

## 황동 분말의 용융에 의한 레이저 급속 조형법

최우천\*, 최우영\*\*, 송대준\*\*, 이진상\*\*\*

\*고려대학교 기계공학과 교수

\*\*고려대학교 기계공학과 대학원생

\*\*\*국민대학교 기계자동차공학부 교수

### Laser Rapid Prototyping by Melting Brass Powder

Woo Chun Choi\*, Woo Young Choi\*\*, Dae Jun Song\*\*, and Kun Sang Lee\*\*\*

#### ABSTRACT

Selective Laser Sintering(SLS) can produce three-dimensional objects directly from a CAD solid model without part-specific tooling. In this study, a simple rapid prototyping through selective laser sintering on brass powder is investigated using a Nd-YAG laser. Experiments are conducted to produce single lines on a powder-packed bed for various process parameters. Also, temperature distribution in the powder bed and the thickness of a melted line are predicted by finite element analysis. In the numerical analysis, the thermal conductivity of the brass powder which is obtained as a function of state and temperature is used.

Key Words : Rapid Prototyping, Selective Laser Sintering, Brass Powder, Nd-YAG Laser, Temperature Distribution, Finite Element Analysis, Thermal Conductivity.

#### 1. 서론

3차원 급속 조형법(3D rapid prototyping technique)은 초기에 시작품의 디자인 검증과 조립성 평가를 위해 사용되어 왔다. 이 시작품을 통해 형상확인, 외관 평가 및 기능 검증을 통해 개발 제품의 신뢰성을 높이고 납기를 대폭적으로 단축할 수 있다<sup>(1)</sup>. 최근에는 이러한 기능 뿐 아니라 원하는 강도나 인성을 갖춘

금형을 만들기 위해 SLS(selective laser sintering) 방식에 의한 급속 조형에 대한 연구가 진행되고 있다. Cu와 구리-주석, 구리-아연 등의 구리 합금 분말들이 SLS가공에 적합하고, Al 분말과 아연 분말도 잘 되는 것으로 알려져 있다<sup>(2-6)</sup>. 국내에서도 구리분말, 철 분말, 청동 분말에 대한 실험이 이루어졌다<sup>(7-9)</sup>. 여러 금속 분말에 대한 SLS 가공에 대한 실험이

이루어지면서 유한요소법을 이용하여 열전달 해석을 통한 형상 예측의 시도가 이루어져왔다<sup>(10-13)</sup>. 이러한 열전달 해석을 통해 레이저 출력, 이송 속도, 줄간의 거리등의 공정 변수에 대한 형성 두께 및 폭을 미리 예측하고, 적절한 공정 변수와 분말 재료의 선정, 도포 두께를 결정할 수 있다. 폴리카보네이트 분말의 층간의 용융에 대한 SLS 가공 모델이 제시되어, 이송 속도, 빔 조사 간격, 레이저 출력 등과 같은 가공 변수들이 용융 깊이에 미치는 영향을 예측하였다. 유한요소법을 이용하여 철분말의 소결을 위한 레이저 출력, 이송속도의 관계를 찾아낸 연구도 발표되었다<sup>(14)</sup>.

본 연구에서는 황동 분말에 대하여 Nd-YAG 레이저의 단속빔을 사용하여 급속 조형 여부를 연구한다. 레이저 출력과 이송속도를 변화시켜, 형성되는 용융선의 두께와 폭에 미치는 영향을 알아본다. 그리고 실험과 동일한 조건을 적용하고 황동분말의 물성치를 온도의 함수로 구하여 유한요소 열전달 해석을 수행하고, 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 형성된 용융선의 치수가 예측 가능함을 보여준다. 본 연구는 황동 분말을 이용한 급속 조형에 대한 해석에 초점을 맞춘 것으로 실험은 해석의 검증을 위해 수행하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 열전달 방정식

분말 입자가 일정한 열유속을 받고 있을 때, 시간에 따른 온도의 변화를 해석하므로 다음과 같은 비정상 열전도 (unsteady heat conduction) 방정식을 이용한다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q^B \quad (1)$$

여기서, T는 온도, t는 시간, ρ는 밀도, c는 비열, k는 열전도계수, q<sup>B</sup>는 단위 체적당 열발

생율을 나타낸다.

Fig. 1는 레이저빔이 입사되는 시간 동안 열전달을 개략적으로 나타내고 있다. Fig. 1에서 Q에서의 에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} V = \alpha I A_s - k \frac{\partial T}{\partial n} A - h_c (T - T_\infty) A_s - h_r (T - T_\infty) A_s \quad (2)$$

여기서, α는 흡수율, I는 레이저 빔의 강도, V는 체적, A<sub>s</sub>는 레이저빔이 조사되는 면적, h<sub>r</sub>은 복사 열전달 계수, h<sub>c</sub>는 대류 열전달계수, T는 복사되는 분말 표면의 온도, T<sub>∞</sub>는 주위 공기의 온도, n은 열전도되는 방향으로의 좌표, A는 열전도가 발생하는 면적이다. 이중, 복사 열전달 계수(h<sub>r</sub>)를 다음과 같이 표현된다.

$$h_r = \epsilon \sigma (T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty) \quad (3)$$

여기서, ε는 방출도(emissivity), σ는 스테판 볼츠만(Stefan-Boltzmann)상수이다.

상변화가 일어나는 구간에서 잠열을 고려한 엔탈피 방법을 이용하여 체적당 유효 열용량을 구한다. 잠열효과를 고려한 새로운 변수인 단위 부피당 엔탈피(H)는 다음과 같다.

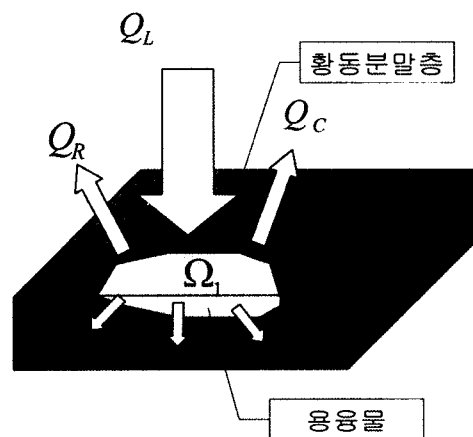


Fig. 1 Schematic of a energy transfer diagram with the laser beam on

$$H = \int \rho c dT \quad (4)$$

식(4)를 이용하여 체적당 유효 열용량  $c^*$  를 구할 수 있고, 용융구간에서 다음의 열전달 방정식을 쓸 수 있다.

$$\phi = \frac{\pi}{10 C^{2/3}} + \frac{\pi}{4} \left( 1 - \frac{1}{C^{2/3}} \right) \quad (5)$$

### 2.2 열전도 계수의 결정

황동은 합금이므로 순수한 물질처럼 일정한 용융점이 없고 용융구간이 존재한다. 황동의 용융구간은 920-960 °C이다. 본 연구에서는 황동분말을 사용하고, 또한 분말은 레이저 빔의 조사에 의해 온도와 상태가 변하며, 이에 따라 물성치가 변하므로, 해당 분말이 현재 혹은 이전에 도달된 최고온도에 따라 물성치가 달라진다<sup>(15)</sup>. 즉, 해당 분말이 도달된 최고온도가 용융구간 이하이면 상태변화가 없고, 용융구간 이상이면 완전히 용융되어 덩어리로 취급할 수 있으며, 용융구간 내에 존재하면 분말과 덩어리 사이인 상태가 된다. 따라서, 분말의 최고온도에 따라 열전도 계수를 달리 취급해야 한다. 분말을 용융시키는 급속조형에서는 상태에 따른 물성치 변화가 매우 중요하다.

#### 1) 최고온도가 용융구간 이하인 경우

고체 분말에 대한 주위 유체의 부피 비인 기공율에 따라 열전도계수는 크게 영향을 받는다. 기공율( $\phi$ )을 나타내는 다음의 식에서 계수 C의 값을 구한다<sup>(16)</sup>.

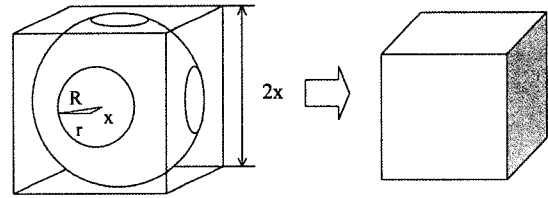
$$\phi = \frac{\pi}{10 C^{2/3}} + \frac{\pi}{4} \left( 1 - \frac{1}{C^{2/3}} \right) \quad (6)$$

여기서, C는 인접한 입자와의 접촉상태에 따라 결정되는 계수이고 열전도 계수를 결정할 때 사용된다. 본 실험에서는 기공율이 0.474이므로 C의 값을 식 (6)에서 구할 수 있다. 공극 내에 존재하는 공기의 열전도계수( $k_2$ )에 대한 황동의 열전도계수( $k_1$ )의 비인  $k_1/k_2$ 가 50보다

큰 경우에는 다음 식을 이용하여 이상 물질 (heterogeneous materials)의 열전달 계수를 구한다<sup>(17)</sup>.

$$k_{eff} = 1.92 \left[ \frac{k_2^2 k_1}{C^2} \right]^{1/3} \quad (7)$$

용융구간 이하에서 열전도계수는 C값, 공기의 열전도계수와 황동의 열전도계수를 위의 식에 대입하여 구한다.



R : sphere radius  
2x : cube dimension  
r : radius of a contact circle

Fig. 2 Densification of a cubic pack structure (As temperature increases, r increases and x decreases.)

#### 2) 최고온도가 용융구간내의 경우

용융구간 내의 온도에 도달된 분말은 용융된 정도에 따라 접촉상태가 달라진다. Fig. 2에 나타난 것과 같이, 온도에 따라 접촉면의 반경 r이 달라진다. 열전도 계수는 분말간의 접촉면의 반경과 분말 입자의 반경과의 비 ( $R/r$ )에 의해 큰 영향을 받는다. 용융구간의 열전도 계수는  $R/r$ 의 값은 용융 구간에서 온도에 따라 비례하는 것으로 가정하여 다음 식으로 구한다.

$$k_{eff} = k_1 \left( \frac{R}{r} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{2R}{r} \right)^{-1} \quad (8)$$

#### 3) 최고온도가 용융구간 이상인 경우

이 구간에서는 완전 용융되거나 혹은 완전 용융된 후 냉각되어 고체가 된 것으로 취급하여, 황동 덩어리의 열전도계수를 사용한다.

Fig. 3은 위에서 언급한 식에 의해 구한 열전도계수를 보여준다. 용융구간에서 열전도 계수가 크게 달라지므로 해석의 정확성을 향상시키기 위해 3단계로 나누어 용융구간에서 온도에 따라 열전도 계수를 다르게 하였다. 분말이 레이저 조사에 의해 온도가 증가하면 Fig. 3에서의 5번 곡선을 따라 열전도 계수가 변하고, 이 분말의 최고온도가 예를 들어 920-930 °C 사이의 온도에 도달된 후 냉각되면 4번 곡선을 따라 열전도 계수가 변하고, 최고온도가 960 °C 이상이 되었다가 냉각되면 1번 곡선을 따라 변한다. 이와 같은 열전도 계수의 변화를 해석 프로그램에 포함시켰다.

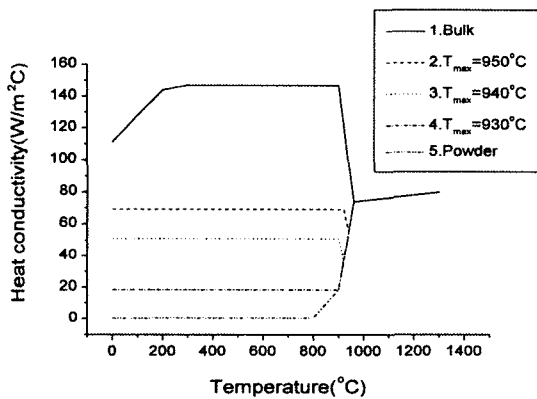


Fig. 3 Heat conductivity as a function of temperature.

### 2.3 유한요소해석을 위한 모델링

유한요소해석 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 열전달 해석을 하기 위하여 Fig. 4와 같이 요소망을 구성하였다. 8절점의 육면체 열전도 요소(solid 70)를 사용하였고, 복사에 의한 열전달 해석을 위해 공기와 접해 있는 표면에 표면요소(surf 22)를 사용하였다. 대류에 의한 열전도 해석은 열전도 요소 표면에 경계 조건을 설정하여 표면에서의 대류를 가정하고, 분말에 의해 둘러싸인 각 표면에 대류 조건을 설정하여 분말간의 열전도에 의한 열방출을

가정하였다<sup>(18)</sup>.

레이저빔에 의한 열유입은 각 표면에 들어가는 열유속으로 설정하고, 각 요소의 표면 절점에 가우스 분포의 열에너지 강도를 할당하여 TEM<sub>∞</sub> 모드의 빔을 구현하였다.

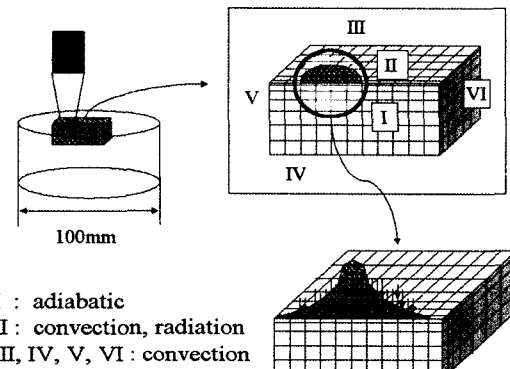


Fig. 4 Modeling of one\_line melting for Finite Element Analysis.

### 3. 실험장치와 방법

사용된 레이저는 평균 출력 50W의 Nd-YAG 고체 레이저(Lumonics LuxStar™)이다. Fig. 5는 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 작업 경로와 작업 조건이 프로그램화된 NC 기계의 명령에 따라 레이저의 on/off, 이송장치의 3축 운동과 분말 층의 도포 두께를 조절하는 조절장치의 운동이 이루어진다. 조사되는 레이저빔은 주파수 10Hz, 조사시간 10ms의 펄스형태로서 TEM<sub>∞</sub>모드이고 에너지 강도는 가우스(Gaussian)분포이다<sup>(19)</sup>. 초점거리가 60mm인 집속 렌즈를 사용하였고, 집속된 빔의 직경은 0.5mm이다. 그러나 넓은 폭을 조사하기 위해 직경이 1.85mm인 초점이 맞추어지지 않은 빔을 사용하였다. 실험재료로 250mesh 체를 완전히 통과하는 황동(Cu wt70%, Zn wt30%) 분말을 사용하였다. 분말은 평균 약 38µm의 평균직경을 갖는 것으로 나타났다.

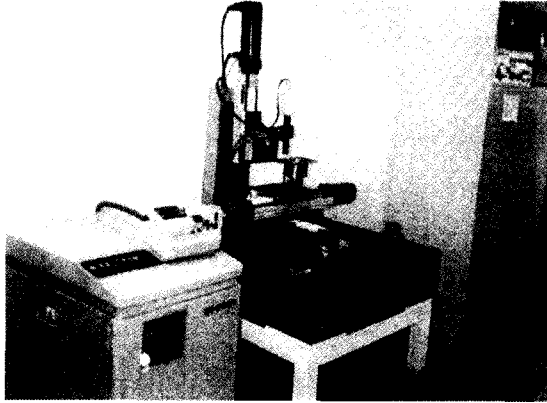


Fig. 5 Laser rapid prototyping system.

작업 방법은 3차원 CAD 형상에서 일정한 두께로 나눈 후에 생기는 단면 데이터로부터 X-Y테이블의 구동 데이터로 변환하고, 미리 도포된 분말층의 표면 중 각 단면의 형상대로 용융되어야 할 부분에는 레이저빔을 조사한다. 레이저빔이 조사된 분말은 용융되어 한 단면의 분말층을 이루고, 그 위에 다른 분말층이 용융되어 적층된다. 레이저가 조사되지 않은 분말 부분은 용융되지 않은 상태로 남아 급속 조형 제품을 받쳐주는 역할을 한다.

실험은 두 가지 조건으로 수행하였다. 빔 직경을 1.85mm로 조절하고, 침두 출력(peak power)을 100W로 고정하고, 이송속도는 5-60mm/min로 변화시키면서 분말의 용융 여부를 실험하였다. 그리고, 이송속도를 15mm/min로 고정하고, 출력을 100-200W로 변화시키면서 분말의 용융 여부를 실험하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

레이저 빔을 조사시켜 분말을 녹여 한 줄을 용융시키는 실험을 수행하였다. Fig. 6는 침두 출력을 100W, 주파수를 10Hz, 한 펄스의 지속 시간을 10ms로 고정시키고, 이송속도를 5-60mm/min로 변화시키면서 반경 1.85mm인 빔을 주사하였을 때 형성된 용융선을 보여준다.

이송속도가 느릴수록 가장자리로부터 완전히 용융되지 못한 분말이 부분적으로 결합되면서 부풀어 오른다. 이것은 용융된 선의 가장자리 부분이 용융풀(molten pool)을 형성할 만큼 열 에너지를 받지 못했기 때문이다. 이송속도가 20mm/min보다 낮아지면 빔의 궤적 모양이 나타나고 분말들이 용융되며 표면이 황동빛을 띤다. 그리고 두께도 아래 방향으로 커진다. 따라서 급속조형의 단면 생성을 위해서는 어느 속도 이하가 되어야 한다. 20mm/min이하가 되면 용융이 일어나며 공극이 거의 없어지기 때문에 밀도의 변화로 인해 가운데 부분이 원래 표면보다 내려간다. 이송속도가 15mm/min 이하일 때는 계속적인 빔의 입사에 따라 초기의 스퍼터링 현상이 사라지고 빔의 이동에 따라 순차적으로 용융이 되는 것을 확인할 수 있다.

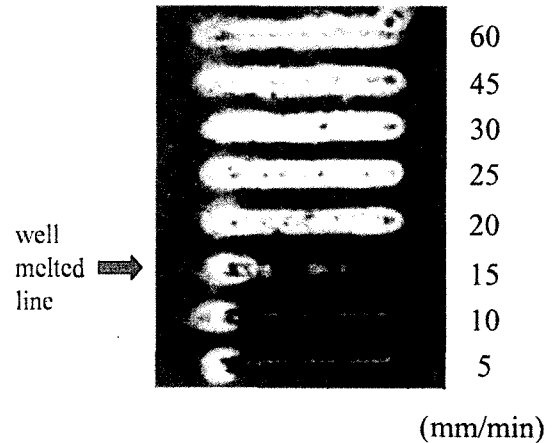


Fig. 6 Melted lines produced for various scanning speeds.

Fig. 7에는 이송속도를 변화시켜가면서 실험했을 때 속도에 대한 두께 및 폭의 변화를 보여준다. 이송속도가 20mm/min보다 느리면 깊이 방향으로 용융되는 양이 많아져 두께가 커진다. 이에 반해 너비는 치수의 변화가 두께에 비해 작다. 이것은 용융되는 양은 들어오는

빔의 에너지 강도에 큰 영향을 받으므로, 같은 출력일 경우 상대적으로 빔의 강도가 작은 가장자리에서는 용융되는 양이 깊이 방향에 비해 이송속도에 별로 영향을 받지 않는다. 이는 분말의 깊이 방향으로 서로 용융되는 경향이 있고 표면으로는 열전달이 작기 때문이다<sup>(20)</sup>.

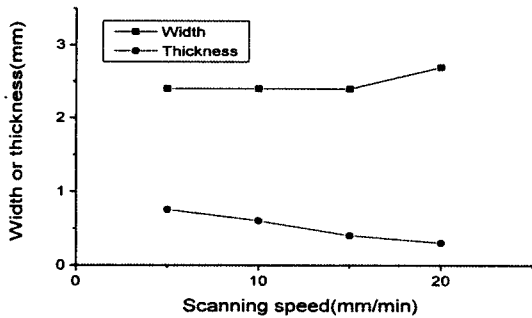


Fig. 7 Thickness and width of melted lines for various scanning speeds. (experimental condition: 100W, 10Hz, 10ms)

Fig. 8은 여러 가지의 빔 출력 하에서 빔 출력에 대한 두께 및 폭의 변화를 보여준다. 이송속도를 일정하게 두고 출력을 높이면 빔의 에너지 강도가 커지게 되므로 가장자리의 용융되는 양이 많아져 폭이 넓어지고 두께도 증가하게 된다.

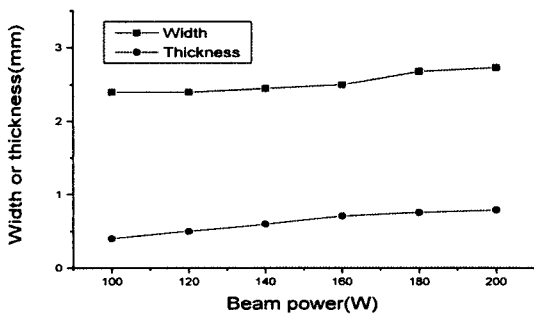


Fig. 8 Thickness and width of melted lines for various beam powers. (experimental condition: 15mm/min, 10Hz, 10ms)

Fig. 9는 레이저빔이 조사될 때의 온도 분포를 유한요소해석을 통해 구한 것이다. 이 그림에서 열이 유입되지 않은 앞부분은 분말 상태이므로 열전도 계수가 낮아 등온선이 촘촘하고, 열유입이 되어 물성치가 바뀐 뒷부분은 덩어리 상태의 큰 열전도 계수 때문에 등온선이 성긴 것을 보여준다. 해석 결과가 온도의 함수로서 나타나는 물성치의 변화에 잘 부응하는 것을 알 수 있다.

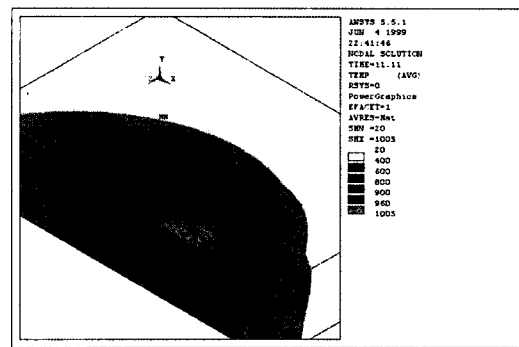


Fig. 9 Established temperature distribution.

Fig. 10은 시간에 대한 빔 중심의 두께 방향 온도 변화의 유한요소해석 결과이다. 이 그래프에서 시간에 따라 온도가 계속 올라가나, 어느 정도 시간이 지난 후에는 온도 변화가 작다. 이것은 첫 번째 빔이 조사될 때 가장자리였던 부이송에 의해 중심이 되는 동안, 급격한 온도변화 없이 전도에 의해 열이 축적되면서 빔에 의해 녹기 때문인 것으로 여겨진다.

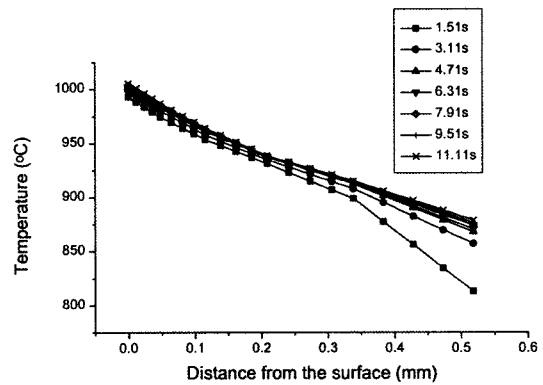


Fig. 10 Temperature distribution in the depth direction.  
(condition: 15mm/min, 100W, 10Hz, 10ms)

Fig. 11은 일정한 이송속도(15mm/min) 조건 하에서 출력의 변화에 대하여 해석과 실험의 결과를 비교한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 실험결과와 해석결과가 서로 잘 일치한다. 이 그림에서 해석의 결과는 최고온도가 900 °C와 920 °C에 이른 부분까지를 깊이로 취급한 것으로, 실험결과는 최고온도가 900 °C인 해석결과와 잘 일치하고 있다. 이것은 900 °C는 용융이 시작되지 않으나 분말입자 간의 결합이 이루어지는 온도이므로 분말이 완전 용융된 부분에 약한 결합을 이루게 되기 때문인 것으로 여겨진다. 본 연구의 실험에서는 분말의 산화를 방지하기 위한 준비가 이루어지지 않았다. 3차원 형상의 정밀한 제품을 제작하려면 도포된 분말 표면에서의 산화를 방지하기 위한 보호 가스의 공급이 요구되고 보다 정밀한 분말 도포 두께의 제어가 필요하다.

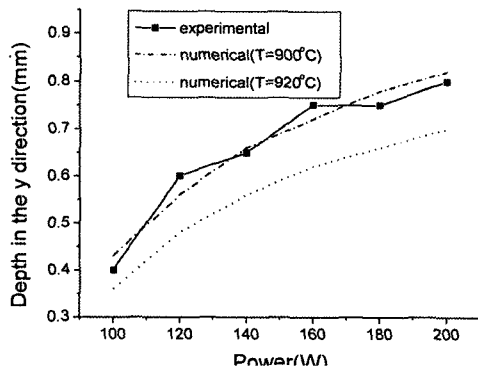


Fig. 11 Comparison between the experimental and the numerical results.

### 5. 결론

금속 분말을 완전 용융시켜 원하는 3차원 형

상을 만들기 위한 기초 단계의 연구로서 한 줄 용융을 실험하였고, 실험조건과 동일한 조건을 적용하여 열해석을 수행하였으며, 실험과 해석의 결과를 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용융물의 폭은 레이저빔의 이송속도에 크게 영향을 받지 않으나 용융물의 두께는 이송속도가 느릴수록 커진다. 이는 가우시안 형태의 레이저빔 강도에 의해 폭이 결정됨을 알 수 있다.
- (2) 레이저빔의 출력이 커질수록 용융물의 두께와 폭이 커진다.
- (3) 레이저빔의 출력과 이송속도와 같은 공정변수를 제어하면 단속빔으로 금속분말의 완전 용융에 의한 형상제어가 가능함을 알 수 있다.
- (4) 열전달 해석을 통해 금속 분말의 용융 두께의 예측이 가능하다.

### 5 . 참고문헌

[1] J. P. Kruth., "Material Increase Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques", Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 2, pp. 603-614, 1991.

[2] P. F. Jacobs, "Rapid Prototyping & Manufacturing", 1st edition, SEM, 1992.

[3] F. Abe, and K. Osakada, "Fundamental Study of Laser Rapid Prototyping of Metallic Parts", int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 30, No. 3, pp. 278-279, 1996.

[4] D. L. Bourell et al, "Selective Laser Sintering of Metals", Manufacturing Science and Engineering, PED-Vol. 68-2, Vol. 2, 1994.

[5] U. Lakshminarayan et al, "Solid Freeform Fabrication of Ceramics Using

- Selective Laser Sintering and Selective Area Laser Deposition”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 249, pp323-329, 1992.
- [6] Y. Kizaki et al, “Phenomenological Studies in Laser Cladding. Part I. Time-Resolved Measurements of the Absorptivity of Metal Powder”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 32, pp. 205-212, 1993.
- [7] Y.-A. Song, “Experimental Study of the Basic Process Mechanism for Direct Selective Laser Sintering of Low-Melting Metallic Powder”, Annals of the CIRP, vol. 46, pp. 127-130, 1997.
- [8] 전병철, “CO<sub>2</sub> 레이저에 의한 선택적 소결 법에 대한 연구”, 인하대학교 석사학위논문, 1996.
- [9] M, C, Shin, “Experimental Study of Direct Metal Prototyping Process”, KAIST, M.E.Thesis, 1995.
- [10] M. Shiomi, A. Yoshidome, F. Abe, K. Osakada, “Finite Element Analysis of Melting and Solidifying Process in Laser Rapid Prototyping of Metallic Powders”, Int. Journal of Machine Tools & Manufacturing 39, pp. 237-252, 1999
- [11] J. L. Norrell, R. H. Crawford, K. L. Wood, “Thermal Issues in the Design of an SLS Rapid Prototyping Machine”, Proceedings of the ASME Design Engineering Technical 1997, pp. 1-13.
- [12] J. C. Nelson et al, “Selective Laser Sintering of Polymer coated Silicon Carbide”, Ind. Eng. Chem. Res., 1995, 34, pp. 1641-1651.
- [13] E. C. Lemmon, “Numerical Methods in Heat Transfer”, Wiley, Chichester, pp. 210-213, 1981.
- [14] 손현기, 양동열, “직접식 조형법의 금속분말 적층부 소결에 관한 연구”, 97년도 정밀공학회 추계 학술 논문집, pp. 552-556, 1997.
- [15] Swithells Metals References Book, 6th Ed., edited by Brandes E. A., Butterworths, 1983.
- [16] Goring. R. L., Churchill, S. W., “Thermal Conductivity of Heterogeneous Materials”, Chemical Eng. Pro., Vol. 57, No. 7, 1961.
- [17] Schotte. W, “Thermal Conductivity of Packed Beds”, A.I.C.H.E. Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 63-67, 1960.
- [18] 손창현, “유한요소법에 의한 MoSi<sub>2</sub> 자전고온 반응 합성 공정의 열전달 해석”, 고려대학교 석사학위논문, 1998.
- [19] Takahasi Ueda, Keiji Yamada, Kauzo Nakayma, “Temperature of Work Materials Irradiated with CO<sub>2</sub> Laser”, Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 1, pp. 117-122, 1997.
- [20] K., Kizaki, H. Azume, S. Yamazaki, H. Sugimoto, S. Takagi, Phenomenological Studies in Laser Cladding Part 1: Time-Resolved Measurements of the Absorptivity of Metal Powders, Japanese Journal of Applied Physics, 32/1: pp. 205-212, 1993.