마찰교반용접 전산모사를 이용한 강도, 집합조직변화 고찰

조재형 · 이창길 · 송상우 · 강정윤

Modeling Strength and Texture Evolution During Friction Stir Welding

JaeHyung Cho, Chang Gil Lee, Sang Woo Song and Chung Yun Kang

1. 서 론

현재 마찰교반용접이 가장 많이 응용이 되는 소재는 알루미늄합금계열¹⁻⁵⁾이며, 마그네슘⁶⁻⁹⁾, 스틸¹⁰⁻¹²⁾, 및 타이타늄합금^{13,14)} 등에도 그 응용범위가 확장되어 있다. 공정조건과 튜의 형상에 따른 미세조직과 기계적 성질 변화에 대한 연구가 많은 관심을 끌고 있으며¹⁵⁾, 여기에 덧붙여, 모델링을 통해서 복잡한 공정에 대한 이해를 높이고자 하는 노력도 함께 병행되어 왔다¹⁶⁻¹⁹⁾.

2차원 혹은 3차원 Eulerian formulation을 기반으로 정상 상태의 공정조건을 가정하고, 열전달과 상태함수(state variable)를 고려하여 마찰교반용접 시, 발생하는 재료의 유동(metal flow)과 열전달(heat transfer), 강도 변화(strength) 및 집합조직(texture) 변화 등을 예측할 수 있다. 본 논문은 알루미늄과 스테인레스강의 마찰교반용접 공정 모델링과 미세조직에 대한 기존 연구내용들을 정리한 것이다²⁰⁻²⁵⁾. 특히 상태함수의 도입과 결정소성학 등을 이용한 집합조직 고찰 등은 기존의 마찰교반용접 공정 모델링에서 잘 다루지 않는 분야로 공정 전후의 기계적 거동예측에 중요한 자료로 이용될 수 있다.

연속체 역학을 기반으로 Lagrangian formulation을 이용한 유한요소법의 경우 대변형 문제를 해결하는데 일정부분 제약이 있어서, 마찰교반용접 모델링에 직접 적용하는 것은 한계가 있으며, 대안으로 최근에는 ALE(Alternative Lagrangian-Eulerian) 등을 이용하거나, 많은 경우 Eulerian formulation에 기반하여 마찰교반용접 모델링을 진행하고 있다. 2차원 공정 모델링을 통해서 열전달과 재료유동을 거시적으로 확인할 수 있으며, 보다 복잡한 재료유동과 열발생 및 기계적 물성 등을 확인하기 위해서는 3차원 모델링이 필요하다.

공정모델링을 진행하기 위해서 필요한 지배방정식(governing eq.)과 경계조건, 그리고 재료의 구성방정식 및 도메인 모델링(discretization or meshing) 등

에 대해서 간략히 제시하고 마지막으로 실제로 마찰교반용접을 진행한 후의 결과들을 소개하도록 하겠다.

2. 지배방정식(Governing equation)

소성변형 시 운동과 열전달은 질량보존, 선형운동 및 에너지 보존 법칙 등을 만족한다.

conservation of mass:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

balance of linear momentum

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma}^T + \mathbf{b} = 0 \quad (2)$$

conservation of energy

$$\rho \frac{De}{Dt} + \operatorname{div} \mathbf{q} - \dot{Q} = 0 \quad (3)$$

위의 식에서 ρ , $\mathbf{u}$, $\boldsymbol{\sigma}$, $\mathbf{b}$, e , $\mathbf{q}$, 그리고 $\dot{Q}$ 등은 각각 밀도, 물체의 속도, Cauchy stress, body force, 내부 에너지, heat flux, 그리고 체적당 열발생 등이다. 선형운동방정식에서 관성은 무시하고 에너지 보존법칙에서 열분산을 고려할 수 있다. 운동과 열전달 방정식을 풀기 위해서 필요한 경계조건은 다음과 같이 정의될 수 있다. 우선 운동경계조건은 모델 도메인의 표면에 힘(traction)이나 혹은 속도(velocity)를 가해준다고 가정해야 한다.

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\eta} = \bar{\mathbf{T}} \text{ on } S_T \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \text{ on } S_u \quad (5)$$

위의 식에서 $\boldsymbol{\eta}$, $\bar{\mathbf{T}}$, 그리고 $\bar{\mathbf{u}}$ 는 각각 표면 법선벡터, 힘벡터, 그리고 속도벡터 등이다. S_T 와 S_u 는 전체 표면적에서 힘벡터(traction)와 속도장(velocity field)이 주어진 부분을 의미한다. 물체와 물체가 접촉하는 부분

은 마찰이 존재하게 되며, 여러 가지 마찰조건을 부여할 수 있다. 가령 sliding friction의 조건인 경우, 두 물체의 속도차이가 힘벡터에 비례한다고 가정한다.

$$\overline{T}_t = \beta(\mathbf{u}_{\text{tool}} - \mathbf{u})_t \quad (6)$$

β 는 마찰계수에 해당하며, 아랫첨자의 t 는 표면Traction의 접선방향(tangential direction)을 의미한다.

열전달의 경우, 물체의 표면에 heat flux나 온도가 주어져야 한다.

$$k \text{ grad } \theta \cdot \boldsymbol{\eta} = \bar{q} \text{ on } S_q \quad (7)$$

$$\theta = \bar{\theta} \text{ on } S_\theta \quad (8)$$

두 종류의 물체가 만나는 부위에서의 열전달은 열전달 계수가 정의되어야 한다.

$$\bar{q} = h(\theta - \theta_\infty) \quad (9)$$

그 외에 초기 조건으로 고려하는 공정 도메인의 온도 혹은 강도 등을 고려할 수 있다.

3. 구성방정식 (constitutive equations)

운동과 열전달을 고려할 때 경계조건으로 힘/속도 혹은 열유동/온도 등을 정해주고 고려하는 재료의 열기계적 반응특성 즉, 재료모델, 혹은 구성방정식도 함께 정해주어야 한다.

재료의 구성방정식은 재료의 열기계적 특성을 잘 반영하도록 만들어져야 한다. 재료의 열적 특성은 재료 내부의 에너지(e)와 열유동이 변형과, 온도 및 재료 고유의 상태함수와 관계를 가진다고 생각할 수 있다.

$$\frac{D}{Dt}(e) = c_p \frac{D}{Dt}(\theta); \mathbf{q} = -k \text{ grad } \theta \quad (10)$$

c_p, k 는 각각 비열(specific heat)과 열전도(thermal conductivity)이다.

재료의 기계적 거동에 대한 수학적 표현은 열적 특성보다 복잡한 양상을 나타낸다. 본 연구에서는 Hart에 의해서 제안된 점소성 모델을 변형하여 재료강도변화를 예측할 수 있도록 하였다. 재료 강도에 영향을 미치는 인자는 열과 기계적 변형 두 가지 요소를 모두 포함하며, 유체처럼 거동하는 측면을 고려하는 점성과 고체처럼 거동하는 소성의 측면을 모두 고려하였다. 다음 유동응력은 소성과 점성에 의해서 결정이 됨을 보여준다.

Table 1 Material parameters for the simplified Hart's model for 304 stainless steel

$a_0(\text{s}^{-1})$	$b_0(\text{s}^{-1})$	G (GPa)	K_0 (MPa)	Q (kcal/mol)
1.36×10^{35}	8.03×10^{26}	73.1	150.0	98
Q' (kcal/mol)	λ	M	N	
98	0.15	7.8	5.0	

$$\bar{\sigma} = \tau = \tau^P + \tau^V \quad (11)$$

$\bar{\sigma}, \tau^P, \tau^V$ 는 각각 유효 Cauchy stress, 소성기여분과 점성 기여분을 나타낸다. 각각의 소성과 점성 유동응력은 온도와 변형속도, 그리고 재료의 강도 등과 관계가 있다.

$$\tau^P = G \left(\frac{\bar{D}}{a} \right)^{\frac{1}{M}}, \quad a = a_0 \left(-\frac{Q'}{R\theta} \right) \quad (12)$$

$$\tau^V = \kappa \exp \left[-\left(\frac{b}{\bar{D}} \right)^\lambda \right], \quad b = b_0 \left(\frac{\kappa}{G} \right)^N \exp \left(-\frac{Q}{R\theta} \right) \quad (13)$$

유동응력에 기여하는 두 개의 항목에서 점성에 의한 τ^V 는 낮은 온도나 혹은 아주 큰 변형속도에서 τ^P 보다 커질 수 있는데 이것은 유체의 거동과 유사함을 알 수 있다. 모델에 사용하는 인자는 다음 테이블에 정리하였다. 여러 가지 온도와 변형속도에서 SUS304소재와 AA6061소재가 가지는 유동곡선의 특성을 가장 잘 반영하도록 모델인자가 결정되어야 한다. 특히 AA6061소재의 경우 열처리형 합금으로 온도가 높아지면 석출물들이 용해되면서 재료의 유동응력이 급격하게 감소한다. 따라서 온도 변화에 따른 유동응력 변화가 매우 급격하게 일어나기 때문에 이러한 효과를 반영하기 위해서 일부의 모델인자를 온도의 함수로 사용할 필요가 있다.

