

DED 공정변수에 따른 SUS316L 적층 레일의 경도 특성 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구실

A Study on the hardness characteristics of rail deposited with SUS316L according to DED process variables

Moo-Sun Kim

Urban Railroad Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 적층공정 기술인 DED(directed energy deposition) 공정기술을 철도 레일에 적용하여 금속 적층을 진행하였을 때 적층면과 레일에서 발생하는 경도 특성의 변화를 시험 분석하였다. 레일은 열차의 반복되는 주행 하중에 의해 마모 및 표면결합이 자주 발생하는 철도 주요 인프라이며, 레일 표면을 복원하기 위해 마모면 상부에 금속 적층을 진행하는 방식의 유지보수방법을 고려할 수 있다. DED 공정기술은 레이저를 이용하여 얇은 용착 레이어를 반복 하여 적층하는 방식의 열사이클로 인해 고유의 물성 변화 특징을 가진다. 본 연구에서는 DED 공정의 주요 변수 변화에 따라 발생하는 경도 특성 변화를 살펴보았다. 시편 제작은 레일 상부 절삭 후 DED 공정기술로 일정 높이만큼 적층 진행 하였다. 적층 소재는 SUS316L을 적용하였으며 공정조건 변수는 레이저 출력 크기와 레이저 스캔 스피드를 다양화하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 대상으로 레일 단면의 경도값(HV)을 적층 표면부터 레일목까지 순차적으로 측정하였다. 경도특성 분석 결과, 레이저 출력이 높을수록 적층면의 경도값은 낮아졌으며 레이저 스캔 속도가 높을수록 상대적으로 높은 경도값을 보였다. 레이저 출력과 레이저 스캔 속도가 연관된 에너지 밀도로 설명하면 결국 에너지 밀도가 높을수록 경도값은 낮아짐을 의미한다. 이는 적층공정시 레이저에 의한 에너지 밀도가 높을수록 냉각속도가 느리지면서 이와 관련된 미세조직 특성의 변화로 인해 최종적인 경도 특성이 달라지는 것으로 판단된다.

Abstract In this study, DED (directed energy deposition) process technology, one of the additive manufacturing process technologies, was applied to rails to analyze the hardness characteristics in the deposited area on a rail surface. A rail is the main infrastructure of a railway where wear and defects on the surface frequently occur due to the cycle of running loads of trains. To repair the rail surface, a maintenance method of metal deposition on the top of the worn surface can be considered. DED process technology has unique physical properties due to the thermal cycle of repeatedly stacking thin fused layers by using a laser. This study examined the changes in hardness characteristics according to the changes of key parameter values in DED process technology. Specimens were manufactured by cutting the upper part of a rail and depositing metal to a certain height using DED process technology. SUS316L was applied as the deposition material, and specimens were produced with varying laser power and laser scanning speed as DED process variables. The hardness value (HV) on the rail cross section of the manufactured specimen was measured sequentially from the deposition surface to the rail neck. As a result of the hardness characteristic analysis, the higher the laser power, the lower the hardness value of the deposition surface was, the higher the laser scanning speed was, and the higher the hardness value was. In terms of the energy density, which is related to the laser power and laser scanning speed, the higher the energy density, the lower the hardness value was. It is estimated that the cooling rate is slower in the fusion process due to the higher energy density of the laser affecting the microstructure characteristics in the deposited metal and change the final hardness characteristics.

Keywords : DED, Hardness, Laser Power, Laser Scanning Speed, Microstructure

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK2303D4)의 연구비 지원으로 수행되었음.

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

email: mskim@krii.re.kr

Received September 14, 2023

Revised October 4, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

적층제조(AM, Additive Manufacturing) 기술은 제품 제작을 위한 새로운 개념의 제조기술로서 사출, 주조, 압축 성형 등 기존 제조기술로는 제조하기 어려웠던 형태의 제품을 제작할 수 있는 방법으로 고려되면서 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다.

기존 제조기술 대비 적층기술이 가질 수 있는 장점으로는 복잡한 형상을 가지는 구조물을 형상에 구애받지 않고 상대적으로 수월하게 제작할 수 있는 점이다. 이는 2차원 평면 형상을 반복적으로 만들어서 3차원으로 쌓는 방식인 적층제조기술의 원리로부터 기인한다. 적층제조 기술은 제품 제작을 위해 필수적으로 여겨졌던 금형을 제작할 필요 없이 바로 적층 기기 내에서 구조물을 제작할 수 있기 때문에 제품 제작 시간 및 비용 절감에서 유리하며 금형 보관 등으로 발생하는 추가적인 유지보수 비용을 절감할 수 있다. 더불어 부가적인 장점으로 제품 형태의 짜임새를 높임으로써 경량화 및 다양한 기능의 복합 구현이 가능하다.

