특 집 : 용접산업의 시뮬레이션기법 활용

용접 설계와 공정의 유한요소해석 연구 동향

이 장 현 · 김 성 찬

Finite Element Analysis of Welding - Literature Review

Jang-Hyun Lee and Sung-Chan Kim

1. 서 론

용접은 적절한 온도 제어를 통하여 재료를 접합하는 방법을 대상으로 한다. 산업 제품의 조립과 생산을 위하여 다양한 용접 방법이 사용되고 있으며, 열원의 종류에 따라 용접 방법을 분류하고 있다.

특히 아크 용접은 재료의 접합 가공에 사용할 수 있는 매우 효과적인 가공 방법으로서 비용과 생산성이 매우 뛰어나다. 그러나 용접은 고온의 열원을 사용하므로 그에 따른 피로 강도, 정적 강도, 균열 발생, 잔류 변형 등의 문제를 안고 있다. 따라서 용접 설계를 위해서는 용접 잔류 응력과 피로 강도, 그리고 강도 등을 평가하는 절차가 필요하다.

용접 현상은 열전달, 탄소성 변형, 야금학적 특성 등이 복합적으로 존재하는 비선형 문제로 정의될 수 있다. 이론적인 해를 구하기 어렵기 때문에 수치적인 접근 방법이 유용하며, 이를 위하여 지난 20여 년간 유한요소해석법에 기초한 수치적인 시뮬레이션 연구가 수행되어져 왔다[1]. 현재는 MSC.Marc, ANSYS, ABAQUS, SYSWeld와 같은 범용 유한요소해석 코드를 이용한 수치 시뮬레이션 기법이 일반화 되어 있다. 그러나 용접 현상에서 수반되는 재료의 특성, 열유체 특성, 모재의 형상 특성, 기계적인 특성 등 물리적 특성을 엄밀하게 반영하기 유한요소해석 모델은 지속적으로 연구되고 있다. 유한요소법을 이용한 용접 해석 연구의 동향은 아래와 같은 몇 개의 그룹으로 분류하여 파악할 수 있다.

- 용접 해석 및 시뮬레이션-전산용접
- 용융 풀의 대류를 고려한 유한요소 해석
- 용접 방법에 따른 유한요소 해석 모델
- 잔류 응력과 잔류 변형의 예측을 위한 해석
- 용접 구조물의 피로 강도 해석
- 판 구조물의 잔류 응력 해석

본 기사에서는 용접 설계 및 강도 평가를 위한 유한요소해석 연구 및 적용 사례를 위에서 제시한 그룹에 따라서 분류하고 동향을 요약하고자 한다.

2. 본 론

2.1 용접 해석 및 시뮬레이션-전산용접

용접 현상을 유한요소해석법을 이용하여 시뮬레이션하기 위해서는 용접의 물리적 특성을 고려할 수 있어야 한다. 용접의 물리적 특징을 반영한 유한요소해석 사례와 용접 열원의 수학적 모델은 Brown[2], Goldak[3] 이 각각 제안한 사례에서 찾아 볼 수 있다.

Table 1에 보인 것과 같이 재료의 상변태와 열탄소성 변형을 반영하기 위하여 thermo-visco-plasticity, thermo-elasto-plasticity, thermo-metallurgical 모델 등 재료 구성 방정식의 변화에 대한 연구가 진행되고 있다[4-5]. TMM 재료 모델을 적용한 사례 연구는 많으나, 상용 코드 중에 SYSWeld가 재료의 상변태 특성이 가능하다.

고상/액상 변화의 모델링은 일반적으로 엔탈피 방법을 이용하여 모델링한다. 그러나 이 방법은 열전달과 유동이 연성된 문제에는 적용하지 않는다.

$$H = \int \rho c_p(T) dT \tag{1}$$

Table 1 Simulation model for welding analysis

물리적 특성	유한요소해석 반영 모델
용융 pool의 액상 -고상 변화	재료의 잠열(Latent heat) 모델
용접 pool의 유동 해석	비드의 유동 및 전자기적 특성 모델
재료의 상변태	Thermo-metallurgical -mechanical(TMM) model
Filler metal의 생성	Element generation/kill 모델

대류와 복사에 의한 냉각조건은 엄밀한 수치 모델을 구하기는 어렵다. 일반적으로 아래와 같이 Goldak[6]이 언급한 대류 계수의 경험식을 사용하지만, 그 값의 차이가 잔류 응력의 크기를 크게 좌우 하지는 않는다.

$$h = 24.1 \times 10^{-4} \epsilon T^{1.61} (W/m^2 ℃) \quad (2)$$

여기서, h는 대류 계수를 의미하며 ϵ은 방사율(emissivity)를 의미한다.

