용접변형의 고정도 예측을 위한 지배인자의 정당성 검증

이 재 익^{*,†} · 장 경 호^{**} · 김 유 철^{***}

^{*}포항산업과학연구원 강구조연구소

^{**}중앙대학교 사회기반 시스템 공학부 건설환경플랜트전공

^{***}일본국립대학법인 오사카대학 접합과학연구소

Verification of Validity of Governing Factors in High Accurate Prediction of Welding Distortion

Jae-Yik Lee^{*,†}, Kyong-Ho Chang^{**} and You-Chul Kim^{***}

^{*}Research Institute of industrial Science & Technology, Incheon, 406-840, Korea

^{**}Dept. of Civil, Environmental & Plant Eng., Chung-Ang Univ., Seoul, 156-756, Korea

^{***}JWRI of Osaka University, 11-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

[†]Corresponding author : leejaeyik@gmail.com

(Received October 21, 2013 ; Revised October 28, 2013 ; Accepted October 30, 2013)

Abstract

The legitimacy of dominating factor in the high accuracy prediction of welding distortion was investigated for butt welding and fillet welding. When out-of-plane distortion was measured by the experiment objecting to butt welding, if tack welding was easily performed, the position of a neutral axis was variously changed by the irregularity. Then, there have been a case that out-of-plane distortion was generated in the unexpected direction. This case should be especially noted. New model for the experiment was proposed so as to solve this problem. As it was elucidated by the case of fillet welding, it was verified that the analysis should be carried out with satisfying the yield condition (especially at high temperature above 700 degree Celsius) and with closely simulating the penetration shape (heat input in weld metal) in order to solve the proposition that is the high accuracy prediction of welding distortion. It was confirmed that residual stress is highly predicted because welding distortion is highly predicted, too.

Key Words : Butt welding, Fillet welding, Welding distortion, Residual stress, High accurate prediction, Governing factor in prediction

1. 서 론

용접변형을 고정도로 예측하고, 생성단계에서 역변형으로 가감하여 용접변형을 저감/방지/제어하고자 하는 명제 해결을 위하여, 저자들은 Bead On Plate(BOP)를 대상으로 열탄소성해석을 기본으로 하는 용접변형 고정도 예측의 지배인자, 즉 ①고온에서도 항복조건을 만족 시키도록 온도증분을 제어하고, ②실제의 용융지형상을 고려하여 입열하고 용접이행 및 온도에 따라 강성을 선택적으로 부여하는 입열모델을 특정 하였다.

그러나 대상모델인 BOP는 실험의 안정성을 확보하기 위한 모델로, 실제 현장에서는 사용하지 않고 있어 현장 활용을 위해 특정한 지배인자의 정당성 검증이 요구되고 있다.

본고에서는 특정한 지배인자의 정당성과 일반성 검증을 위하여, 박판을 대상으로 수행한 용접변형 지배인자 검증사례를 소개하고자 한다.

모델은 용접 프로세스, 이음형식, 열전도 특성이 각각 서로 상이한 모델 3종(맞대기 용접 이음, 필렛 용접 이음, 레이저 용접 이음)을 대상모델로 선정하였다.

한편, 면외변형의 생성 Mechanism과 동일한 잔류응

Fig. 1 Experimental model for butt welding

력의 예측 정도 확인을 통하여, 특정한 지배인자의 일반성도 검토하였다.

2. 맞대기 용접

2.1 실험

박판의 맞대기용접 이음을 대상으로, 용접 면외변형의 측정 실험을 수행한다.

시험편의 형상, 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 소재는 두께 6mm의 SM400을 사용하였다. 맞대기 용접 시험편은 V형 개선각 50° 처리를 한 후, TIG를 사용하여 가접을 수행한 후 1 Pass로 완전 용융 용접을 수행하였다. 용접법은 반자동 탄산가스 아크 용접이며 용접조건은 전류:240 (A), 전압: 28 (V), 용접속도: 5 (mm/s)로 하였다.

용접후, 면외변위는 다이얼 게이지를 사용하여 측정하였다.

실험 결과 및 면외변위 측정 결과를 Fig. 2에 나타낸다. 각변형에 주목하면 (Fig. 2 (a) “●”), 각변형은

“V”형태로 발생되어야 하나, 결과는 “Λ” 형태가 관찰되었다. 또한 용접선상 ($y=0\text{mm}$)에는 단차가 발생함을 확인하였다.

통상의 용접 각변형은 열원의 위치에 의해, 두께방향의 온도구배가 발생하여 “V”형상 분포를 이룬다고 알려져 있다. 고정도 예측의 검증을 수행하기 전 통상의 각변형과 다른 거동을 나타내는 이유에 대해서 검토를 하였다.

가접 종료 후 측정된 변형을 그림중 “□”로 표시 한 중심부($y=0\text{mm}$)에 Misalignment가 관찰되었다. 가접시 이러한 단차를 없애는 위해 여러 가지 공리 했지만 단차를 없앨 수 없었으며, 이를 방지 한 채로 본 용접을 실시하였다.

초기부정을 부여한 검토결과에 의하면 가접으로 생긴 단차로 인해 단면의 중립축 위치가 여러 가지 변화를 겪고 결과적으로 각변형이 “역V” 형태가 된 것으로 추측된다.

한편, 종방향변형(Fig. 2(b), “●”)에 주목해보면, 가접(“□”) 및 본 용접후(“●”)와 측정 결과가 거의 겹쳐져 있어, 종방향변형은 거의 발생되지 않았다고 판단되었다.

본 실험을 위해, 가접에 따른 단차발생을 피하기 위해 새로운 시험시편을 고안하고 이를 이용하여 다시 실험을 실시 하였다.

제안된 시험체를 Fig. 3에 나타내었다. 개선된 시험체는 가접이 필요로 하지 않도록 판 중앙 그루브 하단에 약 0.5-1.0 (mm)의 모재를 남기고 50°의 V형 개선가공을 한 것으로서, 단차의 원인이 되었던 가접의 회피가 가능하도록 고안되었다. 용접후, 그루브의 하단에 남긴 약 0.5-1.0(mm)의 모재가 용접후 맞대기 이음이 되었는지를 확인하기 위해 Fig. 4의 ①, ②와 ③의 위치에서 단면 매크로 사진을 채취 하였다. 단면 매크로 사진 및 후면 용접비드를 Fig. 4에 나타내었다.

(a) Angular distortion

(b) Longitudinal bending distortion

Fig. 2 Experimental results of out-of-plane distortion(Butt welded joint)

Fig. 3 Coordinate systems and model size

용접 전 그루브 하단에 남겨진 모재는 본 용접시 완전히 용융되어, 통상의 맞대기 용접이음부와 같은 이음이 발생됨을 확인할 수 있다.

2.2 시뮬레이션

실험을 3차원 열탄소성해석에 의해 시뮬레이션 하고 면외변형을 고정도 예측함으로써 지배인자의 정당성을 검증한다. 실험의 시뮬레이션은 8절점 아이소파라메트릭 입체 요소를 이용하고 저감적분법에 의해 Locking 현상이 해결된 유한요소법에 근거한 3차원 열탄소성 해석 프로그램을 이용하여 예측하였다.

해석 모델은 단면 매크로 (Fig. 4)를 참조하여 입열 형상을 결정하였으며, 입열요소의 강성은 용접이행방향으로 선택적으로 부여하였다.

용접의 경우 일반 구조 역학 문제의 외력에 해당하는 것이 온도이력이며, 이 온도이력의 정확성이 변형예측

Fig. 4 Macrograph and FEM grid

Fig. 5 Temperature histories

Fig. 6 Effect of σ_{EQ}/σ_Y on prediction accuracy of out-of-plane displacement w

결과의 정확성을 좌우하게 된다. 따라서 용접에 따른 온도 이력을 직접 계측하였다.

온도이력은 시편 표면($x=0, z=6(\text{mm})$)의 4 개소 ($y=-15, -30, -50, -80(\text{mm})$)에 열전대를 설치하고 측정 한다. 온도 측정 결과를 Fig. 5에 기호와 실선으로 나타낸다. 해석 결과는 실험 결과를 잘 재현 하고 있으며, 이 온도이력을 이용하여 탄소성 응력해석을 실시하고, 용접변형 및 잔류응력을 추정하였다.

두 지배 인자를 고려하고 수행한 해석결과중 면외 변형결과를 실선으로 Fig. 7에 나타낸다. 그림의 실선은 상당응력 σ_{EQ} 과 항복응력 σ_Y 의 비율이 최대 1.01의 결과이다. 해석결과는 실험 결과(●)를 정도 높게 잘 재현하고 있다.

한편, 각변형의 실선과 점선의 차이는 작고, 정밀 예측에 있어 가장 중요하다고 생각되는 지배인자는 용착 금속의 형상임을 시사하고 있다.

종방향 변형을 Fig. 7(b)에 나타낸다. 종방향 변형은 절대값 자체가 작아 예측 정도를 논의할 수준은 아니었다. 실험 결과로부터, 맞대기 용접에 발생하는 면외변

Fig. 7 Prediction results of out-of plane distortion for butt welding

Fig. 8 Distributions of residual stress and prediction accuracy of butt welding

형의 고정도 예측의 지배 인자의 정당성을 확인할 수 있었다.

잔류 응력 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림의 “○”는 실험 결과이며, 모두 잘 일치 하고 있다. 결과로부터 용접변형이 정도 높게 예측 가능하다면, 잔류응력도 정밀하게 예측할 수 있는 것으로 확인할 수 있었다.

3. 필릿용접

3.1 실험

맞대기 용접에 이어, 열전도 특성이 다른 대표적인 용접이음인 Fillet 용접이음에 대해서 실험을 진행하였다. 실험 대상 강재는 SM400 (12mm)이며, 시험편의 형상, 크기, 좌표계 및 용접 순서를 Fig. 9에 나타낸다. 그림의 점선 NA는 횡단면에 대한 중립축 위치를 나타낸다.

용접은, 먼저 Pass①을 수행하고 Pass① 종료 후 용접선 종단부의 온도가 50℃ 이하로 냉각 된 후 Pass②를 수행하였다. 이는 평균온도상승까지의 각 Pass 간

열에 의한 복잡한 하중중첩을 회피하기 위함이다. 용접은 로봇에 의한 CO₂용접을 수행하였으며, 용접 조건은 Pass①, Pass②와 함께 전류:300(A), 전압:35(V), 용접 속도는 7.5(mm/s)로 하였다..

시험(Fig. 1) 중심부(x=0, y=0 (mm)), 후면(z=0 (mm))의 4개소(y=0, 16, 31, 56(mm))에 열전대를 설치하고 실험중 온도를 측정하였다.

한편, 용접종료 후 3차원 사진계측 시스템을 이용하여 용접 면외변형을 측정 하였다.

사진계측(IHI개발) 시스템은 측정 대상을 여러 방향에서 여러 장(3장 이상)의 사진을 2백만 화소 이상의 디지털 카메라로 촬영하고 이를 3차원 좌표 데이터로 정밀하게 산출하는 시스템으로, 사진계측의 기준, 즉 계측 Point를 시험편의 표면(z=12mm)에 부착하고 그 위치를 Fig. 9에 “○”표로 나타내었다.

3.2 실험결과

온도 측정 결과를 Fig. 12에 symbol로 나타내고 용접 면외변형의 측정결과를 Fig. 13에 심볼로 나타낸다.

Fig. 9 Coordinate system of fillet welding

Fig. 10 3D Photographic measuring system

Fig. 11 Macrophotography of cross section

각 변형은 “V”형태, 종방향변형은 불룩한 분포를 나타내고 있다. 한편, 계측치 절대값을 비교하면, 종방향 변형의 절대 값은 각 변형과 비교하여 작은 절대치를 나타내고 있다.

3.3 시뮬레이션

실험결과를 3차원 열탄소성해석에 의하여 시뮬레이션을 수행하였다.

해석 모델은 Fig. 9와 같으며, 필렛 용접부의 입열부 형상은 Fig. 11의 Macro사진을 참조하여, 요소형상을 모델링 하고 3차원 열탄소성해석을 실시하였다.

해석결과중, 3차원 비정상 열전도해석에서 얻은 결과를 Fig. 12에 실선으로 나타낸다. 열효율 $\eta=70\%$ 로 하여 Pass① 및 Pass② 함께 실험 결과를 정밀하게 재현하고 있다. 계산된 온도이력을 사용하여 3차원 탄소성해석을 실시하였다.

해석에서 사용된 온도증분 ΔT 는 재료의 항복 응력과 온도 증가 ΔT 에서 발생하는 상당 응력의 비 (HI)가 1.0을 초과할 수 없도록 전 온도장에 대하여 온도증분 ΔT 를 약 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ 정도로 제어하여 계산을 수행하였다.

3차원 열탄소성 해석 결과를 Fig. 13에 선으로 나타내었다. 해석결과(각변형, Fig. 13(b))는 실험 결과를 정도 높게 잘 예측함을 확인하였다.

한편, 종방향변형 분석 결과를 Fig. 13(b)에 나타내었다. Pass①에 의한 구속으로 Pass②의 절대 값이 작아지는 경향이 관찰되었으나, 수직부재의 영향으로 인한 절대값 자체가 작아 예측 정도 분석은 논의하지 않았다.

이상으로부터 맞대기 용접 이음과 다른 이음 형식인 필렛 용접 이음에서도 고온에서의 항복조건을 만족하도록 계산하고, 용접 금속부를 용착금속으로 간주함으로써,

Fig. 12 Temperature histories(fillet welding)

(a) Angular distortions

(b) Longitudinal bending deformations

Fig. 13 Distributions of angular distortions(fillet welding) **Fig. 14** Experimental model (LBW) **Fig. 15** Macrophotography & FEM grid (LBW) **Fig. 16** Temperature histories (LBW)

용접 면의 변형의 예측 정도가 향상되는 것, 즉 지배인자의 정당성이 확인되었다.

4. 레이저용접

상기 2장, 3장을 통하여 특정한 지배인자의 정당성 검증에 이어, 지배인자의 일반성 검증을 위하여 상기 검증에 사용한 용접 프로세스와 상이한 레이저 용접을 대상으로 실험과 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 실험

실험 대상 강재는 SM400 (12mm)이며, 시험편의 형상, 크기, 좌표계 및 용접 순서를 Fig. 14에 나타낸다. 용접조건은 4kW YAG 레이저(CW), 용접속도는 8.33(mm/s)이었으며, Filler metal 없이 평판 부재 위에 수직부재를 완전 용입하여 용접하였다. 용접중, 온도계측과 변위계측을 수행하였으며, 계측위치는 그림 중 점선으로 표시하였다.

4.2 실험결과

온도계측결과, 면외변위 계측 결과를 각각 Fig. 16, Fig. 17에 나타내었다. 레이저용접의 평균온도상승은 약 50°C 정도로 관찰되었으며, 이는, 3장의 Arc 용접과 비교하여 약 절반수준에 해당되었다. 면외변형의 결과(Fig. 17(a)) 중, 각변형의 경향은 “V”형태로 Arc 용접과 같았으나, 절대치는 Arc 용접대비(점선) 절반수준이었다.

종방향 변형(Fig. 17(a))은 레이저용접의 변형이 Arc 용접 결과 보다 작게 관찰되었으나, 두 경우 모두 절대치가 작아 정도에 대한 논의는 하지 않았다.

Fig. 17 Prediction accuracy of welding distortion by L.B.W.

Fig. 18 Prediction accuracy of welding residual stress by L.B.W.

한편, 잔류응력 계측 결과(Fig. 18)는 Arc 용접대비 입열량이 작아(고밀도), Arc 용접과 같이 항복응력에 이르는 수준의 응력의 잔류는 관찰되지 않았다.

4.3 시뮬레이션

지배인자인 입열요소를 Fig. 15와 같이 모델링하고, 3차원 열탄소성 해석을 수행하고, 결과를 Fig. 16, 17에 나타낸다.

3차원 비정상 열전도 해석결과는 열효율을 73%로 조절함으로써 실험결과를 잘 재현하였다.

용접변형의 예측결과는, 항복조건을 만족시키기 위해 고온에서의 온도증분을 0.5~1℃로 하여 해석을 진행하였다.

실험결과로부터 각변형 및 종방향변형의 예측 결과는 실험결과를 정도 높게 잘 예측하였으며, 잔류응력의 계측결과(Fig. 18)도 해석결과는 실험을 정도 높게 잘 재현하였다.

5. 결 론

용접이음 특성이 서로 상이한, 맞대기 용접, 필렛용접, 레이저용접을 대상으로 Bead On Plate에서 확인된 용접 면외변형의 고정도 예측의 지배인자의 정당성을 확인하기 위한 실험과 3차원 열탄소성해석에 의한 시뮬레이션을 수행하였다.

얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 박판의 맞대기 용접을 대상으로 면외변형의 측정 실험을 수행 할 경우 가접으로 인한 Misalignment가 단차를 발생시키고, 이로 인해, 용접중 중립축 위치가 용접선 방향으로 일정하지 않은 경향을 갖게 되었으며, 이것은 종방향 변형 및 각변형 등 용접 면외변형이 예상하지 못한 방향으로 발생할 수 있어, 특단의 주의가 필요하다.

2) 박판의 맞대기 용접에서 발생하는 면외변형 을 정도 높게 측정하기 위한 실험시편을 제안하였다. 이 시편을 이용하여 실험을 실시 함과 동시에, 실험 결과를 열탄소성해석에 의해 시뮬레이션 하고 결과를 비교 검

토함으로써, Bead on plate를 대상으로 특정한 용접면외변형 고정도 예측시 고려해야할 지배인자의 정당성이 확인되었다.

3) BOP모델에서 항복조건에 따른 변위거동은 감소경향으로 수렴된 반면, Fig. 6의 맞대기용접이음의 경우, 변위는 증가경향을 나타내면서 수렴되는 상반된 경향을 나타내고 있다. 이는 항복조건에 따라 변위 절대치의 증가 및 감소경향을 예측할 수 없다는 것이 명확해 졌다.

4) 용접변형과 잔류응력의 생성기구가 동일하다는 전제하에, 완전해방법에 의한 잔류응력의 예측 정도를 확인하였으며, 결과로부터 잔류응력도 정도 높게 예측 가능함이 확인되었다.

5) 레이저용접은 Arc용접대비 평균온도상승이 낮았으며, 이로 인해 각변형 및 잔류응력은 Arc 용접대비 절반수준으로 저감되었다. 한편, 레이저용접의 경우에도 지배인자를 활용함으로써 정도 높은 용접변형의 예측이 가능하였으며, 결과로서, 지배인자의 일반성이 검증되었다.

Reference

1. For example, WATANABE M., SATOH K.: Welding Mechanics and its application, Asakura-shoten, (1965), (in Japanese)
2. KIM Y.-C., LEE J.-Y., INOSE K.: The High Accurate Prediction of Welding Distortion Generated by Fillet Welding, Quart. J. of JWS, **23-3**(2005), 431-435 (in Japanese)
3. KIM Y.-C., CHANG K.-H., HORIKAWA K.: Production Mechanisms for Out-of-plane Deformation in Fillet Welding and Investigation of Generality, Quart. J. of JWS, **17-2**(1999), 294-300 (in Japanese)
4. KIM Y.-C.: Development of Tool for Predicting Welding Distortion with High Accuracy, Nat. Meet. of JWS, Special Session, 2003, 21-22 (in Japanese)
5. Bang, Han-Sur, You-Chul Kim: Analysis on The Three-Dimensional Unstationary Heat Conduction on The Welding of Thick Plate by F.E.M., J. of KWS, **9-2** (1991), 37-43 (in Korean)
6. Bang, Han-Sur: Study on the Mechanical Behavior of Welded part in thick Plate - Three-dimensional Thermal Elasto-Plastic Analysis Based on Finite Element Method, J. of KWS, **10-4** (1992), 250-258 (in Korean)

- 이재익
- 1973년생
- 포항산업과학연구원 강구조연구소
- 용접변형/잔류응력, 피로수명향상
- e-mail : leejaeyik@rist.re.kr

- 장경호
- 1963년생
- 중앙대학교 사회기반시스템공학부
- 용접역학, 강구조, 건전도모니터링
- e-mail : changkor@cau.ac.kr

- 김유철
- 1948년생
- 오사카대학 접합과학연구소
- 용접역학, 강구조, 피로
- e-mail : kimyc@jwri.osaka-u.ac.jp