

제 출 문

본 보고서를 「펄스파의 신호조건에 따른 전자파 인체노출량 측정값 보상방법 연구에 관한 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 11. 24.

연구책임자 : 김 윤 명 (주)EMF Safety)

연구 원 : 라 승 환 (주)EMF Safety)

윤 강 석 (주)EMF Safety)

이 석 윤 (주)EMF Safety)

연구보조원 : 송 용 주 (주)EMF Safety)

요 약 문

1. 과 제 명 : 펄스파의 신호조건에 따른 전자파 인체
노출량 측정값 보상방법 연구
2. 연 구 기 간 : 2017. 03. 15. ~ 2017. 11. 24.
3. 연구책임자 : 김 윤 명
4. 계획 대 진도
가. 월별 추진내용

세부연구내용	연구자	월별 추진일정												비 고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
○ 펄스 전자파에 대한 인체보호기준의 조사	이석윤													
○ 펄스파의 다양한 신호조건을 측정할 수 있는 시험환경 구성	송용주													
○ 펄스파 신호를 대상으로 측정장비의 전자파 인체노출량 측정값의 보정계수 도출	윤강석													
○ 펄스파 신호조건에 대한 전자파강도 측정의 유효성 검증	라승환													
○ 펄스 신호 전자파의 보정계수에 의한 전자파 강도 도출														
○ 최종보고서 작성														
분기별 수행진도 (%)						30		40			30			

나. 세부 과제별 추진사항

1) 펄스파에 대한 인체보호기준의 조사

- 펄스파 신호 발생 기기의 인체영향 및 노출량 평가에 대한 기존 연구 동향 파악

2) 펄스파의 다양한 신호조건을 측정할 수 있는 시험환경 구성 방법 마련

- 실험실 환경에서 펄스파의 다양한 신호조건(주파수, 주기, 출력, 펄스폭 등)에 따라 측정할 수 있는 시험환경 구성방법 구현
- 구현된 시험환경에서 신호조건에 따른 전자파 강도 측정

3) 펄스파 신호를 대상으로 측정 장비(휴대용 전자파 측정기)의 전자파 인체노출량 측정값의 보정계수 도출 방법 마련

- 펄스파 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정한 측정값의 보정계수 도출 방법 연구
- 보정계수를 적용한 측정값의 유효성 검증

4) 펄스파 신호조건에 대한 전자파강도 사례 측정

- 펄스파 신호 조건(주파수, 주기, 출력, 펄스폭 등)에 따른 전자파 강도를 측정 및 데이터 분석

5) 펄스파의 전자파 강도 도출

- 펄스파의 시간평균 및 순간 전자파강도 측정
- 펄스파의 전자파 강도와 검출된 신호간의 상관관계를 그래프화

5. 연구 결과

1) 펄스 전자파에 대한 인체보호기준의 조사

○ ICNIRP에서는 100 kHz, 10 MHz를 기준으로 주파수별 피크값 제한치가 간략하게 제시되어 있음.

· 1 Hz ~ 100 kHz : 기본 제한치(Basic Restriction) $\times \sqrt{2}$

· 100 kHz ~ 10 MHz :

시간평균 전계 및 자계의 노출제한치 $\times 1.5$ (@ 100 kHz)

시간평균 전계 및 자계의 노출제한치 $\times 32$ (@ 10 MHz)

100 kHz ~ 10 MHz 內 주파수는 보간법(1.5~32)으로 구함.

· 10 MHz 이상 :

시간평균 전계 및 자계의 제한기준 $\times 32$

펄스폭에 대해 평균화된 전력밀도의 제한기준 $\times 1,000$

○ IEEE에서는 100 kHz을 기준으로 펄스파 인체 안전기준치가 나누어져 있음.

· 100 kHz 이하

1. E-field, B-field, S(Power Density) 평균값 기준을 만족해야 됨

2. 피크값 기준 : Peak Field 또는 Fourier 변환으로 평가

· 100 kHz 이상

1. 평균 전력밀도(S) 기준을 만족해야 함

2. 피크 전기장 기준(≤ 100 kV/m)을 만족해야 함

3. 에너지 밀도 기준을 만족해야 함

$$\sum_0^{0.1s} (S_{pk} \times \tau) \leq \frac{MPE_{avg} \times T_{avg}}{5}$$

S_{pk} = 펄스의 peak 전력밀도, τ = 펄스폭,

MPE_{avg} = 최대허용노출 평균값,

T_{avg} = MPE가 결정되기 위한 노출 평균시간

2) 펄스파의 다양한 신호조건을 측정할 수 있는 시험환경 구성 방법 마련

○ Signal generator, RF Amp., Horn Antenna를 이용하여 송신시스템을 구성하였고, 휴대용 전자파 측정기와 Spectrum Analyzer로 펄스파 강도를 측정하였음.

○ 민간선박용 무선탐지기를 이용하여 휴대용 전자파 측정기와 Spectrum Analyzer로 펄스파 강도를 측정함.

3) 펄스파 신호를 대상으로 휴대용 전자파 측정기의 전자파 인체노출량 측정값의 보정계수 도출 방법 마련

○ E_{rms} 가 측정지점에서의 시간평균 E_{rms} (계산치)이고, $E_{display}$ 가 휴대용 전자파 측정기로 측정한 시간평균 E_{rms} (측정치, average mode)일 때, $E_{rms}/E_{display}$ 를 통해 보정계수를 도출함.

4) 휴대용 전자파 측정기의 펄스파 측정을 위한 보정계수 도출

○ 휴대용 전자파 측정기의 측정값으로 얻은 보정계수는 Narda Inc.에서 제공한 보정계수 대비 ± 3 dB 이내의 경향을 보임.

6. 기대효과

휴대용 전자파 측정기의 펄스파 보정계수를 측정을 통해 도출하였다. 펄스파에 대한 전자파 강도를 휴대용 전자파 측정기를 이용하여 측정할 때 본 과제에서 도출한 보정계수를 사용하면 정밀한 측정이 가능할 것으로 판단된다.

7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규격	수량	용도	보유현황	확보방안	비고
Spectrum Analyzer	10 Hz ~ 3 MHz	1	주파수 분석	EMF Safety	기보유	
Network Analyzer	300kHz ~ 3 GHz	1	회로분석	EMF Safety	기보유	
Signal Generator	100 kHz ~ 2060 MHz	1	회로분석	EMF Safety	기보유	
Oscilloscope	DC ~ 250 MHz	2	신호 파형 검사	EMF Safety	기보유	
ELF 전자계 측정기	5 Hz ~ 32 kHz	1	전자파측정	EMF Safety	기보유	
ELF 전자계 측정기	50 ~ 60 Hz	1	전자파측정	EMF Safety	기보유	
Spectrum Analyzer	9 kHz ~ 20 GHz	1	주파수 분석	EMF Safety	기보유	
Signal Generator	10 MHz ~ 20 GHz	1	회로분석	EMF Safety	기보유	
Oscilloscope	DC ~ 4 GHz	1	신호 파형 검사	EMF Safety	기보유	
Oscilloscope	DC ~ 2.5 GHz	1	신호 파형 검사	EMF Safety	기보유	

8. 기타사항

최종보고서 초록

국문 초록
<p>펄스파를 사용하는 송신시스템의 사용 증가로 펄스파의 인체 노출량 측정 및 평가가 필요하게 되었다. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)과 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)에서는 펄스파 및 비정현파에 관한 인체노출기준치를 제시하고 있지만, 측정 방법을 제시하고 있지 않다. 국내에서는 펄스파에 대한 인체노출기준치 및 측정 방법이 존재하지 않아, 이 기준을 마련하기 위해 펄스파 측정기기의 신뢰성을 확보할 필요가 있다. 신뢰성을 확보해야할 펄스파 측정기기는 Narda Inc.의 휴대용 전자파 측정기이며, Narda Inc.에서는 펄스파 측정값에 대한 보정계수를 제공하고 있다. 이 제공된 보정계수의 신뢰성을 확보하기 위해 휴대용 전자파 측정기로 펄스파를 측정하여 측정값의 보정계수와 제공된 보정계수를 비교 및 분석하였다. 측정을 통해 구한 보정계수는 Narda Inc.에서 제공한 보정계수 대비 ± 3 dB 이내의 오차를 보였으며 전기장세기에 따른 보정계수의 연속성을 확인하였다.</p>
영문 초록
<p>The increased use of transmission system used pulse modulated RF (Radio Frequency) wave has caused the need of its exposure assessment to human. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)guidelines and IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) document about human exposure to RF Electromagnetic field briefly shows safety level of exposure to pulse and non-sinusoidal wave but domestic safety level of that is not defined yet. So, the measurement instrument to measure pulse modulated RF wave should have high reliability of its value to define the safety level. The instrument is portable EMF measurement instrument made by Narda. And Narda provides correction factor of the instrument. In order to have high reliability of the instrument, we have checked correction factor of the</p>

instrument by comparing with our measurement values. The result shows us that the almost measurement values coincide with correction factor provided by Narda within ± 3 dB and have a continuity of graph depending on E-field strength.

색 인 어	한글	펄스파, 휴대용 전자파 측정기, 보정계수
	영문	Pulse wave, Pulse modulated RF wave, portable EMF measurement instrument

SUMMARY

펄스파를 사용하는 송신시스템의 사용 증가로 펄스파의 인체 노출량 측정 및 평가가 필요하게 되었다. ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)에서는 펄스파 및 비정현파에 대한 인체 보호기준치를 100 kHz 이하, 100 kHz ~ 10 MHz, 10 MHz 이상으로 나누어 제한하고 있다. IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)에서는 100 kHz를 기준으로, 100 kHz 이하에서 전계, 자계, 전력밀도, 신호의 푸리에 성분을 이용한 제한치가 제시되어 있고, 100 kHz 이상에서는 피크전기장, 평균 전력밀도 및 MPE(maximum permissible exposure)에 대한 제한치가 제시되어 있다. 국내에는 펄스파에 대한 인체노출평가 기준이 존재하지 않아 이 기준을 마련하기 위한 펄스파 측정기기의 신뢰성을 확보할 필요가 있다. 신뢰성을 확보해야할 펄스파 측정기기는 Narda Inc.의 휴대용 전자파 측정기이고 Narda Inc.에서 펄스파 측정값 (EF1891 전기장 프로브)에 대한 보정계수를 제공하고 있다. 이 제공된 보정계수의 신뢰성을 확보하기 위해 우선적으로 연속파에 대한 휴대용 전자파 측정기 측정값의 신뢰도를 확보하였다. 그리고 휴대용 전자파 측정기와 EF6092 프로브로 펄스파를 측정한 후 측정된 보정계수와 제공된 보정계수를 비교·분석하였다. 비교·분석결과, 측정으로 구한 대부분의 보정계수는 Narda Inc.에서 제공한 보정계수와 측정으로 구한 보정계수와 약 ± 3 dB 이내의 차이를 보이고 있으며 전기장세기에 따른 보정계수의 연속성을 확인하였다.

목 차

표 목 차	12
그림목차	16
제 1 장 서 론	24
제 2 장 펄스파 측정 및 전자파 인체보호기준	25
제 1 절 펄스파 측정	25
1. Spectrum Analyzer를 이용한 펄스파 측정	26
2. 휴대용 전자파 측정기를 이용한 펄스파 측정	28
제 2 절 전자파 인체보호기준	34
1. 국내외 전자파 인체보호기준	34
가. 국내 전자파 인체보호기준	34
나. 국외 전자파 인체보호기준	37
2. 펄스파에 대한 인체보호기준	42
가. 펄스파에 대한 국내 인체보호기준	42
나. ICNIRP 인체보호기준	42
다. IEEE 인체보호기준	47
(1) 순시 피크값 기반의 제한	47
(2) Fourier 성분 기반의 제한	49
제 3 장 펄스 변조된 RF 신호의 측정 시스템 구성	50
제 4 장 송신시스템의 펄스파 측정	52

제 1 절 실험방법	52
제 2 절 9.0 GHz, CW 신호의 전자파강도 측정	57
제 3 절 펄스파 전자파강도 측정	62
1. Duty cycle이 1/316인 펄스파의 전자파강도 측정	62
2. Duty cycle이 1/1,000인 펄스파의 전자파강도 측정 ·	70
3. Duty cycle이 1/3,160인 펄스파의 전자파강도 측정	78
 제 5 장 민간선박용 무선탐지기의 전자파강도 측정	86
제 1 절 시험방법	86
제 2 절 민간선박용 무선탐지기의 신호 확인	89
1. 삼성ENC(주)에서 제공한 민간선박용 무선탐지기의 신호 정보	89
2. Cable loss와 attenuator 확인	90
3. Spectrum Analyzer(SA)를 이용한 수신 전력 측정 ·	94
4. Peak power meter(PM)를 이용한 수신 전력 측정 ..	99
제 3 절 휴대용 전자파 측정기의 펄스파 측정치 확인	104
 제 6 장 결 론	117

표 목 차

표 2-1. 휴대용 전자파 측정기와 연결되는 프로브의 특성	29
표 2-2. 일반인에 대한 전자파강도기준(국내 전자파 인체보호 기준)	35
표 2-3. 직업인에 대한 전자파강도기준(국내 전자파 인체보호 기준)	36
표 2-4. 국부노출에 대한 전자파흡수율(SAR)기준 (국내전자파 인체보호기준)	37
표 2-5. IEEE C95.1의 일반인에 대한 전자파 인체보호기준	40
표 2-6. IEEE C95.1의 직업인에 대한 전자파 인체보호기준	41
표 2-7. 연속파의 시간변화에 따른 전기장과 자기장의 기본 제한기준 (ICNIRP guidelines 1998)	44
표 2-8. 연속파의 시간변화에 따른 전기장, 자기장에 대한 직업인 제한기준(ICNIRP guidelines 1998)	45
표 2-9. 연속파의 시간변화에 따른 전기장, 자기장에 대한 일반인 제한기준 (ICNIRP guidelines 1998)	46
표 2-10. 비정현파/펄스파에 대한 IEEE 인체보호기준 적용 구분	47
표 2-11. BRs applying to various regions of the body (IEEE C95.1)	48
표 2-11. MPE for exposure of head and torso : $f = 3 \text{ kHz}$ to	

5 MHz (IEEE C95.1)	48
표 2-12. MPE for the limbs : $f = 3 \text{ kHz}$ to 5 MHz (IEEE C95.1)	49
표 4-1. 송신신호가 9.0 MHz이고 CW인 경우, S/A와 휴대용 전자파 측정기의 측정결과	60
표 4-2. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 316 Hz일 때, 휴대용 전자파 측정기의 전자파 강도 측정 결과	64
표 4-3. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 1 kHz일 때, 휴대용 전자파 측정기의 전자파 강도 측정 결과	65
표 4-4. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 3.16 kHz일 때, 휴대용 전자파 측정기의 전자파 강도 측정 결과	66
표 4-5. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 316 Hz일 때 휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과	72
표 4-6. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 1 kHz일 때 휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과	73
표 4-7. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 3.16 kHz일 때 휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과	74
표 4-8. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 316 Hz일 때 휴대용 전자파 측정기의 전자파 강도 측정결과	80
표 4-9. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 1 kHz일 때 휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과	81
표 4-10. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 3.16 kHz일 때 휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과	82

표 5-1. RSU-3700 제원	90
표 5-2. 민간선박용 무선탐지기(삼영ENC(주))의 송신 신호정보	90
표 5-3. cable loss와 30 dB Attenuator의 S_{21} 측정값	93
표 5-4. 그림 5-11 실험에서 채널 0 (PRF : 2,100 Hz, Duty cycle : 1/3,968)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력	95
표 5-5. 그림 5-11 실험에서 채널 1 (PRF : 1,650 Hz, Duty cycle : 1/2,020)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력	96
표 5-6. 그림 5-11 실험에서 채널 2 (PRF : 1,200 Hz, Duty cycle : 1/1,666)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력	97
표 5-7. 그림 5-11 실험에서 채널 3 (PRF : 600 Hz, Duty cycle : 1/1,960)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력	98
표 5-8. 그림 5-12 실험에서 채널 0 (PRF : 2,100 Hz, Duty cycle : 1/3,968)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력	100
표 5-9. 그림 5-12 실험에서 채널 1 (PRF : 1,650 Hz, Duty cycle : 1/2,020)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력	101
표 5-10. 그림 5-12 실험에서 채널 2 (PRF : 1,200 Hz, Duty	

cycle : 1/1,666)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력	102
표 5-11. 그림 5-12 실험에서 채널 3 (PRF : 600 Hz, Duty cycle : 1/1,960)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력	103
표 5-12. Narda Inc.에서 제공하는 휴대용 전자파 측정기에 연결되는 전계프로브의 파라미터의 유효범위	104
표 5-13. SMR-3700의 채널이 0(PRFF : 2,100 Hz, Duty cycle : 1/3,968)인 경우의 송수신 거리에 대한 휴대용 전자 파 측정기에 출력되는 수신 전계 및 $E_{rms}/E_{display}$ ·	105
표 5-14. SMR-3700의 채널이 1(PRFF : 1,650 Hz, Duty cycle : 1/2,020)인 경우의 송수신 거리에 대한 휴대용 전자 파 측정기에 출력되는 수신 전계 및 $E_{rms}/E_{display}$ ·	107
표 5-15. SMR-3700의 채널이 2(PRFF : 1,200 Hz, Duty cycle : 1/1,666)인 경우의 송수신 거리에 대한 휴대용 전자 파 측정기에 출력되는 수신 전계 및 $E_{rms}/E_{display}$ ·	109
표 5-16 SMR-3700의 채널이 3(PRFF : 600 Hz, Duty cycle : 1/1,960)인 경우의 송수신 거리에 대한 휴대용 전자파 측정기에 출력되는 수신 전계 및 $E_{rms}/E_{display}$	111

그림 목 차

그림 2-1. 펄스파와 펄스파의 파라미터	26
그림 2-2. 시간 domain 및 주파수 domain에서의 펄스파 ..	27
그림 2-3. 제로 스패ן(Zero-span)모드 (0 Hz)일 때, 펄스파의 포락선	27
그림 2-4. (좌) Narda Inc. 휴대용 전자파 측정기, (우) 휴대 용 전자파 측정기와 연결되는 프로브	28
그림 2-5. 휴대용 전자파 측정기의 측정화면	30
그림 2-6. x축이 E_display인 경우의 Duty cycle 1/316인 고 정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)	31
그림 2-7. x축이 E_display인 경우의 Duty cycle 1/1,000인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)	31
그림 2-8. x축이 E_display인 경우의 Duty cycle 1/3,160인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)	32
그림 2-9. x축이 E_rms인 경우의 Duty cycle 1/316인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)	32
그림 2-10. x축이 E_rms인 경우의 Duty cycle 1/1,000인 고 정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)	33

그림 2-11. x축이 E_{rms} 인 경우의 Duty cycle 1/3,160인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)	33
그림 2-12. ICNIRP(1998) 전기장강도 인체보호기준	38
그림 2-13. ICNIRP(1998) 자속밀도(B) 인체보호기준	38
그림 2-14. ICNIRP(2010) 전기장강도 인체보호기준	39
그림 2-15. ICNIRP(2010) 자기장강도 인체보호기준	39
그림 2-16. IEEE 전기장강도 인체보호기준(직업인)	41
그림 2-17. IEEE 전기장강도 인체보호기준(일반인)	42
그림 2-18. 펄스파에 대한 전기장 및 전력밀도 인체보호기준 (ICNIRP)	43
 그림 3-1. 펄스파 신호 측정을 위한 테스트 블록도	50
그림 3-2. 펄스파 신호 측정을 위한 시험 환경(단국대 전자과 연구실)	51
 그림 4-1. 스펙트럼 분석기를 이용한 측정 블록도(송신기 출력 ≤ 25 dBm)	53
그림 4-2. 휴대용 전자파 측정기로 수신전계를 측정하는 블록도(송신기 출력 ≤ 25 dBm)	53
그림 4-3. 스펙트럼 분석기를 이용한 측정 블록도(송신기 출력 ≥ 25 dBm)	54
그림 4-4. 휴대용 전자파 측정기로 수신 전계를 측정하는 블록도(송신기 출력 ≥ 25 dBm)	54

그림 4-5. 신호가 CW인 경우, S/A를 이용하여 수신 전계를 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≤ 25 dBm)	57
그림 4-6. (좌) Crystal Detector와 오실로스코프가 연결된 X-band 측정 시스템, (우) 서로 마주 보고 있는 Tx, Rx 안테나	57
그림 4-7. 신호가 CW인 경우, 휴대용 전자파 측정기로 수신 전계를 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≤ 25 dBm)	58
그림 4-8. 신호가 CW인 경우, 휴대용 전자파 측정기로 수신 전계를 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≥ 25 dBm)	58
그림 4-9. 9.0 GHz, CW의 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 배치도	59
그림 4-10. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/316인 펄스와 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≤ 25 dBm)	62
그림 4-11. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/316인 펄스와 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≥ 25 dBm)	63
그림 4-12. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 316 Hz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	67
그림 4-13. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 316 Hz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	67
그림 4-14. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교(x축이 $E_{display}$ 인 경우)	68

그림 4-15. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보 정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	68
그림 4-16. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	69
그림 4-17. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	69
그림 4-18. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/1,000인 펄 스파 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블 록도 (송신기 출력 ≤ 25 dBm)	70
그림 4-19. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/1,000인 펄 스파 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블 록도 (송신기 출력 ≥ 25 dBm)	71
그림 4-20. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 316 Hz인 경우 의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	75
그림 4-21. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 316 Hz인 경우 의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	75
그림 4-22. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	76
그림 4-23. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	76
그림 4-24. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 3.16 kHz인 경우 의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	77
그림 4-25. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 3.16 kHz인 경우 의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	77
그림 4-26. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/3,160인 펄	

스파 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도(송신기 출력 ≤ 25 dBm)	78
그림 4-27. 반송파가 9.0 kHz 이고 Duty cycle이 1/3,160인 펄스파 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≥ 25 dBm)	79
그림 4-28. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 316 Hz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	83
그림 4-29. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 316 Hz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	83
그림 4-30. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	84
그림 4-31. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	84
그림 4-32. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	85
그림 4-33. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	85
그림 5-1. RUS-3700과 Ridged horn antenna간 거리별 수신전계 측정 블록도	86
그림 5-2. RSU-3700과 휴대용 전자파 측정기 간의 거리별 수신전계 측정 블록도	87
그림 5-3. 전파측정지점에서 RSU-3700을 바라본 모습 in EMI chamber (나주 국립전파연구원)	88

그림 5-4. RSU-3700 설치지점에서 전파측정지점을 바라본 모습 in EMI chamber (나주 국립전파연구원) ...	88
그림 5-5. RSU-3700(송신안테나)의 모습	89
그림 5-6. Network Analyzer의 Calibration S_{21}	91
그림 5-7. 1 m cable과 1 m cable에 연결된 connector의 S_{21}	91
그림 5-8. 1 m cable에 연결된 connector의 S_{21}	92
그림 5-9. 2m cable의 S_{21}	92
그림 5-10. 30 dB Attenuator의 S_{21}	93
그림 5-11. Spectrum Analyzer를 이용한 RSU-3700과 수신 안테나 간의 거리별 수신전력 측정 블록도	94
그림 5-12. Peak power meter를 이용한 RSU-3700과 수신안 테나 간의 거리별 수신전력 측정 블록도	99
그림 5-13. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정된 보정계수 와 제공된 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	106
그림 5-14. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정된 보정계수 와 제공된 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	106
그림 5-15. SMR-3700의 채널이 1인 경우의 측정된 보정계수 와 제공된 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	108
그림 5-16. SMR-3700의 채널이 1인 경우의 측정된 보정계수 와 제공된 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)	108
그림 5-17. SMR-3700의 채널이 2인 경우의 측정된 보정계수 와 제공된 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	

.....	110
그림 5-18. SMR-3700의 채널이 2인 경우의 측정된 보정계수 와 제공된 보정계수 비교 (x 축이 E_{rms} 인 경우)	110
그림 5-19. SMR-3700의 채널이 3인 경우의 측정된 보정계수 와 제공된 보정계수 비교 (x 축이 $E_{display}$ 인 경우)	112
.....	112
그림 5-20. SMR-3700의 채널이 3인 경우의 측정된 보정계수 와 제공된 보정계수 비교 (x 축이 E_{rms} 인 경우)	112
그림 5-21. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x 축이 $E_{display}$ 인 경우)	113
그림 5-22. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x 축이 E_{rms} 인 경우)	113
그림 5-23. SMR-3700의 채널이 1인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x 축이 $E_{display}$ 인 경우)	114
그림 5-24. SMR-3700의 채널이 1인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x 축이 E_{rms} 인 경우)	114
그림 5-25. SMR-3700의 채널이 2인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x 축이 $E_{display}$ 인 경우)	115
그림 5-26. SMR-3700의 채널이 2인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성	

(x축이 E_{rms} 인 경우)	115
그림 5-27. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)	116
그림 5-28. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 E_{rms} 인 경우)	116

제 1 장 서 론

최근 펄스파를 이용한 송신시스템으로부터의 전자파 인체노출에 대한 사회적 관심이 증가하는 추세이다. 특히 선박 및 기상청에서 사용하는 펄스파를 이용한 송신시스템의 사용으로 인해 사람들이 펄스파에 대한 인체영향에 관심을 두고 있다. 전자파는 현재 과학적 증거를 기반으로 작성된 국제 기준 및 보호 대책에 의해 인체노출기준치 이하로 제한되어 있다. 국내에서는 연속파에 대하여 전자파 강도 또는 SAR(전자파 비흡수율)에 대하여 실효값(rms)으로 규정하고 있을 뿐, 펄스파 신호에 대한 인체보호기준치를 별도로 규정하지 않고 있다.

펄스파는 Duty cycle, 펄스반복주파수(PRF, Pulse Repetition Frequency), 송신전력에 따라 전자파 인체노출량 평가 방법이 달라진다. 따라서 펄스파를 이용한 응용 설비의 전자파 인체노출에 대한 정확한 측정 방법 및 가이드라인 마련이 필요하다.

본 과제에서는 펄스파 전자파인체보호기준에 대한 국외 자료를 분석하였으며, 펄스파에 대한 휴대용 전자파 측정기(Narda Inc.)의 센싱 특성을 분석하기 위해서 펄스파 송신 시스템을 실내에 구축하고 시스템에서 송신하는 펄스파 신호를 측정하여 보정계수를 도출하였다. 휴대용 전자파 측정기의 보정계수 도출을 위하여 구축된 Signal generator, RF Amp., Horn Antenna를 이용한 펄스파 송신시스템과 민간선박용 무선탐지기를 이용하여 펄스파를 휴대용 전자파 측정기로 측정하여 보정계수를 도출하였고, Narda Inc.에서 제공하는 보정계수와 비교·분석하였다.

제 2 장 펄스파 측정 및 전자파 인체보호기준

제 1 절 펄스파 측정

펄스파는 고주파(RF) 신호가 매우 좁은 펄스로 진폭 변조(Amplitude Modulation)된 것이다. 변조신호는 완전한 구형파의 형태를 갖지 않는다. 펄스파는 무선탐지를 위한 송신시스템의 신호로 사용되고 진폭 변조된 펄스 신호의 전력, 반복주기, 펄스 폭, 그리고 변조의 조절을 통해 측정대상의 위치를 알아낸다.

펄스 변조된 신호의 전력은 최대 측정 거리에 영향을 주며 펄스 반복 주파수(PRF, Pulse Repetition Frequency)는 측정 최대 범위를 결정하는 역할을 한다. 펄스폭은 송신시스템의 공간 분해능을 결정한다. 이때 펄스폭은 측정대상간의 신호가 이동하는데 필요한 시간보다 짧아야 한다. 그렇지 않으면 수신기에서 펄스파가 중첩이 되어 정확한 정보를 얻을 수 없다. 그리고 펄스폭과 펄스파의 모양은 펄스파 신호의 스펙트럼을 결정한다. 예를 들어, 펄스폭을 줄이면 신호의 대역폭은 증가한다. 시스템 대역폭이 넓어지면 주어진 전력량에 대해 수신기 잡음이 높아져 민감도가 감소한다. 또한, 펄스가 매우 짧으면 펄스 스펙트럼이 할당된 주파수의 규제범위를 초과할 수 있다[1].

펄스파에 대해 말할 때, 그림 2-1에서 보이는 바와 같이 여러 가지 용어를 사용한다. 그림 2-1에서 PRI는 Pulse Repetition Interval이고 PRR은 Pulse Repetition Rate이다. 평균전력은 송신신호의 전체 시간과형에서의 평균이 되는 전력이다. 펄스폭과 PRF가 일정하지 않으면 적분 시간은 펄스 파라미터의 모든 가능한 변화를 나타낼 수 있을 만큼 충분히 길어야 한다. 피크 전력는 최대 순간 전력이고 펄스 전력은 하나의 펄스에 대한 적분 또는 평균 전력이다. Duty cycle은 신호의 한 주기 대비 펄스가 지속되는 시간으로 식 (1)처럼 펄스폭(PW)과 펄스 반복 주파수(PRF)로부터 계산할 수 있다.

$$\text{Duty cycle} = \frac{PW}{\text{Pulse Period}} = PW \times PRF \quad (1)$$

그림 2-1에서 보이는 바와 같이 Duty cycle, 펄스 폭, PRF, 그리고 상승 및 하강시간은 신호의 전력을 규정하는데 매우 유용하게 사용된다.

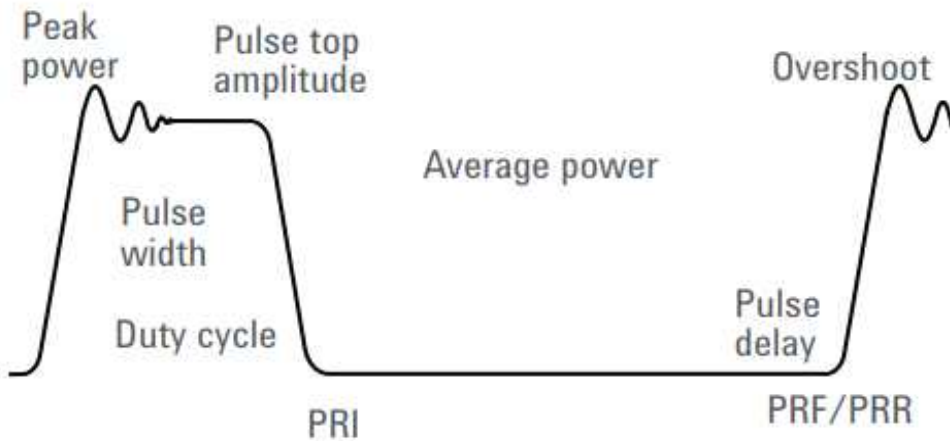


그림 2-1. 펄스파와 펄스파의 파라미터

1. Spectrum Analyzer를 이용한 펄스파 측정

Spectrum Analyzer의 주된 장점은 전력뿐만 아니라 펄스파의 송신 주파수 정보도 확인할 수 있다는 것이다. 펄스파를 Spectrum Analyzer를 통해 측정하면, 그림 2-2에서 알 수 있듯이 신호의 펄스폭과 PRF를 확인할 수 있다. 펄스폭이 좁아지면 스펙트럼 및 sidelobe의 폭이 넓어진다. 펄스의 PRF는 각 스펙트럼 구성 요소 사이의 간격을 의미한다. 따라서 펄스의 스펙트럼을 보면 신호의 펄스 폭, 주기 및 duty cycle에 대한 의미 있는 정보를 얻을 수 있다. 기본 펄스의 경우, duty cycle을 이용하여 평균 전력으로부터 피크 펄스 전력을 계산하거나 그 반대의 계산이 가능하다.

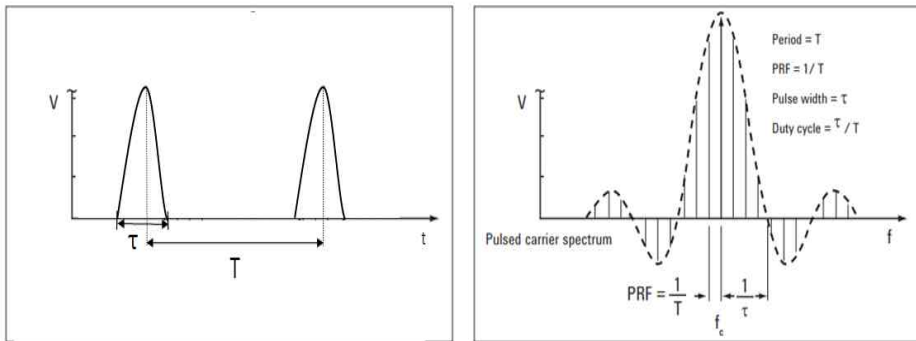


그림 2-2. 시간 domain 및 주파수 domain에서의 펄스파

펄스파를 Spectrum analyzer에서 주파수영역으로 측정하는 것 외에도 시간영역을 이용하여 측정하는 방법인 제로 스패(Zero-Span) 모드가 있다. 제로 스패모드는 그림 2-3와 같이 오실로스코프와 유사한 화면으로 시간영역에서 신호의 정보를 확인할 수 있다. 또한 오실로스코프와 마찬가지로 트리거를 활용하여 펄스 폭, 피크 전력, on-off 비율, 그리고 상승 시간을 쉽게 측정할 수 있도록 펄스의 포락선을 배치할 수 있다. 제로 스패는 주파수 영역에서 측정할 수 없는 상승 시간 및 진폭저하와 같은 중요한 펄스 매개변수를 쉽게 측정할 수 있다[1].

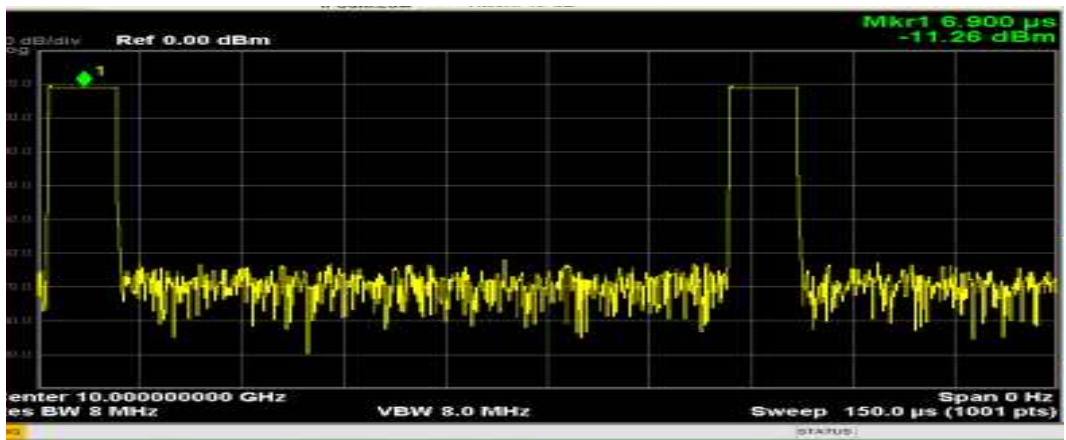


그림 2-3. 제로 스패(Zero-span)모드(0 Hz)일 때, 펄스파의 포락선

2. 휴대용 전자파 측정기를 이용한 펄스파 측정



그림 2-4. (좌) Narda Inc. 휴대용 전자파 측정기, (우)휴대용 전자파 측정기와 연결되는 프로브

그림 2-4에서 보이는 바와 같이 휴대용 전자파 측정기는 전기장, 자기장, 전력밀도를 측정할 수 있으며 연결하는 프로브에 따라 측정할 수 있는 주파수 범위가 달라진다. 연결되는 프로브의 측정주파수 범위는 표 2-1에 나타내었다. 프로브 모델명에서 4자리 숫자의 왼쪽 수를 첫 번째로 보았을 때, 첫 번째와 두 번째 수는 최대 측정 주파수의 두 자리를 말하고 세 번째 수는 10의 승수를 말한다. 네 번째 수는 프로브 모델의 version을 말한다. 예를 들어 EF1891에서 1891의 의미는 최대 측정 주파수가 $18 \times 10^9 = 18 \text{ GHz}$ 이고 첫 번째 version이다.

휴대용 전자파 측정기에서 측정할 수 있는 모드는 Actual, Max hold, Average, Max Average로 4가지가 있다. Actual은 실시간으로 측정되

는 E_{rms} 값을 표시하고 Max hold 값은 실시간으로 측정된 값 중 가장 큰 값을 표시한다. Average는 사용자가 설정한 측정시간에서 측정된 E_{rms} 값에 대한 평균값을 표시하고 Max Average는 Average 값 중 가장 큰 값을 표시한다.

표 2-1. 휴대용 전자파 측정기와 연결되는 프로브의 특성

프로브 모델명	EF1891	EF6092
보정계수	Pulse파 측정의 보정계수 data가 있음	Pulse파 측정의 보정계수 data가 없음
측정주파수 범위	3 MHz ~ 18 GHz	100 MHz ~ 90 GHz
측정세기 범위	0.6 ~ 1000 V/m (CW) 0.6 ~ 30 V/m (True RMS)	0.7 ~ 400 V/m (CW) 0.7 ~ 61.4 V/m (True RMS)
센서타입	Diode based system	Diode based system
Calibration Uncertainty @ 0.2 mW/cm ²	0.8 dB (\leq 300 MHz) 1.5 dB (300 MHz ~ 1.2 GHz) 1.3 dB (\geq 1.2 GHz)	\pm 0.8 dB (\leq 300 MHz) \pm 1.5 dB (300 MHz ~ 1.2 GHz) \pm 1.3 dB (1.2 GHz ~ 60 GHz)

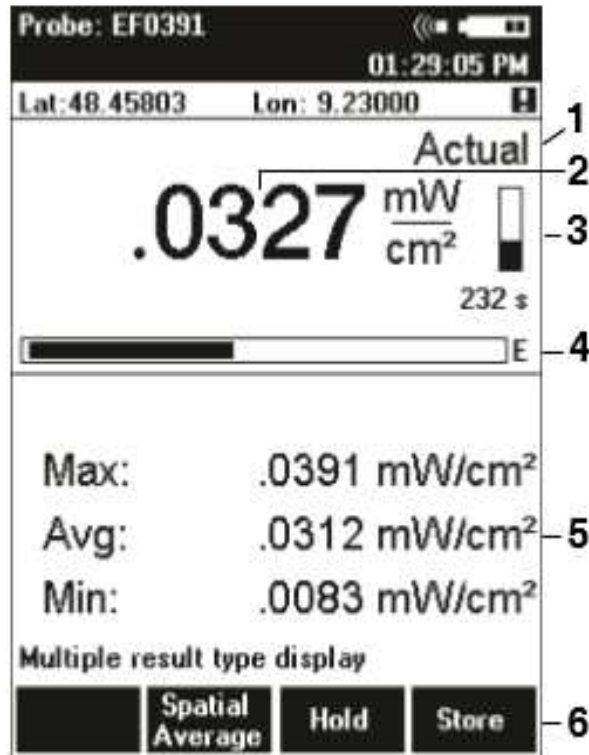


그림 2-5. 휴대용 전자파 측정기의 측정화면

휴대용 전자파 측정기의 측정화면 모습을 그림 2-5에 나타내었다. 그림 2-5에서 1번은 화면에 표시되는 측정 모드를 나타내는 것이고 2번은 1번 모드에 따른 최신 값이다. 3번은 사용자가 설정한 평균시간이 얼마만큼 남아 있는지 알려주는 막대기이다. 4번은 설정된 펄드 타입을 보여주는 펄드 세기의 그래픽 표시이다. 그림 2-5에서는 전계로 설정되어 있다. 5번은 측정 모드에 대한 측정값을 표기해준다. 그림에서 Max는 Max hold 모드를 말하고 Avg는 Average 모드, Min은 실시간으로 측정된 값의 최솟값을 말한다. 6번의 기능들은 이 측정화면에서 사용할 수 없고 일반적인 측정모드에서 사용이 가능하다.

휴대용 전자파 측정기로 펄스와 신호를 측정한 후 신호의 PRF와 Duty cycle에 대한 보정계수를 적용해 주어야 한다. 보정계수에 적용되어야 하는 PRF는 316 Hz, 1 kHz, 3.16 kHz이고 각 PRF에 대한 Duty cycle은 1/316, 1/1,000, 1/3,160, 이다. 그림 2-6 ~ 11은 Narda Inc.에서 제공한 RF와 Duty cycle에 대한 보정계수이다[2].

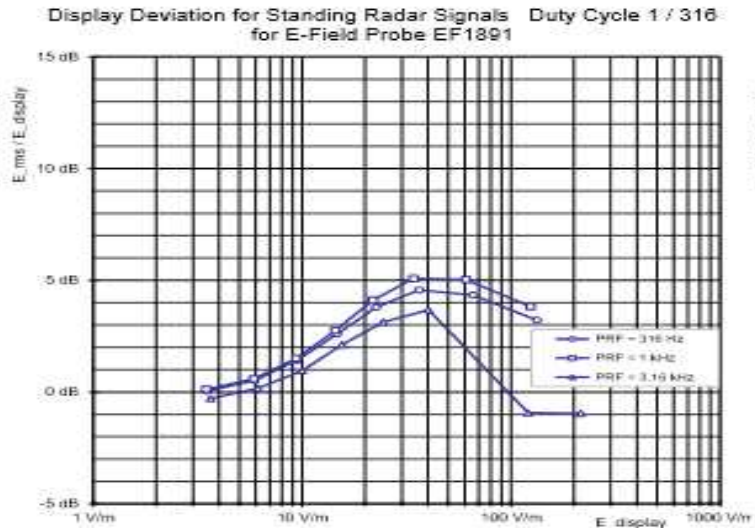


그림 2-6. x축이 E_display인 경우의 Duty cycle 1/316인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)

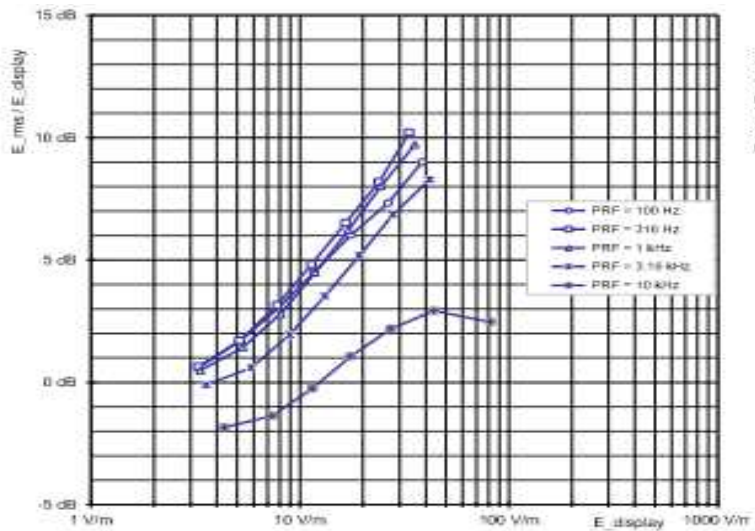


그림 2-7. x축이 E_display인 경우의 Duty cycle 1/1,000인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)

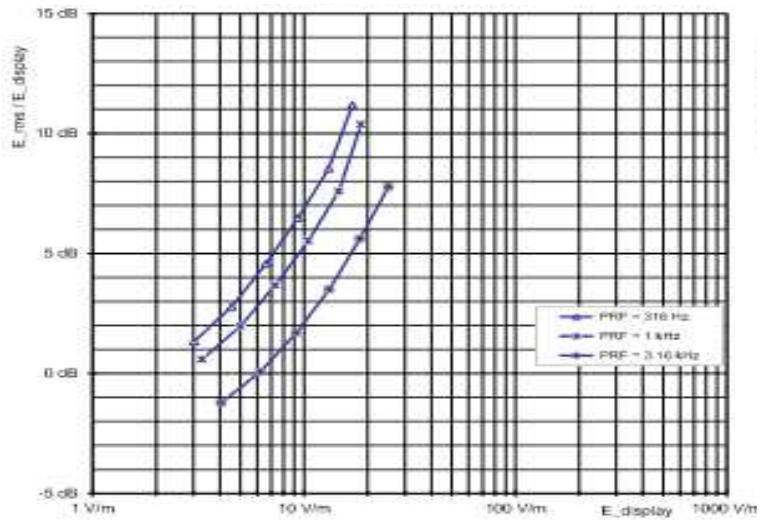


그림 2-8. x축이 $E_{display}$ 인 경우의 Duty cycle 1/3,160인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)

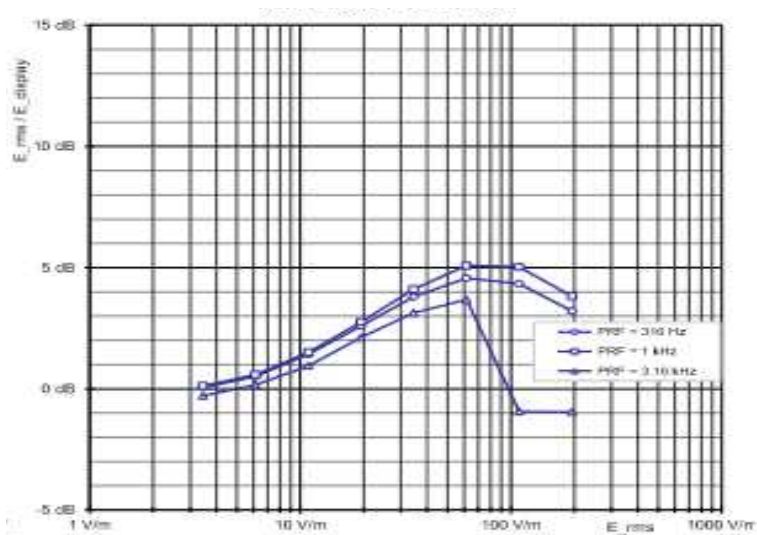


그림 2-9. x축이 E_{rms} 인 경우의 Duty cycle 1/316인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)

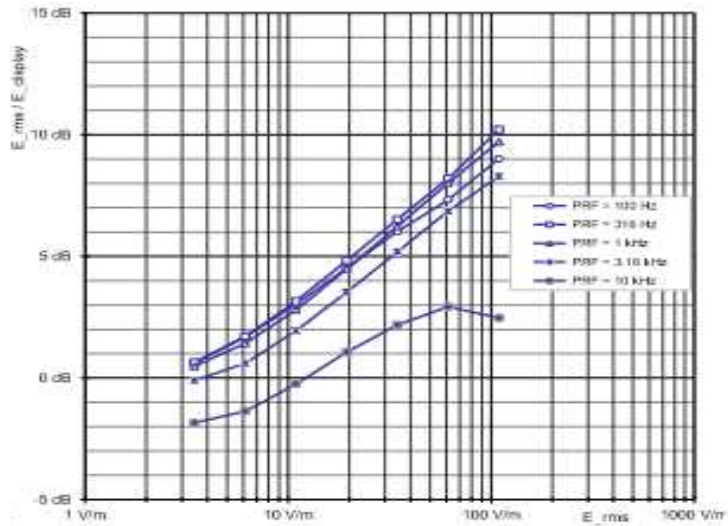


그림 2-10. x축이 E_{rms} 인 경우의 Duty cycle 1/1,000인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)

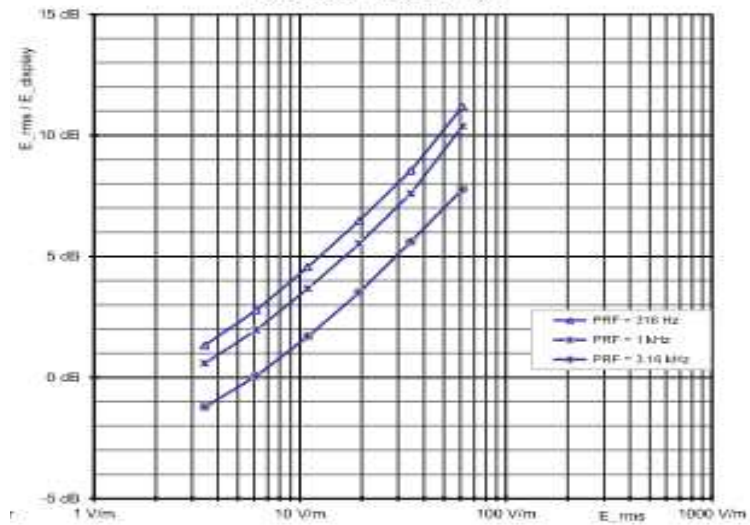


그림 2-11. x축이 E_{rms} 인 경우의 Duty cycle 1/3,160인 고정식 무선탐지기 신호에 대한 보정계수 (프로브 EF1891)

제 2 절 전자파 인체보호기준

1. 국내외 전자파 인체보호기준

가. 국내 전자파 인체보호기준

전파법 및 전기사업법에 의해 국민을 전자파 인체 영향으로부터 엄격하게 국민을 보호하고 있다. 전파법 47조의 2(전자파인체보호기준 등)에 의거하여 전자파인체보호기준(과학기술정보통신부고시 제 2017-7호)을 고시하고 있다. 전자파 인체보호기준은 전신 노출에 대하여 전자파 강도를 제한하고 있으며 일반인과 직업인으로 분류하여 제한하고 있다. 일반인과 직업인에 대한 기준은 표 2-2과 표 2-3에 나타내었다. 국부에 대한 전자파 노출에 대하여는 SAR(Specific Absorption Rate, 전자파比흡수율)로 제한하고 있다. 표 2-4은 국부노출에 대한 SAR를 나타내었다.

표 2-2. 일반인에 대한 전자파강도기준 (국내 전자파 인체보호기준)

주파수 범위	전기장강도 [V/m]	자기장강도 [A/m]	자속밀도 [μT]	전력밀도 [W/m²]
1 Hz 이하	—	3.2×10^4	4×10^4	
1 Hz 이상 ~ 8 Hz 미만	10,000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	
8 Hz 이상 ~ 25 Hz 미만	10,000	$4,000 / f$	$5,000 / f$	
0.025 kHz 이상 ~ 0.8 kHz 미만	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	
0.8 kHz 이상 ~ 3 kHz 미만	$250 / f$	5	6.25	
3 kHz 이상 ~ 150 kHz 미만	87	5	6.25	
0.15 MHz 이상 ~ 1 MHz 미만	87	$0.73 / f$	$0.92 / f$	
1 MHz 이상 ~ 10 MHz 미만	$87 / f^{1/2}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	
10 MHz 이상 ~ 400 MHz 미만	28	0.073	0.092	2
400 MHz 이상 ~ 2,000 MHz 미만	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	$f / 200$
2 GHz 이상 ~ 300 GHz 미만	61	0.16	0.20	10

- 비고: 1. 주파수(f)의 단위는 주파수 범위란에 표시된 단위와 같다.
2. 전기장강도, 자기장강도 및 자속밀도는 실효치로 한다.
자속밀도는, 자기장강도에 자유공간의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$)을 곱한 것이며 전력밀도는 주어진 주파수에서 전기장강도에 자기장강도를 곱한 것이다.
3. 100 kHz 이하의 주파수대역에서 측정값은 시간평균을 취하지 않은 최대값으로 한다.
4. 100 kHz 이상 10 GHz 미만의 주파수대역에서 측정 평균시간은 6 분으로 한다.
5. 10 GHz 이상의 주파수대역에서 측정 평균시간은 $68 / f^{1.05}$ 분으로 한다.
6. 동일 장소 또는 그 주변에 복수의 무선국이 전자파를 복사하는 경우 또는 하나의 무선국이 다중주파수의 전자파를 복사하는 경우 전기장 강도 및 자기장 강도에 관하여는 위 표의 각 주파수에서 복사되는 값의 기준값에 대한 비율의 제곱의 합 또는

전력밀도에 관하여는 위 표의 각 주파수에서 복사되는 값의 기준값에 대한 비율의 합이 각각 1을 초과하지 않아야 한다.

7. 60 Hz 주파수대역의 전기설비(송전선로)는 이 기준을 적용하지 아니한다.

표 2-3. 직업인에 대한 전자파강도기준 (국내 전자파 인체보호기준)

주파수 범위	전기장강도 [V/m]	자기장강도 [A/m]	자속밀도 [μT]	전력밀도 [W/m ²]
1 Hz 이하	—	1.63×10^5	2×10^5	
1 Hz 이상 ~ 8 Hz 미만	20,000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	
8 Hz 이상 ~ 25 Hz 미만	20,000	$2 \times 10^4 / f$	$25 \times 10^4 / f$	
0.025 kHz 이상 ~ 0.82 kHz 미만	500/f	20/f	25/f	
0.82 kHz 이상 ~ 65 kHz 미만	610	24.4	30.7	
0.065 MHz 이상 ~ 1 MHz 미만	610	1.6/f	2.0/f	
1 MHz 이상 ~ 10 MHz 미만	610/f	1.6/f	2.0/f	
10 MHz 이상 ~ 400 MHz 미만	61	0.16	0.2	10
400 MHz 이상 ~ 2,000 MHz 미만	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	f/40
2 GHz 이상 ~ 300 GHz 미만	137	0.36	0.45	50

비고: 1. 주파수(f)의 단위는 주파수 범위란에 표시된 단위와 같다.

2. 전기장강도, 자기장강도 및 자속밀도는 실효치로 한다.

자속밀도는 자기장강도에 자유공간의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$)을 곱한 것이며 전력밀도는 주어진 주파수에서 전기장강도에 자기장강도를 곱한 것이다.

3. 100 kHz 이하의 주파수대역에서 측정값은 시간평균을 취하지 않은 최대값으로 한다.

4. 100 kHz 이상 10 GHz 미만의 주파수대역에서 측정 평균시간은 6분으로 한다.

5. 10 GHz 이상의 주파수대역에서 측정 평균시간은 $68/f^{1.05}$ 분으로

한다. 단, f의 단위는 GHz 이다.

6. 동일 장소 또는 그 주변에 복수의 무선국이 전자파를 복사하는 경우 또는 하나의 무선국이 다중주파수의 전자파를 복사하는 경우 전기장 강도 및 자기장 강도에 관하여는 위 표의 각 주파수에서 복사되는 값의 기준값에 대한 비율의 제곱의 합 또는 전력밀도에 관하여는 위 표의 각 주파수에서 복사되는 값의 기준값에 대한 비율의 합이 각각 1을 초과하지 않아야 한다.
7. 60 Hz 주파수대역의 전기설비(송전선로)는 이 기준을 적용하지 아니한다.

표 2-4. 국부노출에 대한 전자파흡수율(SAR)기준
(국내 전자파 인체보호기준)

주파수 범위	전자파흡수율[W/kg]
100 kHz ~ 10 GHz	1.6

비고: 위 표의 값은 임의의 인체 조직 1그램에 대하여 평균한 전자파흡수율의 최대값에 해당한다.

나. 국외 전자파 인체보호기준

국외의 전자파 인체보호기준 중 가장 대표적인 인체보호기준은 ICNIRP(국제비전리복사방호위원회) Guidelines 1998(DC ~ 300 GHz), ICNIRP Guidelines 2010(DC ~ 100 kHz), IEEE(전기전자기술자협회) std C95.1(3 kHz ~ 300 GHz)등이 있다[3~5]. 그림 2-12과 그림 2-13은 1998년도 ICNIRP의 전기장강도와 자속밀도에 대한 인체보호기준을 나타낸 것이고, 그림 2-14와 그림 2-15은 2010년도에 개정된 ICNIRP의 전기장강도 및 자기장강도의 노출 기준을 나타낸 것이다. 2010년도에 개정된 ICNIRP 기준은 1 Hz ~ 100 kHz까지의 주파수에 대한 노출 제한이며, 1998년도 ICNIRP 기준은 300 GHz까지의 노출 제한 기준치이다. IEEE Std C95.1의 일반인에 대한 인체보호기준은 표 2-5과 그림 2-16,

직업인에 대한 인체보호기준은 표 2-6와 그림 2-17에 나타내었다.

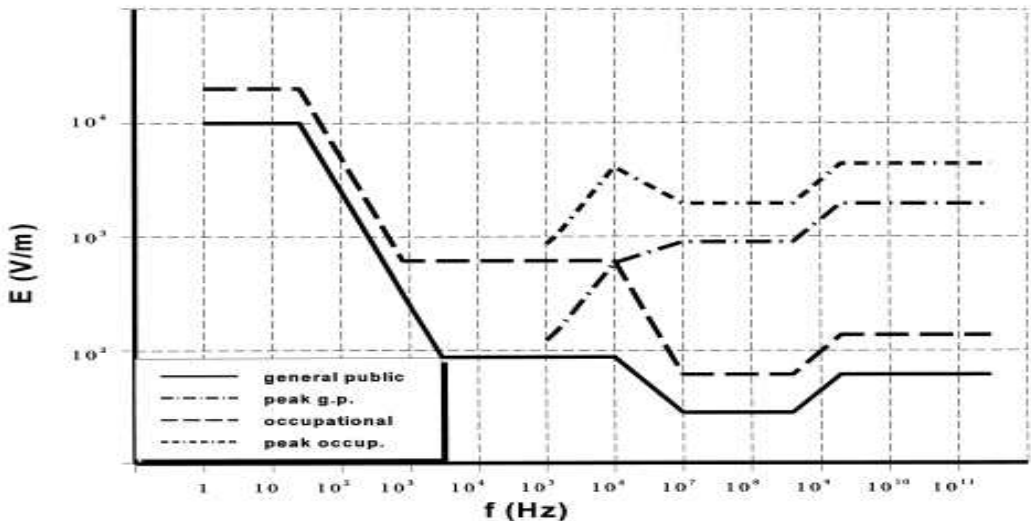


그림 2-12. ICNIRP(1998) 전기장강도 인체보호기준

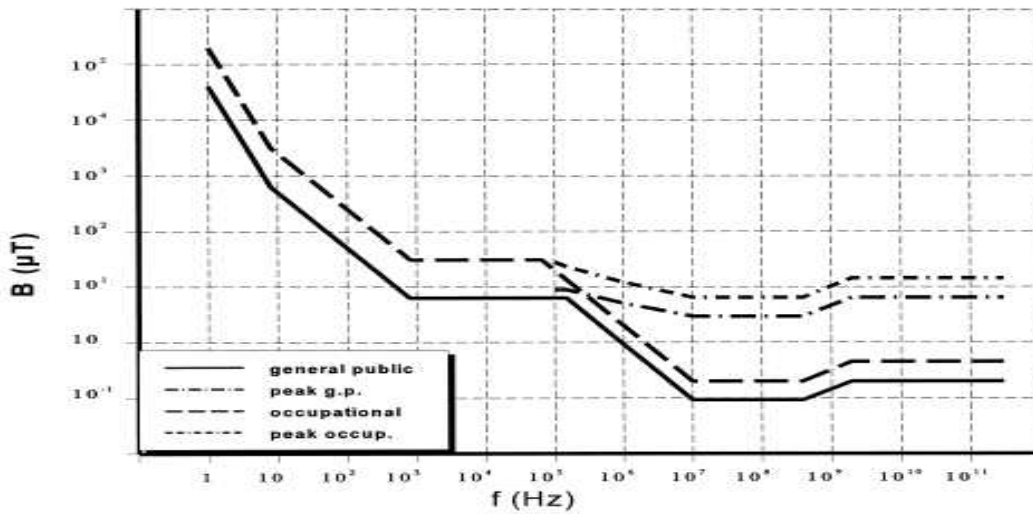


그림 2-13. ICNIRP(1998) 자속밀도(B) 인체보호기준

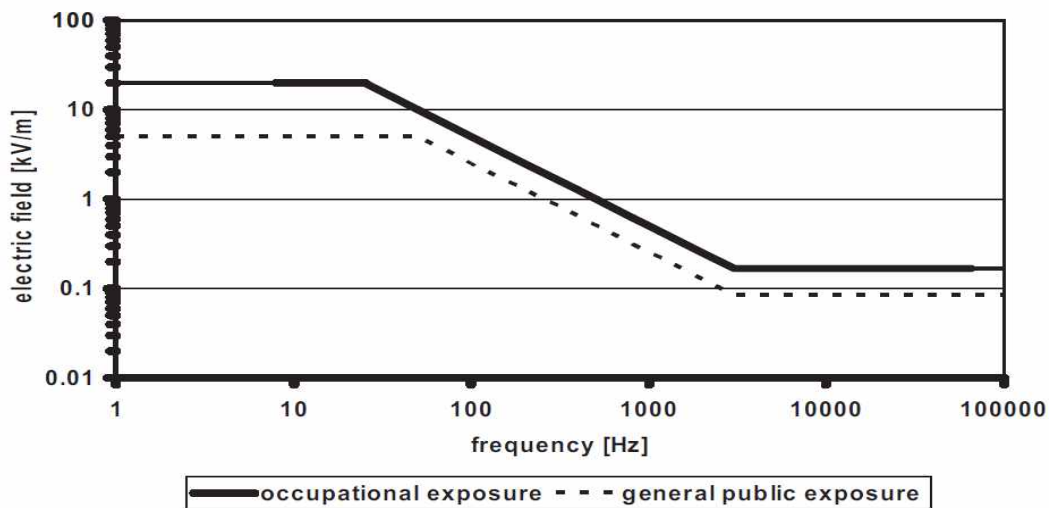


그림 2-14. ICNIRP(2010) 전기장강도 인체보호기준

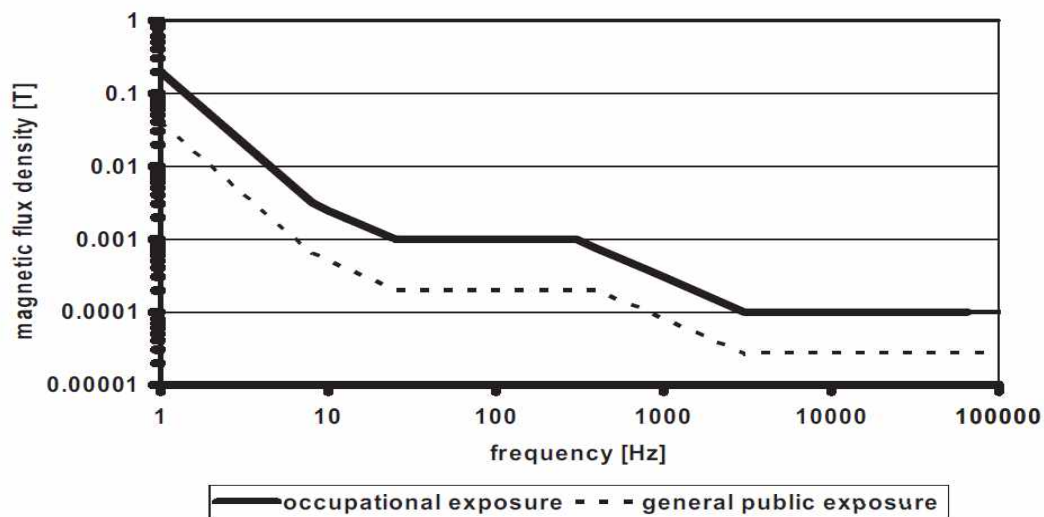


그림 2-15. ICNIRP(2010) 자기장강도 인체보호기준

표 2-5. IEEE C95.1의 일반인에 대한 전자파 인체보호기준

주파수 범위 [MHz]	rms 전기장세기 (E) [V/m]	rms 자기장세기 (H) [A/m]	rms 전력밀도 (S) [W/m ²]	E ² , H ² 또는 S의 평균시간 [min]	
0.1 ~ 1.34	614	1.63/f _M	(1000, 1000000/f _M ²)	6	6
1.34 ~ 3	823.8/f _M	1.63/f _M	(1800/f _M ² , 100000/f _M ²)	f _M ² /0.3	6
3 ~ 30	823.8/f _M	1.63/f _M	(1800/f _M ² , 100000/f _M ²)	30	6
30 ~ 100	27.5	158.3/ f _M ^{1.668}	(2, 9400000/f _M ^{3.336})	30	0.0636× f _M ^{1.337}
100 ~ 400	27.5	0.0729	2	30	30
400 ~ 2,000	-	-	f _M /200	30	
2,000 ~ 5,000	-	-	10	30	
5,000 ~ 30,000	-	-	10	150/f _G	
30,000 ~ 100,000	-	-	10	25.24/f _G ^{0.476}	
100,000 ~ 300,000	-	-	(90f _G -7000)/200	5048/[(9f _G -700)f _G ^{0.479}]	

비고: 1. f_M은 MHz 단위의 주파수이고 f_G는 GHz 단위의 주파수이다.

2. |E|², |H|², S의 평균시간 열에서 오른쪽 열은 rms |E|²의 평균시간이고, 왼쪽 열은 rms |H|²의 평균시간이다. 400 MHz이상의 열에서는 rms S(전력밀도)의 평균시간이다.

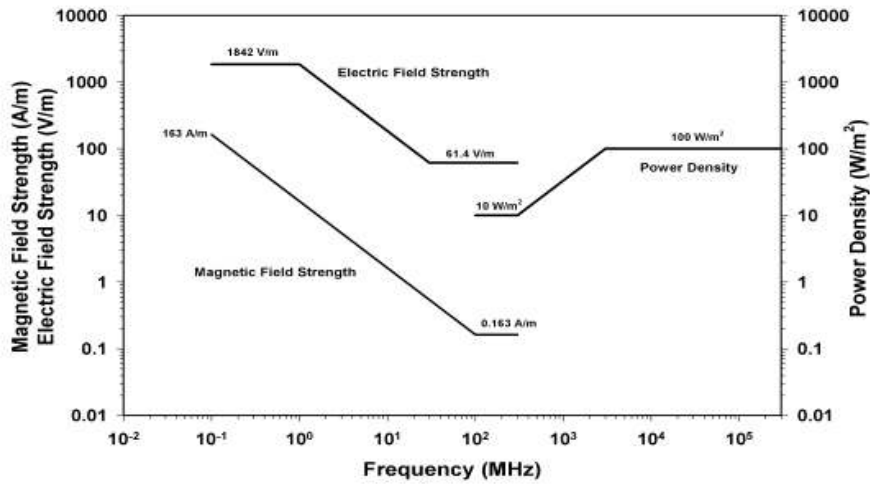


그림 2-16. IEEE 전기장강도 인체보호기준(직업인)

표 2-6. IEEE C95.1의 직업인에 대한 전자파 인체보호기준

주파수 범위 [MHz]	rms 전기장세기 (E) [V/m]	rms 자기장세기 (H) [A/m]	rms 전력밀도 (S) [W/m ²]	$ E ^2, H ^2$ 또는 S의 평균시간 [min]
0.1 ~ 1.0	1842	$1.63/f_M$	(9000, $100000/f_M^2$)	6
1.0 ~ 30	$1842/f_M$	$1.63/f_M$	($9000/f_M^2$, $100000/f_M^2$)	6
30 ~ 100	61.4	$1.63/f_M$	(10, $100000/f_M^2$)	6
100 ~ 300	61.4	0.163	10	6
300 ~ 3,000	-	-	$f_M/30$	6
3,000 ~ 30,000	-	-	100	$19.63/f_G^{1.079}$
30,000 ~ 300,000	-	-	100	$2.524/f_G^{1.079}$

비고: f_M 은 MHz 단위의 주파수이고 f_G 는 GHz 단위의 주파수이다.

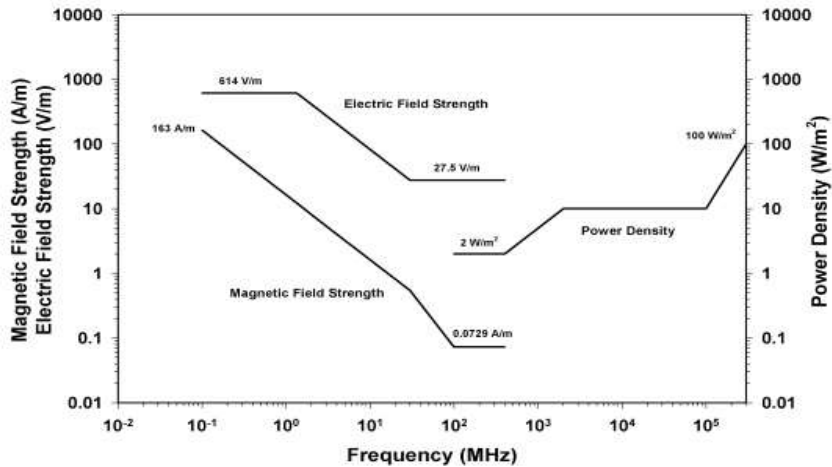


그림 2-17. IEEE 전기장강도 인체보호기준(일반인)

2. 펄스파에 대한 인체보호기준

가. 펄스파에 대한 국내 인체보호기준

국내에서는 전자파 인체보호를 위하여 전자파인체보호기준(과학기술 정보통신부고시 제 2017-7호)을 제정하여 고시하고 있다. 하지만 펄스 전자파 신호에 대한 인체보호기준은 별도로 규정하고 있지 않으며, 연속파와 동일하게 전자파 강도 또는 SAR(전자파흡수율) 값만 규정하고 있다.

국제적 단체인 ICNIRP과 IEEE는 전기장, 자기장, 전력밀도에 대한 평균값 (통상 6분) 기준을 규정하고 펄스 전자파에 대해서는 첨두값 기준도 함께 규정하고 있다.

나. ICNIRP 인체보호기준

ICNIRP의 전자파 강도에 대한 인체보호기준은 직업인과 일반인 기준으로 나누어져 있으며, 주파수 별로 피크값에 대한 기준도 제시하고 있

다.

펄스파의 주파수대역별 피크값 제한치는

- 1 Hz ~ 100 kHz : 연속파의 기본 제한기준 $\times \sqrt{2}$
 - 펄스폭 지속시간이 t_p 인 펄스파의 경우, 기본 제한기준에 적용할 주파수(f)는 $f=1/(2t_p)$ 로 계산한다. 100 kHz까지의 주파수 및 펄스 자체에 대해 펄스와 관련된 최대전류밀도는 상승시간/하강 시간과 자속밀도의 최대 변화율로 구할 수 있다.
- 100 kHz ~ 10 MHz :
 - 100 kHz : 연속파의 시간평균 전기장 및 자기장의 제한기준 $\times 1.5$
 - 10 MHz : 연속파의 시간평균 전기장 및 자기장의 제한기준 $\times 32$
 - 100 kHz ~ 10 MHz 內 주파수는 보간법(1.5 ~ 32)으로 구함.
- 10 MHz 이상 :
 - 연속파의 시간평균 전기장 및 자기장의 제한기준 $\times 32$
 - 펄스폭에 대해 평균화된 전력밀도의 제한기준 $\times 1,000$

이다. 여기서 기본 제한기준과 시간평균 전기장 및 자기장의 제한기준은 ICNIRP guidelines 1998에 명시되어 있는 값이며 그 값은 표 2-7, 2-8, 2-9에 표기하였다. 그림. 2-18은 펄스파에 대한 주파수 대역별 피크 제한치를 나타낸 것이다.



그림 2-18. 펄스파에 대한 전기장 및 전력밀도 인체보호기준(ICNIRP)

표 2-7. 연속파의 시간변화에 따른 전기장과 자기장의 기본 제한기준
(ICNIRP guidelines 1998)

Exposure characteristics	Frequency range	Current density for head and trunk (mA/m^2) (rms)	Whole-body average SAR (W/kg)	Localized SAR (head and trunk) (W/kg)	Localized SAR (limbs) (W/kg)
Occupational exposure	up to 1 Hz	40	–	–	–
	1 – 4 Hz	$40/f$	–	–	–
	4 Hz – 1 kHz	10	–	–	–
	1 – 100 kHz	$f/100$	–	–	–
	100 kHz – 10 MHz	$f/100$	0.4	10	20
	10 MHz – 10 GHz	–	0.4	10	20
General public exposure	up to 1 Hz	8	–	–	–
	1 – 4 Hz	$8/f$	–	–	–
	4 Hz – 1 kHz	2	–	–	–
	1 – 100 kHz	$f/500$	–	–	–
	100 kHz – 10 MHz	$f/500$	0.08	2	4
	10 MHz – 10 GHz	–	0.08	2	4

표 2-8. 연속파의 시간변화에 따른 전기장, 자기장에 대한
직업인 제한기준 (ICNIRP guidelines 1998)

Frequency range	E-field strength (V/m)	H-field strength (A/m)	B-field (μ T)	Equivalent plane wave power density S_{eq} (W/m ²)
up to 1 Hz	–	1.63×10^5	2×10^5	–
1–8 Hz	20,000	$1.63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	–
8–25 Hz	20,000	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^4/f$	–
0.025–0.82 kHz	500/f	20/f	25/f	–
0.82–65 kHz	610	24.4	30.7	–
0.065–1 MHz	610	1.6/f	2.0/f	–
1–10 MHz	610/f	1.6/f	2.0/f	–
10–400 MHz	61	0.16	0.2	10
400–2,000 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	$f/40$
2–300 GHz	137	0.36	0.5	50

표 2-9. 연속파의 시간변화에 따른 전기장, 자기장에 대한
일반인 제한기준 (ICNIRP guidelines 1998)

Frequency range	E-field strength (V/m)	H-field strength (A/m)	B-field (μ T)	Equivalent plane wave power density S_{eq} (W/m^2)
up to 1 Hz	–	3.2×10^4	4×10^4	–
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	–
8–25 Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	–
0.025–0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	–
0.8–3 kHz	$250/f$	5	6.25	–
3–150 kHz	87	5	6.25	–
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	–
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	–
10–400 MHz	28	0.073	0.092	2
400–2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037/f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2–300 GHz	61	0.16	0.20	10

그리고 ICNIRP guidelines 1998에서는 0.3 GHz ~ 10 GHz 펄스파에 의한 auditory effects를 방지하기 위해 SA(에너지흡수율) 기준도 함께 규정하고 있다. 직업인의 경우의 SA 기준 (10 g 조직)은 10 mJ/kg 이하, 일반인의 경우는 2 mJ/kg 이하이다.

다. IEEE 인체보호기준

IEEE의 전자파 강도에 대한 인체보호기준은 주파수 100 kHz를 기준으로 평가기준을 달리하고 있다. 그 내용을 표 2-10에 나타내었다.

표 2-10. 비정현파/펄스파에 대한 IEEE 인체보호기준 적용 구분

주파수	평가기준
100 kHz 이하	3. E-field, B-field, S(Power density) 평균값 기준 만족 4. 피크값 기준 만족 → Peak Field 또는 Fourier 변환으로 평가
100 kHz 이상	4. 평균 전력밀도(S) 기준 만족 5. 피크 전기장 기준(≤ 100 kV/m)만족 6. 에너지 밀도 기준 만족 : $\sum_0^{0.1s} (S_{pk} \times \tau) \leq \frac{MPE_{avg} \times T_{avg}}{5}$ $S_{pk} = \text{펄스의 peak 전력밀도}[W/m^2], \tau = \text{펄스폭}[sec],$ $MPE_{avg}(\text{maximum permissible exposure})$ $= \text{최대허용노출 평균값}[W/m^2],$ $T_{avg} = \text{MPE가 결정되기 위한 노출 평균시간}[sec]$ ※ 단, 평균화 시간(통상 6분)동안 펄스수가 5개 이상이거나 펄스폭이 100 ms 이상일 때는 1, 2 기준만 만족하면 됨.

(1) 순시 피크값 기반의 제한

In-situ(해당부위)에서 순시 전계 피크 제한치는 BRs(Basic restrictions)(rms) 값에 $\sqrt{2}$ 를 곱한 값으로 제한된다. 표 2-11은 주파수에 따른 몸체 대한 기본제한 치를 나타낸 것이다[3].

표 2-11. BRs applying to various regions of the body(IEEE C95.1)

Exposed tissue	f [Hz]	Action level	Persons in controlled environments
		E(rms) [V/m]	E(rms) [V/m]
Brain	20	5.89×10^{-3}	1.77×10^{-2}
Heart	167	0.943	0.943
Extremities	3350	2.10	2.10
Other tissue	3350	0.701	2.10

외부(인체 외부)자기장의 순시 피크 제한치는 식 (2)으로 값을 도출할 수 있다.

$$\dot{B}_P = \sqrt{2} MPE_B(2\pi f) \quad (2)$$

식 (2)에서 \dot{B}_P 는 시간미분에 대한 외부 자기장의 최대 허용값 [T], MPE_B 는 표 2-12, 2-13에 주어진 해당 주파수의 최대 자속밀도 [mT], f 는 주파수로 값은 $1/(2t_p)$ [kHz], t_p 는 시간 미분에 대한 외부자기장의 피크 이동 위상 지속시간 [sec]이다.

표 2-12. MPE for exposure of head and torso : $f = 3\text{kHz}$ to 5MHz
(IEEE C95.1)

Frequency range [kHz]	Action level		Persons in controlled environments	
	B_{rms} [mT]	H_{rms} [A/m]	B_{rms} [mT]	H_{rms} [A/m]
3.0 - 3.35	$0.687/f$	$547/f$	$2.06/f$	$1640/f$
3.35 - 5000	0.205	163	0.615	490

표 2-13. MPE for the limbs : f = 3kHz to 5 MHz (IEEE C95.1)

Frequency range [kHz]	Action level		Persons in controlled environments	
	B _{rms} [mT]	H _{rms} [A/m]	B _{rms} [mT]	H _{rms} [A/m]
3.0 - 3.35	3.79/f	3016/f	3.79/f	316/f
3.35 - 5000	1.13	900	1.13	900

(2) Fourier 성분 기반의 제한

Fouriere 성분을 통한 다중주파수 파형의 노출 수준은 식 (3)으로 도출한다.

$$\sum_0^{5MHz} \frac{A_i}{MPE_i} \leq 1 \quad (3)$$

식 (3)에서 A_i 는 i 번째 푸리에 성분의 크기, MPE_i 는 f_i 에서 단일 정현파에 대한 최대 허용노출(표 2-11, -12, -13)을 말한다. 합산은 노출 파형의 최저 주파수에서 5 MHz까지의 최대 주파수까지 수행한다. 그리고 A_i 와 MPE_i 는 동일한 수량이 측정되어야 하고 같은 단위여야 한다. 예를 들어 A_i 가 자속밀도의 크기라면 MPE_i 는 자속밀도로 측정되어야 한다. 즉, A_i 와 MPE_i 는 필드의 시간 미분값, 유도된 전계, 유도된 전류 밀도가 될 수 있다.

3 kHz 이하의 주파수에 적용되는 MPE_i 는 IEEE Std C95.6-2002에서 주어진 인체내부 MPE(전계)의 Basic Restrictions, B-field 또는 H-field에 대한 MPE, 외부 전계에 대한 MPE로 계산되어야 한다[6].

제 3 장 펄스 변조된 RF 신호의 측정시스템 구성

펄스파의 전자파 강도는 펄스폭, 펄스반복주파수(PRF, Pulse Repetition Frequency), 진폭에 의하여 변화한다. 따라서 신호의 주파수, 주기, 출력, 펄스폭등을 변경 할 수 있는 실험실 환경을 구성하였다. 그림 3-1은 펄스파 신호 측정을 위한 테스트 블록도를 나타낸 것이고, 그림 3-2는 구성된 실험실의 사진이다. 그림 3-2의 실험실에서 얻은 데이터는 환경잡음으로 인해 측정치의 신뢰성이 떨어져 국립전파연구원의 차폐된 실험실에 유사한 측정 시스템을 구성한 후 측정을 수행하였다.

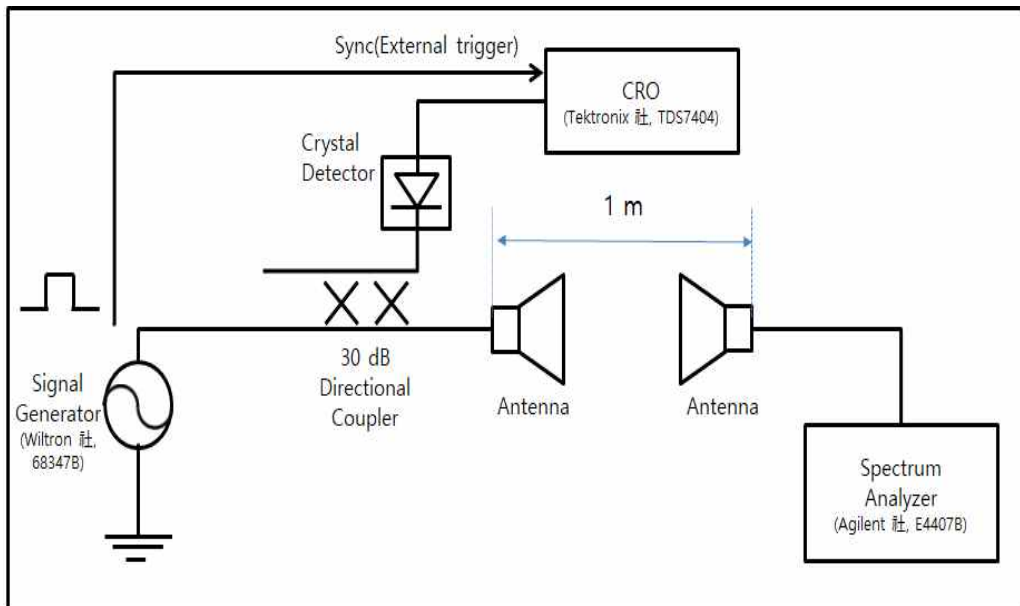


그림 3-1. 펄스파 신호 측정을 위한 테스트 블록도



그림 3-2. 펄스와 신호 측정을 위한 시험 환경
(단국대 전자파연구실)

제 4 장 송신시스템의 펄스파 측정

X-band의 펄스파를 측정할 수 있는 휴대용 전자파 측정기 (Narda Inc.)의 전자파 인체 노출량 측정값에 대한 보정계수를 도출하기 위해 3장에서 제시한 테스트 구성도를 구축하여 연속파에 대한 휴대용 전자파 측정기의 성능을 확인하고 펄스파에 대한 휴대용 전자파 측정기의 측정값을 확인하였다. 연속파 측정을 위해 수신단에 Horn Antenna와 Spectrum Analyzer를 이용하여 전자파 강도를 측정한 후 동일한 위치에서 휴대용 전자파 측정기로 측정하여 그 값을 비교하였다. 펄스파 측정은 연속파와 같은 방법으로 수행하여 Narda Inc.에서 제공하는 보정계수 그래프와 비교 및 분석하였다.

제 1 절 실험방법

일반적인 측정방법은 다음과 같다. 신호발생기(Signal Generator, S/G)에서 신호를 발생하고 이를 증폭기(Amplifier, Amp.) 거쳐 신호를 증폭시킨다. 증폭된 신호가 제대로 나오는지 확인하기 위해 30 dB Directional Coupler의 coupled port에 Crystal Detector를 연결하고 Oscilloscope로 신호를 확인한다. 30 dB Directional Coupler의 transmitted port는 Ridged Horn Antenna(Tx)와 연결하여 신호를 자유 공간에 복사하게 한다. 그리고 Tx Antenna로부터 1 m 떨어진 지점에서 Ridged Horn Antenna(Rx)를 설치한 후 Spectrum Analyzer와 연결하여 신호의 세기를 확인하고 Ridged Horn Antenna(Rx)와 같은 지점에서 휴대용 전자파 측정기에 연결된 Probe를 놓아 신호의 세기를 휴대용 전자파 측정기로 측정한다. S/A와 휴대용 전자파 측정기에서 측정치와 계산치를 이용하여 휴대용 전자파 측정기의 datasheet에 명시된 X-band E-field의 보정그래프와 비교 및 분석한다.

그림 4-1은 Tx Antenna로 전달되는 송신기 출력이 25 dBm 이하인 경우의 신호를 Rx Antenna와 스펙트럼 분석기로 측정하는 블록도이고 그림 4-2는 송신기 출력이 25 dBm인 경우의 신호를 휴대용 전자파 측

정기로 측정하는 블록도이다. 그림 4-3은 송신기 출력이 25 dBm 이상인 경우의 신호를 Rx Antenna와 스펙트럼 분석기로 측정하는 블록도이고, 그림 4-4는 송신기 출력이 25 dBm 이상인 경우의 신호를 휴대용 전자파 측정기와 측정기로 측정 블록도이다.

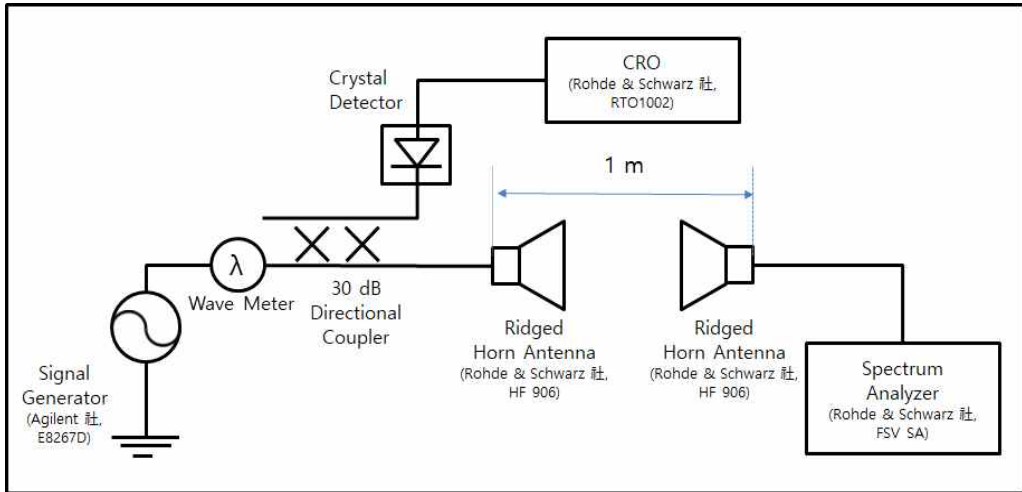


그림 4-1. 스펙트럼 분석기를 이용한 측정 블록도
(송신기 출력 ≤ 25 dBm)

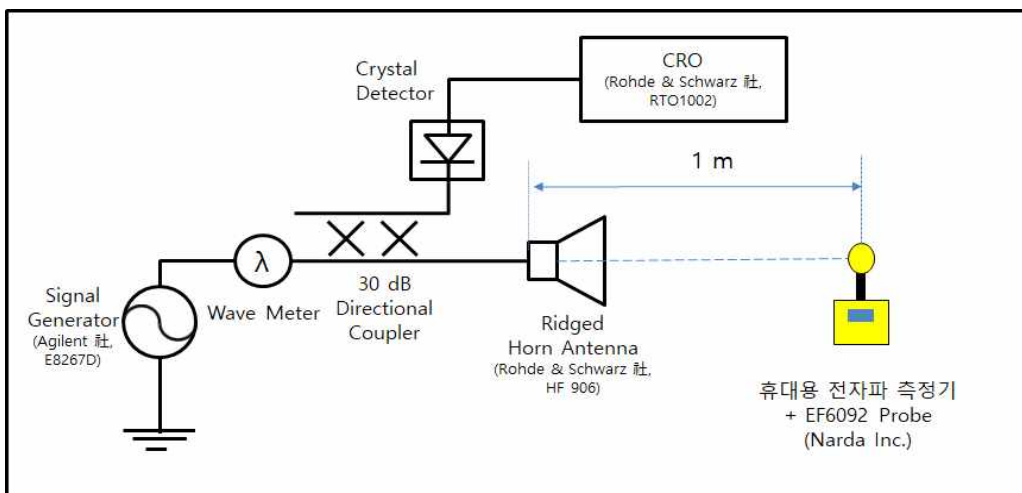


그림 4-2. 휴대용 전자파 측정기로 수신 전계를 측정하는 블록도
(송신기 출력 ≤ 25 dBm)

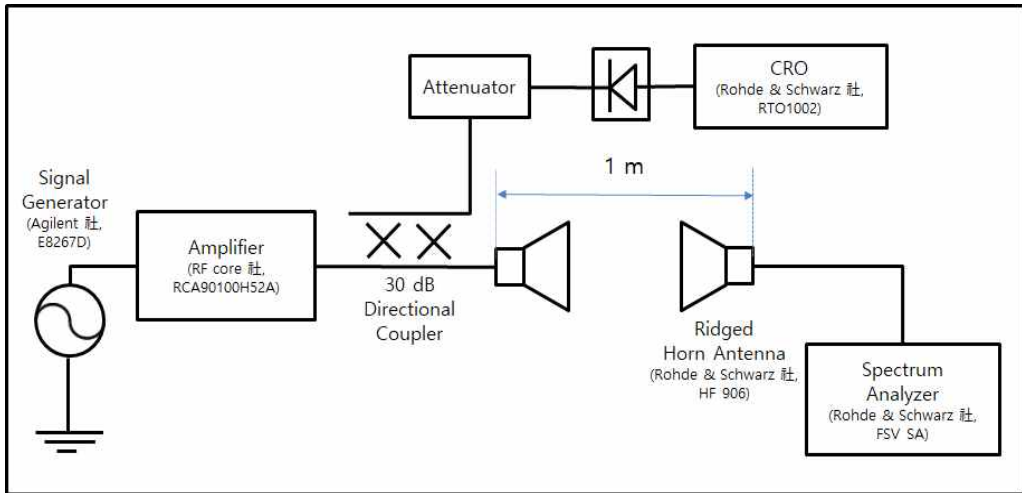


그림 4-3. 스펙트럼 분석기를 이용한 측정 블록도
(송신기 출력 ≥ 25 dBm)

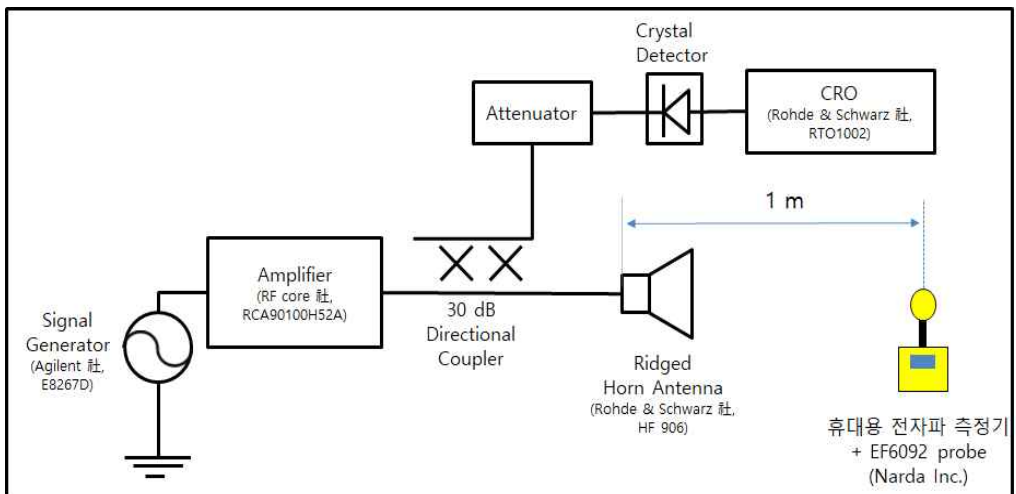


그림 4-4. 휴대용 전자파 측정기로 수신 전계를 측정하는 블록도
(송신기 출력 ≥ 25 dBm)

송신기 출력은 송신안테나로부터 1 m 떨어진 지점에서의 전계값을 3, 6, 10, 15, 20, 30, 60, 120 [V/m]으로 설정하여 계산되었다. 이때, 설정한 전계값은 ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 취하였다. 그리고 계산된 송신기 출력 값에 맞추어 신호

를 만들고 송신안테나에 전달하였다. 송신기 출력은 다음 수식으로부터 계산되었다.

$$\text{Power Density, } P_D = \frac{G_t P_t}{4\pi r^2} = \frac{E_{target}^2}{\eta_0} \quad (4)$$

$$P_t = \frac{4\pi r^2 E_{target}^2}{\eta_0 G_t} \quad (5)$$

식 (4)에서 G_t 는 안테나 이득, P_t 는 송신기 출력 [W], E_{target} 는 송신안테나와 거리 r 만큼 떨어진 지점의 rms 전계의 세기 [V/m], r 은 송신기 안테나와 떨어진 거리 [m], η_0 는 자유공간의 고유임피던스(intrinsic impedance)[Ω]이다.

Spectrum Analyzer에서 측정되는 신호는 전압[dB μ V]으로 표기된다. 안테나 종단의 전기장과 안테나 종단의 전압 비인 AF(Antenna Factor)를 이용하면 측정된 전계[V/m]는 전압[dB μ V]로 변환이 가능하다. 변환식은 다음과 같이 구해진다.

$$AF = \frac{E_{target}}{V_{SA}}, \quad V_{SA} = \frac{E_{target}}{AF} \quad (6)$$

$$V_{SA}[dB\mu V] = 20 \log(E_{target}[V/m] \times 10^6)[dB\mu V/m] - AF[dB/m] \quad (7)$$

식 (6), (7)에서 AF는 안테나 끝단에 유기되는 전계와 안테나 끝단에 유기되는 전압의 비 [1/m], V_{SA} 는 Spectrum Analyzer에서 출력되는 전압[dB μ V], E_{target} 는 측정지점에서의 전계[V/m]이다.

위에서 언급한 송신안테나로부터 1m 떨어진 지점에서의 설정된 전계가 펄스와 신호일 경우, 설정된 전계는 펄스파의 duty 구간에서의 E_{peak} 값이 된다. 반면 휴대용 전자파 측정기에서 측정되는 E_{rms} 값은 시간평균 값이기 때문에 휴대용 전자파 측정기의 측정치와 계산치를 비교하기 위해서는 펄스파의 duty 구간에서의 E_{peak} 값을 시간평균값으로 변환해야

한다. 변환 식은 다음과 같다.

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} E(t)^2 dt} \quad (8)$$

식 (8)에서 E_{rms} 는 펄스파의 시간평균값[V/m]이고, $E(t)$ [V/m]는 $T_1 \leq t \leq T_2$ 에서 정의된 연속함수이다. 식 (8)을 통해 펄스파의 E_{rms} 를 구하기 위해 T_1 이 0 초, T_2 를 펄스의 주기(T), $E(t)$ 를 펄스파의 duty 구간에서의 E_{peak} 로 설정하면 식 (9)을 얻을 수 있다.

$$E_{rms} = E_{peak} \times \sqrt{Duty\ Cycle} \quad (9)$$

식 (9)의 E_{peak} 는 Duty 구간에서의 E_{rms} 값이다.

식 (9)의 전계값 E_{rms} 를 전력밀도 P_{rms} 값으로 변환하는 식은 다음과 같다.

$$P_{rms} = \frac{E_{rms}^2}{\eta_0} \simeq \frac{E_{rms}^2}{377} \quad (10)$$

식 (10)에서 P_{rms} 는 측정지점에서의 전력밀도로 시간평균값 [W/m^2], E_{rms} 는 측정지점에서의 전계로 펄스파의 시간평균값 [V/m]이고, η_0 는 자유공간의 고유임피던스(377Ω) [Ω] 이다.

제 2 절 9.0 GHz, CW 신호의 전자파강도 측정

그림 4-5와 같이 구성 후, 9.0 GHz 신호의 송신 출력에 따른 스펙트럼 분석기에서 출력되는 전자파 강도를 확인하였다. 그림 4-6는 그림 4-5를 구성하여 측정하는 모습을 나타낸 것이다.

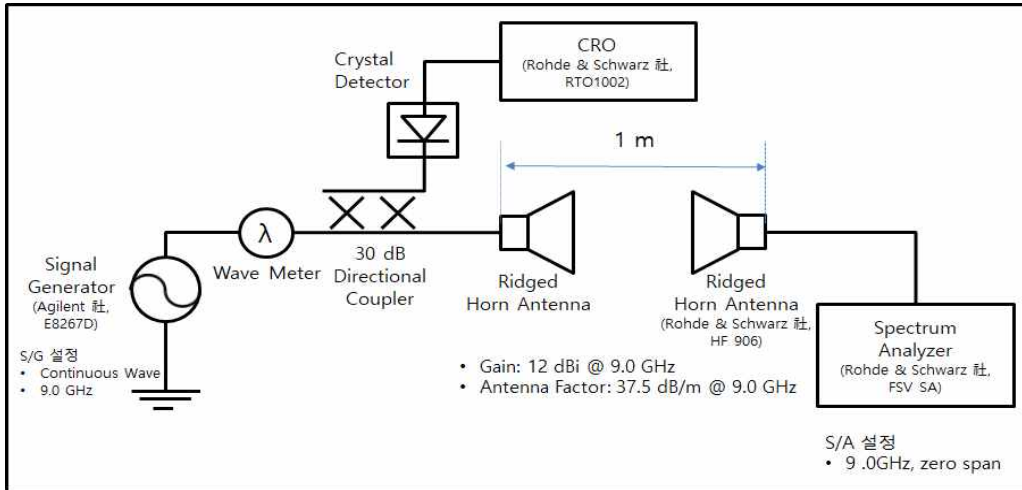


그림 4-5. 신호가 CW인 경우, S/A를 이용하여 수신 전계를 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≤ 25 dBm)



그림 4-6. (좌) Crystal Detector와 오실로스코프가 연결된 X-band 측정시스템. (우) 서로 마주 보고 있는 Tx, Rx 안테나

그림 4-7과 4-8은 9.0 GHz 신호의 송신 출력의 변화에 따른 휴대용 전자파 측정기에 출력되는 전자파 강도를 확인하기 위한 구성도이다. 그림 4-9은 그림 4-7, 4-8을 구성하여 측정하는 모습의 사진이다.

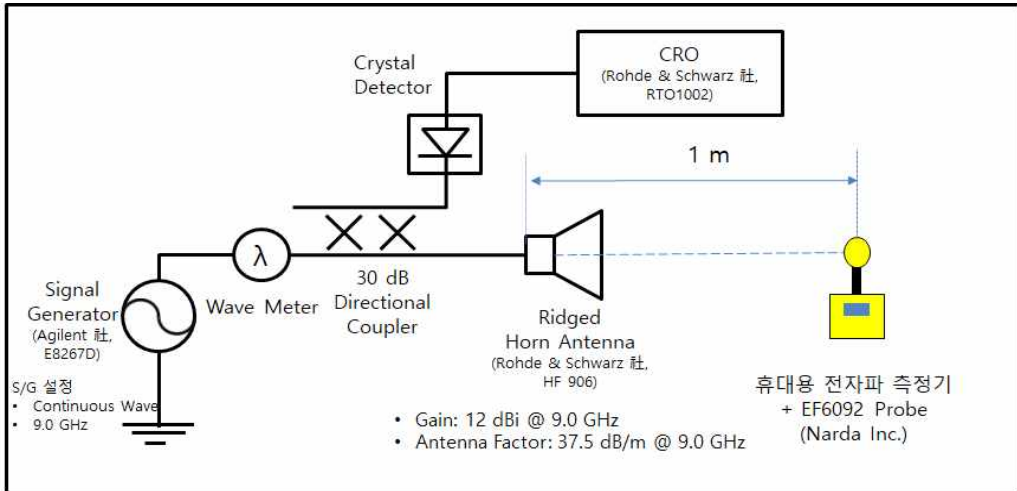


그림 4-7. 신호가 CW인 경우, 휴대용 전자파 측정기로 수신 전계를 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≤ 25 dBm)

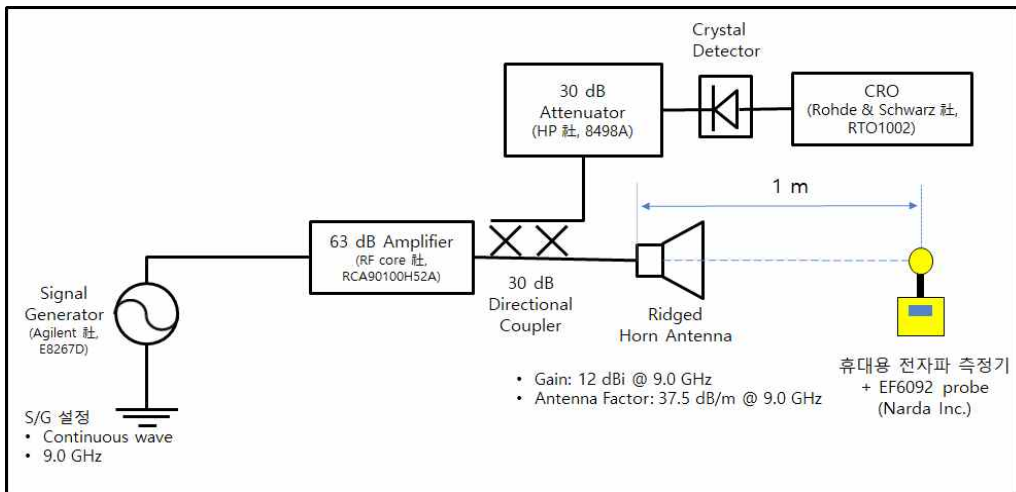


그림 4-8. 신호가 CW인 경우, 휴대용 전자파 측정기로 수신 전계를 측정하는 블록도 (송신기 출력 ≥ 25 dBm)



그림 4-9. 9.0 GHz, CW의 신호를 휴대용 전자파 측정기로
측정하는 배치도

표 4-1. 송신신호가 9.0 GHz이고 CW인 경우, S/A와
휴대용 전자파 측정기의 측정결과

$G_t = 12$ [dB], $r = 1$ [m], $n_0 = 377$ [Ω], $AF = 37.5$ [dB/m]				
측정 지점의 E_{peak} 설정값 (rms) [V/m] <1>	송신기 출력 계산치 [dBm] <2>	S/A에 출력되는 전압 (목표치) [dB μ V] <3>	S/A에 출력되는 전압 (측정치) [dB μ V] <4>	휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average) [V/m] <5>
3	12.77	92.04	92.73	3.10
6	18.79	98.06	98.67	6.23
10	23.20	102.50	103.14	10.54
15	26.75	106.02	—	14.88
20	29.24	108.52	—	19.69
30	32.77	112.06	—	30.47
60	38.79	124.08	—	57.26
120	44.81	127.61	—	121.80

<1> ICNIRP Guideline에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치 (61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 Pulse 신호의 Duty에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (5)를 이용하여 P_t (송신기출력)[dBm]을 구한다. ($G_t = 12$ [dB], $r = 1$ [m], $n_0 = 377$ [Ω], $AF = 37.5$ [dB/m] [7] @ 9.0 GHz, Impedance = 50 [Ω]) 출력이 25 dBm 이하인 경우는 S/G만 사용하여 신호를 발생하고, 25 dBm 이상인 경우에는 S/G와 Amp.를 연결하여 신호를 발생한다.

<3> 식 (5), (7)을 이용하여 값을 산출한다.

<4> 높은 출력의 신호로 인한 S/A의 손상이 우려가 되어 S/A를 이용

한 측정은 송신기 출력이 25 dBm 이하인 경우만 측정한다.

<5> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 단위를 전계 [V/m]로 설정하여 측정하고 그 값은 시간평균값이다.

표 4-1에서 9.0 GHz CW 신호에 대해서는 스펙트럼 분석기를 이용한 전자파강도 측정값과 휴대용 전자파 측정기로 측정한 값이 서로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 CW 신호에 대한 휴대용 전자파 측정기의 보정계수가 필요 없다.

제 3 절 펄스파 전자파강도 측정

1. Duty cycle이 1/316인 펄스파의 전자파강도 측정

반송파(Carrier)가 9.0 GHz이고 Duty cycle이 1/316인 펄스파의 펄스반복주파수가 316 Hz, 1,000 Hz, 3,160 Hz 인 경우에 따라 전자파강도를 측정하기 위해 그림 4-10, 4-11과 같이 구성하고 측정 결과를 표 4-2 ~ 4에 나타내었다. Narda Inc.에서 제공한 보정계수[2]와 휴대용 전자파 측정기로 측정한 보정계수의 비교를 그림 4-12 ~ 17에 나타내었다.

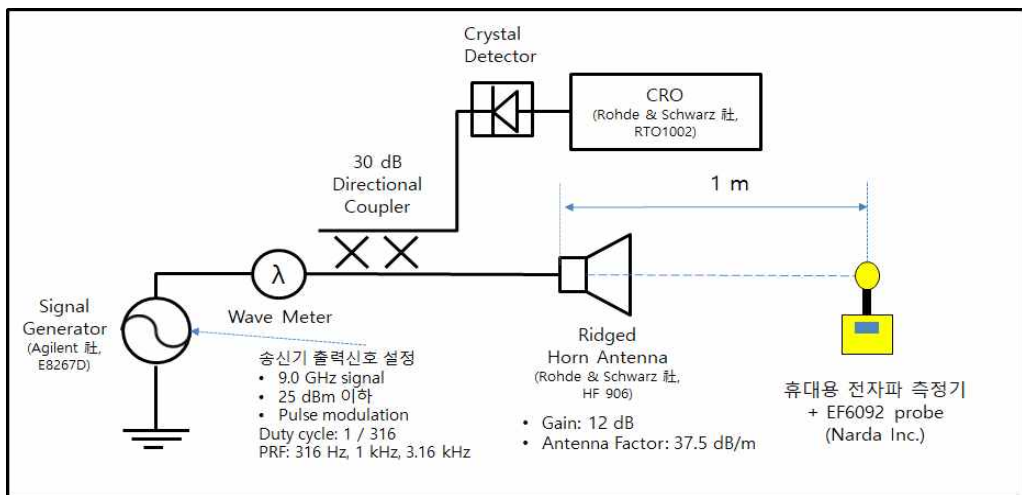


그림 4-10. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/316인 펄스파
신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도
(송신기 출력 ≤ 25 dBm)

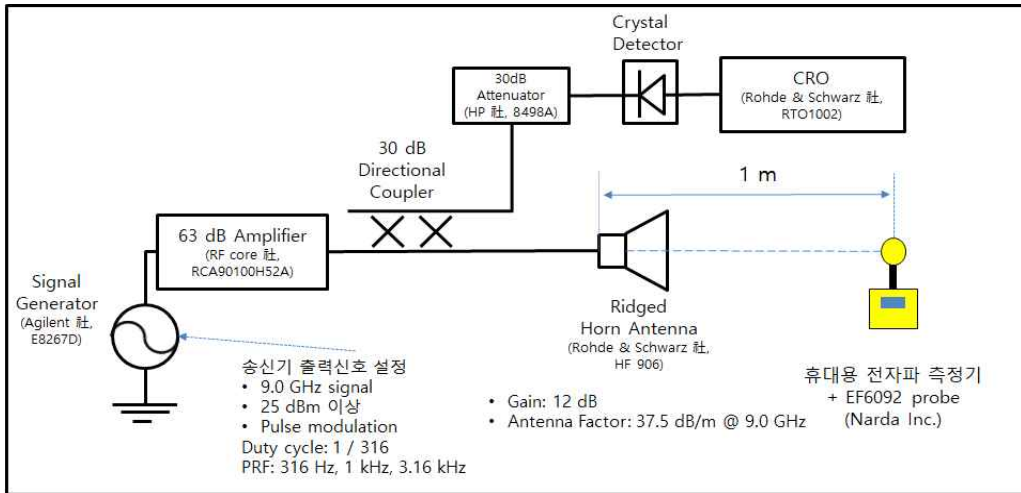


그림 4-11. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/316인 펄스파 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도
(송신기 출력 ≥ 25 dBm)

표 4-2. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 316 Hz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정 지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.56	0.62	-0.42
20	1.13	1.32	-0.69
30	1.69	1.96	-0.65
60	3.38	3.61	-0.29
120	6.75	6.08	0.45
180	10.13	7.32	1.41
240	13.50	8.70	1.91
300	16.88	10.05	2.25

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스파 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (8)을 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms} / E_{display} = 10 \log (E_{rms, 계산치} / E_{display @ 휴대용 전자파 측정기}) [dB]$ [9]

표 4-3. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 1 kHz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정 지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.56	0.64	-0.56
20	1.13	1.31	-0.66
30	1.69	1.97	-0.67
60	3.38	3.60	-0.28
120	6.75	6.00	0.51
180	10.13	7.24	1.46
240	13.50	8.79	1.86
300	16.88	10.07	2.24

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스와 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (9)를 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms} / E_{display} = 10 \log (E_{rms, \text{계산치}} / E_{display @ \text{휴대용 전자파 측정기}}) [dB]$ [9]

표 4-4. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 3.16 kHz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정 지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.56	0.62	-0.42
20	1.13	1.36	-0.82
30	1.69	1.96	-0.65
60	3.38	3.59	-0.27
120	6.75	6.04	0.48
180	10.13	7.33	1.40
240	13.50	8.74	1.89
300	16.88	10.18	2.20

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스와 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (9)를 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms} / E_{display} = 10 \log (E_{rms, 계산치} / E_{display @ 휴대용 전자파 측정기}) [dB]$ [9]

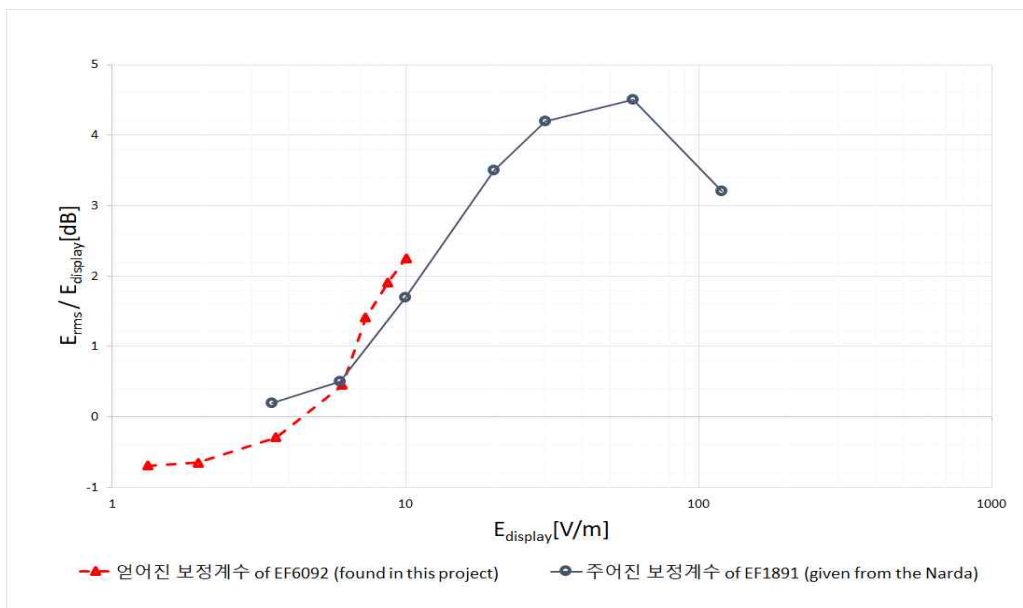


그림 4-12. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 316 Hz인 경우의
보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

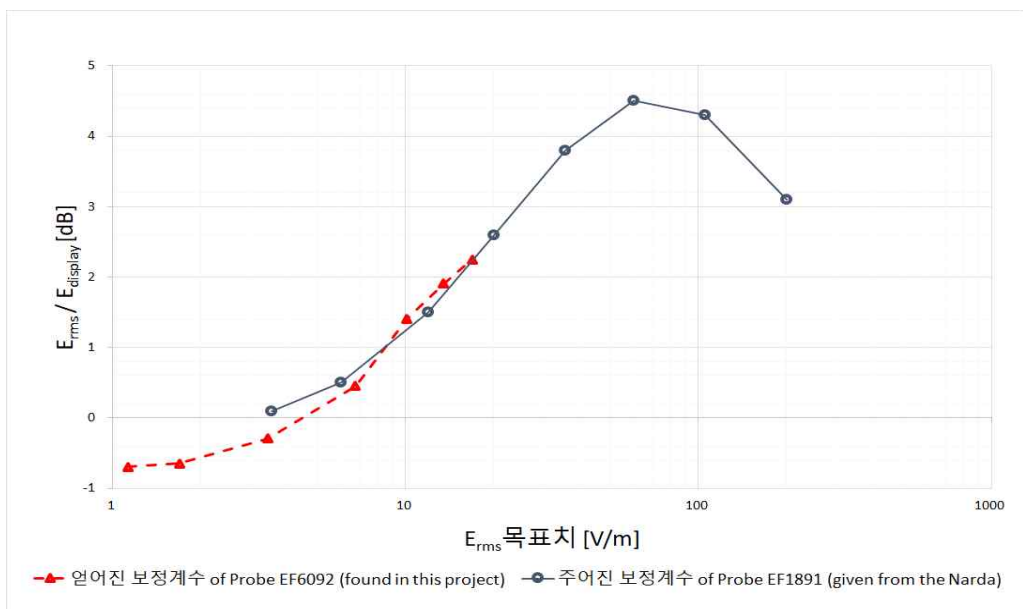


그림 4-13. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 316 Hz인 경우의
보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

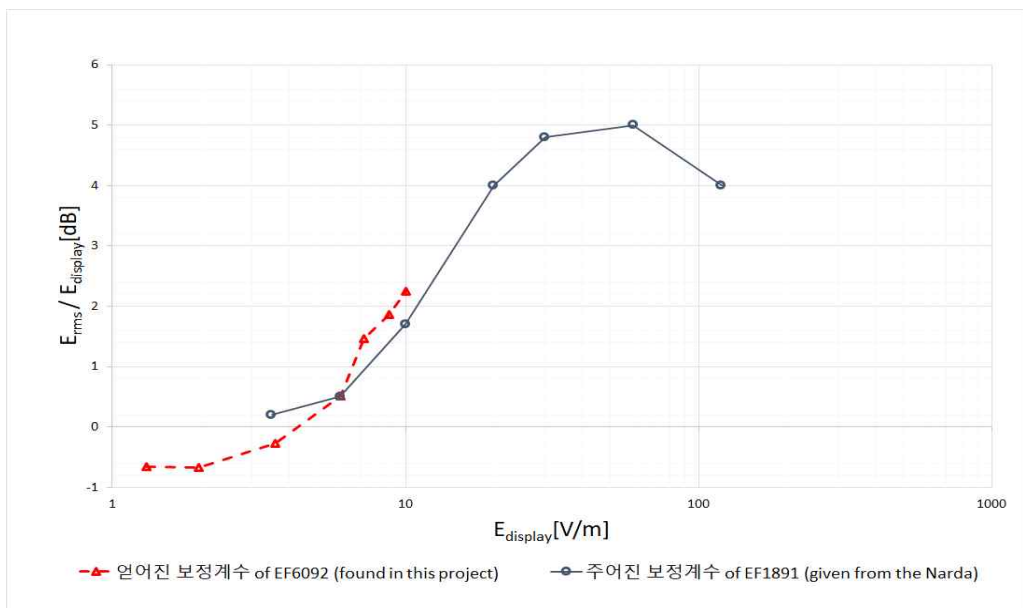


그림 4-14. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

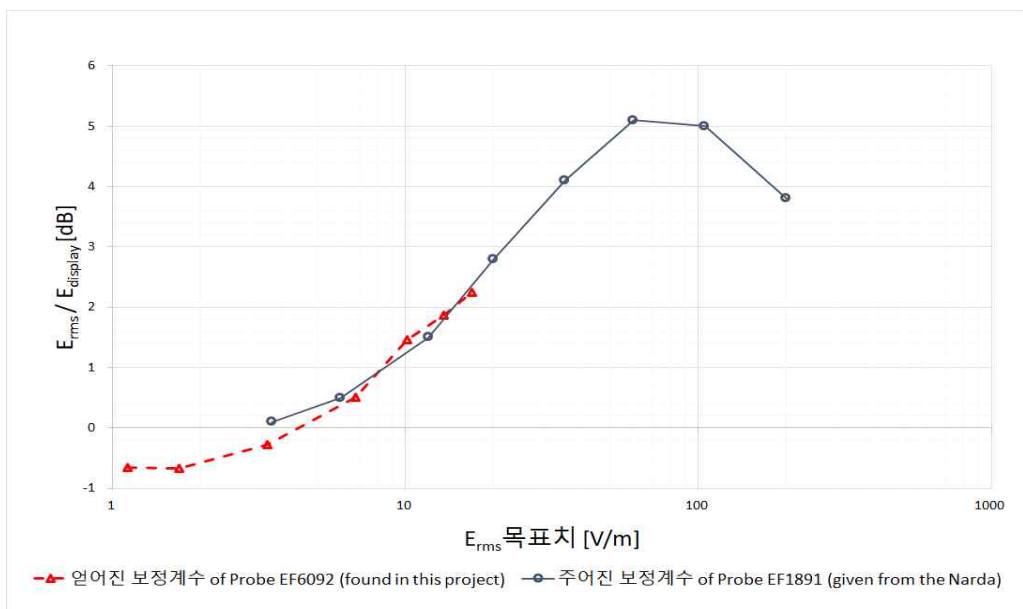


그림 4-15. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

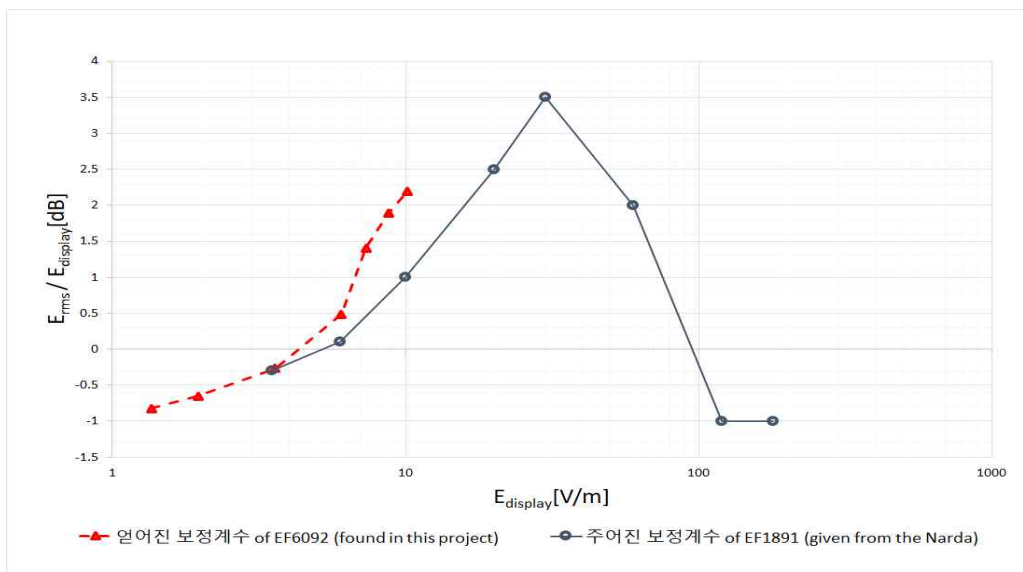


그림 4-16. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

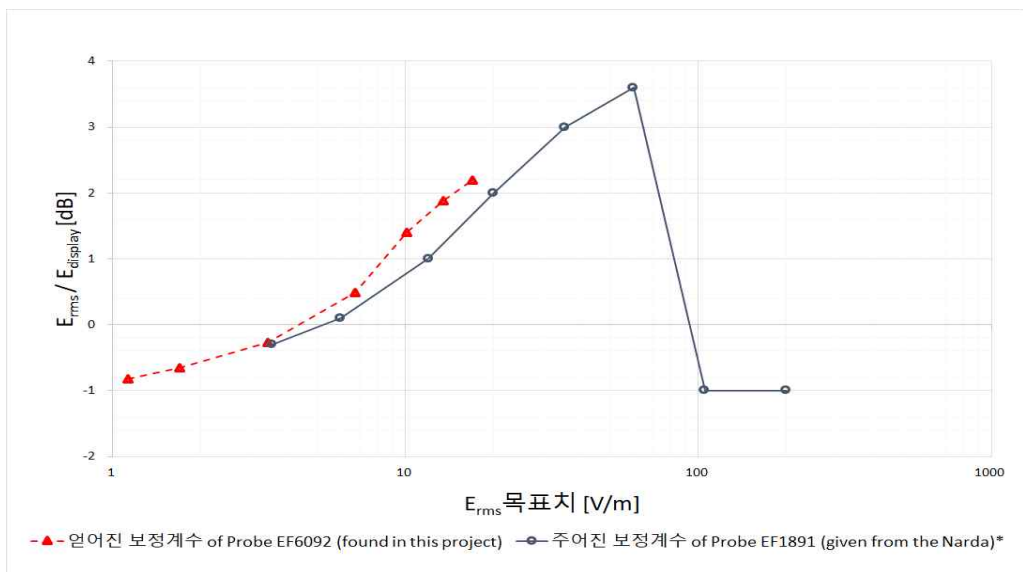


그림 4-17. Duty cycle이 1/316이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

그림 4-12 ~ 17을 통해 측정값이 Narda Inc.에서 제공한 보정계수와 같은 경향성을 가지고 있으며 그 값이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

2. Duty cycle이 1/1,000인 펄스파의 전자파강도 측정

반송파가 9.0 GHz이고 Duty cycle이 1/1,000인 펄스파의 펄스반복주파수가 316 Hz, 1,000 Hz, 3,160 Hz 인 경우에 따라 전자파강도를 측정하기 위해 그림 4-18, 4-19과 같이 구성하고 측정 결과를 표 4-5 ~ 7에 나타내었다. Narda Inc.에서 제공한 보정계수[2]와 휴대용 전자파 측정기로 측정한 보정계수의 비교를 그림 4-20 ~ 25에 나타내었다.

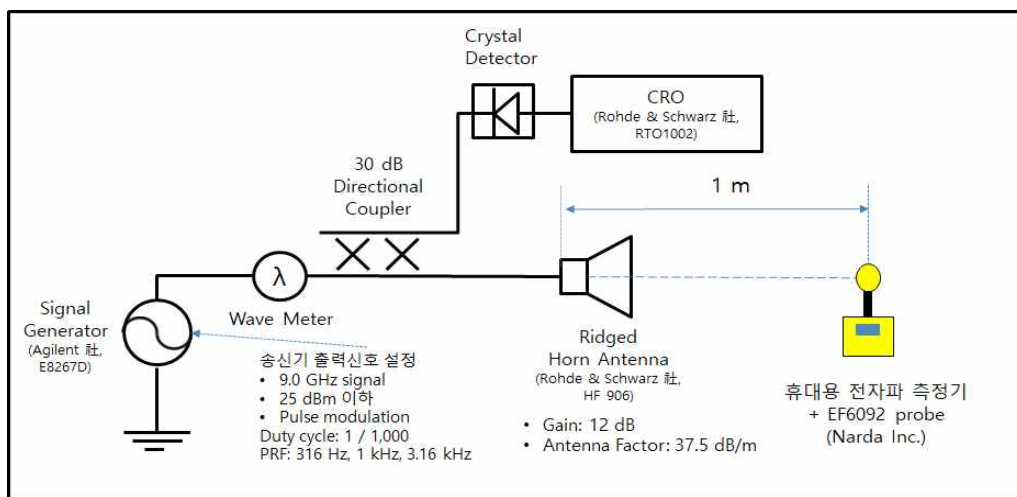


그림 4-18. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/1,000인 펄스파 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도
(송신기 출력 ≤ 25 dBm)

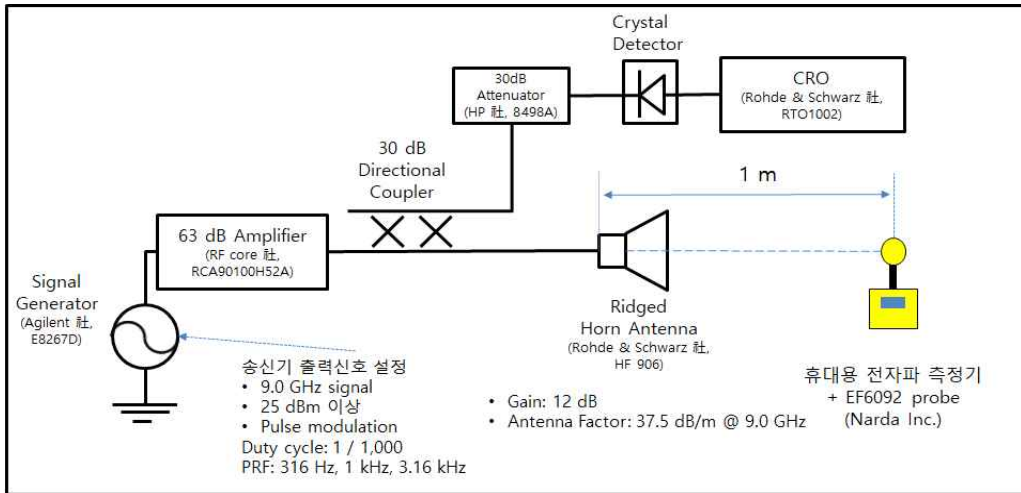


그림 4-19. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/1,000인 펄스파
신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도
(송신기 출력 ≥ 25 dBm)

표 4-5. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 316 Hz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정 지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.32	0.34	-0.31
20	0.63	0.75	-0.74
30	0.95	1.17	-0.91
60	1.90	2.04	-0.31
120	3.79	3.39	0.49
180	5.69	4.22	1.30
240	7.59	4.99	1.82
300	9.49	5.71	2.20

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스와 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (9)를 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms} / E_{display} = 10 \log (E_{rms, 계산치} / E_{display @ 휴대용 전자파 측정기}) [dB]$ [9]

표 4-6. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 1 kHz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정 지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.32	0.38	-0.80
20	0.63	0.78	-0.91
30	0.95	1.17	-0.91
60	1.90	2.04	-0.31
120	3.79	3.37	0.52
180	5.69	4.22	1.30
240	7.59	4.97	1.84
300	9.49	5.74	2.18

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스와 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (9)를 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms} / E_{display} = 10 \log (E_{rms, 계산치} / E_{display @ 휴대용 전자파 측정기}) [dB]$ [9]

표 4-7. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 3.16 kHz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정 지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.32	0.41	-1.13
20	0.63	0.81	-1.07
30	0.95	1.15	-0.84
60	1.90	1.99	-0.21
120	3.79	3.41	0.46
180	5.69	4.22	1.30
240	7.59	5.01	1.80
300	9.49	5.80	2.14

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스와 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (9)를 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms} / E_{display} = 10 \log (E_{rms, 계산치} / E_{display @ 휴대용 전자파 측정기}) [dB]$ [9]

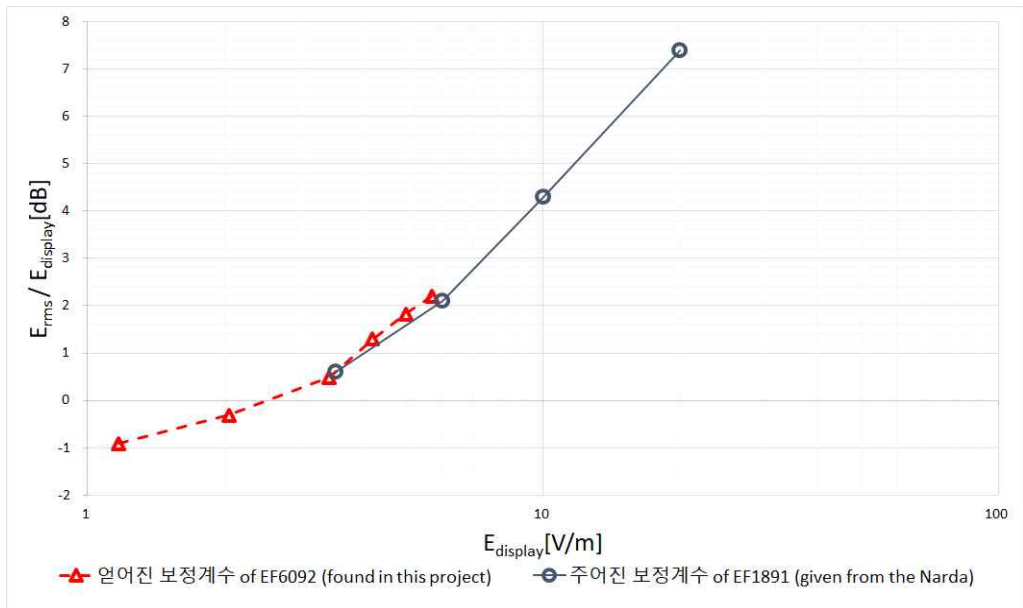


그림 4-20. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 316 Hz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

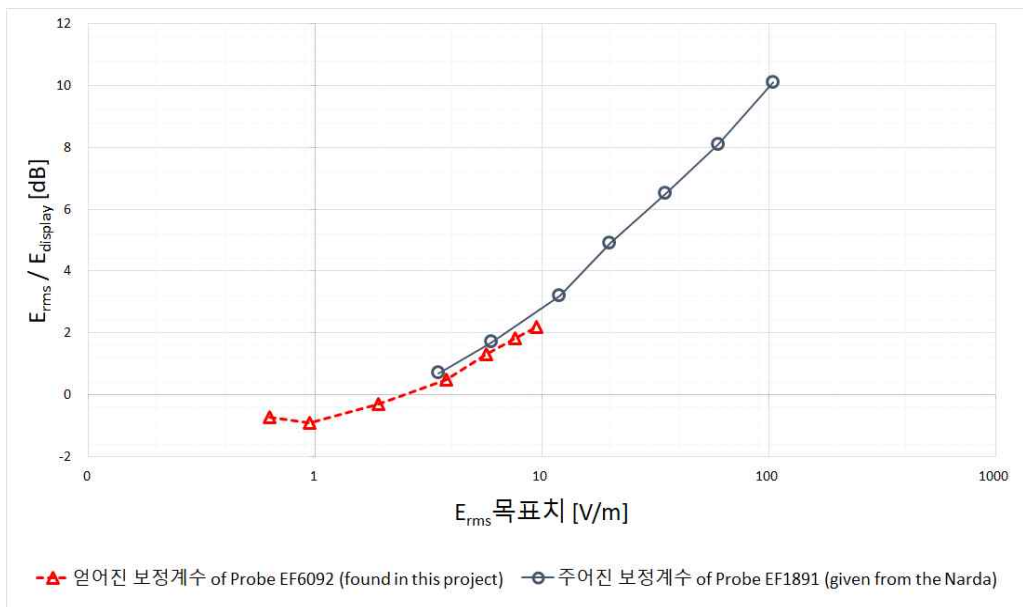


그림 4-21. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 316 Hz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

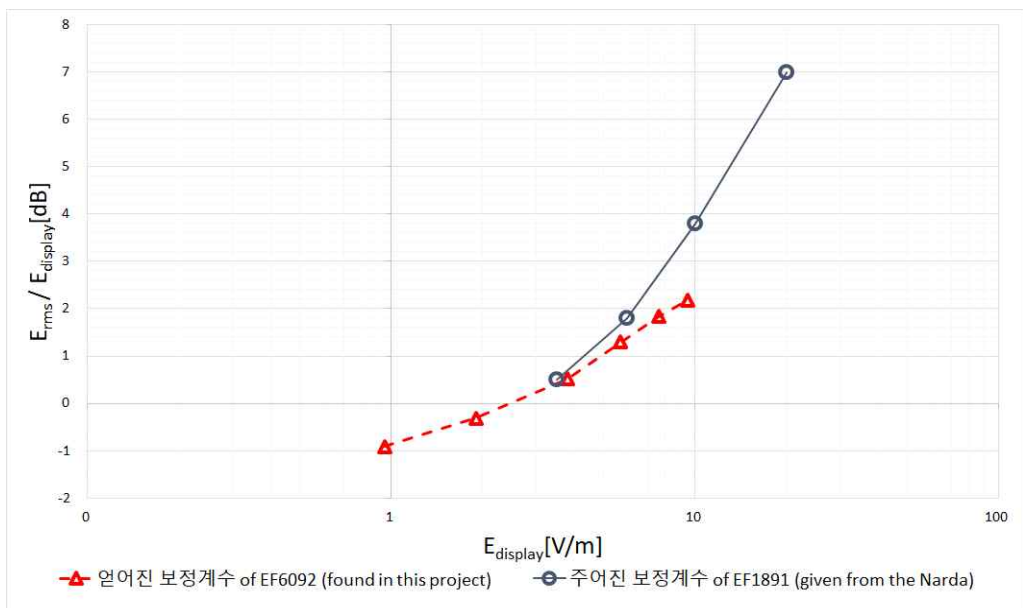


그림 4-22. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

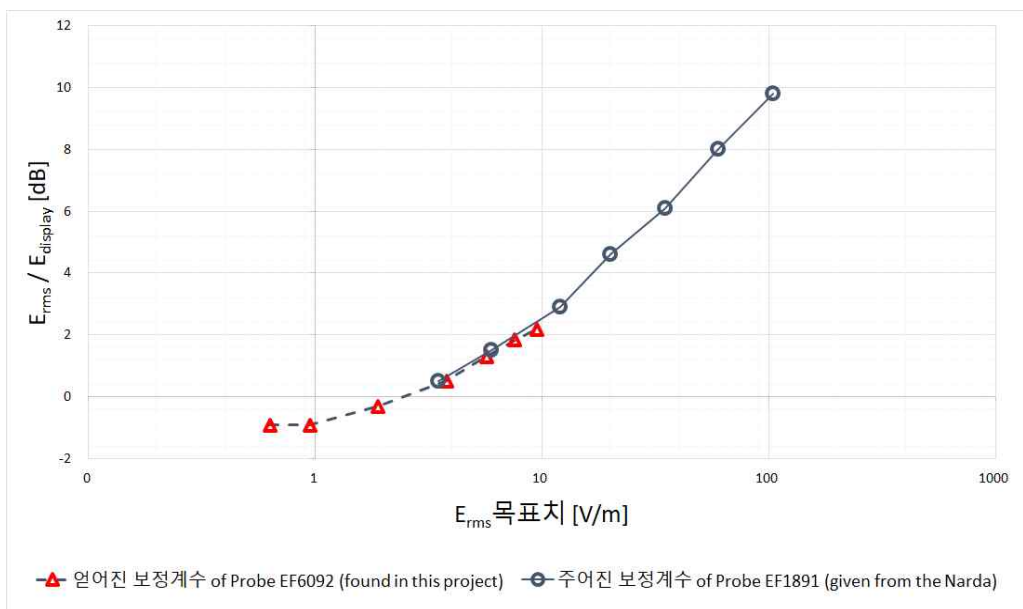


그림 4-23. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 1 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

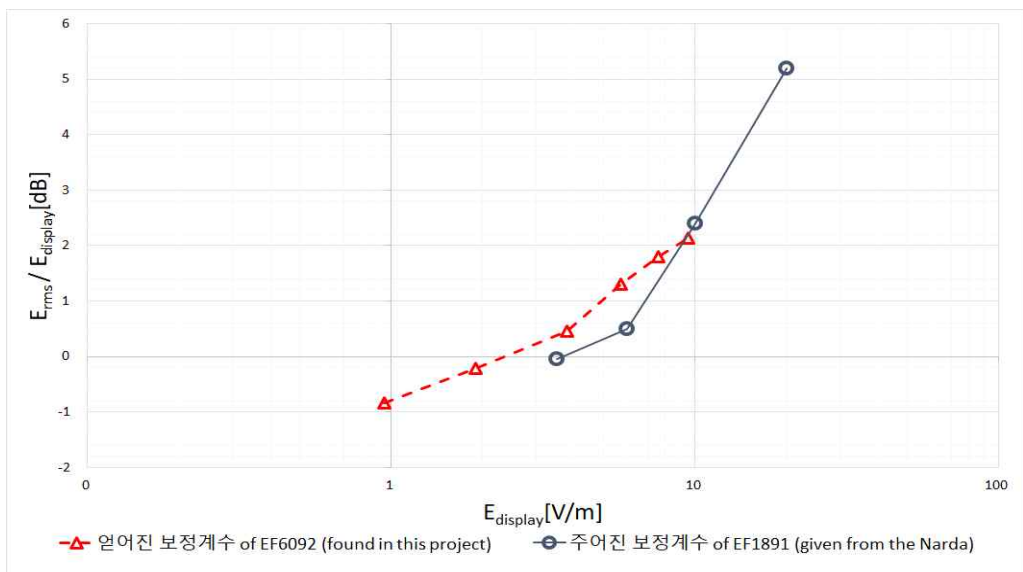


그림 4-24. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

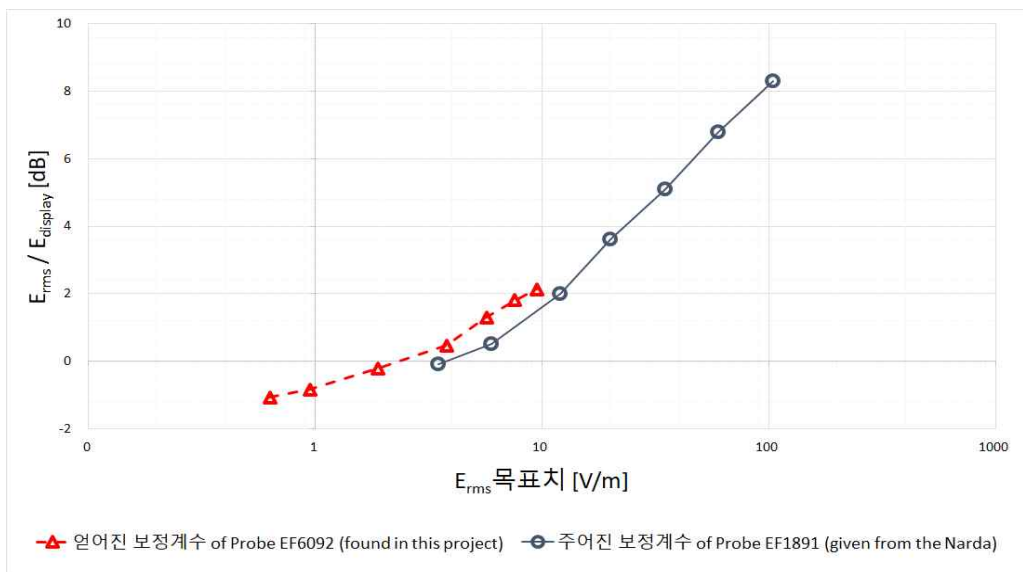


그림 4-25. Duty cycle이 1/1,000이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

그림 4-20 ~ 25를 통해 측정값이 Narda Inc.에서 제공한 보정계수와 같은 경향성을 가지고 있으며 그 값이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

3. Duty cycle이 1/3,160인 펄스파의 전자파강도 측정

반송파가 9.0 GHz이고 Duty cycle이 1/3,160인 펄스파의 펄스반복주파수가 316 Hz, 1,000 Hz, 3,160 Hz 인 경우에 따라 전자파강도를 측정하기 위해 그림 4-26, 4-27과 같이 구성하고 측정 결과를 표 4-8 ~ 10에 나타내었다. Narda Inc.에서 제공한 보정계수[2]와 휴대용 전자파 측정기로 측정한 보정계수의 비교를 그림 4-28 ~ 33에 나타내었다.

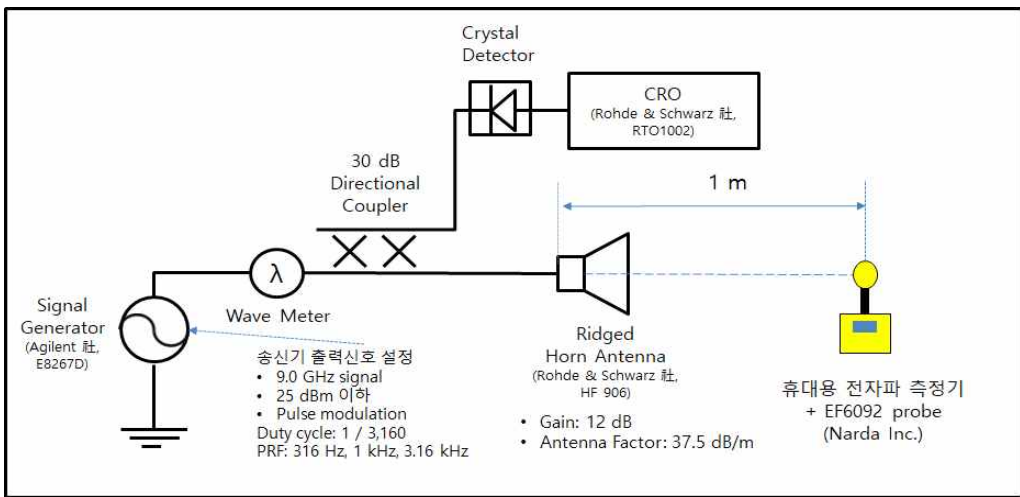


그림 4-26. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/3,160인 펄스파 신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도
(송신기 출력 ≤ 25 dBm)

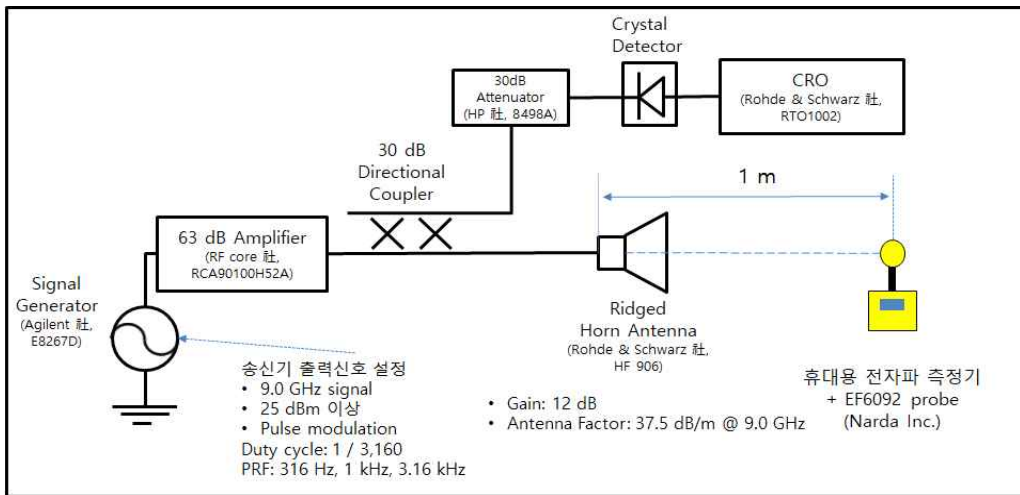


그림 4-27. 반송파가 9.0 GHz 이고 Duty cycle이 1/3,160인 펄스파
신호를 휴대용 전자파 측정기로 측정하는 블록도
(송신기 출력 ≥ 25 dBm)

표 4-8. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 316 Hz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average Mode) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.18	0.28	-1.97
20	0.36	0.42	-0.72
30	0.53	0.70	-1.18
60	1.07	1.20	-0.51
120	2.13	1.88	0.55
180	3.20	2.53	1.02
240	4.27	2.96	1.59
300	5.34	3.37	2.00

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스와 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (9)를 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms}/E_{display} = 10 \log (E_{rms, \text{계산치}}/E_{display@\text{휴대용 전자파 측정기}})[dB]$ [9]

표 4-9. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 1 kHz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average Mode) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.18	0.21	-0.72
20	0.36	0.43	-0.82
30	0.53	0.71	-1.24
60	1.07	1.13	-0.25
120	2.13	1.93	0.44
180	3.20	2.55	0.99
240	4.27	2.92	1.65
300	5.34	3.40	1.96

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스와 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (9)를 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms}/E_{display} = 10 \log (E_{rms, \text{계산치}}/E_{display@\text{휴대용 전자파 측정기}})[dB]$ [9]

표 4-10. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 3.16 kHz일 때
휴대용 전자파 측정기의 전자파강도 측정결과

측정 지점의 E_{peak} 목표치 (rms) [V/m] <1>	측정지점의 시간평균 E_{rms} 목표치 [V/m] <2>	측정지점에서 휴대용 전자파 측정기의 시간평균 E_{rms} 측정값 ($E_{display}$) (Average Mode) [V/m] <3>	E_{rms} / $E_{display}$ [dB] <4>
10	0.18	0.37	-3.18
20	0.36	0.53	-1.73
30	0.53	0.73	-1.36
60	1.07	10.5	0.07
120	2.13	1.87	0.57
180	3.20	2.50	1.07
240	4.27	2.91	1.66
300	5.34	3.38	1.98

<1> ICNIRP Guide Line에 명시된 일반인에 대한 전자파인체노출기준치(61 [V/m])의 근사치인 60 [V/m]를 기준으로 정수배로 나누거나 곱한 값을 설정 값으로 취하였으며 E_{peak} 는 펄스와 duty구간에서의 peak의 rms값이다.

<2> 식 (9)를 이용하여 값을 산출한다.

<3> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][8] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<4> $E_{rms}/E_{display} = 10 \log (E_{rms, 계산치}/E_{display@휴대용 전자파측정기})[dB]$ [9]

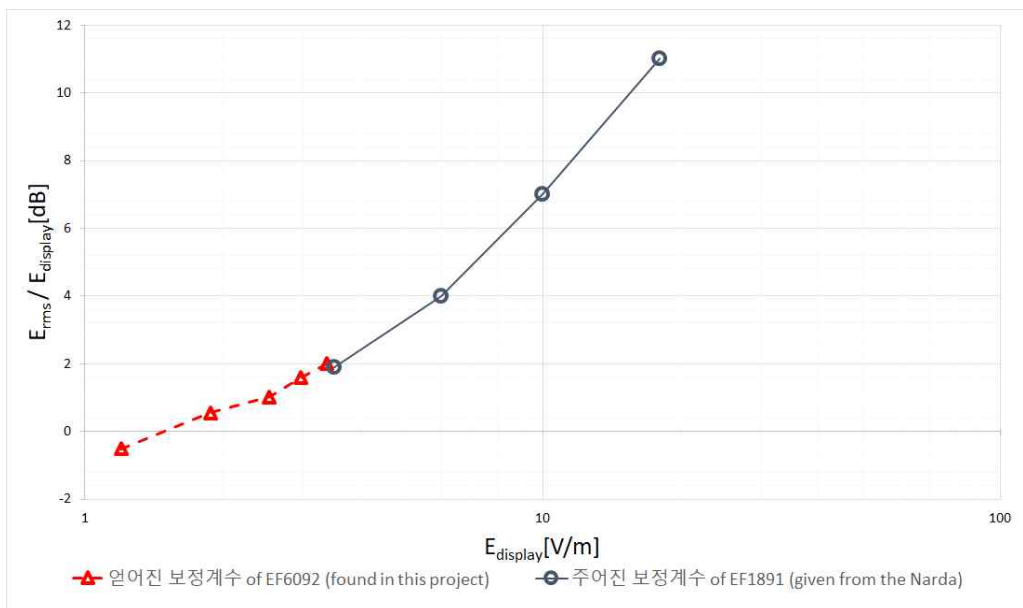


그림 4-28. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 316 Hz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

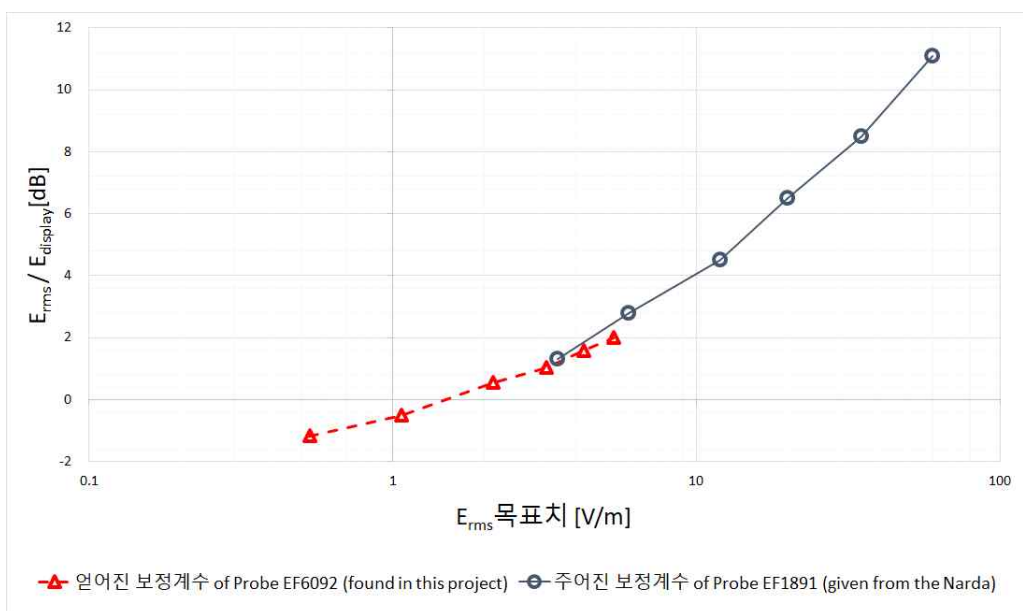


그림 4-29. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 316 Hz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

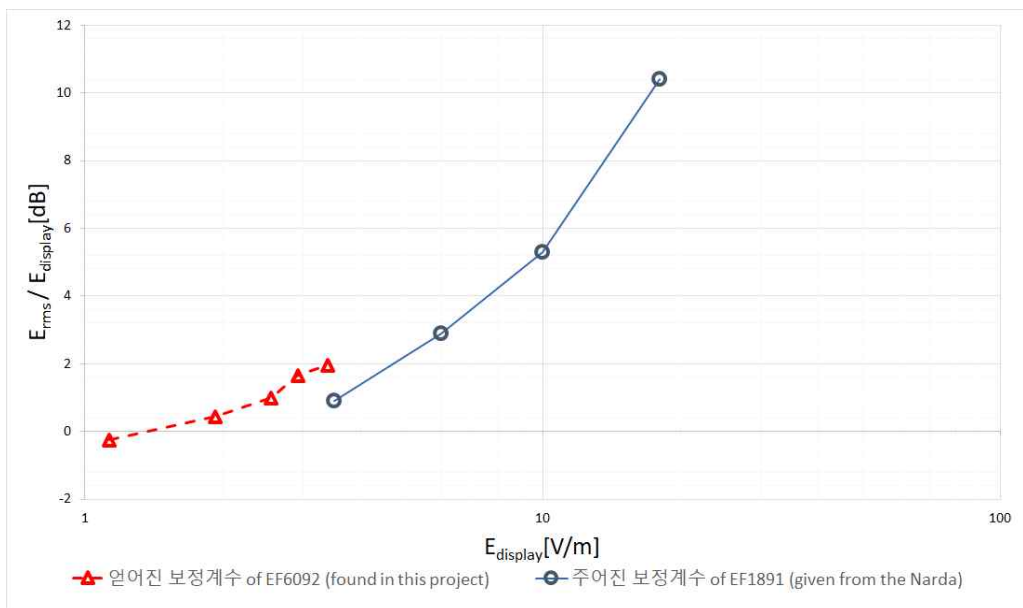


그림 4-30. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 1 kHz인 경우의
보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

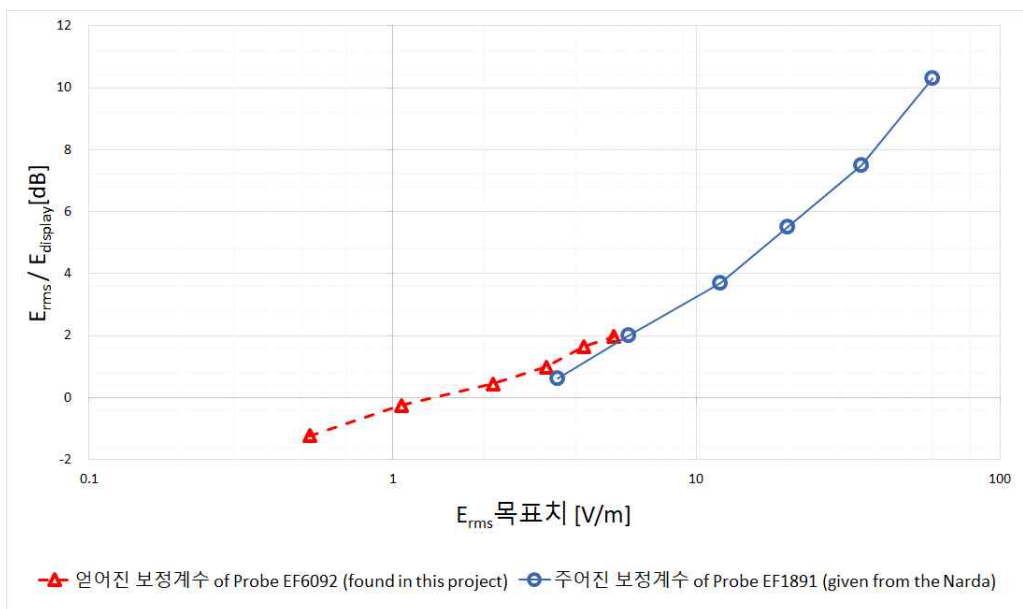


그림 4-31. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 1 kHz인 경우의
보정계수 비교(x축이 E_{rms} 인 경우)

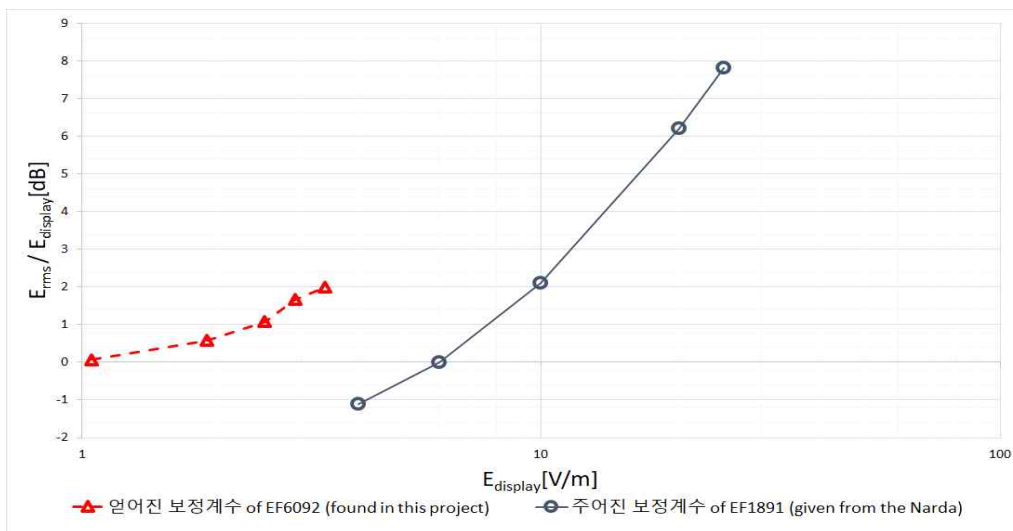


그림 4-32. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

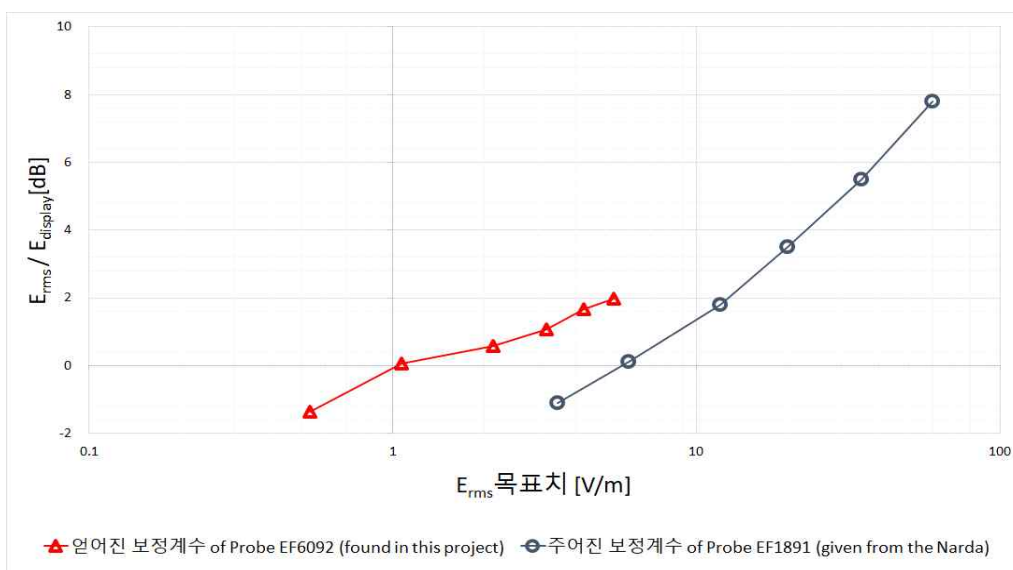


그림 4-33. Duty cycle이 1/3,160이고 PRF가 3.16 kHz인 경우의 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

그림 4-28 ~ 33를 통해 측정값이 Narda Inc.에서 제공한 보정계수와 같은 경향성을 가지고 있으며 그 값이 ± 3 dB이내로 일치함을 확인할 수 있다.

제 5 장 민간선박용 무선탐지기의 전자파강도 측정

삼영ENC(주)의 민간선박용 무선탐지기<SMR-3700(Controller)+RSU-3700(Tx Antenna)>로 펄스파 송신시스템을 구성하였다. 송신되는 펄스파 강도를 Spectrum Analyzer와 Peak power meter, 휴대용 전자파 측정기로 측정하고 Narda Inc.에서 제공하는 보정계수 그래프와 비교 분석을 수행하였다. 휴대용 전자파 측정기(Narda Inc.)로 펄스파 측정값의 보정계수 도출 방법 연구 및 보정계수를 적용한 측정값의 유효성 검증을 위하여 그림 5-1, 5-2의 측정 시스템을 구성하였다.

제 1 절 실험방법

측정지점에서 전자파를 수신할 수 있는 Ridged horn antenna와 민간선박용 무선탐지기의 송신안테나 RSU-3700을 서로 마주보게 하고 두 안테나의 간격을 변화시켜 Ridged horn antenna에서 수신되는 펄스파의 세기를 Spectrum Analyzer또는 Peak power meter를 통해 확인한다. 그림 5-1은 Ridged horn antenna를 통해 수신되는 펄스파 강도를 확인하는 블록도이다.

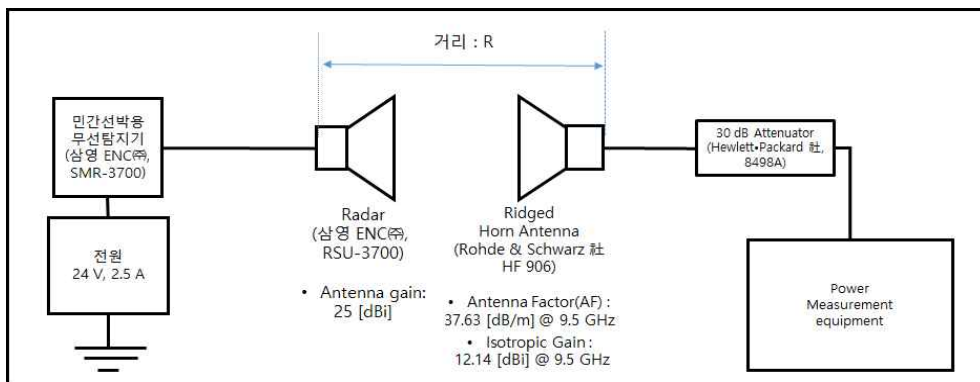


그림 5-1. RSU-3700과 Ridged horn antenna간 거리별
수신전계 측정 블록도

그림 5-1 실험을 통해 RSU-3700에서 송신하는 전자파의 침투 전력치와 duty cycle을 확인할 수 있다.

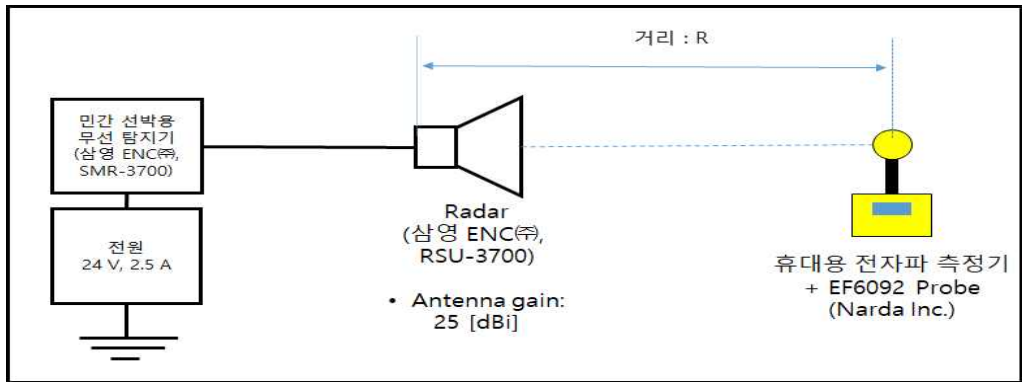


그림 5-2. RSU-3700과 휴대용 전자파 측정기 간의 거리별 수신전계 측정 블록도

송신되는 펄스와 신호의 침투 전력치와 duty cycle의 신뢰성을 확보한 후 휴대용 전자파 측정기로 펄스와 신호를 측정하는 실험을 통해 휴대용 전자파 측정기의 보정계수를 비교 및 분석하는 실험을 진행한다. 즉 그림 5-2과 같이 휴대용 전자파 측정기와 RSU-3700을 서로 마주보게 하고 두 안테나 간격에 변화를 주어 휴대용 전자파 측정기에 출력되는 전계 값을 확인하는 실험을 진행한다.

그림 5-1, 5-2의 실험은 그림 5-3, 5-4에서 보이는 바와 같이 나주의 국립전파연구소 EMI chamber(전자파장해실험 체임버)에서 진행하였다.



그림 5-3. 전파측정지점에서 RSU-3700을바라본 모습
in EMI chamber (나주 국립전파연구원)

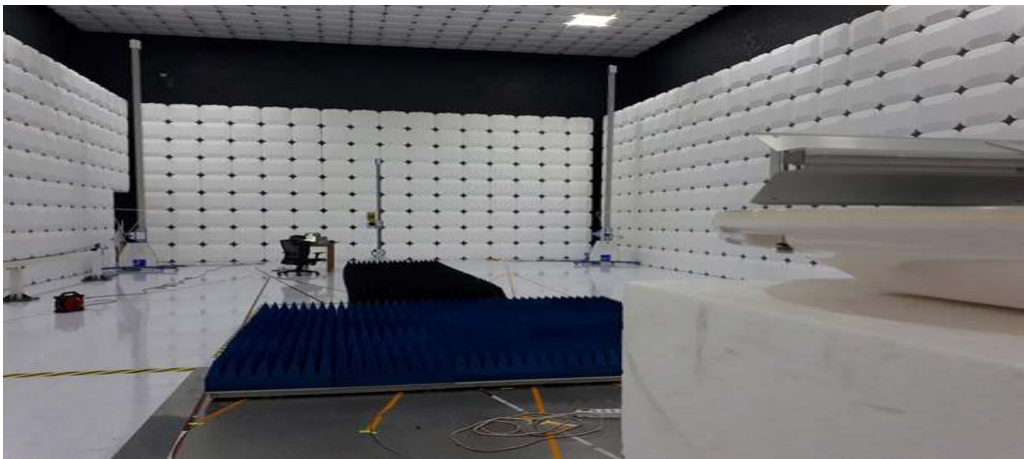


그림 5-4. RSU-3700 설치지점에서 전파측정지점을 바라본 모습
in EMI chamber (나주 국립전파연구원)

제 2 절 민간선박용 무선탐지기의 신호 확인

휴대용 전자파 측정기의 보정계수를 구하기 위해서는 측정지점의 측정된 전계와 계산된 전계가 필요하다. 계산된 전계를 얻기 위해 그림 5-1, 5-2의 실험을 통해 RSU-3700에서 나오는 송신 펄스파를 수신안테나로 수신하여 SA 및 Peak power meter에 출력되는 전압 및 전력과 삼영ENC(주)에서 제공한 RSU-3700의 송신전력으로 계산된 SA 및 Peak power meter에 출력되는 전압 및 전력을 비교를 통해 송신전력의 침투치와 duty cycle이 맞는지 확인해야 한다.

1. 삼영ENC(주)에서 제공한 민간선박용 무선탐지기의 신호정보

삼영ENC(주)의 민간선박용 무선탐지기는 조절부(controller)인 SMR-3700과 송신안테나인 RSU-3700으로 구성되어 있다. 그림 5-5은 RSU-3700의 모습이고 RSU-3700의 재원을 표 5-1에 나타내었다. 그리고 신호는 SMR-3700에서 채널을 선택하여 변경할 수 있다. 이를 표 5-2[10]에 나타내었다.



그림 5-5. RSU-3700(송신안테나)의 모습

표 5-1. RSU-3700 제원

제조사	삼영ENC(주)
안테나 모델명	RSU-3700
송신 주파수	9,410 ± 30 [MHz]
안테나 이득	25 [dBi]
안테나 수평빔폭	4°
안테나 수직빔폭	25°
안테나 Impedance	50 [Ω]

표 5-2. 민간선박용 무선탐지기(삼영ENC(주))의 송신 신호정보

송신 주파수	채널 <1>	PRF [Pulse/sec]	펄스폭 [ns]	송신전력 [W]
9.4 GHz	0	2,100	120	2,965
	1	1,650	300	3,819
	2	1,200	500	4,345
	3	600	850	4,498

<1> RSU-3700에 연결된 SMR-3700(Controller)의 채널 설정값

2. cable loss와 attenuator 확인

그림 5-1 실험에서 사용하는 cable loss와 attenuator의 성능을 확인하기 위해 Network Analyzer(Rohde&Schwarz Inc., ZNB 20)를 통해 그 값을 확인하였다. Network Analyzer에서 측정하는 주파수의 Start 주파수는 9 GHz이고 Stop 주파수는 10 GHz이다. 보고자 하는 측정 주파수는 9.4 GHz이다.

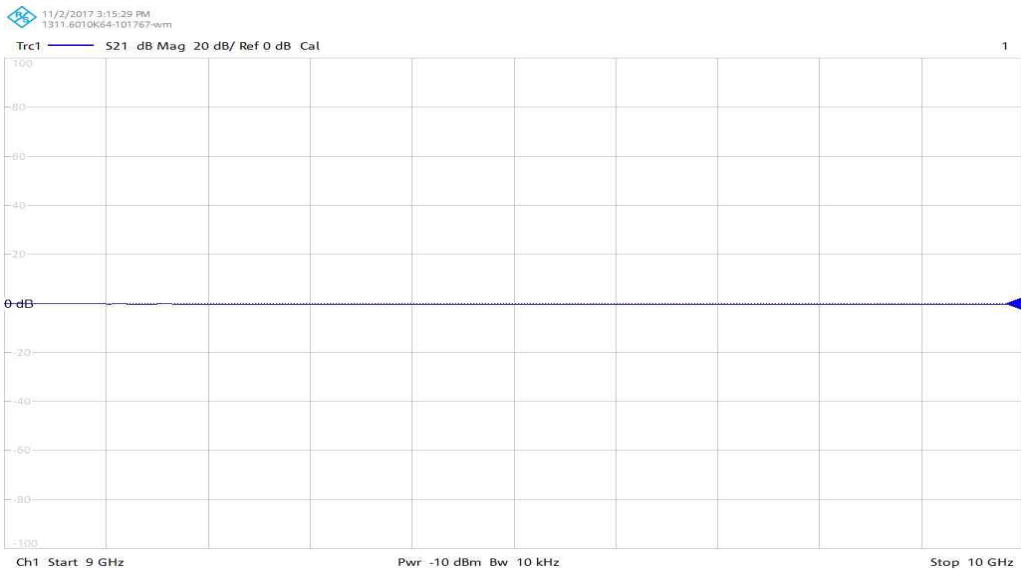


그림 5-6. Network Analyzer의 Calibration S_{21}

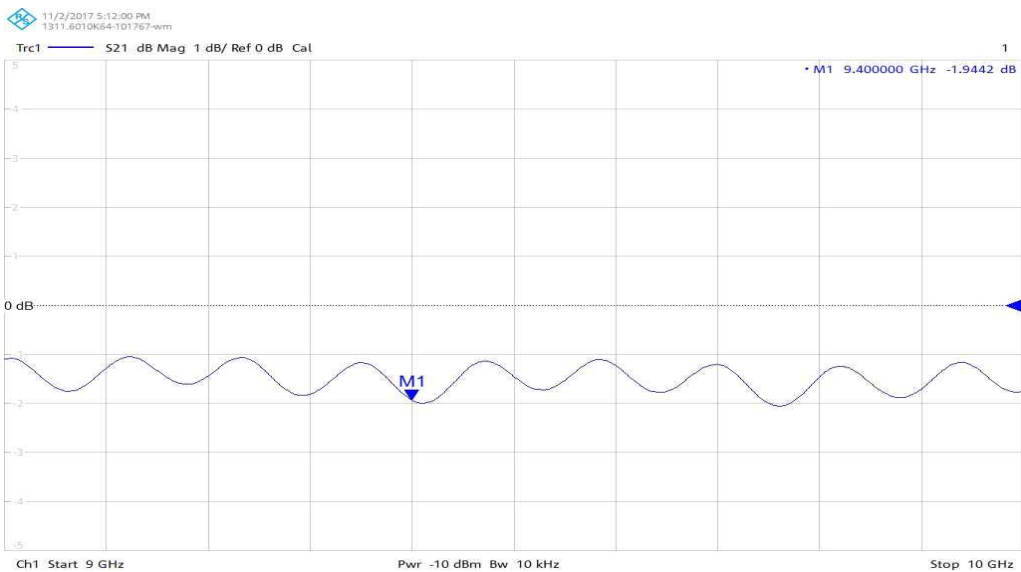


그림 5-7. 1 m cable과 1m cable에 연결된 connector의 S_{21}

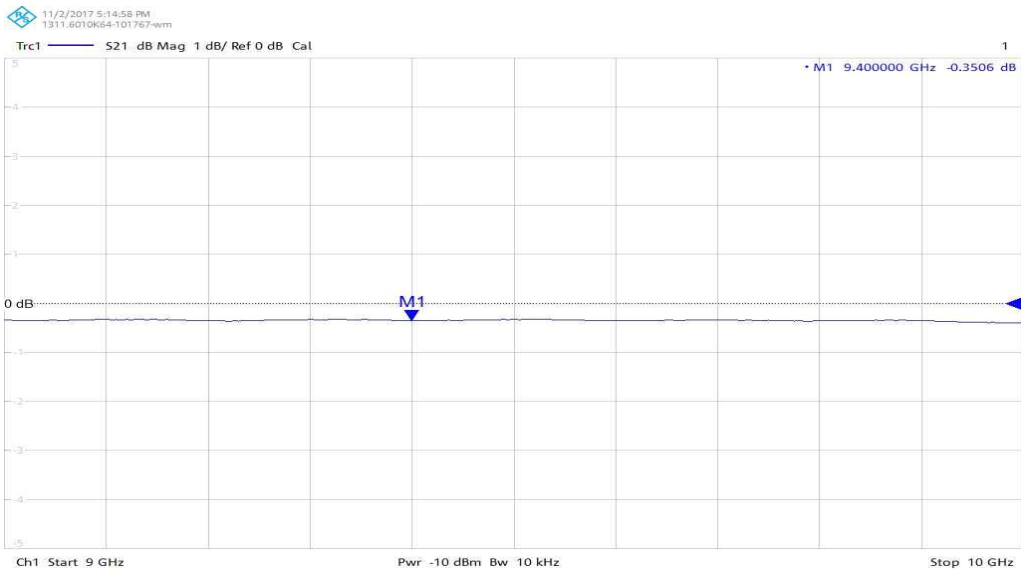


그림 5-8. 1 m cable에 연결된 connector의 S_{21}

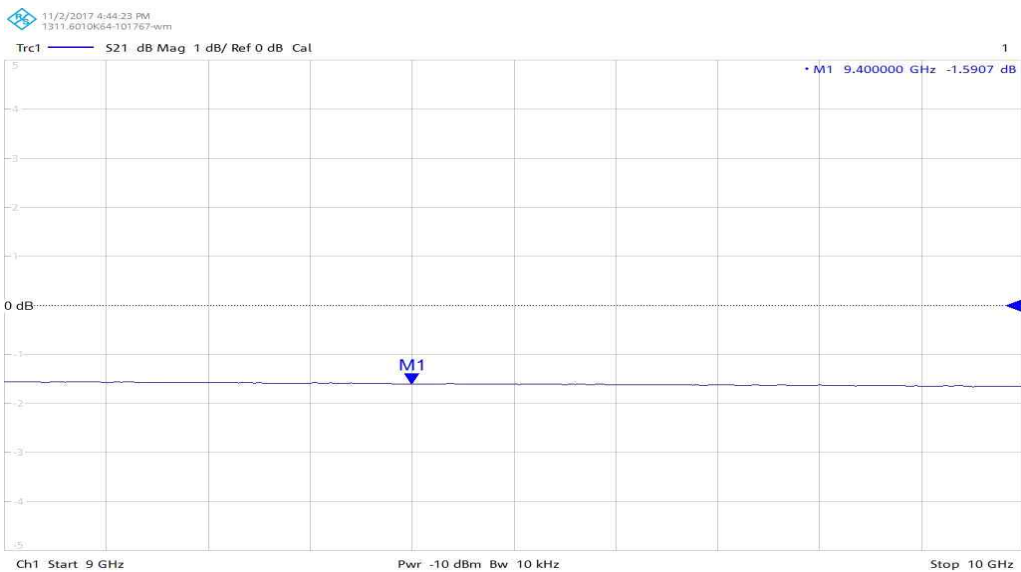


그림 5-9. 2 m cable의 S_{21}

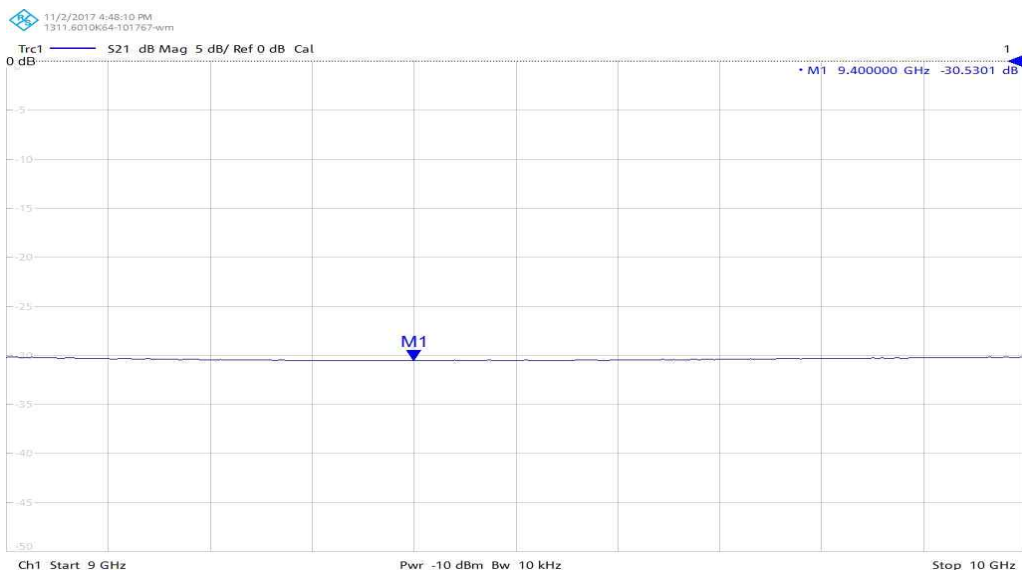


그림 5-10. 30 dB Attenuator의 S_{21}

그림 5-6은 Network Analyzer의 9 ~ 10 GHz의 교정 값이고, 그림 5-7 ~ 10은 cable과 Attenuator의 S_{21} 값이다. 이를 표 5-3에 정리하였다.

표 5-3. cable loss와 30 dB Attenuator의 S_{21} 측정값

1 m cable loss [dB]	2 m cable loss [dB]	30 dB Attenuator [dB]
-1.5936	-1.5907	-30.5301

3. Spectrum Analyzer(SA)를 이용한 수신 전력 측정

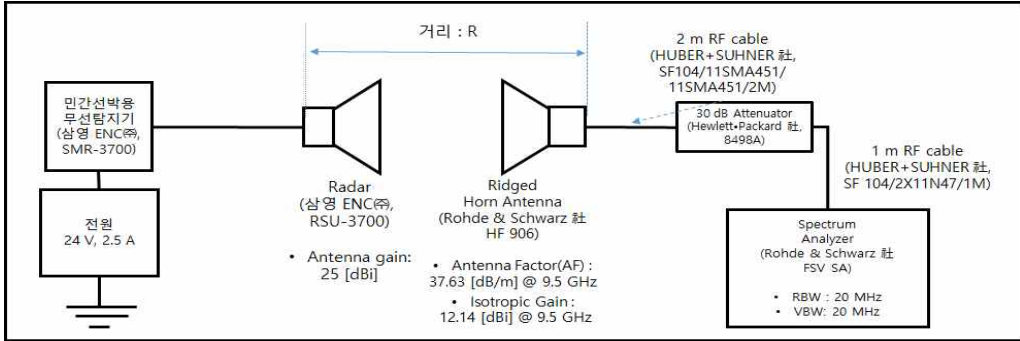


그림 5-11. Spectrum Analyzer를 이용한 RSU-3700과 수신안테나 간의 거리별 수신전력 측정 블록도

그림 5-11의 블록도처럼 실험을 구성하여 SMR-3700의 채널 변경에 대한 수신 전력을 거리에 따라 측정하였다. 채널 0에서 측정한 데이터를 표 5-4, 채널 1에서 측정한 데이터를 표 5-5, 채널 2에서 측정한 데이터를 표 5-6, 채널 3에서 측정한 데이터를 표 5-7에 나타내었다.

Spectrum Analyzer에서 측정되는 신호는 전력[dBm]으로 표기된다. 부하의 Impedance를 이용하면 전압[dBμV]의 단위를 전력[dBm]의 단위로 변환이 가능하다. 변환 식은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{Z} @ \text{부하 impedance } Z \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P_{out} &= 10 \log \left(\frac{V_{out}^2}{10^{-3} \times Z} \right) = 10 \log \left(\frac{10^{-12}}{10^{-3}} \times \frac{V_{out}^2}{10^{-12}} \times \frac{1}{Z} \right) \\ &= 20 \log (V_{out} \times 10^6) - 90 - 10 \log Z \end{aligned} \quad (12)$$

$$P_{out} [dBm] = V_{out} [dB\mu V] - 90 - 10 \log Z \quad (13)$$

식 (11), (13)에서 P_{out} 은 부하 impedance Z 의 전력이고, V_{out} 은 부하 impedance Z 의 전압이다.

표 5-4. 그림 5-11 실험에서 채널 0 (PRF : 2,100 Hz, Duty cycle : 1/3,968)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력

송수신 거리 [m]	펄스와 수신전력 (peak power, 계산치) @ 측정지점 [dBm] <1>	펄스와 수신전력 (peak power, display @ SA) @ 측정지점 [dBm] <2>	펄스와 수신전력 (peak power, 측정치) @측정지점 [dBm] <3>	peak power - avg. power (계산치) @측정지점 [dB] <4>	peak power - avg. power (display @ SA) @측정지점 [dB]
4	38.40	4.01	37.72	35.99	34.79
5	36.46	2.01	35.72		37.28
6	34.88	-0.78	32.93		34.87
7	33.54	-0.49	33.22		35.33
8	32.38	-1.98	31.73		34.41
9	31.36	-2.61	31.10		36.80
10	30.44	-3.54	30.17		34.42
11	29.61	-4.06	29.65		33.97
12	28.86	-4.76	28.95		34.52
13	28.16	-5.51	28.20		34.55
14	27.52	-6.02	27.69		34.92
15	26.92	-6.86	26.85		35.54
16	26.36	-7.34	26.37		35.52

- <1> 식 (5), (7), (13) 을 이용하여 측정지점의 수신전력 단위를 [dBm]으로 나타낸다. (AF= 37.63 @ 9.5 GHz, Impedance = 50 [Ω])
- <2> 30 dB attenuator + cable loss가 포함된 값
- <3> 30 dB attenuator + cable loss가 제외된 값
- <4> $peakpower - avg.power = 10 \times \log(1/duty cycle)$, Duty cycle을 확인 할 수 있다.

표 5-5. 그림 5-11 실험에서 채널 1 (PRF : 1,650 Hz, Duty cycle : 1/2,020)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스파 수신전력

송수신 거리 [m]	펄스파 수신전력 (peak power, 계산치) @ 측정지점 [dBm] <1>	펄스파 수신전력 (peak power, display @ SA) @ 측정지점 [dBm] <2>	펄스파 수신전력 (peak power, 측정치) @ 측정지점 [dBm] <3>	peak power - avg. power (계산치) @ 측정지점 [dB] <4>	peak power - avg. power (display @ SA) @ 측정지점 [dB]
4	39.50	5.83	39.54	33.05	31.88
5	37.56	3.24	36.95		34.18
6	35.98	1.37	35.08		33.39
7	34.64	1.55	35.26		34.72
8	33.48	0.08	33.79		34.36
9	32.46	-0.68	33.03		31.94
10	31.54	-1.63	32.08		32.79
11	30.71	-2.20	31.51		32.34
12	29.96	-3.06	30.65		33.54
13	29.26	-3.80	29.91		33.60
14	28.62	-4.00	29.71		34.45
15	28.02	-4.96	28.75		32.86
16	27.46	-5.27	28.44		33.72

<1> 식 (5), (7), (13) 을 이용하여 측정지점의 수신전력 단위를 [dBm]으로 나타낸다. (AF= 37.63 @ 9.5 GHz, Impedance = 50 [Ω])

<2> 30 dB attenuator + cable loss가 포함된 값

<3> 30 dB attenuator + cable loss가 제외된 값

<4> $peak\ power - avg.\ power = 10 \times \log(1/duty\ cycle)$, Duty cycle을 확인 할 수 있다.

표 5-6. 그림 5-11 실험에서 채널 2 (PRF : 1,200 Hz, Duty cycle : 1/1,666)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스파 수신전력

송수신 거리 [m]	펄스파 수신전력 (peak power, 계산치) @ 측정지점 [dBm] <1>	펄스파 수신전력 (peak power, display @ SA) @ 측정지점 [dBm] <2>	펄스파 수신전력 (peak power, 측정치) @ 측정지점 [dBm] <3>	peak power - avg. power (계산치) @ 측정지점 [dB] <4>	peak power - avg. power (display @ SA) @ 측정지점 [dB]
4	40.06	6.59	40.30	32.22	32.14
5	38.12	3.60	37.31		33.34
6	36.54	1.40	35.11		32.89
7	35.20	2.12	35.83		32.04
8	34.04	0.52	34.23		32.53
9	33.02	-0.11	33.60		32.42
10	32.10	-1.08	32.63		31.64
11	31.27	-2.01	31.70		32.61
12	30.52	-2.57	31.14		31.54
13	29.82	-3.32	30.39		31.96
14	29.18	-3.56	30.15		32.24
15	28.58	-4.36	29.35		32.63
16	28.02	-5.29	28.42		32.14

<1> 식 (5), (7), (13) 을 이용하여 측정지점의 수신전력 단위를 [dBm]으로 나타낸다. (AF= 37.63 @ 9.5 GHz, Impedance = 50 [Ω])

<2> 30 dB attenuator + cable loss가 포함된 값

<3> 30 dB attenuator + cable loss가 제외된 값

<4> $peak\ power - avg.\ power = 10 \times \log(1/duty\ cycle)$, Duty cycle을 확인 할 수 있다.

표 5-7. 그림 5-11 실험에서 채널 3 (PRF : 600 Hz, Duty cycle : 1/1,960)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스파 수신전력

송수신 거리 [m]	펄스파 수신전력 (peak power, 계산치) @ 측정지점 [dBm] <1>	펄스파 수신전력 (peak power, display @ SA) @ 측정지점 [dBm] <2>	펄스파 수신전력 (peak power, 측정치) @측정지점 [dBm] <3>	peak power - avg. power (계산치) @측정지점 [dB] <4>	peak power - avg. power (display @ SA) @측정지점 [dB]
4	40.21	6.66	40.37	32.92	31.79
5	38.27	3.68	37.39		33.81
6	36.69	-0.74	32.97		33.29
7	35.35	2.27	35.98		31.32
8	34.19	0.91	34.62		31.71
9	33.17	-0.17	33.54		33.92
10	32.25	-1.12	32.59		31.72
11	31.42	-1.98	31.73		32.72
12	30.67	-2.68	31.03		32.74
13	29.97	-3.29	30.42		33.59
14	29.33	-3.94	29.77		34.12
15	28.73	-4.34	29.37		34.25
16	28.17	-5.36	28.35		32.14

<1> 식 (5), (7), (13) 을 이용하여 측정지점의 수신전력 단위를 [dBm]으로 나타낸다. (AF= 37.63 @ 9.5 GHz, Impedance = 50 [Ω])

<2> 30 dB attenuator + cable loss가 포함된 값

<3> 30 dB attenuator + cable loss가 제외된 값

<4> $peakpower - avg.power = 10 \times \log(1/duty cycle)$, Duty cycle을 확인 할 수 있다.

표 5-4 ~ 7를 통해 각 채널의 송신전력이 삼영ENC(주)에서 제공한 송신전력 정보와 거의 일치함을 알 수 있다.

4. Peak power meter(PM)를 이용한 수신 전력 측정

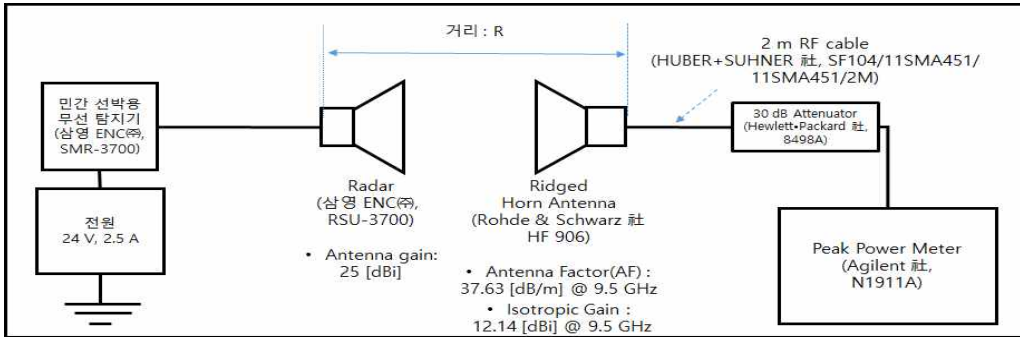


그림 5-12. Peak power meter를 이용한 RSU-3700과 수신안테나 간의 거리별 수신전력 측정 블록도

그림 5-12의 블록도처럼 실험을 구성하여 SMR-3700의 채널 변경에 대한 수신 전력을 거리에 따라 측정하였다. 채널 0에서 측정한 데이터를 표 5-8, 채널 1에서 측정한 데이터를 표 5-9, 채널 2에서 측정한 데이터를 표 5-10, 채널 3에서 측정한 데이터를 표 5-11에 나타내었다.

Peak power meter에서 측정되는 신호는 전력[dBm]으로 표기된다. 식 (13)을 이용하여 전력의 단위를 dB μ V에서 dBm으로 변환할 수 있다.

표 5-8. 그림 5-12 실험에서 채널 0 (PRF : 2,100 Hz, Duty cycle : 1/3,968)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스파 수신전력

송수신 거리 [m]	펄스파 수신전력 (peak power, 계산치) @ 측정지점 [dBm] <1>	펄스파 수신전력 (peak power, display @ PM) @ 측정지점 [dBm] <2>	펄스파 수신전력 (peak power, 측정치) @측정지점 [dBm] <3>	peak power - avg. power (계산치) @측정지점 [dB] <4>	peak power - avg. power (display @ PM) @측정지점 [dB]
4	38.40	6.07	38.19	35.99	36.68
5	36.46	4.15	36.27		35.77
6	34.88	1.37	33.49		36.99
7	33.54	1.72	33.84		36.79
8	32.38	0.36	32.48		37.56
9	31.36	-0.58	31.54		37.29
10	30.44	-1.74	30.38		37.50
11	29.61	-2.22	29.90		37.36
12	28.86	-2.99	29.13		37.72
13	28.16	-3.96	28.16		35.12
14	27.52	-4.29	27.83		37.43
15	26.92	-5.28	26.84		37.62
16	26.36	-5.52	26.60		37.03

<1> 식 (5), (7), (13) 을 이용하여 측정지점의 수신전력 단위를 [dBm]으로 나타낸다. (AF= 37.63 @ 9.5 GHz, Impedance = 50 [Ω])

<2> 30 dB attenuator + cable loss가 포함된 값

<3> 30 dB attenuator + cable loss가 제외된 값

<4> $peak\ power - avg.\ power = 10 \times \log(1/duty\ cycle)$, Duty cycle을 확인 할 수 있다.

표 5-9. 그림 5-12 실험에서 채널 1 (PRF : 1,650 Hz, Duty cycle : 1/2,020)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력

송수신거리 [m]	펄스와 수신전력 (peak power, 계산치) @ 측정지점 [dBm] <1>	펄스와 수신전력 (peak power, display @ PM) @ 측정지점 [dBm] <2>	펄스와 수신전력 (peak power, 측정치) @측정지점 [dBm] <3>	peak power - avg. power (계산치) @측정지점 [dB] <4>	peak power - avg. power (display @ PM) @측정지점 [dB]
4	39.50	7.50	39.62	33.05	34.09
5	37.56	4.89	37.01		34.07
6	35.98	2.88	35.00		34.42
7	34.64	3.16	35.28		33.67
8	33.48	1.83	33.95		34.47
9	32.46	0.81	32.93		33.59
10	31.54	-0.31	31.81		34.34
11	30.71	-0.59	31.53		34.59
12	29.96	-1.76	30.36		34.12
13	29.26	-2.42	29.70		34.40
14	28.62	-2.83	29.29		34.87
15	28.02	-3.52	28.60		33.02
16	27.46	-3.87	28.25		32.79

<1> 식 (5), (7), (13) 을 이용하여 측정지점의 수신전력 단위를 [dBm]으로 나타낸다. (AF= 37.63 @ 9.5 GHz, Impedance = 50 [Ω])

<2> 30 dB attenuator + cable loss가 포함된 값

<3> 30 dB attenuator + cable loss가 제외된 값

<4> $peak\ power - avg.\ power = 10 \times \log(1/duty\ cycle)$, Duty cycle을 확인 할 수 있다.

표 5-10. 그림 5-12 실험에서 채널 2 (PRF : 1,200 Hz, Duty cycle : 1/1,666)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력

송수신 거리 [m]	펄스와 수신전력 (peak power, 계산치) @ 측정지점 [dBm] <1>	펄스와 수신전력 (peak power, display @ SA) @ 측정지점 [dBm] <2>	펄스와 수신전력 (peak power, 측정치) @측정지점 [dBm] <3>	peak power - avg. power (계산치) @측정지점 [dB] <4>	peak power - avg. power (display @ SA) @측정지점 [dB]
4	40.06	8.21	40.33	32.22	33.17
5	38.12	5.22	37.34		33.18
6	36.54	2.96	35.08		34.19
7	35.20	3.81	35.93		33.19
8	34.04	2.42	34.54		33.29
9	33.02	1.40	33.52		33.17
10	32.10	0.61	32.73		33.41
11	31.27	-0.31	31.81		33.87
12	30.52	-0.92	31.20		33.84
13	29.82	-1.79	30.33		33.50
14	29.18	-2.36	29.76		33.61
15	28.58	-2.92	29.20		33.56
16	28.02	-3.80	28.32		33.68

<1> 식 (5), (7), (13) 을 이용하여 측정지점의 수신전력 단위를 [dBm]으로 나타낸다. (AF= 37.63 @ 9.5 GHz, Impedance = 50 [Ω])

<2> 30 dB attenuator + cable loss가 포함된 값

<3> 30 dB attenuator + cable loss가 제외된 값

<4> $peak\ power - avg.\ power = 10 \times \log(1/duty\ cycle)$, Duty cycle을 확인 할 수 있다.

표 5-11. 그림 5-12 실험에서 채널 3 (PRF : 600 Hz, Duty cycle : 1/1,960)인 경우의 송수신거리에 대한 펄스와 수신전력

송수신 거리 [m]	펄스와 수신전력 (peak power, 계산치) @ 측정지점 [dBm] <1>	펄스와 수신전력 (peak power, display @ SA) @ 측정지점 [dBm] <2>	펄스와 수신전력 (peak power, 측정치) @측정지점 [dBm] <3>	peak power - avg. power (계산치) @측정지점 [dB] <4>	peak power - avg. power (display @ SA) @측정지점 [dB]
4	40.21	8.26	40.38	32.92	33.79
5	38.27	5.22	37.34		33.72
6	36.69	1.63	33.75		37.14
7	35.35	3.83	35.95		33.91
8	34.19	2.52	34.64		33.87
9	33.17	1.46	33.58		33.98
10	32.25	0.68	32.80		34.42
11	31.42	-0.28	31.84		33.69
12	30.67	-0.99	31.13		34.02
13	29.97	-1.79	30.33		33.92
14	29.33	-2.32	29.80		34.18
15	28.73	-2.81	29.31		34.31
16	28.17	-3.77	28.35		33.97

<1> 식 (5), (7), (13) 을 이용하여 측정지점의 수신전력 단위를 [dBm]으로 나타낸다. (AF= 37.63 @ 9.5 GHz, Impedance = 50 [Ω])

<2> 30 dB attenuator + cable loss가 포함된 값

<3> 30 dB attenuator + cable loss가 제외된 값

<4> $peak\ power - avg.\ power = 10 \times \log(1/duty\ cycle)$, Duty cycle을 확인 할 수 있다.

표 5-8 ~ 11를 통해 각 채널의 송신전력이 삼영ENC(주)에서 제공한 송신전력 정보와 거의 일치함을 알 수 있다.

제 3 절 휴대용 전자파 측정기의 펄스파 측정치 확인

Narda에서 제공하는 probe EF1891의 보정계수와 비교 분석을 위해 Narda에서 제공한 표 5-12[2]를 적용하여 측정값을 비교 분석한다.

표 5-12. Narda에서 제공하는 휴대용 전자파 측정기에
연결되는 전계 프로브의 파라미터의 유효범위

파라미터	파라미터의 크기	파라미터의 유효적용 범위
Duty cycle	1/316	1/177 ~ 1/562
	1/1,000	1/562 ~ 1/1,778
	1/3,162	1/1,778 ~ 1/5,620
펄스 반복 주파수 (PRF)	316 Hz	177 ~ 562 Hz
	1 kHz	562 ~ 1.78 kHz
	3.16 kHz	1.77 ~ 5.62 kHz

그림 5-2의 블록도와 같이 구성하여 SMR-3700(송신부 ontroller)의 채널변경과 송신안테나와 측정지점의 거리 변화에 따른 휴대용 전자파 측정기에 출력되는 측정 전계를 표 5-13 ~ 16에 나타내었다. 그림 5-13 ~ 20은 Narda에서 제공한 보정계수와 측정으로 얻은 보정계수의 비교 그래프이다.

표 5-13. SMR-3700의 채널이 0(PRF : 2,100 Hz, Duty cycle : 1/3,968)인 경우의 송수신 거리에 대한 휴대용 전자파 측정기에 출력되는 수신전계 및 $E_{rms}/E_{display}$

송수신 거리 [m]	시간평균 펄스파 수신전계 E_{rms} (계산치) @ 측정지점 [V/m] <1>	휴대용 전자파 측정기 <Average> E_{rms} ($E_{display}$) (시간평균, 측정값) @ 측정지점 [V/m] <2>	$E_{rms}/E_{display}$ [dB] <3>
4	21.05	5.78	5.61
5	16.84	5.45	4.90
6	14.03	4.95	4.53
7	12.03	4.47	4.30
8	10.52	4.30	3.89
9	9.35	3.82	3.89
10	8.42	3.44	3.89
11	7.65	3.34	3.60
12	7.02	3.27	3.32
13	6.48	2.91	3.47
14	6.01	3.21	2.73
15	5.61	3.02	2.69
16	5.26	2.82	2.71

<1> 식 (5)를 이용하여 거리별 수신전계를 계산한다.

<2> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][7] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<3> $E_{rms}/E_{display} = 10 \log (E_{rms, \text{계산치}}/E_{display @ \text{휴대용 전자파 측정기}})[dB]$ [9]

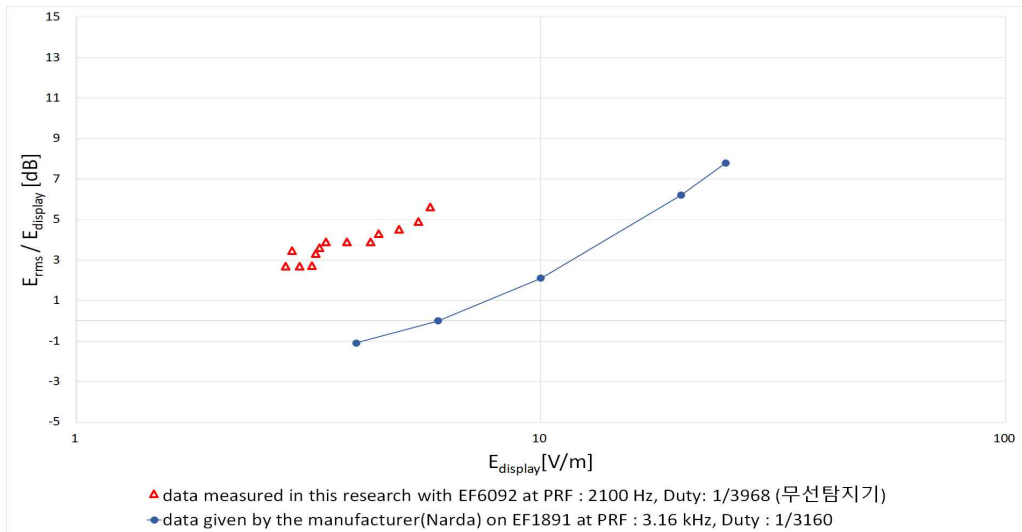


그림 5-13. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정된 보정계수와 제공된 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

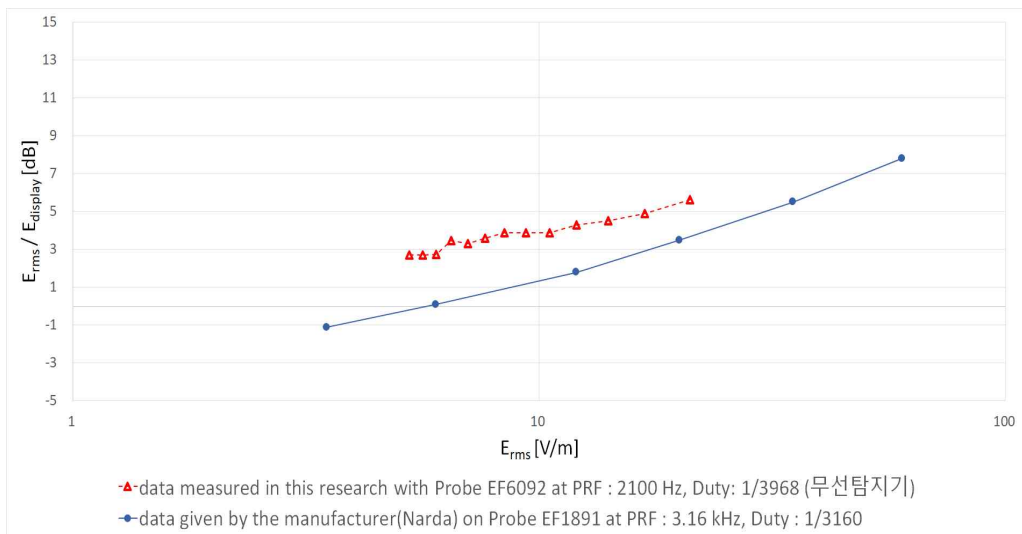


그림 5-14. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정된 보정계수와 제공된 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

그림 5-13, -14를 통해 SMR-3700의 채널이 0의 신호 (PRF : 2,100 Hz, duty cycle : 1/3,968)에서 휴대용 전자파 측정기의 측정값은 Narda Inc.에서 제공한 보정계수보다 약 5 dB 높은 것을 확인 할 수 있다.

표 5-14. SMR-3700의 채널이 1(PRF : 1,650 Hz, Duty cycle : 1/2,020)인 경우의 송수신 거리에 대한 휴대용 전자파 측정기에 출력되는 수신전계 및 $E_{rms}/E_{display}$

송수신 거리 [m]	시간평균 펄스와 수신전계 E_{rms} (계산치) @ 측정지점 [V/m] <1>	휴대용 전자파 측정기 <Average> E_{rms} ($E_{display}$) (시간평균, 측정값) @ 측정지점 [V/m] <2>	$E_{rms}/E_{display}$ [dB] <3>
4	33.48	8.48	7.58
5	26.78	7.92	5.96
6	22.32	7.18	5.29
7	19.13	6.46	4.72
8	16.74	6.32	4.23
9	14.88	5.73	4.14
10	13.39	5.16	4.14
11	12.17	4.88	3.97
12	11.16	4.84	3.63
13	10.30	4.31	3.78
14	9.57	4.87	2.93
15	8.93	4.41	3.06
16	8.37	4.28	2.91

<1> 식 (5)를 이용하여 거리별 수신전계를 계산한다.

<2> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][7] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<3> $E_{rms}/E_{display} = 10 \log (E_{rms, \text{계산치}}/E_{display @ \text{휴대용 전자파 측정기}})[dB]$ [9]

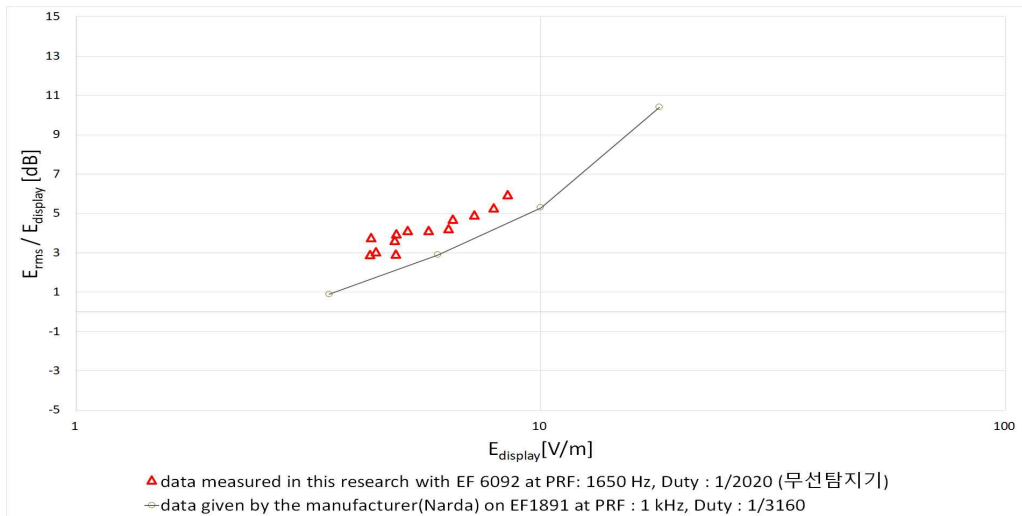


그림 5-15. SMR-3700의 채널이 1인 경우의 측정된 보정계수와 제공된 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

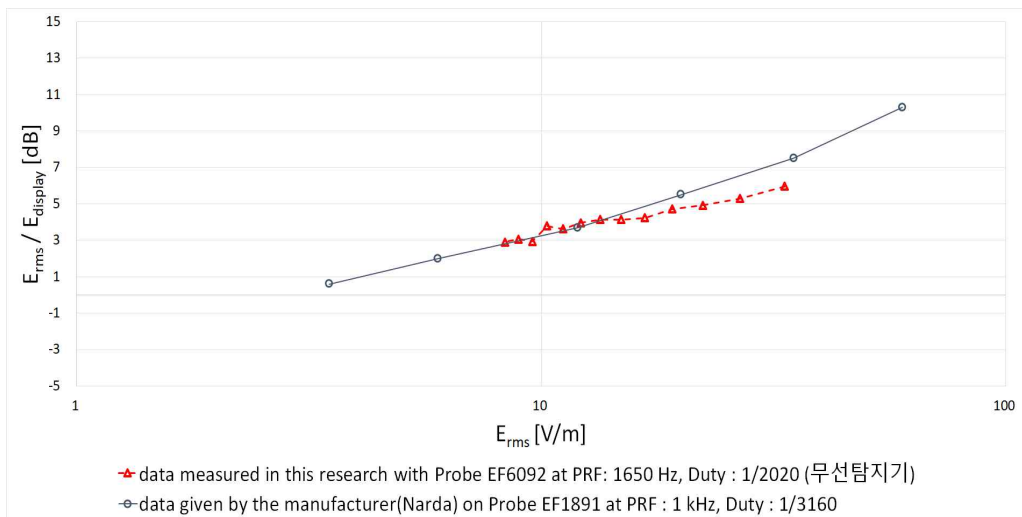


그림 5-16. SMR-3700의 채널이 1인 경우의 측정된 보정계수와 제공된 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

그림 5-15, -16를 통해 SMR-3700의 채널이 1의 신호 (PRF : 1,650 Hz, duty cycle : 1/2,020)에서의 측정값은 Narda Inc.에서 제공한 보정계수와 유사한 경향성을 보이며 제공된 보정계수와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

표 5-15. SMR-3700의 채널이 2(PRF : 1,200 Hz, Duty cycle : 1/1,666)인 경우의 송수신거리에 대한 휴대용 전자파 측정기에 출력되는 수신전계 및 $E_{rms}/E_{display}$

송수신 거리 [m]	시간평균 펄스와 수신전계 E_{rms} (계산치) @ 측정지점 [V/m] <1>	휴대용 전자파 측정기 <Average> E_{rms} ($E_{display}$) (시간평균, 측정값) @ 측정지점 [V/m] <2>	$E_{rms}/E_{display}$ [dB] <3>
4	39.32	9.80	6.03
5	31.45	9.17	5.35
6	26.21	8.34	4.97
7	22.47	7.40	4.82
8	19.66	7.13	4.40
9	17.47	6.71	4.16
10	15.73	6.04	4.16
11	14.30	5.78	3.93
12	13.11	5.68	3.63
13	12.10	5.12	3.73
14	11.23	5.70	2.95
15	10.48	5.01	3.21
16	9.83	4.98	3.01

<1> 식 (5)를 이용하여 거리별 수신전계를 계산한다.

<2> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][7] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<3> $E_{rms}/E_{display} = 10 \log (E_{rms, \text{계산치}}/E_{display @ \text{휴대용 전자파 측정기}})[dB]$ [9]

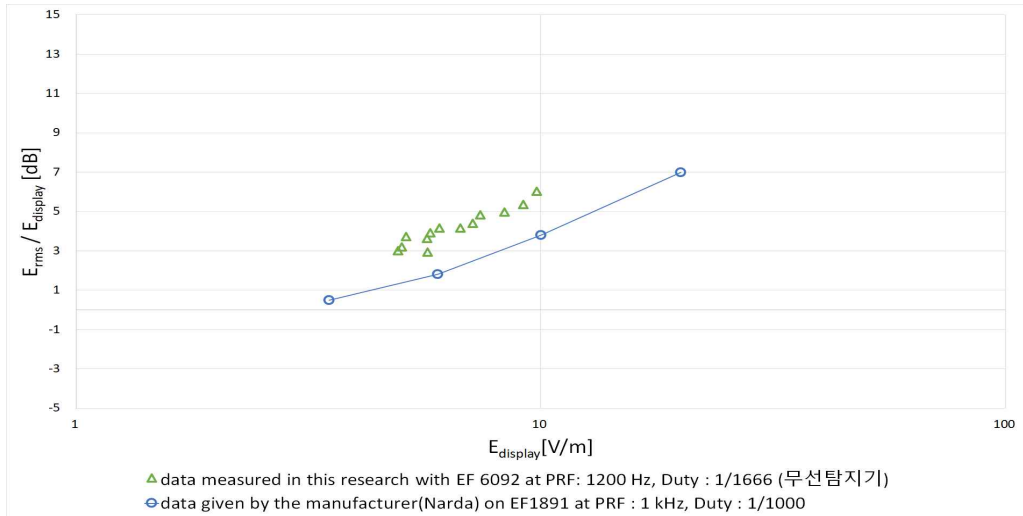


그림 5-17. SMR-3700의 채널이 2인 경우의 측정된 보정계수와 제공된 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

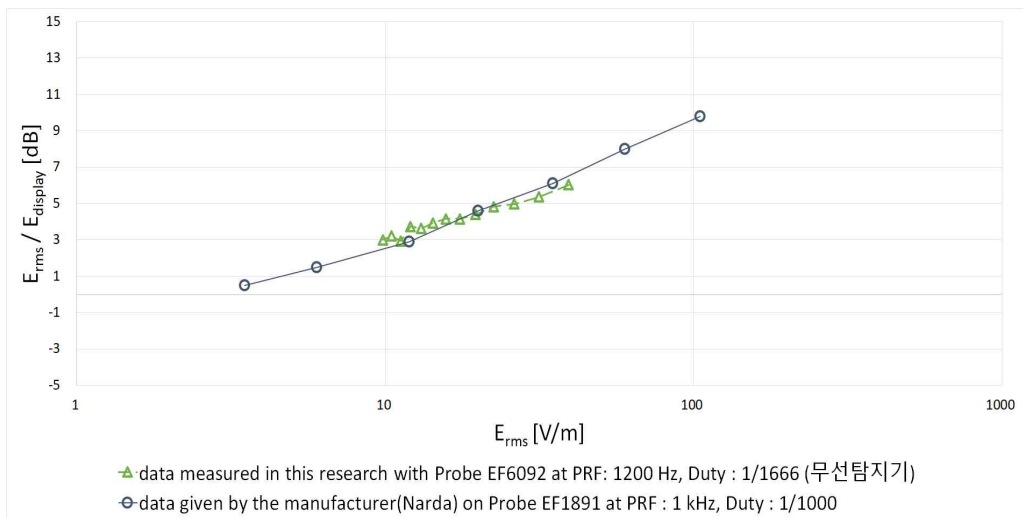


그림 5-18. SMR-3700의 채널이 2인 경우의 측정된 보정계수와 제공된 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

그림 5-17, -18를 통해 SMR-3700의 채널이 2의 신호 (PRF : 1,200 Hz, duty cycle : 1/1666)에서의 측정값은 Narda Inc.에서 제공한 보정계수와 유사한 경향성을 보이며 제공된 보정계수와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

표 5-16. SMR-3700의 채널이 3(PRF : 600 Hz, Duty cycle : 1/1,960)인경우의 송수신거리에 대한 휴대용 전자파 측정기에 출력되는 수신전계 및 $E_{rms}/E_{display}$

송수신 거리 [m]	시간평균 펄스파 수신전계 E_{rms} (계산치) @ 측정지점 [V/m] <1>	휴대용 전자파 측정기 <Average> E_{rms} ($E_{display}$) (시간평균, 측정값) @ 측정지점 [V/m] <2>	$E_{rms}/E_{display}$ [dB] <34>
4	36.88	9.01	6.12
5	29.50	8.46	5.43
6	24.59	7.69	5.05
7	21.07	6.85	4.88
8	18.44	6.51	4.52
9	16.39	6.21	4.22
10	14.75	5.59	4.21
11	13.41	5.38	3.97
12	12.29	5.26	3.69
13	11.35	4.73	3.80
14	10.54	5.25	3.03
15	9.83	4.68	3.23
16	9.22	4.55	3.07

<1> 식 (5)를 이용하여 거리별 수신전계를 계산한다.

<2> Average는 휴대용 전자파 측정기의 측정 모드 중 하나로 일정 시간동안 측정된 값들을 산술평균한 값이 표기된다. 전계 단위[V/m]로 측정하였고, 그 값은 시간평균값이다. 그리고 휴대용 전자파 측정기에 연결한 EF6092 probe의 측정 가능 범위가 0.7 ~ 400 [V/m][7] 이므로 측정값 중 0.7 [V/m]이하의 값은 필요하지 않는 데이터로 취급한다.

<3> $E_{rms}/E_{display} = 10 \log (E_{rms, \text{계산치}}/E_{display @ \text{휴대용 전자파 측정기}})[dB]$ [9]

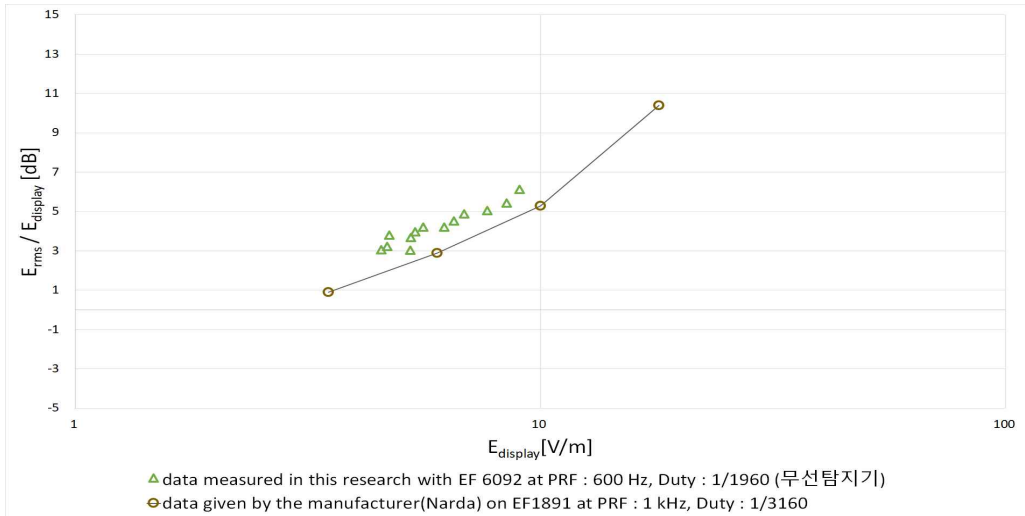


그림 5-19. SMR-3700의 채널이 3인 경우의 측정된 보정계수와 제공된 보정계수 비교 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

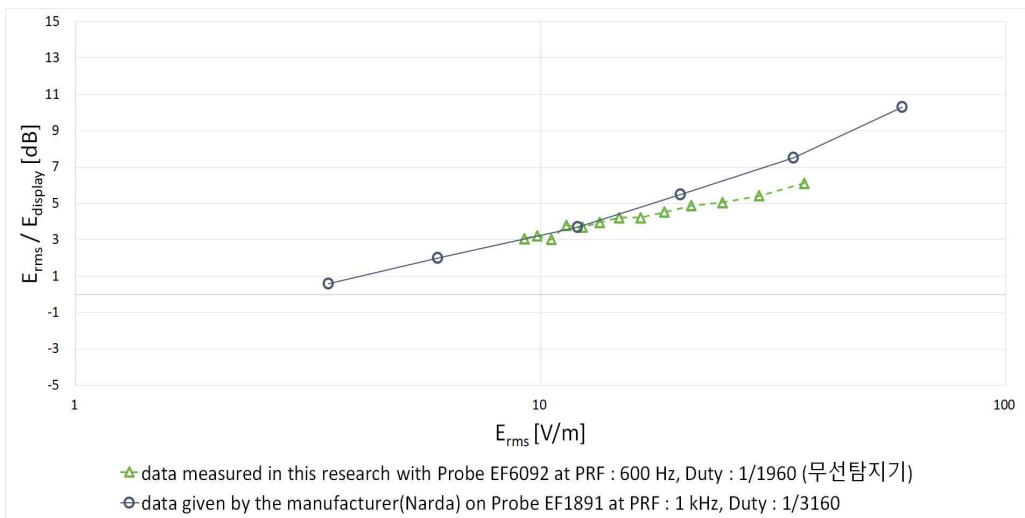


그림 5-20. SMR-3700의 채널이 3인 경우의 측정된 보정계수와 제공된 보정계수 비교 (x축이 E_{rms} 인 경우)

그림 5-19, -20를 통해 SMR-3700의 채널이 3의 신호 (PRF : 600 Hz, duty cycle : 1/1,960)에서의 측정값은 Narda Inc.에서 제공한 보정계수와 유사한 경향성을 보이며 제공된 보정계수와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

그림 5-21 ~ 28은 SMR-3700의 채널 신호를 표. 5-12에 적용하여 그에 맞는 측정 보정계수와 SMR-3700의 채널에 따른 측정 보정계수를 합성한 그래프이다.

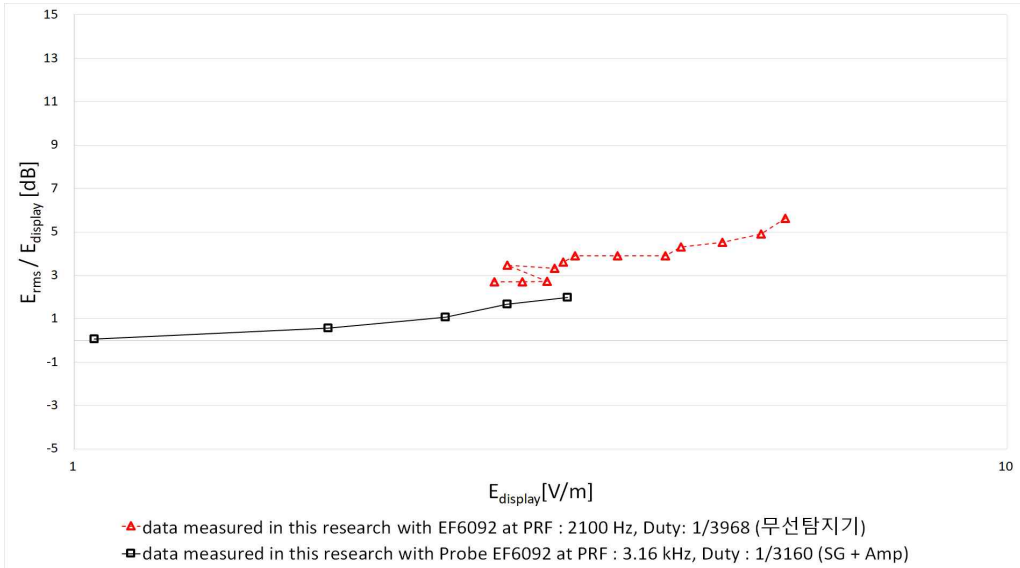


그림 5-21. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

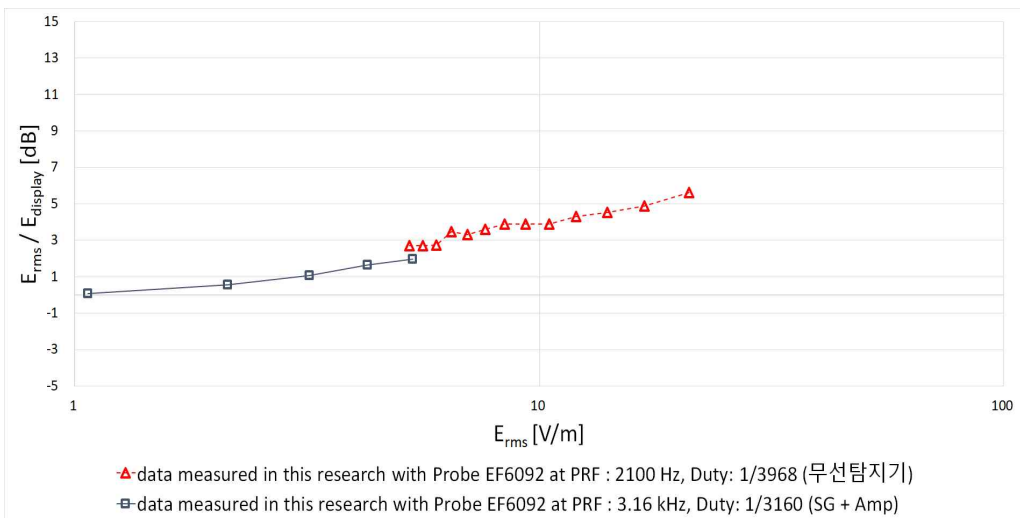


그림 5-22. SMR-3700의 채널이 0인 경우의 측정 보정계수와 채널 0 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 E_{rms} 인 경우)

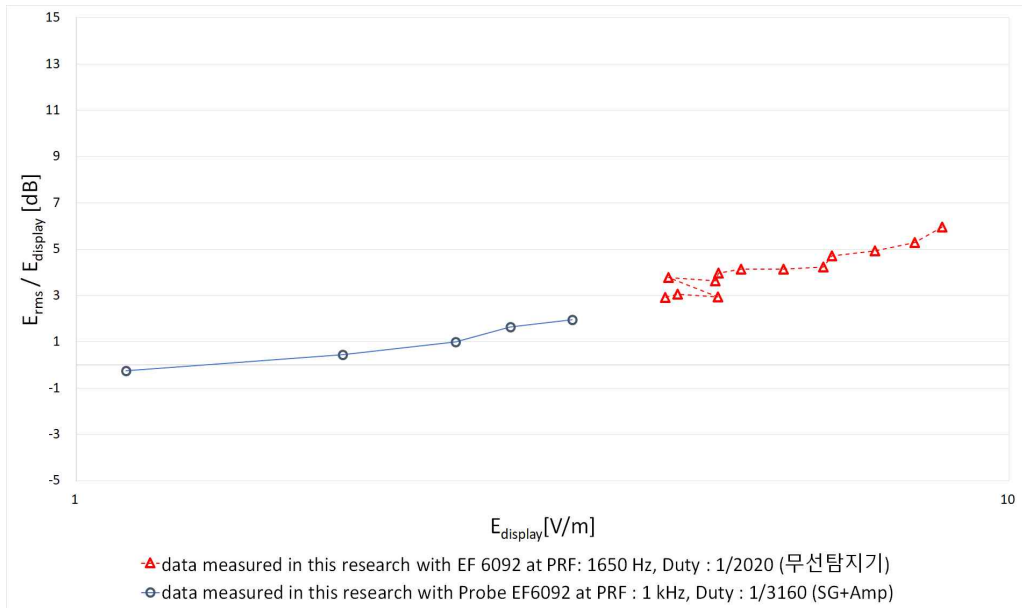


그림 5-23. SMR-3700의 채널이 1인 경우의 측정 보정계수와 채널 1 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

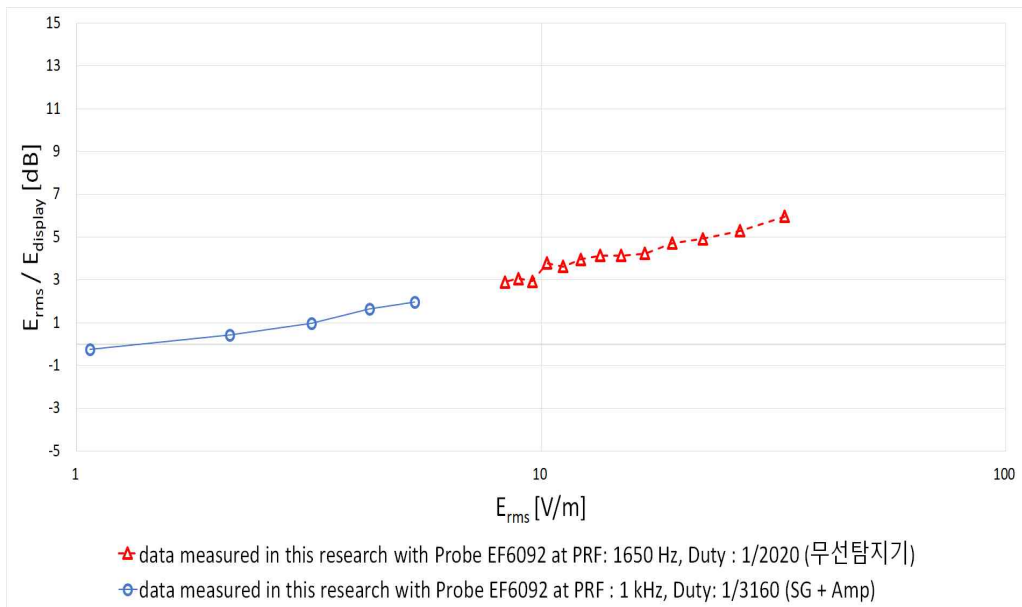


그림 5-24. SMR-3700의 채널이 1인 경우의 측정 보정계수와 채널 1 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 E_{rms} 인 경우)

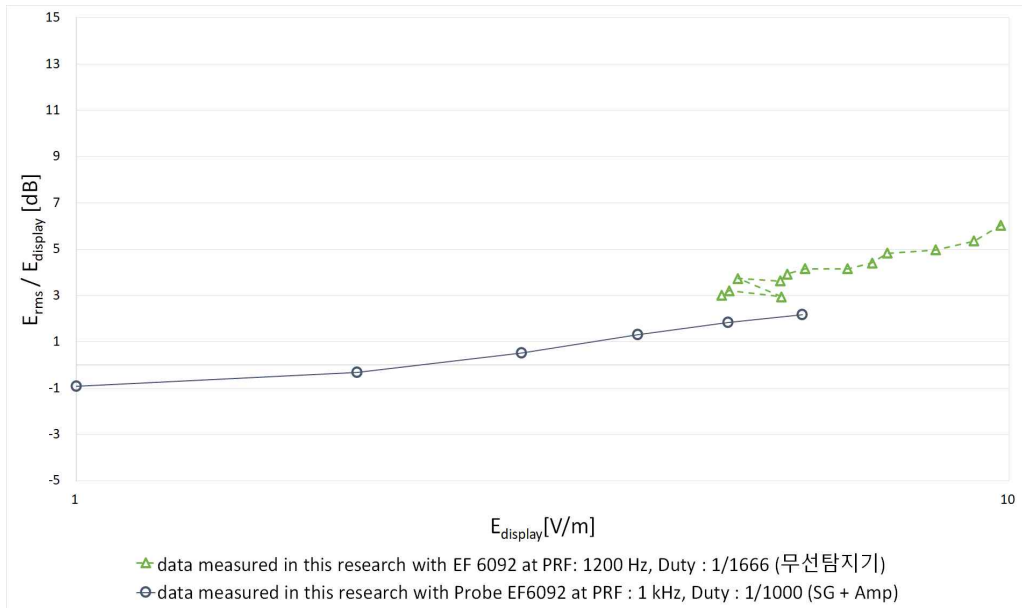


그림 5-25. SMR-3700의 채널이 2인 경우의 측정 보정계수와 채널 2 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

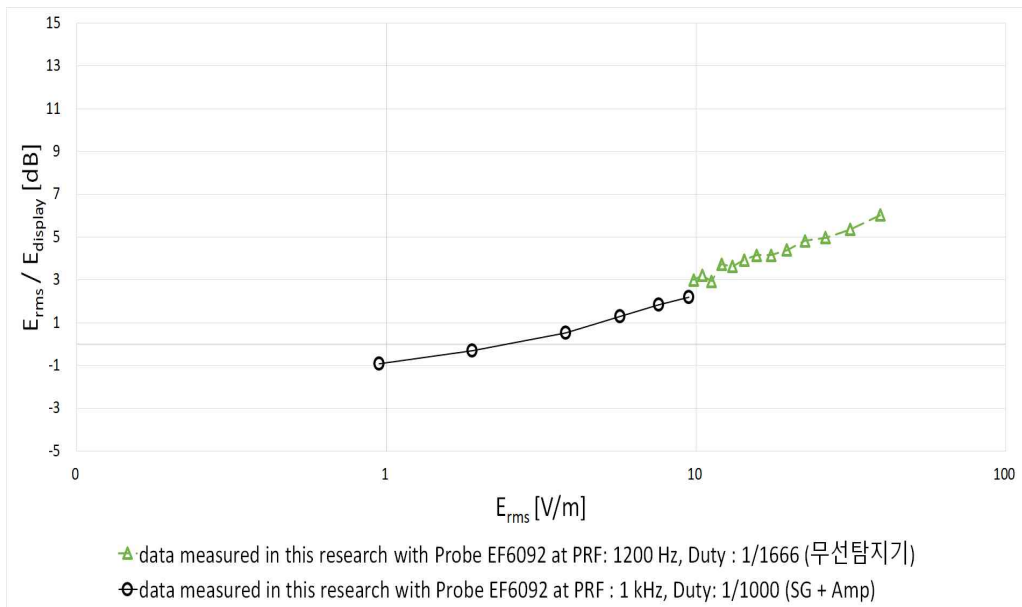


그림 5-26. SMR-3700의 채널이 2인 경우의 측정치와 채널 2 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 E_{rms} 인 경우)

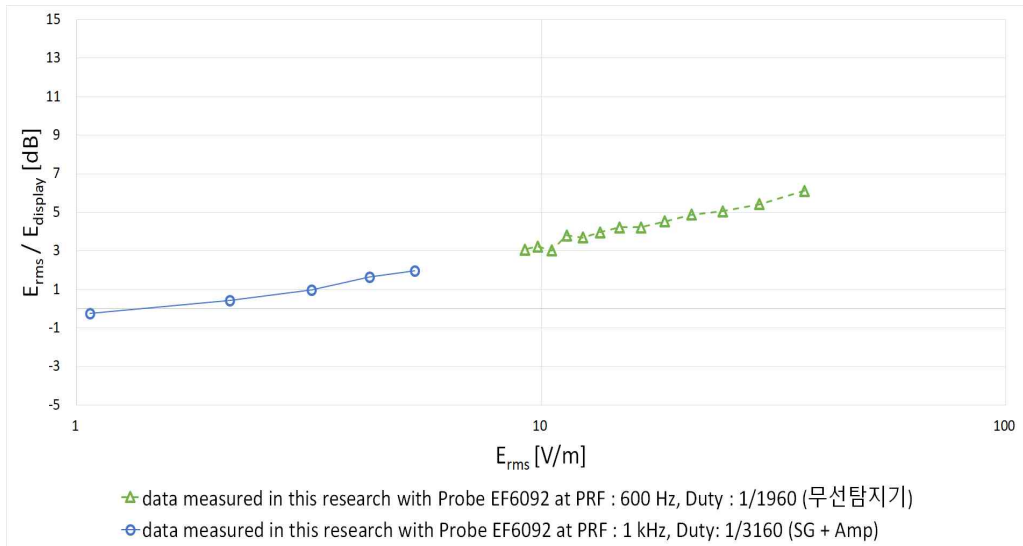


그림 5-27. SMR-3700의 채널이 3인 경우의 측정 보정계수와 채널 3 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 $E_{display}$ 인 경우)

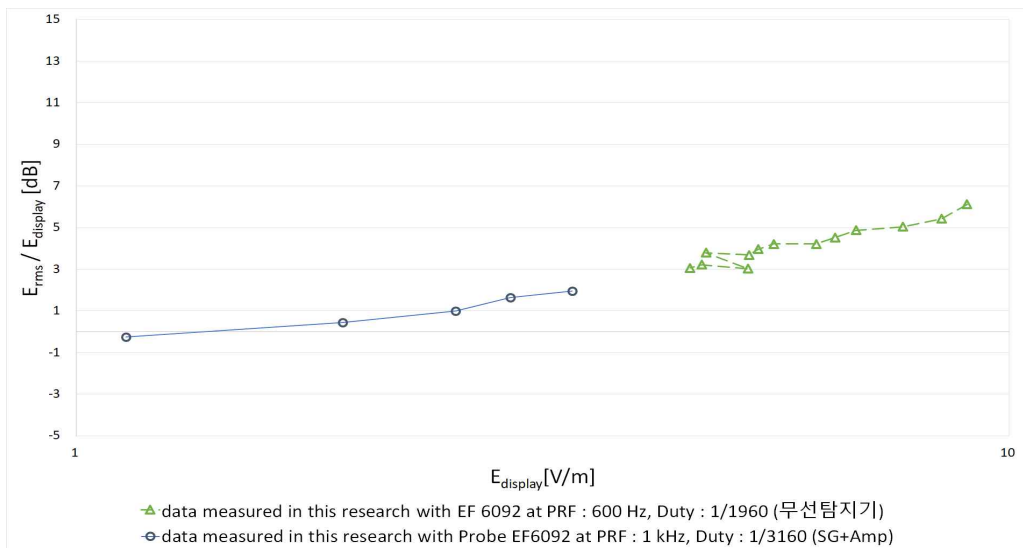


그림 5-28. SMR-3700의 채널이 3인 경우의 측정 보정계수와 채널 3 신호에 적용 가능한 측정 보정계수의 합성 (x축이 E_{rms} 인 경우)

그림 5-21 ~ 28을 통해 EF6092 프로브의 측정치가 전계 세기에 따라 연속성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

제 6 장 결 론

펄스파에 의한 인체 안전성에 대한 우려가 증가하고 있어, 이에 대한 측정 및 평가가 필요하게 되었다. 따라서 펄스파를 휴대용 전자파 측정기(Narda Inc.)로 측정할 때 정확한 값을 측정하는지 확인하고, 정확한 값이 측정되지 않는다면 이에 대한 보정계수를 도출하는 것이 필요하다. 이를 위해 4 장에서 신호발생기로 9.0 GHz의 연속파 신호를 발생시키고 휴대용 전자파 측정기로 측정하여, 9.0 GHz 연속파 신호 대한 휴대용 전자파 측정기의 측정 신뢰도를 확보하였다. 그리고 신호발생기로 다양한 PRF와 Duty cycle을 갖는 펄스파 신호를 발생시켜 휴대용 전자파 측정기로 측정하여 펄스파 신호에 대한 보정계수를 구하였으며, Narda Inc.에서 제공하는 보정계수와 ± 3 dB이내 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 이를 통해 PRF(Pulse Repetition Frequency)와 Duty cycle에 따른 Narda Inc.에서 제공하는 보정계수의 신뢰성을 일부 확보하였다. 5 장에서는 민간선박용 무선탐지기(SMR-3700 + RSU-3700)을 통해 휴대용 전자파 측정기의 펄스파 측정 신뢰성을 확인하였다. 그 결과 민간선박용 무선탐지기의 채널 0(PRF : 2,100 Hz, Duty cycle : 1/3,968)을 제외한 채널 1(PRF : 1,650 Hz, Duty cycle : 1/2,020), 채널 2(PRF : 1,200 Hz, Duty cycle : 1/1,666) , 채널 3(PRF : 600 Hz, duty cycle : 1/1,960)에서 측정값이 Narda Inc.에서 제공한 보정계수와 ± 3 dB 이내의 차이가 있음을 확인하였다. 민간선박용 무선탐지기의 채널 0에서 휴대용 전자파 측정기의 측정치에 대한 보정계수는 Narda Inc.에서 제공한 보정계수보다 약 + 5 dB 높게 나왔다. 이는 Narda Inc.에서 제공한 보정계수는 EF1891 프로브를 바탕으로 제공된 값이지만 본 과제에서는 EF1891과 비슷한 성능을 지닌 EF6092 프로브를 사용했기 때문에 나타난 프로브 특성 오차로 보인다.

4장에서 측정된 EF6092의 보정계수와 5장에서 측정된 EF6092의 보정계수의 합성을 통해 전기장의 세기에 따른 EF6092의 보정계수의 연속성을 확인할 수 있다. EF6092 프로브와 휴대용 전자파 측정기로 펄스파를 측정할 때, 이 보정계수를 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Radar Measurements, Keysight Technologies, August 22, 2014.
- [2] Technical Note 111, Standards-compliant test of non-ionizing electromagnetic radiation on radar equipment using broadband meters (for example NBM), Narda Safety Test Solutions.
- [3] ICNRIP Guidelines, “For limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields(up to 300 GHz),” Health physics 74(4):494-522, 1998.
- [4] ICNRIP Guidelines, “For limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields(1 Hz to 100 kHz),” Health physics 99(6):818-836; 2010.
- [5] IEEE Std C95.1, “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz,” IEEE, 2005.
- [6] IEEE Std C96., “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz,” IEEE, 2002.
- [7] HF906 교정검사성적서, 2014.
- [8] E-Field probe EF6092 datasheet, Narda Safety Test Solutions.
- [9] Šimunic, Koren, “An Electric Field Measurement of a Scanning Radar Antenna,” Microwave Journal, pp. 124+, Sept. 1997.
- [10] 삼영ENC(주), SMR-3700 설정 및 시험방법.