

제동중량비율을 이용한 도시철도차량 제동성능 평가방법 연구

최돈범^{1*}, 이강미², 윤용기²

¹한국철도기술연구원 미래전략센터, ²한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부

A Study on Train Braking Performance Assessment Methods Using Braked Weight Percentage

Don-Bum Choi^{1*}, Kang-Mi Lee², Yong-Ki Yoon²

¹Future Strategy Center, Korea Railroad Research Institute

²Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute

요약 본 논문은 철도차량 안전의 핵심 요소인 제동성능을 확인하는 평가방법의 비교와 제동성능에 영향을 미치는 차량과 레일의 마찰계수의 분포가 감속도에 미치는 영향을 분석하고 열차 편성에 따른 감속도의 분포를 예측하였다. 제동성능의 평가는 실제 운행중인 도시철도차량의 실차 시험을 통하여 제동시 제동거리와 제동시간을 측정해서 감속도를 산출하는 제동성능 평가방법과 UIC 544-1에 따른 제동중량비율을 이용한 평가 방법에 대하여 두 방법을 서로 비교하여 장단점을 살펴보았으며 각 방법의 호환성을 검토하였다. 차량과 레일의 마찰계수 분포를 검토한 확률적 제동모델을 수립하고 제동성능에 가장 큰 영향을 미치는 차량과 레일의 접촉계수 분포가 열차의 편성에 미치는 영향을 분석하였다. 제동중량비율을 이용한 평가 방법은 일정 초기 제동속도를 시험한 결과를 다양한 제동초기속도에서의 제동거리로 환산할 수 있어 열차 신호시스템의 설계나 신규 노선에서의 운전 패턴을 설계 검증할 수 있는 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 보이며 편성에 따른 감속도의 확률적 분포 예측을 통하여 열차분리 결합등 가변 조성시 감속도의 분포를 예측함에 따라 보다 정밀한 열차신호 설계의 기초 자료로 활용가능할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, we evaluate the braking performance of an urban railway vehicle to verify its basic safety condition. The braking performance evaluation methods, deceleration measurement and braked weight percentage, were compared for trains with different numbers of cars, in order to assess the advantages of each method and their compatibility. With a probabilistic braking model, the effect of the adhesion coefficient distribution was analyzed in accordance with the train composition. A train with many cars has a narrower deceleration distribution width than one with few cars. The braked weight percentage method is expected to be useful in the design of train signal systems, because it allows the braking distance to be calculated for various initial brake velocities. The deceleration distribution model and its results are expected to be useful as a basis for precise train signal design.

Keywords : Braking Distance, Brake Performance, Brake System, Braked Weight Percentage, Deceleration

1. 서론

도시철도에서 표정속도를 안전하게 높이고 효율적으로 제어하기 위한 노력은 열차 신호제어시스템의 개발과 더불어 지속되어 왔다. 고속열차를 비롯한 모든 열차에

적용되는 열차 신호제어시스템은 운행선로를 구역별로 구획하고 설계된 허용속도 범위내로 운전되고 허용 속도 범위 내에서 주행되도록 제어한다[1, 2, 3]. 열차의 속도를 제어하기 위해서는 다양한 제동장치가 적용되고 있으며 국내 도시철도에 적용되는 전동차에서는 공기제동과

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Don-Bum Choi(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5563 email: eye@krrri.re.kr

Received October 6, 2016

Revised (1st October 24, 2016, 2nd October 31, 2016)

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

회생제동을 혼합하여 사용되고 있다.

기존의 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준에서는 제동성능을 평가하기 위하여 작동조건별로 시운전시험을 통하여 감속도와 제동거리가 일정기준 이내 인지를 확인하는 시험을 수행[4]하였으며 개정된 철도안전법에서는 제동장치의 설계적합성 또는 형식동등성을 시험으로 입증하는 경우 제동거리와 감속도를 측정하여 제동성능을 평가하여야 한다 [5].

