

주파수 영역에서 봉상전극의 접지임피던스 특성

(Grounding Impedance Characteristics of Ground Rods in Frequency Domain)

이형수* · 심건보** · 김경철** · 최종기*** · 박상만***

* 산업안전공단, ** 홍익대학교 ***전력연구원

(Hyung-Soo Lee · Keon-Bo Shim · Kyung-Chul Kim · Jong-Kee Choi · Sang-Man Park)

Abstract

Although DC ground resistance is a good index of grounding performance for grounding electrodes, it does not reflect the grounding performance during transient state. Besides, impulse ground impedance, which is defined by a ratio of the peak value of transient ground potential rise to the peak value of impulse current, cannot be an absolute index due to its dependence on impulse current shape. In this paper, ground impedance of various rod-type ground electrodes has been measured in frequency domain ranging from 1 Hz to hundreds of kHz. Equivalent circuit models of the ground rod have been identified from the measured values of ground impedance in frequency domain.

1. 서론

전기에너지를 사용하는 전력설비에서 고장은 필연적으로 일어나는 것이며, 특히 지락고장이 발생하면 고장전류가 대지로 흘러가게 되어 전기설비의 구내 및 주변에 전위차가 나타나게 되어 인체의 안전이나 설비의 절연에 위험을 초래하게 된다. 더욱이 최근에 전력사용의 수요가 급속하게 성장함에 따라 전력설비도 증대되어 전력설비의 고장용량도 증가하고 있으므로 상대적으로 고장전류에 의한 대지전위의 상승이 커져서 인체의 안전이나 설비의 절연 등에 미치는 위험도 증대되고 있는 실정이다. 이러한 위험에 대비하기 위한 것이 전기설비의 접지시스템인데, 일반적으로 상용 주파수 영역에서는 낮은 접지저항의 크기만으로도 충분히 감전보호용 접지의 기능을 달성한 것으로 평가할 수 있다. 그러나 낙뢰나 서지 전류와 같은 고주파 영역에서는 접지전극의 저항만이 아니라 접지도체의 인덕턴스와 대지정전용량 등에 의한 영향까지 고려하여야 한다. 낙뢰나 서지 등에 의한 고주파 영역에서 접지전극의 응답 특성은 상용 주파수를 포함하는 저주파 영역에서의 응답 특성이 매우 다르다는 것은 이미 잘 알려져 있는 사실이다[1],[2]. 따라서 접지시스템에 대한 접지성능의 정확한 평가와 설계를 위해서는 상용주파수 영역에서의 접지성능은 물론, 고주파 영역에서의 접지성능에 대해서도 유입되는 전류에 의한 전위의 상승을 억제하고, 고장전류

의 크기를 제어하는 등의 적절한 대책을 세워야 한다. 본 연구에서는 배전선로의 접지전극으로 많이 사용되고 있는 봉상전극인 동피복 접지동봉과 심타용 아연도금 강봉에 대하여 접지임피던스를 1[Hz]~수백[kHz]의 주파수 영역에서 측정하였으며, 측정된 접지임피던스 값으로부터 최적화법(pattern search method) [3]으로 봉상 접지전극의 등가회로 모델과 ARMA 모델링 기법[4]을 이용하여 봉상 접지전극의 전달함수를 산출하여 봉상 접지전극에 대한 주파수 영역에서의 임피던스 특성을 분석하였다.

2. 접지임피던스의 측정

2.1. 봉상 접지전극과 설치

본 연구에서는 주파수 영역에서 봉상 접지전극의 접지임피던스 특성을 측정하기 위하여 사진 1과 같은 봉상 접지전극을 사용하였으며, 사진 1에서 A는 동피복 접지동봉을, B는 심타용 아연도금 강봉을 나타낸다. 또한, 각 접지전극을 그림 1과 같은 배열로 지표면으로부터 75[cm]의 깊이에 매설하였다. 그림 1에서 1s1p는 봉상 접지전극이 1직1병으로, 2s1p는 2직1병, 1s2p는 1직2병의 배열로 매설되었다는 것을 의미한다.

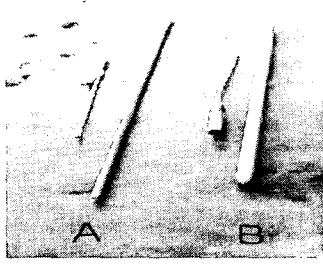


사진 1. 봉상 접지전극
Photo 1. Ground Rods

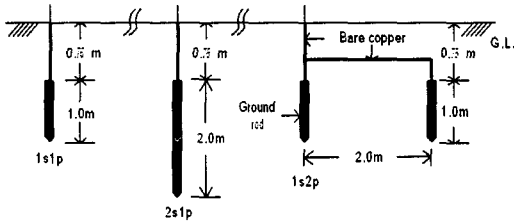


그림 1. 봉상 접지전극의 배열
Fig. 1. Arrangement of Rods

2.2. 접지임피던스 측정회로

그림 2는 봉상 접지전극의 임피던스를 측정하기 위한 측정시스템의 구성을 보인 것이고, 그림 3은 접지 임피던스를 측정하기 위한 전류와 전위전극의 배열 위치를 보인 것이다. 이러한 측정회로에서 함수발생기로부터 생성된 임의의 주파수 전류를 접지전극에 주입시키면서 접지전극의 전위와 전류 파형을 측정하여 휴대용 컴퓨터에 저장하고, 푸리에 변환(Fourier Transform) 기법을 이용하여 접지 임피던스를 계산하면 된다.

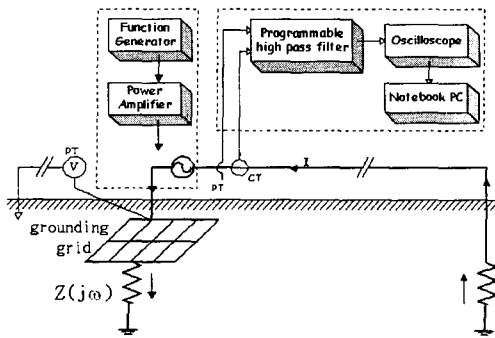


그림 2. 접지임피던스 측정시스템
Fig. 2. Measurement System of Impedance

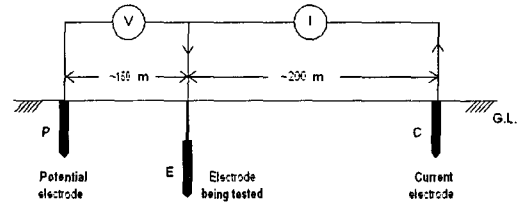


그림 3. 전류 및 전위 전극의 배열
Fig. 3. Probe Position for Measurement

2.3. 측정결과

측정된 전류와 전압 파형으로부터 식 (1)의 계산식으로 각각의 주파수에서의 접지 임피던스를 구한다.

$$Z_{mea}(f) = \frac{V_{mea}(f)}{I_{mea}(f)} = |Z_{mea}(f)| \angle \theta_{mea}(f) \quad (1)$$

그림 4와 표 1은 주파수 영역에서 측정된 접지동봉(A-1s1p)에 대한 접지임피던스의 결과를 예로 보인 것이다. 다른 접지전극에 대한 결과는 부록 I에 수록한다.

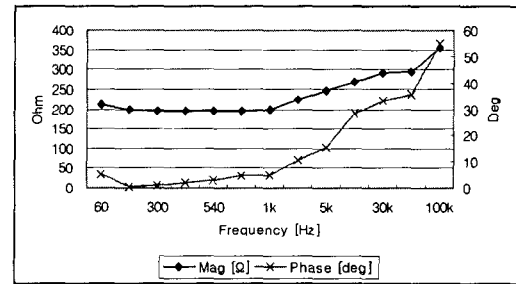


그림 4. 접지임피던스 측정결과(A-1s1p)
Fig. 4. Ground Impedance(A-1s1p)

표 1. 접지임피던스 측정 결과

Table 1. Results of Measurement

Frequency [Hz]	Z [Ω]	Phase [deg]
60	233.81	-1.2
180	224.07	-0.5
300	220.05	-0.9
420	217.04	-0.3
540	216.30	1.3
900	215.54	3.6
1k	216.92	3.7
3k	247.70	9.9
5k	268.57	10.6
10k	293.50	14.5
30k	317.65	22.7
50k	328.97	27.7
100k	383.78	67.1

3. 접지임피던스의 회로 모델

봉상 접지전극은 매설된 장소의 토양의 특성, 대지 저항률, 온도, 습도 및 전지전극의 형상이나 접속 상태 등의 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하므로 접지 임피던스 모델링을 수립하는 것은 쉬운 문제가 아니다.

본 연구에서는 고주파 영역에서 접지전극의 해석을 위하여 사용되는 저항 R, 인덕턴스 L 및 커패시턴스 C로 구성되는 그림 5와 같은 회로의 접지 임피던스 모델 [2]에 대하여 측정된 값으로부터 식 (2)로 나타내는 접지 임피던스 식의 파라미터인 R, L 및 C를 최적화 기법인 pattern search 법(PSM)을 이용하여 구하였다.

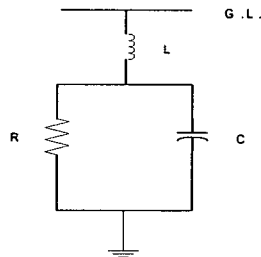


그림 5. 접지 임피던스 모델
Fig. 5. Impedance Model

$$Z_{sim} = j\omega L + \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad [Q] \quad (2)$$

측정된 전류와 전압 파형으로부터 계산된 접지 임피던스 Z_{mea} 값과 계산된 접지임피던스 Z_{sim} 값의 차이가 최소화 될 때까지 파라미터인 R, L 및 C의 값을 변화시키면서 반복하여 구하면 된다. 그림 6은 이 과정을 보인 것이다.

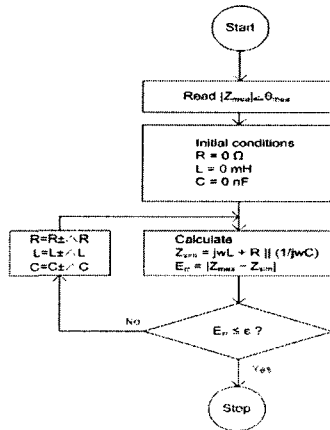
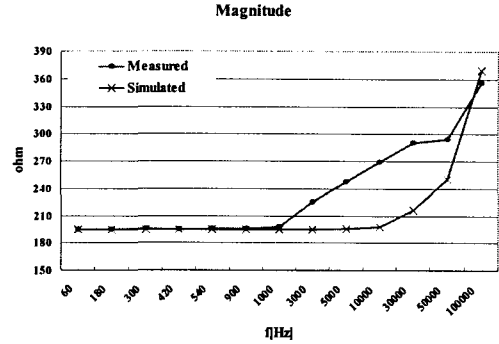
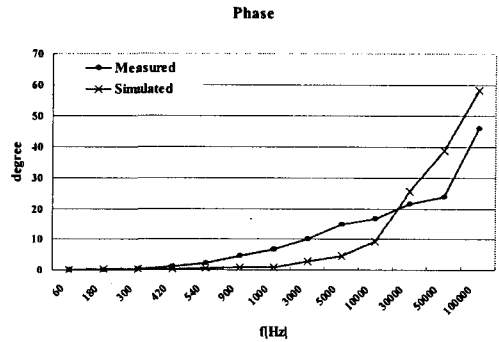


그림 6. PSM 계산 순서도
Fig. 6. Flowchart of PSM

그림 7은 PSM 방법으로 구한 저항 R, 인덕턴스 L 및 커패시턴스 C를 식 (2)에 적용하여 구한 주파수별 접지임피던스를 측정된 값과 비교한 예를 접지동봉 (A-1slp)에 대하여 보인 것이며, 표 2는 회로모델에서 구한 임피던스의 파라미터 값을 보였다.(부록 II참조)



(a) magnitude[Q]



(b) Phase(degree)

그림 7. 접지 임피던스의 비교
Fig. 7. Comparison of Ground Impedance

표 2. 계산된 파라미터

Table 2. Calculated Parameter

접지전극	R[Q]	L[mH]	C[nF]
A-1slp	195.00	0.40	0.00
B-1slp	215.00	0.57	0.00
A-2slp	145.00	0.33	0.20
B-2slp	203.00	0.54	0.12
A-1s2p	60.00	0.15	0.00
B-1s2p	53.00	0.15	0.00

표 2에서 보는 바와 같이 접지전극의 매설깊이가 깊어질수록 커패시턴스 C의 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 접지임피던스의 전달함수 모델

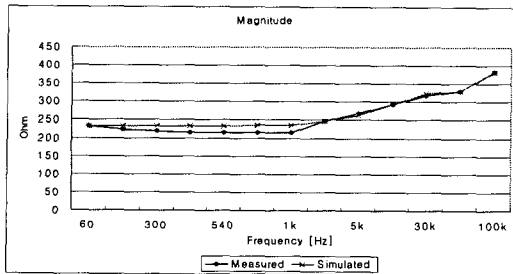
본 연구에서는 봉상 접지전극의 주파수 영역에서의 접지 임피던스 특성을 분석하기 위하여 접지 임피던스의 전달함수 모델을 수립하여 파라미터 식별 방법을 적용하였다. 주파수 영역에서 접지 임피던스 모델은 전달함수 모델을 선정하는 것이 일반적이며, 전달함수의 파라미터 식별을 위하여 주파수별 측정된 임피던스를 적용하였다.

표 3은 본 연구에서 제안한 봉상 접지전극의 접지 임피던스 전달함수 모델의 파라미터를 ARMA 모델링 기법으로 구한 결과를 보여주고 있으며, 그림 8은 모델을 적용하여 구한 주파수별 접지임피던스를 측정된 값과 비교한 예를 심타용 아연도금 강봉(B-1s1p)에 대하여 보인 것이다. 다른 접지전극에 대한 결과는 부록 III에 수록하였다.

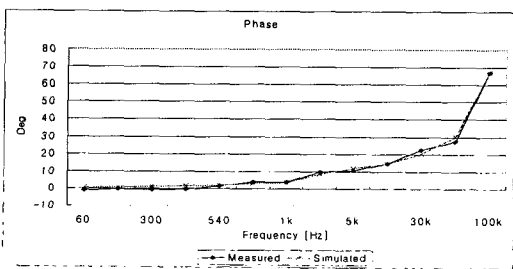
표 3. 전달함수 모델

Table 3. Model of Transfer Function

전극	전달함수
A-1s1p	$Z(s) = \frac{-1.937 \times 10^{-13}s^2 - 1.335 \times 10^{-6}s - 1}{4.965 \times 10^{-14}s^2 - 2.52 \times 10^{-6}s - 0.0047}$
B-1s1p	$Z(s) = \frac{3.5 \times 10^{-11}s^2 + 3.56 \times 10^{-11}s + 2.793 \times 10^{-6}s + 1}{3.95 \times 10^{-14}s^2 - 9.32 \times 10^{-12}s^2 + 8.03 \times 10^{-6}s + 0.00428}$
A-1s2p	$Z(s) = \frac{1.98 \times 10^{-18}s^2 + 3.283 \times 10^{-13}s^2 + 6.34 \times 10^{-6}s + 1}{1.36 \times 10^{-20}s^2 + 1.7 \times 10^{-12}s^2 + 5.92 \times 10^{-6}s + 0.0132}$
B-1s2p	$Z(s) = \frac{6.687 \times 10^{-24}s^4 + 3.28 \times 10^{-24}s^4 + 1.616 \times 10^{-24}s^2 + 1 \times 10^{-7}s^2 + 7.06 \times 10^{-4}s + 1}{5.73 \times 10^{-46}s^4 + 3.65 \times 10^{-46}s^2 + 2 \times 10^{-14}s^2 + 1.63 \times 10^{-9}s^2 + 1.3 \times 10^{-6}s + 0.0143}$
A-2s1p	$Z(s) = \frac{-1.157 \times 10^{-13}s^2 - 4.7 \times 10^{-6}s - 1}{1.12 \times 10^{-13}s^2 - 7.46 \times 10^{-6}s - 0.00674}$
B-2s1p	$Z(s) = \frac{-2.68 \times 10^{-13}s^2 - 4.45 \times 10^{-6}s - 1}{6.27 \times 10^{-13}s^2 - 5.39 \times 10^{-6}s - 4.52 \times 10^{-3}}$



(a) magnitude(Ω)



(b) Phase(degree)

그림 8. 접지 임피던스의 비교(전달함수)
Fig. 8. Comparison of Ground Impedance

5. 결론

배전선로 등의 접지전극으로 많이 사용되고 있는 봉상 접지전극인 동피복 접지동봉과 심타용 아연도금 강봉에 대하여 여러 종류의 배열 방식별로 매설하여 주파수를 변화시키면서 접지 임피던스를 측정하였다. 측정된 결과로부터 접지전극의 주파수 변화에 따른 접지 임피던스가 영향을 받음을 확인하였다. 또한, 각 봉상 접지전극별 접지 임피던스에 대하여 회로 모델과 전달함수 모델을 제안하였다. 각각의 모델로부터 얻어진 값과 측정값을 비교하여 본 결과, 전달함수 모델의 결과가 더욱 양호한 특성을 보였으며, 접지 임피던스의 회로 모델의 결과로부터는 접지전극의 길이가 길어질수록 커패시턴스의 영향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

확인된 결과에 따르면 봉상 접지전극에 대하여 과도 응답 특성을 분석할 수 있는 좀 더 진보된 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Abdul M. Mousa, "The SsII ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes", IEEE Trans. on PD, Vol. 9, no. 3, 1994.
- (2) I. F. Gonos, F. V. Topalis, I. Stathopoulos, "Transient impedance of grounding rods", ISH, Vol. 2, pp. 272~275, 1999.
- (3) J. A.Cadeow & H. R. Martens, Discrete-time and Computer Control System, Prentice-Hall Inc., 1970.
- (4) L. Ljung & T. Soderstrom, Theory and Practice of Recursive Identification, Cambridge, Massachuset: The MIT Press, 1983.

<부록 I> 접지 임피던스의 측정값

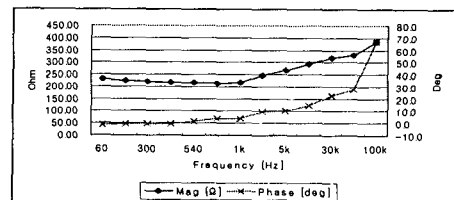


그림 AI-1. 접지임피던스 측정결과(B-1s1p)
Fig. AI-1. Ground Impedance(B-1s1p)

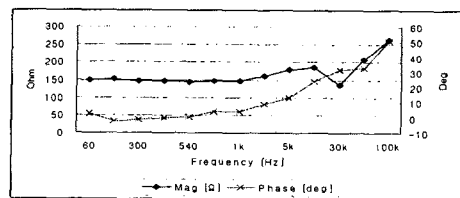


그림 AI-2. 접지임피던스 측정결과(A-2s1p)
Fig. AI-2. Ground Impedance(A-2s1p)

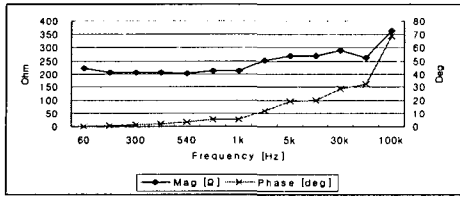


그림 AI-3. 접지 임피던스 측정결과(B-2s1p)
Fig. AI-3. Ground Impedance(B-2s1p)

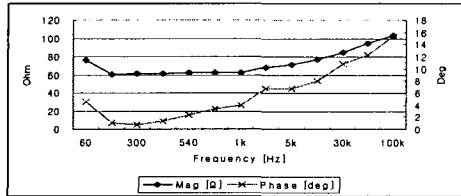


그림 AI-4. 접지 임피던스 측정결과(A-1s2p)
Fig. AI-4. Ground Impedance(A-1s2p)

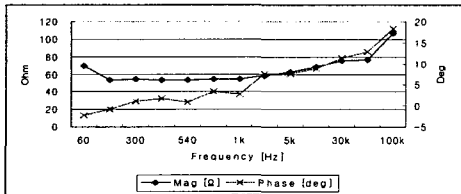


그림 AI-5. 접지 임피던스 측정결과(B-1s2p)
Fig. AI-5. Ground Impedance(B-1s2p)

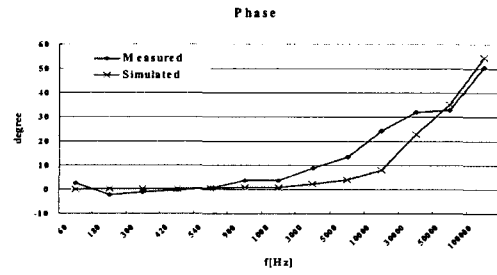
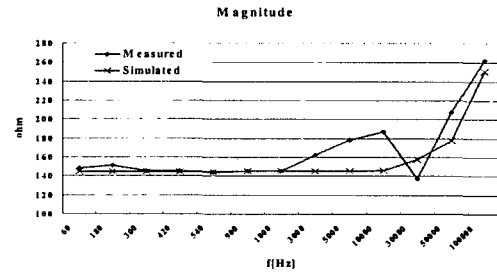


그림 AII-2. 접지 임피던스(A-2s1p)
Fig. AII-2. Ground Impedance(A-2s1p)

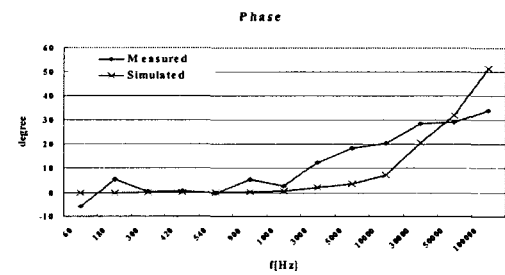
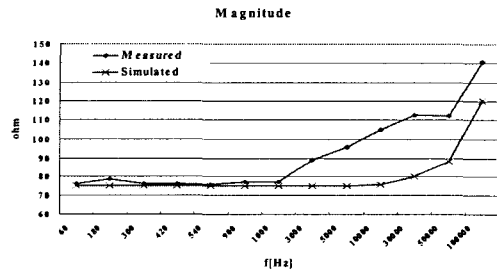


그림 AII-3. 접지 임피던스(B-2s1p)
Fig. AII-3. Ground Impedance(B-2s1p)

<부록 II> 접지 임피던스 비교(회로모델)

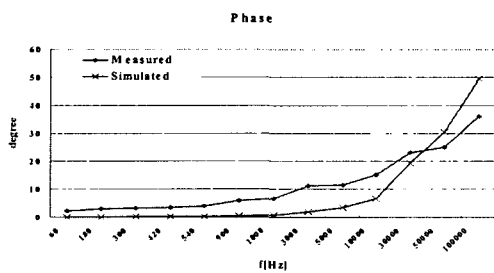
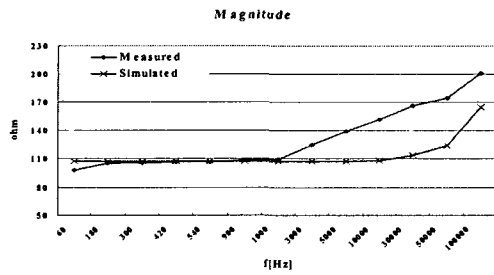
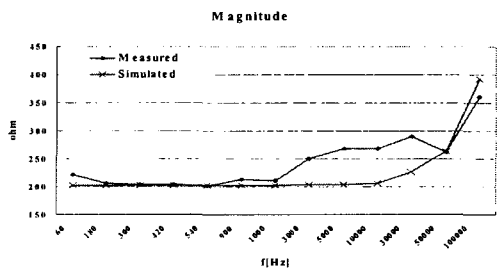


그림 AII-1. 접지 임피던스(B-1s1p)
Fig. AII-1. Ground Impedance(B-1s1p)



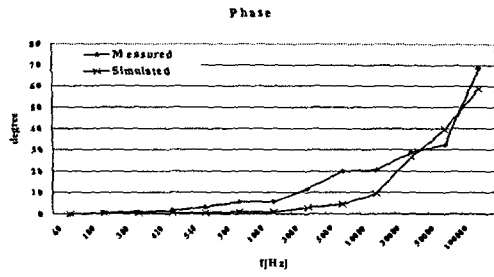


그림 AII-4. 접지 임피던스(A-1s2p)
Fig. AII-4. Ground Impedance(A-1s2p)

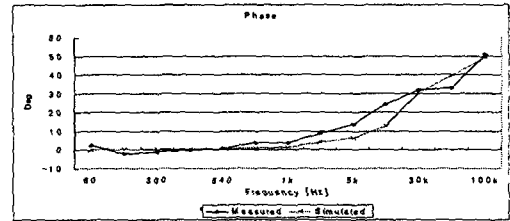
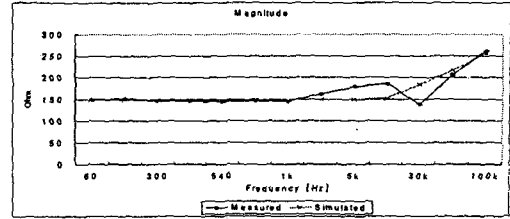


그림 AIII-2. 접지 임피던스(A-2s1p)
Fig. AIII-2. Ground Impedance(A-2s1p)

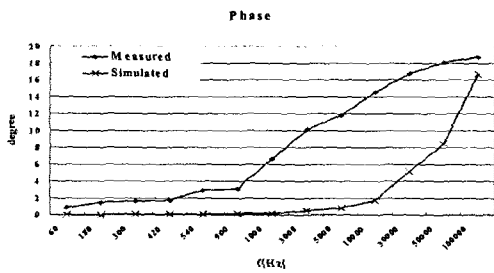
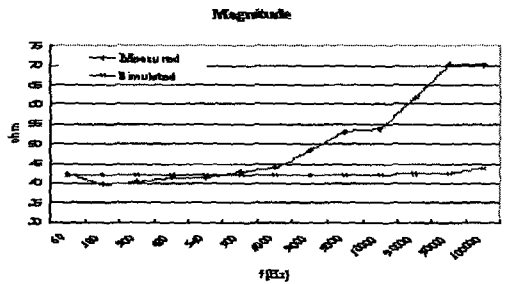


그림 AII-5. 접지 임피던스(B-1s2p)
Fig. AII-5. Ground Impedance(B-1s2p)

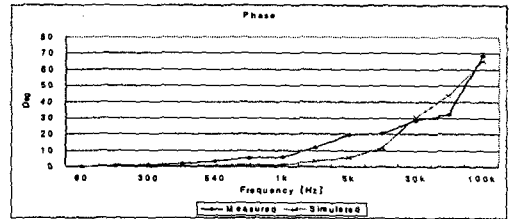
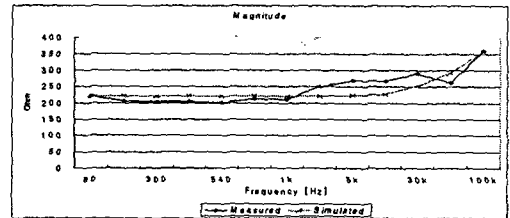


그림 AIII-3. 접지 임피던스(B-2s1p)
Fig. AIII-3. Ground Impedance(B-2s1p)

<부록 III> 접지 임피던스 비교(전달함수)

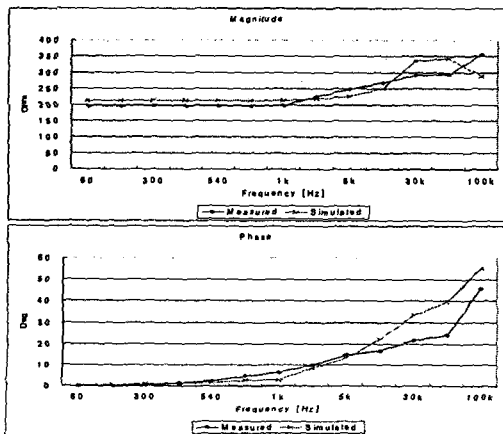


그림 AIII-1. 접지 임피던스(A-1s1p)
Fig. AIII-1. Ground Impedance(A-1s1p)

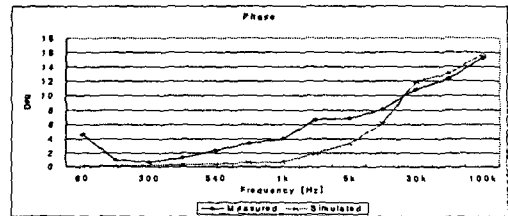
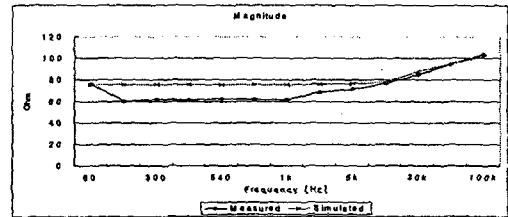


그림 AIII-4. 접지 임피던스(A-1s2p)
Fig. AIII-4. Ground Impedance(A-1s2p)