용융 비드의 용입 현상은 용입되는 비드의 위치에 놓인 요소의 강성을 회복시키는 방법을 사용하고 있으며, ANSYS, ABAQUS, MSC.Marc가 채용하고 있다.

2.2 비드의 대류를 고려한 유한요소 해석

용융 비드에 의한 용접면의 형상 및 상변태를 추정하기 위하여 비드의 solid-fluid transition의 유동 해석에 대한 연구[7-10] 등이 있다. 그러나 현재로서는 열탄소성 구성 방정식을 채용한 재료 물성치 모델이 일반적으로 사용되고 있으며, 용융 비드의 유동 해석은 제한적인 범위에서 사용하고 있다. 용융 비드의 대류 해석은 1950년대[9]부터 시작되었다. 대류에 의한 비드의 형상 변화는 용접부의 기공, 초기 결함, 용융재 부족 등의 문제를 가져올 수 있기 때문에 대류 모델은 초기 결함 예측의 목적으로 적합하다. 용융 풀의 물리적 특성은 열 유동이므로, 질량 보존 방정식, 운동량 방정식과 에너지 방정식의 연성 문제로 정의할 수 있다[10]. 또한 용접 전류에 의해 발생하는 전자기력과 용융 풀의 표면 장력, 용융 비드의 온도 구배에 의한 부력 등을 고려하여야 한다.

(1) 질량 보존 방정식

비압축성 유체로 가정하면 아래와 같은 질량 보존 법칙을 만족해야만 한다.

$$\frac{1}{x}\frac{\partial(x\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

여기서, ρ 는 밀도, u, v은 각각 반경과 축 방향 속도를 말한다.

(2) 전자기 방정식

용접 풀은 전자기력의 영향을 받으므로 아래와 같은 전류 연속 방정식을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial r}(x\sigma\frac{\partial\phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma\frac{\partial\phi}{\partial z}) = 0 \quad (4)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{x}\int_0^x x j_z dx \quad (5)$$

σ는 electrical conductivity, ϕ는 electrical potential 이다. B_θ는 자기장의 세기, μ_0는 진공 상태의 투자율(permeability) j_x, j_z는 각 반지름 방향과 축방향의 전류 밀도를 말한다.

(3) 운동량 보존 방정식

용접 풀의 가스와 용융 금속은 다음과 같이 축 방향과 반지름 방향의 운동량 보전 방정식을 만족해야 한다.

$$\rho v\frac{\partial u}{\partial x} + \rho u\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + 2\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial r}\left(x\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left(x\mu\frac{\partial v}{\partial z}\right) + j_x B_\theta + \rho g \quad (6)$$

$$\rho v\frac{\partial v}{\partial x} + \rho u\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{2}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left(x\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x}\right) - 2\frac{v}{x^2}\right) - j_x B_\theta \quad (7)$$

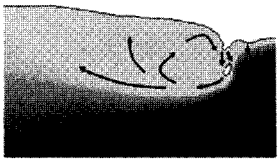
여기서 P는 압력, μ는 점성을 의미한다.

(4) 에너지 방정식

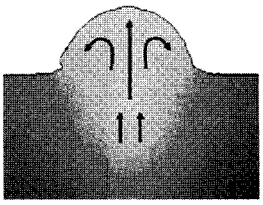
열 다음은 열확산 방정식이다.

$$\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p\left(v\frac{\partial T}{\partial x} + u\frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left(xk\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \Gamma_s \quad (8)$$

여기서, T는 온도, c_p는 비열, k는 열전도 계수, 그리고 Γ_s는 Joule 열과 아크에 의한 에너지 발생율을 의미한다. 다음의 Fig. 1은 용융 풀의 유동과 형상을 해석한 사례이다.



(a) Side view flow pattern



(b) Front view pattern

Fig. 1 레이져 용접에 의한 용융 풀 해석 사례[8]

2.3 용접 방법에 따른 유한요소 해석 모델

용접 방법은 열원의 종류, 보호 가스의 종류 등에 구별하고 있다. 유한요소법을 이용한 용접 시뮬레이션은 아래와 같은 용접 법에 적용되고 있다.

