

불수강 316L겉면에 대한 레이자미크로연마과정의 동적모의분석

장봉렬, 지금혁

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학연구사업을 더욱 강화하여 세포공학과 유전자공학, 초고압물리학, 극저온물리학을 발전시키며 레이자와 플라즈마기술, 원자에너지와 태양에너지를 개발하여 인민경제에 받아들이는데서 나서는 과학기술적문제를 적극 풀어나가야 하겠습니다.》
(《김정일선집》 증보판 제11권 139페이지)

레이자미크로연마는 하나의 복잡한 열력학적과정으로서 재료의 성질, 겉면의 형태, 레이자빔과 재료사이 호상작용 등에 관계된다.

금속재료겉면에 대한 레이자미크로연마가 진행될 때 재료의 열전도, 비열, 잠열 등 물리적성질들의 변화때문에 합리적인 연마모형을 세우기가 매우 어렵다.[1] 이로부터 레이자미크로연마과정에 대한 수치모의를 통하여 레이자빔임펄스너비, 최적에너지밀도 등 공정파라미터들을 예측할수 있다.

우리는 금속겉면에 대한 레이자미크로연마과정의 동적모의분석을 위하여 레이자미크로연마의 열력학적과정을 열전도방정식으로 묘사하고 불수강 316L겉면에 대한 레이자미크로연마수치모의를 진행하였다.

1. 동적모형

ns임펄스레이자를 리용하여 금속재료겉면에 대한 미크로연마과정의 동적모형을 세울 때 다음의 4가지 가정을 할수 있다.

① 겉면우에서 레이자빔점의 크기는 녹음구역의 깊이보다 훨씬 크며 따라서 1차원모형을 리용할수 있다.[1]

② 레이자빔의 임펄스들사이의 열영향을 무시할수 있다.[2]

③ 겉면으로부터의 열흐름과 열복사는 무시한다.

동적모형의 공간구역과 경계조건은 그림 1과 같다.

그림 1에서 Γ_{sl} 은 고체-액체계면에서의 열흐름이며 이것은 레이자미크로연마과정에 이동한다. 일반적으로 1차원열전도방정식은 다음과 같다.[3]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

재료에서 상변환이 일어날 때 발생하는 잠열(녹음열, 증발열)을 고려하면 고체-액체계면의 경계조건은 다음과 같이 표시된다.

$$k_s \left(\frac{dT}{dx} \right)_s - k_l \left(\frac{dT}{dx} \right)_l = \rho L \frac{dS}{dt} \Big|_{\Gamma_{sl}} \quad (2)$$

여기서 S 는 고체-액체계면의 위치(녹음깊이)이며 고체-액체계면의 온도는 녹음점(T_m)

과 같다. 즉

$$T(x = S(t), t) = T_m \quad (3)$$

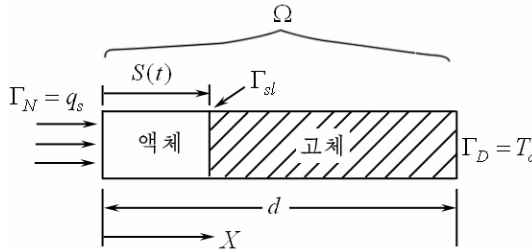


그림 1. 동적모형의 공간구역과 경계조건

구역 Ω 의 왼쪽경계(결면)에서 입사하는 레이자빛의 에네르기밀도는 결면에서의 열흐름밀도와 같다. 즉

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = q_s(t) \quad (4)$$

식 (4)에서 $q_s(t)$ 는 흡수되는 열흐름밀도이다. 디리클레(Dirichlet)경계조건으로부터 Ω 구역 오른쪽의 온도는 방안온도와 같다. 즉 시편의 두께 d 는 충분히 크며 따라서 연마 과정에 시편 밀면에서의 온도변화는 다음과 같이 표시된다.

$$T(x = d, t) = T_a \quad (5)$$

열원방법[4]을 리용하여 상변환과정을 고찰하며 동시에 재료의 비열과 열전도계수의 온도 의존성을 고려한다. 녹음과정을 1차원유한요소방법(FEM)으로 모의할 때 결면에서 온도분포 $T(x, t)$ 는 선형도대함수를 리용하여 얻을 수 있다.

