

용접이상화에 의한 용접부정의 예측과 정도

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

*포항산업과학연구원 강구조연구소

**중앙대학교 사회기반 시스템 공학부 건설환경플랜트전공

***일본국립대학법인 오사카대학 접합과학연구소

Prediction of Welding Imperfection with Idealization of Welding and Their Accuracy

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

In order to reduce a grand compute time in prediction of welding distortion and residual stress by 3D thermal elastic plastic analysis, idealization of welding that is methods to heat input simultaneously in all weld metal on the same welding direction is carried out on two weld joints(butt welding and fillet welding). Then, the accuracy of acquired results is investigated through the comparison of the high accuracy prediction results.

The thermal conduction analysis results by idealization of welding, the temperature is raised accompany with beginning of heat input because all of weld metal is heated input at the same time. On the other side, the temperature witch predicted with high accuracy is raised at the moment heating source passes the measuring points. So, there is difference of time between idealization of welding and considering of moving heat source faithfully. However, temperature history by idealization of welding is well simulated a high accuracy prediction results.

Key Words : Welding imperfection, Welding distortion, Residual stress, Idealization of welding, CPU time, 3D thermal elastic- plastic analysis

1. 서 론

용접가공에는 필연적으로 용접부정(변형과 잔류응력)이 발생하고 있으며, 열탄소성해석에 의해 이들을 예측하는 경우 전온도장에서 항복조건을 충족(특히 700℃ 이상의 고온 영역) 시킴과 동시에 용융지 형상을 고려(용착금속부에 입열)하고, 열원의 이동을 충실하게 모의 하면, 정도 높은 예측이 가능함을 확인하였다.

그러나, 3차원 열탄소성해석에 의한 예측은, 온도증분의 미세화와 열원이동의 고려에 방대한 계산 시간을

요하고 있어, 제작현장에서 정도 높은 예측수단으로서의 활용이 현실적으로 불가능 하다고 판단되고 있다.

본고에서는 맞대기 용접 및 필렛 용접의 대표적인 두 용접 이음을 대상으로 고정도 예측수단을 활용한 용접 이상화 모델을 제안하고, 용접부정(용접변형/잔류응력)의 예측 정도와 예측 시간 비교를 통하여 열탄소성해석의 현장 적용 가능성을 검토하였다.

2. 열원이동의 이상화

용접 현상을 충실하게 시뮬레이션 할 때 계산 시간을

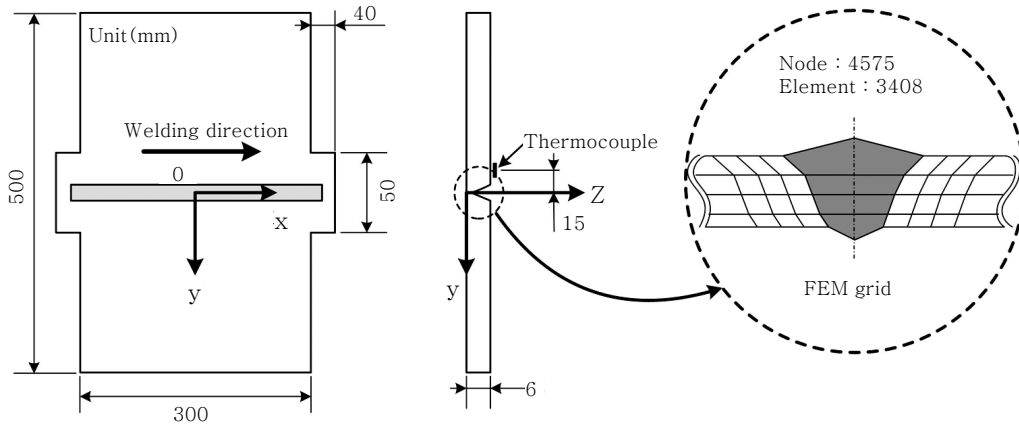


Fig. 1 Analysis model for butt welding

가장 많이 소요하고 있는 부분은 용접 열원의 이동 과정을 재현하는 부분이며, 제작 현장을 고려하면 계산 시간을 대폭 단축한, 이상적인 열원이동 모델을 생각하였다. 즉, 3차원 열탄소성해석을 이용한 고정도 예측에 있어서 용접선을 따라 입열 과정이 한 번에 수행되는 용접속도가 순간적으로 극대화된 이상적인 상황을 가정하였다.

본 가정에 대한 타당성 검증을 위하여, 열전도 특성이 상이한 두 가지 대표적인 용접 이음을 대상으로 용접이상화를 통한 3차원 열탄소성해석을 수행하고, 얻어진 결과(용접변형 및 잔류응력)를 고정도 예측 결과와 비교 검토함으로써 예측 정확도와 예측시간을 검토한다.

3. 맞대기 용접

3.1 3차원 비정상 열전도 해석

해석 모델을 Fig. 1에 나타낸다. 대상소재는 SM400이며 용접조건은 전류: 28(V), 전압: 240(A), 용접속도: 5(mm/s)의 반자동 CO₂ 용접을 가정하였다.

충입열량은 이동열원과 동일하며, 시험체 중앙(x=0 mm)에서 판 폭 방향(y 방향)으로 측정 한 온도이력²⁾이 일치되도록 열효율을 결정하였다.

3차원 비정상 열전도 해석 결과의 일례로서 x=0, y=15, z=6 (mm)의 온도 이력을 Fig. 2에 실선으로 나타낸다. 그림의 “●”는 온도 측정 결과이며, 점선은 열원의 이동을 충실하게 시뮬레이션²⁾ 한 결과이다.

이상화한 열전도해석결과의 온도 이력은, 충입열량은 이동열원과 동일하며 열원의 이상화로 인한 입열시간의 상이로 인해 시간 차이와 열효율의 상이가 발생되었으나, 시험체 중앙 (x=0(mm))에서 실험 및 열원의 이동을 충실히 재현한 결과와 잘 일치 하고 있다.

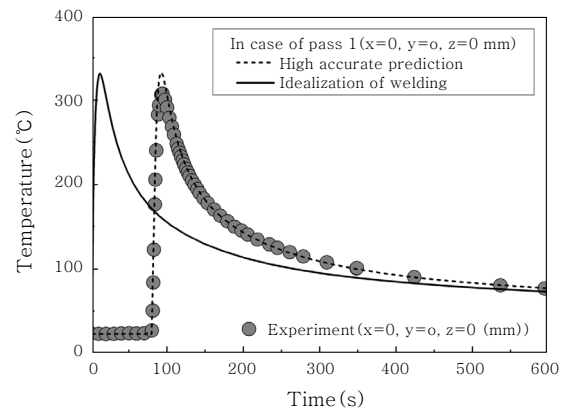


Fig. 2 Temperature history (Butt welding)

3.2 3차원 열탄소성해석

온도이력을 이용하여 수행한 탄소성 응력해석결과 중, 시험체 중앙부 (x=0 (mm))에 발생한 각변형을 Fig. 3 (a)에 실선으로 나타낸다. 그림의 “●”는 각변형 측정 결과, 점선은 고정도 예측 결과이다.

열원의 이상화에 의한 각변형 예측 결과, 경향은 실험 결과와 같지만 절대값은 고정도 결과 대비 작은 결과가 얻어졌다.

종방향 변형을 Fig. 3 (b)에 나타내고 있으나 절대값 자체가 작고, 정확성을 논할 정도는 아니었다.

한편, 잔류응력 (용접선 방향 성분: σ_x 및 용접선 직각 방향 성분: σ_y)의 예측 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 그림 중 “□”는 고정도 예측 결과를 “○”는 열원을 이상화한 결과이지만, 모두 잘 일치 하고 있음을 확인하였다. 본 원인은 다음과 같이 추정하였다.

재료의 항복 응력은 700°C 이상의 고온 영역에서 거의 “0”에 가까운 수준을 나타내고 있고¹⁾ 잔류응력의 주요 생성기구(연강의 경우)는, 냉각에 따른 강도회복 온도가, 700도까지 냉각된 이후로 응력의 잔류치가 증가

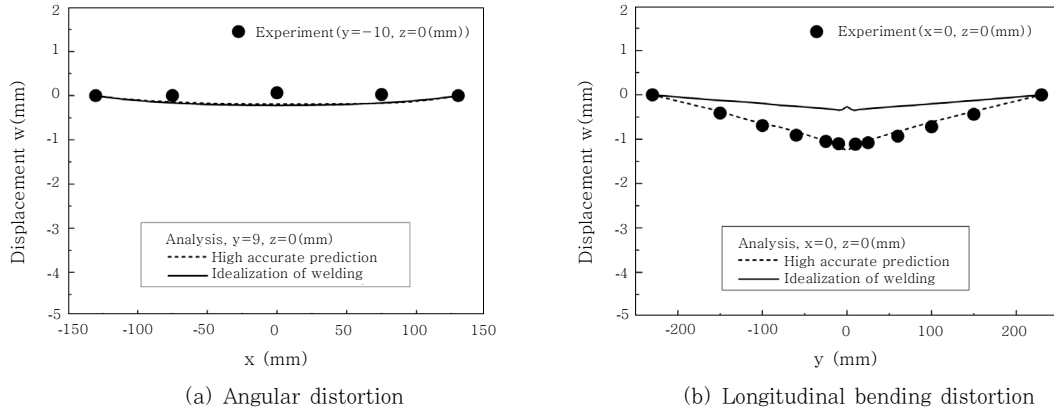


Fig. 3 Out-of plane distortion (Butt welding)

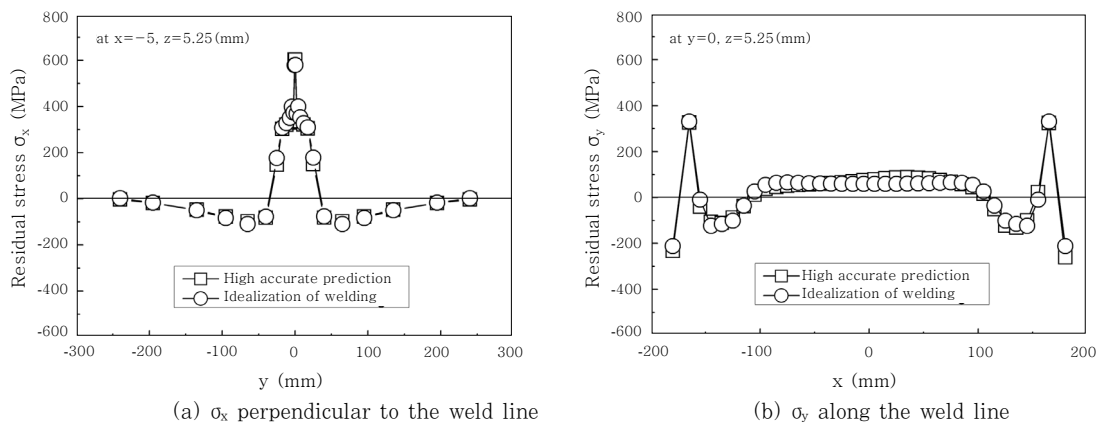


Fig. 4 Residual stress (Butt welding)

하기 때문에 추정된다.

이상으로 맞대기 용접의 경우, 열원의 이상화에 의한 예측 결과는 면의 변형이 생기는 방향과 경향은 일치 하였지만, 예측치의 절대값은 작고 예측 정확도는 높지 않았다. 반면, 잔류응력의 예측 정확도는 높은 것으로 확인되었다.

