

자동차 Wheel Speed Sensor의 전자파 적합성 평가 연구

Electromagnetic Compatibility Evaluation of Automotive Wheel Speed Sensors

이세원 · 김현지 · 이종현 · 김해룡 · 최범진

Sewon Lee · Hyunji Kim · Jonghyun Lee · Haelyong Kim · Beomjin Choi

요 약

최근 자율주행 연구의 발전으로 인해 차량 내 전자 부품의 수가 크게 증가하면서 다양한 제어 및 센서 시스템의 통합이 필요하게 되었다. 이에 따라 이러한 시스템이 장착된 차량의 전자파 적합성(EMC)을 평가하는 것이 필수적이 되었다. 이 중에서도 휠 속도 센서(WSS: wheel speed sensor)는 차량의 현재 속도를 측정하는 데 중요한 역할을 하며, ABS (anti-lock braking system)와 ESC(electronic stability control)와 같은 시스템의 핵심 부품으로 사용된다. 따라서, 전자파 방사(EMI)를 최소화하고 내성(EMS)을 확보하는 것이 점점 더 중요해지고 있다. 본 연구에서는 WSS의 전자파 평가 방법의 변천사를 분석하고, 향후 평가 방식 개선에 대해 제안한다.

Abstract

With the recent advancements in autonomous driving research, the number of electronic components in vehicles has increased significantly, necessitating the integration of various control and sensor systems. Consequently, it is essential to evaluate the electromagnetic compatibility (EMC) of vehicles equipped with such systems. Among these, the wheel speed sensor (WSS) plays a crucial role in measuring the current speed of a vehicle and serves as a key component in systems such as the antilock braking system (ABS) and electronic stability control (ESC). Therefore, minimizing electromagnetic emission (EMI) and ensuring electromagnetic immunity (EMS) are becoming increasingly important. This study analyzes the evolution of electromagnetic evaluation methods for WSSs and proposes improvements for future assessment practices.

Key words: Wheel Speed Sensor, Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Interference, Electromagnetic Susceptibility

I. 서 론

초기 자동차 산업은 연료를 점화하기 위한 간단한 전기 회로 사용 외에 엔진이 초기 회전을 시작하면, 기계적인 장치 위주로 동작하였다. 이후 1970년대 연비 개선을 위한 엔진제어장치(ECU: engine control unit) 장착을 시작

으로 각종 전장품이 적용되면서 차량 내 안전 및 편의성이 증가하였다^[1]. 환경에 관한 관심이 증대되어 전기/수소차, 자율주행 자동차와 플리잉 카 등 미래형 자동차(미래차)로 자동차 산업 추세가 변화하고 있다^[2].

자율주행 차량의 기능은 인지(perception), 판단(decision making), 제어(control)로 구분할 수 있다^[3]. 인지 단계에서

한국자동차연구원 전파환경기술부문(Korea Automotive Technology Institute, EM Environment R&D Department)

· Manuscript received December 4, 2024 ; Revised February 24, 2025 ; Accepted March 19, 2025. (ID No. 20241204-001S)

· Corresponding Author: Sewon Lee (e-mail: leesw@katech.re.kr)

는 카메라, 라이다, 레이더, GPS(global positioning system), WSS(wheel speed sensor) 등을 사용하여 데이터를 수집하고, 판단 단계에서 ECU가 데이터를 통합하여 실시간으로 분석 및 처리한다. 인지하는 전장품이 전자파 방출이나 전자파로 인한 오동작이 발생하면 판단에 오류가 발생하기 때문에 전자파 적합성(EMC: electromagnetic compatibility)이 중요하다^[4].

전자파 적합성의 중요성과 전장품들의 기술 개발에 발맞추어 자동차의 전자파 규격과 범규도 지속해서 개발되고 개정되어 발전했다^[5]. 유럽 법규 ECE regulation No.10 Rev.7과 MIL-STD-461 H도 개정 시기가 도래되고 있어 향후 변화에 빠르게 대응해야 할 것으로 보인다. 본 논문에서는 WSS 전장품의 전자파 평가 항목별 평가방법에 대한 변화와 더불어 평가 관련 이슈가 있던 사항들에 관해 기술하고 향후 개선 및 발전 방향에 대해 제안하고자 한다.

II. WSS 개요

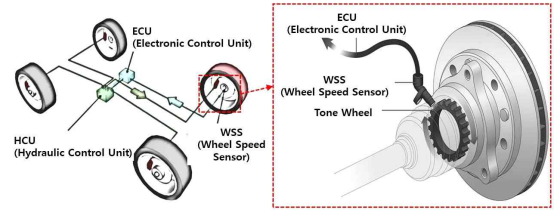
2.1 기본 동작 원리

WSS는 그림 1(a)와 같이 차량에 4개의 각 바퀴 휠에 위치하며, 톤 휠과 WSS사이 이격거리 0.7 mm로 이격된 위치에 장착하여 휠의 속도를 감지하는 센서이다.

그림 1(b)와 같이 WSS의 전원 연결을 구성하여 출력 파형을 측정하면 표 1의 신호 상한, 하한 신호 전압이 톤 휠의 회전 속도에 비례하여 상태가 변화한다.

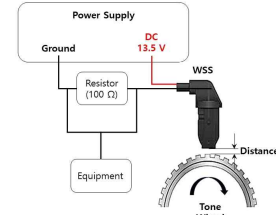
WSS의 톤 휠은 그림 1(c)와 같이 톱니형과 마그네틱형이 있으며, 일반적으로 능동형 동작은 그림 2(a)와 같이 자속 밀도 변화량에 따라 상한 신호 전압과 하한 신호 전압이 50:50의 비율로 출력되는 형태와 그림 2(b)와 같이 부가 정보를 나타내기 위해 duty 비율이 일정하지 않은 스마트 형이 있다^[6].

WSS의 출력 신호 전압은 표 2의 자동차에서 사용되는 통신 신호 전압 중에서 상당히 낮은 신호 전압으로 동작 하기에 동일한 잡음 소스원에 의해 신호 전압이 변동될 시 범위를 초과할 가능성이 더 크다. 또한, 단일 신호 통신은 차동 신호에 비해 전자파가 더 많이 방출되고, 외부 노이즈에 취약하다^[7].



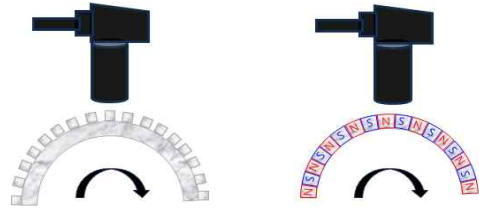
(a) WSS 차량 장착 구성도

(a) WSS installation layout in vehicle



(b) WSS 전원 연결도

(b) WSS power connection diagram



(c) 톤 휠 종류(좌: 톱니형, 우: 마그네틱형)

(c) Tone wheel types (left: toothed, right: magnetic)

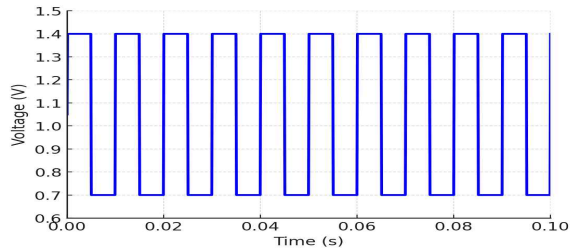
그림 1. WSS 셋업 구성

Fig. 1. WSS setup configuration.

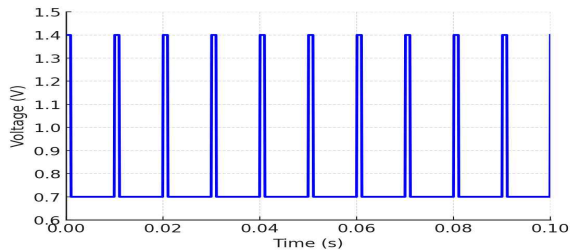
표 1. WSS 출력 파형 측정 조건

Table 1. Measurement conditions for WSS output waveform.

| Condition | Value | Unit | Tolerance |
|---------------------------|-------------|--------|-----------|
| Supply voltage | 13.5 | V d.c. | ±2 % |
| Measuremant resistance | 100 | Ω | ±5 % |
| Tone wheel rotation speed | 500 | rpm | ±5 % |
| Air gap | 0.7 | mm | ±5 % |
| Signal type | Square wave | - | - |
| High-level signal | 1.43 | V d.c. | ± 2.5 |
| Low-level signal | 0.715 | V d.c. | ± 1.25 |



(a) 능동형 WSS
(a) Active wheel speed sensor



(b) 스마트 WSS
(b) Smart wheel speed sensor

그림 2. WSS의 출력파형

Fig. 2. Output waveform of WSS.

표 2. 자동차 통신 신호의 전압 수준

Table 2. Voltage levels of automotive communication signals.

| Communication method | Signal type | Low voltage (V) | High voltage (V) |
|----------------------|--------------|-----------------|------------------|
| CAN | Differential | 1.5 | 3.5 |
| LIN | Single-ended | 0 | 12.0 |
| FlexRay | Differential | 0 | 5.0 |
| Ethernet | Differential | 0 | 5.0 |
| Sent | Differential | 0 | 5.0 |
| WSS output | Single-ended | 0.715 | 1.43 |

2-2 출력 파형 원리

출력 파형 주파수는 차속에 비례하며 능동형 WSS 펄스 1개당 스마트 WSS 펄스 2개가 발생한다. WSS 주파수는 식 (1)과 같이 계산할 수 있으며, 일반적으로 48개의 극을 갖는다고 할 때, 평가 조건인 500 rpm은 능동형의 경우 400 Hz, 스마트형의 경우 800 Hz 수준이다.

$$Frequency[Hz] = \frac{RPM \times \text{극의 개수}}{60} \quad (1)$$

이것을 속도로 변환하면, 평균적인 승용차 바퀴 지름 65 cm 기준으로 식 (2)와 같이 계산할 때 약 60 km/h의 속도에 해당한다.

$$Speed[km/h] = \frac{2\pi r \times RPM \times 60}{1000} \quad (2)$$

III. EMI

WSS의 전자파 방출 평가 항목은 WSS의 전자파 적합성 평가 규격 MES-T-BS-RE-003 또는 ES 95660-30 등에서 radiated emission만 요구하고 있어 현재까지 해당 평가만 진행하였다. 따라서 CE(conducted emission) 및 ME(magnetic emission) 등의 평가 항목이 지금까지와 같이 WSS에 적용하지 않는 것이 맞는지 차후 검토가 필요할 것으로 보인다.

3-1 Radiated Emission(RE) - ALSE

초기 톤 휠 지그는 그림 3(a)와 같이 220 V AC를 입력 받아 동작하는 지그로 활용하였으나 지그 자체만 동작 시 발생하는 노이즈로 규제치를 만족하지 못하는 현상이 발생하였다. 따라서 지그 없이 전원만 인가하여 ALSE (absorber-lined shielded enclosure) 평가를 진행하였다. 이후 규격 요구조건인 톤 휠 회전속도 500 rpm 조건을 맞추기 위해 그림 3(b)와 같이 공압식 톤 휠 지그를 도입하여 환경 노이즈 문제를 해결하였다.

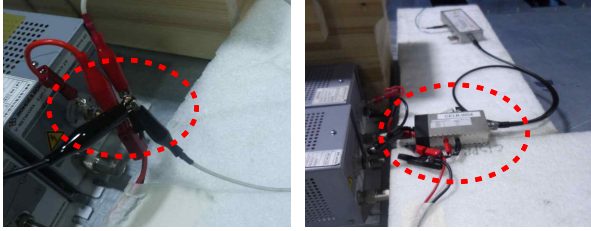


(a) 220 V a.c. 입력
(a) 220 V a.c. Input

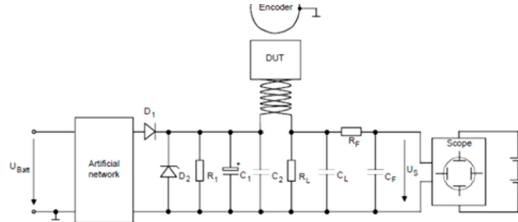
(b) 공압식
(b) Air pressure input

그림 3. WSS의 톤 휠 지그

Fig. 3. Tone wheel jig for WSS.



(a) 100 Ω 저항 연결 (b) 로드 시뮬레이터 연결
(a) Connecting a 100 Ω resistor (b) Connecting a load simulator



(c) 로드 시뮬레이터 회로 예시
(c) Example of a load simulator circuit

그림 4. WSS의 동작 확인을 위한 회로 구성
Fig. 4. Circuit configuration for verifying the operation of a wheel speed sensor (WSS).

기존에는 그림 4(a)와 같이 100 Ω 저항만으로 시료의 정상동작을 확인하였으나, 방사 노이즈가 규제치를 초과하는 경우가 있기 때문에 커패시터 등의 각종 수동소자들이 추가된 그림 4(b) 및 그림 4(c)와 같이 로드 시뮬레이터로 측정하여 노이즈를 저감시켰다.

RC 기본 회로에서 시정수(τ : time constant)는 식 (3)으로 정의되며, 전압의 시간에 따른 상승 및 하강 특성은 각각 식 (4) 및 식 (5)로 표현된다. WSS의 출력 신호 모니터링을 위한 회로 구성을 조정하여 시정수를 증가시켜 상승 및 하강 시간을 연장함으로써 고주파 성분을 줄이는 효과를 기대할 수 있다.

$$\tau = R \times C \quad (3)$$

$$V(t) = V_{MAX}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4)$$

$$V(t) = V_{MAX}(e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5)$$

WSS에 전원만 인가한 것보다 공압식 톤 휠 지그를 적용하여 500 rpm을 설정 시 회전속도에 따라 상태 변화하는 디지털 신호가 발생하다 보니 로드 안테나로 측정하는 주파수 전기장에 대한 노이즈가 증가한다.

해당 구형파 신호의 -20 dB/dec 로 감쇄하는 특성은 식 (6)과 같으며, 500 rpm에 해당하는 400 Hz(능동형) 또는 800 Hz(스마트형)로 고정되어 있기에 이를 계산해보면 127 Hz, 254 Hz이다.

$$-20 \text{ dB/dec} \text{ cutoff Frequency [Hz]} = \frac{1}{\pi T} \quad (6)$$

저주파수 노이즈가 감소되는 원리는 로드 시뮬레이터에서 커패시터 등의 소자에 의해 상승 및 하강 시간이 변화하여 -40 dB/dec 로 감쇄하기 시작하는 주파수인 식 (7)이 더 낮은 주파수가 되어 그림 5와 같은 원리로 저주파수 노이즈가 낮아진다.

$$-40 \text{ dB/dec} \text{ cutoff Frequency [Hz]} = \frac{1}{\pi T_r} \quad (7)$$

100 Ω 저항 연결 시 상승 및 하강 시간이 그림 6(a)와 같이 1 us 수준이며, 로드 시뮬레이터 연결 시 100 Ω 저항 외에 커패시터 등의 회로에 의한 영향으로 그림 6(b)와 같이 12 us로 상승한다. -40 dB/dec 로 감쇄하기 시작하는 주파수를 계산하면, 각각 318 kHz와 26 kHz로 약 10분의 1 수준이다.

그림 7(a)와 같이 WSS에 전원만 인가한 것보다 그림 7(b)와 같이 공압식 톤 휠 지그를 적용하여 500 rpm을 설정

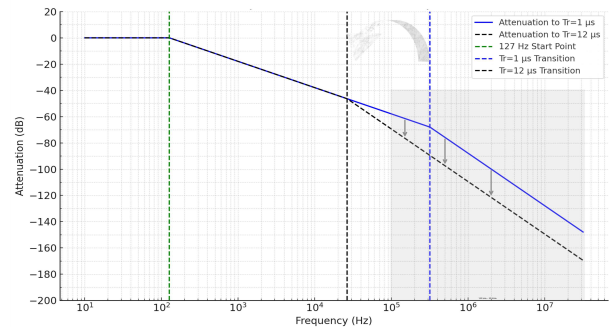


그림 5. 고주파 대역 전자파 감쇄 특성 비교
Fig. 5. Comparison of high-frequency EMI attenuation characteristics.

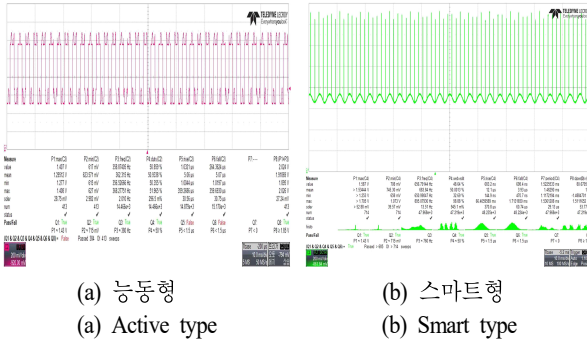


그림 8. BCI 노이즈 주입에 의한 WSS 영향
Fig. 8. Effects of BCI noise injection on WSS.

될 수 있어 측정값이 수백 us로 측정되지만, 오실로스코프의 측정 오류이기에 판정에서는 예외로 한다. 또한, 모니터링 전압이 offset이 생기는 경우가 발생할 수 있으며, 노이즈 레벨을 조정하여 임계점을 잡고 규격에서 요구하는 만족 조건과 맞는지 판단한다.

4-2 Radiated Immunity(RI) - ALSE

RI-ALSE 평가는 안테나로 전기장을 방사하여 노이즈를 주입하는 시험으로 ISO 11452-2를 참조로 한다. 안테나의 극성이 수평보다 수직이 WSS에 영향을 더 주는 경향이 있으며, 80~200 MHz의 주파수 대역에서 전기장 노이즈에 대한 영향이 크다.

그림 9(a)와 같이 출력 파형 offset이 발생할 수 있으며, 그림 9(b)와 같이 상한 및 하한 신호의 기준 전압의 변동성이 커지면 오실로스코프의 주파수 측정도 기준 주파수

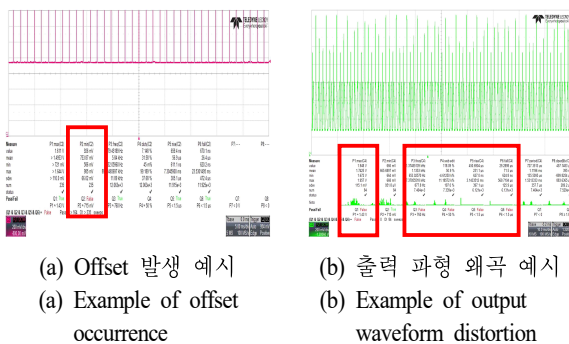


그림 9. ALSE 노이즈 주입에 의한 WSS 영향
Fig. 9. Effects of ALSE noise injection on WSS.

의 2배 수준인 1.37 kHz로 측정이 되기도 한다.

4-3 Portable Transmitter

portable transmitter 평가는 차량 환경에서 휴대용 통신기기 등에 의한 오동작 여부를 확인하는 평가로 실제 활용 장비를 사용하여 평가하거나 범용 안테나를 활용하여 평가하는 2가지 방식이 있다.

