

T-모양 급전선을 갖는 마이크로스트립 슬롯 안테나의 최적 설계방법에 관한 연구

Optimum Design of T-shaped Microstrip-line-fed Slot Antennas

김권일 · 서영훈 · 박익모

Kwonil Kim · Younghoon Suh · Ikmo Park

요 약

본 논문은 T-모양 급전선을 갖는 마이크로스트립 슬롯안테나의 최적 설계방법에 대하여 연구하였다. T-모양의 급전선을 갖는 마이크로스트립 슬롯안테나의 대역폭에 가장 큰 영향을 주는 설계변수는 급전선의 offset 위치와 가로방향의 급전선 길이로서, 기판의 유전상수와 두께 그리고 슬롯 폭이 주어지면 설계한 안테나가 최대 대역폭을 갖도록 두 설계변수를 계산할 수 있는 식을 curve fitting을 통하여 유도하였다. 시뮬레이션하여 최대 대역폭을 갖도록 최적화 시킨 안테나의 offset 위치와 급전선 가로길이를 이 식을 이용하여 계산한 값과 각각 비교하였고 그 결과가 잘 일치하였다.

Abstract

This paper presents the optimum design method for T-shaped microstrip-line-fed slot antennas on various substrates. Since the impedance bandwidth of the antenna depends highly on the vertical offset position and the length of horizontal strip conductor, we derived the formulas regarding these design parameters to get the maximum bandwidth. The formulas can compute the offset position and the length of horizontal strip conductor for any given substrate parameters. We compared the results obtained by using these design formulas and the one obtained by the simulation for each slot width, and it showed very good agreement.

I. 서 론

마이크로스트립 슬롯안테나를 급전하는 일반적인 방법은 마이크로스트립 급전 선로를 슬롯의 중앙으로 급전하는 방식이다^[1]. 이 급전방식은 매우 높은 방사저항을 갖는 문제점이 있어 이것을 해결하기 위해 급전하는 위치를 슬롯 중심에서 슬롯의 양 끝단 쪽으로 오프셋(offset)시키는 방법이 제시되었다^{[1],[2]}. 그러나 슬롯 폭이 좁은 경우(narrow slot)에 한하여 좋은 정합을 이룰 수 있지만 슬롯 폭이

넓어지면(wide slot) 방사저항도 슬롯 폭에 비례적으로 증가하여 우수한 정합을 할 수 없는 문제가 있다^[3]. 슬롯 폭이 넓은 안테나에 대한 연구가 지속적으로 이루어졌으나 슬롯 폭이 증가하면 대역폭도 넓어질 수 있다는 가능성만 확인했을 뿐 더 넓은 대역폭을 얻지는 못했다^[4]. 이러한 문제점을 해결한 구조가 T-모양의 마이크로스트립 급전선을 사용한 것으로, 방사저항 값을 현저히 줄이면서 슬롯 폭이 증가하여도 방사저항 값을 일정하게 유지할 수 있어 별다른 정합회로를 사용하지 않아도 슬롯 폭이 증

아주대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20010111-007

· 수정완료일자 : 2001년 3월 9일

가함에 따라 대역폭도 증가하는 특성을 얻을 수 있다^{[5],[6]}.

본 논문에서는 T-모양의 마이크로스트립 급전선을 사용한 광대역 슬롯안테나의 최적 설계방법에 대하여 연구하였다. T-모양 급전선을 갖는 마이크로스트립 슬롯안테나에서 대역폭과 정합에 가장 큰 영향을 주는 설계변수는 급전선의 offset 위치와 가로방향의 급전선 길이로서, 기판의 유전상수(ϵ_r)와 두께(h) 그리고 슬롯 폭이 주어지면 설계한 안테나가 최대 대역폭을 갖도록 두 설계변수를 계산할 수 있는 식을 curve fitting을 통하여 유도하였다. 안테나는 0.635 mm에서 1.575 mm 사이의 기판 두께와 유전상수 2.2, 4.3 그리고 10.2를 갖는 다섯 가지 경우에 대하여 설계하였으며, 각 경우에 따라 슬롯의 폭과 offset의 비율을 비교하였고, 그 결과 각 경우에 offset과 슬롯 폭이 일정한 비율을 갖는 특성이 있었다. 설계한 안테나 중 유전상수 2.2 두께 1.575 mm인 안테나는 VSWR < 2를 기준으로 최대 대역폭인 1.06 octave를 얻었고, 그 안테나를 제작하여 결과를 확인하였다.

