

# 해군 함정 내부공간에 대한 2.4GHz 대역의 채널 특성과 경로손실모델 분석

정희원 최대근\*, 이정규\*, 김영훈\*, 종신회원 김성철\*\*°

## Analysis of Path Loss Model and Channel Characteristics at 2.4GHz on Navy Warship's Internal Space

Dae-geun Choi\*, Jung-kyu Lee\*, Young-hoon Kim\* *Regular Members,*  
Seong-cheol Kim\*\*° *Lifelong Member*

### 요 약

무선 네트워크가 요즘 들어 기술적인 도약을 이루면서 그 적용범위나 역할이 중요해지고 있다. 국방 분야에서 무선 네트워크를 도입하여 유선의 한계를 극복하고 개선하려는 움직임도 적지 않으며 특히 현재 해군 함정 내부에서의 대부분의 통신을 유선을 이용하기 때문에 복잡하고 비효율적이다. 본 논문에서는 함정 내 무선 네트워크 구축을 위해서 일반적인 실내 전파환경과는 많은 차이점을 가지는 함정 내 격실 및 복도에 대해 전파 환경 측정 실험을 실시하고 모델링을 하였다. 함체 전체가 철 구조물로 이뤄진 특수 환경인 함정 내에서 2.4GHz 대역의 주파수에 대한 CW 측정을 통해 전파환경 특성을 분석하고 함정 내부공간에 대한 전파 경로 손실 모델을 제시 하며, 전파 추적 시뮬레이션 기법을 통해 측정 결과와 비교분석하였다. 더욱이, 기존에 연구되었던 실내 전파환경에 대한 전파 경로손실 모델과 비교 분석하여 차이점을 도출하여 함정 내 무선 네트워크의 활용방안에 대해 고찰하였다.

**Key Words** : 해군 함정, 연속파 측정, 2.4GHz, 경로손실모델, 광선추적기법

### ABSTRACT

Recently, wireless network has been playing an important role in communication system and the applications have become wider with its big technological leap. In defence sector, there are some attempts to use wireless networks to go beyond the wire system. Especially, most internal space of the warships have the wired communication system, which are complicated and inefficient. In this paper, we measure and make a channel model about the internal parts of the warship which contain compartments and corridors including many differences from general indoor environment for establishing wireless networks in warship's internal space. In the unique environment made of metal, we measure 2.4GHz signals using continuous wave(CW) and analysis the environment to present indoor path-loss model for comparing with results from the ray-tracing tool. Moreover, we draw the conclusion that the environment of warships has a wide difference from conventional environments and put the results to practical use in warship's internal space.

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0000316)

\* 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 전파 및 무선통신 연구실 (face1549@mxwell.snu.ac.kr, minishao@maxwell.snu.ac.kr)

\*\* 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 (sckim@maxwell.anu.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-08-333, 접수일자 : 2011년 8월 1일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 26일

## I. 서론

지금의 현대사회는 지속적인 무선통신의 발전에 힘입어 다양한 무선 네트워크 서비스 및 무선액세스를 기반으로 하는 센서 네트워크에 대한 요구가 급속도로 확산되고 있다. 육상의 대형 오피스빌딩, 캠퍼스, 공항 등이 무선 네트워크 및 무선센서네트워크를 이용해 인터넷과 이메일, 인터넷 전화, 위치 기반서비스 등의 업무를 자유자재로 처리하듯이 바다 위의 중대형 함정(수송선, 구축함, 호위함 등) 및 일반 선박에서도 똑같은 업무를 자유롭게 처리할 수 있도록 무선 네트워크 및 이를 기반으로 무선센서 네트워크 시스템을 구축해 유선의 한계를 극복하고 개선하려는 움직임이 적지 않다.

현재의 해군 함정들은 지휘통제체계, 무장체계, 통신체계 등 복잡한 전투체계를 탑재하여 운영하고 있으며, 체계 간 필요한 주요 정보들은 초기에 설계된 유선에 의해 접속(hard-wired)되어 있어, 함정을 운영하는 기간 중 체계의 변경으로 인한 추가 배선 작업 시 고가의 비용 및 함체 수밀에 대한 검토가 요구되는 실정이다. 이에 함정 내 무선 네트워크 및 이를 기반으로 무선센서 네트워크기술을 구축한다면 유선을 대체할 수 있는 예비 데이터 전송 통신망 확보가 가능하며, 함정의 주요장치의 상태를 모니터링(Ship environment monitoring) 할 수 있고, 승조원들의 위치를 실시간 파악할 수 있는 시스템(RTLS : Real Time Location System) 구축이 가능해진다. 이와 같은 무선 네트워크 시스템 구축은 현장 지휘관들의 지휘결심에 큰 영향을 줄 것으로 예상되며, 함정의 전투력 향상에 획기적인 효과를 발휘할 수 있을 것이다. 또한 무선 네트워크로 대체 가능한 유선 네트워크 케이블을 식별하여 대체함으로써 함정의 건조공정이 크게 단축되고, 비용절감 효과도 클 것으로 예상된다.

본 논문에서는 일반적인 실내 전파환경과는 많은 차이점을 가지는 함정 승조원의 거주공간인 격실 및 복도에 대해 무선 전파환경 측정실험을 실시하였다. 함정내부가 벽면, 바다, 천장, 해치(Hatch) 등 철 구조물(metallic construction)로 이뤄진 함정내부에서 2.4GHz 대역의 주파수에 대한 CW 측정을 통해 전파환경 특성을 분석하여 함정 내부공간에 대한 전파 경로 손실 모델을 제시하고, 전파추적 시뮬레이션 기법을 이용하여 경로손실을 예측하고 측정결과와 비교분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 실내

전파환경에서의 기존의 경로 손실 모델을 소개한 후 이를 기반으로 함정 내의 전파 환경 특성을 살펴본다. 3장에서는 함정 내 실험 시스템과 시나리오를 소개한다. 4장에서는 실험 결과와 전파추적 시뮬레이션을 비교 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 실내 전파환경에서의 경로손실모델

지금까지 많은 연구가 수행되어진 실내 전파 환경<sup>[1,2]</sup>에서의 경로 손실 모델과는 달리 철 구조물로 이뤄진 함정내부 환경<sup>[3]</sup>에서의 전파 특성 및 경로 손실 모델에 대한 연구가 아직 미진한 단계에 머무르고 있다. 이에 실제 함정내부에서 전파 채널측정 및 분석을 통해 경로 손실 모델을 제시하고 함정 고유의 전파 특성을 이해함으로써 추후 함정 내 무선 네트워크 시스템 구축 시 통신체계 성능 및 효율성을 극대화하기 위함이며, 향후 군 통신에 적용 가능유무 및 그 필요성에 대해 언급하기 위함이다.

### 2.1 실내 다중경로에 대한 경로손실모델

그림 1은 실내 무선 전파환경을 나타낸 것이다. 실내 복도의 벽과 바다는 평탄한 것으로 가정하고 전파를 반사시키면 송신기와 수신기 사이의 물체에 의해 반사되어진 산란전계는 다음과 같다.<sup>[4]</sup>

$$E_s = E(1 + \Gamma e^{j\beta\Delta d}) \quad (1)$$

여기서  $\Delta d$ 는 직접파와 반사파와의 전파경로차를 나타내고  $\Gamma$ 는 반사계수를 나타낸다. 자유공간 경로손실에 의해  $E$ 는 거리에 비례해서 선형적으로 감쇠되어진다. 자유공간 전파경로 손실 모델에 따라 수신기에 수신되는 평균 수신 전력은 다음과 같다.

$$P_r = \frac{|E|^2}{2\eta_0} = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2)$$

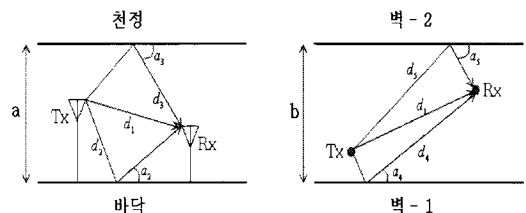


그림 1. 실내 복도의 다중경로 손실 모델

여기에서  $\eta_0$ 는 자유공간 특성임피던스이고,  $P_t$ 는 송신전력,  $G_t$ 는 송신안테나 이득,  $G_r$ 는 수신안테나 이득,  $\lambda$ 는 파장,  $d$ 는 송신기와 수신기간의 거리이다.

식 (2)를 실내 다중경로 환경에 적용시키기 위해서 그림 1처럼 다중경로 거리  $d_1$ 에서  $d_5$ 에 대한 수신점에서의 수신 전력은 다중경로 손실 계산식을 이용하면 다음과 같다.

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \sum_{i=1}^k \frac{1 + \Gamma(a_i) \exp(-j\beta\Delta d_i)}{d_i} \right|^2 \quad (3)$$

여기에서  $\Gamma(a_i)$ 는 반사계수,  $a_i$ 는 입사각,  $\beta$ 는 전파상수이고  $\Delta d_i$ 는 직접파와 다중경로 전파의 경로차이다.  $k$ 은 다중경로의 수이고, 그림 1과 같이  $d_1$ 에서  $d_5$ 로 나타난다.  $k=1$ 은 송·수신기 사이에 직접파만이 존재한다고 가정하였을 때의 전파 경로이고  $k=3$ 은 직접파와 바닥 및 천정 반사 또는 직접파와 양쪽 벽면의 반사를 고려한 3가지 전파에 대해서만 영향이 미친다고 가정하여 적용된 전파경로이다.  $k=5$ 는 일반적인 복도 환경에서 발생될 수 있는 5가지의 전파를 고려했을 때의 전파 경로이다.

식 (3)의 거리항인  $d_i$ 에 적용되는 파라미터로  $h_t$ 는 송신 안테나의 높이이고,  $h_r$ 는 수신 안테나의 높이이다. 그리고 벽-1로부터 송신안테나가 떨어져 있는 거리는  $x_1$ 이고, 수신 안테나가 떨어져 있는 거리는  $x_2$ 이므로 그림 1의 벽-1을 기준으로 한 송·수신기 사이의 실제 떨어진 거리  $d'$ 는 다음과 같다.

$$d' = \sqrt{d^2 + (x_2 - x_1)^2} \quad (4)$$

따라서 송·수신기 사이에서 전달되는 경로는 다섯 가지로 그 경로에 대한 거리 계산은 다음과 같다. 첫 번째는 직접 전파된 신호로서 거리  $d_1$ 은 다음과 같다.

$$d_1 = \sqrt{d'^2 + (h_t - h_r)^2} \quad (5)$$

또한 바닥 및 천정에 의해 반사되어 진행되어온 전파경로 거리  $d_2, d_3$ 는 다음과 같다.

$$d_2 = \sqrt{d'^2 + (h_t - h_r)^2} \quad (6)$$

$$d_3 = \sqrt{d'^2 + [2 \times (a - h_t)]^2} \quad (7)$$

그림 1의 벽-1 및 벽-2로부터 반사되어 온 전파 경로 거리  $d_4, d_5$ 는 다음과 같다.

$$d_4 = \sqrt{d^2 + (2 \times x_1)^2} \quad (8)$$

$$d_5 = \sqrt{d^2 + [2 \times (b - x_2)]^2} \quad (9)$$

한편 반사계수  $\Gamma(a_i)$ 는 안테나의 특성 및 각 반사대상 물체의 유전체 상수( $\epsilon_c$ )에 따라 변화되고 다음과 같다.

$$\Gamma(a_i) = \frac{\epsilon_c \sin\theta - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\theta}}{\epsilon_c \sin\theta + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\theta}} \quad (10)$$

$$\Gamma(a_i) = \frac{\sin\theta - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\theta}}{\sin\theta + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\theta}} \quad (11)$$

위 식에서 유전체 상수  $\epsilon_c$ 는 다음과 같다.

$$\epsilon_c = \epsilon_r - j60\sigma\lambda \quad (12)$$

여기서는 유전율  $\epsilon_r$ 은 유전체상수  $\epsilon_c$ 의 중요한 성분이고  $\sigma$ 는 도전율이다.

### 2.2 거리종속 경로손실모델

실내의 평균 경로손실은 거리에 대해서 지수적으로 증가한다.

$$\overline{PL}(d) \propto \left( \frac{d}{d_0} \right)^n \quad (13)$$

여기에서  $\overline{PL}$ 은 평균 경로손실이고,  $n$ 은 경로손실이 거리에 대해서 얼마나 빠르게 증가하는가를 나타내는 평균 경로손실 지수이고,  $d$ 는 송신기와 수신기 사이의 거리이다. 평균 경로손실에 대한 식 (14)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{PL}(d) [dB] = PL(d_0) + 10 \times n \times \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (14)$$

여기에서 기준거리는 1m 이고,  $PL(d_0)$ 는 송신기에서 1m 기준거리까지의 자유공간 손실로 가정할 수 있다. 식 (14)에서 경로손실은 대수정규분포를 이루고 있음을 알 수 있다. 여기서 실내의 형태, 실내의 길이, 송신기와 수신기간 물체의 함수 파라미터들로 나타나는 평균 경로손실 지수  $n$ 을 결정해야 한다. 또한 송신기와 수신기 간의 거리  $d$ 에 대한 경로손실은 다음과 같다.<sup>[5]</sup>

$$PL(d) [dB] = \overline{PL}(d) [dB] \times X_\sigma [dB] \quad (15)$$

여기서  $X_\sigma$ 는 표준편차  $\sigma$ 를 갖는 제로평균 대수정규분포이다.

### 2.3 ITU-R에서 권고하고 있는 실내전파환경에서의 경로 손실 모델

ITU-R P.1238에서의 실내 전파 모델 사용은 송신기와 수신기가 같은 건물 내에 존재한다고 가정한다. 경로 손실 측정방법으로는 경로와 site의 정보가 거의 필요 없는 장소 일반적(site-general)모델과 거리 모델 대신에 각 벽에 대한 손실을 고려하는 장소 특정적(site-specific) 모델이 있다. 경로 손실 모델은 경로 손실의 평균과 음영 페이딩(shadow fading)의 통계에 의해서 특정 지어진다. 이러한 경로 손실 모델들은 여러 개의 벽이나 층을 통과하는 신호의 감쇠를 설명 할 수 있으며, 층간의 주파수 재사용 특성을 고려한 여러 층을 통과한 손실도 설명 할 수 있다. 벽과 장애물만을 통과하는 전송특성과 건물의 단일 층 내에서의 다른 손실 모델을 고려한 경로 손실 지수에 의한 경로 손실의 기본적인 모델은 다음 식 (16)과 같다.<sup>[6]</sup>

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + 10n \log_{10} d + L_f(N) - 28 \quad (16)$$

- 여기서  $n$  : 거리 경로 손실 지수
- $f$  : 주파수(MHz)
- $d$  : 송신기와 수신기 간 분리거리
- $L_f$  : 층 통과 손실인자 [dB]
- $N$  : 송신기와 수신기 사이의 층 개수

표 1은 여러 측정결과에 근거한 일반적인 매개

표 1. 실내 환경 경로 손실 계산을 위한 경로손실지수(n)

주파수	주거지	사무실	상가건물
900MHz	-	3.3	2.0
1.2~1.3GHz	-	3.2	2.2
1.8~2.4GHz	2.8	3.0	2.2
4GHz	-	2.8	2.2
60GHz	-	2.2	1.7

변수들을 나타낸다.<sup>[7]</sup>

### 2.4 함정 내에서의 무선 전파 특성

함정은 일반 주거지 및 빌딩과 같은 실내 환경과 비교하였을 때 크기 규모나 구조가 매우 다르고 폐쇄된 공간이 많아 전파가 전달되는 범위가 매우 짧아지고 전파 환경의 변화가 급격히 바뀌는 특성이 있다. 독특한 환경과 구조로 인해 무선통신 시스템 설치 시 고려해야하는 접속 점(Access Point)의 배치문제, 두꺼운 철판 및 격실, 문 폐쇄에 의한 데드존(Dead-zone)발생이 전파 간섭의 주요인으로 판단된다.<sup>[8]</sup>

가장 명백한 것은 함정의 내부는 두꺼운 철판으로 되어있어 매우 좋은 도체(Conductor)의 역할을 한다는 것이다. 즉 전계가 완벽한 도체로 들어가면 전부 소멸되는 특성을 가짐을 알 수 있다. 하지만, 외부로 통하는 해치 도어를 제외하고 일반 출입문은 강화플라스틱으로 되어있고, 고무재질로 둘러 쌓여있어서 전파를 흡수하거나 감쇄될 수는 있어도 완벽히 차단되지는 않는다. 이러한 특성을 이용한다면, 함정에서도 무선통신 환경을 구축할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

먼저 전파가 도체로 이루어진 함정의 벽을 통과하지 못하는 현상은 도체의 표피두께(Skin Depth)로 설명할 수 있다. 자유공간에서 전파하던 평면파(plane wave)가 도체 매질을 만나 투과하면 도체 내부에서 손실이 발생되는데 자유공간에서 평면파의 크기가  $e^{-1}$ 만큼 되는 거리가 그 도체의 표피두께가 된다.

위의 표피두께( $\delta_s$ )를 아래의 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (m) \quad (17)$$

측정시스템의 주파수가 2.4GHz, 즉 파장이 12.5Cm

이고 금속의 도전율(Conductivity)이  $10^7 [S/m]$ , 비투자율(Relative permeability)  $\mu_r$ 이 100이기 때문에 위 식을 통해 합정내부 철판의 표피두께가  $0.324 \mu m$  가됨을 알 수 있다. 즉 이를 통해 합정 벽을 이루고 있는 철판에 입사한 전파의 대부분이  $0.324 \mu m$  범위 안에서 소멸되기 때문에 합정의 철판두께인 1cm를 통과하지 못하고 대부분 반사됨을 알 수 있다. 이때 투과파가 생기지 않는 이유는 스넬의 법칙에 의한 전체 반사파와는 다른 현상인데 이는 스넬의 법칙이 성립하기 위해선 투과매질의 유전율  $\epsilon_2$ 가 입사매질의 유전율  $\epsilon_1$ 보다 작아야하는데 실험조건은 아래의 식 (18)과 같이 되기 때문이다. 여기서 유전율  $\epsilon_0$ 은 공기 중의 유전율이고,  $\epsilon_2$ 는 철판의 유전율이다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} < \epsilon_2 \quad (18)$$

이번에는 측정 시스템 환경과 매질의 정보를 이용해 전반사 환경을 정량적으로 계산해보면 식 (20)과 식 (21) 같이 반사계수( $\Gamma$ )와 투과계수( $T$ )를 알 수 있다.

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} = 0.324 \mu m \quad (19)$$

$$\gamma = \frac{1+j}{\delta_s} = (3.08 + j3.08) \times 10^6 \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{1+j}{\sigma \delta_s} = (0.308 + j0.308) \times 10^{-6} (\Omega) \quad (21)$$

$$\Gamma = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} = 0.998 \angle 179.9^\circ \quad (22)$$

$$T = \frac{2\eta}{\eta + \eta_0} = 2.308 \times 10^{-3} \angle 44.95^\circ \quad (23)$$

여기서  $\delta_s$  : 표피두께

$\gamma$  : 전파상수(Propagation coefficient)

$\eta$  : 고유임피던스(Intrinsic impedance)

$\Gamma$  : 반사계수(Reflection coefficient)

$T$  : 투과계수(Transmission coefficient)

본 측정실험에서 가정한 철판은 완전도체(Perfect conductor)는 아니기 때문에 줄(Joule)의 법칙과 포인팅 이론(Poynting theorem)을 이용해 철판에 입사된 전자파가 철판에 투과되어 표피 두께 안에서 소멸한 평균 파워를 구할 수 있다.

입사파를 식 (24)라 가정하면 투과되어 소멸된 파워는 식 (25)와 같다.

$$P_i = \frac{|E_0|^2}{2\eta_0} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} P_t &= \frac{1}{2} \int_v \bar{E}_t \bar{J}_t dv \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 (\hat{x} E_0 T e^{-\alpha z}) \cdot (\hat{x} E_0 T e^{-\alpha z})^* dz dy dx \quad (25) \\ &= \frac{1}{2} \sigma |E_0|^2 |T|^2 \int_0^1 e^{-2\alpha z} dz = \frac{\sigma |E_0|^2 |T|^2}{4\alpha} \end{aligned}$$

본 논문의 실험 환경에서 앞서 제시된 투과계수 ( $T$ )를 이용해 입사파  $P_i$ 와 투과 파  $P_t$ 의 비율은 정량적으로 계산해보면 다음의 식 (26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{\frac{\sigma |E_0|^2 |T|^2}{4\alpha}}{\frac{|E_0|^2}{2\eta_0}} = \frac{\eta_0 \sigma |T|^2}{2\alpha} = 3.292 \times 10^{-3} \quad (26)$$

여기서  $\alpha$ 는  $1/\delta_s$ 이며  $\eta_0$ 는  $120\pi$  값을 갖는다. 결과를 살펴보면 합정의 철판에 입사되어 투과해 소멸되는 파워가 입사파의 0.329%에 불과한데 이를 통해 도체 철판에 입사한 전파의 대부분이 반사됨을 알 수 있다. 이와 같이 합정 내부공간에 대한 무선 전파특성은 일반적인 ITU-R에서 권고하고 있는 실내 전파 환경과는 큰 차이점이 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 논문은 실제 합정내부의 중앙복도 및 격실(체력 단련 실)에서의 전파 측정실험 및 광선 추적기법을 이용한 시뮬레이션을 통해 합정내부 공간의 전반사 특성을 이해하고 경로 손실 모델 분석을 바탕으로 ITU-R에서 권고하고 있는 실내 전파 환경에서의 경로 손실 모델을 합정의 내부공간에 적용하는 데는 어려움이 있다는 것을 알아보고자 한다.

### Ⅲ. 함정내부공간의 채널측정

#### 3.1 측정 시스템

경로 손실을 측정하기 위하여 CW 측정 시스템을 사용하였다. 측정 장비의 구성은 그림 2와 같이 송신 단에서는 신호 발생기, RF 앰프, 옴니 안테나를 사용하였으며, 수신 단에서는 스펙트럼 분석기와 데이터 수집용 노트북을 사용하였다.

송·수신 안테나는 3dBi를 가지는 옴니 안테나를 사용하였으며, 송신출력은 안테나 입력 단에서는 20dBm 을 갖도록 하였다. 측정은 함정 내부의 승조원 거주구역인 체력 단련 실, 중앙복도에서 이루어졌다. 측정은 AP가 위치할 수 있는 지점인 체력 단련실의 코너(그림 3의 Tx Corner) 및 중심(그림 3의 Tx Center), 그리고 복도에서는 함미 쪽 해치도어 앞에(그림 3의 Tx Passaway) 설치하였다.

각 지점에서는 그 지점을 대표하는 평균 수신 값을 구하기 위해서 측정 지점 및 반 파장 떨어져 있는 4개의 지점에서 각 100번씩 수신 값을 수집하여 총 500번에 대한 섹터 평균값을 구하였다. 각 100 번씩 수신 값을 얻은 이유는 같은 지점의 신호의 세기일 지라도 변화의 폭이 크기 때문에 그 지점에서의 신호 세기에 대한 데이터의 신뢰도를 높이기 위해서이다. 따라서 한 순간의 값을 측정하는 것이

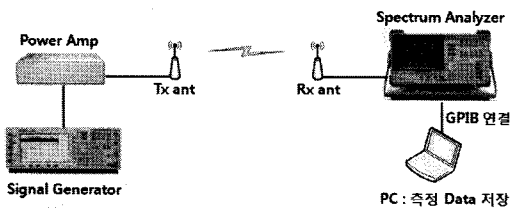


그림 2. CW 측정 시스템

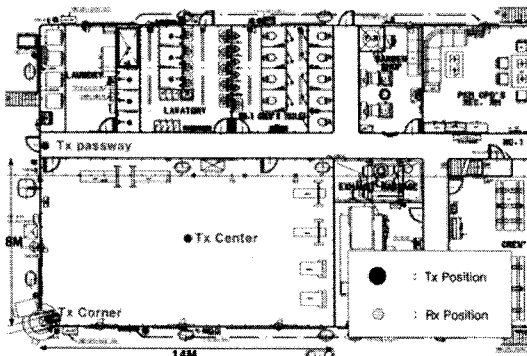


그림 3. 함정 내 도면 및 송신기 위치

표 2. 측정제원

송신전력	20dBm	
주파수	2.4GHz	
안테나 이득	3dBi	
안테나 높이	송신단	1.4m
	수신단	1.4m

아니라 한 지점에서의 신호 세기의 평균값을 이용하여 신호 세기를 판단해야 한다. 더 많은 값에 대한 평균을 취할수록 더 정확한 값을 얻을 수 있지만 보통 100회에서 200회까지의 평균을 이용한다. 송신기와 수신기의 높이는 바닥으로부터 1.4m의 높이를 유지하였다. 주파수는 공중 무선 랜 서비스, 블루투스, 무선 식별 시스템, 디지털 코드 없는 전화 등 다양한 통신에 사용되고 있는 ISM(Industrial Scientific Medical) 밴드 주파수 2.4GHz를 사용하였다.<sup>[9],[10]</sup>

#### 3.2 측정 시나리오

채널 측정실험은 함정의 주갑판(Main deck)에 있는 중앙복도 및 승조원 체력단련실에서 수행하였다. 함정 내부공간의 측정환경은 표 3과 같다.

먼저 중앙복도에서의 측정실험은 그림 4에서와 같이 주갑판에 있는 중앙복도의 함미 쪽 해치도어 앞에 송신 시스템을 설치하고 1m 간격으로 수신기를 송신 시스템으로부터 멀어지게 하면서 14개의 지점의 LOS환경에서 측정하였다. 또한 각각의 수신 지점 및 반 파장 떨어진 지점 4곳에서 각각 100회씩 총 500회 CW측정을 수행하였다. 반 파장 떨어진 지점 4곳에서 측정하는 이유는 한 지점에서 소규모 페이딩(small scale fading)이 발생할 수 있기 때문에 그 지점에서 반 파장 이상 떨어진 부근에서

표 3. 무선채널 측정환경

측정환경	크기	구성 재질
중앙복도	14 × 1.5 × 2.3m	바닥, 천장, 벽 등 20mm 두께의 강철판으로 되어있으며, 1개의 함미 쪽의 외부출입문은 강철판이며, 5개의 격실출입문은 알루미늄 재질임.
체력 단련실	14 × 8 × 2.3m	바닥, 천장, 벽 등의 재질은 중앙복도와 동일함. 벽면은 5mm두께의 단열재로 덮여져 있고, 바닥 및 천장은 1mm 두께의 폴리우레탄로 도포되어있음. 출입문은 2개이며 알루미늄 재질임.

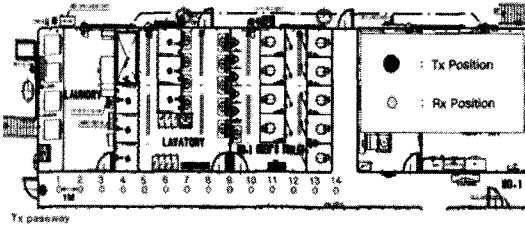


그림 4. 중앙복도에서의 측정지점

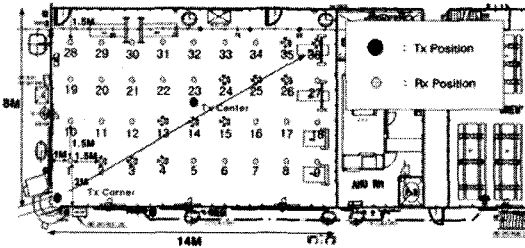


그림 5. 체력 단련 실에서의 측정지점

측정을 할 경우 비 상관 신호(uncorrelated signal)를 얻을 수 있으며<sup>[11]</sup> 이 값을 평균을 취할 경우 원하는 거리에 있는 신호 세기 값을 정확히 얻을 수 있기 때문이다.

승조원 체력 단련 실에서의 측정실험은 그림 5와 같이 승조원 체력단련실의 가장자리와 중심에 송신 시스템을 설치하고 중심에서는 36개 수신지점을 가시경로 환경으로 하여 CW측정을 수행하였고 가장자리에서는 반대편 가장자리까지 선을 그어서 선에서 가까운 거리에 있는 11개의 수신지점에 대해서 CW측정을 하였다. 합정내부는 벽면, 바닥, 천장, 해치door 등 모든 구조물이 철로 이루어져 있으며, 중앙복도와 통하는 출입문은 알루미늄으로 되어있다. 격실 내부의 운동기기는 모두 치워진 상태였으며, 측정실험을 하는 동안 사람의 이동은 없도록 하였다. 그림 5에서 빨간색으로 나타낸 지점이 송신지점 들이고, 노란색으로 나타낸 지점은 수신지점이다.

#### IV. 측정 결과 및 전파추적기법 비교

##### 4.1 중앙복도에서의 CW측정 실험결과

그림 6의 실험 결과에 나타난 추세선 방정식의 기울기는 경로손실지수  $n$ 값이 되며 절편은  $P_0$ 값이 된다. 이는 식(14)의 관계를 보면 알 수 있다. 측정 실험의 결과 경로손실지수  $n$ 은 1.45 값을 가지며,  $P_0$ 값은 -19.9dBm 값을 갖는다.

대규모 페이딩(Large-scale fading)을 고려한  $X_r$

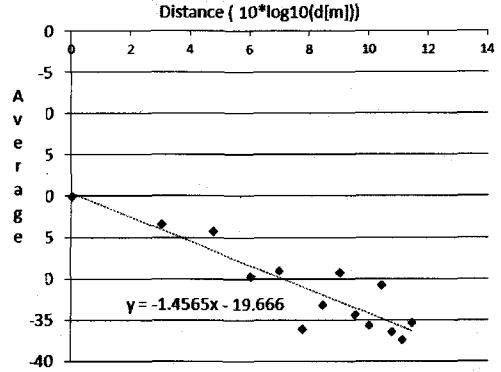


그림 6. 측정거리에 따른 수신 파워 및 결과에 따른 추세선(중앙복도)

는 2.27[dBm]이었으며, 대표수신점에서 반 파장 떨어진 4지점에서의 신호 세기의 표준편차는 3.42[dBm]으로 분석되었다.

합정 중앙복도에서의 측정결과는 이와 같이 ITU-R에서 제안한 표 1에서 보여주는 일반 실내 전파 환경에서의 경로 손실 모델과 달리 경로손실지수  $n$  값이 작은 것을 알 수 있으며, 이는 합정 내부의 중앙복도가 천장, 벽 그리고 바닥이 모두 금속의 재질로 구성되어 있는 도파관 구조에 의한 것으로 분석할 수 있다.

위의 실제 측정값의 신뢰성을 검증하기 위해 전파추적기법을 이용해서 동일한 위치에 송·수신안테나 위치시켜 시뮬레이션을 실행하였으며, 그 결과는 그림 7와 같이 실제 측정치와 매우 흡사한 패턴을 보여준다. 측정값과 시뮬레이션의 결과 값을 비교

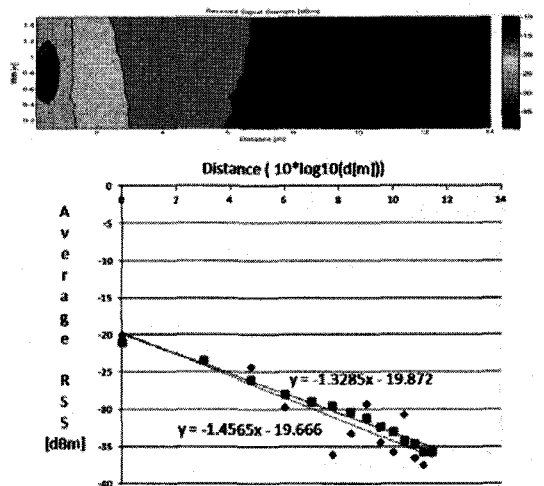


그림 7. Ray-tracing과 측정 데이터의 비교

하면, 경로손실지수  $n$ 은 각각 1.45와 1.32의 값을 가지며,  $P_0$ 값은 각각 -19.9dBm와 -19.8dBm값을 갖는다.

#### 4.2 체력 단련 실에서의 CW측정 실험결과

##### 4.2.1 송신 단이 격실의 중앙에 위치해 있을 때의 경로 손실 모델

체력단련실내에서 송신 단이 중앙에 놓인 경우 송신단과의 거리에 따른 수신 신호 강도를 측정한다. 그림 6의 중앙복도에서 측정한 경로 손실 지수와 달리 체력단련실내에서 송신 단이 중앙에 놓인 경우는 측정 실험의 결과 경로손실지수  $n$ 값이 0.79를 갖게 된다. 이는 중앙복도가 오픈 구조인 것과 달리 체력단련 실은 사방이 메탈로 구성되고 밀폐된 구조를 갖기 때문에 거리에 따른 경로 손실이 중앙복도보다 작게 나타나는 것으로 보인다. 또한 ITU-R에서 제시한 표 1의 육상의 일반 실내 환경의 경로 손실 지수 값을 적용할 수 없음을 확인할 수 있다.

##### 4.2.2 송신 단이 격실의 가장자리에 위치해 있을 때의 경로 손실 모델

그림 9는 그림 8의 환경과 동일한 함정내의 체력 단련 실에서 송신 단이 가장자리에 놓인 경우 송신 단과 거리에 따른 수신 신호 강도를 나타낸다. 송신 단이 중앙에 놓인 그림 8과 비교하여 거리에 따른 경로손실지수는 비슷한 값, 0.94의 값을 갖는 것으로 나타나고 이는 같은 환경인 체력 단련 실내에서는 송신단의 위치와 상관없이 거리에 따른 경로 손실 지수 값이 동일하게 나오는 것으로 볼 수 있으며 ITU-R에서 제시한 표 1과 같은 일반 실내 환경

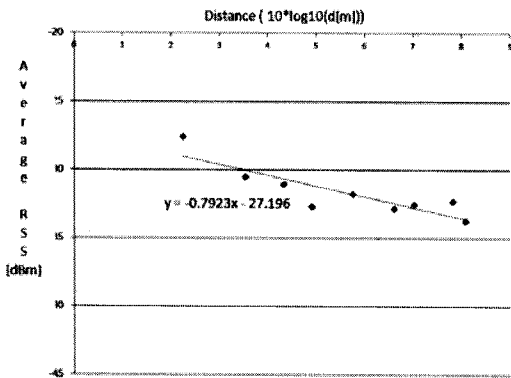


그림 8. 측정거리에 따른 수신 파워 및 결과에 따른 추세선 (체력 단련 실-중앙)

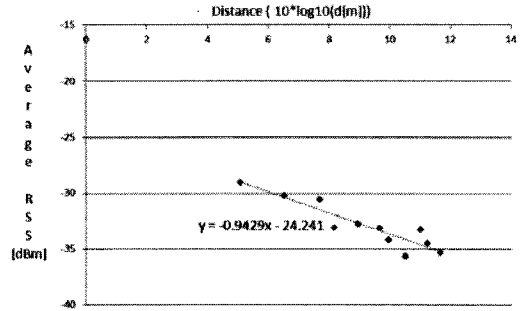


그림 9. 측정거리에 따른 수신 파워 및 결과에 따른 추세선 (체력 단련 실-가장자리)

의 경로 손실 지수 값이 메탈로 구성된 함정 내에서는 적용 될 수 없다는 것을 확인 할 수 있다.

#### 4.3 실제측정 및 전파추적 시뮬레이션 비교분석

먼저 체력단련 실에서 송신단의 위치가 중앙에 놓였을 때의 전파추적기법 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 그림 10과 측정값과 시뮬레이션의 결과 값을 비교하면, 경로손실지수  $n$ 은 각각 0.79와 0.91의 값을 가짐으로써 중앙복도의 결과와 같이 실제 측정값과 시뮬레이션 값이 유사한 경향을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 11은 체력단련 실에서 송신단의 위치가 가장자리에 놓였을 때의 전파추적기법 시뮬레이션 결

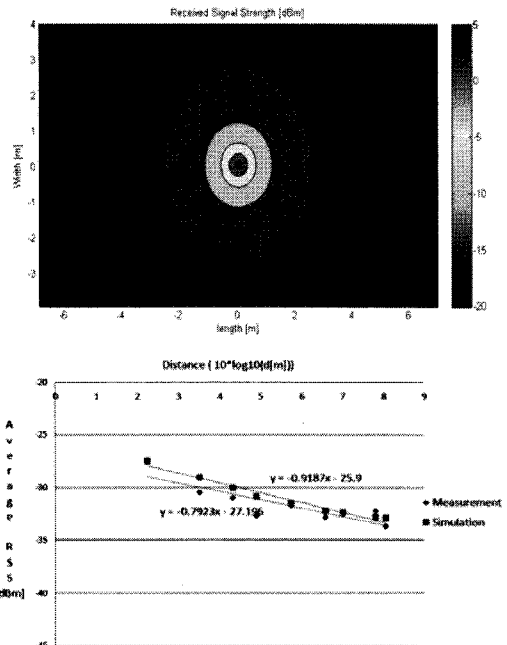


그림 10. 전파추적기법과 측정 데이터의 비교(중앙)



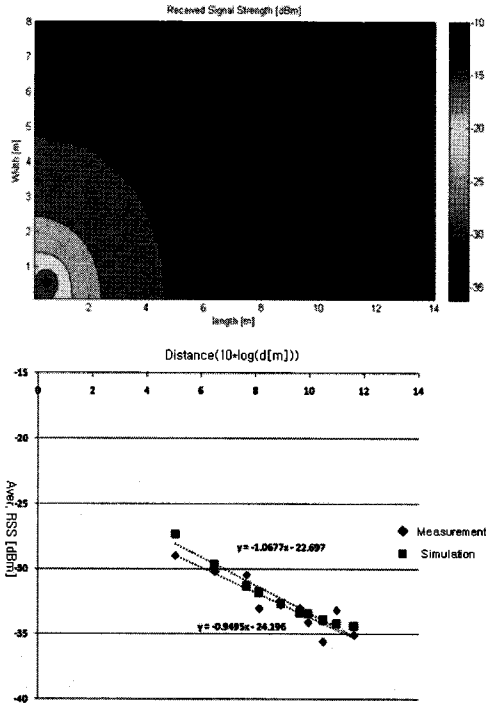


그림 11. 전파추적기법과 측정 데이터의 비교(가장자리)

과이다. 측정값과 시뮬레이션의 결과 값을 비교하면, 경로손실지수  $n$ 은 각각 0.94와 1.06의 값을 가짐을 알 수 있다. 송신단이 중앙에 위치한 것과 비교할 때 경로손실지수 값이 크게 차이가 없으며, 이는 체력단련실과 같은 철 구조물로 둘러싸인 폐쇄된 공간에서는 송신단의 위치와 상관없이 거리에 따른 경로 손실 지수 값이 거의 유사하게 나오는 것으로 볼 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 함정 내 무선 네트워크 구축을 위해서 일반적인 실내 전파환경과는 많은 차이점을 가지는 함정 승조원의 거주공간인 격실 및 복도에 대해 2.4GHz 대역의 주파수 채널특성을 분석하고 경로 감쇄를 알아보았다. 그리고 측정값의 신뢰성을 검증하기 위해 전파추적기법 시뮬레이션 기법을 이용한 모의실험을 수행하여 경로 손실을 예측하고 실제 측정결과와 비교분석하였다.

우선 함정의 승조원 거주공간인 중앙복도와 체력 단련실에서 CW측정을 통해 함정 내부공간의 경로 손실지수 값이 표 1과 같이 ITU-R에서 권고하는 일반적인 실내 환경에서의 경로손실지수 값과 차이

점이 있다는 것을 밝혀냈고 함정의 내부공간에 대한 경로 손실 모델을 제시하였다. 아래의 표 4에서 나타나는 결과와 같이 함정내부의 중앙복도와 체력 단련실에서 경로 손실 지수를 측정 한 실제 값은 일반 실내 환경보다(경로손실지수 값 : 2.2~3.3) 경로 손실지수 값이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 또한 이를 검증하기 위해 동일한 도면상에서 전파추적기법 시뮬레이션을 이용하여 일반 실내 환경을 가정하고 재질을 콘크리트로 설정하여 시뮬레이션 한 결과를 보면 철판일 경우의 경로손실지수 값이 일반 실내 환경을 가정한 것보다 낮은 경로손실지수 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

표 4와 같이 실제 측정 한 경로손실지수 값과 전파추적기법을 이용하여 시뮬레이션 한 경로손실지수 값을 비교 하였을 때 유사한 결과 값을 가짐으로써 실제측정값의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

지금까지 많은 연구가 수행되어진 실내 전파 환경에서의 경로 손실 모델과는 달리 철 구조물로 이루어진 함정 및 일반 중대형 선박의 내부 환경에서의 전파 특성 및 경로 손실 모델에 대한 연구가 아직 미진한 단계가 머무르고 있는데 본 논문 측정실험을 통해 선박의 고유 경로 손실 모델을 확인할 수 있었으며, 선박 내부공간의 특징적인 전파 특성을 이해할 수 있었다. 추후 일반 중대형 선박이나, 해군 함정에서 본 논문의 연구결과를 바탕으로 선박내부에 무선 네트워크 및 이를 기반으로 한 무선 센서 네트워크 구축 시 선박 자체의 특성적인 전파 환경에 맞는 경로손실 매개변수 값을 제시하여 효율적인 네트워크 설계가 가능하도록 그 기반을 제공할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 함정 및 선박에 탑재하여 운용중인 각종 시스템 중 유선을 무선으로 대체할 수 있는 구간을 식별하여 무선 네트워크를 구축한다면 비용 절감 효과 및 선박의 건조공정 또한 크게 단축될 것으로 예상된다.

표 4. 함정 내부공간에서의 경로손실 매개변수

구 분	측정결과 Pass loss Exp.(n)	$X_{\sigma}$ (dBm)	s.t.d (dBm)	시뮬레이션 결과 Pass loss Exp.(n)	
중앙복도	1.45	2.27	3.42	1.33	
체력 단련실	중앙	0.79	0.86	3.22	0.92
	가장 자리	0.94	0.83	3.25	1.04

참 고 문 헌

[1] Alexander, S. E., "Radio Propagation Within Buildings at 900MHz", Electronics Letters, Vol.18, No.21, pp.913-914, 1982.

[2] Anderson, J. B., Rappaport, T.S., Yoshida, S., "Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels", IEEE Communications Magazine, Nov., 1994.

[3] Cox, D. C., Murray, R. R., and Norris, A. W., "Measurements of 800MHz Radio Transmission into Buildings with Metallic Walls", Bell Systems Technical Journal, Vol.62, No.9, pp.2695-2717, Nov., 1983.

[4] David K. Cheng, Field and wave electromagnetics, 2nd ed. Addison-Wesley, 1989.

[5] Seidel, S. Y., Rappaport, T.S., "914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.40, No.2, pp.207-217, Feb., 1992.

[6] Devasirvatham, D. M. J., Banerjee, C., Krain, M. J., Rappapor. D. A., "Multi-frequency Radiowave Propagation Measurements in the Portable Radio Environment", IEEE International Conference on Communications, pp.1334-1340, 1990.

[7] Hawbaker, D.A., Rappaport, T.S., "Indoor wideband radio propagation measurement at 1.3GHz and 4.0GHz." Electron Lett., Vol.26, No.21, pp.1800-1802, Oct., 1991.

[8] Gregory B. Tait, Michael B. Slocum, "Electromagnetic environment characterization of below-deck spaces in ships", IEEE International Symposium on EMC, Vol.1, pp.34-38, Aug., 2008.

[9] T. Chrysikos, G. Georgopoulos, K.Brikos, S. Kotsopoulos, "Wireless Channel Characterization : On the validation issues of indoor RF models at 2.4GHz", First Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunication(PACET), Patras, Greece, Mar., 20-22, 2009.

[10] S.C Kim, H.L. Bertoni, M. Stern "Pulse Propagation Characteristic at 2.4GHz Inside

Buildings", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.45, No.3, pp.579-592, Aug., 1996.

[11] H. Hashemi, "The indoor radio propagation channel," Proc. IEEE, Vol.81, pp.943-967, Jul., 1993.

최 대 근 (Choi Dae-Geun)

정회원



2001년 3월 해군사관학교 해양공학과

2011년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학과 학사

2011년~현재 방위사업청 전투함사업팀 통신전자담당

<관심분야> Wireless Channel

Modeling, Communication System

이 정 규 (Jung\_kyu Lee)

정회원



2008년 2월 고려대학교 전파통신공학과 학사

2010년 2월 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 석사

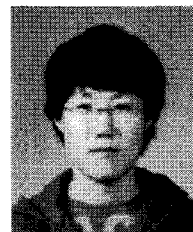
2010년~현재 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 박사과정

<관심분야> Localization

Algorithm, Communication System, Wireless Channel modeling

김 영 훈 (Younghoon Kim)

정회원



2007년 2월 경북대학교 전기공학부 학사

2007년 3월~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석·박사

통합과정

<관심분야> UWB, Channel modeling

김 성 철 (Seong-Cheol Kim)

종신회원



1984년 2월 서울대학교 전기공학  
학과 학사

1987년 2월 서울대학교 전기공학  
학과 석사

1995년 2월 미국 폴리테크닉  
대학교 박사

1995년~1999년 AT&T Bell

lab. Member of Technical Staff

1999년~2003년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 조  
교수

2003년~2008년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 부  
교수

2008년~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 정교수

<관심분야> Wireless Communication System,  
Channel Modeling, Communication Algorithm,  
MIMO, Relay, Localization