

쾌속 금형 제작을 위한 텅스텐 카바이드와 코발트 혼합물의 선택적 레이저 소결

김광희* · 조셉 비만**

Selective Laser Sintering of WC-Co Mixture for Rapid Tooling

K.H. Kim and Joseph J. Beaman

Abstract

This paper describes the experimental results on direct selective laser sintering of WC-Co mixture for rapid tooling. The experiments were carried out within an air, argon and nitrogen atmosphere. Coupons of single layer were sintered at various laser powers, scanning speeds and scan spacings. As the energy density (energy per unit scanned area) is increased, the thickness of coupons is increased. The main problem took place during sintering within an air atmosphere was severe oxidation of WC-Co mixture. As the laser power is increased and/or scanning speed is decreased, more severe oxidation occurred. Within an argon and nitrogen atmosphere the oxidation is reduced significantly. Experiments on multi-layer sintering were also carried out.

Key Words : Rapid Tooling, Selective Laser Sintering, Tungsten Carbide, Cobalt

1. 서론

쾌속조형(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 개발기간 및 비용을 획기적으로 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 층(layer)에 선택적으로 레이저를 주사하여 부분적으로 분말이 소결 또는 용융되도록 한 후, 그 위에 다시 새로운 층을 쌓아가면

서 원하는 제품을 제작하는 공정이다.⁽¹⁾

전통적인 방법에 의한 금형 제작은 많은 시간과 노력을 필요로 하기 때문에 신속하게 시장 변화에 대처하기 위해서는 쾌속 조형 기술을 응용한 쾌속 금형 제작(Rapid Tooling) 기술의 개발이 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 직접식으로 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 금형

* 부경대학교 기계공학부

** Mechanical Engineering Department, University of Texas at Austin

을 제작하는 방법이다. 간접식은 현재 소형 사출 금형의 제작에 상업적으로 적용되고 있으나, 비교적 저온에서 녹는 금속만 침투시킬 수 있으므로 프레스 금형 등 고강도를 필요로 하는 금형의 제작에는 아직 적용할 수 없다. 강도가 높은 금형을 제작하기 위하여 직접식에 대한 여러 연구가 수행되었으나⁽²⁻⁴⁾ 아직도 많은 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

텅스텐 카바이드는 경도가 매우 높은 장점이 있어서 드릴(drill) 등의 절삭 공구와 금형의 인서트(insert) 등으로 많이 사용되고 있으나 취성(brittleness)이 강한 단점으로 사용에 제한을 받고 있다. 그러나 바인더 역할을 하면서 인성(toughness)을 부여할 수 있는 코발트(cobalt)와 혼합하여 최근 많은 관심을 받고 있는 조성이 점차로 변하는 소재(Functionally Gradient Material)⁽⁵⁾로 제작될 경우 석유 산업 등에서 사용되는 드릴 비트(drill bit)나 금형 등의 제작 및 성능 향상에 획기적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 패속 금형 제작에 적용할 수 있는 조성이 점차로 변하는 소재를 제작하기 위한 준비 단계로서, 일정한 성분비를 가진 텅스텐 카바이드와 코발트 혼합물(WC-Co mixture)의 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 소결 실험을 하였으며, 아르곤 및 질소 분위기에서 다층 소결 실험도 실시하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

본 실험에서는 최대 출력이 500W이고 파장(wave length)이 $10.6\mu\text{m}$ 인 CO_2 레이저 장치(Coherent Everlase 525)를 사용하였으며 초점 직경(spot diameter)은 0.6mm가 되도록 하였다. Fig. 1은 실험 장치의 전체적인 모습으로 오른쪽에 레이저 발생장치, 왼쪽에 소결실(sintering chamber), 그리고 가운데 부분에 컴퓨터 및 제어 장치를 보여주고 있다. Fig. 2는 알루미늄 판으로 제작된 소결실의 모습이다. 아르곤 및 질소 분위기를 만들기 위하여 Fig. 3과 같은 아크릴 판과 염화나트륨(sodium chloride) 유리로 만든 차폐 상자(shielding box)를 이용하였다. 염화나트륨 창을 통하여 레이저가 주사되고 위쪽의 호스를 통하여 아르곤이나 질소 가스가 공급되어 상자의 바닥 쪽으로 빠져나가도록 하였다.



Fig. 1 Selective laser sintering equipment

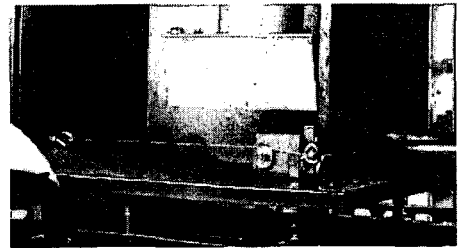


Fig. 2 Selective laser sintering chamber

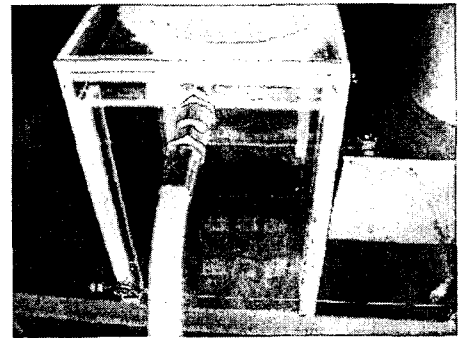


Fig. 3 Shielding box

2.2 실험 재료

본 실험에 사용된 텅스텐 카바이드와 코발트 혼합물은 텅스텐 카바이드 입자의 표면에 코발트가 코팅된 형태이며 코발트가 전체 체적의 16%를 차지한다. 이 혼합물이 보관 중이나 소결 공정 중에 산화되는 것을 막기 위해 다시 표면을 왁스(wax)로 코팅하였다. 실험에 사용된 아르곤 가스와 질소 가스는 소결 중에 소재의 산화가 최소화되도록 각각 3.9%와 4.1%의 수소를 포함하도록 하였다.

2.3 실험 방법

팅스텐 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 용량이 150W인 관계로 그 범위를 넘는 값은 레이저 발생 장치의 전류를 대신 측정하고 환산한 추정치를 괄호 안에 표시하였다. 실험 시간 및 소요되는 아르곤 및 질소를 절약하기 위하여 시편의 크기는 한쪽 변이 약 10mm 정도가 되도록 하였다. 주사 속도는 레이저가 주사되는 시간을 직접 측정하여 계산하였다. 레이저 빔의 직경 및 소결 후 측정된 시편의 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 실온에서 예열은 하지 않고 소결하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 단층 소결

3.1.1 공기 중에서의 소결

Fig. 4, 5, 6은 공기 중에서 소결된 시편을 동일한 주사선사이의 간격에 대하여 에너지 밀도 (주사된 단위 면적 당 레이저 에너지)가 증가하는 순서로 배열한 모습이다. 레이저의 출력이 증가할수록 또는 레이저의 주사 속도가 감소할수록 즉 에너지 밀도가 높아질수록 더욱 심한 산화가 발생하였다. 소결된 시편은 매우 쉽게 부서졌고 밀도도 매우 낮아서 제품을 만들기에는 부적절한 것으로 보인다. 산화 방지를 목적으로 분말에 코팅된 왁스는 큰 도움이 되지 못하였고 심한 그을음이 발생하는 경우도 있었다.

3.1.2 아르곤 분위기에서의 소결

Fig. 7, 8, 9는 Fig. 3의 차폐 상자를 이용하여 만든 아르곤 분위기에서 소결된 시편을 역시 동일한 주사선사이의 간격에 대하여 에너지 밀도가 증가하는 순서로 배열한 모습이다. 공기 중에서 소결된 시편들과 비교해 보면 산화가 급격히 감소하였음을 알 수 있다. 본 연구에서

Table 1 Experimental conditions for single layer sintering

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

Table 2 Experimental conditions for multi-layer sintering

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

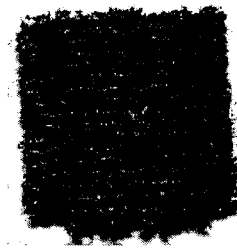


Fig. 4 Sample coupon of single layer sintered within an air when laser power is about 173W, scanning speed is 22.98mm/s and scan spacing is 178.2%

사용된 차폐 상자는 공급되는 가스의 압력으로 외부 공기의 유입을 막는 형태이므로 가스를 절약하기 위하여 가스 공급 유량을 줄이면 산화가 발생하는 것이 관찰되었다. 산화는 급격히 감소하였음에도 불구하고 소결된 시편의 밀도는 매우 낮았고 강도도 매우 약해서 매우 쉽게 부서져서 역시 제품을 만들기에는 부적절한 것으로 보인다. 따라서 더욱 밀도가 높고 강도도 높게 소결될 수 있는 조건을 찾기 위한 추가적인 실험이 필요하다.

3.1.3 질소 분위기에서의 소결

Fig. 10은 질소 분위기에서 소결된 시편을 에너지 밀도가 증가하는 순서로 배열한 모습으로, 아르곤 분위기에서의 소결 결과와 거의 비슷하였다. 역시 산화는 급격히 감소하였음에도 불구하고 소결된 시편의 밀도와 강도는 매우 낮았다.

3.1.4 소결 층의 두께

Fig. 11은 아르곤 및 질소 분위기에서 레이저의 에너지 밀도 및 주사선사이의 간격의 변화에 따른 소결 층의

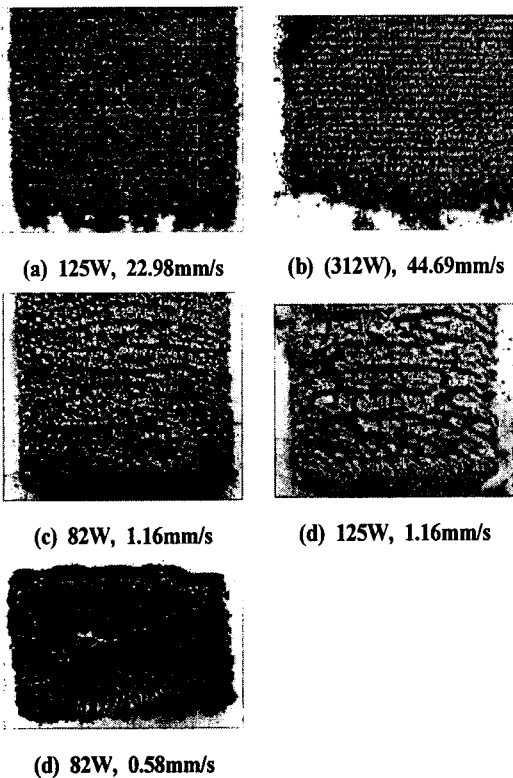


Fig. 5 Sample coupons of single layer sintered within an air at various laser powers and scanning speeds when scan spacing is 118.8%

두께를 나타내고 있다. 에너지 밀도가 증가할수록 소결 두께가 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 동일한 에너지 밀도에 대하여 주사선사이의 간격이 좁을수록 역시 두껍게 소결됨을 알 수 있다. 동일한 에너지 밀도를 얻는 방법으로는 레이저 출력을 증가시키는 방법과 주사속도를 낮추는 방법이 있는데, 주사 속도를 낮추는 방법은 공정시간이 길어지고 주사되는 부분의 주위로 열

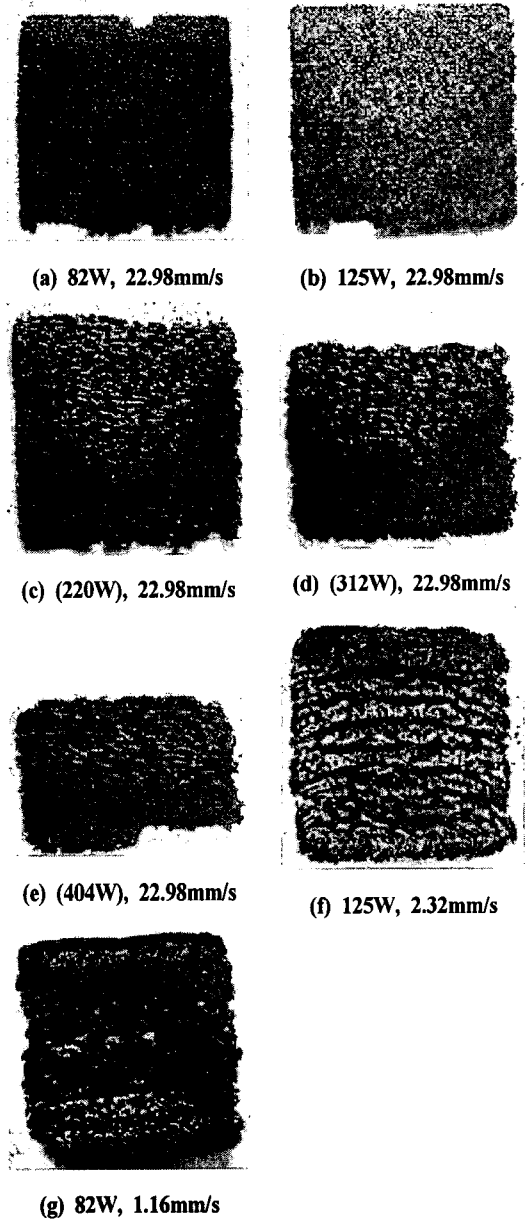
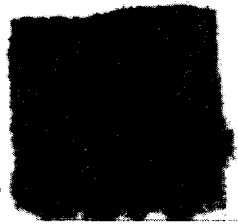


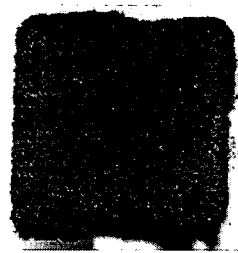
Fig. 6 Sample coupons of single layer sintered within an air at various laser powers and scanning speeds when scan spacing is 59.4%



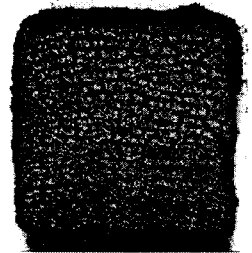
(a) 104W, 65.61mm/s



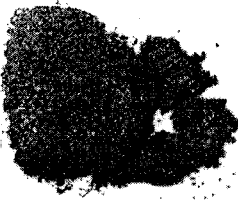
(b) 104W, 44.69mm/s



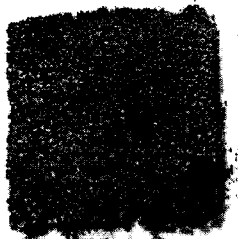
(k) 104W, 4.62mm/s



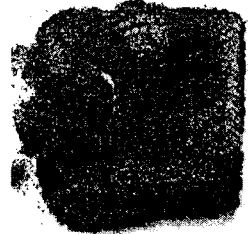
(l) 104W, 3.47mm/s



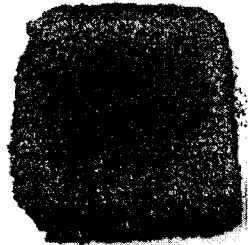
(c) 70W, 22.98mm/s



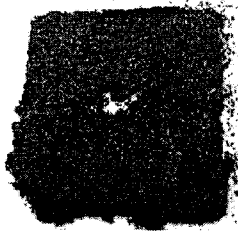
(d) 104W, 22.98mm/s



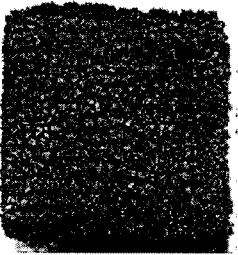
(m) 70W, 2.32mm/s



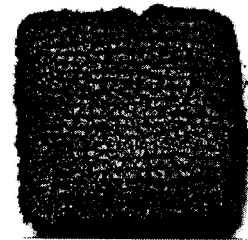
(n) 70W, 1.74mm/s



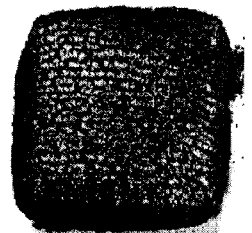
(e) 70W, 11.52mm/s



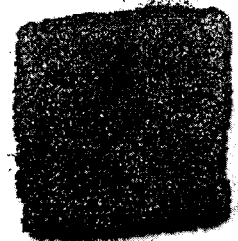
(f) 104W, 11.52mm/s



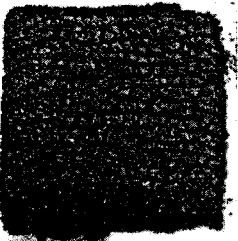
(o) 104W, 2.32mm/s



(p) 104W, 1.74mm/s



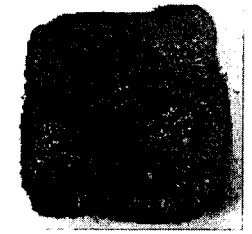
(g) 70W, 6.92mm/s



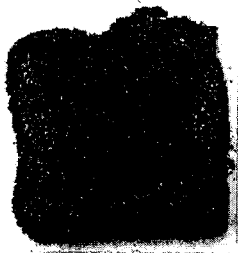
(h) 104W, 6.92mm/s



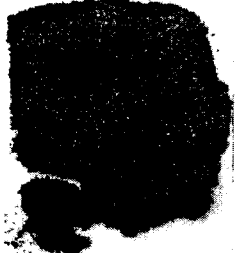
(q) 70W, 1.16mm/s



(r) 70W, 0.58mm/s



(i) 70W, 4.62mm/s



(j) 70W, 3.47mm/s

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

전달이 발생하는 시간이 길어지므로 주위로 많은 열을 빼앗겨서 효율이 저하되는 것으로 이 그림으로부터 추정할 수 있다. 따라서 공정시간이 짧아지고 국부적으로 고온으로 가열할 수 있는 장점이 있는, 레이저 출력을 증가시켜 에너지 밀도를 높이는 방법을 이용하는 것이 유

리할 것으로 보인다.

3.1.5 단층 소결 결과에 대한 고찰

금형같이 비교적 크기가 큰 제품을 경제적으로 제작하려면 공기 중에서 소결할 수 있는 것이 바람직하다. 그러나 본 실험에서는 공기 중에서 소결할 때 매우 심한 산화가 발생하는 것이 확인되었고, 따라서 적절한 밀도와 강도를 갖는 제품을 공기 중에서 소결할 수 있는 조건을 찾기는 매우 어려울 것으로 보인다.

아르곤 및 질소 분위기를 만들기 위해 제작된 차폐 상자는 산화를 억제하는데 비교적 효과적인 것으로 보인다. 그러나 소결된 시편의 밀도와 강도는 매우 낮았다.

아르곤 및 질소 분위기임에도 불구하고 완벽하게 산화를 억제한다고 볼 수는 없으므로 이로 인하여 밀도와 강도가 낮아지는지를 확인하기 위하여 완전 진공 상태에서 소결 실험을 실시하여 그 결과를 비교할 필요가 있다.

차폐 상자 제작에 이용된 염화나트륨 유리는 통과되는

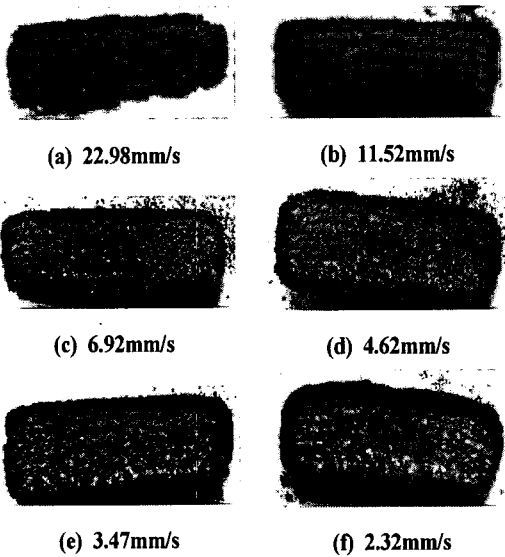


Fig. 8 Sample coupons of single layer sintered within an argon atmosphere at various scanning speeds when laser power is 104W and scan spacing is 20.0%

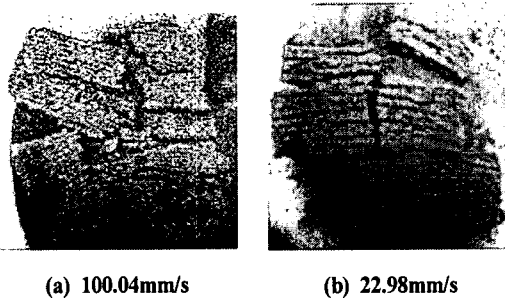


Fig. 9 Sample coupons of single layer sintered within an argon atmosphere at various scanning speeds when laser power is about 220W and scan spacing is 7.4%

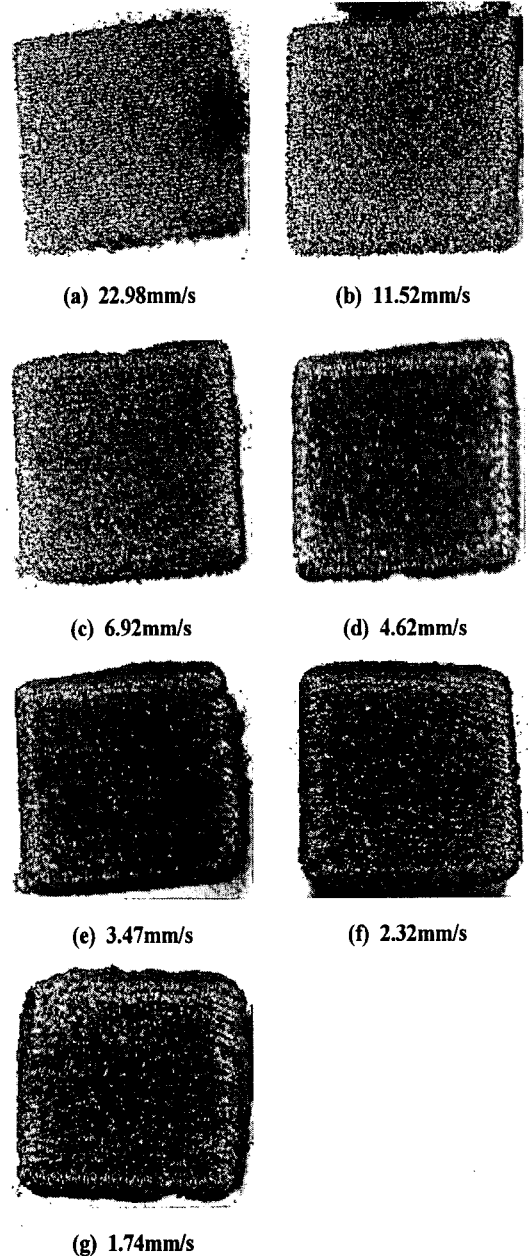


Fig. 10 Sample coupons of single layer sintered within a nitrogen atmosphere at various scanning speeds when laser power is 104W and scan spacing is 59.4%

레이저 에너지의 10% 정도를 흡수하였다. 따라서 큰 열 팽창이 발생하여 출력을 200W 정도로 증가시키고 주사 속도를 낮추자 균열이 발생하여 더 이상 사용할 수 없게 되었다. 따라서 염화나트륨 유리는 차폐 상자의 제작에 적절하지 않는 것으로 보인다.

최소 출력이 300W 이상인 고출력 레이저를 이용하여 높은 에너지 밀도로 소결한 예비실험에서 레이저가 주사된 부분의 분말이 소결되지 않고 움푹 파인 자국만 남는 경우가 발생하였다. 이는 너무 과도한 에너지가 급격히 공급된 결과로 분말에 포함된 수분 등의 불순물이 폭발적으로 기화되는 현상에 의한 것으로 판단된다. 따라서 출력이 높은 장치에서의 추가 실험에서는 수분이나 왁스 등의 불순물을 제거하도록 하여야 할 것으로 보인다. 한 가지 방법으로 분말을 예열하는 방법이 있으나 장치 제작과 비용에 많은 문제점이 있을 것으로 보인다.

3.2 다층 소결

3.2.1 아르곤 분위기에서의 소결

Fig. 12는 아르곤 분위기에서 열 개의 층으로 소결된 육면체 시편들을 에너지 밀도가 증가하는 순서로 배열한 모습이다. 소결된 각 층들이 서로 강하게 결합되지 못하고 쉽게 분리되었다.

3.2.2 질소 분위기에서의 소결

Fig. 13은 질소 분위기에서 다섯 개의 층으로 소결된 육면체 시편들을 에너지 밀도가 증가하는 순서로 배열한 모습이다. 역시 소결된 각 층들이 서로 강하게 결합되지 못하고 쉽게 분리되었다.

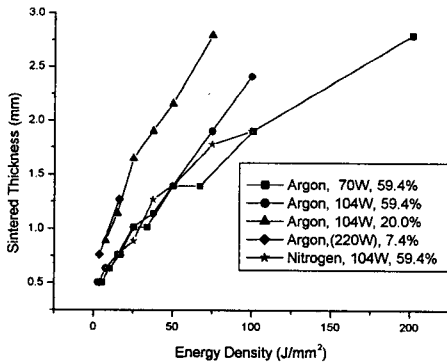


Fig. 11 Thickness of coupons of single layer sintered within an argon and a nitrogen atmosphere at various energy densities and scan spacings

3.2.3 다층 소결 결과에 대한 고찰

충분한 밀도와 강도를 가진 단층의 소결물을 얻을 수 있는 소결 조건을 먼저 찾은 후에 각 소결층들이 강하게 결합된 다층의 소결물을 얻을 수 있는 소결조건을 찾는 연구를 수행하여야 할 것으로 보인다.

4. 결론

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

공기 중에서 소결할 때 매우 심한 산화가 발생하였고, 소결된 시편의 밀도와 강도는 매우 낮았다. 아르곤 및 질소 분위기에서는 산화가 급격히 줄어들었으나, 역시 소결된 시편의 밀도는 매우 낮고 매우 쉽게 부서졌다. 모든 분위기에서 레이저의 출력이 증가할수록 또는 레이저의 주사 속도가 감소할수록 즉 에너지 밀도가 높아질수록 소결층의 두께가 증가하였다.

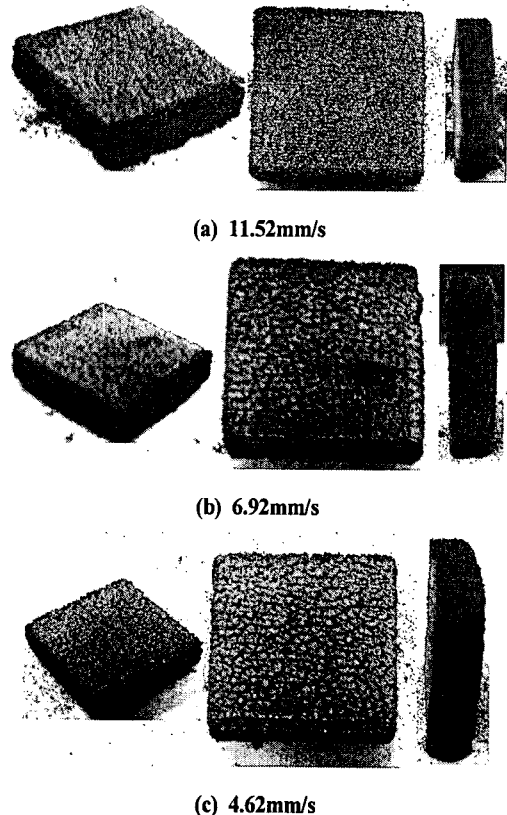
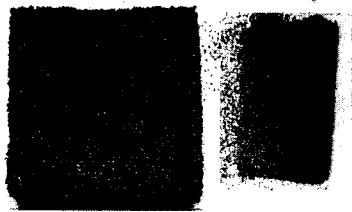
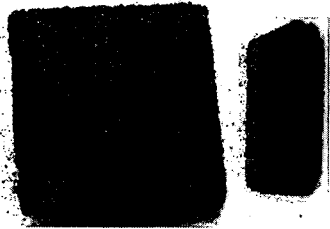


Fig. 12 Sample cubes of ten layers sintered within an argon atmosphere at various scanning speeds when laser power is 104W and scan spacing is 59.4%



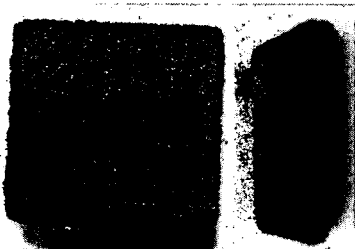
(a) 22.98mm/s



(b) 11.52mm/s



(c) 6.92mm/s



(d) 4.62mm/s

(e) 3.47mm/s

Fig. 13 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%

다층으로 소결된 육면체들의 각 층들은 서로 강하게 결합되지 못하고 쉽게 분리되었다.

패속 금형 제작에 적용 가능할 정도로 충분한 밀도와 강도를 지닌 소결물을 얻기 위해서는 진공 중에서 소결 실험 및 고출력 레이저를 이용한 고 에너지 밀도상태에서의 소결 실험 등 추가적인 많은 실험을 실시하여야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2000학년도 2학기 부경대학교 연구년 사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) Pham, D.T. and Gault, R.S., 1998, "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies", *Int. J. of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 38, pp. 1257~1287.
- (2) Das, S., Beaman, J.J., Wohler, M. and Bourell, D.L., 1998, "Direct Laser Freeform Fabrication of High Performance Metal Components", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, pp. 112~117.
- (3) Huaser, C., Childs, T.H.C., Dalgarno, K.W. and Eane, R.B., 1999, "Atmospheric Control during Direct Selective Laser Sintering of Stainless Steel 314S powder", *Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, pp. 265~272.
- (4) Huaser, C., Childs, T.H.C. and Dalgarno, K.W., 1999, "Selective Laser Sintering of Stainless Steel 314S HC Processed using Room Temperature Powder Beds", *Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, pp. 273~280.
- (5) Jepson, L.R., Beaman, J.J., Bourell, D.L., Jackson, B., McAdams, D., Perez, J. and Wood, K.L., 2000, "Multi-Material Selective Laser Sintering: Empirical Studies and Hardware Development", 2000 NSF Design & Manufacturing Research Conference.