

다양한 접지면 형태에 따른 표면파 전파에 관한 기초연구

A Study of the Surface Wave Propagation on the Various Types of Grounds

박민서 · 이정해

Minseo Park · Jeong-Hae Lee

요약

본 논문에서는 배열 안테나 설계 시 격리도의 문제를 야기시키는 표면파에 관한 기초적인 연구를 진행하였다. 마이크로스트립 패치 안테나의 표면파와 유사한 환경에서 모의실험을 진행하기 위해 접지된 유전체 평판(grounded dielectric slab) 모델을 사용하였으며, DGS, PMC, Soft 표면, Hard 표면 등 다양한 접지면 형태에 따른 표면파 전파에 대해 모의실험을 진행하였다. 모의실험 결과에 의하면 TM-wave 입사 시 DGS의 경우 25 % 정도의 전파 차단 효과가 나타났으며, PMC와 Soft 표면의 경우 95 % 이상의 전파를 차단하는 결과를 나타내었다. 이 연구는 격리도 향상을 통한 배열안테나의 이득 증대에 유용하게 사용될 것이다.

Abstract

In this paper, the surface wave that caused the isolation problem when the design of the array antenna is studied. The grounded dielectric slab model is used in order to simulate in the similar environment with the surface wave of the microstrip patch antenna. The propagation of the surface wave on the various types of grounds which are defected ground structure(DGS), perfect magnetic conductor(PMC), Soft-surface, and Hard-surface is simulated. As a result, 25 % power is blocked by the DGS when the TM-wave incident. Also, 95 % power is blocked by the PMC and Soft-surface. This study will be very useful to increase the gain of an array antenna by improving the isolation between the antenna elements.

Key words: Array Antenna, Surface Wave, Defected Ground Structure(DGS), Perfect Magnetic Conductor(PMC), Soft Surface, Hard Surface

I. 서론

현대의 다양한 무선 이동통신 서비스는 정보통신 사회에서 중추적 역할을 하고 있으며, 소비자들은 정보의 고속화 및 다기능 복합화 서비스를 점진적으로 요구하고 있는 추세이다. 따라서 최근 무선 이동통신 시장은 통신 품질의 개선을 위한 안테나 시스템 개발의 중요성이 더

욱 부각되고 있다^[1].

보다 멀리 원거리 통신 시스템을 구축하기 위해 고이득을 가지는 안테나가 요구되며, 고이득의 빔이 가지는 직진성의 단점을 보완하기 위해 빔 조향 시스템이 포함된 안테나가 요구되고 있다. 이러한 요구사항을 만족할 수 있는 안테나로서 단일 복사소자를 배열하여 고이득의 빔을 가지며, 각 배열 소자에 공급되는 전류의 크기와 위

「이 연구는 민군기술협력사업으로부터 지원을 받아 수행된 연구임.」

「이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2015R1A6A1A03031833).」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

· Manuscript received July 1, 2015 ; Revised October 8, 2015 ; Accepted October 8, 2015. (ID No. 20150701-02S)

· Corresponding Author: Jeong-Hae Lee (e-mail: jeonglee@hongik.ac.kr)

상, 소자 간의 간격 등을 조절함으로써, 보다 쉽게 원하는 빔 패턴을 얻을 수 있는 배열 안테나에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다^[2].

안테나의 배열 설계 시 단일 안테나의 표면파로 인한 안테나간 상호 결합에 의해 나타나는 격리도에 대한 문제는 안테나의 성능에 있어 큰 문제점중 하나로 지적된다^[3]. 일반적으로 안테나의 입력 포트 사이의 격리도는 두 안테나간 물리적인 거리를 증가시키면 해결할 수 있으나, 이러한 방법은 통신기기 자체의 물리적 크기가 증가한다는 단점이 있다^[3].

최근에는 안테나간 격리도 문제의 근본이 되는 표면파 제어에 관한 연구가 대두되고 있다. 이에 본 논문에서는 표면파의 접지면 형태에 따른 전파 특성에 관한 기초적인 연구를 진행하였다. 접지면에 슬릿을 배치하는 Defected Ground Structure(DGS) 구조^{[4],[5]}와 주기구조에서 발생하는 저지대역을 사용하는 고임피던스 표면(Electromagnetic band gap 구조^[6] 등) 및 Soft 표면^{[7],[8]}, Hard 표면^{[7],[8]}에 집중하여 이들을 접지면 일부로 사용할 경우, 표면파 전파 특성 변화에 대해 모의실험을 진행하였다.

마이크로스트립 패치 안테나의 표면파와 유사한 환경에서 모의실험을 진행하기 위해 접지된 유전체 평판(Grounded dielectric slab) 모델^[9]을 사용하였다. 접지된 유전체 평판에 전파가 입사될 때 형성되는 표면파에 대해 모의실험을 실시한 후, 접지면에 DGS 구조가 있는 경우와 접지면 중앙부에 다른 구조(Perfect Magnetic Conductor (PMC), Perfect Electric Conductor(PEC), Soft-surface, Hard-surface)가 존재하는 경우에 대해 다시 모의실험을 실시함으로써 표면파의 변화에 대해 알아보았다. 모의실험에는 유한요소법(FEM: Finite Element Method)을 기반으로 하는 HFSS 시뮬레이터가 사용되었다.

II. Surface Wave on Grounded Dielectric Slab

그림 1에 모의실험에 사용된 접지된 유전체 평판의 전체 구조를 나타내었다. ISM 대역 주파수인 2.45 GHz에서 진행되었으며, 비유전율 2.2, 높이 1.6 mm의 유전체를 사용하였다. 무손실 조건에서의 모의실험을 위해 $\tan \delta$ 는 0으로, 접지면은 PEC로 설정하였다.

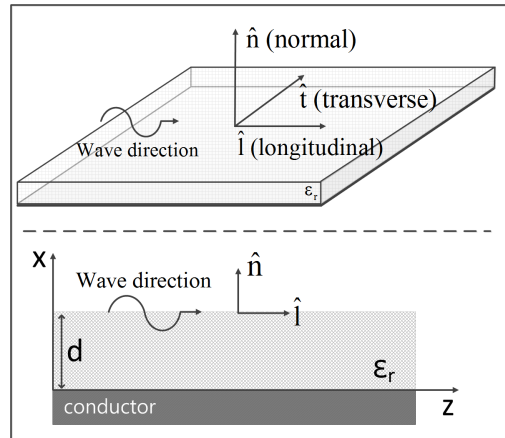


그림 1. 접지된 유전체 평판의 구조(전체, 측면)
Fig. 1. The structure of the grounded dielectric slab.

접지된 유전체 평판에 TM-wave의 guided 모드가 형성될 경우, 다음 식 (1)~(4)를 연립함으로써 전파상수(β)를 구할 수 있다^[9].

$$k_c^2 = \epsilon_r k_0^2 - \beta^2, \quad (0 \leq x \leq d) \tag{1}$$

$$h^2 = \beta^2 - k_0^2, \quad (d \leq x \leq \infty) \tag{2}$$

$$(k_c d)^2 + (hd)^2 = (\epsilon_r - 1)(k_0 d)^2 \tag{3}$$

$$(k_c d) \tan(k_c d) = \epsilon_r h d \tag{4}$$

이때 k_c 와 h 는 각 영역별 차단파수를 나타내며, 파장(λ)은 $2\pi/\beta$ 를 통해 간단히 구할 수 있다. 또한, 위의 식에서 구한 차단파수와 전파상수 및 TM-mode의 전계와 자계 식을 이용하여 TM-wave의 파동임피던스(Z_{TM})를 구할 수 있다^[9]. 이를 식 (5)~(7)에 나타내었다.

$$E_x = (-j\beta / k_c) A \cos(k_c x) e^{-j\beta z} \tag{5}$$

$$H_y = (-j\omega\epsilon_0\epsilon_r / k_c) A \cos(k_c x) e^{-j\beta z} \tag{6}$$

$$Z_{TM} = E_x / H_y = \beta / (\omega\epsilon_0\epsilon_r) \tag{7}$$

접지된 유전체 평판에 TM-wave의 guided 모드가 형성되는지를 알아보기 위하여 유전체 끝단에 plane wave가 입사되는 조건과 wave-port를 통해 입사되는 조건의 두 가지 경우에 대해 모의실험을 진행하였으며, 표 1에 이에

표 1. 접지된 유전체 평판의 전파상수, 파장, 파동임피던스
Table 1. Wave number, wave length, and wave impedance of the grounded dielectric slab.

	β [m^{-1}]	λ [cm]	ZTM [Ω]
Theoretical	51.38	12.23	171.41
Simulated (plane wave)	51.59	12.18	171.38
Simulated (wave port)	45.43	13.83	165.16

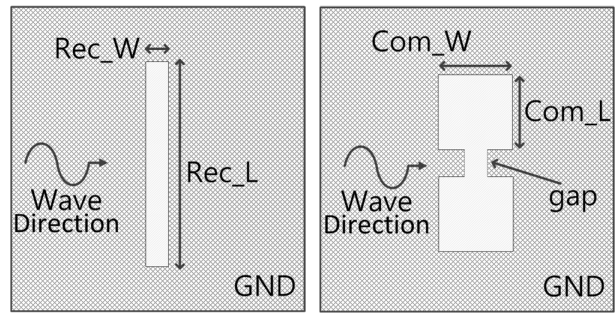
대한 실험값과 위에서 언급한 이론에 의한 계산값을 비교한 결과를 나타내었다. Plane wave가 입사되는 조건에서 실험값이 이론값에 보다 더 근사하게 나타났으며, 유전체 내부에서 공기 중의 파장인 12.24 cm보다 짧은 파장이 나타나는 것을 확인하였다. 이를 통해 guided 모드가 형성⁹⁾된 것으로 판단하였고, 이 결과를 바탕으로 이후의 모의실험은 plane wave 입사 조건에서 실시하였다.

III. Various Ground Structures

접지면의 다양한 형태에 따른 모의실험을 위해 DGS 구조가 있는 경우와 접지면 중앙부에 다른 구조(PMC, PEC, Soft-surface, Hard-surface)가 존재하는 경우를 가정하였다. 또한, 구조변화에 따른 표면파는 아무런 구조가 없을 경우의 유전체 평판의 전달전력(P_0)과 구조가 있는 경우의 전달전력(P_{DGS} , P_{SURF})을 비교해 봄으로써 알아보았으며, 전달전력은 Poynting vector를 통해 확인하였다.

3-1 Defected Ground Structure(DGS)

그림 2에 접지면에 DGS가 있는 경우의 실험에 사용된 2가지 형태의 구조 및 파라미터, 그에 따른 DGS의 공진 주파수를 나타내었다. (a)는 가장 간단한 형태의 DGS 구조인 사각형 슬롯 형태이며, (b)는 가장 일반적으로 사용되는 형태^{4),5)}이다. DGS 구조의 경우, 슬롯 자체가 공진 주파수를 가진다. DGS 슬롯의 전기적 길이가 L 을 결정, gap이 C 를 결정하여 LC 공진을 형성하게 된다⁵⁾. 따라서 L 과 C 를 결정하는 파라미터에 따라 동일한 공진주파수를 가지는 형태로 설계가 가능하기에 각각 두 가지 형태로 설계하여 모의실험을 진행하였다.



(a) 사각형 슬롯 (a) Rectangular slot type
(b) 일반 형태 (b) Common type⁴⁾

Rect. slot	f_{DGS} [GHz]	Rec_W [mm]	Rec_L [mm]	
Case 1	2.45	0.5	52	
Case 2	2.45	2	54	
Common	f_{DGS} [GHz]	Gap [mm]	Com_W [mm]	Com_L [mm]
Case 3	2.45	0.5	18	18
Case 4	2.45	2	23	23

그림 2. (a) 사각형 슬롯, (b) 일반 형태의 2가지 타입의 DGS 구조 및 설계 파라미터

Fig. 2. The structure and parameters of two types of the DGS (a) ractanglar slot type, (b) common type.

DGS의 공진주파수(f_{DGS})와 wave의 주파수가 일치하는 경우에서 슬롯의 수를 늘려가며 전달전력을 비교해 보았으며, 이에 따른 결과를 표 2에 나타내었다. 슬롯의 수가 증가할수록 더 많은 전력을 차단시켜 주는 것을 확인하였으나 그 차이는 미미하였으며, 평균적으로 아무런 구조도 없는 경우에 비해 대략 20~25 % 정도의 전력을 차단시켜 주는 것으로 나타났다. 즉, DGS 자체의 공진주파수

표 2. DGS 형태 및 개수에 따른 전력 전달 비율
Table 2. Power transfer rate with DGS type and number.

# of DGS	1	3	5	비고
DGS type				
No structure	1			
P_{DGS}/P_0 (Case 1)	0.775	0.756	0.753	Rect. slot
P_{DGS}/P_0 (Case 2)	0.782	0.766	0.754	
P_{DGS}/P_0 (Case 3)	0.807	0.788	0.783	Common type
P_{DGS}/P_0 (Case 4)	0.811	0.798	0.787	

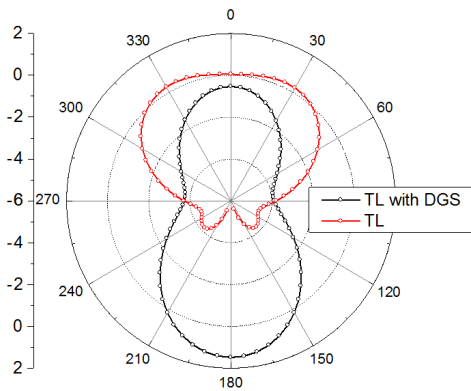


그림 3. DGS 유무에 따른 마이크로스트립 전송선로의 방사패턴
 Fig. 3. The radiation pattern of the microstrip line with DGS presence.

와 wave의 주파수가 일치하는 경우, 일종의 밴드 스탑 필터 역할을 하게 된다.

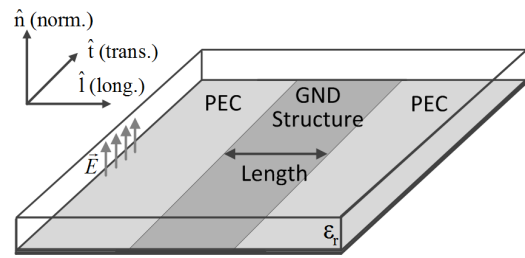
하지만 DGS 자체의 공진으로 인해 마치 표면파가 급전, DGS 구조가 슬롯안테나의 형태로 방사가 일어나는 것을 확인하였다. 실제로 배열안테나의 격리도 향상 및 이득 증가라는 목적으로 DGS를 사용할 경우, 격리도는 향상될 수 있으나, DGS의 슬롯을 통해 후방방사가 발생하여 안테나의 이득이 오히려 저하될 수도 있을 것으로 우려된다. 그림 3에 일반 마이크로스트립 라인의 방사패턴을 DGS 유무에 따라 나타냄으로써 실제로 DGS가 존재하는 경우 후방방사가 커지는 것을 확인해 보았다.

DGS의 공진주파수와 wave의 주파수가 일치하지 않는 경우, 표면파 차단 효과는 미미한 것으로 확인되었다.

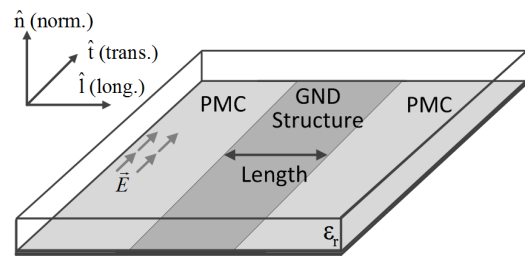
3-2 Ground with PMC, PEC, Soft, and Hard Surface

접지면의 형태에 따른 표면파의 변화를 보다 다양하게 알아보기 위해 TM-wave 뿐만 아니라, TE-wave가 형성되는 조건을 모델링하여 모의실험을 진행하였다.

그림 4에 형성되는 전파의 종류에 따라 설정한 모의실험 조건을 간단히 그림으로 나타내었다. 그림 4(a)는 TM-wave가 형성되는 경우의 실험조건이다. 앞선 실험들과 같이 패치 안테나의 TM-wave와 같은 형태의 field를 형성해 주기 위해 PEC를 접지면으로 사용하였다. 이때 wave는 longitudinal 방향으로 전파하며, PEC의 경계조건에



(a) TM-wave 실험조건
 (a) Simulation condition of TM-wave



(b) TE-wave 실험조건
 (b) Simulation condition of TE-wave

그림 4. 전파의 종류에 따라 설정한 모의실험 조건
 Fig. 4. Simulation condition according to the type of the wave.

의하여 접지면 위에서 전계는 normal 방향으로 형성된다. 그림 4(b)는 TE-wave가 형성되는 경우의 실험조건이다. TE-wave전파의 경우와 같은 형태의 field를 형성해 주기 위해 접지면을 PMC로 설정하였으며, wave는 longitudinal 방향으로 전파한다. PMC의 경계조건에 의하여 접지면 위에서 전계는 transverse 방향으로 형성된다.

각 경우에서 접지면 중앙부에 다른 구조들을 넣어봄으로써 표면파의 변화를 알아보았다. 주기구조에서 발생하는 저지대역을 사용하는 고임피던스 표면에 대한 실험을 진행하기 위하여 이러한 구조를 대체할 수 있는 PMC (TE-wave의 경우 PEC)를 사용하였으며, 그 외에 Soft 표면^{[7],[8]}과 Hard 표면^{[7],[8]}을 도입하여 실험을 진행하였다.

그림 5에 실험에 이용한 Soft 및 Hard 표면의 형태를 나타내었다. 접지면을 물결 형태의 주기구조로 만든 형상이며, 그 깊이 c 는 $\lambda/4$ 이다^[7]. 깊이를 $\lambda/4$ 로 설정함으로써 w 구간은 표면에서 open으로 보이게 되며, 이를 주기적으로 배치함으로써 short와 open이 반복되는 구조를 나타내게 된다. 즉, PEC와 PMC가 주기적으로 배치되어 있

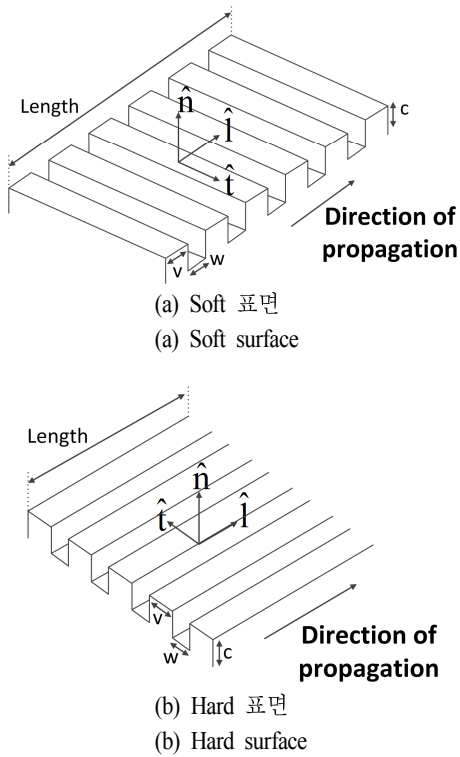


그림 5. (a) Soft 표면과 (b) Hard 표면의 구조^[8]
 Fig. 5. Structure of (a) Soft surface and (b) Hard surface.

는 것과 같은 효과를 보이게 된다. Soft 표면의 경우, 주기 구조의 배치방향을 전파의 진행방향기준 longitudinal 방향으로 설정한다. 또한, 참고문헌 [7]과 [8]에 따르면 Hard 표면의 경우, 설계 방법은 Soft 표면과 동일하나, 물결 주기구조의 배치방향을 전파의 진행방향 기준 transverse 방향으로 설정함으로써 구현할 수 있다.

참고문헌 [7]에 따르면 물결구조의 폭(v, w)은 $\lambda/2$ 보다 충분히 작아야 한다. v 혹은 w 가 점점 커지는 경우 Soft 표면의 전체 length가 커지게 된다. 또한, v 와 w 를 고정시킨 후 물결 주기구조의 개수를 늘림으로 인해 length를 증가시킬 수도 있다. 따라서 두 가지 경우에 대해 파라미터 스터디를 진행하며, 물결 주기구조의 폭에 의해 달라지는 특성을 알아보았다. 먼저 물결 주기구조의 폭 v 와 w 를 각각 $2\text{ mm}(=0.016\lambda)$ 와 $4\text{ mm}(=0.032\lambda)$ 로 설정한 뒤, 주기구조의 개수를 늘려가며 전력전달을 확인해 보았으며, 주기구조의 개수를 5개, v 를 2 mm 로 고정시킨 후, w 를 1

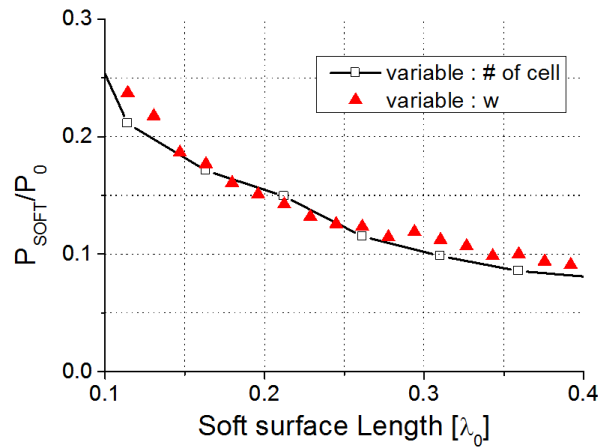


그림 6. Soft 표면의 length 증가 방식에 따른 전력 전달 비율
 Fig. 6. Power transfer rate with the length increments of the Soft surface.

mm부터 10 mm까지 키워가며 length 변화에 따른 전력전달을 확인해 보았다. 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림 6의 결과에 따르면 두 경우의 전력 전달 비율은 length가 길어짐에 따라서 줄어드는 것으로 나타났으며, 그 경향성이 거의 일치하게 나타났다. 따라서 참고문헌 [7]에서 언급된 것과 같이, 주기구조의 폭(v, w)이 $\lambda/2$ 보다 충분히 작다면 전력전달은 표면의 설계 파라미터보다는 length에 좌우될 것이라 판단했다. 이후의 실험은 v 와 w 를 각각 2 mm, 4 mm로 고정시킨 후 진행하였다.

그림 7에 TM-wave, TE-wave의 실험조건에 따른 결과를 나타내었다. TM-wave 입사조건인 (a)의 경우, PMC 구조와 Soft 표면에서 전달전력이 급격히 줄어드는 것을 확인하였으며, 95 % 이상의 전력을 차단하는 것을 확인하였다. 이는 PMC에서 전계의 normal 성분이 존재할 수 없다는 일반적인 경계조건을 충분히 만족하는 결과라고 볼 수 있다. TE-wave 입사조건인 (b)의 경우, PEC 구조와 Soft 표면에서 96 % 이상의 전력이 차단되는 것을 확인하였다. 이 역시 PEC에서 전계의 tangential 성분이 존재할 수 없다는 일반적인 경계조건을 만족하는 결과로 볼 수 있다. Hard 표면은 두 실험에서 공통적으로 전력차단 효과가 거의 없었으며, 이를 통해 Hard 표면은 TM-wave와 TE-wave 모두를 통과시키는 것으로 판단하였다.

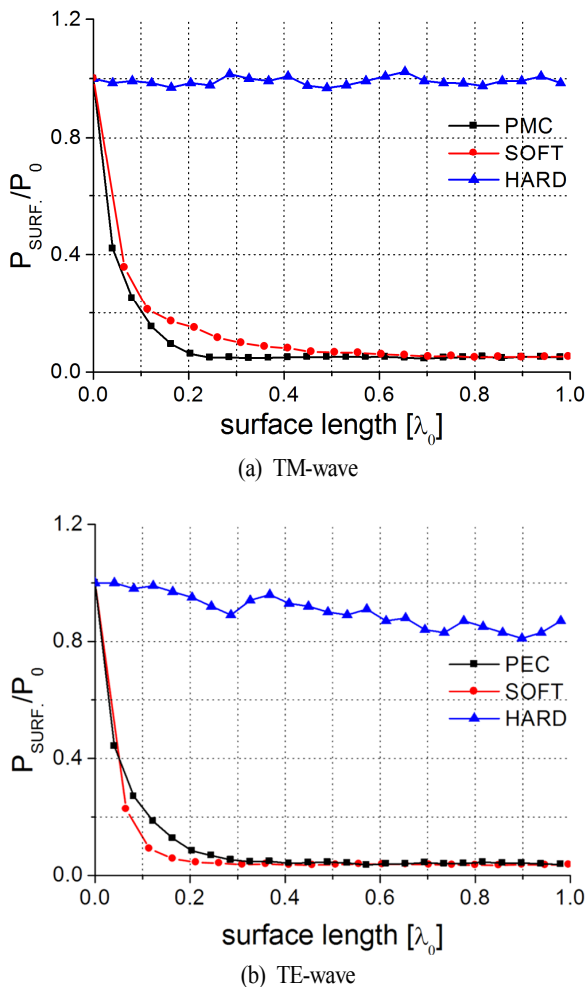


그림 7. 접지면 구조와 전파의 종류에 따른 전력 전달 비율
 Fig. 7. Power transfer rate with the ground structure and type of wave.

IV. 결 론

본 논문에서는 안테나간 격리도의 문제를 야기시키는 표면파에 관한 기초적인 연구를 진행하였다. 마이크로스트립 패치 안테나의 표면파와 유사한 환경에서 모의실험을 진행하기 위해 접지된 유전체 평판 모델을 사용하였으며, 다양한 접지면 형태에 따른 표면파 전파에 대해 실험을 진행하였다.

접지면에 DGS 구조가 존재하며, 전파의 주파수와 DGS의 공진주파수가 일치하는 경우, 일종의 밴드 스탑 필터

와 같은 역할을 함으로써 전력을 차단시켜 주는 효과가 있는 것을 확인하였지만, DGS 자체의 공진으로 인해 접지면 아래로 후방방사가 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 접지면에 PMC(TE-wave의 경우 PEC), Soft-표면이 존재하는 경우, 효과적으로 전력을 차단시켜 주는 것을 확인하였으며, Hard 표면의 경우 전파의 종류에 관계없이 모두 통과시키는 결과를 보여주었다.

실험결과를 토대로 종합해 보면 DGS의 경우 배열의 단일 소자 사이에 배치한다면 격리도가 향상될 수는 있으나, 후방방사로 인해 오히려 안테나의 이득이 저하될 수 있을 것으로 우려되며, PMC(주기구조를 이용한 고임피던스 표면) 혹은 Soft 표면을 배열안테나에 효과적으로 사용한다면 표면파 전파 억제에 의해 격리도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] 전중창, 김성우, 이동현, 김경열, "차세대 이동통신용 역지향성 능동 안테나 배열에 관한 연구", 정보통신연구진흥원 학술기사, 1990년.
- [2] 김진혁, 황금철, 신재호, "밀리미터파 대역 응용을 위한 직렬 급전 마이크로스트립 배열 안테나 설계", 한국전자과학회논문지, 22(12), pp. 1176-1179, 2011년 12월.
- [3] 최원상, 이흥민, "독립된 접지면을 갖는 EBG 구조를 이용한 이중 대역 마이크로스트립 패치 안테나 사이의 격리도 향상", 한국전자과학회논문지, 23(3), pp. 306-313, 2012년 3월.
- [4] D. Ahn, J. -S. Park, C. -S. Kim, J. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, no. 1, pp. 86-93, Jan. 2001.
- [5] D. Ahn, C. -S. Kim, G. -Y. Kim, and J. -S. Park, "Effects of a lumped element on defected ground structures", in *Proc. 30th Eur. Microwave Conf. Dig.*, vol. 2, pp. 75-78, Oct. 2000.
- [6] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. Broas, N. Alexopoulos,

and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11. pp. 2059-2074, Nov. 1999.

[7] P. -S. Kildal "Artificially soft and hard surface in electromagnetics", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 38,

no. 10, pp. 1537-1544, Oct. 1990.

[8] P. -S. Kildal, "Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics and their application to antenna design", in *Proc. 23rd Eur. Microw. Conf.*, pp. 30-33, 1993.

[9] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ED, John Wiley.

박 민 서



2014년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2014년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 배열 안테나, Metamaterial 안테나

이 정 해



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 3월 UCLA 전기공학과 (공학박사)
1993년 3월~1996년 2월: General Atomics 교환연구원

1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor

1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나, Metamaterial RF 소자, 무선전력전송