이를 구속하는 상온영역으로 분포하게 된다. 열평형 영역을 고려한 고유변형도 영역 내부의 등가하중은 고전적 방법에 의하여 다음과 같이 정의 된다.

$$m_{y1} = \frac{1}{b_1} \int_{-(\frac{h}{2})}^{-(\frac{h}{2}-d_1)} E_1 \epsilon_{r1}^*(z) b_{z1} z dz \quad (1.1)$$

$$f_{y1} = \frac{1}{b_1} \int_{-(\frac{h}{2})}^{-(\frac{h}{2}-d_1)} E_1 \epsilon_{r1}^*(z) b_{z1} dz \quad (1.2)$$

이후 추가적으로 해석의 정밀도를 위하여 고려되는 열평형영역에서의 고유변형도 및 등가하중은 식(1.3)과 식(1.4)와 같다.

$$m_{y2} = \frac{1}{b_2} \left(\int_{-(\frac{h}{2}-d_1)}^{d_2-\frac{h}{2}} E_2 \epsilon_{disk}^* b_{z2} z dz + \int_{-\frac{h}{2}}^{-(\frac{h}{2}-d_1)} E_2 \epsilon_{ring}^* (b_{z2} - b_{z1}) z dz \right) \quad (1.3)$$

$$f_{y2} = \frac{1}{b_2} \left(\int_{-(\frac{h}{2}-d_1)}^{d_2-\frac{h}{2}} E_2 \epsilon_{disk}^* b_{z2} dz + \int_{-\frac{h}{2}}^{-(\frac{h}{2}-d_1)} E_2 \epsilon_{ring}^* (b_{z2} - b_{z1}) dz \right) \quad (1.4)$$

이렇게 식(1.1) 식(1.3)에서 구하여진 모우먼트의 합은 등가하중으로 전환하여 탄성해석에 적용되어진다.

3. 다층 맞대기 용접의 실험

3.1 다층 맞대기용접의 해석에 사용된 모델

Kim[5]은 Fig 2의 시편을 Table 1의 조건으로 실험하였다.

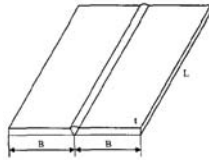


Fig. 2 Experiment model of multi-pass butt welding model with v-groove

Table 1 Welding condition for multi-pass butt welding models with V-groove

Plate thickness	I	V	ν
mm	A	V	mm/sec
14	240	30	5.4

Groove angle	L	B	Root gap
	mm	mm	mm
40°	240	30	4

3.2 V-groove 용접의 고유변형도 영역의 결정 및 적용

맞대기 용접을 2차원으로 모델링한 후 열전달 해석을 수행하였다. 고유 변형도 영역의 형상을 결정하고 등가하중을 구하여 모델의 각변형을 구한다. 기존의 실험 자료와 결과를 비교함으로써 맞대기 용접 해석의 정확성을 검증한다. 1차, 2차, 3차의 용접에 따른 고유변형도 영역을 수반하는 열전달 해석과 열탄소성 해석이 3.2.1-3.2.3까지 수행되었다.

3.2.1 1st pass

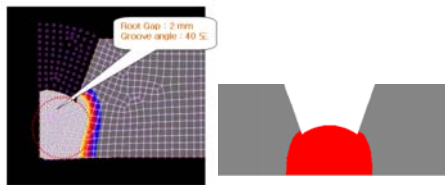


Fig. 3 Shape of inherent strain region in penetration

3.2.2 2nd pass

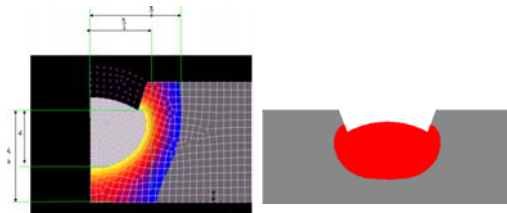


Fig. 4 Shape of inherent strain region without penetration

3.2.3 3rd pass

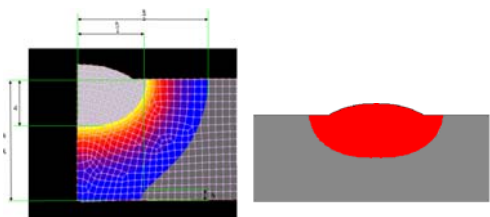


Fig. 5 Shape of inherent strain region at last layer

Table 2 Experimental result compared of advanced and conventional Inherent method with V-groove welding

Layer	Experimental	conventional	Advanced		
Layer	Experimental Result (rad)	Inherent method results (rad)	Inherent Strain Analysis Considering Laminated Beam Theory (rad)	Ratio (Inh(con)/e xp)	Ratio (Inh(adva)/exp)
1st	-	-	-		
2nd	0.01744	0.02277	0.01947	30%	11%
3rd	0.01541	0.01703	0.01633	10%	5.9%
Total	0.03285	0.03981	0.0358	21%	8.9%

4. 결론

본 논문에서는 용접 변형을 예측하기 위한 일련의 연구를 수행하였다. 기존의 고유변형도법보다 개선된 적층특성을 고려한 고유변형도법과 등가 하중법을 적용하였다.

1. 고유변형도법은 고유변형도 영역과 상온영역의 상관관계를 고려하여 변형도를 구하고 이것을 등가하중으로 치환하는 방법이다. 또한 등가하중 적용시 고유변형도 영역을 단일 물성치로 정의하고 탄성해석을 수행하게 된다.
2. 본 논문에서는 3층 적층특성을 고려한 고유변형도를 제시하였다. 적층고유변형도는 구간별 특성을 고려하여 고유변형도 영역 내부의 고유변형도 열평형영역내부의 고유변형도로 나누어지며 열평형영역 내부의 고유변형도는 다시 열영향부의 구조적 특성을 반영하여 상세화 하였다.
3. V-groove 용접 실험을 통하여 적층특성을 고려한 고유변형도법의 개선을 확인하였다.

참고문헌

1. Jang, C.D., and Seo, S. I., "A Simplified Method to Estimate Longitudinal Deformations of Built-up Beams Due to Welding and Heating", Journal of Ship Research, Vol.39, No.2, pp.176-183, 1995.(a)
2. 고대은, 열탄소성 해석 모델을 이용한 산상가열시의 판의 변형 예측에 관한연구, 서울대학교 박사학위논문, 1998.
3. 문형석, 열영향부 적층특성을 고려한 개선된고유변형도 기반의 용접각 변형 예측, 서울대학교 박사학위논문, 2008.
4. Watanabe, M., and Satoh, K., "Effect of Welding Conditions on the Shrinkage Distortion in Welded Structures", Welding Journal, Vol.40, pp.377-384, August 1961.
5. 김상일, 2004, "V-개선 맞대기 용접 변형에 대한 간이 예측 모델 개발", 대한조선학회지 제 41권 제2호, pp.106-113.
6. 김형철, 고유 변형도 기반 등가하중법을 이용한 다층 맞대기 용접 해석에 대한 연구, 서울대학교 석사학위논문, 2007.