우에서 서술한 금속재료에 대한 레이자미크로연마의 동적모형방정식은 식 (1)–(5)로 구성되어 있다.

2. 수치모의방법

1차원유한요소법을 리용하여 금속재료의 레이자미크로연마과정의 동적모형에 대하여 수치모의계산을 진행하였다.

식 (1)을 시간에 관하여 1계, 공간에 관하여 2계편도함수를 취하고 열흐름밀도를 도입하면 이 방정식은 공간에 대한 1계편도함수방정식으로 변환되며 수치모의를 위해 이것을 시간과 공간에 대하여 이산화한다. 즉

$$t_i = \Delta t \times i \quad (i = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

$$x_j = \Delta x \times j \quad (j = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$\Delta x = \frac{d}{N} \quad (8)$$

우의 초기 및 경계조건에서 열전도방정식을 다음과 같이 이산화한다.

$$\begin{cases} J_{j, i+1} = -k(T_{ji}) \frac{T_{ji} - T_{j-1, i}}{\Delta x}, & (j = \overline{1, N}, i = 0, 1, 2, \dots) \\ \frac{T_{j, i+1} - T_{ji}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho c} \frac{J_{j+1, i} - J_{ji}}{\Delta x}, & (j = \overline{0, N-1}, i = 0, 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (9)$$

식 (1)에 대한 수치모의계산을 진행할 때 초기조건들을 다음과 같이 리산화한다.

$$\begin{cases} J_{00} = q_s(0) \\ J_{j_0} = 0, (j = \overline{1, N}) \\ T_{j_0} = T_a, (j = \overline{0, N}) \\ T_{N_0} = T_a \\ S = 0 \end{cases} \quad (10)$$

리산화된 경계조건들은 다음과 같다.

$$J_{0i} = q_s(t_i) = q_s(\Delta t \times i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots) \quad (11)$$

$$T_{N,i} = T_a \quad (i = 0, 1, 2, \dots) \quad (12)$$

수치모의계산과정에 고체-액체계면(Γ_{sl})마디점의 조건식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} T_{M,i} = T_m \\ J_{M,i} = J_{M+1,i} = \rho c \frac{\Delta S}{\Delta t} \end{cases} \quad (13)$$

수치모의계산에서는 녹음전선에 대응한 마디점이 그것들사이의 재료가 완전히 녹거나 고체화된 후에 다음마디점으로 이동한다. 즉 재료는 녹음 혹은 고체화될 때 잠열을 발생하는데 전마디점과 다음마디점사이의 재료가 그 잠열을 완전히 흡수하기 전에 녹음전선은 움직이지 않는다.

식 (13)에서 ΔS 는 Δt 시간동안 재료가 흡수한 잠열에 의한 녹음깊이이다. $\Delta S > 0$ 일 때 재료는 녹으며 $\Delta S > \Delta x$ 일 때 녹음마디점은 다음마디점으로 이동(깊이방향으로)한다. $\Delta S < 0$ 일 때 재료의 고체화가 진행되며 $\Delta S < -\Delta x$ 일 때 마디점은 다음마디점으로 이동(결면방향)한다. $-\Delta x < \Delta S < \Delta x$ 일 때 마디점은 이동하지 않는다. 즉 녹음전선이 움직이지 않는다.

3. 수치모의결과 및 해석

임펄스레이자미크로연마에서 금속재료의 녹음과정에 대한 수치모의분석을 진행할 때 리용하는 파라미터들은 레이자빛의 임펄스너비, 모의구역의 길이, 마디점수, 시간간격이며 또한 물리적상수들로서는 밀도, 비열, 열전도계수, 잠열, 증발온도, 녹음온도, 동력학적점성, 결면장력 등이 있다.

레이자연마과정을 수치모의할 때 리용한 파라미터들은 표 1과 같다.

표 1. 레이자연마과정을 수치모의할 때 리용하는 파라미터

레이자빛임펄스너비 /ns	시편두께 / μm	마디점수 /개	시간간격 /ns	공간간격 / μm
10~100	30	600	0.01	0.05

불수강 316L의 물리적파라미터들은 표 2와 같다.

수치모의과정을 통하여 서로 다른 임펄스너비에 대하여 재료의 증발온도에 도달함이 없이 녹음만 일어나게 하는데 필요한 레이자빛의 에너지밀도범위를 얻을수 있다.

레이자빛의 임펄스너비에 따르는 불수강 316L결면의 에너지밀도변화는 그림 2와 같다.

그림 2에서는 레이자빛임펄스너비의 변화에 따르는 결면의 녹음만 일어나게 하는 레

이자빛에에너지밀도의 윗한계와 아랫한계값을 보여주었다. 그림 2에서 아래의 점선은 결면의 녹음과 가열사이의 경계선이다. 설정된 임펄스너비에 대하여 경계선위에 대응되는 레이자빛에에너지밀도에서는 결면의 녹음이 일어나고 경계선아래의 레이자빛에에너지밀도에서는 결면의 가열만 진행된다.

표 2. 불수강 316L의 물리적파라메터[5]

동적점도/($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)	열전도계수/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	결면장력/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
$6.29\cdot 10^{-3}$	$14.307+0.0181\times T-6\cdot 10^{-4}\times T^2$	1.803

마찬가지로 그림 2에서 윗쪽점선은 결면의 녹음과 증발사이의 경계선인데 이 경계선 이상의 레이자빛에에너지밀도에 대해서는 결면의 증발과정이 진행된다.

그림 2에서 보는바와 같이 임펄스너비가 클수록 결면의 녹음에 대응되는 레이자빛에 에너지밀도의 범위가 커지며 녹음깊이와 지속시간의 범위가 커진다. 다시말하여 비교적 큰 임펄스너비를 가진 레이자빛이 레이자미크로연마에 보다 합리적이다.

그러나 임펄스너비가 클수록 레이자빛에에너지밀도의 범위가 커지며 녹음구역으로부터 시편안으로 확산되는 열량이 커진다.

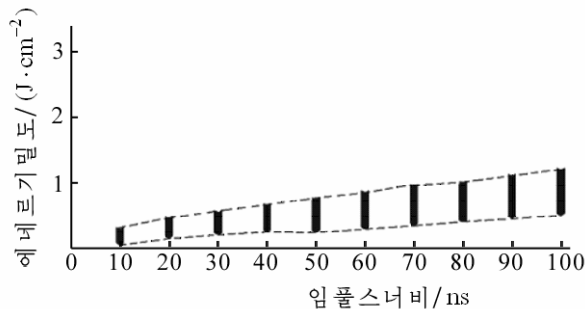


그림 2. 임펄스너비에 따르는 불수강 316L결면의 에너지밀도변화

만일 임펄스의 너비가 너무 크면 레이자빛에너지는 시료결면의 아래방향으로 수십 μm 까지 확산되며 이때 결면의 온도가 녹음점에 도달하려면 더 큰 에너지를 가져야 한다. 임펄스너비가 충분히 작으면 쪼여준 레이자빛에너지가 확산되는 시간이 매우 작 으며 결면에서 확산되는 레이자빛에너지는 기본적으로 결면의 가열 및 녹음에 쓰인다.

불수강 316L에 대하여 서로 다른 깊이에서 시간에 따르는 온도변화는 그림 3과 같다.

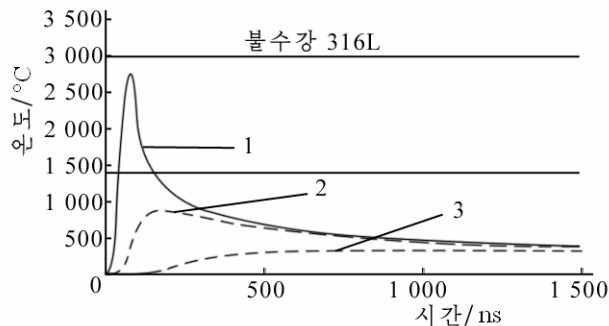


그림 3. 불수강 316L에 대하여 서로 다른 깊이에서 시간에 따르는 온도변화
1-3은 깊이가 각각 0, 1, 3 μm 인 경우

그림 3에서 보는바와 같이 불수강 316L에 대하여 서로 다른 깊이에서 시간에 따르는 온도변화를 알수 있다.

임펄스레이자빔의 에네르기밀도는 공간적으로 가우스분포이다. 수치모의에서 레이자빔임펄스너비는 40ns, 레이자빔에네르기밀도는 40ns에 대응하는 에네르기밀도의 옷한계값($0.75\text{J}/\text{cm}^2$)이다.

불수강 316L에 대하여 시간에 따르는 녹음전선의 위치변화는 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는바와 같이 불수강 316L에 대하여 레이자빔임펄스너비가 40ns인 경우 그에 대응하는 에네르기밀도의 옷한계를 가진 임펄스레이자빔으로 미소연마를 진행할 때 시간에 따르는 녹음전선(고체-액체계면)의 위치변화를 알수 있다.

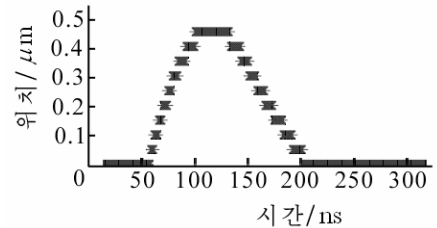


그림 4. 불수강 316L에 대하여 시간에 따르는 녹음전선의 위치변화

옷한계에네르기밀도를 가진 임펄스레이자빔으로 미소연마를 진행할 때 서로 다른 임펄스너비에 대응되는 최대녹음깊이와 최대녹음시간을 구할수 있다.(표 3)

표 3의 자료에 기초하여 레이자빔에네르기밀도를 실시간조종할 때 만족시켜야 할 조종정밀도를 예측할수 있다.

표 3. 임펄스의 너비에 대응되는 최대녹음깊이와 최대녹음시간

임펄스의 너비 /ns	결면을 녹이는데 필요한 에네르기밀도범위 /($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	최대 녹음깊이 / μm	최대 녹음시간 /ns
30	0.55~0.65	0.20	52
40	0.40~0.75	0.23	71
50	0.42~0.85	0.27	91
60	0.45~0.95	0.31	115
70	0.50~1.05	0.33	137

맺 는 말

금속결면에 대한 레이자미크로연마과정의 동적모의분석을 위하여 임펄스레이자미크로연마의 열력학적과정을 열전도방정식으로 묘사하였으며 불수강 316L결면에 대하여 수치모의하고 최적레이자미크로연마효과를 위한 공정과라메터들을 예측하였다.

참 고 문 헌

- [1] P. R. Jang et al.; International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-015-7992-3, 121, 2015.
- [2] T. M. Shao et al.; Surface & Coating Technology, 197, 77, 83, 2005.
- [3] T. L. Perry et al.; ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 131, 2, 021002, 2009.
- [4] A. Gisario et al.; Int. J. Mater Form, 3, 1, 1067, 2010.
- [5] D. Umbrello et al.; International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 462, 2007.

Dynamic Simulation Analysis of Laser Micro-Polishing against the Surface of Stainless Steel 316L

Jang Pong Ryol, Ji Kum Hyok

The thermodynamic processes of the pulsed laser micro-polishing have been described by the thermal conduction equation for dynamic simulation analysis of laser micro-polishing against the metallic surface. Through numerical simulation analysis for the stainless steel 316L surface, the several influence factors for optimum effect of the laser polishing were predicted.

Keywords: laser, micro-polishing, energy density, stainless steel