

밀리 미터파 유전체 도파관의 설계에 관한 고찰

강 창 언

북 일리노이 주립대학교 교수

I. 서 론

박막기술의 급속한 개발과 광 주파수 영역에 까지 걸친 밀리 미터파의 전송을 위한 유전체 도파관의 개발에 박차를 가해 왔다. 구형(矩形) 유전체 도파관에 대한 수학적인 모델이 고찰되었고 확산곡선이 논의 되었다.

도파관내 매질에서 전파속도의 지연으로 에너지를 전송하는, 단일 모우드 굴절 도파관은 수동형 신호처리 디바이스의 새로운 형태를 이룩하기 위한 중요한 매개물로서 출현하고 있다. 이러한 회로 디바이스들은 마이크로파 기술자들에게는 매우 친숙한, 분포 정수형 콤파넌트 무리(群)에 매우 근접하고 또한 보통의 구형(矩形) 원통형(圓筒型), 동축형(同軸型)의 금속 도파관에도 적용 된다. 이렇게 새로운 분포 회로 소자의 대다수는 도파관 대응체 즉, 결합기, 하이브리드, 공진기, 전력 디바이더, 여파기 등과 같은 회로 기능을 형성하게 된다.

어쨌든, 많은 예에서 새로운 회로 콤파넌트는 굴절형 도파관의 도파 특성때문에 도파관의 크기에 따라 여러 파장에 걸쳐 사용될 수 있을 것이다.

전기 자기적 영역에서 여러 사람들에 의해 표면 음향학이나 광학에 응용하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 단일 주파 광파를 도파할 수 있는 가능성이 밀러(Miller) (1)에 의해 집적 광학(integrated optics)이라고 호칭되었던 새로

운 기술 영역의 몇 가지 디바이스를 내는데 기여했다. 광 주파수용 유전체 구형 도파관은 Marcatili (2, 3)와 Goell (4)에 의해 이론적으로 설명되었고 Goell (5)과 Knox (14)에 의해 실증되었다. 횡축의 디멘존이 미크론 이하인 도파관을 제작 한다는 난점으로 해서 단일 모우드 내에 있는 도파관에 대해 강조 되어야 하는 것은 파장의 10 배나 되는 횡축 디멘존을 갖는 도파관을 제공 한다는 것이다. 제작 기술이 개선 되면 결국 도파관은 광파의 도파능(guidability)을 개선 하기 위하여 관내 매질에 대하여 높은 굴절율을 사용하게 될 것이다.

광 굴절 도파관은 음향 표면 도파관내에 굴절 유도의 대응물을 갖고 음향 표면 도파관 내에서 탄성 Ragleigh wave가 기저판(基底盤) 면 상에 만들어진 가는 구멍(strip)에 의해 도파 된다. 이 경우에 있어서 도파 특성은 도파관과 기저판의 재료의 기계적인 특성에 의해 결정 된다.

이러한 도파관 구조는 White (6)에 의해 제안 되었고, Tiersten (7, 8)에 의해 해석 되었다. 한편, 표면 음향파에 있어서 현재의 관심사의 상당수는 지연 선 응용(delay line application)에서 그 근원을 발견 한다. Knox와 그 워 (9, 10), Adkin 과 그 워 (11, 12)의 사람들이 고리형 공진기(ring resonator)와 결합기에 대해 상세히 기술 했다. 최근 여러가지 노력에 의해서 10.6~10.8〔Hz〕의 주파수 영역까지 확대 되었다.

박막 회로(thin film circuits)로 된 유전체 굴절형 도파관은 초 고주파에서, 대치 기저판과 비교하여 우세한 전위로 하여 밀리미터 주파수 영역에서 특수한 강세(emphasis)를 갖는 밀리미터 주파수 영역을 통하여 논의 되었다. 최근 Kang(13)은 전자 비임에 의해 새로운 밀리미터 파 디바이스를 소개했다.

II. 최근의 연구 동향과 문제점

현재의 노력은, 도파능(guidability)이, 비 유전율이 6~100 까지인 매질의 높은 유전율을 이용 함으로써 광폭할만 하게 개선 된다는 고찰에 근거를 두고 있다. 첨가하여 구형 유전체 도파관에 대한 수학적 모델을 이용 함으로써 박막 회로에 대한 표면 도파관을 만들려는 의도를 가능하게 했다. 그 과정은 회로 콤포넌트 열(列) 형태로 된 영상 도파관 구조로 볼 수 있다. 도파관 재료는 저 손실, 고 유전율 세라믹 또는 세라믹으로 채워진 플라스틱이 될 것이다.

통상적인 금속 도파관은 그 자체가 波를 집적하는 기능을 갖지 않는다. 최근에 일반적으로 밀리미터파 전송에 사용되는 도파관 구조는 직선적인 미세한 홈(micro strip)이다. 그러나 주파수가 증가 할수록 단면의 디멘션은 보다 더 적어지고 도체손실은 원하지 않는 레벨까지 증가 한다. 고 유전율 유전체 영상선로는 밀리미터파 집적회로에 대하여 낮은 전송 손실을 보인다.

구형 유전체 굴절 도파관에 대한 몇몇의 일반화된 이론이 밀리미터 주파수 영역에 있어서 여러가지로 응용하기 위해 정립 되었다. 이 이론으로부터 결합기, 하이브리드, 여파기, 공진기와 전력 디바이더 등의 많은 수동 분포 회로 콤포넌트들을 설계할 수 가 있다. 도파관 단면은 구형이기 때문에 콤포넌트열(列)이 일단(一團)의 집속회로로 제작될 수 있음이 예견된다. 이 이론은 마이크로파, 밀리미터파와 광 주파수

에서도 유용하다.

이 해석은 밀리미터 집적회로를 구성하는데 있어 요구하는 최적의 형태로 채택된 유전체 영상 도파관에도 같은 방식으로 적용할 수 있다. 이 해석은 단일 도파관과 결합된 도파관에 대한 확산관계에 도달한다.

III. 해석적 모델

유전체 영상 도파관과 방향성 결합기를 그림 1과 2에 보인다. 특수한 경우에 영상 도파관의 성질은 두 도파관 사이의 간격이 대단히 크기 때문에 결합 관계를 무시할 수가 있다. 영상

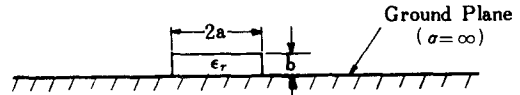


그림 1. 유전체 영상 도파관의 단면

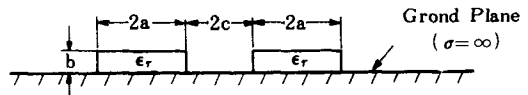


그림 2. 방향성 결합기의 단면

도파관의 도파특성은 Goell(4)과 Marcatili(2)에 의해 컴퓨터로 구해진 해와 비교 되었다. 같은 방법으로 각기 근접해 있는 두 개의 영상 도파관의 결합 특성은 Marcatili에 의해 구해진 해와 비교 되었다. Maxwell 방정식을 이용한 경계치 문제에 대한 자세한 해는 구하기가 매우 어렵고 따라서 디지털 컴퓨터를 써야할 필요가 있다.

이런 문제를 보다 간단히 하기 위하여 근사적인 결과를 내는 유전체 슬라브(Slab)도파관을 해석 함으로써 가능하다. Marcatili의 방식을 따른 이런 단순화는 잘 유도된 모우드에 대해, 전장은 ϵ_0 인 자유 공간에서 지수적으로 감소하고, 전력의 대부분은 ϵ_r 인 영역을 통과한다는

고찰로부터 발생한다. 전력의 일부는 그림 3의 빗금친 세 부분을 통과한다. 이 그림은 실질적인 경계치 문제에 대한 근사 해석 모델을 나타

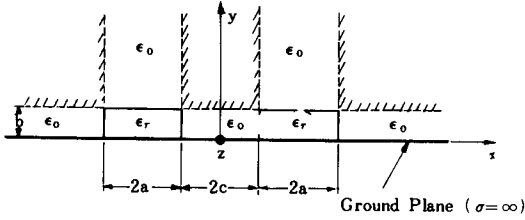
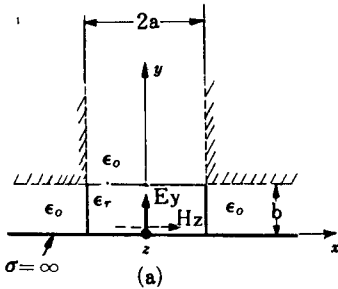


그림 3. 방향성 결합기의 해석적 모델

낸 것이다. 그림 4는 비 유전율이 ϵ_r 인 구형 코어를 이루고 있는 유전체 영상 도파관을 나타낸 것이다. 그리고 이 구형 코어는 유전율이 ϵ_0 인 준 무한(準無限) 매질로 둘러 쌓여 있고 완전히 전도하는 대지 평면상에 놓여 있다. 전파 방향은 +Z 방향이다. 그림 3에서 $2C \rightarrow \infty$ 로 취함으로써 구형 영상 도파관이 된다. 이러한 구조는 E_{mn}^y 모드와 같은 도파 모드의 불연속 스펙트럼과 비 도파 모드의 연속 스펙트럼을 낸다.

E_{mn}^y 모드의 주 횡축 전자장 성분은 슬라브



영상 도파관의 경우와 같이 E_y, H_x 이다. 즉 $2a = \infty$ 인 경우 TMon 모우드인 것과 같다.

Marcatili의 보고서(2)에서 처럼 이것은 유도 rod 내에서 각각의 전자장 성분은 X, Y 축에 대하여 정현적으로 변화할 것으로 가정된다.

전자장은 변화는 그림 4(b), (c)에 나타낸 것처럼 한쪽면을 지수 함수적으로 감축하는 것이다. 점차 m, n 은 각 성분이 도파관 내에서 갖는 반주기 변화의 차수(次數)를 나타낸다.

IV. 설계 고찰

X 방향과 Y 방향에 있어서의 전파상수 k_x, k_y 는 초월 함수식의 해이고,

$$a_{kx} = \frac{m\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{k_x}{k_{x0}}\right), m = 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$b_{ky} = \frac{m\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{k_y}{\epsilon_r k_{y0}}\right), m = 1, 2, \dots \quad (2)$$

여기서

$$k_{x0} = [(\epsilon_r \epsilon_0 - 1) k_0^2 - k_z^2]^{1/2} \quad \dots \quad (3)$$

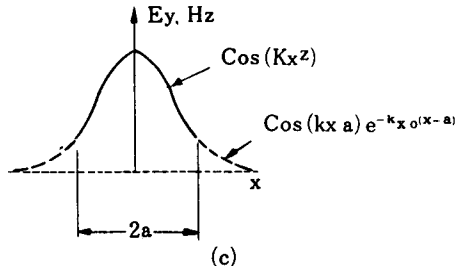
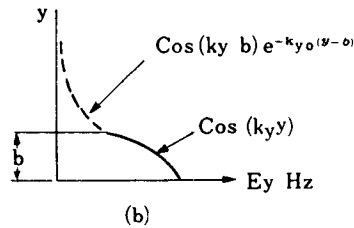


그림 4. 영상 도파관의 해석적 모델

(a) 모 형

(b), (c) 기본모우드 E_{mn}^y 의 전자장분포

$$k_{y0} = [(\epsilon_{re} - 1) k_0^2 - k_z^2]^{1/2} \dots \dots \dots (4)$$

$$\epsilon_{re} = \epsilon_r - (k_y/k_0)^2 \dots \dots \dots (5)$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0$$

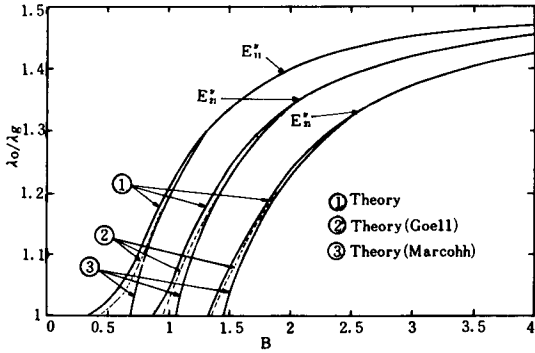
λ_0 ; 자유 공간의 파장

진행축 방향 전파상수 k_z 는

$$k_z = [k_0^2 \epsilon_{re} - k_x^2]^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

로 주어진다.

그림 5에서 Knox, Marcatili 와 Goel 등에 의한 수치적 결과가 비교된 것이다. (그림에서 이론치는 Knox 의 결과이다). 세 가지의 해 전부



$\epsilon_r = 2.25, a/b = 2$

그림 5. 도파관의 정규화 높이 B에 대한 도파관의 변화 모우드 파장

는 b의 적당히 큰 값에 대해서 썩 잘 부합 된다. 유전체 도파관이 설계 되었을 때 각종 도파관 정수(parameter)는 시발점으로서 이 세 값 중에서 채택될 수 있다. 이러한 세 값은 다음 조건을 만족할 때 최적 부합 상태가 된다. 즉,

$$P^2 = \frac{(\lambda_0 - \lambda_g)^2 - 1}{\epsilon_r - 1} \geq 0.5$$

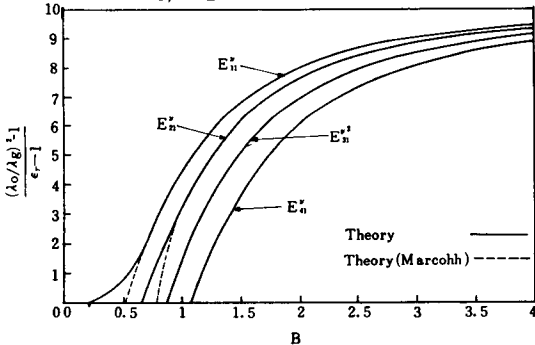


그림 6. 변화 모우드에 대한 확산곡선

$\epsilon_r = 2.25, a/b = 4$

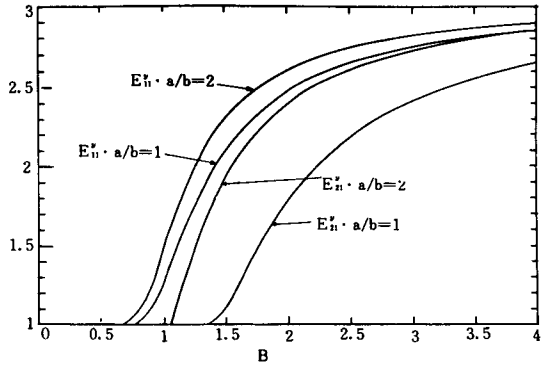


그림 7. 변화 모우드에 대한 도파관 파장 $\epsilon_r = 9, a/b = 1.2$

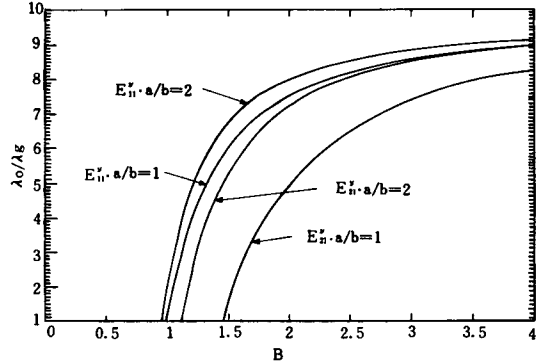


그림 8. 변화 모우드에 대한 도파관 파장 $\epsilon_r = 90, a/b = 1.2$

여기서 P^2 는 정규화 전파상수이다. 확산 관계를 그림 6에 나타냈다. 세 결과에서 보면 더 큰 모순이 생긴다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 b의 값이 작은 경우에 더 큰 모순이 생긴다. 또한 그림 7과 8에서와 같은 유사한 곡선도 얻을 수 있다.

V. 결 론

구형 굴절 도파관에 대한 수학적 모델이 이룩되었고 이것은 임의의 전자파 주파수에 응용할 수 있다. 즉 이것은 마이크로파, 밀리미터파 그리고 광파에서 장차 사용될 수 있는 것이다. 이런 도파관 구조의 실제값은 재질과 제작 기술에 전적으로 의존된다. 저 손실로 인하여, 높은 유전율을 갖는 재질들은 파장이 밀리미터인 주파수에서 사용 가능한데 이것은 다음과 같이 추측할 수 있다. 즉 구형 굴절 도파관은 밀리미터 영상선로 집적회로를 위해 사용된다는 것

이다.

단일 모우드에 대한 분산곡선을 얻었다. 이것은 형상비(aspect ratio)를 증가 시키고 모우드 간격을 감소 시키고, 그 결과 단일 모우드 주파수 영역을 감소 시킨다. 광범위 단일 모우드 주파수 영역은 1:1의 형상비에 의해 주파수 범위가 결정된다. 비 유전율의 증가는 대역폭에 형상비를 증가시키는 것과 같은 효과를 낸다. 비 유전율이 증가됨에 따라 보다 높은 b의 값에서 차단이 발생한다. 실험적 측정이 행해졌고, 이론적인 결과와 실험치가 비교 되었으며, 만족할 만한 결과와 부합된다는 점에서 타당성이 있다.

參 考 文 獻

1. Miller, S. E. "Integrated Optics", Bell System Tech. J., Vol. 48, No. 7, pp. 2059-2069, Sept. 1969.
2. Marcatili, E. A. "Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics," Bell System Tech. J., Vol. 48, No. 7, pp. 2079-2102, Sept. 1969.
3. Marcatili, E. A. "Bends in Optical Dielectric Guides," Bell System Tech. J., Vol. 48, No. 7, pp. 2103-2132, Sept. 1969.
4. Goell, J. E. "A Circular-harmonic Computer Analysis of Rectangular Dielectric Waveguides," Bell System Tech. J., Vol. 53, No. 7, pp. 2133-2160, Sept. 1974.
5. Goell, J. E. and R. D. Standley. "Sputted Glass Waveguide for Integrated Optical Circuits," Bell System Tech. J., Vol. 55, No. 10, pp. 3431-3434, Dec. 1976.
6. White, D. L. IEEE Symp. on Sonics & Ultrasonics, VanCouver, Canada, Oct. 1967.

7. Tiersten, H. F. IEEE Symp. on Sonics & Ultrasonics, VanCouver, Canada, Oct. 1967.
8. Tiersten, H. F. "Elastic Surface Wave Guide by Thin Films", J. Appl. Phys., Vol. 40, No. 8, pp. 770-789.
9. Knox, R. M. and A. P. Vander Heuvel. "Elastic Surface Wave Circuits at Microwave Frequencies," European Microwave Conf., London, England, Sept. 1969.
10. Knox, R. M. and D. B. Owen. "Distributed Components for Microwave Elastic Surface Wave Circuits," IEEE Microwave Elastic Surface Wave Circuits, IEEE Microwave Int. Symp., Newport, California. May, 1970.
11. Adkins, L. R. and A. J. Hughes. "Elastic Surface Guided by Thin Films," IEEE Trans. on Microwave Theory & Tech. Vol. 17, No. 11, pp. 904-911.
12. Adkins, L. R. and A. J. Hughes. "Acoustic Surface Wave Directional Couplers", IEEE Microwave Int. Symp., Newport, California, May, 1970.
13. Kang, C. E. "Millimeter Wave Amplification by the Interaction between Cyclotron Wave and Electron Beam", ISAS, Trans App. Science & Tech. Vol. 73, No. 1, Jan. 1980.
14. Knox, R. M. and P. P. Toullos, "Integrated Circuits for the Millimeter Through Optical Frequency Range" IEEE Submillimeter Symp. New York, April, 1970.