단점으로는 우선적으로 공정 환경 제약을 많이 받는다. 즉 제작할 수 있는 제품 크기에 제한이 있으며, 공정 환경과 제작 기기에 따라 제작품질이 동일하지 않을 수 있다. 제품의 형상 자유도가 높다는 장점이 있는 반면 단순 형상 제품의 경우 기존 제작방식이 유리할 수 있다. 또한 제품을 대량으로 제작하는 경우 기존 제작방식 대비 시간 및 비용 부담이 커진다. 따라서 제품특성에 따른 생산 개수와 비용 등을 감안하여 적층기술과 기존 제작 방식에서 유리한 방식을 택할 수 있는 선정 기준이 필요하다.

위에 서술한 바와 같이 제품 제작의 경우 적층기술은 기존 기술 대비 상대적으로 제약이 많지만, 제품의 유지보수 기술로 적용하는 경우 공정 환경과 구조물 크기 등의 제약이 줄어들 수 있다.

적층기술은 유지보수 기술로서 다양한 산업 분야에 적용되고 있는데, 그 예로 국부적으로 파손된 대형 부품을 재생하거나 금형 등의 표면 품질을 높이기 위한 표면 적층 등이 있다.

대형 구조물이 많은 철도 분야에는 마모 또는 표면 결함이 자주 발생하는 구조물을 현장에서 유지보수 하기 위한 기술로서 적용을 고려할 수 있다. 그 예로, 가장 중요한 인프라 설비 중 하나인 레일에는 고하중의 열차가 반복적으로 운행함에 따라 표면 마모가 발생하기 쉬우며, 일부 곡선 구간에서는 편마모 현상 등이 발생하고 스

킬 소음 등의 문제로 연결되고 있다. 또한 표면 경화, 파상 마모 등의 다양한 문제점이 발생하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 전체 레일 대상으로 주기적으로 진행해야 하는 기존 연마작업보다 효율이 좋은 유지보수 기술이 필요하며, 적층기술은 앞선 문제점 해결을 위한 적합한 해법으로 고려될 수 있다. 이러한 배경으로 인해 적층기술을 레일 표면결합의 유지보수 기술로 적용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

레일 유지보수를 위한 적층기술과 관련된 연구로서 Kral et al[1]은 아크용접 및 레이저 클래딩을 활용한 기술을 제안하였다. Seo et al[2]은 레이저 클래딩 기술을 이용하여 Stellite 21, Inconel 625 및 Hastelloy-C 등 3가지 소재로 레일 적층시편을 대상으로 마모 및 접촉피로 특성을 연구하였다. Mortazavian et al[3]은 SAW(Submerged Arc Welding)기법을 적용한 C-Mn 레일 적층 시편 대상으로 미세조직 변화와 경도 특성을 연구하였다. 그리고 레이저 파우더 적층기술을 적용한 SUS304L 소재 대상으로 FEM 해석과 시험을 통해 경도 및 잔류응력 분석을 진행하였고 열처리에 따른 미세조직 특성의 변화를 관찰하였다[4,5]. Lai et al[6]은 4가지 적층소재에 대하여 적층 layer 수에 따라 적층 경계면에서 발생하는 크랙 결함에 관한 분석을 수행하였다. Nellian et al[7]은 Stellite 6를 적층한 레일 모재와 적층재 사이 경계면에 대해 전단 강도 측정 시험을 진행하였으며 Roy et al[8]은 SUS410L과 Stellite 21의 적층공정에서 발생하는 열응력 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 적용 구조물 크기에 제약이 덜하고 또한 공정 환경의 영향이 상대적으로 적은 DED 공정 기술을 적층기술로 적용하여 SUS316L 소재 대상으로 레일 표면 적층을 진행할 때 레이저의 주요 공정조건에 따른 적층 영역 및 레일 모재의 경도 특성 변화에 대한 시험분석을 진행하였다.

2. 본론

2.1 DED 공정

적층 제조기술은 앞서 언급한 바와 같이 2차원의 평면 구조물을 아래 표면에 용착하는 방식으로 반복적으로 쌓아 올리면서 3차원 입체 구조물을 제작할 수 있는 제조 공정기술이다. 고분자에서 금속까지 다양한 소재를 파우더 형태로 가공하여 활용할 수 있으며, 소재를 적층하는 방식에 따라 레이저를 열원으로 쓰는 SLM, DED 및 전

자빔을 활용한 EBM 방식 등 다양한 공정기술로 구분할 수 있다. 이 중 DED(Directed Energy Deposition) 공정기술은 다른 적층공정기술에 비해 작업에 영향을 미치는 환경 제약이 상대적으로 줄어들며, 대형 부품 적용이 수월하기 때문에 레일과 같은 실외에 설치된 대형 구조물의 유지보수 작업을 현장에서 진행하는데 있어 적합한 적층공정 기술로 고려할 수 있다.

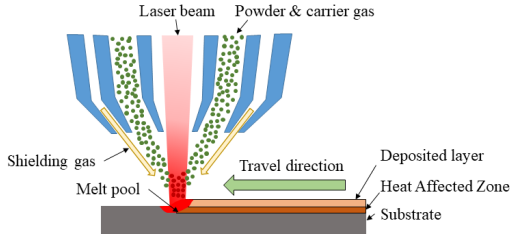


Fig. 1. Schematic of DED process

Fig. 1에 DED 공정기술의 개념을 도시하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 공정절차는 먼저 DED 장비 헤드를 통해 헤드 중앙에서 레이저가 출력되며, 레이저 홀 주변에 위치한 분사구에서 적층 소재 파우더가 carrier 가스와 함께 분사된다.

출력되는 레이저 공간 안에 뿌러지는 소재 파우더는 레이저로부터 충분한 열을 흡수하여 액상으로 상변화가 일어나며, 잔여 레이저의 열에너지는 적층대상이 되는 substrate에 흡수된다. 이 때 용융된 상태의 파우더 소재는 substrate에 용착되면서 멜팅풀을 형성하게 된다. 용착 경계면에는 기존 substrate 위에 새로 용착된 적층 레이어와 구분되는 HAZ(Heat Affected Zone)이 형성되는데, 이는 구조물의 최종 물성에 영향을 미치는 중요한 영역이다.

DED 공정과 연관된 중요한 공정변수로서 레이저 출력, 레이저 스캔 스피드, 스캐닝 간격, 파우더 피딩 속도, 레이저 스캐닝 방향 등을 정의할 수 있다.

위 공정변수들로부터 Eq. (1)과 같이 에너지 밀도를 정의할 수 있다[9]. 에너지 밀도는 적층되는 금속 파우더의 용융 상태를 예측하기 위한 간단한 형태의 식으로 고려된다.

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

에너지 밀도 E (J/mm³)는 레이저 파워 P(W), 스캔 스피드 u(mm/s), 스캔 간격 h(mm), 그리고 레이어 두께

d(mm)의 상관관계로 정의된다.

2.2 적층 레일시편 제작

DED 공정기술 적용 적층 레일시편 제작을 위해 모재 레일은 60kgKR 규격 레일을 적용하였으며 적층 소재는 SUS316L을 적용하였다. 모재 및 적층 소재 조성은 Table 1[10-12]에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of rail steel and SUS316L (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

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

적층 레일 시편은 모재 레일 상부를 절삭 가공한 후 절삭 표면 위에 DED 공정기술로 다수의 레이어를 7mm 두께까지 적층하는 방식으로 제작하였다. 레일 적층시편 단면을 Fig. 2에 도시하였다.

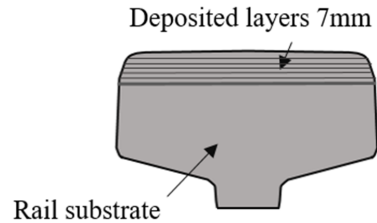


Fig. 2. Schematic model of the repaired rail

시편 제작을 위한 DED 장비는 DMG Mori 社 LASERTEC 65 3D hybrid 장비를 사용하였다. 시편제작은 상온 온도조건에서 진행하였으며 레이저 스캐닝 방향은 레일의 종방향으로 적층하는 조건을 적용하였다.

시편별 제작 공정조건을 Table 2에 정리하였다.

공정조건 변수로는 레이저 파워와 레이저 스캔 스피드로 지정하였는데 레이저 파워는 각 1,600, 1,800, 2,000W로 구분하였으며, 레이저 스캔 스피드는 800, 1,000, 1,200mm/min으로 각 구분하였다. 각 케이스별 시편은 위 변수의 조합으로 공정조건을 설정하고 제작을 진행하였다.

Table 2. DED process conditions for each specimen case

Case no.	Laser power (W)	Laser scan speed(mm/min)
1	1,600	800
2	1,600	1,000
3	1,600	1,200
4	1,800	800
5	1,800	1,000
6	1,800	1,200
7	2,000	800
8	2,000	1,000
9	2,000	1,200

2.3 경도 측정

DED 적층 후 적층 및 레일 단면의 경도 특성 분석을 진행하기 위해 레일 단면 중심선을 기준으로 하여 라인을 정의하고 적층 영역에서 3개 측정점, 경계영역 1개 측정점 그리고 레일 모재부 6개의 측정점을 Fig. 3과 같이 선정하였다. 경도 측정은 Future Tech 社の FV-810 비커스 경도기를 사용하였다.

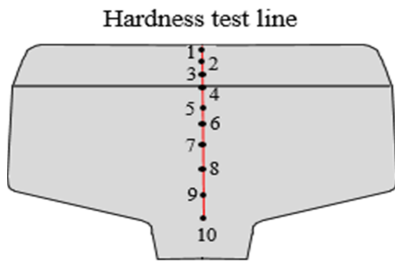
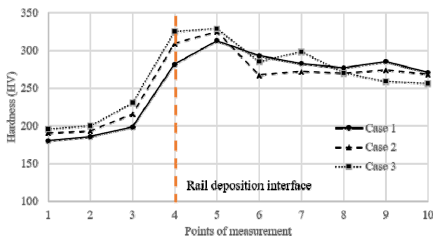


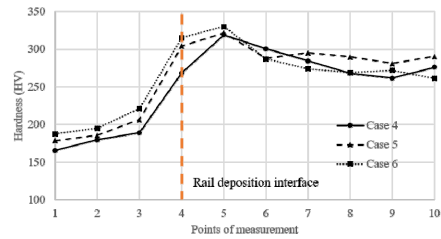
Fig. 3. Points to measure hardness

2.4 결과 분석

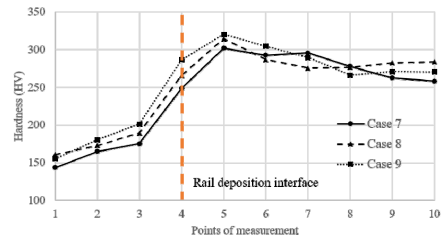
레이저 파워 및 레이저 스캔 속도를 기준으로 하여 경도값 시험결과를 정리하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Hardness distribution of the deposited rail with the increasing scanning speed and the constant laser power of (a) 1,600W, (b) 1,800W and (c) 2,000W

먼저 Fig. 4의 각 그래프는 Table 2에서 정의한 케이스들을 일정한 레이저 파워 조건에서 레이저 스캔 스피드를 점차적으로 증가하도록 정리하였을 때 경도값의 변화를 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 일반적으로 적층 영역에서는 적층 표면에서 적층 경계면에 근접할수록 경도값은 증가하고 모재 영역에서 경계면을 지나 멀어질수록 점차적으로 경도값이 낮아진다. 1,600W, 1,800W 및 2,000W 등 3개의 일정 레이저 파워 조건에서 공통적으로 보이는 적층 영역의 경도 특성은 레이저 스캔 스피드가 증가함에 따라 경도값이 상대적으로 높아짐을 보여주고 있다. 레일 모재 영역에서는 스캔 스피드에 따른 경도값의 특정 변화 패턴을 보이지 않는다.

다음으로 Fig. 5에는 일정한 레이저 스캔 스피드 조건에서 레이저 파워의 변화에 따른 경도값의 변화를 정리하였다. 각 800mm/min, 1,000mm/min 및 1,200mm/min 등 3개의 레이저 스캔 스피드 일정 조건에서 적층 영역의 경도 특성은 레이저 파워가 증가함에 따라 경도값이 상대적으로 낮아짐을 확인할 수 있다. 앞선 결과와 마찬가지로 레일 모재 영역의 레이저 파워 변화에 따른 경도값의 특정 변화 패턴은 보이지 않는다.

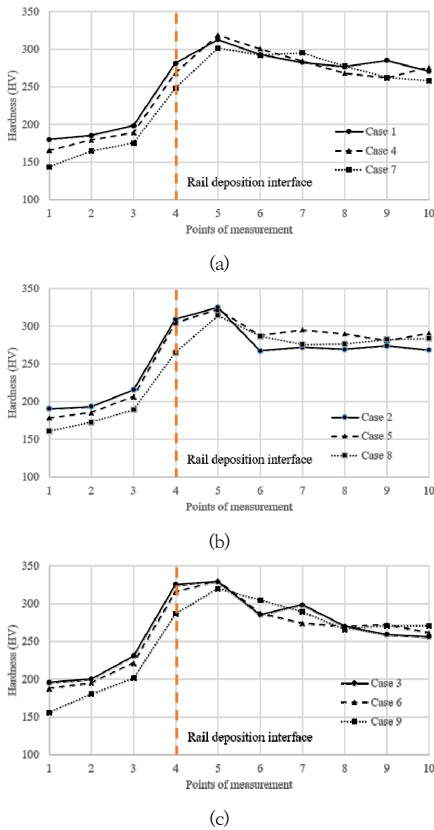


Fig. 5. Hardness distribution of the deposited rail with the increasing laser power and the constant scanning speed of (a) 800mm/min, (b) 1,000mm/min and (c) 1,200mm/min

지금까지 DED 공정의 중요 변수인 레이저 파워와 레이저 스캔 스피드의 조건을 다양화하여 적층영역과 모재 영역의 경도 값 변화를 살펴보았다. 먼저 시편 결과로부터 공정조건과 상관없이 적층 표면에서 적층 경계면에 근접할수록 경도값이 커짐을 공통적으로 확인하였다. 이는 적층 경계면에서 시작되는 용착공정이 적층방향인 상부로 진행되면서 적층 레이어마다 반복되는 가열 사이클로 인해 발생하는 적층금속의 미세조직 변화로부터 기인한다[3,13].

적층되는 첫번째 레이어는 레일 위에 용착되어 상온냉각을 거치게 되고 빠른 냉각속도로 인해 δ -페라이트 생성이 유리해지면서 경도값이 높지만[3] 레이어 적층이 반복되어 진행될수록 새로 적층되는 레이어의 냉각속도는 상대적으로 느려지며, 냉각속도의 저하로 인한 오스테나이트 생성으로 인해 경도값의 저하로 연결된다.

적층시 조사되는 레이저의 에너지 밀도는 Eq. (1)에서

알 수 있는 바와 같이 레이저 파워와 레이저 스캔 스피드에 영향을 받게 된다. 즉, 다른 공정조건이 같다는 전제하에 레이저 파워가 증가할수록, 그리고 레이저 스캔 스피드가 줄어들수록 에너지 밀도는 증가하게 된다. 에너지 밀도가 증가하는 경우 적층 레이어의 냉각속도는 상대적으로 감소하게 되며 고온으로 유지되는 시간이 길어지면서 오스테나이트로의 변태가 증가하게 된다[14]. 이로 인해 에너지 밀도가 증가하는 공정조건의 경도는 상대적으로 낮은 값을 보이게 된다. 이는 일정한 레이저 파워에서 스캔 스피드가 높을수록 에너지 밀도가 낮아져 경도가 높아지는 Fig. 4의 결과 및 일정한 레이저 스캔 스피드에서 레이저 출력 증가로 인한 에너지 밀도의 증가시 경도가 낮아지는 Fig. 5 결과의 원인으로 설명될 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 레이저 적층공정기술인 DED 공정기술을 철도 레일의 유지보수 기술로 적용하기 위한 연구로 SUS316L 소재 대상으로 DED 공정의 중요 공정조건인 레이저 파워와 레이저 스캔 스피드를 변수로 하여 레일의 경도 특성 변화 분석을 진행하였다.

경도 특성변화의 분석 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 공정조건별로 구분한 모든 시험 케이스에서 적층 표면에서 적층 경계면에 근접할수록 경도값은 증가함을 보인다.
- 2) 동일한 레이저 파워 조건에서 레이저 스캔 스피드를 늘릴수록 적층영역의 경도값은 상대적으로 높아진다.
- 3) 동일한 레이저 스캔 스피드 조건에서 레이저 파워의 증가에 따라 적층영역 경도값은 상대적으로 낮아진다.
- 4) 레이저 파워 및 레이저 스캔 스피드와 관련된 에너지 밀도가 증가할수록 적층 레이어의 냉각속도가 느려지면서 고온으로 유지되는 시간이 길어지며 이로 인해 오스테나이트로의 변태가 증가함으로써 경도값이 낮아지는 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-y>
- [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-y>
- [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.ijtst.2021.05.004>
- [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] 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>
- [7] 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>
- [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.
- [13] M.Kim, "A Study on the Hardness characteristics of repaired rail applying DED process technology", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.24, no.8, pp.455-460, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.8.455>
- [14] S.C.Kim, J.H.Hyun, T.W.Shin, J.H.Koh, "A Study of the Characteristics on the Dissimilar Metals (ASTM Type 316L-Carbon Steel: ASTM A516-70) Welds Made with FCA Multiple Layer Welding", Journal of Welding and Joining, vol.34, no.3, pp.69-76, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.3.69>

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