

안테나 교정 국제공동 연구

연구책임자 류재만

연구원 박정규

윤훈

서명원

유대훈

제 출 문

본 보고서를 「안테나 교정 국제 공동 연구」 과제의
최종보고서로 제출합니다.

2008. 12. 31.

연구책임자 : 류 재 만(이천분소 시험과)

연 구 원 : 박 정 규(이천분소 시험과)

윤 훈(이천분소 시험과)

서 명 원(이천분소 시험과)

유 대 훈(이천분소 시험과)

요 약 문

30MHz에서 1000MHz 대역의 야외시험장에서의 안테나 교정방법은 국제적으로 표준방법이 확립되어 있지 않아 그 유효성은 국가간 또는 안테나 교정기관간에 상호비교를 통하여 안테나 인자 측정값의 일치 여부와 측정불확도의 관계로 통계적인 기법을 이용하여 판단하고 있다. 그러한 국제적인 배경에 따라 전파연구소와 일본의 정보통신연구기구(NICT)는 안테나 교정 상호 비교 측정 공동연구를 2004년부터 본격적으로 수행하였다.

본 보고서에서는 2008년 일본의 정보통신연구기구와 안테나 교정 상호공동연구 결과뿐만 아니라 그 동안의 수행해왔던 다이폴안테나, 바이코니칼안테나, 로그주기(LPDA)안테나를 각 기관의 방법으로 측정한 자유공간안테나 인자를 상호 비교하였다. 전파연구소는 3-안테나법을 근간으로 하여 높이에 따라 측정한 안테나 인자의 평균값으로부터 자유공간안테나 인자를 측정하고 일본의 정보통신연구기구는 잘 계산된 이론적 표준다이폴 안테나를 이용하여 수학적 방법인 Curve Fitting Method로 자유공간안테나 인자를 측정한다. 여기서는 두 기관이 사용하는 안테나 교정방법의 기본이론을 다루고, 그 측정결과를 상호 비교하여 양 기관의 불확도 내에서 훌륭하게 일치함을 보였다.

SUMMARY

Measurement uncertainty assessment is very important in measurement and calibration. RRA provides antenna calibration services for EMI test. Reliability of EMI test depends on accurate antenna calibration. Antenna calibration results have to be accompanied with measurement uncertainty for its better reliability. This report gives the results of mutual comparison of free-space antenna factors between NICT of Japan and RRL of Korea. To obtain the free space antenna factors, NICT use the Curve Fitting Technique using Standard Antenna Method, RRA use Height Scanning Averaging in which the insertion loss depending on the height from ground is averaged. Although the maximum deviation between the values calibrated by two laboratories was 0.6dB at 600MHz in case of dipole, they were correspondent within the uncertainties of both institutes.

목 차

제 1 장 서 론	9
제 2 장 한·일 안테나 공동연구 연혁	10
제 1 절 공동연구의 시작(2002년-2004년)	10
제 2 절 공동연구의 진행(2005년-2007년)	11
제 3 절 공동연구의 종료 및 향후 협력(2007년-2008년)	12
제 3 장 주요한 안테나 교정방법	13
제 1 절 서 론	13
제 2 절 3-안테나법(Three Antenna Method)	15
제 3 절 표준안테나법(Standard Antenna Method)	19
제 4 장 양 기관의 안테나 교정방법 비교	24
제 1 절 서 론	24
제 2 절 RRA : 3-안테나 Height Scanning Average	25
제 3 절 NICT : 표준안테나법의 Curve Fitting Method	34
제 5 장 양 기관의 상호교정 결과 비교	39
제 1 절 서 론	39
제 2 절 다이폴 안테나	40
제 3 절 바이코니칼 안테나	42
제 4 절 대수주기 안테나	44
제 5 절 측정불확도	46
제 7 장 결론 및 향후계획	48
* 참고문헌	49

표 목 차

[표 1] 안테나 교정방법의 종류	14
[표 2] NICT 표준안테나법 교정의 세부내용	36
[표 3] 전파연구소와 NICT 교정야외시험장 비교	39
[표 4] 비교용 다이폴안테나의 제원	40
[표 5] 다이폴안테나 교정결과 비교	40
[표 6] 바이코니칼안테나 교정결과 비교	42
[표 7] 대수주기 안테나 교정결과 비교	44
[표 8] HSA에 의한 다이폴 안테나 교정의 불확도 총괄표	46
[표 9] 안테나별 양기관의 측정불확도 비교	47

그 립 목 차

[그림 1] 아시아권 안테나 공동연구 협력 단계	12
[그림 2] 안테나 사이의 삼입손실 측정	13
[그림 3] 3-안테나법 구성 및 안테나 쌍	16
[그림 4] 3-안테나법의 삼입손실 측정	17
[그림 5] 표준안테나법의 구성	21
[그림 6] 금속평면 위 안테나의 기하광학 구조	25
[그림 7] HSA 측정 개념	26
[그림 8] 평균에 의한 반사파 소멸과 자유공간 전개	27
[그림 9] $\frac{e^{-jkx}}{x}$ 그래프 ($r_N - r_o = 7 \times \frac{\lambda}{2}$)	29
[그림 10] 스캔 시작높이 h_0 및 스캔 범위 $h_0 \sim h_N$ ($r_N - r_0 = m\lambda$)에 따른 안테나 인자의 변화 추이 (800MHz)	31
[그림 11] NICT의 계산가능 표준다이폴 : 저주파(좌), 중주파(중) 고주파(우)	34
[그림 12]. NICT의 표준안테나법 측정구성	35
[그림 13] 안테나인자의 정의	37
[그림 14] 등가회로	37
[그림 15] 전파연구소(좌) 및 NICT(우)의 안테나교정 야외시험장	39
[그림 16] 다이폴 안테나 교정결과 비교 그래프	41
[그림 17] 다이폴 안테나 교정결과 양 기관의 차이	41
[그림 18] 바이코니칼 안테나 교정결과 비교 그래프	43
[그림 19] 바이코니칼 안테나 교정결과 양 기관의 차이	43
[그림 20] 대수주기 안테나 교정결과 비교 그래프	45
[그림 21] 대수주기 안테나 교정결과 양 기관의 차이	45

제 1 장 서 론

국제무선장해특별위원회(CISPR)는 안테나 교정방법의 국제적인 통일 방안을 논의하기 위하여 2005년 말에 CD(위원회안) 문서 CISPR/A/644/CD를 제출하여 각 회원국에 회람을 하였다. 이 문서는 자유공간 안테나 인자의 산출을 위하여 표준시험장법^[2], 표준안테나법, 3-안테나법, 높은 높이에서 측정하는법, 높이에 따른 평균을 취하는 평균법을 다루었다. 2006년도 CISPR 본 회의에서 EMI 측정용 안테나 교정에 통일방안에 관하여 많은 논쟁이 있었지만 안테나 결론을 이끌어 내지 못하여 안테나 교정에 관한 문제는 처음부터 논의를 다시 시작하게 되었다.

각 국은 자국의 전자파환경을 보호하기 위하여 EMI를 규제하고 있는데 그 근간이 되는 것이 안테나의 교정이다. 주파수 30MHz에서 1GHz대역은 대부분의 국가에서 EMI 규제 대역으로 설정되었지만, 이 대역은 전파의 파장의 범위로 30cm에서 10m이기 때문에 반사파의 영향에서 벗어난 자유로운 측정을 하기가 어렵다. 그리하여 야외시험장에서 자유공간안테나 인자 측정기술이 다양하게 존재하게 된다. EMI 측정 결과의 통일성과 신뢰성을 확보하는 차원에서 국가간 또는 안테나 교정기관간 상호비교연구가 국제적으로 수행되고 있다. 국내의 RF 중심기관인 전파연구소에서도 일본의 정보통신연구기구(NICT)와 MOU를 통하여 안테나 상호비교 측정연구를 2003년 말부터 수행하고 있다.

본 보고서에서는 2008년 일본의 정보통신연구기구와 안테나 교정 상호공동연구 결과뿐만 아니라 그 동안의 수행해왔던 다이폴안테나, 바이코니칼안테나, 로그주기(LPDA)안테나를 각 기관의 방법으로 측정한 자유공간안테나 인자를 상호 비교하였다. 전파연구소는 3-안테나법을 근간으로 하여 높이에 따라 측정한 안테나 인자의 평균값으로부터 자유공간안테나 인자를 측정하고 일본의 정보통신연구기구는 잘 계산된 이론적 표준다이폴 안테나를 이용하여 수학적 방법인 Curve Fitting Method로 자유공간안테나 인자를 측정한다. 여기서는 두 기관이 사용하는 안테나 교정방법의 기본이론을 다루고, 그 측정결과를 상호비교하여 양 기관의 불확도 내에서 훌륭하게 일치함을 보였다. 전파연구소는 32개의 방송통신지정시험기관이 보유 사용하고 있는 EMI 측정 및 시험장 평가용 안테나를 연간 약 200여개를 직접 교정해 주고 있는 반면, 일본의 NICT는 그 산하기관인 TELEC이 사용하는 EMI 측정용 안테나를 연간 4내지 5개를 교정해주고 TELEC은 그 교정된 안테나를 기준으로 EMI 시험을 수행하는 일본의 VCCI회원 기관에 대하여 안테나 교정 서비스를 수행함으로써 간접적으로 시험기관에 대한 안테나 교정을 제공하고 있다.

제 2 장 한 · 일 안테나 공동연구 연혁

제 1절 공동연구의 시작(2002년-2004년)

국제간 기술교류를 통한 전파 연구사업 발전을 위하여 일본 통신종합연구소(CRL: 현 NICT)와 2002년 7월 23일에 안테나 측정기술을 포함한 4개 분야의 공동연구를 위한 양해각서를 체결하였다. 이에 따라 2002년 9월 CRL의 안테나 연구 책임자인 Shinozuka Takashi 등이 전파연구소를 방문하여 일본의 안테나 측정 방법을 소개하고 양 기관간 안테나 교차 시험 측정 정례화를 협의하여 세부항목 및 항목별 추진 세부 일정을 논의 하였다.

2003년 4월 전파연구소의 관계자가 도쿄 고꾸분지에 있는 CRL 본부를 방문하여 안테나 교정방법 및 교차 시험에 대한 협의와 일본의 안테나 특성 확인 증명제도에 대해 조사하였다. 2003년 12월에 유웅곤 전파자원연구과장, 고흥남 주무관, 박재수 주무관 및 박정규 연구사가 CRL를 방문하여 CRL의 안테나 교정 야외 시험장에서 우리소의 다이폴 안테나 2개를 이용하여 CRL에서 제공한 시료용 안테나(Anritsu_MP_652B, Schwarzbeck_713)를 우리소의 안테나 교정 방법인 3-안테나법의 Height Scanning Averaging에 의하여 자유공간 안테나 인자를 측정하였고 또한 CRL은 특성이 이론적으로 정확하게 계산된 표준안테나(Calculable dipole)를 이용하여 표준안테나법으로 2m 및 3m 높이에서의 안테나 인자를 측정하여 상호 비교하였다.

2004년 3월 EMC 그룹장 Shinozuka를 포함한 CRL의 안테나 교정 및 연구팀 7명이 전파연구소 이천분소 안테나 교정 야외시험장을 방문하여 4일 동안 CRL이 보유 운용하고 있는 표준안테나 Calculable Dipole Antenna (CHASE #2)를 사용하여 개량표준시험장법에 의하여 CRL 보유한 또 하나의 이론적으로 계산된 표준안테나인 Calculable Dipole Antenna(CHASE #1) 대한 자유공간 안테나 인자를 측정하였고, 우리소도 3-안테나법의 Height Scanning Averaging에 의하여 그 시료용 표준 다이폴 안테나의 자유공간 안테나 인자를 측정하였다. 그 결과 30MHz를 제외한 1GHz 전 측정범위에서 0.5dB 이내로 잘 일치함을 보였다. 30MHz의 교정에서 우리소의 방법은 안테나 마스트의 높이가 8.7m 이상이 되어야 충분한 정확도가 나온다는 결론을 얻고 그 결과를 바탕으로 2005년 기존의 6m의 안테나 마스트를 10m 마스트로 교체하는 개선작업을 수행하였다.

제 2절 공동연구의 진행(2005년-2007년)

각 기관의 안테나 교정 및 연구담당자가 상호 기관을 직접 방문하여 자신의 안테나 교정방법으로 EMI 측정용 다이폴 안테나를 측정하는 Round Robin 방식은 자신의 안테나 교정방법에 맞게 상대방의 야외시험장에 교정 설비를 갖추어야 한다는 불편 때문에 2003년 및 2004년으로 종료하고, 기준 시료안테나를 준비하는 기관에서 먼저 자신의 야외시험장에서 안테나를 교정한 후 상대 기관에게 보내어 측정하게 하고 그 결과는 추후 상호 방문하여 논의하는 형식으로 전환하였다.

2004년 말, 2005년, 2006년 초반까지는 EMI 시험장의 정규화시험장감쇠량(NSA) 측정에 기준이 되는 다이폴안테나에 대한 상호 비교 측정 및 논의를 진행하였다. 기준 시료안테나는 2004년 4월 1일부터 기존의 CRL(통신종합연구소)와 TAO(통신방송기구)과 통합하여 새로이 출범한 일본 NICT(정보통신연구기구)에서 준비하였다. 자유공간안테나 인자를 산출할 기준 시료 다이폴로서 30MHz-200MHz 대역의 Anritsu_MP_652B와 300MHz-1000MHz 대역의 Schwarzbeck_UHALP_793을 NICT에서 먼저 측정하고 그 시료를 전파연구소로 항공 택배로 보내어 우리소가 측정한 후에 각 안테나 교정담당 및 연구진이 상호 기관을 방문하여 교정결과에 대한 분석과 새로운 안테나 측정법 연구를 토의하는 방식으로 전환하여 2006년 말까지 수행하였다. 다이폴 안테나의 교정 비교 연구는 2006년 말에 각 기관간 다이폴안테나의 측정불확도를 산출하고 상호 측정결과를 비교함으로써 종료하였다.

EMI 인증시험에 가장 많이 사용되며 EMI 시험에 중요성이 가장 큰 광대역 안테나인 30MHz-300MHz 대역의 바이코니칼 안테나(Biconical Antenna) 및 300MHz-1000MHz 대역의 로그주기안테나(LPDA)에 대해서 2006년 말부터 2007년까지 상호비교 측정연구를 진행하였다. 전파연구소에서는 기준용 광대역 시료 안테나로서 바이코니칼 안테나 Schwarzbeck_BBA_9106과 로그주기 안테나 Schwarzbeck_UHALP_9108를 준비하였다. 전파연구소에서 먼저 측정하고 NICT에서 나중에 측정한 후 그 결과를 2007년 NICT에서 논의하고 향후 공동연구 협력에 대하여 논의 하였다. 그 결과는 바이코니칼 안테나의 경우 30MHz에서 0.47dB, 300MHz에서 0.39dB의 차이를 제외하고 비교 측정 주파수 모두 0.25dB내로 좋은 일치를 보였으며, 로그주기 안테나의 경우 300MHz에서 0.4dB를 제외하고 모든 주파수에서 0.19dB 이내의 훌륭한 일치를 보였다.

제 3 절 공동연구의 종료 및 향후 협력(2007년-2008년)

광대역 안테나에 대한 교정을 2차로 각 기관에서 실시하였으며, 광대역 안테나에 대하여 양 기관에서 각자의 교정방법에 따른 측정불확도를 산출하고 논의하였다. 양 기관의 방법에 따라 측정한 EMI용 안테나의 교정결과가 잘 일치한다는 결론을 이끌어 내고 이를 2008년 5월 싱가포르에서 개최된 Asia-Pacific EMC Symposium에 우리소가 주저자로서 공동으로 논문을 발표하였다. 이러한 결과는 EMI시험장 평가 및 IT 제품의 EMI 시험을 상호 인정해 줄 수 있는 EMC 분야의 국가간 MRA 체결에 기본 데이터로 활용할 수가 있을 것이다.

한편 양기관간 EMI 측정 안테나 공동연구를 다이폴안테나 및 광대역 안테나 교정의 상호비교로 마무리하면서 EU와 미국이 주도하는 이 분야에서 아시아권의 연대의 중요성을 인식하였다. 우리나라와 일본의 전파법에 근거한 양 기관의 안테나 연구 협력을 그림 1처럼 국면 1로 상정하고 국면 2는 양국의 국가표준기본법(또는 측정법)에 근거한 국가표준기관(우리나라의 KRISS 및 일본의 NMIJ)이 함께 공동연구를 수행하는 단계로 진입한 후 중국, 대만 및 태국 등이 참여하는 범 아시아권 안테나 공동연구 연대를 구성하는 국면 3의 구상 등에 대해 논의하였다. 이는 각 국가의 안테나 교정 기관의 입장 차이와 이해관계 등이 얽혀있어 추진하는데 많은 어려움이 있을 수 있겠지만 향후 협력 방안을 강구하기로 하고 지속적인 접촉을 유지하기로 하였다.

	Radio Law	Measurement Law(National Std.)	
Phase 1			Phase 2
KOREA	RRI(Gov.)	KRISS	
JAPAN	NICT(IAI)	NMIJ(IAI)	
CHINA			
(TAIPEI?)			
Thailand			Phase 3
.....			

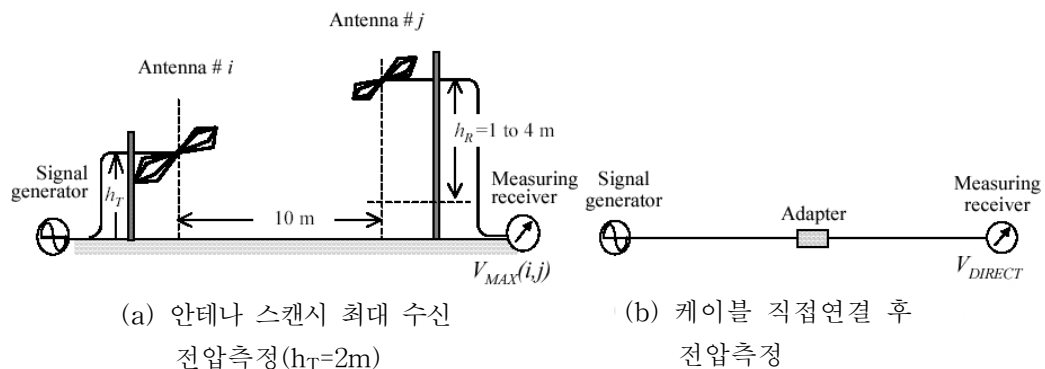
[그림 1] 아시아권 안테나 공동연구 협력 단계

제 3 장 주요한 안테나 교정방법

제 1 절 서론

접지면을 가진 안테나교정 야외시험장에서 30MHz-1000MHz 대역의 안테나 인자를 결정하는 방법은 여러 가지가 있다. 대표적으로 3가지가 논의되고 있는데 3-안테나법(Three Antenna Method:TAM), 표준안테나법(Standard Antenna Method:SAM) 및 표준시험장법(Standard Site Method:SSM)이 그것이다. 이러한 안테나 교정방법들은 그림 1에서 보여주는 것처럼 안테나 사이의 삽입손실을 측정하는데 기반을 두고 있다. 어떤 경우에 있어서는 기준안테나법(Reference Antenna Method:RAS)은 3-안테나법이나 표준안테나법에 의해 교정된 안테나를 기준으로 사용하여 측정하는 방법을 의미한다.

3-안테나법이나 표준안테나법은 높이 의존 안테나 인자 $F_A(h_R)$ 를 제공한다. 이 방법들은 자유공간안테나 인자 $F_{Free-space}$ 를 산출하기 위하여 추가적인 특별한 기술이 필요하다. 반면 표준시험장법은 원래 스윙 주파수로 지면으로부터 높이에 따라 안테나를 스캔하면서 시험장 삽입손실을 측정하는 동안 발생하는 상쇠간섭을 피하기 위해 개발되었다. 표준시험장법은 높이의 함수로서 안테나인자를 정확히 측정하는 것도 아니고 자유공간 안테나 인자를 정확히 산출하는 것도 아니다. 다만 장점이라고 하면 EMI 시험에서 사용하는 측정 구성과 닮았다는 것이다. [표 1]은 위 3가지 안테나 교정방법에 대한 안테나 배열 사항과 자유공간 안테나 인자를 산출하기 위하여 필요한 추가적인 내용을 목록화 하였다.



[그림 2] 안테나 사이의 삽입손실 측정

[표 1] 안테나 교정방법의 종류

교정방법	전송 안테나 높이 h_T	수신 안테나 높이 h_R	안테나 이격 거리 D	필요 보정 인자	결과물	자유공간 안테나 인자 산출의 별도 필요 방법
3-안테나법	안테나1 h_1 , 안테나2,3 h_2 ^{주1)}		$D \geq D_0$ ^{주2)}	없음	높이의존 안테나인자 $F_A(h)$	높은위치측정 평균법 ^{주4)}
표준 안테나법	주1)을 충족 하는 h_T	어떤 높이	$D \geq D_0$ ^{주2)}	없음	높이의존 안테나인자 $F_A(h)$	평균법 커브피팅법 ^{주5)}
표준 시험장법	2m	1m-4m 스캔	10m	있음	자유공간 안테나 인자 F_{Afs}	보정값 필요

주1) h_T 와 D 는 다음과 같이 조정되어야 한다.

- (1) 수신안테나는 uniform field 내에 있어야 한다.
- (2) 수신안테나는 최소 수신 전압에 해당하는 null에 있지 말아야 한다.
- (3) 수신안테나는 안테나의 최대 지향성에 직접파와 반사파를 수신하도록 방향이 잡혀져야 한다.

주2) D_0 는 안테나의 상호결합을 허용한계까지 줄이도록 요구되는 이격거리

주3) 수평편파가 각 방법에서 사용된다.

주4) 전파연구소에서 Height Scanning Average 법으로 사용하는 방법

주5) 일본 NICT에서 사용하는 방법

제 2 절 3-안테나법(Three Antenna Method)

통상적인 3-안테나법은 고정된 높이에서 측정할 때 적용되는 반면에 마찬가지로 3 안테나를 사용하는 표준시험장법은 최대 수신신호를 찾기 위하여 각 쌍의 안테나 중에 하나의 안테나가 높이에 따라 스캔 되어진다.

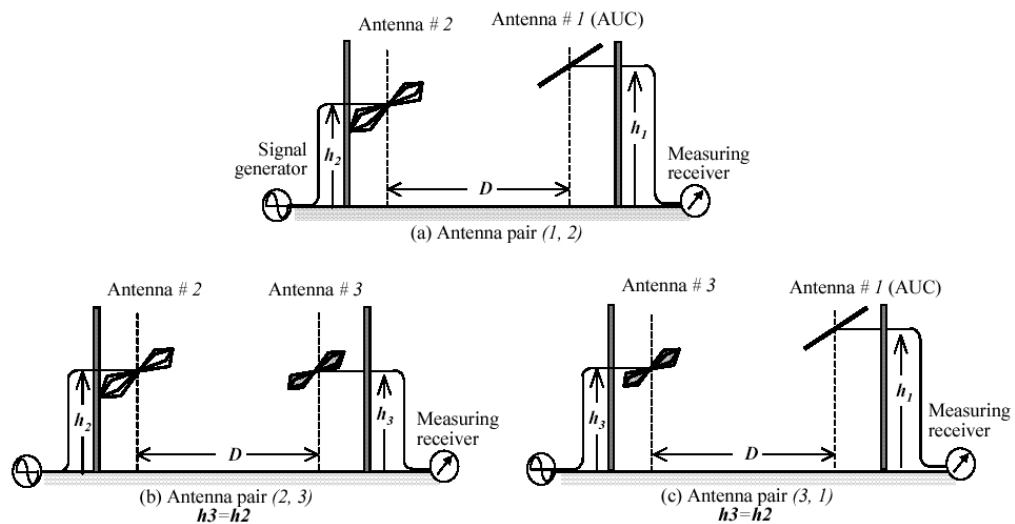
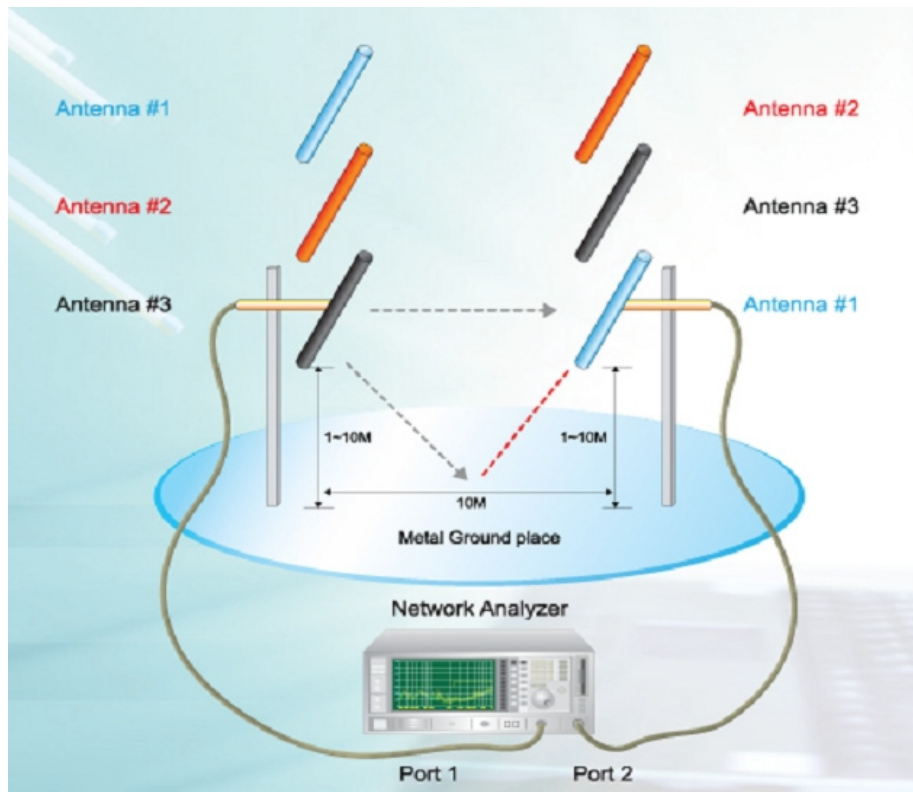
3-안테나법은 안테나 교정 야외시험장 접지 평면으로부터 어떤 높이에 놓여진 세 개의 안테나 쌍에 대한 삽입손실을 측정함으로써 행해진다. 교정대상안테나 AUC(Antenna Under Calibration)외에 독립적으로 2개의 안테나가 더 필요하다. 각 안테나 쌍에 대해 삽입손실 측정은 [그림 2]에서 처럼 수행되어야 하는데 전송안테나와 수신안테나 사이의 이격거리가 10m 이상 떨어져야 하고 접지평면 위의 높이 h_T 및 h_R 에서 수평편파로 배열되어 있어야 한다.

h_T 및 h_R 은 같은 높이가 아니지만 h_1 에서는 안테나 1이 놓여져야 하고 h_2 에는 안테나 2와 3이 놓여져야 한다. 3-안테나법의 구성과 안테나 쌍은 [그림 3]에서 보여준다. 안테나 사이의 이격거리 D 는 세 개의 안테나 쌍에 대해서 모두 같아야 하고 높이 h_1 및 h_2 는 각 주파수 f 에 대하여 다음과 같은 방식으로 주의를 기울이며 선택해야 한다.

- (a) 안테나들은 상호결합이 줄어들도록 충분히 멀리 떨어져야 하고 AUC는 안테나 및 접지평면의 이미지 안테나 사이의 결합을 줄이도록 충분히 높게 설치되어야 한다.
- (b) 추가로 D 와 h_2 는 수신안테나가 null의 위치에 놓이지 않도록 해야 하는데, null은 바로 인근의 최대 전계보다 10dB이상 낮은 지점으로 정의된다. null의 조건은 다음과 같은 방정식에 의하여 계산할 수 있다.

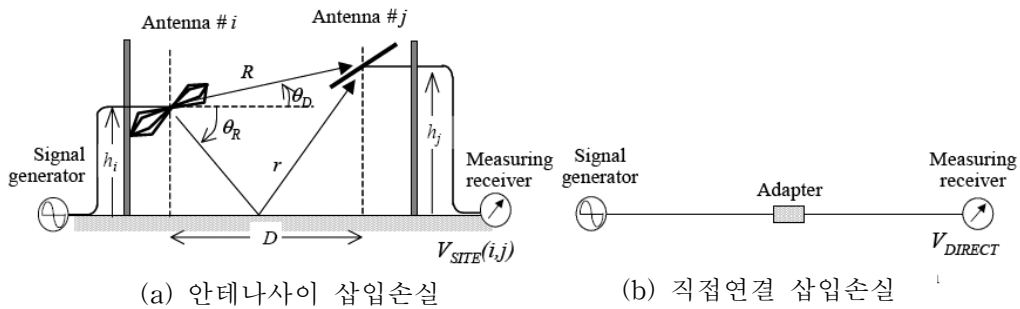
$$E(D, h_1, h_2) \propto \left| \sqrt{G_i(\theta_D)} \frac{e^{-jkR}}{R} - \sqrt{G_i(\theta_R)} \frac{e^{-jkr}}{r} \right| \quad (1)$$

여기서 R 과 r 은 직접파 및 반사파의 진행 거리이다.



[그림 3] 3-안테나법 구성 및 안테나 쌍

파수 벡터 k 는 파장 λ 에 대해 $k=2\pi/\lambda$ 로 정의된다. $G_i(\theta)$ 는 θ 방향에서 안테나 i 의 지향성 이득이다. θ 는 수평면에 대한 각이다. θ_D 와 θ_R 은 각각 직접파와 반사파의 각이다. 안테나 쌍 (i, j) 의 시험장 삽입손실은 [그림 4]와 같은 구성에 따라 측정되어야 한다.



[그림 4] 3-안테나법의 삽입손실 측정

- (a) 안테나 i 에 연결된 신호발생기를 안테나 j 의 위치에서 충분한 세기의 전기장이 발생하도록 조정한다. RF신호를 측정하는 수신기는 신호발생기의 주파수에 동조되어 안테나 j 에 연결되어야 한다. 신호발생기는 수신기의 등가 잡음 입력(Equivalent noise input) 보다 적어도 15dB이상의 신호가 수신기 입력단에 발생할 수 있도록 충분히 높아야 한다. 신호발생기의 출력 및 수신기 그리고 안테나 포트에서 입력 임피던스의 부정합(mismatching)은 반사파를 유발하여 안테나 교정의 에러를 발생시킬 수 있다. 그러므로 신호발생기와 수신기는 리턴로스가 가능한 한 큰 것을 이용해야 한다. 안테나와 케이블 연결부에 감쇠기를 연결하여 측정함으로써 에러를 최소화 할 수 있다. 부정합 에러는 안테나 교정의 측정불확도 분석에 반드시 포함되어야 한다. 안테나 j 로부터 유도된 출력전압 $V_{site}(i, j)$ dB μ V 단위로 측정한다. 신호발생기나 측정용 수신기 대신에 네트워크분석기를 사용할 수도 있다.
- (b) 케이블을 연결될 안테나와 분리시키고 서로서로 직접 연결하여 dB μ V 단위로 출력전압 V_{direct} 를 측정한다. $V_{site}(i, j)$ 와 V_{direct} 를 측정하는 동안 신호발생기의 주파수 및 출력 레벨을 일정하게 유지시켜야 한다.
- (c) 두 안테나 사이의 삽입손실은 dB 단위로 다음과 같은 방정식에 의해서 계산한다.

$$L_{ij} = V_{direct} - V_{site}(i, j) \quad (2)$$

수신기나 네트워크 분석기가 전력을 dBm으로 측정한다면 위의 방정식은 다음과 같은 방정식과 등가가 된다.

$$L_{ij} = P_{direct} - P_{site}(i, j) \quad (3)$$

(d) 위의 측정으로부터 세 개의 안테나에 대한 안테나인자를 산출하기 위한 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_1(h_1) &= \frac{1}{2} [L_{12} - L_{23} + L_{31} + 20\log f_{MHz} + C_{12} - C_{23} + C_{31} - 32] \\ F_2(h_2) &= \frac{1}{2} [L_{23} - L_{31} + L_{12} + 20\log f_{MHz} + C_{23} - C_{31} + C_{12} - 32] \\ F_3(h_3) &= \frac{1}{2} [L_{31} - L_{12} + L_{23} + 20\log f_{MHz} + C_{31} - C_{12} + C_{23} - 32] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$C_{lm} = 20\log \left| \frac{e^{-jkR_{lm}}}{R_{lm}} - \frac{e^{-jkr_{lm}}}{r_{lm}} \right| \quad (5)$$

$$R_{lm} = \sqrt{D^2 + (h_l - h_m)^2} \quad (6)$$

$$r_{lm} = \sqrt{D^2 + (h_l + h_m)^2} \quad (7)$$

밑첨자 l 및 m은 세 개의 안테나 1, 2, 3을 의미하고, L_{lm} 은 안테나 l과 m 사이의 시험장 삽입손실이다.

3-안테나법의 측정불확도는 다음과 같은 주요한 4개의 불확도 요인으로 구성되어 있으며 반드시 고려해야 한다.

- (a) 세 개의 안테나 쌍에 대한 삽입손실 L 측정의 불확도
- (b) 방정식 (4)의 기하구조에서 파라미터 C의 불확도
- (c) 높이 h 및 안테나 이격 거리 D의 변화에 따른 안테나인자의 불확도
- (d) 시험장 불완전성

제 3 절 표준안테나법(Standard Antenna Method)

표준안테나법은 접지평면위에서 전송안테나와 교정대상안테나(AUC) 사이의 시험장 삽입손실 측정에 기초하며, 특정한 높이 h 에서 AUC의 높이 의존 안테나 인자 $F_{AUC}(h)$ 를 제공한다. AUC에 입사되는 전계강도의 세기는 표준안테나라고 불리는 특별한 안테나를 이용하여 정확하게 측정된다. 표준안테나(STA) 종류 중에 하나로서 계산된 안테나(calculable antenna)가 있는데, 그것은 안테나의 접지면으로부터 높이 h 와 주파수 f 의 함수로서 안테나 인자 $F_{STA}(h)$ 를 정확하게 알고 있어야 한다. 일반적으로 표준안테나는 동조 또는 광대역 다이폴과 같은 다이폴형태(dipole-type)의 안테나이다. 그것의 안테나 인자는 해석적 방법이나 수치적 방법에 의하여 엄격하게 계산되어야 하는데 측정에 의하여 유효성이 검증될 수 있어야 한다.

[그림 5]의 (a)와 같이 야외시험장에 교정대상안테나(AUC)를 어떤 높이 h 에 수평편파로 놓는다. 교정대상안테나로부터 거리 D 가 떨어진 지점에 어떤 높이 h_T 에 송신안테나를 수평편파로 놓는다. 안테나 사이의 거리는 상호 결합 효과를 줄이도록 주파수를 고려하여 주의있게 선택한다. 일반적으로 D 는 10m 이상으로 설정된다. 전송안테나의 높이는 수신안테나 측에 전계가 null이 되는 지점을 피하여 설치해야 한다. 전계의 null 조건은 방정식 (1)과 같다. 교정대상안테나와 표준안테나 사이의 지향성의 차이에 특히 주의해야 하는데, 접지면 반사파의 각을 염두해야 한다. 지향성의 차이는 측정불확도 분석에 포함되어야 한다. 다이폴 형태의 표준안테나를 사용하는 경우 교정대상안테나가 다이폴 안테나 이거나 바이코니칼 안테나일 때는 그 지향성에 의한 차이는 거의 무시할 수 있다. 그것은 그런 종류의 안테나로부터 방사되는 파의 H-면이 균일하기 때문이다.

전송안테나에 연결된 신호발생기는 교정대상안테나가 위치한 곳에서 충분한 수준의 전계가 유도되도록 조정해야 한다. 신호발생기는 수신기의 등가 잡음 입력(Equivalent noise input) 보다 적어도 15dB이상의 신호가 수신기 입력단에 발생할 수 있도록 충분히 높아야 한다. 신호발생기의 출력 및 수신기 그리고 안테나 포트에서 입력 임피던스의 부정합(mismatching)은 반사파를 유발하여 안테나 교정의 에러를 발생시킬 수 있다. 그러므로 신호발생기와 수신기는 리턴로스가 가능한 한 큰 것을 이용해야한다. 안테나와 케이블 연결부에 감쇠기를 연결하여 측정함으로써 에러를 최소화 할 수 있다. 부정합 에러는 안테나 교정의 측정불확도 분석에 반드시 포함되어야 한다.

RF 측정용 수신기는 교정대상 안테나에 연결되어야 하고 신호발생기의

주파수에 동조시켜야 한다. 교정대상안테나의 출력 포트에 유도되는 전압 $V_{AUC}(h)$ 는 $\text{dB}\mu\text{V}$ 단위로 측정한다. 신호발생기와 수신기 대신에 네트워크분석기를 사용할 수도 있다.

교정대상안테나에 입사되는 $\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 단위의 전계는 [그림 5] (b)가 보여주는 것처럼 교정대상안테나를 표준안테나로 치환하였을 때 다음과 같은 방정식 (8)에 의하여 계산될 수 있다.

$$E(h) = F_{STA}(h) + V_{STA}(h) \quad (8)$$

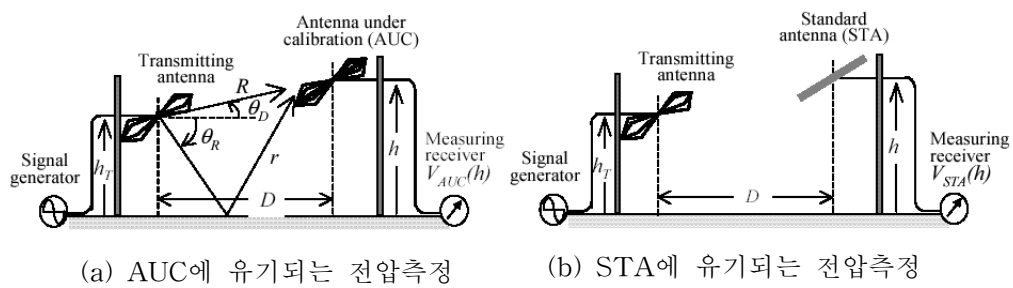
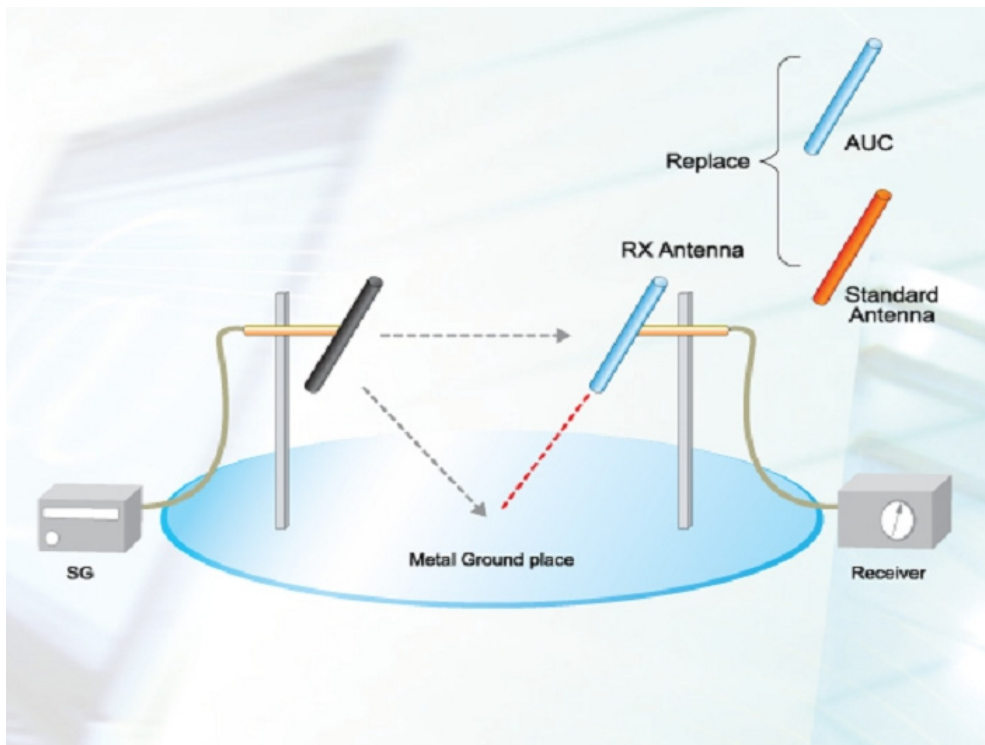
RF 측정용 수신기는 교정대상 안테나에 연결되어야 하고 신호발생기의 주파수에 동조시켜야 한다. 교정대상안테나의 출력 포트에 유도되는 전압 $V_{AUC}(h)$ 는 $\text{dB}\mu\text{V}$ 단위로 측정한다. 신호발생기와 수신기 대신에 네트워크분석기를 사용할 수도 있다.

교정대상안테나에 입사되는 $\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 단위의 전계는 [그림 5] (b)가 보여주는 것처럼 교정대상안테나를 표준안테나로 치환하였을 때 다음과 같은 방정식 (9)에 의하여 계산될 수 있다.

$$E(h) = F_{STA}(h) + V_{STA}(h) \quad (9)$$

여기서 표준안테나의 안테나인자는 dB/m 단위로 $F_{STA}(h)$ 로 표시한다. dB/m 단위로 교정대상안테나의 안테나인자는 방정식 (10)에 의하여 계산한다.

$$F_{AUC} = F_{STA}(h) + \{ V_{STA}(h) - V_{AUC}(h) \} \quad (10)$$



[그림 5] 표준안테나법의 구성

신호발생기의 주파수와 출력 레벨은 $V_{AUC}(h)$ 와 $V_{STA}(h)$ 를 측정하는 동안 항상 일정하게 유지되어야 한다. 수신기나 네트워크가 전력으로서 dBm을 측정한다면 안테나인자는 방정식 (11)로 계산하면 된다.

$$F_{AUC} = F_{STA}(h) + \{P_{STA}(h) - P_{AUC}(h)\} \quad (11)$$

30MHz에서 1000MHz 대역의 EMI 측정용 안테나를 교정할 때 측정불확도 $\pm 0.5\text{dB}$ 이내가 되도록 보장하려면 다음과 같은 주의 사항을 염두해 두어야 한다.

- (a) 교정대상안테나와 표준안테나는 물리적으로 비슷한 크기가 되어야 한다. 300MHz까지는 $\pm 10\text{mm}$ 이내로 교정대상안테나와 표준안테나가 같은 위치로 치환되어야 하고, 1GHz까지는 $\pm 3\text{mm}$ 이내이어야 한다.
- (b) 부정합에 의한 반사를 줄이기 위하여 안테나 입력포트에 감쇠패드를 부착하여야 한다. dB 단위의 감쇠기 값은 케이블과 수신기 및 안테나 사이의 길이와 고유 감쇠값에 의존한다. 일반적으로 안테나와 수신기 사이의 리턴로스 값을 21dB 이상이 되도록 하기위하여 6dB 감쇠패드가 권고된다. 그것은 부정합 에러로서 $\pm 0.1\text{dB}$ 에 해당된다.
- (c) 신호발생기와 수신기의 유동(drift), 야외시험장의 온도변화 효과를 줄이기 위해 교정대상안테나와 표준안테나 측정 사이의 시간 간격을 최소화해야 한다. 야외시험장의 온도변화는 특히 태양빛이 직접 쬘이는 조건에서는 온도의 변동에 의하여 케이블 감쇠량에 중대한 변화가 일어날 수 있다. 흰색으로 외장된 케이블은 상대적으로 온도변화 효과를 감소시키는데 이용될 수 있다.
- (d) 감쇠기, 케이블 및 안테나 등에 대하여 RF 동축 커넥터를 조일 때 제대로 연결이 되도록 주의를 기울여야 한다. 모든 연결은 커넥터 연결 확인 게이지(connector pin-depth gauge)를 사용하여 점검하여야 한다.
- (e) 표준안테나가 교정대상안테나보다 먼저 측정되어야 한다. 그런 후 표준안테나의 측정을 반복해야 한다. 만일 두 표준안테나 사이의 측정값의 차이가 $\pm 0.25\text{dB}$ 를 초과한다면 교정대상안테나 교정에 대한 전체적인 불확도(overall uncertainty)가 $\pm 0.25\text{dB}$ 를 초과될 수가 있다. 그러므로 그 측정은 반복되어야 한다.
- (f) 케이블이 안테나 소자와 직교가 되게 한다면 케이블로부터의 반사효과는

작아질 수 있다. 케이블이 접지평면을 향하여 수직으로 떨어뜨려지기 전에 안테나 뒤로 최소한 1m는 수평으로 연장되어야 한다.

표준안테나법과 관련된 측정불확도는 다음과 같은 5종의 주요한 불확도 요인으로 구성되어 있고 반드시 고려해야 한다.

- (a) 측정된 수신안테나 전압 $V_{AUC}(h)$ 와 $V_{STA}(h)$ 의 불확도
- (b) 표준안테나의 안테나인자의 불확도 $F_{STA}(h)$
- (c) 안테나 높이 h 및 안테나 이격거리 D 에 따라 변동하는 안테나인자
- (d) 교정대상안테나와 표준안테나의 지향성 차이, 특히 반사파의 입사각에서의 차이
- (e) 시험장 불완전성

제 4 장 양 기관의 안테나 교정방법 비교

제 1 절 서론

30MHz에서 1000MHz 대역의 EMI 측정용 안테나의 교정에 대하여 전파연구소가 3-안테나법을 근간으로 한다면 일본의 정보통신연구기구는 표준다이폴 안테나 특히, 계산가능 표준다이폴을 사용하는 표준안테나법을 근간으로 하고 있다. 이 두 방법은 3장에서 논의하였듯이 기본적으로 높이에 의존하는 안테나인자 $F(h)$ 를 측정하는 방법으로서 자유공간안테나인자 $F(\text{free-space})$ 를 측정하기 위하여는 특별한 기술과 절차가 필요하다.

전파연구소의 방법은 4장 2절에서 논의한 3-안테나법을 약간 변형하여 송신 및 수신 안테나를 항상 같은 높이에 위치시킨다. 두 안테나를 최소 높이에서 최고 높이까지 스캔하면서 각각의 높이 h_n 에서 높이의존 안테나 인자 $F(h_n)$ 를 측정하여 그의 평균을 계산함으로써 자유공간안테나인자를 산출하는 이른바 높이스캔평균법(HSA ; Height Scanning Average Method)을 사용한다. 여기서 n 은 n 번째 높이를 의미한다. 실무상으로는 높이 h_n 에서 세 쌍의 안테나 사이의 삽입손실 $L_n(i, j)$ 를 측정하여 그의 평균으로서 자유공간 안테나 삽입손실을 계산하여 3-안테나법의 방정식 (4)를 이용한다.

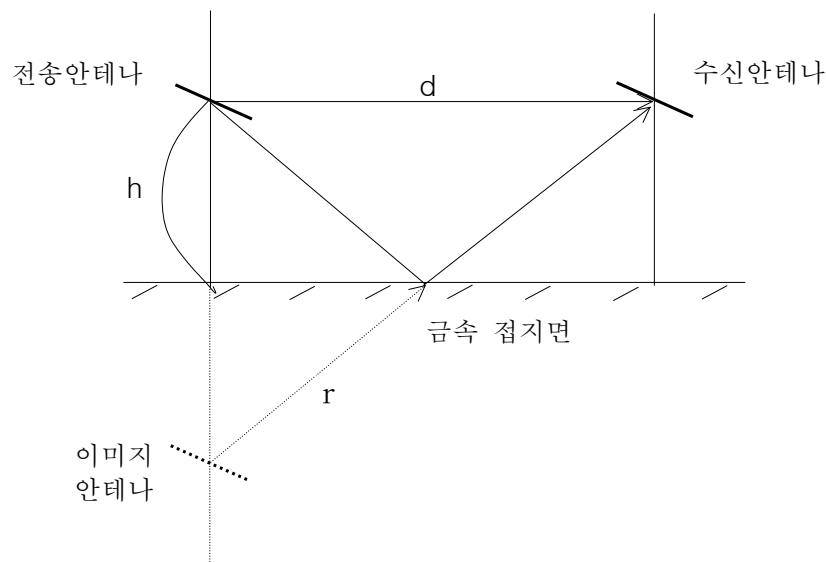
정보통신연구기구의 방법은 4장 2절에서 논의한 표준안테나법을 근간으로 한다. 표준안테나법에 의하여 주파수에 따라 몇몇 높이에서 높이 의존 안테나인자 $F(h_n)$ 을 측정하고 그 값들을 높이의 함수로 그래프에 점을 찍고 최소자승법(least square method)에 의하여 점을 이은 곡선을 추적하고 안테나인자의 높이에 따른 주기성과 자유공간 수렴성의 성질을 이용하여 자유공간 안테나인자를 산출하는 곡선최적화방법(Curve Fitting Method)을 사용한다.

제 2 절 RRA : 3 안테나 Height Scanning Average

[그림 6]은 금속 접지평면 위 어떤 높이 h 에 놓여있는 송·수신 안테나와 송신안테나의 거울상인 이미지 안테나를 보여주고 있다. 송신안테나의 이득이 G_t 이고 송신전력이 P_t 인 전송안테나에 대해서 이격거리 d 인 수신위치에서 자유공간 원거리전계(free-space far-field)의 이론적인 값은 다음과 같이 방정식 (12)에 의해 주어진다.

$$E_r = \sqrt{30G_tP_t} \frac{e^{-jkd}}{d} \quad (12)$$

이미지 안테나가 새로운 전계 발생원이 되는 기하광학 2-광선 모델(geometrical optics 2-ray model)에 따르면 방정식 (12)에서 반사파의 경로가 r 인 이미지 안테나에 의한 전계와 전송안테나의 전계가 합성되어 방정식 (13)와 같이 된다.



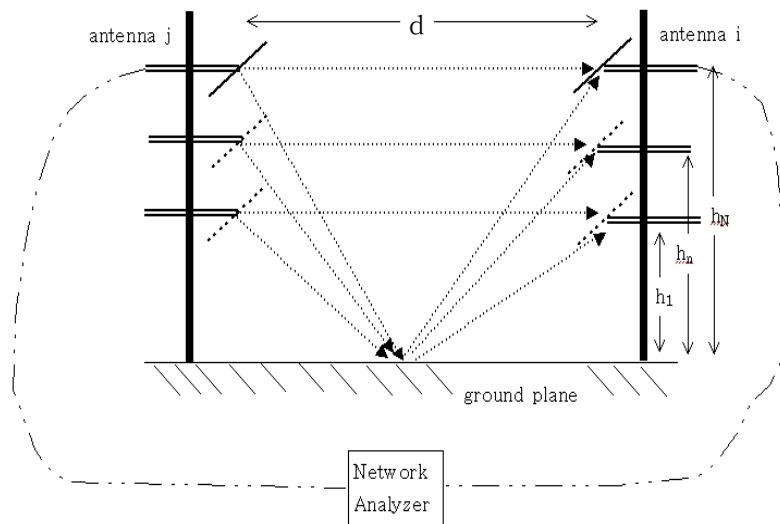
[그림 6] 금속평면 위 안테나의 기하광학 구조

$$E_r = \sqrt{30G_tP_t} \left(\frac{e^{-jkd}}{d} - \frac{e^{-jkr}}{r} \right) \quad (13)$$

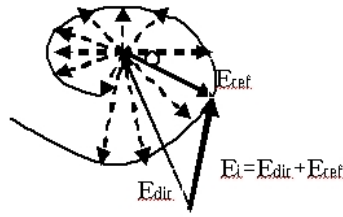
여기서 반사파의 경로 r 은 송신 및 수신안테나의 높이 h 와 안테나 사이의 이격거리 d 와 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$r = \sqrt{d^2 + 4h^2} \quad (14)$$

금속접지 평면으로부터 같은 높이에 있는 송신 및 수신안테나가 신호를 주고받을 때, 수신안테나는 송신안테나 및 그 이미지 안테나로부터 직접파 및 반사파의 영향을 받는다. [그림 7]처럼 두 안테나가 같은 높이를 유지하고, 높이에 따라 전계강도를 측정하면 높이 변화에도 불구하고 직접파는 그 세기 및 위상이 변화하지 않는 반면에, 방정식 (13)에서 보듯이 반사파는 안테나높이에 따라 경로차가 발생하여 그 전계의 세기 및 위상이 변화한다. 그러므로 각각의 높이에서 수신 측의 전기장을 측정하고 측정된 모든 값에 대하여 합성 평균을 취하면 위상이 일정한 직접파는 그대로 남게 되고 높이에 따라 위상차가 존재하는 반사파들은 서로간의 간섭에 의하여 소멸되는 것이 HSA 측정의 기본원리를 정성적으로 설명한다.



[그림 7] HSA 측정 개념



[그림 8] 평균에 의한 반사파 소멸과 자유공간 전계

[그림 8]과 같이 i 번째 수신 높이에서 전기장 E_i 는 높이에 따라 위상 및 세기가 일정한 직접파 E_{dir} 과 높이에 따라 위상 및 세기가 달라지는 반사파 E_{ref} 의 벡터적인 합성이 된다. 위상이 180° 차가 되는 반사파의 쌍들을 안테나의 최소높이와 최대높이에서 반사파의 경로차가 1파장의 되는 두 높이사이에서 합성전계의 평균값을 계산하면 반사파가 없는 자유공간의 전기장을 구하게 된다.

최소높이 h_0 에서 최고높이 h_N 까지 높이에 따른 전계를 측정한다면 데이터는 $N+1$ 개가 되고 높이 h_i 에서의 합성전계 E_r^i 와 반사파의 경로길이 r_i 는 방정식 (13)와 (14)에 따르면 다음과 같다.

$$E_r^i = \sqrt{30G_tP_t} \left(\frac{e^{-jkd}}{d} - \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \right) \quad (13)$$

$$r_i = \sqrt{d^2 + 4h_i^2} \quad (14)$$

i 가 0부터 N 까지 움직인다. 이것은 반사파들의 평균값을 계산하는데 경로 길이 및 안테나 스캔 높이 범위가 다음과 같은 방정식의 범위에 있다는 것을 의미한다.

$$r_0 \leq r_i \leq r_N \quad (15)$$

$$h_0 \leq h_i \leq h_N \quad (16)$$

$r_0 \leq r_i \leq r_N$ 이 되는 범위의 전계강도의 평균은 방정식 (17)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 E_{average} = \langle E_r^i \rangle &= \sum_{i=0}^N \frac{1}{N+1} \sqrt{30 G_t P_t} \left(\frac{e^{-jkd}}{d} - \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \right) \\
 &= \sqrt{30 G_t P_t} \frac{e^{-jkd}}{d} - \sqrt{30 G_t P_t} \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N \frac{e^{-jkr_i}}{r_i}
 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 N 이 충분히 크다면, 즉 $N \rightarrow \infty$ 이면 방정식 (17)는 다음과 같은 적분이 포함된 방정식 (18)으로 근사될 것이다.

$$E_{average} = \sqrt{30 G_t P_t} \frac{e^{-jkd}}{d} - \sqrt{30 G_t P_t} \frac{1}{r_N - r_0} \int_{r_0}^{r_N} \frac{e^{-jkx}}{x} dx \quad (18)$$

위 방정식에서 r_0 는 송수신 안테나의 최소높이가 h_0 일 때 반사파의 경로길이이며 r_N 은 최대높이 h_N 일 때 반사파의 경로길이가 된다. 최대 및 최소 경로길이의 차 $r_N - r_0$ 가 송신 전파의 파장 λ 의 정수배 즉, $r_N - r_0 = m\lambda$ ($m=1, 2, 3, \dots$)일 때 자유공간조건에 최적화 된다. 이러한 조건에서 방정식 (18)의 우변 적분 항은 0에 수렴한다. 즉,

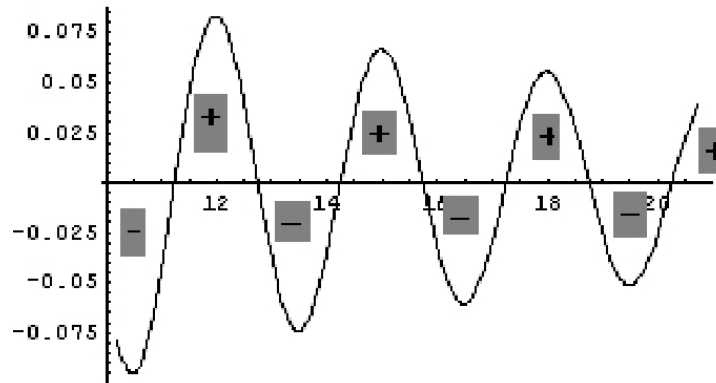
$$\frac{1}{m\lambda} \int_{r_0}^{r_N} \frac{e^{-jkx}}{x} dx \rightarrow 0 \quad (19)$$

이 된다.

그림 9는 주파수가 100MHz이고 반사파의 최대 및 최소의 경로차가

$r_N - r_0 = 7 \times \frac{\lambda}{2}$ 일 때 적분항의 함수 $\frac{e^{-jkx}}{x}$ 의 그래프를 나타낸다. 방정

식 (19)는 기하학적으로 그림 9의 그래프 면적에 해당된다. 면적이 양과 음을 교차하기 때문에 그 값은 0에 가깝게 되고, 경로차가 1파장이 될 때 자유공간 전계를 산출한다고 위에서 논의했지만 그림 9에서 보듯이 경로차가 반파장이 될 때도 충분한 효과를 얻을 수가 있음을 보여준다. 한편, 반사파들을 측정하여 평균을 계산할 때 방정식 (19)에서 m 이 클수록 반사파의 평균 값이 점점 더 작아지기 때문에 방정식 (18)의 반사항은 더욱 0에 수렴하게 된다. 말하자면, HSA 측정시 스캐닝 범위인 최소높이와 최대높이의 차이를 크게 하면 할수록 자유공간 효과는 그만큼 커진다는 것을 시사한다. 스캐닝 높이 범위를 결정하기 위하여 방정식 (14)를 이용한다.



[그림 9] $\frac{e^{-jkx}}{x}$ 그래프 ($r_N - r_o = 7 \times \frac{\lambda}{2}$)

파장이 λ 이고 스캐닝 최소높이가 h_0 인 경우 반사파의 경로차가 파장의 m 배에 위치위치하는 최대 높이 h_N 은 다음 방정식에 의해 결정된다.

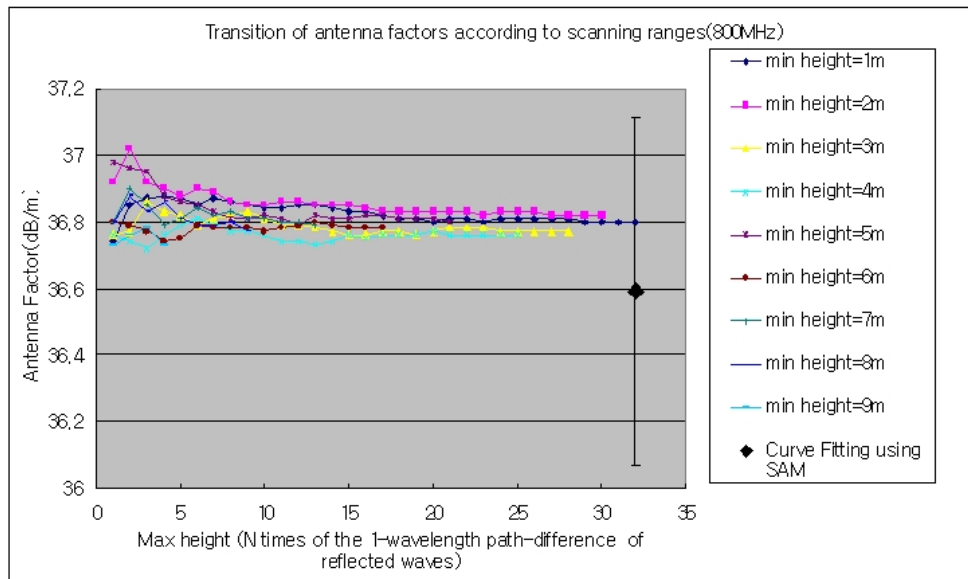
$$\begin{aligned} r_N - r_0 &= \sqrt{d^2 + 4h_N^2} - \sqrt{d^2 + 4h_0^2} = m \times \lambda \\ &= \sqrt{d^2 + 4h_N^2} - \sqrt{d^2 + 4h_0^2} = m \times \frac{300}{f(\text{MHz})} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $f(\text{MHz})$ 는 MHz 단위의 주파수이다. 시험장 접지면으로부터 같은 높이에 위치한 송·수신 안테나의 이격거리를 10m로 하고 최소높이를 1m로 하여 파장별로 측정 스캔 높이를 경로차가 1λ , 2λ , ... $m\lambda$ 인 위치를 계산하여 [표 1]에서 보여준다. [표 1]에서는 30, 40, 50, 70, 100, 200MHz에 대한 것이다.

10m 높이를 한계로 하여 방정식 (18)에 의하여 계산하면 300MHz의 경우는 1파장의 경로차의 스캔 높이 범위는 1m~2.52m이고 12파장의 경로차의 스캔 높이 범위는 1m~9.91m이다. 400MHz는 1파장 1m~2.23m이며 16파장 1m~9.91m, 500MHz는 1파장 1m~2.04m이며 20파장 1m~9.91m, 600MHz는 1파장 1m~1.90m이며 24파장 1m~9.91m, 700MHz는 1파장 1m~1.80m이며 28파장 1m~9.91m, 800MHz는 1파장 1m~1.72m이며 32파장 1m~9.91m, 900MHz는 1파장 1m~1.65m이며 36파장 1m~9.91m, 1000MHz는 1파장 1m~1.60m이며 40파장 1m~9.91m 이다.

[표 1] 반사파 경로차 $r_N - r_o = m\lambda/2$ ($m=1, 2, \dots$)에 해당되는 스캔높이

반사파 경로차	안테나 스캔 시작높이 $h_0=1\text{m}$ 이고 안테나 이격거리 10m일 때 주파수별 경로차가 $m\lambda/2$ 되는 스캔 최대높이 $h_N(\text{m})$ (30MHz-200MHz)					
	30MHz	40MHz	50MHz	70MHz	100MHz	200MHz
0.5λ	5.72	4.86	4.31	3.62	3.03	2.23
1λ	8.77	7.30	6.37	5.24	4.31	3.03
1.5λ	10m초과	10m초과	8.19	6.64	5.39	3.71
2λ			9.91	7.94	6.37	4.31
2.5λ			10m초과	9.18	7.30	4.86
3λ				10m초과	8.19	5.39
3.5λ					9.06	5.89
4λ					9.91	6.37
4.5λ					10m초과	6.84
5λ						7.30
5.5λ						7.75
6λ						8.19
6.5λ						8.63
7λ						9.06
7.5λ						9.49
8λ						9.91
1과장	10m	7.5m	6m	4.3m	3m	1.5m
주) 안테나 마스트는 10m이기 때문에 스캔 최대 높이는 10m임						



[그림 10] 스캔 시작높이 h_0 및 스캔 범위 $h_0 \sim h_N$ ($r_N - r_0 = m\lambda$)에 따른 안테나 인자의 변화 추이 (800MHz)

[그림 10]은 800MHz의 경우 스캔시작 높이 h_0 가 1m, 2m, 3m..., 9m일 때 h_0 가 1m인 경우 스캔최소범위 1파장(1m~1.72m)과 최대범위 32파장(1m~9.91m)에서 32개의 안테나인자의 변화추이([그림 10]에서 파란색 그래프)와 h_0 가 2m인 경우 스캔최소범위 1파장(2m~2.46m)과 최대범위 30파장(2m~9.80m)에서 30개의 안테나인자의 변화추이([그림 10]에서 분홍색 그래프) 등등을 표시하였다. 스캐닝범위 즉 측정높이 범위가 커지면 커질수록 어떤 특정한 값에 수렴하는 성향이 있는데 그것이 자유공간 안테나 인자가 된다. [그림 10]에서 왼쪽 가운데의 큰 점은 표준안테나를 이용하는 Curve Fitting method에 의하여 측정한 자유공간 안테나 인자이고 막대 그래프는 Curve Fitting method의 측정불확도 범위를 표시하는 것으로 0.5dB 이다.

이와 같이 HSA는 높이에 따라 측정된 값을 평균으로 하여 자유공간 안테나 인자를 산출하게 된다. dB 단위로 표시된 3-안테나법의 안테나 인자 산출 방정식 (4), (5), (6) 및 (7)을 고려해보자.

$$\begin{aligned}
 F_1(h_1) &= \frac{1}{2} [L_{12} - L_{23} + L_{31} + 20\log f_{MHz} + C_{12} - C_{23} + C_{31} - 32] \\
 F_2(h_2) &= \frac{1}{2} [L_{23} - L_{31} + L_{12} + 20\log f_{MHz} + C_{23} - C_{31} + C_{12} - 32] \\
 F_3(h_3) &= \frac{1}{2} [L_{31} - L_{12} + L_{23} + 20\log f_{MHz} + C_{31} - C_{12} + C_{23} - 32]
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$C_{lm} = 20\log \left| \frac{e^{-jkR_{lm}}}{R_{lm}} - \frac{e^{-jkr_{lm}}}{r_{lm}} \right| \tag{5}$$

$$R_{lm} = \sqrt{D^2 + (h_l - h_m)^2} \tag{6}$$

$$r_{lm} = \sqrt{D^2 + (h_l + h_m)^2} \tag{7}$$

HSA를 적용하는 경우, 송신 및 수신 안테나 사이의 거리 d 가 항상 일정하고 높이 h_i 도 항상 같기 때문에 방정식 (5), (6) 및 (7)은 각각 다음과 같다.

$$C_{12}^i = C_{23}^i = C_{31}^i \equiv C_i = 20\log \left| \frac{e^{-jkd}}{d} - \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \right| \tag{5-1}$$

$$R_{12}^i = R_{23}^i = R_{31}^i = d \tag{6-1}$$

$$r_{12}^i = r_{23}^i = r_{31}^i \equiv r_i = \sqrt{d^2 + 4h_i^2} \tag{7-1}$$

여기서 첨자 i 는 i 번 째 높이를 의미한다.

방정식 (5-1)은 직접파와 반사파를 표시하는 전개방정식 (13)과 동일하다. 그러므로 이절에서 논의한 HSA의 높이에 따른 평균을 계산하게 되면 (5-1)

의 간섭항인 $\frac{e^{-jkr_i}}{r_i}$ 는 0로 수렴하게 되어 (5-1)은 다음과 같이 간단하게 표시할 수 있다.

$$C_{average} \equiv \langle C_i \rangle = -20\log d \tag{19}$$

그러므로 3-안테나 HSA 방법의 자유공간 안테나 산출 공식은 다음의 방정식 (20)이 된다.

$$\begin{aligned}
F_1(freespace) &= \frac{1}{2} [L_{12} - L_{23} + L_{31} + 20\log f_{MHz} - 20\log d - 32] \\
F_2(freespace) &= \frac{1}{2} [L_{23} - L_{31} + L_{12} + 20\log f_{MHz} - 20\log d - 32] \\
F_3(freespace) &= \frac{1}{2} [L_{31} - L_{12} + L_{23} + 20\log f_{MHz} - 20\log d - 32]
\end{aligned} \tag{20}$$

여기서 1, 2, 3은 각각의 안테나를 의미하며, L_{12} , L_{23} , L_{31} 은 안테나 쌍 (1, 2), (2, 3), (3, 1)에 대하여 높이에 따라 감쇠량 측정값의 평균을 취한 자유공간 안테나 삽입손실이 된다.

제 3 절 NICT : 표준안테나의 Curve Fitting Method

일본의 정보통신연구기구(NICT)는 기본적으로 표준안테나법을 사용하고 있다. 표준안테나법에 의하여 측정된 안테나 인자는 시험장 접지면으로부터 높이 h 에 의존하게 된다. 국제적으로 안테나의 실효길이 L_{eff} 측정하고 안테나의 유기되는 개방 전압 V_{rf} 를 RF-DC관계에 의하여 DC 전압 V_{dc} 를 측정함으로써 알아내어 안테나에 입사하는 전기장 E 를 결정한 후 같은 전기장의 위치에 교정대상안테나(AUC)로 치환하고 그에 유기되는 전압을 측정하여 안테나인자 정의 식 $F(h)=E/V$ 관계에 의하여 안테나 인자를 산출하는 표준안테나와 전송 특성을 정확하게 알고 있는 하이브리드를 발문으로 모멘트법에 의해 이론적으로 안테나 인자를 계산할 수 있는 표준안테나가 쓰인다. NICT는 후자의 계산가능 표준다이폴 안테나를 사용하는데 그것은 그림 11에서 보여준다.

원칙적으로 NICT는 계산가능 표준다이폴로 치환법에 의하여 방정식 (10)에 따라 높이 의존 안테나 인자를 측정한다.

$$F_{AUC}(h) = F_{STA}(h) + \{ V_{STA}(h) - V_{AUC}(h) \} \quad (10)$$

높이에 의존하는 안테나 인자를 측정하는 절차는 다음과 같다.



그림 11. NICT의 계산가능 표준다이폴 : 저주파(좌), 중주파(중) 고주파(우)

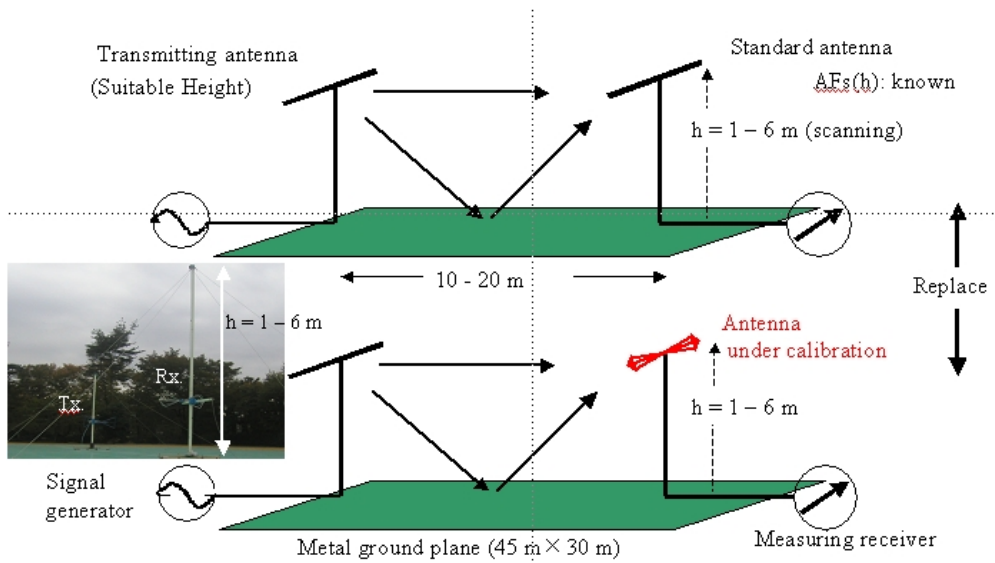


그림 12. NICT의 표준안테나법 측정구성

- 그림 (12)과 같은 구성에서 높이에 따라 안테나 인자값을 알고 있는 표준 다이폴 안테나를 수신측에 2m 또는 3m 등의 특정높이에 설치하고 30MHz-1GHz의 대역을 갖는 광대역 송신안테나를 송신측에 설치한다. 송신 안테나를 1m - 6m(보통은 1m - 4m) 높이 범위를 스캔하면서 수신측의 수신기(또는 네트워크분석기)의 신호레벨이 최대가 되는 지점을 찾는다. 최대가 되는 지점에 송신안테나를 고정하고 표준안테나 측의 수신기가 측정하는 표준 수신전압 V_{STA} 를 기록한다.
- 표준안테나 측정시 출력되었던 신호발생기의 주파수 및 출력을 그대로 유지하면서 송신안테나의 똑같은 위치에 고정해 놓고 표준안테나를 제거한 후 표준안테나가 설치된 같은 위치에 교정대상안테나를 놓는다. 교정대상 안테나의 출력 전압 V_{AUC} 를 측정하여 기록한다.
- 표준안테나법의 안테나인자 산출 공식인 방정식 (10)으로 교정대상안테나의 높이 의존 안테나 인자 $F_{AUC}(h)$ 를 계산한다.

NICT 안테나 교정의 안테나 사이의 이격거리와 송·수신 안테나의 스캔 높이 등 세부내용은 표 2에서 보여준다.

표 2. NICT 표준안테나법 교정의 세부내용

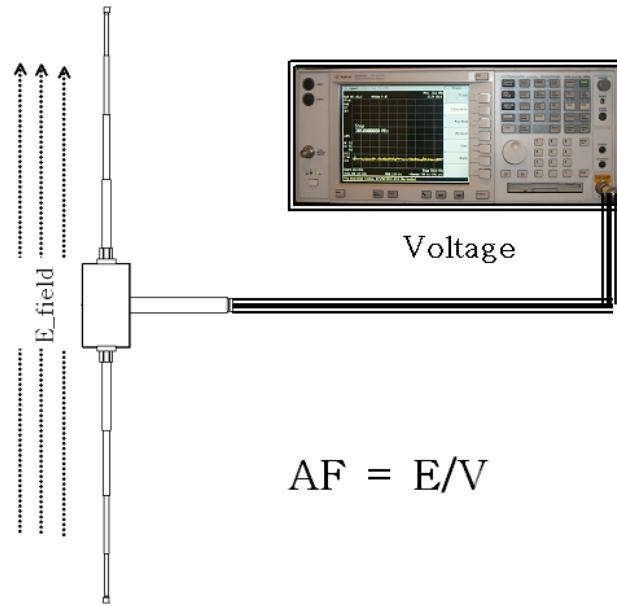
주파수(MHz)	안테나 스캔높이(m)		송신안테나 높이(m)	안테나 이격거리(m)
	시작	끝		
30	1	6	4	20
40	1	6	4	15
50	1	6	4	12
70	1	6	2	10
100	3	6	2	10
200	4.5	6	1	10
300	3	4	1	14
400-1000	1	4	1	10

표준안테나법은 기본적으로 높이의존 안테나 인자를 측정할 수 있기 때문에 자유공간안테나 인자를 산출하기 위해서는 부가적인 특별한 기술이 필요하게 된다. 일본의 NICT도 표준안테나법을 이용하여 자유공간안테나 인자 산출방법인 Curve Fitting Method를 사용하고 있다. 그러나 주파수 대역별 방법의 차이가 있다. 30MHz-300MHz 대역은 엄격하게 Curve Fitting Method를 사용하는 반면에 400MHz-300MHz 2m 높이의 안테나 인자를 측정하여 근사법에 의하여 자유공간안테나 인자를 산출한다.

여기서는 Curve Fitting Method를 중심으로 NICT의 자유공간안테나 인자 산출법을 설명한다.일반적으로 안테나 임피던스는 시험장 접지평면으로부터 높이 h에 따라 변화한다. 마찬가지로 안테나 인자도 높이의 함수로 주어진다.

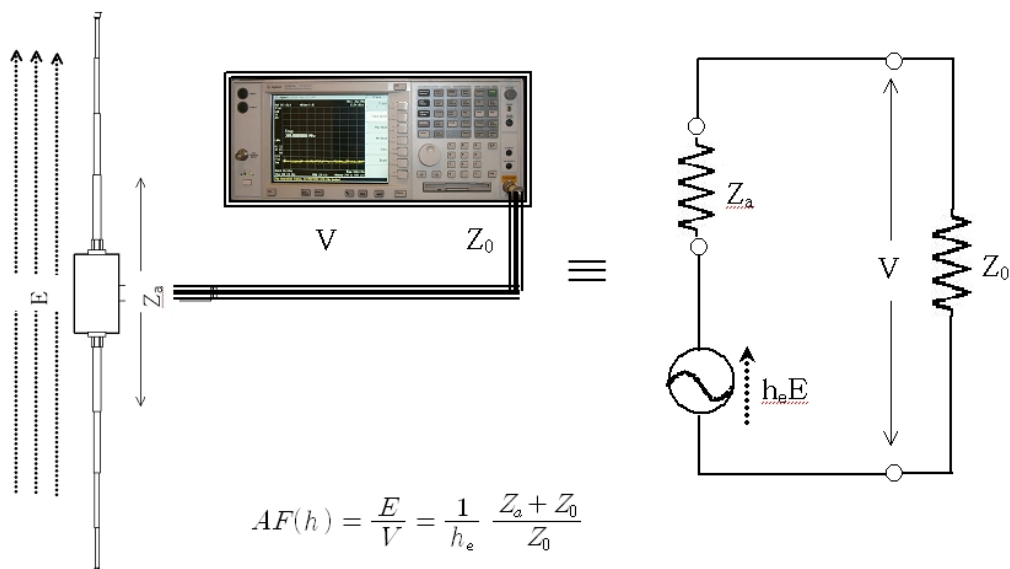
[그림 12]는 안테나에 유기되는 전기장을 수신기가 읽는 전압으로 측정하는데 안테나 인자 F는 안테나에 입사되는 전기장 E와 안테나에 유기되는 전압 V의 비로 다음과 같이 정의되는 안테나의 주요 파라미터이다.

$$F = \frac{E}{V} \quad (21)$$



[그림 13] 안테나인자의 정의

[그림 12]의 구성에서 안테나의 입력 임피던스가 Z_a 및 그 실효길이가 h_e 이고 수신기의 입력 임피던스를 Z_0 라고 하면 전압원이 $h_e E$ 이고 부하 Z_a 및 Z_0 가 직렬로 연결되어 있는 [그림 13]과 같은 등가회로로 간주할 수가 있다.



[그림 14] 등가회로

[그림 13]의 등가회로와 안테나 인자 정의 식 (21)를 이용하면 높이의존 안테나 인자는 임피던스와 안테나 실효길이로 다음과 같이 표현된다.

$$F(h) = \frac{E}{V} = \frac{1}{h_e} \frac{Z_a + Z_0}{Z_0} \quad (21)$$

여기서 안테나의 입력 임피던스는 시험장 접지 평면과 상호 결합 때문에 높이에 의존하는 함수이다. 그러므로 안테나의 입력임피던스 Z_a 는 다음과 같은 방정식으로 추정할 수가 있다.

$$Z_a(h) = Z(\infty) + \alpha Z_r(h) \quad (22)$$

윗 식에서 $Z(\infty)$ 자유공간 안테나 임피던스이고 α 는 반사계수 이며 $Z_r(h)$ 는 시험장 접지면의 이미지 안테나와 상호임피던스 항이다.

$Z_r(h)$ 는 근사적으로 다음과 같은 식에 의하여 표현된다고 알려져 있다.

$$Z_r(h) \sim h_e^2 \frac{e^{-jk \cdot 2h}}{2h} \quad (23)$$

(23)식에 의하면 $Z_r(h)$ 는 높이에 따라 주기성을 갖으며 높이가 증가함에 따라 어떤 값에 수렴하는 특성이 있다. 그러므로 방정식 (21), (22) 및 (23)에 의하여 안테나 인자는 다음과 같은 수식으로 모델화 할 수 있다.

$$F(h; b_1, \Delta\theta) = F(\infty) + A \frac{\cos(k \cdot 2h + \Delta\theta)}{\lambda b_1 + h} \quad (23)$$

여기서 $F(\infty)$ 는 미지수로서 이 방법에 의하여 최종적으로 계산할 자유공간 안테나인자이고, A , b_1 및 $\Delta\theta$ 도 또한 어떤 미지수이다. 이러한 미지수들은 표준안테나법으로 높이에 따라 측정하여 방정식 (10)에 의해 계산한 높이 테나인자의 데이터들을 이용하여 최소자승법(Least Square method)에 따라 높이에 대한 그래프를 그리고 그것으로부터 자유공간 안테나 인자를 산출하게 된다.

제 5 장 양 기관의 상호교정 결과 비교

제 1 절 서론

전파연구소와 NICT의 30MHz - 1000MHz 대역 EMI 측정용 안테나 교정 야외 시험장의 규격과 제질 측정용 장비는 [표 3]과 같다. 또한 양 기관의 야외 시험장은 [그림 13]에서 보여준다. 비교 주파수는 30, 40, 50, 70, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000MHz등 14과장 이다.

[표 3] 전파연구소와 NICT 교정야외시험장 비교

		RRA	NICT
Ground Plane	크기	45m×30m	45m×30m
	금속면	Steel Sheet+ 12mm mesh	Steel Sheet
마스트 높이		10m	6m
측정 장비		Network Analyzer	Network Analyzer



[그림 15] 전파연구소(좌) 및 NICT(우)의 안테나교정 야외시험장

제 2 절 다이폴 안테나

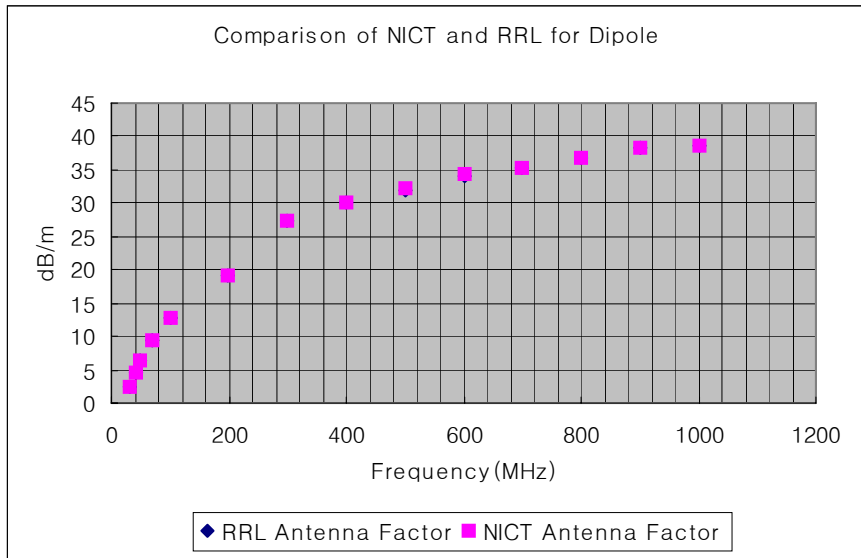
비교 측정 교정대상 다이폴 안테나는 NICT에서 준비하고 제공한 것으로서 그 제원은 [표 4]에서 보여준다. [표 5]는 각 기관에서 측정한 결과를 나타낸다. [그림 14]는 비교결과를 그래프로 나타냈고 [그림 15]는 그 차를 표로 표시하였다.

[표 4] 비교용 다이폴안테나의 제원

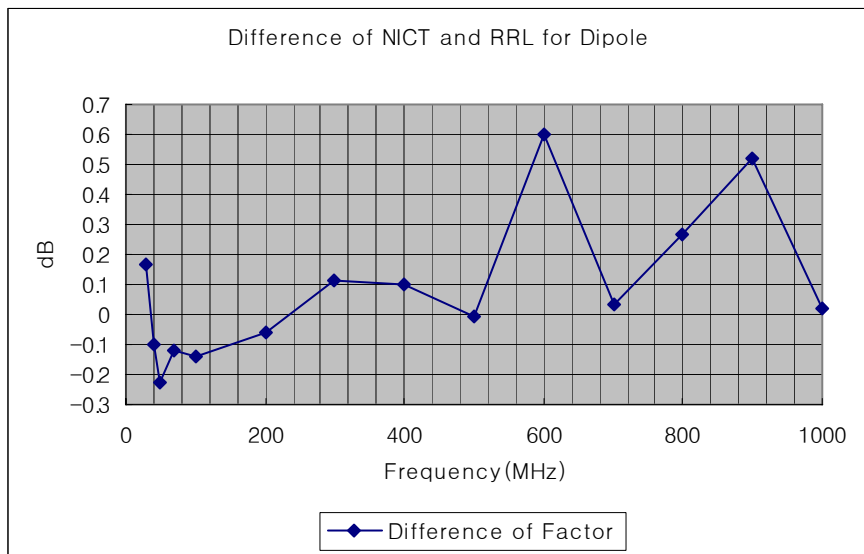
제조사	형식	Model	주파수영역
Anritsu	dipole	MP 652B	30-200MHz
Schwarzbeck	dipole	UHALP793	300-1000MHz

[표 5] 다이폴안테나 교정결과 비교

Frequency (MHz)	NICT의 결과(dB/m)	RRA의 결과(dB/m)	Difference (dB)
30	2.27	2.44	-0.17
40	4.81	4.71	0.1
50	6.72	6.49	0.23
70	9.56	9.44	0.12
100	12.88	12.57	0.31
200	19.08	19.02	0.06
300	27.31	27.42	-0.11
400	29.89	29.99	-0.1
500	32.01	32.01	0
600	33.55	34.15	-0.6
700	35.22	35.25	-0.03
800	36.59	36.86	-0.27
900	37.90	38.42	-0.52
1000	38.57	38.59	-0.02



[그림 16] 다이폴 안테나 교정결과 비교 그래프



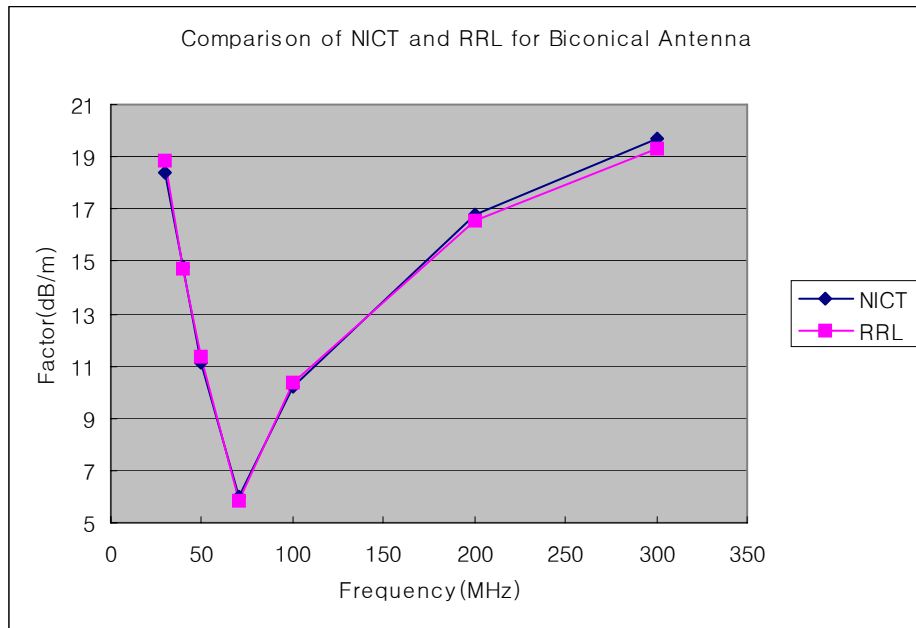
[그림 17] 다이폴 안테나 교정결과 양 기관의 차이

제 3 절 바이코니칼 안테나

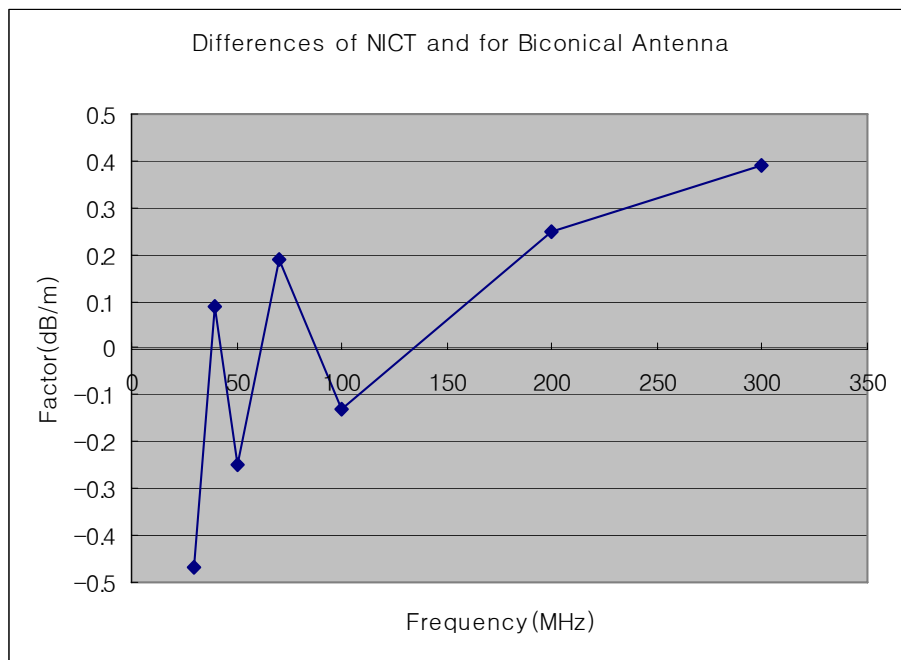
비교 측정 교정대상 바이코니칼 안테나는 전파연구소에서 준비하고 제공하였으며 주파수 영역은 30MHz-300MHz이고 Schwarsbeck BBA9106 이다. [표 6]은 각 기관에서 측정한 결과 및 차이이며 [그림 17] 및 [그림 18]은 측정결과 및 차이를 그래프로 보여준다.

[표 6] 바이코니칼안테나 교정결과 비교

안테나	주파수(MHz)	NICT의 측정결과(dB/m)	RRA의 측정결과(dB/m)	차이 (dB)
바이코니칼	30	18.4	18.87	-0.47
	40	14.8	14.71	0.09
	50	11.1	11.35	-0.25
	70	6.0	5.81	0.19
	100	10.2	10.33	-0.13
	200	16.8	16.55	0.25
	300	19.7	19.31	0.39



[그림 18] 바이코니칼 안테나 교정결과 비교 그래프



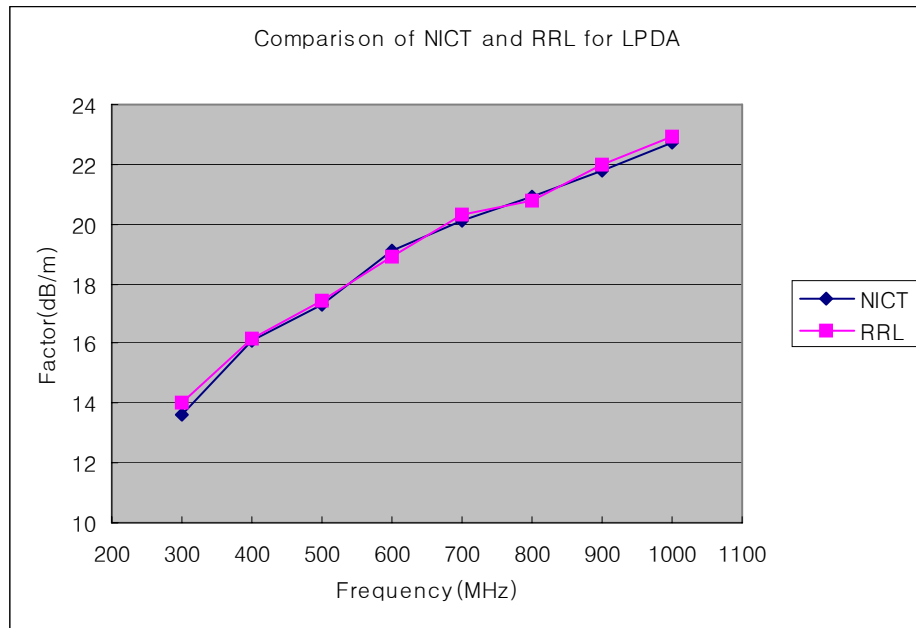
[그림 19] 바이코니칼 안테나 교정결과 양 기관의 차이

제 4 절 대수주기 안테나

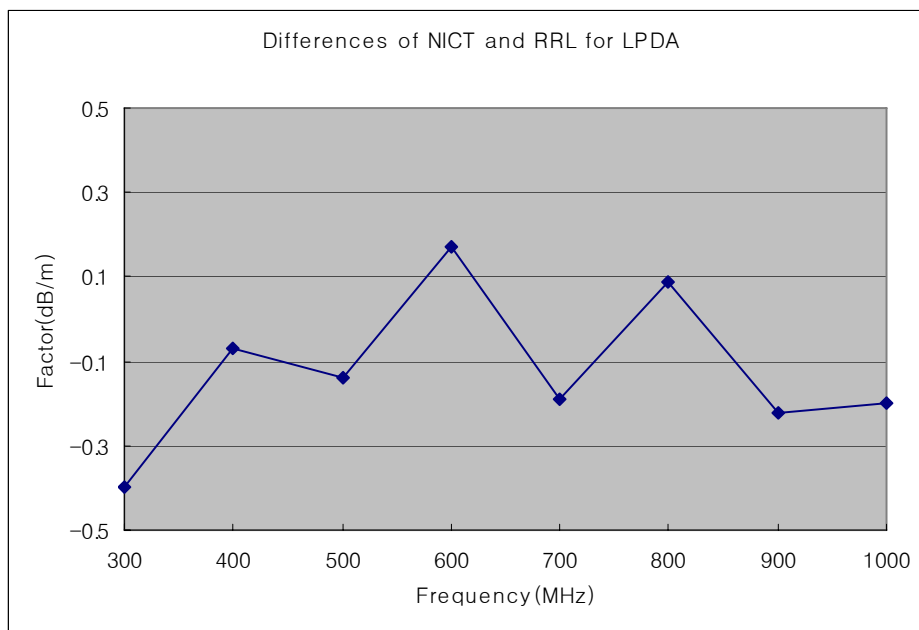
비교 측정 교정대상 대수주기 안테나는 전파연구소에서 준비하고 제공하였으며 주파수 영역은 300MHz-1000MHz이고 Schwarzsbeck UHALP9109 이다. [표 7]은 각 기관에서 측정한 결과 및 차이이며 [그림 19] 및 [그림 20]은 측정결과 및 차이를 그래프로 보여준다.

[표 7] 대수주기 안테나 교정결과 비교

안테나	주파수(MHz)	NICT의 측정결과(dB/m)	RRA의 측정결과(dB/m)	차이 (dB)
대수주기 안테나	300	13.6	14.00	-0.4
	400	16.1	16.17	-0.07
	500	17.3	17.44	-0.14
	600	19.1	18.93	0.17
	700	20.1	20.29	-0.19
	800	20.9	20.81	0.09
	900	21.8	22.02	-0.02
	1000	22.7	22.90	-0.2



[그림 20] 대수주기 안테나 교정결과 비교 그래프



[그림 21] 대수주기 안테나 교정결과 양 기관의 차이

제 5 절 측정불확도

CISPR/A/644/CD 문서에 제시한 안테나교정의 측정불확도 추정의 예시를 근간으로 양 기관 각자의 교정방법에 대한 측정불확도를 산출하였다. 주요한 측정불확도 요인은 네트워크분석기, 부정합, 온도효과, 마스트 및 케이블 반사, 안테나 위치, 시험장의 주위잡음 등을 고려하였다. 예를 들어 전파 연구소의 방법 HSA에 의하여 다이폴안테나 교정에 대한 불확도 총괄표는 [표 8]에서 보여준다. [표 9]는 양 기관이 산출한 측정불확도 비교결과 이다.

[표 8] HSA에 의한 다이폴 안테나 교정의 불확도 총괄표

Uncertainty sources and influence quantities	Uncertainty value, \pm dB	Probability distribution	Divisor	Standard uncertainty, \pm dB
Site insertion loss measurement ΔL				
Network analyzer residual error	0.166	rectangular	$\sqrt{3}$	0.096
Combined mismatch	0.049	normal	1	0.049
Temperature effect on cable	0.0974	rectangular	$\sqrt{3}$	0.056
Repeatability	0.180	normal	1	0.180
Combined uncertainty, ΔL				0.22
Evaluation of the induced voltage, ΔC				
Antenna positioning error	0.107	rectangular	$\sqrt{3}$	0.062
Directional alignment error	0	rectangular	$\sqrt{3}$	0
Error in assumed phase center	0	rectangular	$\sqrt{3}$	0
Mutual coupling with ground image antenna	0.0044	normal	1	0.0044
Site effect	0.1	rectangular	$\sqrt{3}$	0.058
Non-uniform H-plane pattern	0.2		$\sqrt{3}$	0.115
Reflection from masts	0.07	normal	1	0.07
Ambient RF interference	0.1	rectangular	$\sqrt{3}$	0.058
Combined uncertainty, ΔC				0.17
Evaluation of the induced voltage, ΔF				
Frequency	0	rectangular	$\sqrt{3}$	0
All Combined uncertainty	0.28			
Expanded uncertainty (k=2)	0.56			

[표 9] 안테나별 양기관의 측정불확도 비교

안테나	NICT	RRA	주파수(MHz)
다이폴	0.52 dB	0.56 dB	30-1000
바이코니칼	0.4 dB	0.58 dB	30-300
대수주기	0.7 dB	0.65 dB	300-1000

제 6 장 결론 및 향후 계획

30MHz에서 1000MHz 대역의 야외시험장에서의 안테나 교정방법은 국제적으로 표준방법이 확립되어 있지 않아 그 유효성은 국가간 또는 안테나 교정기관간에 상호비교를 통하여 안테나 인자 측정값의 일치 여부와 측정불확도의 관계로 통계적인 기법을 이용하여 판단하고 있다. 그러한 국제적인 배경에 따라 전파연구소와 일본의 정보통신연구기구(NICT)는 안테나 교정 상호 비교 측정 공동연구를 2004년부터 본격적으로 수행하였다.

자유공간안테나 인자를 측정하는 전파연구소의 3-안테나 Height Scanning Average와 NICT의 표준안테나법을 이용한 Curve Fitting Method로 측정한 EMI용 다이폴, 바이코니칼 및 대수주기 안테나의 교정 결과를 비교하였다. 다이폴 안테나의 경우 600MHz에서 0.6dB 및 900MHz에서 0.52dB를 제외하고는 0.31dB이내의 좋은 결과를 얻었다. 600MHz에서 0.6dB는 양 기관의 측정불확도(전파연구소 0.56dB 및 NICT 0.52dB)를 고려하면 훌륭한 일치라고 판단해도 좋은 결과이다. 광대역 안테나로서 바이코니칼 안테나의 경우 30MHz에서 0.47dB, 300MHz에서 0.39dB의 차이를 제외하고 비교 측정 주파수 모두 0.25dB내로 좋은 일치를 보였으며, 로그주기 안테나의 경우 300MHz에서 0.4dB를 제외하고 모든 주파수에서 0.19dB 이내의 훌륭한 일치를 보였다.

2008년도까지의 양 기관의 공동연구 결과를 근간으로 안테나교정 기술을 미국 및 EU가 양분하여 선도하는 국제적 흐름에 대하여 아시아권의 안테나 교정기술 향상과 협력을 도모하고자 공동연구를 중국, 대만, 태국 등 아시아권으로 확대하려고 일본 NICT 측과 추진하였지만, 그 국가들의 안테나 교정기관의 정확한 파악의 어려움과 교정기관과의 입장 차이 때문에 2008년도에 공동연구 추진의 어려움이 있었다. 이에 일본 NICT와 범아시아권 안테나 교정 공동연구를 향후에 분위기가 무르익으면 추진하기로 하고 양 기관의 안테나 측정관련 연구 협력은 지속하기로 하였으며 양기관의 안테나 교정 측정불확도를 줄이는데 협력하기로 합의하였다.

참 고 문 헌

- [1] Park Jung-Kuy, Jeong Dong-Chan, Yoon Hoon, Ryoo Jaeman, Makoto Sakasai, Akira Suzuki, Katsumi Fujii and Yokio Yamanaka "Mutual Comparison on Calibration of Free-space Antenna Factor for EMI Antenna in 30MHz - 1GHz" 2008 Asia -Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium, pp 890-893, 19-22 May 2008
- [2] Jung-Kuy Park, Dong-Chan Jeong, Ginam Cha, and Hong-Nam Go, "Height Scanning Averaging method for Free-Space Antenna Factors of EMI Antenna" ISAP2005, August 3-5, 2005
- [3] Akira Sugiura, et al, "EMI Antenna Calibration with Averaging Height -Dependent Antenna Factors" ICEMC Bangkok, pp.379-382.
- [4] Shinya Kaketa, Katsumi Fujii, Akira Sugira "A Novel Method for EMI Antenna Calibration on a Meta Ground Plane", 2003 IEEE Int'l Symposium on EMC, Istanbul May 2003.
- [5] IEC CISPR/A/644/CD Project number CISPR 16-1-5 Amd.1 Ed1., "Antenna Calibration"
- [6] 박정규, 윤훈, 유재만, 이종훈 "EMI 안테나의 높이에 따른 안테나인장의 특성분석", 2008년도 마이크로파 및 전파 학술대회, 제31권 제2호, pp.152, 2008년 9월 25일 - 26일
- [7] 박정규, 정동찬, 차기남, 고흥남, "30 MHz에서 1 GHz 대역 EMI용 안테나의 준자유 공간 안테나팩터 산출에 관한 연구" 2004년도 한국전자과학회 종합학술발표회 Vol. 14, No.1, 2004.11.5
- [8] 박정규, 정동찬, 조진영, 유석원, "EMI용 다이폴안테나 교정의 측정불확도 산출", 2006년도 한국전자과학회 종합학술발표회 Vol. 16, No.1, 2006.11.3
- [9] 박정규, 정동찬, 윤훈, 유재만, "안테나 교정방법 및 절차 비교연구", 2007년도 전파연구소 연구보고서(전파환경 보호기술) RRL2007-02, pp.595-640, 2008년 5월
- [10] ETSI TR 100 028-1 v1.4.1 (2001.12) "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum matter; uncertainty in the measurement of mobile radio equipment characteristics"

- [11] ETSI TR 100 028-2 v1.4.1 (2001.12) "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum matter; uncertainty in the measurement of mobile radio equipment characteristics"
- [12] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory : Analysis and Design" John Wiley & Sons, 1982

안테나 교정 국제공동 연구



140-848 서울시 용산구 원효로 군자감길 46

발 행 일 : 2009. 2

발 행 인 : 김 춘 희

발 행 처 : 방송통신위원회 전파연구소

전 화 : 02) 710-6452

인 쇄 : 한국장애인이워크협회

Tel. 02) 2272-0307

ISBN-978-89-93720-12-9

비매품

주 의

1. 이 연구보고서는 전파연구소에서 수행한 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 전파연구소 연구결과임을 밝혀야 한다.