

## 용접변형 고정도 예측을 위한 지배인자의 특정

이 재익\*<sup>†</sup> · 장 경 호\*\* · 김 유 철\*\*\*

\*포항산업과학연구원 강구조연구소

\*\*중앙대학교 사회기반 시스템 공학부 건설환경플랜트전공

\*\*\*일본국립대학법인 오사카대학 접합과학연구소

### Specification of Governing Factors for High Accurate Prediction of Welding Distortion

Jae-Yik Lee\*<sup>†</sup>, 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

<sup>†</sup>Corresponding author : leejaeyik@gmail.com

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

#### Abstract

In carrying out the elastic-plastic analysis, four conditions (equilibrium equation, constitutive equation, condition of compatibility and yield condition) should be satisfied. In welding, the temperature largely changed from a melting temperature to a room temperature. So, yield stress of materials largely changed, too. In particular, yield stress becomes about zero over 700°C. The analysis should be carried out under the condition that equivalent stress generated in temperature increment  $\Delta T$  did not exceed yield stress of materials at high temperature over 700°C. It should be sufficiently recognized that the obtained results were not reliable if this condition was not satisfied.

Key Words : Bead on plate, Welding distortion, Angular distortion, Accuracy, Shape of deposit metal, Thermal Elastic-Plastic analysis, Governing factor

#### 1. 서 론

교량 및 선박 등 판과 보강재로 구성된 박판 구조물의 제작에 다수 적용되고 있는 용접공정에는 변형과 응력이 필연적으로 발생<sup>1)</sup>하고 있다.

그 중 변형은 좌굴, 피로 등 역학적요인과 구조물의 제작 정밀도 및 미관 저하에 따른 상품 신뢰성 저하 등 제작 전반에 걸쳐 효율을 저감시키는 요인이 되고 있다.

허용치 이상의 변형에 대하여 현장에서는, 여러 가지 후처리 방법으로 교정되고 있으나, 교정에는 시간/비용 증가와 함께 경험적인 숙련 기술이 요구되고 있으나, 숙련기술자의 인력은 최근 감소경향에 있어, 근본적인 해결 방법이 요구되고 있다.

한편, 현장 교정방법으로 가열교정(Fig. 1)에는, 많은 화석에너지와 부생물인 온실가스가 발생, 이들은 지구 온난화에 영향을 미치고 있으며, 일본의 경우, 온실



Fig. 1 Gas heating correction (box girder)

가스 감축을 위한 활동으로 용접구조물의 후교정이 필요하지 않는 용접 기반기술 개발을 정부과제로 진행(5년)하는 등 변형의 후처리가 환경문제 개선방안으로도 인식되고 있다.

이러한 용접변형 문제에 대해서 저자들은, 용접변형을 생성단계에서 저감/방지 또는 제어하는 명제 해결을 위하여, 용접변형을 정도 높게 예측하고 이를 용접전/용접중 역방향으로 변형을 부여하여 최종 발생하는 변형량을 저감시키는 “역변형률법”에 주목하였다.

본 기술은 용접변형의 정도 높은 예측을 기본적으로 요구하고 있으나, 현재의 예측 정도는 정성적 해석 정도가 가능한 상태이며, 현장에서도, 정량화라는 인식이 없이, 현장 경험을 기반으로 활용되고 있다.

최근에는 용접와이어의 성능을 개선하여 용접부의 저온 상변태 과정에서 변태팽창을 이용한 용접변형 능동 제어 기술까지 제안되고 있으나, 고정도 예측수단의 부재로 폭넓은 현장 활용이 어려운 상태이다.

한편, 용접변형의 고정도 예측수단으로 유한 요소법에 의한 3차원 열탄소성해석이 일반적으로 수행되고 있지만, 현재의 용접변형의 예측 수단은 높은 예측정도를 보증하지 못하며, 이는, 수많은 영향인자에 대한 거동이 명확하게 밝혀지지 않았기 때문이다.

본고에서는 “용접변형의 고정도 예측을 통한 용접변형 저감방법 구현”이라는 목표 달성을 위해, 저자들이 수행해온 연구성과 중 용접변형 고정도 예측의 지배인자에 대하여 특정한 사례를 소개하고자 한다.

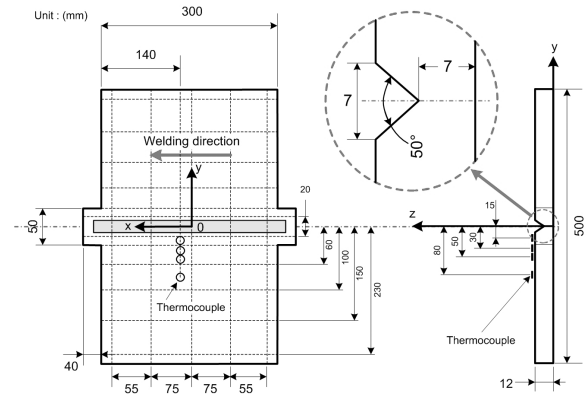
## 2. 실험

용접변형의 고정도 예측을 위한 대상모델로서, 형상, 용접 등에 대하여 안정성이 높은 Bead On Plate를 대상으로 실험을 수행하였다.

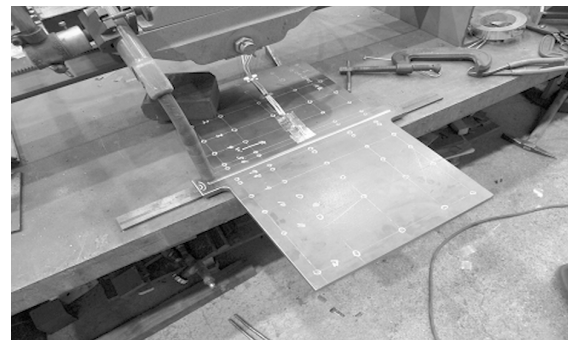
실험 대상 강재는 SM400 (12mm)이며, 용접 Bead 용착 안정성을 확보하기 위하여, End tap 및 Groove가 포함된 Bead On Plate를 대상으로 실험을 진행하였다. 시험체의 형상, 크기, 좌표계 및 용접 순서를 Fig. 2에 나타낸다.

용접은 반자동 CO<sub>2</sub> 용접 1 Pass(Fig. 2(b))를 수행하였으며, 용접조건은 전류: 240(A), 전압: 28(V), 용접 속도: 5(mm/s)로 하였다.

실험중 시편의 온도변화 계측을 위해, 시편 (Fig. 2) 중심부 상면(x=10, z=12(mm))의 4개소 (y=15,30, 50,80(mm))에 열전대를 설치하였으며, 용접종료 후 시편이 상온까지 냉각된 후, 다이얼 게이지(분해능: 1/100mm)를 이용하여, 각변형과 종방향 변형을 계측하였다. 계측 위치는 Fig. 2(a)에 점선으로 나타내었다.



(a) Experimental model



(b) Semi-Auto CO<sub>2</sub> welding

Fig. 2 Bead on plate with groove

온도 측정결과를 Fig. 5, Fig. 12에 심볼로 나타내었다. 평균온도상승은 약 90℃로 계측되었다.

용접 면외변형의 측정 결과, 용접선 방향의 각변형 경향은 “V”형상이었으며, 절대치는 최대 약 3mm로, Start <Mid<End의 순서로, 중단부의 각변형이 가장 크게 계측되었다. 한편, 종방향 변형은 각변형 보다 계측치가 크게 작았다.

## 3. 시뮬레이션

실험결과를 3차원 열탄소성해석에 의하여 시뮬레이션 하였다. 예측수단은 저자들에 의해 개발된 3차원 열탄소성해석 프로그램을 사용 하였으며, 프로그램의 정당성 / 일반성 등 검증 사례는 참고문헌에 나타내었다.

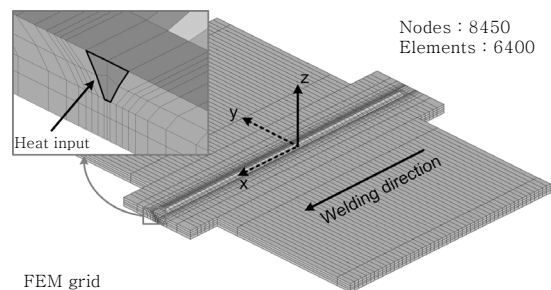


Fig. 3 FEM grid for bead on plate

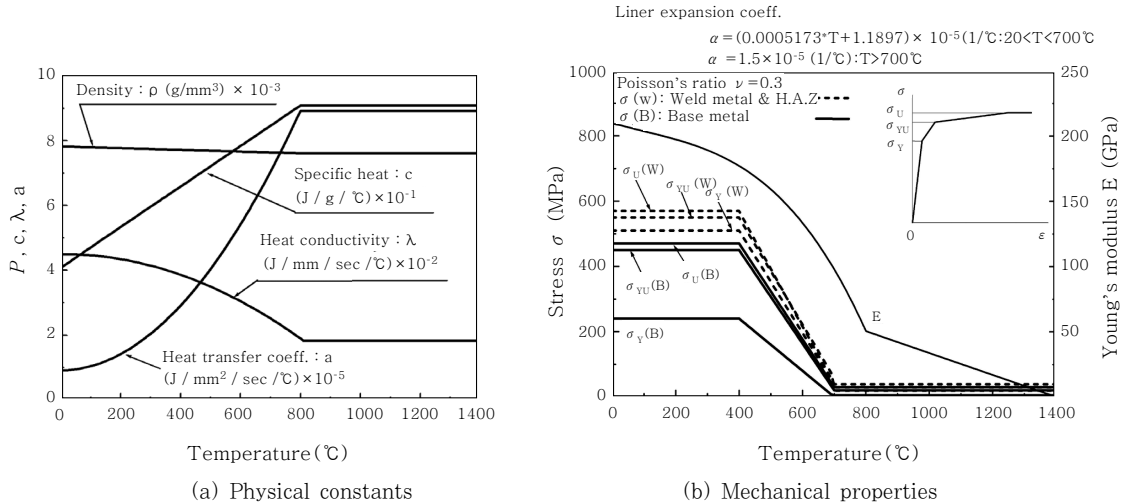


Fig. 4 Temperature dependence of materials characteristics

해석 모델(Fig. 3)은 8절점 Solid 요소를 사용하고 6,400개 요소로 이산화 하였다. Bead On Plate(이하 BOP)의 입열부 형상은, 단순 3각형 형상으로 가정하였으며, 수치해석에 사용된 강재/Wire의 물리상수 및 기계적특성질의 온도 의존성은 Fig. 4를 참조하였다.

열전도해석결과에 주목해 보면, 온도이력은 용접현상에 있어서 외력에 해당됨으로, 실험치와 해석치의 온도이력이 일치되도록 허용범위 (CO<sub>2</sub> 용접:70~80%)에서 열효율( $\eta$ ), 즉 총입열량을 조절 하였다. 3차원 비정상 열전도 해석결과 (Fig. 5)는 실험결과를 잘 모사하고 있다.

계사된 온도이력을 사용하여 탄소성해석을 수행하였다. 구속조건은 회전과 변이가 발생되지 않도록 최소 6개 성분만을 고려하였다(Fig. 6). 3차원 열탄소성해석 결과 중 각변형의 예측 결과를 실선으로 Fig. 7에 나타내었다. 각변형 ( $x=0\text{mm}$ )은 실험의 경향을 잘 재현하였으나, 절대치는 실험결과와 많은 차이를 보이고 있다.

예측 정도에 영향을 미치는 영향인자 검토를 수행하기 전 해석조건에 주목하였다.

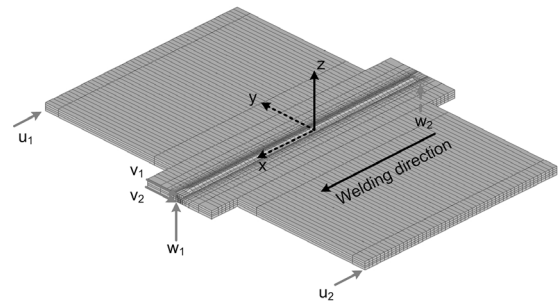


Fig. 6 Boundary condition

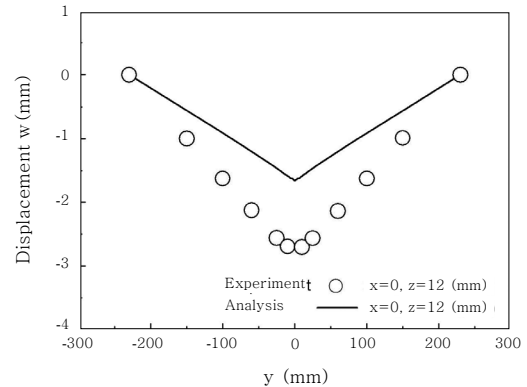


Fig. 7 Prediction results of angular distortion

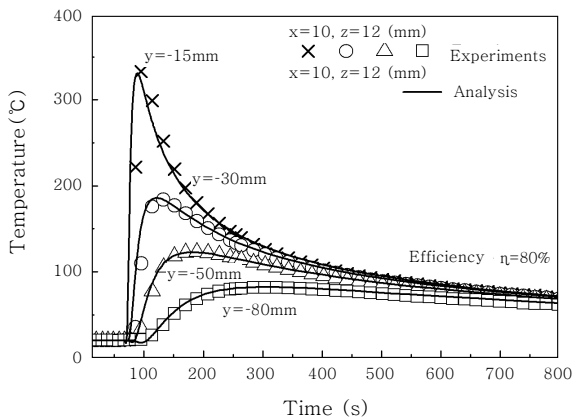
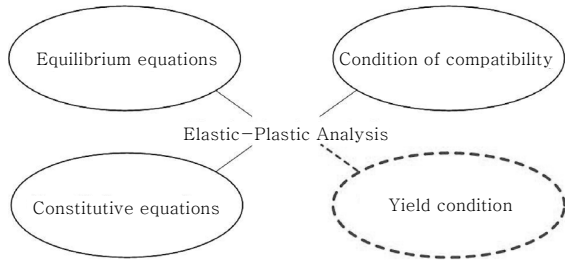


Fig. 5 Temperature histories

#### 4. 용접 시뮬레이션의 필수조건

용접현상을 3차원 유한요소법에 의한 열탄소 성해석에 의해 재현할 경우, 반드시 만족해야 할 4가지 조건을 Fig. 8에 나타낸다.

이중, 항복조건에 주목하면, 일부의 온도이력 구간에서 온도증분  $\Delta T$ 에 의해 발생하는 상당응력이 재료의 항복응력을 넘는 현상이 관찰되었다. 온도증분  $\Delta T$ 에서



**Fig. 8** Forth condition for thermal elastic-plastic analysis by FEM

발생하는 상당 응력이 재료의 항복응력을 초과하는 영역은 온도 상승 및 냉각과정을 포함하여 700℃ 이상 되는 용접선 주위의 고온 영역임이 확인되었다.

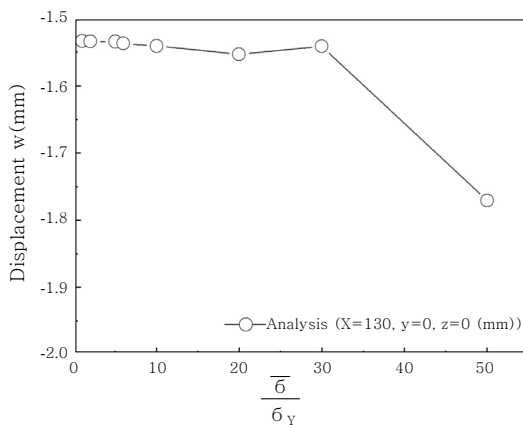
700℃ 이상의 고온부에서 재료의 항복응력은 40~50MPa의 낮은 수준이지만(Fig. 4 (b)), 700℃ 이하의 냉각 과정에서 온도증분 ΔT (30℃ 정도)에 의해 생기는 상당응력은 어떠한 경우에도 재료의 항복응력을 초과 할 수 없다.

용접현상은 재료의 용융점부터 상온까지 넓은 온도영역을 다루고 있으나, 어떠한 경우에도, 역학적인 조건을 만족해야 한다.

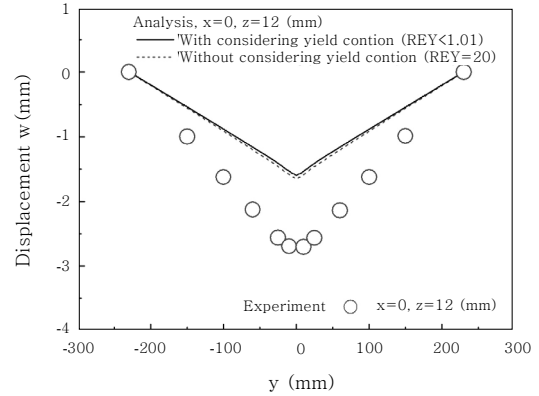
재료의 항복응력과 온도증분 ΔT에서 발생하는 상당응력의 비가 1.0이 되기 위한 조건을 충족하기 위해 ΔT를 제어하고 얻어진 해석 결과(변위)를 Fig. 9에 나타낸다.

해석 결과는 절대치의 증가와 감소를 반복하며, 수렴하였으며, 더 나은 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 700℃의 고온영역에서도, 항복조건을 만족시켜야 한다는 것을 시사하고 있다.

이상으로 고온시의 항복조건을 의식하지 않고 해석하면 모든 역학조건을 충족한 결과에 대해 과소 또는 과대평가 하게 된다. 그러나 해석에는 과소 또는 과대



**Fig. 9** Variation of displacement in accordance with yield condition



**Fig. 10** Prediction results (Angular distortion)

인지 조차 모르는, 즉 평가의 방법이 없고, 조건을 충족하도록 해석 하는 것 외에 방법이 없는 필수조건임을 인지해야 한다.

한편, 항복조건을 충족하도록 해석 했지만, 용접 금속을 단순한 3 각형으로 가정한 경우 실험값과 여전히 큰 차이를 나타내고 있다. 영향인자로서 용융지 형상을 영향인자로 특정하고, 그 정도를 확인하였다.

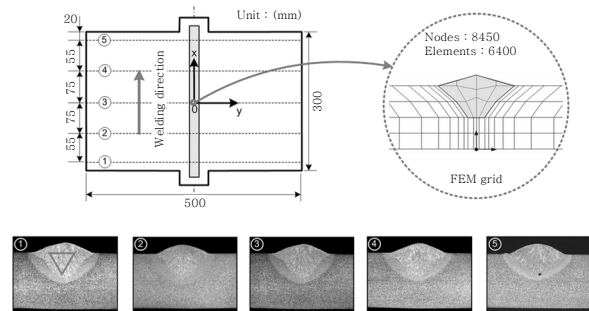
### 5. 지배인자의 특정(용융지형상의 고려)

용접선 방향 5개소의 단면 매크로 사진 채취하고 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

단면 매크로 사진을 통하여 용접금속의 형상은 간단한 3각형이 아니라는 것을 알 수 있다.

BOP 용융부 단면 매크로 사진을 기본으로 용접금속 부분을 용착금속으로 간주하고, 3 차원 열탄소성해석을 실시한다.

용접금속을 용착금속으로 간주할 경우 주의 사항으로, 입열시 용착금속은 강성을 가지지 않고 용착금속 요소의 절점은 변위를 갖지 않으며, 입열을 하지 않는, 입열 대기중인 선행의 용착금속 요소들은 온도변화에 따라 강성과 변위를 가져야 하는, “입열요소 강성의 소멸과 생성” 현상을 충분히 고려해야 할 필요가 있다.



**Fig. 11** Macro photograph along weld line

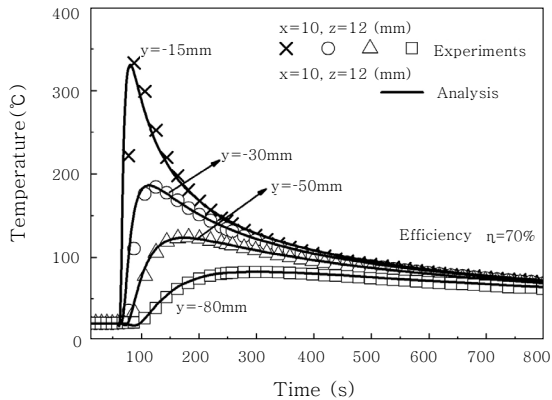


Fig. 12 Temperature histories with considering weld shape

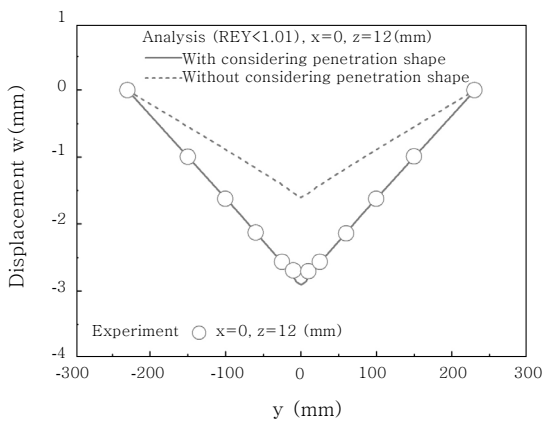


Fig. 13 Prediction results of angular distortions with considering weld shape

용접금속부에 입열하고 비정상 열전달 해석을 수행하고 얻어진 결과를 Fig. 12에 실선으로 나타낸다.

용착금속형상 고려로 인하여 열원요소와 계측 거리와의 최단거리가 짧아졌으며, 열효율( $\eta$ )을 70%로 조절하여 실험결과를 잘 재현하도록 하였다.

용착금속의 형상을 고려하여 이곳에 입열시키고, 재료의 항복응력과 온도증분  $\Delta T$ 에서 발생하는 상당응력의 비가 1.0을 초과하지 않는 제약 조건에서  $\Delta T$ 를 조절하고 수행한 해석결과(각변형)를 Fig. 13에 나타내었다. 해석결과는 실험결과(심볼)를 정도 높게 재현하고 있음을 확인하였다.

본 결과로부터, 입열요소가 단순한 3각형인 경우와 용착금속 형상을 고려한 경우 두께방향의 온도구배가 같았다는 사실은, 즉, 실험의 온도구배와 일치하도록 해석 한 것은, 용접 변형(각변형)이 단순히 총입열량에 따른 두께방향의 온도구배에 의한 것만이 아니며, 입열과 용접이행중의 입열요소 강성의 상실과 회복(3차원 열원 형상과 이에 대한 강성 부여가 지배적임)이 예측 정도에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미하고 있다.

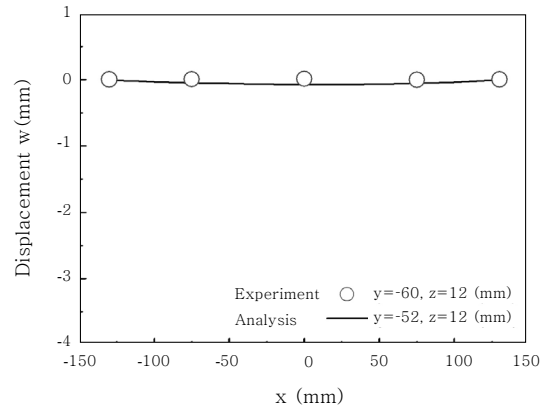


Fig. 14 Longitudinal bending distortion

한편, 종방향 변형은 절대값 자체가 작아 결과에 대한 논의를 하지 않았다.

## 6. 맺음 말

용접변형의 고정도 예측을 위한 지배인자 확보를 위하여, Bead On Plate를 대상으로 실험을 수행하고, 실험결과를 3차원 열탄소성 해석에 의한 시뮬레이션을 수행하였다.

얻어진 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1) 열효율 조절을 통하여 온도 측정 결과의 정도 높은 시뮬레이션이 가능하였다.

2) 탄소성해석을 할 경우 충족시켜야 할 4개의 조건이 있으며, 용접 문제는 용융온도에서 실온까지 광범위한 온도영역을 취급하게 되며, 재료의 항복응력은 크게 변화한다. 그 중에서도 700°C 이상에서는 항복응력이 거의 상실되어 700°C 이상의 고온부에서 온도증분  $\Delta T$ 에 의해 계산되는 상당응력이 항복응력을 초과하지 않는 제약조건에서 해석해야 하고, 이를 충족시키지 못할 경우 결과는 최소 및 최대가 되는 등 신뢰 받을 가치가 없는 것을 충분히 인식 해 둘 필요가 있다.

3) 용접 각변형의 시뮬레이션은 입열요소(용착금속) 형상을 단순한 3각형으로 가정하는 것이 아닌 용융지 금속 형상에 입열을 하고 열원이동과 온도에 따라 요소에 적절한 강성을 고려하여 3차원 열탄소성해석을 수행하면 정도 높은 각변형 예측이 가능함을 확인하였다.

4) 종방향 변형은 절대 값 자체가 작아 영향인자와 예측 정확도의 논의가 어려웠다.

## References

1. For example, M. Watanabe, K. Satoh : Welding mechanics and its application, Asakura shoten(1965), (in Japanese)

2. Y.-C. Kim : Prediction and Production Mechanism of Residual Stress Generated by Welding and Joining, J. of Light Metal Welding & Construction, **38-11** (2000), pp.508-515 (in Japanese)
3. K.Inose, H.Imoto, Y.Nakanishi, Y.-C. Kim 3D-measurement of Welding Distortion using Photograph and Its Applicability, Prep. Nat. Meet. of JWS, **75**, 286-287 (in Japanese)
4. Y.-C.Kim,K.-H.Chang, K.Horikawa : Production Mechanisms for Out-of Deformation in Fillet Welding and Investigation of Generality, Quar. J. of JWS, **17-2** (1999), 294-300 (in Japanese)
5. Y.-C. Kim : Development of Tool for Predicting Welding Distortion with High Accuracy, Special Session of JWS,(2003), 21-22 (in Japanese)
6. 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)
7. 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