직접분사 적층제조 공정을 이용한 탈황 내마모 펌프부품의 보수재생 연구

김 성 욱^{*,†} · 임 성 록^{*} · 천 창 근^{*}

^{*}포항산업과학연구원 산업소재연구그룹

Repair Properties of Desulfurization Pump Part Layers by Direct Energy Deposited Additive Manufacturing Process

Sungwook Kim^{*,†}, Sunglock Lim^{*} and Chang-Keun Chun^{*}

^{*}Industrial material research group, RIST, Pohang, 37673, Korea

[†]Corresponding author : sungwook@rist.re.kr

(Received December 9, 2019 ; Revised January 17, 2020 ; Accepted February 3, 2020)

Abstract

Numerous pump systems are applied to industries including power plants; among these, desulfurization transfer pumps are severely eroded by slurry, and require periodic replacement of internal impeller and wear plate parts. When directed energy deposition(DED) in the additive manufacturing process is used to repair parts, it is possible to repair entire parts or sections of them. If there is no discontinuity or inventory of parts, this process is expected to be utilized often in the future.

In this study, a deposition test and physical property evaluation were carried out using the DED process to repair wear resistance pump parts for desulfurization transfer. Although it is necessary to develop alloys with excellent deposition conditions and compositions similar to those of the base material, this study conducted experiments on commercially available alloy materials. As a result of evaluating various materials, it was found that a powder composed of an iron-based system had characteristics similar to those of the material to be repaired.

Key Words : Additive manufacturing, DED(Directed Energy Deposition, Abrasive pump parts, High-chrome white cast iron

1. 서 론

발전소를 비롯한 산업계에는 다양한 펌프시스템이 적용되고 있으며, 그 중에서 탈황 이송용 펌프는 슬러리에 의한 에로존(erosion)이 심하게 발생되어 내부 임펠러(impeller) 및 내마모판(wear plate) 부품의 주기적인 교체가 요구되고 있다¹⁾. 펌프 부품의 경우 표면에서 주로 마모 및 탈락이 발생하고 있으며, 이러한 부위의 보수 및 재생을 통하여 부품의 수명을 연장할 수 있다. 부품의 보수 및 재생을 위한 공정으로 주로 용접/접합 및 클래딩이 시도되었으나²⁻⁴⁾, 최근 적층제조, 3D프린팅 기술의 개발로 정밀부품의 국부적인 재생도 가능하

게 되었다⁵⁾.

금속 분야에 활용되고 있는 적층제조(AM)공정은 크게 분말베드용융(PBF, Powder Bed Fusion) 방식과 직접분사적층(DED, Directed Energy Deposition) 방식이 있으며, 사용 중 부품의 보수 및 재생 분야에는 직접분사적층 공정이 주로 적용된다⁶⁾. 특히, 직접분사적층 공정 이용시 부품의 전체 및 일부분 적층이 가능하며, 부품단종 및 재고부품이 없는 경우 부품의 공급 기간 단축 등의 장점이 있어 향후 많은 활용이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 발전용 펌프부품의 보수를 위한 직접 분사적층형 금속 3D프린팅 공정의 적용 가능성을 파악하고자 탈황 이송용 내마모 펌프 부품의 보수 적층시험

및 물성평가를 진행하였고, 모재와 유사한 특성을 가지는 소재를 선정하고자 하였다. 모재와 유사한 조성계를 가지면서 적층이 우수한 합금개발이 필요할 것으로 사료되나, 현 시점에서는 시중에서 확보가능한 상용 합금 소재를 대상으로 실험을 진행하였으며, 향후 추가적인 조성계의 시험평가를 통하여 적층부의 물성향상을 개선해 나가고자 한다.

2. 실험방법

2.1 보수대상 부품 및 소재

발전용 펌프부품의 보수를 위해 Fig. 1의 웨어플레이트(wear plate)에 동종 및 이종 조성계의 분말소재를 적층하고, 보수재생부의 특성을 평가하였다. 적층시험을 위한 기판은 폐기된 웨어플레이트를 가공하여 사용하였다. 내마모성을 높이기 위한 기판의 주요성분은 28%Cr-3%C-Fe이며, Fig. 2와 같이 미세조직은 철계 기지에 25vol% 크롬 탄화물, $(Fe,Cr)_7C_3$ 로 구성되어 있다.

