

철도차량 차체용 더블 스킨 알루미늄 압출 패널의 감쇠특성

강길현¹, 김철수^{2*}

¹(주) 현대로템, ²한국교통대학교 철도차량시스템공학과

Damping Characterization of the Double-skin Aluminum Extruded Panels for Rolling Stock Carbody

Gil-Hyun Kang¹ and Chul-Su Kim^{2*}

¹Hyundai Rotem Co.

²Dept. of Railway Vehicle System Engineering, KNUT

요 약 철도차량 차체 설계시 음압레벨에 따른 소음해석을 통한 차체 패널의 감쇠특성을 최적화하는 것이 필요하다. 본 논문은 철도차량 차체용 알루미늄 더블스킨 압출패널의 진동감쇠특성 해석을 통한 철도차량 차체의 구조소음 해석에 관한 연구이다. 주파수응답 가진시험을 통하여 측정된 기계적 모빌리티 값인 포인트 모빌리티, 트랜스퍼 모빌리티, 모달 모빌리티와 단순음원이론을 사용하여 정규화된 음압을 계산하였다. 도포용 감쇠재의 감쇠값을 라미네이티드 셸 요소에 사용하여 유한요소해석을 수행함으로써, 감쇠처리에 의한 소음감소수준 예측을 하였다. 또한 실제 차량 구조와 유사한 고정경계조건의 감쇠특성해석을 통하여 열차주행시 발생하는 진동의 영향을 크게 받는 언더프레임과 같은 부위에 일정 두께의 감쇠재 코팅이 진동 및 소음억제에 큰 효과가 있을 것으로 사료된다.

Abstract When car builder designs the large carbody structure of railway vehicles, it is necessary to optimize the damping characteristics through the analysis of structure borne noise such as sound pressure level(SPL). This paper is a study on the structure borne noise analysis by characterizing the damping of double skin aluminum extruded panels for rolling stock carbody. The normalized SPL was calculated based on the simple source theory using measured mechanical mobility parameters from vibration tests(i.e. point, transfer and modal mobility). The reduced SPL was predicted by using finite element method by applying loss factor of damping material into laminated shell elements. It was found out that the damping material coated on the panels like underframe, which part is seriously affected by vibration during train run, took effect to reduce noise level.

Key Words : Double Skin Aluminum Extruded Panels, Modal Mobility, Normalized Sound Pressure Level, Rolling Stock Carbody

1. 서론

최근 철도차량 차체로서 알루미늄합금 더블스킨패널(double skin panel)은 용접작업의 개선을 통한 제작/보수 비용의 절감과 친환경 재생 가능하기 때문에 이의 사용이 급증하고 있다. 그러나 이 패널은 공명통과 같은 구조로 인하여 주행중에 발생하는 진동 및 소음 감소를 요구한다. 특히 주행동안 차체의 저주파수대역 음압은 선로에서 전달된 진동으로 인하여 승객에게 전달된다. 따라서

이를 억제하기 위한 방안으로서, 판재사이의 공간에 흡음재를 충전하거나 하부에 도포용 감쇠재(이하 도포재)를 부착하여 소음을 억제한다.

국내에서는 알루미늄 차체에 대한 소음 억제 방안으로서, 충전재에 따른 투과손실(transmission loss)에 대한 연구가 주로 수행되었다[1,2]. 그러나 열차주행시 구동용 감속기[3]나 대차로부터 전달되는 차체 진동에 따른 차체 패널의 도포재 효과에 대한 체계적인 연구는 아직 미흡한 실정이다. 이의 원인은 철도차량[4,5]의 차체구조가 대

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

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

Received June 7, 2013

Revised July 1, 2013

Accepted July 11, 2013

형 구조물인 관계로 대형 가진 설비가 필요하며, 시험용 바닥 면적이 넓어 감쇠처리(damping treatment)가 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 철도차량 차체 언더프레임의 더블 스킨 알루미늄패널을 대상으로 가진시험 및 모달 해석을 수행하고, 이로부터 주행동안 진동에 의해 발생하는 음압 레벨평가에 유용한 기법을 제시하고자 한다. 또한 차체의 구속조건을 고려한 고정 경계조건하에서 본 패널의 음압 레벨로부터 도포재 효과를 검토하고자 한다.

2. 본론

2.1 차체용 알루미늄 패널 진동시험

본 연구의 철도차량 바닥용 알루미늄판재는 이중판 구조용 압출재로 양면 판과 이를 지지하는 지지판들로 구성되며, Fig. 1과 같이 차체 길이방향으로 용접하여 제작된다.

본 연구의 차체용 패널의 진동 시험평가방법은 영국의 버밍엄 대학 자동차 그룹(the University of Birmingham Automotive Group)에서 1970대부터 사용하여 많은 구조물 및 자동차용 차체, 창유리 및 타이어 등 구조물 진동 실험을 기초로 발전 시켜온 기계적 모빌리티 측정방법이다[6,7].



[Fig. 1] Double skin Al panels for rolling stock carbody structure



[Fig. 2] Test setup for mechanical mobility measurement of the double skin Al panel

Fig.2는 본 연구의 알루미늄판재 단면에 설치된 가속도계 및 진동시험 장치를 나타낸 사진이다. 진동응답시험은 전동차용으로 사용되는 0.5m×2m(폭×길이)의 더블스킨 패널을 A형 철재 프레임에 장착한 후에 자유경계조건 (free boundary condition)을 구현하도록 수행하였다. 또한 주파수 응답특성 평가를 위한 가진력은 판재하부 중앙부에 설치된 가진기를 통하여 조화함수형태로 부여하였다. 본 시험에서는 가진시험은 1N의 정현파 조화력 (sinusoidal waveform force)을 1Hz에서부터 500Hz까지 연속으로 가진하며, 45개 채널의 가속도계를 통하여 진동응답특성을 측정[8]하였다.

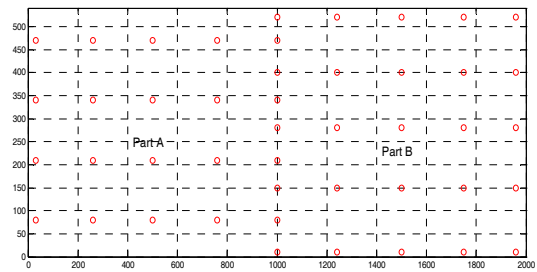
2.2 기계적 모빌리티 특성 시험 및 평가

기계적 모빌리티(mechanical mobility measurement)는 가진 시 가속도로 표현되는 주파수 응답값과 유사하게 힘에 대한 속도형태로 진동시스템의 동적특성을 표현하는 진동 특성값이다. 일반적으로 표현되는 모빌리티함수는 주파수응답함수의 형식으로 식 (1)과 같다[9].

$$M_{jk}(\omega) = \frac{V_j}{F_k} = i\omega \sum_{r=1}^n \frac{(\mathbf{r}\Phi_j)(\mathbf{r}\Phi_k)}{\lambda_r^2 - \omega^2} \quad (1)$$

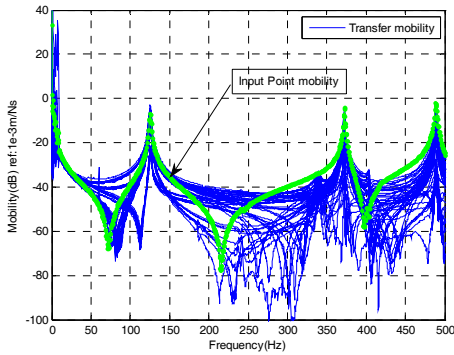
여기서 M_{jk} : 점 j 와 k 간의 모빌리티 함수, V_j : 점 j 에서의 속도, F_k : 점 k 에서의 가진력(input excitation force), λ_r^2 : r^{th} 모드의 고유치, $\mathbf{r}\Phi_j$: r^{th} 고유치의 j^{th} 요소, n : 자유도나 모드수이다.

한편, 자동차나 철도차량 등의 구조적 동적시험 (structural dynamic tests)에 사용되는 주요 모빌리티는 포인트 모빌리티(point mobility), 전달모빌리티(transfer mobility)와 모달 모빌리티(modal mobility)가 있다. 입력 포인트 모빌리티는 가진점에서 측정된 모빌리티이며, 전달 모빌리티는 각 측정점에서 얻어지는 모빌리티 값으로 진동 입력점에서 구조물의 다른 점으로의 진동에너지 전달거동을 표현한다.



[Fig. 3] Positions of the measurement for modal mobility test

Fig. 3은 알루미늄판재의 45개 가속도계를 설치한 측정점과 유한요소 모델의 좌표점을 함께 나타낸 것이다. 패널 중앙부기준 좌측으로 파트A는 상부판재와 접합부(Fig. 2의 삼각형 꼭지점)에 4줄로 5개씩 종방향으로 가속도계를 20개(4×5: 12개 면적요소)설치한 부분이다. 또한 우측의 파트 B는 지지점과 판재부 사이 중앙점에 3줄과 길이방향 모서리부 2줄을 합하여 총 5줄에 5개씩 25개(5×5: 16개 면적요소)를 설치한 부분이다.



[Fig. 4] Measured point and transfer mobility of the double-skin Al panel

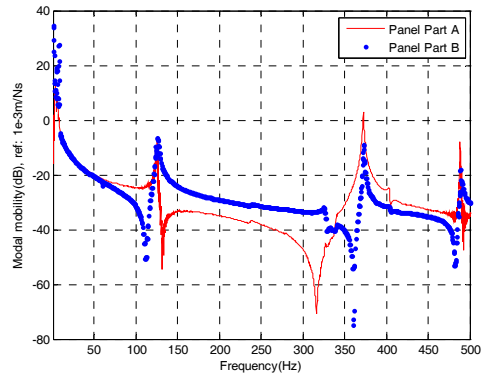
Fig. 4는 알루미늄판재의 가진점 포인트 모빌리티를 포함한 45개 측정점에서 수집한 전달모빌리티 곡선들을 보여주는 그림이다. 자유경계조건의 경우 공진주파수 129Hz, 345Hz 대역에서 모빌리티 값들이 국부적인 최대(local peak)값을 보여 주고 있다.

모달 모빌리티는 구조물의 각 요소 꼭지점들에서 개별 전달모빌리티의 한정된 면적에 대한 평균치를 나타내는 매개변수이다. 수학적으로 모달 모빌리티 벡터(modal mobility vector)는 식 (2)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\bar{\eta}(\omega) = \sum_{i=m}^n [R(\omega)_i A_i + jI(\omega)_i A_i] / \sum_{i=m}^n A_i \quad (2)$$

여기서 $R(\omega)_i$ 는 i_{th} 요소의 실수부 모빌리티, $I(\omega)_i$ 는 i_{th} 요소의 허수부 모빌리티, A_i 는 면적, ω 는 주파수, m 은 구조물의 첫 번째 요소이며, n 은 구조물의 마지막 요소 번호이다.

Fig. 5는 Fig. 4의 총 45개의 전달 모빌리티로부터 식 (2)를 이용하여 얻어진 모달 모빌리티 일례를 나타낸 것이다. 여기서 파트 A와 B는 Fig. 3에서 제시한 것이며, 이의 계산은 MATLAB을 이용하여 구하였다. 파트 A와 파트B의 최대 모달 모빌리티는 약간 상이하지만, 공진주파수 129Hz부근과 345Hz 대역에서 발생하였다.

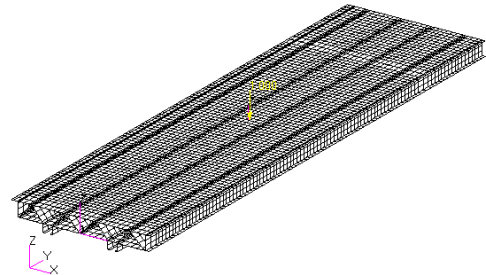


[Fig. 5] Measured modal mobility of the panel

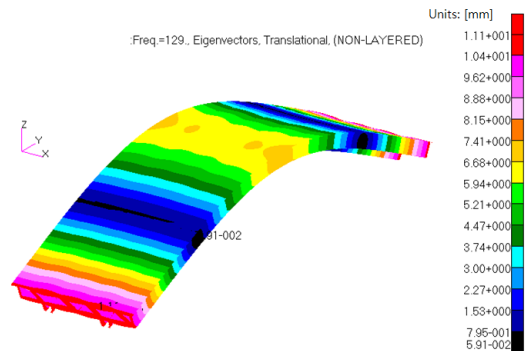
2.3 모달 모빌리티 해석 결과

2.3.1 유한요소모델링

본 연구의 모달해석은 상용프로그램 MSC.NASTRAN의 2차원 쉘요소 CQUAD4로 요소망을 생성하여 수행되었다. 대형 철도차량 차체의 소음해석시 효율적인 주파수 응답 해석을 고려하여 요소를 분할하고, 해석모델의 총 요소수와 노드수는 각각 4,012개 및 4,489개이다.



[Fig. 6] Finite element model of the double skin panel

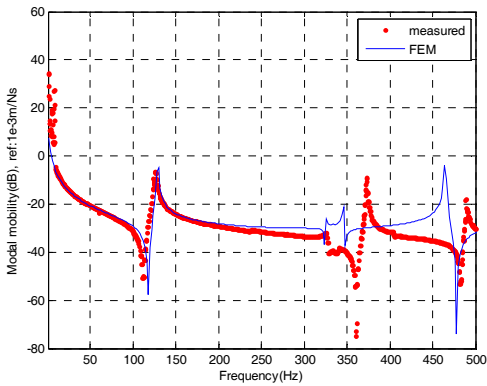


[Fig. 7] Results of normal mode analysis for the panel at 129Hz

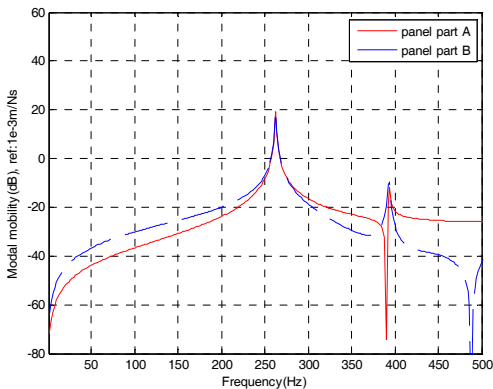
Fig. 6은 본 구조물의 진동특성 평가를 위한 유한요소 모델이다. Fig. 7은 Fig. 6으로부터 얻어진 모달 해석결과 의 일례이다. 가진력은 자유경계조건하에 Fig. 2의 시험 조건과 같이 1N의 조화 가진력을 패널 중앙부에 부여하였다. 해석 프로그램은 MSC.NASTRAN이며, 공진주파수는 시험결과와 유사하게 129Hz부근의 종방향 굽힘모드에서 확인되므로 본 모델의 유효성을 확인하였다.

2.3.2 자유 및 고정 경계조건하에 모달 해석

Fig. 8은 자유 경계조건하의 패널 Part B부에서 모달 모빌리티 시험값과 해석결과를 비교하여 보여준 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 330Hz이상의 주파수 대역은 유한요소해석 결과값이 다소 높은 경향을 보인다. 따라서 본 모델은 330Hz 대역이하에서 더블스킨형 철도차량 차체의 감쇠특성 평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.



[Fig. 8] Comparison of modal mobility of part B between measured data and FEA results under free boundary conditions



[Fig. 9] Modal mobility of the panel under fixed boundary conditions

한편, 본 패널은 인접 판재와 용접으로 접합하거나 변위 제한을 받으므로 양면 판재 모서리 경계부위를 강제 구속한 고정 경계조건(fixed boundary condition)하에 본 패널의 모달 모빌리티 평가가 요구된다. Fig. 9는 고정 경계조건하에 본 패널의 모달 모빌리티 해석 결과를 나타낸 것이다. 자유 경계조건하에 첫 번째 공진주파수는 Fig. 8과 같이 129Hz에서 발생하지만, 고정 경계조건하에 공진주파수 260Hz대역에서 최대값이 파트에 상관없이 유사하게 나타났다. 이는 330Hz이하대역에서 고정경계조건하에 본 모델의 모달 모빌리티는 패널 단면에 의존적이지 않음을 시사한다.

2.4 도포 패널의 감쇠 특성

2.4.1 모달 모빌리티를 이용한 감쇠특성

모달 모빌리티는 단순 소음원이론(simple-source theory of sound)에 의해 음압(sound pressure level)으로 변환 가능하다. 만약 단일 방사원(single radiating source)으로 방사하는 체적속도(volume velocity)가 구조물 모달 모빌리티와 같다면 음압은 식(3)과 같다[10].

$$P = \frac{\rho c \kappa F S}{2\pi R} M_m \quad (3)$$

여기서 P 는 발생된 음압, ρ 는 공기밀도, κ 는 음향파의 수(acoustic wave number), c 는 공기중 음속, R 은 측정점에서 평균거리, F 는 입력 가진력(input excitation force), M_m 는 모달 모빌리티, S 는 전체 구조물 면적이다. 이로부터 단위 가진력하에 정규 음압레벨(Normalized Sound Pressure Level, SPL)은 식(4)와 같다[11].

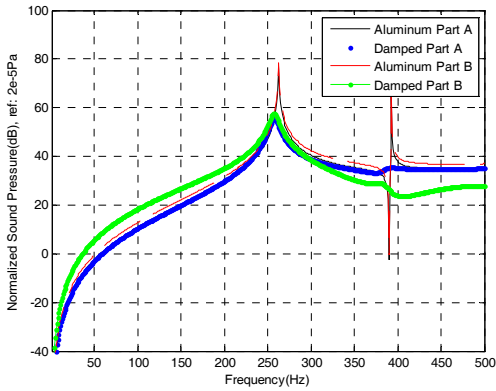
$$p = \frac{P}{F} = \frac{\rho c \kappa S}{2\pi R} M_m \quad (4)$$

이 식은 단일 탄성재료뿐만 아니라 이중 점탄성물질을 적용한 도포재의 감쇠특성 평가에 활용할 수 있다. 즉, 본 연구에서는 실험적으로 입증된 도포재를 더블스킨 패널에 적용시킨 후에 식 (4)의 정규 음압레벨을 평가하고, 이의 소음 저감 효과를 검토하고자 한다.

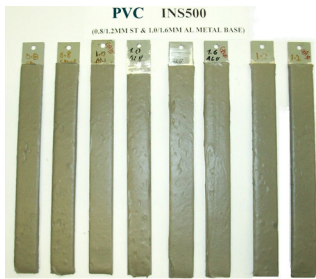
2.4.2 고정경계조건하에 도포패널의 감쇠특성

Fig.10은 고정 경계 조건하에서 본 패널의 파트 A와 B 부에서 감쇠재를 도포 전후에 각각의 정규 음압레벨을 비교한 것이다. 여기서 도포재는 Fig. 11과 같이 높은 감쇠계수를 갖는 PVC INS 500 3mm이며, 이의 물성치는 Table 1과 같다[11]. 이는 ASTM E 756[12]에 준하여 오

버레스트 빔 시험(Oberst beam test)[13]을 통하여 얻어진 값이다.



[Fig. 10] Sound Pressure Level prediction of panel: Fixed boundary conditions, undamped and damped, Panel Part A & Part B

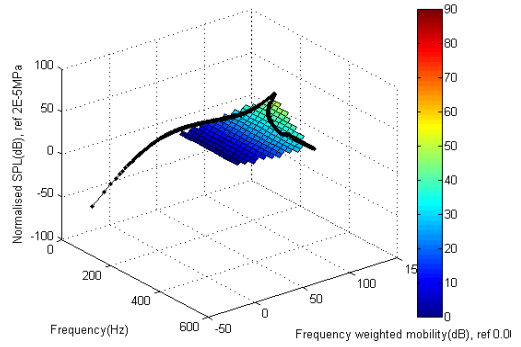


[Fig. 11] Damped beam Specimen for Oberst beam Test, PVC INS500

[Table 1] Material properties of PVC INS 500

Items	properties
measured loss factor	0.0768~0.2703
dynamic modulus range	567.2~1149.2
average dynamic range	803.63
loss factor range	0.3003~0.4859
average loss factor	0.3552

한편, Fig. 10으로부터 고정 경계조건하에 본 패널의 공진주파수대역인 260Hz대역에서 도포패널의 정규 SPL은 약 20dB정도 감소하였다. 이로부터 PVC INS 500 3mm 도포로 감쇠처리지 20dB정도의 음압 감쇠 효과를 시사한다. 참고로 Fig. 12는 고정경계조건하에서 소음저감효과를 나타낸 도포패널의 정규 음압레벨과 전달 모빌리티에대한 3차원 노모그래프(nomograph)이다.



