

## 운행특성을 고려한 철도차량 감속기의 피로해석

김철수<sup>1\*</sup>, 강길현<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국철도대학 철도차량기계과, <sup>2</sup>(주) 현대로템

### Fatigue Analysis of Reduction Gears Unit in Rolling Stock Considering Operating Characteristics

Chul-Su Kim<sup>1\*</sup> and GilHyun Kang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Rolling Stock Mechanical Engineering, KNRCU

<sup>2</sup>Hyundai Rotem Co.

**요약** 철도차량의 안전성을 확보하기 위해서는 견인성능 및 속도의 변동성을 고려하여 감속기의 피로해석에 관한 연구를 수행하는 것이 중요하다. 본 논문은 고속철도차량 감속기 기어의 변동하중하에서 피로파괴에 대하여 준정적 유한요소해석과 선형 Miner's Rule에 의한 내구성해석을 수행하였다. 해석을 위한 변동하중이력은 열차견인성능곡선과 상업운전조건에서 운전선도를 기초로 MSC.ADAMS의 동역학 해석에 의하여 구축하였다. 또한 감속기 피로수명은 기어표면의 침탄부 효과를 고려한 유한요소모형을 사용하여 변형률-수명접근법에 의하여 예측하였다. 해석결과로부터 급출발에 의한 빈번한 높은 기동토크와 정차역수의 증가는 철도차량 감속기 기어수명을 감소시킬 수 있었다.

**Abstract** To assure the safety of rolling stock, it is important to perform the fatigue analysis of reduction gear unit in rolling stock considering a variation of velocity and traction motor capability. This paper presents fatigue analysis of the damage of reduction gear unit of railway vehicle under variable amplitude loading (VAL) based on quasi-static fatigue analysis using finite element model and linear Miner's rule. The VAL for the simulation was constructed from the tractive effort curve and train run curves of railway vehicle under commercial operation condition using MSC.ADAMS dynamic analysis. The finite element model for evaluating the carburizing effect on the gear surface was used for predicting the fatigue life of the middle gear based on strain-life based approach. The results showed that the frequent high starting torque due to a quick start as well as increasing numbers of stops at station would decrease the fatigue life of reduction gear unit.

**Key Words** : Fatigue Analysis, Reduction Gears, Rolling Stock, Operating Characteristics

### 1. 서론

철도차량의 부품들은 주행중 반복하중을 자주 받게 되며, 이는 부재에 아주 미세한 물리적 손상을 유발 시킨다. 어떤 부재가 반복하중을 받게 되면 항복강도 이하의 응력상태에서도 부품은 미소한 균열이나 누적손상이 발생하게 피로파손이 발생한다. 따라서 다양한 주행조건하에 반복하중을 받고 있는 철도차량부품의 교체시기를 예측하기 위해서는 부품의 피로해석이 매우 중요하다.

철도차량의 동력전달 장치 핵심부품 중의 하나인 감속기 기어는 차량의 견인전동기에 의한 토크(torque)를 차축에 연속적으로 전달하는 요소로, 이의 고장은 차량운행 정지나 열차지연을 야기한다[1]. 감속기 기어의 고장은 단순한 제조공정상의 재질결함이나 응력, 재질, 환경 등의 복합된 원인으로 발생한다[2,3,4].

철도차량의 감속기 및 기어에 관한 기존 연구[1,5,6]를 살펴보면, 정도원 등[1]은 KTX 감속기의 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability and Safety)분석을 통한

본 논문은 분산형 고속철도 시스템엔지니어링 기술개발의 일환으로 국토해양부의 연구지원에 의해 수행되었음.

\*교신저자 : 김철수(chalskim@paran.com)

접수일 11년 01월 27일

수정일 11년 03월 07일

게재확정일 11년 03월 10일

TBO(Time Between Overhaul) 주기 및 예방정비 업무를 검토하였다. 김연수 등[5]은 무부하상태하에 감속기의 윤활유의 누유여부, 온도, 진동 및 소음 등을 평가하였다. 그리고 이동형 등[6]은 고속전철용 기어의 피로 강도를 평가하였다. 그러나 이들 연구에서 실제 열차 운행이력에 따른 감속기의 피로수명 평가는 미비한 실정이다. 따라서 철도차량의 주행안전성을 확보하기 위해서는 차량 운전 특성을 고려한 견인전동기부 감속기 기어에 대한 피로수명 평가가 필요하다.

일반적으로 고속철도차량 감속기 기어에 작용력은 견인모터의 토크 및 선로에서 전달되는 충격하중 등이 포함되어 동력학적으로 매우 복잡하다. 본 연구에서는 철도차량 감속기 구동기어에 전달되는 운전특성을 반영한 반력을 하중이력(loading histories)으로 구축하여 기어의 치면에 반복하중하에서 준정적피로해석(quasi-static fatigue analysis)을 수행하고자 한다. 그리고 고속철도차량 감속기부 기어표면의 주요 열처리인 침탄효과(caburizing effect)를 피로해석결과로부터 검토하고자 한다. 또한 차량의 출발시 최대견인력의 제한 필요성과 정차회수의 최소화하는 운행방안을 검토하여 이로부터 감속기 기어 수명과의 상관성을 규명하고자 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 내구성해석 알고리즘

차량부품의 피로수명 평가에 있어서 가장 먼저 고려해야 될 항목은 하중이력과 재료 피로특성이다. 여기서 하중이력은 해석하고자 하는 구조물이 시간영역(time domain) 혹은 주파수 영역(frequency domain)에서 반복 혹은 변동되는 일련의 하중데이터를 의미하며, 하중은 힘, 온도, 압력 및 속도 등과 같은 물리량이다. 또한 재료 특성은 기계 구조물에 적용된 재료의 기계적 특성을 의미하며, 이는 내구성 해석의 기법에 따라 상이하다.

기계구조물에 조합하중이 작용할 경우 기계부품의 내구성 해석과정은 다음과 같다[7]. 먼저 각 요소 및 절점에 작용하는 시간에 따른 작용 응력 이력 텐서(applied stress history tensor)는 정적해석의 응력텐서값과 하중계수에 의하여 무차원화된 각각의 하중이력들을 곱하여 얻어진다. 이로부터 산출된 텐서량은 중첩법(superposition method)에 의하여 응력 이력 텐서량으로 표현되고, 이 텐서량은 파손이론의 주응력값에 의하여 스칼라(scalar)성분의 등가응력이력텐서(equivalent stress history tensor)로 전환된다. 이는 실질적인 손상을 주는 응력이력 값만을

얻기 위하여 사이클 카운팅기법(cycle counting method)에 의하여 필터링(filtering)된다. 이후 과정을 살펴보면, 기계부품의 피로수명은 등가응력이력텐서의 횡수와 각각의 재료에 따른 피로특성곡선으로부터 마이너 손상법칙(Miner's damage rule)[8]에 의한 누적 피로손상량(cumulative fatigue damage)을 산출하여 평가한다.

## 3. 해석결과

### 3.1 차량 및 감속기 시스템 제원

본 연구의 철도차량 감속기는 KTX감속기 시스템으로서, 견인전동기에 연결된 1차 감속기와 윤축에 조립된 2차 감속기로 구성한다. 이의 설계제원은 기존 기술이전자료[9]에서 제시된 값을 사용하였으며, 1차감속기류는 헬리컬기어이고, 2차감속기는 평기어이며, 총 감속비는 2.19이다.

### 3.2 감속기 동력학해석

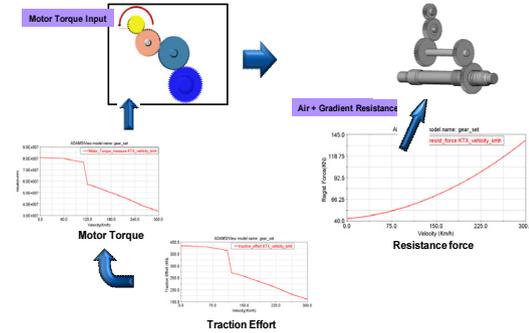
#### 3.2.1 1차 감속기의 작용이력 분석

그림 1은 차량 출발시 동역학 해석과정을 간략하게 나타낸 것이다. 그림에서 하단의 선도들은 각각 차량 출발시 견인력 선도와 주행저항 선도이다. 그림 2는 차량의 출발에서 모터의 최고 총출력(full power)까지 구동할 때 1차 감속기부 구동(Gear\_1)-중간(Gear\_2)-종동(Gear\_3) 헬리컬기어 표면의 작용력을 나타낸 것이다. 동역학 해석 프로그램은 MSC.ADAMS 2006[10]이며, 해석시 입력 토크는 구동 기어축에 부여하였다. 중간기어(Gear\_2) 표면의 스러스트 하중(thrust load)은 그림 2에서와 같이 10kN 이내로서 구동기어(Gear\_1) 및 감속기어(Gear\_3)의 225kN보다 상대적으로 작다. 이는 구동 및 감속기어의 스러스트 하중이 상호작용하여 상쇄되었기 때문이다. 그러나 중간기어부 저널에 작용하는 xy평면의 최대 모멘트 및 스러스트하중은 그림 3에서 보는 바와 같이 각각  $6.4 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ 이며,  $1.35 \times 10^3 \text{ kN}$ 으로서 기어 표면의 스러스트하중 보다 매우 큰 값이다. 즉, 중간기어의 주된 하중은 헬리컬 각도에 따른 치면의 스러스트하중보다 저널에 작용하는 모멘트와 스러스트하중이다.

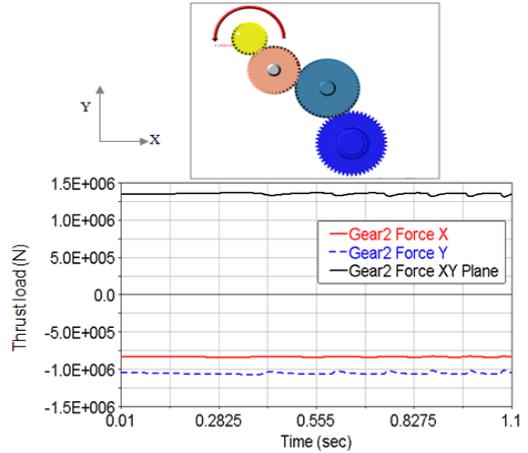
#### 3.2.2 중간기어 저널의 작용력

그림 4은 속도별 작용이력의 RMS(root mean square) 값을 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 총 출력조건(100%)하의 가속구간에서 중간기어 저널의 작용력은 방향에 상관없이 고속영역(120km/h이상)보다 저속영역에

서 크며, 특히 60km/h 속도까지 중간기어 저널의 작용력이 그 이상의 속도보다 크다.

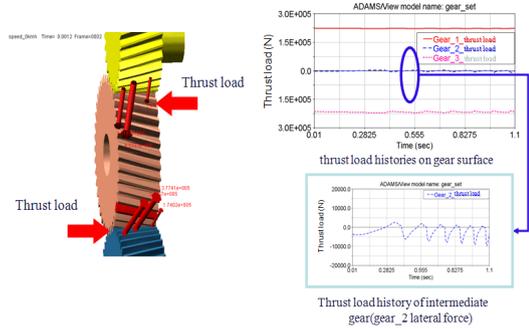


[그림 1] 고속철도차량 주행시 감속기시스템의 동역학 해석과정

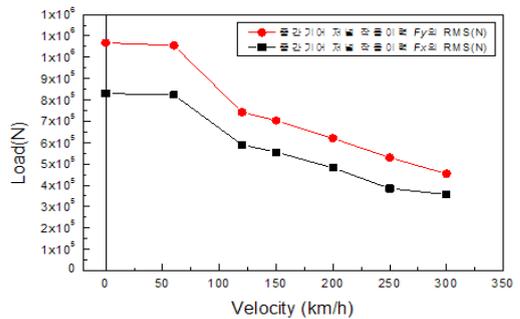


(b) 작용하중 이력

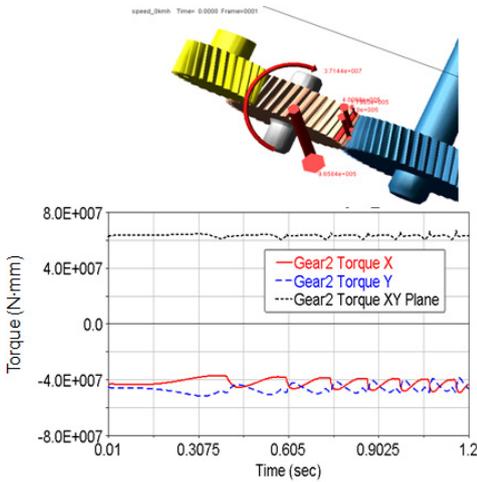
[그림 3] 1차 감속기부 중간기어(Gear\_2) 저널의 작용하중 및 모멘트 이력



[그림 2] 1차 감속기부 기어들의 스러스트 하중이력



[그림 4] 속도별 중간기어(Gear\_2) 저널의 작용하중 이력에 대한 RMS(root mean square)



(a) 모멘트 이력

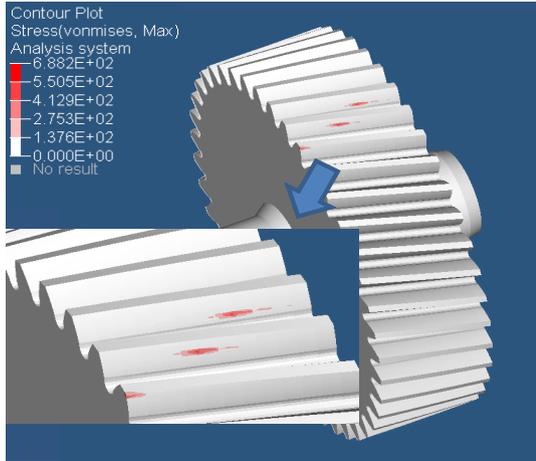
### 3.3 주행 구간에 따른 내구성 평가

#### 3.3.1 응력해석

1차 감속기의 내구성 해석을 수행하기 위해서는 3.2절의 작용력 이력과 함께 응력해석결과가 필요하다. 그림 5는 그림 2의 조건하에 감속기부 구동기어와 감속기어의 접촉에 따른 1차 감속기부 중간기어 치면에 발생한 응력 해석 분포를 나타낸 것이다.

유한요소망 구축 및 응력해석은 범용소프트웨어인 각각 MSC. PATRAN[8]과 MSC.NASTRAN[9]에 의하여 수행되었다. 요소 형태는 3차원해석을 위한 8절점 직육면체요소와 6절점 wedge요소이며, 총 요소수는 103,660개이며, 총 노드수는 120,565개이다. 입력자료로서 탄성계수(elastic modulus)는 207GPa이고, 프아송비(poisson's ratio)는 0.29이다. 구속조건은 좌우 중간기어 축에 병진 운동을 구속하였다. 주행 회전시 기어는 2~3개의 이가 동시에 맞물려 돌아가며, 이로부터 치면에 발생하는 최대

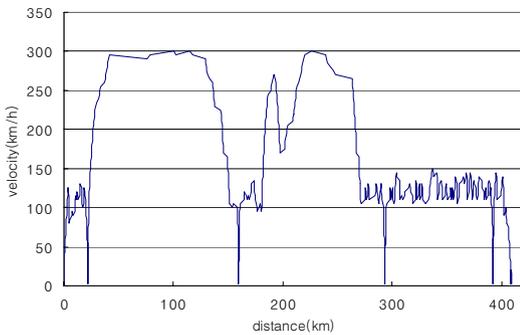
von-Mises응력(maximum von-Mises stress)은 그림 5에서 보는 바와 같이 688MPa이다.



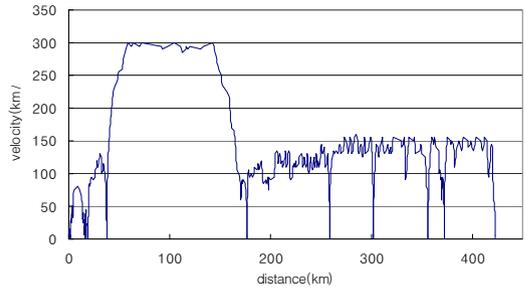
[그림 5] 1차 감속기부 중간기어의 응력해석 결과

### 3.3.2 운행이력에 따른 작용하중 분석

그림 6은 주행거리에 따른 가상의 운전속도이력으로서 (A)노선은 총 주행거리 420km 정차역은 6개소이며, 최고 속도운행횟수가 2회이다. (B)노선은 총 주행거리는 (A)노선과 유사하지만 정차역은 9개소이며, 최고속도 운행횟수가 1회이다. 이로부터 동역학해석을 수행하여 중간기어에서 하중이력을 얻었으며, 그림 7은 그림 6의 속도이력에 따른 하중진폭 및 평균하중에 대한 빈도수를 각각 정리한 것이다. 여기서 사용된 기법은 레인플로우 사이클 기법(rainflow cycle counting method)이다. 최대 하중진폭은 두 노선에서 서로 유사한 값을 갖지만, 정차빈도가 높은 (B)노선에서 최대 하중진폭의 발생횟수가 (A)노선보다 2배 정도가 많다.

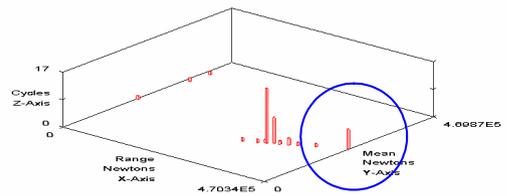


(a) A-track

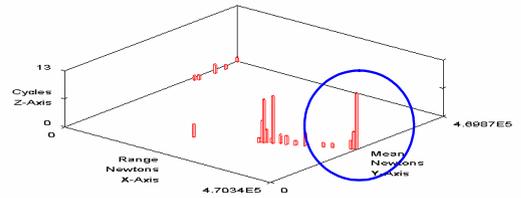


(b) B-track

[그림 6] 주행거리에 따른 가상의 철도차량 속도이력



(a) A-track



(b) B-track

[그림 7] 중간기어의 작용이력에 대한 사이클카운팅집계 결과

### 3.3.3 주행이력에 따른 내구성 해석

본 연구에 사용된 기어의 재료는 NF규격으로 16NCD13이며, 이의 피로특성은 식 (1)과 같다.

$$\Delta \varepsilon / 2 = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

여기서 재료상수값은 각각  $\sigma'_f = 1477$ ,  $b = -0.09$ ,  $\varepsilon'_f = 0.82$ ,  $c = -0.68$ 이다.

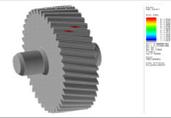
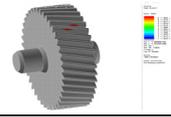
기어 표면부의 침탄처리 효과를 검토하기 위하여 치면의 유한요소망에 피로특성을 표면으로 부터 0.8mm까지 각각 부여하여 모델링하였다.

그리고 내구성해석은 상용소프트웨어인 MSC. FATIGUE 2005[10]으로 수행했다. 기어표면의 침탄유무와 각 노선

별 피로수명 평가 결과를 정리하면 Table 1과 같으며, 침탄효과를 반영한 경우는 미반영한 경우보다 매우 긴 수명을 가짐을 알 수 있다.

한편, A 및 B노선의 피로수명 평가를 비교하면, A노선의 반복 주행시 얻어진 중간기어의 피로수명은 B노선의 경우보다 길다. B노선의 경우 120km/h이하의 저속 주행을 하게 되므로 감속기가 받는 평균하중은 A노선주행보다 상대적으로 크다. 또한, B노선 주행은 A노선 주행인 경우보다 잦은 정차 후 출발로 인하여 보다 빈번한 하중진폭 횡수를 일으키게 되므로, 보다 빨리 수명저하를 초래하게 된다. 따라서 B-노선과 같은 저속으로 차량운행이 오래 지속되면, 동일 주행거리조건하에 철도차량 감속기 교체주기가 빨라진다.

**[표 1]** 각 노선 및 침탄효과에 따른 중간기어의 피로해석 결과

	표면처리 효과 미반영	표면처리 효과 반영
A-track		
Fatigue life	Damage = $9.5509 \times 10^{-4}$ 예측피로수명 = $4.282 \times 10^5$ km	Damage = $2.8181 \times 10^{-5}$ 예측피로수명 = $1.451 \times 10^7$ km
B-track		
Fatigue life	Damage = $2.0396 \times 10^{-3}$ 예측피로수명 = $1.716 \times 10^5$ km	Damage = $8.1843 \times 10^{-5}$ 예측피로수명 = $4.276 \times 10^6$ km

#### 4. 결론

본 연구는 고속철도차량 1차감속기 중간기어의 피로 해석을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 1차 감속기부의 작용이력을 동역학 해석으로부터 분석한 결과, 중간기어부 저널에 작용하는 최대 모멘트 및 스리스트하중은 각각  $6.4 \times 10^4$  kN·mm이며,  $1.35 \times 10^3$  kN으로서 기어 표면의 스리스트하중 보다 매우 큰 값이다.
- 2) 가속구간에서 축의 작용력은 방향에 상관없이 저속 영역(120km/h이하)에서 크며, 차량의 출발시 기동 토크에 의한 큰 작용력이 발생하므로 저속영역에서 반복적으로 정차 출발 운전시 큰 손상이 발생할 수 있다.
- 3) 기어 표면침탄효과에의 여부에 따라 피로수명을 비교

하면, 침탄효과를 반영한 경우는 미반영한 경우보다 매우 긴 수명을 가진다.

- 4) 저속운동 및 정차역수가 빈번하게 철도차량을 운행하면 감속기에 높은 평균하중과 빈번한 하중진폭 횡수를 일으키게 되므로, 보증수명보다 빨리 수명저하를 초래하게 된다.

#### 5. 고찰

- 1) 중간기어 저널에 스리스트하중이 크게 작용하므로 저널의 마모 및 변형이 발생할 수 있다. 또한 차량 주행시 감속기에 전달되는 진동 및 충격은 저널과 기어박스사이의 체결나사 및 중간기어의 표면까지도 악영향을 미칠 수 있으므로 감속기 설계시 각별한 주의가 요구된다.
- 2) 출발 후 저속영역(120km/h이하)에서 저널은 고속영역보다 큰 손상을 가질 수 있으므로 기관사가 정차 후 차량 출발시 급가속이 되지 않도록 운전해야함을 시사한다.
- 3) 향후 철도차량 감속기의 안전성을 확보하기 위해서는 안전 감속기 기어류의 제조공정상에 경화 깊이와 같이 기어표면 침탄처리를 특별관리가 필요하다.
- 4) 철도차량이 저속운동 및 정차역수가 빈번하게 장기간 운동을 지속하면, 동일 주행거리에서 감속기의 교체주기가 빨라지므로 유지/보수 측면에서 이를 반영할 필요가 있다.

#### 참고문헌

- [1] D. W. Jung, Y. Y. Lee and E. S. Kim, "A Study of Maintenance Measures of the KTX Decelerator", 2008 Spring Conference of Korean Society for Railway, pp.1191-1197, 2008.
- [2] S. N. Nishida, "Failure Analysis in Engineering Applications", Butterworth-Heinemann LTD, pp.4-12, 1992.
- [3] Darle W. Dudley, Townsend, Dennis P., "DUDLEY'S GEAR HANDBOOK", McGraw-Hill, New York, pp.1.1~19.21, 1991.
- [4] ANSI/AGMA 2101-C95, "Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Spur and Helical Gear teeth", Metric edition of ANSI/AGMA 2001-C95,

1995.

- [5] Kim, Y.S. Mok, J.K. Chang, S.K. and Hong, Y.K Kim et al, "Idling Performances of Reduction Gear Unit for Bimodal Tram", 2008 Autumn Conference of Korean Society for Railway, pp.584-589, 2008.
- [6] D. H. Lee, J. W. Seo, K. H. Moon and K. J. Choi, "Bending fatigue strength comparison of specimen and actual gear for Korea High-Speed Train", 2002 Spring Conference of Korean Society for Railway, pp.399-403, 2002..
- [7] MSC. SOFTWARE, MSC.FATIGUE User's Guide, 2005
- [8] Norman E. Dowling, "MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS", Prentice-Hall, New Jersey, 1999.
- [9] Korea High Speed Rail, "Rolling Stock System", 1996, Engineering Vol.1.
- [10] MSC. SOFTWARE, MSC.ADAMS User's Guide, 2005

---

**강 길 현(Gil-Hyun Kang)**

[정회원]



- 2001년 12월 : 영국 The University of Birmingham 기계공학과 졸업(Ph D)
- 1981년 ~ 2007년 : 기술고등고시 16회 철도청, 철도공사 근무, 현재 국토해양부 고속철도 운영위원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국철도대학 철도차량기계과 겸임강사
- 2010년 7월 ~ 현재 : 현대로템(주) R&D Center 근무

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량진동소음

---

**김 철 수(Chul-Su Kim)**

[정회원]



- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학박사)
- 2008년 ~ 현재 : 국토해양부 철도기술 심의위원
- (사) 한국도시철도협회 학술이사
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국철도대학 철도차량기계과 부교수

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS