

論文

# 프레넬 영역에서의 해상용 RFID 전파모드 이론 고찰

임정빈\*·구자영\*\*·이재응\*\*\*

\*목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수, \*\*해양경찰청 정보화계, \*\*\*목포해양대학교 해양산업대학원

## Research on the Propagation Mode Theory of Marine RFID in the Fresnel Zone

Jeong-Bin Yim\* · Ja-Young Ku\*\* · Jae-Eung Lee\*\*\*

\*Div. of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

\*\*Korea Coast Guard, Incheon, Korea

\*\*\*Graduate School of Maritime Industry, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

**요 약 :** 해상용 RFID의 탐지 가능한 거리를 조사하기 위하여 프레넬 영역(fresnel zone)에서 가시선(Line Of Sight, LOS) 범위에 대한 이론적인 전파모드를 고찰하였다. 지구곡면에 대한 LOS의 구조적 모델을 제시하고, 전파 모드 이론과 특정 주파수에 대한 수평거리 계산 방법을 고찰하였다. 연구결과, 희망 탐지거리 확보를 위한 송수신기 안테나 높이와 기상환경에 의한 탐지거리의 영향 등에 대한 이론적 분석이 가능하였다.

**핵심용어 :** 가시선, 무선식별장치, 프레넬 영역, 전파모드, 지구곡면

**ABSTRACT :** The theoretical propagation modes of radio waves in the area of Line of Sight(LOS) within Fresnel zone are searched for the available detection ranges in a Marine RFID (Radio Frequency Identification). The structural LOS model to Earth's curvature is proposed and, the calculation method of horizontal distance in a specific radio frequency is also considered in this work. As studying results, it is found that the height of antenna to cover the detection ranges and the influences of detection ranges by weather environments can be analyse with the theoretical methods.

**KEY WORDS :** Line Of Sight, RFID, Fresnel zone, wave propagation modes, Earth's curvature

### 1. 서 론

RFID (Radio Frequency IDentification)는 무선 주파수를 이용하여 물체를 식별하는 장치이다. 현재 RFID는 주로 육상의 물류, 물체식별, 홈오토메이션 등에 적용되고 있다. 한편, 육상보다 더 광범위한 적용이 가능하고, 육지면적의 2.5배에 달하는 우리나라 EEZ 영역을 고려하면, 해상에서의 RFID 적용은 산업응용 측면에서 고부가가치 창출이 가능할 것으로 고려된다[1]-[4].

본 연구진은 해상에서 선박이나, 어구, 라이프자켓 등을 식별하기 위한 해상용 RFID(Marine RFID) 개발을 추진하고 있다[5]. 해상용 RFID는 해상이라는 특수한 환경에 적용하기 때문에 육지와는 다른 지형적인 특징을 RFID 설계 및 제작시 고려해야한다. 특히, 장거리 탐지를 위한 해상용 RFID는, 지구의 구배(curvature) 때문에 발생하는 전파의 반사, 산란, 회절 등을 고려해야한다. 그리고 전파가 전파되는 가시거리(Line Of Sight, LOS)의 경우는 프레넬 영역(Fresnel zone)의 생성과 훼손에 의해서 탐지거리가 영향을 받기 때문에 이를 분석하고 계량화할 수 있는 기법이 필요하다.

본 연구에서는 기존 프레넬 영역에서의 LOS와 지구구배 등에 관한 연구를 이용하여 해상용 RFID에 대한 전파모드 분석 기법과 최적의 안테나 높이, 기상환경에 따른 탐지거리의 영향 등을 분석하고자 한다.

### 2. 이론 전개

#### 2.1 전파 구배 현상의 모델링

지구의 구배(curvature) 때문에 전파는 Fig. 1과 같이 지표면을 따라 굴절되면서 전파된다. 지표면으로부터 고도가 증가함에 따라 굴절 인덱스  $n = \sqrt{\epsilon_r}$  ( $\epsilon_r$ : 공기의 유전율)가 감소하기 때문에 전파속도는 증가하고, 지-대-지(ground-to-ground) 이동통신의 경우는 전파의 이동거리가 멀어짐에 따라 원호에 근사한 전파의 파선 경로(radio wave ray path)를 만든다. 표준 대기에서 지구구배의 반경은  $r_w \approx 4 r_e$  ( $r_e$ : 지구반경 6,370km)이 된다[6].

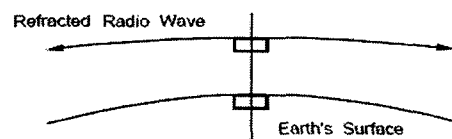


Fig. 1 Curvature of the refracted radio wave

전파의 파선경로가 굽어지기 때문에 전파신호의 수평도달거리는 광학적 직선거리와 비교하여 길어진다. 충분한 높이  $h_{ei}$ 를

갖는 안테나  $i$ 에 대해서 경사되면서 굽어지는 전파의 파선경로의 경우, 기하학적 형태는 다음 Fig. 2와 같이 실제 육지형태를 완만한 지구(smooth Earth) 형태로 근사하여 전개할 수 있다.

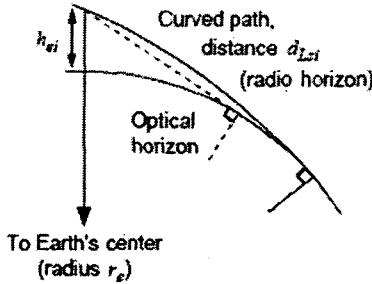


Fig. 2 Geometry of the smooth Earth

그리고 안테나  $i$ 로부터 전파의 파선경로가 지구와 만나는 접선점까지의 경로길이는 Fig. 2의 완만한 지구의 수평거리  $d_{Lsi}$ 로 나타난다. 통신경로를 분석하는 경우에  $d_{Lsi}$ 는 Fig. 2의 광학적 도달거리를 나타내는 점선의 직선경로로 취급하는 것이 편리하다.

이를 위하여 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 Fig. 2에 나타난  $d_{Lsi}$ 와 동일한 거리개념을 갖는 반경  $a = k r_e > r_e$ 의 지구 형태를 가정한다. 일반적으로 통신 시스템에서는  $a = 4 r_e / 3 = 8,493\text{km}$ 의 지구 모델을 이용하여 전파경로를 분석하고 있다.  $a = 4 r_e / 3$ 를 이용하면, 지구상공 수 km 이내에 파선경로가 있는 경우, 직선으로 고려할 수 있다.

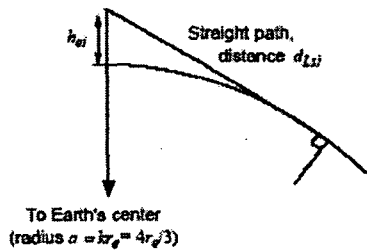


Fig. 3 Fictitious horizon geometry

Fig. 3의 근사 지구모형에서  $d_{Lsi}$ 는 다음 식(1)과 같이, 지구 반경  $a$ 와 안테나 높이  $h_{ei}$ 의 함수로 계산된다.

$$d_{Lsi} = \sqrt{(a + h_{ei})^2 - a^2} \approx \sqrt{2 a h_{ei}} \quad (1)$$

### 2.2 지형을 고려한 효과적인 안테나 높이

Fig. 3의 근사 지구모형에 나타난 파선경로에 산이나 빌딩이 가로막고 있는 경우, 수평거리  $d_{Lsi}$ 는 이들 물체와의 접선거리로 결정된다. 높은 산이나 복잡한 지형이 전파경로에 존재하는 경우, 수평거리  $d_{Lsi}$ 는 근사 지구모형에서 예상한 전파거리보다

줄어든다.

이러한 지형이나 빌딩이 전파경로에 존재하는 경우, 효과적으로 임피던스 매칭된 안테나의 LOS(Line-Of-Sight) 거리도 영향을 받는다. 이러한 전파경로의 방해물을 고려하는 경우, 우선적으로 고려해야할 것이 방해물의 높이데, 일반적으로 참조 수평면(reference plane)을 기준으로 고려한다. 예로서, 송수신 안테나가 설치된 장소의 지형과 송수신 안테나 사이에 형성되는 대권표면(great circle surface) 경로는, 참조 수평면을 기준으로 상하 변동되는 것으로 고려할 수 있다[6]-[10].

송신기로부터 수신기까지의 경로사이에서, 거리  $x$ 에 있는 지형의 고도  $h_a(x)$ 는 다음 식(2)으로 나타낼 수 있다.

$$h_a(x) = h_{ref}(x) + h_s(x), \quad 0 \leq x \leq d \quad (2)$$

여기서,  $x=0$ 은 송신기 위치의 거리,  $x=d$ 는 수신기 위치의 거리,  $h_{ref}(x)$ 는 전파경로에 있는 참조 수평면의 고도 또는 참조 수평면의 평균고도,  $h_s(x)$ 는 참조 수평면의 편차.

수평거리  $d_{Lsi}$ 에 미치는 지형의 효과와 전파에 미치는 다른 효과를 모델링하기 위해서, 참조 수평면의 고도는  $x$ 에 대한  $h_a(x)$  데이터의 직선 근사과정을 통하여 모델을 구할 수 있다. 그러나 모든 실제 지형에 대한 데이터를 확보하는 것이 어렵기 때문에 지형불규칙 변수(terrain irregularity parameter)  $\Delta h$ 를 도입한다.  $\Delta h$ 는 Fig. 4와 같이 위의 식(2)의  $h_s(x)$  샘플에 대해서 중간값과 평균값을 구한 후, 이들 사이의 10% 편차를 나타낸 값이다.

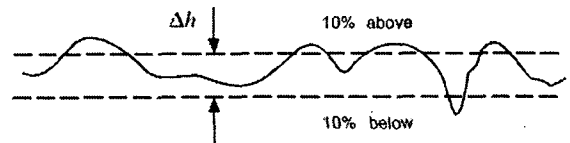


Fig. 4 Terrain irregularity parameter,  $\Delta h$

이러한 지형불규칙 변수  $\Delta h$ 는 다양한 관련 연구자료를 통하여 다음 식(3)과 같이 경로길이  $d$ 의 함수로서 보간된 평균 높이로 나타난다.

$$\Delta h(d) = \Delta h(1 - 0.8e^{-d_{km}/50}) \quad (3)$$

위의 식(3)에서, 경로상의 상세한 지형특징을 모르는 경우에는 다음 Table. 1에 나타난 대표적인 지형을 선택하여  $\Delta h$ 의 값을 정할 수 있다.

이와 같은 실제 불규칙 지형에 설치한 안테나  $i$ 의 구조적 높이를  $h_{gi}$ 로 두면, 이 안테나에 대한 효과적인 안테나 높이(effective antenna height, EAH)는 근사적으로 다음 식(4)으로 나타낼 수 있다.

$$h_{ei} \doteq \max [h_{gi}, h_{gi} + h_a(x_i) - h_{ref}(x_i)], i = t, r \quad (4)$$

여기서, 전송기에 대해서  $i = t$ , 수신기에 대해서  $i = r$ .

Table 1 Terrain features and its  $\Delta h$

Terrain description	$\Delta h$
Water or very smooth plains	0-5
smooth plains	5-20
Slightly rolling plains	20-40
Rolling plains	40-80
Hills	80-150
Mountains	150-300
Rugged mountains	300-700
Extremely rugged mountains	>700

여기서,  $h_s$ 를 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 안테나를 설치한 장소의 지형 높이와 각 지역의 평균 지형 높이 사이의 차로 나타내면, 안테나가 산마루에 있는 경우 ( $h_s > 0$ ), EAH는 안테나의 구조적 높이  $h_{gi}$ 에 지형 높이  $h_s$ 가 더해지는 형태로 된다.

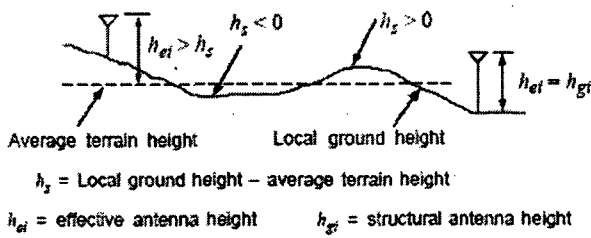


Fig. 5 Concepts of Effective Antenna Height,  $h_{ei}$

특별히 지정한 지형 데이터가 없는 경우  $h_{ei}$ 를 예측하기 위해서는  $\Delta h$ 를 안테나 사이트 위치에 대한 통계값으로 구할 수 있다. 이러한 경우,  $h_{ei}$ 는 다양한 자료를 통하여 다음 식(5)과 같은 실험식으로 구할 수 있다. 단, 식(5)은 안테나의 구조적 높이가 10미터 이내인 경우의  $h_{ei}$  계산에 적용된다.

$$h_{ei} = \begin{cases} h_{gi}, & (a) \\ h_{gi} + \left[ 1 + c \cdot \sin\left(\frac{\pi h_{gi}}{10m}\right) \right] e^{-2h_{gi}/\Delta h}, & (b) \\ h_{gi} + (1+c) \cdot e^{-2h_{gi}/\Delta h}, & (c) \end{cases} \quad (5)$$

여기서, (a)는 비특정 위치를 선택한 사이트, (b)는  $h_{gi}$ 가 5m 이내일 때 정확하게 선택한 사이트, (c)는  $h_{gi}$ 가 5m 이상일 때 정확하게 선택한 사이트 등을 나타내고, 위의 식(5)의  $c$ 는 다음과 같이 실험적으로 결정된다.

$$c = \begin{cases} 4, & \text{careful siting} \\ 9, & \text{very careful siting} \end{cases}$$

위의 식(5)를 이용하여 안테나의 구조적 높이  $h_{gi}$ 와 이에 대

한 EAH  $h_{ei}$  계산 결과를 Fig. 6에 나타냈다.

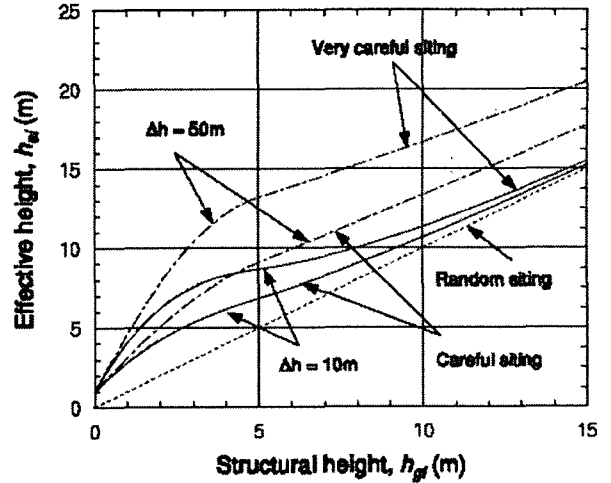


Fig. 6 Calculation results  $h_{gi}$  versus  $h_{ei}$

### 2.3 LOS 영역에서의 전파

LOS만을 고려하는 경우, 지리적인 특징은 다음 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

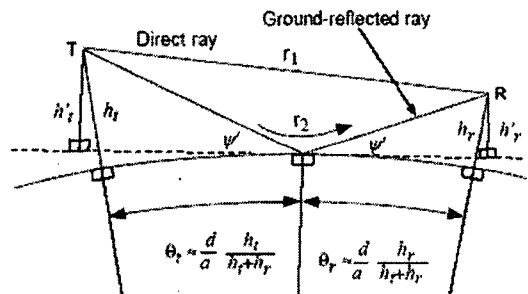


Fig. 7 Reflection from a smooth spherical Earth

Fig. 7에서, 주어진 송신 안테나 높이  $T$ 와 수신 안테나 높이  $R$  사이에는 경로길이  $r_1$ 의 직접파선과 경로길이  $r_2$ 의 반사파선 양쪽이 존재한다. 전자장의 방향특성 때문에 전파가 지면에 반사될 때 위상이 변한다. 수평평면에 대해서는 180도 위상이 변하며, 반사파의 경로 길이가  $r_1 \approx r_2$ 일 때 파괴적인 간섭을 야기하며, 이러한 결과는 안테나 높이가 낮고, 긴 거리에서 나타난다.

Fig. 7의 완전한 구형지구 모형은 Fig. 8과 같이 평면 지구모형으로 근사하여 LOS 경로에서의 전파 정밀도를 분석할 수 있다.

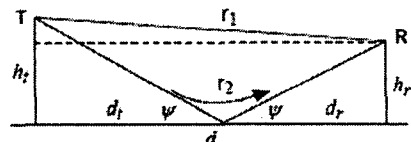


Fig. 8 Reflection from a plane smooth Earth

Fig. 8에서 직접파선의 경로길이  $r_1$  과 반사파선의 경로길이  $r_2$  사이의 차는 다음 식(6)으로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 r_2 - r_1 &= \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \\
 &\approx d \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_t + h_r}{d} \right)^2 \right] - d \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_t - h_r}{d} \right)^2 \right] \\
 &= \frac{2 h_t h_r}{d} \tag{6}
 \end{aligned}$$

그리고 안테나 높이를 미터(m)로 나타낸 경우, 위의 식(6)의 경로길이의 차는 다음 식(7)과 같은 전파 위상차  $\Delta$ 를 야기하고,

$$\Delta = \frac{4 \pi h_t h_r}{\lambda d} \tag{7}$$

Fig. 8에서의 반사각  $\psi$  는 다음 식(8)으로 주어진다.

$$\tan \psi = \frac{h_t}{d_t} = \frac{h_t + h_r}{d} \tag{8}$$

### 2.4 LOS 링크를 위한 프레넬 영역

일반적으로, 제1 프레넬 영역은 직접파선과 반사파선의 경로길이 차이가 반 파장( $\lambda/2$ ) 이하인 반사 점을 포함하는 타원체로서 Fig. 9와 같이 정의할 수 있다.

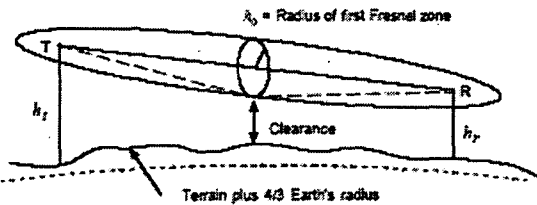


Fig. 9 First Fresnel zone and path clearance

Fig. 9에서 프레넬 영역의 체적은 타원체가 되는데, 송신기 안테나 위치  $T$ 와 수신기 안테나 위치  $R$ 을 기준으로 하는 두 개의 초점이 연결되는 점의 자취로 구성된다. 프레넬 영역의 반경  $h_0$ 을 계산하기 위하여 Fig. 9를 다음 Fig. 10과 같이 간단히 나타낸다.

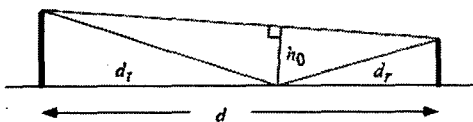


Fig. 10 Fresnel zone radius,  $h_0$

Fig. 10을 이용하여 반파장( $\lambda/2$ ) 위치는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\lambda/2 = \text{반사경로의 길이} - d$$

$$\begin{aligned}
 &= (\text{송신기로부터 반사점까지의 거리} + \text{반사점에서 수신기까지의 거리}) - d \\
 &= \sqrt{d_t^2 + h_0^2} + \sqrt{d_r^2 + h_0^2} - d \\
 &= d_t \left[ 1 + \frac{h_0^2}{2d_t^2} + \dots \right] + d_r \left[ 1 + \frac{h_0^2}{2d_r^2} + \dots \right] - (d_t + d_r) \\
 &\approx \frac{h_0^2}{2} \cdot \frac{d_t + d_r}{d_t d_r} \tag{9}
 \end{aligned}$$

위의 식(9)으로부터 미터 단위로 나타낸  $h_0$ 를 구하면 다음 식(10)이 된다.

$$h_0(m) = \sqrt{\frac{\lambda d_t d_r}{d}} \tag{10}$$

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 실험방법과 실험결과

2dB 안테나를 부착한 100mW의 xxxMHz 대역 RFID 송신기와 2dB 안테나를 부착한 수신기를 개발하여 해상에서 최대 전파 도달거리 측정실험을 하였다.

2척의 소형선박을 이용하여 한 척에는 송신기를, 다른 한 척에는 수신기를 부착하여 ECDIS와 레이더를 이용하여 통신 가능거리를 측정하였다.

측정실험전 이 시스템의 도달거리는 약 10마일 이상으로 계산되었으나, 실험결과, 해상상태에 따라서 약 5~6마일 정도의 전파 도달거리를 획득하였다. 이론적으로 계산한 LOS 길이와는 많은 차이를 나타냈다.

### 3.2 분석

상기 이론식에 의하면, xxxMHz RFID의 경우, 프레넬 반경은 약 10마일에 대해서 약 30미터이고, 지구 구배에 의한 수평면에서의 프레넬 영역 손실은 해상에서 2마일마다 약 3미터 발생한다. 따라서 10마일의 통신경로를 확보하기 위해서는 약 15미터의 프레넬 영역이 손실됨을 감안해야한다.

따라서 10마일 탐지거리를 갖기 위해서는 프레넬 반경 30미터에 프레넬 영역의 손실분 15미터를 더하여 약 45미터의 영역을 확보해야한다. Fig. 11은 이러한 해상에서의 프레넬 영역이 해수면 접촉에 의하여 손실되는 개념을 나타낸다.

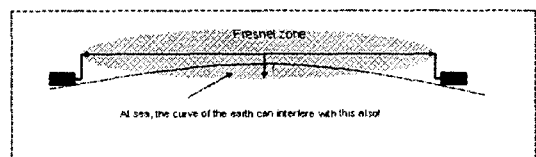


Fig. 11 Interferences with sea surface

### 3.3 문제점 분석과 대책

이러한 프레넬 영역의 손실 방지를 위한 대안을 고려하면 다음과 같다. 우선, 다음 Fig. 12와 같이 한쪽이나 양쪽 모두의 안테나를 수면으로부터 높게 설치하는 것이다. 이 방법은 안테나를 높이 설치할 수 없는 환경에서는 적용 불가능한 것으로 고려된다.

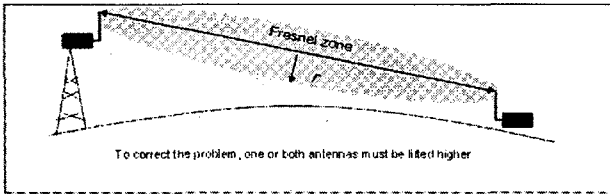


Fig. 12 To correct the problem

다른 방법으로는 다음 Fig. 13과 같이 2대의 수신기를 리피터(repeater)로 활용하는 방법이다. 이 방법을 적용하기 위해서는 송신기와 수신기 중간에 리피터를 관리할 수 있는 중간 기지국(육상 기지국이나, 선박 등) 개념이 필요하다.

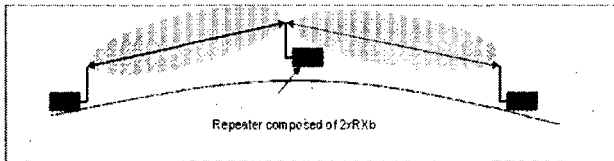


Fig. 13 Repeater composed with two Receivers

## 4. 결론

해상에서 RFID를 적용하는 경우, 지구구배에 따른 수평 도달거리 이론을 정리하고, 이를 실제 실험결과와 비교하여 분석하였다.

송수신 실험 장치를 개발하여 해상 실험한 결과, 이론적으로 계산한 수평 도달거리에 미치지 못하는 거리가 확보되었다. 이

차이는 프레넬 영역 손실에 의한 것으로 추정되며, 해결방법은 안테나를 높이는 것이 주효하지만, 사정이 허락되지 않는 환경에서는 적용 불가하고, 다른 대안으로는 2대의 수신기를 리피터로 사용하는 방법도 고려할 수 있음을 알았다.

현재 이 시스템은 실험 중인데, 실험을 통한 이론검증은 향후 학회를 통하여 보고할 예정이다.

## 참고 문헌

- [1] 표철식, UHF RFID, TTA 저널 제94호, 2004, pp.122-125
- [2] 표철식, 채종석, RFID 기술 및 표준화 동향, TTA 저널, 제95호, 2004, pp.38-39
- [3] 한국 RFID/USN 협회, www.karus.or.kr
- [4] 산자부 보도자료, 해상 컨테이너 RFID(무선식별) 부착의무에 따른 대응전략 수립 2005-03-25, www.mocie.go.kr
- [5] 해양경찰청 보도자료 2005, nmpa.go.kr
- [6] Byron Barker, Wireless/RFID, Defense Spectrum Office, DISA, Feb.28-Mar.2, 2005
- [7] RFID Committee, *RFID Handbook*, www.rfid-handbook.de, 2005
- [8] L. E. Miller, Propagation Model Sensitivity Study, J. S. Lee Associates, Inc. July 1992
- [9] Jeremy Pearce and Daniel Mittleman, Defining the Fresnel zone for broadband radiation, Physical Review E66, 056602, 2002
- [10] Jesper Spetzler and Roel Snieder, Tutorial-The Fresnel Volume and Transmitted Waves, Geophysics, Vol.69, No.3, June 2004, pp.653-663
- [11] ZYTRAX Inc., *VHF/UHF/Microwave Radio Propagation: A Primer for Digital Experimenters*, ZYTRAX.com