

논문 2017-54-6-14

수동형 패치를 이용한 전기차 소음 저감

(Noise Reduction of Electric Vehicle using Passive Damping Material)

김 현 수*, 김 병 일**, 한 완 옥***

(Hyunsu Kim, Byeongil Kim[©], and Won-ok Han)

요 약

전기자동차 파워트레인에서 발생하는 소음은 주로 모터의 전자기력 불균형에서 오는 소음과 기어 장치의 기계 시스템에서 발생하는 소음으로 구분될 수 있다. 이 소음들은 일반적 연소 엔진음 보다는 작지만, 조용한 배경 소음 때문에 더 거슬리는 소리가 될 수 있음에도 불구하고 그 소음의 특성이나 저감 방법을 널리 알려져 있지 않다. 본 논문에서는 전기차 개발단계 혹은 완성단계에서 적용할 수 있는 전달 경로에 감쇠 수동형 패치를 부착하여 소음을 저감하는 방법을 제시하고자 한다. 먼저, 모터 소음은 모터의 동적 특성에 따라 영향을 받으며 또한 모터 토크와 어떠한 상관성을 가지는 지를 보여준다. 또한, 모터 보다는 감속기의 표면이 더 소음에 취약한 부위라는 사실을 실험적으로 보여준다. 마지막으로, 주요 소음 전달경로인 드라이브 샤프트나 감속기 하우징 표면에 패치를 부착하여 실차 평가하였으며 실험 결과는 가속보다는 감속 조건에서 소음이 저감되는 영향이 크다는 것을 보여준다.

Abstract

Cabin noise due to the electric powertrain of electrical vehicle may consists of motor noise caused by electrical mismatch and gear noise coming from reduction gearbox. These sound may be considered rather small noise compared to those of internal combustion engine, but without masking effect, the noise can be more annoying for customer. Thus, this paper demonstrates the characteristics of electrical vehicle powertrain noise, and the effect of passive damping material for the noise reduction. The typical motor noise can be affected by the motor torque. Also, it is demonstrated that the reduction gearbox may be a weak point for the noise path compared to the motor housing. With vehicle test, it is shown that the damping patch is more effective for noise reduction with deceleration condition than with acceleration condition.

Keywords : Electric Vehicle (EV), Motor Noise, Gearbox Noise, Passive Damping Material

I. 서 론

전기자동차 일렉트릭 파워트레인에서 발생하는 소음은 주로 모터의 전자기력 불균형에서 오는 소음과 기어 장치(감속기)의 기계시스템에서 발생하는 기어 소음으로 구분 될 수 있다. 이러한 소음은 그 레벨 자체로는

일반적인 연소엔진 소음과 비교할 때 작은 편이나, 조용한 주변 소음으로 인해 오히려 더 거슬리는 소리가 될 수 있다. 이에 따라, 실제 전기차의 개발 단계에서 모터 소음과 기어 소음을 저감하기 위하여 여러 가지 노력을 기울여 왔으며 특히 모터소음을 저감하기 위해서는 모터 내부 형상의 변경을 통해 소음을 저감하는 방법이 널리 알려져 있다^[1~10]. 감속기의 기어 소음은 일반적으로 기어의 형상을 변경하여 전달오차 (Transmission Error)를 줄임으로서 소음을 저감하기도 한다. 하지만 이러한 접근들은 그 특성상 개발초기에 모터나 기어의 제원이 선정되며, 개발 중에는 그 제원을 변경하는 것이 쉽지 않기 때문에 비현실적이다.

* 정회원, 양상블자동차연구소

** 정회원, 영남대학교 기계공학부

(School of Mechanical Engineering, Yeungnam University)

*** 정회원, 여주대학교 자동차과

(Department of Automobile, Yeosu Institute of Technology)

© Corresponding Author (E-mail : bikim@yu.ac.kr)

Received ; March 30, 2017 Revised ; April 5, 2017

Accepted ; May 23, 2017

자동차의 파워트레인 소음을 저감하는 방법으로는 소음이 전달되는 경로, 즉 모터나 기어장치의 하우징, 브라켓, 드라이브 샤프트 등에 질량을 추가하거나 리브(rib) 추가로 강성을 보강하는 방법을 사용하기도 한다. 또한, 일반적으로 차량에서 발생하는 풍절음이나 도로 소음이 전달되는 경로에 감쇠효과를 이용하는 제진재를 부착하여 소음을 저감하는 방법이 효과적으로 사용하기도 한다. 하지만, 이러한 제진재는 그 특성상 고온에서 사용이 어려우며 광범위한 부분에 사용하는 것 보다는 가장 최적의 위치에 사용함으로써 원가 및 비용을 절감하는 것이 매우 중요하다.

테슬라의 등장과 함께 전기차 파워트레인의 폭발적인 가속감과 주행성능 - 기어변속이 없으므로 느껴지는 가속감 - 으로 인해 전기차에 대한 일반 대중의 관심이 날로 높아지고 있다. 이에 따라 전기차의 고주파 소음(high pitch noise)에 대한 고객 불만도 점차로 증대되고 있지만 전기차 소음의 특징을 잘 분석한 연구나 그 소음을 효과적으로 저감하기 위한 실제적인 연구는 잘 찾아보기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 전기차 소음의 특징을 설명하고 전기차를 개발 중이거나 개발 완료 후에도 현장에서 즉시 사용이 가능한 제진재를 통해 전기차의 파워트레인 소음을 효과적으로 저감하는 방법에 대해 논하고자 한다.

II. 본 론

1. 전기차 소음의 특성

전기차의 소음과 구동 특성을 이해하기 위해서는 모터의 성능곡선을 통해 모터의 토크와 출력의 특징을 이해해야 한다. 그림 1에서 보여지는 바와 같이 모터는 일반적인 엔진과 달리 구동 초기에 최대 토크를 발휘할 수 있다. 이 때문에 전기차의 소음은 구동초기 혹은 제동말미에 최대토크가 생성될 때 발생되기 쉽다.

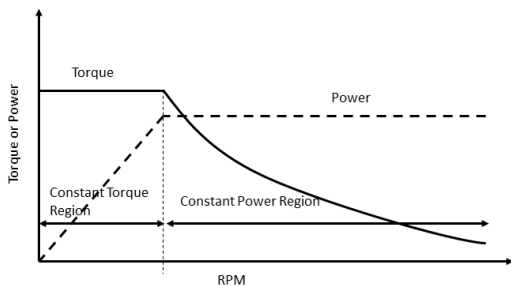


그림 1. 일반적인 모터 성능 곡선
Fig. 1. Motor Performance Curve.

이 운전영역은 더욱이 차량속도가 낮은 관계로 주변의 바람소음이나 타이어 마찰음 등이 작기 때문에 모터 소음 같은 파워트레인 소음이 더 부각되기 쉽다. 그림 2는 전기차의 가속 및 감속시 차량 실내에서 마이크로폰으로 측정된 소음을 시간-주파수 영역으로 분석한 결과를 보여주고 있다. 시속으로 약 100 km/h까지 가속하고 다시 0 km/h까지 감속하였으며 주파수는 인간의 귀가 최대로 들을 수 있는 20,000 Hz 까지 분석이 가능하도록 분해능을 설정하였다.

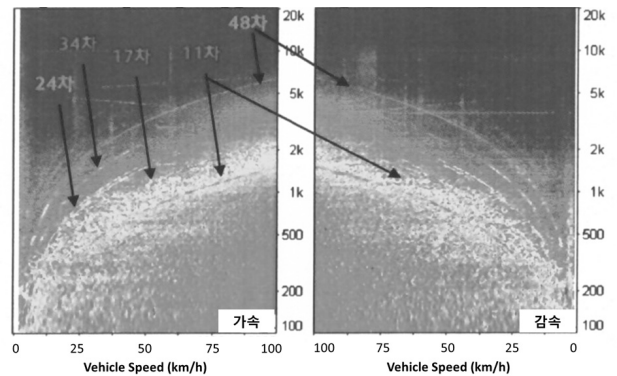


그림 2. 전기차 실내 소음의 시간-주파수 분석
Fig. 2. Time-Frequency Analysis for EV Cabin Noise.

그림 2에서 색깔은 음압의 세기를 나타낸다. 빨간색은 음압이 높은 것을 의미하고, 파란색은 낮은 음압을 나타낸다. 가속 및 감속에서 약 200~500 Hz 대역에서 광범위하게 나타나는 높은 음압은 일반적인 주행소음으로서 바람소리, 타이어에서 발생하는 노면 소음 등이다. 여기에 화인(Whine) 소음이 실선으로 나타나는데 평가에 사용되는 전기차의 화인성분은 모터 회전속도에 대한 차수(order)로 나타나게 된다. 구동모터의 화인 성분은 24차 및 48차이며 기어장치의 소음은 11차와 17차(34차는 17차의 2차 하모닉 성분)이다. 모터의 토크 곡선 성능으로 인해 가속 시와 감속 시 약 50 km/h 미만에서 화인 소음 성분들이 많이 관찰된다.

그림 3은 모터 하부 및 감속기 하부에서 가속 시 측정된 진동값을 보여준다. 그림 3 (a) 및 (b)는 감속기 기어 성분인 17차와 34차 성분을 각각 보여준다. 따라서 기어 소음이 주원인인 17차와 34차 성분이 감속기 하부에서 더 크게 측정되는 것은 당연하다. 하지만, 그림 3 (c)와 (d)는 모터의 24차 및 48차를 보여주는데, 감속기 하부에서의 진동이 비슷하거나 오히려 더 크다. 이는 감속기의 하우징의 두께를 포함한 진동의 전달경로가 감속기가 더 취약한 것으로 추정할 수 있다.

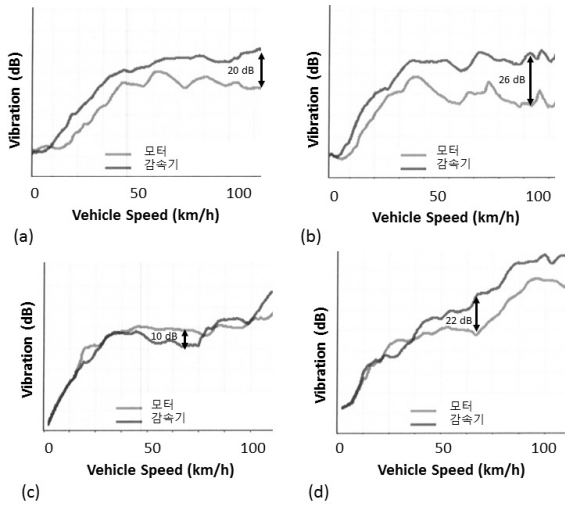


그림 3. 모터 감속기 하부 진동: (a) 17차; (b) 34차; (c) 24차; (d) 48차
Fig. 3. Measured Vibration on Motor or Reduction Gearbox: (a) 17th order; (b) 34th order; (c) 24th order; (d) 48th order

2. 수동형 댐핑 패치의 특성

그림 4는 수동형 댐핑 패치의 특성을 보여준다. 원통형 구조의 방사소음을 평가하면서 수동형 패치를 부착하는 것이 그림 4(a)에 묘사되어 있고, 그 효과가 그림 4(b)에 나타나 있다. 모든 모드에서 공통으로 발견되는 구조적 Anti-node 상에 수동형 패치를 부착하였다.

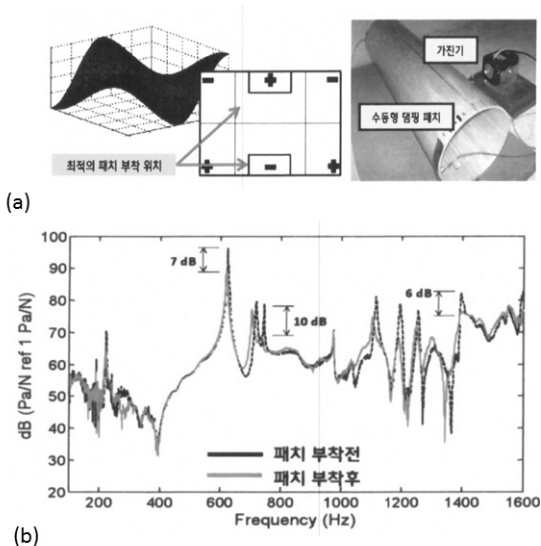
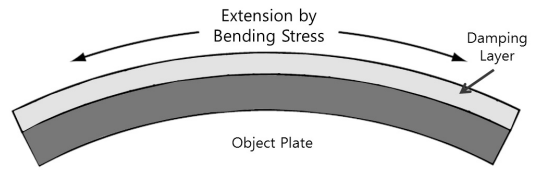


그림 4. 수동형 댐핑 패치 특성: (a) 원리시험 평가용 원통형 모델과 부착위치 (b) 패치 부착 전/후 응답 함수
Fig. 4. Effect of the passive damping material: (a) Shell model and location of patch attachment; (b) Frequency response function before/after the damping patch attachment

댐핑 패치의 종류는 자유층 (Free Layer) 감쇄 패치 및 구속층 (Constrained Layer) 감쇄 패치가 있다. 자유층 감쇄 시스템은 감쇄 재료 적용의 가장 간단한 형태로서 기본 구조로부터의 벤딩 응력 하에서 재료의 확장 및 압축의 결과로서 에너지가 소멸된다. 반면 구속층 감쇄 시스템은 일반적으로 강성이 큰 구조 응용 분야에 적용이 권장되며 댐핑 층의 전단 변형으로 인해 에너지가 소산된다. 그림 5는 댐핑 패치의 종류를 보여주고 있다.

• Free Layer Damping



• Constrained Layer Damping

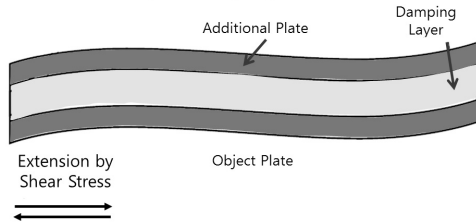


그림 5. 자유층 및 구속층 댐핑
Fig. 5. Free Layer and Constrained Layer Damping.

전체 원통형 구조 전체면적에 약 2% 에 불과한 영역에 패치를 부착하였지만 감쇄(damping) 효과가 잘 나타난다. 주파수 영역에 따라 각 고유진동수에서 약 6~10 dB 정도 소음이 감소하는 것을 볼 수 있으므로 작은 크기의 Constrained Layer 댐핑 패치는 Shell구조의 방사 소음 저감효과를 보였다^[11].

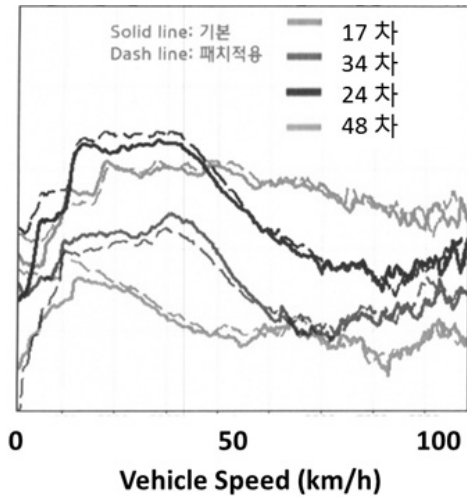


그림 5. 드라이브 샤프트 수동형 패치 부착
Fig. 5. Passive Damping Patch Attached on Drive Shaft of Electric Vehicle.

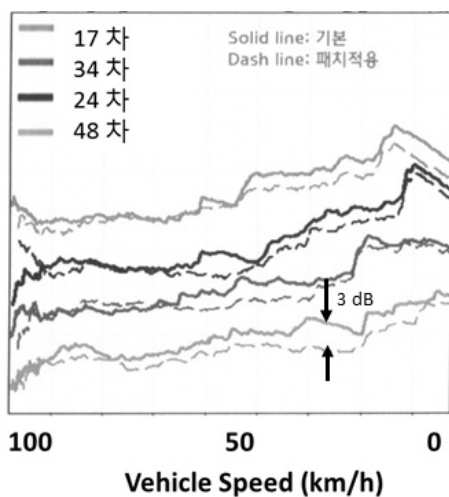
III. 실험 결과

1. 드라이브 샤프트 패치 부착 효과

그림 5는 전기차 파워트레인 소음 및 진동의 중요 전달경로 중 하나인 드라이브 샤프트에 패치를 부착한 사진이다. 패치의 크기는 폭이 약 5 cm 이며 드라이브 샤프트의 외경을 다 커버할 수 있게 부착되었다. 부착 위치는 임팩트 가진을 했을 때 가장 음압이 크게 나오는 위치, 즉 응답성이 큰 위치로 선정하였다. 이 상태로 급가속 및 급감속시 차수별 소음 성분의 변화를 관찰하였으며 그 결과를 분석하였다.



(a)



(b)

그림 6. 드라이브 샤프트 수동형 패치 여부에 따른 소음 효과: (a) 가속; (b) 감속
Fig. 6. Effect of Damping Patch on Drive Shaft: (a) Acceleration; (b) Deceleration.

그림 6은 그림 5와 같이 구성한 실차 시험에서 드라이브 샤프트에 수동형 패치 부착 여부에 따른 소음 저감 효과를 보여주고 있으며 감속기 소음인 17차 / 34차와 모터 소음인 24차 / 48차 오더 성분이 관찰 및 분석되었다. 가속 시에 모터의 24차 소음을 보면 그림 1에서의 모터 최대 토크 곡선과 비슷한 패턴을 보인다. 이는 가속 모드를 평가할 때 최대 토크를 발생시킨 상태, 즉 가속 페달을 100% 밟으면서 평가를 했음을 알 수 있다. 가속 시에는 패치 부착 후에 감속기의 34차 성분에서 약간의 효과를 볼 수 있었으나, 나머지 차수에서는 큰 효과가 없는 것을 볼 수 있다. 하지만 감속 시에는 모든 차수에서 약 3 dB 정도의 소음 저감 효과를 볼 수 있다. 이러한 차이는 소음이 전달되는 경로가 가속과 감속에서 다르게 기인 한 것으로 추정할 수 있다.

2. 감속기 하우징 패치 부착 효과

그림 7은 감속기 표면에 수동형 패치를 부착한 사진이다. 리브가 없는 비교적 넓은 표면에 부착이 되었는데 고주파 소음의 특성상 넓은 표면적에서 스피커처럼 국소 진동을 일으키며 소음을 방사할 가능성이 크기 때문이다. 패치의 크기는 4×6 cm 이며 두께는 6T 이다.

그림 8은 수동형 패치가 감속기 표면에 부착된 경우 소음의 변화를 나타낸 것이다. 패치 부착 전후 17차 / 34차 소음을 비교하였다. 가속 시에는 패치 부착의 효과가 크지 않지만 감속 시에서는 약 8 dB 정도의 소음 저감을 볼 수 있다. 앞에서 언급된 바와 같이 가속 시와 감속시의 소음 저감 효과가 다른 이유는 운동 조건에 따른 소음의 전달경로가 다른 것으로 추정할 수 있다.

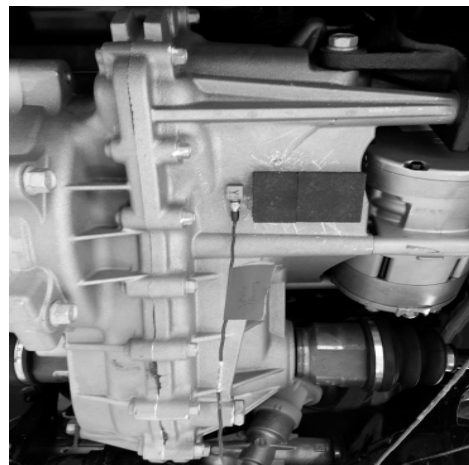


그림 7. 전기차 감속기 하부 수동형 패치 부착 사진
Fig. 7. Picture of Passive Damping Patch on Reduction Gearbox of Electric Vehicle.

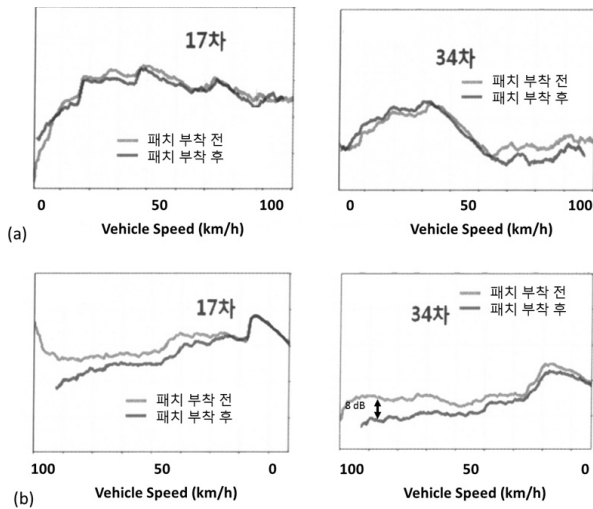


그림 8. 전기차 감속기 하부 수동형 패치에 따른 소음 효과

Fig. 8. Effect of the passive damping patch on the reduction gear box of electric vehicle.

