

VHF 데이터통신 통달거리 예측 및 요소 분석

A Study on Estimation and Factors of VHF Data Link Range

이영중* 김인선* 박주래*
YoungJoong Lee InSeon Kim JooRae Park

Abstract

An Estimation of VHF data link range for EW(Electronic Warfare) equipment in the sea environment was studied to predict the data link range between transmitting and receiving station. The theoretical estimation predicts within 3% error with actual measurement of VHF data link range at sea. Data link range factors including refraction and reflection are added in the basic wave propagation equation. The effect of refraction and reflection to the range is analysed with quantity level.

Keywords : Data Link Range(데이터통신 통달거리), Refraction(굴절), Reflection(반사), Propagation Factor(전파 요소)

1. 서론

기본적인 전파 전파 방정식(Wave Propagation Equation)은 자유공간에서의 안테나 이득을 포함한 송신기의 유효출력(Effective Radiated Power)과 수신기의 수신감도와 공간손실만이 고려된다. 하지만 실제 데이터링크는 자유공간이 아닌 지형적인 제약으로 지리적인 가시선(Line of Sight) 제약을 받는 상황에서 운용되며 이러한 지리적인 제약은 VHF 대역의 데이터통신에서는 주로 전파 전파 방정식의 손실 요소로 고려할 수 있다. 지리적 제약을 고려하기 위한 대표적인 지구 모델은 평면 지구이다. 하지만 데이터링크 통달거리가 큰 경우는 이러한 평면 지구 모델이 아닌 곡률 지구 모델의 적용이 필요하다. 또한 주파수가 낮은 전자파

일수록 지구 대기에 의해 더 잘 굴절 되어 지리적인 가시선보다 전파 거리가 길어지게 된다. 이러한 현상을 굴절(Refraction)이라 하며 전파 전파 방정식의 이득 요인이 된다. 본 논문은 해상 VHF 대역 데이터링크 통달거리를 예측하기 위해 기본적인 전파 전파 방정식에 송수신 케이블 손실, 대기손실, 안정적인 데이터통신을 위한 마진, 채널 코딩 이득 외에 굴절과 반사 요소를 추가하였다. VHF 통신대역에서 반사 요소는 가장 큰 손실 요소이며, 굴절과 반사 요소는 평면과 곡률 지구 모델에 의해 동시에 고려되는 요소로서 데이터링크 통달거리에 미치는 영향을 분리할 수 없다^{1~5)}.

반사는 송수신 고도가 모두 낮고 입사각이 가장 작은 수평 방향으로 입사할 경우 가장 손실이 크며 송수신 중 어느 한쪽의 고도가 증가할 경우 손실이 감소하고, 양쪽 고도가 모두 증가할 경우 더욱 감소하는 경향을 보인다^{6,7)}.

본 논문에서는 앞서 기술한 요소들을 기본 전파 전

† 2010년 2월 26일 접수~2010년 5월 27일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이영중(youngcenter@add.re.kr)

과 방정식에 추가하여 실제 데이터링크 통달거리 시험치와 비교하였고 3% 이내의 오차로 수신국 고도 60/200/500/1000ft에서 데이터링크 통달거리를 예측하였다. 또한 평면과 곡률 지구 모델에 의한 반사와 굴절 요소를 레이다 방정식에 고려하여 이들 요소를 정량적으로 분리하였으며 데이터링크 통달거리에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 전파 전파 방정식과 고려 요소

기본적인 전파 전파 방정식에 송수신 케이블 손실, 대기 손실, 수신기 잡음지수, 데이터통신 마진, 채널코딩 이득을 고려한 수신기 신호 대 잡음비는 식 (1)과 같다.

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi R^2} \frac{1}{4\pi} \frac{1}{L_t L_r L_a} \frac{1}{kTB} \frac{1}{M} G_c \quad (1)$$

여기서 P_t 는 송신기 출력, G_t 는 송신 안테나 이득, G_r 은 수신 안테나 이득, λ 는 파장, R 은 송수신기간 거리, L_t 는 송신 케이블 손실, L_r 은 수신 케이블 손실, L_a 는 대기 손실 포함 안테나패턴 손실, k 값은 볼츠만 상수로서 1.38054×10^{-23} , T 는 온도, B 는 수신 대역폭, M 은 고품질 데이터통신을 위한 마진, G_c 는 Convolution-Viterbi 채널코딩 이득이며 72MHz에서의 데이터는 Table 1과 같다.

Table 1. 시뮬레이션 제원

	제원
Pt[dBm]	40
Gt[dBi]	-14
Gr[dBi]	-6.49
Lt[dB]	0.26
Lr[dB]	3.12
La[dB]	0.01
M[dB]	10
Gc[dB]	4
Pr[dBm]	-115

3. 굴절과 반사 요소

가. 굴절(Refraction)

전자파는 자유공간에서 직진하지만 지구 대기에 의해 굴절하게 되어 지구 반경은 식 (2)와 같이 실제 지구 반경(r_o)의 4/3배에 해당하는 유효 지구 반경(r_e)으로 표시할 수 있다. 대기의 조건에 의해 굴절이 심해지는 현상을 덕팅(Ducting)이라하며 더운 여름 바다 표면에서 덕팅 현상이 많이 발생한다^[8].

$$r_e = \frac{4}{3} r_o \quad (2)$$

나. 반사(Reflection)

레이더파가 지구 표면으로부터 반사될 때 진폭은 감쇄하고 위상은 변경된다. 이러한 반사는 I 대역의 경우 역위상일 경우 손실, 동위상일 경우 최대 6dB 이득으로 작용하나, VHF 대역의 전파 가시선 영역에서는 일반적으로 손실 요소로 작용한다^[9,10].

수직과 수평 반사계수(Reflection Coefficient)는 각각 식 (3), (4)와 같으며 입사각(Ψ_g), 유전상수(ϵ) 및 주파수에 의존한다. 유전상수(ϵ)는 식 (5)와 같이 표현되며 상온의 해상환경에서 절대 유전상수(ϵ_r)는 80이고 도전율(σ)은 4이며 30, 72, 88MHz 주파수에 대한 반사계수의 진폭과 위상 특성은 각각 Fig. 1, 2, 3과 같다.

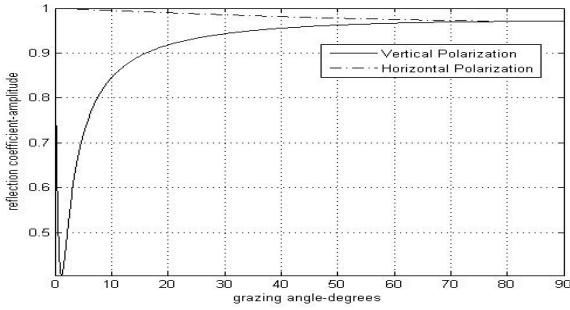
$$\Gamma_v = \frac{\epsilon \sin \Psi_g - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \Psi_g}}{\epsilon \sin \Psi_g + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \Psi_g}} \quad (3)$$

$$\Gamma_h = \frac{\sin \Psi_g - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \Psi_g}}{\sin \Psi_g + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \Psi_g}} \quad (4)$$

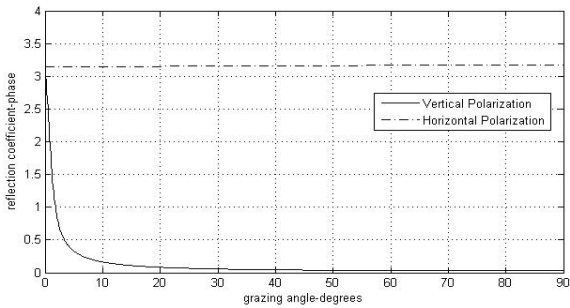
$$\epsilon = \epsilon_r - j60\lambda\sigma \quad (5)$$

반사에 의한 영향을 고려하기 위해 자유공간이 아닌 조건에서 전파 전파를 설명하는데 이용되는 전파 요소(Propagation Factor)를 식 (6)과 같이 표현하자. 해수면 근처에서는 다중경로에 의한 전파가 전파 요소에 지배적인 영향을 준다.

$$F = \left| \frac{E}{E_0} \right| \quad (6)$$

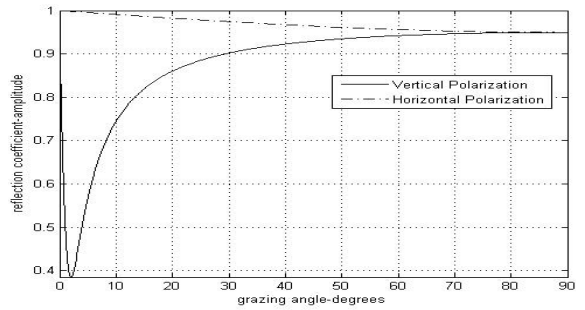


(a) 상온 해상환경의 반사계수 진폭 특성(30MHz)

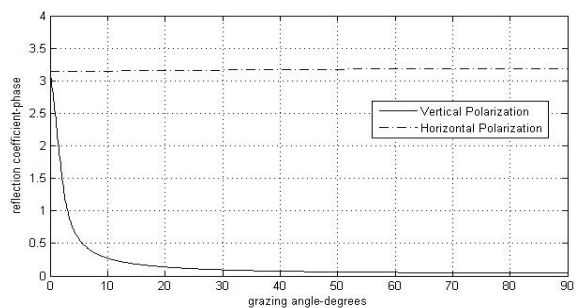


(b) 상온 해상환경의 반사계수 위상 특성(30MHz)

Fig. 1. 상온 해상환경의 반사계수 특성

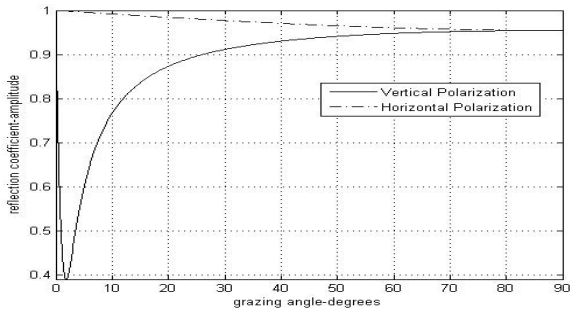


(a) 상온 해상환경의 반사계수 진폭 특성(88MHz)

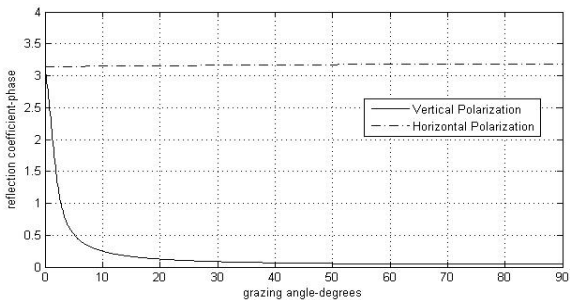


(b) 상온 해상환경의 반사계수 위상 특성(88MHz)

Fig. 3. 상온 해상환경의 반사계수 특성



(a) 상온 해상환경의 반사계수 진폭 특성(72MHz)



(b) 상온 해상환경의 반사계수 위상 특성(72MHz)

Fig. 2. 상온 해상환경의 반사계수 특성

E 는 매질이 존재하는 경우의 전계이며 E_0 는 자유 공간의 전계이다.

다중경로 전파를 고려하기 위해 Fig. 4와 같이 평면 지구와 Fig. 5와 같이 곡률 지구에 대해 고려하자. 송신국 안테나의 고도가 h_t , 수신국 안테나의 고도가 h_r 이고 입사각이 ψ_g 일 때 통신기의 송신 에너지는 직접 경로 $R_d(A-C)$ 와 간접경로 $R_i(A-B-C)$ 에 의해 수신 안테나에 전달된다.

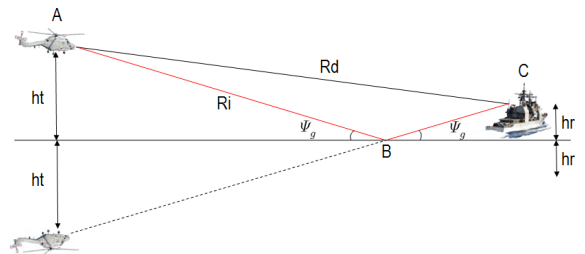


Fig. 4. 평면 지구에서의 전파 전파

두 경로의 거리 차와 위상 차는 각각 식 (7), (8)과 같다.

$$r_1 = \frac{r}{2} - p \sin \frac{\xi}{3}$$

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{r_e (h_t + h_r) + \frac{r^2}{4}} \quad (19)$$

$$\xi = \sin^{-1} \left(\frac{2r_e r (h_t - h_r)}{p^3} \right)$$

$$R_1 = \sqrt{h_r^2 + 4r_e (r_e + h_r) \left(\sin \frac{\phi_1}{2} \right)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{h_t^2 + 4r_e (r_e + h_t) \left(\sin \frac{\phi_2}{2} \right)^2} \quad (20)$$

$$R_d = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + 4(r_e + h_t)(r_e + h_r) \left(\sin \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)^2}$$

$$\Delta R = \frac{4R_1 R_2 (\sin \Psi_g)^2}{R_1 + R_2 + R_d} \quad (21)$$

$$\Psi_g = \sin^{-1} \left(\frac{2r_e h_r + h_t^2 - R_1^2}{2r_e R_1} \right)$$

식 (16)의 유도과정과 동일한 가정을 할 경우 전파 요소는 식 (22)와 같이 표현할 수 있으며 전파 요소의 제곱은 전파가 전파될 때 손실 항목으로 추가되며 반사 요소를 고려한 SNR_{sphere} 는 식 (23)과 같이 표현된다^[12,13].

$$F^2 = 2 - 2\cos\Delta\Phi = 4 \left(\sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{4R_1 R_2 (\sin \Psi_g)^2}{R_1 + R_2 + R_d} \right) \right)^2 \quad (22)$$

$$SNR_{sphere} = SNR \times 4 \left(\sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{4R_1 R_2 (\sin \Psi_g)^2}{R_1 + R_2 + R_d} \right) \right)^2 \quad (23)$$

4. 데이터링크 통달거리 시뮬레이션 및 시험

가. 시뮬레이션

데이터링크 통달거리는 Table 1의 시뮬레이션 제원을 사용하여, 30, 72, 88MHz 주파수에 대해 송신국 송신안테나 고도(60, 200, 500, 1000ft)와 수신국 수신안테나 고도(52, 64ft) 별로 자유공간, 평면지구 모델, 곡률지구 모델에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며 결과는 Fig. 6, 7, 8, 9와 같다.

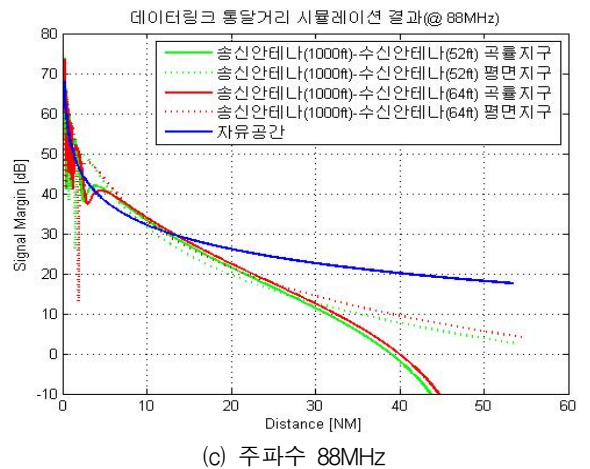
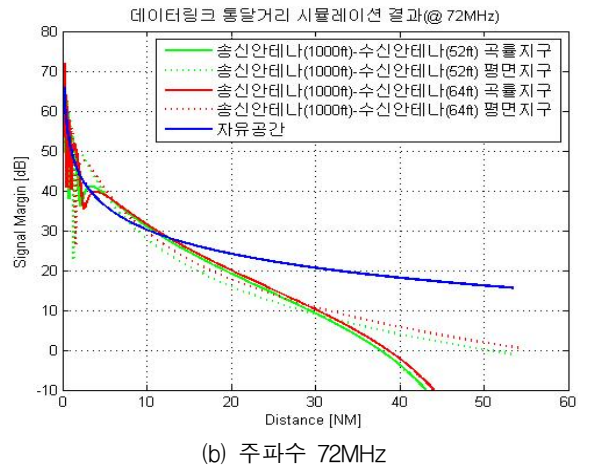
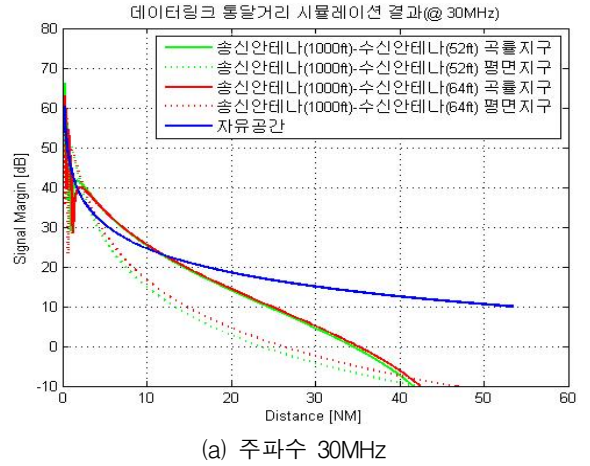
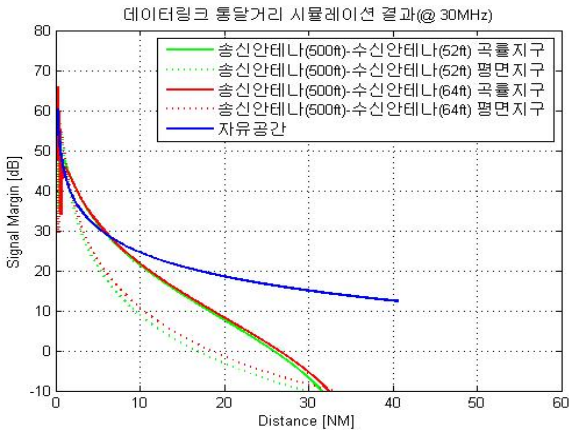
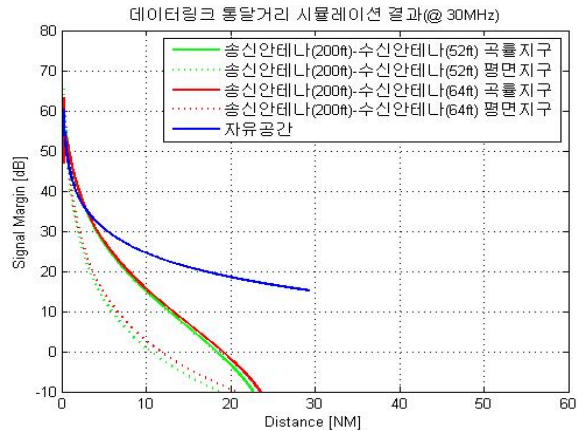


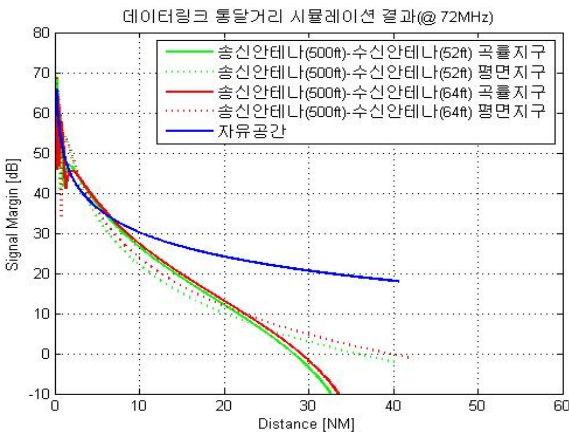
Fig. 6. 데이터링크 통달거리 시뮬레이션(송신안테나 고도 1000ft)



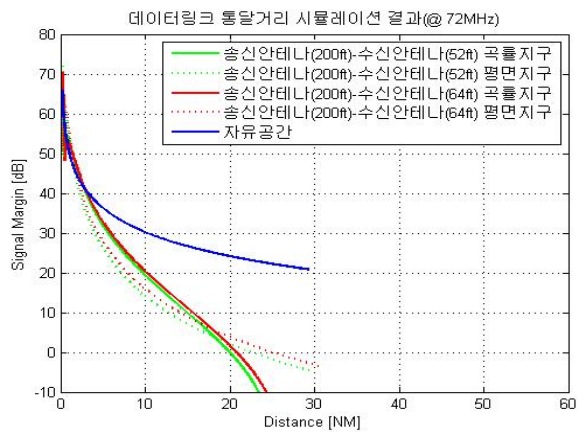
(a) 주파수 30MHz



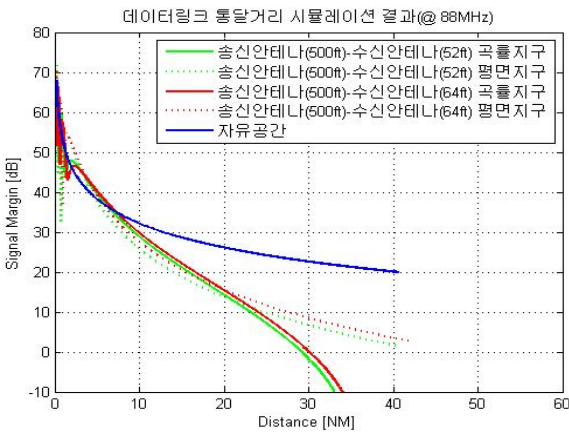
(a) 주파수 30MHz



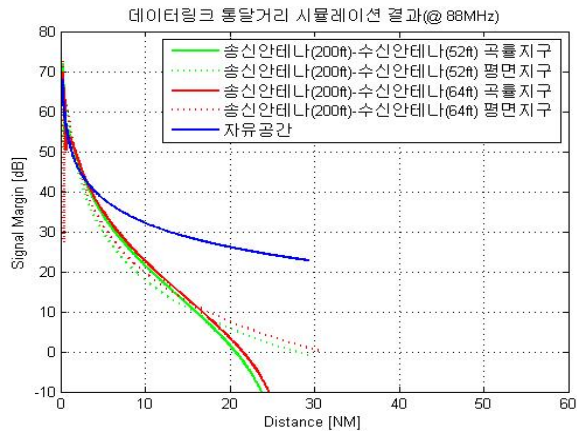
(b) 주파수 72MHz



(b) 주파수 72MHz



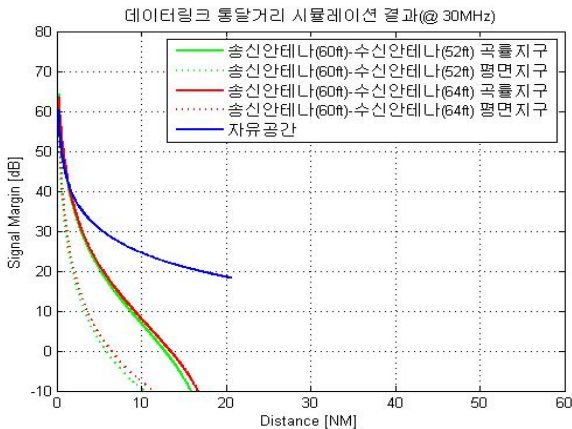
(c) 주파수 88MHz



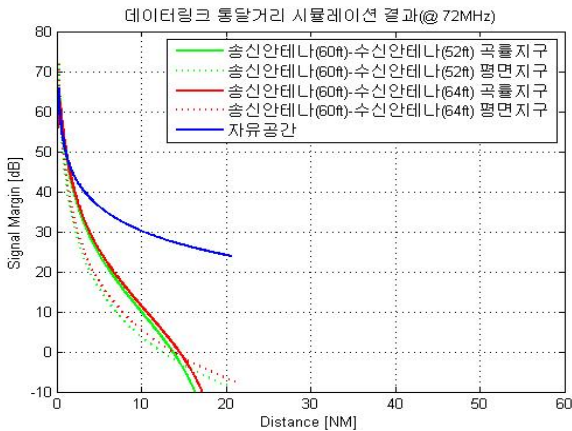
(c) 주파수 88MHz

Fig. 7. 데이터링크 통달거리 시뮬레이션(송신안테나 고도 500ft)

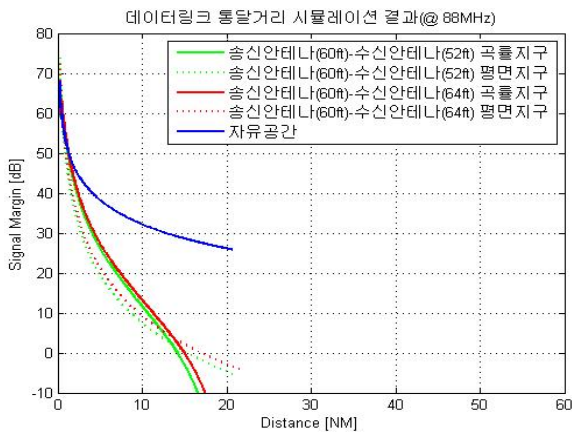
Fig. 8. 데이터링크 통달거리 시뮬레이션(송신안테나 고도 200ft)



(a) 주파수 30MHz



(b) 주파수 72MHz



(c) 주파수 88MHz

Fig. 9. 데이터링크 통달거리 시뮬레이션(송신안테나 고도 60ft)

나. 시뮬레이션 및 시험 결과 비교

시험은 수신국 고도 64ft, 송신국 고도 60/200/500/1000ft에 대해 수행하였으며 자유공간, 평면지구 모델, 곡률지구 모델에 의한 시뮬레이션 결과와의 비교는 Fig. 10과 같으며 곡률지구 모델에 의한 시뮬레이션 결과와 시험 결과의 오차는 Table 2와 같다. 앞서 예측한 바와 같이 송신 고도가 클수록 지구와 유사한 곡률 지구 모델을 이용한 반사 손실이 유효함을 알 수 있다. Fig. 10은 굴절 이득과 반사 손실에 대한 성분을 구하기 위해서 식 (4)에서 지구 반지름을 r_o 로 설정하여 반사에 의한 손실을 구하고 지구 반지름을 r_e 로 설정하여 굴절에 의한 이득을 구하였다. 이들 항목들은 Fig. 11과 같다.

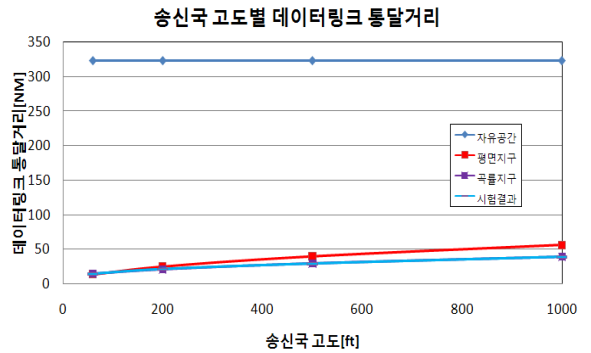


Fig. 10. 송신국 고도별 데이터링크 통달거리 비교

Table 2. 통달거리 예측 오차

	송신국 고도			
	60ft	200ft	500ft	1000ft
오차	3%	-1.29%	0.2%	1.2%

반사 손실과 굴절 이득 요소

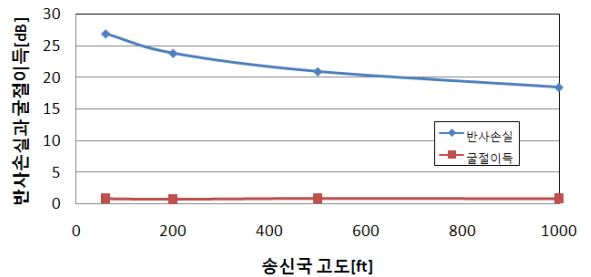


Fig. 11. 송신국 고도별 반사 손실과 굴절 이득

5. 결론

본 논문은 기본적인 전파 전파 방정식에 송수신 케이블 손실, 대기 손실, 수신기 잡음지수, 데이터통신 마진, 채널코딩 이득, 굴절 이득, 반사 손실을 고려한 수신기 신호 대 잡음비를 이용해 송신국 고도 60/200/500/1000ft에서 데이터링크 통달거리를 예측하여 시험결과와 비교하였다. 그 결과 곡률 지구 모델에 의한 반사 손실을 적용한 경우 3% 이내의 오차를 확인하였다. 또한 반사 손실과 굴절 이득 요소 성분을 분석한 결과 고도가 낮은 60ft의 경우 손실이 26.94dB로 가장 컸고 고도가 1000ft인 경우 18.46 dB로 손실이 적었다. 이는 입사각이 수평에 가까울 때 반사 손실이 가장 큰 반사 계수 특성을 보여 준다. 굴절 이득은 1dB 이하(최대 약 0.93dB)의 이득으로서 송수신 고도와 무관하게 거의 일정함을 알 수 있다.

Reference

- [1] "ARC114 Communication Range Tests", Sikorsky Aircraft, Report No. SER-70303, pp. 12~22.
- [2] "Brazilian LYNX Seaspray 3000 Radar System Operation Handbook", Marconi Electronic Systems, Report No. RSD 3842, pp. 1/4~1/5, 1999.
- [3] H. D. Griffiths, L. Vinagre, S. B. Vines, C. P. Bartram, "Measurements of Non Line of Sight VHF Propagation Over the Sea Surface", 10th International Conference on Antennas and Propagation, IEE Conference Publication No. 436, 14~17 April, 1997.
- [4] Bean, B. R., G. D. Thayer, "Models of the Atmospheric Refractive Index", Pro. IRE, V. 47, pp. 740~755, 1959.
- [5] Millman, G. H, "Atmospheric Effects on VHF and UHF Propagation", Proc. IRE, V. 46, pp. 1492~1501, August, 1958
- [6] Barry McLarnon, "VHF/UHF/Microwave Radio Propagation : A Primer for Digital Experimenters", CEIDIS-ULA, Primer Taller De Capacitacion Technologias W, 2003.
- [7] Lamont V. Blake, "Radar Range-Performance Analysis", Artech House, 2001.
- [8] Lamont V. Blake, "Ray Height Computation for a Continuous Nonlinear Atmospheric Refractive-Index Profile", Radio Science, Vol. 3, No. 1, January 1998.
- [9] Ralph M. Schmalenberger, Michael G. Edrich, "Channel Modelling for Wideband Data Communication in a Maritime Mobile Environment", Eurocomm 2000, Information Systems for Enhanced Public Safety and Security, IEEE/AFCEA, 2000.
- [10] "최신 무선통신 원리와 재밍기법", 공군전투발전단, 2005.
- [11] Kerr, D. E., Propagation of Short Radio Waves, M.I.T. Radiation Laboratory Series, Vol. 13, McGraw-Hill, 1951.
- [12] 이영중, 김인선, 박주래, "VHF 데이터통신 통달거리 예측 연구", 한국군사과학기술학회 제11권 제6호, pp. 55~62, 2008.
- [13] Bassem R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB", Chapman & Hall/CRC, 2000.