Hart model에서 강도의 변화는 변형속도에 비례한다. 마찰교반용접은 변형속도가 매우 크므로 재료강도(κ)의 크기를 일정 이상 커지지 않도록 제어할 필요가

Table 2 Material parameters for the simplified Hart's model for AA6061

$a_0(\text{s}^{-1})$	$b_0(\text{s}^{-1})$	G (GPa)	K_0 (MPa)	Q (kcal/mol)
1.30×10^{45}	1.03×10^{23}	70.0	100.0	37.5
Q' (kcal/mol)	λ	M	N	
37.5	0.15	7.8	5.0	

있다. Voce-like saturation limit 접근법은 이러한 조건에서 유용한 방법이다.

$$\kappa^{sat} = \left(\frac{C}{\phi}\right)^{m_0}, \quad \phi = \theta \ln\left(\frac{D_0}{D}\right) \quad (14)$$

$$\frac{D}{Dt}(\kappa) = h_0 \left(1 - \frac{\kappa}{\kappa^{sat}}\right)^{n_0} \bar{D} \quad (15)$$

그림 1은 SUS304소재의 재료변수를 결정하기 위해서 Fisher factor, ϕ 와 응력의 선형관계를 이용한 것이다.

앞서 지적했듯이 AA6061소재는 온도에 따른 재료강도의 변화가 크기 때문에 일정하게 주어진 온도, 473K, 573K, 673K and 773K에서 Fisher factor와 재료강도의 선형관계를 만족한다 (그림 2). 그림 3은 온도의 2차 함수 형태로 주어진 $m_0(T)$ 와 $C(T)$ 를 나타내었다.

그림 4는 온도변화에 따른 $m_0(T)$ 와 $C(T)$ 의 변화를 고려한 flow stress이다. 373K, 573K, 773K의 세 온도에 대해서 여러 가지 변형속도가 주어지는 경우의 유동응력 변화를 계산하였다.

그림 1 SUS304소재 (a) Fisher factor와 재료강도의 선형관계 (b) 온도와 변형에 따라 flow stress

그림 2 AA6061소재, 온도에 따른 Fisher factor와 재료강도의 선형관계(473K, 573K, 673K and 773K)

그림 3 온도의 함수로 주어진 $m_0(T)$ 와 $C(T)$

Table 3 Material parameters for the strength evolution for 304 stainless steel

h_0 (GPa)	n_0	D_0 (s ⁻¹)	K_{SS} (MPa)
100	6	1.0×10^8	200
m_0	C (MPa)		
2.148(constant)	132(constant)		

Table 4 Material parameters for the strength evolution for AA6061. Note that θ is temperature, and both m_0 and C are dependent on temperature, θ

h_0 (GPa)	n_0	D_0 (s ⁻¹)	K_{SS} (MPa)
5	9	1.0×10^{10}	50
m_0	C (MPa)		
$2.84 - 0.015 \times \theta + 2.14 \times \theta^2$	$180 - 0.42 \times \theta + 2.66 \times \theta^2$

그림 4 AA6061소재의 여러 가지 온도와 변형속도에 따른 유동응력 변화

4. 결과 고찰

마찰교반용접공정을 모델링하기 위한 도메인을 그림 5에 표현하였다. 2차원 모델링의 경우 6노드 triangle

그림 5 모델 도메인과 경계조건

요소를 사용하였고, 3차원 모델링의 경우 20노드의 brick 요소를 사용해서 계산할 수 있다. 툴의 이동속도와 회전속도가 함께 더해지는 구간을 advancing side(AS)라고 하고, 툴의 이동속도와 회전속도가 반대가 되는 구간을 retreating side(RS)라 할 수 있다. 그림에서 welding direction(WD)과 AS가 표시되어 있다. bottom면은 RS에 해당한다. 2차원 모델에서는 툴 핀부분만 고려 되며, 툴 솔더는 고려되지 않는다. 3차원 모델의 경우 툴 솔더가 함께 고려되며, 두께 방향으로의 재료유동을 예측할 수 있다. 경계조건을 보면, 모델링이 되며, 판재의 입구쪽에 속도 조건을 주었고, 판재의 옆면으로는 단열조건을 주었다.

그림 6은 2차원 모델링의 결과이며, 재료의 이동을 나타내는 streamline 분포도이다. AS쪽에서 재료의 급격한 속도 및 방향 변화가 일어남을 알 수 있다. 또한 RS 방향에서 가장 밀집된 streamline 분포를 볼 수 있다. 전체적으로는 툴핀에 근접해서 밀집된 재료유동을 볼 수 있다.

그림 6 2차원 모델링 시 재료유동을 나타낸 streamline 분포도 (SUS304)

그림 7 3차원 모델링 시 여러 가지 pin thread 각도에 따른 재료 유동을 나타낸 그림 (SUS304)

다음 그림 7은 3차원 모델링이며, 툴솔더는 고려하지 않고 순수하게 툴핀의 효과만을 가지고, 재료의 유동을 고려한 것이다. 핀의 나선 각도가 0도인 경우는 2차원 모델과 동일하다고 생각할 수 있으며, 각도가 조금씩 커짐에 따라서 두께방향으로 재료의 섞임이 발생함을 알 수 있다. 판재의 윗 면에 있던 재료가 판재의 아래쪽으로 내려가 축적이 됨을 알 수 있다.

툴 핀 이외에 툴 솔더까지 고려하면 열발생이 더욱 커지게 되고, 재료의 유동도 더욱 복잡해진다. 핀의 나선 각도가 0인 경우 윗면에서부터 아랫면으로 재료의 섞임을 보이지 않고 재료의 유동이 점차로 감소하는 형태를 보인다. 15도의 각을 준 경우 툴 솔더 바로 아래에 있던 재료들 까지 툴 핀의 회전을 따라서 판재의 아랫면까지 이동함을 알 수 있다. 툴 솔더와 붙어 있는 부분들은 회전에 의해서 상하 운동 없이 바로 접합면 뒤로 이동한다. 특정한 streamline들은 툴 핀을 수 차례 나선 운동을 한 후 용접후면으로 이동한다.

그림 8 툴 핀과 솔더를 함께 고려한 재료유동 (SUS304)

그림 9는 2차원 모델의 결과로서 온도와 재료강도의 분포를 나타낸 것이다. 용접부위 뒷 면으로 해석의 꼬리처럼 온도분포가 길고 좁게 나타난다. 가장 높은 온도는 AS쪽에서 발견된다. 또한 재료강도의 경우 온도 분포와는 약간 상반된 분포를 나타내는데, RS쪽에서 최대값을 보이며, AS쪽에서는 그 보다 낮은 값을 보인다. 전체적으로는 용접부위가 용접이 없는 모재보다 강도가 증가한다. 다음 그림 10은 실험적으로 측정된 SUS304소재의 경도 분포이다. 모재보다 용접부위의 경도값이 증가했음을 알 수 있다.

그림 11은 AA6061소재의 여러 가지 톨 회전 속도

그림 9 2차원 모델에서 온도와 재료상태함수 (재료강도)의 변화 (SUS304)

그림 10 SUS304의 경도분포 측정값

그림 11 여러 가지 톨 핀 회전 속도에 따른 온도 분포 (AA6061)

그림 12 경도분포와 강도 예측값 비교 (AA6061)

에 따른 온도 분포이다. 위의 그림 9번에서 보면 용접면을 따라서 온도가 비교적 넓게 퍼져 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 소재의 열전달 계수와 비교적 밀접하게 연관이 되어 있는데, 알루미늄은 SUS304에 비해 매우 우수한 열전달 계수를 가진다. 참고로 열전달을 결정하는 항목은 재료를 통해서 전달되는 conduction 항목과 재료의 이동을 따라서 전달되는 convection 항목으로 구성이 된다. 빠른 재료 유동은 상대적으로 convection에 의한 열전달이 빠르게 일어나므로 온도가 낮게 평가된다.

상태함수인 재료강도 값은 경도값을 이용하여 추정할 수 있으며, 실험된 경도값은 용접 부위에서 크게 감소한 형태를 띄고 있다. 예측한 재료 강도값 또한 모재에 비해서 크게 감소한 형태를 띄고 있다. 이것은 석출경화형 소재가 높은 온도에 의해서 연화가 일어나고 있음을 의미한다.

