

쾌속 금형 제작을 위한 텅스텐 카바이드와 코발트 혼합물의 선택적 레이저 소결 실험

김 광 희* · 조셉 비만**

Experiments on Selective Laser Sintering of WC-Co Mixture for Rapid Metal Tooling

K-H Kim* · J- J. Beaman**

Key words : Rapid Metal Tooling(쾌속 금형 제작), Selective Laser Sintering(선택적 레이저 소결), Tungsten Carbide(텅스텐 카바이드), Cobalt(코발트)

Abstract

Rapid tooling technique enables us to make dies and molds that produce prototype parts with the correct material at a substantially reduced cost and time. In this study, experiments on selective laser sintering of tungsten carbide-cobalt mixture were carried out to find optimal sintering conditions that will be applied to rapid metal tooling. The experiments were carried out within an air, an argon and a nitrogen atmosphere. Coupons of single layer were sintered at various laser powers, scanning speeds and scan spacings. Very severe oxidation took place within an air atmosphere. The oxidation is reduced significantly within an argon and a nitrogen atmosphere. The thickness of the sintered coupons is increased as the energy density, the laser energy per unit scanned area, is increased. Several multi-layer sintering experiments were also carried out.

1. 서 론

쾌속 조형(Rapid Prototyping) 기술은 종이, 고분자(polymer), 금속 및 세라믹 소재 등을 이용하여 금형 등의 공구를 사용하지 않고 캐드 모델로부터 직접 정밀한 제품을 짧은 시간 내에 제작할 수 있는 기술로 신제품 개발 기간 및 비용을 획기적으

로 줄일 수 있는 기술로 주목받고 있다. 선택적 레이저 소결(Selective Laser Sintering) 공정은 현재 상업적으로 널리 사용되고 있는 쾌속 조형 공정 중의 하나로 얇은 분말 층에 선택적으로 레이저를 조사하여 부분적으로 분말이 소결 또는 용융되도록 한 후, 그 위에 다시 새로운 층을 쌓아가면서 원하는 제품을 제작하는 공정이다¹⁾⁴⁾.

* 부경대학교 기계공학부

** 텍사스대학교 기계공학과

전통적인 금형 제작 방법은 많은 시간과 노력을 필요로 하기 때문에 신속하게 시장 변화에 대처하기 위해서는 쾌속 조형 기술을 응용한 쾌속 금형 제작(Rapid Tooling) 기술의 개발 및 적용이 요구되고 있다. 이 쾌속 금형 제작 방법 중의 하나로 금속 분말을 소재로 하여 선택적 레이저 소결 공정을 통하여 금형을 제작하는 방법이 있는데, 이 방법은 다시 간접식과 직접식¹⁾⁴⁾⁵⁾으로 나눌 수 있다. 간접식은 금속 분말과 바인더(binder)가 혼합된 소재로 금형을 제작한 후 후처리를 통해 바인더를 제거하고 청동 등을 침투시켜 밀도를 높혀 강도를 향상시키는 방법이고, 직접식은 금속 분말을 직접 용융시켜 금형을 제작하는 방법이다. 간접식은 현재 소형 사출 금형의 제작에 상업적으로 적용되고 있으나, 비교적 저온에서 녹는 금속만 침투시킬 수 있으므로 비교적 강도가 낮다. 따라서 프레스 금형 등 고강도를 필요로 하는 금형을 제작하기 위한 직접식에 대한 여러 연구가 수행되었으나 상업적으로 적용하기 위해서는 많은 추가적인 연구가 요구되고 있다.

텅스텐 카바이드(tungsten carbide)는 경도가 매우 높은 장점이 있어서 드릴 등의 절삭 공구와 금형의 인서트(insert) 등으로 많이 사용되고 있으나 취성(brittleness)이 강한 단점이 있다. 그러나 바인더 역할을 하면서 내충격성을 부여할 수 있는 코발트(cobalt)와 혼합하여 최근 많은 관심을 받고 있는 조성기 기능에 따라 점차로 변하는 재질인 경사기능재료 (Functionally Gradient Material)⁶⁾로 제작될 경우 석유 산업 등에서 사용되는 드릴 비트(drill bit)나 금형 등의 제작 및 성능 향상에 획기적인 기여를 할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 쾌속 금형 제작에 적용할 수 있는 경사기능재료를 제작하기 위한 전 단계로서, 일정한 성분비를 가진 텅스텐 카바이드와 코발트 혼합물의 선택적 레이저 소결 실험을 실시하였다. 최적의 소결 조건들을 찾기 위하여 공기, 아르곤 및 질소 분위기에서 레이저 출력(laser power) 및 주사 속도(scanning speed), 주사선사이의 간격(scan spacing)을 변화시키면서 단층(single layer) 소결 실험을 하였으며, 아르곤 및 질소 분위기에서 다층(multi-layer) 소결 실험도 실시하였다.

2. 선택적 레이저 소결 실험

2.1 실험 장치

본 실험에서는 최대 출력이 500W이고 파장(wave length)이 10.6 μ m 인 CO₂ 레이저 장치(Coherent Everlase 525)를 사용하였으며 소결시 빔의 초점 직경(spot diameter)은 0.6mm가 되도록 하였다. Fig. 1은 컴퓨터에 의해 제어되는 선택적 레이저 소결 실험 장치의 개요도이다. 이 장치는 경사기능재료도 제작할 수 있도록 두 종류의 소재를 실시간으로 원하는 성분으로 혼합하여 공급할 수 있는 장치도 갖추고 있다⁶⁾. Fig. 2는 알루미늄 판으로 제작된 소결실(sintering chamber)의 모습이다. 아르곤 및 질소 분위기를 만들기 위하여 Fig. 3과 같은 아크릴 판과 염화나트륨(sodium chloride) 유리로 만든 간이 차폐 상자(shielding box)를 제작하여 사용하였다. 염화나트륨 창을 통하여 레이저가 주사되고 위쪽의 호스를 통하여 아르곤이나 질소 가스가 공급되어 상자의 바닥 쪽으로 빠져나가도록 하였다.

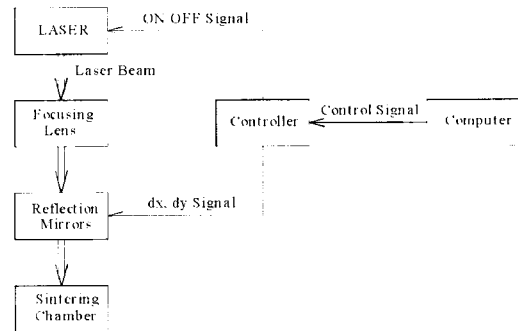


Fig. 1 Schematic diagram of selective laser sintering equipment

2.2 실험 재료

본 실험에 사용된 텅스텐 카바이드와 코발트 혼합물은 코발트가 전체 체적의 16%를 차지한다. 이 혼합물이 보관 중이나 소결 공정 중에 산화되는 것을 억제하기 위해 표면을 왁스(wax)로 코팅하였

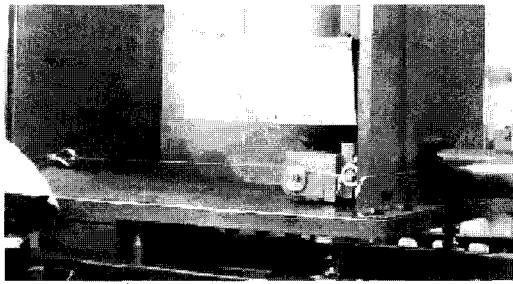


Fig. 2 Selective laser sintering chamber



Fig. 3 Shielding box made of plexiglass and sodium chloride glass

다. 실험에 사용된 아르곤 가스와 질소 가스는 소결 중에 소재의 산화를 억제하도록 약 4%의 수소를 포함시켰다.

2.3 실험 방법

텅스텐 카바이드와 코발트 혼합물을 공기, 아르곤 및 질소 분위기에서 레이저의 출력, 주사 속도 및 주사선사이의 간격을 달리하면서 각각 단층으로 소결 하였다. Table 1은 단층 소결 조건을 나타내고 있다. 레이저 출력은 출력 측정기(power meter)를 이용하여 측정하였으며 출력 측정기의 용량 150W를 넘는 값은 레이저 발생 장치의 전류를 대신 측정하고 환산한 추정치를 괄호 안에 표시하였다. Fig. 4는 레이저의 주사 방향을 나타내고 있다. 실험시간 및 소모되는 아르곤과 질소를 절약하기 위하여 시편의 x-축 방향의 길이는 약 10mm 정도가 되도록 잡았다. 주사 속도는 레이저가 주사되는 시간을 직접 측정하여 계산하였다. 레이저 빔의 직경과 주사선의 수 및 소결 후 측정된 시편의

y-축 방향의 폭으로부터 주사선사이의 간격을 계산하였다.

각 층의 두께가 0.5 mm인 다층 시편의 소결 실험도 실시하였다. 10층으로 된 육면체를 아르곤 분위기에서, 5층으로 된 육면체를 질소 분위기에서 각각 소결하였다. Table 2는 다층 소결 실험 조건을 보여주고 있다. 단층 및 다층 소결 실험 모두에서 분말은 예열하지 않고 실온에서 소결하였다.

Table 1 Experimental conditions for single layer sintering

Atmospheric condition	Laser power (W)	Scanning speed (mm/s)	Scan spacing (% of beam dia.)
Air	82, 125, (173), (220), (312), (404)	0.58, 1.16, 2.32, 22.98,	59.4, 118.8, 178.2
		44.69	
Argon	70, 104, (220)	0.58, 1.16, 1.74, 2.32, 3.47, 4.62, 6.92, 11.52, 22.98,	7.4, 20, 59.4
		44.69, 65.61, 83.81, 100.04	
Nitrogen	104	1.74, 2.32, 3.47, 4.62,	59.4
		6.92, 11.52, 22.98	

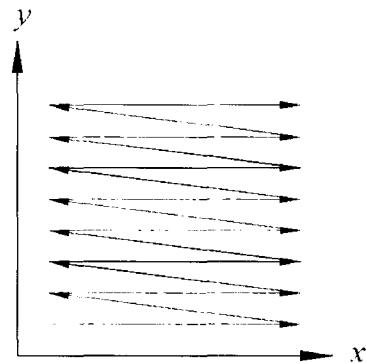


Fig. 4 Scanning direction

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 단층 소결

3.1.1 공기 중에서의 소결

공기 중에서 주사선 간격이 각각 레이저 빔 직경

Table 2 Experimental conditions for multi-layer sintering

Atmospheric condition	Number of layers	Laser power (W)	Scanning speed (mm/s)	Scan spacing (% of beam dia.)
Argon	10	104	4.62, 6.92, 11.52, 3.47, 4.62,	59.4
Nitrogen	5	104	6.92, 11.52, 22.98	59.4

의 178.2%, 118.8%, 59.4%가 되도록 단층으로 소결한 시편들을 다음의 식 (1)과 같이 계산된 에너지 밀도 즉 주사된 단위 면적 당 가해진 레이저 에너지가 증가하는 순서로 Fig. 5, 6, 7에 각각 배열하였다. 이 그림들은 주사선 간격이 너무 넓고 에너지 밀도가 매우 낮으면 만족스러운 소결물을 얻을 수 없음을 보여주고 있다. 소결 중에 산화가 발생하여 각 시편들이 두꺼워지면서 분말 표면위로 약간 솟아오르는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 에너지 밀도가 높아질수록 심하게 발생하였다. 스테인레스강 분말의 공기 중에서의 선택적 소결 실험에서도 심한 산화 현상이 보고되고 있다⁴⁾.

에너지 밀도는 다음과 같이 계산하였다.

$$e = \frac{100 P}{vdw} \tag{1}$$

여기서 e 는 에너지 밀도(J/mm^2), P 는 레이저의 출력(W), v 는 레이저의 주사속도(mm/s), d 는 소결시 레이저의 초점 직경(mm), w 는 주사선 간격의 레이저 빔의 초점 직경에 대한 백분율(%)을 나타내고 있다.

모든 시편들은 맨손으로도 쉽게 부술 수 있을 정도로 강도가 매우 낮았고 밀도도 매우 낮아서 제품을 만들기에는 부적절하였다. 산화 방지를 목적으로 분말에 코팅된 왁스는 큰 도움이 되지 못하였고 심한 그을음이 발생하는 경우도 있었다. 또한 매우 높은 에너지 밀도로 소결할 경우에는 레이저가 주사된 분말 표면 부분이 소결되지 않고 움푹 파인 자국만 남는 경우가 발생하였다. 이는 너무 과도한 에너지가 급격히 공급된 결과로 분말에 포함될 수

분과 왁스 등이 폭발적으로 기화되는 현상에 의한 것으로 판단된다. 따라서 보다 높은 에너지 밀도에서의 추가적인 실험에서는 수분이나 왁스 등의 불순물의 제거가 요구된다.