적층용 소재는 내마모 부품과 동종 및 이종소재를 적용하였으며, 동종소재는 Fig. 3은 웨어플레이트 스크랩을 이용하여 가스아토마이징 후 분말로 제조하였다. 그림은 제조분말의 형상이며, 입도분포는 51~105 μ m (D50 73 μ m)이다.

Fig. 1 Damaged wear plate of pump parts

Fig. 2 Microstructure of wear plate material

Fig. 3 28%Cr-Fe Powder from wear plate scrap

Table 1 Chemical compositions(wt.%)

CORRAX	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ai	O	Fe
	0.03	0.3	0.3	12.0	9.2	1.4	1.6	0.02	Bal.
M789	C			Cr	Ni	Mo	Ai	Ti	Fe
	0.02			12.2	10.0	1.0	0.6	1.0	Bal.
Stellite6	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Fe	Co
	1.0	1.1	0.5	28.2	1.9	0.9	5.1	2.8	Bal.

Table 2 Flow rate of applied powders

	1	2	3	평균 값	유동도 (sec/50g)
28Cr-Fe	20.708	20.056	20.839	20.56	13.63
Stellite6	21.124	21.022	21.067	21.06	13.08
CORRAX	21.668	21.682	21.604	21.66	13.45
M789	21.131	21.158	21.172	21.15	13.52

이종소재는 내마모용 상용분말을 적용하였으며, 철계(M789®, CORRAX®-Voestapline제조) 및 코발트계(Stellite6®-Kennametal제조)를 적용하였다. Table 1과 2는 각각 적층용 분말의 화학조성과 ASTM B964 기준으로 유동도를 평가한 결과이며, 각 분말의 유동도는 비슷한 수준인 것으로 파악되었다.

2.2 직접분사 적층제조 장치 및 공정변수

Fig. 3은 내마모 펌프부품 웨어플레이트의 적층시험을 위해 적용한 직접분사적층(Directed Energy Deposition, DED) 방식의 3D프린팅 장치이며, 병렬 5축(Parallel Kinematic Machine, PKM) 적층방식이 적용되었다.

주요 공정변수는 레이저 출력 및 분말 송급량이며, 사전 예비실험을 진행하여 최적 공정조건으로 400W, 3g/min 으로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 펌프내 이송유체 분석

탈황 슬러리 이송펌프 내 마모 및 부식환경 파악을

Fig. 4 DED type 3D printing system(maxrotec, korea)
power: 4kW(IPG fiber laser)

Fig. 5 Size distribution of slurry particles

Fig. 6 XRD result of slurry in the pump

위해 발전소에서 유체를 채취하여 분석을 진행하였다. 유체 내에는 탈황반응을 위한 슬러리 물질들이 혼합되어 있으며, 입도 분포를 통한 슬러리는 Fig. 5와 같이 16~101 μ m(D50 50.6 μ m)수준인 것으로 분석되었다. 슬러리 물질에 대한 XRD분석결과는 Fig. 6과 같으며, 주로 SiC 및 Al₂O₃로 이루어져 있다. 이들의 입자들이 펌프 내에서 유동하면서 침식(erosion)반응을 통하여 앞서 Fig. 1에서와 같은 파손을 발생하는 것으로 파악되었다.

3.2 펌프부품 동종소재 적층결과

웨어플레이트 스크랩(28%Cr-Fe)으로 제조된 분말

Fig. 7 Deposited layers by 28%Cr-Fe powder

Fig. 8 Fractured surface of 28%Cr-Fe deposited layer

을 이용하여 보수적층을 진행한 결과는 Fig. 7과 같으며, 총 5패스 높이로 적층 후 응고수축하면서 기판과의 계면분리 및 적층부의 균열이 발생한 것을 볼 수 있다.

계면 분리가 발생한 적층부에 대하여 SEM 분석을 진행한 결과, Fig. 8과 같이 벽개파면을 관찰할 수 있으며, 이는 적층부와 모재 간 희석(dilution)이 거의 발생하지 않았음을 의미한다.

보수대상재는 탄소함량이 3%정도로 매우 높고, 레이저 적층에 의한 급랭 조건이므로 용융적층에 의한 동종소재의 보수는 매우 어려운 것으로 판단되었다.

3.3 상용소재 적층결과

상용소재는 철계 M789®, CORRAX® 및 코발트계 Stellite6® 분말을 이용하여 Table 3과 같은 공정조건으로 적층하였으며, Fig. 9와 같이 35X35, 1t높이로 적층하였다.

Fig. 10은 각 소재별 적층부의 단면 미세조직을 나타낸 것으로 적층 간 패스에 의한 경계면을 관찰할 수 있으며, 빠른 냉각에 의한 셀형 수지상을 형성하고 있

Table 3 Process parameters of applied deposition

Laser powder (Watt)	Powder feeding rate(g/min)	PKM feeding rate (mm/min)	Carrier gas rate (L/min)	Shielding gas rate(L/min)
400	3	700	3	6

Fig. 9 Deposited layers by DED system

Fig. 10 Microstructure of deposited layers

다. M789 적층부에서는 일부영역에서 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세한 기공이 형성되어 있는 것으로 관찰이 되었다. 이러한 미세 기공이 기계적 물성에 큰 영향은 미치지 않을 것으로 판단되나, 피로물성이 요구되는 경우에는 HIP처리와 같은 후처리를 통해 제거할 필요가 있다.

한편, 후열처리에 의한 물성변화를 파악하기 위해 적층소재의 응력제거 열처리 온도인 570°C , 4시간 열처리 후 물성을 비교하였다.

3.4 상용소재 적층부의 마모도 평가결과

내마모 부품으로의 보수 적용 가능성을 평가하기 위해 적층부의 마모시험을 실시하였다. 시험장비는 Neo-Tribo MPW110을 이용하여 BOD(Ball on disk)방식으로 평가하였으며, 마모조건은 SiC ball 12.7mm , 하중 30N , 회전속도 $1,000\text{rpm}$, 유지시간 5분으로 진행하였다.

시험결과 Fig. 11(a)와 같이 마모량은 보수대상재인 28Cr-Fe대비 M789, CORRAX가 높게 나타났으며, 열처리 후에도 크게 개선되지는 않았다. 한편, Stellite6는 28Cr-Fe대비 우수한 내마모 특성을 나타내었으며, 열처리시 마모 성능이 향상되었다. Fig. 11(b)와 같이 마찰계수를 비교시 28Cr-Fe와 거의 동일한 성능을 나타내었으며, 열처리 후에도 비슷한 경향인 것으로 파악되었다. 이는 마모시험방법에서 동일한 조건을 적용하였고, 정상패턴의 마모에서는 소재물성보다 접촉지점의 형상적인 요소가 더 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 적층부의 경도를 로크웰 C스케일로 측정한 결과는 Fig. 11(c)와 같으며, 모든 적층부의 경도가 대

(a)

(b)

(c)

Fig. 11 Results of abrasive and hardness test (a) weight loss (b) friction coefficient (c) hardness

상소재 28Cr-Fe보다 높은 것으로 평가되었다. 열처리 후에는 Fe계 소재인 M789, CORRAX 적층부의 경도가 상승한 것으로 나타났다. 일반적으로 높은 경도는 마모특성을 향상시키는 것으로 알려져 있으나⁷⁾, 마모경향은 시험방법에 따라 다양하게 나타날 수 있어 열처리에 의한 경도증가가 곧 마모향상의 결과로 연계된 것이 아니라고 판단된다.

Fig. 12는 내마모 시험 중 마모량/마찰하중 비를 도식화 한 것으로 28Cr-Fe 대비 CORRAX 소재가 유사한 마모성능을 나타내었다. M789소재는 열처리 전 타소재들과 동떨어진 양상을 나타내었으나, 열처리 후 CORRAX와 비슷한 경향으로 변화하였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 적용하고자 하는 웨어플레이트의 내마모 특성은 보수 대상재와 동등한 물성을 확보하는 것이 좋으며, 이보다 우수한 내마모 특성을 유지할 경우에는 웨어플레이트의 역할을 상실하

Fig. 12 Weight loss-friction force ratio of deposited layers during abrasive test (a) before heat treatment (b) After heat treatment

고, 보호하고자 하는 케이싱이 오히려 마모되는 결과를 초래할 수 있다.

3.5 상용소재 적층부의 내식성 평가결과

유체의 산성도가 부식에 영향을 미칠 것으로 예상되어 ASTM G31에 따른 침지 부식시험을 진행하였다. 시험에는 발전소에서 채취한 펌프매질 용액을 사용하였고, pH 측정결과 7.58수준으로 분석되어 내식성에 큰 영향을 주지 않을 것으로 파악되었다. 시험은 Fig. 13에서와 같이 앞서 마모시험을 진행한 디스크 시험편을 이용하여 48시간동안 반응 후 시험 전과의 질량차이를 측정하였다. 부식속도(ASTM G31)를 다음 식으로 산출한 결과,

$$Corrosionrate = (K \times W) / (A \times T \times D)$$

K=상수, T=반응시간, A=반응면적 W=질량차, D=밀도

Fig. 14와 같이 나타났다. Stellite6를 제외하고, 보

Fig. 13 Before and after surface shape by corrosion test

Fig. 14 Corrosion rate of deposited layers

수 대상재와 유사 또는 약간 빠른 특성을 나타내었다. 따라서, 보수 측면에서 웨어플레이트에 적용된다면 Stellite6는 대상재보다 우수한 특성으로 케이싱이 침식당할 가능성이 큰 것으로 파악되므로, 대상재와 유사하거나 약간 열위한 M789 또는 CORRAX 소재를 적용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

4. 결 론

이상과 같이 발전용 펌프부품의 보수를 위해 직접분사 적층제조 공정을 이용하여 내마모 소재를 적층한 후 적층부의 물성을 평가한 결과 결론은 다음과 같다.

- 1) 동종의 조성계를 분말소재로 이용한 적층시험에서는 높은 탄소함량으로 인하여 적층부의 탈락이 발생하였으며, 보수공정에 적합하지 않다.
- 2) 상용 내마모용 분말소재를 이용한 경우 28Cr-Fe 보수대상재의 적층이 가능하나, 적층부 내 일부영역에서 미세 기공이 관찰되므로 공정조건의 조절이 필요하다.
- 3) 내마모 분말소재 중 코발트계의 Stellite6를 적용한 적층부는 우수한 내마모 특성을 나타내었으나, 보수대상재와의 마모특성 차이로 인하여 적용이 곤란하다.
- 4) 철계 소재인 M789 및 CORRAX 분말을 이용한 적층부는 보수 대상재와 마모특성이 유사하여 보수용 소재로 적용이 가능하며, 응력제거 및 물성제어를 위한 후열처리가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부의 '표면정밀도 $7\mu\text{m}$ 급 대형 부품 직접제작용 금속 3D프린터 개발(No.1005378)' 지원으로 작성되었음.

ORCID: Sungwook Kim: <https://orcid.org/0000-0002-9682-4674>

ORCID: Chang-Keun Chun: <https://orcid.org/0000-0001-7945-0749>

References

1. N. Ojala, K. Valtonen, A. Antikainen, A. Kemppainen, J. Minkkinen, O. Oja and V. Kuokkala, Wear performance of quenched wear resistant steels in abrasive slurry erosion, *Wear*, 354-355 (2016) 21-31.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.02.019>
2. J. D. Kim, E. J. Lee and C. G. Kim, The Study on Laser Cladding of Heat Resisting Steel Using EuTroLoy 16006 Powder, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 41-4 (2017) 299-305.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.4.299>
3. S. J. Hong and S. H. Hong, The Status of Repair Welding for Power Plant, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 23-1 (2005) 26-29.
4. H. M. Lee, U. B. Baek and K. B. Yoon, Evaluation of Weldability for Steam Turbine Casing Weld Repair, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 16-4(1998) 9-18.
5. S. Kaierle, L. Overmeyer, I. Alfreda, B. Rottwinkela, J. Hermsdorfa, V. Weslinga and N. Weidlichch, Single- crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting, *CIRP J. of Manuf. Sci. and Tech.*, 19(2017) 196-199.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.001>
6. A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi and P. Fino, Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair, *Appl. Sci.* 9(2019) 3316-3342.
<https://doi.org/10.3390/app9163316>
7. G. Y. Baek, G. Y. Shin, K. Y. Lee and D. S. Shim, A Study on Micro-Structure and Wear Behavior of AISI M4 and CPM15V Deposited by Laser Melting, *Korean J. Met. Mater.*, 56-6(2018) 30-439.
<https://doi.org/10.3365/KJMM.2018.56.6.430>