

# 고속 철도 차량 횡댐퍼 오일 씬의 형상 단면 최적설계

황지환<sup>1</sup>, 김철수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국교통대 교통대학원, <sup>2</sup>한국교통대 철도차량시스템공학과

## Optimum Design of Cross Section Lateral Damper Oil Seals for High Speed Railway Vehicle

Ji-Hwan Hwang<sup>1</sup>, Chul-Su Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Transportation, KNUT

<sup>2</sup>Department of Railway Vehicle System Engineering, KNUT

**요약** 고속 철도 차량 댐퍼의 오일 씬은 열차 운행동안 외부 환경으로부터 유해한 오염을 막고, 댐퍼 내부에서 오일 누출을 방지하고자 사용되는 니트릴 부타디엔 고무 재질 부품이다. 오일 씬의 주요 고장원인인 누유는 본 댐퍼의 피로 파손을 일으킨다. 뿐만 아니라 본 오일 씬의 누적 손상은 궤도 불규칙과 캔트 등으로 열차 주행동안 반복적인 댐퍼의 상하 운동으로부터 로드와 본 부품 사이에 접촉력으로 인하여 발생한다. 따라서 본 오일 씬의 설계는 취약점에서 최대 주변형률을 최소화하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 댐퍼의 내구성을 향상하기 위하여 다중 섬 유전자 알고리즘을 이용하여 오일 씬 단면형상에 대한 최적설계를 수행하였다. 오일 씬의 최적단면은 절차 자동화 / 최적설계 프로그램을 이용하여 본 연구의 최적설계와 비선형 유한요소해석의 통합절차에 따라 얻어진 것이다. 또한, 비선형 유한요소해석의 입력 자료로서, 본 고무의 비선형 물성값은 말로우식으로 표현하였다. 취약지점인 오일 누유지점에서 최적단면의 오일 씬은 초기 형상과 비교할 때, 이 지점에서 최대 주변형률이 약 24% 감소함을 확인하였다.

**Abstract** The damper oil seal of a high-speed railway vehicle is made from nitrile butadiene rubber (NBR) in order to prevent lubricant from leaking into the damper and to stop harmful contaminants from entering the external environment while in service. Oil leakage through the seal primarily occurs from fatigue failure of the damper. Cumulative damage of the seal occurs due to the contact force between the rod and the rubber during movement due to track irregularities and cants, among other factors. Thus, the design of the oil seal should minimize the maximum principal strain at weak points. In this study, the optimal cross section of the damper oil seal was found using the multi-island genetic algorithm method to improve the durability of the damper. The optimal shape of the oil seal was derived using process automation and design optimization software. Nonlinear material properties for finite element analysis (FEA) of the rubber were determined by Marlow's model. The nonlinear FEA confirmed that the maximum principal strain at the oil leakage point was decreased 24% between the initial design and the optimum design.

**Keywords :** Damage, High Speed Railway Vehicle, Lateral damper, Multi Island Genetic Algorithm, Oil Seal

### 1. 서론

철도차량 현가장치인 댐퍼는 궤도 불규칙 및 틀림에 따라 안정된 승차감을 유지하고자 열차 운행시 반복적으로 운동한다. 고속철도차량(KTX) 현가장치인 횡댐퍼는

Fig. 1과 같이 주행동안 차체(car body)와 대차(bogie)사이에서 다양한 변위 및 진동을 흡수함으로써 승차감을 향상하는 역할을 수행한다. 이의 주된 고장 원인은 로드(rod)의 상하 반복적인 접촉에 따른 오일 씬(oil seal)의 누유(leakage) 발생이다. 오일 씬의 고장은 열차 운행동

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(16RTRPB08576403)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Chul-Su Kim(Korea National University Transportation)

Tel: +82-70-8855-1649 email: chalskim@ut.ac.kr

Received December 12, 2016

Revised January 5, 2017

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

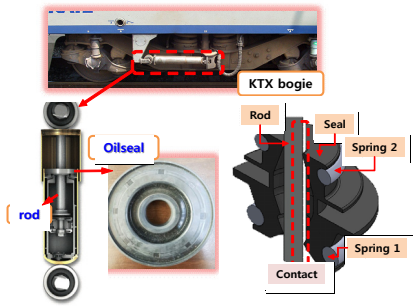


Fig. 1. Lateral damper oilseal of KTX bogie

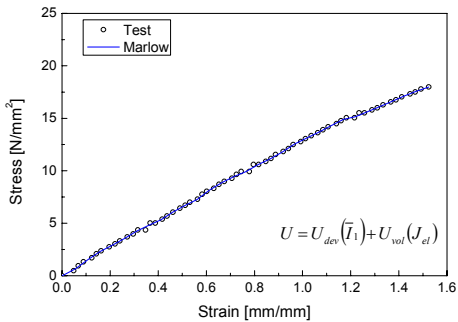


Fig. 2. Stress-strain curves of nitrile butadiene rubber used for the oilseal

안 현가 성능(suspension performance)의 저하를 초래함으로써, 주행 안전성 및 승차감에 악영향을 미친다. 또한 오일 씰은 댐퍼의 수명과 직결되므로 중정비 관점에서 이의 고장에 따른 빈번한 유지보수 및 교체가 어려운 실정이다. 따라서 기존 댐퍼의 고장 방지 및 수명연장을 위해서는 다양한 댐퍼류에 공통적으로 취부할 수 있는 오일 씰에 대한 단면형상의 최적설계 연구가 필요하다.

최근 철도차량 고무부품에 대한 연구[1-3]는 방진 고무부품의 특성 평가[1]와 네오프렌 고무로 제작된 차량간 통로연결막의 비선형 해석 및 내구성 평가에 관한 연구로 국한되었다[2,3]. 이에 반하여 본 연구의 오일 씰과 같이 철도차량 고무부품에 대한 해석 및 설계에 관한 연구는 금속소재와 달리 초탄성(hyper-elastic behavior)의 거동에 대한 해의 수렴이 어려우므로 아직까지 미비한 실정이다.

## 2. 기계적 특성 평가

고무소재는 대변형 범위에서도 초탄성 거동을 나타내므로 이를 고려한 비선형 유한요소해석시 해의 정확도를

높이기 위해서는 응력-변형을 선도로부터 적합한 재료거동식을 선정하는 것이 중요하다.

Fig. 2는 본 고무재료의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 고무 재료의 초탄성 거동은 말로우(Marlow) 모델[4]을 이용하여 식 (1)과 같이 변형률에너지밀도 함수( $U$ )로 표현하였다.

$$U = U_{dev}(\bar{I}_1) + U_{vol}(J_{el}) \quad (1)$$

여기서  $U_{dev}$ 는 편차 변형률 에너지밀도(deviatoric strain energy density),  $U_{vol}$ 는 부피증가에 대한 변형률 에너지밀도,  $\bar{I}_1$ 은 1차 편차 변형률 불변량(first deviatoric strain invariant),  $J_{el}$ 은 탄성 체적비를 (elastic volume ratio)이다. 이 선도는 본 오일 씰에 대한 비선형 유한요소해석의 입력 자료로서 사용하였다.

## 3. 비선형 유한요소해석

Fig. 3은 본 오일 씰의 경계조건 및 작용하중을 나타

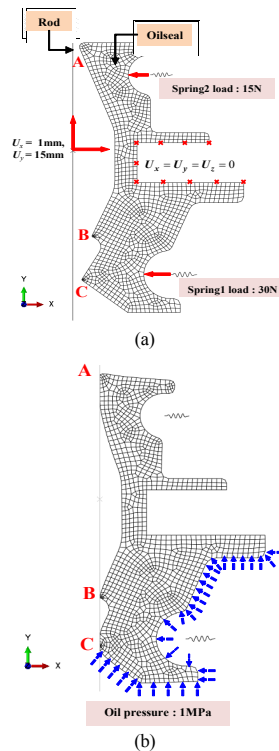


Fig. 3. Finite element model and boundary condition of the oilseal, (a)assembly condition of the 1<sup>st</sup> step (b) applied load condition of the 2<sup>nd</sup> step

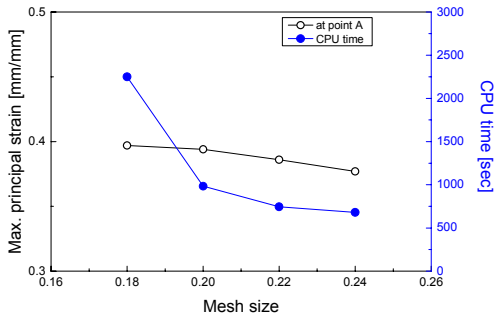


Fig. 4. Determination of the mesh size of the oil seal finite element

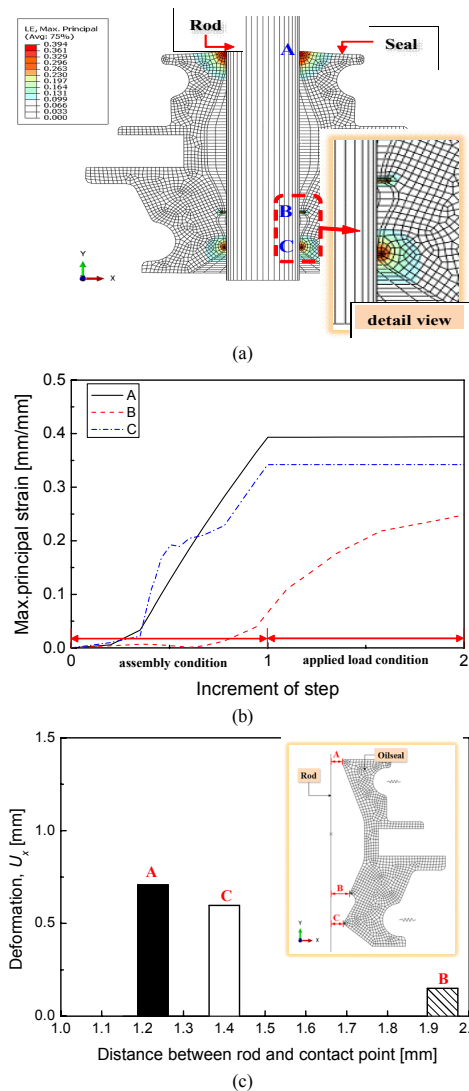


Fig. 5. Maximum principal strain distribution and histories of the original model, (a)finite element analysis result

낸 것이다. 작용하중은 총 2 단계로 구분되며, 첫 번째 단계는 조립 조건(Fig. 3(a))이고, 두 번째는 조립상태에서유압을 부여하는 단계(Fig. 3(b))이다. 조립조건은 로드를 오일 씬의 립(lip)에 1mm 변위로 부여하고, 각 스프링 조립은 링크(link)형태로 구현하였다. 여기서 2개의 스프링 하중은 각각 15N과 35N을 부여하였다. 2단계 작용하중조건인 오일 씬 내압은 1MPa이다. Fig. 4는 요소 크기(mesh size)에 따른 최대 주변형률(A지점)과 해석시간을 나타낸 것이다. 그림에서 요소 크기 ‘0.2’인 경우에 최대 주변형률을 유지하면서 급격한 해석시간의 감소를 나타내므로 이를 본 해석에서 적용하였다.

Fig. 5는 Fig. 3으로부터 기존 단면형상의 오일 씬에 대한 비선형 유한요소해석결과를 나타낸 것이다. 본 연구의 기계적 거동 변수는 고무 재료의 초탄성 거동을 고려하여 최대 주변형률(maximum principal strain)이다 [1-3]. 이 그림에서 취약부위는 로드와 접촉하는 세 지점들로서, 최대 주변형률의 크기에 따라 A, C 및 B지점 순으로 나타난다. 이의 원인은 Fig. 5(c)로부터 로드사이 간격의 크기에 따라 각 지점에서 x축 변형량( $U_x$ )의 증가 때문이다. 가장 높은 최대 주변형률은 A지점에서 0.394이다. 또한, 실질적인 오일누유 발생지점인 C지점도 0.343(A지점 최대 주변형률 값의 87%)으로서 취약 지점에 해당한다. 따라서 이들 취약지점 부근의 기하학적 형상은 본 부품의 최적설계 변수로서 고려되어야 한다.

#### 4. 최적설계

본 뎀퍼의 오일 씬에 대한 누유방지를 위한 설계요구 사항은 오일 씬 조립에 따른 기하학적 제약과 로드 접촉에 따른 최대 주변형률의 감소이다. 이로부터 설계문제를 정식화하면 Table 1과 같으며, 각 취약지점인 세 지점(A, B, C)의 최대 주변형률을 감소하기 위한 설계변수들은 Fig. 6과 같다.

Table 1. Formulation of optimum design

Find	$X_1, X_2, X_3$
Minimize	Maximum principal strain at A, B and C
Boundary	$64 < X_1 < 74[\text{deg}]$
	$0.5 < X_2 < 1.5[\text{mm}]$ $55 < X_3 < 65[\text{deg}]$
Constraint	Max. principal strain at point A < 0.394
	Max. principal strain at point B < 0.281
	Max. principal strain at point C < 0.343

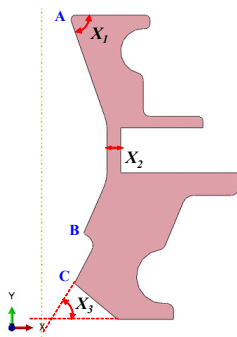


Fig. 6. Design parameters for the damper oilseal

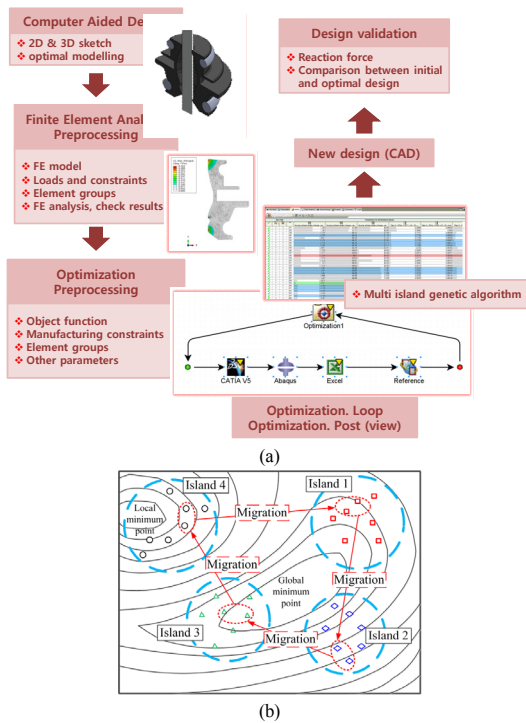


Fig. 7. Flowchart of an iterative optimization procedure, (a) Optimization flowchart, (b) Multi island genetic algorithm [7]

Fig. 7(a)은 오일 씰의 단면에 대한 형상 최적화 설계 과정을 도식화 한 것이다. 최적설계 프로그램은 I-sight이며, 이는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS와 CAD 프로그램인 CATIA V5와 연동하여 실행을 자동화한다. 뿐만 아니라, 결과에 따른 설계 공간을 탐색하고, 필요한 제약조건을 따르는 최적설계 매개 변수를 식별한다. 이의 과정을 살펴보면, 먼저 유한요소 전처리 단계에서는 재료 특성, 하중 및 경계(또는 제약) 조건을 정의한다. 또한 유한요소해석은 최적화를 고려하여 cae 파일 형식의

로 저장한 후에 수행한다. 다음 단계에서 최적화 문제는 Fig. 6에 따라 설계영역 및 변수를 정의하며, ABAQUS에 의해 생성된 odb 파일은 목적함수 결과파일로 지정된다. 최적화 루프는 I-sight의 zmf 입력파일로 저장하면서 반복 수행한다. 본 연구의 최적화는 각 접촉지점 A와 C의 각도를 설계변수로 정의하고, 목적 함수를 최소화하도록 진행한다. 최적화 알고리즘은 Fig.7 (b) 와같이 다중 목적함수에 유용한 다중 섬 유전자 알고리즘으로 수행하였다. 본 알고리즘은 기존의 유전자알고리즘과 달리 설계변수( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ )인 개체들(individuals)을 ‘섬’으로 그룹핑하고, 반복과정 동안 하위 개체군을 독립적으로 유지하고 새로운 반복과정 전에 하위 개체군 간의 지식 전달 과정(migration)을 수행하여 부분 최적해의 발생가능성을 낮게 한다.[5-7]본 연구에서는 각 단계 최적화 반복하는 동안 유한요소 모델과 파라미터들을 설계데이터에 바로 반영한다. 본 모델의 최적화는 Fig. 8과 같이 총 350회로부터 259회에서 성공하였다.

Fig. 9은 Fig. 8로부터 본 오일 씰의 최적단면을 기준 단면과 함께 나타낸 것이다. 이 그림에서 나타낸바와 같이 최적화 단면은 A지점 각도( $X_1$ )는 69도에서 72도로, C지점 각도( $X_3$ )는 60도에서 65도로 바뀌었으며, 중심부의 두께( $X_2$ )는 1mm에서 0.55mm로 변화하였다.

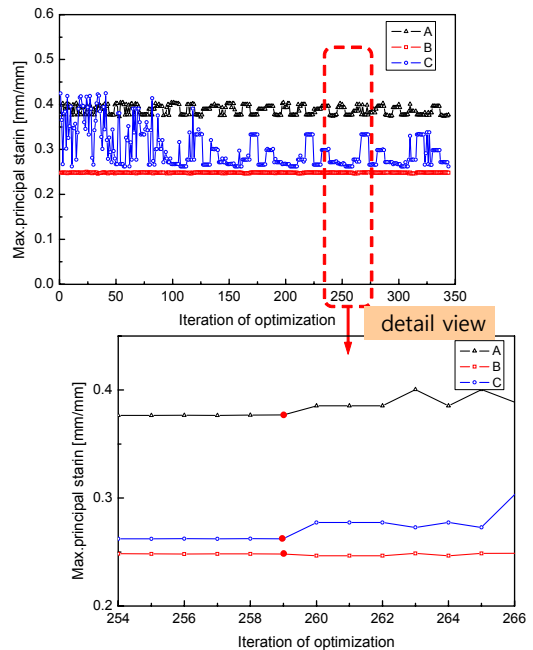


Fig. 8. Optimization histories in case of Fig. 7

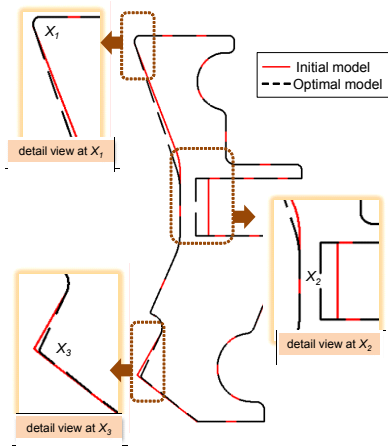


Fig. 9. Comparison of cross sections between the initial and the optimum designs

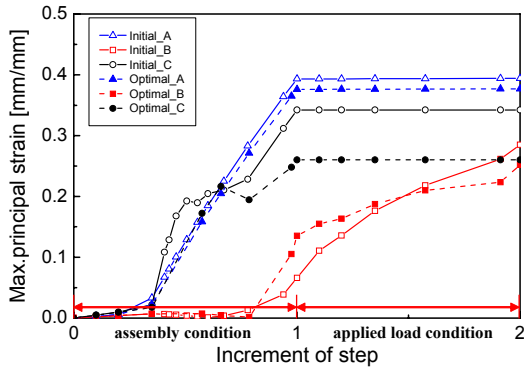


Fig. 10. Comparison of maximum principle strain histories between the initial and the improved model

Table 2. Comparison of the initial and optimum design models.

Position	Initial model		Optimal model		Decreasing rate of Max. principal strain
	Max. principal strain	variables	Max. principal strain	variables	
A	0.394	$X_1$ 69 [deg]	0.377	$X_1$ 72 [deg]	4 [%]
B	0.285	$X_2$ 1 [mm]	0.252	$X_2$ 0.55 [mm]	12 [%]
C	0.342	$X_3$ 60 [deg]	0.260	$X_3$ 65 [deg]	24 [%]

제안된 최적화 단면의 유효성을 검증하기 위하여 기존 대비 최대 주변형률과 반력을 함께 비교하였다. Fig. 10는 Fig. 9의 기존과 최적화 단면에 대한 세 지점에서 각각의 최대 주변형률 분포 이력 이며, Table 2는 세 지점에 결과를 함께 비교한 것이다.

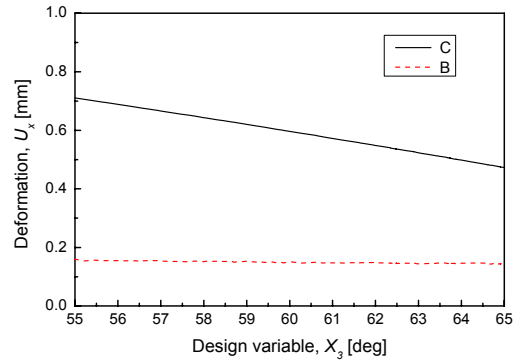


Fig. 11. Comparison of design variable  $X_3$  histories of deformation

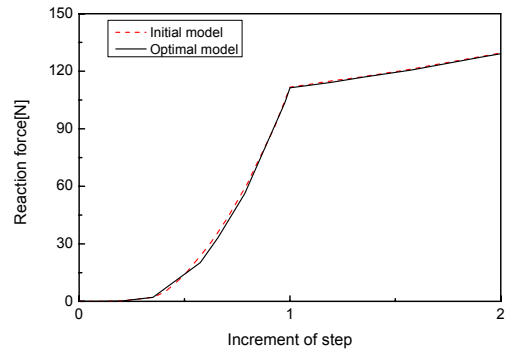


Fig. 12. Comparison of increment histories of reaction force at rod axis center

그림에서 오일 누유 관련 C지점에서 최적모델의 최대 주변형률은 0.342에서 0.260으로 약 24%감소하였다. 또한, 2단계 C와 B지점에서 최적모델의 최대 주변형률은 각각 0.260와 0.252로서 거의 같아진다. 이의 원인은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 C지점의 x축 변형량( $U_x$ )은  $X_3$ 의 각도증가에 따라 완만한 감소 경향을 갖는 B지점과 달리 급격히 감소하였기 때문이다.

한편, 기존모델과 최적모델에서 로드 축 중심에서 각각의 반력이력은 Fig. 12와 같이 거의 유사함을 확인하였다. 이로부터 Fig. 9의 최적단면에 대한 본 해석의 유효성을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 철도차량 뎀퍼류 오일 씰의 내구성 향상 연구 일환으로서, 이의 비선형 유한요소해석을 수행

하였으며, 단면형상에 대한 유전자 알고리즘 기반 최적 설계를 수행하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 오일 씰의 비선형 유한요소해석은 조립 조건과 유압을 부여하는 단계로 나누어 수행하였다. 해석 결과로부터 실질적인 오일누유 발생지점에서 최대 주변형률은 0.343이며, 이 지점이외 로드와 접촉하는 지점에서도 최적설계 수행시 제한 및 목적 함수에 고려하였다.
- (2) 총 350회 단계를 거쳐 다중 섬 유전자알고리즘에 준한 최적설계를 수행한 결과, 본 오일 씰의 최적 화단면은 로드와 접촉하는 2개 지점에서 기존 모델보다 3~5° 증가하는 형상을 갖는다. 또한 최적 단면의 최대 주변형률은 오일 누유와 관련지점에서 약 24%감소하였다. 그리고 두 모델의 반력이 력이 유사하므로 최적설계의 유효성을 확인하였다.

향후에 이를 바탕으로 내구성 해석, 리그시험 및 차량 시운전 시험평가를 수행할 것이다.

## References

- [1] C. S. Woo, H. S. Park, D. C. Park, "Characteristics and Useful Life Prediction of Rubber Spring for Railway Vehicle", Journal of the Korean Society for Railway, vol. 10, no. 2 pp. 211-216, 2007.
- [2] G. H. Kang, C. S. Kim, "Nonlinear Analysis of Rubber Bellows for the High Speed Railway Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 14, no. 8, pp. 3631-3637, 2013.  
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.8.3631>
- [3] G. H. Kang, C. S. WOO, C. S. Kim, "Durability Evaluation of Gangway Connections for the High Speed Railway Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 15, no. 8, pp. 4796-4801, 2014.  
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.8.4796>
- [4] A. Ali, M. Hosseini, B. B. Sahari, I. Paczelt, "A Review of Constitutive Model for Rubber-Like Materials", American Journal of Engineering and Applied Sciences, pp. 232-239, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2010.232.239>
- [5] A. V. der Velden, P. Koch. Isight Design Optimization Methodologies. pp. 7-16, Simulia, 2010.
- [6] X. Hu1, X. Chen, Y. Zhao and W. Yao, "Optimization Design of Satellite Separation Systems Based on Multi-Island Genetic Algorithm", Advances in Space Research, vol. 53, no. 5, pp. 870-876, 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.021>

- [7] S. B. Choi, J. W. Jung, J. B. Choi, Y. S. Chang, H. O. Ko, M. C. Kim, B. S. Lee, "Estimation of Brittle Fracture Behavior of SA508 Carbon Steel by Considering Temperature Dependence of Damage Model", The Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 36, no. 5, pp. 513-521, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.5.513>

### 황 지 환(Ji-Hwan Hwang)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한국철도대학교 철도차량기계과 졸업
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원 (석사과정)

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS

### 김 철 수(Chul-Su Kim)

[종신회원]



- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학)
- 2008년 11월 ~ 현재 : 국토해양부 철도기술 심의위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 교수 (교통대학원 겸직)

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS