

용접변형 발생기구 및 해석

양 영 수

Generation Mechanism and Analysis of Welding Distortion

Young-Soo Yang

1. 서 론

용접공정은 국부적인 가열에 의해 두 물체를 접합하는 것이 일반적이다. 구조물에 국부적인 가열은 열응력을 발생시키고, 발생한 열응력은 열변형을 생성한다. 이러한 열변형이 용접공정이 완료된 후에 영구적으로 남아 있는 변형을 용접변형이라 한다. 용접공정을 이용한 강구조물 제작에서 발생한 용접변형은 구조물의 치수를 변화시키거나, 용접 후 조립공정을 어렵게 만들기 때문에 교정과 같은 생산공정을 추가로 필요로 하게 된다. 따라서 강구조물 제작 시 설계단계에서 용접변형을 최소화하기 위해서는 용접변형의 생성원리를 이해하고, 여러 종류의 용접변형에 대한 적절한 대책을 필요로 한다.

2. 용접변형 발생기구

용접변형 생성원리를 이해하기 위하여 Fig. 1과 같은 간단한 모델인 1차원 형상의 원형막대를 생각한다. Fig. 1(a)와 같이 원형막대를 구속하지 않고 자유상태에서 가열하면 막대는 열팽창에 의하여 길이가 늘어난 후, 냉각하면 수축하여 길이변화 없이 처음 상태로 되돌아온다. 가열 및 냉각상태에서 열응력 받지 않기 때문에 가열온도를 높이 올려도 냉각하면 언제나 처음 상태로 되돌아온다. Fig. 1(b)와 같이 양단에서 구속 후 가열하면 길이 변화는 없고, 열팽창에 상응하는 압축응력이 발생한다. 생성된 압축응력이 항복응력에 도달하지 않은 상태에서 냉각하면 막대는 수축하여 길이는 처음상태와 동일하게 된다. 즉, 가열

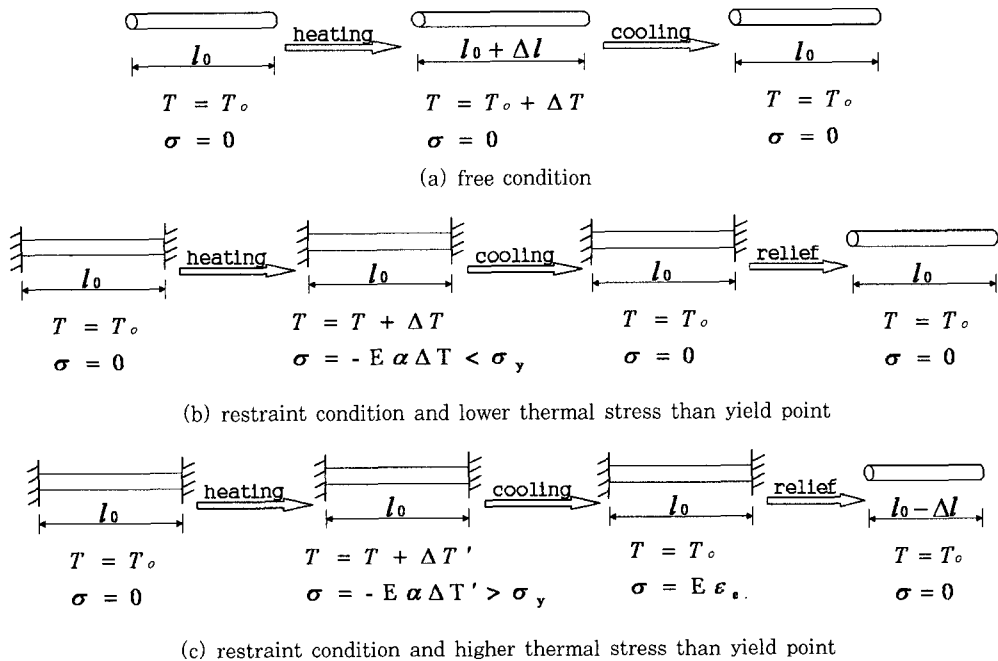


Fig. 1 Simple model for weld shrinkage

에 의해 열응력이 발생하더라도, 항복응력 이하의 열응력이 생성되면 자유상태와 동일하게 팽창, 수축 후 길이변화가 나타나지 않는다. 그런데 Fig. 1(c)와 같이 구속된 상태에서 가열하여 팽창에 의해 생성된 압축응력이 항복응력(σ_y) 이상이 되도록 가열하면, 소성변형이 발생한다. 소성변형 후 냉각하면 냉각에 의한 수축은 탄성적으로 진행되기 때문에, 온도는 처음 상태로 냉각되었으나 수축량은 팽창량 보다 크게 된다. 냉각완료 후 구속상태를 제거하면 처음길이보다 줄어든 현상이 나타난다. 막대의 길이가 초기 상태보다 감소하였지만, 막대 단면의 직경은 증가된 상태가 되어 초기상태와 부피는 동일하다. 이와 같이 구속된 상태에서 가열하여 팽창에 의해 생성된 열응력이 항복응력 이상이 될 때 처음길이보다 수축하는 현상이 용접 변형 발생의 근본 원인이다.

Fig. 2와 같이 용접현상은 일반적으로 큰 부재에 국부적으로 가열 후 냉각하는 현상이기 때문에, 가열 시 주변 부재는 온도가 상승하지 않아 국부적으로 가열된 부재를 구속하는 효과로 작용되어 열응력이 생성되고, 생성된 열응력은 항복응력 이상이 되어 수축 시 처음 크기보다 적어지는 현상이 나타난다. 용접부위는 Fig. 1(c)와 유사한 형태로 열이력을 받아 용접 변형 현상이 나타난다.

용접에 의한 열변형은 가열, 냉각 과정동안 복잡한 열응력 분포에 의해 복잡한 형태의 변형이 나타나지만, 우리의 주 관심인 최종 변형 상태는 가열부분(용접비드 부분)이 수축한다는 간단한 가정으로 구조물의 변형양상을 대략적으로 예측할 수 있다.

2.1 횡수축(transverse shrinkage)과 각변형(angular distortion)

횡수축은 Fig. 3과 같이 용접선에 직각(횡)방향의 수축량이다. 용접이 진행될 때 용접토치 앞부분과 용접이 완료되어 냉각이 이루어진 후미 부분에서 용접 토치의 가열부위를 횡방향으로 구속하기 때문에 Fig. 2의 모델과 같은 조건이 형성된다. 가열 시 생성된

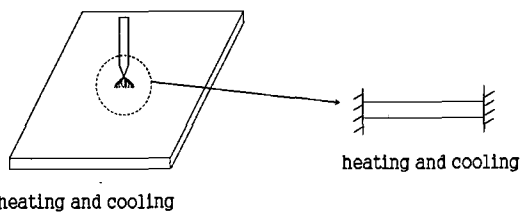


Fig. 2 Modelling for thermal distortion in welding process

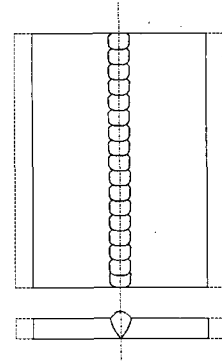


Fig. 3 Schematic diagram of transverse shrinkage

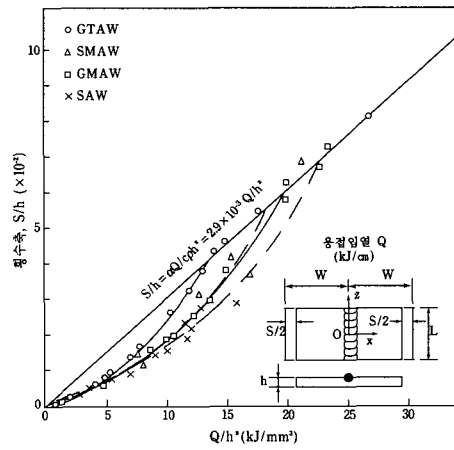


Fig. 4 Transverse shrinkage as function of heat input¹⁾

팽창 응력이 항복응력을 초과하여 냉각 후 최후에 횡 방향으로 수축이 일어난다. 횡수축은 용접선 주변의 수축에 의해 생성되기 때문에 수축량은 입열량에 의해 영향을 받는다. 입열량의 증가에 따라 수축량이 증가하는 양상이 Fig. 4에 나타나있다.

각변형은 횡수축과 동일한 방향의 수축에 의해 생성되나, 부재의 깊이에 따라 수축량이 다르기 때문에 생성된다. 부재 상단에서 하단부위보다 입열량이 많아 수축량이 상단에서 크고, 하단에서 적은량이 수축하면 Fig. 5와 같은 각변형이 발생한다. 즉, 각변형량은 부재 깊이 방향으로 온도분포의 변화량에 영향을 받는다. 만약 완전용입(full penetration)이 일어나 깊이 방향에 따라 온도분포의 변화가 없다면 각변형이

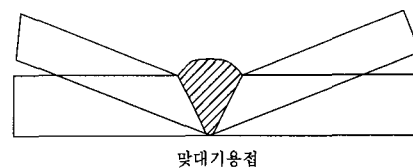


Fig. 5 Schematic diagram of angular distortion

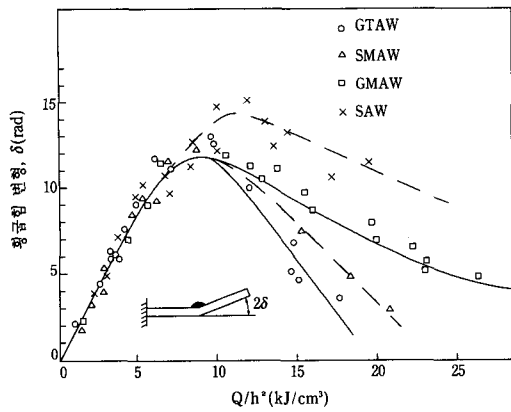


Fig. 6 Angular distortion as function of heat input¹⁾

일어나지 않는다. Fig. 6에서 입열량이 증가함에 따라 각변형량이 초기에는 증가하나 일정 입열량 이상이 되면 감소하는 현상이 나타나난다. 입열량이 과다하게 증가하면 각변형량이 감소하는 이유는 용입 깊이가 깊어져 완전용입 쪽으로 접근하기 때문이다.

입열량이 동일하고 부재의 두께가 증가하면 깊이방향의 온도분포의 변화량은 크게 되나, 깊이가 증가에 따라 하단 부위에서 각변형에 대한 저항이 증가하기 때문에 변형량이 감소할 수도 있다.

2.2 종수축(longitudinal shrinkage) 과 종굽힘(longitudinal distortion)

종수축은 Fig. 7과 같이 용접진행 방향으로 용접선 가열부위가 수축하는 현상이다. 용접토치가 이동할 때 용접선 가까운 부분은 가열될 때 팽창하고, 냉각 시 수축하게 되나, 용접선에서 횡방향으로 떨어져 있는 부분은 온도변화가 없어 열변형이 없기 때문에, 용접선 주변의 가열부분을 Fig. 2와 같이 구속하는 효과가 발생하여 종수축이 생성된다. 종방향은 구속도가 크기 때문에 많은 양의 잔류응력을 생성하고, 일반적으로 종수축량은 횡수축에 비하여 미미한 양이다.

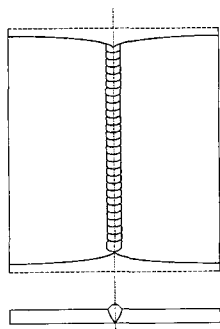


Fig. 7 Schematic diagram of longitudinal shrinkage

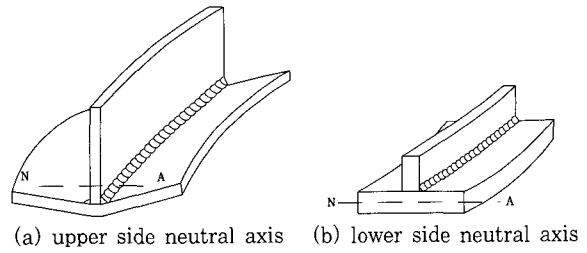


Fig. 8 Schematic diagram of longitudinal distortion and neutral axis compare with weld line

