

지하 터널 통신용 동축 슬롯케이블의 최적화 설계

김 정 기* · 박 경 환**

(*중앙대학교 전자공학과교수,

**부천전문대학 전자통신과 조교수)

■ 차

레 ■

I. 서 론

III. 결 론

II. 본 론

I. 서 론

현재 국내외적으로 무선 통신의 사용이 급증함에 따라 양질의 통신 서비스를 제공하면서도 시공간의 제약을 없애려는 시도는 필연적이라 할 수 있다. 그러한 시도를 가운데 하나가 통신장치가 있는 건물 내부나 터널 등에서도 동축 슬롯케이블을 설치하여 어느 곳에서나 중단없는 RF커버를 제공하는 것이다.

동축 슬롯케이블은 그 형태(단면, 길이)에 따라 0.5 MHz에서 부터 1.7 GHz내지 그 이상의 주파수 대역까지 일반 안테나로써 RF 장(field)의 커버가 불가능하거나 소규모 지역에 장(field)를 제한하고자 할 때 송수신 시스템이 모두 가능한 연속적인 안테나이다. 따라서 동축 슬롯케이블은 이러한 특수 지역의 통신 문제를 해결하는 데 적절한 안테나로서 역할을 한다. 자동화된 공장내부에 유도 운반기구의 무선제어를 할 수 있도록 하며, 병원에서는 위급 환자를 부도 등에서 운반 중일 때 지속적인 감시를 가능하게 한다. 그리고 특수한 전파 특성으로 discrete 안테나 시스템과 같은 기존의 방식으로는 RF커버가 도저히 불가능한 지하철과 같은 터널 시스템에서도 동축 슬롯케이블은 매우 효과적인 통신을 가능케 한다. 그 예로 그림 1은 오스트리아 비엔나의 지하철에서의 통신을 위한 RF 커버를 보여 준다.

본 고에서는 이러한 동축 슬롯케이블의 전기적인

특성을 비롯하여 기존의 통신방식과의 차이점 그리고 구체적인 응용 예에 따른 설치 예 등을 소개하고자 한다.

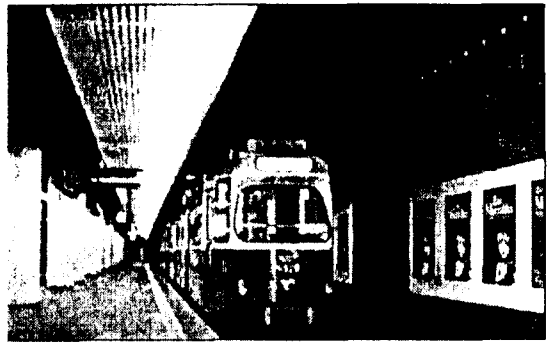


그림 1. 난청 지역의 통신 예(오스트리아 지하철)

II. 본 론

동축 슬롯케이블은 유전체로 채워진 동축 케이블의 외부도체에 일정한 형태의 슬롯을 형성시켜서 그 슬롯을 통해 케이블 내부 또는 외부로 결합되는 전자장을 통신에 이용하도록 만들어진 것이다. 따라서 특성 상 케이블은 distributed 안테나, leaky feeder, 또는 방사[누설] 케이블 등으로도 불리고 있으며, 이러한

RF커버 상태에서의 통신 방식을 Distributed Communication이라 한다. 사용되는 슬롯은 1:순하게 짜여진 외부 그물 형태가 외부도체 역할을 하거나 케이블 길이를 따라 외부도체에 규칙적인 슬롯이 분포하는 경우 등이다. [2,3,4]

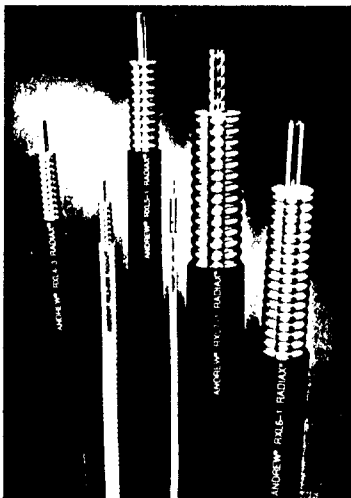


그림 2. 동축 슬롯케이블(타원형의 슬롯, Andrew사)

케이블의 전기적 특성에 대한 연구는 주로 실험에 의한 고찰이었으며, 비교적 정확한 이론 해석은 1980년대에 발표되었다. 현재까지의 실험 및 해석 결과를 근거로 동축 슬롯케이블의 몇 가지 중요시되는 특성을 살펴해보도록 하겠다.

• 기존 통신방식과의 차이점

기존의 discrete 통신 시스템과 distributed 통신 시스템과의 주요한 차이점은 사용하는 안테나의 형태에 있다. discrete 시스템은 point source 안테나를 사용하는 반면 distributed 시스템은 RF커버가 요구되는 영역 전체를 경우하는 방사 케이블을 사용한다. 케이블

외부 도체 상의 홈(slot)들은 그 케이블이 연속적인 안테나로서 동작할 수 있도록 한다. 케이블 전체 길이를 따라서 전달되는 RF 신호가 슬롯을 통해 방사되고, 케이블 주변에서 전달되는 신호가 슬롯안으로 결합(coupling)되어 케이블을 따라 운반된다. 기존의 동축케이블과 같이 감쇠손실(attenuation loss)을 가진다. 터널 내에서 장애물의 영향을 받거나 특히 구부러진 모퉁이에서 심하게 감쇠된다. 그러므로 지속적인 무선 커버를 유지하기 위해 일정 구간마다 신호 증폭이 필요하다.

• 전파특성 [4,5,7]

1979년 R.A.Hurd를 비롯해 1980년 Paul P. Delogne, 1989년 Essam E.Hassan 등은 전파상수에 대한 초월방정식을 정적인 형태로 근사시켜 축에 대해 일정한 슬롯을 갖는 케이블의 내·외부 고유치를 해석하였다. 그 결과 내부도체와 외부도체 사이를 영역 1, 케이블 외부 영역을 영역 2라 하면, 영역 1에서의 V_p (위상속도)는 그 매질의 TEM 파의 속도보다 더 크게 되며, 이는 슬롯의 영향으로 안테나 내부가 저주파에서 동축케이블과 같은 완전한 TEM mode를 형성하지 못하고 고차모드와 유사한 효과를 나타내는 것으로 유추된다. 그리고 영역 2에서는 V_p 가 광속보다 작게 되어 slow wave가 되며, β_{zn} 는 허수값으로 안테나 표면에서 외부로 진행하는 파가 감쇠하는 표면파가 된다. 케이블 반경과 슬롯 각도 변화에 따른 전파상수 결과가 그림 3과 같다.

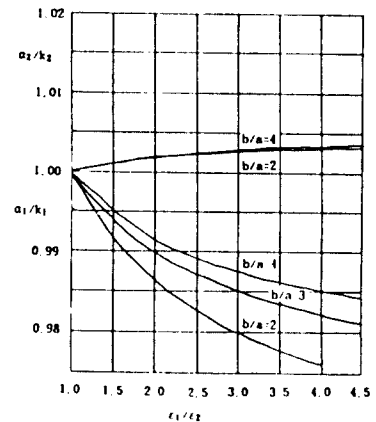


그림 3-1. 반경의 비에 따른 정규화된 monofilar와 bifilar mode의 전파상수

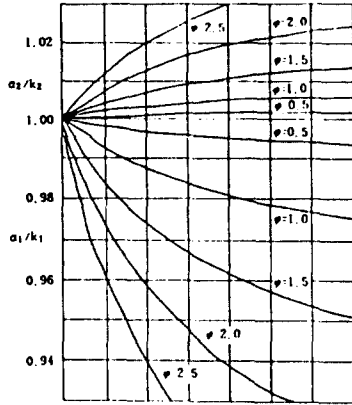


그림 3-2. 슬롯 각도 변화에 따른 정규화된 monofilar와 bifilar mode의 전파상수

• 누설 등가전위 및 특성 임피던스^{9,10)}

누설 케이블 설치시 전자장의 방사가 불필요하거나 혹은 제어타이 있는 곳과 같이 전자파에 장애를 받기 쉬운 장소에서는 다음 장소로 신호를 연결하기 위해 누설 케이블에 동축 케이블을 설치해야 하는 경우가 있다. 이때 두 가지의 케이블 사이에는 안정된 신호전송을 위해 임피던스 매칭을 필요로 하게 된다. 그러면 길이에 따라 일정한 슬롯을 갖는 케이블 내부 유전체의 유전율 변화나 슬롯 각도 변화에 따른 동축 슬롯케이블의 캐패시턴스와 특성 임피던스를 살펴보도록 하겠다.

케이블 내에 저장되는 에너지를 U, 전계를 E라 하면, 단위 길이당 전계 내에 저장된 전체 에너지는 다음과 같다.

$$U = 1/2 \int_A \epsilon |E|^2 dA \tag{1}$$

이를 회로 변수로 나타내면,

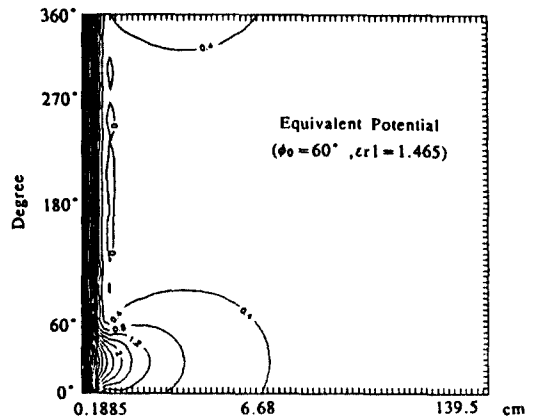
$U = 1/2 C V_0^2$ 이고, 여기에서 V_0 를 1 volts라 하면, 전송선의 정전용량은

$$C = \int_A \epsilon |E|^2 dA \tag{2}$$

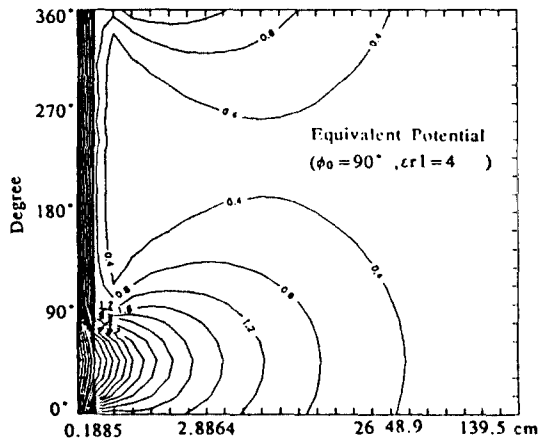
특성 임피던스는 캐패시턴스와 다음의 관계가 있으므로 동축 슬롯케이블 내부 전계로부터 최종적인 특성 임피던스를 구할 수가 있다.

$$Z_0 = \eta \frac{\epsilon}{c} = 376.7 \epsilon_0 \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \tag{3}$$

케이블 내부 전계는 G.R.M.(grid relaxation method)에 의한 반복법으로 구해진 전위분포와의 관계 $E = -\nabla V$ 로 부터 쉽게 구한다. 케이블 내부 도체의 전위를 10 volts로 둘 때 케이블(내경 = 0.5 cm, 외경 = 1.5 cm) 내·외부 등가 전위분포가 그림 4와 같다. 케이블 내부 유전체의 ϵ_{r1} 이 클 수록, 슬롯 각도 ϕ_0 가 클 수록 누설 장(field)의 세기가 상대적으로 커질 것임을 미루어 짐작할 수 있다.



(a) $\epsilon_{r1} = 1, \phi_0 = 60^\circ$



(b) $\epsilon_{r1} = 4, \phi_0 = 90^\circ$

그림 4. 유전율 변화에 따른 케이블 내·외부의 전위분포

다음의 표 1, 2는 위와 동일한 케이블(내경 = 0.5 cm, 외경 = 1.5 cm)의 유전율과 슬롯각도 변화에 따른 캐패시턴스와 특성 임피던스를 나타내고 있다. 이로부터 슬롯의 각도가 클 수록, 유전율이 작을 수록 캐패시턴스는 작아지고, 특성임피던스는 커지는 것을 볼 수 있다.

표 1. G.R.M.에 의한 동축 슬롯케이블의 캐패시턴스 및 특성임피던스 ($\epsilon_r = 2$)

슬롯 각도	캐패시턴스 C	특성 임피던스 Z ₀
90°	0.1009300E+09	0.1673793E+02
78°	0.1009952E+09	0.1670777E+02
66°	0.1010605E+09	0.1667758E+02
54°	0.1011259E+09	0.1664738E+02
42°	0.1011914E+09	0.1661720E+02
30°	0.1012569E+09	0.1658705E+02
18°	0.1013220E+09	0.1655712E+02

표 2. G.R.M.에 의한 동축 슬롯케이블의 캐패시턴스 및 특성임피던스 ($\epsilon_r = 10$)

슬롯 각도	캐패시턴스 C	특성 임피던스 Z ₀
90°	0.5045922E+09	0.2090423E+02
78°	0.5049246E+09	0.2089047E+02
66°	0.5052579E+09	0.2087669E+02
54°	0.5055916E+09	0.2086291E+02
42°	0.5059256E+09	0.2084914E+02
30°	0.5062596E+09	0.2083538E+02
18°	0.5065924E+09	0.2082169E+02

• 동축 슬롯케이블의 전자기 분포¹¹⁾

이 절에서는 먼저 차폐된 일반 동축케이블과 선계 ρ성분의 차이점을 비교해보고 케이블 내부 전계를 살펴해보도록 한다. 차폐된 일반 동축 케이블의 경우 현재 다루고 있는 정도의 크기인 것은 케이블의 최저 코어 모드 차단 주파수(f_{cut})는 10 GHz 이상이므로 1 ~ 2 GHz 정도에서는 현재와 같이 슬롯이 있다한 지라도 그 이하학적 상태에 의한 장(field)의 변화는 있건만 주파수에 대한 영향은 없다고 볼 수 있다. 그러나 특이한점은 그림 5에서 보듯 케이블 내부에 가까이에서 전계의 ρ성분이 일정하지 않고 비칙하게 분포

(TE₁₀ 모드)에서의 동일 성분과 유사한 분포를 관찰하게 된다.

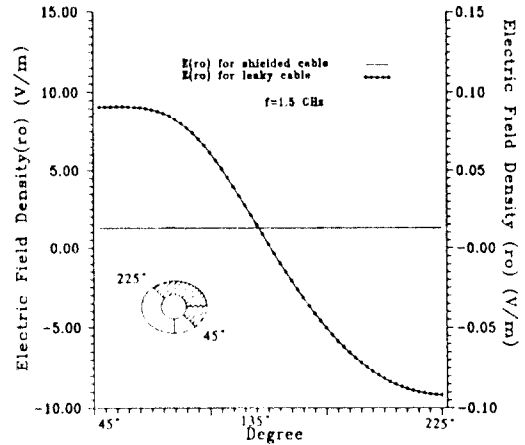
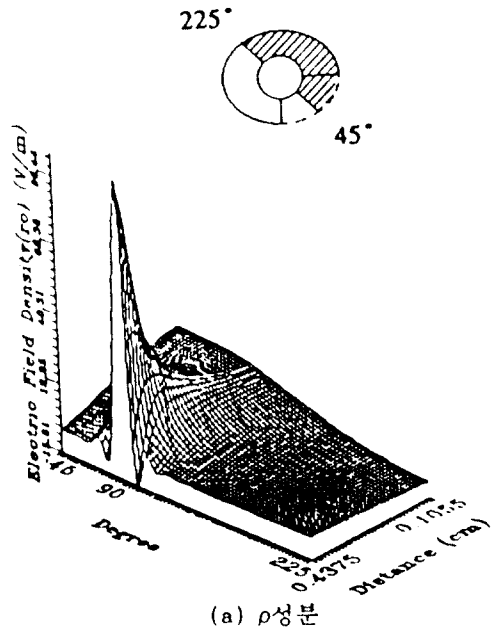
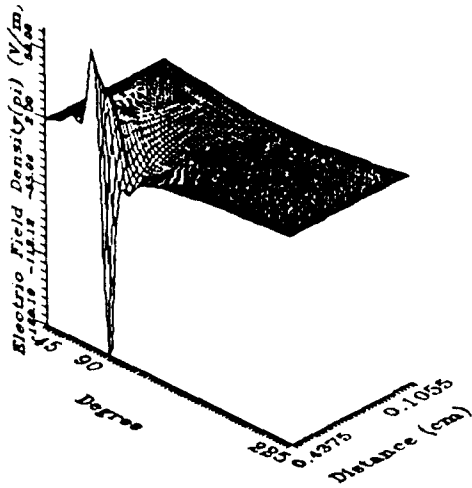


그림 5. 슬롯 케이블과 차폐된 일반 동축케이블의 선계 ρ성분 비교

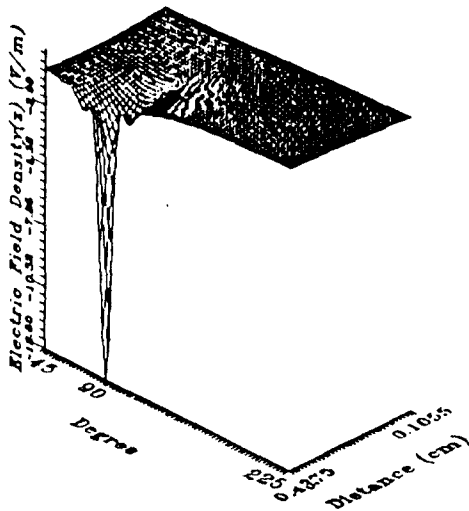
진행적인 케이블 내부 전계는 ρ와 φ성분은 대칭이며, φ성분은 방향만 반대이다. 따라서 케이블 내 슬롯의 중심을 기점으로 반원, 즉(15° ~ 225°)까지 전계분포를 그림 6(a), (b) 그리고 (c)에서 나타내고 있다.



(a) ρ성분



(b) θ 성분



(c) z 성분

그림 6. 슬롯 케이블 내부 전계분포(1.5 GHz)

전계 θ 성분은 케이블 내부에서는 비교적 작은 값을 가지나 케이블 경계면에 접근할 수록 양 끝에서 반대 방향으로 커진다. 전계 z 성분은 거의 0에 가까우며 슬롯의 끝으로 갈 수록 도체에 접근하게 되므로 0에 더욱 근접하는 것을 볼 수 있다. 그리고 전계 세 성분은 모두 슬롯의 끝(45°)에서 큰 변화를 겪게 된다. 이러한 분포는 1989년 Hassan이 케이블의 표면에서 구한 해석적 결과와 일치하며, 단, Hassan의 결과치에서 전

계 θ 성분이 심한 파동을 갖는 것은 그가 Ritz Optimization 기법을 사용했기 때문이며, 따라서 전개항의 수를 증가시키면 이 파동효과는 점차 사라지고 무더게 되어 그림 7의 결과에 근접할 것이다.

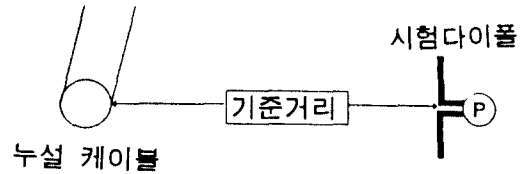


그림 7. 결합손실

• 시스템의 이득(Gain)과 손실(Loss)

사용 주파수에서 케이블의 설치를 위해서는 시스템의 전체적인 이득과 손실을 알아야 한다. 이득(Gain)을 송신 전력이라 하면, 손실은 감쇠손실(Attenuation Loss)와 결합손실(Coupling Loss)의 합으로서 dB로 측정된다. 이들의 차가 System Operating Margin로 케이블과 케이블 길이 등 시스템 설계에 필요하게 된다. 결합손실은 케이블 내부 신호 크기와 0 dBd 이득 안테나에 의한 수신 신호와의 차로써 일정한 기준거리에서 dB로 표시한다. 결합손실은 안테나(케이블) 길이나 안테나가 설치되는 주변지역의 기하학적 형태에 의존하므로 경우에 따라 다르다.

결합손실을 측정하는 거리기준은 동축 슬롯케이블 안테나를 제작하는 회사에 따라 차를 보이고 있어 직접적인 비교는 불가능하다. 예로 1.5m에서의 결합손실(CI.1.5m)을 6.1m에서의 결합손실(CI.6.1m)로 전환을 위해서는 다음과 같이 약간의 계산을 기한다.

$$CI.6.1m = CI.1.5m + 20Log\left(\frac{6.1}{1.5}\right)$$

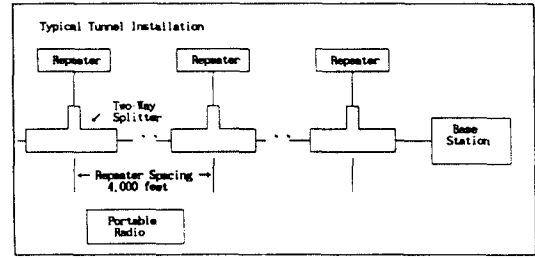
표 3. 결합손실 측정 기준

회사명	결합손실 기준
Andrew	케이블로부터 6.1 m
Hitachi	" 1.5 m
Alcatel	" 1.5 m
Kabel Metal	" 2.0 m
Nokia	" 6.1 m
Huber Suhner	" 4.0 m
Cablewave	" 6.1 m

표 3은 결합손실 측정거리의 몇 가지 기준을 소개하고 있다.

• 장소에 따른 케이블 설치 예
건물이나 배

먼저 RF커버가 요구되는 영역을 먼저 정의한다. (가령, 중앙 복도만 커버하고 사무실이나 회의실과 같은 곳은 피한다.) 그리고 케이블 주위 이상 물질로부터 방해받지 않는 곳으로 신호 전파가 자유롭지 못한 곳은 피해야 한다. 건물내에서 케이블을 사용하기 위해서는 내부가 비금속인 승강기와 같은 장소에 수직으로 설치하는 것이 바람직하다. 균일한 RF커버를 제공하기 위해 승강기는 되도록 건물 내부의 중앙에 위치하는 것이 좋다. 단면적이 넓은 건물에서는 필요에 따라 하나 이상의 수직 케이블을 쓸 수 있다. 기타의 복잡한 구성으로 인하여 한 층의 RF 커버가 적절한지 여부를 가늠하는 것은 어렵기 때문에 한 층에 일단한 방사 케이블을 설치하고 신호 세기를 그 층의 곳곳에서 측정하여야 한다. 가능하다면 이론적 해석을 통해 설계를 한다면 매우 이상적이라 생각한다.



(b)터널 내부의 동축 슬롯케이블 설치 형태

그림 8. 장소에 따른 동축 슬롯케이블의 설치예

터널/ 지하철/ 갬도

이들 장소의 공통점은 한 방향으로 매우 긴 거리를 가지지만 단면적이 일정하게 제한되어 있다는 점이다. 따라서 이동 통신장비가 대체로 케이블 가까이 위치하게 되므로 이러한 곳에는 방사와 감쇠율이 낮은 케이블이 적합하다. 그리고 케이블의 위치는 천정 높은 곳에 위치시켜 통신 장애의 가능성을 최소화 시킨다.

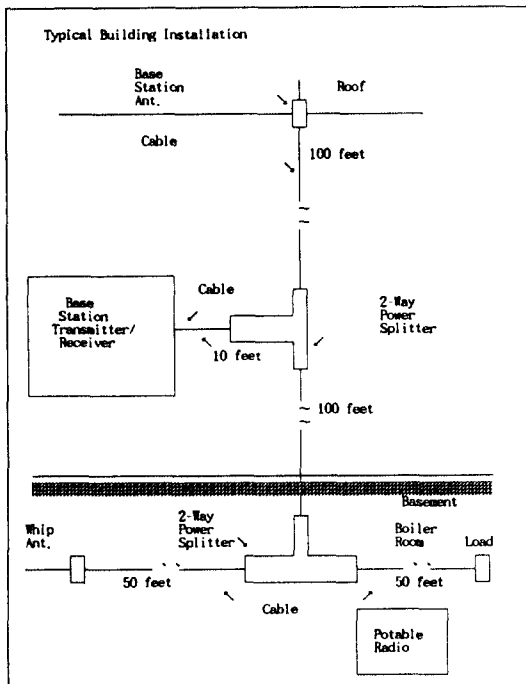
III. 결 론

지금까지 장소에 구애됨이 없이 자유로운 무선이동 통신을 위해 고안된 동축 슬롯케이블에 대한 제반 특성 및 설치와 관련된 사항들을 간단히 살펴보았다.

현재까지 이론적 측면에서의 해석은 아직 측정을 대신할 만큼의 발전을 하고 있지는 않다. 그러나 최적의 distributed 통신 시스템을 구축하기 위해 앞으로도 반드시 요구되는 사항이 이론적 뒷받침이라 생각한다. 그러한 관점에서 볼 때 건물 통로의 불연속 부분에 의한 모드 전환과 감쇠량, 밀딩 벽이 완전도체가 아니므로 표면효과와 고려와 그 전파계를 해석하는데 있어 고주파 영역에서 차단주파수에 따른 고차모드의 선형적 결합에 대한 상세한 연구가 요구된다고 본다.

참 고 문 헌

1. R. A. Hurd, "The modes of an axially slotted coaxial cable waveguide," Radio Sci., vol.14, no.5, pp.741-751, Sept.-Oct. 1979.
2. E. E. Hassan, "Field solution and propagation characteristics of monofilar-bifilar modes of axially slotted



(a)건물내부의 동축 슬롯케이블 설치 형태

- coaxial cable," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-37, pp.553-557, Mar. 1989.
3. J. R. Wait, "Electromagnetic theory of the loosely braided coaxial cable: part 1," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-24, pp.547-553, Sep. 1976.
 4. P. Delogne and A. Laloux, "Theory of the slotted coaxial cable," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-28, pp.1102-1107, Oct. 1980.
 5. P. Delogne and L. Derick, "Underground use of a coaxial cable with leaky sections," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-28, pp.875-883, Nov. 1980.
 6. L. Deryck, "Natural propagation of electromagnetic waves in tunnels," IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. VT-27, no.3, pp.145-150, Aug. 1978.
 7. P. Delogne, "EM propagation in tunnels," IEEE Trans. Antennas Propagat. vol. AP-39, pp.401-406, Mar. 1991.
 8. N. Marcuvitz, Waveguide Handbook, McGraw-Hill, Inc. 1984.
 9. John D. Krous, "Electromagnetics," McGraw-Hill, Inc. 1985.
 10. Lawrence N. Dworsky, Modern Transmission Line Theory and Applications, John Wiley & Sons, Inc. 1979.

본 연구는 체신부, 한국전기통신공사의 후원으로 이루어졌습니다



김 정 기

박 경 환

- 1985년 2월 : 중앙대 전자공학과 학사
- 1987년 2월 : 중앙대 전자공학과 석사
- 1990년 7월 : 중앙대 전자공학과 박사
- 현재 : 부천전문대학 전자통신과 교수

- 1942年 5月 5日生
- 1965年 2月 : 延世大學校電氣工學科卒業
- 1969年 2月 : 延世大學校大學院電氣工學科(工學碩士)
- 1975年 2月 : 延世大學校大學院電氣工學科(工學博士)
- 1970年 3月 ~ 1977年 2月 : 光云工科大學校 副教授
- 1977年 3月 ~ 現在 : 中央大學校電子工學科 教授
- 1982年 12月 ~ 1983年 12月 : 美京大學校 客員教授