

전동 모빌리티의 부품-완성차 EMC 검증 체계 및 배터리 시스템 영향 분석

An EMC Verification Framework for Components and Vehicles for Electric Mobility and an Analysis of Battery Systems

윤 영 찬*** · 홍 현 귀*** · 백 장 현**

Young-Chan Yoon*** · Hyun-Gwi Hong*** · Jang-Hyun Baek**

요 약

본 논문은 일반 전동 골프카, 저속전기차(LSV), 자율운행 전동 골프카를 대상으로 부품에서 완성차에 이르는 다층 전자파 적합성(EMC) 검증 체계를 구축하고, 4개 공인 시험기관과 사내 시험실에서 수행한 17건의 사례를 플랫폼-검증 단계 매트릭스로 통합 분석하였다. 그 결과 기능 저하 주파수는 부품 단계와 완성차 단계에서 서로 다른 대역에 분포하였으며, 부품 단계에서 100 V/m에 기능 저하를 나타내지 않은 시료가 완성차 단계에서는 약 10.5 dB 낮은 30 V/m에서 기능 저하를 나타내었다. 또한 동일 차량·동일 배선 조건에서 배터리팩만 교체한 비교를 통해, 셀 화학종이 동일하고 케이싱 재질이 상이한 두 팩 사이에서 치명적 결함의 발현 여부가 같았으며, 이 결함이 BMS 보호 로직 재설계를 통해 시스템 수준에서 보완될 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this study, a multi-level electromagnetic compatibility verification framework is established for electric mobility systems that covers electric golf carts, low-speed vehicles, and autonomous electric golf carts. The framework applies to a wide range of systems from individual components to the level of entire vehicles. A total of seventeen verification cases conducted at four accredited laboratories and an in-house facility were integrated into a platform-by-stage matrix. Functional degradation occurred in different frequency bands at the component and vehicle levels. For example, specimens showing no degradation at 100 V/m in component-level testing did degrade at 30 V/m, about 10.5 dB lower, at the vehicle level. When a given battery pack was replaced under identical vehicle and wiring conditions, the occurrence of a critical failure differed between two packs with identical cell chemistry but different casing materials. This issue was mitigated at the system level through redesigned protection logic for the battery management system.

Key words: Electromagnetic Compatibility, Electric Mobility, Radiated Immunity, Battery Management System

*디와이(주)(DY Co., Ltd)

**전북대학교 산업정보시스템공학과(Department of Industrial and Information Systems Engineering, Jeonbuk National University)

***한국자동차연구원 전파적합성연구센터(EMC R&D Center, Korea Automotive Technology Institute)

· Manuscript received June 9, 2026 ; Revised August 10, 2026 ; Accepted August 24, 2026. (ID No. 20260609-002S)

· Corresponding Author: Jang-Hyun Baek (e-mail: jbaek@jbnu.ac.kr)

I. 서 론

전동 모빌리티는 일반 전동 골프카에서 저속전기차(LSV, low-speed vehicle)를 거쳐 자율운행 골프카로 발전하고 있다. 자율운행 기능의 추가는 비전 처리 장치(VPU, vision processing unit)와 자율 제어 장치(ACU, autonomous control unit) 등 안전 필수 전장품의 비중을 높이며, 이에 따라 전자파 적합성(EMC, electromagnetic compatibility)은 단순한 인증 요건을 넘어 차량 안전과 직결되는 핵심 신뢰성 항목이 되었다. 그러나 전동 골프카는 국제 차량 EMC 규격인 ECE R10이 정확히 적용되는 차량 범주에 속하지 않아, 산업 현장에서는 “자동차 전장품 전자파 시험 규격 준용”과 같은 모호한 기준이 통용된다. 또한 부품 수준의 적합성이 완성차 수준의 적합성을 보장하지 못하며, 배터리·구동계 통합 이후 전혀 다른 약점이 발현되는 경우가 빈번하다.

본 논문은 이러한 문제의식 아래 일반 골프카에서 LSV를 거쳐 자율운행 골프카에 이르는 세 가지 차량 플랫폼을 대상으로 부품에서 완성차에 이르는 다층 EMC 검증 체계를 구축하고, 4개 공인 시험기관과 사내 시험실에서 수행한 17건의 검증 사례를 통합 분석한다. 본 연구의 기여는 다음과 같다. 첫째, 특정 차종에 국한되지 않고 여러 플랫폼에 공통으로 적용할 수 있는 부품-완성차 검증 체계를 제시한다. 둘째, 부품 단계와 완성차 단계에서 기능 저하가 관찰되는 주파수가 서로 다른 대역에 분포하며, 차종 및 개발 단계에 따라 서로 상이하게 나타남을 실측 자료로 제시한다. 셋째, 배터리팩의 사양 차이가 완성차의 EMC 거동에 미치는 영향을 동일 차량·동일 배선 조건에서의 팩 교체 비교를 통하여 확인하고, 그 원인을 케이싱의 차폐 특성 관점에서 분석한다.

II. 시험 방법론

2-1 검증 체계 및 시험기관

검증은 부품(component)→완성차(vehicle)→디버깅(debugging)→개선 후 재검증(re-verification)의 다층 구조로 수행하였다. 시험은 4개 공인 시험기관[한국자동차연구원(KATECH), 자동차융합기술원(JIAT), 구미전자정보기술

원(GERI), SGS]과 사내 시험실에서 분담하였다. 자율운행 전장품의 경우 JIAT에서 시험 방법 및 규격 적합성을 사전 검증한 뒤 KATECH에서 정식 시험성적서를 발급받는 2단계 절차를 적용하여 측정의 타당성을 확보하였다. 대상 차종은 세대(generation)에 따라 2세대(2.0G)·3세대(3.0G)로 구분되는 일반 골프카트, 2.0G를 미국 저속전기차 규제에 맞게 재설계한 LSV, 그리고 3.0G에 자율운행 전장품을 탑재한 자율운행 골프카로 구성된다. 총 17건의 검증은 LSV 7건, 일반 골프카 5건, 자율운행 골프카 5건으로 구성되며, 각 차종에서 부품→완성차→개선 단계를 포괄한다. 다만 부품 단계 시험의 대상은 전기·전자 제어 부품에 한정되며, 배터리팩은 3-4에서 후술하는 제약에 따라 단품 시험 대상에서 제외되었다. 시험은 시료를 실제 운행 조건에 가깝게 동작시킨 상태에서 수행하였다. 완성차 시험에서는 차량을 롤러 위에 거치하여 최고 속도 20 km/h 주행 모드로 운전하고, 시동 투입, 감광빔 점등, 전방 와이퍼 수동 최고속 동작을 유지한 상태에서 주행 속도·제동 응답·계기판 표시를 감시하였다. 부품 시험에서는 시료를 규정된 접지면 위에 배치하고 부하 시물 레이터에 연결하여 정상 통신 상태를 유지하였다. 감시 항목은 플랫폼별로 동일하게 적용하였다.

2-2 적용 표준

사내 시험 규격에 명기된 시험 항목은 동등한 국제 표준^{[1]-[8]}으로 환산하여 적용하였다. 표 1에 시험 항목별 적용 표준과 주요 시험 조건을 정리하였다.

2-3 성능 판정 기준

기능 성능 상태(FPS, functional performance status)는 ISO 11451-1 및 ISO 11452-1의 분류에 따라 4단계로 판정하였다^{[9],[10]}. Region I은 간섭 노출 중 모든 기능이 규격 범위 내에서 정상 동작하는 상태, region II는 노출 중 기능이 일시적으로 규격을 벗어나되 노출 종료 후 자동으로 복귀하는 상태, region III는 노출 종료 후 사용자의 조작에 의하여 복귀하는 상태, region IV는 부품의 영구 손상 또는 교체가 필요한 상태를 의미한다.

완성차 시험의 동작 조건과 결함 판정 기준은 UN

표 1. 시험 항목별 적용 국제 표준 및 시험 조건

Table 1. International standards and test conditions applied per test item.

Test item	Applied standard	Frequency band	Test level	Modulation	Dwell
Conducted immunity (BCI)	ISO 11452-4	0.1~400 MHz	200 mA (envelope)	CW, AM (1 kHz, 80 %)	2s
Radiated immunity, ALSE (component)	ISO 11452-2	20 MHz~6 GHz	100 V/m	CW, AM, PM	2s
Radiated immunity, ALSE (vehicle)	ISO 11451-2	20 MHz~2 GHz	30 V/m (distance 2 m)	AM, PM	2s
Transient immunity (supply lines)	ISO 7637-2	Pulse 1, 2a, 2b, 3a, 3b, 5b	-150 to +100V	Time-domain pulse	-
Transient immunity (signal lines)	ISO 7637-3	Pulse a, b/2a	-110 to +75 V/±6 V	Time-domain pulse	-
Electrostatic discharge (ESD)	IEC 61000-4-2, ISO 10605	-	Contact: ±4 kV Air: ±2, 4, 8 kV	150 pF/330 Ω	-
Radiated emission (RE)	CISPR 25, ECE R10	30 MHz~1 GHz	Peak, quasi-peak	RBW 120 kHz	-

Regulation No. 10^[8]의 차량 시험 조건을 전동 골프카의 최고 속도에 맞추어 환산하여 적용하였다. 즉 동 규정이 규정하는 50 km/h 주행 모드를 골프카의 최고 속도인 20 km/h 주행 모드로 대체하였다. 항목별 결함 판정 기준은 표 2에 정리하였다.