국내 제동성능시험은 운행 최고속도에서 제동거리와 감속도를 통하여 안전을 위한 최소의 요건을 확인하는 시험으로 다른 속도범위에서의 제동거리의 확인은 별도의 시험을 수행해야 그 성능을 확인할 수 있었다[6]. 또한, 최근 제정된 철도차량의 기술기준에서는 제동중량비율(Braked Weight Percentage)을 사용하여 제동성능을 평가하는 국제규격(UIC 544-1 [7])을 적용하도록 되어 있으나 국내 운행중인 전동차에 대하여 제동중량비율을 이용하여 제동성능을 평가한 사례가 없으며 제동중량비율의 접근방법은 감속도에 대한 기준을 직접적으로 확인할 수 없다는 단점이 있는 것으로 알려져 있다[8].

따라서 국내 운행중인 전동차를 대상으로 기존의 성능시험에 따라 제동성능을 평가한 결과와 철도차량기술 기준에서 제시한 제동중량비율을 이용한 제동성능평가 방법을 비교해 보고 그 장단점을 평가해 보고자 한다.

2. 도시철도차량의 제동시스템

일반적인 도시철도차량의 제동장치의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 제동시스템은 제동제어기 (ECU, Electronic Control Unit), 제동작용장치 (BOU, Brake Operating Unit) 및 제동실린더 (Cylinder) 등으로 구성되어 있다. 상용제동시에는 주간제어기 및 신호장치에서 발생한 제동지령이 차량 컴퓨터 (Car Computer)를 통하여 ECU로 전송되고 ECU에서는 제동지령과 융하중신호 (Load Signal)를 검지하여 필요한 요구제동력을 계산하고 인버터에 전기제동을 지령한다. 요구제동력을 전기제동이 만족하지 않으면 ECU는 Trailer Car에 마찰제동력을 수행하고 부족분을 Motor Car의 마찰제동으로 보충하는 혼합제동을 수행한다. 혼합제동방식은 Trailer Car와 Motor Car를 1 유닛으로 혼합제동방식을 적용한다[8]. 비상시에는 전기제동의 지연등을 이유로 공기제동이 우선하여 작용하게 된다.

제동모델은 제동시스템의 종류 (공압제동, 전기제동 등) 뿐 아니라 제동력의 제어방식 (단일 압력, 계단식 압력 등)도 고려하여야 하며 이에 대한 예시를 Fig. 2에 나타내었다.

일반적으로 차량에 직접작용하는 마찰력을 이용한 담면제동(Block Brake)의 경우 속도가 증가함에 따라 감속도는 감소하는 것으로 알려져 있으며 2단 압력 제어시 감속도를 높일 수 있는 것으로 알려져 있으며 디스크 제동(Disc Brake)의 경우 속도에 따라 감속도가 비교적 일정한 것으로 알려져 있다[8].

실제 운행중인 일반적인 제동모델은 Fig. 3과 같이 노치(Notch)를 이용한 계단형 모델을 적용한다. 계단식 모델은 선형 모델보다 정확도가 떨어지지만 계산의 간편성으로 인해 광범위하고 효과적으로 쓰이고 있다 [8]. 속도 제어시스템에서 사용되는 제동모델은 다양한 속도에 대해서도 적용 가능해야 하고 속도에 따라 감속도를 과대 추정하는 것을 막기 위해 일정 감속도 모델이 주로 설계에 반영된다.

본 연구에서는 도시철도차량에서 기본으로 사용되는 공기제동에 대해 제동력이 일정하게 제어되는 상용 전제동 (Full Service Brake)을 적용하였다.

