

## 자동차 전장품의 전자파 방출 평가 숙련도 시험에 관한 연구

### Proficiency Testing of Electromagnetic Emissions from Automotive Electronic Components

김현지 · 이세원 · 민지원 · 김동균 · 최범진 · 이헌수\*

Hyun-Ji Kim · Se-Won Lee · Ji-Won Min · Dong-Kyun Kim · Beom-Jin Choi · Houn-Soo Lee\*

#### 요 약

본 연구는 자동차 전장품의 전자파 방출(EMI: electromagnetic interference) 평가에 있어 비교 숙련도 시험의 설계 및 결과 분석을 통해 시험의 신뢰성과 타당성을 검증하였다. 현재 자동차 전장 시스템의 복잡성 증가와 함께 전자파 간섭 문제가 심화됨에 따라, 전장품의 EMC 적합성 검증 및 이를 수행하는 기관과 전문가의 역량 평가가 필수적인 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 비교 숙련도 시험의 설계 원칙과 평가 기준을 체계적으로 제시하였으며, 실험 데이터를 기반으로 시험 결과를 분석하여 숙련도 평가의 활용 가능성을 논의하였다. 이를 통해 EMC 평가 분야의 기술 표준화와 전문성 강화를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

#### Abstract

This study aims to design and analyze a comparative proficiency-testing framework for evaluating the electromagnetic compatibility (EMC) of automotive electronic components, thereby verifying the reliability and validity of comparative proficiency testing. As the complexity of modern automotive electronic systems increases with the severity of electromagnetic interference issues, assessing the EMC compliance of electronic components as well as the capabilities of institutions and experts conducting these evaluations is critical. This study systematically presents the principles and criteria for designing comparative proficiency tests and analyzes the test results based on experimental data to discuss their practical applicability. The findings are expected to provide foundational data for standardizing techniques and enhancing the expertise in EMC evaluation.

Key words: EMC(Electromagnetic Compatibility), EMI(Electromagnetic Interference), EMS(Electromagnetic Susceptibility), Proficiency Testing

#### I. 서 론

자동차 전장품의 EMC 숙련도 평가는 전원 시스템, 하네스, 차체 구조 등 시스템 요소의 영향을 크게 받으며,

단순 측정 능력 외에도 규격 해석과 셋업 구성 등 시험자의 종합적 이해도가 중요한 변수로 작용한다. 이에 따라 일반적인 EMC 평가와는 차별화된 숙련도 평가 체계가 요구된다. 이러한 평가 체계의 신뢰성과 국제적 정합성을

「이 연구는 2024년 (주)현대자동차 전자파적합성(EMC) 지정시험기관간 비교숙련도의 일환으로 수행되었음.」

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

\*현대자동차 전자신뢰성시험팀(Hyundai Motor Group, Electronics Reliability Evaluation Team)

· Manuscript received December 18, 2024 ; Revised February 16, 2025 ; Accepted April 17, 2025. (ID No. 20241218-002S)

· Corresponding Author: Hyun-Ji Kim (e-mail: kimhj@katech.re.kr)

확보하기 위해, ISO/IEC 17025:2017은 시험 및 교정 기관의 정확성과 품질 시스템을 보장하는 필수 인증 기준으로 적용되며<sup>[1]</sup>, ISO/IEC 17043:2023은 숙련도 평가의 운영과 결과 해석에 대한 기준을 제공한다. 특히, 해당 기준에 따라 수행된 숙련도 평가는 다기관 간 시험 결과의 일치 여부를 통해 시험소의 기술적 능력을 보완적으로 입증할 수 있는 수단으로 기능한다<sup>[2],[3]</sup>.

본 논문에서는 전자파 방출 평가 4가지 항목에 대해 기존 방식보다 확대된 주파수와 균일한 레벨 인가가 가능한 조건을 설계하여 자동차 전장품을 평가하는 시험소 30개 기관에서 결과를 측정하였다. 측정한 결과를 바탕으로 향후 숙련도 평가 방법 개선 방향을 제안한다.

## II. 전도성 방출(Conducted Emission)

전도성 방출은 차량의 전원 라인에서 유기되는 전자파를 전압법 또는 전류법으로 측정하는 시험방법으로 CISPR 25 국제규격의 시험 방법을 참조한다<sup>[4]</sup>.

기존의 숙련도 측정 방법은 특정 몇 개의 주파수에 대해서 콧 생성기를 통해 DUT(device under test)의 위치에 셋업하여 방출 노이즈를 측정하는 방식이었다.

그림 1의 인가 레벨 특성에서 확인할 수 있듯이, 신호 발생기는 전체 주파수 범위에서 균일한 신호 출력을 제공하여 반복 측정 시 일관된 결과를 도출할 수 있다. 반면, 콧 생성기는 주파수에 따라 인가 레벨이 일정하지 않은 특성을 보인다. 특히, 배터리 충전식 콧 생성기의 경우, 시간 경과 및 배터리 잔량에 따라 출력 신호가 변동될 가능

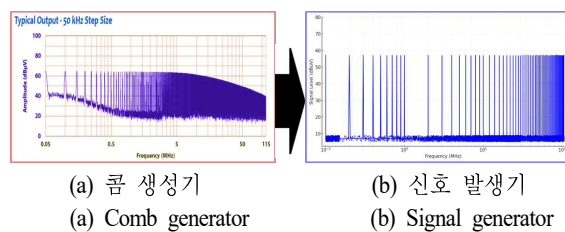


그림 1. 콧 생성기와 신호 발생기의 주파수별 인가레벨 특성

Fig. 1. Frequency-dependent input level characteristics of the Comb generator and Signal generator.

성이 있어, 안정적인 인가 레벨을 유지하기 어려운 한계를 가진다<sup>[5]</sup>. 이러한 단점을 보완하고자 본 논문에서는 신호 발생기를 활용하여 전 주파수 대역에서 일정한 인가레벨을 구현한 숙련도 평가방법을 설계하여 측정하였다.

### 2-1 전압법(Voltage Method)

전도성 방출 전압법은 전원선의 전자파를 AN(artificial network)의 전압 관측 단자에서 측정하는 방법이다. 그림 2와 같이 신호 발생기와 AN을 N-타입 RF 커넥터를 통해 RF 케이블로 직접 연결하여 노이즈를 인가하는 방식이다.

AN에는 그림 3의 AN 지그를 연결하며, AN의 제조사에 따라 구조가 다르기 때문에 대부분의 시험소에서 사용하는 Rohde & Schwarz 또는 Schwarzbeck사의 AN 지그를 준비하였다.

신호 발생기에서는 측정하고자 하는 주파수 100

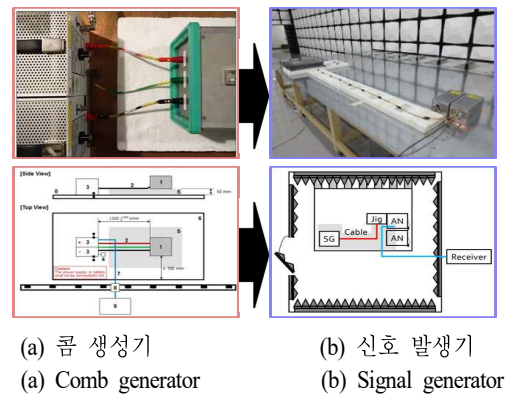


그림 2. 비교숙련도 전도성 방출 전압법 셋업 예시

Fig. 2. Example setup for comparative proficiency in conducted emission voltage method.

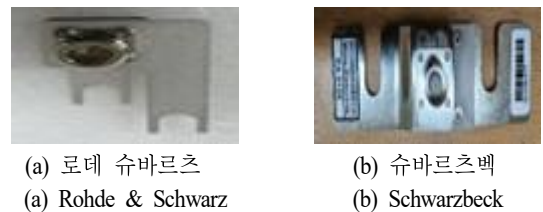


그림 3. AN 지그

Fig. 3. AN jig.

kHz~108 MHz 대역에서 주파수를 변경하면서 인가하며, 인가레벨은 -50 dBm으로 설정한다. 신호 발생기의 임피던스는 50 Ω에 맞추어져 있지만 AN의 임피던스 특성 곡선은 저주파수에서는 낮은 임피던스 특성을 보인다. 따라서 신호 발생기에서 일정한 인가레벨을 인가하더라도 AN에 분배된 전압이 낮기 때문에 저주파수 측정값은 낮게 측정이 된다.

$$V_{AN} = 2 \times \frac{Z_{AN}}{(Z_{AN} + Z_{SG})} \times V_{SG} \quad (1)$$

$V_{AN}$  : AN의 전압,  $V_{SG}$  : 신호 발생기의 전압

$Z_{AN}$  : AN의 임피던스,  $Z_{SG}$  : 신호발생기의 임피던스

CISPR 25의 Table E.1에  $Z_{AN}$  임피던스 테이블로 측정값을 식 (1)과 같이 계산하여 예측한 값이 표 1과 같다.

식 (1)에서 2를 곱하는 것은 신호 발생기의 경우 부하가 50 Ω이라고 생각하고 내부 임피던스 50 Ω과 함께 전압을

표 1. 비교숙련도 전도성 방출 전압법 측정 결과 추정치  
Table 1. Estimated results of comparative proficiency conducted emission voltage method measurements.

Frequency [MHz]	AN Measurement-based estimation dB(μV)		
	Nominal value	Lower tolerance	Upper tolerance
0.1	38.6	36.8	40.1
0.15	41.9	40.1	43.3
0.2	44.1	42.3	45.5
0.3	47.0	45.4	48.4
0.4	49.0	47.4	50.2
0.5	50.4	48.9	51.6
0.7	52.2	50.8	53.3
1	53.8	52.5	54.8
1.5	55.1	53.9	56.1
2	55.8	54.6	56.6
2.5	56.1	55.0	56.9
3	56.3	55.2	57.1
4	56.5	55.4	57.3
5	56.6	55.5	57.4
7	56.7	55.6	57.5
10	56.8	55.7	57.5
15	56.8	55.7	57.5
20	56.8	55.7	57.5
30	56.8	55.7	57.6
50	56.8	55.7	57.6
100	56.8	55.7	57.6

예측하여 설정한 전압대비 2배의 전압을 인가하도록 되어 있기 때문이다. 계산된 비교 숙련도 전압법의 측정 결과에서 추정된 전압을 로그 스케일로 변환한 값은 표 1에 제시되어 있다. 해당 값은 이론적 추정치이며, 실제 측정 시 사용한 케이블 및 커넥터의 삽입손실, 시험 환경 내 주변 전자파 간섭, 측정 장비의 보정 상태 및 정확도 등 다양한 요인에 의해 편차가 발생할 수 있다.

숙련도 샘플 제공기관에서 초기 측정시에는 이론 추정치에 활용하거나 기관 내 다른 챔버 또는 시험자 데이터를 쌓는 것이 중요하며, 이렇게 쌓인 데이터를 기반으로 식 (2)의  $Z'$ -Score를 통해 숙련도 참가 기관의 측정치가 정상범위에 있는지 판단할 수가 있다. 식 (2)의  $X_{Avg.robust}$ 는 이상값 영향을 줄인 평균,  $\sigma_{robust}$ 는 이상값의 영향을 줄인 표준편차이다.

$$Z - Score = \frac{X - X_{Avg.robust}}{(\sigma_{robust})} \quad (2)$$

$X_{Avg.robust}$  : 이상값 영향을 줄인 평균,

$\sigma_{robust}$  : 이상값의 영향을 줄인 표준편차

전도성 방출 전압법 측정 결과는 그림 4와 같으며, 30 개 기관의 측정 결과를  $Z'$ -Score로 계산하여 그래프를 그린 것이 그림 5이다.

$Z'$ -Score가 2 이내의 경우 정상 범위로 볼 수 있으며<sup>[7]</sup>, 대부분의 주파수 대역에서 2 이내의 범위를 갖는다. 몇몇 시험소에서 특정 주파수 결과의 경우 2를 벗어나는 결과도 있으며, 3 이내의 경우 주의 필요, 4 이내의 경우 경고 필요로 4 이상의 결과를 보인 시험소는 0 %인 것으로 확인되었다. 전체 측정 주파수는 70개이며, 해당 범위를 몇

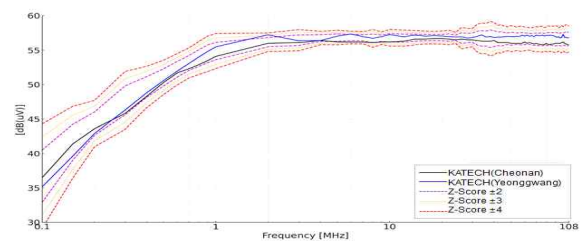


그림 4. 비교숙련도 전도성 방출 전압법 측정 결과  
Fig. 4. Measurement results of comparative proficiency in conducted emission voltage method.

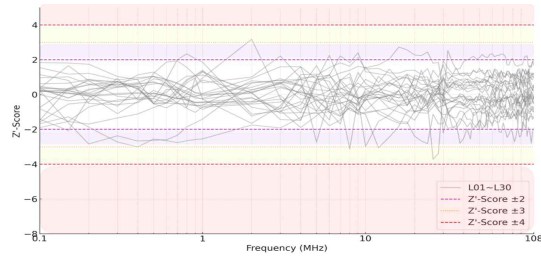


그림 5. 비교숙련도 전도성 방출 전압법 결과 분석  
Fig. 5. Analysis of comparative proficiency results for conducted emission voltage method.

개 주파수가 벗어나는지 백분율을 구해서 30개 시험소의 평균을 계산한 것이 표 2의 맨 우측열의 결과이다.

## 2-2 전류법(Current Method)

전도성 방출 전류법은 하네스의 전자파를 전류 프로브에 체결하여 측정하는 방법이다. 전체 셋업은 그림 6과 같으며, 그림 7과 같이 신호 발생기와 AN 사이에 전류 프로브를 체결할 수 있는 고정 장치를 중간에 연결하여 이 고정 장치에 전류 프로브를 체결한다.

전류 프로브 전용 고정 장치가 있으면 해당 장비를 사용하고, 없더라도 BCI 교정시 사용하는 고정 장치를 활용하여 진행하였다.

신호 발생기에서는 측정하고자 하는 주파수 100 kHz ~ 245 MHz 대역에서 주파수를 변경하면서 인가하며, 인가레벨은 -30 dBm으로 설정한다.

신호 발생기의 임피던스는 50 Ω에 맞추어져 있지만 AN의 임피던스 특성 곡선은 저주파수에서는 낮은 임피

표 2. 비교숙련도 전도성 방출 전압법 Z'-Score 분석  
Table 2. Z'-Score analysis of comparative proficiency in conducted emission voltage method.

Z'-Score	Description (Severity level)	Average probability within the specified range
<   2	Normal range (Low)	95.3 %
<   3	Caution advised (Moderate)	99.7 %
<   4	Warning required (High)	100.0 %
>   4	Critical condition (Extreme)	0 %

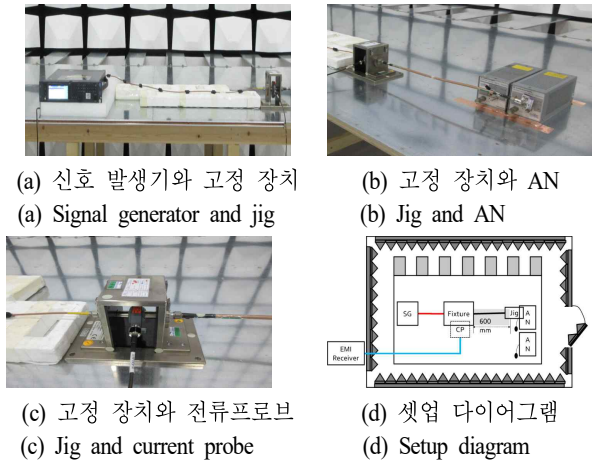


그림 6. 비교숙련도 전도성 방출 전류법 셋업 예시  
Fig. 6. Example setup for comparative proficiency in conducted emission current method.

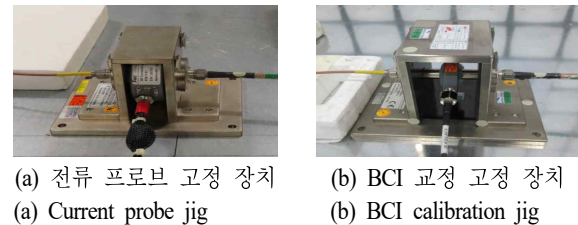


그림 7. 전류 프로브 고정 장치 예시  
Fig. 7. Example of a current probe fixture.

던스 특성을 보인다. 따라서 신호 발생기에서 일정한 인가레벨을 인가하더라도 AN 임피던스가 낮은 저주파수 대역에서는 전류가 높게 측정된다.

$$I_{Fixture} = 2 \times \frac{V_{SG}}{(Z_{AN} + Z_{SG})} \quad (3)$$

$V_{SG}$ : 신호 발생기의 전압,  $Z_{AN}$ : AN의 임피던스,  
 $V_{SG}$ : 신호발생기의 임피던스

CISPR 25의 Table E.1에 AN 임피던스 테이블로 측정 값을 식 (3)과 같이 계산하여 예측한 값이 표 3과 같다.

식 (3)에서 2를 곱하는 것은 신호 발생기의 경우 부하가 50 Ω이라고 생각하고 내부 임피던스 50 Ω과 함께 전압을 예측하여 설정한 전압대비 2배의 전압을 인가하도록 되어 있기 때문이다. 계산된 비교숙련도 전류법 측정

표 3. 비교숙련도 전도성 방출 전류법 측정 결과 추정치  
Table 3. Estimated results of comparative proficiency conducted emission current method measurements.

Frequency [MHz]	AN Measurement-based estimation dB(μA)		
	Nominal value	Lower tolerance	Upper tolerance
0.1	48.5	48.4	48.6
0.15	48.2	48.1	48.4
0.2	48.0	47.8	48.2
0.3	47.5	47.3	47.8
0.4	47.1	46.8	47.5
0.5	46.7	46.3	47.1
0.7	46.1	45.6	46.6
1	45.3	44.7	46.0
1.5	44.5	43.9	45.3
2	44.1	43.4	44.9
2.5	43.8	43.1	44.7
3	43.7	42.9	44.5
4	43.5	42.7	44.4
5	43.4	42.6	44.3
7	43.3	42.5	44.2
10	43.3	42.5	44.2
15	43.3	42.4	44.1
20	43.2	42.4	44.1
30	43.2	42.4	44.1
50	43.2	42.4	44.1
100	43.2	42.4	44.1

결과 추정치 전류를 로그 스케일로 변환하면 표 3과 같은 값이 계산되며, 이론적인 추정치일뿐 실제 측정시에 다양한 요인에 의해 편차가 발생할 수 있다.

제안한 비교숙련도 전도성 방출 평가법은 고정 장치의 내심 도선에 전류 프로브를 체결하는 차동 모드 전류(differential mode current)를 측정한다. EMI 측정 리시버에서 전류 프로브로부터 측정된 전압에 교정된 전류 프로브의 전송 임피던스(transfer impedance)를 나누어 식 (4)와 같이 전류를 환산하여 계산한다. 전자파 측정에서 로그 스케일로 측정값을 도출하며, 양변에 log를 취하면 측

$$I_{CurrentProbe} = \frac{V_{EMIRceiver}}{Z_{Transfer Impedance}}$$

$$I_{dB(uA)} = V_{dB(uV)} - Z_{dB(\Omega)} \quad (4)$$

$V_{EMIRceiver}$  : 리시버에서 측정된 전압,

$Z_{Transferimpedance}$  : 전류프로브의 전송 임피던스

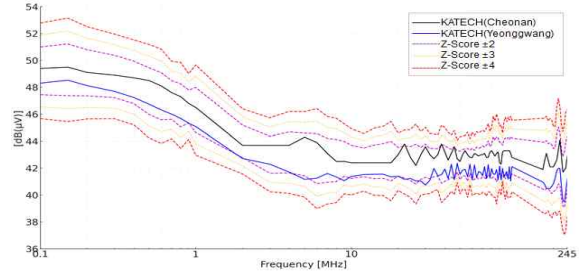


그림 8. 비교숙련도 전도성 방출 전류법 측정 결과

Fig. 8. Measurement results of comparative proficiency in conducted emission current method.

정된 전압[dB(μV)]에서 전송 임피던스[dB(Ω)]를 빼는 형태로 계산된다.

전도성 방출 전류법 측정 결과는 그림 8과 같으며, 30개 기관의 측정 결과를 Z'-Score로 계산하여 그래프를 그린 것이 그림 9이다. 대부분의 시험소에서 표 4와 같이 Z'-Score가 |2| 이내인 확률이 95.4 %이며, 특정 몇몇 주파수에서 주의가 필요한 영역인 |2|에서 |3| 수준으로 측정되었다.

전체 측정 주파수는 85개이며, 해당 범위를 몇 개 주파수가 벗어나는지 백분율을 구해서 30개 시험소의 평균을 계산한 것이 표 4의 맨 우측열의 결과이다.

### Ⅲ. 방사성 방출(Radiated Emission)

방사성 방출은 차량의 전장품 및 하네스에서 방출되는 전자파를 안테나를 통해서 측정하는 시험방법으로 전기장 방출은 CISPR 25, 자기장 방출은 MIL-STD-461G 시험

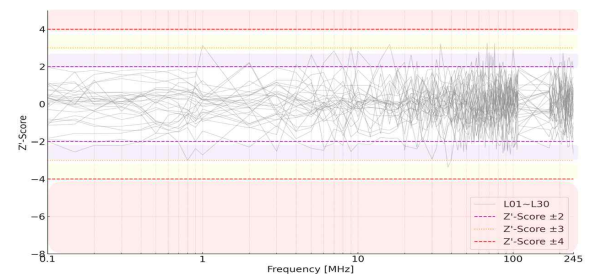


그림 9. 비교숙련도 전도성 방출 전류법 결과 분석

Fig. 9. Analysis of comparative proficiency results for conducted emission current method.



표 4. 비교속련도 전도성 방출 전류법 Z'-Score 분석

Table 4. Z'-Score analysis of comparative proficiency in conducted emission current method.

Z'-Score	Description (Severity level)	Average probability within the specified range
$<  2 $	Normal range (Low)	95.4 %
$<  3 $	Caution advised (Moderate)	99.9 %
$<  4 $	Warning required (High)	100.0 %
$>  4 $	Critical condition (Extreme)	0 %

방법을 참조한다<sup>[4],[6]</sup>.

전도성 방출과 마찬가지로 기존의 속련도 측정 방법인 콤팩트에서 전기장 방출의 경우 신호 발생기, 자기장 방출의 경우 저주파수 특성상 광형 생성기를 통해 DUT의 위치에 셋업하여 방출 노이즈를 측정하는 방식으로 변경하였다.

### 3-1 전기장(Electric Field)

전기장 방출 측정은 CISPR 25에 기술된 그림 10과 같이 셋업하여 표 5와 같이 4가지 종류의 안테나를 통해 전기장을 측정한다.

비교속련도 측정 방법은 CISPR 25의 Annex I에 서술된 “ALSE performance validation 150 kHz to 1 GHz”의 방법을 사용한다. 해당 방법은 1 GHz 이하 주파수 대역에 대해서 수직과 수평의 최대값에 대한 측정 결과를 시뮬레이션한 결과인 CISPR 25의 Table I.1값 대비  $\pm 6$  dB 이내인 확률이 90 % 이상일 때 만족조건으로 하고 있다. 하지만 실제 평가시 수직과 수평의 측정 결과를 각각 도출해 내며, 1 GHz 이상에 대해서도 측정을 하기 때문에 해당

표 5. 전기장 방출 측정 안테나 종류

Table 5. Types of antennas for electric field emission measurements.

Antenna name	Frequency
Active rod antenna	150 kHz~30 MHz
Biconical antenna	30 MHz~200 MHz
Log-Periodic antenna	200 MHz~1 GHz
Horn antenna	1 GHz~5.925 GHz

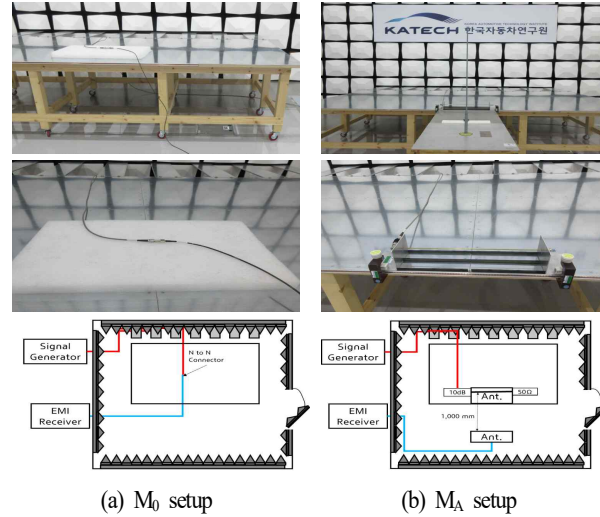


그림 10. 비교속련도 방사성 방출 전기장 셋업 예시

Fig. 10. Example setup for comparative proficiency in radiated emission electric field measurements.

방법으로 전 주파수대역을 측정하고 수직과 수평에 대한 결과 측정 결과를 별도로 도출하여 분석한다.

Long-wire antenna는 CISPR 25의 Figure I.4에 나온 구조와 동일하며, 한쪽 끝은 50  $\Omega$  종단 저항을 체결하고 다른 한쪽은 챔버 외부의 신호 발생기와 10 dB 감쇄기를 연결하여 체결한다.

측정에 앞서 그림 11과 같이 셋업한 후 VSWR을 측정하여  $VSWR < 1.2$  인지 확인하여 정상여부를 파악한 후 측정한다. VSWR은 네트워크 분석기를 통해 S-parameter  $S_{11}$ 을 측정한 결과를 식 (5)를 통해 계산하여 얻을 수 있다. 단, 1 GHz 이상 주파수 대역의 경우 해당 안테나가 1 GHz 이하 조건으로 설계된 안테나이므로 해당되지 않는다.

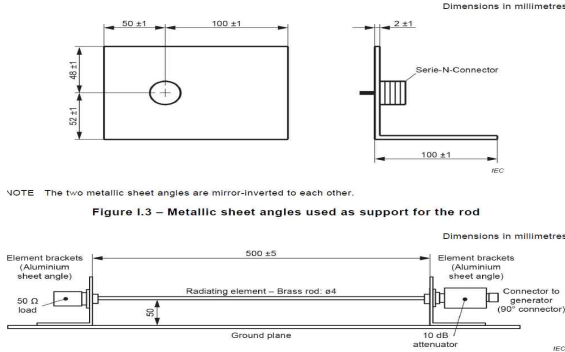
$$VSWR = \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} = \frac{\left(1 + 10^{\frac{S_{11}[dB]}{20}}\right)}{\left(1 - 10^{\frac{S_{11}[dB]}{20}}\right)} \quad (5)$$

VSWR : 전압 반사비,  $S_{11}$  : 반사계수

신호 발생기에서는 측정하고자 하는 주파수 100 kHz ~ 6 GHz 대역에서 주파수를 변경하면서 인가하며, 인가 레벨은 0 dBm(107 dB( $\mu$ V))로 설정한다. CISPR 25에는 13 dBm(120 dB( $\mu$ V))로 되어 있으나 신호 발생기 사양에 따라 인가레벨을 조정하였으며,  $M_A$  측정값과  $M_0$  측정값



(a) 롱 와이어 안테나  
(a) Long-wire antenna



(b) 구조  
(b) Structure

그림 11. 롱 와이어 안테나 및 구조<sup>[4]</sup>  
Fig. 11. Long-wire antenna and structure<sup>[4]</sup>.

의 차이를 도출하여 결과를 판단하기 때문에 선형성이 확보되는 인가레벨임이 확인되면 낮은 인가레벨에서 측정결과를 신뢰할 수 있다. 따라서 식 (6)의 120 dB(μV)의 값을 인가레벨로 변경하여 수식적용을 하지 않는다.

$$\begin{aligned} E_{eq} &= 120 \text{ dB}(\mu V) + (M_A - M_0) + k_{AF} \\ &= 120 \text{ dB}(\mu V) + S_{21} + k_{AF} \end{aligned} \quad (6)$$

$E_{eq}$  : 등가 전기장 강도,  $M_A$  : 측정된 전압 전력레벨,  
 $M_0$  : 기준 전압 레벨,  $S_{21}$  : 전송계수,  $k_{AF}$  : 안테나 계수

CISPR 25에 Table E.1에 있는  $E_{eq,max,ref}$ 의 경우 수평은 30 MHz~1 GHz에서  $E_{eq,hor,ref}$ 와 동일하게 적용하며, 수직의 경우 150 kHz~30 MHz만 적용하고, 30 MHz~1 GHz의 경우 30개 시험소 결과로 식 (7)의 결과를 로버스트 평균을 적용하여 판단하였다.

$$\begin{aligned} \Delta_{ver} &= E_{eq,ver} - E_{eq,ver,ref} \\ \Delta_{hor} &= E_{eq,hor} - E_{eq,hor,ref} \end{aligned} \quad (7)$$

$\Delta_{ver}$  : 수직 편파에서의 전기장 차이

$\Delta_{hor}$  : 수평 편파에서의 전기장 차이

$E_{eq,ver}$  : 측정된 수직 편파 등가 전기장 세기

$E_{eq,ver,ref}$  : 기준 조건에서 수직 편파 등가 전기장 세기

$E_{eq,hor}$  : 측정된 수평 편파 등가 전기장 세기

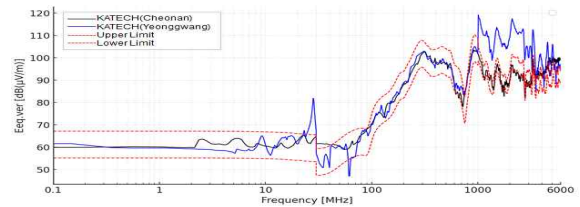
$E_{eq,hor,ref}$  : 기준 조건에서의 수평 편파 등가 전기장 세기

그림 12는 비교숙련도 방사성 방출 전기장 측정 결과이며, 1 GHz 이하의 경우 기존 CISPR 25의 방법을 적용하였기에 시험소 간 편차가 크지 않으며, 1 GHz 이상의 경우 해당 주파수에 맞게 설계된 안테나가 아니다 보니 편차가 많이 발생하는 것을 볼 수 있다.

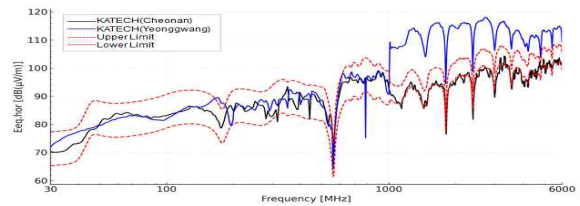
수평의 경우 30 MHz~1 GHz 주파수 대역에서 기존 CISPR 25에 제시된  $E_{eq,hor}$  값의  $\pm 6$  dB 이내에 들어오는 시험소별 확률의 평균이 95.32 %이며, 수직의 경우 100 kHz~1 GHz 대역중에서 30 MHz~1 GHz의 경우만 제시된 기준값으로 하였으며,  $E_{eq,ver}$  값의  $\pm 6$  dB 이내에 들어오는 시험소별 확률의 평균이 88.09 %인 것을 그림 13에서 확인할 수 있다.

편차가 많이 발생하는 10 MHz~100 MHz 대역과 500 MHz~600 MHz 대역의 제한 범위를 늘리거나 시험소별 편차를 줄이기 위한 연구가 추가 연구가 필요할 것으로 보이며, 1 GHz 이상 주파수 대역에 적합한 long-wire antenna도 CISPR 25에서 논의하고 있다.

### 3-2 자기장(Magnetic Field)



(a) 수직편파  
(a) Vertical



(b) 수평편파  
(b) Horizontal

그림 12. 비교숙련도 방사성 방출 전기장 측정 결과  
Fig. 12. Comparative proficiency radiated emission electric field measurement results.

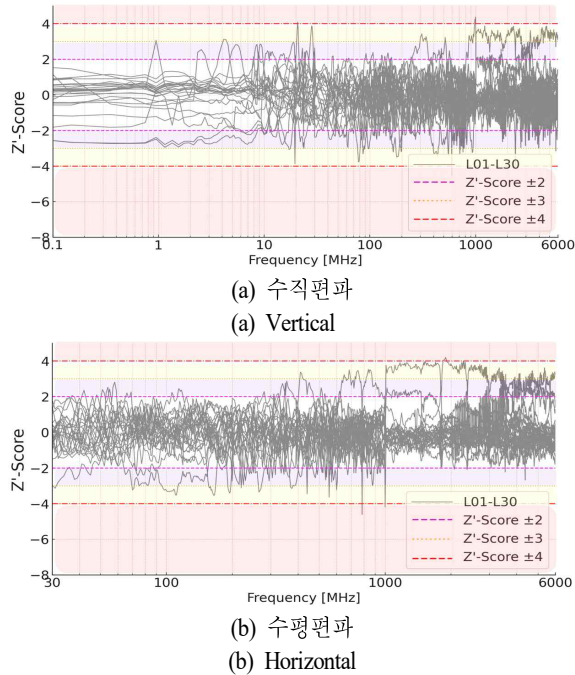


그림 13. 비교숙련도 방사성 방출 전기장 결과 분석  
Fig. 13. Comparative proficiency analysis of radiated emission electric field results.

자기장 방출 측정은 MIL-STD-461G에 기술된 RE101, radiated emission, magnetic field 평가항목을 참조로 한다. 그림 14와 같이 13.3 cm 루프 안테나를 통해서 DUT 면을

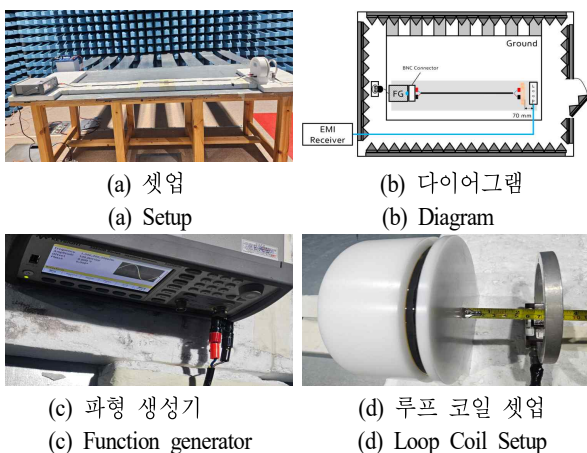


그림 14. 비교숙련도 방사성 방출 자기장 셋업 예시  
Fig. 14. Example setup for comparative proficiency in radiated emission magnetic field measurements.

측정거리 7 cm 거리에서 20 Hz~200 kHz 주파수 대역에서 측정을 하였다.

파형 생성기에 인가레벨은 10 V<sub>pp</sub>로 설정하며, 여기에 연결된 방사 루프 코일을 DUT로 가정하고 코일 중심면을 기준으로 7 cm거리에서 측정을 수행한다. 방사 루프 코일의 사양은 한국산업기술시험원(KTL: Korea testing laboratory)에서 개발한 표 6의 사양에 제품을 활용하였으며 결과는 그림 15와 같다.

자기장 계산은 측정 루프 안테나의 구조, 면적, 전류 등을 다양하게 고려하여야 하기 때문에 인가레벨 대비 측정될 자기장을 예측하는 것은 단순 계산으로는 어려우며 시뮬레이션을 통해 예측할 수 있다.

그림 16 및 표 7과 같이 방사성 방출 자기장의 경우 전체 주파수 대역에서 다른 평가항목에 비해 상대적으로 편차가 작은 편인 것으로 확인되었다. 발생하는 편차 수준은 측정불확도와 더불어 측정 거리 및 측정 위치와의 정렬 상태 오차 등에 기인한 것으로 볼 수 있어 시험자의 정확한 위치 정렬을 위한 숙련도 및 지그 활용이 중요하다.

표 6. 비교숙련도 방사성 방출 루프 코일 사양  
Table 6. Comparative proficiency radioactive emission loop coil specifications.

Parameter	Value
Turn	300 [turn]
Coil diameter	1 [mm]
Coil DC resistance	3.5 [ $\Omega$ ]

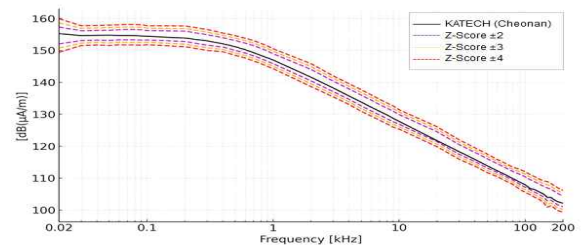


그림 15. 비교숙련도 방사성 방출 자기장 측정 결과  
Fig. 15. Comparative proficiency radiated emission magnetic field measurement results.



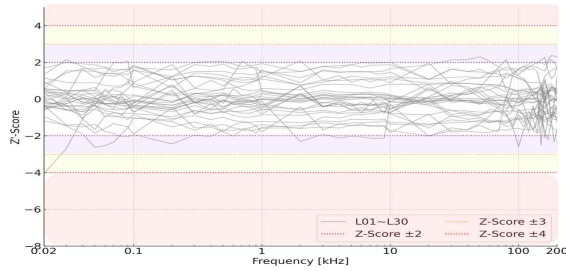


그림 16. 비교숙련도 방사성 방출 자기장 결과 분석  
Fig. 16. Comparative proficiency analysis of radiated emission magnetic field results.

표 7. 비교숙련도 방사성 방출 자기장 Z'-Score 분석  
Table 7. Comparative proficiency analysis of radiated emission magnetic field Z'-Score.

Z'-Score	Description (Severity level)	Average probability within the specified range
<   2	Normal range (Low)	96.8 %
<   3	Caution advised (Moderate)	99.9 %
<   4	Warning required (High)	100.0 %
>   4	Critical condition (Extreme)	0 %

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존 비교 숙련도 시험 방법에서 특정 주파수만 평가하고, 인가레벨이 균일하지 않은 콤 생성기의 한계를 개선하여 신호 발생기를 활용하여 전체 평가 조건을 대표할 수 있도록 설계된 숙련도 방법을 채택하여 신뢰성 있게 진행한 결과를 Z'-Score로 분석하였다.

전자파 방출의 경우 일반적으로 평가 전에 주변 잡음을 확보하여 측정을 하지만, 평가 결과의 신뢰성을 위하여 평가 사전에 비교숙련도와 유사한 평가방법을 통해 측정 결과가 신뢰할 수 있는 구간으로 소급성을 유지하는지 확인한 후 DUT를 셋업하여 측정하는 것이 좋을 것으로 보인다. 추가된 절차에 따른 완화 조건을 적용한 결과, 측정의 신뢰성이 확보되었으며, 측정 결과 또한 규제 기준 대비 6 dB의 마진이 확보된다면 MIL-STD-461G에서 규정하는 주변 잡음 측정 생략 절차를 도입하는 방안도 고려할 수 있을 것이다.

시험소간 비교숙련도를 진행함에 있어 해당 평가 결과

와 분석 결과를 공유하여 편차가 많이 발생하는 구간은 이론 추정치 값에 근접하도록 하거나 편차 발생이 줄어들 수 있도록 참가 시험소들과 지속적인 추가 연구를 통해 신뢰성 있는 시험 결과를 도출해 낼 수 있을 것이다.

해당 숙련도 과정이 지속적으로 발전하여 국제시험소 인정협력체 (ILAC: international laboratory accreditation cooperation)의 국가 간 무역 장벽을 제거하기 위해 각 시험 결과를 신뢰할 수 있도록 보장하는 주요 목적을 달성할 수 있을 것이다.

#### References

- [1] International Organization for Standardization(ISO), *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, ISO/IEC 17025:2017, Mar. 2018.
- [2] J. H. Park, "A study on inspection methods for conducted emission of automotive electronic components," *2024 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KIEES) Summer Conference*, Vol. 12, pp 379, Aug. 2024.
- [3] D. Jung, "Improvement of an ICT proficiency testing scheme," M.S. thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, 2019.
- [4] *Vehicles, boats and internal combustion engines -Radio disturbance characteristics -Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers*, International Electrotechnical Commission(IEC)/CISPR 25, Dec. 2021.
- [5] S. M. Yoon, "Inspection of radiated emissions from automotive components using a long wire antenna," *2024 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KIEES) Summer Conference*, Vol. 12, pp 378, Aug. 2024.
- [6] *Electromagnetic Interference/Electromagnetic Compatibility (EMI/EMC), Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment*, MIL-STD-461G, Dec. 2015.
- [7] F. Pythoud, "Proficiency testing in EMC radiated immunity," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 5, pp. 1249-1256, Oct. 2018.

# 김 현 지 [한국자동차연구원/연구원]

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



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

# 김 동 균 [한국자동차연구원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9700-8858>



2014년 2월: 공주대학교 나노정보공학 (공학사)  
2020년 2월: 아주대학교 IT융합 (공학석사)  
2014년 10월~현재: 한국자동차연구원 전파환경 기술부문 연구원  
2024년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학 박사과정

[주 관심분야] Vehicle EMC

# 이 세 원 [한국자동차연구원/연구원]

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



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

[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 전파환경기술부문장  
[주 관심분야] EMI/EMC, WPT, EMF, IEMI

# 민 지 원 [한국자동차연구원/연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-0947-0713>



2023년 2월: 공주대학교 전자공학과 (공학사)  
2023년 5월~현재: 한국자동차연구원 전파환경기술부문 연구원  
[주 관심분야] EMC, EMF

# 이 현 수 [현대자동차/연구원]

<https://orcid.org/0009-0008-3698-5987>



2023년 2월 인하대학교 전자공학 (공학석사)  
2003년 9월~현재: 현대자동차 전자신뢰성시험팀 연구원  
[주 관심분야] EMI/EMC, IEMI