論文98-35T-6-14

이동통신용 슬리트안테나

(Slit Antenna for Mobile-communication)

李 相 檜 *

(Sang-Hoi Yi)

요 약

본 연구는 통신용 안테나로서 휨 특성과 외부 도체와 거리 영향을 받지 아니하는 슬리트 안테나를 연구 개발하였다. 개발방법은 슬리트 동축선 구조에 대한 누설 전자장 특성을 이용하여 전자통신시스템용 이동통신 주파수대역(800-900㎒) 안테나로 개발 설계하며, 전용소프트웨어를 사용한 컴퓨터시뮬레이션하였다. 안테나의 사용 대역 851㎒에서 반사계수 S11이 0.21과 지향성 2.9 및 주파수 대역 1.5㎒을 갖는 우수한 결과를 보인다.

Abstract

It is a good flexibility of bending body and non-interaction of outer bodies for slit antenna to be being studied and developed in this paper. The characteristics of leaked EM waves in slit transmission line are applied to antennas of tele-communication systems. The computer simulations using a special software adapt to design a new slit antenna, and to apply to tele-communications systems with frequencies of land mobile communication (800-900㎒). The good results of which reflection coefficient S11 is 0.21 and directivity is 2.9 and band-widths are 1.5㎒ in 851㎒ are shown.

Ⅰ. 서 론

최근 이동통신의 사용이 폭발적으로 증가하면서 통화에 대한 욕구는 어떠한 장소나 시간에 구애받지 않고 통화 할 수 있는 서비스 기술을 요구하고 있다. 그러나 통화 품질이 향상되어도 건물내, 지하상가, 터널 등에서 송수신 불가능한 지역이 존재하고 있다.

현재 이러한 통화 불통지역에서 이동통신에 의한 통화 욕구를 충족하기 위한 연구는 활발하게 진행되고 있다. 그중 대표적인 예로서 누설 동축선 안테나(leaked coaxial line antenna)[1]의 연구를 들 수 있다. 이 안테나 시스템은 전파의 전파(傳播) 불능 지역인 빌딩내부, 지하상가, 터널, 광산 등과 군사 항공용으로 레이더 시스템, 지상유도 수송시스템 등에서 송신용으로 광범위하게 행해지고 있다. 또한 누설 동축선 안테나 중 슬롯안테나(slot antenna)의 시판 제품은 Heliax[3]라는 상표로 미국 Andrew 회사에서 생산하고 있으며, 국내에서는 터널에서 AM/FM 송신용 안테나로 사용되고 있다.

누설 동축선은 모든 신호 에너지가 일정한 경로를 따라 유도되는 개방형 전송선로이며, 차폐된 동축선 외부도체에 일정 길이의 슬롯이 있어 외부로 전자장을 형성하여 피더와 안테나 성질을 동시에 갖는 특징이 있다. 누설 동축선 안테나는 아직 송신부분의 연구만 이루어지고 수신부분의 연구는 계속되고 있는 상태이다.[1]

이론적인 해석은 1970년대부터 Hill, Wait, Delogne, Hu 등에 의하여 연구되었다. AT&T Bell 연구소에서는 빌딩 내부의 통신을 위해 단일 안테나, 슬롯안테나, 어레이 안테나 등에 의한 RF대역 수신

* 正會員, 동서울大學 電子科

(Dept. of Electronics Dong Seoul College)

※ 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

接受日字: 1998年4月18日, 수정완료일: 1998年6月8日

강도를 비교 측정 연구하였으나 기존의 방법으로는 RF주파수 대역의 통신이 불가능했다. 현재 상용되는 동축선 안테나는 동축선 외부표피 도체를 일정 간격으로 슬롯을 가하고 계속적인 전력의 공급으로 송신 기능만을 하고 있다. Pogorzelski, Wait는 이 안테나의 전파특성에 대해 터널이나 건물 안에서 동축선 직경을 고려하지 않은 가는선 안테나 해석 방법을 이용한 내부의 특성모드를 해석하였다. 그러나 주파수가 증가할수록 전력손실을 고려한 안테나 직경 관계는 좀더 복잡한 관계식을 필요로 하게 된다. 최근에는 Delogne[3], Hassan 등에 의해 동축선 해석이 이루어지고 있으나 실제 사용되고 있는 구조의 누설 동축선에 대한 해석은 완전하게 표현되지는 못하고 있다. 또한 이 안테나를 건물내부나 터널에 설치할 때 외부 도체가 전파특성에 미치는 영양 등에 대한 고려가 필요하며, 현재 시판되고 있는 동축선 안테나는 대전력 송신용으로 실험적 방법에 의해 만들어진 것이다.