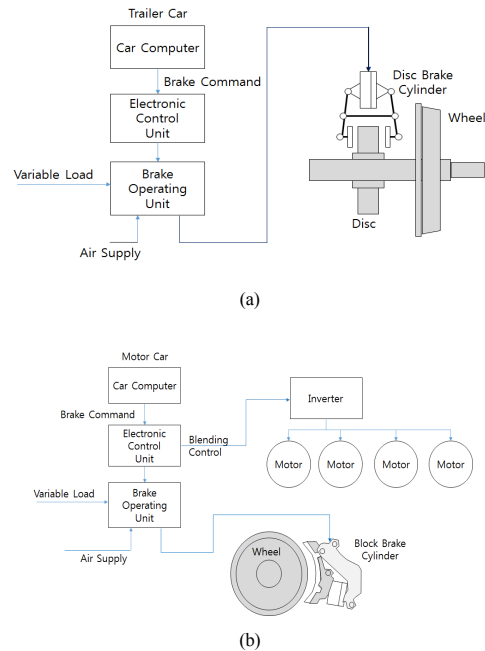


Fig. 1. Schmetic Braking System ((a) Trailer Car, (b) Motor Car)

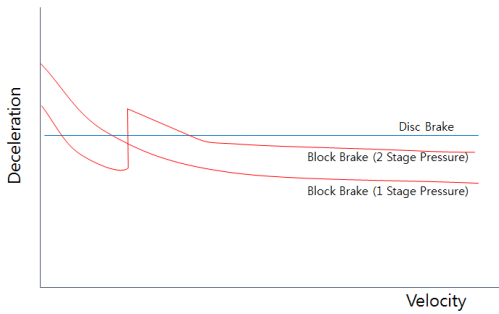


Fig. 2. Deceleration of various type of brake type

Table 1. Weighted brake percentage coefficient with initial velocity

Initial Vel. [km/h]	Brake Coefficient	
	C	D
40	8560	17
50	12880	12
60	18400	9.7
70	25040	8.5
80	33080	8.4
90	42490	9.1

3. 제동중량비율과 감속도의 관계

UIC 제동성능평가의 기초 파라미터가 되는 제동중량비율은 제동중량과 열차중량의 비를 백분율로 나타낸 것이다. 제동중량비율과 제동거리의 관계는 여러 종류의 열차와 제동시스템에 대하여 반복적 실험결과를 바탕으로 식 (1)과 같이 반비례의 관계를 나타내고 있다 [7][8].

$$S = \frac{C}{\lambda + D} \quad (1)$$

여기서, S: 제동거리(m), λ: 제동 중량 비율(%), C, D: 초기 속도에 따른 제동 계수(-)

초기제동속도에 따른 제동계수는 Table 1과 같다. 국내에서 운행 중인 대다수의 전동차와 여객열차에서 합성 제륜자를 사용하기 때문에 이를 고려하였다. Fig. 4에는 식(1)과 Table 1에 따른 제동중량비율과 제동초기속도에 따른 제동거리를 나타내었다.

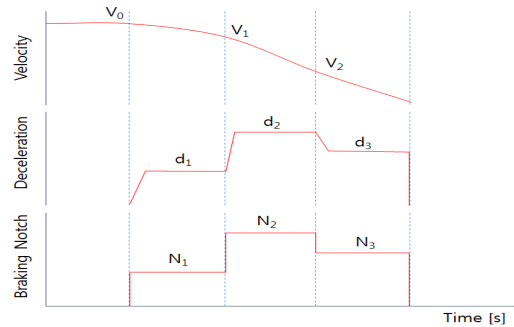


Fig. 3. General braking model

제동거리와 제동 감속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{V_0^2 - V_1^2}{2d} \quad (2)$$

여기서, S: 제동거리 [m], V₀: 제동 초기속도 [m/s], V₁: 제동 최종속도 [m/s], d: 제동시 감속도 [m/s²] ……………

제동시 일정한 감속도를 갖고 제동 최종속도를 정지 속도라고 가정하면 제동중량비율과 제동초기 속도의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d = \frac{V_0^2}{2 \left(\frac{C}{\lambda + D} \right)} \quad (3)$$

UIC 544-1의 평가곡선에 따른 결과물은 Fig. 5에 나타내었다. 제동하중 비율이 높을수록 제동거리는 짧아지며 이에 따라 감속도는 증가하게 된다.

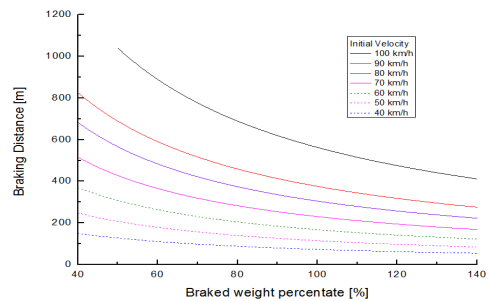


Fig. 4. Braking distance with braked weight percentage and initial velocity

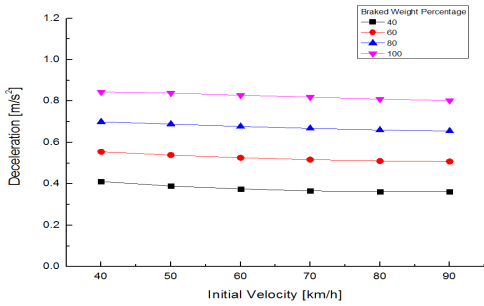


Fig. 5. Deceleration with braked weight percentage

Table 2. Train weight and brake systems

Train Set	Train Control Car	Motor Car	Motor Car	Trailer Car	Motor Car	Train Control Car
Weight [ton]	38.1	40.7	40.7	31.4	40.7	38.1
Brake	Disc	Elec. & Shoe	Elec. & Shoe	Disc	Elec. & Shoe	Disc

또한, 일정한 제동중량비율에 대하여 감속도는 전체적인 속도구간에 대해 비교적 일정하게 모델링하고 있음을 알 수 있으며 저속구간에서는 증가할 것으로 예상된다.

UIC 544-1에 따른 제동성능 평가방법의 장점은 일정한 속도에서의 제동시험을 통하여 제동중량비율이 확인되면 다른 제동초기 속도에 대하여 추가적인 시험을 수행하지 않아도 제동거리를 예측할 수 있다는 장점이 있다.

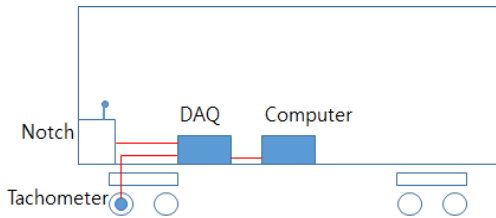


Fig. 6. Braking performance test set-up

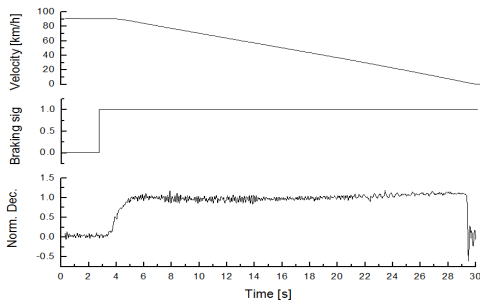


Fig. 7. Representative braking experiment result

4. 제동중량비율의 계산

기존의 제동거리와 감속도를 이용한 제동성능평가 방법과 제동중량하중을 이용한 방법의 비교를 위하여 6량 1편성으로 구성된 신분당선 열차에 대하여 각각의 방법으로 제동성능을 평가하였다.

제동시험은 직선평탄 터널구간에서 운행최고속도인 90 km/h에서 공기 전제동시 속도와 시간을 기록하는 시험을 수행하였다.

제동시험시 제동신호와 차량의 속도를 확인하기 위한 주간제어기(Master Controller)의 노치(Notch)신호와 차륜에 부착한 타코미터(Tachometer)의 신호를 이용하였다 (Fig. 6).

