

철도차량용 기초제동장치의 제동레버 강도에 대한 해석적 연구

박수명^{1*}, 박재영²

¹우송대학교 철도시스템학과, ²우송대학교 철도전기시스템학과

Analytical study to the Brake Lever in Basic Brake System for Railway Vehicle

Su-Myung Park^{1*}, Jae-young Park²

¹Department of Railway System, Woosong University

²Department of Railway Electric System, Woosong University

요약 철도차량에서 기초제동장치의 제동레버는 제동통으로부터 발생하는 작용하중을 받아서 제동패드로 전달하는 중요한 안전장치로 설계 시 높은 안전성이 요구되는 기구이다. 그러나 철도차량의 설계기준인 【철도차량 안전기준에 관한 규칙】에 의하면 충분한 강도를 가져야 한도와 같이 정성적인 기준만을 제시하고 있어 실제 안전율 1.27로 설계된 전기기관차용 제동레버가 절손되어 재질을 바꿔 강도를 높인 적이 있고 또한 철도차량의 종류에 따라 각기 다른 구조의 제동레버를 사용하고 있어 본 논문에서는 분리형 구조로 설계된 고속철도차량과 일체형으로 설계된 전기동차와 전기기관차에 적용된 각각의 제동레버에 대해 이론적 해석, 구조해석을 시행하여 응력분포 및 취약부분을 확인하였다. 또한 제동 시 발생하는 수평응력과 굽힘응력의 관계를 확인하기 위해 파단시험을 실시하여 제동레버가 굽힘 응력을 많이 받음을 확인하였다. 이와 같은 해석과 실험을 통해 실제 운행 중인 철도차량의 각 제동레버에 적용된 안전율을 확인하였으며, 실제 적용된 안전율을 바탕으로 최소 정량적인 안전율의 기준 값을 제시하였다. 그리고 일체형으로 제작된 전기동차의 제동레버에 대해 동일조건하에 분리형으로 설계 변경하여 구조해석을 시행하여 일체형으로 설계된 제동레버를 분리형으로 설계 변경하였을 경우 안전율 향상에 어느 정도 영향을 미치는지를 분석하였다.

Abstract A brake lever in a basic railway brake system is an important safety device that delivers braking force from the brake cylinder to the brake pad. The safety guidelines for designing rolling stock only qualitatively describe that the brake lever should have sufficient strength. Each train has a different type of brake lever. One brake lever that was designed with a factor of safety of 1.27 has failed, so the material was changed to increase the strength. Therefore, the stress distribution and weak points of the lever were identified by theoretical analysis. and structural analysis. Different brake lever designs were examined for KTX high-speed trains, which have a split-type structure, as well as for electric locomotives, which use an electric multiple unit (EMU) with a unity-type structure. A fracture test was also done to look at the relationship between the vertical stress and the bending stress during braking. The results were used to find a safety factor to apply to each train and suggest quantitative minimum guidelines. We also looked at changing the unity-type EMU brake lever to the split type under the same conditions and analyzed how much the design change affected the factor of safety.

Keywords : Brake lever, Brake system, Rolling stock, Structural analysis, Safety factor

1. 서론

철도는 정시성, 대량수송, 안전성 등의 장점이 있는 교통수단으로 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 미래

의 육상 운송수단으로서 많은 관심을 받아 오고 있다. 또한 철도차량의 고속화에 따라 열차의 승차감과 안전성이 더욱 강조되고 있다. 이에 따라 철도차량의 제동시스템의 성능 및 안전성이 더욱 더 중요하게 인식되고 있다

*Corresponding Author : Su-Myung Park(Woosong Univ.)

Tel: +82-31-460-4501 email: smartdaddy@korail.com

Received July 7, 2016

Accepted August 11, 2016

Revised (1st August 2, 2016, 2nd August 8, 2016)

Published August 31, 2016

[1][2].

철도차량의 최적 제동력은 접촉력의 변수인 차량중량에 의해 적용범위가 달라지고, 공기제어압력, 제동통의 크기, 기초제동장치, 레버비 등에 의한 압부력의 변화가 제동력에 영향을 미치며, 마찰재료 특성, 제동초속도에 의한 마찰계수의 변화, 충분한 안전율을 고려하여 설계되어야 한다[5].

그러나 철도차량 안전기준에 관한 규칙[6] 67조 2항에는 「제동레버 등과 같이 힘을 지탱하거나 전달하는 부품은 충분한 강도를 가져야한다」 라고 정성적인 표현에 국한되어 있으며, 안전율과 같은 정량적 기준은 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 강도관점에서 일체형 제동레버의 안전성 향상을 위하여 분리형(split type) 제동레버의 강도평가를 수행하고, 이로부터 안전도의 최소 기준 값을 제안하고자 한다.

2. 이론적 해석

2.1 제동레버

철도차량용 기초제동장치는 제동통(Brake cylinder), 제동레버(Brake lever), 고정지지점(Fixed point support), 제동패드 등으로 구성되어 있다. 제동통의 공기압은 제동통 단면적과 작용하는 공기압력을 통해 제동통을 작동시키고 이렇게 만들어진 작용력은 제동레버에 전달되어 제동 레버비에 따라 작용력을 변동시켜 제동력을 발생시키고 제동력은 제동패드의 마찰계수를 통해 발생한 실질제동력으로 작용한다[4]. 이와 같은 제동력의 전달과정에서 제동레버에는 제동통에서 레버에 전달응력과 면압이 작용하고, 중간지지점인 레버 지지점에는 지렛대와 같은 기능을 하므로 굽힘 응력이 발생하고 또한 제동패드 앞단에 전단응력과 면압 등이 발생한다. 제동레버의 강도 설계를 위해서는 재질, 레버비에 따른 응력, 지지점 및 구조가 중요한 요소이다. 아래 Table 1은 제동레버에 대한 차종별 구조 및 기본 사양을 보여준다.

Table 1. characteristics in the respective brake lever

| classification | EMU | EL | KTX |
|----------------|------------|------------|------------|
| material | SC450 | GALP 900-8 | SF590 |
| lever ratio | 1.6 | 1.4 | 0.976 |
| fixed points | 2 | 1 | 2 |
| structure | unity type | unity type | split type |

2.2 일체형 제동레버

Fig. 1 은 일체형 제동레버인 전기동차와 전기기관차용 제동레버이다. 레버비는 최종 소요되는 제동력에 따라 설계되어지나 본 전기동차가 1.6:1, 전기기관차가 1.4:1로 설계되었다.

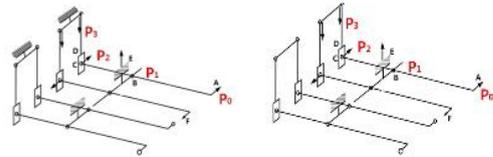


Fig. 1. basic brake assembly of EMU, EL

Fig. 2는 일체형으로 설계된 전기동차 및 전기기관차용 제동레버의 작용하중 및 응력을 산출하기 위한 자유물체도이다. 제동통에서 발생하는 작용하중 P_0 는 식(1)과 같다. P_1 에는 식(2)와 같이 가장 많은 하중이 작용하게 된다. P_2 는 제동레버의 끝단에 작용하는 하중으로 식(3)과 같다. P_3 는 제동패드에 걸리는 하중으로 제동패드의 마찰계수에 P_2 를 곱한 값으로 식(4)와 같다. 괄호안의 값은 전기기관차용이다.

$$P_0 = P \times A \tag{1}$$

$$P_1 = P_0 + 1.6(1.4)P_0 = 2.6(2.4)P_0 \tag{2}$$

$$P_2 = P_0 \times 1 \times 1.6(1.4) \tag{3}$$

$$P_3 = P_2 \times \mu \tag{4}$$

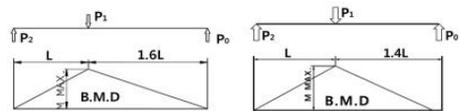


Fig. 2 free body diagram of the basic brake assembly for EMU, EL

Fig. 3은 제동레버의 최대응력을 산출하기 위한 굽힘모멘트 선도이다. 가장 높은 하중이 작용하는 P_1 에서 최대응력이 발생한다. 최대응력 값은 식(5)와 같이 P_1 지점에서의 굽힘 모멘트 값을 단면계수 Z 로 나눈 값으로 산

출된다.

P_0, P_2, P_3 지점에서 각각 전단응력과 면압이 발생 하지만 P_1 지점에서 발생하는 응력에 비해 미미하다.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{Z} \quad (5)$$

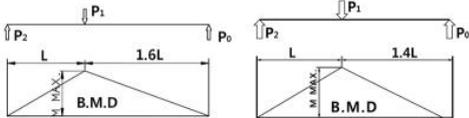


Fig. 3. bending moment diagram for EMU, EL

2.3 분리형 제동레버

Fig. 4는 고속철도차량에 적용되고 있는 기초제동장치이다. 고속철도차량에 사용된 제동레버는 전기동차용 제동레버와 다르게 크로스링크를 활용하여 제동레버가 상하로 분리되는 분리형 제동레버가 적용되었다. 제동레버의 레버비는 0.976 : 1이 적용되었다.

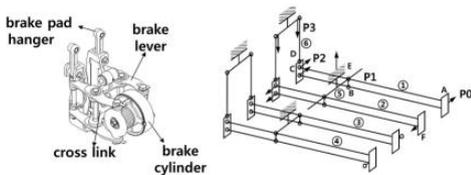


Fig. 4. basic brake assembly & free body diagram for KTX

Fig. 4에서 보는 것처럼 크로스 링크 상하로 제동레버가 분리되어 있어 식(3)에서 보는 것처럼 일체형에서는 P_2 에 1의 힘이 가해지던 것이 식(8)에서 보듯 분리형에서는 P_2 에 2의 힘이 걸리게 된다. 즉 분리형 제동레버에서는 P_2 에 동일한 힘을 전달하는데 P_0 에 절반의 힘만 소요되고 이로 인해 제동레버에 더 적은 응력이 부여된다. 이런 원리로 동일 기초제동장치에서 일체형 제동레버를 분리형으로 변경할 경우 해당 제동레버에 가해지는 응력을 줄일 수가 있다.

$$P_0 = P \times A \quad (6)$$

$$P_1 = 0.976P_0 + P_0 = 1.976P_0 \quad (7)$$

$$P_2 = P_0 \times 2 \times 0.976 \quad (8)$$

$$P_3 = P_2 \times \mu \quad (9)$$

Fig. 5는 고속철도차량용 제동레버의 레버비에 따라 발생하는 굽힘 모멘트선도를 나타내고 있다. 분리형 레버가 적용되어 레버비를 일체형이 적용된 전기동차 및 전기기관차에 비해 상당히 줄여서 설계되었다.

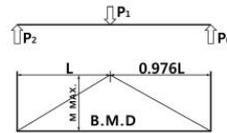


Fig. 5. bending moment diagram for KTX brake lever

3. 제동레버에 대한 파단시험

일체형 제동레버중 전기기관차용 제동레버는 제동패드 지지점(brake pad hanger)가 없는 1점 지지방식이므로 제동 체결 시 수직응력이 더 크게 작용할 것이 예상되어 제동레버에 가해지는 수직응력과 굽힘 응력과의 관계를 확인하기 위하여 Fig. 6과 같이 시험용 지그를 만들어 파단시험을 하였다.

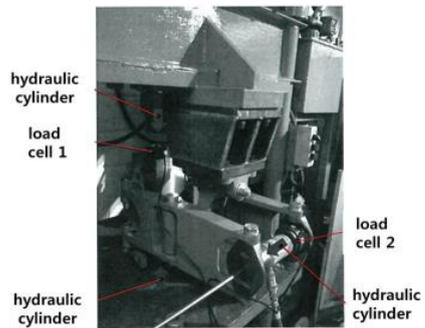


Fig. 6. test equipment for EL brake lever load test

파단시험을 실시한 결과 굽힘 응력이 작용하는 실린더 출력의 경우는 최대출력의 2배 이상인 4,875kgf에서 파단 되었고 수직응력(F)는 3배 이상인 7,100kgf에서 파단 되었다. 즉 1점지지 방식으로 설계되어 수직응력에 취약한 전기기관차용 제동레버에서도 수직응력 보다 지렛대 역할로 발생하는 굽힘 응력에 대하여 취약함을 확인할 수 있었다.

4. 유한요소해석

4.1 유한요소해석 모델

구조해석을 위한 3차원 모델링형상을 구현하기 위하여 3D 시뮬레이션 프로그램인 Solidworks 2012와 해석 솔루션 프로그램으로 Midas IT NFX 2014 R2를 사용하여 선형정적 해석방법으로 수행하였다. 각 brake lever의 해석에 사용된 요소는 고차사면체 요소이고, 각각의 요소수 및 결절점은 전기동차가 91,704개, 142,457개, 전 기기관차는 각각 23,134개, 40,135개. 고속철도차량이 각각 54,893개, 85,152개를 적용하였다. 마지막으로 전 기동차를 분리형으로 가정 할 경우가 6,376개, 10,863개이다.

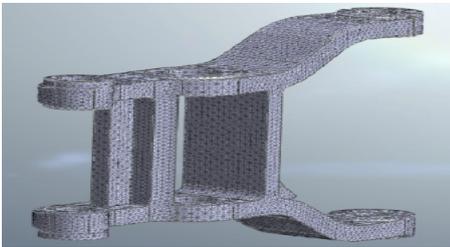


Fig. 7. FEM model of EMU brake lever

Table 2. material properties of EMU brake lever

| classification | | contents |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| material | | SC450 |
| mechanical properties | tensile strength | over 450MPa |
| | yield strength | over 225MPa |
| | endurance limit | 10^7 cycle \rightarrow 179MPa |
| | modulus of elasticity | 202GPa |
| | Poisson ratio | 0.30 |

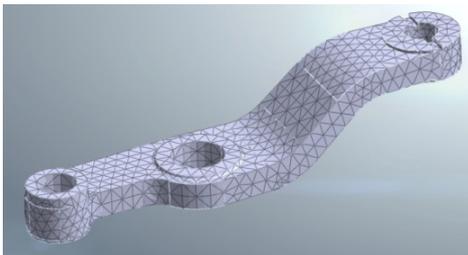


Fig. 8. FEM model of EMU split type lever

Table 4. material properties of EL brake lever

| classification | | contents |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| material | | GCAD 900-8 |
| mechanical properties | tensile strength | over 900MPa |
| | yield strength | over 600MPa |
| | endurance limit | 10^7 cycle \rightarrow 432MPa |
| | modulus of elasticity | 159.3GPa |
| | Poisson ratio | 0.25 |

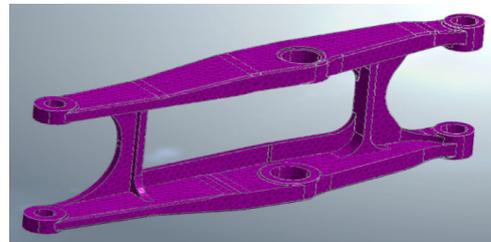


Fig. 9. FEM model of EC brake lever

Table 3. material properties of KTX brake lever

| classification | | contents |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| material | | SF590B |
| mechanical properties | tensile strength | over 590MPa |
| | yield strength | over 360MPa |
| | endurance limit | 10^7 cycle \rightarrow 275MPa |
| | modulus of elasticity | 205GPa |
| | Poisson ratio | 0.29 |

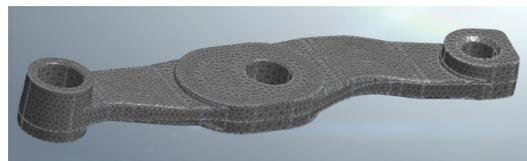


Fig. 10. FEM model of KTX brake lever

4.2 경계조건 및 하중조건

제동레버는 기초제동장치의 일부분으로 고정지지점을 통해 차체에 부착되고 한쪽은 제동통에 연결되어 제동통의 행정만큼 움직이고 반대편은 제동패드와 제동디스크 간격만큼 움직이고, 중간의 룯드는 레버비에 따라 지렛대역할을 하며 고정조건이다. 제동통에서 발생하는 압력이 1쌍의 제동레버를 통해 중심점에서 지렛대 역할을 하며 굽힘응력이 가해지고 반대편 제동패드에 제동력을 전달한다.

하중조건은 각 차종별 제동통 최대압력을 적용하였다. 전기동차는 P₀에서 7.9KN, P₂에 12.7KN, 전기동차(분리형)은 P₀에서 3.95KN, P₂에 12.7KN, 전기기관차는 P₀ 22.8KN, P₂에서 31.92KN, 고속철도차량은 P₀ 20.3KN, P₂에서 39.62KN, 적용하였다.

5. 유한요소해석결과 및 고찰

유한요소해석의 대상은 3가지 차종(전기동차, 고속철도차량, 전기기관차)의 제동레버와 일체형인 전기동차의 제동레버를 기타 조건은 동일한 상태에서 분리형으로 가정된 모형을 포함 총 4가지를 대상으로 유한요소해석을 하여 안전율 및 내구한도를 검토하였다. 철도차량의 피로수명은 EN규격이나 사양서에 따라 10⁷cycle의 값을 기준으로 검토하였다.

Table 5. result of structural analysis to the respective brake lever

| classification | EMU | EMU(split) | EL | KTX |
|-----------------|------|------------|-------|------|
| Max. stress | 90.1 | 83 | 225.8 | 166 |
| yield strength | 225 | 225 | 600 | 360 |
| safety factor | 2.5 | 2.71 | 2.66 | 2.17 |
| endurance limit | 179 | 179 | 432 | 275 |

5.1 일체형 제동레버의 구조해석결과

Fig. 11은 전기동차(EMU)용 제동레버를 구조해석 한 결과 값으로 최대응력은 P₁ 지점에서 90.1MPa이 발생하였다. 이는 Fig. 3에서 나타내는 것과 같이 지렛대의 중심위치로서 2.6P₀의 하중이 작용하기 때문이다. 안전율은 최대응력이 항복강도의 25% 수준으로 2.5로 나타났다.

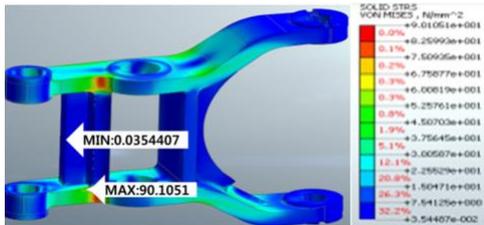


Fig. 11. structural analysis result of EMU brake lever

Fig. 12은 전기기관차(EL)의 제동레버를 구조해석 한

결과 값으로 최대응력은 P₁ 지점에서 225.8MPa이 발생한다. 이의 안전율은 2.66이다.

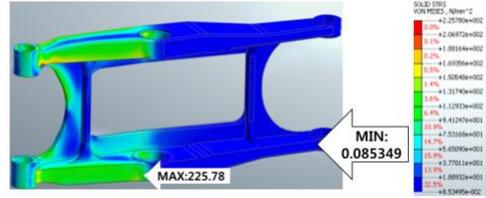


Fig. 12. structural analysis result of EC brake lever

5.2 분리형 제동레버의 구조해석 결과

Fig. 13는 고속철도차량(KTX)용 제동레버를 구조해석 한 결과 값으로 일체형인 전기동차나 전기기관차와 마찬가지로 고정점으로 최대 굽힘응력이 발생하는 P₁ 지점에서 166MPa이다. 이의 안전율은 2.16이다. 고속철도차량의 제동레버는 분리형을 사용하므로 레버비가 일체형에 비해 작다. 그리고 P₀에 일체형 전기기관차용 제동레버보다 작은 힘인 20.3KN가 작용함에도 불구하고, 분리형인 P₂의 출력은 일체형보다 높지만, 제동레버의 최대응력은 일체형보다 작음을 확인할 수 있었다.

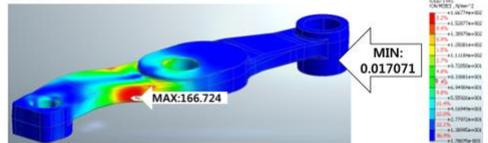


Fig. 13. structural analysis result of KTX brake lever

5.3 분리형 변경에 따른 구조해석 결과

Fig. 14는 일체형 Fig. 10으로부터 분리형(Split type)으로 변경한 후에 구조 해석한 결과이다. 분리형은 일체형의 2배의 힘을 전달하므로 P₀ 값으로 일체형의 1/2인 3.95KN을 입력해도 요구 값인 P₂에는 12.7KN이 발생된다. 즉, 분리형으로 설계변경 할 경우 최대응력도 83MPa로 낮아지는 것을 확인하였다.



