

철도차량의 저상 및 고상 승강장 겸용 승강문 스텝에 대한 내구성 평가

김철수¹, 박민흥^{2*}

¹한국교통대학교 철도차량시스템공학과, ²(사)한국철도차량엔지니어링 기술연구소

Durability Evaluation on Doorstep Equipments Used for Low and High Level Platforms at Railway Vehicle

Chul-Su Kim¹ and Min-Heung Park^{2*}

¹Department of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation

²Technical lab., Korea Rolling Stock Technical Corp.

요 약 국내 여객을 취급하는 철도역사의 승강장은 간선철도노선의 저상승강장(500mm)과 광역전철구간의 고상승강장(1135mm)으로 구분 운용되고 있다. 저상승강장 전용 중·고속 열차가 수도권 전철구간(고상승강장)과 본선구간(저상승강장)에서 혼용 운영될 경우를 대비하고 안전운전 및 승객편의를 함께 고려하기 위해 저상 고상 승강장 겸용 승강시스템의 개발은 필수적이다. 한편 현재 개발 중인 시스템(스텝)에 대한 국내의 내구성 및 신뢰성 시험 기준은 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 저상/고상 승강장 겸용 텔레스코픽 슬라이드방식 승강문 스텝의 개발을 위한 연구 일환으로서, VPD관점에서 내구성 해석을 수행하고 신뢰성 보증시험에 준한 무고장 시험시간동안 실물 리그시험을 통하여 이의 내구성 기준 및 보증수명을 검토하였다.

Abstract The platform of railroad station for domestic passenger train has been operated at two categories like the platforms if low level(500mm, mainline) and high level(1,135mm, metropolitan subway line). To operate both metropolitan subway line and mainline railroad safely, it is essential to develop the doorstep equipment of railway vehicle regardless of low and high level platforms. On the other hand, the domestic test standard at durability and reliability of doorstep equipment has not been existed until now. This study aims at the development on doorstep equipment of telescopic sliding type for low and high level platforms. Durability analysis with VPD(Virtual Product Development) techniques are performed and the durability standard & qualification life through the rig test during no failure test time is examined in accordance with reliability qualification test.

Key Words : Doorstep Equipment for Both the Low and the High Level Platforms, Durability Analysis, Durability Test, Reliability Qualification Test, No Failure Test Time

1. 서 론

국내 여객열차 전용 승강장은 일반 간선열차에서 주로 사용하는 저상승강장(레일 상면 기준 높이 500mm)과 수도권 전동차에서 주로 사용하는 고상승강장(레일 상면 기준 높이 1135mm)으로 구분된다.[1] 저상 승강장 전용

중·고속열차가 수도권 전철구간과 본선구간에서 혼용 운영하기 위해서는 열차 안전운전을 고려한 저상/고상 승강장 겸용 승강문 스텝이 필요하다. 이와 함께 승강문과 승강장사이 이격거리로 발생하는 승객 안전 및 불편함을 해소하기 위해서는 이격거리를 최소화 할 수 있는 겸용 승강문 스텝이 요구된다.

본 논문은 국토해양부 한국형 텀팅열차 신뢰성 평가 및 운용기술개발 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Min-Heung Park

Tel: +82-031-269-2077 email: ddung7676@naver.com

접수일 12년 08월 17일

수정일 (1차 12년 08월 31일, 2차 12년 09월 05일)

게재확정일 12년 09월 06일

국내 관련 개발기술을 살펴보면, 수도권 전철 경부선 및 장항선에서 운행 중인 누리호(TEC)에 저상 고상 승강장에 혼용할 수 있는 승강문 스텝이 설치되어 운행 중이다. 그러나 이 기술을 중·고속열차에 도입하려면 현재 차량의 차체 바닥 프레임의 변형이 불가피하므로 구조적 안정성 측면에서 차체 개조는 불가능하며, 복잡한 작동 메커니즘과 고속철도차량의 기밀유지 능력이 떨어지며 승강문과 승강장 사이의 이격거리 변동성으로 인하여 고객의 불편함이 발생할 것으로 예상된다.[2]

국의 관련 개발기술은 작동 메커니즘별로 계단방식, 슬라이드방식, 접이방식 등으로 구분된다. 계단방식은 기밀유지의 어려움을 가지며 바닥프레임의 변형 또는 손상이 불가피하므로, 저상 승강장 전용 중·고속열차 적용이 힘들다. 접이방식은 차량과 승강장사이의 이격거리의 불편을 해소할 수 있으나 작동시 많은 공간 및 시간이 요구된다. 슬라이드 방식은 기존 차량의 바닥 프레임의 손상을 최소화 하면서 이격거리를 해소하고 신속한 작동이 가능하다. 중국 고속열차 CRH는 중국철도의 승강장 높이를 고려하여 수동형 슬라이드 방식 승강문 스텝장치를 개발하였다. 그러나 이 장치는 각 차량마다 1단계 작동을 수동으로 운영해야 하는 단점을 갖는다. 따라서 향후 저상/고상 승강장 혼용 운영에 대비하고 이격거리 문제를 함께 해결하기 위해서는 2단계에 걸쳐 자동으로 작동하는 텔레스코픽 슬라이드방식(telescopic sliding type) 겸용 승강문 스텝의 개발이 필요하다.

한편, 철도차량용 승강문 관련 연구는 대부분 신뢰성 보전(Reliability Centered Maintainability, RCM)관점의 전동차 유지보수주기 또는 신뢰성향상에 국한되었으며 [3-4], 국내 승강문 스텝과 관련된 연구 및 규격은 미비한 실정이다.

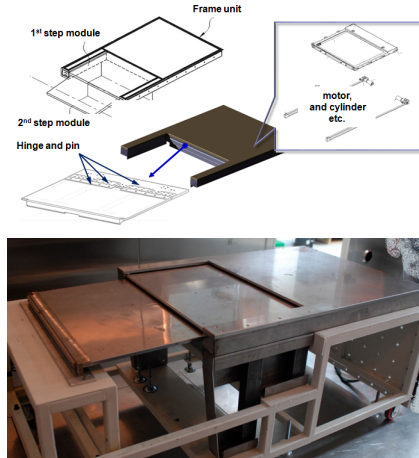
본 연구에서는 저상/고상 승강장 겸용 텔레스코픽 슬라이드방식 승강문 스텝의 개발을 위한 연구 일환으로서, VPD(Virtual product development)관점에서 내구성 해석을 수행하고자 한다. 또한 신뢰성 보증시험(reliability qualification test)에 준한 무고장 시험시간(no failure test time)동안 실험 리그시험을 통하여 이의 내구성 기준 및 보증수명을 검토하고자 한다.

2. 본론

2.1 저상고상 승강장 겸용 승강문 스텝 장치

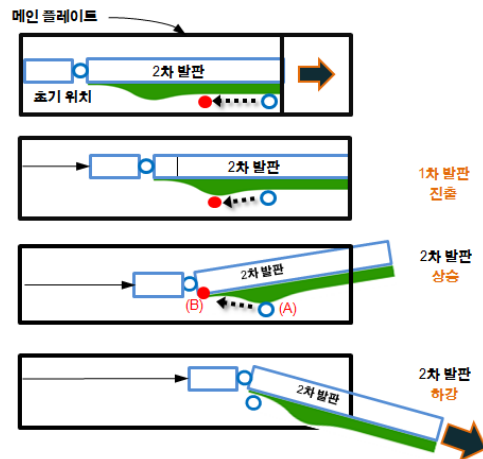
그림 1은 저상/고상 겸용 승강문 스텝장치를 나타낸 것이다. 저상고상 승강장 겸용 승강문 스텝은 강성 및 내

구성을 확보하기 위한 프레임 유닛, 1차 발판 유닛, 2차 발판 유닛, 가이드 레일 등으로 구성하였으며, 정의된 시스템의 기능을 구현할 수 있는 구동 모터, 실린더, 풀리, 롤러, 베어링 등으로 구성하였다.



[그림 1] 저상고상 겸용 승강문 스텝 장치
[Fig. 1] The doorstep equipment of both the low and the high level platforms

본 스텝 장치는 1 및 2차 발판 유닛에 의하여 단계적으로 텔레스코픽 슬라이딩하여 승강장까지 연장됨으로써, 차종별 승강문과 차량사이의 좌우 이격거리와 상관없이 안전하게 승하차 할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 또한 차량 상판과 고상 승강장사이의 상하 이격거리 변동성은 그림 2와 같이 2차 발판의 캠 단차에 의하여 해결하도록 설계하였다.

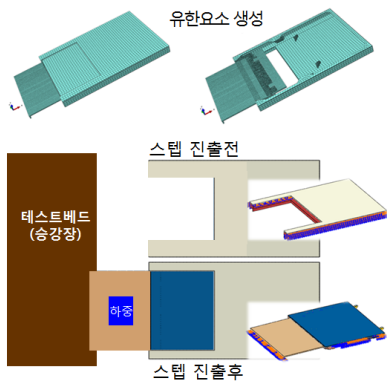


[그림 2] 스텝 작동 순서
[Fig. 2] Step operation procedure

2.2 내구성해석 결과

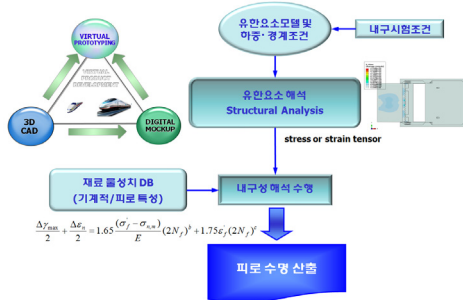
2.2.1 유한요소 및 내구성 해석

그림 3에 승강문 스텝의 내구성 해석을 위한 유한 요소망 생성(finite element mesh generation)과 경계조건을 나타낸 것이다. 총 요소수는 71,774개이고 노드 수는 127,433개이다. 하중 및 경계조건은 국내 관련 규격이 없으므로 EN14752 규격[5]에 준하여 스텝의 기계적 강도 관련 요구조건을 적용하였다.



[그림 3] 승강문 스텝 장치의 유한요소모델 및 경계조건 [Fig. 3] The finite element model and boundary condition of the door equipment

경계조건은 2차 발판이 고상 승강장에 지지하는 단순 보 형태로서 프레임유닛의 측면 및 1차 발판 측면 그리고 2차 발판 및 승강장사이 접촉부를 각각 구속하였다. 또한, 2차 발판 캐리어 플레이트의 핀, 힌지 및 발판하부와 롤러 사이에는 면접촉 조건을 부여하였다. 하중조건 (Load case)은 100mm x 200mm 면적에 수직하중 2kN을 부여하였다. 그리고 내구해석의 1회(cycles)는 그림 2의 작동순서에 따른 후 수직하중을 부여하고 원상태로 복귀할 때까지이다.



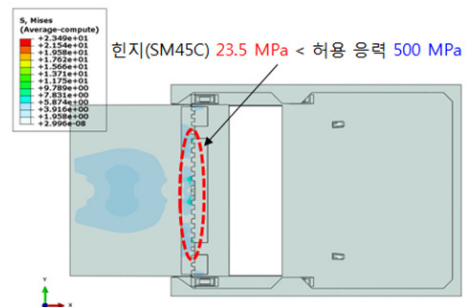
[그림 4] 내구성 해석 개념도 [Fig. 4] Concept diagram of durability analysis

그림 4는 본 스텝의 내구성해석 절차를 나타낸 것이다. 내구성해석은 유한요소해석 결과로부터 다축 변형률 피로 수명 평가식인 Brown-Miller equation-Morrow mean stress correction에 따라 수행하였다. 여기서 구조해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 내구성해석은 FE-SAFE를 사용하였다.[6-7]

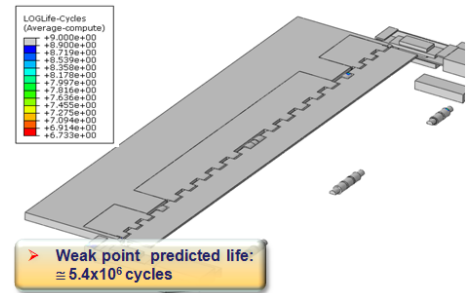
2.2.2 해석 결과

그림 5는 유한요소해석(a) 및 내구성 해석 결과(b)를 나타낸 것이다. 유한요소해석 결과로부터 취약부는 2차 스텝의 Hinge부이며, 이의 최대 von-Mises 응력은 23.5MPa이다. 힌지 재질(hinge material: SM45C)의 허용 응력은 500MPa이며, 이의 안전계수는 약 21로서 매우 안전하다.

그리고 내구성 해석 결과로부터 본 장치의 예상수명은 약 5.4×10^6 회이다.



(a) 유한요소해석(Finite element analysis)



(b) 내구성해석(Durability analysis)

[그림 5] 유한요소 및 내구성 해석 결과 [Fig. 5] Result of Finite Element & Durability Analysis

2.3 무고장 시험 시간의 결정

본 장치의 내구성 시험시간 기준은 기존 규격에 존재하지 않으므로 본 연구에서는 신뢰성 보증시험에 준한 무고장 시험시간으로부터 내구성 시험시간 기준을 제안하고, 본 장치의 보증수명을 함께 검토하고자 한다.

고비용 장기간 소요되는 기계부품의 보증수명에 관한 선행연구[8-12]에서는 신제품 개발 또는 부품교체 시 작동 조건하에 보증 기간내 제품성능을 유지하는 신뢰성보증시험의 일환으로 무고장 시험방법을 제안하였다. 무고장 시험방법은 어떤 일정시간까지 제품을 시험한 후에 고장이 하나도 없으면 그 제품은 신뢰도 요구조건을 만족한다고 판단하는 방법이다. 즉, "A%의 신뢰수준으로 B_p 수명(또는 MTTF)이 C시간 이상임을 입증하기 위해서는 N개의 sample로서 T시간 동안 시험하여 고장이 하나도 없어야 한다."로 표현한다. 기계류 부품의 확률수명분포는 일반적으로 2모수 Weibull 분포에 따르며, 이 분포의 형상모수(shape parameter, β)를 가정하면, 무고장 시험시간의 계산식은 식 (1)과 같다.[8-12]

$$t_{nftt} = B_p \cdot \left[\frac{\ln(1 - C_L)}{n \cdot \ln(1 - p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

여기서 t_{nftt}는 무고장 시험시간, B_p 수명은 아이템의 누적고장확률이 p%가 되는 시점, C_L은 신뢰수준(confidence level), n은 샘플수, p는 percentile 지표, β는 2모수 Weibull 분포의 형상모수이다.

식 (1)에서 B_p 수명의 p값은 작을수록 제품의 신뢰도는 높음을 의미한다. 본 연구의 검용 승강문 스텝장치에 대한 B_p 수명의 p값은 이전 연구[7]와 고장에 따른 승객 안전 및 열차의 운행 장애 등을 고려하여 높은 수준인 B₁ 수명을 채택한다. 본 장치의 보증수명인 B₁ 수명은 실질적인 유지보수를 고려하여 한국철도공사에서 제시하는 철도차량 유지보수지침(2010-125호)[13]에 준하여 KTX의 전반검수(FGI) 기준인 16개월(1.33년) 동안 무고장으로 작동하는 횟수로 정의하였다. 이에 대한 계산식은 식 (2)와 같이 1편성 열차 1일 운행횟수(서울-부산) 3회, 1회편도 운행시 고상 승강장 정차 역에서 동작횟수 9회, 1년(365일) 중 열차 가용도(availability) 95%를 가정한 것이다. 본 장치의 B₁ 수명(보증수명)은 식 (2)에 의해 12,452 회이다.

$$B_1 \text{ 수명(보증수명)} = \frac{9\text{회}}{1\text{회 편도운행}} \times \frac{3\text{회 편도운행}}{\text{일}} \times \frac{365\text{일}}{1\text{년}} \times 0.95 \times 1.33\text{년} = 12,452\text{회} \quad (2)$$

또한, 식 (1)에서 본 장치의 신뢰수준은 타 연구사례 [7] 및 안전성의 중요도를 고려하여 95%로 가정하였다.

그리고 시료수는 고비용 및 제작기간의 제약으로 인해 1개로 결정하였다.

한편, 본 스텝은 여러 부품들로 구성되어 내부의 부품들이 복합적으로 수명에 영향을 미치지만, 스텝의 반복 작동시 높은 신뢰도를 요구하는 실린더가 가장 핵심부품으로 판단된다. 본 장치의 형상모수 β값은 Weibull Database[14]의 실린더 형상모수 2.0으로 가정하였다.

따라서, 본 장치의 무고장 시험시간은 식 (1)에 의하여 표 1로부터 계산하면 214,981회(약 22만회)이다.

[표 1] 무고장 시험 시간
[Table 1] No Failure Test Time

항목	내용
보증수명	12,452회
신뢰수준	CL : 95%
와이블 형상모수	β = 2.0
샘플수	n=1
무고장시험 시간 (내구성시험 시간)	$t_{nftt} = 12,452 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.95)}{1 \cdot \ln(1-0.01)} \right]^{\frac{1}{2}} = 214,981\text{회}$

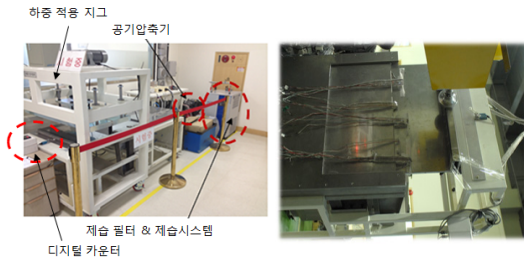
2.4 내구성 평가

2.4.1 내구성 시험

본 스텝의 내구성시험(실물 리그시험)은 실제 차량과 동일한 운용조건인 공기압 5Bar와 전원(DC 100V/2A)을 공급하여 수행하였다. 표 2는 내구성 시험에 사용된 시험장치의 세부 사양을 정리한 것이다. 본 시험은 100회 동작을 수행한 후에 이상 유무를 확인하는 예비시험을 거치고 수행한다. 참고로 그림 6은 내구성 평가를 위한 실물리그시험 사진이다. 1차 및 2차 발판이 진출하고 복귀하는 1회의 소요시간은 20초이며, 전체 22만회는 약 50일(총 1,222시간)동안 진행되었다. 시험 종료 후 본 장치의 영구변형 유무는 그림 6의 우측사진과 같이 제하조건(unloading condition)하에 취약부의 로켓트 변형률게이지 및 처짐량으로 확인하였으며, 주요 구동부품의 마모상태를 함께 확인하였다.

[표 2] 내구성 시험 장치 사양
[Table 2] Specification of Durability Test Equipment

항목	내용
제습 필터 & 시스템	모델명 : XD-5HT 용량 : 0.65 Nm ² /min 치수 : 455 × 625 × 860
SCU(Step Control Unit)	입력 : 100 V, 출력 : 24 V
스텝 고정 지그	치수 : 1,600 × 580 × 1,000
하중 적용 지그	하중 : 200 kgf
공기 압축기	5.5 HP, 9.5 kgf/cm ²



[그림 6] 내구성 시험장치
[Fig. 6] Durability test equipment

2.4.2 시험 결과 및 고찰

그림 7은 22만회 내구성 시험 종료 후 사진으로서, (a)는 내구성 시험 종료 사진이며, (b)는 시험 종료 후 해체 상태에서 주요 구동부품의 마모상태 사진이다.



(a) 내구성 시험 종료(Final result of durability test)



(b) 시험 종료 후 시스템 마모상태 확인
(After test, confirmation of system wear-out)

[그림 7] 내구성 시험 결과
[Fig. 7] The final result of durability test

내구성 시험 종료 후, 시스템의 기능시험 및 전원 차단 상태에서의 수동개폐 시험 실시 결과 이상이 없었으며, 시스템을 해체하여 부품/모듈의 마모상태는 이상 없음을 확인하였다. 또한 무부하 조건하에 변형률 및 처짐량은 '0'이므로 본 장치의 영구변형은 없다는 것을 알 수 있었다. 이는 본 스텝 장치가 신뢰수준 95%에서 보증수명 12,452회(B_1 수명)를 보장함을 의미하며, KTX 차량에 저상 및 고상 승강장 겸용 승강문 스텝 적용을 가정할 경우, KTX 전반기(2011)주기 16개월 동안 시스템이 고장 없이 운용됨을 의미한다.

3. 결론

본 연구에서는 철도차량의 저상 및 고상 승강장 겸용 승강문 스텝에 대한 내구성 및 보증수명을 평가하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. EN 14752 규격에 준한 기계적 강도조건하에서 유한요소해석 결과, 본 장치의 취약부는 2차 스텝의 Hinge부이며 이의 안전계수는 약 21로서 매우 안전하다. 또한 내구성 해석 결과, 본 스텝의 예상수명은 약 5.4×10^6 회이다. 따라서 본 장치의 설계(안)은 기계적 강도 측면에서 안전하게 설계되었다고 판단된다.
2. 본 장치의 B_1 수명(12,452회)을 보증하는 무고장 내구성시험 사이클 수는 95% 신뢰수준 및 형상모수(β)값 2.0을 적용하여 계산하였으며, 이의 결과는 214,981회(약 22만회)이다.
3. 무고장 내구성시험 종료 후에 본 장치의 기능시험, 수동개폐 시험 및 부품/모듈의 마모상태는 정상적으로 확인되었다. 또한, 무부하 조건하에 변형률 및 처짐량은 '0'이므로 본 장치의 영구변형은 없었다.
4. 향후 연구에서 본 스텝장치는 성능시험(진동, 환경, EMC시험 등) 및 현차적용 시험(시운전)을 통하여 신뢰성을 평가할 예정이다.

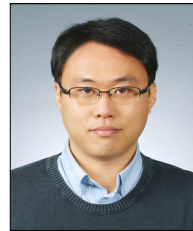
References

- [1] Ministry of Government Legislation, "Regulation of Railway Construction Criteria", Article 28 and 29, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009.
- [2] Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning, "The Planning Report on the Development Plan of Door System of Low and High Level Platforms, pp. 13-179, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010.
- [3] C. H. An, D. S. Lee, Y. J. Son and H. S. Lee, "A Study for Reliability Improvement of Belt Type Door System using FMECA", Journal of the Korean Society for Railway, 13(1), pp. 58-64, 2010.
- [4] D. G. Lee, J. W. Kim and H. S. Lee, "A Case Study on Determining Doors Maintenance Intervals through Running Fault Data Analysis for Metro EMU", Journal of the Korean Society for Railway, 11(3), pp.240-247, 2008.
- [5] European Railway Agency, "BS EN 14752; Railway Application-Body Entrance Systems", European

- Standards, 2005.
- [6] C. S. Kim and G. H. Kang, "Fatigue Analysis of Reduction Gears Unit in Rolling Stock Considering Operating Characteristics", Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.12, No.3, pp. 1085-1090, 2011.
- [7] J. U. Choi, S. H. Kim and K. S. Kim, "A Study on Durability of Automotive Propeller Shaft by Fatigue and Vibration", Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.12, No.4, pp. 1495-1501, 2011.
- [8] S. R. Lee and H. E. Kim, "No-Failure Test Times of Hydraulic System Components for the Life Test", proceedings of the 2006 fall annual meeting for KSME, pp.7-12, 2006.
- [9] J. Y. Byun, W. J. Joo, Y. Jeong, Y. M. Jeong and S. K. Jeong, "Influence of Variables related to Accelerated Life Test Time for a Compressor in Refrigerator", proceedings of the 2009 spring annual meeting for KSPSE, pp.343-347, 2009
- [10] D. S. Jung, J. W. Park and D. S. Kim, "Zero Failure Acceleration Test by Using Inverse Power Model", proceedings of the 2011 spring annual meeting for KSME Reliability Div., pp.142-143, 2011.
- [11] S. W. Ji, B. S. Kang and J. S. Jang, "The Estimation of shape Parameter and Life Analysis for Pneumatic Cylinder", proceedings of the 2006 fall annual meeting for KSPSE, pp.188-194, 2006.
- [12] B. J. Sung, D. S. Kim and J. B. Lee, "A Reliability Study of Direct Drive Type High Speed Solenoid Actuator", proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp.1035-1036, 2011.
- [13] Korea Railroad, "Maintenance Guidelines of Rolling Stock", 2010-125. Article 3, KORAIL, 2010.
- [14] Bloch, Heinz P. and Fred K. Geitner, "Practical Machinery Management for Process Plants, Volume 2 : Machinery Failure Analysis and Troubleshooting", 2nd Edition Appendix A, Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1994.

박 민 흥(Min-Heung Park)

[정회원]



- 2006년 8월 : 한양대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 : 한양대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사수료)
- 2006년 7월 ~ 2008년 8월 : GM 대우 차체설계팀 M300 Underbody 설계

- 2008년 9월 ~ 현재 : (사)한국철도차량엔지니어링 기술연구소 연구원

<관심분야>

시스템 수명 예측 및 신뢰성 평가, 신뢰성 공학

김 철 수(Chul-Su Kim)

[정회원]



- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학박사)
- 2008년 1월 ~ 현재 : 국토해양부 철도기술 심의위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 부교수

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS