

외부 전자파에 의한 LAN 케이블의 유도전압

Induced Voltages on LAN Cables Due to Incident Electromagnetic Fields

주재철* · 박범준* · 김종국* · 이현영** · 임계재*** · 박동철*

Jae Cheol Ju* · Beom Jun Park* · Jong Kuk Kim* · Hyun Young Lee** · Gae Jae Lim*** · Dong Chul Park*

요 약

임의의 방향에서 입사하는 외부 전자파와 다중 전송선로와의 결합 특성을 해석하기 위해 다중 전송선 방정식을 FDTD 기법으로 전개하고 선로에 유도되는 전압을 시뮬레이션하였다. 테스트 선로로는 Ethernet 방식의 고속 LAN 구축시 사용되는 UTP Category 5 케이블과 알루미늄 호일로 차폐된 STP Category 5 케이블을 사용하였다. TEM 셀을 이용하여 유도전압을 측정하고 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 또한 차폐된 STP Category 5에 대해 차폐 호일의 접지상태 및 접지저항의 변화에 따른 차폐효과를 비교한 결과, 차폐 호일의 양단을 모두 접지하고 접지저항을 작게 할 때 차폐효과가 가장 크게 나타났다.

Abstract

Multiconductor transmission line(MTL) equations are solved by FDTD method to examine the coupling between incident electromagnetic fields and multiconductor transmission lines. The measurement of induced voltages on UTP Category 5 and STP Category 5 cables which are used as LAN cables is carried out using a TEM cell where uniform and strong TEM fields can be established. The comparison between measured and simulated results shows good agreement. It is also found that grounding of shield foil at both terminations and small grounding resistance give good shielding effects for STP Category 5.

I. 서 론

외부 전자파와 다중 전송선로와의 결합 현상은 EMC 분야에서 중요한 문제로 다루어져 왔다. 특히 고속 디지털 통신서비스가 시작되면서 통신선로에

서 전송되는 디지털 신호의 사용 주파수 대역이 광대역화되면서 선로상호간 간섭으로 인한 누화나 외부 전자파와의 감응으로 인해 통신 시스템 성능에 미치는 영향이 증가하고 있다. 이에 따른 대책을 강구하기 위해서는 각각의 전기·전자기기에서의 대책뿐만 아니라 전송선로의 전자파 감응특성을 파

「본 연구는 한국통신 정보통신기초과제(98-09) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.」

* 충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

** 한국통신 가입자망연구소(Access Network Research Lab., Korea Telecom)

*** 관동대학교 전자통신공학과(Dept. of Electronic Communications Engineering, Kwandong University)

· 논문 번호 : 990826-09S

· 수정완료일자 : 1999년 9월 2일

약하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 다중 전송선 방정식^{[1]-[3]}을 시간 영역 유한차분(FDTD) 기법으로 전개하여 외부 전자파와 전송선로 사이의 결합 현상을 시뮬레이션 하였다. 또한 이 결과들을 TEM 셀을 이용하여 측정된 실험치와 비교하였다. 테스트 선로는 Ethernet 방식의 고속 LAN 구축에 사용되고 각각 8개의 동선선로로 구성된 UTP(Unshielded Twisted Pair) Category 5와 알루미늄 호일로 차폐된 STP(Shielded Twisted Pair) Category 5를 사용하였다. 외부 전자파와의 결합 현상 측정은 TEM 셀을 이용하여 외부 전자계로 부터 측정영역을 차폐시키고 테스트 선로에 일정한 크기의 정현파를 입사시켜 선로종단에서 유도된 전압을 스펙트럼 분석기로 측정하였다.

UTP Category 5에서는 가우시안 전자파 펄스를 입사시켜 선로에 유도되는 전압을 FDTD 기법으로 시뮬레이션하고 주파수 영역으로 푸리에 변환하여 측정된 실험치와 비교하였다. 또한 STP Category 5에서는 차폐 호일의 접지상태와 접지저항의 변화에 따른 전자파 감응특성을 비교하였다.