[Fig. 12] SPL/Mobility 3D nomograph of panel under fixed boundary conditions

3. 결론

본 연구에서는 철도차량용 알루미늄 더블스킨 압출 패널을 대상으로 진동 모드 시험과 유한요소 해석을 통하여 모달 모빌리티를 구하고, 이로부터 정규 음압에 따른 도포재 효과를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자유경계조건하에 본 패널의 공진주파수는 진동 모드시험으로부터 구한 결과, 129Hz, 345Hz 부근이다. 이 결과는 2차원 쉘요소의 유한요소 모델에 따른 모달해석 결과와도 유사하였으며, 이로부터 본 모델의 유효성을 확인하였다.
- 2) 자유 경계조건하에 본 패널의 최대 모달 모빌리티는 공진주파수 129Hz부근이며, 이의 시험값은 유한요소해석 결과는 330Hz까지 유사하였다. 이에 반하여 실제 철도차량 차체의 구속조건인 고정 경계조건하에서 최대 모달 모빌리티는 공진 주파수 260Hz 부근에서 발생하였다.
- 3) 모달 모빌리티로부터 정규 음압레벨을 환산하여 패널의 도포효과를 검토하면, 구속경계조건하에서 PVC INS500을 3mm정도 코팅된 도포패널은 원소재 알루미늄 패널의 경우보다 20dB정도의 구조소음저감 효과를 얻었다. 이로부터 열차주행시 발생하는 진동의 영향을 크게 받는 언더프레임과 같은 부위에 일정 두께의 감쇠재 코팅은 진동 및 소음억제에 큰 효과가 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 철도차량제작자가 대형 구조물인 차체설계시 유한요소해석을 사용하여 구조소음감소 예측을 할 수 있게 함으로써 최적 감쇠설계에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

References

- [1] S. H. Kim, J. C. Park and J. N. Kim, "Sound Transmission Loss of Aluminum Extruded Panels for Railway Vehicles", *Trans. of the Society for Noise and Vibration Eng.*, Vol. 10, No. 10, pp.662~668, 2000.
- [2] K. J. Kim, J. H. Lee, D. Y. Kim and S. H. Kim, "A Method Of Analysis To Predict Sound Transmission Loss Of An Extruded Aluminum Panel For Used On Railways Vehicles", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 16, No. 1, pp.20~25, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.1.020>
- [3] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.3.1085>
- [4] S. H. Ahn, K. W. Chung, S. H. Jang and C. S. Kim, "Durability Evaluation of the Korean Gauge-Adjustable Wheelset System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 12, pp.5669~5675, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.12.5669>
- [5] M. H. Park and C. S. Kim, "Conceptual Design on Doorstep Equipments Used for Low and High Level Railway Platforms", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 9, pp.3882~3888, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.3882>
- [6] J. W. Dunn, O. A. Olatunbosun, and B. Mills, "Prediction Of Low Frequency Sound Pressure Distribution Inside A Vehicle Passenger Compartment From Its Structural Dynamic Response", *Journal of Society of Environment Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp.11~16, 1980.
- [7] O. A. Olatunbosun and K. W. Cheng, "Vibro-Acoustic Assessment of Vehicle Body Structures and Trim Materials", *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 16, Nos 4/5, pp.464~476, 1995.
- [8] K. Gatzwiller and H. Herlufsen, *How to Determine the Modal Parameters of Simple Structure*, pp.1-8, Application Note, Bruel & Kjaer., 2001
- [9] Ewins D. J., *Modal Testing; Theory and Practice*, pp.153-208, Research Studies Press LTD, 1984.
- [10] O. A. Olatunbosun, *Mechanical Mobility Approach to Assessing the Dynamic Performance of Vehicle Structures*, Ph.D. Thesis, The University of Birmingham, 1976.
- [11] Gil Hyun Kang, *The Characterization of the Damping properties of Beams and Panels for application to Vehicle Body Structure*, pp.131~132, Ph.D. Thesis, The University of Birmingham. 2001.
- [12] ASTM E 756: 2005, *Standard Method for Measuring Vibration -Damping Properties of Materials*, American Society for Testing and Materials, 2005.
- [13] Oberst H. unter Mitwirkung von Frankenfeld, K., *Über die Dämpfung der Bigeschwingungen Dünner Bleche durch Fest Haftende Beläge*, *Acustica*, Vol. 2, Akustische Beiheft 4, pp.AB181~AB194, 1952.

강 길 현(Gil-Hyun Kang)

[정회원]



- 2001년 12월 : 영국 The University of Birmingham 기계공학과 졸업 (Ph D)
- 1981년 5월 ~ 2007년 6월 : 기술고등고시 16회 철도청, 철도공사 근무, 현재 국토해양부 고속철도 운영위원
- 2010년 7월 ~ 현재 : (주) 현대로템 철도사업본부 근무

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량진동소음

김 철 수(Chul-Su Kim)

[정회원]



- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업 (공학박사)
- 2008년 10월 ~ 현재 : 국토해양부 철도기술 심의위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 부교수

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS