

## 물리적 표면처리 기법에 따른 복합소재 및 알루미늄간 접합특성 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

### A study on adhesion properties between composite material and aluminum according to the physical surface treatment technique

Moosun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

**요약** 본 연구에서는 탄소섬유 및 유리섬유 강화 복합소재를 대상으로 하여, 접합면에 기계적인 결합력 향상을 위해 물리적인 표면처리 방법을 적용할 때, 알루미늄 및 복합소재, 복합소재 및 복합소재 간의 접합특성을 비교 분석하였다. 접합시편은 접합을 위해 쓰이는 모재 종류와 모재 접합면의 표면처리 방법으로 각각 구분하였다. 물리적인 표면처리 방법으로는 기계적인 마모 (사포 처리, sand blasting 처리 및 플라즈마 처리기법을 적용하였다. 접합시편은 single lap joint 시편으로 제작하였으며 lap shear strength 측정 실험을 진행하여 그 결과값을 비교하였다. 실험 결과에서 기계적인 마모 및 sand blasting 표면 처리 방법이 물리적인 표면 처리를 진행하지 않은 일반 시편 대비하여 약 4~5배의 접합강도 향상이 있음을 확인하였다. 플라즈마 처리 기법을 적용한 방안에서는 플라즈마 출력과 처리 시간을 150 W 5분, 150 W 10분 및 300 W 3분 처리 조건으로 정의하여 실험을 진행하였으며, lap shear strength 결과에서 앞선 기계적 표면 처리 방안과 유사한 결과를 보였다. 다만 처리 조건에 따라서 접합특성에 미치는 영향은 적음을 확인하였다.

**Abstract** In this study, the adhesion properties between aluminum and composite materials, composite materials, and composite materials were compared according to the physical surface treatment to improve mechanical bonding at the bonding surface when considering carbon fiber and glass fiber-reinforced composite materials. Bonded specimens were classified into the type of base material and the surface treatment method of the bonding surface. Sandpaper, sandblasting, and plasma were applied as physical surface treatment methods. The bonded specimen was prepared as a single lap joint test specimen. An experiment to measure the lap shear strength was conducted, and the results were compared. The experimental results confirmed that the mechanical abrasion and sandblasting treatment improved the lap shear strength approximately 4 to 5 fold compared to the general specimen without physical surface treatment. In plasma treatment, the experiment was conducted by defining the respective plasma output and treatment time as follows: 150 W and 5 minutes, 150 W and 10 minutes, and 300 W and 3 minutes. Moreover, the lap shear strength results were similar to the previous mechanical surface treatments. On the other hand, the effect on the adhesion properties was small, depending on the plasma treatment conditions.

**Keywords** : Adhesion properties, Composite material, Lap shear strength, Plasma, Surface treatment

---

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07044505)

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

email: mskim@krii.re.kr

Received October 6, 2020

Revised October 27, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

## 1. 서론

오늘날 항공, 자동차, 철도, 선박 등 운송수단 제조 산업에서 경량화를 목적으로 하는 소재 사용은 지속적으로 증대하고 있는 추세이다.

경량화 소재는 더 가볍고 강하면서도 안전한 차별화된 소재를 요구하고 있다.

대표적인 소재로, 알루미늄, 마그네슘, 초고강도 합금 이외에도 유리섬유 또는 탄소섬유를 적용하는 복합소재 등을 들 수 있다. 철도차량의 경우 스틸, 알루미늄 등의 사용에서 벗어나 복합재료를 적용하고자 많은 연구가 진행되어 왔다.

하지만 차량 전체를 복합소재로 제작하는 경우 뛰어난 경량화 특성을 가지면서도, 제조공정의 복잡함, 높은 제작 비용 등의 이유로 단독으로 사용하기엔 효율의 문제가 있으므로 금속 구조체와 함께 복합소재를 부분적으로 적용하는 하이브리드 형태의 적용이 효율적이라 할 수 있다. 이 경우 금속과 복합소재간의 기계적, 열적 물성 등의 차이로 내구성의 문제가 발생할 수 있기 때문에 두 소재간의 접합 특성에 관한 관심이 높아지고 있다.

일반적인 용접으로는 금속 및 고분자를 모재로 하는 복합소재간의 접합이 불가능하기 때문에 홀 가공 및 기계적 체결 방법을 통해 이종소재간의 접합을 진행할 수 있는데, 이 경우 복합소재의 특성에 의해 홀가공 공구의 내구성이 문제가 될 수 있으며, 이런 문제점을 극복하기 위해 접착제와 같은 화학적 접합방법에 관한 많은 연구가 진행 중에 있다.

접합 관련 연구로서 Gude 등[1]은 CFRP 모재 대상으로 접합면의 플라즈마 처리 후 카본 나노 필러가 첨가된 접착제를 적용하고 수분흡수가 접합강도에 미치는 영향을 시험적으로 분석하였고 Song 등[2]은 복합소재 접합특성에 온도 및 습도 등의 환경 요인이 미치는 영향을 연구하였다. Lee 등[3]은 알루미늄과 복합재의 이종소재 접합에 관해 알루미늄 시편의 표면 처리 상태에 따른 전단시험을 진행하였다. Tuzun 등[4]은 calcite분말을 접착제에 혼합하였을 때 접합강도에 미치는 영향을 분석하였으며, On 등[5]은 열팽창계수의 영향을 줄이기 위해 접착제 내부에 메타 아라미드 나노섬유를 함침한 경우의 접합강도에 관하여 연구를 수행하였다. Kwon 등[6]은 접합시편을 만드는 접합공정 진행시 공정 조건의 최적화를 통한 접합특성 향상에 관하여 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 접합되는 소재의 다양한 조합을 고려하여 1액형 에폭시 접착제를 적용할 때 접합특성을 분석하

였다. 이 때 실험 변수로서 소재 접합면의 표면 처리 여부 및 물리적 표면 처리 방법에 따라 접합력 차이를 분석하였다. 실험은 single lap joint test 방식으로 진행하여 lap shear strength를 측정하는 방식으로 결과값을 비교하였다.

## 2. 본론

### 2.1 접합특성 시편 제작

접합특성 실험을 위해 제작한 시편의 모재 조합은 알루미늄-CFRP, CFRP-CFRP, 알루미늄-GFRP, GFRP-GFRP 이다. 실험에 사용된 각 모재의 특성은 Table 1 과 같다.

Table 1. Specification of test material

	Product name	Weaving type	Thickness (mm)
Carbon fiber/epoxy	H15 (SK chemical)	Plane fabric	0.3 (1 ply)
Glass fiber/epoxy	FAW300 (SK chemical)	Plane fabric	0.32 (1 ply)
Aluminum	Al 6005A	-	3

접합을 위한 접착제로는 1액형 에폭시 타입의 Huntsman사 Araldite 2011을 사용하였다.

복합소재 모재는 두께를 3 mm 로 일정하게 유지하기 위해 각 16장씩의 탄소섬유 및 유리섬유 프리프레그를 사용하였다. 복합재료 평판을 성형한 후 ASTM D1002 [7] Single lap joint test 규격에 따라서 절단한 후 Fig. 1과 같이 접합시편을 제작하였다.

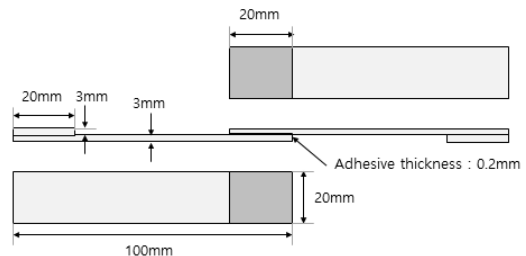


Fig. 1. Specification of test specimen for single lap joint test

접합시편간 에폭시 접착제는 핫프레스를 사용하여 80 °C에서 2시간 동안 경화하였다.

## 2.2 접합표면 처리 방법

접합강도를 높이는 물리적인 방법으로 모재와 접착제 간 mechanical inter-locking 효과를 증대할 수 있는 표면 처리가 필요하다. 실험변수로 고려한 모재의 표면처리 방법으로는 물리적 표면처리를 적용하지 않은 미처리 시편, 사포(mechanical abrasion)를 이용하여 접합면에 기계적 처리를 적용한 시편, 그리고 sand blasting을 진행한 표면처리 시편으로 분류하였다. 마지막으로 플라즈마를 이용한 표면처리 방법은 플라즈마 출력과 처리시간을 다르게 하여 적용하였다.

먼저 사포를 이용한 표면 처리는 알루미늄 모재의 경우 #80 사포를, 복합재 모재는 #150 사포를 사용하여 +45도 및 -45도 방향으로 각 10회씩 접합표면을 긁은 후 아세톤으로 세척을 진행하였다.

Sand blasting 처리는 알루미늄 모재의 경우 #46 알루미늄 입자를 0.6 MPa 압력으로 5초간 분사하였으며, 복합재 모재는 #160 알루미늄 입자를 0.2 MPa로 5초간 처리하였다.

플라즈마를 이용한 표면 처리 조건으로는 O<sub>2</sub>를 이용한 산화 플라즈마 방식으로 150 W 5분 및 10분 처리조건과 300 W 3분 처리 조건으로 구분하여 진행하였다.

## 2.3 Single lap joint 실험

접합표면 처리 방법별로 각각 제작된 접합시편을 대상으로 single-lap joint 실험을 진행하였다. 실험은 Instron (USA)社의 5969 장비를 사용하여 상온에서 진행하였으며, ASTM D1002 규격을 따랐다. 그리고 1.0 mm/min의 하중속도로 진행하였다. 각 조건별 실험은 5개 시편을 대상으로 하였으며, 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2에 사포로 표면처리를 진행한 시편의 접합특성 시험 후 파단된 단면을 나타내었다.

그림에서 보이는 바와 같이, 알루미늄과 복합재를 각 모재로 하는 접합시편의 파단은 부분적으로 접합 계면 및 복합재의 층간 파괴모드가 혼재하는 형태로 파단이 발생함을 보여준다. 다음으로 복합재를 두 모재로 하는 경우에는 시편 파단이 복합재 내부 층간에서 발생함을 확인할 수 있다. Sand blasting 처리한 시편에서도 파괴된 단면에서 비슷한 경향을 보인다.

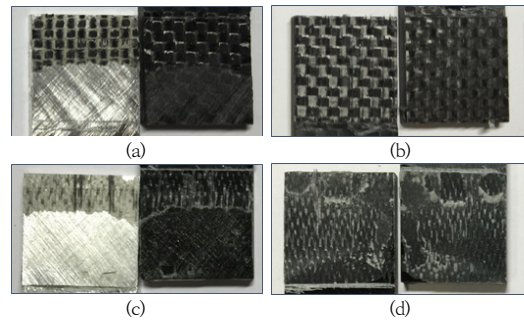


Fig. 2. Fractured surface of mechanically abraded specimen of (a) Al-CFRP, (b) CFRP-CFRP, (c) Al-GFRP and (d) GFRP-GFRP

알루미늄과 복합소재 모재의 파단 단면이 다른 이유는 사포 및 sand blasting 등의 표면 처리 후 알루미늄 모재에서 급격하게 산화반응이 발생하고 알루미늄 산화층이 형성됨으로써 이 지점에서 상대적으로 취약한 경계면이 발생한 것으로 추정된다.

Fig. 3에 표면처리 방법별로 lap shear strength 값을 비교하여 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이, 표면 미처리 시편을 기준으로, 사포를 통한 기계적 표면처리 시편 및 sand blasting 처리 시편의 lap shear strength가 4~5배 증가함을 확인할 수 있다. 이는 표면처리 진행 후 생긴 거친 접합 표면의 영향으로 기계적 상호 구속 효과가 발생함으로써 접합강도가 증가한 것으로 볼 수 있다. 다음으로 사포처리와 sand blasting 처리 시편의 결과를 비교하였을 때, sand blasting 처리 시편이 Al-GFRP 조합 경우를 제외한 나머지 시편 조합에서 더 높은 lap shear strength 값을 보인다. 이는 수작업으로 진행한 사포를 통한 기계적 표면처리보다 sand blasting 처리 방법이 좀 더 균일하고 조밀하게 거칠기를 향상시킨 것으로 판단된다.

또한 모든 시편 제작 조건에서 알루미늄과 복합재료 조합 접합시편의 접합강도가 상대적으로 높게 측정되었다. 이는 알루미늄의 강성이 CFRP 및 GFRP로 구성된 복합재료 모재의 강성보다 높기 때문에 동일한 하중을 주었을 때 복합재료 모재보다 변형되는 양이 상대적으로 적다. 그로 인해 접합면 끝단에서 발생하는 peel stress 수준이 낮아지게 되며, 상대적으로 고분자 표면보다 표면 자유 에너지가 높은 금속 표면에서의 접합력이 높아진 것으로 추정된다. 이는 시편의 파손단면에서 복합재료 모재에서는 층간박리에 의해 파손이 되는 반면, 알루미늄 모재에서는 복합소재 박리없이 떨어져 나간 점으로 확인할 수 있다.

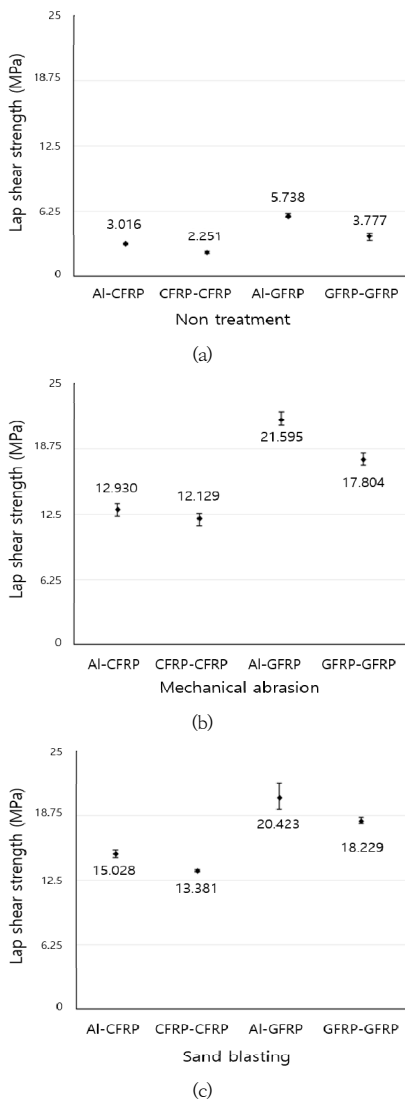


Fig. 3. Lap shear strength of specimen with (a) non-treated, (b) mechanical abraded and (c) sand blasted surface

다음으로 플라즈마 처리가 접합특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 앞서 언급한 플라즈마 처리 조건에 따른 접합면의 형상 특성을 비교분석하였다.

Fig. 4에 플라즈마 출력 및 노출시간에 따른 접합면 형상과 접촉각을 비교한 결과를 나타내었다.

그림에서 보이는 바와 같이 플라즈마 처리를 진행한 시편 모두에서 표면 경화된 에폭시가 제거되면서 섬유 노출을 확인할 수 있다.

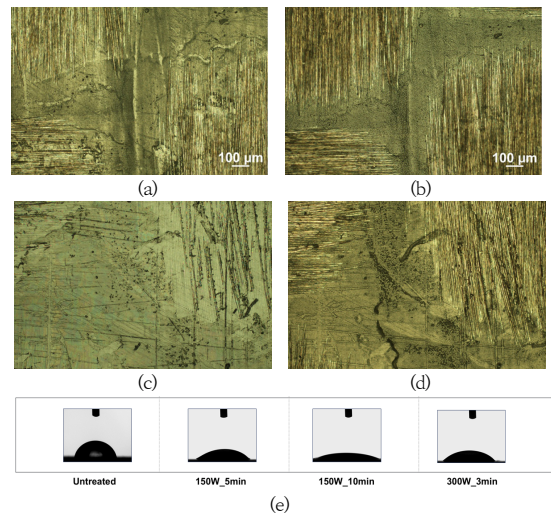


Fig. 4. Surface of specimen with (a) 150 W 5 mins & (b) 150 W 10 mins plasma treatment (c) without treatment, (d) 300 W 3 mins plasma treatment and (e) contact angle according to plasma treatment conditions

150 W 출력 기준에서 5분 처리한 시편과 10분 처리한 시편을 비교할 때 10분 처리의 경우 더 많은 섬유 노출을 보이고 있으며 300 W 출력 조건에서 3분동안 처리하였을 경우 150 W 5분 이상 처리 조건과 유사한 표면 형상 특성을 보인다.

접촉각 크기를 비교한 결과에서는 플라즈마 처리 시간이 늘어남에 따라 접촉각 크기가 작아지면서 150 W 5분 처리와 300 W 3분 처리 조건의 접촉각이 유사한 값을 보인다. 접촉각이 낮아짐은 표면자유 에너지가 증가함을 나타내며 한편으로는 접착제가 복합재 모재에 잘 스며들음을 의미한다.

Fig. 5에 플라즈마 처리 조건에 따른 lap shear strength 결과값을 비교하여 나타내었다.

그림에서 보이는 바와 같이 플라즈마 처리 시편의 경우 모든 플라즈마 조건에서 평균 접합강도가 시편 소재 별로 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

150 W 출력의 플라즈마 처리 조건에서 처리 시간에 따라 섬유 노출량의 차이를 확인 할 수 있었지만 이 차이는 접합강도에 영향을 주지 못한 것으로 판단된다. 300 W 3분 처리 시편의 접합 강도는 비슷한 섬유 노출량을 보이는 150 W 5분 처리 시편과 유사한 값을 보이는 데, 이는 접촉각의 크기가 유사하기 때문에 비슷한 결과를 예상할 수 있다. 앞선 기계적 표면처리 조건의 결과와 비교할 때 플라즈마 처리가 기계적 표면처리보다 미세한

식각이 가능함에도 불구하고 접착제의 높은 점도로 인해, 미세 식각된 표면에 접착제가 충분히 스며들지 못하면서 유사한 접착강도를 가지는 것으로 추정할 수 있다.

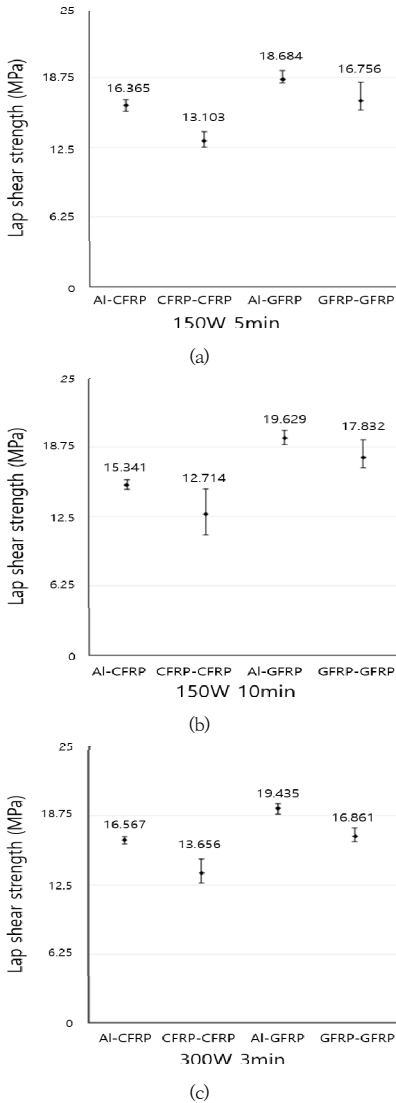


Fig. 5. Lap shear strength of specimen with (a) 150W 5 mins, (b) 150W 10mins and (c) 300W 3mins plasma treatment

기계적 표면 처리 및 플라즈마 처리 조건의 시험결과에서 공통적으로 확인되는 흥미로운 결과는 CFRP와 GFRP 조합 시편의 lap shear strength 결과를 비교했을 때, GFRP 시편의 결과값이 CFRP 시편 대비하여 더 높은 값을 보인다는 점이다. 이는 CFRP의 경우 동일 하중이 시편 양쪽 끝단에 작용할 때 이로 인한 변형량이 상

대적으로 강성이 높은 CFRP 대신 접착제에 대부분 집중되는 반면에 GFRP 시편의 경우 상대적으로 GFRP의 낮은 강성으로 인해 변형량이 접착제와 복합소재 모재에 분산됨으로써 접착제 내부의 변형을 크기가 CFRP 시편보다 감소하였기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 알루미늄과 CFRP 및 GFRP 복합소재를 모재로 하는 이종소재간 접합특성과 복합소재 모재간 접합특성을 표면 처리 방법 및 조건별로 구분하여 그 결과를 비교 분석하였다. 표면 처리 방법 구분은 모재 접합면의 기계적 결합력을 증대할 수 있는 방안을 중심으로, 사포를 이용한 기계적인 마모, sand blasting 처리 및 플라즈마를 이용한 표면 에폭시 제거와 섬유 노출 정도를 조건으로 정의하였다.

접합특성은 lap shear strength를 기준으로 평가하였으며, 실험 결과로부터 모재 종류 및 표면 처리 방법에 따른 접합특성을 확인하였다.

실험 분석 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 사포 및 sand blasting을 적용한 표면 처리 시편의 접합특성은 표면 미처리 시편 대비 약 4~5배의 lap shear strength의 증가 효과를 보였다. 표면의 단순 거칠기 조절만으로도 접합강도를 향상할 수 있었으며, 이종소재 경우 복합소재 접합특성보다 높은 결과값을 보였다.
2. 플라즈마를 활용한 표면 처리 시편의 접합특성 관련하여, 접합특성에 대한 플라즈마 처리 조건의 영향은 적었으며, 이는 플라즈마로 인해 미세 식각이 생성된 표면에 고점도의 접착제가 스며들지 못하면서 접합특성에서 큰 차이를 보이지 못한 것으로 판단된다.

#### References

[1] M.R.Gude, S.G.Prolongo, A.Urena, "Hygro thermal ageing of adhesive joints with nanoreinforced adhesives and different surface treatments of carbon fibre/epoxy substrates", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol.40, pp.179-187, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.09.005>

- [2] M.Song, J.Kweon, J.Choi, H.Kim, M.Song, S.Shin, J.Byun, "Hygrothermal Effect on the Strength of Carbon/Epoxy Composite Single-Lap Bonded Joints ", *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol.38, no.2, pp.119-128, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2010.38.2.119>
- [3] M.Lee, H.Kim, C.Kang, "Effect of Surface Roughness of Al5052/CFRP Composites on the Adhesion and Mechanical Properties", *Composites Research*, vol.26, no.5, pp.295-302, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7234/composres.2013.26.5.295>
- [4] F. Nihal, M. Tunalioglu, "The effect of finely-divided fillers on the adhesion strengths of epoxy-based adhesives", *Composite Structures*, vol.121, pp.296-303, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.007>
- [5] S.Y.On, M.S.Kim, S.S.Kim, "Effects of post-treatment of meta-aramid nanofiber mats on the adhesion strength of epoxy adhesive joints", *Composite Structures*, vol.159, pp.636-645, 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.016>
- [6] D.Kwon, S. Park, J.Park, I.Kwon, "A Study on Bonding Process for Improvement of Adhesion Properties Between CFRP-Metal Dual Materials", *Composite Research*, vol.30, no.6, pp.416-421, 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7234/composres.2017.30.6.416>
- [7] ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), *ASTM*, International, West Conshohocken, PA, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1520/D1002-10R19>

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 선임연구원

<관심분야>

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석