

구형 및 원형 Aperture에서의 회절현상

(The Diffraction Phenomena on Rectangular and Circular Apertures)

洪 義 錫*, 吳 一 德**

(Ui Seok Hong and Eel Deok Oh)

要 約

여러가지 형태의 개구면에 대한 전자파의 회절현상을 Kirchhoff 및 Fresnel 회절이론을 이용하여 해석하였다. 개구면의 파라미터들의 변화에 따른 전자파의 신호의 세기를 컴퓨터를 이용 수치해석적으로 계산하였다. 실험데이터를 얻기 위해서는 아크릴판 상에 개구면을 만들었으며 판의 표면에는 반사 및 투과를 방지하기 위해서 그 표면에 Elecoat 라는 특수도료를 칠하였다. 송수신 안테나로는 Yagi 안테나를 사용하였으며 사용된 주파수는 820MHz였다. 이론치와 실험치는 잘 일치함을 볼 수 있었고 이러한 결과는 도심지 내의 건물과 건물사이를 진행중인 차량의 이동통신을 위한 시스템 설계시 유용한 자료로 사용될 것이다.

Abstract

For many different types of apertures the diffraction phenomenon on the electromagnetic wave is analyzed by using Kirchhoff and Fresnel's diffraction theory. The signal intensity in variation of aperture's parameters is numerically calculated by a computer. To obtain the experimental data many types of apertures were made on an acryl board on which a special material Elecoat was painted for preventing some reflections on the board surface and transmissions through it. Two Yagi antennas were used for a transmitting and receiving antenna and the frequency was 820MHz. The theoretichal values agreed reasonably with experimental data and these results will be used for a system design in the mobile communication between many buildings in the middle of a city.

I. 서 론

지상을 운행중인 차량과 차량간의 이동통신이나 통신위성을 이용한 이동통신의 경우 가장 문제가 되는 것중 하나는 여러가지 지형지물에 의한 신호감쇠이

다. 이러한 장애물의 크기와 형태에 따라서 전자파의 회절정도가 달라지게 되므로 원만한 이동통신을 위해서는 지역이나 지형에 대한 정확한 정보가 필요하게 된다.

지금까지 발표된 대부분의 논문에서는 통신로상에 나타나는 장애물 (obsacle) 중 숲이나 수목들로 인한 전자파의 감쇠를 측정데이터를 근거로 근사식만을 유도하였다!¹⁻³ 특히 Goldhirsh와 Vogle은 land-mobile satellite system에서 UHF대의 주파수로 인한 가로변의 수목으로 인한 신호감쇠를 측정하였고,⁴ LaG-

*正會員, 光云大學校 電子通信工學科
(Dept. of Telecomm., Eng., Kwangwoon Univ.)

**正會員, 大田工業大學 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Taejon Nat'l Univ. of Tech.)
接受日字: 1989年 9月 18日

rone 과 Chapman 은 수목들로 인한 전자파의 전파 특성을 조사하였다.⁽⁵⁾ 또한 Vogel 과 Hong 은 임의 형태의 장애물로 인한 신호감쇠에 대하여 Fresnel 회절 이론을 이용하여 새로운 이론식을 유도하고 그 결과를 실험치와 비교해 봄으로써 이론의 타당성을 입증하였다.^(7,8)

본 논문에서는 이동중인 차량이나 무선전화기를 소지한 사람이 건물 밀집지대를 이동 중 발생하는 신호감쇠의 원인인 회절현상을 해석하고자 한다. 이때 건물과 건물사이를 송·수신사이에 놓인 개구면(aperture)으로 가정할 수 있을 것이다. 이러한 가정하에 개구면(aperture)의 크기나 형태에 따른 전자파의 회절현상을 Kirchhoff 및 Fresnel diffraction 이론을 이용하여 새로운 이론식을 유도하고자 한다. 이와같이 해서 얻은 새로운 이론식을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 수치해석적으로 그 결과를 얻고 실험치와 비교함으로써 이론의 타당성을 입증하고자 한다.

II. 회절(diffraction) 이론

송·수신기 사이에 그림 1 과 같이 무한장의 obstacle 에 임의의 크기의 aperture 가 있는 경우를 가정하여 보자.

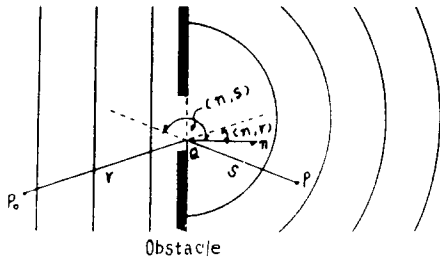


그림 1. Aperture에서의 회절현상
Fig. 1. Diffraction on by a small aperture.

여기서 Po는 Source Point, P는 Observation Point 이며 Po점과 Aperture 간의 거리를 r, Aperture와 P 점까지의 거리는 s이다.

Fresnel-Kirchhoff 회절공식에 의하여 P점에서의 전자파의 disturbance U(P)는 아래식으로 표시할 수 있음을 보여주었다.⁽⁶⁾

$$U(P) = \frac{-jA}{2\lambda} \iint_a \frac{\exp[jk(r+s)]}{rs} [\cos(n, r) - \cos(n, s)] dS \quad (1)$$

여기서 A는 상수이며 λ는 파장, k는 전파상수이고 a는 P점에서의 신호의 크기를 결정하기 위한 Aperture의 면적, cos(n, r) 및 cos(n, s)는 방향여현이다.

만일 Aperture로 부터 Po와 P사이의 거리가 Aperture의 직경보다 매우 크고, 또한 점 0가 Aperture내의 점이라 가정하면 선분 OPo와 OP가 PoP 선분과 만드는 각은 그다지 크지 않게 되므로 [cos(n, r) - cos(n, s)]는 2cos δ로 대체할 수 있다. δ는 개구면에 수직한 선분과 점 Po, P를 잇는 직선이 이루는 각이다.

반면에 면적소 dS가 적분영역 내에서 임의의 위치를 취할때 r+s는 일반적으로 수배의 파장 만큼 변하게 되고 그 결과 exp[jk(r+s)]는 매우 심하게 진동하게 될 것이다. 따라서 1/rs변수 만 1/r's' 으로 대체하면 식(1)은 다음과 같이 될 것이다.

$$U(P) = \frac{-jA}{\lambda} \frac{\cos \delta}{r's'} \iint_a \exp[jk(r+s)] dS \quad (2)$$

여기서 r'와 s'는 원점으로 부터 Po와 P사이의 거리이다.

1. 구형 Aperture에서의 회절현상

이동통신에서 건물과 건물사이, 가로수의 가지와 가지사이의 신호감쇠의 영향을 알아보기 위하여 Fresnel-Kirchhoff 회절공식을 이용하여 본 논문에서는 구형 Aperture에서의 회절이론을 유도하고자 한다. 그림 2 는 z=0인 x-y 평면에서 무한장의 Obstacle 에 유한한 구형 Aperture가 있는 경우이다. 여기서 δ는 PoP를 잇는 선분이 Z축과 이루는 elevation angle이다. 또한 a 및 b는 원점으로 부터 Aperture의 높이 및 폭을 나타낸다.

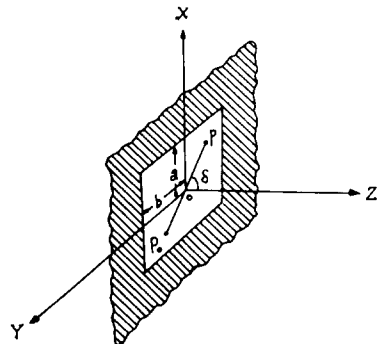


그림 2. X-Y평면상의 구형 Aperture
Fig. 2. A rectangular aperture on X-Y plane.

Aperture 내에 원점을 둔 직각 좌표계를 도입하고 변수를 적당히 변환하면 P점에서 전자파의 disturbance $U(P)$ 는 다음과 같이 표시된다.⁶⁾

$$U(P) = B (C + jS) \tag{3}$$

여기서

$$B = (-jA/\lambda) \cos \delta \{ [\exp jk (r+s)] / r' s' \}$$

$$C = d \iint \cos [(\pi/2) (u^2 + v^2)] dudv \tag{4}$$

$$S = d \iint \sin [(\pi/2) (u^2 + v^2)] dudv$$

이고 이 과정에서 Aperture 내의 직각 좌표변수 ξ 와 η 를 새로운 변수 u 와 v 로 아래와 같이 변환시켰다.

$$(\pi/\lambda) (1/r' + 1/s') \xi^2 \cos^2 \delta = (\pi/2) u^2$$

$$(\pi/\lambda) (1/r' + 1/s') \eta^2 = (\pi/2) v^2 \tag{5}$$

구형 Aperture로 인한 신호감쇠는 식(4)에서 적분구간을 구형 Aperture부분 영역에 대하여 취하면 된다.

$$-a < \xi < a, \quad -b < \eta < b$$

또는 u, v 의 항으로 나타내면

$$-w < u < w, \quad -t < v < t$$

여기서 변수 w 및 t 는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$w = [(2/\lambda) (1/r' + 1/s')]^{1/2} a \cos \delta$$

$$t = [(2/\lambda) (1/r' + 1/s')]^{1/2} b \tag{6}$$

식(5)의 회절적분을 Fresnel 적분의 성질을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = 4d [Ci (w) Ci (t) - Si (w) Si (t)]$$

$$S = 4d [Si (w) Ci (t) + Ci (w) Si (t)] \tag{7}$$

여기서 Ci 및 Si 는 아래와 같이 표시되는 Fresnel의 sine 및 cosine integral이다.

$$Ci (x) = \int_0^x \cos \left(\frac{\pi}{2} \tau^2 \right) d\tau$$

$$Si (x) = \int_0^x \sin \left(\frac{\pi}{2} \tau^2 \right) d\tau$$

전자파의 신호의 세기를 나타내는 $I(P)$ 에 B, C 및 S 를 대입하면

$$I(P) = |B|^2 (C^2 + S^2) \\ = 4 [Ci^2 (w) + Si^2 (t)] [Ci^2 (w)^2 + Si^2 (t)^2] I_0 \tag{8}$$

이 된다. 여기서 I_0 는 장애물이 없을때의 신호의 세기이며 다음과 같이 표시된다.

$$I_0 = 4 |B|^2 d^2 \frac{|A|^2}{(r' + s')^2} \tag{9}$$

이로 정규화 된 P점에서 신호의 세기는 다음과 같다.

$$I/I_0 = 4 [Ci^2 (w) + Si^2 (t)] [Ci^2 (t) + Si^2 (t)] \tag{10}$$

2. Rotation angle에 따른 회절 현상

다음으로 Fresnel-Kirchhoff 회절공식을 이용하여 중심축으로 부터 임의의 각 α 만큼 회전된 구형 Aperture에서의 신호의 세기를 유도하고자 한다.

구형 Aperture가 그림 3 과 같이 α 만큼 회전되었으므로 좌표변환을 시켜야 한다.

$$x = x' \cos \alpha - y' \sin \alpha \quad x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha \\ y = x' \sin \alpha + y' \cos \alpha \quad y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha \\ z = z' \quad z' = z \tag{11}$$

회전된 구형 Aperture로 인한 신호감쇠는 식(4)에서 적분구간을 회전된 구형 Aperture 부분 영역에 대하여 취하면 된다.

$$-a' < \xi < a', \quad -b' < \eta < b'$$

또한 u', v' 항으로 나타내면

$$-w' < u' < w', \quad -t' < v' < t'$$

여기서

$$w' = [(2/\lambda) (1/r' + 1/s') (1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \delta)]^{1/2} a' \\ t' = [(2/\lambda) (1/r' + 1/s') (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \delta)]^{1/2} b' \tag{12}$$

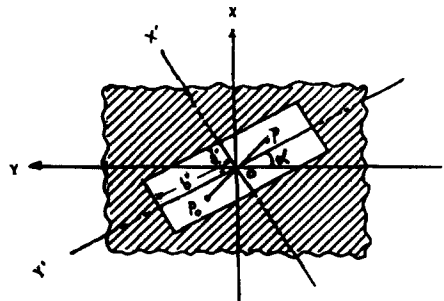


그림 3. 회전된 구형 Aperture
Fig. 3. A rotated rectangular aperture.

따라서 식 (4)의 회절적분을 Fresnel 적분의 성질을 이용하면

$$C = 4 d' [Ci (w') Ci (t') - Si (w') Si (t')]$$

$$S = 4 d' [Si (w') G (t') + Ci (w') Ci (t')] \quad (13)$$

여기서 $d' = (\lambda/2) [1/(r' + s')] \{ 1/[(1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \delta) (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \delta)] \}^{1/2}$ 이다. 신호의 세기 $I(P)$ 에 대입하면

$$I(P) = | B |^2 (C^2 + S^2)$$

$$= 4 I_0 \left[Ci^2 (w') [Ci^2 (t') + Si^2 (t')] + Si^2 (w') [Ci^2 (t') + Si^2 (t')] \right] \quad (14)$$

이 된다. 여기서

$$I_0 = 4 d'^2 | B |^2 = \frac{\cos^2 \delta}{(1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \delta) (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \delta)} I_0 \quad (15)$$

이고, 따라서 I_0 로 정규화된 P점에서 신호의 세기는 다음과 같다.

$$I/I_0 = \frac{4 \cos^2 \delta}{(1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \delta) (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \delta)} [Ci^2 (w') + Si^2 (w')] [Ci^2 (t') + Si^2 (t')] \quad (16)$$

3. 원형 Aperture에서 회절현상

Fresnel-Kirchhoff 회절공식에 의하여 원형 Aperture에서 회절이론을 유도해 보자. 그림 4는 $Z = 0$ 인 $X - Y$ 평면에 원형 Aperture가 있는 경우이다.

원점 0은 PoP 선상에 위치하고 있으며 원점 0에서 송·수신기까지의 거리를 각각 $r' s'$ 이라 하자.

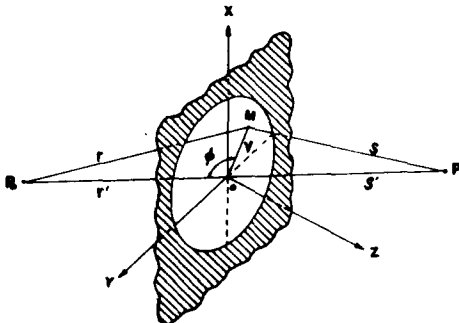


그림 4. X-Y 평면상의 원형 Aperture
Fig. 4. A circular aperture on X-Y plane.

Aperture 내의 임의의 점 M은 원점 0에서 M까지의 거리 V와 Y축이 선 OM과 이루는 각 ϕ 의 함수인 $M(v, \phi)$ 로 나타낼 수 있고 미소 면적소 $ds = v dv d\phi$ 가 된다. 따라서 r과 s를 식(2)에 대입하면 $U(P)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(P) = B (C + jS) \quad (17)$$

여기서

$$B = \frac{-Aj\cos \delta}{\lambda} \frac{4 r'^2 s'^2 \exp [jk (r' + s')] }{r' s'}$$

$$C = 2\pi \int_0^a \frac{\cos [\pi/\lambda (1/r' + 1/s') v^2] }{(v^2 + 2r'^2) (v^2 + 2s'^2)} v dv$$

$$S = 2\pi \int_0^a \frac{\sin [\pi/\lambda (1/r' + 1/s') v^2] }{(v^2 + 2r'^2) (v^2 + 2s'^2)} v dv \quad (18)$$

식(18)을 계산하기 위하여 v에 대한 적분식을 다음과 같이 놓는다.

$$Ci (a) = \frac{1}{2} \int_0^{a^2} \cos (Ap) \frac{1}{[p^2 + p(R + S) + RS]} dp$$

$$Si (a) = \frac{1}{2} \int_0^{a^2} \sin (Ap) \frac{1}{[p^2 + p(R + S) + RS]} dp \quad (19)$$

여기서 $A = \pi/\lambda (1/r' + 1/s')$

$$P = v^2$$

$$R = 2r'^2$$

$$S = 2s'^2 \quad (20)$$

이다.

I_0 로 정규화된 P점에서의 신호의 세기는 다음과 같다.

$$I/I_0 = 4 (ARS)^2 / (X^2 + Y^2) [Ci^2 (a) + Si^2 (a)] \quad (21)$$

$$\text{여기서 } X = \left(\frac{R+S}{ARS} \right) - 2 \cdot 3 \frac{(R^2+S^2+R^2S+RS^2)}{(ARS)}$$

$$Y = 1 - 2 \frac{(R^2+S^2+RS)}{(ARS)^2} + 2 \cdot 3 \cdot 4 \frac{(R^4+S^4+R^3S+SR^3+R^2S^2)}{(ARS)} + \dots \quad (22)$$

이다.

Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

송신 안테나에서 복사된 전파가 구형 및 원형 Aperture 에 의해서만 투과 되도록 하기 위하여 전파 차단장치는 3mm 두께의 아크릴 판을 사용하였으며, 송신 안테나는 10소자, 수신 안테나는 5소자 Yagi 안테나를 사용하였다. 또 전파 차단장치의 표면에는 무반사 및 무투과를 위해서 표 1 에서와 같은 특성을 갖는 AU 5107 의 Elecoat 라는 특수 페인트를 coating 하였다.

표 1. Elecoat 페인트의 특성

Table 1. Characteristics of Elecoat paint.

특종	성류	조성	색상	비저항 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	표면저항 (Ω / cm^2)	감쇠특성 (dB)
AU 5107	은동복합 아크릴계	은갈색	5*E-4 이하	0.2 이하	35-68 (0.5-1000MHz)	

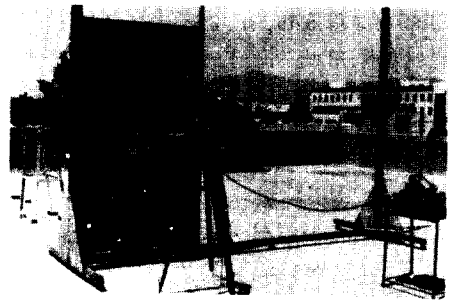
사진 1 은 송·수신 안테나 사이에 60cm × 60cm 크기의 구형 Aperture 가 놓인 실험장치를 보여주고 있으며 사진 2 는 회전된 구형 Aperture 의 크기가 40cm × 20cm 일 때의 실험장치이다.

이제 구형 Aperture 의 크기에 따른 신호변화에 대한 실험결과를 고찰하여 보자.

그림 5 (a) 는 송신 안테나와 Aperture 간의 거리 $R = 1.6\text{m}$, Aperture 와 수신 안테나간의 거리 $S = 0.4\text{m}$ 이고 그림 5 (b) 는 $R = 3.6\text{m}$, $S = 0.4\text{m}$ 이며 $f = 820\text{MHz}$, $\delta = 0^\circ$ 일때 Aperture 의 폭과 길이를 각각 5cm 씩 120cm 까지 변화시켰을 때의 신호변화를 측정하여 이론치와 비교한 것이다.

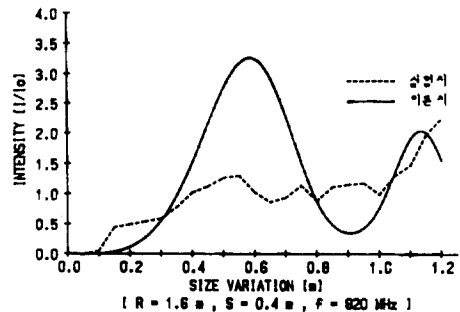


사 진 1. 60cm × 60cm Aperture 에 대한 측정장치
Photo 1. Experimental arrangement with 60cm × 60cm aperture.

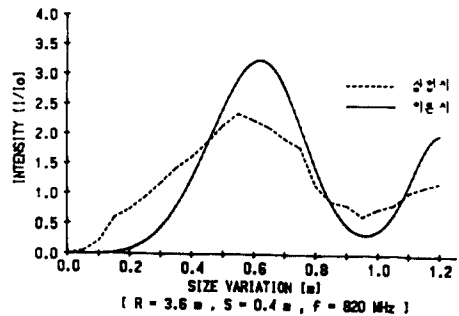


사 진 2. 40cm × 20cm 회전된 Aperture 에 대한 측정장치

Photo 2. Experimental arrangement with 40cm × 20cm rotated aperture.



(a)



(b)

그림 5. 구형 Aperture 의 크기 변화에 따른 신호의 세기

Fig. 5. The wave intensity according to the size variation of a rectangular aperture.

그림에서 종축은 I/I_0 를, 횡축은 Aperture 의 크기의 변화를 나타내며 실선은 이론치를, 점선은 실험치를 나타내고 있다.

그림 5 (a) 와 같이 송·수신기가 너무 근접해 있을 때의 수신신호의 세기는 이론치와 실험치 사이에 차

이가 있으나 그림 5 (b) 와 같이 송·수신기의 거리가 점차 멀어짐에 따라 이론치에 실험치가 근접해 감을 볼 수 있다. 또한 실험치가 이론치보다 왼쪽으로 편위되어 있음을 볼 수 있는데 이것은 측정장치를 설치해놓은 장소, 송·수신 안테나의 복사패턴 등에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

또한 구형 Aperture의 rotation angle 변화에 따른 신호변화를 고찰하여 보자.

그림 6 은 구형 aperture의 rotation angle α 를 0° 부터 180° 회전했을때의 실험치 및 이론치의 결과를 비교하고 있다. 여기서 그림 6 (a) 는 $R=3.6m$, $S=0.4m$ 이고 그림 6 (b) 는 $R=5.6m$, $S=0.4m$ 이다. 또한 Aperture의 크기는 가로 70cm, 세로 35cm이며 $\delta=0^\circ$ 이고 $f=820MHz$ 이다.

신호의 세기는 이론치에서는 Aperture가 좌표계의 중심에 놓여있기 때문에 α 에 무관하게 일정하지만 실험치에서는 안테나의 지향성으로 인해서 α 각에 따라 약간씩 변하고 있음을 알 수 있다. 이러한 지향성

의 영향은 송·수신기간의 거리가 멀어질수록 더 심해지는 것을 그림 6 (a) 와 (b) 를 비교해 보면 쉽게 알 수 있다.

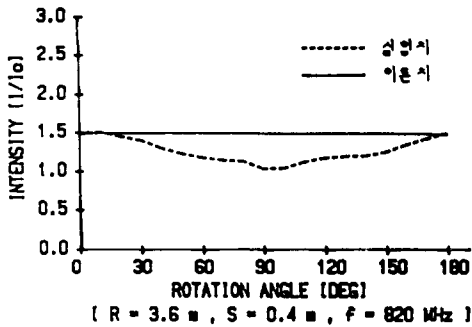
다음으로 원형 Aperture의 크기 변화에 따른 신호변화를 고찰해 보자.

그림 7 은 송신 안테나와 Aperture간의 거리 $R=1.6m$, $3.6m$ 이고 Aperture와 수신 안테나 간의 거리 $S=0.4m$ 로 하였으며 $f=820MHz$, $\delta=0^\circ$ 일때 원형 Aperture의 직경을 각각 5cm 씩 120cm까지 변화시켰을 때의 신호변화를 측정하여 이론치와 비교한 것이다.

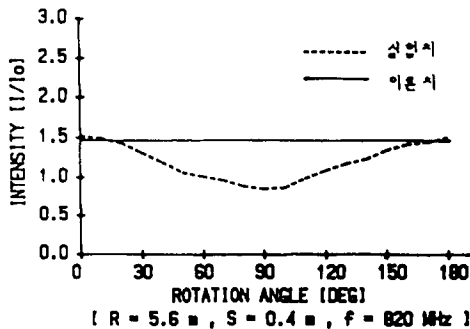
원형 Aperture에서의 수신신호의 세기는 구형 Aperture에 비하여 그림 7 (a) 에서 보는 바와 같이 송·수신기가 근접해 있을 때에도 실험치가 이론치에 접근하고 있으며, 그림 7 (b) 와 같이 송·수신기의 거리가 점차 멀어짐에 따라 더욱 이론치에 접근하고 있음을 보여주고 있다. 또한 실험치가 이론치 보다 왼쪽으로 편위되는 정도도 구형 Aperture에 비하여 심하지 않음을 알 수 있다.