금형과 같이 비교적 크기가 큰 제품은 공기 중에서 제작할 수 있는 것이 경제적으로 매우 바람직하다. 그러나 본 실험에 의하면 매우 심한 산화현상

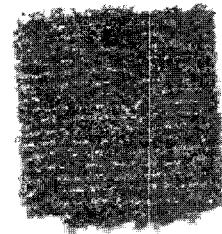


Fig. 5 Sample coupon of single layer sintered within an air when laser power is about 173W, scanning speed is 22.98mm/s and scan spacing is 178.2% of beam diameter

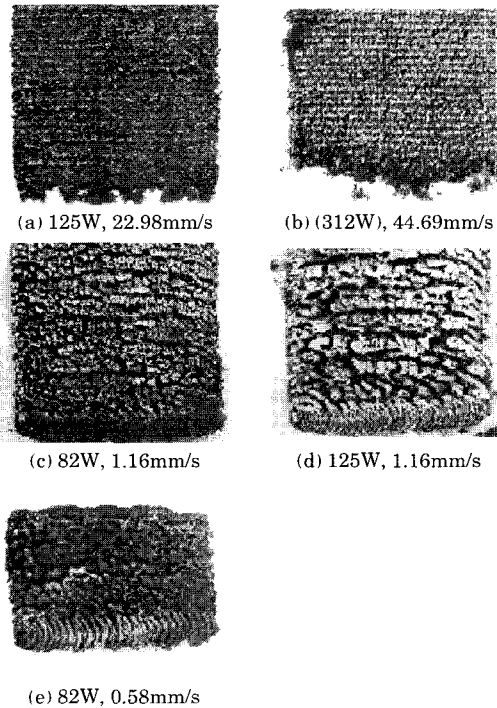


Fig. 6 Sample coupons of single layer sintered within an air at various laser powers and scanning speeds when scan spacing is 118.8% of beam diameter

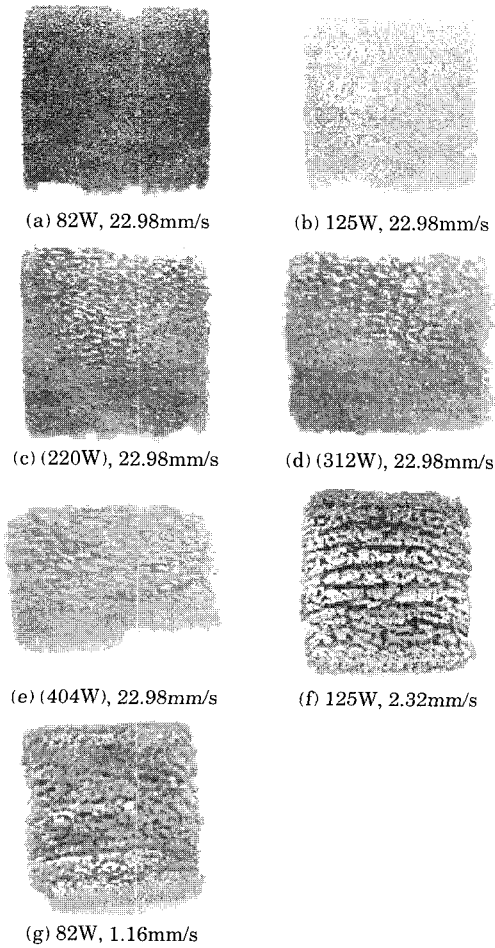


Fig. 7 Sample coupons of single layer sintered within an air at various laser powers and scanning speeds when scan spacing is 59.4% of beam diameter

으로 인하여 적절한 밀도와 강도를 갖도록 공기 중에서 소결할 수 있는 조건을 찾기는 매우 어려울 것으로 보인다.

3.1.2 아르곤 및 질소 분위기에서의 소결

Fig. 3의 간이 차폐 상자를 이용하여 만든 아르곤 분위기에서 주사선 간격이 각각 레이저 빔 직경의 7.4%, 20%, 59.4%가 되도록 단층으로 소결한 시편들을 에너지 밀도가 증가하는 순서로 Fig. 8, 9, 10에 각각 배열하였다. 공기 중에서 소결된 시편들과 비교해 보면 산화가 매우 많이 감소하였음을 알 수 있다. 산화는 매우 많이 감소하였음에도

불구하고 소결된 시편들의 밀도와 강도는 매우 낮아서 매우 쉽게 부스러져서 역시 제품을 만들기에 부적절하였다. 이는 공급된 에너지 밀도가 너무 낮아서 소결에 필요한 온도까지 도달하지 못하였기 때문으로 보인다. 따라서 밀도와 강도가 높게 소결될 수 있는 조건을 찾기 위하여 더욱 높은 에너지 밀도에서의 추가적인 실험이 요구된다.

차폐 상자 제작에 이용된 열화나트륨 유리는 통과되는 레이저 에너지의 10% 정도 흡수함을 측정하여 알 수 있었다. 이 흡수되는 에너지로 인하여 큰 열팽창이 발생하여 에너지 밀도를 400J/mm²이상으로 높이자 균열이 발생하여 더 이

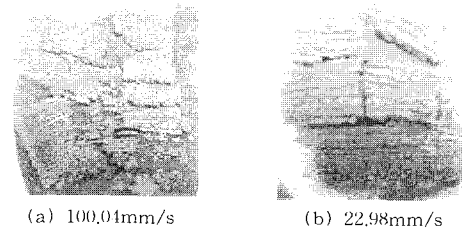


Fig. 8 Sample coupons of single layer sintered within an argon atmosphere at various scanning speeds when laser power is about 220W and scan spacing is 7.4% of beam diameter

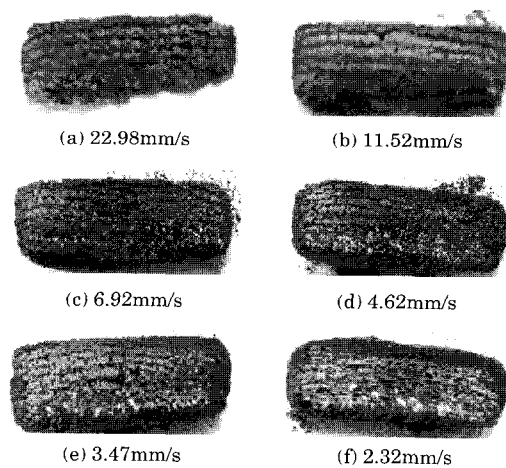


Fig. 9 Sample coupons of single layer sintered within an argon atmosphere at various scanning speeds when laser power is 104W and scan spacing is 20.0% of beam diameter

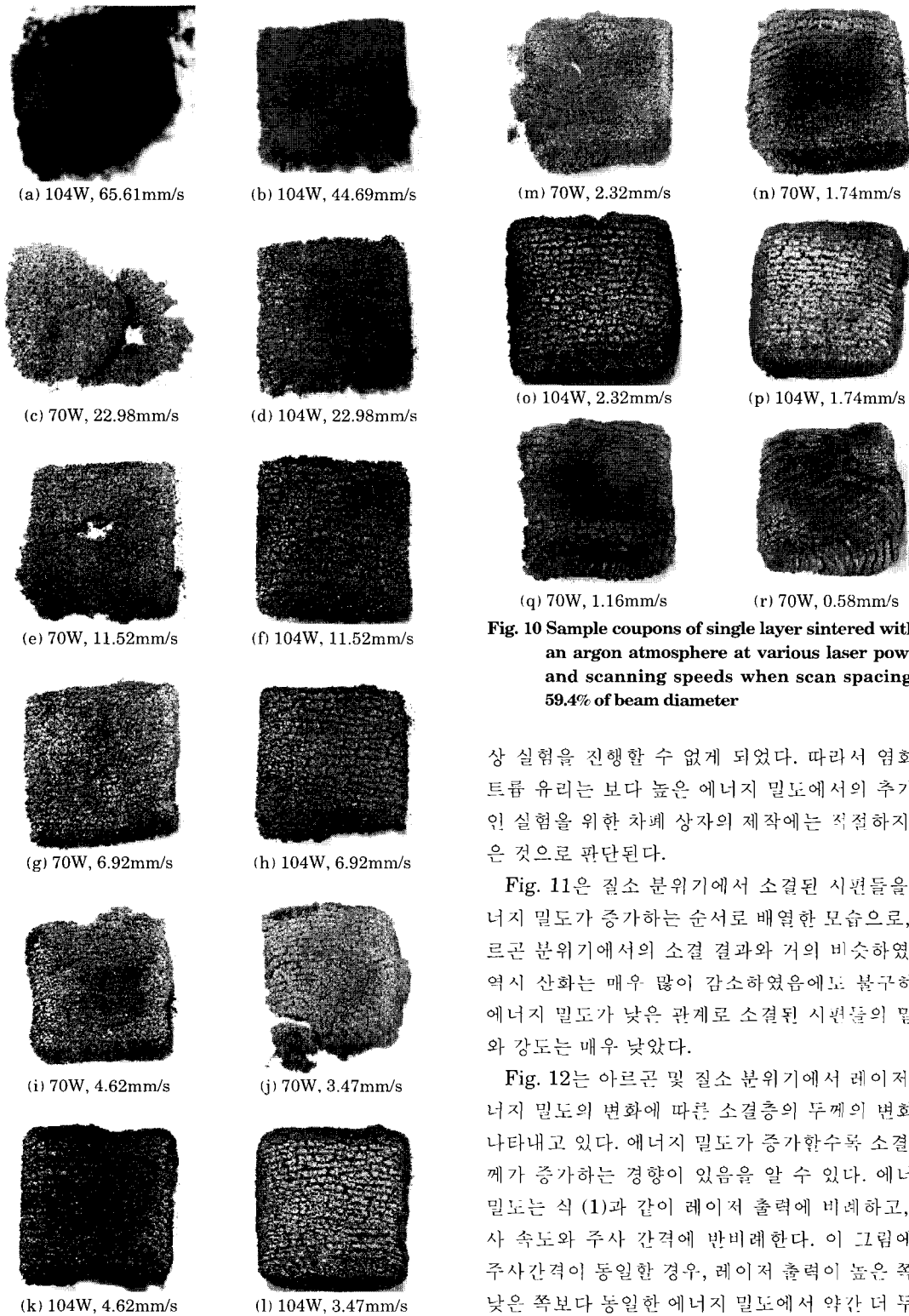


Fig. 10 Sample coupons of single layer sintered within an argon atmosphere at various laser powers and scanning speeds when scan spacing is 59.4% of beam diameter

상 실험을 진행할 수 없게 되었다. 따라서 염화나트륨 유리는 보다 높은 에너지 밀도에서의 추가적인 실험을 위한 차폐 상자의 제작에는 적절하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 11은 질소 분위기에서 소결된 시편들을 에너지 밀도가 증가하는 순서로 배열한 모습으로, 아르곤 분위기에서의 소결 결과와 거의 비슷하였다. 역시 산화는 매우 많이 감소하였음에도 불구하고 에너지 밀도가 낮은 관계로 소결된 시편들의 밀도와 강도는 매우 낮았다.

Fig. 12는 아르곤 및 질소 분위기에서 레이저 에너지 밀도의 변화에 따른 소결층의 두께의 변화를 나타내고 있다. 에너지 밀도가 증가할수록 소결 두께가 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 에너지 밀도는 식 (1)과 같이 레이저 출력에 비례하고, 주사 속도와 주사 간격에 반비례한다. 이 그림에서 주사간격이 동일한 경우, 레이저 출력이 높은 쪽이 낮은 쪽보다 동일한 에너지 밀도에서 약간 더 두껍

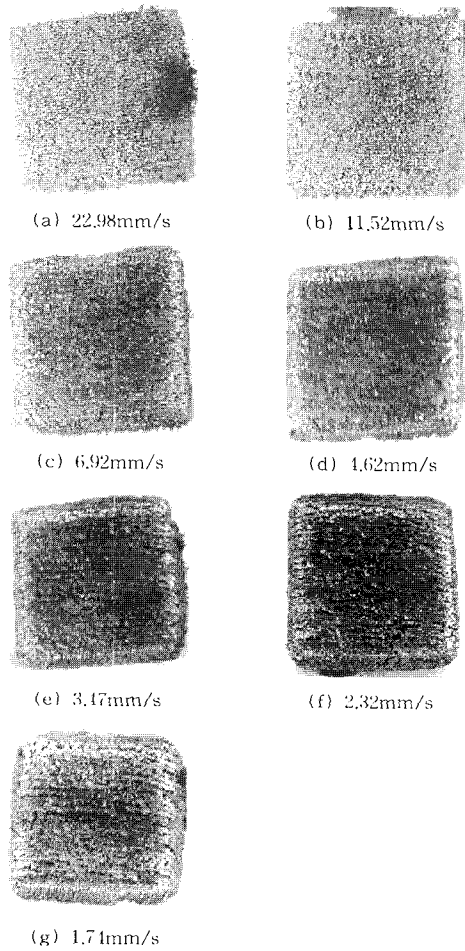


Fig. 11 Sample coupons of single layer sintered within a nitrogen atmosphere at various scanning speeds when laser power is 104W and scan spacing is 59.4% of beam diameter

게 소결되는 경향이 있음을 알 수 있다(○와 □ 비교). 이는 출력이 높은 쪽이 주사속도도 더 빨라서 동일한 시편을 더 빨리 소결하므로 열손실이 덜 발생하기 때문으로 추정된다. 또한 레이저 출력이 동일할 경우, 주사간격이 넓은 쪽이 좁은 쪽보다 동일한 에너지 밀도에서 약간 더 두껍게 소결되는 경향이 있음을 알 수 있다(○와 △ 비교). 이는 주사간격이 좁은 쪽이 에너지를 더 많은 횟수로 나누어 공급하기 때문에 역시 열손실이 발생하기 때문으로 판단된다.

정밀한 제품을 제작하기 위해서는 적절한 밀도와 강도를 가지면서도 소결층의 두께는 가능하면

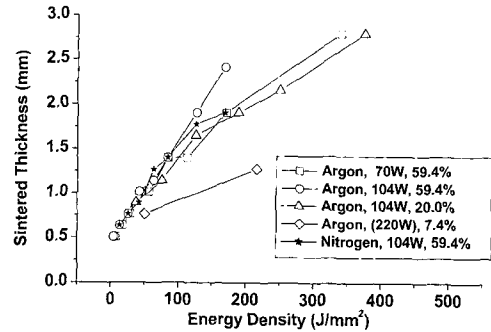


Fig. 12 Thickness of coupons of single layer sintered within an argon and a nitrogen atmosphere at various energy densities

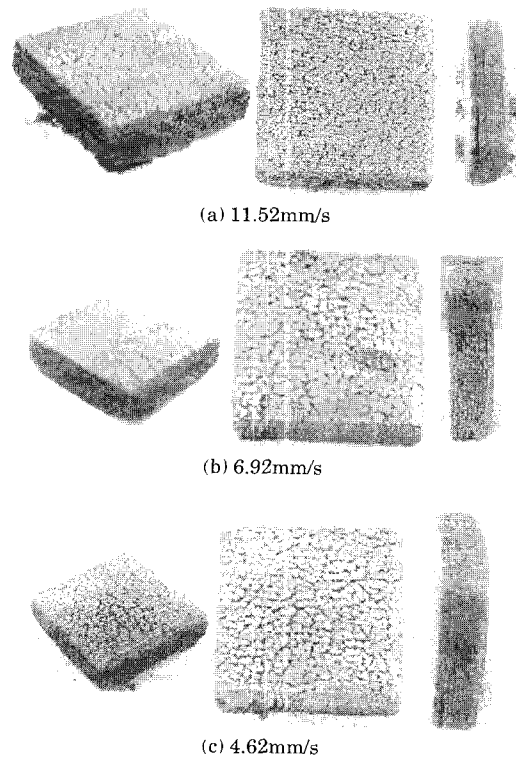


Fig. 13 Sample cubes of ten layers sintered within an argon atmosphere at various scanning speeds when laser power is 104W and scan spacing is 59.4% of beam diameter

얇은 것이 바람직하므로, 최적의 소결 조건은 소재를 국부적으로 용융온도까지 순간적으로 가열할 수 있는 고출력 및 분말의 표면층만 가열하고 공

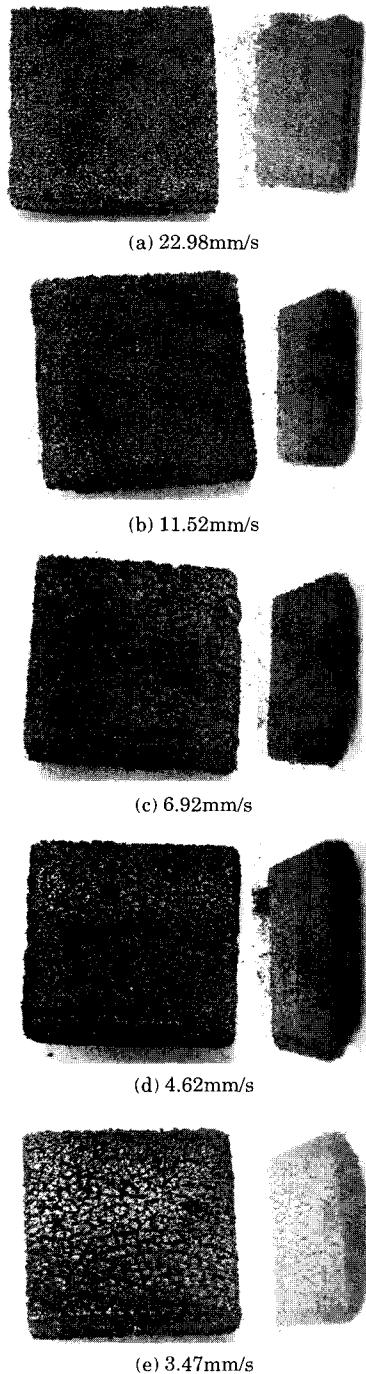


Fig. 14 Sample cubes of five layers sintered within a nitrogen atmosphere at various scanning speeds when laser power is 104W and scan spacing is 59.4% of beam diameter

정 시간을 단축시킬 수 있는 빠른 주사 속도 그리고 적절한 주사간격의 조합으로 결정되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 다층 소결

Fig. 13은 아르곤 분위기에서 10개의 층으로 소결된 육면체 시편들을, Fig. 14는 질소 분위기에서 5개의 층으로 소결된 육면체 시편들을 각각 에너지 밀도가 증가하는 순서로 배열한 모습이다. 에너지 밀도가 높아질수록 가운데 부분이 가장자리보다 더 두꺼워지는 현상이 발생하였으며 예상했던 대로 공급된 에너지 밀도가 낮은 관계로 소결된 각 층들은 서로 강하게 결합되지 못하고 쉽게 분리되었다. 다층 소결 연구는 먼저 최적의 단층 소결 물을 얻을 수 있는 소결 조건을 찾은 다음 계속 수행하여야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

텅스텐 카바이드와 코발트 혼합물의 선택적 레이저 소결 실험을 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 공기 중에서 소결할 때 매우 심한 산화가 발생하였고, 소결된 시편의 밀도와 강도는 매우 낮았다. 아르곤 및 질소 분위기에서는 산화가 급격히 줄어들었으나, 공급된 에너지 밀도가 너무 낮은 관계로 소결된 시편의 밀도는 매우 낮고 매우 쉽게 부스러졌다. 모든 분위기에서 레이저의 에너지 밀도가 높아질수록 소결층의 두께가 증가하였다.

(2) 낮은 에너지 밀도에서 다층으로 소결된 육면체들의 각 층들은 서로 강하게 결합되지 못하고 쉽게 분리되었다.

(3) 쾌속 금형 제작 등에 적용 가능할 정도로 충분한 밀도와 강도를 지닌 소결물을 얻기 위해서는 진공 중에서의 소결 실험 및 고출력 레이저를 이용하여 400J/mm²이상의 에너지 밀도에서의 소결 실험 등 많은 추가적인 실험을 실시하여야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2000학년도 2학기 부경대학교 연구
년 사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

[1] 양동열, 손현기, "쾌속제품(RP)을 위한 쾌속조형기술의 최근동향", 한국정밀공학회지 제17권, 제 10호, pp. 5-10, 2000.

[2] D.T. Pham and R.S. Gault, "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies", Int. J. of Machine Tool & Manufacture, Vol. 38, pp 1257-1287, 1998.

[3] S. Das, J.J. Beaman, M. Wohlert and D.L. Bourell, "Direct Laser Freeform Fabrication of High Performance Metal Components", Rapid Prototyping Journal, Vol. 4, pp. 112-117, 1998.

[4] C. Hauser, T.H.C. Childs, K.W. Dalgarno and R.B. Eane, "Atmospheric Control during Direct Selective Laser Sintering of Stainless Steel 314S powder", Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 265-272, 1999.

[5] C. Hauser, T.H.C. Childs and K.W. Dalgarno, "Selective Laser Sintering of Stainless Steel 314S HC Processed using Room Temperature Powder Beds", Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 273-280, 1999.

[6] L.R. Jepson, J.J. Beaman, D.L. Bourell, B. Jackson, D. McAdams, J. Perez and K.L. Wood,

"Multi-Material Selective Laser Sintering: Empirical Studies and Hardware Development", 2000 NSF Design & Manufacturing Research Conference, 2000.

[7] O. Gillia and D. Bouvard, "Phenomenological analysis of densification kinetics during sintering: application to WC-Co mixture", Materials Science and Engineering, A279, pp. 185-191, 2000.

저 자 소 개



김광희 (金 珉 熙)

1960년 7월생. 1983년 서울대학교 기계설계학과 졸업(학사). 1985년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(박사). 부경대학교 기계공학부 교수. 당학회 회원.



JOSEPH J. BEAMAN, JR.

The University of Texas at Austin(B.S.). The University of Texas at Austin(M.S.). Massachusetts Institute of Technology(Sc.D.). Professor, Mechanical Engineering Department of the College of Engineering at the University of Texas at Austin.