Fig. 7에는 대표적인 제동시험의 결과를 나타내었다. 허용운행속도 90 km/h인 시험구간에서 상용 전제동을 체결하여 열차가 완전히 정차할 때까지의 속도와 제동신호 그리고, 속도를 미분한 감속도를 각각 나타내고 있다.

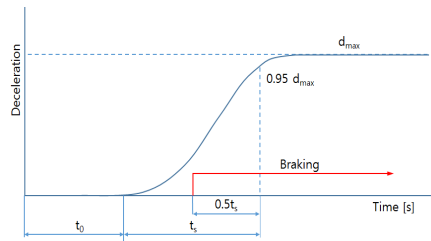


Fig. 8. Braking signal and deceleration

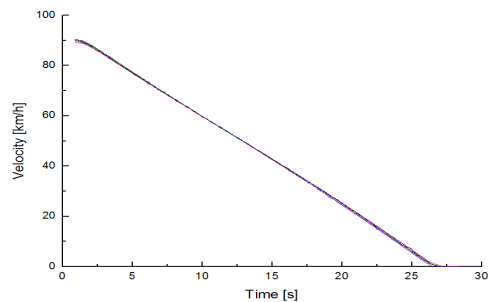


Fig. 9. Braking experiment results (velocity)

제동은 제동신호가 인가되어도 제동력이 즉시 발생하는 것이 아니라 전기적 기계적 지연시간(t_0)과 제동력이 증가하기 시작하여 완전히 발달하기까지 소요되는 시간(t_s)으로 구분할 수 있으며 UIC에서는 제동거리 산출의 시작이 최대감속도의 95%까지 발달하는 시간을 중심으로 제동거리의 산출을 시작[7]한다. 제동거리의 산출에

가장 많이 적용되는 방법은 EN 14531-2:2015의 시간적분 (Time Integration)을 이용하는 방법([10], [11])으로 본 연구에서도 제동거리 산출을 위해 시간적분 방법을 적용하였다.

UIC 544-1에 따른 보정을 거쳐 평균 제동거리 352 m의 제동중량비율을 초기속도 90 km/h에 대하여 식 (1)을 이용하면 제동중량비율은 111.6%임을 알 수 있으며 산출한 제동중량비율과 식 (3)을 이용하여 감속도를 산출하면 0.89 m/s²이 되어 기존의 산출방법 (Table 3)과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있다.

Table 3. Braking experimental results

Trial	Initial Velocity [km/h]	Braking Distance [m]	Deceleration [m/s ²]
1	91.1	356.2	0.90
2	89.9	355.6	0.88
3	90.6	353.4	0.90
4	89.7	353.9	0.88
5	89.9	355.1	0.88
6	89.9	356.2	0.88
Average	90.2	355.1	0.88

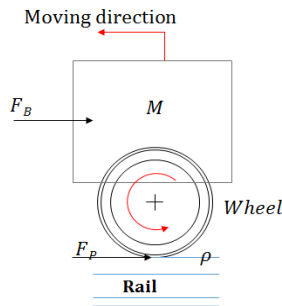


Fig. 10. Single wheel brake model

5. 제동모델의 확률적 분석

철도차량의 감속도는 제동장치에 의해 발생한 제동력, 차륜-레일간의 점착계수 (Adhesion Coefficient), 그리고 차량 질량의 비로 나타낼 수 있다.

점착계수는 축소모형 실험 등을 통하여 공전(Slip)의 발생에 따라 일정하지 않고 확률분포를 갖는 것으로 알려져 있다 [12].

감속도의 확률분포를 위하여 각 변수를 식 (4)와 같이 명목값 (Nominal Value)과의 비율로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{d_o} = \frac{\frac{F_P}{F_{Po}} \frac{\rho}{\rho_o}}{\frac{M}{M_o}} \quad (4)$$

여기서, d/d_o : 실제감속도와 명목감속도의 비, F_P/F_{Po} : 실제제동력과 명목제동력의 비, M/M_o : 실제질량과 명목질량의 비, ρ/ρ_o : 실제 점착계수와 명목 점착계수의 비

점착계수와 명목 점착계수의 비는 단일 차륜 점착시험결과에 따라 Fig. 11과 같이 정규분포를 따르고 상한과 하한이 평균 ($\mu=1.0$)으로부터 각각 표준편차($\sigma=0.21$)의 3배 차이를 갖는 것으로 가정하였다.