본 연구는 이러한 누설 동축선 안테나의 전파 전파원리를 기초로 하였다. 기본 원리는 자동차의 앞 유리면과 차량 몸체 사이의 틈새에서 안테나 선이 진행한다면 동축케이블에 한면을 개방한 슬리트 구조가 될 것이다. 이 개방면으로 통신이 가능하다면 안테나를 외부로 노출시키지 않고 사용할 수 있다.

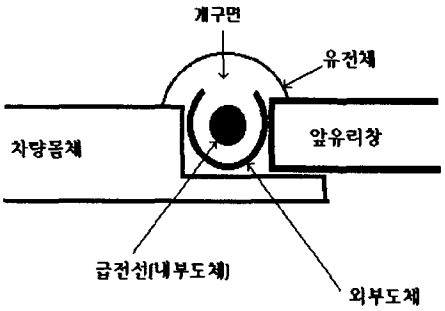


그림 1. 슬리트안테나의 설치위치 및 물리적 구조
Fig. 1. Location site and mechanism of slit antenna.

예로 차량 안테나의 위치를 기존의 위치에서 차량 앞유리창과 차량 몸체 틈새로 이동한다면 물리적 구조가 그림 1에서 보인 것처럼 이 틈새에 안테나선을 통과시키는 것이 동축선의 구조와 동일하게 될 것이다. 이러한 동축선의 구조를 슬리트안테나(slit antenna)[4]라 칭한다.

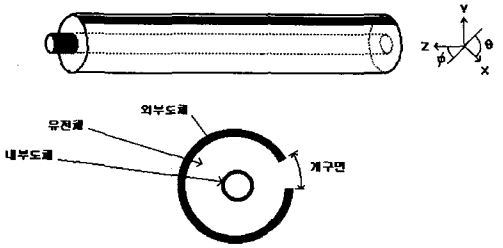


그림 2. 슬리트안테나 구조
Fig. 2. Schematic of slit antenna.

그림 2에서 보인 슬리트안테나의 구조는 슬롯안테나의 구조와 유사하나 개구면이 구조물에서 연속으로 진행하여 슬롯 구조와는 구분된다. 이때 안테나의 개구면은 슬롯 형태로 진행방향이 대칭축에 비교하여 매우 길므로 슬롯에 의한 전자파 모드가 형성되는 것이 아니라 진행 방향에 대한 개구면에 전력의 누출이 될 것이다. 이것이 슬롯 안테나와 분명히 다른 점이다. 유사한 유추로 개구면각이 180 °이고 동축선 단면이 무한히 큰 경우 마이크로스트립 안테나 형태가 될 것이나, 누설 전자파의 전자파 특성은 마이크로스트립 안테나의 전자파 특성과 분명히 다른 동작을 하게 된다.

본 연구는 동축선의 슬리트 단면 구조를 이론적으로 해석하여 전자파 누설에 의한 복사 현상을 증명하며, 안테나 구조물에 적용하여 이동통신 주파수대역(800-900㎒)에서 사용할 수 있는 최적의 슬리트 안테나를 설계 제작하였으며, 설계 전용 소프트웨어는 Ansoft사의 maxwell hfss를 이용하였다.

Ⅱ. 슬리트 안테나 구조의 수식화

1. 단면구조의 경계조건

해석 모델은 직선형 슬리트 동축선 구조 단면으로 수치해석을 통하여 이 구조물의 개구면에서 전압과 전류를 계산하고, 개구면을 소스로 하여 원거리 복사패턴을 구한다. 이때 개구면을 선 안테나(linear antenna)와 동일한 형태로 가정하게 된다.

