

논문 2011-1-8

초소형 전송폭을 갖는 광 다중모드 간섭결합기의 설계

Design of Optical Multimode Interference Couplers with Ultracompact Propagating Width

호광춘*

Kwang-Chun Ho

요약 본 논문에서는 모드전송선로 이론과 유효유전체 해석법을 결합한 새로운 해석법이 초소형 전송폭을 갖는 3차원 구조의 광 다중모드 간섭결합기의 설계특성을 분석하기 위하여 사용되었다. 결합된 해석법에 기초한 다중모드 간섭결합기의 결합효율을 정의하였으며, 3 dB 결합기, cross 결합기 그리고 bar 결합기의 결합 특성을 나타내는 결합 길이를 수치해석적으로 결정하였다. 수치해석 결과 본 논문에서 설계한 다중모드 간섭결합기는 낮은 insertion loss와 높은 splitting ratio를 갖는 특성을 보였다.

Abstract In this paper, to evaluate the design properties of 3D optical multimode interference (MMI) couplers with ultracompact width, modal transmission line theory and effective dielectric method are combined with together. A coupling efficiency based on the composed approach is defined, and the coupling length is numerically determined for the design of 3 dB coupler, cross coupler and bar coupler. The simulation result shows that the designed MMI coupler has a low insertion loss and a high splitting ratio.

Key Words : MMI coupler, Power splitting, Equivalent network

1. 서론

광 결합기는 광 집적소자를 구성하는 가장 기본적인 요소이다. 이 소자들은 광 신호 라우팅이나 광 신호처리를 위하여 필수적으로 사용하는 소자들이다^[1-3]. 오늘날 그 중에서도 다중모드 간섭 (Multimode Interference: MMI) 결합기들은 낮은 초과 손실 (Excess Loss), 높은 소멸 비 (Extinction Ratio), 작은 크기 그리고 제작 시에 발생하는 제작 허용오류 (Tolerance)에 대한 낮은 의존율에 기인하여 지속적으로 그 관심이 증가하고 있는 광 소자이다.

MMI 결합기를 설계하기 위하여 제안된 1차원적 모델링 기법들은 이미 여러 차례 보고되어 왔다^[4]. 또한, 최근

에 유한 요소법 (Finite Element Method)를 이용한 3차원적 모델링에 대한 설계법도 보고된바 있다^[5].

비록, 이들 해석법들이 준(quasi)-TE 또는 준(quasi)-TM 모드들의 다중 간섭을 이용한 결합기를 설계할 때 정확한 결과들을 제공하지만, 정확한 결과들을 얻기 위한 시뮬레이션 시간이 오래 걸린다. 특히, 광 격자 필터와 같은 다른 광통신용 소자들과 함께 집적 소자를 설계할 때 설계 시에 필요한 물리적 특성을 얻기 위하여 현저하게 증가하는 계산 량이 필요하게 된다. 결국, 계산 량의 증가로 인하여 마이크로 단위의 물리적 특성 값들에 치명적인 오차가 발생할 수 있다.

이를 위하여 본 논문에서는 rib형 도파로로 구성된 3차원 광 MMI 결합기를 설계할 때 효율적으로 적용이 가능한 유효 유전체 방법 (Effective Dielectric Method: EDM)^[6]을 기반으로 하는 정확한 모드 전송선로 이론

*정회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자: 2010.12.3, 수정일자: 2011.1.25
재제확정일자: 2011.2.11

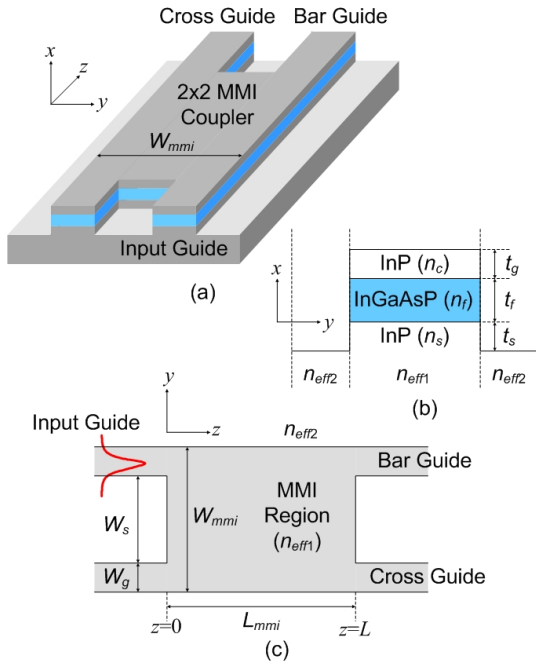


그림 1. (a) 광 다중모드 간섭 결합기의 3차원 기하학적 구조. (b) rib 도파로의 단면도. (c) 전체적인 평면도.
 Fig. 1. (a) 3D geometric configuration of optical MMI coupler. (b) Side view of the rib guide. (c) Top view of MMI coupler.

(Modal Transmission-Line Theory: MTLT)^[7]을 적용하여 초소형 전송폭으로 구성된 MMI 결합기의 결합 특성과 그 결합길이를 분석하였다.

II. 다중모드 간섭 결합기의 전송특성

광 MMI 결합기와 같이 rib형 광 전송구조로 형성된 방향성 결합기는 rib형 도파로의 높이와 그 전송 폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합효율이 증가하거나 감소한다. 이러한 변수들에 의존하는 3D 구조의 2×2 광 MMI 결합기가 그림 1(a)에 자세하게 도시되어 있다. 그때 그림 1(b)에서 보듯이, MMI 결합기는 두께 $t_s = 300 \text{ nm}$, 굴절률 $n_s = 3.17$ 인 InP, 두께 $t_f = 500 \text{ nm}$, 굴절률 $n_f = 3.38$ 인 InGaAsP, 두께 $t_g = 300 \text{ nm}$, 굴절률 $n_g = 3.17$ 인 InP 층들로 구성된 전송 채널을 갖도록 설계하였다. 또한, 입력 도파로와 cross/bar 도파로들의

폭은 $W_g = 1.2 \mu\text{m}$ 로 설계하였으며, MMI 결합기의 전송 폭은 초소형인 $W_{mmi} = 4 \mu\text{m}$ 로 선택하였다. 그때 광 MMI 결합기에 존재하는 모드는 본질적으로 전파 방향에 따라 준(quasi)-TE 모드와 준-TM 모드로 분류되며, 만일 고려되어지는 전파방향이 z -축이라면 우리는 이 모드들을 각각 TE_{nm}^z 형, TM_{nm}^z 형 혼성 모드(hybrid mode)라 정의한다.

그림 1(a)에서 파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 의 모드가 MMI 결합기의 y -축을 따라 입사한다고 가정하자. 이때, y -축 방향에서의 전파상수는 다음과 같다.

$$k_x^{(j)2} + k_y^2 + k_z^2 = k_x^{(j)2} + \beta^2 = k_0^2 \epsilon_j \quad (1)$$

여기서, ϵ_j 는 j -번째 전송 층의 그 유전율을 나타내며,는 yz -평면상의 그 전파 상수이다. 그때, 아래와 같은 모드 전송선로 이론의 횡 방향 공진 조건^[8]을 이용하면, 그 전파 상수 β 가 결정된다.

$$|Z_{up}(\beta) + Z_{dn}(\beta)| = 0 \quad (2)$$

여기서, $Z_{up}(\beta)$ 과 $Z_{dn}(\beta)$ 은 x -축 상의 임의의 위치에서 각각 위와 아래로 본 그 임피던스를 나타내며, 그 축을 따라 구성된 등가 전송선로의 그 전파상수와 특성 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_j = \begin{cases} \frac{\omega \mu_0}{k_x^{(j)}} & (TE_{nm}^z \text{ mode}) \\ \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_j}{k_x^{(j)}} & (TM_{nm}^z \text{ mode}) \end{cases} \quad (3)$$

결국, xy -평면 상에서 y -축 방향으로 계산된 식 (2)의 고유치 문제로부터 각 영역들의 그 유효 굴절률(n_{eff})을 결정할 수 있으며, 그림 1(c)와 같은 등가 2D 구조를 얻을 수 있다. 그러므로, 등가화된 이 2D 전송구조에 모드 전송선로 이론을 적용하여 MMI 결합기에 전파하는 혼성 모드들 간의 결합특성을 분석할 수 있다.

III. 다중모드 간섭 결합기의 결합효율

그림 1(c)에서 보듯이 광 MMI 결합기를 통하여 전파하는 필드는 x -축 상의 변화가 없고, 입력 모드는 상향 도파로를 통하여 입사 되어 cross나 bar 도파로를 통하여 전송된다고 가정하였다. 그때, 식 (2)에 주어진 등가 전송선로의 횡 방향 공진조건을 전파상수 β 에 대하여 적용하

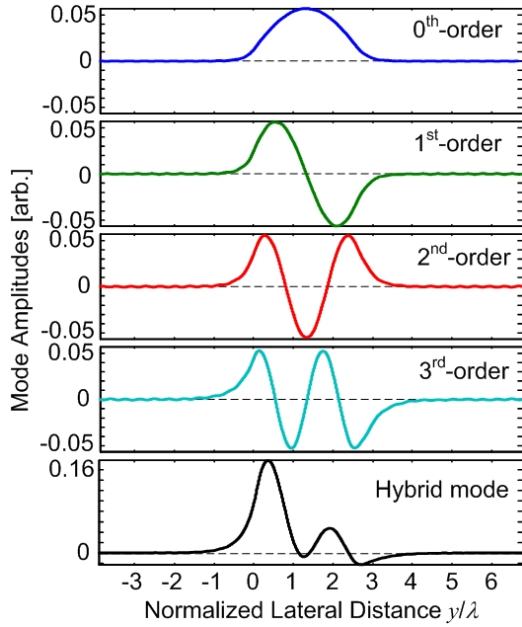


그림 2. MMI 결합기에서 전파하는 모드들의 lateral 필드분포와 4개의 전파모드들이 결합된 혼성모드.

Fig. 2. Lateral field distribution of modes propagating at MMI coupler, and hybrid mode composed by the 4 guiding modes.

면 입/출력 단에서의 TE_{nm}^z 모드에 대한 정확한 횡방향 전계 성분은

$$E_r(y, z) = V_r(z)e_r(y) \quad (4)$$

와 같으며, MMI 결합기 내에서 전파하는 전계는 그림 2에 주어진 $N=4$ 개의 전파모드들이 아래와 같이 선형적으로 결합하여 표현된다.

$$E_{mmi}(y, z) = \sum_{m=1}^N V_m(z)e_m(y) \quad (5)$$

여기서, r 은 입/출력 영역에서 각각 in 또는 out 을 나타내며, $V_m(z) = V_m(0)e^{ik_{z,m}z}$ 는 m -번째 모드의 모드 전압, 그리고 $e_m(y)$ 는 m -번째 모드의 횡방향 필드분포를 각각 나타낸다.

결국, 입력 경계면 $z=0$ 에서 식 (4)와 (5)의 전계 분포에 대하여 경계조건을 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_{in}(0)e_{in}(y) = \sum_{m=1}^N V_m(0)e_m(y) \quad (6)$$

여기서, V_{in} 은 입력 단에 걸리는 모드 전압이며,

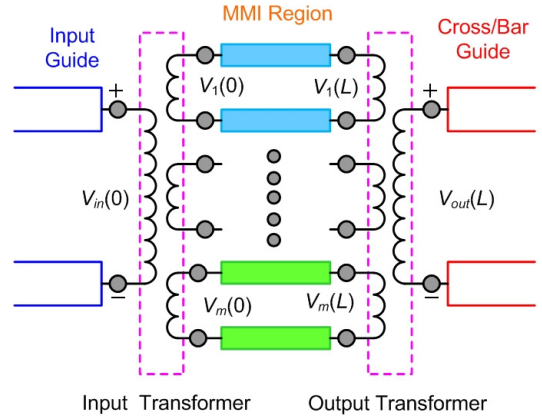


그림 3. 광 MMI 결합기의 결합효율을 유도하기 위하여 구성된 등가 전송선로.

Fig. 3. Equivalent network connected to define the coupling coefficient of optical MMI coupler.

$e_{in}(y)$ 은 입력 단에서 입사되는 횡방향 필드 분포이다.

또한, 결합기의 입력 단에서 여기된 전송 모드는 길이 $z=L$ 만큼 진행한 후 출력 단에서 아래의 경계조건을 만족하며 출력된다.

$$V_{out}(L)e_{out}(y) = \sum_{m=1}^N V_m(L)e_m(y) \quad (7)$$

이때 위의 식 (6)에 TE_{nm}^z 모드의 직교조건^[8]을 적용하고 풀면 다음과 같다.

$$V_m(0) = T_{in,m} V_{in}(0) \quad (8)$$

여기서, 입력 변환상수 (input transformation coefficient) $T_{in,m}$ 은 아래와 같이 주어진다.

$$T_{in,m} = \int_{cs} e_{in}(y)e_m^*(y)dS \quad (9)$$

결국, 출력 정규화 조건을 적용하여 식 (7)을 출력 전압에 대하여 풀면

$$V_{out}(L) = \sum_{m=1}^N \{T_{m,out} V_m(0)e^{ik_{z,m}L}\} \quad (10)$$

이 된다. 여기서, 출력 변환상수 $T_{m,out}$ 은

$$T_{m,out} = \int_{cs} \{e_m(y)e_{out}^*(y)dS\} \quad (11)$$

과 같이 정의된다. 그러므로, 식 (8)을 식 (10)에 대입하고 정리하면 입력전력에 대한 출력전력의 비율을 나타내는 TE_{nm}^z 모드의 결합효율 (coupling efficiency)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_{TE_{nm}^z} &= \frac{P_{out}}{P_{in}} = \operatorname{Re} \left(\frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \frac{V_{out}(L)}{V_{in}(0)} \right|^2 \\ &= \operatorname{Re} \left(\frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \sum_{m=1}^N \{ T_{in,m} T_{m,out} e^{ik_{z,m}L} \} \right|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $k_{z,in}$ 과 $k_{z,out}$ 은 각각 입력영역 $z < 0$ 과 출력영역 $z > L$ 에서 TE_{nm}^z 모드의 전파상수를 나타내며, 식 (12)를 유도하기 위하여 구성된 모드 전송선로 이론 (MTLT)에 기초한 등가 전송선로가 그림 3에 자세하게 묘사되어 있다.

IV. 다중모드 간섭 결합기의 결합길이

앞 장에서 유도하고 정의한 식 (12)의 결합효율을 이용하여 본 논문에서 설계구조를 제시한 2×2 MMI 결합기의 전송특성을 수치 해석하였다. 즉, 입력 도파로를 통하여 입력된 광 신호가 임의의 결합길이 $z = L_{mmi}$ 를 진행한 후에 cross와 bar 도파로를 통하여 출력되는 특성을 분석하였다.

첫 번째로, TE_{01}^z 모드에 대하여 광 MMI 결합기의 결합길이 L_{mmi} 에 따른 입/출력 신호들의 결합효율을 분석하였다. 그림 4(a)에서 보듯이, 하향 입력 도파로에서 입력된 광 신호는 bar 도파로 (실선으로 표시)와 cross 도파로 (점선으로 표시)를 통하여 전송되며, 그 입력 신호는 $L_{3dB} = 91.5 \mu\text{m}$ 에서 bar/cross 도파로를 통하여 $\eta_{TE_{01}^z} = 0.48$ 의 균등한 전력 신호를 방출하였다. 또한, 광 MMI 결합기의 길이가 $L_{cross} = 182.9 \mu\text{m}$ 와 $L_{bar} = 364 \mu\text{m}$ 인 길이에서 입력 광 신호는 각각 cross 도파로와 bar 도파로를 통하여 각각 $\eta_{TE_{01}^z} = 0.98$ 와 $\eta_{TE_{01}^z} = 0.92$ 의 전력 신호를 출력함을 보였다. 이를 구체적으로 확인하기 위하여, 그림 4(b)에 MMI 결합기 내에서 전파하는 필드의 분포도를 도시하였다. 그림에서 보듯이, 하향 입력 도파로를 통하여 입력된 광 신호가 L_{3dB} , L_{cross} , L_{bar} 에서 앞서 언급한 것과 같이 잘 출력되고 있음을 알 수 있다.

두 번째로, 본 논문에서 제시한 광 MMI 결합기의 설계특성을 분석하기 위하여 아래와 같이 정의된 excess

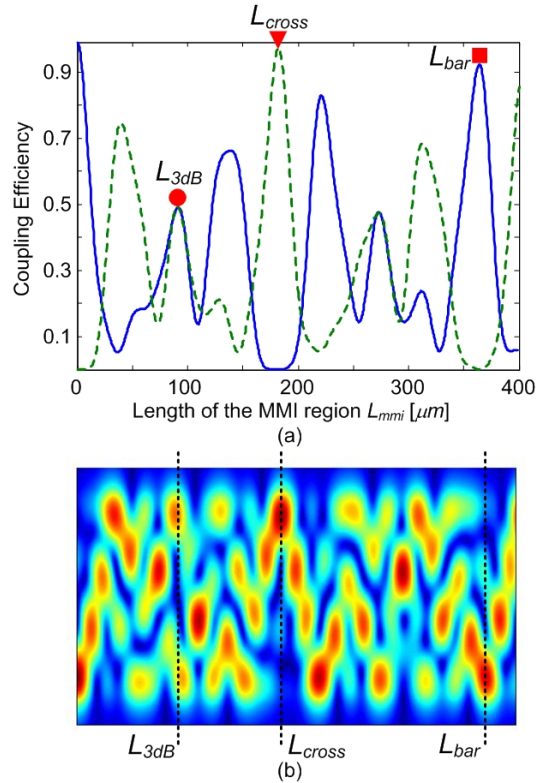


그림 4. (a) MMI 결합기의 길이에 따른 결합효율의 변화. (b) 결합기 내에서 전파하는 필드 분포도.
Fig. 4. (a) Variation of coupling efficiency along the length of MMI coupler. (b) Field distribution propagating inside coupler.

loss (E_{loss})와 splitting ratio (S_{ratio})가 결합기의 결합길이 L_{mmi} 에 따라 어떻게 변하는지 분석하였다.

$$\begin{aligned} E_{loss} &= 10 \log \left(\frac{P_{cross} + P_{bar}}{P_{in}} \right), \\ S_{ratio} &= 10 \log \left(\frac{P_{bar}}{P_{cross}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, P_{cross} 와 P_{bar} 는 각각 cross와 bar 도파로를 통하여 방출되는 광 신호들의 출력전력을 나타낸다. 결국, 그림 5에서 보듯이 L_{3dB} 에서 excess loss와 splitting ratio는 당연한 결과인 0 dB가 됨을 보였으며, 이는 입력된 광 신호가 이 결합길이에서 두 도파로를 통하여 균등하여 분배되도록 MMI 결합기가 잘 설계되었음을 보여 주는 것이다.

마지막으로, 2×2 MMI 결합기가 cross 결합기로 동작할 때의 설계특성을 분석하기 위하여 아래와 같은

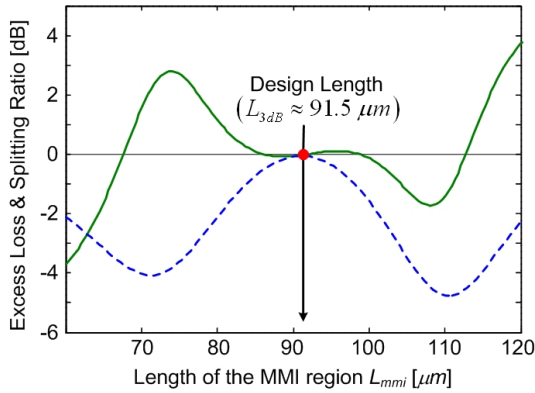


그림 5. MMI 결합기의 길이에 따른 excess loss (점선)과 splitting ratio (실선)의 변화.
Fig. 5. Variation of excess loss (dashed line) and splitting ratio (solid line) along the length of MMI coupler.

insertion loss (I_{loss})와 cross talk (C_{talk})를 분석하였다.

$$I_{loss} = 10 \log \left(\frac{P_{cross}}{P_{in}} \right), \quad (14)$$

$$C_{talk} = 10 \log \left(\frac{P_{bar}}{P_{cross}} \right)$$

그림 6에서 보듯이, 광 MMI 결합기의 길이가 L_{cross} 인 지점에서 insertion loss (I_{loss})는 0 dB로 나타났으며, cross talk (C_{talk})는 약 -60 dB로 무시할 정도로 작게 나타났다. 그러므로, 본 논문에서 제시한 초소형 2×2 MMI 결합기는 광 통신망에서 광신호 결합기로써 유용하게 사용할 수 있다.

V. 결론

3D 구조인 광 MMI 결합기의 설계 및 특성을 분석하기 위하여 모드 전송선로 이론과 유효 유전체 방법을 결합하여 그 결합기의 결합특성을 수치 해석하였다.

그 결과 본 논문에서 제안한 초소형 2×2 MMI 결합기는 하향 입력 도파로를 통하여 입사된 혼성모드들을 결합길이 L_{3dB} 에서 bar/cross 도파로를 통하여 균등하게 방출하였으며, 결합길이 L_{cross} 와 L_{bar} 에서 입력 광 신호를 각각 cross 도파로와 bar 도파로를 통하여 방출하

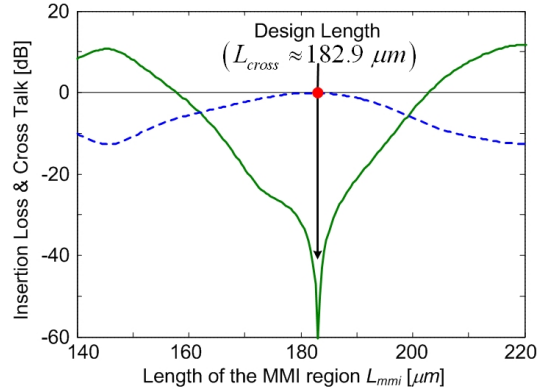


그림 6. MMI 결합기의 길이에 따른 insertion loss (점선)과 cross talk (실선)의 변화.
Fig. 6. Variation of insertion loss (dashed line) and cross talk (solid line) along the length of MMI coupler.

였다. 또한, 낮은 cross talk와 높은 splitting ratio을 나타내었다.

이와 같은 결과들은 광 MMI 결합기의 전송특성과 설계특성을 결정 할 때 기준에 제안되어 왔던 3D 모델링에 비하여 본 논문에서 제안한 방법이 훨씬 쉽고 좋은 수치 해석적 알고리즘을 제공할 수 있다는 것을 보여 주는 것이다.

참고 문헌

- [1] L. Soldano and E. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications," J. Lightwave Technol., Vol. 13, pp. 615-627, 1995.
- [2] C. Herben, C. Vreeburg, J. Leijtens, H. Block, F. Groen, I. Moerman, J. Pedersen, and M. Smit, "Chirping of an MMI-PHASAR demultiplexer for application in multiwavelength lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 9, pp. 1116-1118, 1997.
- [3] Jong-Moo Lee, Joon Tae Ahn, Doo Hee Cho, Jung Jin Ju, Myung-Hyun Lee, and Kyong Hon Kim, "Vertical Coupling of Polymeric Double-Layered Waveguides Using a Stepped MMI Coupler," ETRI Journal, Vol. 25, pp. 81-88,

2003.

- [4] K. S. Chiang, "Performance of the effective-index method for the analysis of dielectric waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 714-716, 1991.
- [5] C. Vazquez, F. J. Mustieles, and F. H. Gil, "Three-dimensional method for simulation of multimode interference couplers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 11, pp. 2296-2299, 1995.
- [6] S. T. Peng and A. Oliner, "Guidance and Leakage Properties of a Class of Open Dielectric Waveguides: Part I-Mathematical Formulations," *IEEE Trans. MTT*, vol. 29, no. 9, pp. 843-855, 1981.
- [7] 호광춘, 김준환, 김영권, "광통신용 광 결합기의 모드 전송선로 해석법," *대한전자공학회 논문*, 제 35-D호, 7권, pp. 25-31, 1998.
- [8] K. C. Ho, and K. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides," *IEICE Trans. Electronics*, Vol. E88-C, pp. 270-274, 2005.

저자 소개

호 광 춘(정회원)

- 제 10권 1호 참조
- 현 한성대학교 정보통신공학과 교수

<주관심분야: Optical Communications, Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Design and Analysis of RF (microwave) Devices>

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.