

## WDM 시스템에 적합한 광결정 대역 통과 필터 설계

박동수 · 김상인<sup>†</sup> · 박익모 · 임한조

아주대학교 전자공학부

Ⓞ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지

(2005년 6월 29일 받음, 2005년 6월 15일 수정본 받음)

본 논문에서는 2차원 광결정 공진기의 결합을 통해 WDM시스템에 적합한 특성을 가지는 공진 필터를 설계하였다. 공진기간의 결합에 있어서 고려해야 할 요소를 시영역에서의 모드 결합이론(coupling modes in time)을 적용하여 이론적으로 분석하였으며, 전자회로 등가화를 이용하여 쉽게 그 요소를 결정할 수 있음을 보였다. 공진기 결합에 있어서 공진기 간의 간격에 따른 위상천이에 대해서 외부감쇄에 의한 Q-factor를 조정함으로써 보상할 수 있음을 확인하였고, 2차원 광결정 점결합 공진기를 이용하여 50GHz의 대역폭을 가지며 통과대역에서 0.5 dB 리플을 가지는 3차 Chebyshev 대역 통과 필터를 설계하였다.

주제어 : Photonic crystals, Optical bandpass filters, Coupling of mode in time, Wavelength division multiplexing(WDM).

### I. 서 론

광결정에 선 결합을 도입함으로써 형성되는 도파로는 기존의 굴절을 차에 의한 도파로와는 달리 광 밴드 간격에 의해서 빛이 가두어지므로 매우 작은 규모의 굽은 도파로 형성에 용이하며, 이는 매우 높은 집적도를 가지는 광집적회로를 구현하는데 있어서 적합한 특성을 가진다. 또한, 광결정에 점 결합을 도입한 경우에는 미세 규모의 공진기를 얻을 수 있게 되는데, 이를 이용한 광결정 레이저에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 광결정 기반의 미세 공진기는 필터의 구현에도 응용이 가능한데, 2차원의 광결정에서 도파로와 미세 공진기 간의 공진 결합을 이용한 필터 구조가 이미 제안된 바 있다.<sup>[1-2]</sup> 또한, 광결정에 기반한 Fabry-Perot(F-P) 형태의 공진기를 이용하여 필터를 구현하고자 하는 연구도 진행된 바 있다.<sup>[3-5]</sup> 특히, 참고문헌<sup>[5]</sup>에 보고된 연구에서는, 2차원 광결정 기반의 도파로에 광결정 기반의 F-P 형태의 공진기를 삽입하는 구조를 기반으로, 다수의 F-P 형태의 공진기를 직접 결합하여 급격한 승락(roll-off)과 평탄한 주파수 투과 특성을 가지는 고차 대역 통과 필터(bandpass filter)를 설계했다. 직접 결합된 F-P 형태의 필터 설계는 참고논문<sup>[6,7]</sup>에 보고된 이론적인 연구에 토대를 두고 있다. 그런데, 광결정 기반의 F-P 형태의 공진기를 설계하는데 있어서, 광결정으로 구현된 반사경의 침투 깊이를 고려하여 공진기의 길이를 결정하여야 하는 어려움이 있으며, 또한 F-P형태의 공진기의 특성상 투과되는 주파수 영역이 주기적으로 존재하여 원하지 않는 특성이 부가적으로 나타날 수 있다.

본 논문에서는 F-P 형태의 공진기가 아닌 점 결합 공진기의 결합을 이용한 고차 대역 통과 필터 설계에 관한 연구 결

과를 보고한다. 점 결합 공진기 간의 결합에 관한 현상론적인 연구와<sup>[8]</sup> 이론적인 연구 결과<sup>[9]</sup>가 보고된 바 있으나, 본 논문에서는 등가 전자 회로를 이용하여 필터의 특성을 용이하게 조절할 수 있는 광결정 기반의 대역 통과 필터 설계에 관한 체계적인 방법론을 제시한다.

