

전기기관차 견인전동기 운전점 특성과 가진주파수를 고려한 프레임 설계

Frame Design Considering Exciting Frequency and Driving Characteristic of a Traction Motor for Electric Locomotive

김철수* · 김재문†
(Chul-Su Kim · Jae-Moon Kim)

Abstract - In this paper, we were performed a structural analysis and durability analysis for an integral frame with an axle according to development of the electric locomotive traction motor. In terms of the structural stability, as a result of the analysis modeling with coupling conditions of beam element and an alternative element of three-dimensional, the maximum von-Mises stress of the locking screw mounting frame were similar as 50MPa and 51MPa. Also A comparison of the natural frequency and the exciting frequency while driving of the electric locomotive No. 8200, the natural frequency is 627.05Hz~856.9Hz while the exciting frequency is not more than most 30Hz or 553Hz, 1110Hz. Therefore, it is possible to avoid the resonance.

Key Words : Traction motor, Constant torque, Structural analysis, Durability analysis, Frame

1. 서론

국내 일반 철도 여객 수송 및 화물을 운송역할을 하는 800호대 전기기관차는 도입 후 10년이 경과되어 노후화가 진행 중이며, 이중 8200호대 전기기관차는 해외에서 도입된 철도차량이다. 이로 인해 유지보수 측면에서 기술이전이 이루어지지 않아 지속적으로 많은 어려움을 겪고 있으며, 노후화된 차량부품들은 소량 다품종이므로 조달 확보가 힘든 실정이다. 국내 철도 운영기관에서는 차량 유지보수에 많은 어려움을 가지므로[1], 8200호대 차량의 노후화에 따른 부품의 유지보수 비용 증가 및 원활한 공급을 위하여 주요 부품의 국산화 개발을 추진하고 있다.

그러나 이들 연구에서 실제 열차 운행이력에 따른 견인전동기의 피로수명 평가는 미비한 실정이다. 따라서 철도차량의 주행안전성을 확보하기 위해서는 전기적 특성 검토뿐만 아니라 견인전동기에 대한 구조해석 및 내구성 해석이 필요하다. 최근 개발되고 있는 전동기에 대한 연구일례를 살펴보면, 다중게이트방식을 적용한 30[kW]이하 3상 고효율 유도전동기를 개발하기 위해 불평형 응답해석을 수행하여 회전시 발생하는 불평형 진동응답을 분석하였다[2]. 그리고 영구자석 매입형 3상 동기 전동기를 고속영역에서 운전시킬

때 정적 및 동적 하중 상태를 고려함으로써 내구시험 및 실제 운용시 영구자석 접촉불량으로 인한 최악조건을 회피할 수 있는 합리적인 설계 예측 연구 등이 있다.

본 논문은 8200호 전기기관차의 견인전동기 개발에 따른 차축에 취부되는 전동기 프레임의 구조적 안전성 검토의 연구 일환으로서, 견인전동기의 운전점 특성을 고찰하고 견인전동기 일체형 프레임에 대한 구조해석 및 내구성해석을 수행하였다. 또한 주행조건에 따른 토크 이력하에 피로수명을 예측하고 이의 상관성을 검토하였다.

2. 본론

2.1 전기기관차 견인전동기 제원 및 운전점 특성

8200호 전기기관차는 가변전압 가변주파수(Variable Voltage Variable Frequency, 이하 VVVF) 제어방식을 적용하여 4개의 견인전동기를 구동하게 되며, 최고 운용속도 150[km/h]인 여객/화물 겸용 철도차량이다. 전기기관차의 견인전동기는 철도차량 진행방향의 수직 방향으로 설치된 1,350[kW]의 4극 3상 비동기 전동기로서 노우즈 서스펜션 구동장치(Nose suspension device)와 조립된 일체형이다[1].

표 1은 현재 운용되고 있는 전기기관차 견인전동기 특성과 동등한 성능을 갖기 위해 본 연구를 통해 개발된 8200호 전기기관차의 견인전동기인 유도전동기에 대해 전원주파수(f_s)에 따른 운전점 특성을 보여준다. 견인전동기에 대한 특성곡선을 추종하기 위해 각각의 전원주파수에서 슬립을 0~1로 변화하면서 최대효율과 역률을 갖는 운전점에서의 얻은 회전자 속도, 상전압, 상전류, 토크 데이터이다.

* Dept. of railway vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea

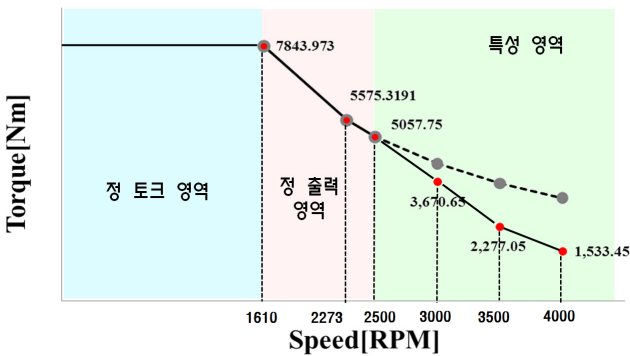
E-mail: goldmoon@ut.ac.kr

Received : November 11, 2014; Accepted : November 25, 2014

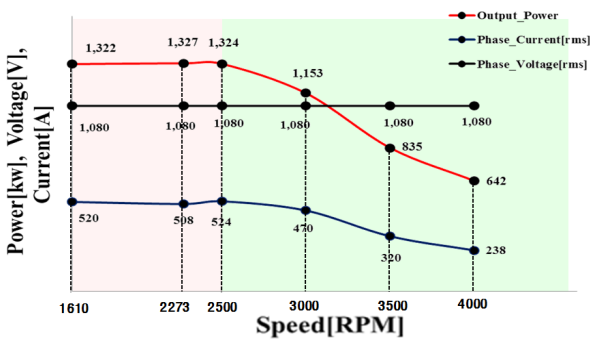
표 1 운전점에서 회전자속도, 상전압, 상전류, 토크 데이터

Table 1 Rotor Speed, Phase Voltage, Phase Current and Torque data at an Operating point

전원주파수 [Hz]	회전자 속도 [rpm]	상전압 [V]	상전류 [A]	토크 [Nm]
53.99	1610	1079.65	519.89	7843.97
76.27	2273	1079.65	508.05	5575.32
83.92	2500	1079.65	523.55	5057.75
100.66	3000	1079.65	470.11	3670.65
117.17	3500	1079.65	319.95	2277.05
133.77	4000	1079.65	237.96	1533.45



(a) 속도에 따른 토크



(b) 속도에 따른 전력, 전압, 전류값

그림 1 견인전동기 특성곡선

Fig. 1 Characteristic Curve of the Traction Motor

그림 1은 표 1에 대한 견인전동기 설계에 따른 특성곡선을 보여준다. 일반적으로 견인전동기는 속도변화에 따른 정토크, 정전력, 특성영역으로 구분되는데 그림 1(a)는 속도 변화에 따른 토크값으로 속도가 증가할수록 토크값이 상대적으로 떨어지고 있음을 알 수 있다. 그림 1(b)는 속도 변화에 따른 전력, 전압, 전류값을 보여준다. 견인전동기 1610[rpm] 속도이전에는 정토크로 운전하다가 1610[rpm]~2500[rpm] 사이에는 정전력 제어, 특성영역에서는 상전압은 일정하지만 상전류가 떨어지면서 전력도 비례하여 떨어지는 것을 알 수 있다.

2.2 차량 주행에 따른 진동 주파수 분석

열차 운행 시 Motor-Gearbox-Wheel에서 발생하는 진동 특성을 알아보기 위해 수행 되었다. 운행 중 설비의 진동상태와 주파수 분석을 위하여 그림 2와 같이 Motor outboard bearing, Motor inboard bearing, Gearbox housing, 차축 NDV bearing측에 16 Point 진동센서를 설치하고, 차륜 측에 속도측정이 가능한 1 point 타코센서가 설치되었다. 설치된 Point는 열차 왕복운행구간 동안 다채널 진동 분석장비인 Emerson 6500과 LMS로 측정하였고, 가동조건은 일정속도 구간과 각역 출발 및 도착지점의 과도상태를 포함한 제천역 - 영주역 전체 왕복 운행구간을 기준으로 하였다[3].

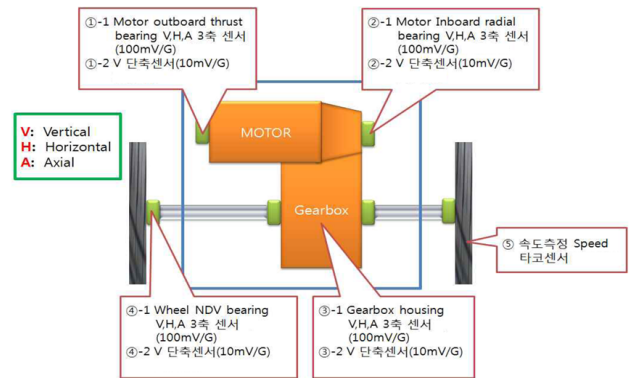


그림 2 센서 측정 위치

Fig. 2 Sensor measuring point

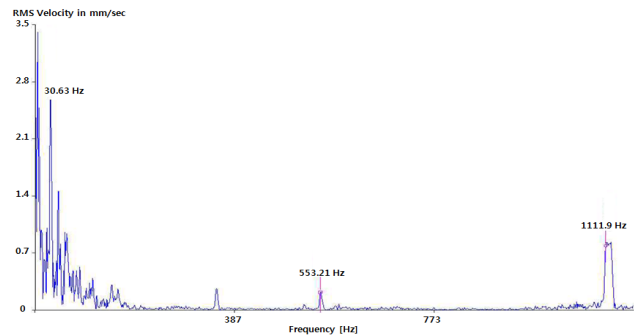


그림 3 차량 속도 70km/h에서의 가진 주파수

Fig. 3 Excitation frequency at railway vehicle speed 70km/h

그림 3은 8200호 전기기관차가 60~100[km/h] 주행 중 속도가 증가하면서 평균 진동량이 가장 높은 구간인 70[km/h]의 Motor Outboard Vertical 방향의 진동 데이터를 보여준다. 전체 진동량은 약 10[mm/s] RMS 값으로 분석결과 견인전동기 회전주파수 성분인 1X가 약 30[Hz]로 다른 성분들에 비해 높게 나타나고 있고, 1X이하 저주파수 성분들은 레일 충격진동에 의해 나타나는 주파수로 추정된다. 고주파수대역을 보면 500[Hz] 이상 대역에 고조파성분으로 553[Hz]와 2배인 1110[Hz]대역이 나타나고 있다. 이것은 계산결과 70[km/h] 주행시 기어박스에서 나타나는 GMF(Gear Mesh Frequency) 성분으로 열차 구동시 기어박스에서 발생하는 주파수 성분이 견인전동기측까지 전달되어 영향을 주고 있다고 판단된다.

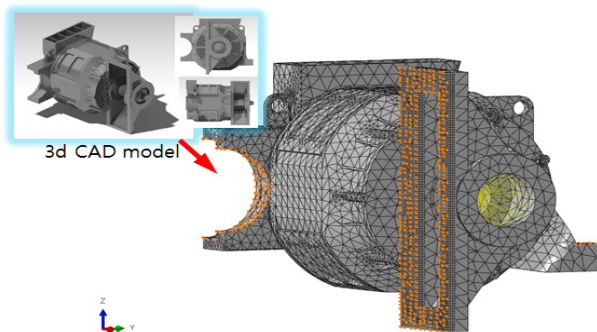
한편 동일조건에서의 진동량을 살펴보면 가속도(G)값으로

Vertical 1.85G, Axial 1.55G, Horizontal 1.32G의 순으로 전체 진동량과 비슷한 패턴으로 Vertical 방향에서 진동이 가장 높게 나타났다.

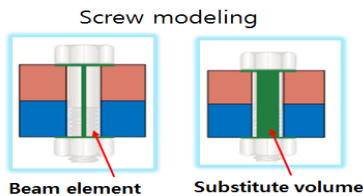
2.3 유한요소모델 구축 및 모드해석

견인전동기 운전점 특성과 전기기관차 주행에 따른 진동 주파수를 고려하여 견인 전동기의 효율 및 정격 출력 특성뿐만 아니라 사용 수명을 충분히 만족하기 위해 강도(Strength) 및 내구성(Durability) 측면에서 안전성 검토가 필요하다.

그림 4는 강도평가의 구조해석에 요구되는 유한 요소망 생성(Finite element mesh generation) 및 경계조건을 나타낸 것이다. 본 모델은 3차원 캐드모델(Computer aided design model)로부터 상용해석 소프트웨어인 ABAQUS[4]에서 변환하고 이로부터 요소망을 생성하였다. 요소망은 3차원 중절점사면체요소(Tetrahedral elements, C3D10) 90,225개와 8절점 육면체요소(Hexahedral elements, C3D8) 9,321개를 혼합한 것이다. 총 요소수(Total number of elements)와 총 노드수(Total number of nodes)는 각각 99,546개와 163,074개이다. 해석에 입력 자료로서 사용되는 재료의 탄성계수(Elastic modulus)는 207GPa이고, 프아송비(Poisson's ratio)는 0.29이다. 경계조건(Boundary condition)은 대차프레임에 전동기를 지지하는 부분(3곳)의 변위(x,y,z)를 모두 구속하고, 작용하중은 승객하중을 고려한 최대 정지 마찰력을 적용하였다. 그리고 구조적 안정측면에서 중요한 취부프레임의 나사체결부 모델링[5]은 그림 4(b)와 같이 빔요소(Beam element)의 커플링조건과 3차원 대체요소(Substitute volume)를 각각 부여하고 해석결과를 비교하였다.



(a) The finite element model



(b) Screw model for finite element analysis

그림 4 견인전동기 유한요소모델 및 경계 조건

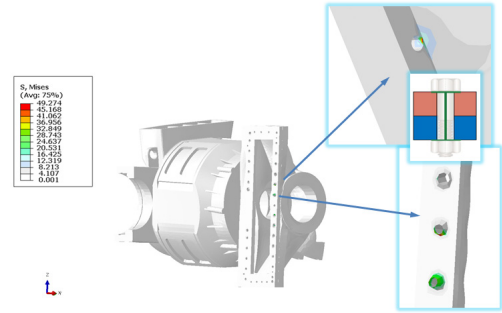
Fig. 4 The finite element model and boundary condition of the traction motor

2.4 유한요소 및 내구성 해석

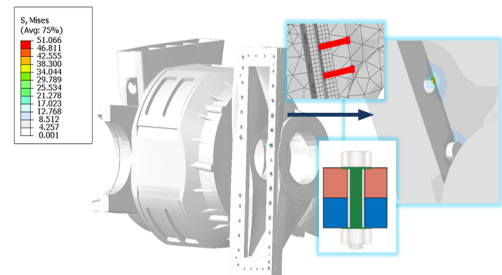
2.4.1 유한요소 해석결과

전기기관차 견인전동기 운전점 특성과 가진주파수를 고려한 프레임 설계

그림 5는 그림 4로부터 전동기 프레임의 유한요소 해석결과를 나타낸 것으로 장치의 취부부는 감속기장치사이 나사체결부에서 발생하였다. 나사체결부의 정확한 해를 구하기 위하여 Fig. 4(b)와 같이 두 가지 모델로 각각 해석을 수행하였다. 이들의 최대 von-Mises응력은 각각 50MPa와 51MPa로서 유사하다. 참고로 본 부품의 정규모드 해석결과는 그림 6과 같으며, 주행이력의 가진주파수 검토를 통하여 공진여부를 판단할 수 있다.



(a) Screw joint modelled as a beam element



(b) Screw joint modelled as substitute volume

그림 5 2종류 나사체결 모델링에 따른 유한요소해석결과
Fig. 5 Results of finite element analysis with two types of screw models

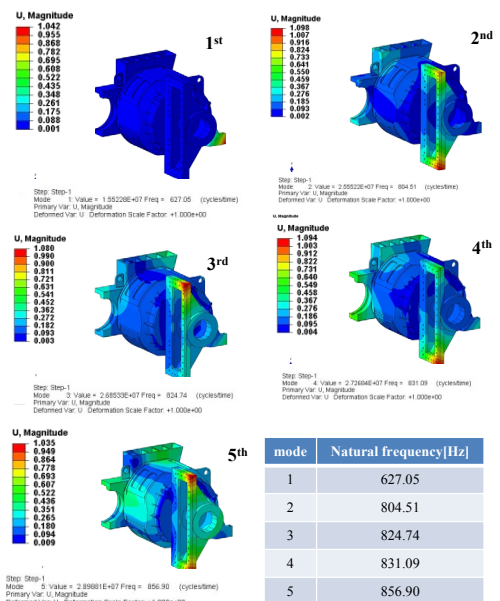


그림 6 전동기 프레임의 고유주파수 분석 결과

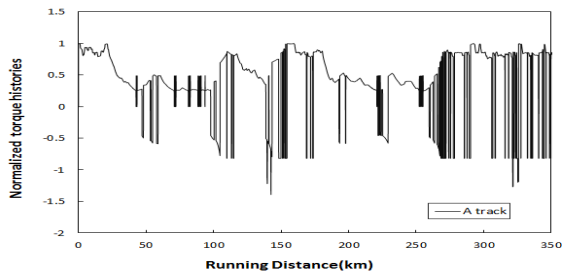
Fig. 6 The natural frequency of a motor frame

그림 6의 고유 주파수와 8200호 전기기관차 주행 중에 가진 주파수를 비교해 보면 고유 주파수는 모드에 따라 627.05[Hz]~856.9[Hz]인 반면 가진 주파수는 대부분 30[Hz] 이거나 553[Hz], 1110[Hz]이므로 공진회피가 가능하다.

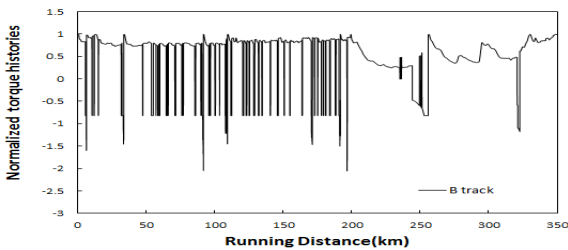
2.4.2 내구성 해석결과

보다 실질적인 피로수명 예측을 위하여 본 논문에서는 실차 주행시 측정된 속도이력으로부터 환산된 토크이력을 사용하였다. 그림 7은 동일한 주행거리에서 2개 노선에 대한 가상의 토크이력을 나타낸 것으로 토크값은 양의 최대 토크로 나눈 정규화된 토크이력이다. 2개 노선은 총 주행거리 350[km]로서 동일하지만, (A)노선은 정차역은 6개소이고, (B)노선은 정차역은 11개소이다. 이로부터 그림 8은 그림 7의 주행거리에 따른 토크진폭 및 평균토크에 대한 빈도수를 각각 정리한 것이다. 여기서 사용된 기법은 레인 플로우 사이클 기법(Rainflow cycle counting method)[6]이다. 최대 진폭은 두 노선에서 서로 유사한 값을 갖지만, 정차빈도가 높은 (B)노선에서 최대 하중진폭의 발생횟수가 (A)노선보다 2배 정도가 많다.

한편, 참고로 본 부품의 내구성해석은 피로수명 예측에 범용적으로 사용되는 FeSafe를 이용하였다[7]. 그림 9에서 2개 토크이력하에서의 내구성해석결과를 바탕으로 A 및 B노선의 피로수명 평가를 비교하면, A노선의 반복 주행시 얻어진 본 부품의 피로수명($10^{9.003}$ km)은 B노선의 경우($10^{7.805}$ km)보다 길다. B노선의 경우 50[km/h]이하의 저속 주행을 하게 되므로 체결부가 받는 평균토크는 A노선주행보다 상대적으로 크다. 또한, B노선 주행은 A노선 주행인 경우보다 잦은 정차 후 출발로 인하여 보다 빈번한 토크진폭 횡수를 일으키게 되므로 보다 빨리 수명저하를 초래하게 된다.



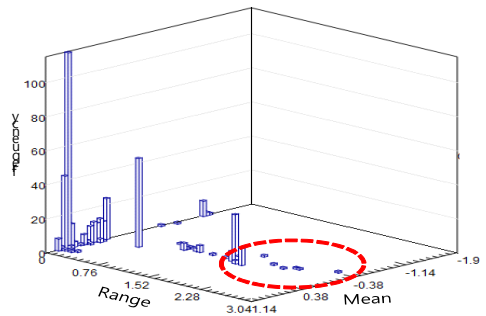
(a) A track



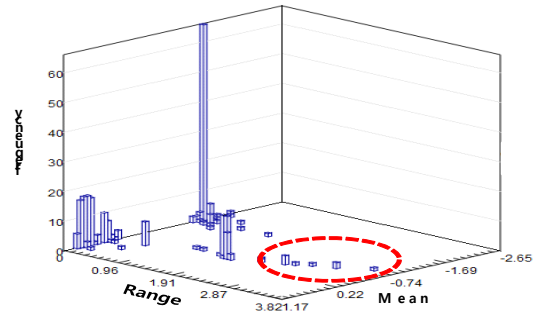
(b) B track

그림 7 내구성 해석에 사용될 토크이력

Fig. 7 Torque histories train in main line used for the durability simulation.



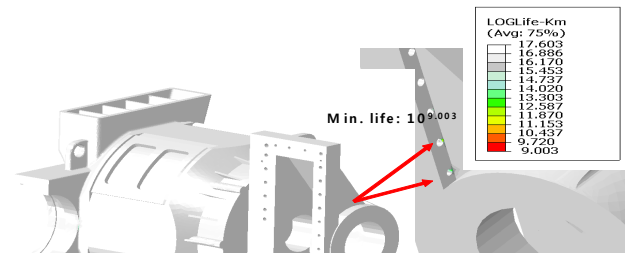
(a) A track



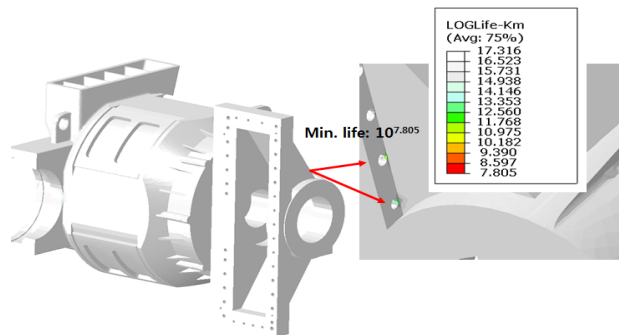
(b) B track

그림 8 2개 토크이력하에 사이클 카운팅 결과

Fig. 8 Results of Rainflow cycle counting under 2 types of torque histories



(a) A track



(b) B track

그림 9 2개 토크이력하에 내구성해석 결과

Fig. 9 Results of fatigue analysis under 2 types of torque histories

3. 결 론

본 논문에서는 전기기관차 견인전동기의 개발에 따른 차축과 일체형인 프레임에 대한 구조해석 및 내구성 해석을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 견인전동기는 속도변화에 따른 정토크, 정전력, 특성영역으로 구분되는데 1610[rpm] 속도이전에는 정토크로 운전하다가 1610[rpm]~2500[rpm] 사이에는 정전력 제어, 특성영역에서는 상전압은 일정하지만 상전류가 떨어지면서 전력도 비례하여 떨어진다.
- (2) Motor-Gearbox-Axle 전체설비의 진동량은 Gearbox와 Axle축이 견인전동기에 비해 높은 진동량(45>35mm/s rms)을 나타내고 있으며, 방향별로는 수직방향>축방향>수평방향의 순서로 큰 진동량을 보였다.
- (3) 구조적 안정측면에서 중요한 취부프레임의 나사체결부는 빔 요소의 커플링조건과 3차원 대체요소로 모델링하여 해석한 결과, 최대 von-Mises응력은 각각 50MPa과 51MPa로서 유사하다.
- (4) 운행 특성에 따른 견인전동기 프레임의 내구성 해석 결과로부터 전기기관차가 갖은 정차와 저속 운행을 하면, 동일 주행거리조건하에 이의 교체주기가 빨라진다. 따라서 전동기 교체 및 예방정비 주기 수립시 이를 고려한 설정이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 미래철도기술개발사업의 연구 일환으로 국토교통부의 연구비지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] B.Y. Park, "Structure and Function of Electric Locomotive", Korail Human Resources Development Center, pp.430~439, 2006.
- [2] S.W. Jung, "A study on a rotordynamics of copper die casting rotor for high efficiency induction motor", A master's degree, dong-a university, 2013.
- [3] KTM Eng(Ltd.), No. 8200 Electric Locomotive Motor-Gearbox-Wheel Driven equipment vibration measurement test results report, April 2013.
- [4] Dassault System, SIMULIA Abaqus/CAE User's Manual, 2014.
- [5] VDI-Richtlinie 2230 Part 2, "Systematic Calculation of High Duty Bolted Joints-Joints with Several Cylindrical Bolts", Verein Deutscher Ingenieure, Dusseldorf, Nov., 2011.
- [6] Norman E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall, New Jersey, 1999.
- [7] Dassault System, SIMULIA FeSafe User's Manual, 2014.

저 자 소 개



김 철 수(Chul-Su Kim)

1996년 한양대 기계공학부 졸업, 2002년 8월 동 대학원 졸업(공학). 2008년~현재 국토교통부 철도기술 심의위원, 2013년 8월~현재 ISO/TC269 기술위원, 2003년 3월~현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 겸 교통전문대학원 교수



김 재 문(Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년 ~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통시스템공학과 겸 철도전기전자공학과 부교수

E-mail : goldmoon@ut.ac.kr