

Directed energy deposition 공정 적용 단일 적층 트랙의 단면 형상에 관한 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구실

A Study on the sectional shape of single track added by directed energy deposition process

Moo-Sun Kim

Urban Railroad Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 임베디드 센서 금속 구조물을 제작하기 위한 방법으로 DED(Directed energy deposition) 공정 기술을 적용할 때 공정의 높은 열에너지에 의한 센서 파손을 방지하기 위해 공정조건에 따른 멜트풀 형상 변화 특성에 관하여 시험 분석을 진행하였다. AI 기술이 발전하면서 구조물 자가진단의 중요성이 커지고 있으며, 이에 따라 구조물과 센서 융합 방안의 필요성이 커지면서 센서를 구조물에 삽입하는 방안에 관한 연구가 확대되고 있다. 일반 제조방식으로 센서와 구조물을 일체화하는 경우, 공정 열에너지에 의한 센서 파손을 피하기 어렵다. 하지만 레이저 적층기술을 적용할 경우 용착에너지를 최소화하여 센서 파손을 방지할 수 있다. 용착에너지를 판단할 수 있는 방안으로 DED 공정시 생성되는 멜트풀의 형상분석을 통해 가능하다. 본 연구에서 멜트풀 형상 분석을 위해 DED 공정을 다양한 레이저 출력과 레이저 스캔 스피드 조합의 공정조건에서 진행하여 생성되는 멜트풀의 폭과 깊이를 비교하였다. 대상 소재는 SUS316L을 적용하였으며, 레이저 출력은 900~1,800W, 스캔 스피드는 800~1,200mm/min의 범위에서 정의하였다. 분석 결과로, 에너지 밀도가 증가할수록 멜트풀 폭은 증가하였으며, 같은 에너지 밀도에서는 출력이 커질수록 상대적으로 멜트풀 폭이 더 증가함을 확인하였다. 모재내에 생성되는 멜트풀 깊이 또한 에너지 밀도에 비례하여 증가하였으며 1,800W와 800mm/min의 공정조건에서 700 μ m의 최대 깊이 값을 보였다. 센서 커버의 최소 두께는 멜트풀의 최대 깊이 이상으로 제작되어야 센서 파손을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract In this study, analysis was carried out to determine melt-pool shape characteristics according to the processing conditions to prevent sensor damage due to high thermal energy when applying DED (directed energy deposition) to manufacture a metal-structure embedding sensor. As AI technology develops, the importance of developing a self-diagnosis structure increases. As the need for integration of a sensor and a structure increases, research to insert sensors into structures is expanding. When integrating a sensor and structure using a general manufacturing method, it is difficult to avoid damage to the sensor due to heat energy. However, when laser additive manufacturing technology like DED is applied, sensor damage can be prevented by minimizing fusion energy. A way to determine the fusion energy is through analysis of the shape of the melt pool formed during the DED process. In this study, to analyze the melt pool shape, the DED process was performed under various laser power and scan speed combinations, and the width and depth of the generated melt pool were compared. SUS316L was applied as the material, and the laser power and scan speed were in the ranges of 900-1,800 W and 800-1,200 mm/min, respectively. As a result of the analysis, it was confirmed that the melt pool width increased as the energy density increased, and at the same energy density, the melt pool width increased as the laser power increased. The melt pool depth created within the substrate material also increased in proportion to the energy density, showing a maximum depth value of 700 μ m under process conditions of 1,800 W and 800 mm/min. It is estimated that the minimum thickness of the sensor cover must be more than the maximum depth of the melt pool to prevent sensor damage.

Keywords : DED, Energy Density, Laser Power, Laser Scanning Speed, Meltpool

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

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

email: mskim@krii.re.kr

Received October 31, 2023

Revised November 28, 2023

Accepted December 8, 2023

Published December 31, 2023

1. 서론

적층제조(AM, Additive Manufacturing) 기술은 대표적인 3D 프린팅 기술로서 사출, 주조와 같은 기존 제조기술로는 제작이 어려운 복잡한 형상의 제품 제작을 가능하게 하는 새로운 개념의 제조기술이다. 예를 들어 적층기술의 고도화로 인해 이상적인 설계 방안으로만 여겨지던 위상최적설계 결과물인 구조물의 실물 제작이 가능하게 되어 복잡한 형상과 기능성의 동시 구현이 가능하다.

또한 적층기술은 제품 제작을 위한 금형 등의 부가 구조물이 필요하지 않으므로 금형 제작 및 유지보수를 위한 시간과 비용을 절감할 수 있다.

적층기술의 물성 특징으로는 열원으로 쓰이는 에너지의 미세조절이 가능하기 때문에 일반 용접과 달리 열영향부(HAZ, Heat affected zone)를 국소화할 수 있으며, 기존 구조물에 적층하는 경우 열영향부를 최소화하여 기존 물성을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이종소재의 접합시 경계면에서 소재 용착공정의 미세조절이 가능하여 접합특성을 향상할 수 있다.

단점으로는 장비 및 공정 환경의 제약에 품질 영향을 많이 받는다는 것이다. 적층 장비에 따라 제작할 수 있는 구조물의 크기가 제한되며, 장비 특성과 장비 운영자의 경험에 따라 영향을 많이 받으므로 구조물의 물성 차이가 발생할 수 있다. 그리고 제품을 대량으로 제작하는 경우 기존 제작방식에 비해 비용 부담이 커질 수 있다.

이와 같은 특성의 적층기술은 적용 구조물 형태와 생산 개수에 따라 제작 효율의 차이가 있으므로, 이를 기반으로 적층기술 적용 여부를 판단하여야 한다. 즉 부품 제작을 위한 제조기술로 활용하거나 또는 파손 부품의 일부 영역을 유지보수하는 기술로 적용함으로써 제조 효율을 올릴 수 있다.

최근 들어 부품 제작 또는 유지보수 용도에서 더 나아가, 적층기술 특징에 기반하여 새롭게 관심받는 분야는 구조물 내부에 센서를 삽입하여 이를 일체화하는 기술 연구이다.

현대의 부품 제조기술은 디지털 패러다임으로의 전환에 의해 주요 부품들의 상태를 실시간으로 모니터링하고 인공지능 같은 기술을 통해 시스템의 건전성을 확보하는 기술로의 변환을 추구하고 있다. 이를 위해 자가진단이 가능한 부품 스마트화 기술개발이 요구되고, 따라서 구조물과 센서의 융합 방안의 모색이 필요하다.

외부의 가혹 환경에 의한 센서 파손 가능성을 낮추고, 장착 위치 등의 제약을 최소화 할 수 있는 방안으로 구조

물 내부에 센서를 삽입하는 경우 센싱 대상의 구조물이 직접 보호구조체 역할을 하면서 제품 공간 활용의 이점을 살릴 수 있다.

기존 제품 제작기술로서 제품 내부에 센서를 삽입하여 주조 또는 용접 공정 등으로 제품을 제작하는 경우, 높은 열 등으로 인한 파손을 피할 수 없으며, 구조체와 센서의 접합품질을 보증할 수 없는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 적층기술을 적용함으로써 해결할 수 있다. 구조물 내 센서 부착시 미세영역에 대한 적층공정을 활용하여 센서 구조물에 대한 열영향을 상대적으로 최소화할 수 있으며, 센서 상부의 적층 공정 모니터링을 통해 일체화 결함을 최소화하고 대상 구조물의 형상 제작이 가능하기 때문이다.

구조물 내 센서 삽입 적층기술 관련하여, 고분자를 대상으로 한 연구로서 Liang et al[1]은 메탈 와이어 메시를 FDM(Fused deposition modeling)공정기술로 고분자 내에 함침하여 안테나를 제작하는 연구를 수행하였다. Sbriglia et al[2]은 FDM 공정기술로 가속도계를 삽입한 구조물의 모드 특성에 대한 FDM공정 조건 영향력을 연구하였다. 금속 구조물 내 임베디드 센서 제작기술 연구로서 Juhasz et al[3]은 하이브리드 AM 기술을 적용하여 스트레인 게이지 센서를 제작하고 성능실험을 진행하였다. Jung et al[4]은 SLM(Selective laser melting)공정시 열에 의한 센서 파손을 방지하기 위해 보호층을 삽입한 임베디드 센서 제작기술에 관한 연구를 수행하였으며, Hyer et al[5]은 SLM공정기술을 이용하여 열전대를 금속 구조물내에 삽입하고 이에 대한 성능시험을 통해 센서 건전성을 확인하였다.

금속 구조물 내부 임베디드 센서 제작기술 연구의 대부분은 적층공정시 센서에 대한 열영향을 최소화하기 위해 100 μ m 단위 레이어 제어 기술이 가능하고 열원인 레이저의 열영향이 상대적으로 적은 SLM공정기술에 집중되어 진행되고 있다. 하지만 SLM 공정기술은 구조물 크기의 제약 및 공정공간의 밀폐와 적층 파워더의 두께 균일화 등 공정조건이 까다롭기 때문에 임베디드 센서 제작의 유연성을 위해 상대적으로 환경 영향이 적은 DED 공정기술 적용 연구가 필요하다.

본 연구에서는 DED 공정으로 임베디드 센서 제작시 센서와 구조물간 결합부에서 공정 열영향에 의한 센서 금속 커버의 손상을 최소화 할 수 있는 공정 조건 특성 분석을 목표로 하였다. 이를 위해 공정 열영향과 직결되는 펄트플 형상특징과 관련하여 DED 공정 조건별로 분석을 진행하였다. 즉 센서 금속 커버의 두께에 적합한 펄트플의 폭 및 깊이와 같은 사이즈 특성을 분석하였다.

2. 본론

2.1 DED 공정

레이저를 열원으로 이용하는 대표적인 적층 제조기술로서 DED(Directed Energy Deposition) 공정기술은 SLM 공정기술에 비해 공정환경이 작업품질에 미치는 영향이 적고 대형 부품 적용이 수월하므로 현장 작업에 적용할 수 있는 잇점이 있는 반면, 레이저 출력 세기는 상대적으로 강하며, 적층 재료로 쓰이는 금속 파우더의 크기 또한 크고 거칠기 때문에, 적층시 SLM공정 대비하여 열영향부의 크기가 커진다.

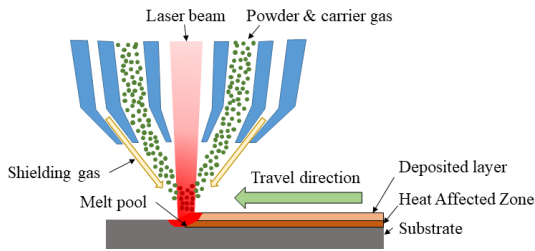


Fig. 1. Schematic of DED process

Fig. 1에 DED 공정기술의 개념을 도시하였다.

DED 공정 절차는 먼저 장비 헤드를 통해 중앙에서 레이저가 출력되며, 레이저 홀 주변에 위치한 분사구에서 적층소재인 금속 파우더가 이송 gas와 함께 분사된다.

레이저 출력 범위 안에 분사되는 금속 파우더는 레이저 열로부터 열을 흡수하고 액상으로 전환되며, 나머지 레이저 열에너지는 적층 대상구조물 표면에 흡수된다. 그 후 용융된 파우더 소재는 적층 표면에 용착되고 그 영역을 중심으로 멜트풀이 생성된다.

용착 경계면에는 기존 적층구조물 위에 새로 용착된 적층 레이어와 구분되는 HAZ이 형성되는데, 이는 구조물의 최종 물성에 영향을 미치는 중요한 영역이다.

DED 공정에서 중요한 공정변수로는 레이저 출력, 레이저 스캔 스피드, 스캐닝 간격, 스캐닝 방향 및 파우더 피딩 속도 등을 들 수 있다.

레이저 적층공정에서 멜트풀 특성을 예측하기 위해 대표적으로 쓰이는 파라미터로서 위 공정변수들로 구성된 에너지 밀도를 정의할 수 있다[6]. 에너지 밀도는 Eq. (1) 과 같이 정의된다.

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

에너지 밀도 E (J/mm^3)는 레이저 파워 P (W), 스캔 스피드 u (mm/s), 스캔 간격 h (mm), 그리고 레이어 두께 d (mm)의 상관관계로 정의되며 이로부터 알 수 있는 바와 같이 레이저 파워의 크기가 커지고 스캔 스피드가 줄어들수록 멜트풀에 적용되는 에너지 밀도는 높아진다는 것을 예측할 수 있다.

2.2 적층 시편 제작

DED 공정의 열영향 영역과 관련된 멜트풀의 형상 특성을 측정하기 위해 멜트풀 생성에 가장 큰 영향을 미치는 공정조건인 레이저 출력과 스캔 스피드를 변수로 하여 시편을 제작하였다. 적층 모재와 적층 파우더로 SUS316을 적용하였으며 그 조성은 Table 1[7,8]에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of SUS316L powder (wt%)

Material	Fe	C	Si	Mn	P
SUS316L	Bal	0.03	1	2	0.045

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

적층시편은 모재 블록 위에 레이저 파워 및 스캔 스피드를 구분하여 싱글 트랙을 적층하는 방식으로 제작하였다. 한 개의 블록에는 동일한 레이저 파워조건에 3개의 다른 스캔 스피드로 각 싱글 트랙을 적층하였다. 각 케이스별 공정조건은 Table 2에 정리하였다. 시편 제작은 Fig. 2와 같은 형상으로 진행하였다.

Table 2. DED process conditions for each specimen case

Case no.	Laser power (W)	Laser scan speed(mm/min)
1	900	800, 1000, 1,200
2	1,000	
3	1,100	
4	1,200	
5	1,300	
6	1,400	
7	1,500	
8	1,600	
9	1,700	
10	1,800	



Fig. 2. Single track specimen manufactured by DED

시편 제작을 위한 DED 장비는 DMG Mori 社 LASERTEC 65 3D hybrid 장비를 사용하였으며, 시편 제작은 상온 온도조건에서 진행하고 파우더 피딩 속도는 동일한 조건으로 적용하였다. 이 때 레이저 스폿의 직경은 2.96mm이다.

2.3 멜트풀 형상 특성 분석

DED 공정을 통해 생성되는 멜트풀 형상은 레이저 열원의 에너지 분포 형태와 밀접한 관련을 가진다. 일반적으로 레이저 내 에너지 분포는 가우시안 분포를 따른다. 레이저 스폿 내 에너지 분포 계산은 다음 식으로부터 유도된다[9].

$$LP_l = \frac{2 \times LP}{\pi r_l^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{r_l^2}\right) \quad (2)$$

이 때 r_l 은 토탈 빔 반경, r 은 로컬 반경, LP 는 소스 레이저 출력이며 LP_l 은 위치별 레이저 출력을 의미한다 [8]. 레이저 에너지 분포 형상에 따라 멜트풀의 기본형상은 타원형으로 구성될 것임을 예측할 수 있다.

멜트풀 형상 분석은 모재 위에 레이저로 소재 파우더를 용착한 싱글 트랙의 타원형 단면 크기와 폭을 측정하여 공정조건별로 정리하였다.

먼저 Fig. 3에 두 개 공정조건에서 생성된 멜트풀의 단면형상을 비교하였다.

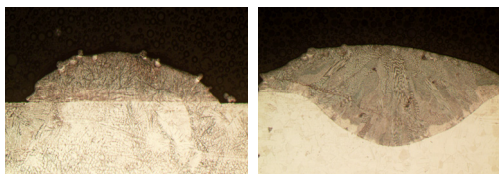


Fig. 3. Sectional view of melt pool with (a) 900W, 800mm/min and (b) 1,800W, 800mm/min

900W, 800mm/min 의 조건에서 생성된 멜트풀 형상은 모재 위에 파우더 소재의 용착이 더해지지만 모재의 용융은 거의 없다. 반면 1,800W, 1,200mm/min 공정조건의 멜트풀은 소재 용착과 더불어 모재 내부까지 용융되어 넓은 범위에서 생성됨을 확인할 수 있다. 따라서 적층품질은 멜트풀 형상을 기반으로 할 때 두번째 적층조건에서 나은 결과를 가질 것이다.

다음으로 Table 2에서 정의한 케이스 별로 생성된 멜트풀 사이즈 결과를 정리하였다.

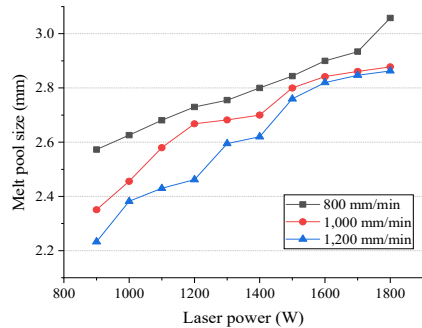


Fig. 4. Comparison of meltpool width with the various DED processing conditions

Fig. 4는 케이스 별 공정조건에서 생성된 멜트풀 폭의 크기 측정 값들을 비교하였다. 레이저 출력이 커질수록 그리고 스캔 스피드가 낮을수록 멜트풀 폭은 증가한다. 하지만 대부분의 공정조건 범위에서 멜트풀 폭은 레이저 스폿 직경보다 작다. 이는 스폿 직경내에서 에너지 밀도가 균일하지 않고 스폿 바깥으로 나갈수록 약해지는 에너지 밀도 때문에 일정 범위 내에서는 파우더가 충분히 용융되지 못하기 때문이다.

Fig. 5에는 레이저 스캔 스피드에 대한 레이저 출력비를 기준으로 멜트풀 폭을 비교하였다.

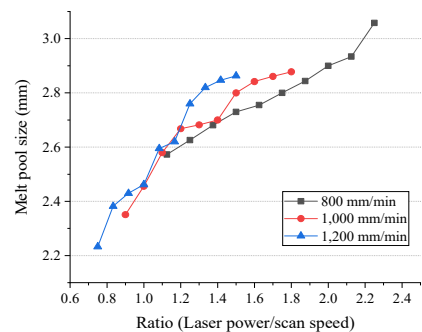


Fig. 5. Comparison of meltpool width with the various ratio of laser power to scan speed

Eq. (1)에서 나타낸 바와 같이 에너지 밀도는 레이저 출력에 비례하고 스캔 스피드에 반비례한다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 스캔 스피드에 대한 출력 비율이 약 1.2까지는 비슷한 에너지 밀도 크기에서는 멜트풀 사이즈가 비슷한 반면 그 이후로는 에너지 밀도가 비슷한 경우 레이저 출력이 더 큰 조건에서 상대적으로 멜트풀 사이즈가 증가한다. 이는 레이저 출력이 멜트풀 형성에 더 큰 영향을 가짐을 의미한다.

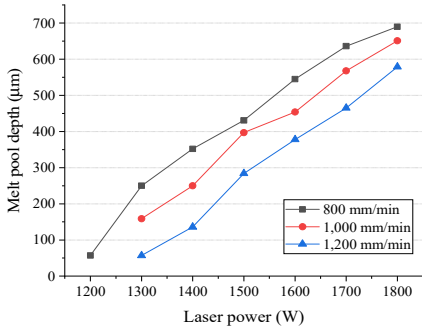


Fig. 6. Comparison of melt pool depth with the various DED processing conditions

Fig. 6에는 공정조건별로 모재 내부까지 생성되는 멜트풀 깊이를 측정된 값을 비교하였다. 앞서 언급한 바와 같이 일부 공정 조건에서는 모재 내부 용융이 발생하지 않고 용융된 파우더만 용착되므로 모재 내부로의 멜트풀 깊이는 생성되지 않는다. 레이저 출력이 1,200W 이상부터 모재 내부에 용융이 발생하며 이로 인한 멜트풀 깊이가 점차적으로 증가하였다. 멜트풀 깊이 또한 에너지 밀도에 비례하여 크기가 증가한다. 시험을 진행한 공정조건 범위에서 멜트풀 깊이는 최대 700 μm 에 이르므로 이 경우 센서 금속 커버는 이 값 이상의 최소 두께를 가져야만 금속 커버의 형상이 유지될 수 있을 것으로 예측된다.

3. 결론

본 연구에서는 금속 구조물 내부에 센서를 삽입하고 그 상부에 구조물 형태를 적층 제작하는 방식의 임베디드 센서 제작기술로 레이저 적층공정기술인 DED 공정기술을 적용할 때 센서 커버에 미칠 수 있는 열영향을 분석하기 위해 레이저 출력 및 스캔 스피드의 다양한 조합 조건에서 생성되는 싱글 트랙의 멜트풀 형상에 관한 분석을 진행하였다.

멜트풀 형상 특성의 분석 결과를 다음과 같이 정리하

였다.

- 1) 레이저 출력이 증가하고 스캔 스피드가 줄어들수록 에너지 밀도가 증가하며 이로 인해 멜트풀 폭은 증가한다. 대부분의 멜트풀 직경은 레이저 스팟 직경보다 작게 생성된다.
- 2) 일정한 에너지 밀도에서 레이저 출력이 더 큰 조건에서 멜트풀 폭 크기는 상대적으로 증가하였다.
- 3) 레이저 출력이 1,200W 이상인 경우 모재 내부로의 멜트풀 생성이 관찰되었으며, 주어진 공정조건에서 최대 700 μm 의 깊이가 생성되었다. 임베디드 센서 제작시 센서 파손을 방지하기 위한 금속 커버 두께는 이 값을 참조하여 정의할 수 있다.

References

- [1] M.Liang, C.Shemelya, E.MacDonald, R.Wicker, H.Xin, "3-D Printed Microwave Patch Antenna via Fused Deposition Method and Ultrasonic Wire Mesh Embedding Technique", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.14, pp.1346-1349, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2405054>
- [2] L.R.Sbriglia, A.M.Baker, J.M.Thompson, R.V.Morgan, A.J.Wachtor, J.D.Bernardin, "Embedding Sensors in FDM Plastic Parts During Additive Manufacturing", Topics in Modal Analysis & Testing, vol.10, pp. 205-214, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30249-2_17
- [3] M.Juhasz, R.Tiedemann, G.Dumstorff, J.Walker, A.D.Plessis, B.Conner, W.Lang, E.MacDonald, "Hybrid directed energy deposition for fabricating metal structures with embedded sensors", Additive Manufacturing, vol.35,101397, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101397>
- [4] I.D.Jung, M.S.Lee, J.Lee, H.Sung, J.Choe, H.J.Son, J.Yun, K.Kim, M.Kim, S.W.Lee, S.Yang, S.K.Moon, K.T.Kim, J.Yu, "Embedding sensors using selective laser melting for self-cognitive metal parts", Additive Manufacturing, vol.33, 101151, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101151>
- [5] H.C.Hyer, K.Carver, F.A.List III, C.M.Petrie, "Embedding Sensors in 3D Printed Metal Structures", ORNL/TM-2021/2143, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2172/1818670>
- [6] 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>
- [7] Stainless steel wires, KS D 3703:2007, Korean Standards & Certification, 2007.

- [8] Stainless steel bars, KS D 3706:2017, Korean Standards & Certification, 2017.
- [9] 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>

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대 자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술 연구원 책임연구원

<관심분야>

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석