이상의 기준에 따라, 계기판 LED의 순간적 깜빡임(플리커)은 주행·제동 기능에 영향을 주지 않고 노출 종료와 함

께 소멸하므로 region II로 분류하였다. 배터리관리시스템(BMS)의 보호 릴레이 동작에 의한 전원 차단은 시료의 손상을 수반하지 않고 재기동 조작으로 복귀하므로 region III로 분류하였으며, 전원선 과도에 의한 시료 소손과 같이 재사용이 불가능한 상태만을 region IV로 판정하였다. 방사성 방출 시험은 광대역 측정 시 표 2의 동작 조건을, 협대역 측정 시 시동 투입 및 감광빔 점등 조건을 적용하였다.

2-4 반복성 및 측정 유효성

시험은 기능 저하가 관찰되지 않은 항목에 대하여 1회 수행하고, 기능 저하가 관찰된 항목에 대해서는 동일 조건에서 3~4회 반복하여 결함의 재현성을 확인하였다. 본 논문에서 보고한 모든 기능 저하 사례는 반복 시험에서 재현이 확인된 것이다. 다만 기능 저하가 관찰되지 않은 조건은 단일 측정에 근거하므로, 해당 조건에서의 적합 판정은 통계적 신뢰구간을 수반하지 않는다. 개선 전후 비교 항목은 동일 시험기관·동일 시험실·동일 감시 구성으로 재검증하여 측정 환경 변동의 영향을 배제하였다. 배터리팩 교체 비교(표 3)는 동일 차량·동일 배선·동일 시험 조건에서 팩만을 교체하여 연속 수행하고, 두 팩 모두 3~4회 반복하여 각각의 거동이 재현됨을 확인하였다.

표 2. 완성차 시험동작 조건 및 결함 판정 기준

Table 2. Vehicle-level operating conditions and failure criteria.

Operating condition	Failure criterion
Driving speed 20 km/h	Deviation exceeding ±10 % of the set speed
Dipped beam on	Headlamp or tail lamp extinguished
Instrument cluster in normal mode	Unexpected warning indication; discontinuity in odometer display
Turn signal lamp on	Flashing frequency<0.75 Hz or >2.25 Hz; duty rate<25 % or >75 %
Front wiper at manual high speed	Complete stop
Brake pedal not operated	Unintended braking or brake lamp illumination

표 3. 배터리팩별 완성차 ALSE 거동비교

Table 3. Vehicle-level ALSE behavior by battery pack.

Frequency	Pack A (NCM/Casing: PC-based polymer)	Pack B (NCM/Casing: aluminum)
100 MHz	Power shutdown (region III)	Normal (region I)
620 MHz	Speed reduction	Speed reduction
0.1~1 GHz	Speed reduction · LED flicker	Speed reduction · LED flicker

III. 결과 및 분석

표 4는 세 가지 플랫폼을 검증 단계별로 정리한 것으로, 17건 검증 사례의 전모를 요약한다.

3-1 부품·완성차 단계별 기능 저하 주파수의 분포

부품과 완성차의 기능 저하는 서로 다른 주파수 대역과 결합 모드에서 관찰되었다. 자율운행 골프카의 경우 부품(VPU·ACU)에서는 전원선 과도(ISO 7637-2 pulse 5b)에서만 기능 저하가 관찰되었고, 방사성 내성(ALSE, 100 V/m) 및 전도성 내성(BCI, 200 mA) 조건에서는 기능 저하가 관찰되지 않았다. 반면 동일 부품이 탑재된 완성차에서는 방사성 내성(30 V/m) 조건의 100 MHz 및 620 MHz에서 기능 저하가 발현되었다.

주목할 점은 인가 전계의 크기 관계이다. 부품 단계에서 100 V/m에 대하여 기능 저하가 관찰되지 않은 시료가,

표 4. 플랫폼별·검증 단계별 통합 매트릭스

Table 4. Integrated platform-by-stage verification matrix.

Platform	Component-level weakness	Vehicle-level ALSE weakness (MHz)	Improvement and re-verification
Standard GC	ESD·Surge	300~400	Pass after improvement
LSV	ESD damage	270~300	Pass on retest
Autonomous GC	Load dump damage	100/620	Component and BMS improvement

GC: golf cart.

완성차 단계에서는 이보다 약 10.5 dB 낮은 30 V/m에서 기능 저하를 나타내었다. 부품 단계에서 시료는 규정된 접지면 위에 정의된 길이의 하네스와 함께 배치되나, 완성차 상태에서는 차체와 실차 배선이 형성하는 경로를 통하여 시료 위치의 국부 전계가 증대되거나 부품 단계에 존재하지 않는 결합 모드가 형성될 수 있다. 동일한 분포 차이가 일반 골프카와 LSV에서도 관찰되었으며, 이는 부품 단계의 적합 판정만으로 완성차 단계의 적합성을 예측할 수 없음을 보여준다(그림 1).

