

와이어 송급 레이저 금속 3차원 적층 연구동향

감 동 혁* · 김 영 민* · 김 철 희*[†]

*한국생산기술연구원 용접접합그룹

Recent Studies of Laser Metal 3D Deposition with Wire Feeding

Dong-Hyuck Kam*, Young-Min Kim* and Cheolhee Kim*[†]

*Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

[†]Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received August 25, 2015 ; Revised October 14, 2015 ; Accepted October 19, 2015)

Abstract

Recent developments of Laser metal 3D deposition with wire feeding are reviewed which provide an alternative to powder feeding method. The wire feeding direction, angle and position as well as laser power, wire feeding rate, and deposition speed are found to be key parameters to make quality deposition with high throughput. When compared with the powder feed, the wire feed shows higher material efficiency, higher deposition rate, and smoother surface. Large elongated columnar grains which have epitaxial growth across deposit layers are observed in deposit cross sections. The growth direction is parallel to the thermal gradient during the deposit process. Tensile properties are found to be dependent on the direction due to the anisotropic deposit property. A real-time feedback control is demonstrated to be effective to improve the deposition stability.

Key Words : Wire feeding, Laser, Metal deposition, Microstructure, Mechanical properties, Feedback control

1. 서 론

3D프린팅(printing)은 CAD 디자인 정보를 이용하여 소재를 적층하여 3차원 물체를 제조하는 적층제조(additive manufacturing)공정을 의미하며 기존의 선삭, 밀링, 연삭가공 등을 바탕으로 하는 절삭가공에 대비되는 개념이다. 3D 프린터에서 이용되는 한층씩(layer by layer) 쌓아올리는 형태의 제조방식은 전통가공방식에 비해 형상학적 자유도와 시간과 소량 생산에서 생산비 절감효과를 제공한다. 그리고 시작품단계에서 쾌속조형(rapid prototyping) 뿐만 아니라 최종 부품으로 적용이 확대 추세이다.^{1,2)} 초기 3D프린팅은 주로 녹는점이 낮은 플라스틱 소재를 이용한 쾌속조형 위주였지만 현 추세는 전통적인 제조공법으로 생산이 불가하거나 비효율적인 금속이나 기능성 소재 부품을 생산하는데 초점이 맞춰져 있다. 특히, 항공우주, 에너지,

국방, 의료 등의 분야와 같이 다품종 소량생산 부품에 대한 수요가 높은 경우 금속 3D프린팅을 통하여 생산성을 높이고 비용을 절감할 수 있다. 또한 3D프린팅의 복잡한 형상 제조 능력을 통하여 고성능의 최적화된 디자인 구현이 가능하다.

현재 주로 사용되는 금속 적층제조 공법은 분말적층 용융(Power Bed Fusion, PBF) 공법과 고에너지 직접조사(Direct Energy Deposition, DED) 공법 두 가지로 나뉜다. PBF 공법의 경우, 모재 분말층위에 고에너지의 레이저나 전자빔을 선택적으로 조사하여 용융 결합시키며 층층이 형상을 쌓아 올린다. 이 공법의 경우 형상 자유도와 부품정밀도가 높은 장점이 있지만 선택적 분말 소결 또는 용융 공정 특성상 적층 밀도가 낮고 용융 균일도 확보가 어려워 출력물의 강도와 재현 반복성이 떨어지는 단점이 있다. DED 공법은 금속 분말 등 용가재료를 적층부에 송급하면서 동시에 레이저 등의 고에너지로 용융하여 적층하는 방식이며 PBF 공법

에 비해 강도와 재현반복성이 향상되어 현재 연구가 활발하게 이루어지는 3D프린팅 기술이다³⁻⁵⁾. DED 공법은 생산성이 높고 대형부품적용에 유리하여 현재 고가의 부품에 대한 수리, 재생, 보강을 비롯하여 다품종 소량생산 부품 제조 등의 분야에 활용되고 있다. 특히 최근엔 항공우주에너지 분야의 복잡한 형상의 고기능성 합금 부품제작을 위한 연구개발이 시도되고 있다.

하지만 현재 DED 공법에 주로 이용되는 분말송급 방식은 동축 분말송급 및 용융제어가 용이한 장점을 가지고 있으나 이에 비해 용접에 주로 이용하던 와이어송급 방식은 시스템구성이 다소 복잡해지지만 생산성, 기공, 표면 품질, 재료 효율 측면에서 장점을 가지고 있어 최근 많은 관심을 받고 있다⁶⁻⁸⁾. 따라서 본 논문은 현재까지 진행된 와이어송급을 이용한 DED 공법에 대한 주요 연구 성과에 대해 알아보도록 하고 향후 연구개발 방향에 대하여 논의하고자 한다.

2. 와이어송급 적층

2.1 공정변수의 종류 및 영향

와이어 송급 적층 시스템 구성은 고출력 레이저, 열원의 위치와 모션제어 장치, 금속 와이어 공급 장치 등이 있으며 산화 방지를 위한 불활성 가스 분위기가 조성된다. Fig. 1은 와이어 송급 적층 공정의 기본 개념 및 주요 변수에 관하여 보여주고 있다. 주요 변수로는 레이저출력(laser power, P), 초점거리(focal position, Δz), 초점직경(focal plane diameter, D_f), 용융표면 레이저빔직경(beam diameter at melt pool, D_b), 금속와이어직경(metal wire diameter, D), 와이어송급속도(wire feeding speed, v_w), 와이어송급각도(feeding angle, α), 적층속도(deposition speed, v) 등이 있다.

와이어송급 위치, 방향과 각도는 적층 품질에 중요한 영향을 미친다. Fig. 2와 같이 와이어송급 위치와 방향

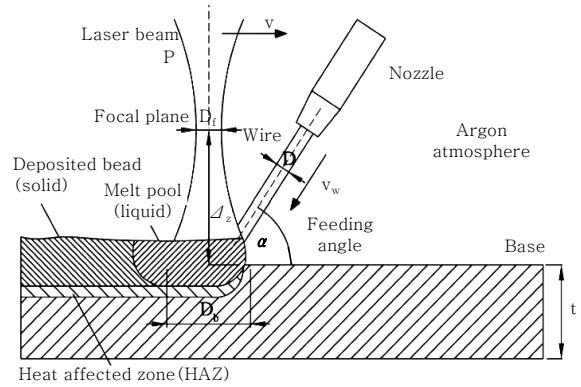


Fig. 1 Schematic drawing of the wire feeding DED process⁹⁻¹¹⁾

은 6가지로 구분된다. W. U. H. Syed 등에 의해 진행된 연구결과^{12,13)}에 의하면 전면송급(front feeding)이 후면송급(rear feeding)에 비해 적층 표면 품질이 우수하고 그에 따른 계면 기공발생 확률이 낮고 결합력이 높음을 확인하였다. 반대로 후면송급의 경우 톱니형상의 표면 거칠기가 발생하므로 적층 품질이 낮아진다. 전면송급에서 와이어 위치가 용융풀의 앞쪽(leading edge), 즉 Fig. 2(c) 일 경우, 레이저 에너지 전달을 방해하지 않으므로 가장 좋은 결과를 보임을 보고하였다. 전면송급의 적층각은 20~60도 범위에서 양질의 적층 형상을 보인다. 60도 이상일 경우 리플(ripple)이 심하게 형성되며, 20도 이하일 경우에도 적층부형상이 불안정해지는 현상이 발생함을 보고하였다.

레이저출력과 적층속도는 적층형상을 결정하는 중요한 변수이다. 즉, 레이저출력이 증가할수록 그리고 적층속도가 감소할수록 단위시간 단위면적 당 에너지가 증가하므로 와이어가 용융되는 양이 증가한다. S. H. Mok 등의 연구보고¹⁴⁾에 의하면 적층두께에 대한 영향은 적층속도가 레이저출력에 비해 크지만, 적층 폭에 대한 영향은 레이저출력이 적층속도에 비해 크다. 또한

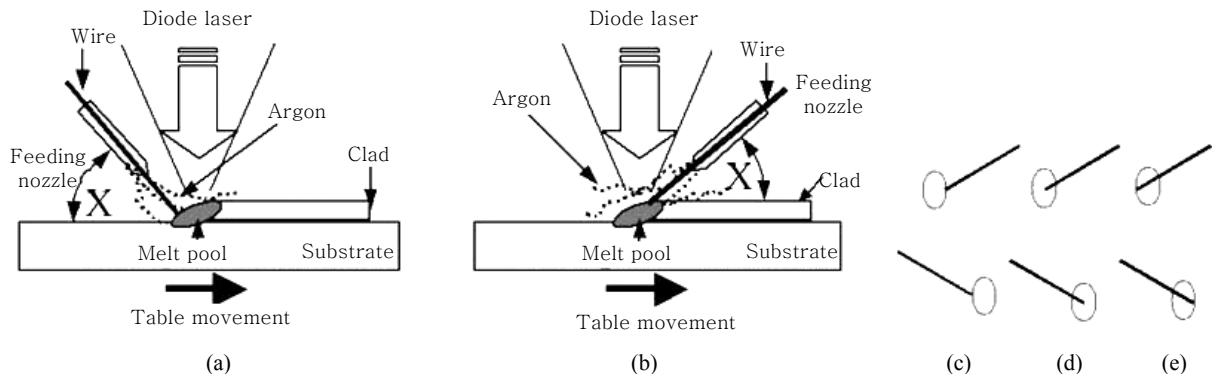


Fig. 2 (a) front feeding, (b) rear feeding, (c) wire placed at leading edge, (d) wire placed at the centre and (e) wire placed at the trailing edge of the melt pool (top row is for rear feeding and bottom row is for front feeding)¹²⁾

Table 1 Summary of experimental setups for laser metal deposition with wire feeding

Processing Parameters	Brandl et al. ⁹⁻¹¹⁾	Syed et al. ¹²⁻¹³⁾	Mok et al. ¹⁴⁻¹⁵⁾	Hussein et al. ¹⁶⁾
Deposition material	Ti-6Al-4V	STS 316L	Ti-6Al-4V	Waspaloy
Substrate material	Ti-6Al-4V	Mild steel	Ti-6Al-4V	Waspaloy
Substrate thickness, t [mm]	6.35	5	10	10
Laser type	3.5kW, Nd:YAG	1.5kW, Diode	2.5kW, Diode	2kW, Diode
Laser power, P [kW]	1.75~3.5	1.1	1.2~2.06	1
Beam size @melt pool, Db[mm]	~4.1Φ	2.5×3.5	2×7	2×6
Motion control	6-axis robot	x-y CNC, manual z	4-axis CNC	CNC
Metal wire diameter, D [mm]	1.2	0.8	1.2	1.2
Wire feeding direction	Front	Front	Front	Front
Wire feeding position	Leading edge	Leading edge	Leading edge	Leading edge
Feeding angle, α [°]	55	20, 50	45	45
Wire feeding speed, vw[mm/s]	15~160	26.5	16.6~33.3	25
Deposition speed, v [mm/s]	7.5~40	4	0.83~5	1.7
Shielding Gas	Ar	Ar	Ar	Ar

가열과 냉각 이력 또한 레이저출력과 적층속도에 의해 결정된다. 레이저출력이 감소하거나 적층속도가 증가하면 용탕 냉각을 위한 시간이 감소하므로 입자(grain) 크기가 작아지며 이에 따라 강도(또는 경도)가 증가한다. 따라서 생산성뿐만 아니라 출력물의 물성을 고려하여 해당 변수를 결정할 필요가 있다.

Table 1은 선행된 와이어송급 DED 공법의 선행연구의 공정 조건을 요약한 내용이다. 레이저빔직경(D_b)은 공통적으로 와이어 직경에 비해 충분히 크게 설정되었다. 그 이유는 와이어와 레이저빔의 상대위치 허용오차를 여유 있게 함으로써 와이어 용융을 안정적으로 유지하기 위함이다. 또한 공통적으로 적층간 냉각시간을 뒤서 과열을 방지하고 적층을 보다 안정화하였다. 한편, 아크 열원에 비해 레이저의 고밀도 열원은 열 충격을 최소화 하고 예열을 필요하지 않으며 초점 사이즈가 작아 정교한 와이어 용융 작업이 가능하다. 따라서 불필요한 열발생이 최소화되며 열공급이 매우 안정적인 장점이 있다.

2.2 와이어송급과 분말송급 비교

Fig. 3에서와 같이 송급속도에 따른 적층속도에 관한 평가결과를 보면 분말송급의 재료효율은 30 % 이하인데 반해 와이어송급은 100 %이다. 그리고 표면조도를 비교했을 때 공정 조건에 따른 값의 변동이 있지만 대체적으로 분말송급의 경우 70~90 μm, 와이어송급의 경우 40~60 μm 수준임을 확인했다. 분말송급 시 표면 조도가 상대적으로 높은 이유는 분말이 불완전 용융이

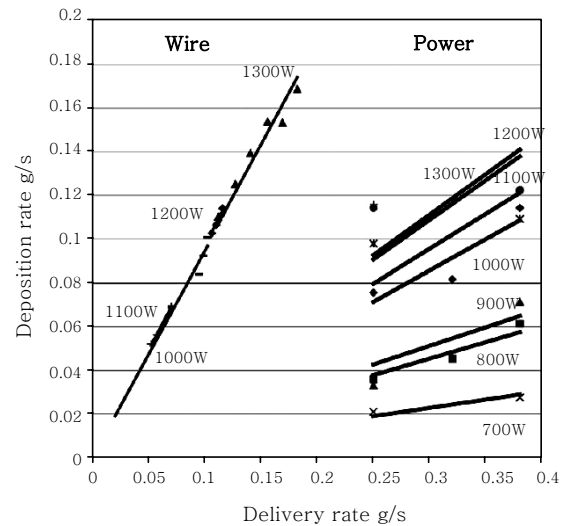


Fig. 3 Deposition rate vs. material delivery rate at different laser powers for wire and powder feed deposition¹³⁾

나 알갱이 상태로 적층되면서 표면에 요철을 형성하기 때문이다. 또한 이러한 표면 거칠기는 적층 계면 간 기공이 형성될 가능성을 높이므로 출력물 밀도 측면에서 분말적층이 상대적으로 불리하다. 와이어송급과 분말송급에 따른 미세조직형상은 유의미한 차이가 없으므로 보고되었다. 두 경우 공통적으로 밀판(substrate)과 인접한 첫 번째 적층의 결정 크기가 작으며 적층 층이 밀판에서 멀어질수록 결정크기가 커진다. 이것은 밀판에 가까울수록 밀판을 통한 열전도속도, 즉 냉각속도가 빨라져서 결정이 미세해 지기 때문이다.

2.3 미세조직과 기계적 물성

와이어송급을 이용한 Ti-6Al-4V 합금의 적층연구¹⁵⁾에서 출력물의 미세조직을 분석한 결과를 요약하면 아래와 같다.

Fig. 4와 같이 출력물의 미세조직은 연신된 주상 결정립이 적층 경계면을 가로질러 모재의 결정립 방향과 일치하는 에피텍셜(epitaxial) 성장함을 확인하였다. 여기서 성장 방향은 분말적층 연구에서 보고된 것과 같이 온도의 기울기와 평행하다. 즉, Fig. 4의 적층부 단면의 기울어진 입자 형상이 관찰되며 이는 분말송급 적층 연구에서 관찰된 것과 같이 적층 중 가열과 냉각 방향에 의해 결정된다. 적층 공정에서 이전 층의 입자는 부분적으로 녹아서 다음 적층의 입자 성장 핵 역할을 하고 냉각 방향에 따라 에피텍셜 성장을 한다. 적층 층간 경계역(band region)이 확인되며 이 역시 분말송급 적층 연구에서 관찰되는 것과 같이 재용융과 열이력에 의한 것이다. 레이저에너지가 높고 적층속도가 낮은 경우 경계역이 두껍게 형성되고 조대한 미세조직을 가지며, 레이저 에너지가 낮고 적층속도가 빠를수록 경계역이 얇고 미세한 조직을 가진다.

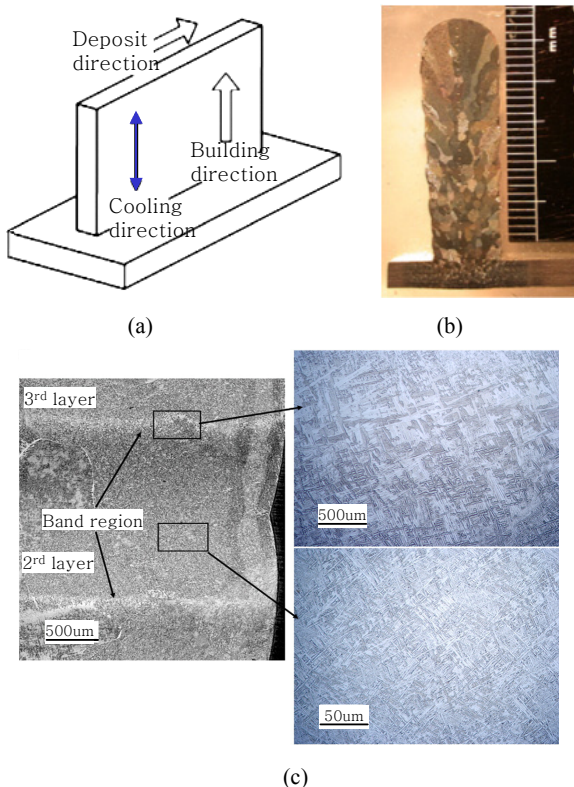


Fig. 4 (a) Schematic of the wall building strategy and (b) cross-section of the deposited single bead wall and (c) the microstructure of band region and the nominal region observed in the as deposited sample¹⁵⁾

공정 조건에 따른 경도 차이는 10 % 이내임을 확인하였고 적층속도가 증가함에 따라 또는 레이저 에너지가 감소함에 따라 경도가 증가한다. 이는 냉각속도 증가로 인해 입자 크기가 감소하기 때문이다. 그리고 Fig. 4의 적층방향(building direction)이 공정진행방향(deposit direction)에 비해 항복강도와 인장강도 모두 높은 것으로 보고하였다. 탄성계수 역시 적층방향(building direction)이 공정진행방향(deposit direction)에 비해 높은 값을 가짐을 보고하였다. 이와 같이 인장 특성이 적층 방향으로 더 좋은 이유는 앞에서 언급한 결정 성장 방향이 이방성을 가지기 때문이라고 설명하였다.

B. Baufeld 등의 Ti-6Al-4V 와이어적층 연구논문¹⁷⁾에서 역시 인장시험에서의 연신율도 이방성을 가지고 있으며 이 또한 결정성장방향에 따른 이방성과 관련이 있다고 설명한다. 공정진행방향으로의 인장시험은 가늘고 긴 초정 β-결정립의 성장방향과 거의 수직인 방향으로 적층방향에 비해 많은 결정립계를 가지고 있다. 많은 양의 결정립계는 파괴의 잠재적인 원인이라 보고되고 있기 때문에 이로 인해 공정진행방향의 연신율이 적층방향의 연신율에 비해 낮을 것으로 추정하였다. 피로강도의 경우에도 적층방향이 공정진행방향에 비해 낮은 값을 가져 보다 쉽게 피로 파괴됨을 보고하였다. 이러한 피로강도는 항복강도가 높거나 전위의 슬립(slip) 거리가 감소될 때 증가한다고 하는데 그 중에서도 전위의 슬립거리 감소가 좀 더 중요한 변수로 작용한다고 한다. 그리고 레이저 와이어 적층 공정은 비균질한 핵 생성과 방향성을 지닌 급속 응고 등의 특성을 가진 일종의 주조 형태로 냉각속도가 빠르기 때문에 일반적인 주조에 비해 치밀한 조직을 가진다. 따라서 단조와 같이 높은 강도를 가지며, 냉각속도가 높을 경우 낮은 냉각속도에 비해 높은 강도를 가진다. 이것은 냉각속도가 높을 경우 미세조직이 마르텐사이트, 거대한 α 층상구조, 그리고 비평형 조성을 가지는 α 층상구조가 될 수 있고 이러한 미세구조로 인해 고용강화와 전위강화 현상이 발생하기 때문이라고 추정하고 있다.

2.4 공정 모니터링 및 실시간 제어

와이어송급 방식은 와이어와 용융풀과 충돌 위험이 있고 와이어가 불완전하게 용융될 경우 공정 불량 발생 등의 문제점이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 실시간 피드백 제어를 적용하는 것은 좋은 방법이 될 수 있다. A. Heralic 등의 연구논문¹⁸⁾에서는 실시간 피드백 제어를 통한 와이어송급 적층의 공정 안정성과 적층 품질 향상을 검증하였다. Fig. 5와 같이 용

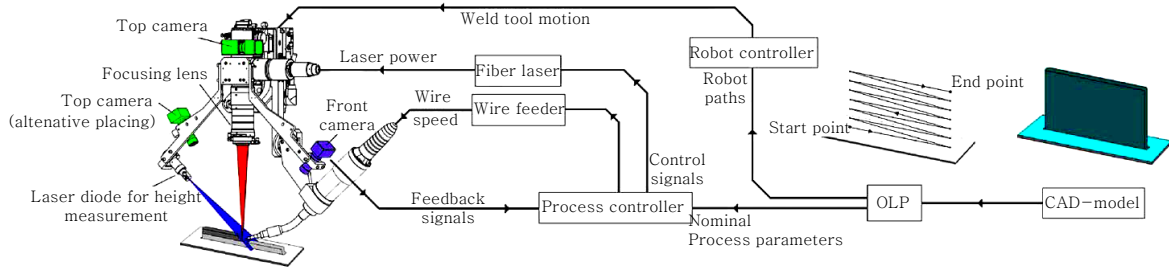


Fig. 5 Illustration of the robotized laser metal-wire deposition system with feedback control¹⁸⁾



Fig. 6 Multi-layered single bead wall deposited with automatic process control (The length of the wall: 215mm)¹⁸⁾

탕의 폭과 적층 높이 모니터링을 위해 2개의 카메라와 1개의 레이저 다이오드를 사용하였다. 여기서 상부에 설치된 카메라를 통해 얻어진 용융풀의 영상 경계면을 확인하여 폭을 측정하였다. 레이저 다이오드의 라인 빔(line beam)을 용탕에 투사한 상태에서 전면부에 설치된 카메라로 이미지를 촬영하고 영상 분석 알고리즘을 통하여 높이를 측정하였다. 이때 카메라에 밴드패스 필터를 설치하여 측정정밀도를 높였다. 또한 용융풀의 폭은 레이저 출력에 주로 영향을 받고 높이는 와이어 송급 속도에 주로 영향을 받는다는 실험적 근거를 가정으로 PI 제어기를 제작하였다. Fig. 6과 같이 용탕의 폭과 적층 높이를 일정하게 유지하면서 적층이 가능하다는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 리뷰 논문에서는 와이어송급 DED공정의 공정 특성, 와이어송급과 분말송급 공정 비교, 미세조직 및 기계적 물성, 그리고 공정 모니터링 및 실시간 제어에 관한 선행 연구결과를 요약하였다. 와이어송급 방식은 높은 생산성과 재료효율, 낮은 산화오염 위험성 등의 장점을 가지고 있지만 낮은 형상 정밀도와 자유도로 인해 제한적으로 활용되고 있다. 그러나 대형부품의 경우 타 방법으로 적용이 어려우므로 현재보다 생산성 및 품질을 향상시킬 경우 적용이 가장 유리한 공법이다.

References

1. J. J. Beaman and C. R. Deckard, Selective laser sintering with assisted powder handling, *US patent no. 4938816*, (1990)

2. D. L. Bourell, H. L. Marcus, J. W. Barlow, J. J. Beaman and C. R. Deckard, Multiple material systems for selective beam sintering, *US patent no. 5076869*, (1991)
3. J. Mazumder, J. Choi, K. Nagarathnam, J. Koch, D. Hetzner, The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components, *JOM*, 49-5 (1997), 55-60
4. C. Atwood, M. Griffith, L. Harwell, E. Schlienger, M. Ensz, J. Smugeresky, T. Romero, D. Greene and D. Reckaway, Laser engineered net shaping (LENS™) : a tool for direct fabrication of metal parts, *Proceedings of the ICALEO 1998, Orlando, FL, USA, 1998*, 48-56
5. G. K. Lewis and E. Schlienger, Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition, *Materials & Design*, 21-4 (2000), 417-4233
6. E. Beyer, P. Herwig, S. Hunze, A-F. Lasagni, M. Lutke, A. Mahrle, S. Nowotny, J. Standfuß and S. Thieme, High Power Laser Materials Processing, *Proceedings of the 31th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), 2012*, Paper No. OP2
7. S. Kaierle, A. Barroi, C. Noelke, J. Hermsdorf, L. Overmeyer and H. Haferkamp, Review on Laser Deposition Welding: From Micro to Macro. *Physics Procedia*, 39 (2012), 336-345
8. Y.-N. Ahn and C. Kim, Comparison of powder feeding and wire feeding in laser cladding, *Journal of KWJS*, 31-4 (2013), 13-16 (in Korean)
9. E. Brandl, F. Palm, V. Michailov, B. Viehweger and C. Leyens, Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire, *Materials & Design*, 32(1), 2011, 4665-4675
10. E. Brandl, V. Michailov, B. Viehweger and C. Leyens, Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads, *Surface & Coatings Technology*, 206 (16), 2012, 1120-1129
11. E. Brandl, A. Schoberth and C. Leyens, Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM), *Materials Science and Engineering A*, 532 (2012), 295-307
12. W. U. H. Syed and L. Li, Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition, *Applied Surface Science*, 248-1

- (2005), 518-524
13. W. U. H. Syed, A. J. Pinkerton and L. Li, A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping, *Applied Surface Science*, 247-1 (2005), 268-276
 14. S. H. Mok, G. Bi, J. Folkes, I. Pashby, Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics, *Surface & Coating Technology*, 202-16 (2008), 3933-3939
 15. S. H. Mok, G. Bi, J. Folkes, I. Pashby, J. Segal, Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part II: Investigation on the mechanical properties, *Surface & Coating Technology*, 202-19 (2008), 4613-4619
 16. N. I. S. Hussein, J. Segal, D. G. McCartney, and I. R. Pashby, Microstructure formation in Waspalloy multi-layer builds following direct metal deposition with laser and wire, *Material Science and Engineering A*, 497 (2008), 260-269
 17. B. Baufeld, E. Brandl, and O. Van der Biest, Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, 211-6 (2011), 1146-1158
 18. A. Heralic, A.-K. Christansson, M. Ottosson, and B. Lennartson, Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements, *Optics and Lasers in Engineering*, 48-4 (2010), 478-485