CDMA, GSM, Bluetooth, Wi-Fi(5G 포함), V2X 등이 포함되며, ISO 11452-9를 참조한다. near-field 안테나를 통해 해당 통신 주파수 대역의 변조를 모사하며, 측정 거리는 기본적으로 50 mm로 진행하고 그림 10(a)와 같이 하니스 연결부 평가 시 하니스를 별도로 고정하지 않으면 안테나와 밀접하게 된다. 이때, 출력 파형에 왜곡이 발생하는 주파수 대역이 있어 평가 시 주의가 필요하며, 그림 10(b)와 같이 하니스를 안테나로 이격시켜 해결할 수 있다.

4-4 Transient Immunity(TI) - CCC method

CCC(capacitive coupling clamp)는 신호선으로 유입되는 순간적 과도 전압 노이즈를 주입하여 오동작 여부를 확인하는 평가 방법이며, ISO 7637-3을 참조한다. CCC method

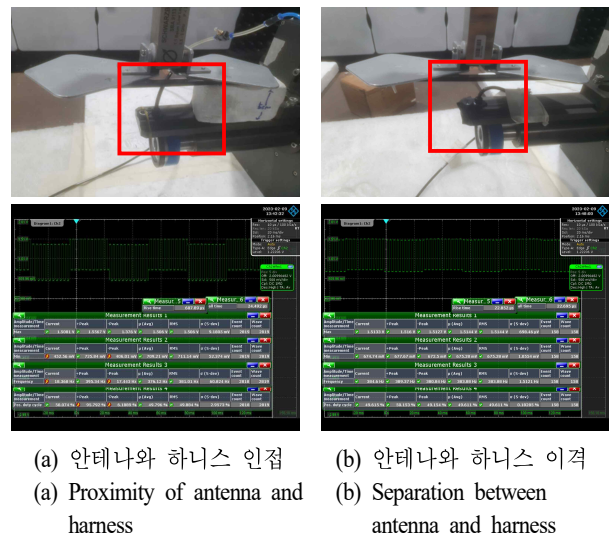


그림 10. PT 노이즈 주입에 의한 WSS 영향
Fig. 10. Effects of portable transmitter noise injection on WSS.

는 fast pulse이며, 최근에는 slow pulse인 ICC(inductive coupling clamp) method도 평가하는 추세이다.

순간적 과도 전압 노이즈가 주입되면서 WSS의 출력 파형에 그림 11과 같이 해당 노이즈가 커플링 되어 출력되는 경우가 있으며, 오실로스코프의 노이즈 필터와 샘플링 조건 및 출력 신호 사이에 광 컨버터 사용 여부에 따라 커플링 영향이 달라진다.

4-5 Electrostatic Discharge(ESD)

ESD는 시료의 조립, 운반, 교체 또는 작동 중 정전기에 의한 손상을 방지하기 위해 정전기 노이즈를 인가하여 오동작 여부를 확인하는 평가 방법이며, ISO 10605를 참조한다. 기존 평가 테이블 하단의 GRP(ground reference plan)과 bleeder wire(high resistance $2 \times 470 \text{ k}\Omega$)를 사용하던 것을 최신 2023년도 개정판에서는 제외되었다.

WSS 해더는 절연체로 감싸져 있어 일반적으로 공압식 톤 휠 지그의 금속 부위에 인가가 되며, 고주파성 노이즈에 영향을 받을 수 있는 오실로스코프 특성상 그라운드 테이블에 정전기를 인가만 해도 그림 12와 같이 출력 파형 신호에 영향을 줄 수 있다.

4-6 Ripple Power Supply Test

Ripple은 전원전압이 흔들리면 오동작 여부를 확인하는 평가로 전자파 적합성 평가 항목보다는 전기적 성능 평가 항목 범주에 포함되며, ISO 16750-2를 참조한다.

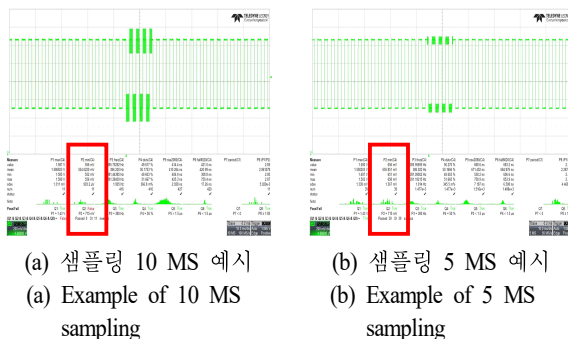


그림 11. CCC 노이즈 주입에 의한 WSS 영향
Fig. 11. Effects of CCC noise injection on WSS.

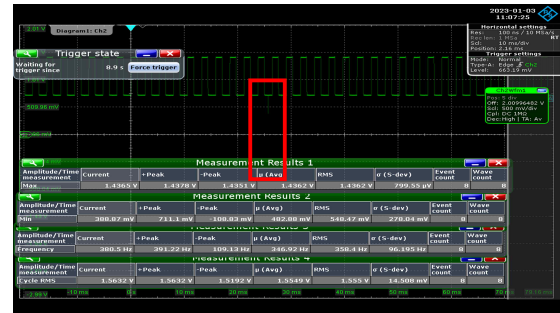


그림 12. ESD 노이즈 주입에 의한 WSS 영향
Fig. 12. Effects of ESD noise injection on WSS.

WSS의 전원전압이 흔들리면 100Ω 저항의 전압에도 영향을 주며, 이 영향성의 정도는 오실로스코프의 샘플링 또는 그림 13과 같이 노이즈 필터 적용 여부에 따라 달라진다.

V. 결 론

본 논문에서는 WSS의 전자파 적합성 평가 시 사용하는 오실로스코프의 설정 조건에 따라 전자파 노이즈 영향성의 변화를 확인하였으며, 이에 따라 실제 WSS의 신호를 입력받는 컨트롤러를 전자파 적합성 평가시 모니터링용으로 활용 및 데이터 수집하는 것이 필요할 것으로 보인다. 또한, 60 km/h 수준에 해당하는 500 rpm 평가 조건도 EMI의 경우 법적 허용 수준의 최대 속도에 해당하는 악조건으로 측정하는 것에 대한 검토가 필요하다.

각 완성차 업체는 자체 규격을 개정해 오고 있으며, 완성차에 납품하기 위해 각 부품사는 해당 규격으로 평가

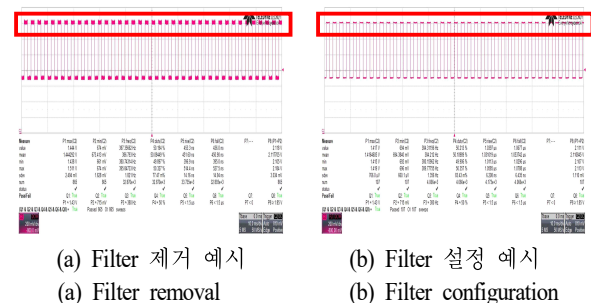


그림 13. Ripple 노이즈 주입에 의한 WSS 영향
Fig. 13. Effects of ripple noise injection on WSS.

한 성적서가 있어야 한다. 미래형 자동차의 특성상 전기차와 자율주행은 안전과 밀접한 연관성이 있으며 안전 관련 부품 시험의 경우 실제 차 환경을 대표할 수 있는지에 대한 검토를 하여 항상 최신화를 유지하는 것이 중요하다. 평가 사전에 테스트계획을 작성하여 부품 특성에 맞게 계획을 세우게 되는데, 부품 개발사와 완성차 및 시험기관 담당자와 긴밀한 협업을 하는 것이 중요하다.

References

- [1] R&D Information Center, *Analyzing domestic and international trends in the future automotive industry: Automotive electronics/display/lighting*, Seoul, Knowledge Industry Information Institut(KNIN), pp. 456-457, 2017.
- [2] B. Choi, "Korea automotive technology institute, EM environment R&D department," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 1, pp. 96-102, Jan. 2024.
- [3] Y. Na, J. H. Kang, J. H. Lee, K. So, H. K. In, and K. Jo, "Trends and future of decision making for autonomous car," *The Korean Association of Mobility Studies*, vol. 3, no. 1, pp. 33-52, Mar. 2023.
- [4] O. Pöllny, A. Held, and F. Kargl, "On the manipulation of wheel speed sensors and their impact in autonomous vehicles," in *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV)*, Las Vegas, NV, Oct.-Nov. 2020, pp. 1530-1537.
- [5] H. Woo, "A study on electromagnetic standards changes of vehicles," *Journal of Auto-vehicle Safety Association*, vol. 13, no. 2, pp. 7-14, Jun. 2021.
- [6] H. Kim, "Design for method of detecting the wrong installed wheel speed sensor," in *2011 Korea Society of Automotive Engineers Conference and Exhibition*, Daejeon, Nov. 2011, pp. 1584-1589.
- [7] H. Jung, J. Jung, and Y. Lim, "Design of compact common mode noise absorption filter," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 12, pp. 963-968, Dec. 2018.

이 세 원 [한국자동차연구원/연구원]

<https://orcid.org/0009-0004-8619-739X>



2012년 2월: 공주대학교 정보통신공학 (공학사)
2012년 2월~2014년 9월: 넵코어스 통신사업부 주임연구원
2020년 8월: 충남대학교 전파공학 (공학석사)
2014년 9월~현재: 한국자동차연구원 전파환경기술부문 연구원

[주 관심분야] EMC, EMF, WPT

김 현 지 [한국자동차연구원/연구원]

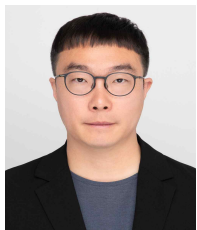
<https://orcid.org/0009-0004-3038-2027>



2020년 2월: 공주대학교 기계자동차공학 (공학사)
2024년 2월: 아주대학교 IT융합/정보전자전공 (공학석사)
2020년 2월~현재: 한국자동차연구원 전파환경기술부문 연구원
[주 관심분야] MIL, EMC

이 중 현 [한국자동차연구원/실장]

<https://orcid.org/0009-0008-7984-7824>



2008년 2월: 부경대학교 전자공학 (공학사)
2018년 8월: 충남대학교 전파공학 (공학석사)
2007년 11월~현재: 한국자동차연구원 전파환경기술부문 실장
[주 관심분야] EMC, EMF, WPT

최 범 진 [한국자동차연구원/부문장]

<https://orcid.org/0000-0002-1801-3649>



2004년 2월: 한밭대학교 제어계측학 (공학사)
2007년 8월: 충남대학교 전파공학 (공학석사)
2022년 2월: 영남대학교 전기공학 (공학박사)
2025년 3월~현재 : 연세대학교 경제대학원 최고경제인과정 재학 중
2004년 3월~현재: 한국자동차연구원 전파환경기술부문 부문장
[주 관심분야] EMI/EMC, WPT, EMF, IEMI

김 해 룡 [한국자동차연구원/실장]

<https://orcid.org/0009-0002-9465-2589>



2003년 8월: 경북대학교 전자전기공학 (공학사)
2005년 8월: 한국정보통신대학교 정보통신 (공학석사)
2011년 2월: 한국과학기술원 정보통신 (공학박사)
2011년 2월~현재: 한국자동차연구원 전파환경기술부문 실장

[주 관심분야] Shield Effectiveness(SE), Leakage Current(LC)