IV. 결 론

정지 통신위성을 이용한 차량과 차량 또는 차량과

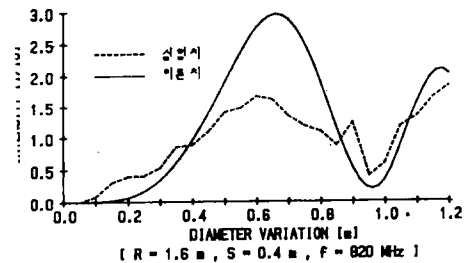


(a)

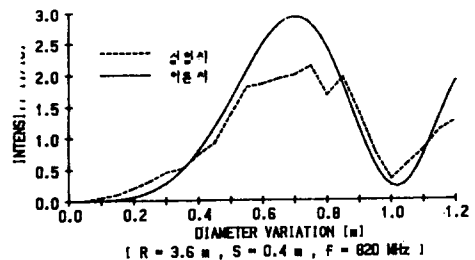


(b)

그림 6. 구형 Aperture의 rotation angle에 따른 신호의 세기
Fig. 6. The wave intensity according to the rotation angle of a rectangular aperture.



(a)



(b)

그림 7. 원형 Aperture의 크기 변화에 따른 신호의 세기
Fig. 7. The wave intensity according to the radius variation of a circular aperture.

office간의 이동통신에서 건물과 건물사이, 가로수의 가지와 가지사이의 신호감쇠로 인한 영향은 이동통신에서 중요한 문제이다.

본 논문에서는 Fresnel-Kirchhoff 회절이론을 이용하여 구형 Aperture 및 원형 Aperture에 대한 회절이론을 유도하여 시뮬레이션에 의한 결과치를 실험치와 비교하였다.

전반적인 회절현상에 대한 추세는 측정장치를 설치해 놓은 장소와 송·수신 안테나의 복사패턴 등을 고려해 볼 때 이론치와 실험치가 잘 일치하였다.

따라서 본 논문의 자료는 선박통신 및 차량과 차량간의 이동통신 분야에서 통신로상의 장애물에 대한 신호감쇠를 예측할 수 있을 것이다.

특히 이러한 결과는 통신위성을 이용한 이동통신 시스템 설계시 차량 안테나의 형식, 송·수신 주파수, 송신기의 출력 및 수신기의 형태를 결정하는 자료로 활용될 수 있을 것이다.

그러나, 본 논문에서는 구형 및 원형 장애물의 원점이 통신로 상에 위치하고 있는 경우에 대해서만 연구하였으므로 장애물이 통신로의 중심축 상을 벗어난 일반적인 경우에 대한 연구가 요구된다.

參 考 文 獻

[1] W.J. Vogel and E.K. Smith, "Theory and measurements of propagation for satellite to land-mobile communication at UHF", Proc. IEEE 35th Vehic. conf., Boulder, Co, pp. 218-223, 1985.

[2] J.S. Butterworth, "Propagation measurements for land-mobile satellite systems at 1542 MHz," Commun. Res. Center, Tech. Note no. 724, Ottawa, Aug. 1984.

[3] J.S. Butterworth, "Propagation measurements for land-mobile satellite systems at 1542 MHz," Commun. Res. Center, Tech. Note no. 723, Ottawa, Aug. 1984.

[4] J. Goldhirsh and W.J. Vogel, "Roadside tree attenuation measurements at UHF of land-mobile satellite systems," IEEE Trans. Anten. and Propagation, vol. 35, no. 5, pp. 589-596, May 1987.

[5] A.H. LaGrone and C.W. Chapman, "Some propagation characteristics of high UHF signals in the immediate vicinity of trees," IRE Trans. of anten. and Propag., pp. 487-491, September, 1961.

[6] M. Born and E. Wolf, "Principles of optics," Pergamon Press, 1980.

[7] W.J. Vogel and U.S. Hong, "Measurements and modeling of land mobile satellite propagation at UHF and L-Band," IEEE Trans. Anten. and Propagation, vol. 36, no. 5, pp. 707-719, May, 1988.

[8] 홍의석, 오일덕, "통신 위성과 지상 차량간의 통신에 있어서 신호감쇠", 대한전자공학회 논문지, 제26권 제7호, pp. 21~29, 1989년 7월.

著 者 紹 介

洪 義 錫 (正會員) 第26卷 第7號 參照
 현재 광운대 전자통신공학과 교수

吳 一 德 (正會員) 第26卷 第7號 參照
 현재 대전공업대학 전자공학과 부교수.