종방향 수축량은 미미하여 조립 등 추후 공정에 문제가 발생하지 않을 수 있으나, Fig. 8과 같이 종굽힘을 발생할 수 있다. 종수축이 중립축(N-A)으로부터 떨어져 있기 때문에 굽힘 모멘트가 작용하여 종굽힘이 발생한다. 그러므로 종굽힘의 방향은 Fig. 8(a)와 같이 중립축 위쪽에 있을 때와 Fig. 8(b)와 같이 중립축 아래 있을 때 굽힘이 다르게 나타난다. 종방향의 굽힘을 방지하기 위해서는 용접선과 중립축을 가깝게 유지해야한다.

2.3 회전변형(rotational distortion)

회전변형은 Fig. 9와 같이 용접되지 않은 맞대기 부분의 흠이 용접의 진행에 따라 닫히거나 열리는 현상이다. 회전변형은 용접속도에 의한 영향을 크게 받아 방향이 결정된다. 용접토치 주변은 가열되어 팽창 과정을 겪고 있기 때문에 용접이 진행되지 않은 흠 부분은 열리려고 하는 힘이 작용된다. 그러나 Fig. 9(a)와 같은 SMAW는 수동용접으로 저속이기 때문에, 용접토치를 중심으로 용접이 완료된 용접선(후미부분)에서의 온도변화는 가열 후 냉각이 상당히 진행되어 후미 용접선 대부분에서 수축과정이 일어난다. 즉, 용접토치 후미부분에서 발생한 수축력이 용접토치 주변에서 발생한 팽창력보다 크게 되면 흠 부분이 닫히게 되고, 용접토치 주변의 팽창력이 후미부분의 수축력보다 크게 되면 열리려고 한다. Fig. 9(b)와 같이 SAW에서는 용접속도가 빠르고 입열량이 많기 때문에 용접토치 후미부분에서 가열 후 냉각과정이 많이 진행되지 않아(고온상태 유지) 용접중에 수축력이

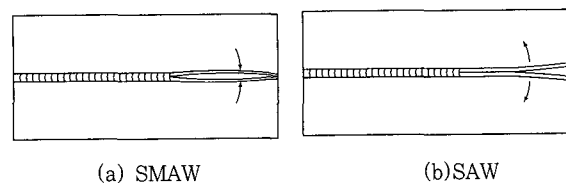


Fig. 9 Schematic diagram of rotational distortion

적게 작용하여 흠 부분이 열리고 있다.

3. 용접변형 해석

용접변형의 정성적인 분포를 이해하기 위하여 용접 변형 원리에 대하여 생각하였다. 그러나 산업체 및 실제응용을 위해서는 변형의 정량적인 분포를 알아야 한다. 용접변형의 정량적인 크기는 실구조물에 용접을 수행하여 변형을 측정하면 구할 수는 있으나 비용 및 시간에 문제가 있으며, 모든 경우의 수에 대하여 실험이 불가능하다. 이에 대한 대안으로 이론적으로 변형을 예측하는 많은 연구가 진행되고 있다.

용접변형을 해석하는 방법은 용접의 모든 과정을 수치적인 방법을 이용하여 해석하는 방법과 고유변형률 개념을 도입하여 이론 해석해를 구하는 방법이 있다. 또한 해석해와 수치해석을 적절히 조합하는 방법도 많이 사용되고 있다.