II. 다중 전송선 방정식

외부로부터 입사하는 전자파와 다중 전송선로의 구조는 그림 1과 같다. 입사하는 전자파가 다중 전송선로에 전압(전류)을 유도하는 전자기적 결합 현상은 다중 전송선 방정식을 이용하여 해석할 수 있는데 본 논문에서는 Agrawal 방법^[1]을 채택하였다. 다중 전송선 방정식은 Maxwell 방정식으로부터 식 (1), (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} [V^s(z, t)] + [R][I(z, t)] + [L]\frac{\partial}{\partial t}[I(z, t)] = \begin{bmatrix} \vdots \\ E_x^i(i\text{-번째 도체}, z, t) - E_x^i(\text{기준 도체}, z, t) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

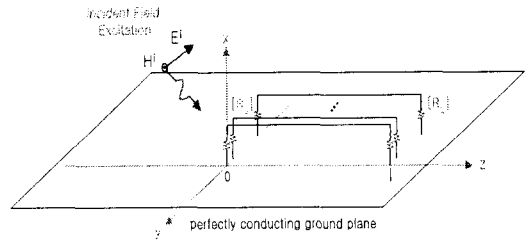


그림 1. 외부에서 입사하는 전자파와 다중 전송선로
Fig. 1. Multiconductor transmission lines excited by an incident electromagnetic wave.

$$\frac{\partial}{\partial z} [I(z, t)] + [G][V^s(z, t)] + [C]\frac{\partial}{\partial t}[V^s(z, t)] = 0 \quad (2)$$

여기서 $[V^s(z, t)]$ 와 $[I(z, t)]$ 는 각각 산란전압과 총전류 행렬을, $[R]$, $[L]$, $[G]$, $[C]$ 는 각각 단위길 이당 저항, 인덕턴스, 컨덕턴스, 커패시턴스 행렬을 나타내며, 식 (1)의 우변 항의 E_x^i 는 입사전기장의 전송선로 길이 방향 성분 행렬의 i 번째 행을 의미한다.

또한 총전압은 산란전압과 입사전압의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$[V(z, t)] = [V^s(z, t)] + [V^i(z, t)] = [V^s(z, t)] - \int_0^{h_i} [E_x^i(z, t)] dx \quad (3)$$

여기서 $[V^i(z, t)]$ 는 입사전압 즉 입사전기장의 수직성분, E_x^i 를 적분한 양이고 h_i 는 그림 1에 보인 바와 같이 i 번째 선로의 높이이다.

전송선로의 양단에서 $[V^s(z, t)]$ 의 경계조건은 테브난(Thevenin) 정리를 이용하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} [V^s(0, t)] &= -[R_s][I(0, t)] + \int_0^{h_i} [E_x^i(0, t)] dx \\ [V^s(L, t)] &= [R_L][I(L, t)] + \int_0^{h_i} [E_x^i(L, t)] dx \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 $[R_s]$, $[R_L]$ 은 전송선로의 양끝의 종단 저항이다.

이상으로 얻은 다중 전송선 방정식은 산란전압 방식(scattered voltage formalism)으로 표현된 것이며 입사전기장의 수직성분은 전송선로의 양 끝단에서, 입사전기장의 수평성분은 전송선로의 가운데 부분에서 각각 등가 분포전원으로 나타난다^[3].

III. 실험구조 및 측정결과

3-1 TEM 셀 특성

전자파 감응특성 측정에 안테나를 사용하면 감응특성 측정에 필요한 dc 부더의 넓은 대역폭을 구현하기 어렵고, 지향성, 편파특성 등과 같은 고려해야 할 문제점이 발생하게 된다. 그러나 TEM 셀을 이용할 경우 낮은 주파수영역에서 차단주파수까지의 넓은 주파수 대역에서 전자파 감응실험이 가능하고 외부 전자계로부터 측정영역을 차폐할 수 있고 상대적으로 작은 인가전압으로 큰 전기장을 만들 수 있고, 또한 측정영역 내부에 균일한 TEM 모드를 만들 수 있다.

실험에 사용된 TEM 셀의 특성 임피던스와 차단주파수는 다음 식으로부터 주어진다^[4].

$$Z_0 = \frac{376.7}{4 \left[\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \frac{\pi g}{2b} \right) \right]} \quad [\Omega] \quad (5)$$

$$f_c = \frac{75}{a} \sqrt{1 + \frac{4a}{\pi b \ln \left(\frac{8a}{\pi g} \right)}} \quad [\text{MHz}] \quad (6)$$

여기서 a , b , g 는 그림 2에 보인 바와 같고 $a = 10 \text{ cm}$, $b = 6 \text{ cm}$ 이며 제작된 TEM 셀의 특성 임피던스는 50Ω , 차단주파수는 1.029 GHz 이다.

3-2 실험장치 set-up

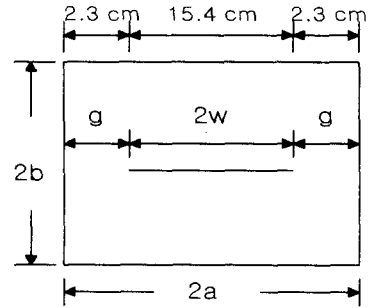


그림 2. 제작된 TEM 셀의 단면구조

Fig. 2. Cross-sectional view of a fabricated TEM cell.

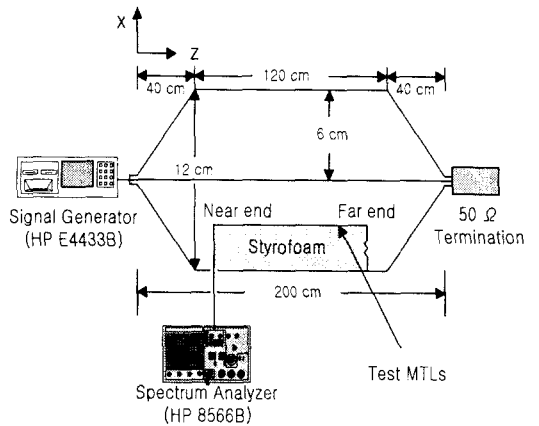


그림 3. 실험장치 set-up

Fig. 3. Measurement set-up.

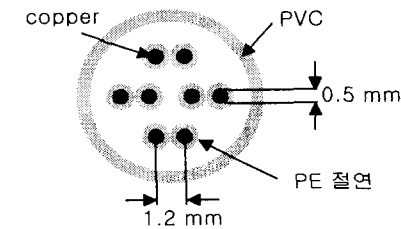
실험을 위한 장비 구성은 그림 3과 같다. 이때 제작된 TEM 셀 내부에서 테스트 선로에 전자파 펄스를 입사시키기 위해서 HP사의 모델명 E4433B ESG-D Series Signal Generator를 사용하였고 HP사의 8566B 스펙트럼 분석기와 HP-IB를 이용하여 주파수를 변화시켜가며 유도전압을 측정하였다.

테스트 선로의 길이는 90 cm 이고 접지면으로부터 케이블의 높이를 일정하게 유지하기 위해 공기와 전기적 물성이 비슷한 3 cm 높이의 스티로폼으로 지지하고 8개의 선로중 한 도체만 고주파용 칩 저항으로 종단하였다. 이때 접지면으로는 $120 \text{ cm} \times$

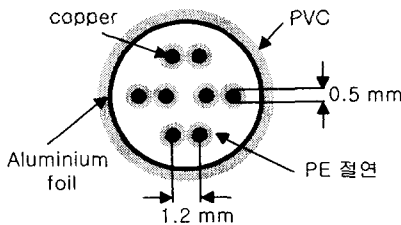
20 cm × 0.3 cm의 알루미늄 판을 사용하였는데 이는 접지를 이루는 동시에 TEM 셀 바닥면의 외부 도체를 이루게 된다.

테스트 선로인 UTP Category 5와 STP Category 5는 IEEE 802.3 100 base-T 적용표준이고 PE 절연 PVC 재킷 재질로 피복된 4쌍의 동선로로 구성되어 있다. 그림 4에 이 선로들의 단면구조를 나타내었고 이 단면구조로부터 전송선 방정식의 파라미터 $[L]$, $[C]$ 값을 wide separation을 가정하여 계산하였고^{[2],[3]}, $[R]$ 과 $[G]$ 는 0인 무손실 경우로 가정하고 시뮬레이션하였다.

또한 TEM 셀의 종단을 50Ω 으로 터미네이션하여 임피던스를 매칭시켰고 TEM 셀 안에서 전기장의 세기는 septum과 TEM 셀의 외부도체와의 거리가 6 cm 이므로 인가해 준 전압을 거리로 나눈 값 즉, $-\frac{\text{인가전압}}{0.06}$ [V/m]가 된다.



(a)



(b)

그림 4. 테스트 선로의 단면구조

(a) UTP Category 5, (b) STP Category 5

Fig. 4. Cross-sectional view of the test MTLs.

(a) UTP Category 5, (b) STP Category 5.

3-3 실험치와 시뮬레이션 결과의 비교 및 분석

그림 5에 전송선로의 구조와 외부 전자파의 입사방향을 나타내었고 FDTD 기법을 이용하여 그림 6에 보인 가우시안 전자파펄스를 테스트 선로에 입사시켜 선로에 유도되는 전압을 시간영역에서 계산하고 주파수영역으로 푸리에 변환하여 측정치와 비교하였다. 그림 7에 UTP Category 5에서의 유도전압 크기를 측정된 결과와 FDTD 기법을 이용한 시뮬레이션 결과를 비교하여 잘 일치함을 보였다. 이 때 입력신호로는 1 V의 크기와 0°의 위상을 갖는 정현파 신호를 인가하였다.

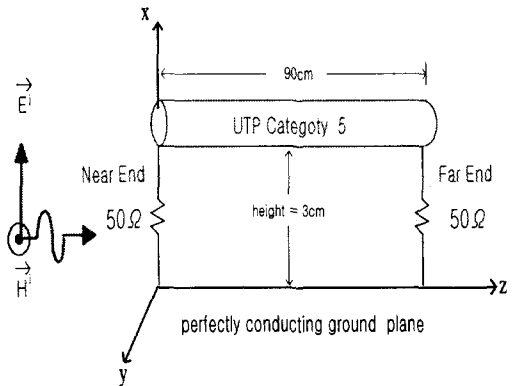


그림 5. UTP category 5의 전송선 구조

Fig. 5. Physical configuration of UTP category 5.

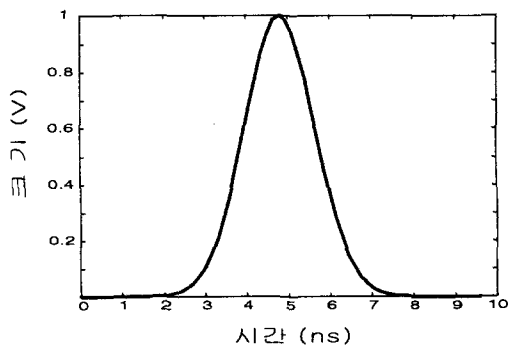
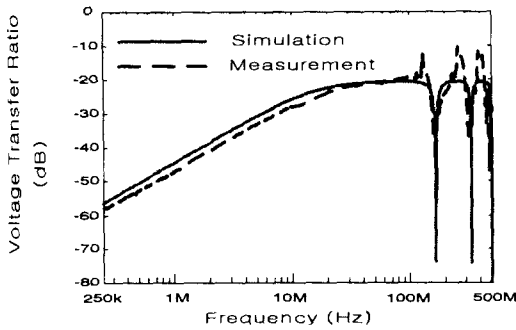
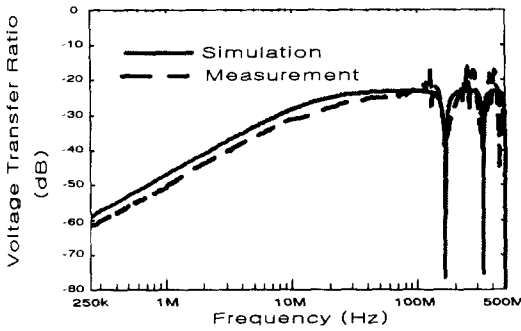


그림 6. 가우시안 펄스 전자파

Fig. 6. Gaussian electromagnetic pulse.



(a)



(b)

그림 7. UTP Category 5의 유도전압

(a) Near End 전압, (b) Far End 전압

Fig. 7. Induced voltages on UTP Category 5.

(a) Near End voltage, (b) Far End voltage.

STP category 5는 주로 RF 간섭이나 EMI 문제가 예상될 때 사용되며 8개의 동선로와 알루미늄 차폐호일로 구성되어 있다. 외부 전자파 펄스가 입사할 때 STP Category 5의 차폐호일의 접지상태 변화, 테스트 선로의 종단저항 변화, 다중접지에 따른 차폐효과를 측정하였고 이때 8개의 선로 중 한 측정선로만 양단을 저항으로 종단시켰다.

먼저 그림 8에 차폐호일의 양단을 접지시키고 유도전압을 측정한 선로를 50 Ω으로 종단시킨 경우의 전송선 구조를 나타내었고 그림 9에 차폐호일의 접지 상태를 변화시켜가며 측정한 결과를 보였다. 여기서 테스트 선로와 접지면으로 구성된 회로의 특성 임피던스가 약 300 Ω 정도이고 양단이

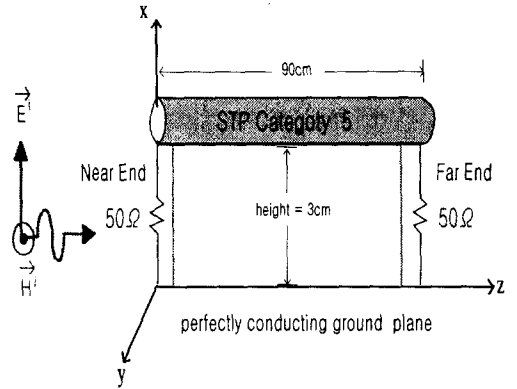


그림 8. STP category 5의 전송선 구조(낮은 임피던스 부하)

Fig. 8. Physical configuration of STP category 5 (low impedance load).

50 Ω으로 종단되어 있어 낮은 임피던스 부하(low impedance load)로 인한 유도성 결합(inductive coupling)이 용량성 결합(capacitive coupling)보다 크다. 그러므로 그림 9의 측정결과에서 차폐호일을 한쪽만 접지시킨 경우나 양쪽 모두 개방시킨 경우는 차폐효과가 작았고 차폐호일의 양단을 접지시켰을 때 차폐효과가 크게 나타났다. 이 유도성 결합은 용량성 결합과는 달리 차폐호일의 양단을 모두 접지시켜야 줄일 수 있는데 이것은 맥스웰의 패러데이 법칙과 렌츠의 법칙으로 설명될 수 있다. 차폐호일과 접지면 사이의 입사 자기장은 차폐호일에 전류를 유도하고 이 유도 전류는 입사 자기장과 반대 방향의 자기장을 발생하여 결국 테스트 도체의 외부 입사 전자파에 의한 유도성 결합을 감소시킨다^{[5],[6]}. 그리고 그림 10에 차폐호일의 양단의 접지저항 값을 변화시켜가며 측정한 결과를 보였는데 접지저항이 50 Ω인 경우 차폐효과가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그러므로 차폐 호일의 양단을 모두 접지시키고 접지저항은 작아야만 유도성 결합을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

한편 종단저항이 1150 Ω인 높은 임피던스 부하(high impedance load)로 인한 용량성 결합이 유

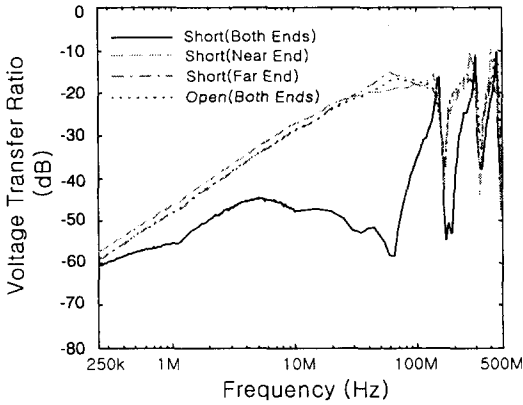


그림 9. STP category 5의 유도전압(낮은 임피던스 부하)

Fig. 9. Induced voltages on STP Category 5 (low impedance load).

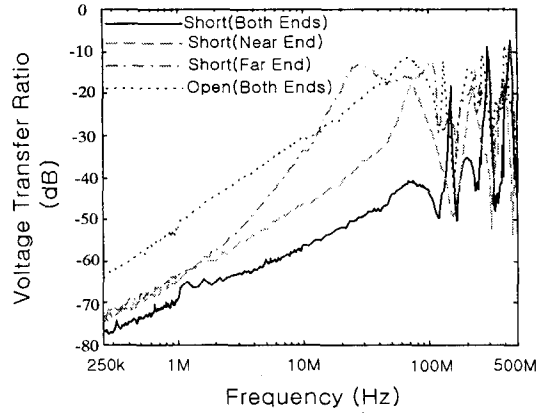


그림 11. STP category 5의 유도전압(높은 임피던스 부하)

Fig. 11. Induced voltages on STP Category 5 (high impedance load).

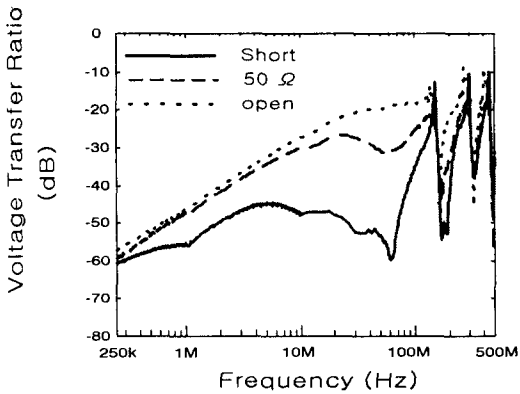


그림 10. STP Category 5의 접지저항 변화에 따른 유도전압

Fig. 10. Induced voltages on STP category 5 with variation of grounding resistance.

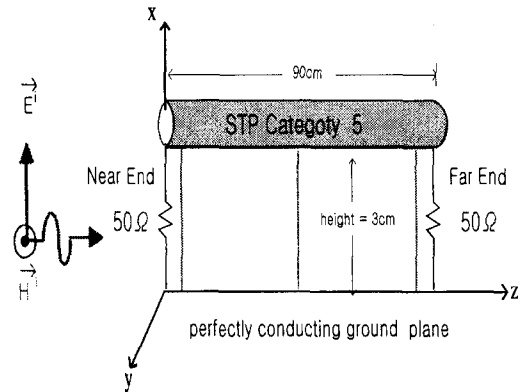


그림 12. STP category 5의 다중 접지구조

Fig. 12. Multiple grounding configuration of STP category 5.

도성 결함보다 큰 경우에도 같은 방법으로 차폐효일의 접지상태를 변화해 가면서 외부 전자파에 대한 차폐효과를 측정하였고 그 결과를 그림 11에 보였다. 용량성 결함이 우세한 경우 선로의 한 쪽만 접지시켜도 차폐효과가 커짐을 알 수 있고 선로 양단을 모두 접지시켰을 때 차폐효과가 가장 크게 측정되었다^[7].

테스트 선로를 다중 접지했을 때 외부 전자파에 의한 차폐효일의 효과를 실험하기 위하여 그림 12에서 보는 바와 같이 선로의 가운데 부분에 접지를 추가하였다. 접지를 다중으로 하면 높은 주파수영역에서의 차폐효과가 크게 증가함을 그림 13의 측정결과에서 알 수 있다. 따라서 고주파성분이 많은 외부 전자파가 입사할 때 다중접지를 한다면 차폐효과를

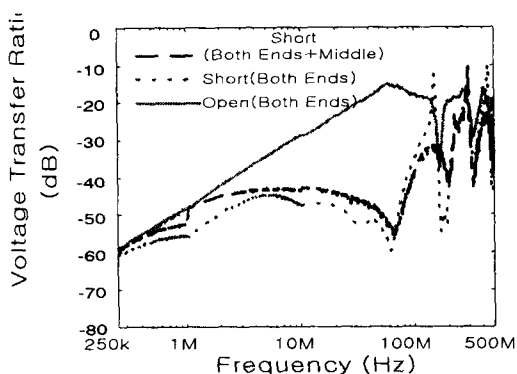


그림 13. STP category 5의 다중 접지에 따른 유도전압
Fig. 13. Induced voltages on STP Category 5 with multiple grounding.

높일 수 있음을 측정결과를 통해서 알 수 있다.

차폐효율이 있는 STP Category 5의 경우 차폐 효율 양단을 접지저항이 가능한 작게 접지시켜야 외부 입사장에 대한 차폐효과가 커지게 된다. 전기장에 의한 용량성 결합은 STP Category 5 차폐효율을 단일 접지 혹은 다중 접지를 했을 때 줄일 수 있고 자기장에 의한 유도성 결합은 입사전기장이 통과하는 폐 경로의 면적을 줄이거나 차폐효율 양단을 접지한 경우에 줄일 수 있다.

IV. 결 론

외부로부터 발생한 전자파가 다중 전송선로에 입사할 때 전송선로에 유도되는 전압을 전송선 방정식을 FDTD 기법으로 전개하고 가우시안 펄스 전자파를 이용하여 100 Mbps LAN에 사용되는 UTP Category 5에 유도되는 전압을 시뮬레이션하였다. 또한 TEM 셀을 이용한 실험치와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. EMI 대책용 통신선로로 사용되는 STP Category 5 케이블의 접지상태와 접지저항의 변화에 따른 전자파 감응특성을 측정하여 비교하고 분석하였다. 이러한 전송선로들에서 결합현상을 이해하고 해석함으로써 통신시스템 성능에 미치는 영향을 평가하고 이에 따른 대비책을

강구할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문의 실험은 한국표준과학연구원 전자기환경그룹의 측정설비를 이용하여 수행되었습니다. 정연춘 그룹장을 위시한 그룹소속 연구원들의 협조에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A. K. Agrawal, H. J. Price, and S. H. Gurbaxani, "Transient Response of Multi-conductor Transmission Lines Excited by Nonuniform Electromagnetic Field," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-22, pp. 119-129, May, 1980.
- [2] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, Wiley Interscience, New York, 1994.
- [3] F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*, Wiley Interscience, New York, 1997.
- [4] M. L. Crawford and J. L. Workman, "Using a TEM cell for EMC measurements of electronic equipment," *NBS Tech. Note* #1013, 1979.
- [5] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Wiley Interscience, New York, 1992.
- [6] M. Pelt and P. De Win, "Termination of a Screen in Practise : Earthing Versus Grounding," *International Wire & Cables Symposium Proceedings*, pp. 692-697, 1997.
- [7] Henry W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, Wiley Interscience, New York, 1988.

주 재 철



1991년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 7월: Oklahoma State University, Stillwater(공학석사)
 1997년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정 재학중(한국표준과학연구원 학연과정)

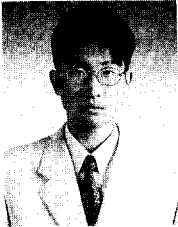
[주 관심분야] 전자장 수치해석, EMI/EMC

박 범 준



1994년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정 재학중
 [주 관심분야] 전자장 수치해석, EMI/ EMC

김 종 국



1999년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정 재학중
 [주 관심분야] 전자장 수치해석, EMI/EMC

이 현 영



1977년 3월: 한국항공대학교 통신공학과(공학사)
 1988년 8월: 연세대학교 대학원(공학석사)
 1997년 3월~현재: 충남대학교 대학원(박사과정)
 1980년 2월~1983년 12월: 한국전기

통신연구소 연구원
 1984년 1월~현재: 한국통신 연구개발본부 책임연구원
 [주 관심분야] 통신설비의 EMI/EMC, Lightning coupling 해석

임 계 재



1959년 5월 16일 생
 1983년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 8월: 동국대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1993년 2월: 동국대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1984년 4월~1986년 1월: 현대전자 근무
 1991년 2월~1994년 2월: 유한전문대학 전자과 조교수
 1994년 3월~현재: 관동대학교 정보통신공학과 부교수
 [주 관심분야] EMI/EMC, 전자장 수치해석, 안테나 및 전파전파

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기·전자공학과(공학석사)
 1984년 12월: University of California, Santa Barbara(공학박사)
 1976년~현재: 충남대학교 공과대학

전파공학과 교수
 1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany, 방문교수
 1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson
 1996년~현재: 한국전자과학회 부회장
 1998년~현재: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson
 [주 관심분야] Microwave and millimeter-wave passive devices, EMC/EMI topics, and Antennas.