- GMAW(Gas metal Arc Welding)
- GTW (Gas Tungsten Welding)
- Resistance welding
- Spot welding
- Laser beam welding
- SMAW(Shield Metal Arc Welding)
- FSW(Friction Stir Welding)s
- SAW(Submerged Arc Welding)

현재까지는 GMAW, GTW, SMAW, FSW, Spot welding, SAW, 레이져 용접 등은 유한요소법에 의한 시뮬레이션 모델이 다수 개발되어 있으며, 적용한 사례를 쉽게 찾을 수 있다[11-13]. 아크 용접은 Goldak[6]이 제안한 열원의 수학적 모델을 변경함으로써 그 특성을 반영하고 있다. 아래의 식은 아크 열원의 특징을 나타내는 열 유속(q_0)의 방정식이 가장 기본적인 아크의 열원 모델이다.

$$q(r)=\frac{q_0}{2\pi\sigma^2}\exp^{\frac{-r^2}{2\sigma^2}} \qquad (9)$$

여기서 q_0 는 최대 열유속, σ는 분포 집중 계수이며, r은 아크 중심으로부터 거리를 의미한다. 그러나, σ를 구하기 위해서는 온도 계측 실험을 통하여 얻어야 하는 어려움은 있으나, 아크 용접의 특징을 가장 잘 나타내고 있는 것으로 알려져 있다. 향상된 모델로서 ellipsoid 분포를 가진 열 유속이 사용되기도 한다.

한편, EGW(Electro Gas Welding)[12], FCAW (Flux Core Arc Welding)등은 적절한 열원 모델을 찾기 어렵기 때문에 시뮬레이션을 통한 연구 사례는 많지 않다. 상용 코드에서 열원을 모델링하는 방법은 두 가지로 나눌 수 있다.

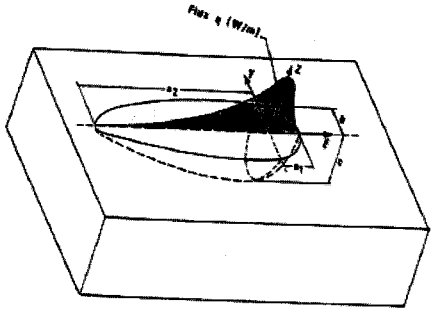


Fig. 2 Goldak의 아크 용접 열원 모델[6]

- MSC.Marc, ABAQUS: Goldak[6]이 제시한 아크 열원의 수학적 모델을 직접 제공하여 계수 값만을 지정하여 열원 모델이 가능하다. 또한 용접선과 비드의 지정이 가능하며, 사용자 함수를 이용하여 열원의 수학적 모델을 추가로 지정할 수 있다.
- ANSYS: 아크 열원의 모델을 직접 사용자가 열유속 경계 조건으로 모델링하여야 하며, 용접 비드의 생성도 직접 지정하여야 한다.

Laser 용접에 의한 시뮬레이션 모델은 안정화된 연구 결과를 제시하고 있다. 다층 용접의 잔류 응력 해석은 많은 전산기 용량을 필요로 하고 있기 때문에 현재는 3차원 모델에는 많이 적용되고 있지 않으나, 2차원 모델을 이용한 적용 사례는 활발하게 이루어지고 있는 편이다[13-15].

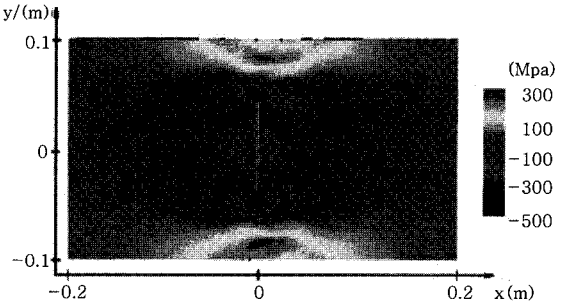


Fig. 3 다층 용접의 잔류 응력 해석[13]

2.4 용접 잔류 응력 및 변형 해석

용접 과정에서 발생하는 높은 온도 분포가 국부적인 열응력을 발생시키며, 변형을 일으킨다. 잔류 응력은 균열과 결함의 원인이 될 뿐만 아니라 피로 수명과 강도의 감소를 가져온다. 잔류 응력의 예측과 예열에 의한 잔류응력 감소 등에 대한 연구를 찾아 볼 수 있다[14-18].

2.5 용접구조물의 피로 강도 해석

용접부의 피로 강도 해석은 toe부의 응력 집중에 의한 피로 균열의 진전, 피로 균열 발생, 피로 강도 예측, 용접 순서에 따른 피로 강도 평가 등에 대한 연구가 진행되고 있다. 실용적으로는 용접부의 잔류 응력이 피로 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 핫 스팟 응력

(hot spot stress)이 주로 사용되고 있다. 점 용접, 맞대기 용접, 겹치기 용접, T-연결 등 연결 방법에 따라 잔류 응력이 피로 강도에 영향을 연구 되고 있으나 실용적인 결과를 얻기 위해서는 많은 실험이 요구되고 잇다. 상자 형상의 구조물, 압력 용기, 자동차, 그리고 선박 등의 구조물에 대한 연구가 수행되고 있다[18-25].

2.6 판 구조물의 잔류 응력 해석

T-joint 구조물로서 판-보강재 구조물, 박판 조립 구조, 보와 column의 연결, 선박 구조물의 잔류 응력 해석 연구 등이 진행되고 있다[26-27]. 그러나 판 구조물의 용접선의 길이는 3차원 열탄소성 유한요소 해석을 적용하기에는 많은 전산 용량과 시간을 필요로 하기 때문에 응력 해석의 간력화 연구를 수행하는 단계에 있다고 판단된다.

3. 맺 음 말

본 기사에서는 용접 설계 및 공정을 위한 유한요소해석의 적용에 대해 요약하였다. 용접의 유한요소해석은 용접 풀의 형상 예측, TMM 모델, 그리고 대형 복합 구조물의 잔류 응력 및 변형 해석으로 확대되며, 각 용접법의 해석 모델이 개발될 것으로 기대된다.

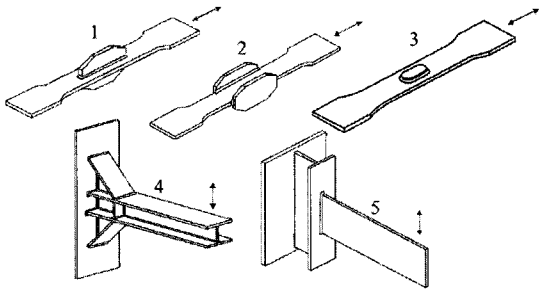


Fig. 4 피로 강도 평가에 사용된 모델 예[25]

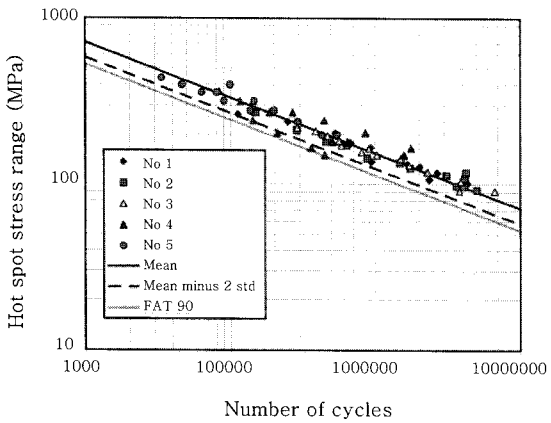


Fig. 5 Hot-Spot stress S-N data 예[25]

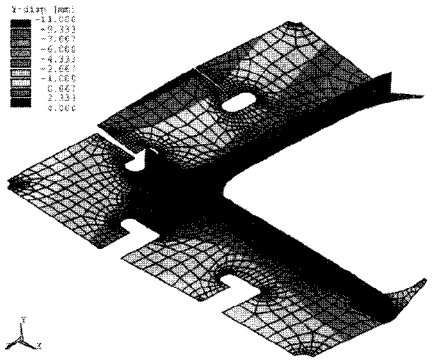


Fig. 6 용접 순서가 잔류 변형에 미치는 영향 예[27]

참 고 문 헌

1. K.H. Choi, S.E. Im: Recent Trends of Computational Welding Mechanics, Journal of KWS, **25-5** (2007), 1-3 (in Korean)
2. S.B. Brown and H. Song: Finite element simulation of welding of large structures, Journal of Engineering for Industry **114** (1992), 441 - 451
3. J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby: A new finite element. model for welding heat sources, Metallurgical Transactions, B15B(2) (1984), 299-305
4. L.E. Lindgren: Finite element modeling and simulation of welding. Part II: improved material modeling, Journal of Thermal Stress, **24** (2001), 195-231
5. J. Ronda and G. J. Oliver: Consistent thermo-mechano-metallurgical model of welded steel with unified approach to derivation of phase evolution laws and transform-inducted plasticity Computational Methods in Applied Mechanical Engineering, **189** (2000), 361-417
6. J. Goldak, M. Bibby, J. Moore, R. House, B. Patel: Computer modeling of heat flow in welds, Metallurgical and Materials Transactions B, **17B** (1986), 587-600
7. M.H. Davies, M.A. Wahab, and M. J. Painter: Investigation of the interaction of a molten droplet with a liquid weld pool surface- a computational and experimental approach, Welding Journal, Research Supplement, (2000), 18-23
8. J.H. Jo, S.J. Na,: Three-dimensional molten pool analysis of GMA-laser hybrid welding, Transaction of KWS, **48** (2007), 184-186 (in Korean)
9. P.T. Houldcroft: Dilution and uniformity in aluminium alloy weld beads, British Weld Journal **1** (1954), 468
10. F. Lu, S. Yaoa, S. Lou and Y. Li: Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool, Computational Materials Science, **29-3**(2004), 371-378
11. S.W. Wen, P. Hilton, D.C.J. Farrugia: Finite element modelling of a submerged arc welding process, Journal of Material Processing Technology, **119-1** (2001), 203-209

12. K. Sasaki, K. Suda, R. Motomatsu, Y. Hashiba , S. Okita, S. Imai: Development of Two-electrode Electro-gas Arc Welding Process, Nippon Steel Technical Report, **90** (2004), 67-74
13. L.E. Lindgren, H. Runnemalm, M. O. Näsström: Simulation of multipass welding of a thick plate, International Journal for Numerical Methods in Engineering, **44-9** (1999), 1301-1316
14. K.Y. Bae, S.J. Na and D.H. Park: A study of mechanical stress relief treatment of residual stresses for one-pass submerged arc welding of V-grooved mild steel plate, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B **208** (1994), 217-227
15. P. Dong et al: Residual stress analysis of a multi-pass girth weld ASME/JSME Joint Press. Vess. Piping Conf. PVP **373** (1998), 421-431
16. Y.C. Hou et al: Effects of residual stresses on fracture of welded pipes, ASME Press. Vess. Piping Conf. PVP **327** (1996), 67-75
17. S. Nair., E. Panm, and R.C. Dix: Residual stress generation and relaxation in butt-welded pipes, J. Press. Vess. Tech., **104** (1982), 188-192
18. K. Nakacho and Y. Ueda: An efficient method for estimation of reduction of welding residual stresses from stress-relief annealing Rep II , Trans. JWRI **23** (1994), 79-84
19. B. Atzori and G. Meneghetti: Fatigue strength of fillet welded structural steels: finite elements strain gauges and reality, Int. J. Fatigue **23** (2001), 713-721
20. C. Bayley, G. Glinka, J. Porter: Fatigue crack initiation and growth in A517 submerged arc welds under variable amplitude loading, Int. J. Fatigue **22** (2000), 799-808
21. P. Dong: A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints Int. J. Fatigue **23** (2001), 865-876
22. P. Salvini, E. Scardecchia and G. Demofonti: A procedure for fatigue life prediction of spot welded joints, Fatigue Fract Eng Mater **20** (1997), 1117-1128.
23. Y. Tomita et al. : Study on fatigue strength of boxing fillet weldments (2nd Rep) 6th Int. Offshore Polar Eng. Conf. (Los Angeles) **4** (1996), 199-204
24. 석창성, 김대진, 구재민, 서정원, 구병춘, Hot - spot 응력을 이용한 십자형 필렛 용접재의 피로강도 평가, 대한기계학회 논문집, **제29권 제11호** (2005), 1488 ~ 1493
25. I. Lotsberg and G. Sigurdsson: Hot Spot Stress S-N Curve for Fatigaue Analysis of Plated Structures, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, **128-4** (2006), 330-336
26. Y. Shi et al. :Studies on a computational model and the stress field characteristics of weld-bonded joints for a car body steel sheet J. Mater. Process. Technol. **100** (2000) 171.8
27. L.E. Lindgren: Numerical modelling of welding, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. **195** (2006), 6710-6736

• 이장현(李長鉉)
• 1969년생
• 인하대학교 기계공학부 선박해양공학전공
• 다층 용접 및 plasma 절단, PLM
• e-mail: jh_lee@inha.ac.kr

• 김성찬(金成燦)
• 1963년생
• 인하공업전문대학 선박해양시스템과
• 피로 파괴, 피로 균열 예지, 해양구조물
• e-mail: schankim@inhatc.ac.kr