Fig. 14. structural analysis result of EMU split type lever

6. 결론

본 연구에서는 철도차량 안전기준에 관한 규칙에서 충분한 강도를 가져야 한다와 같이 정성적인 표현만을 제시하고 있어 안전도에 대한 정량적 최소 기준 값을 제시하고자 운행 중인 전기동차, 고속철도차량, 전기기관차 3종류 철도차량의 제동레버를 분석하여 역으로 문제 없이 운행 중인 철도차량의 제동레버를 대상으로 안전율을 산출하여 정량적 최소 기준 값을 제시하였으며 분리형과 일체형구조에 따른 차이점을 확인하였고 일체형으로 설계된 전기동차용 제동레버를 분리형으로 가정하여 해석하여 안전율에 미치는 효과를 분석하였다.

- (1) 각 제동레버의 안전율은 전기동차 2.5, 고속철도차량 2.16, 전기기관차 2.66이었다. 기존에 운행 중인 제동레버의 안전율은 2~3정도로 설계된 것을 확인하였다.
- (2) 제동레버는 일체형(전기동차, 전기기관차)과 분리형(고속철도차량)으로 설계되었으나 일체형보다는 분리형으로 설계될 경우 절반의 힘으로 2배의 힘을 전달하므로 각 제동레버의 응력집중을 감소시킬 수 있다. 전기동차의 제동레버를 분리형으로 가정하고 해석한 결과 응력집중이 90.1MPa에서 83MPa로 약 8.5% 낮아지고, 안전율은 2.5에서 2.71로 향상되어지는 것을 확인하였다.
- (3) 제동레버에서 최고 응력집중부위는 지렛대 역할을 하는 중심축 부위(P_1)로 동일하게 나타났으나 제동레버비 등 설계구조에 따라 약간 다르게 분포되고 있음을 확인하였다.

References

- [1] D. C. Lee, C. K. Kang, "A Study on a HILS System for a Wheel-Slide-Protection Device of a Railway Vehicle including Hysteresis of a Brake Caliper", Graduate school of Konkuk UNIV, pp. 1-2, 2015.
- [2] Min-Su. Kim, "Vibration Analysis of Tread Brake Block in the Brake Dynamometer for the High Speed Train", International Journal of System Application, Engineering & Development, Issue 1, vol. 5, 2011.
- [3] K. J. Choi, H. S. Lee "Evaluation technology for brake performance of brake tread shoe", Journal of KSTLE, vol. 22, no. 2, pp. 87-92, Apr. 2006.
- [4] F. Talati S. Jalalifar, "Analysis of heat conduction in a

disk brake system", Heat Mass Transfer, vol. 45, pp. 1047-1059, January, 2009.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-009-0476-y>

- [5] D. W. Lee, J. N. Kim, S. S. Cho, "A Study on Safety Estimation of Railroad Wheel", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 11, no. 4, pp. 1178-1185, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.4.1178>
- [6] Minister of MOLIT, "Regulation regarding the safety of rolling stock", MOLIT, 2010.
- [7] S. H. Lee, B. I. Kim, "Analytical Verification of the Standard Inclinations of Slope in the Design Criteria", vol. 15, no. 8 pp. 5342-5348, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.8.5342>

박수명(Su-Myung Park)

[정회원]



- 2012년 8월 : 서울과학기술대학교 철도차량시스템학과 (공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 우송대학교 철도시스템학과 (박사과정)
- 1994년 2월 ~ 현재 : 철도청 및 코레일 근무

<관심분야>

철도시스템, 철도차량, 구조해석

박재영(Jae-Young Park)

[정회원]



- 1996년 8월 : 고려대학교 산업대학원 전기공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호 공학과 (공학박사)
- 1970년 1월 ~ 2007년 2월 : 철도청 및 한국철도공사 근무
- 2007년 3월 ~ 현재 : 우송대학교 철도 전기시스템학과 교수

<관심분야>

자동제어, 지능형시스템, 제어계측