

## 선택성레이자소결에서 분말재료의 녹음특성에 대한 3차원유한요소모의해석

리준영, 리경준

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학연구기관들과 과학자, 기술자들은 우리 나라의 실정에 맞고 나라의 경제발전에 이바지할수 있는 과학기술적문제를 더 많이 풀어야 하겠습니까.》(《김정일선집》 증보판 제13권 173페이지)

선택성레이자소결(SLS: Selective Laser Sintering)은 3차원CAD모형의 분층자료에 기초하여 분말재료를 층층이 쌓아올려 3차원물체를 만들어내는 한가지 고속성형방법이다. 이 방법으로는 수지, 금속, 세라믹스 등의 분말재료로부터 다른 매개물이 없이 그리고 레이자열작용을 가한 후 다른 공정을 필요로 하지 않으면서 직접 완전한 기능제품을 만들수 있으며 값죽은 재료의 리용과 높은 성형속도, 결면정밀도 등의 우점을 가지는것으로 하여 제조분야에서 널리 리용되고있다.[1, 2]

선택성레이자소결이 가지는 이러한 우점을 효과적으로 리용하는데서 집초레이자빔묶음의 주사간격과 분말층의 두께를 합리적으로 정하는것이 중요하다.

선택성레이자소결에서는 주로 가우스분포를 가지는 레이자빔묶음을 리용한다. 선행연구[3, 4]에서는 분말재료에서 온도에 따르는 비열과 열전도도의 변화, 녹음과정에서 밀도의 동적변화 등 선택성레이자소결과정에 일어나는 재료의 물리적성질의 변화들을 이론적으로, 실험적으로 밝혔다.

본문에서는 선택성레이자소결에서 집초레이자빔묶음의 직경과 출력, 주사속도가 분말의 녹음과정에 주는 영향을 모의분석하고 성형속도와 결면정밀도를 높이는데서 제기되는 적합한 주사속도와 주사간격, 분말층의 두께를 결정하는 방법을 확립하였다.

### 1. 선택성레이자소결의 모형화

선택성레이자소결의 모형화에는 레이자빔묶음과 분말층의 호상작용, 재료의 분말과 고체부분에서의 열전도, 소결과정에 일어나는 분말상태로부터 고체상태로의 물질의 상변환이 포함된다.

선택성레이자소결에서 열에너르기원으로 TEM<sub>00</sub> CO<sub>2</sub> 레이자를 리용하는 경우에 빔묶음직경안에서 빔세기분포는 가우스분포에 따르므로

$$I(r, w) = (1 - R_e) I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right). \quad (1)$$

여기서  $r$ 는 레이자빔묶음중심으로 부터의 거리이고  $R_e$ 는 분말층결면에서의 반사계수이며 최

대빛세기  $I_0$  은 레이자출력  $P$  와 레이자빔뭉음의 특성반경  $w$  에 의하여 결정된다. 즉

$$I_0 = \frac{2P}{\pi w^2}, \quad (2)$$

$$w = \frac{D/2}{2.146}. \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 빔뭉음의 직경이다.

선택성레이자소결에서 열전달과정은 다음의 에네르기런속방정식으로 표시된다.

$$\int_V \rho \dot{U} dV = \int_S q dS \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 는 물질의 밀도,  $V$ 는 결면적이  $S$ 인 분말재료의 체적,  $\dot{U}$ 는 내부에네르기의 변화 속도,  $q$ 는 체적열흐름결수이다.

열전달방정식 (4)는 2개의 경계조건을 가진다.

첫 경계조건은 분말층결면에서 복사와 대류에 의한 열손실로 정의된다. 즉

$$-k_e \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=S} = h(T_a - T|_{Z=S}) + \varepsilon_R \sigma (T_a^4 - T|_{Z=S}^4). \quad (5)$$

여기서  $T_{Z=S}$ 는 분말층결면에서의 온도,  $T_a$ 는 예열온도,  $h$ 는 대류열흐름결수,  $\varepsilon_R$ 는 물질의 열복사결수,  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만상수,  $k_e$ 는 열전도도이다.

두번째 경계조건은 분말층아래쪽으로는 그 어떤 열손실도 일어나지 않는다는것이다. 즉

$$-k_e \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = 0. \quad (6)$$

선택성레이자소결에서 분말재료로서 폴리탄산에스테르를 리용하는 경우 열전도결수는 다음의 식으로 표시된다.[1]

$$k_e = k_s(1 - 0.2\beta - 1.73\beta^2) \text{ (W/(m} \cdot \text{K))} \quad (7)$$

여기서  $k_s$ 는 고체폴리탄산에스테르의 열전도결수로서

$$k_s = 0.02504 + 0.0005T \text{ (W/(m} \cdot \text{K))} \quad (8)$$

이고 공극률  $\beta$ 는 다공성매질의 밀도  $\rho$ 와 고체상태매질의 밀도  $\rho_{\max}$ 의 함수로서

$\beta = \frac{\rho_{\max} - \rho}{\rho_{\max}}$ 로 표시된다.

그리고 폴리탄산에스테르분말재료의 비열은 고체상태에서와 녹음상태에서 온도의 선형함수로서 각각 다음의 식으로 표시된다.

$$C_p = -20.56 + 4.103T \text{ (J/(kg} \cdot \text{K))} \quad T \leq T_g$$

$$C_p = 935.34 + 2.284T \text{ (J/(kg} \cdot \text{K))} \quad T > T_g$$

여기서  $T_g = 418\text{K}$ 은 폴리탄산에스테르의 유리화온도이다.

선택성레이자소결과정에 상변환으로 일어나는 분말밀도의 변화속도는 다음의 미분방정식으로 표시된다.

$$\frac{d\rho}{dt} = (\rho_{\max} - \rho)A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (9)$$

여기서  $R$ 는 기체상수이며 결수  $A$ 와 활성화에너지  $E$ 는 해당한 조건 즉 레이자빔뭉음의 출력과 주사속도에 관계된다.

단위면적의 열흐름  $q$ 는 열흐름벡토르  $f$ 의 함수로서 면적  $S$ 의 법선벡토르  $n$ 에 의하여 다음의 식으로 표시된다.

$$q = -f \cdot n \quad (10)$$

식 (10)을 식 (4)에 넣으면

$$\int_V \rho \dot{U} dV = - \int_V \text{div} f dV. \quad (11)$$

열흐름벡토르  $f$ 는 열전도결수  $k_e$ 와 온도경사도의 함수로서 푸리에열전도법칙에 따라  $f = k_e \text{grad} T$ 로 표시된다.

## 2. 모의결과 및 분석

모의에 리용한 폴리탄산에스테르분말재료에서 공극률은  $\beta = 0.5$ , 대류열흐름결수는  $h = 25 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 결면복사결수는  $\varepsilon_R = 0.8$ 이다.

모의계산에서 레이자빔뭉음의 이동은 자리표계원점의 이동으로 취하고 주사속도는 자리표계원점이 해당 위치에 머무르는 시간으로 규정하였다.

계산에서는 레이자출력이 5W인 조건에서 집초레이자빔뭉음의 직경  $D$ 를 100, 200, 300  $\mu\text{m}$ 로, 주사속도  $v$ 를 10, 20, 30 cm/s로 변화시키면서 모의하였다.

모의결과 집초레이자빔뭉음의 주사속도가 증가할수록 결면온도는 비선형적으로 낮아진다. 그것은 결면에 축적되는 에너지가 작아지는 것과 관련된다. 레이자출력이 커질수록 분말층결면의 최대온도는 선형적으로 높아지지만 소결깊이는 비선형적으로 증가한다. 그리고 레이자빔뭉음의 직경이 커질수록 결면온도는 낮아지며 소결깊이도 작아진다. 그것은 레이자출력밀도가 직경의 2제곱에 거꾸비례하기 때문이다.

집초레이자빔뭉음의 주사방향에 수직인 면에서 유리화온도이상에 이르는 녹음구역을 결정하고 MATLAB를 리용하여 최량화방법으로 레이자주사간격과 소결깊이를 결정하였다.

빔뭉음의 직경과 주사속도에 따르는 주사간격과 소결깊이는 표와 같다.

표. 빔뭉음의 직경과 주사속도에 따르는 주사간격과 소결깊이

$v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$D = 100 \mu\text{m}$		$D = 200 \mu\text{m}$		$D = 300 \mu\text{m}$	
	$\Delta l/\text{mm}$	$\Delta d/\text{mm}$	1	2	1	2
10	0.20	0.10	0.19	0.09	0.18	0.08
20	0.18	0.08	0.17	0.07	0.16	0.05
30	0.13	0.05	0.11	0.04	0.09	0.03

성형속도는  $v \cdot \Delta l \cdot \Delta d$ 로 평가할수 있다.

표에서 보는바와 같이 폴리탄산에스테르를 분말재료로 쓰는 경우에 주어진 조건에서 레이자빔뭉음의 직경 100  $\mu\text{m}$ , 주사속도 20 cm/s, 주사간격이 0.18 mm일 때 성형속도의 값이 가장 크며 이때의 소결깊이를 분말층의 두께로 설정하였다. 즉 분말층의 두께는 0.08 mm이다.

## 맺 는 말

분말의 녹음과정에서 집초레이자빔 묶음의 직경과 주사속도가 주는 영향을 모의분석하고 그것에 기초하여 적합한 주사속도와 주사간격, 분말층의 두께를 결정하는 방법을 논의하였다. 레이자출력이 주어진 조건에서 집초빔 묶음의 직경이 작을수록 그리고 주사속도가 작을수록 소결깊이는 증가한다.

## 참 고 문 헌

- [1] L. Dong et al.; Journal of Materials Processing Technology, **209**, 700, 2009.
- [2] S. Kolossov et al.; Int. J. Mach. Tools Manuf., **44**, 117, 2004.
- [3] D. L. Bourell et al.; Solid Freeform Fabrication Proceedings, The University of Texas, 102~109, 1991.
- [4] D. Moser et al.; The minerals, Metals & Materials Society, **67**, 5, 1194, 2015.

주체106(2017)년 5월 5일 원고접수

## **Analysis of 3D Finite Element Simulation of Melting Characteristics of Powder in Selective Laser Sintering**

*Ri Jun Yong, Ri Kyong Jun*

We analyzed effect of diameter of focusing laser beam, its power and scanning velocity on temperature field of powder using finite element method(FEM) in selective laser sintering and suggested the method of getting suitable scanning velocity, interval and the depth of powder plate. The simulation results show that depending on the physical property of material and its dependency of temperature, appropriate diameter of focusing laser beam, its power and scanning velocity are related to the quality of prototyping and prototype speed.

Key words: selective laser sintering, temperature distribution, 3D finite element analysis