내부 도체에 급전(V_o)할 경우 슬리트 동축선 단면과 개구면을 그림3에서 5개 영역으로 구분하여 표시하도록 한다. 즉 각 단면은 개방 부분을 우선 2차원 단면으로 하여 급전되는 내부도체의 개방면(1면), 내부도체와 외부도체 사이의 공간인 유전체면(2면), 안테나 외부의 자유공간(3면), ABC조건을 만족하는 공간(4

면)[5], 외부도체의 슬리트 개방면(5면)으로 한다.

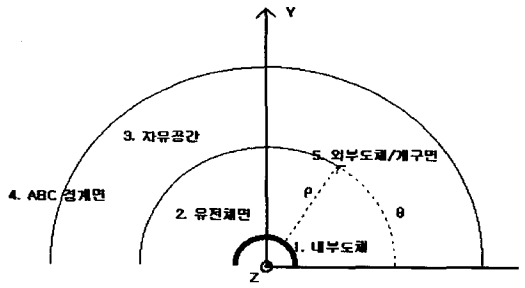


그림 3. 경계면을 포함하는 슬리트 동축선 단면
Fig. 3. Cross-section of slit transmission line with boundary.

이들 5개의 영역은 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

① 내부도체의 개방면 1영역

$V_f = V_0$

$J_{z,\phi} \neq 0$

$J_\rho = 0$

② 내부개방 유전체면 2영역

$V_f = -C_1 V_0$ (C_1 :상수)

$J_{z,\phi} = 0$

$J_\rho \neq 0$

③ 자유공간 3영역

$V_f = 0$

$J_{z,\phi} \neq 0$

$J_\rho \neq 0$

④ ABC 조건 4영역

주파수 파장 10λ 이상의 거리

$V_f = 0$

$J_{z,\phi} \neq 0$

$J_\rho \neq 0$

⑤ 개구면 5영역

$V_f = F(w)$

여기서 V_f는 경계면의 전압크기를 나타내며, V_0은 급전전압, J는 경계면에 유기되는 전류밀도를 나타낸다. $F(w)$는 삼각함수로 중앙값은 $\frac{1}{4}V_0 < V_f < \frac{1}{2}V_0$에서 수렴하는 값으로 한다.

이 값들은 이론값에 의한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과로서 이것을 이용하여 폐경계면 1,2,5를 이루는 경계의 전압값을 구한다. 즉 개구면 5면의 전압을 구한다.

2. 수 식 화

앞에서 유도된 단면 경계에서 전압은 $\boldsymbol{E} = -\nabla\phi - j\omega\boldsymbol{A}$의 $-\nabla\phi$ 값으로 대체할 수 있으며 $-j\omega\boldsymbol{A}$ 는 경계조건에 의해 지정된다.

최종적으로 개구면(5면)에 유도되는 $E_{\rho,\phi,z}$ 을 ρ, ϕ, z 로 구분하여 다음과 같이 유도한다.

그림 3에서 개구면의 전계 E_ρ를 구하기 위해 전계 방정식에 대입하여 연립방정식 형태를 만들면

$$E_{\rho 1} = -\nabla_{\rho 1} V_1 - j\omega\mu \int_1 J'_{\rho 1} G\ ds' - j\omega\mu \int_2 J'_{\rho 2} G\ ds' - j\omega\mu \int_5 J'_{\rho 5} G\ ds' \quad (1)$$

$$E_{\rho 2} = -\nabla_{\rho 2} V_2 - j\omega\mu \int_1 J'_{\rho 1} G\ ds' - j\omega\mu \int_2 J'_{\rho 2} G\ ds' - j\omega\mu \int_5 J'_{\rho 5} G\ ds' \quad (2)$$

$$E_{\rho 5} = -\nabla_{\rho 5} V_5 - j\omega\mu \int_1 J'_{\rho 1} G\ ds' - j\omega\mu \int_2 J'_{\rho 2} G\ ds' - j\omega\mu \int_5 J'_{\rho 5} G\ ds' \quad (3)$$

여기서 $J_{\rho 1} = 0$이고, $J_\rho = j\omega\varepsilon E_\rho$ 이므로 식 (1,2,3)을 정리하여

$$E_{\rho 1} = -\nabla_{\rho 1} V_1 - j\omega\mu \int_2 (j\omega\varepsilon E'_{\rho 2})\, G\ ds' - j\omega\mu \int_5 (j\omega\varepsilon E'_{\rho 5})\, G\ ds' \quad (4)$$

$$E_{\rho 2} = -\nabla_{\rho 2} V_2 - j\omega\mu \int_2 (j\omega\varepsilon E'_{\rho 2})\, G\ ds' - j\omega\mu \int_5 (j\omega\varepsilon E'_{\rho 5})\, G\ ds' \quad (5)$$

$$E_{\rho 5} = -\nabla_{\rho 5} V_5 - j\omega\mu \int_2 (j\omega\varepsilon E'_{\rho 2})\, G\ ds' - j\omega\mu \int_5 (j\omega\varepsilon E'_{\rho 5})\, G\ ds' \quad (6)$$

식 (4,5,6)을 변환하여

$$0 = B_1 + E_{\rho 1} + L_{12}E_{\rho 2} + L_{15}E_{\rho 5}$$

$$0 = B_2 + 0 + (L_{22} - I)E_{\rho 2} + L_{25}E_{\rho 5}$$

$$0 = B_5 + 0 + L_{52}E_{\rho 2} + (L_{55} - I)E_{\rho 5}$$

메트릭스 변환하면

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U & L_{12} & L_{15} \\ 0 & (L_{22}-I) & L_{25} \\ 0 & L_{52} & (L_{55}-I) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{\rho 1} \\ E_{\rho 2} \\ E_{\rho 5} \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

이며, U와 I 메트릭스는 다음과 같다.

$$U = \begin{bmatrix} 1\,0\,0\,\ldots 0 \\ 0\,1\,0\,\ldots 0 \\ \cdots\cdots \\ 0\,0\,0\,\ldots 1 \end{bmatrix} \qquad I = \begin{bmatrix} 1\,1\,1\,\ldots 1 \\ 1\,1\,1\,\ldots 1 \\ \cdots\cdots \\ 1\,1\,1\,\ldots 1 \end{bmatrix}$$

여기서 L은 오퍼레이터로 L, L-1 형태는 각각 휴레드홀름(Fredholm) 1종, 2종 적분방정식 형태를 만족하여 전계 $E_{\rho 1,2,5}$를 구할 수 있다..

전계 E_ϕ 성분은 전계 E_ρ를 구하는 과정과 동일하게 경계조건 $\nabla_{\phi 1} V_1 = 0, \nabla_{\phi 2} V_2 = 0$, $E_{\phi 1} = 0$, $E_{\phi 2} = 0$, $J_\phi = j\omega\varepsilon E_\phi$ 조건을 만족하는 다음과 같은 메트릭스 식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U & L_{11} & L_{15} \\ 0 & L_{21} & L_{25} \\ 0 & L_{51} & (L_{55}-I) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{\phi 1} \\ J_{\phi 1} \\ E_{\phi 5} \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

이상의 과정을 통하여 미지수 $J_{\phi 1}$, $E_{\phi 5}$를 구한다.

전계 E_z 성분도 전계 E_ϕ와 전계 E_ρ를 구하는 과정과 동일하게 각면에서 경계조건 $J_z = j\omega\varepsilon E_z$, $\nabla_{z1} V_1 = 0, \nabla_{z2} V_2 = 0, E_{z2} = 0$ 대치하여 메트릭스 식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U & L_{11} & L_{15} \\ 0 & L_{21} & L_{25} \\ 0 & L_{51} & (L_{55}-I) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{z1} \\ J_{z1} \\ E_{z5} \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

이상의 과정을 통하여 미지수 J_{z1}, E_{z5}를 구한다.

최종적으로 개구면(5면)의 전계 $E_{\rho 5}$, $E_{\phi 5}$, E_{z5}를 선별하여 이것을 소스로하여 슬리트 동축선 단면의 전자파 특성을 계산한다.

Ⅲ. 수치해석 결과 및 검토사항

1. 2차원 단면

슬리트 동축선 단면은 개구면에 대한 전자파 복사를 수식(7)(8)(9)으로 경계면의 전계 E와 전류밀도 J를 구하게 된다. 이것을 바탕으로 경계면 구역내의 전계는 경계면을 소스로 하고 구역내의 값은 수식 $\boldsymbol{E} = -\nabla\phi - j\omega\boldsymbol{A}$를 사용하여 구한다. 그림 4는 슬리트 동축선에서 E_ρ를 표시한다.

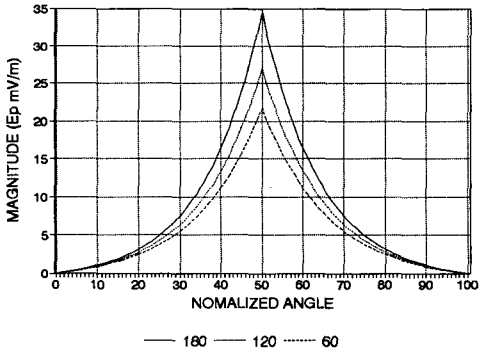
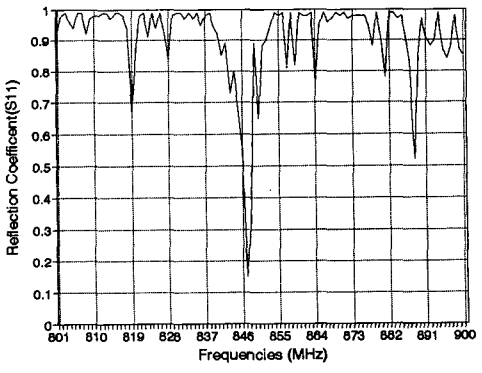


그림 4. 동축선 슬리트면에서 전계 E_ρ
Fig. 4. Magnitude E_ρ at slit boundary in transmission line.

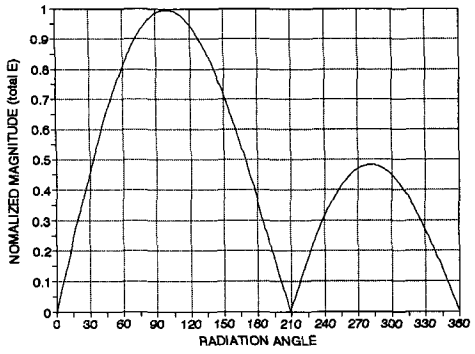
이 결과에서 내부도체에 급전한 전력은 외부도체 개구면을 통하여 복사되는 것을 보이고 있다. 개구면 각이 60° 로 개방되는 경우 최대값은 중앙 30° 에서 2.3×10^{-2} [V/m]이며 양측 끝면에서는 0[V/m]이 된다. 개구면 각이 120° 개방될 경우 최대값은 6.4×10^{-2} [V/m], 개구면 각이 180° 개방될 경우 최대값은 1.2×10^{-1} [V/m]으로 개구면이 클수록 외부로 유출되는 전계는 크지만 비례관계는 성립하지 않는다. 개구면으로 유출되는 전력의 수식화를 이해 동축선의 내경과 외경비를 포함하는 개구면의 전력 유출에서는 별다른 수식화를 기대할 수는 없었다. 다만 다음에 표시할 안테나의 경우 길이와 내경 및 외경의 조정이 안테나 복사 효율에 많은 함수 관계를 나타내고 있었지만 수식화는 못했다.

2. 슬리트안테나 구조

기본 구조에서 내경×외경×길이 비를 4.35×10×160㎜, 슬리트 개구면각을 180° 로 하여 동축선직경의 반을 제거한 슬리트 구조물이다. 내부면은 유전체가 아닌 공기(ε_r = 1.0)로 채워진 경우 800-900㎒에서 컴퓨터 시뮬레이션한다. 이 과정은 슬리트 안테나의 내경과 외경 및 길이의 비례관계를 도출하기 위한 것으로 내경 대비 외경의 비가 크면 용량성 저항 성분이 크며, 내경 대비 외경의 비가 줄어들면 리액턴스 성분이 커지게 될 것을 기대한다. 이 경우 최적 임피던스를 50Ω으로 한다면 반사계수 S_{11} 성분이 0에 가까운 값으로 수렴하게 될 것을 기대하고 있다. 이때 시뮬레이션 프로그램은 반사계수에 대한 허용 오차를 ±0.03으로 한다.



(a)



(b)

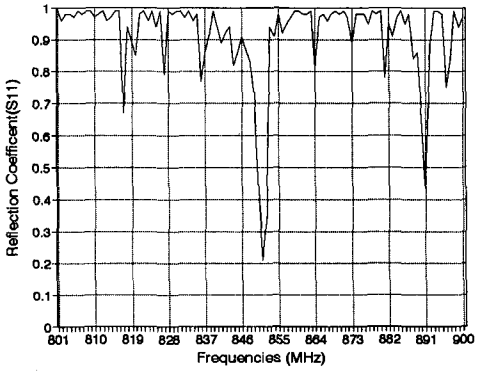
그림 5. 슬리트안테나의 복사 특성 (4.35×10×160㎜, 800-900㎒) (a) 반사계수 (b) 복사특성

Fig. 5. Radiation of slit antenna at 4.35×10×160 ㎜ in 800-900㎒ (a) reflection coefficient (b) radiation power

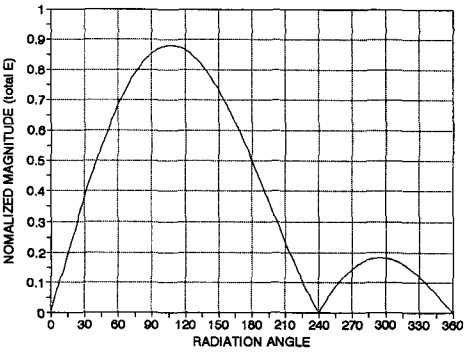
그림 5(a)는 800-900㎒ 주파수 범위에서 주파수 도약을 1㎒씩으로 하고 입력포트는 1W의 전력을 50Ω 급전하여 반사계수 S_{11} 성분을 보인 것이다. 안테나 길이는 모노폴 안테나로 ¼파장으로 하고, 내경에 대한 외경비는 0.435로 하여 일반 동축선의 급전비를 사용한다. 대부분 주파수에서는 반사계수가 1에 가까운 값이나 847㎒ 주파수에서는 0.33 이하의 값으로 대역폭은 1.2 ㎒ 정도이다. 이때 복사전력 패턴을 그림 5(b)에서 표시하였다. 여기서 특이한 사항은 전계 E_z가 E_x, E_y에 비교하여 크게 존재한다는 것이다. 즉 진행방향 z축에 대한 E_y 성분은 θ=90° 일때로 최대 전계값 E_{MAX}를 예측할 수 있으나 실제 최대 전계값 E_{MAX}는 θ=98° 와 φ=53° 일 때 벡터 합성값으로 지향성은 2.6이 된다. 복사전력은 2.6×10^{-1} W로 -5.85 dB의 효율을 갖는다. 다음 단계로 길이를 조정하고 슬리트 안테나 내부에 공기 대신 유전체(ε_r = 2.3)를 채워 내경과 외경비를 조절하여 최적의 안태나를 설계하고 그림 6에 복사특성을 나타냈다

실험 측정은 4.35×10×107㎜, 180° 개구면 슬리트 구조로 한다. 그림 6(a)은 800-900㎒에서 반사계수 S_{11} 값으로 851㎒에서 0.33 이하의 값으로 SWR이 2.0 이하가 된다. 주파수 대역폭는 1.5㎒이다. 여기서 최대 전계값 E_{MAX}는 θ=107° 와 φ=52° 일 때 벡터 합성값이며 지향성은 2.9이고, 복사전력은 2.2×10^{-1}W로 -6.58 dB 효율로 내부가 공기일때보다 지향성은 넓어지지만 전력 복사 효율은 89%로 감소한다. 또한 891㎒에서 S_{11}이 0.42로 반사계수를 더 낮출수 있다면 송수신 겸용 이동통신용 안테나가 될 것이다.

또한 끝단효과를 최소화 할 수 있는 방법은 안테나 길이를 조절하지만 내외경 값이 커지면 E_z 값이 감소하고 E_x 과 E_y 값이 커지므로 지향성이 달라지게 된다. 이 경우 사용 목적에 따른 지향성을 조절하면 될 것이다. 추후 끝단의 전류값을 0으로 맞출 수 있는 방법은 계속적인 연구가 필요하다.



(a)



(b)

그림 6. 최적의 슬리트안테나의 복사 특성 (4.35×10 ×107 ㎜, 800-900㎒) (a) 반사계수 (b) 복사특성

Fig. 6. Radiation of optimized slit antenna in 800-900㎒ (a) reflection coefficient (b) radiation power.

최종적으로 임의의 슬리트안테나 단면 크기를 증가시킬 경우 충분한 주파수 대역폭을 얻을수 있을 것으로 평가되나 내경과 외경 및 길이에 대한 정량화된 수식화는 이루지 못했으며, 외경에 비하여 내경이 커질때 용량성 임피던스의 증가하며, 반대로 내경이 줄어들 때 리액턴스가 증가하게되고, 이러한 위상지연을

없애는 경우에도 저항값이 거의 0에 가까운 값으로 나타났다. 그러나 특정 주파수에서는 입력 임피던스 50 Ω에 가까운 저항값(반사계수 $S_{11} \leq 0.33$, SWR≤2.0)을 유지할 수 있었다.

Ⅳ. 결 론

본 연구는 자동차 앞 유리창과 몸체 사이에 밀착할 수 있는 안테나 구조물을 기본 원리로 하여 밀착형 안테나 시스템을 구현한 것이다. 기본적으로 슬리트 동축선 단면 구조에서 전자파 전력이 외부로 복사되는 것을 확인하였으며 이를 바탕으로 슬리트안테나를 설계하였다. 이때 안테나의 특성은 슬리트 개구면으로 단방향 전력 복사되며 851㎒에서 반사계수 S_{11}=0.21 (SWR=1.53), 주파수 대역폭 1.5㎒, 지향성 2.9, 복사 전력 2.2×10^{-1}W로 -6.58 dB 전력 복사 효율의 우수한 복사특성을 확인하였다. 또한 891㎒에서 S_{11}이 0.42로 반사계수를 더 낮출수 있다면 송수신 겸용 이동통신용 안테나가 될 것이다.

그러나 슬리트 구조의 이론적인 수식화는 계속적인 보완을 필요로 하며, 이를 바탕으로 새로운 슬리트 안테나 시스템을 개발할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김정기, 누설 동축 케이블의 전자파 특성 해석(최종보고서), 한국전자통신연구소, 1994

[2] P.P.Delogne and A.A.Laloux, "Theory of the slotted coaxial cable," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol, MTT-28, pp. 1102-1107, 1980.

[3] -, Heliax 95 Technical manual, Andrew co-operation, 1995.

[4] 이상회, 슬리트안테나, 특허출원 95-41515, 1995.11.

[5] B.Enquist and A.Majda, "Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves," Math. Compat., vol. 31 no. 139, pp.629-651. July 1977.

[6] R.F. Harrington, Time Harmonic Electromagnetic fields. New York: McGraw-Hill, chapt. 8, 1961.

[7] Samuel Silver, *MICROWAVE ANTENNA THEORY AND DESIGN*, Peter Peregrinus Ltd., chapt. 5-6, 1986.

[8] R.H.Clarke and J.Brown, *DIFFRACTION THEORY AND ANTENNAS*, John Wiley & Sons, chapt. 3, 1980.

저 자 소 개

李 相 檜(正會員)

1958년 9월 3일 생. 1983년 2월 중앙대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사). 1985년 2월 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1989년 2월 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1993년 8월-1994년 8월 London Unv. Academic Visitor(Post- Doc.연수). 1989년 3월-현재 동서울대학 전자과 교수. 현재: 한국쉬즈라인(주), 제이슨테크(주), 예빛산업(주) 기술 고문. 주연구분야: EMC, 안테나공학