3.1 이론 해석해(analytical solution)

용접부위는 가열에 의한 팽창 및 냉각에 의한 수축 등 복잡한 변형이 이루어져 최후 상태에 잔류변형이 나타난다. 이론 해석해에서는 용접이 진행되는 동안 모든 이력을 생략하고 Fig. 1에서 생각하였던 단순모델을 이용하여 최후 수축량을 고려하여 해를 구한다. 일반적으로 용접부위의 수축을 고유변형률이라 하며, 대부분의 해석해는 고유변형률 개념과 고전탄성이론을 바탕으로 이론해석해를 구한다²⁻⁴⁾. Fig. 10과 같이 강판 용접 후 용접선 단면에서 일정영역(용융부, 열영향부 또는 소성변형영역)을 고유변형률 영역으로 정의하고, 이부분이 주어진 고유변형률 만큼 수축할 때 강판 전체의 변형분포를 계산한다. 그러나 고유변형률의 영역을 얼마나 크게 할 것인가? 고유변형률의 값을 어떻게 정의할 것인가? 등에 관한 연구가 되고 있으나 아직은 불완전한 상태이다.

이론해석해의 장점은 복잡한 계산과정을 거치지 않고 단순한 계산으로 변형량을 예측하고 설계에 적용이 가능하여 이용이 편리한 장점이 있다. 그러나 평판과 같은 단순부재에만 적용이 가능하여 복잡한 실구

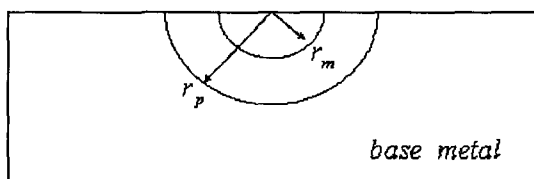


Fig. 10 Model of initial strain

조물에는 적용이 불가능하며, 탄성해석이 용접순서에 따른 변화를 고려할 수가 없고, 결과 수식유도 과정에 많은 가정이 포함되어 있기 때문에 실험과 잘 일치하지 않은 경향이 있다.

3.2 수치해석(numerical solution)

컴퓨터의 발달로 여러 분야에서 수치해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 유한요소법(FEM)을 이용한 적용사례에 관한 연구가 많이 발표되고 있다⁵⁻⁸⁾. 용접공정을 유한요소법을 이용하여 해석하기 위해서는 용접열원을 적절한 모델(일반적으로 heat flux model by Gaussian distribution 사용)로 가정하여 용접부재에 입열되면 열전달해석을 수행한다. 국부적인 가열에 의해 불균일한 온도분포가 형성되어 각 위치마다 열팽창량이 상이하여 열응력이 발생한다. 발생한 열응력은 항복응력을 초과하여 소성 변형을 하기 때문에 냉각 후 잔류응력 및 잔류변형이 남는다. 그러므로 수치해석을 위해서는 비선형 과도 열탄소성(nonlinear transient thermo elasto plastic) 해석을 수행해야 한다. 최근에는 유한요소상용 프로그램인 ABAQUS, MARC, SYSWELD 등은 용접공정 해석에 적절한 여러 가지 선택사항을 포함하여 공급하고 있다.

용접공정 모든 과정을 수치해석을 이용하여 해석하면 결과 값의 신뢰도가 양호하여 좋은 결과를 얻을 수 있다. 또한 탄소성 해석을 수행하기 때문에 용접순서의 변화에 따른 잔류변형을 얻을 수 있다. 그러나 용접공정의 큰 특징 중 하나로, 용접토치 주변에서 온도변화가 급격하여 열응력 및 열변형의 근본 원인은 가열부위이기 때문에, 정확한 계산을 위하여 요소분할에서 가열부위는 미세하게 요소를 분할해야 한다. 즉, 각 순간의 계산에서는 용접토치 주변만 미세한 요소가 필요하지만, 전체 요소분할에서는 모든 용접선을 따라 미세하게 요소분할을 해야 하기 때문에 요소의 수가 너무 많아진다. 또한 해석과정도 비선형 과도 열탄소성 해석을 해야 하기 때문에 계산시간이 과도하다. 유한요소법을 이용한 복잡한 실구조물해석은 컴퓨터 용량과 계산시간의 문제로 슈퍼컴퓨터를 사용하여도 유용한 해를 얻기가 불가능한 상황이다. 최근에는 요소의 종류를 Solid element 대신 shell element 등을 사용하는 방법으로 modelling을 단순화 하여 해석을 시도하고자 하는 연구가 진행되고 있기도 하다⁹⁾.

3.3 이론 해석해와 수치계산의 조합

이론 해석해는 고유변형률과 고전탄성이론을 적용

하여 용접변형을 예측하였으나 단순부재에만 적용이 가능하고, 수치해석을 이용한 용접공정 모든 과정을 비선형 과도 열탄소성 해석하는 것은 비효율적이기 때문에 두가지를 결합하는 방법이 사용되고 있다. 고유변형률 개념을 적용하여 용접부위가 수축되는 현상을 등가하중으로 환산하여, 유한요소법을 이용하여 구조물에 등가하중이 작용할 때 탄성해석을 수행하여 변형량을 예측하는 것이다¹⁰⁻¹⁴⁾. 본 해석법은 복잡한 형상의 실구조물의 해석이 가능하고, 유한요소 해석도 탄성으로 수행하며, 용접선 주변을 특별히 조밀하게 요소분할을 필요로 하지 않기 때문에 계산이 간단하다. 그러나 탄성해석이기 때문에 용접순서에 따른 변형량의 차이를 알 수가 없고, 고유변형률 결정과 등가하중 결정시에 많은 가정이 포함되기 때문에 해석결과를 신뢰하기가 어렵다고 판단된다.

4. 결 언

용접변형은 조선업계 등에서 중요문제로 등장하고 있으며, 지금까지는 용접변형 및 변형 후 교정 공정에 대한 체계적인 데이터가 정립되어 있지 않아 모든 경우를 임시방편적으로 대처하였다. 그러나 고부가 가치의 선박제작 및 후발 국가에 비하여 한발 앞서 나아가기 위해서는 체계적이고 지속적인 연구 및 관심이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Kunihiro Satoh and Toshio Terasaki, 1976, "Effect of welding conditions on welding deformations in welded structural materials", Journal of Japan Welding Society, 45-5, 302-308
2. Tsugio Fugimoto, 1970, "A method for analysis of residual welding stresses and deformation based on

- the inherent strain, Journal of Japan Welding Society, 39-4, 236-252
3. K.-J. Son, Y.-S. Yang and H.G. Beom, 2000, "Analysis of angular distortion in weldments using laminated plate theory", Science and Technology of Welding and Joining, Vol.5, No.4, pp.245-249
4. 손광재, 양영수, 장상균, 2003, "고유변형률의 개념을 이용한 열가공공정 시 판 변형 예측", 21-1, 54-59
5. S.B. Brawn and H. Song, 1992, "Implications of three-dimensional numerical simulations of welding of large structures", Welding Journal, 71-2, 55s-62s
6. P.Michaleris and A.Debiccari, 1997, "Prediction of welding distortion", Vol.76, No.4, pp.172s-181s
7. 정창두, 고대은, 문성춘, 서용록, 2001, "삼각가열에 의한 판 변형의 시뮬레이션", 대한조선학회논문집, 38-4 pp.66-74
8. 허주호, 김상일, 2003, "후판 구조의 각변형 예측 및 제어에 관한 연구", 대한용접학회지, 21-5, 518-524
9. 전유철, 한명수, 2005, "Shell 요소를 이용한 판넬 용접변형 해석모델 개발", 대한용접학회 2005년 춘계학술발표대회, pp.270-272
10. Jong Gye Shin and Amiram Moshaiov, 1991, "Modified strip model for analyzing the line heating method", Journal of Ship Research, 35-2 172-182
11. 서승일, 정창두, 1997, "용접구조물의 변형예측에 관한 연구", 대한용접학회, 15-5, 438-447
12. 정창두, 이창현, 2000, "선체블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구", 대한조선학회, 37-2, 127-136
13. 박정웅, 이재원, 이해우, 2002, "등가하중법을 이용한 강 구조물 용접변형 해석", 대한용접학회지, 20-3, 385-393
14. 하윤석, 정창두, 2004, "선상가열시 강의 상변태를 고려한 개선된 고유변형도 기반의 등가하중법", 대한조선학회지, 41-6, 65-74



- 양영수(梁永洙)
- 1963년생
- 전남대학교 기계공학과
- 용접구조물 해석, 레이저 재료가공
- e-mail:ysyang@chonnam.ac.kr