

Aperture Coupling을 이용한 NRD to Microstrip Transition

임 현 용, 이 동 현, 이 정 해
홍익대학교 전자통신공학과

Aperture Coupled NRD to Microstrip Transition

Hun-Yong Lim, Dong-Heon Lee, Jeong-Hae Lee
Dept. of Radio Science & Communication Engineering, Hong-Ik University

Abstract - 본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 저손실 특성이 우수한 전송선로인 non-radiative dielectric (NRD) guide와 microstrip의 transition에 관해 연구하였다. 본 연구에서 이용된 transition은 aperture coupling을 이용한 것으로 NRD와 microstrip 사이의 aperture를 통하여 magnetic field가 coupling되는 원리이다. Aperture의 구조를 각각 rectangular와 ridge 형태로 설계하였다. 비교를 위해서 설계된 microstrip to microstrip transition의 경우 aperture의 구조를 ridge 형태로 했을 때 rectangular 일 때 보다 삽입손실 특성이 개선되었고 더 넓은 bandwidth를 가지는 것을 알 수 있었다. NRD to microstrip transition의 경우는 bandwidth 면에서 ridge 구조와 rectangular 구조 모두 비슷한 특성을 보였다.

1. 서 론

기존에 밀리미터파 대역에서 사용할 수 있는 소자로는 microstrip line이나 유전체 도파로 등이 있었으나 microstrip의 경우 주파수가 높아지면 전도 손실이 높아지고 방사되는 손실도 커진다. 또한, H-guide의 경우에는 직선영역에서의 전도 손실은 상당히 적은 값을 가지지만 굽어진 부분이나 불연속적인 부분에서 옆의 라인과의 cross talk이나 부가적인 손실이 발생한다.

Non-radiative dielectric (NRD) guide는 기존의 밀리미터파 대역 소자의 단점을 보완하기 위해 1981년도에 제안된 전송선로로 평행한 평판 전도체 사이에 유전체가 삽입된 간단한 구조로 이루어져 있다 [1][2][3]. 하지만 여러 NRD 응용분야와 집적화에 가장 중요한 transition에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다. 기존의 NRD transition의 경우 NRD의 유전체 부분을 taper형태로 가공하여 rectangular waveguide나 horn안테나로 transition시키는 방법이 주로 사용되어 왔으나 taper제작이 어렵고 측정 방법도 복잡하였다. 또한, 구조가 복잡하므로 NRD를 사용한 시스템을 구현하는데 있어서도 많은 어려움이 있었다.

본 논문에서는 aperture coupling을 이용하여 범용으로 가장 많이 쓰이는 microstrip과의 transition에 대하여 연구하였다. Aperture coupling을 이용한 NRD transition은 microstrip의 그라운드 평면에 적당한 구조의 aperture를 뚫고 aperture를 통하여 microstrip의 magnetic field가 NRD의 LSM₁₁ field로 유기되는 원리이다. 이 구조를 사용할 경우 기존의 NRD의 구조를 변형할 필요가 없으므로 제작이 편리하고, 집적화에 유리하다는 장점이 있다.

먼저 microstrip에 aperture coupling을 이용하여 두 개의 microstrip의 coupling정도를 simulation 및 측정하고 ridge구조를 사용하여 특성을 향상시키는 방법에 대하여 연구하였다. 또한, coupling 구조를 2-port 네트워크로 하여 보다 실용적으로 사용될 수 있도록 하였다. NRD to microstrip transition에 대해

서 그 원리를 설명하고 simulation을 통해 얻어진 수치를 적용하여 제작 후 측정결과와 simulation 결과를 비교하였다.

2. Microstrip to microstrip transition

Aperture coupling은 도파관에 aperture를 뚫게 되면 그 aperture를 통해 도파관의 필드가 다른 도파관의 필드로 유기되는 현상으로 microstrip이나 도파관을 다른 microstrip이나 도파관으로 연계시킬 때 많이 사용되는 방법이다 [4][5][6][7]. 주파수대역이 높아지고 회로의 크기가 작아짐으로써 transition의 중요성은 더욱 커지고 있으며 기본적인 transition의 기능 이외에 이를 이용한 안테나의 제작 등도 이루어지고 있다.

Microstrip to microstrip transition은 transition 구조를 4-port 네트워크로 구성하고 이것의 coupling factor를 Green's function을 이용하여 해석한 논문을 참고하였다 [4][5]. Microstrip에서의 aperture coupling은 magnetic coupling을 이용한 것이다. 이 경우, microstrip의 길이가 무한하다고 가정하면 각 line의 위상은 무시가 되므로 S₃₁ 과 S₄₁의 크기는 같고 위상만 반대가 되게 된다.

4-port 네트워크에서 최적화된 S-parameter의 값은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다 [8]. 먼저 각각의 S-parameter를 S₁₁, S₂₁, S₃₁, S₄₁으로 나타내면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$S_{11} = R \tag{1a}$$

$$S_{21} = T = 1 - R \tag{1b}$$

$$S_{31} = S_{41} = P_t \tag{1c}$$

여기서 네트워크는 passive이므로 손실이 없다고 가정하면 $|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 + |S_{41}|^2 = 1$ 이 성립하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R^2 + T^2 + 2P_t^2 = 1 \tag{2}$$

이 때, T=1-R이므로 결국 다음과 같은 R의 식으로 나타낼 수 있게 된다.

$$R^2 - R + P_t^2 = 0 \tag{3}$$

이 때, P_t가 최대일 때 R=0.5 가 되므로 각각의 S-parameter는 다음과 같은 값을 얻을 수 있다.

$$S_{11} = R = 0.5 = -6dB \tag{4a}$$

$$S_{21} = T = 1 - R = 0.5 = -6dB \tag{4b}$$

$$S_{31} = S_{41} = P_t = 0.5 = -6dB \tag{4c}$$

위의 결과는 4-port 네트워크에서의 이상적인 coupling 효과에 대한 값이다. 위의 이상적인 값을 얻기 위해서 CST사의 Microwave Studio를 이용하여 rectangular형태의 aperture로써는 크기를 바꾸어 가며 여러 방법으로 simulation하였으나 위의 결과를 얻지 못하여 aperture 구조를 ridge로 변형시킴으로써 특성을 개선시키고자 하였다. 그림. 1은 변형시킨 ridge 형태의 aperture 모양이다.

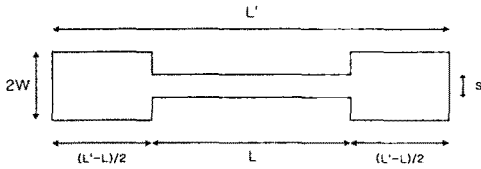


그림. 1 ridge구조의 aperture

먼저 microstrip의 특성은 $\epsilon_r=3.38$, $d=0.508\text{mm}$, $T=0.035\text{mm}$ 이고 컨덕터의 너비는 $50\ \Omega$ 일 때 1.2mm 로 하여 여러 차례의 simulation으로 표. 1과 같은 수치를 얻었다. 여기서 중심 주파수는 $2W$ 와 s 의 너비에 의한 등가회로의 L , C 값에 의해 조절되므로 $2W$ 를 변화시킴으로써 조절할 수 있게 된다. 여기서 너비가 증가하면 등가회로의 C 값이 커지게 되므로 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 식에 의해 ω_0 가 작아지기 때문으로 설명할 수 있다.

표. 1 Microstrip to microstrip transition의 parameter

	L'	L	s	$2W$	$f_0=3\text{GHz}$		
					S_{11}	S_{21}	S_{31}
Rectangular	22mm			2.4mm	-9dB	-2dB	-9dB
Ridge	22mm	10mm	0.2mm	2.4mm	-6.2dB	-5.9dB	-6.2dB

Microstrip의 transition에서 4-port 구조는 실제적으로 이용하기에는 S-parameter 특성면에서 비효율적이다. 표. 1에서 얻은 ridge의 수치를 이용하여 microstrip의 coupling효과를 2-port의 경우에 대해 simulation하였다. Microstrip transition 구조를 2-port로 할 경우, open된 microstrip의 끝단에서의 radiation이 없다고 가정하게 되면, open된 길이에 따라 S-parameter의 특성이 변화하게 되며 전체적인 특성은 특정주파수만 통과시키는 band-pass filter의 형태로 나타나게 된다. 그림. 2는 2-port 네트워크의 구조를 도식화한 것이다.

여기서 끝단의 open된 microstrip의 길이(k)를 변화

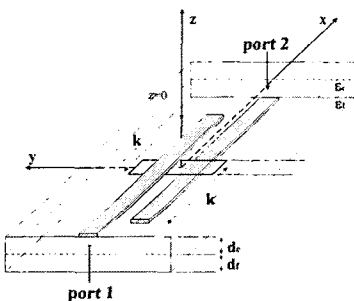


그림. 2 2-port microstrip to microstrip transition

시켜 가면서 simulation 해보았다. 그 결과 open된 길이에 따라 S_{21} 의 특성은 큰 변화가 없었으나 S_{11} 은 큰 변화가 있었다. 그러므로 전체적인 S-parameter 특성을 고려하여 k 값(12mm)을 선택하였다.

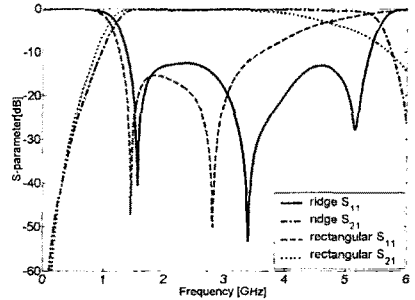


그림. 3 Aperture 구조에 따른 S-parameter 비교

그림. 3은 표. 1의 수치를 가지고 aperture의 구조가 rectangular일 때와 ridge구조일 때를 비교한 것이다. 그림. 3을 보면 aperture를 rectangular형태로 했을 때 보다 ridge형태로 했을 때 삽입손실이 개선됨을 알 수 있고 bandwidth면에서도 개선이 있음을 확인할 수 있다.

위의 결과를 토대로 제작과 측정은 ridge구조를 선택하였다. 제작에 사용된 microstrip은 $\epsilon_r=3.38$, $d=0.508\text{mm}$, $T=0.035\text{mm}$ 이고 컨덕터의 너비는 특성 임피던스가 $50\ \Omega$ 일 때 1.2mm 로 하여 제작 및 측정을 하였다. 그림. 4는 측정치와 simulation한 값을 비교하여 나타낸 것이다.

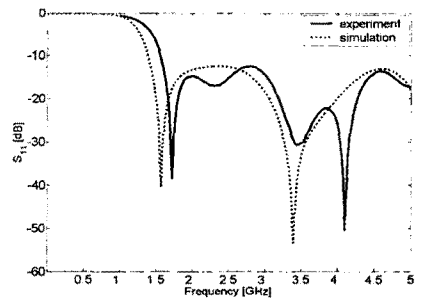


그림. 4a microstrip to microstrip transition의 S_{11}

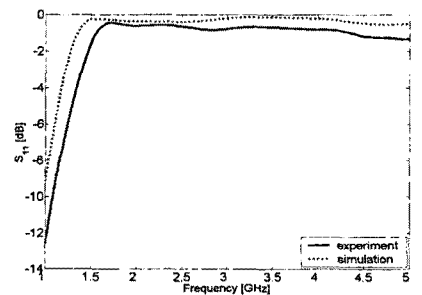


그림. 4b microstrip to microstrip transition의 S_{21}

그림.4에서 S_{21} 만 비교해보면, 측정된 결과가 simulation 결과보다 약간 손실이 있으나 이것은 측정 시의 정밀하지 못한 점이나 connector에서 발생하는 손실로 보이며 세심한 측정을 통해 개선될 수 있을 것이다.

3. NRD to microstrip transition

본 논문에서 연구한 NRD와 microstrip의 transtion의 기본 원리는 aperture coupling을 이용한 것이다 (7). 즉, NRD와 microstrip 사이의 aperture를 통해 microstrip의 magnetic field가 NRD의 magnetic field로 coupling되는 원리이다. NRD와 microstrip을 서로 수직한 형태로 놓게 되면 두 guide의 electric field는 수직한 방향에 있게 되지만 magnetic field는 같은 방향으로 놓여지게 됨을 알 수 있다. 적당한 구조와 크기의 aperture를 적절히 사이에 위치시키면 aperture를 통하여 magnetic field가 coupling되고 coupling된 magnetic field가 electric field를 발생시켜서 구조에 맞는 guide의 모드 (즉, NRD의 LSM₁₁ 모드)로서 전파하게 되는 것이다. 이 때, aperture는 두 transmission line (NRD, microstrip)의 magnetic field가 잘 coupling될 수 있는 구조이어야 하며 aperture의 위치도 세심히 고려되어야 한다. 여기서 microstrip의 ground plane과 NRD의 metal plate는 서로 공유하게 된다. NRD의 dielectric 부분의 구조를 변경시킬 필요가 없고, microstrip의 ground plane에 aperture를 뚫기만 하면 되므로 제작이 쉽다는 장점이 있다. 그림. 5에 이러한 2-port 네트워크 transition 구조를 나타내었다.

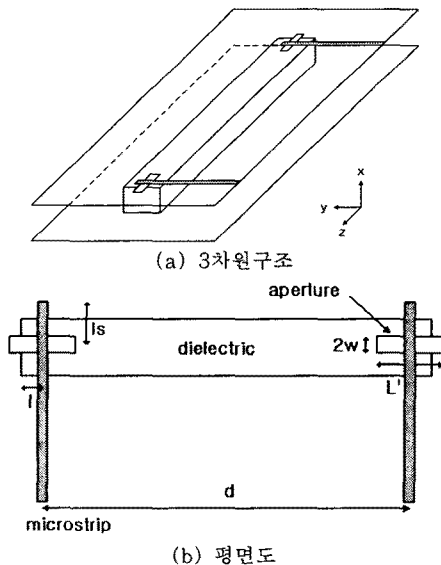


그림. 5 NRD to microstrip transition 구조

그림. 5와 같은 transition구조를 CST사의 Microwave Studio를 이용하여 simulation하였다. 이 경우 여러 가지 parameter - aperture의 구조와 크기, microstrip 끝단의 open된 길이, NRD guide의 끝과 aperture와의 길이, microstrip의 컨덕터 사이의 길이 - 들이 고려되어야 하므로 simulation시에 이러한 parameter들에 대해서 각각 simulation하여 가장 최적화된 수치를 얻는 과정을 반복하여 표. 2의 수치를 얻었다.

전체적인 크기는 110mm×60mm로 하였다. 이 때, NRD는 $\epsilon_r=2.08$ 인 Teflon을 사용하였고, 크기는 주파수가 20GHz일 때를 기준으로 각 모드의 cut-off 주파수를 고려하여 $a=6.5\text{mm}$, $b=8\text{mm}$ 로 하였다. 또한 microstrip은 substrate의 두께가 20mil이고 ϵ_r 이 3.38인 것을 사용하였고, 컨덕터의 너비는 $50\ \Omega$ 일 때 1.2mm로 하였다.

표. 2 NRD to microstrip transition의 parameter

	L'	L	s	2W	ls	l	d
Rectangular	7mm	.	.	0.5mm	2mm	2mm	78mm
Ridge	16mm	6.3mm	0.4mm	1.1mm			

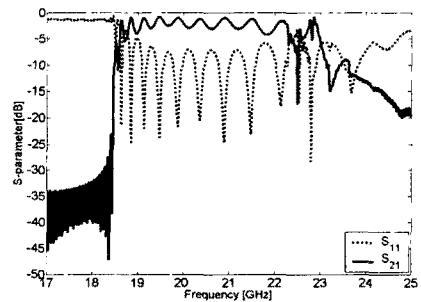


그림. 6a Rectangular aperture인 NRD to microstrip

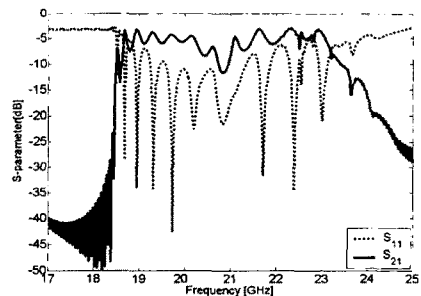


그림. 6b Ridge aperture인 NRD to microstrip

표. 2의 수치들을 이용하여 simulation한 결과를 그림. 6에 나타내었다. 그림. 6a를 보면 주파수가 약 19GHz에서 22GHz인 대역에서 field가 transition되는 band-pass filter의 특성이 나타나는 것을 볼 수 있다. S-parameter의 특성을 보면 S_{21} 은 NRD의 기본 모드 LSM₁₁모드의 cut-off frequency인 18.5GHz부터 제대로 특성이 나타나며, 22.55GHz 부근에서 S_{21} 이 떨어지는 현상이 보이는데 이 주파수는 NRD의 기본 모드 LSM₁₁모드 다음에 나타나는 고차모드인 LSM₁₂모드의 cut-off frequency와 거의 일치한다. 즉, 고차모드가 나타나면서 magnetic-field의 모양이 바뀌게 되므로 더 이상 magnetic field가 coupling 되지 못하는 것이다. 그러므로 NRD transition에서의 bandwidth는 LSM₁₁모드와 LSM₁₂모드의 cut-off frequency에 의해 제한되는 것으로 생각할 수 있다.

그림. 6b를 보면 S_{21} 이 약 22.5GHz에서부터 감소하므로 rectangular 일 때 보다 bandwidth면에서 개선

되지 않았다. 이것은 rectangular의 경우와 마찬가지로 NRD의 고차모드인 LSM₁₂모드의 영향으로 보인다. 그러므로 NRD transition은 LSM₁₁모드와 LSM₁₂모드의 cut-off frequency에 의해 제한된다고 볼 수 있다.

위의 결과로 인해 rectangular aperture로 제작, 측정하였다. 여기에 사용된 NRD는 $\epsilon_r=2.08$ 인 teflon이며 크기는 6.5mm×8mm×82mm이고 이 때의 LSM₁₁모드의 cut-off frequency는 18.5GHz이다. 이 때의 수치들은 표. 2를 토대로 제작, 측정을 하였다. 여기서의 측정치와 simulation한 값을 비교하여 그림. 7에 나타내었고 simulation 결과와 유사함을 볼 수 있다.

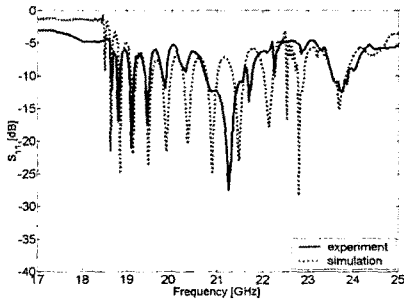


그림. 7a Rectangular 구조의 NRD to microstrip의 S₁₁

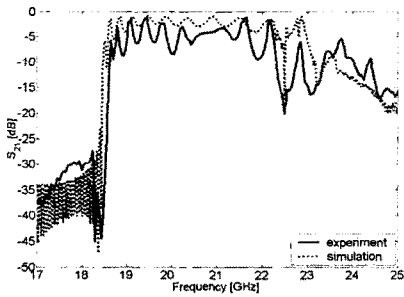


그림. 7b Rectangular 구조의 NRD to microstrip의 S₁₂

4. 결 론

본 논문에서는 aperture로 결합되는 microstrip to microstrip transition과 NRD와 microstrip의 transition에 대해 연구하였다. 이 때의 aperture의 구조는 각각 rectangular와 ridge형태로 하여 그 특성을 비교하였다. Microstrip to microstrip transition의 경우 aperture의 구조가 ridge일 때 rectangular의 경우 보다 삽입손실이 좋고 더 넓은 bandwidth를 가져 전체적으로 특성이 향상되었음을 알 수 있었고 simulation 결과를 토대로 제작, 측정하여 simulation 결과와 일치함을 확인하였다. NRD to microstrip transition의 경우에도 aperture의 구조를 rectangular와 ridge 형태로 한 후 설계하였지만 ridge의 구조에서 향상된 bandwidth를 얻지 못하였다. 이는 NRD transition의 bandwidth가 NRD의 고차모드인 LSM₁₂ 모드의 cut-off frequency에 의해 제한을 받기 때문으로 생각되어진다. NRD transition도 simulation 결과를 토대로 제작, 측정하여 simulation 결과와 유사함을 확인하였다.

감사의글

본 논문은 과학재단에서 지원하는 특정기초 사업 (R01-2000-00261)의 지원을 받아 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Yoneyama, N. Tozawz, S. Nishida, "Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits." IEEE Trans. MTT, Vol.29, No.11, pp.1188-1192, 1981.
- [2] T. Yoneyama, "Nonradiative dielectric waveguide." Infrared and Millimeter Waves, Vol.11, K.J. Button(Ed.), Chap. 2, Academic Press, Orlando, FL, 1984.
- [3] Shibani, K. Koul, "Millimeter wave and optical dielectric integrated guides and circuits." John Wiley & Sons, 1997.
- [4] Naftali Herscovici, David M. Pozar, "Full-wave analysis of aperture-coupled microstrip lines," IEEE Trans. MTT, Vol.39, No.7, pp.1108-1114, 1991.
- [5] D. M. Pozar, "A reciprocity method of analysis for printed slot and slot-coupled microstrip antenna," IEEE Trans. AP, Vol.AP-34, pp.1439-1446, 1986.
- [6] J. S. Rao, K. K. Joshi, B. N. Das, "Analysis of small aperture coupling between rectangular waveguide and microstrip line," IEEE Trans. MTT, Vol.29, No.2, pp.150-154, 1981.
- [7] Liang Han, Ke Wu, "An integrated transition of microstrip to nonradiative dielectric waveguide for microwave and millimeter-wave circuits." IEEE Trans. MTT, Vol.44, No.7, pp.1091-1096, 1996.
- [8] Guillermo Gonzalez, "Microwave transistor amplifiers." Prentice Hall, 1997.