IV. 결 론

전기차의 파워트레인, 즉 모터-감속기로 구성된 시스템의 소음은 모터 회전속도의 차수로 나타난다. 모터는 24차 및 48차 성분으로 나타나며, 감속기는 17차가 주 성분이다. 이러한 소음을 저감하는 방법으로 모터의 형상을 변경하거나 기어의 제원을 최적화 하여 소음원을 저감하는 방법이 근원적인 해결 방법일 수 있으나 개발이 어느 정도 진행된 후에는 변경이 어려운 경우가 많다. 본 연구에서는 수동형 패치를 이용하여 소음의 전달 경로 중 드라이브 샤프트 혹은 감속기 표면에 댐핑 효과를 추가하여 소음에 대한 영향을 조사하였다. 전기차의 파워트레인 소음 중 모터 소음은 모터 토크와 상관관계를 가지는 것을 보였으며 모터 하부와 감속기 하부 중 감속기 하부쪽 쪽이 방사 소음에 더 취약할 수 있다는 것을 보였다. 드라이브 샤프트와 감속기 표면에 부착한 두 경우 모두 가속 조건보다 감속 조건에서 화인 소음을 저감하는데 더 효과적인 것을 볼 수 있다. 그러나 소음 전달의 정확한 경로를 파악하기 위해서는 추가적인 평가가 필요할 것이다.

REFERENCES

[1] P. Vijayraghavan and R. Krishnan, Noise in Electric Machines: A Review, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 5, pp. 1007-1013, 1999.

[2] Jahns TM, Soong WL, Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives - A Review, IEEE Transactions on Industrial Electronics 1996; 43: 321-30.

[3] Parsa L, Hao L, Interior Permanent Magnet Motors with Reduced Torque Pulsation, IEEE Transactions on Industrial Electronics 2008; 55: 602-09.

[4] Islam R, Husain I, Fardoun A, McLaughlin K, Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs with Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction, IEEE Transactions on Industry Application 2009; 45: 152-60.

[5] Hanselman D, Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motors, IEEE Transaction on Industrial Electronics 1994; 41: 292-300.

[6] Beroug H, Boukais B, Sahraoui H, Analysis of Torque Ripple in a BDCM, IEEE Transaction on Magnetics 2002; 38: 1293-6.

[7] Zhu L, Jiang SZ, Zhu ZQ, Chan CC, Analytical Methods for Minimizing Cogging Torque in Permanent-Magnet Machines, IEEE Transactions on Magnetics 2009; 45: 2023-31.

[8] Atallah K, Wang J, Howe D, Torque-Ripple Minimization in Modular Permanent-magnet Brushless Machines, IEEE Transactions on Industry Applications 2003; 39: 1689-95.

[9] Favre E, Cardoletti L, Jufer M, Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Approach to Cogging Torque Suppression, IEEE Transactions on Industry Applications, 1993; 29: 1141-9.

[10] Borghi CA, Casadei D, Cristofolini A, Fabbri M, Serra G, Minimizing Torque Ripple in Permanent Magnet Synchronous Motors with Polymer-Bonded Magnets, IEEE Transactions on Magnetics 2002; 38: 1371-7.

[11] Plattenburg J, Dreyer JT, Singh R, Active and passive damping patches on a thin rectangular plate: A refined analytical model with experimental validation, Journal of Sound and Vibration 2015; 353: 75-95.

저 자 소 개



김 현 수(정회원)
 2001년 국민대학교 기계설계학과
 학사 졸업.
 2006년 University of Cincinnati
 기계공학과 석사 졸업.
 2011년 Ohio State University 기
 계공학과 박사 졸업.

2011년~2016년 현대자동차 기술연구소 책임연구원
 <주관심분야: 친환경 자동차, 파워트레인 개발,
 고장진단, 신호처리>



한 완 옥(정회원)
 1985년 광운대학교 전자공학과 학사
 졸업.
 1987년 광운대학교 전자공학과 석사
 졸업.
 1995년 광운대학교 전자공학과 박사
 졸업.

1995년~현재 여주대학교 자동차과 교수
 <주관심분야: 자동차 통신, 로봇 및 전장 제어>



김 병 일(정회원)
 1999년 한국과학기술원 항공우주공
 학과 학사 졸업.
 2004년 부산대학교 메카트로닉스
 협동과정 석사 졸업.
 2010년 Ohio State University 기
 계공학과 박사 졸업.

2011년~2014년 현대자동차 기술연구소 책임연구원
 2014년~현재 영남대학교 기계공학부 조교수
 <주관심분야: 차세대 차량 NVH, 스마트 스트럭처,
 능동 진동제어>