계산시간을 비교하면, 이상화에 의한 계산시간은 용접을 충실히 재현하는 경우의 약 1/10 이었다.

4. 필렛 용접

4.1 3차원 비정상 열전도 해석

해석 모델을 Fig. 5 에 나타내었다. 재료는 SM400이고 용접 조건은 Pass① 및 Pass②와 함께: 전압: 35(V) 전류: 300(A), 용접속도: 7.5(mm/s)로 가정 하였다.

용접은 먼저 Pass①층의 용접금속부(착색부)에 이동을 고려하지 않은 용접 이상화를 수행하고, 시험체 종단의 온도가 50℃ 이하로 냉각 한 시점에서 Pass②층의 용접금속부(착색부)에 용접 이상화를 수행한다.

열전도해석후, 온도이력을 Fig. 6에 나타내었다. 이상화에 의한 온도이력(실선)은 앞에서 언급 한 바와 같이 시간적 차이를 두고 실험(●)과 열원의 이동을 충실히 재현한 결과(점선)와 잘 일치 하고 있다. 이 온도이력을 사용하여 열탄소성 응력해석을 실시한다.

4.2 3차원 열탄소성해석

3차원 열탄소성해석을 수행하고, 결과중, 시험체 중앙부 ($x=0$ (mm))에 발생한 각변형을 Fig. 7(a)에 실선으로 나타낸다. 그림 중 실험 결과를 “●”로, 열원의 이동을 충실히 재현한 고정도 예측 결과를 점선으로 나타낸다.

열원의 이상화에 의한 예측 결과는 변형 경향이 실험 결과와 일치하고 있지만, 해석결과의 절대치는 크고 예측 정확도는 높지 않았다.

종방향 변형을 Fig. 7(b)에 나타낸다. 맞대기 용접의 사례와 같이 절대값 자체가 작아 정도를 논의 할 정도는 아니었다.

잔류응력 예측 결과(Fig. 8) 맞대기 용접에서와 같이

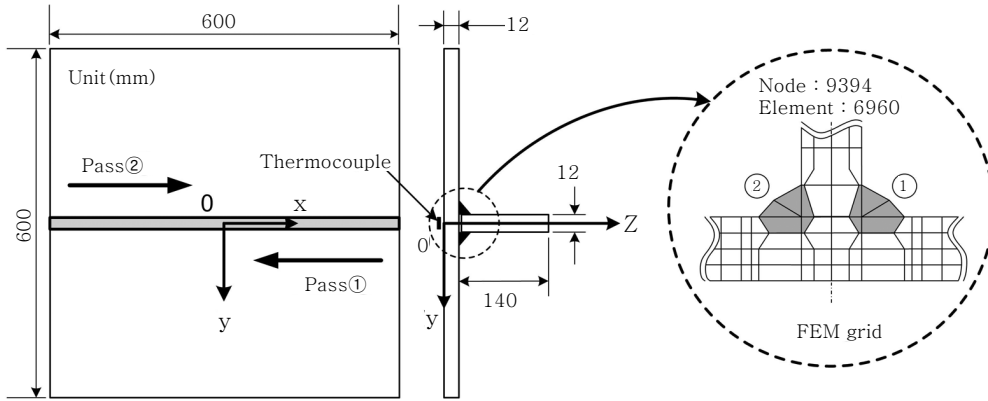


Fig. 5 Analysis model for fillet welding

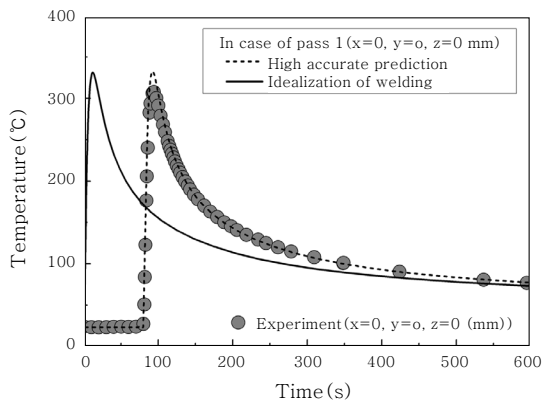


Fig. 6 Temperature histories (Fillet welding)

용접선방향 및 직각방향의 각각의 성분에 대해 고정도로 예측한 결과와 모두 잘 일치하고 있다. 이유는 앞서 언급 했다.

이상 필렛 용접에 있어서도 맞대기 용접의 이상화 사례와 같이 면의 변형이 생기는 방향 등 경향은 일치하고 있지만, 예측 정도는 고정도 예측치 대비 크게 낮은 것이 확인되었다. 반면, 잔류응력의 예측 정확도는 고정도 예측결과와 같은 수준의 정도가 얻어짐이 확인되었다.

본 필렛용접이음 모델의 경우, 이상화에 의한 계산 시간은 고정도 예측의 약 1/20로 측정되었다.

한편, 고온에서의 항복조건을 만족시키기 위해 온도 증분 ΔT 를 0.5~1°C 수준으로 계산이 진행되었으며, 온도증분을 줄이면, 더욱더 많은 예측 시간의 절감이 가능하다고 생각이 되었으나, 본 고온에서의 항복조건은 용접현상의 이상화 대상이 아닌, 만족되어야 할 하나의 역학적 조건, 즉 절대치로 표현되는 것이 아닌 조건의 만족 여부에 대한 결과가 의미가 있는 것으로, 본 용접 이상화에서는 논의하지 않았다.

5. 결 론

용접부정(변형 및 잔류응력)의 고정도 예측시, 많은 계산 시간을 필요로 하는 열원의 이동을 이상화(용접 라인을 따라 한 번에 열원이 놓이는 가정)한 모델을 대상으로 용접부정의 예측 결과를 검토하였다. 얻어진 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1) 용접을 이상화 하는 경우 측정위치에 따라, 열원 이동을 충실히 재현한 경우와 비교하여, 온도 이력의 시간 차이가 발생하였으나, 입열시간과 열효율을 조절

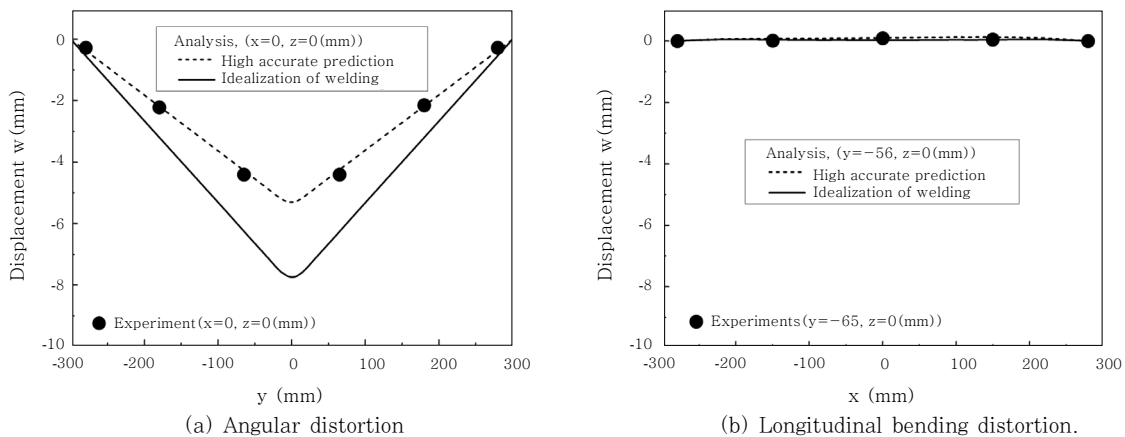


Fig. 7 Out-of plane distortions (Fillet welding)

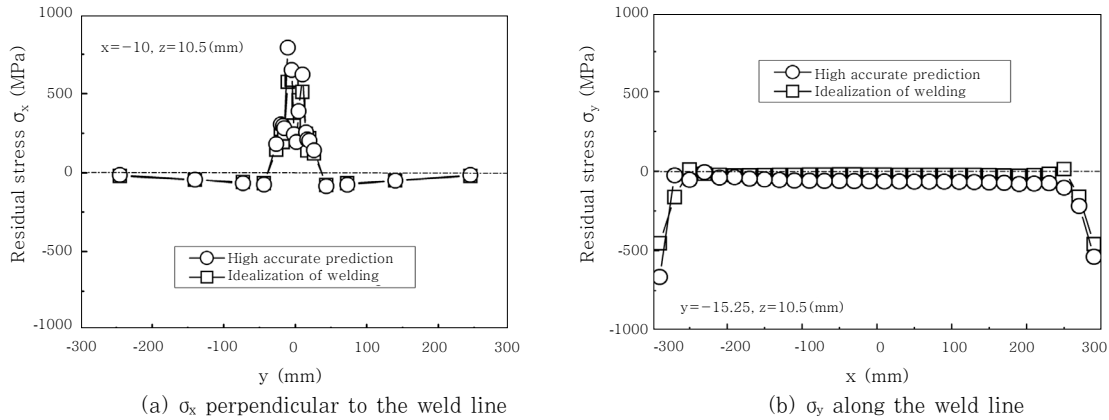


Fig. 8 Distribution of residual stresses (Fillet welding)

함으로서 열원의 이동을 충실히 재현한 결과와 잘 일치 하도록 해석이 가능 하였다.

2) 맞대기 용접 및 필렛 용접에서 발생하는 각 변형 은 실험 및 고정도 예측 결과와 경향은 일치 하였지만, 절대값의 예측 정도는 높지 않았으며, 종방향 변형은 정도를 논의 할 만큼 절대값이 크지 않았다.

3) 맞대기 용접 및 필렛 용접에서 발생하는 잔류 응 력 분포 및 절대치는 이동열원을 고려한 고정도 예측 결과와 잘 일치하고 있었다.

4) 계산 시간은 맞대기 용접의 경우 고정도 예측대비 약 1/10, 필렛 용접의 경우 약 1/20로 대폭 단축되었다.

Reference

1. For example, M. Watanabe, K. Satou: Welding Mechanics and its application, Asakura-shoten, (1965), (in Japanese)
2. Y. C. KIM, J. Y. LEE, et al.: Measurement and Numerical Simulation of Welding Distortion Generated by Butt Welding Prep. Nat. Meet. of JWS, **77**, 300-301 (in Japanese)
3. Y. C. KIM, J. Y. LEE, K. Inose: The High Accurate Prediction of Welding Distortion Generated by Fillet

Welding, Quar. J. of JWS, **23-3** (2005), 431-435 (in Japanese)

4. Y. C. KIM, J. Y. Lee, et al.: Prerequisite Condition for High Accuracy Prediction of Welding Distortion, Prep. Nat. Meet. of JWS, **76**, 150-151 (in Japanese)
5. Y. C. Kim, K. H. Chang and K. Horikawa: Production Mechanisms for Out-of-plane Deformation in Fillet Welding and Investigation of Generality, Quar. J. of JWS, **17-2**(1999), p. 294-300 (in Japanese)
6. Y. C. KIM, J. Y. LEE, et al.: Prediction of Welding Distortion and Residual Stress by Idealization of welding and Its Accuracy (I). Prep. Nat. Meet. of JWS, **75**, 276-277 (in Japanese)
7. Y. C. KIM, J. Y. LEE, et al.: Prediction of Distortion and Residual Stress by Idealization of welding and Their Accuracy (II). Prep. Nat. Meet. of JWS, **78**, 218-219 (in Japanese)
8. 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)
9. 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



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



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