3-2 차종 및 개발 단계에 따른 기능 저하 주파수의 차이

완성차 ALSE 조건에서 기능 저하가 관찰된 주파수는 차종에 따라 상이하였다. 여기서 일반 골프카트는 세대(generation)에 따라 2세대(2.0G)와 3세대(3.0G)로 구분되며, LSV는 2.0G 일반 골프카트를 미국 저속전기차 규제(최고속도·안전벨트 등)에 맞게 재설계한 차량, 자율운행 골프카는 3.0G 일반 골프카트에 자율운행 전장품을 탑재한 차량이다. 시험 결과 일반 골프카 완성차는 300~400 MHz 대역에서, LSV 완성차는 270~300 MHz 대역에서 제동·구동 기능의 저하가 나타났다. LSV가 2.0G의 재설계 차량인 점을 고려하면, 두 차종의 대역 차이는 재설계에 수반된 차체 및 배선 구조의 변화와 관련되는 것으로 판단된

Component level — time domain (frequency-independent)

Autonomous GC : VPU · ACU Load dump (ISO 7637-2 pulse 5b) → damage (IV)

Standard GC : IP panel ESD · surge (IEC 61000-4-2)

LSV : component ESD damage → design change

No degradation under 100 V/m radiated · 200 mA conducted immunity

Component-level compliance cannot predict vehicle-level compliance

Vehicle level, ALSE — frequency domain (ISO 11451-2, 30 V/m)

Standard GC

300~400 MHz

Braking · traction degradation

difference between vehicle types

LSV

270~300 MHz

Braking · traction degradation

Autonomous GC

100 MHz

power shutdown (Region III)

620 MHz

speed reduction

0 100 200 300 400 500 600 700 MHz

그림 1. 부품·완성차 단계별 기능 저하 주파수 분포

Fig. 1. Distribution of degradation frequencies at component and vehicle levels.

다. 또한 동일 규격으로 시험한 2.0G와 3.0G 일반 골프카트의 비교에서, 3.0G에서만 속도 저하가 3~4회 반복 재현되었고 2.0G에서는 기능 저하가 관찰되지 않았다. 3.0G의 결함은 EMC 차폐 패넌을 보강한 이후 해소되었다. 이는 세대 간 차폐 구조의 변화가 기능 저하 주파수의 위치에 영향을 미침을 시사한다. 다만 2.0G의 무결합 판정은 단일 측정에 근거하므로, 두 세대 간 기능 저하 주파수의 이동을 정량적으로 확정하기 위해서는 세대별 전 대역 반복 측정이 요구된다.

3.3 다층 검증 체계의 개선 효과 검증 기능

다층 검증 체계는 설계 개선 활동의 효과를 확인하는 도구로 작동하였다. 자율운행 부품의 경우, KATECH 정식 시험에서 전원선 과도(load dump, ISO 7637-2 pulse 5b, $U_s=+87$ V, 클램핑 전압 $+21.5$ V, $R_i=2$ Ω , $t_d=400$ ms, 5회 인가)에 의해 VPU·ACU 두 제어기가 모두 전원 차단 후 시료 소손(region IV)에 이르렀다. 이후 전원부 보호 설계를 보강한 뒤 동일 항목을 디버깅을 통해 재검증하여 적합(region I)으로 전환됨을 확인하였다. 동일한 결함 검출→개선→재검증의 순환이 3개 플랫폼 모두에서 재현되었다(그림 2). 주목할 점은 자율운행 제어기 2종이 방사성 내성(ALSE, 100 V/m)과 전도성 내성(BCI, 200 mA)에서는 기능 저하를 나타내지 않았으나, 전원선 과도(load dump)에서는 12 V·48 V 전압계와 제어기 종류를 막론하고 동일하게 소손되었다는 것이다. Pulse 5b의 클램핑 전압이 $+21.5$ V인 점을 고려하면, 소손은 정격을 초과하는 전압이 400 ms 동

안 지속되는 조건에서 전원 입력부의 보호 소자 정격 및 에너지 흡수 용량이 부족하였던 것에 기인한다.

이는 자율운행 제어 전장품의 단일 지배적 취약점이 전원선 전도성 과도임을 시사한다.

3.4 배터리팩 사양이 완성차 EMC에 미치는 영향

동일 자율운행 완성차에서 차량 배선과 팩 장착 위치를 유지한 채 배터리팩만을 교체(pack A ↔ pack B)하여 완성차 ALSE 시험을 수행하였다(표 3). 두 팩은 셀 화학종이 NCM 삼원계로 동일하나, 케이싱 재질이 각각 PC계 고분자와 알루미늄 하드케이스로 상이하다. 팩의 상세 사양은 공급사와의 비밀유지 계약에 따라 셀 화학종 및 케이싱 재질 수준으로 한정하여 기술한다.

Pack A는 100 MHz에서 전원이 차단되어(BMS 보호 동작) 차량이 정지하였고, pack B는 동일 조건에서 정상 동작하였다. 두 결과는 각각 3~4회 반복 시험에서 재현되었다. 한편 620 MHz 및 0.1~1 GHz 대역의 경미한 속도 감속과 계기판 LED 깜빡임(플리커) 현상은 두 팩에서 공통으로 나타났다.

두 팩의 거동 차이는 케이싱의 전자파 차폐 특성에서 비롯된 것으로 판단된다. 고분자 재질은 도전성이 없어 무선주파수 대역에서 차폐 효과를 제공하지 못하는 반면, 도체 케이스는 표피 효과에 의하여 내부로의 전자파 침투를 차단한다. 알루미늄의 표피 깊이는 100 MHz에서 약 8.5 μ m이므로, 통상의 케이스 두께에서 내부 회로는 실질적으로 차폐된 상태가 된다. 따라서 pack A에서는 100 MHz 전자파가 케이싱을 투과하여 내부 B+ 전압 센싱 회로에 결합하였고, BMS가 이를 전압 오류로 오판하여 보호 릴레이를 차단한 것으로 해석된다. 동일 BMS IC의 전압 센싱 경로 전자파 감수성은 선행 연구에서도 보고된 바 있다^{[11]~[13]}. 차량 배선과 장착 위치를 동일하게 유지한 상태에서 팩만을 교체하였으므로, 관찰된 거동 차이는 팩 외부 배선의 결합 경로가 아니라 팩 내부로의 침투 경로에 기인한다. 반면 620 MHz 대역에서 두 팩에 공통으로 나타난 속도 저하는 케이싱 차이와 무관하게 발현되었다. 이는 해당 결함의 원인이 배터리팩 내부가 아니라 구동계 또는 완성차 배선 수준에 있음을 시사하며, 부품 시험

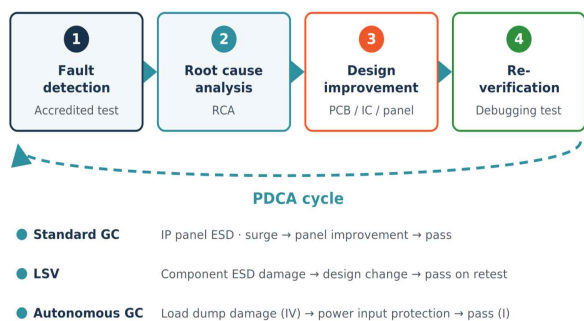


그림 2. 3개 플랫폼 공통 PDCA 개선 사이클
Fig. 2. Common PDCA improvement cycle across three platforms.

에서 검출되지 않았다는 점을 함께 고려하면 완성차 통합 이후에 발현되는 시스템 수준의 취약점으로 판단된다. 다만 두 팩은 케이싱 재질 외에 BMS 보호 로직의 구현 방식에서도 상이할 수 있다. BMS의 전압 오류 판정 및 릴레이 차단 조건은 공급사별로 소프트웨어 수준에서 달리 구현되며 본 연구에서는 그 세부 사항을 확인할 수 없었다. 따라서 본 비교는 단일 변수를 통제할 실험이 아니라, 팩 단위 사양의 차이가 완성차 거동에 미치는 영향을 확인한 비교로 해석되어야 한다. 한편 본 검증 체계에서 배터리팩은 단품 단위의 방사성 내성 시험을 거치지 않은 상태로 완성차 단계에 투입되었다. 이는 시험 설계상의 누락이 아니라, 고전압·고에너지 배터리팩을 전자파 무향실 내에서 강전계에 노출시키는 시험이 열폭주 및 화재의 위험을 수반하여 시험기관이 수용하기 어려운 데 기인한다. 무향실은 전파흡수체로 내장되어 있어 화재 발생 시 피해가 크고 소화 설비의 적용에도 제약이 있으므로, 배터리팩 단품에 대한 강전계 방사성 내성 시험을 수행할 수 있는 환경은 제한적이다. 그 결과 배터리팩의 전자파 내성은 완성차 단계에 이르러서야 검증되며, 본 사례에서 관찰된 100 MHz 전원 차단과 같은 치명적 결함도 완성차 시험 단계에서 최초로 검출되었다. 이 취약성은 BMS 펌웨어의 보호 로직을 두 단계로 재설계함으로써 시스템 수준에서 관리되었다. 1차 개선은 전압 오류 검출 시 즉시 릴레이를 차단하던 동작 순서를 변경하여, 속도를 안전 수준(10 km/h 이하)으로 감속하고 정지시킨 후 차단하도록 하는 것이었다. 2차 개선은 전압 오판 임계값을 정상 동작 전압 범위 $\pm 5\%$ 이내로 한정하여 전자파 노이즈 유입 시에도 오검출 없이 정상 동작을 유지하도록 하는 것이었다. 두 개선은 요구사항을 제시하고 공급사가 펌웨어에 반영하였으며, 세부 구현은 공급사의 설계 자산에 해당하여 본 논문에서는 다루지 않는다.

1차 개선 후 동일 100 MHz 조건에서 차량의 거동은 전원 차단에 의한 즉시 정지에서 감속 후 정지로 변경되었다. 두 상태는 모두 사용자의 재기동 조작을 요하므로 region III에 해당하나, 주행 중 급정지가 제거되어 위험 거동이 완화되었다. 2차 개선 후에는 동일 조건에서 기능 저하가 관찰되지 않아 region I으로 회복되었으며, 2차 개선 사양은 양산에 적용되었다. 본 사례는 하드웨어 수준에서 완전히

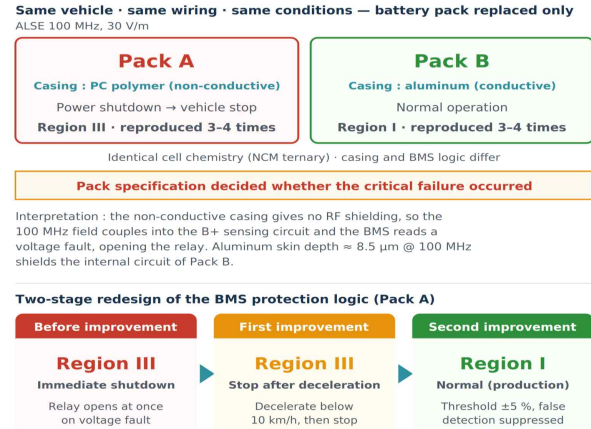


그림 3. 배터리 영향 및 BMS 보완 효과

Fig. 3. Battery influence and the effect of BMS mitigation.

제거되지 못한 EMC 취약성을 상위 시스템의 fail-safe 설계로 안전하게 관리할 수 있음을 보여준다(그림 3).

IV. 고 찰

본 검증 체계는 시험 방법·규격의 사전 타당성 검증(JIAT)→공인 정식 시험(KATECH)→디버깅 재검증으로 이어지는 3단계 거버넌스를 형성한다. JIAT 선행 검증은 ECE R10이 명확히 적용되지 않는 전동 모빌리티에서 시험 방법·성능 판정 기준의 적절성을 본 시험 전에 확인함으로써 재시험 비용과 결함 검출 지연을 줄이고, KATECH 공인 시험은 결과의 법적·학술적 신뢰성을, 디버깅 재검증은 개선 효과의 정량적 결함 추적성(traceability)을 각각 확보한다. 본 연구에서 완성차 시험 조건을 UN Regulation No. 10의 50 km/h 주행 모드에서 골프카의 최고 속도인 20 km/h 주행 모드로 환산하여 적용한 것도 이 선행 검증 단계에서 확정된 것이다.

배터리의 하드웨어 EMC 취약성이 BMS 펌웨어의 재설계로 관리된 점은, EMC 강건성이 하드웨어 단일 계층에서 확보되는 것이 아니라 하드웨어-펌웨어-시스템의 다계층 전략으로 확보되어야 함을 보여준다. 개선 전 BMS의 동작은 전압 오류 검출 시 즉시 릴레이를 차단하는 것이었는데, 이 동작은 전자파 노이즈에 의한 오검출 시 주행 중 급정지를 유발하므로 보호 기능 자체가 위험 원인으로 작용할 수 있는 구조이다. 1차 개선은 차단에 앞

서 감속을 수행하도록 동작 순서를 재정의하여 급정지에 따른 위험을 제거하였고, 2차 개선은 오판 임계값을 정상 동작 범위 이내로 한정하여 오검출 자체를 억제하였다. 즉 1차 개선은 결함이 발생하였을 때의 거동을 안전한 방향으로 유도하는 조치이고, 2차 개선은 결함의 발생 자체를 억제하는 조치로서, 두 조치는 서로 다른 계층에서 작용한다. 이러한 접근은 기능 안전 표준이 제시하는 설계 원칙과 맥을 같이한다. ISO 26262^[14]는 안전 메커니즘이 오작동하는 경우에도 위험한 상태로 전이하지 않도록 설계할 것과, 임계값 설정 시 경계 조건을 검토할 것을 요구한다. 본 사례의 1차 및 2차 개선은 각각 이러한 관점에 대응한다. 다만 본 연구에서는 위험원 분석 및 위험도 평가(HARA)를 수행하지 않았으므로, 개선 전 동작이 특정 ASIL 요구사항에 위반되는지를 판단할 수는 없다. 전자파 노이즈에 의한 보호 기능 오작동을 기능 안전의 관점에서 정량적으로 평가하기 위해서는 HARA와 EMC 검증을 연계한 별도의 분석이 요구된다.

또한 본 연구에서 배터리팩의 사양 차이가 완성차 EMC 거동의 차이로 나타난 결과는 배터리팩 단위의 신뢰성 평가와 직접적으로 연결된다. 동일 차량 조건에서 팩의 교체만으로 치명적 결함의 발현 여부가 같았다는 점은, 팩의 EMC 강건성이 셀 및 BMS의 전기적 설계뿐 아니라 케이싱의 차폐 설계에 의하여도 좌우됨을 시사한다. 케이싱 재질은 팩 사양서에 통상 기계적 강도, 방수 등급, 중량의 관점에서 기재되며 전자파 차폐 성능의 관점에서는 명시되지 않는 경우가 많다. 따라서 배터리팩 선정 단계의 신뢰성 평가 항목에 케이싱의 도전성 여부와 그에 따른 차폐 효과가 반영될 필요가 있다.

그런데 배터리팩 단품에 대한 방사성 내성 시험은 앞서 기술한 화재 위험으로 인하여 수행되기 어렵다. 이는 전동 모빌리티의 EMC 검증 체계가 지닌 구조적 공백이며, 개발 후반부에 설계 변경 부담이 집중되는 결과를 초래한다. 본 사례에서도 배터리 하드웨어의 교체가 아니라 BMS 펌웨어 수준의 보완으로 대응할 수밖에 없었던 배경에는 이러한 검증 시점의 제약이 있다. 이를 보완하기 위한 방향으로 셀을 모의 부하로 대체한 상태에서 BMS 보드 및 센싱 회로의 내성만을 검증하는 방법, 팩 케이싱의 차폐 효과를 IEEE Std 299^[15] 등에 근거하여 별도로 측정하고 내부

회로의 내성 결과와 조합하여 평가하는 방법을 고려할 수 있다. 본 사례에서 케이싱 재질이 결함 발현 여부와 관련되었다는 점은 후자의 실효성을 시사한다.

본 검증 체계는 결함의 원인을 계층별로 분리하여 식별하는 기능을 수행하였다. 100 MHz의 전원 차단은 팩의 교체로 발현 여부가 달라졌으므로 배터리 시스템 수준의 원인, 620 MHz 및 0.1~1 GHz 대역에서 두 팩에 공통으로 나타난 속도 저하와 계기판 LED 깜빡임은 팩의 종류와 무관하게 발현되었으므로 차량 플랫폼 수준의 원인에 각각 귀속된다. 후자는 배터리팩의 교체가 아니라 구동계 배선 및 차폐 설계의 개선을 통하여 대응되어야 한다. 이와 같이 결함 원인을 계층별로 귀속시키는 것은 개선 자원을 적절한 설계 영역에 배분하는 근거를 제공한다.

V. 결 론

본 논문은 일반 골프카에서 LSV를 거쳐 자율운행 골프카에 이르는 세 가지 플랫폼에 걸쳐 부품-완성차 다층 EMC 검증 체계를 구축하고 17건의 검증 사례를 통합 분석하였다.

분석 결과는 다음과 같다. 첫째, 부품 단계와 완성차 단계에서 기능 저하가 관찰된 주파수는 서로 다른 대역에 분포하였으며, 부품 단계에서 100 V/m에 대하여 기능 저하를 나타내지 않은 시료가 완성차 단계에서는 약 10.5 dB 낮은 30 V/m에서 기능 저하를 나타내었다. 이는 부품 단계의 적합 판정만으로 완성차 단계의 적합성을 예측할 수 없음을 보여준다. 둘째, 완성차 ALSE 조건에서 기능 저하가 관찰된 주파수는 차종 및 세대에 따라 상이하였으며, 차체 구조의 변화가 그 위치에 영향을 미침을 시사하였다. 셋째, 다층 검증 체계는 결함 검출-개선-재검증의 순환을 통하여 설계 개선 효과를 확인하는 도구로 기능하였다. 특히 동일 차량·동일 배선 조건에서 배터리팩을 교체한 비교를 통하여, 셀 화학종이 동일하고 케이싱 재질이 상이한 두 팩 사이에서 치명적 결함의 발현 여부가 같음을 확인하였다. 이 결함은 BMS 펌웨어 보호 로직의 2단계 재설계를 통하여, 전원 차단에 의한 즉시 정지(region III)에서 감속 후 정지(region III)를 거쳐 정상 동작(region I)으로 회복되었으며 최종 사양은 양산에 적용되었다. 이는 하드웨어 수

준에서 제거되지 못한 EMC 취약성을 상위 시스템의 fail-safe 설계로 관리할 수 있음을 보여준다.

본 검증 체계는 ECE R10이 명확히 적용되지 않는 전동 모빌리티에서 안전 무결성을 확보하기 위한 실용적 방법론을 제공한다. 향후 과제로는 배터리팩 단품에 대한 방사성 내성 검증 방법의 확립, 배터리 화학종 및 셀 형태에 따른 완성차 EMC 취약 주파수 데이터베이스의 구축, 자율운행 전장품의 EMC 검증과 ISO 26262의 위험원 분석(HARA)을 연계한 통합 평가 체계의 개발, 그리고 본 체계를 전동 골프카 EMC 검증의 산업 표준안으로 발전시키는 연구가 요구된다.

References

- [1] *Road Vehicles – Vehicle Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy – Part 2: Off-Vehicle Radiation Sources*, ISO 11451-2, International Organization for Standardization, Geneva, Jun. 2015.
- [2] *Road Vehicles – Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy – Part 2: Absorber-Lined Shielded Enclosure*, ISO 11452-2, International Organization for Standardization, Geneva, Jan. 2019.
- [3] *Road Vehicles – Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy – Part 4: Harness Excitation Methods*, ISO 11452-4, International Organization for Standardization, Geneva, Apr. 2020.
- [4] *Road Vehicles – Electrical Disturbances from Conduction and Coupling – Part 2: Electrical Transient Conduction along Supply Lines Only*, ISO 7637-2, International Organization for Standardization, Geneva, Mar. 2011.
- [5] *Road Vehicles – Electrical Disturbances from Conduction and Coupling – Part 3: Electrical Transient Transmission by Capacitive and Inductive Coupling via Lines Other than Supply Lines*, ISO 7637-3, International Organization for Standardization, Geneva, Jul. 2016.
- [6] *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and Measurement Techniques – Electrostatic Discharge Immunity Test*, IEC 61000-4-2 Revised, International Electrotechnical Commission, Geneva, Dec. 2008.
- [7] *Vehicles, Boats and Internal Combustion Engines – Radio Disturbance Characteristics – Limits and Methods of Measurement for the Protection of On-Board Receivers*, CISPR 25, International Special Committee on Radio Interference, Geneva, Dec. 2021.
- [8] *Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to Electromagnetic Compatibility*, UN Regulation No. 10, Rev. 6, UN Economic Commission for Europe, Geneva, Oct. 2019.
- [9] *Road Vehicles – Vehicle Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy – Part 1: General Principles and Terminology*, ISO 11451-1, International Organization for Standardization, Geneva, Jun. 2015.
- [10] *Road Vehicles – Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy – Part 1: General Principles and Terminology*, ISO 11452-1, International Organization for Standardization, Geneva, Jun. 2015.
- [11] O. Aiello, "Electromagnetic susceptibility of battery management systems' ICs for electric vehicles: Experimental study," *Electronics*, vol. 9, no. 3, p. 510, Mar. 2020.
- [12] O. Aiello, P. Crovetto, and F. Fiori, "Susceptibility to EMI of a battery management system IC for electric vehicles," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Dresden, Aug. 2015, pp. 749-754.
- [13] A. Doridant, K. Abouda, P. Givelin, and B. Thibaud, "Battery management system demonstrator board design using EMC system simulation," in *Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Barcelona, Sep. 2019, pp. 427-432.
- [14] *Road Vehicles – Functional Safety*, ISO 26262, International Organization for Standardization, Geneva, Dec. 2018.
- [15] *IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*, IEEE Std 299, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, Sep. 2006.

윤 영 찬 [디와이(주)/책임]

<https://orcid.org/0009-0001-6580-5956>



2008년 2월: 울산대학교 전기제어공학과 (공학사)
2019년 8월: 전북대학교 전기및시스템공학 (공학석사)
2026년 2월: 전북대학교 산업정보시스템공학과 (공학박사 수료)
2013년: 동양기전(주)

2014년: KTE(주)

2014년 10월~현재: 디와이(주) 연구개발1팀 신뢰성담당 책임
[주 관심분야] 신뢰성 분석 및 시험/EMC/이차전지 등

홍 현 귀 [한국자동차연구원/센터장]

<https://orcid.org/0000-0001-9452-0987>



2010년 2월: 한밭대학교 제어계측공학과 (공학사)
2017년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2006년 6월~현재: 한국자동차연구원 전파적합성연구센터(영광) 센터장
2020년 11월~현재: CISPR D 자동차 분

과, ISO TC22 WG3 전문위원

[주 관심분야] RF, Automotive EMI/EMC 등

백 장 현 [전북대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0340-4134>



1986년 2월: 서울대학교 산업공학과 (공학사)
1988년 2월: 서울대학교 산업공학과 (공학석사)
1988년 4월~1988년 8월: 한국과학기술원 경제분석실 위촉연구원
1997년 2월: 서울대학교 산업공학과 (공학박사)

1989년 6월~1998년 2월: 한국전자통신연구원 교환기술연구단, 이동통신연구단 선임연구원

1998년 6월~2004년 9월: 한국전자통신연구원 이동통신연구단, 초빙연구원

1998년 3월~현재: 전북대학교 산업정보시스템공학과 교수
[주 관심분야] 경영과학, 확률모형, 신뢰성분석, 정보통신 등