

# 지하 매설형 안테나를 이용한 근거리 유성 버스트

## 통신의 특성개선

### Improvement of Short Range Performance of Meteor Burst Path with Buried Antenna

김병철 · 김기채 · 이무영

Byoung-Chul Kim · Ki-Chai Kim · Mu-Yong Lee

#### 요 약

유성버스트 통신방식은 1000 km 이상의 장거리 VHF NLOS 데이터 통신 시스템을 가장 경제적인 방법으로 구현시켜 줄 수가 있다. 그러나 이 방식은 근거리 전송에서는 버스트의 지속시간이 짧아져서 도통율이 열화함으로 본질적으로 실용에는 부적합한 것으로 알려져 있다. 이 논문에서는 유성 버스트 전송로의 근거리 특성을 해석한 후, 송, 수신안테나의 빔 패턴이 공간의 hot-spot을 완전히 포용할 수 있도록 함으로써 버스트의 발생빈도를 증가시키는 동시에 안테나에 유도하는 지상 잡음 전계를 효과적으로 차단함으로써 수신기의 실패 차단전압을 낮추면 시스템의 총 도통율(duty rate)은 크게 개선될 수 있음을 밝혔다. 이 해석결과를 기초로 하여 특히 근거리 유성 버스트 경로에 적합한 안테나로서 소개구형 공동형 안테나를 개발하였다. 이 안테나는 지하에 매설하여 사용하는데 이렇게 함으로서 수직방향의 지향성이 개선되고 지상으로부터의 잡음 혼입이 효과적으로 차단된다. 이 안테나는 3 dB 빔 폭이 90°에 달하여 양각 8~90°로서 근거리 경로의 hot-spot을 효과적으로 조사(illuminate) 할 수가 있는데, 이것은 대체로 100 km 이하의 근거리 유성 버스트 경로에 최적합한 조건이다. 지표방향으로의 지향성은 최소로 억제되어 이 방향으로부터 인공잡음의 혼입을 효과적으로 차단하는데 재래식의 Yagi보다 평균 3 dB 이상 억제된다. 이 안테나를 수신안테나로 사용하여 100 km 경로에서 시험통신을 실시한 결과 동일한 조건하에서 4 소자 Yagi 안테나를 사용한 경우에 비하여 버스트의 발생빈도와 지속시간이 각각 10 %와 20 % 이상 증가한 것을 확인할 수 있었다.

#### Abstract

Meteor Burst Communication can provide effective and economical means of communication where long distance VHF NLOS data transmission is needed ; often ranges more than 1000 km. It has been, however, so far considered unsuitable for short distance application because of phenomenal decrease in burst durations, which leads to decreation of total duty rate of the system. This paper extensively analyzes characteristics of shot distance MB(Meteor Burst) path and shows the low duty rate may be improved by increasing burst rate through adapting antenna beam width

영남대학교 전기전자공학부(Dept. of Electrical & Electronics Eng., Yeung-nam University)

· 논문 번호 : 980814-073

· 수정완료일자 : 1998년 10월 16일

to cover entire hot-spot region in the space and, by compensating effective burst length throughcutting down man-made noises introduced by antenna. Based on the analysis, we are developed a small-opening-cavity antenna, especially designed for short distance MB path. In operation, the antenna is to be buried under ground surface so as to improve directivity and reduces noise introduction. The antenna exhibits power gain of 3 dB with 90 degree beam width and thus enables to illuminate entire hot-spot regions with the elevation angle of 8-90 degree which is the case of transmission less than 100 km. Directivity horizontal to earth surface is suppressed to minimum which enables to cut man-made noises from near-by sources down to more than 3 dB from the level reported with conventional 4 element Yagi.

A series of experiments performed on 100 km MB paths have conformed that, with the antenna installed at receiving site, the burst rate and duration time have been noticed to increase by 10 and 20 percent respectively from the values obtained by conventional 4-element Yagi antenna under same testing condition.

## I. 서 론

유성버스트 통신(Meteor Burst Communication: MBC)은 우주진(meteor dust)에 의해 발생하는 유성적(meteor trail)의 전자파 산란 현상을 이용하여 NLOS(Non-Line-Of-Sight) 통신로를 구현하는 무선 통신 방식이다.

유성적에 의한 전자파 산란 현상은 주로 VHF 대역에서 관측되며 매분 수 회에서 수 10회의 빈도로 발생하여 지속시간 수 10, 수 100 초 내외의 버스트 신호 형태로 수신된다. 따라서 이 방식은 지속성의 정보의 전송에는 적합하지 않으나 소용량이고 패킷형 데이터의 전송에서는 극히 유리한 많은 특징을 지니고 있다. 예를 들면 장치의 구축, 운용의 간편성, 고도의 경제성, 융통성, 보안성, 내 방해성, 내 재해성, 무인화와 자동화의 용이성 등이 뛰어나서 특히 병경 지대(deserted region)의 간이형 데이터 통신, 원거리 텔레메터링(telemetry), 군용 또는 재해 대책용 통신망 등에 가장 적합한 것으로 알려져 있다<sup>[1]-[2]</sup>.

유성의 전기 물리적인 특성은 이미 오래 전부터 특히 물리학자들에 의해 발견, 연구되어 왔는데 그

전자파 산란현상을 통신에 이용하는데 성공한 것은 50~60년대에 걸쳐서 설치된 JANET<sup>[3],[4]</sup>와 COMET<sup>[5]</sup> 시스템이라 할 수가 있다. 그러나 이러한 실험 시스템의 성공에도 불구하고 MBC는 80년대까지는 실용화되지는 못하였는데 그 이유는 마침 인공위성을 이용한 위성통신이 산업계의 관심을 독점하고 있었고 무엇보다도 아직 디지털 기술이 유성 버스트와 같은 간헐적인 통신로를 실용화 할 수 있을 수준에 도달하고 있지 못하였기 때문이라고 할 수가 있다. 그러나 90년대에 들어서면서 디지털 기술이 발전하여 유성 버스트 통신로도 원활히 이용할 수 있게 되었을 뿐 아니라, 분야에 따라서는 위성통신을 비롯한 재래식 통신방식에도 문제점이 발견되고 있어서 MBC는 새로운 각광을 받기 시작하고 있다. 특히 80년대 후반에 알래스카와 캐나다의 광활한 지역에 건설된 SNOTEL<sup>[6]</sup> 나 AMBCS, 나일강 유역에 건설된 홍수 통제 시스템, 필리핀에 건설된 해양 관제 시스템 등은 그 규모에 있어서도 재래식 첨단 통신망을 능가하고 있다.

MBC의 가장 큰 결점은 통신로의 발생과 지속시간이 랜덤(random)하며 그 도통율(duty rate)이 다른 방식에 비하여 낮다는 점이다. 특히, 유성버스트 경로(Meteor Burst path)의 거리가 수 100 km 이하가 되면 이론적으로 버스트의 길이가 크게 줄어

들게 되어 있다. 이것은 트레일의 위치가 100 km 로 일정한 고도에 있기 때문에 근거리가 되면 유성 트레일에 대한 전자파의 입, 산란각이 적어져서 산란손실이 커지고 버스트의 감쇄 시정수가 적어진다는 본질적 원인 때문이다. 이 이유 이외에도 이만한 거리에서는 지상파에 의한 재래식 통신이 가능해진다는 이유도 있어서 아직 100 km 이내의 근거리에서는 MBC가 실용화된 예는 보고되지 않고 있다. 그러나 산간지대에 있어서의 계곡간 통신, 산림지대나 시가지처럼 지상파의 감쇄가 큰 지역에서의 통신 또는 자연적, 인위적 재해로 인하여 종래 시스템의 조속한 복구가 불가능한 경우 등, 근거리에서라도 유성버스트 경로가 아니면 경제적인 시스템의 구현이 불가능한 분야가 많이 발견되고 있다.

실험에 의하면 근거리가 되면 전파 거리 단축에 의한 수신 전력 레벨의 상승이 산란 손실의 증가를 그만큼 상쇄할 수가 있고 따라서 버스트의 발생빈도는 증가하기 때문에 적절한 방법으로 버스트 길이의 단축을 다소 보상한다면 실용화가 가능한 수준으로 도통율의 개선은 가능하다.<sup>[7]</sup> 지금까지의 해석에 의하면 유성 버스트 신호는 대체로 저밀도 트레일(underdense trail)에서 산란되는 지수함수형의 진폭을 지닌 것으로 되어 있으므로 수신기의 문턱전압의 절하가 도통율의 개선에 가장 효과적이라 할 수가 있다. 수신기의 문턱 전압은 수신기 설계에 있어서 가장 중요한 요소의 하나이지만 그 개선은 수신기의 가격 상승을 초래하기 때문에 한계가 있기 마련이다. 일반적인 무선 시스템에서는 이러한 경우, 안테나의 전력이득을 높이는 것이 가장 경제적인 방법으로 알려져 있다. 그러나 안테나의 이득 개선은 지향 특성을 높이는 결과가 되기 때문에 이 방법은 유성버스트 경로에서는 그대로 적용하지 못한다. 그 이유는 유성 트레일이 넓은 공간에 랜덤하게 분포하여 발생하기 때문인데 이것은 빔을 가급적 넓혀야만 많은 버스트를 수용할 수가 있기 때문이다. 이러한 이유 때문에

현재까지도 MBC에는 10 dB 수준의 간단한 Yagi 안테나가 쓰여지고 있는데, 이 안테나로서는 측엽(side lobe)으로 인한 잡음의 혼입을 막을 수가 없을 뿐 아니라 수 100 km 이하의 근거리가 되면 높은 양각을 실현시키기가 기계적으로 어려워진다.

본 논문은 이러한 점에 착안한 것으로서 먼저 MBC의 근거리 특성을 해석하고 안테나의 이득과 지향특성을 최적화 시킴으로서 이러한 결점이 개선될 수 있음을 밝힌다. 다음에 side lobe가 전혀 없으며 잡음 혼입이 극히 적을 뿐만 아니라, 주 빔각도가 근거리 유성버스트 경로에 적합하여 결과적으로 근거리에서 버스트 길이의 단축을 크게 보상할 수 있는 새로운 형태의 MBC용 안테나를 해석적으로 도출하고 50 MHz 대역의 모델을 사용하여 시뮬레이션 시킴으로서 그 특성을 확인한다. 끝으로 이 모델을 실제 제작하여 기존의 MBC 시험 통신시설을 사용, 100 km 내외 경로에서 그 도통율이 종래 안테나에 비하여 개선되었음을 보고한다.

이 안테나는 근거리 유성버스트 경로에서는 트레일 발생 위치가 양각 (elevation)이 90°에 가까운 100 km 상공에 집중하게 된다는데 착안한 것으로서 지하에 매설된 개구형 공동의 형태로 되어 있으며 수직 방향으로 큰 전력이득을 지니는 반면, 수평 방향으로 강한 감쇄를 나타내어 주위 잡음의 혼입을 방지하며 높은 양각을 구현하는데 있어서 어떤 형태보다도 기계적으로 완고하다는 것이 확인되었다.

이 안테나는 지상 100 km 근방에 수동 증계점이 존재함으로써 위성 통신에서와 같은 넓은 서비스 지역(coverage area)을 포용할 수가 있고 구조적으로는 지하에 매설되어 있는 관계로 폭풍이나 폭격을 포함하는 극한적인 자연적, 인위적 재해에서도 생존율(survival rate)이 높고 은폐가 용이하며 간섭전파에 대해서도 강하다. 따라서 군, 경찰용 데이터 통신망, 재해 대책 비상 통신망, 산간지대나 미개발 지역의 데이터 통신망 등에 실용화 될 수

가 있다고 본다.

## II. 근거리 MBC path의 해석적 특성

### 2-1 버스트의 길이

두 지점간의 유성 버스트 통신로는 그림 1과 같이 송신지점 T와 수신지점 R를 초점으로 하는 회전 타원면에 접하는 위치에 유성 트레일이 발생했을 때 형성된다. 이때 생성되는 트레일은 비교적 큰 우주진에 의한 전리도가 큰 과밀도 트레일(overdense trail)과 적은 우주진에 의해 생성되는 저밀도 트레일(underdense trail)로 구별되는데 낙하 우주진의 수량은 질량이 적은 것이 압도적으로 많으므로 회선 설계에 있어서는 일반적으로 저밀도 트레일을 대상으로 한다.

저밀도 트레일에 의해 산란되는 전자파의 특성에 관해서는 이미 많은 해석이 되어 있는데 그 대표적인 것으로 식 (1)이 있다<sup>[8]</sup>.

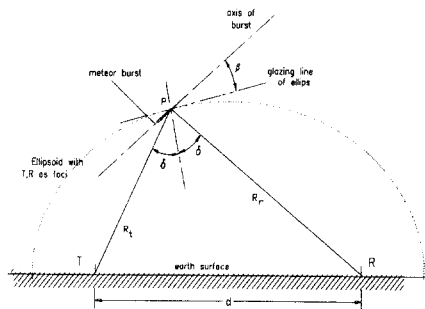


그림 1. 유성 버스트 통신 경로

Fig. 1. Meter Burst Communication Path.

$$P_R = \frac{\lambda^3 q^3 r^2}{16 \pi^2} \cdot \frac{P_T G_T G_R}{R_t R_r (R_t + R_r) (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)} \cdot \exp\left(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \cdot \sec^2 \phi}\right) \cdot \exp\left(\frac{2}{\tau} t\right) \quad (1)$$

$$\tau = \left(-\frac{16\pi^2 D}{\lambda^2 \cdot \sec^2 \phi}\right) \quad (2)$$

$P_T, P_R$  : 송, 수신 전력 (W)

$G_T, G_R$  : 송, 수신안테나 이득

$q, r_e$  : 트레일의 전자 선밀도(1/m) 및 전자 반경 ( $2.817 \times 10^{-15}$  m)

$r_0$  : 트레일의 초기 반경 (m)<sup>1)</sup>

$\beta, \phi$  : 타원면 접선에 대한 트레일의 각도 및 전자파의 입, 산란각

$R_t, R_r$  : 송, 수신 안테나로부터 트레일까지의 거리 (m)

$D$  : 트레일의 평균 확산계수<sup>2)</sup>

$\tau$  : 트레일의 감쇄 시정수 (S)

이 식에 의하면 저밀도 트레일에서 산란되는 버스트 신호는 그림 2와 같은 지수함수형이 된다. 따라서 수신전력  $P_R$ 의 최대치  $P_{R_m}$ 과 수신기의 문턱치(threshold)  $P_{th}$ 가 주어지면 버스트의 지속시간  $t_0$ 는 다음과 같이 산출된다.

$$t_0 = \frac{\tau}{2} \cdot \log_e \left(\frac{P_{R_m}}{P_{th}}\right) \quad (3)$$

여기서  $\tau$ 는 버스트 신호 파형의 시정수로서 식 (1)의 식 (2)와 같다.

1) 우주진은 직경이 수 mm 내외임으로  $r_0=0$ 으로 근사시킬 수가 있다.

2) 평균 확산계수 D는 트레일의 평균 높이를  $h_a$  (km), 주파수를  $f$ (MHz)라 할 때 다음과 같은 실험식으로 주어진다.

$\log_{10}(D) = 0.067 h_a - 5.6, \quad h_a = 124 - 17 \log_{10}(f)$

이 식에서 버스트의 시정수는 근거리가 될수록 짧아짐을 알 수가 있다. 그러나 버스트의 길이는 동시에 문턱치에 대한 수신전력비의 대수에 비례하는 까닭에 이 비를 크게 하면 근거리로 인한 본질적인 버스트 길이의 단축을 상당 수준 개선할 수가 있다.

지금, 외래 잡음이 첨가된 경우의 실효 문턱치를  $P_{th\text{eff}}$ 라 한다면 그 때의 버스트의 길이  $t_{01}$ 은 식 (3)으로부터

$$t_{01} = \frac{\log_e (P_{R_m} / P_{th\text{eff}})}{\log_e (P_{R_m} / P_{th})} \cdot t_0 \quad (4)$$

와 같이 되며 버스트 길이는

$$t_{01} - t_0 = \log_e \left( \frac{P_{th}}{P_{th\text{eff}}} \right) \quad (5)$$

만큼 짧아진다.

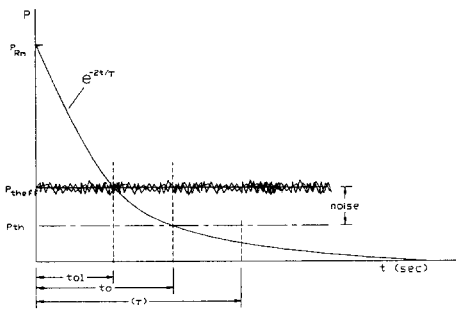


그림 2. 저밀도 버스트의 파형과 문턱전력  
Fig. 2. Underdense burst and effective threshold level.

그림 2는 특정 버스트에 있어서 외래잡음을 고려한 경우의 실효 문턱치와 그로 인한 버스트의 길이의 단축효과를 나타낸 것이다.

### 2-2 버스트의 발생빈도

버스트는 우주진에 의해 발생하며 그 산란 전력

의 크기는 우주진의 질량에 비례한다. 지금, 질량이  $m < m+d_m$  사이의 우주진이 발생한 트레일을 생각할 때 여기에 입사하는 전계를  $v$ 라고 한다면  $v d_m \propto m^s d_m$ 의 관계가 있다. 따라서 임의의 질량  $m_1$  보다 큰 유성 트레일에 입사하는 전계는  $v (m > m_1) \propto m_1^{-s+1}$ 이 된다. 우주진의 질량과 그 트레일의 전자 선밀도는 비례하므로 전자 선밀도가  $q_0$  이상인 트레일의 수  $N$ 은

$$N(q > q_0) = c q_0^{-s+1} = c q_0^{-1} \quad (6)$$

이 된다. 일반적인 독립 유성(sporadic meteor)에서는  $s=2$ 로 알려져 있으므로  $N$ 은 매초당  $1 \text{ m}^2$  평면에 떨어지는 유성 트레일의 수가 된다. 여기서  $c$ 는 비례상수로서  $1.3 \times 10^2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 이다. 전자 선밀도가  $q_0$  이상이 되는 트레일 수  $q$ 는  $q_0$ 가 검지 될 때의 수신기의 문턱치를  $P_{th}$ 로 한다면 식 (1)과 식 (5)에서 다음과 같이 산출된다.

$$N(q > q_0) = c \cdot \sqrt{K \cdot \frac{P_T G_T G_R}{P_{th}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_r R_t (R_r + R_t) (1 - \cos^2 \beta \sin^2 \phi)}} \quad (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$$

$$K = r_e^2 \lambda^3 \quad (7)$$

즉, 버스트의 발생빈도도 수신기 문턱치에 대한 수신전력의 비의 평방근에 비례한다.

### III. 근거리 특성의 개선

#### 3-1 근거리 특성의 문제점과 개선 방안

통신거리  $d$ 와 전자파의 트레일에 대한 입사 및 산란각  $\phi$ 간에는 지구의 곡률을 무시한다면

$$\phi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{d}{2h}} \quad (8)$$

와 같은 관계가 있고 트레일의 발생 위치는  $h=100 \text{ km}$ 로서 일정하기 때문에 근거리가 될수록  $\phi$ 는 적

어진다. 그 결과 버스트의 감쇄시정수  $\tau$ 가 적어지지만 식 (5)에 의하면 버스트의 길이는 수신기의 입력전력과 수신기의 문턱치와의 비의 대수에 비례하기 때문에 수신기의 문턱치를 낮추면 근거리 효과로 인한 버스트 길이의 감소를 보상할 수가 있다. 뿐만 아니라 문턱치를 낮추면 식 (6)에서 버스트의 발생빈도가 증가하기 때문에 근거리 경로로 인한 유성버스트 경로의 도통율의 감소를 크게 개선시킬 수가 있다.<sup>3)</sup>

### 3-2 수신기의 실효 문턱치와 그 개선

일반적으로 수신기 입력에 유도되는 총 잡음 전력은 등가 잡음 온도를 사용하여 다음과 같이 표시된다. 단 여기서는 급전선 손실을 무시되어 있다.

$$N_0 = kT_A + k(F-1)T_0 \quad (\text{W/Hz}) \quad (9)$$

$T_A$  : 안테나 등가 잡음 온도 (K)

$F$  : 수신기 잡음 지수

$T_0$  : 상온 300 ° K

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  ( J/K ) Boltzmann 상수

수신기의 문턱전압은 그 수신 신호의 변조방식에 따라서 이 잡음치 보다 일정치 높은 전력을 설정하여야 하는 까닭에 실효 문턱치는 다음과 같이 된다. 여기서  $P_{mar}$ 는 변조 방식에 따라 정해지는 여유치이다.<sup>4)</sup>

$$P_{theff} = kT_A + k(F-1)T_0 + P_{mar} \quad (10)$$

안테나의 등가 잡음  $kT_A$ 는 안테나 자체의 상온 열 잡음( $kT_0$ )과 외래 잡음으로 되어 있는데 일반적으로  $kT_A \gg k(F-1)T_0 + P_{mar}$ 가 성립한다.<sup>5)</sup> 따라서 실효 문턱치는 수신기 자체가 지닌 본질적인 문턱전압 즉, 위 식의 우변보다도 외래잡음에 의하여 결정되며 이것을 차단하면 크게 개선시킬 수가 있다는 것을 알 수가 있다.

일반적으로 안테나에 혼입되는 잡음은 수직 편파 잡음이 많고 잡음원은 전력선과 각종 전력 설비가 밀집해 있는 지표면에 강하게 분포되어 있다. 따라서 안테나는 가급적 수평편파를 사용하는 동시에 특히 지표면에 평행인 side lobe를 최소화 할 필요가 있다. 또한 일반적인 안테나에 있어서는 주빔(main beam)을 가능한 한 첨예화시킴으로서 S/N 비의 개선에 도움이 되도록 하는 것이 상례로 되어 있다. 그러나 유성버스트 경로에 있어서는 주빔을 과도히 첨예화시키면 유성 트레일의 발생공간이 제한되기 때문에 빔의 형태에 관해서는 보다 면밀한 고찰이 필요하다.

### 3-3 안테나의 지향성 결정

송, 수신소간에 통신로가 확립되는 것은 그림 1과 같이 송, 수신안테나를 초점으로 하는 회전타원체에 접하는 위치에 유성 트레일이 발생 할 때이다. 이러한 회전타원체는 무수히 존재하므로 전방위성의 안테나를 사용하여야만 할 것이다. 그러나 불필요하게 넓은 빔 폭을 부여하면 안테나 이득이 감소할 뿐 아니라 외래잡음의 혼입이 증가함으로 적절한 타협점을 찾을 필요가 있다.

3) 식 (3), (5) 등에 의하면 근거리 특성의 개선을 위해서는 이 밖에도  $P_T$ 와  $G_T$ ,  $G_R$ 로 대표되는 소위 EIRP의 증대를 고려할 수가 있다. 그러나 송신 전력의 증가는 전원의 용량증가, 기기 제조원가의 상승, 타 통신계에 대한 방해 가능성의 증대 등 바람직하지 않는 부작용이 있고 안테나 이득의 개선 문제는 안테나의 빔 폭(*beam width*)을 협소화시켜서 송, 수신 안테나가 공유 공간을 좁히는 결과가 되어 버스트 발생빈도의 감소로 이어진다.

4) BPSK의 경우에는 BER  $10^{-4}$ 를 목표로 한다면 9 dB

5) 대표적인 값으로 50 MHz 대역에서는 상업지역 30, 주택지역 26, 전원지대 21 dB(kTo)로 보고되어 있다.

3-3-1 hot-spot 집중 조사 방식

Eshleman 등은 일정 높이의 고도(100 km)에서 트레일의 길이를 일정치로 가정하고 그 발생이 완전히 랜덤한 경우, 버스트의 도통율에 가장 기여도가 큰 공간 영역을 해석적으로 도출하고 이것을 hot-spot라고 명명한 바가 있다. 실제로 있어서는 고도에 따라 분포밀도가 다르며 버스트의 길이도 확률이 큰 범위가 존재하기 때문에 해석 결과와는 상당한 차이가 있어서 실험 결과까지 고려하여 그림 3과 같은 hot-spot도가 도출되어 있다.<sup>[9]</sup>

이 분포 형태는 경로의 거리에 따라 차이가 있지만 대체로 넓은꼴이 되는 것도 확인되어 있기 때문에 두 안테나의 빔은 T-R축 선의 중점의 상공 100 km에 위치한  $L_1 \times L_2 \times L_3$ 의 공간을 완전히 포용하는 것이 바람직하다.

그림 3은 hot-spot 공간의 평면도인데 수평면 빔 폭  $\psi_h$ 는 최소한 75도가 되어야만 한다는 것을 알 수가 있다. 그러나 트레일의 발생 고도는 80 km~120 km이므로 안테나의 실지 빔 폭은 hot spot의 중심부의 고도를  $h$ 라고 할 때  $d$ 로 계산할 수가 있으므로  $d=100$  km 경로에서는 대체로 34°이면

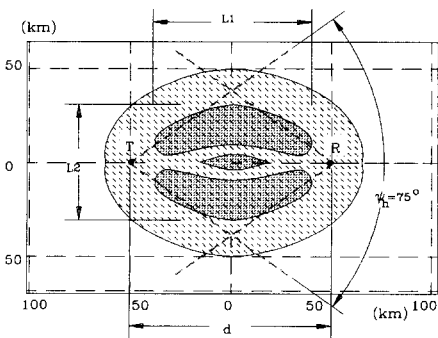


그림 3. 100 km 경로에서의 hot spot의 평면도 및 안테나의 수평면 빔 각  $\psi_h$   
 Fig. 3. Plan view of hot spot at 100 km path and required beam angle  $\psi_h$

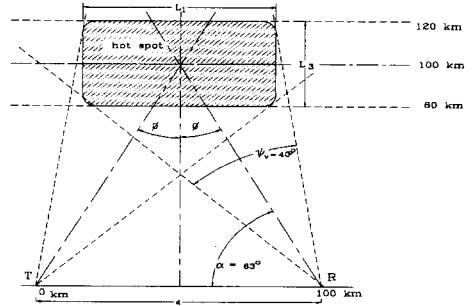


그림 4. 100 km 경로를 위한 안테나의 양각 평면 빔 각  $\psi$ 과 양각  $\alpha$   
 Fig. 4. Beam angle  $\psi$  and elevation angle  $\alpha$  of 100 km path.

된다.

$$\psi_h = \psi_{h0} \cos \alpha, \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{2h}{d} \quad (11)$$

한편, 수직면의 빔 폭도 송신점 T에서 hot-spot 공간을 완전히 포용하여야 하므로 그림 4와 같이  $\psi = 40^\circ$ 가 되어야 하며 이 빔은 지표면에 대하여 양각  $63^\circ$ 로 지향되어야 한다는 것을 알 수가 있다.

3-3-2 광역 조사 방식

그림 2에서 도통을 공헌도가 1.5가 넘는 hot-spot 부분을 중심으로 하여 도통을 공헌도가 0.5가 되는 넓은 영역이 존재하고 있는 것을 볼 수가 있다. 이득이 높으면서도 빔 각이 비교적 넓은 안테나가 개발될 수 있다면 그림 5와 같은 광범위 조사 방식을 채택하면 송, 수신 안테나의 공유 공간이 커짐으로 버스트 발생빈도도 그만큼 증가 될 수 있다. 간단한 계산에 의하면 그림 4와 같이 주빔의 각도가  $90^\circ$ 인 안테나를 사용하는 경우, 상대 안테나의 빔 폭을  $60^\circ$ 로 설정한다고 하여도 공유공간은 집중조사 방식에 비하여 10배 이상 증가한다.

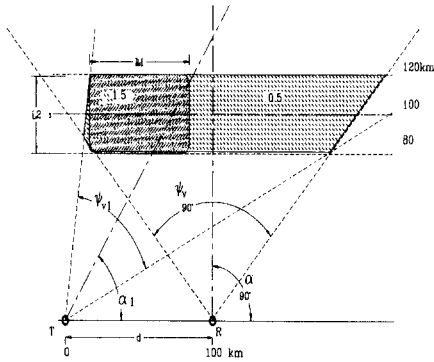


그림 5. 광역 조사 방식을 위한 빔 폭과 공유공간  
 Fig. 5. Beam angle required for wide illumination method and common volume of the beams.

#### IV. 매설형 안테나의 설계

이러한 방사특성을 지닌 안테나로서는 여러 가지를 고려할 수가 있으나 특히 설치의 용이성과 양각과 방위각 및 잡음 차폐 특성에 중점을 둔 지하 매설형 안테나를 제안한다. 이 안테나는 두 개의 복사 소자로서 구동되는 일종의 개구형 안테나로서 공동은 지하에 매설하여 사용한다. 주 빔의 폭은 90° 정도로 넓고 수직방향으로 강력한 지향성을 나타내지만 지표면의 잡음원으로부터는 효과적으로 차폐되어 있기 때문에 특히 위에 눈썰한 근거리 유성버스트 경로에 적합한 특성을 보유하고 있다. 이 장에서는 이 안테나의 특성을 해석하고 특히 50 MHz 대역의 안테나 모델에 관해서 방사 패턴을 시뮬레이션하여 근거리 유성버스트 경로에 최적화 함을 증명한다.

##### 4.1 구조

그림 6은 근거리 유성버스트 통신용으로 제안한 안테나의 구조와 그 좌표계를 나타낸다. 지표면이 개구면( $a \times b$ )과 평행이 되도록 하여 지하로 공동( $a \times b \times c$ )을 만든 형태의 안테나이며 반경이  $r$ 인

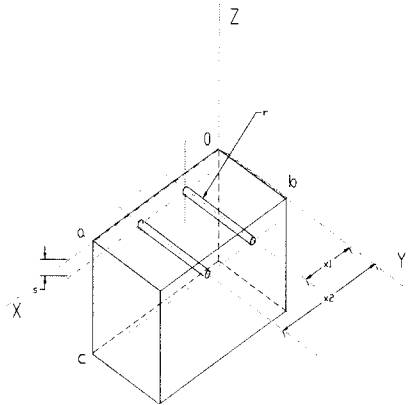


그림 6. 매설 안테나의 구조와 좌표계  
 Fig. 6. Structure and the axis.

2개의 도체봉이 개구면에 평행하게 배치되어 있다. 2개의 도체봉 중에서 하나는 급전을 위한 것이며 하나는 지향성을 조절하기 위한 도체봉이나 본 논문의 범위에서는 지향성의 조절은 고려하지 않고 있다. 두 도체봉 중 어느 쪽에서 급전을 해도 되나 본 논문에서는  $x_1$ 의 위치에 있는 도체봉의  $y=0$ 에서 급전하고 있다.

위에 논술한 바와같이 수 100 km 이내의 근거리 유성버스트 경로에 있어서는 주 지향 빔은 양각 70° 이상의 고각이고 가급적 고이득이면서 hotspot 공간을 완전히 포용할 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 수신기의 실효 문턱치를 개선하기 위하여 외래 환경 잡음을 효과적으로 차단할 수 있도록 지표면에 평행으로는 지향성이 전혀 형성되지 않아야 한다.

그림 6과 같은 구조의 안테나는 이러한 목적에 적합한 방사 지향성을 형성시킨다. 이 안테나는 지하에 매설하므로 안테나 설치작업의 용이성 등을 고려하여 가능한 한 소형화 할 필요가 있는데 이를 위해 공동의 크기가 사용파장에 비해 작은 형식을 선택하고 도체봉은 가능한 한 개구면에 가까



은 위치에 배치하였다. 이와 같은 소형 개구면 안테나는 개구면의 크기를 변화시키더라도 방사 지향성의 형태는 거의 변하지 않는다는 특징이 있다.

### 4-2 해 석

그림 6과 같은 안테나의 방사 지향성을 계산하기 위해서는 도체봉에 흐르는 전류분포 및 개구면에서의 전계분포에 관한 연립적분방정식을 유도하고 그 해를 구하여야 한다. 본 논문에서는 적분방정식의 해를 모멘트 법으로 구하여 방사 지향성을 계산하는 방법을 택하였다.

도체봉에 흐르는 전류분포  $J_1, J_2$  및 개구면에서의 전계분포  $E_a$ 에 관한 연립적분방정식은 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega\epsilon} \iint_{S_1} \bar{K}'_{11e}(r, r') \cdot J_1(r') dS'_1 \\ & + \frac{1}{j\omega\epsilon} \iint_{S_2} \bar{K}'_{12e}(r, r') \cdot J_2(r') dS'_2 \\ & - \iint_{S_a} \bar{K}'_{1m}(r, r') \cdot [\hat{z} \times E_a(r')] dS'_a \\ & = -V_1 \hat{y} \delta(y) \quad jX_{11}(b) \quad (y \quad b) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega\epsilon} \iint_{S_1} \bar{K}'_{21e}(r, r') \cdot J_1(r') dS'_1 \\ & + \frac{1}{j\omega\epsilon} \iint_{S_2} \bar{K}'_{22e}(r, r') \cdot J_2(r') dS'_2 \\ & - \iint_{S_a} \bar{K}'_{2m}(r, r') \cdot [\hat{z} \times E_a(r')] dS'_a \\ & = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \left[ \iint_{S_1} \bar{K}'_{a1e}(r, r') \cdot J_1(r') dS'_1 + \iint_{S_2} \bar{K}'_{a2e}(r, r') \cdot J_2(r') dS'_2 \right. \\ & + \frac{1}{j\omega\epsilon} \iint_{S_a} \bar{K}'_{am}(r, r') \cdot [\hat{z} \times E_a(r')] dS'_a \\ & \left. = \frac{1}{j\omega\mu} \iint_{S_a} \bar{K}''_{am}(r, r') \cdot [-\hat{z} \times E_a(r')] dS'_a \right], \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $k = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$ ,  $\epsilon$ 은 유전율,  $\mu$ 는 투자율이다. 적분핵은 다음 식으로 주어진다.

$$\bar{K}'_{je}(r, r') = (\bar{I}k^2 + \nabla\nabla) \cdot \bar{G}'_e(r, r') \quad (15)$$

$$\bar{K}'_{jm}(r, r') = (\bar{I}k^2 + \nabla\nabla) \cdot \bar{G}'_m(r, r') \quad (16)$$

$$\bar{K}'_{im}(r, r') = \nabla \times \bar{G}'_m(r, r') \quad (17)$$

$$\bar{K}''_{am}(r, r') = (\bar{I}k^2 + \nabla\nabla) \cdot \bar{G}''_m(r, r') \quad (18)$$

$$\bar{K}'_{ae}(r, r') = \nabla \times \bar{G}'_e(r, r') \quad (19)$$

모멘트 법의 정식화 과정은 잘 알려져 있으므로 생략하도록 하며, 본 논문에서 중요한 목적 함수인 방사 지향성은 개구면에서의 전계분포에 대응하는 등가자류분포를 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E(R, \theta, \varphi) = \hat{\theta}E_\theta + \hat{\varphi}E_\varphi \quad (20)$$

$$E_\theta = \frac{jke^{-jkr}}{2\pi R} [L_x \cos \varphi + L_y \sin \varphi] \quad (21)$$

$$E_\varphi = \frac{jke^{-jkr}}{2\pi R} [\cos \theta (L_x \cos \varphi - L_y \sin \varphi)] \quad (22)$$

$$\begin{aligned} L_x = & \sum_{p=0}^P \sum_{q=1}^Q E_{xpq} \left[ \frac{jks_c [(-1)^p e^{jks_c} - 1]}{(p\pi/a)^2 - (ks_c)^2} \right] \\ & \cdot \left[ \frac{(q\pi/b)[1 - (-1)^q e^{jks_c}] }{(q\pi/b)^2 - (ks_s)^2} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

여기서,  $S_c = \sin \theta \cos \varphi$ ,  $S_s = \sin \theta \sin \varphi$ 이다.

### 4-3 수치 계산 및 검토

#### 4-3-1 방사 지향성과 이득

수치계산에 사용한 안테나의 제원은 다음과 같이 설정하였다.

그림 7은 모델 안테나의 H면 방사 지향성을 계산한 결과이다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 방사 지향성의 H면 패턴은 지표면 방향으로 지향성을 갖지 않으므로 지표면으로부터의 외래잡음을 완벽히 차단할 수 있음을 알 수 있다. 그림 8은 전력이득의 계산결과를 나타낸다. 이 안테나의수직

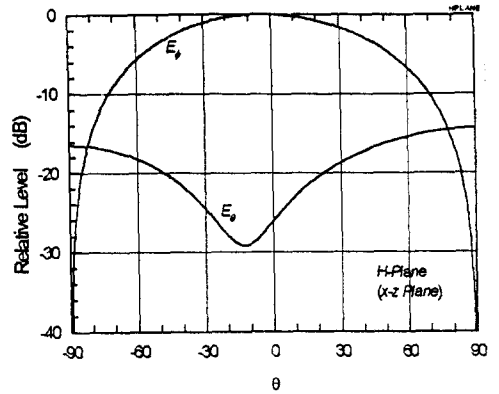
표 1. 모델 안테나의 제원

Table 1. Spec. of model antenna.

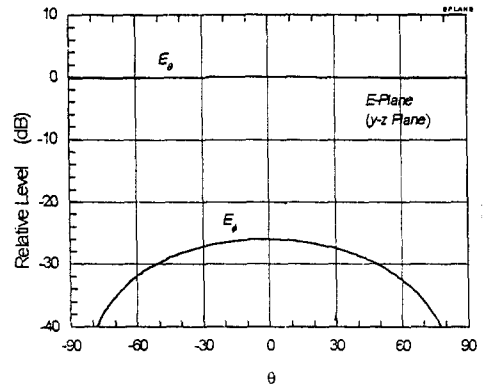
구분	제 원		비 고	추 기
사용주파수	50 MHz			
개구면치수 (cm)	a	160		개구면은 지표면과 평행이고 수평편파로 사용
	b	80		
공동의크기 (cm)	a	160	공동내부는동 망(Cu-mesh) 을 부착	
	b	80		
	c	100		
도체봉(cm)	r	0.6		r:(직경)
	l	80		l:(길이)
main빔폭 (degree)	$\Psi_h$	90	지표면과 평행면	3 dB 폭
	$\Psi_v$	63	지표면과 수직면	상 동
앙각(degree)	$\alpha$	90	지표면에 대한 앙각	빔 중심선 각도

방향(Z축, 즉  $\alpha=90$ )의 전력이득은 약 8.5 dB로서 개구면이 소형인 단일 안테나로서는 대단히 높다. 이 주파수 대역에서 일반적으로 사용하고 있는 4 소자 Yagi 안테나는 이득이 10 dB 정도인데 안테나의 크기는 대형이 되고 소자 수가 4개이므로 취급 및 설치가 어렵다. 이에 비하면 본 논문에서 제안한 안테나는 소형인 개구면 안테나로서 약 8.5 dB의 이득이 얻어지는데, 10 dB 이상의 전력 이득을 얻고자 하면 개구면의 크기를 크게하면 되므로 목적에 맞게 적절한 크기의 안테나를 실현시킬 수 있으며 지하에 매설하므로 설치가 용이하다는 장점이 있다.

또한, 이 안테나의 3 dB 빔 폭은 X-Z 평면, Y-Z 평면 다같이 거의 90도 이상이 됨으로 100 km 경로에서 집중 조사방식을 택하였을 경우의 최적각을 모두 만족한다. 특히 이 안테나의 빔은 수평면에 관한 한 거의 전방위형으로 되어 있으므로 특히 이동 통신국을 상대로 하는 기지국용으로도 적합한



(a) H면



(b) E면

그림 7 방사 지향성

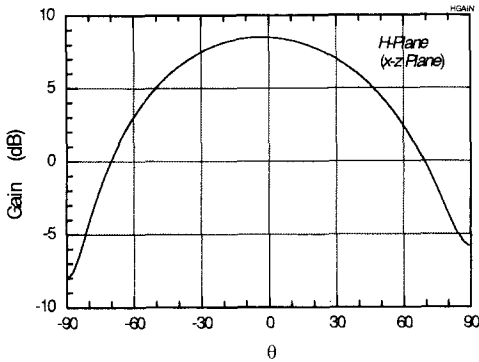
Fig. 7. Antenna Radiation.

특성을 지니고 있다고 할 수 있다.

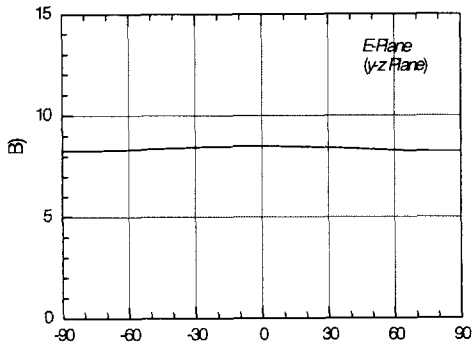
이 안테나는 광역 조사 방식으로 사용하는 경우에 더 효과적이다. 즉, X-Z 평면에서의 3 dB 빔폭이 90도가 됨으로 100 km 경로에 사용하는 경우, 그림 5와 같이 극히 넓은 공유공간을 8.5 dB의 높은 전력 이득으로 조사할 수가 있다.

#### 4-3-2 외래잡음 차단율의 검토

앞에서 고찰한 방사 지향성 및 이득의 계산결과로부터 지표면 방향에서 발생하는 외래잡음의 차단



(a) H면



(b) E면

그림 8. 안테나 이득  
Fig. 8. Antenna Gain.

효과를 검토할 수 있다. 그림 7에서 보는 바와같이 모델 안테나에 관해서 Z방향의 전계강도를 해석적으로 구한 후 주 빔의 최대치로서 규격화 시켜 지향성을 시뮬레이션해 본 결과, 지표면(즉,  $\theta=90^\circ$ 일 때)에 근접할수록 상대 전계강도는 급격하게 떨어져서 지표면에서는 최대치의 -60 dB 이하로 내려가는 특성을 나타내는데 이로부터 이 안테나는 50 MHz 대역의 잡음성분에 관한 한 거의 완벽히 차단한다는 것을 알 수가 있다.

V. 실험

이 장에서는 위에서 개발한 대설형 안테나를 사용하여 시험통신을 실시한 결과를 보고한다.

실험은 위의 해석과정에서 설정한 환경에 최대한 부합되는 근거리 유성버스트 경로를 선정 한 후, 모델 안테나를 제작하여 송신 안테나로 사용한 경우의 이 경로의 버스트 검출 빈도와 평균 지속시간을 측정하여 기존의 안테나를 사용한 경우와 비교하였다.

5-1 실험 경로 및 방법

근거리 경로로서는 그림 9와 같이 경산-영풍군 예고개 계곡간의 100 km 구간을 취하였다. 이 구간에는 수신안테나 근방에 900 m 가량의 능선이 있어서 지상파는 최대로 감쇄되어 수신기의 문턱치 이하가 된다. 따라서 유성 트레일의 산란파만이 수신이 된다고 할 수 있다. 모델 안테나는 영풍군 예고개 계곡에 설치하고 경산에서 50 MHz 대 200 W의 송신기로서 송출되는 CW 파를 수신하여 기록한 후, 연구실에서 수신 신호를 해석, 통계하여 버스트의 발생수와 길이를 산출하는 방법으로 실험을 진행하였다.

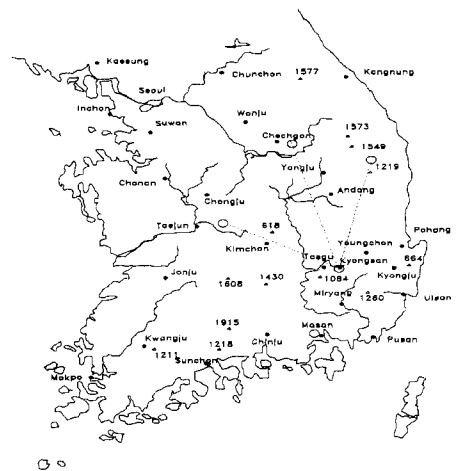


그림 9. 시험 통신 경로  
Fig. 9. Experiment paths.

## 5-2 실험설비

### 5-2-1 사용 안테나

실험용 안테나는 위에서 해석한 모델에 최대한 부합되도록 제작하였는데 그 제작도면은 그림 10과 같다.

### 5-2-2 시험 시스템

시험 시스템은 그림 11과 같이 구성 하였다. 송신기는 IC-756에 Linear Amplifier를 부착하여 51.115 MHz에서 주파수 1200 Hz의 LSB 변조된 신호를 출력 200 W로서 송신케하고 이 신호를 수신하여 DAT에 기록한 후, 해석하는 방법을 택하였다. DAT에 실시간으로 기록된 수신 신호는 FFT 처리하여 1200 Hz 성분만을 선택하되 배경잡음과의 S/N비가 특정치를 초과하는 것이 30 ms이상 계속되는 경우를 버스트로 인식하도록 하였다. 안테나는 4 소자 Yagi로서 10 dB인 것을 사용하였다.

## 5-3 실험 결과 및 평가

실험을 통하여 측정된 수신 버스트의 특성은 그림 12와 같았다.

즉, 100 km path에 있어서 제안된 안테나를 사용하는 경우, 재래식의 Yagi antenna보다 버스트 지속시간은 평균 50 ms 정도가 더 길어져서 25 % 정도의 개선을 보이며, 버스트 발생빈도는 분당 평균 1 회정도 더 증가하기 때문에 18 % 정도 개선되는 것을 확인할 수가 있다.

이 결과를 750 km의 중거리 path에서의 재래식 yagi를 사용한 경우와 비교하여 보았는데, 근거리 path에 비하여 버스트의 지속시간은 분명히 길게 나타나나 제안된 안테나를 사용한다면 버스트의 발생빈도가 상대적으로 증가하기 때문에 도통율(duty rate)은 거의 비슷한 수준이 된다는 것을 알

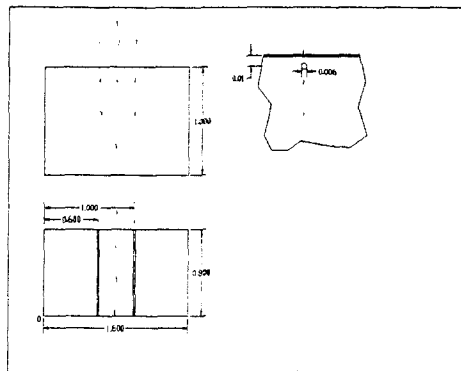


그림 10. 실험용 안테나 제작도

Fig. 10. Plan view of experimental antenna.

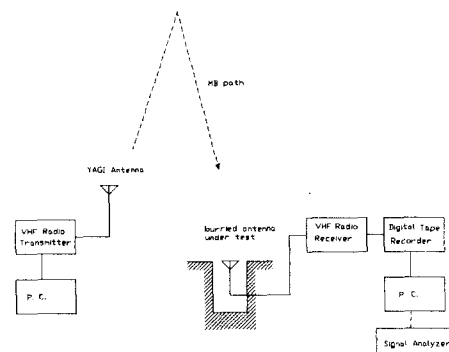


그림 11 시험통신 시스템 구성도

Fig. 11. Test facility for the experiment.

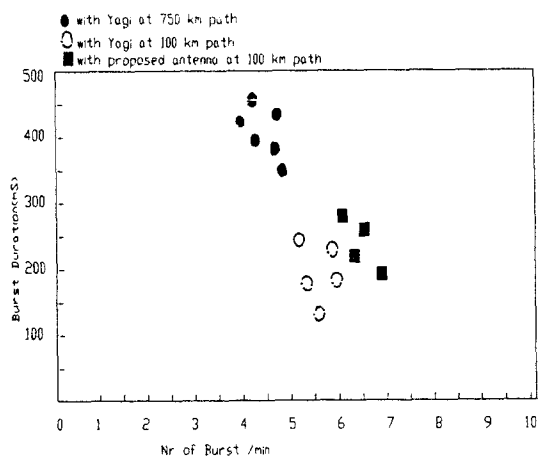


그림 12. 제안 안테나의 측정결과 및 Yagi와의 비교

Fig. 12. Result of experiment with proposed antenna and with conventional Yagi.

알 수가 있다.

### VI. 결 론

유성 버스트 경로는 근거리가 되면 유성 트레일에 대한 전자파의 입사 및 산란각이 적어지기 때문에 산란손실이 커지고 버스트 시정수가 현저히 짧아진다. 유성 버스트 통신로의 특성을 해석해 본 결과 산란손실의 보상은 안테나의 이득을 높임으로서 개선할 수가 있고 버스트 길이의 보상은 수신기의 실효 문턱치를 낮추면 상당수준 개선이 가능하다는 것을 알았다. 필자들은 이것을 새로운 형태의 안테나를 사용함으로써 해결할 수가 있다고 보고 지하에 매설하는 개구형 공동형의 안테나를 개발하였다. 이 안테나는 크기가 160 x 80 cm의 개구면을 가진 높이 100 cm의 공동을 지하에 매설한 형태로 되어 있는데 50 MHz 대역을 모델에 사용한 시뮬레이션 결과, 주 빔의 전력이득이 약 15 dB에 이르고 측엽이 전혀 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. 특히 지표면과 평행 방향으로의 주빔에 비해 70 dB 이상의 감쇄를 보이기 때문에 외래 잡음의 혼입이 최소한으로 억제된다.

이 안테나를 사용하여 경북 경산시를 중심으로 한 100 km 경로에서 시험통신을 실시하였는데 그 결과는 종래의 Yagi 안테나를 사용한 경우에 비하여 버스트의 발생율은 18 % 정도, 버스트의 길이는 25 % 정도 길어져서 종래의 장거리 경로에 근사한 값이 되어 만족한 근거리 통신이 가능한 도통율이 됨을 확인할 수가 있었다.

수신기의 실효 문턱전압이 재래식의 Yagi형 안테나에 비하여 3 dB 이상 저하됨으로서 버스트의 평균 지속시간을 현저히 증가 시켜준다. 뿐만 아니라 이 안테나는 지향 방향이 지표면에 90° 이고 빔 폭은 80° 내외가 되기 때문에 근거리 경로에서의 hot-spot을 조사하기가 특히 편리하다는 특징도 있다. 또한 주파수 특성이 비교적 광범위하여 취급에 용이하고 특히 지하에 매설되어 있기 때문에

자연적, 인위적 재해에서 생존율이 대단히 높다는 장점도 아울러 갖추어져 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. Z. Schunker, *Meteo Burst Communications* Artech House, Boston, 1990.
- [2] J. D. Oetting, "An Analysis of meteor burst communications for military applications", *IEEE. Trans. Comm.* COM-28, 9, pp. 1591-1600, Sept. 1990.
- [3] G. W. L. Davis, "The canadian JANET system" *proc.of IRE* 45, pp. 1666, Dec. 1957.
- [4] P. A. Forsyth, "The principles of JANET, a meteor burst communication system" *Proc. IRE*, vol. 45, no. 12, pp. 943-950, Dec. 1957.
- [5] P. J. Bartholome, "COMET-a new meteor burst system incorporating APQ and Diversity reception" *IEEE, Trans., Commun* vol. 52, no. 2, pp. 268-278, Apr. 1968.
- [6] D. E. Johnson: "Ten years experience with the SNOTEL meteor burst data acquisition system" *Proc. MBC symp.*, pp. SII. 5-SII. 20, Nov. 1987.
- [7] 김병철, 김기채, 이무영 "참조경로비교법을 이용한 유성 버스트 무선로의 특성 추정", 한국전자과학회 논문지, 제9권 제1호, pp. 72-86, 1998년 2월
- [8] 福田明 "流星 burst 通信system 特性" 信學論(B), pp. 943-950, 1982. 7.
- [9] 福田明 "流星 burst 通信" 電磁環境工學情報, pp. 90-99, Oct. 1991.
- [10] J. A. Weitzen "A study of foot-print of meteor scatter communication" *IEEE Trans. Comm.*, pp. 426-430, Apr. 1990.
- [11] A. N. Ince "Spatial properties of meteor

burst propagation" *IEEE Trans, Comm*, pp. 841-845, June 1980.

- [12] P. S. Cannon "The evolution of meteor burst communication system" *J. Inst. - Electron. Radio Eng.*, vol. 57, 3, pp. 101-112, May 1987.

- [13] L. A. Manning "Meteor in the ionosphere" *Proc. IRE*, vol. 47, pp. 186-189, Feb. 1959.

- [14] J. A. Weitzen "Predicting the arrival of meteors for MBC" *Radio Science*, pp. 1009-1020, Nov-Dec. 1986.

### 김 병 철



1994년 2월 : 영남대학교 공과대학 전자공학과(공학사)  
 1996년 2월 : 영남대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1996년 3월 ~ 1998년 2월 : 영남대학교 대학원 전자공학과(박사과정 수료)

### 이 무 영



1960년 : 한양대학교 전기공학과(공학사)  
 1972년 : 캐나다 BC 주립대학(공학석사)  
 1966년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 전기전자공학부 교수  
 [주 관심분야] 전자파 이론, 전자파 응용

### 김 기 채



1984년 2월 : 영남대학교 공과대학 전자공학과(공학사)  
 1986년 3월 : 일본 Keio Univ. 대학원 전기공학과(공학석사)  
 1989년 3월 : 일본 Keio Univ. 대학원 전기공학과(공학박사)  
 1989년 4월 ~ 1993년 3월 : 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원  
 1993년 4월 ~ 1995년 8월 : 일본 후쿠오카공업대학 정보공학과 조교수  
 1995년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 전기전자공학부 조교수  
 [주 관심분야] 전자파 이론 및 안테나, EMC/EMI, 전자파 응용 등