

DED 공정기술을 적용한 레일 유지보수 시편의 경도 특성 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구실

A study on the hardness characteristics of repaired rail applying DED process technology

Moo-Sun Kim

Urban Railroad Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 철도산업의 주요 인프라 구성요소인 레일을 대상으로 적층제조기술로 유지보수를 수행하였을 경우 레일에 발생하는 주요 물성의 변화를 분석 진행하였다. 적층제조기술은 열차의 반복 하중에 의한 레일 표면 마모 및 결함을 대상으로 한 유지보수 기술로 적용이 가능하다. 유지보수 기술로서의 적층제조 특성을 이해하기 위한 시험을 진행하기 위해, 레일 상부 절삭 후 DED 공정기술로 일정 높이만큼 적층하여 시편을 제작하였다. 적층 소재로 SUS316L 및 SUS630 두 종류의 소재를 적용하였고 공정조건의 차별화로 레이저 스캐닝 방향을 0° 및 0°/90° 교차 적층으로 구분하였다. 측정 물성은 레일 단면을 기준으로 레일의 주요 물성인 경도값(HV)을 적층 표면부터 레일의 중심까지 순차적으로 측정하였다. 경도 분석결과는 두 소재 모두 적층 표면에서 적층 경계면까지 점차적으로 경도값이 증가하는 특성을 보였으며 레일 원소재 영역에서는 경계면 근처에서 상대적으로 높은 경도값을 가졌다. 이는 적층 영역에서 레이저에 의한 가열사이클의 반복횟수와 냉각속도의 차이에 따라 생성되는 미세조직 특성이 달라지고 이로 인해 경도값의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한 레일 원소재 영역에서는 적층경계면 근처에서 레이저 열원의 영향을 가장 크게 받기 때문에 이로 인해 생성되는 미세조직 차이로 높은 경도값을 가지는 것으로 추정된다.

Abstract This study analyzed the results of rail maintenance performed with additive manufacturing technology. Additive manufacturing can be applied as a maintenance technology for rail surface abrasion and defects caused by repeated train loads. To understand the characteristics of the process, rail specimens were produced by adding repair material to a certain height with directed energy deposition after cutting the top of a rail. Two types of materials, SUS316L and SUS630, were applied as repair materials, and laser scanning was done with directions of 0° and 0°/90°. The hardness was measured sequentially from the deposited surface to the center of the rail at the cross section. The results showed that the hardness value gradually increased from the deposited surface to the interface of the deposition and rail for both repair materials and had a relatively high value near the interface in the region of raw rail material. It is believed that the difference in the hardness value is due to the microstructure characteristics produced by the difference of the reheating cycle and the cooling rate in each layer. In addition, the hardness is directly affected by the laser heat source near the interface of the deposition and rail in the area of raw rail material, so it is estimated that the higher hardness value is due to the difference in microstructure generated by this phenomenon.

Keywords : Additive Manufacturing, Directed Energy Deposition, Hardness, Microstructure, Rail

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK2303F2)의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

email: mskim@krrri.re.kr

Received June 29, 2023

Accepted August 10, 2023

Revised July 31, 2023

Published August 31, 2023

1. 서론

3D 프린팅으로 불리는 적층제조(AM, Additive Manufacturing)기술은 기존의 제조기술로 접근하기 어려운 기술적 특성을 구현할 수 있으므로 최근 들어 제품 제조를 위한 신기술로 활용되고 있으며 적용 분야가 점진적으로 확대되고 있다.

일반적인 적층제조기술의 특징으로는 복합 형태의 구조물을 단일 공정으로 제작할 수 있고, 기존 기술로 제작이 어려운 구조물 형상을 구현할 수 있는 점이다. 또한 미세 적층특성을 통해 이종소재 접합 등 소재간 박리 현상을 줄일 수 있는 기술적 특성을 가진다. 이러한 장점을 기반으로 제품 제작시 공정 단계를 줄일 수 있고, 금형 제작 및 보관 등과 같은 부가적인 비용을 줄일 수 있으며 컴팩트한 부품 제작이 가능하여 경량화 및 기능의 향상을 기대할 수 있다. 반면, 현재까지의 기술적 특징으로 제작 가능한 부품의 크기에는 제한이 있으며, 표면 품질이 중요한 구조물에선 추가적인 공정이 요구된다. 그리고 생산하고자 하는 부품 수량이 제작 시간과 비용 측면에서 적층제조기술 적용 여부를 결정하는 주요 사항으로 고려되어야 한다.

따라서 현재 적층제조기술의 구조물 제작기술 적용 한계를 극복하기 위해 완제품 제작뿐만 아니라 기존 구조물의 부분 유지보수 기술로 적용하기 위한 방안과 관련된 많은 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 적층제조기술을 구조물의 유지보수 기술로 적용할 때, 부품 제조를 위한 적층제조기술 특성과 비교하여 상대적으로 공정 구현 환경과 적용 구조물 크기의 제약이 줄어든다. 적층기술을 유지보수 기술로 적용하고 있는 분야는 다양한데, 그 예로 마모 또는 파손이 진행된 금형 및 일반 기계부품부터 항공, 선박, 철도 등 대형 구조물까지 적용 분야를 넓힐 수 있다. 특히 철도 분야에서는 적층기술을 활용하여 레일을 유지보수하는 기술개발에 관심이 집중되고 있다. 일반적으로 레일의 경우 마모 또는 표면 결함문제를 해결하기 위해 주기적으로 연마공정을 도입하여 작업을 진행하고 있지만 레일 마모 및 표면 결함이 국부적으로 진행되었거나 그 정도가 상당한 경우 연마공정을 대신하여 적층제조기술을 레일 표면 복원기술로 적용하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다.

레일 유지보수와 관련된 연구 예로서 Kral et al[1]은 아크용접과 레이저 클래딩 등과 같은 적층기술을 활용하여 레일의 손상부분을 복원하는 유지보수 기술 개발에

대한 초기 제안을 하였다. Seo et al[2]은 Stellite 21, Inconel 625 및 Hastelloy-C 등 3가지 소재를 각 적용하여 레이저 클래딩으로 제작한 레일 시편을 대상으로 마모 및 접촉피로에 대한 특성을 시험 분석하였다.

Mortazavian et al[3,4]은 SUS304L 소재 대상으로 레이저 파우더 적층기술을 적용하여 경도 및 잔류응력을 FEM을 이용한 수치해석과 시험을 통해 그 특성 분석을 진행하였으며 열처리에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다. 그리고 Mortazavian et al[5]은 SAW(Submerged Arc Welding) 공정 기술을 적용하여 C-Mn 레일에 대한 유지보수 시편을 제작하여 미세조직구조와 경도 특성을 연구하였다.

Nellian et al[6]은 Stellite 6로 적층한 레일 유지보수 시편을 대상으로 레일과 적층소재의 경계면에 대한 전단 강도 측정 시험을 진행하였다. 그리고 Lai et al[7]은 4가지 적층소재에 대하여 single layer와 double layer를 적층하였을 경우 적층 경계면에서 발생하는 크랙 결함에 관한 분석을 진행하였으며 Roy et al[8]은 SUS410L과 Stellite 21 소재의 double layer 적층에 대해 열응력 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 적층기술 중 레이저를 이용한 적층기술을 활용하여 마모 특성이 우수한 2가지 소재로 적층 제작된 레일 시편을 대상으로 단면의 경도 특성을 분석 진행하였다. 또한 다층 레이저를 적용하여 상대적으로 두꺼운 적층 시편을 대상으로 하여 연구의 차별성을 꾀하였다.

2. 본론

2.1 DED 공정기술

적층제조기술은 2차원의 평면을 쌓아 올려 3차원의 입체 구조물을 만드는 원리를 응용한 제조 공정기술이다. 적용 가능한 소재는 금속 및 폴리머 등 다양한 소재를 활용할 수 있으며, 소재를 적층하는 원리에 따라 다양하게 분류할 수 있다.

대표적으로 소재를 파우더 형태로 가공 후 레이저나 전자빔과 같은 열원을 이용하여 용융 상태로 바닥 레이어에 용착하는 방식이 있으며 이 경우 우수한 기계적 물성으로 인해 주로 산업용 제품의 생산 또는 유지보수 기술로 적용되고 있다.

레이저를 열원으로 사용하는 대표적인 금속 적층제조 기술로는, 금속 파우더를 적층한 상태에서 레이저로 국부

영역을 용착하는 방식의 SLM (Selective Laser Melting) 공정기술과 금속 파우더를 분사하면서 동시에 레이저를 조사하여 용착하는 방식인 DED(Directed Energy Deposition) 공정기술로 구분할 수 있다.

SLM 공정기술의 경우 정밀 제작이 가능하지만 제작 공간 등 공정 환경의 제약이 많으며, DED 공정기술은 상대적으로 거친 표면 품질을 가지면서도 공정 환경 제약이 적은 편이다.

따라서 본 연구에서는 레일 유지보수 현장환경을 고려할 때 활용도가 높을 것으로 예상되는 DED 공정 기술을 적용하여 시편을 제작하였다.

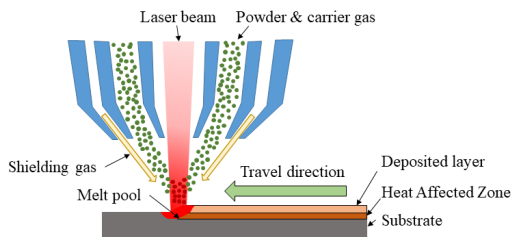


Fig. 1. Schematic of DED process

Fig. 1에 DED 공정기술의 원리를 도시하였다.

먼저 적층대상이 되는 substrate에 레이저를 조사하여 멜트풀을 생성하게 되고 carrier gas를 이용하여 레이저 영역에 소재 파우더를 공급한다.

소재 파우더는 레이저 조사 영역에 들어오면서 용융된 상태로 변화하게 되고 이후 substrate의 멜트풀 위에 용착된다.

용착 경계면에는 기존 substrate 위에 새로 용착된 적층 레이어와 구분되는 HAZ (Heat Affected Zone)이 형성되는데, 이는 구조물의 결합 등 최종 물성에 영향을 미친다.

대표적인 DED 공정변수로서 레이저 출력, 레이저 스캔 스피드, 스캐닝 간격, 파우더 피딩 속도, 레이저 스캐닝 방향 등을 주요 공정변수로 정의할 수 있다.

이러한 공정변수로부터 Eq. (1)과 같이 에너지 밀도라는 대표적인 파라미터를 정의한다[9].

에너지 밀도는 금속 파우더의 용융 상태를 예측하기 위한 가장 중요하면서도 간단한 형태의 식으로 고려된다.

$$E = \frac{P}{udh} \quad (1)$$

이 때, E는 에너지 밀도 (J/mm^3)를, P는 레이저 파워 (W)를, u는 스캔 스피드 (mm/s), h는 스캔 간격 (mm)를, 그리고 d는 레이어 두께 (mm)를 의미한다.

2.2 시편제작

레일 표면 결함시 유지보수 방안으로 DED 공정기술을 적용한 레일 적층 시편을 제작하였다.

모재가 되는 레일은 60kgKR 규격 레일을 적용하였고 유지보수용 레일 적층 소재로는 SUS316L 및 SUS630 2가지 소재를 선정하였다. 각 소재 조성은 Table 1 [10-12]에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of rail steel and deposition material (wt%)

Material	Fe	C	Si	Mn	P
60kgKR	Bal	0.63~0.75	0.15~0.30	0.70~1.10	Max 0.03
SUS316L	Bal	0.03	1	2	0.045
SUS630	Bal	0.07	1	1	0.04

Material	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co
60kgKR	Max 0.025	-	-	-	-	-
SUS316L	0.03	12~15	16~18	2.5	-	-
SUS630	0.03	3~5	15~17.5	-	3~5	-

레일 유지보수 시편은 10mm 두께의 모재 레일을 대상으로 상부를 절삭 가공 후 DED 공정기술로 다수의 레이어를 7mm 두께로 적층 제작하였다. Fig. 2에 레일 적층시편 단면을 도시하였다.

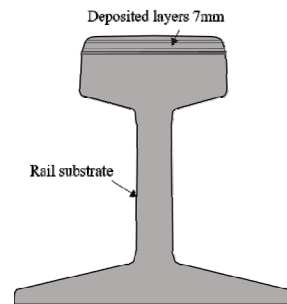


Fig. 2. Schematic model of the repaired rail

시편 제작을 위한 DED 공정 장비는 DMG Mori 社の LASERTEC 65 3D hybrid 장비를 사용하였다. 제작 공정조건은 장비제작사에서 제공하는 소재별 공정 조건 테이블을 적용하였다.

시편 제작시 온도조건은 상온에서 진행하였다.

기본적인 공정 파라미터조건으로 레이저 출력은 SUS316L인 경우 1800W로, SUS630은 2000W로 설정하여 진행했으며, 레이저 스캐닝 속도는 두 소재 모두 동일한 1,000mm/min으로 진행하였다.

앞서 언급한 바와 같이 적층제작조건인 레이저 스캐닝 방향 또한 최종 물성에 영향을 미칠 수 있는 변수임을 감안하여 이의 영향을 고려하기 위해, 레일 유지보수 시편 제작시 레일 횡방향으로 레이저 스캐닝하여 적층하는 조건과 횡방향 및 종방향으로 교차 스캐닝 적층하는 조건으로 다양화하여 각 적층소재별로 시편 제작하였다.

2.3 경도 측정

제작된 레일 적층시편을 대상으로 레일 단면의 경도 특성 분석을 진행하였다. 경도 측정은 소재 및 레일 단면 영역에 따라 다양한 위치를 선정하여 진행하였다.

측정 위치 선정은 레일 단면기준으로 윗면의 양 끝단과 중앙점에서 레일목의 중심점까지 라인을 정의하고 적층 영역에서 라인상 3개 측정점, 경계영역 1개 측정점 그리고 레일 모재부 6개의 측정점을 선정하였다. 측정 위치는 Fig. 3에 도시하였다.

경도 측정 장비로는 Future Tech 社의 FV-810 비커스 경도기를 사용하였다.

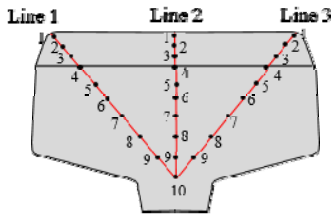


Fig. 3. Points and lines to measure hardness

2.4 결과 분석

적층 소재와 및 레이저 스캐닝 방향에 따른 비커스 경도 값의 결과를 정리하였다.

먼저 Fig. 4에는 적층소재로 SUS316L을 적용하였을 때 레이저 스캐닝 방향으로 0°와 0°/90°로 교차 적용한 각 조건에서 경도 측정값 변화를 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이, 레일 단면에서 3개의 모든 측정라인 기준으로 적층영역에서는 표면에서 적층 경계면으로 접근할수록 경도 값은 증가하고 적층 경계면을 지난 포인트에서 최대 경도 값을 가지며 레일의 중심부로 진행할수록 일정한 경도 특성을 보인다. Fig. 4의 (a)와 (b)를

비교하였을 때 적층시 레이저 스캐닝 방향 조건에 따른 경도 특성 변화의 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

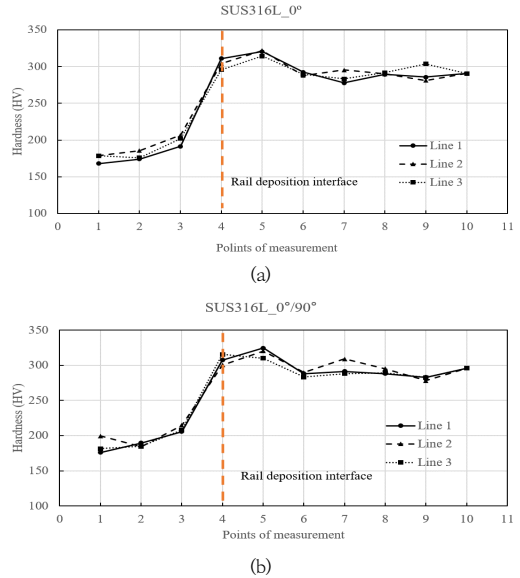
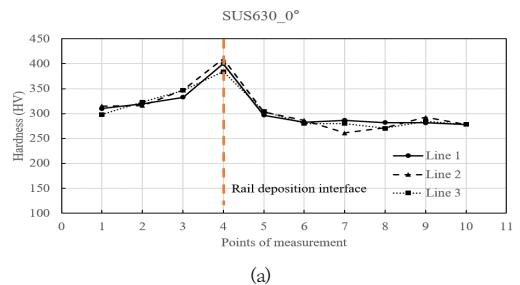


Fig. 4. hardness distribution of repaired rail with SUS316L deposited along (a) 0° and (b) 0°/90°

다음으로 Fig. 5에는 SUS630을 적층소재로 적용하였을 때 0°와 0°/90°로 교차 적용한 레이저 스캐닝 방향 조건에서 각 경도 측정값 변화를 도시하였다.

SUS630의 경우에도 앞선 SUS316L 시험결과와 마찬가지로 3개의 측정라인 기준으로 적층영역에서는 표면에서 적층경계면으로 접근할수록 경도값 증가를 보이며, 적층 경계면에서 최대 경도값을 가진다. 이후 레일 원소재 영역에서는 경계면에 근접한 위치에서 최대 경도 값을 가지며 이후 경도 특성은 일정 수준으로 유지한다.

SUS630 또한 적층시 0°와 0°/90°로 교차 적용한 레이저 스캐닝 방향 조건에 따른 각 경도 특성 변화는 유사하다.



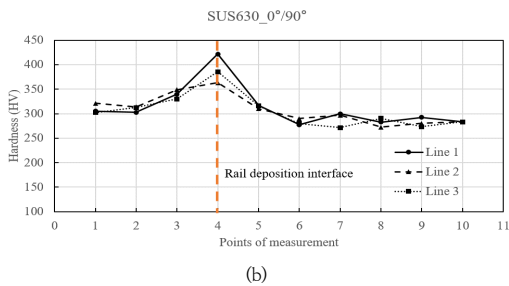


Fig. 5. hardness distribution of repaired rail with SUS630 deposited along (a) 0° and (b) 0°/90°

두 적층 소재 모두 공통적으로 적층영역에서 보이는 경도 특성 변화는 레일 표면에서 적층 경계면에 가까워질수록 증가하는 경도값이다.

이는 적층 경계면으로부터 시작되는 레이저 용착이 적층 방향인 상부로 진행됨에 따라 가열 사이클의 반복으로 인한 적층소재 미세조직의 변화로부터 기인한다고 볼 수 있다[3].

즉, 첫 번째 적층 레이어는 상온의 레일 위에 용착되면서 빠른 냉각을 거치게 되고 이로 인해 δ -페라이트 생성을 유도하면서 높은 경도값[3]을 가지게 된다.

이와 같은 방식으로 기존 레이어 위에 다음 레이어가 적층됨에 따라 가열 사이클이 반복되면서 δ -페라이트 생성이 용이해진다. 다른 한편으로는 레이어 적층이 진행될수록 대기 중의 대류와 복사 및 아래 베드를 통한 냉각 속도는 점차적으로 느려진다. 냉각속도의 저하는 오스테나이트 생성에 유리해지면서 경도값의 저하로 연결된다. 결국 가열사이클의 반복과 냉각속도의 저하 등 복합적인 요인으로 인해 레이어 상부로 갈수록 상대적으로 오스테나이트 생성이 유리해지며 결과적으로 경도값은 감소한다.

다음으로 적층 경계면 하부에서 시작되는 레일 원소재 영역에서는 첫 번째 적층 레이어로부터 전달되는 열원의 영향을 직접 받게 되어 용점 온도에 근접하게 되고 이로 인해 α -페라이트 생성이 상대적으로 많아져 경도값이 높지만 레이저 열원의 영향은 레일 하부로 갈수록 줄어들고 이는 α -페라이트 비율이 줄어드는 대신 오스테나이트 비율이 커지면서 경도값에 영향을 미치게 된다.

SUS316L과 SUS630 두 소재에서 보이는 적층된 레일의 최대 경도값을 가지는 위치가 다른 이유는 각 소재의 경도 특성 차이로부터 기인한 것으로 추정할 수 있다. 일반적인 두 적층 소재 및 레일 소재의 경도값은 SUS630, 레일, SUS316L 순으로 낮아진다[12]. 따라서 상대적인 경도 값의 차이에 따라 최대 경도값을 가지는 위치가 달라지는 것으로 추정할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 적층제작기술인 DED 공정기술을 활용하여 철도산업의 주요 인프라인 레일의 유지보수 기술로 적용하기 위해 SUS316L 및 SUS630 소재 대상으로 레일의 주요 물성 중 하나인 경도 특성의 변화를 시험 분석하였다.

경도 특성은 레일 단면 기준으로 3개의 측정 라인을 선정하여 각 소재의 적층 영역과 레일 원소재 영역에서 측정하였다.

경도 특성 분석결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) SUS316L 적층시편에서는 적층 표면에서 적층 경계면으로 진행할수록 경도값은 높아지며 경계면에 근접한 레일 원소재 측정점에서 가장 높은 경도값을 보인다.
- 2) SUS630 적층시편 또한 적층 표면에서 경계면으로 진행할수록 경도값은 커지며 경계면의 측정점에서 가장 높은 경도값을 가진다.
- 3) SUS316L 및 SUS630 두 소재에서 레이저 스캐닝 방향 0°와 0°/90°로 교차 적층한 각 케이스별 경도 특성 차이는 크지 않다.
- 4) 적층영역 기준으로 적층경계면에 근접할수록 경도값이 높아지는 이유는 레이저 가열사이클 반복횟수 및 레일 베드를 통한 상대적으로 빠른 냉각 속도에 의해 주로 δ -페라이트 생성이 유리해지는 요인으로 판단된다.
- 5) 경계면 하부의 레일 원소재 영역에서는 적층 경계면에 가까운 위치에서 레이저 열원의 영향으로 용점 온도에 근접하면서 α -페라이트 생성이 상대적으로 유리해지며 경도값이 높아지는 것으로 판단된다.

References

- [1] R. F. Kral, S. A. Mayhill, M. Q. Johnson, M. E. Rovnyak, D. J. Coomer, Method of repairing a rail, US Patent, US7520415B2, 2004.
- [2] J. Seo, J. Kim, S. Kwon, H. J, "Effects of Laser Cladding for Repairing and Improving Wear of Rails", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 20, pp. 1207-1217, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00115->
- [3] E. Mortazavian, Z. Wang, H. Teng, "Finite Element Investigation of Thermal-kinetic-mechanical Evolutions

during Laser Powder Deposition as an Innovative Technique for Rail Repair”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 118, pp. 319-342, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-07873->

- [4] E. Mortazavian, Z. Wang, H. Teng, “Effect of heat treatment on microstructure and hardness of a worn rail repaired using laser powder deposition”, International Journal of Transportation Science and Technology, vol. 11, Issue. 2, pp. 406-422, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2021.05.00>
- [5] E. Mortazavian, Z. Wang, H. Teng, “Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 107, pp. 3315-3332, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05208-x>
- [6] A. S. Nellian, J. H. L. Pang, “Laser metal deposition characterization study of metal additive manufacturing repair of rail steel specimen”, Virtual and Physical Prototyping, vol. 18, no. 1, e2134042, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2134042>
- [7] Q. Lai, R. Abrahams, W. Yan, C. Qiu, P. Mutton, A. Paradowska, M. Soodi, X. Wu, “Influences of depositing materials, processing parameters and heating conditions on material characteristics of laser-cladded hypereutectoid rails”, Journal of Materials Processing Tech, vol. 263, pp. 1-20, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.035>
- [8] T. Roy, A. Paradowska, A. Abrahams, M. Law, P. Mutton, M. Soodi, W. Yan, “Residual stress in laser cladded heavy-haul rails investigated by neutron diffraction”, Journal of Materials Processing Tech, vol. 278, 116511, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116511>
- [9] M. Kim, “Study on Tensile Properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 19, no. 12, pp. 25-31, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.25>
- [10] Rails, KRS TR 0001-15(R), Korean Railway Standards, 2006.
- [11] Stainless steel wires, KS D 3703:2007, Korean Standards & Certification, 2007.
- [12] Stainless steel bars, KS D 3706:2017, Korean Standards & Certification, 2017.

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석