참 고 문 헌

1. M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P.J. Withers: Acta Materialia, **51** (2003), 4791-4801
2. K. Elangovan, V. Balasubramanian: Materials Characterization, **59** (2008), 1168-1177
3. A. Simar, Y. Bréchet, B. de Meester, A. Denquin, T. Pardoen: Materials Science and Engineering: A, **486** (2008), 85-95
4. Christian B. Fuller, Murray W. Mahoney, Mike Calabrese, Leanna Micon: Materials Science and Engineering: A, **527** (2010), 2233-2240
5. Yan-hua Zhao, San-bao Lin, Lin Wu, Fu-xing Qu: Materials Letters, **59** (2005) 2948-2952
6. S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao: Materials Science and Engineering A, **527** (2010), 6064-6075
7. H. Zhang, S.B. Lin, L. Wu, J.C. Feng, Sh.L. Ma: Materials and Design, **27** (2006), 805-809
8. N. Afrin, D.L. Chen, X. Cao, M. Jahazi: Materials Science and Engineering: A, **472** (2008) 179-186
9. B.M. Darras, M.K. Khraisheh, F.K. Abu-Farha, M.A. Omar: Journal of Materials Processing Technology,

- 191 (2007) 77-81
10. A.P Reynolds, Wei Tang, T Gnaupel-Herold, H Prask: Scripta Materialia, **48** (2003), 1289-1294
 11. Yasuyuki Miyano, Hidetoshi Fujii, Yufeng Sun, Yasuyuki Katada, Shuji Kuroda, Osamu Kamiya: Materials Science and Engineering: A, **528** (2011), 2917-2921
 12. Hoon-Hwe Cho, Heung Nam Han, Sung-Tae Hong, Jong-Hwan Park, Yong-Jai Kwon, Seok-Hyun Kim, Russell J. Steel: Materials Science and Engineering: A, **528** (2011), 2889-2894
 13. R.W. Fonda, K.E. Knippling: Acta Materialia, **58** (2010), 6452-6463
 14. L. Zhou, H.J. Liu, P. Liu, Q.W. Liu: Scripta Materialia, **61** (2009), 596-599
 15. R.S. Mishra, Z.Y. Ma: Materials Science and Engineering: R: Reports, **50** (2005) 1-78
 16. X.K Zhu, Y.J Chao: Journal of Materials Processing Technology, **146** (2004), 263-272
 17. H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel: Acta Materialia, **54** (2006), 1199-1209
 18. H.W. Zhang, Z. Zhang, J.T. Chen: Journal of Materials Processing Technology, **183** (2007) 62-70
 19. R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia: Progress in Materials Science, **53** (2008), 980-1023
 20. Jae-Hyung Cho, Donald E. Boyce, Paul R. Dawson: Materials Science and Engineering A **398** (2005), 146 - 163
 21. Jae-Hyung Cho and Paul R. Dawson: Metallurgical and Materials Transactions A, **37**(2006). 1147-1164
 22. J-H Cho, D E Boyce and P R Dawson: Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. **15** (2007) 469 - 486
 23. Jae-Hyung Cho, Paul R. Dawson: Modeling Journal of Engineering Materials and Technology **130** (2008), 011007-1
 24. J.-H. Cho, S. H. Kang, H. N. Han, and K. H. Oh: METALS AND MATERIALS International, **14** (2008), 247~258
 25. S. H. Kang, J.-H. Cho, C. G. Lee, S. J. Kim, K. H. Oh and H. N. Han: Journal of KWJS, **28** (2010), 512-519 (in Korean)
 26. E. Hart, J. Eng. Mater. Technol. **98** (1976) 193 - 202

- 조재형
- 1970년생
- 한국기계연구원 부설 재료연구소
- 구조재료연구본부
- e-mail : jhcho@kims.re.kr

- 송상우
- 1973년생
- 한국기계연구원 부설 재료연구소
- 마찰교반접합, 용접기술기준
- e-mail : swsong@kims.re.kr

- 이창길
- 1963년생
- 한국기계연구원 부설 재료연구소
- 철강재료, 고상접합
- e-mail : cglee@kims.re.kr

- 강정윤
- 1953년생
- 부산대학교 재료공학부
- 마찰교반접합, 브레이징, 용접야금
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr