

# 표면파 모드 기반 통신 시스템에서 매질 구조에 따른 경로 손실 및 전송률 특성에 관한 연구

현석봉, 장승현, 송원영, 황정환

한국전자통신연구원

{sbhyun, damduk, songwonyoung, jhhwang}@etri.re.kr

## A Study on Path Loss and Data Rate characteristics by Medium Structure in Surface-Wave Mode based Communication Systems

Seok-Bong Hyun, SeungHyun Jang, WonYoung Song, Jung Hwan Hwang

Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

### 요약

본 논문은 유전율 등의 특성이 서로 다른 매질 간의 경계면에서 발생하는 표면파 모드를 이용하는 통신 방식에서 매질의 구조, 특히 유전층의 두께에 따른 2.4GHz 대역 산란계수 특성을 측정하고 이를 이론적인 경로 손실 모델과 비교하여, 표면파에 대한 기본적인 채널 모델의 타당성을 검증한 일부 결과를 기술한다. 이를 통해 표면파 통신에서 데이터 전송률 또는 전송 거리 등의 통신 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

## I. 서 론

기존의 무선통신은 기지국과 단말 간의 공간에서 발생하는 자유 공간파 (free space wave) 및 건물 등 매질에 의한 반사와 산란, 회절 현상을 통해 3차원적으로 전파하는 전자기파를 이용한다. 한편, 유전율 등의 특성이 서로 다른 매질 간의 경계면에서는 표면 근처에 전자기장 에너지가 집중되어 경계면을 따라 2차원적으로 전파하는 표면파(surface wave) 모드가 존재함이 알려져 있으며, 최근에 이를 통신 시스템에 활용하는 기술이 개발되고 있다[1-3]. 자유 공간파는 경로 손실이 거리의 제곱으로 증가하지만, 표면파는 경로손실이 거리에 비례하므로[4] 동일한 송신 출력에 대해 원거리에서 더 높은 전력을 수신할 수 있다. 표면파의 이러한 특성을 이용하면 금속체 구조물이 많은 선박 내부나 공장, 건설 현장, 선박 건조장 등에서 전파의 반사에 의한 손실보다는 금속 면을 따라 진행하는 표면파에 의한 손실 감소 효과가 우세하여, 통신 커버리지를 향상시킬 수 있다. 따라서 표면파를 활용한 다양한 통신 시스템이 개발되었으나, 실제 금속체 구조에 대해 전송 경로 손실을 정량적으로 분석한 자료는 아직 충분하지 않아서 추가적인 연구가 요구되었다.

이러한 필요성에 의해, 본 논문에서는 전자기파 중에서 표면파 모드를 이용하여 통신하는 시스템에서, 데이터 전송률 또는 전송 거리 등 통신 성능에 영향을 미치는 매질 구조에 대해 정량적 분석을 수행하고 그 결과의 일부를 제시한다.

## II. 본론

표면파의 발생 기전에 대해서는 전자기파의 여러 모드를 해석하는 과정에서 많이 알려졌다. 이를 통해 무한평면과 같은 비교적 단순한 구조에 대해서는 맥스웰 방정식의 수학적 해도 매우 복잡한 수식이지만 이미 구해진 상태이다[3-4]. 그러나 매질 구조가 무한 평면 또는 이상적인 구체 등 특수한 형상에서 벗어나서 실제 환경을 반영하려면 주요한 몇 가지 파라메

터로 표현되는, 측정 기반의 단순화된 채널 모델이 필요하다. 이는 기존 무선통신 모뎀 설계에 사용되었던 모델과 유사한 수식으로 표현하는 것이 복잡한 전파 환경의 해석에 더 실용적이기 때문이다.

표면파가 적용되는 대표적인 환경은 다수의 금속 격벽(bulkhead)과 방수문(watertight steel door) 등으로 구성된 선박 내부이다. 격벽의 방수문에는 수밀성을 높이기 위해 실리콘 고무가 방수문 가장자리에 배치되어 있다. 실험실 환경에서는 금속 격벽을 전파 차폐실(EM shielding room)로, 방수문의 실리콘 고무는 전파가 통과할 수 있는 슬릿으로, 선박 내부의 보호 도장(protective coating paint)은 실리콘 시트로 각각 대체할 수 있다. 따라서 선박 내부의 전파 특성을 측정하기 위한 실험 사진은 그림 1과 같으며, 그림에서 실리콘 시트와 안테나가 부착된 면이 격벽에 해당한다.

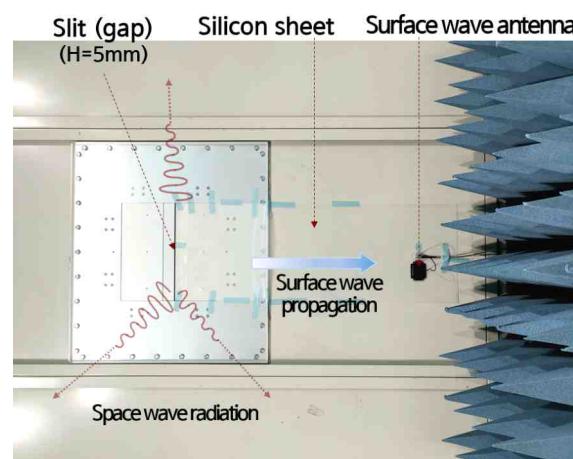


그림 1. 격벽 슬릿에 의한 표면파 모드 전파 실험 세업

그림 1은 표면파 통신이 활용되는 가장 일반적이고 대표적인 매질 구조라고 할 수 있으므로, 여기서 측정되는 데이터와 경로 손실 모델을 비교하면 경로 손실 모델의 타당성을 검증할 수 있다. 그림 1에서 격벽은 전파

차폐실의 전면부에 해당하며, 격벽의 반대쪽에 송신 안테나가 배치되어 있다. 송신 안테나는 그림 1에 도시되지 않았으나 우측 중앙의 직사각형 모양이 표면파 수신 안테나에 해당한다. 슬릿은 격벽(사진) 반대쪽 면에 위치한 안테나에서 발생된 전파를 회절시켜 전면부로 공간파를 방사하며, 실리콘 시트가 부착된 수평방향으로는 표면파를 발생시킨다. 이를 전자기파 시뮬레이션 결과는 그림 2와 같다.

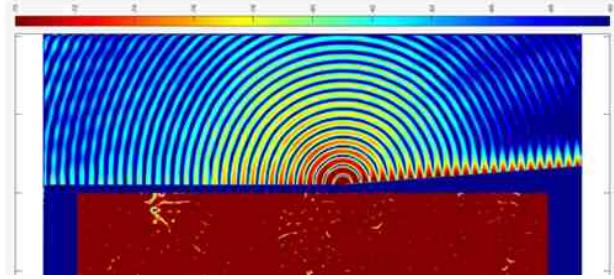


그림 2. 격벽 슬릿 구조의 EM 시뮬레이션 결과

그림 2는 그림 1을  $x$ 축 방향으로 90도 회전시켜서 격벽에 수직한 방향으로 발생하는 전기장 강도를 나타낸 것이다. 그림에서 중앙부가 슬릿에 해당하고, 아래의 직사각형은 전파 차폐실 단면에 해당한다. 그림 2에서 실리콘 시트 표면으로 전기장이 모여서 전파됨을 확인할 수 있으며, 공간파는 전 방향으로 방사됨을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과로부터 표면파의 전계 강도를 거리에 따라 나타내면 그림 3과 같다. 평균 전계 강도는 표면파에 의해서는 그림 2의 회색 점선과 같이 거리의 제곱근에 비례하여 감소하며, 공간파는 거리에 비례하여 감소한다. 실제 환경에서는 표면파와 공간파가 합쳐져서 전파하므로 그림 3의 청색 실선과 같은 감쇄 특성을 갖는다.

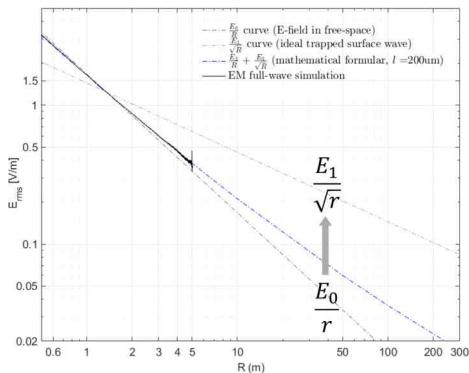


그림 3. 표면파 모드의 거리에 따른 전기장 시뮬레이션 결과

그림 3과 같은 표면파 전계강도의 거리에 따른 감쇄 특성은 기존의 논문 [4]에 정리된 수식에 부합하는 결과이며, 페이딩 성분을 제외하면 far-field 영역에서 경로 손실( $PL$ )은 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$PL_{dB}(r) \approx 10n \cdot \log\left(\frac{r}{r_0}\right) + 20\log\left(\frac{4\pi r_0}{\lambda}\right) - 20\log(l \cdot f_0) - \alpha(S_{11}) + C_0(f) \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 감쇄 계수로서, 일반적인 공간파에서는 2에서 4 정도의 값을 가지며 표면파만 전파하는 구간에서는 1이 된다.  $l$ 과  $S_{11}$ 은 각각 유전체층 두께와 안테나 반사 계수이며, 표면파의 주요 특징인 경로 손실이 유전체층 두께가 커질수록 감소하는 현상을 나타내는 파라미터이다. 마지막 항은 주파수가 증가할수록 경로 손실이 감소하는 특성을 나타내며, 일반적으로는 주파수가 높아질수록 경로손실이 증가하나, 표면파의 경우는 오히려 경로 손실이 감소하여, 높은 주파수에서도 통신 커버리지를 유지할 수 있는 특성을 기대할 수 있다.

그림 4는 그림 1의 실험 과정에서 유전체 층의 두께에 따른 경로손실 특성을 측정하고 이를 수식 (1)과 비교한 그래프이다. 그림 4에서 측정값은 격벽 아래와 위에 위치한 표면파 안테나간 S-파라미터를 측정한 후 특정 주파수(2.57GHz) 대역의 전달계수(S21)를 평균한 값이다. 측정된 S21이 상당히 낮은 이유는 격벽 아래 전파 차폐실 내부에 위치한 안테나에서 방사된 전파가 격벽 슬릿을 통과한 후 90도 회절하여 표면파로 변환되는 과정에서 큰 경로 손실이 발생하기 때문이다.

그림 4를 통해 기본적인 채널 모델 수식 (1)로 계산된 값이 유전층 두께 3mm까지는 오차 범위 내에서 측정값과 잘 부합됨을 알 수 있다. 데이터 전송률은 IEEE 802.11ac 표준 지원하는 Wi-Fi의 2x2 MIMO 모드에서 시험했으며, 두께 0mm와 2mm에 대해 각각 약 8Mbps와 29Mbps로 측정되었다. 이러한 실험 결과로부터 유전층 두께를 증가시킬수록 데이터 전송률이 향상됨을 확인하였다.

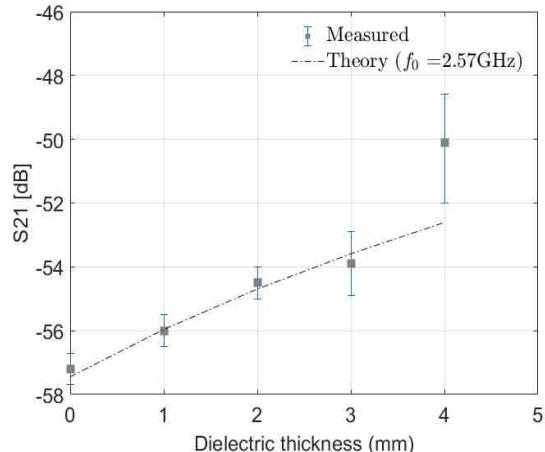


그림 4. 유전층 두께에 따른 전달계수(S21) 측정 결과

### III. 결론

본 논문에서는 표면파가 활용되는 대표적 분야인 선박 내 통신에서 격벽 통과 성능을 분석할 수 있는 실험 장치를 구성하고, 여기서 측정된 전달계수 등의 특성을 경로 손실 모델 수식과 비교하였다. 이러한 정량적 분석을 통해, 유전층 두께와 송수신 거리 등 주요 파라미터에 대한 기본적인 채널 모델의 유효성을 검증하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2023-00228942, 극한환경 내 금속 표면파 자기장 통신 기술 개발 및 시스템 실증)

### 참 고 문 헌

- [1] S. B. Hyun, et al., "Long-distance Transmission Technique based on Two-dimensional Propagation Mode along the Boundary between Heterogeneous Media", *JCCI*, Apr. 2024
- [2] J. Wan, et al., "Simulation and Experimental Verification for a 52GHz Wideband Trapped Surface Wave Propagation System, ", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 4, 2019
- [3] A. Ishimaru, *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering*, Wiley-IEEE Press, 2017.
- [4] T. Fei, et al., "A Comparative Study of Radio Wave Propagation Over the Earth Due to a Vertical Electric Dipole," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 10, pp. 2723-2732, Oct. 2007.