감속도는 제동력과 질량이 일정한 경우 점착계수의 분포와 같아지게 된다. 실제차량에서는 1량당 차륜이 8개 있으므로 1량에 대한 감속도 분포는 다음과 같이 쓸 수 있으며 차량의 편성에 따른 감속도의 확률분포를 산출할 수 있다.

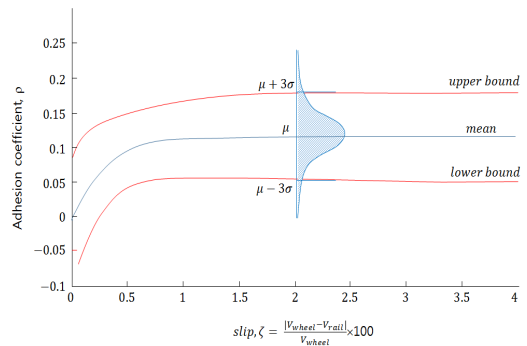


Fig. 11. Single wheel adhesion coefficient distribution according to slip

$$\frac{d}{d_o} \sim N(\mu, 8\sigma^2) \quad (5)$$

Fig. 11에는 열차를 구성하는 차량의 편성에 따라 감속도비의 분포를 나타내었다. 차량의 편성이 증가함에 따라 감속도의 분포는 좁게 분포하게 된다. 실제시험 결과에서는 성능평가를 위한 최소한의 회수만을 시험한 것으로 이를 이용하여 분포를 확인할 수 없었으나 점착계수의 분포와 차량의 편성에 따라 감속도의 분포를 예측할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 도출과정의 복잡성과 더불어 직관성이 지 않아 그 동안 국내에서 적용되지 않았던 제동중량비율을 이용한 제동성능을 기존의 감속도와 제동시간을 이용한 방법과 비교하였다.

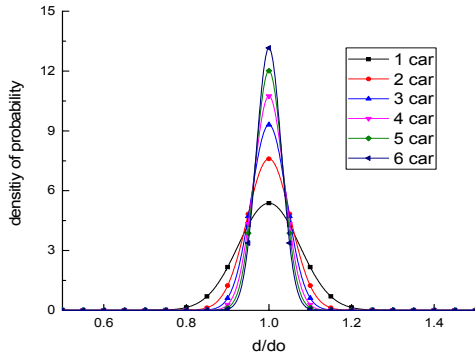


Fig. 11. Probability density of the ratio d/d_o

또한, 제동성능에 가장 큰 영향을 주는 점착계수의 영향을 확인하기 위하여 축소모형에서의 확률분포 결과를 차량의 편성에 따른 감속도의 분포를 확인하였으며 본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 제동중량비율을 이용하여 제동성능평가 방법은 다양한 초기 제동속도에 대해 별도의 추가 시험 없이 제동거리를 산출할 수 있다는 장점을 확인하였다.
- (2) 이 방법은 다양한 제동 초기속도에 대해 제동거리 예측할 수 있으므로 신설된 선로에서의 운행정보 예측이나 열차제어를 위한 신호시스템의 설계와 검증 등에 적용될 수 있음을 확인하였다.
- (3) 제동성능에 영향을 미치는 중요요소 중 하나인 점착계수를 제동성능 모델을 이용하고 축소모형의 시험결과를 이용하여 감속도의 분포를 예측하였다.

차량의 편성에 따른 제동감속도의 분포에 관한 연구는 자동열차제어 등 안전거리 설계시 감속도의 분포를 예측하여 보다 정밀한 설계가 가능할 것으로 보이며 가변열차 편성 등 열차의 구성을 변경하는 경우 안전거리 확보 등의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위하여 제동성능에 영향을 미치는 제동패드의 마찰

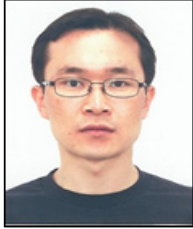
계수에 관한 연구 뿐 아니라 실험형 점착계수에 관한 보완적 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

- [1] M. S. Kim, J. Kim, T. Kim, S. S. Park, et al., "Study of the metropolitan rapid transport system to minimize sidetrack construction", Journal of the Korean Society for Railway, vol. 16, no. 5, pp. 402-409, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.5.402>
- [2] J. Kim, M. S. Kim, K. Ko, D. U. Jang, "The Study on the Standardization of the Maximum Acceleration of the Electric Multiple Unit through the Analysis of the Traction and Adhesion Characteristics", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 11, pp. 7934-7940, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7934>
- [3] S. M. Park, J. Y. Park, "Analytical study to the Brake Lever in Basic Brake System for Railway Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 17, no. 8, pp. 624-629, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.8.624>
- [4] Ministry of Land Transport and Marine Affairs, "Criteria for performance test of urban rail vehicles", 2011.
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Technical Standards for Railway Vehicles", 2016.
- [6] G. S. Yun, W. H. Jeon, "A Study for Determining the braked weight of Iran DMU using UIC 544-1", Proc. of Spring Conference of Korean Society for Railway, pp. 1624-1633, 2009.
- [7] UIC 544-1, Brakes-Braking performance, 6 th edition, 2014.
- [8] P. Presciani, M. Malvezzi, G.L.Bonacci, M.Balli, "Development of a braking model for speed supervision systems"
- [9] W. D. Lee, K. H. Choi, "A Design of brake Control System For Electrical Multiple Unit", Proc. of Spring Conference of Korean Society for Railway, pp. 151-156, 2000.
- [10] EN 14531-2:2015 Railway applications-Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking Part 2: Step by step calculations for train sets or single vehicles)
- [11] B. B. Kang, Y. H. Cho, "Methods for calculation of stopping and slowing distances and braking performance parameters", J. Korean Soc. Mech. Technol, vol. 17, no. 5, pp. 990-997, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.17958/ksmt.17.5.201510.990>
- [12] M. S. Kim, K. H. Kim, S. J. Kwon, "Estimation Study on the Wheel/Rail Adhesion Coefficient of Railway Vehicles Using the Scaled Adhesion Tester", J. Korean Soc. Precis. Eng., vol. 32, no. 7, pp. 603-609, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.7.603>

최 돈 범(Don-Bum Choi)

[정회원]



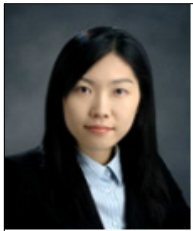
- 2000년 2월 : 성균관대학교 기계설계학과
- 2002년 8월 : 포항공과대학교 기계공학
- 2002년 9월 ~ 2007년 8월 : POSCO
- 2007년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 근무

<관심분야>

열차제동, 자동제어

이 강 미(Kang-Mi LEE)

[정회원]



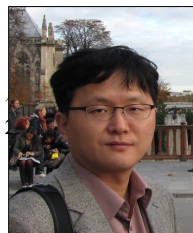
- 2003년 2월 : 충북대학교 전기전자공학부 졸업
- 2005년 2월 : 충북대학교 전자공학과 졸업
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 근무

<관심분야>

자동제어, 무선통신

윤 용 기(Yong-Ki Yoon)

[정회원]



- 1996년 2월 : 충북대학교 전기공학과 졸업 (공학석사)
- 2016년 2월 : 한양대학교 전자전기 제어계측공학부 수료 (공학박사)
- 1995년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

열차제어시스템, 소프트웨어 안전성