II. 안테나 설계

설계한 안테나들의 유전상수는 기판 RT Duroid 6010($\epsilon_r=10.2$)과 5880($\epsilon_r=2.2$) 그리고 FR-4($\epsilon_r=4.3$)를 기준으로 선택하였으며, 기판 두께는 RT Duroid 6010기판에 대해서 0.635 mm와 1.27 mm를 RT Duroid 5880에 대해서는 0.787 mm와 1.575 mm를 그리고 FR-4기판은 1 mm를 선택하였고, 시뮬레이션 도구로는 MoM(Method of Moments)방식의 Ensemble 5.1을 사용하였다. T-모양 급전선을 갖는

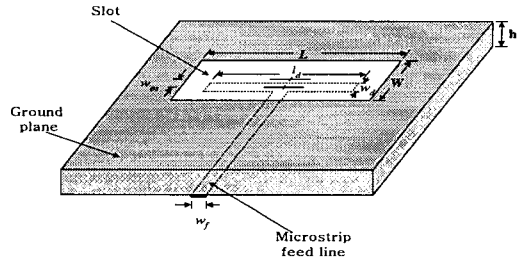


그림 1. T-모양 마이크로스트립 슬롯안테나 구조
Fig. 1. Geometry of a T-shaped microstrip-line-fed slot antenna.

마이크로스트립 슬롯안테나의 구조는 그림 1과 같다. 설계 변수로서 L 은 슬롯의 길이, W 는 슬롯의 폭, l_d 는 T-모양 급전선의 가로방향 길이, w_d 는 가로로 놓여진 급전선의 폭, w_f 는 세로방향의 급전선 폭, offset(w_{os})은 슬롯 중심에서 T-모양 급전선 중심 사이의 간격을 나타낸다. 안테나의 각 설계변수를 표 1에 나타내었다.

공진 주파수 결정에 가장 큰 변수로 작용하는 슬롯의 길이는 다음의 식으로 계산할 수 있다^{[7],[8]}.

$$L = \frac{150}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \cdot f_{GHz}} \quad [mm] \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{2\epsilon_r}{1 + \epsilon_r} \quad (2)$$

여기에서 L 은 안테나의 공진 길이이고, ϵ_{eff} 는 유전체 기판 두께가 유한할 때 기판의 실효유전상수, 그리고 f_{GHz} 는 GHz 단위로 나타낸 공진 주파수이다. 식 (1)에 표현된 슬롯길이는 슬롯 라인에서 guided wavelength의 1/2 되는 값으로, 엄밀한 의미에서 보면 식 (1)으로 계산한 슬롯길이는 전기적인 공

표 1. 설계한 안테나의 디자인 파라미터

Table 1. Microstrip slot antenna and substrate dimensions.

Case	ϵ_r	h(mm)	h / λ_g	L (mm)	λ_g (mm)	w_d (mm)	λ_o (mm)	f_o (GHz)	BW _{max} (%)
1	10.2	0.635	0.0053	60	120	0.596	161.9	1.853	50.8
2	10.2	1.27	0.0106	60	120	1.192	161.9	1.853	51.5
3	2.2	0.787	0.0065	60	120	2.398	140.7	2.132	63.8
4	2.2	1.575	0.0131	60	120	4.795	140.7	2.132	69.8
5	4.3	1	0.0083	60	120	2	152.8	1.963	60.2

진 길이므로 실제 슬롯길이는 이보다 조금 짧게 설계하여야 하나^[8], 본 논문에서는 이 차이가 매우 작아 무시하였다. 설계한 안테나들을 모든 경우에 대해 같은 파장으로 비교하기 위하여 λ_g 값을 120 mm로 고정하였다. 따라서 공진 주파수는 각 경우의 실효유전상수에 따라 조금씩 달라지게 된다 (표 1참고). 슬롯 폭은 12 mm에서 36 mm까지 4 mm 간격으로 증가시켜 가면서 최대 대역폭을 갖도록 설계하였다. T-모양 급전선의 가로방향 길이(l_d)는 1 mm 단위로 변화시켰고, offset은 0 mm부터 0.1 mm 단위로 늘려가며 시뮬레이션 하였다. 설계변수로서 offset은 슬롯 중심과 급전선 사이의 간격을 의미하는데, offset을 정의할 때에 슬롯의 중심을 기준으로 급전선을 위로 움직일 때 슬롯중심과 급전선의 간격을 offset으로 정의할 수도 있고 반대로 급전선을 아래로 움직일 때 생기는 간격으로 정의할 수도 있는데, 급전선을 위로 움직이게 되면 고차모드가 생겨 반파장보다 높은 주파수에서 공진이 일어나게 되므로, 본 논문에서 offset은 급전선을 아래쪽으로 움직일 때의 간격으로 설정하였다. 가로와 세로방향의 급전선 폭은 각 안테나 기판의 유전상수와 두께에 따라 특성임피던스가 50 Ω 이 되도록 했다. 따라서 유전상수가 낮고 기판이 두꺼울수록 급전선 폭은 넓어지게 된다.

III. 결과 및 해석

3-1 Offset의 영향

급전선의 offset 위치는 T-모양 급전선을 갖는 마이크로스트립 안테나의 대역폭에 가장 많은 영향을 주는 설계변수중 하나이다. 슬롯 폭이 증가하면 슬롯에 여기되는 필드(field)의 양이 많아지고, 임피던스도 바뀌게 되는데, 이것을 급전선의 offset 위치로 보상해줄 수 있다. 따라서 슬롯 폭이 넓어지면 offset 값도 일정비율로 증가해야 최대 대역폭을 얻을 수 있다. 그림 2는 offset에 의한 영향을 offset과 슬롯 폭에 대한 비율로 나타낸 것으로, 각 안테나가 최적화 되었을 때의 w_{os}/W 가 일정한 비율을 보이고 있다.

그림 2에서 보면, w_{os}/W 은 슬롯의 폭에 관계없이

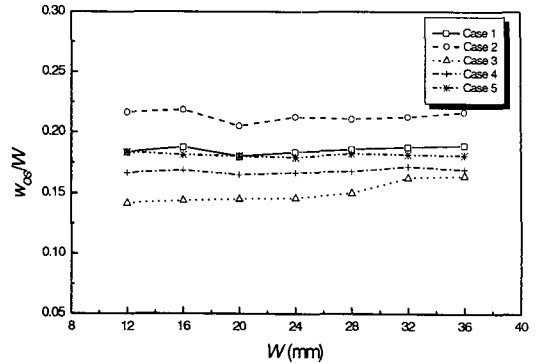


그림 2. 최적화 된 다섯 개 안테나의 offset과 슬롯 폭의 비율, w_{os}/W

Fig. 2. The ratio of offset to slot width (W) for five different slot antennas.

일정하고, case 1, 2가 case 3, 4에 비해 비교적 큰 offset에서 최적의 정합특성을 얻었다. 이것은 offset의 영향이 가로로 놓여진 급전선의 중심과 슬롯의 중심사이의 간격보다는 급전선의 윗면과 슬롯의 밑면 사이의 간격에 좌우되기 때문이라고 예상된다. 즉 급전선의 윗면과 슬롯의 밑면 사이의 간격이 어느 일정 길이에 이를 때 안테나는 최적화 된다. 그림 2에서 보면 기판 두께보다는 유전상수에 의한 영향이 많고, w_{os}/W 값은 기판 두께와 유전상수에 비례한다는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 각 경우의 w_{os}/W 를 ϵ_{eff} 와 h 로 나누면 어떤 상수로 수렴하는 것을 알 수 있고, 이와 같은 사실로부터 기판의 유전상수와 두께를 변수로 하여 설계한 안테나가 최대 대역폭을 갖도록 offset 값을 계산할 수 있는 식을 curve fitting을 통하여 유도하였다. 아래의 식은 슬롯길이(L)가 슬롯 폭(W)보다 큰 경우에 사용할 수 있다.

$$\frac{w_{os}}{W} = 0.0231 \times \epsilon_{eff} \times (h + 3.75), \quad L > W \quad (3)$$

여기서 ϵ_{eff} 는 기판의 실효 유전상수, h 는 기판두께를 나타낸다. 이 식을 이용하는 방법은 다음과 같다. 먼저 설계하고자 하는 안테나에 사용할 기판을 선택하고 식 (2)로 ϵ_{eff} 를 계산하여 기판의 두께(h)와 함께 식 (3)에 입력한다. 그리고 나서, 설계하고

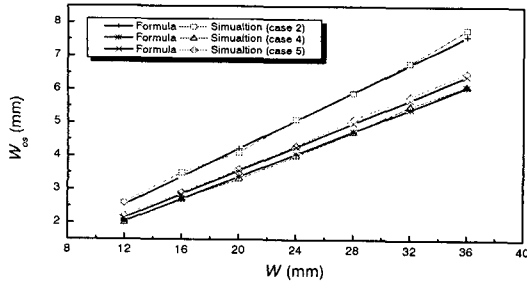


그림 3. 시뮬레이션과 디자인 식에 의한 offset값 비교.

Fig. 3. Comparison of the offset value between the simulation and the formula.

자 하는 안테나의 슬롯 폭(W)을 선택하여 넣어주면 최대 대역폭을 얻을 수 있는 offset 값이 계산된다. 이 식은 T-모양 급전선을 갖는 직사각형 슬롯안테나의 초기 설계에 이용할 수 있다. 그림 3은 이 식을 이용하여 계산한 offset 값과 시뮬레이션에 의해 각각의 슬롯크기에서 최대 대역폭을 갖도록 최적화 시킨 offset 값을 비교해 놓은 것이다. 슬롯의 폭에 따라 offset 값을 mm 단위로 나타내었고 오차는 offset 값에 대해 평균 0.1 mm, 대역폭에 대해서는 평균 2% 이내이다.

3-2 급전선 가로길이의 영향

T-모양 급전구조를 갖는 직사각형 슬롯안테나에서 급전선의 가로길이는 슬롯과 커플링 되는 정도에 의해 한 번 공진 또는 두 번 공진을 일으켜 대역폭을 변화시킨다. 가로길이가 길어지면 슬롯과 커플

링이 많아지면서 높은 주파수 영역에서 임피던스의 인덕티브한 성분이 상대적으로 줄어들게 되며, 이때의 공진 점은 50 Ω 정합점에서 멀어지게 되어 공진은 낮은 주파수 영역에서 한번만 일어나고 따라서 대역폭은 줄어든다. 그러나 반대로 급전선의 가로길이가 짧아지면 슬롯과의 커플링이 줄어들고 높은 주파수 영역에서 공진점이 정합점에 가까워져 두 번 공진이 일어나 대역폭이 증가하게 된다. 따라서 안테나를 설계할 때 캐패시티브 또는 인덕티브하게 정합에서 벗어난 것을 이 설계 변수를 가변해서 보상해 줄 수 있다. 낮은 주파수 영역에서의 임피던스는 급전선 가로길이에 따라 크게 변하지 않는다. 표 2는 각 경우의 안테나가 최적화 되었을 때의 설계변수와 대역폭을 나타낸 것으로, 각 경우에 슬롯이 넓어지면 급전선 길이는 줄어드는 경향이 있다. 또한 유전상수가 상대적으로 큰 case 1, 2의 급전선 길이가 case 3, 4의 것보다 짧고, 유전상수가 같은 경우에는 기판 두께에 비례하여 급전선 길이가 길어지는 사실을 알 수 있다. 이는 급전선 길이와 슬롯 길이의 비(l_d/L)는 유전체기판의 두께에는 비례하고, 실효 유전상수와 슬롯 폭에는 반비례하는 특성을 가지는 것을 나타낸다. 이와 같은 특성을 이용하여, 본 논문에서는 식 (3)에서 구한 offset 위치에서 급전선 가로길이를 최적화 시킬 수 있는 식을 curve fitting을 통하여 다음과 같이 유도하였다.

$$\frac{l_d}{L} = (0.081h + 0.563) \times \left(\frac{0.581}{\epsilon_{eff}} + 0.198 \right) \times \left(\frac{1}{0.018W + 0.318} \right) \quad (4)$$

표 2. 설계한 안테나의 최적화 된 설계변수

Table 2. Comparison of optimum results for each case.

Case	W (mm)	l_d (mm)	w_{os} (mm)	w_{os}/W	%BW	Case	W (mm)	l_d (mm)	w_{os} (mm)	w_{os}/W	%BW
1	12	35	2.2	0.1833	25.8	2	12	38	2.6	0.2167	12.1
	24	25	4.4	0.1833	52.3		24	28	5.1	0.2125	43.1
	36	20	6.8	0.1889	47.6		36	22	7.8	0.2167	50.3
3	12	43	1.7	0.1417	54.1	4	12	46	2	0.1667	38.4
	24	34	3.5	0.1458	63.8		24	36	4	0.1667	69.8
	36	27	5.9	0.1639	55.6		36	28	6.1	0.1694	63.5

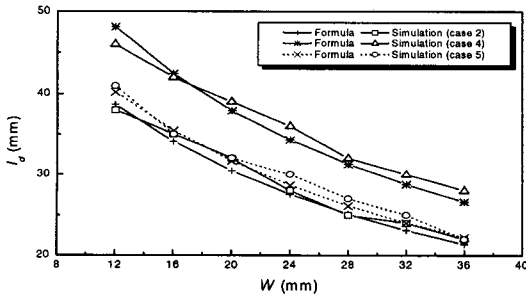


그림 4. 시뮬레이션과 디자인 식에 의한 급전선 가로길이(l_d)값 비교.

Fig. 4. Comparison of the length of the horizontal strip conductor(l_d) between the simulation and the formula.

여기서 l_d 는 급전선의 가로길이, L 은 슬롯의 길이, W 는 슬롯의 폭, h 는 기판두께, ϵ_{eff} 는 기판의 실효 유전상수를 나타낸다. 이 식은 먼저 식 (3)에서 offset 값을 계산한 다음, 식 (3)에서와 같은 변수값 (W, ϵ_{eff}, h)을 사용하여 최대 대역폭을 갖는 급전선 길이를 계산할 수 있다. 그림 4는 식 (4)를 이용하여 계산한 l_d 값과 시뮬레이션에 의해 최대 대역폭을 갖도록 최적화 시킨 l_d 값을 비교해 놓은 것이다. 오차는 l_d 값에 대해 평균 0.5 mm, 대역폭에 대하여 평균 4% 이내이다.

이상의 결과를 요약하면, T-모양 급전선을 갖는 직사각형 슬롯안테나를 초기 설계할 때, 먼저 사용할 유전체기판과 슬롯 크기를 결정하면 식 (3)으로 최대 대역폭을 갖는 offset 값을 계산할 수 있고, 이 offset에서 최적의 정합과 대역폭을 갖도록 식 (4)로 급전선 가로길이를 계산할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 실험적으로 검증하기 위하여 유전상수가 2.2 기판두께가 1.575 mm이고, 접지면의 크기가 150 mm × 150 mm인 RT-Duroid 5880 기판에 슬롯크기가 60 mm × 24 mm인 안테나를 제작하여 측정하였다. 제작한 안테나의 S_{11} 측정결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 그림 5에 나타내었다. 두 결과가 매우 유사함을 보이고 있다.

3-3 임피던스 loci와 대역폭의 변화

T-모양 급전선을 갖는 슬롯안테나에서 각 경우의

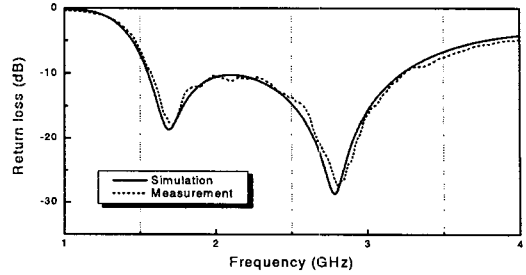


그림 5. 최적화 된 case 4 안테나의 S_{11} 측정결과 ($L = 60$ mm, $W = 24$ mm, $w_d = 4.795$ mm, $h = 1.575$ mm, $\epsilon_r = 2.2$)

Fig. 5. Comparison of the measured and simulated return loss for case 4. $L = 60$ mm, $W = 24$ mm, $w_d = 4.795$ mm, $h = 1.575$ mm, and $\epsilon_r = 2.2$.

임피던스 loci는 유전상수와 기판두께에 따라 크게 변하지는 않았으나, 유전상수가 낮은 case 3, 4 두 안테나가 case 1, 2에 비해 좀 더 뚜렷한 임피던스 loci 변화를 보이는 특성이 있었다. 그림 6은 $W = 16, 24, 32$ mm 일 때 최적화 된 네 개의 안테나에 대한 입력 임피던스 변화를 Smith 도표 상에 비교한 것이다.

그림 6을 보면, 슬롯 폭이 넓어지면서 전체적인 impedance loci가 인덕티브하게 증가하고 있다. 이유는 슬롯이 넓어지면 좋은 정합을 얻기 위해 급전선의 offset 위치는 아래쪽으로 옮겨야 하고 급전선의 가로길이는 줄여야 하는데, 그러면 슬롯과 급전선과의 커플링이 줄어들게 되어 캐패시티브 성분이 줄어들고 상대적으로 인덕티브한 성분이 많아지기 때문이다. 또한 슬롯 폭이 증가함에 따라 높은 주파수 영역에서 임피던스 loci가 점차 작아지게 되어 슬롯 폭에 비례하여 대역폭이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 7은 대역폭에 많은 영향을 주는 슬롯크기가 모두 같을 때(60 mm × 24 mm) 표 2에 나타낸 4가지 경우들의 안테나 반사손실(S_{11})특성을 비교한 것이다.

그림 7에서 나타난 것처럼, 마이크로스트립 패치 안테나에서와 같이 유전상수가 낮은 ($\epsilon_r = 2.2$) 두 안테나가 대역폭이 넓고, 그 중에서도 기판 두께가 두꺼운 case 4가 조금 더 넓은 것을 알 수 있다. 그

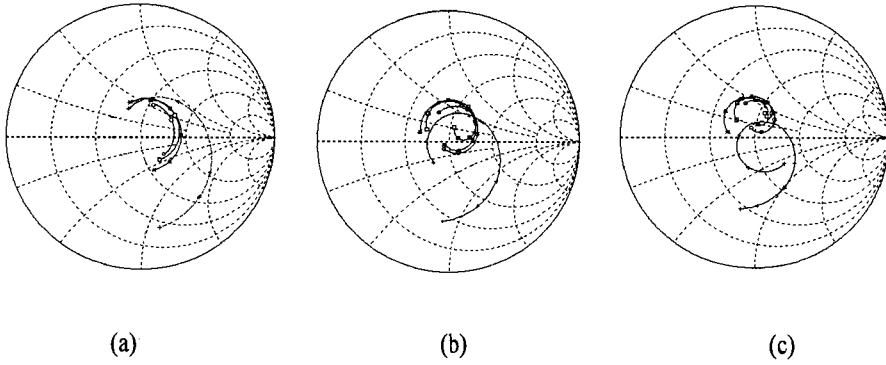


그림 6. (a) $W=16$ mm (b) $W=24$ mm (c) $W=32$ mm
 case 1 : case 2 : case 3 : case 4 :
 $W=16, 24, 32$ mm일 때 최적화된 네 개의 안테나에 대한 임피던스 변화 ($f = 1.7 \sim 2.2$ GHz)

Fig. 6. (a) $W=16$ mm (b) $W=24$ mm (c) $W=32$ mm
 case 1 : case 2 : case 3 : case 4 :
 Input impedance loci of antennas on Smith chart when $W=16$ mm, 24 mm, and 32 mm ($f = 1.7 \sim 2.2$ GHz)

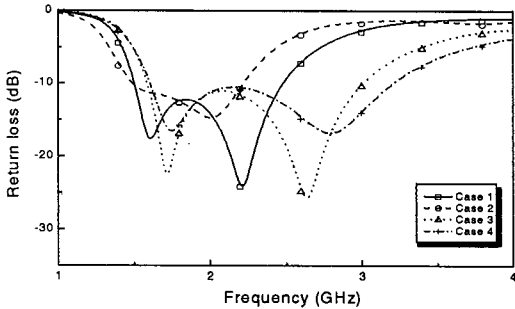


그림 7. 슬롯크기 60 mm \times 24 mm일 때 4가지 경우의 안테나의 S_{11} 특성 비교
 Fig. 7. Return loss of four antennas with the same slot size (60 mm \times 24 mm).

러나 대역폭의 차이는 6% 정도로 미세하여 마이크로스트립 패치 안테나보다는 기판두께에 민감하지 않는 특성이 있고, 기판 두께와 유전상수 차이가 가장 큰 case 1과 case 4는 약 20% 정도의 대역폭 차이를 나타내고 있다.

IV. 결 론

본 논문은 T-모양 급전선을 갖는 마이크로스트립

슬롯안테나의 최적 설계방법에 대하여 연구하였다. T-모양 급전선을 갖는 마이크로스트립 슬롯안테나에서 가장 중요한 설계변수는 급전선의 offset 위치와 급전선의 가로방향 길이로서, 기판의 유전상수와 두께 그리고 슬롯 폭이 주어지면 설계한 안테나가 최대 대역폭을 갖도록 offset 값과 급전선 길이를 계산할 수 있는 식을 curve fitting을 통하여 유도하였다. 시뮬레이션하여 최대 대역폭을 갖도록 최적화시킨 안테나의 offset 값과 급전선 길이를 구한 식을 이용하여 계산한 값과 각각 비교하였다. 급전선의 offset 위치는 크게 할수록 슬롯에 여기 되는 커플링이 줄어들고, 급전선의 가로길이는 길어질수록 슬롯과의 커플링이 많아지므로, 이를 조절하여 좋은 종합 특성으로 각 경우에 최대 대역폭을 얻을 수 있었다. 슬롯의 폭(W)과 offset의 비율을 다섯 가지 설계 경우에 따라 비교하였다. 슬롯의 길이에 관계없이 각 안테나가 최대 대역폭을 가질 때 offset과 W 의 비율은 일정한 값을 나타내었고, 유전체기판의 유전상수와 기판 두께에 비례함을 알 수 있었다. 시뮬레이션 결과를 실험적으로 검증하기 위해 유전상수 2.2 기판 두께 1.575 mm인 유전체 기판으로 안테나를 제작, 측정하여 결과를 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Yoshimura, "A microstrip slot antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-20, pp. 760-762, Nov., 1972.
- [2] D. M. Pozar, "Reciprocity method of analysis for printed slot and slot-coupled microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, pp. 1439-1446, Dec., 1986.
- [3] M. Kahrizi, T. K. Sarkar, and Z. H. Maricevic, "Analysis of a wide radiating slot in the ground plane of a microstrip line," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-41, pp. 29-37, Jan., 1993.
- [4] S. M. Shum, K. F. Tong, X. Zhang, and K. M. Luk, "FDTD modeling of microstrip-line-fed wide-slot antenna," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 2, pp. 118-120, Oct., 1995.
- [5] M. K. Kim, K. I. Kim, Y. H. Suh, and I. Park, "A T-shaped microstrip-line-fed wide slot antenna," *IEEE AP-S Int. Symp. Digest*, Salt Lake city, Utah, pp. 1500-1503, July, 2000.
- [6] 한석진, 박익모, 신철재, "전송선로 모델을 이용한 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나 설계," 한국전자과학회 논문지 제11권, 제4호, pp. 610-618, 2000년 6월.
- [7] A. Axelrod, M. Kisluk, and J. Maoz, "Broadband microstrip-fed slot radiator," *Microwave J.*, pp. 81-94, June, 1989.
- [8] B. N. Das and K. K. Joshi, "Impedance of a radiating slot in the ground plane of a microstripline," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-30, pp. 922-926, Sept., 1982.
- [9] R. Janaswamy and D. H. Schaubert, "Characteristic impedance of a wide slotline on low-permittivity substrates," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-22, pp. 548-554, May, 1974.
- [10] E. Chang, S. A. Long, and W. F. Richards, "An experimental investigation of electrically thick rectangular microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, pp. 767-773, June, 1986.
- [11] J. B. Knorr and J. Saenz, "End effect in a shorted slot," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-21, pp. 579-580, Sept., 1973.
- [12] J. B. Knorr, "Slot line transitions," *IEEE Trnas. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-22, pp. 548-554, May, 1974.
- [13] M. Davidovitz and Y. T. Lo, "Input impedance of a probe-fed circular microstrip antenna with thick substrate," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, no. 7, pp. 905-911, July, 1986.
- [14] D. H. Schaubert, D. M. Pozar, and A. Adrian, "Effect of microstrip antenna substrate thickness and permittivity: comparison of theories with experiment," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-37, pp. 677-682, June, 1989.
- [15] H. Kobayashi, M. Yuki, and Y. Yasuoka, "Effects of substrate thickness on the gain of millimeter and submillimeter wave slot antenna," *Electron. Comm. Jpn.*, part 1, vol. 80, no. 11, Jan., 1997.

김 권 일



1999년 2월: 아주대학교 전파공학과(공학사)
2001년 2월: 아주대학교 전자공학부(공학석사)
2001년 3월~현재: 삼성전자 정보통신
[주 관심분야] 초고주파 능동, 수동

소자

박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학과(공학사)
1989년: 일리노이 대학교 전기전자공학과(공학석사)
1994년: 일리노이 대학교 전기전자공학과(공학박사)
1994년~1996년: LG전자기술원 선

임연구원

1996년~현재: 아주대학교 전기전자공학과 조교수, 부교수

[주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 수치해석

서 영 훈



1999년 8월: 아주대학교 전파공학과(공학사)
1999년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 광대역 안테나, 초고주파 능·수동 소자, 수치해석