### II. 광결정 기반의 대역 통과 필터 구조

본 연구에서는 광결정 기반의 대역 통과 필터를 구현하기 위해 그림 1(a)와 같이 2차원 광결정 도파로에 점 결합 공진기를 삽입한 구조를 고려하였다. 2차원 광결정은 결정 주기  $a$ 의 정방형 격자 구조를 가지며, 격자는 공기중에 세워진 굴절율이 3.4이고 반지름이  $0.2a$ 인 원기둥으로 구성된다. 도파로는 2차원 광결정 구조에서 한 줄의 원기둥을 제거함으로써 구현되었고, 공진기는 도파로에 삽입된 반지름  $r_a$ 인 원기둥으로 구성된 1차원 광결정에 반지름이  $r_b$ 인 점 결합을 도입함으로써 구현되었다. 도파로 내에 1차원 광결정을 삽입할 때 그림 1(a)에 도시된 바와 같이 2차원 광결정과 동일한 격자 상수를 유지했는데, 이는 본 연구 결과의 파장에 대한 범위를 확보하기 위함이다. 공진기의 특성은  $r_a$ 와  $r_b$  그리고 도파로에 삽입된 점 결합 주변의 원기둥의 수에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 공진기의 특성을 조정하기 위한 또 하나의 수단으로, 그림 1(a)에 도시된 바와 같이 도파로에 삽입된 점 결합 위/아래에 위치한 원기둥의 반지름  $r_c$  또한 변화시켰다. 이들 공진기의 구조 변수의 변화에 따른 공진기 특성 변화는 본 논문의 V절에서 자세히 다루어진다.

그림 1(b)는 이상에서 설명한 공진기의 한 예 ( $r_a = 0.15a$ ,  $r_b = 0.06a$ ,  $r_c = 0.2a$ , 점 결합 주변의 원기둥의 수 = 3)에 대한 주파수 투과 특성을 나타내는데, 이는 2차원 시간영역 유한차분법(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)을 이용하

<sup>†</sup> E-mail: sangin@ajou.ac.kr

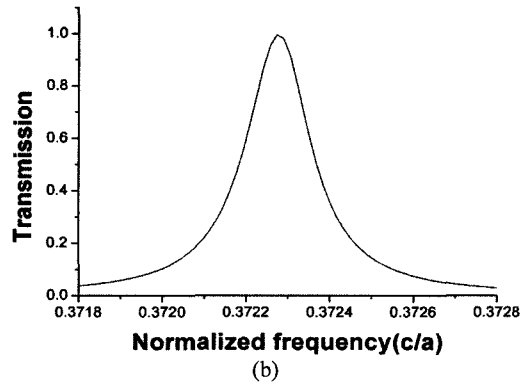
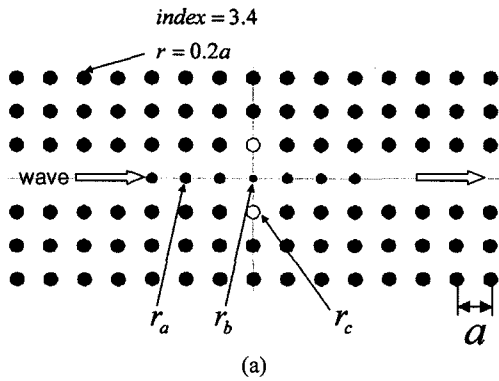


그림 1. (a) 광결정 도파로 내에 점결합을 이용한 단일 광결정 공진기, (b) 단일 광결정 공진기의 주파수 투과 특성 ( $r_a = 0.15a$ ,  $r_b = 0.06a$ ,  $r_c = 0.2a$ , 점 결합 주변의 원기둥의 수 = 3).

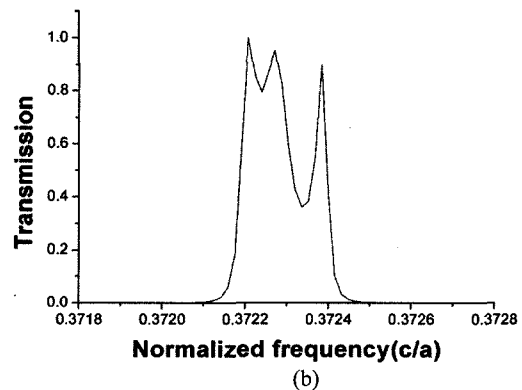
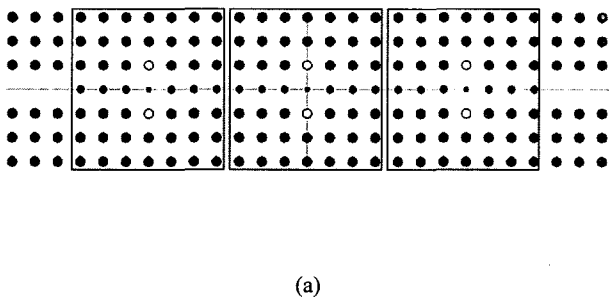


그림 2. (a) 동일한 단일 광결정 공진기 3개를 직접 결합한 3차 공진 필터 ( $r_a = 0.15a$ ,  $r_b = 0.06a$ ,  $r_c = 0.2a$ , 점 결합 주변의 원기둥의 수 = 3), (b) 3차 공진 필터의 주파수 투과 특성.

여 계산한 결과이다. 그림 1(b)에서 보면, 전형적인 단일 공진기의 특성인 Lorentzian 형태의 주파수 투과 특성을 갖는 것을 볼 수 있다. 우리가 원하는 급격한 승락(roll-off)과 평탄한 주파수 투과 특성을 얻기 위해서는 다수의 공진기를 결합하는 것이 필요한데, 그림 2(a)에 도시된 바와 같이 앞에서 고려한 공진기 3개를 직접 결합하는 경우에는 그림 2(b)와 같은 주파수 투과 특성을 얻게 된다. 그림 2(a)에서 보듯이 공진기를 결합할 때 2차원 광결정의 주기를 유지했다. 그림 2(b)를 보면 원하는 특성과 달리 약 40%까지 투과율이 감소하는 깊은 리플이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 원하는 특성을 가지는 광결정 기반의 고차 필터는 단순히 동일한 공진기를 직접 결합함으로써 얻을 수는 없음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 고차 공진 필터를 설계하기 위해서 공진기 간의 결합이 주파수 투과 특성에 미치는 영향에 관한 이론적 모델링을 수행하였다.

### III. 결합된 공진기의 이론적 분석

우리는 직렬로 연결된 공진기의 필터 특성을 분석하기 위해 공진기 내부의 에너지와 외부에서 입력되는 파동과의 관계를 시영역에서의 모드 결합 이론(coupling modes in time)을 적용하여 분석하였다.<sup>[10]</sup> 단일 공진기 내의 모드의 크기

변화는 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$\frac{du}{dt} = j\omega_0 u - \frac{u}{\tau_0} - 2\frac{u}{\tau_e} + \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} S_{+1} + \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} S_{+2} \quad (1)$$

여기서  $u$ 는 공진모드의 크기(amplitude)로서,  $|u|^2$ 이 공진 모드에 저장된 에너지가 되도록 표준화(normalization) 되어 있다. 그림 3에서와 같이  $S_{+1}$ ,  $S_{+2}$ 는 공진기 좌우에서 공진기 쪽으로 입사하는 입사파의 크기이고,  $S_{-1}$ ,  $S_{-2}$ 는 공

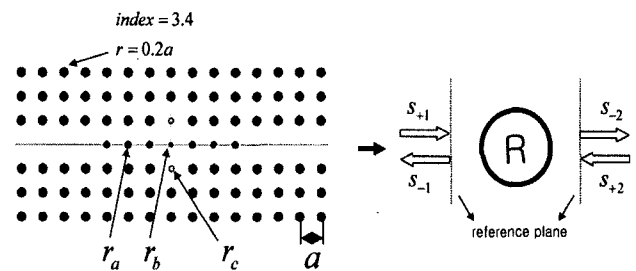


그림 3. 도파로와 연결된 단일 공진기의 개념도.  $S_{+1}$ ,  $S_{+2}$ 는 공진기 좌우에서 공진기 쪽으로 입사하는 입사파의 크기이고,  $S_{-1}$ ,  $S_{-2}$ 는 공진기의 외부손실에 의해 공진기좌우로 빠져나가는 반사파의 크기이다. 여기서  $S$ 의 기준면은  $a$ 와 위상이 같은 위치로 하였다.

진기의 외부손실에 의해 공진기 좌우로 빠져나가는 반사파의 크기이며, 각각은  $|S|^2$ 이 파동의 파워가 되도록 표준화되어 있다. 여기서  $1/\tau_0$ 은 내부손실에 의한 감쇄비율이고  $1/\tau_e$ 은 외부손실에 의한 감쇄비율이다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 크기  $a$ 는  $\omega_0$ 의 주파수로 공진하고, 내부손실에 의해  $1/\tau_0$ 의 비율로 감소하고, 좌우의 외부손실에 의해  $1/\tau_e$ 씩, 즉  $2/\tau_e$ 의 비율로 감쇄한다. 또한 좌우의 입사파에 의해서 증가하는 항을 갖는데, 반사파와 공진기의 외부손실은 서로 시반전(time-reversal) 관계에 있고,  $u$ 는 에너지와 관련되어 표준화 된 값이고,  $S$ 는 파워와 관련되어 표준화 된 값이기 때문에 입사파와 공진 모드 간의 결합 계수의 절대값은  $(2/\tau_e)^{1/2}$ 이 되고 위상은 입사파를 측정하는 기준점(reference plane)의 위치에 의존하게 된다. 식 (1)에서는 결합계수의 위상이 0인 경우에 해당 되는데, 이는 입사파 측정 기준점을 공진 모드와 동일 위상을 가지는 점으로 정하였다고 가정했기 때문이다.

식 (1)로부터, 에너지 보존을 고려하면 각 방향에 대해서 반사파  $S_-$ 는 입사파  $S_+$ 와 공진기의 외부손실 성분과의 관계를 유도 할 수 있는데, 이는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{-1} = -S_{+1} + \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} u \quad (2a)$$

$$S_{-2} = -S_{+2} + \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} u \quad (2b)$$

다음으로, 이상에서 서술한 단일 공진기에 관한 식을 그림 4와 같이 여러 개의 공진기가 결합된 경우로 확장하였다. 일반적으로 공진기가 연결될 때 두 공진기 사이의 간격에 의해서 입사파 측정 기준점 간의 위상차는  $\phi$ 가 발생하게 되는데, 이를 고려하여 3개의 공진기가 결합된 경우에 대해서 식(1)을 확장하면 다음과 같다.

$$\frac{du_1}{dt} = j\omega_0 u_1 - \frac{2}{\tau_{e1}} u_1 - A_1 u_1 + K_{12} u_2 + \sqrt{\frac{2}{\tau_{e1}}} S_{+1} \quad (3a)$$

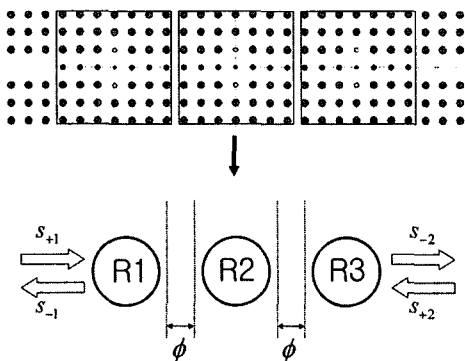


그림 4. 3차 공진필터의 개념도.. 각 공진기는 기준면간의 간격에 따른 위상차  $\phi$ 를 갖고 결합되어있다.

$$\frac{du_2}{dt} = j\omega_0 u_2 - \frac{2}{\tau_{e2}} u_2 - 2A_2 u_2 + K_{12} u_1 + K_{23} u_3 \quad (3b)$$

$$\frac{du_3}{dt} = j\omega_0 u_3 - \frac{2}{\tau_{e3}} u_3 - A_3 u_3 + K_{23} u_2 + \sqrt{\frac{2}{\tau_{e3}}} S_{+2} \quad (3c)$$

$$A_i = \frac{e^{2\phi}}{1 - e^{2\phi}} \frac{2}{\tau_{ei}} \quad (4)$$

$$K_{ij} = \frac{e^{j\phi}}{1 - e^{2\phi}} \frac{2}{\sqrt{\tau_{ei} \tau_{ej}}} \quad (5)$$

$$S_{-1} = S_{+1} + \sqrt{\frac{2}{\tau_{e1}}} u_1 \quad (6a)$$

$$S_{-2} = S_{+2} + \sqrt{\frac{2}{\tau_{e2}}} u_2 \quad (6b)$$

위의 식에서  $u_i$ 는  $i$ 번째 공진기의 크기이고, 내부손실은 없으며 모든 공진기는 동일한 공진 주파수를 가진다고 가정하였다.  $A_i$ 는 공진기가 연결되었을 때 인접한 공진기와의 결합에 의한  $u_i$ 의 외부 감쇄비율 변화량이며,  $K_{ij}$ 는  $i$ 번째 공진기와  $j$ 번째 공진기 사이의 결합 상수인데, 식 (4)와 (5)의 유도 과정은 본 논문의 부록에 상세히 기술되어 있다. 식 (4)와 (5)에서 알 수 있듯이 두 공진 간의 결합 효과는 위상차  $\phi$ 와 각각의 공진기의 외부 감쇄비율에 의해서 결정된다. 식 (6)은 식 (2)로부터 자명하다.

이상의 식들로부터 1번 공진기 쪽으로의 입사파만 있다고 가정하고 ( $S_{+2}=0$ ), 3개의 결합 된 공진기의 주파수 투과 특성  $S_{-2}/S_{+1}$ 를 정리하면 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{S_{-2}}{S_{+1}} = \frac{2K_{12}K_{23} \frac{1}{\sqrt{\tau_{e1}\tau_{e2}}}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{2}{\tau_{e1}} + A_1)(j(\omega - \omega_0) + \frac{2}{\tau_{e2}} + 2A_2)(j(\omega - \omega_0) + \frac{2}{\tau_{e3}} + A_3) - K_{12}^2(j(\omega - \omega_0) + \frac{2}{\tau_{e1}} + A_1) - K_{23}^2(j(\omega - \omega_0) + \frac{2}{\tau_{e2}} + A_2)} \quad (7)$$

위 식의 유도에 있어서 모든 공진기와 입사파의 시간에 따른 변화는  $e^{j\omega t}$ 의 형태라고 가정하였다. 식 (7)에서 보는 바와 같이 위상차  $\phi$ 와 각 공진기의 외부 감쇄비율  $1/\tau_{ei}$ 이 전체 결합 된 공진기들의 주파수 투과 특성을 결정하는 중요한 변수임을 알 수 있다. 따라서, 식 (7)의 주파수 투과 특성이 원하는 필터 특성 가지도록 하기 위해서는  $\phi$ 와  $1/\tau_{ei}$ 를 적절히 결정하는 것이 요구된다. 본 연구에서는 이를 위해서 결합 된 공진기 구조를 전자 회로로 등가화 하여, 기존의 전자회로 필터 설계 방식을 적용하여 쉽게 최적의 변수를 구하고자 하였다.

#### IV. 결합 된 공진기의 전자 등가 회로

그림 5(a)는 우리가 설계하고자 하는 3차 대역 통과 필터를 전자회로로 등가화 한 회로이다. 각 공진기는 LC 등가회로로, 공진기와 공진기 사이의 도파로 영역에 의한

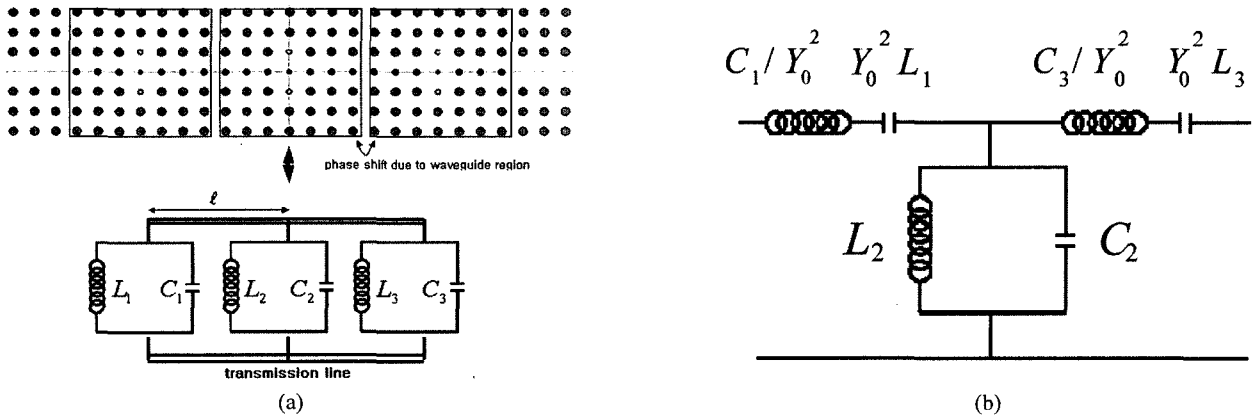


그림 5. (a) 3차 공진필터의 전자회로 등가화, (b) 일반적인 Chebyshev 밴드패스 필터 회로. 각각의 공진기는 L-C 회로로 등가화 하였고, 공진기와 공진기사이의 도파로 영역에 의한 위상천이는 L-C 회로 사이에 전송선이 있는 것으로 등가화 하였다.

위상천이는 LC회로 사이에 전송선(transmission)이 있는 것으로 등가화 하였다. 각 공진기의 공진주파수  $\omega_0 = (1/LC)^{1/2}$ 의 관계를 갖고,  $1/\tau_e$ 은  $1/\tau_e = Y_0/2C$ 의 관계를 갖는다.<sup>[10,11]</sup> 공진기 사이의 전송선의 길이가  $l = \lambda/4$  라면, 즉 위상천이가  $-\pi/2$  라면, 그림 5(a)의 등가 회로는 그림 5(b)에서와 같은 회로로 변형 될 수 있는데, 이는 일반적인 밴드패스 필터의 회로와 동일하고,<sup>[12]</sup> 따라서 기존의 Chebyshev 필터 테이블을 적용하여 식 (7)이 원하는 주파수 투과 특성을 가지도록  $1/\tau_e$ 를 결정할 수 있다. 만일 3차 대역 통과 필터의 중심 주파수가 193.55 THz이고 0.1 dB의 리플을 가지며, 필터의 통과 대역 폭이 50 GHz인 3차 공진필터를 구현하기 위해 Chebyshev 필터 테이블을 이용하면  $C_1 = 3.2834 \times 10^{-12}$  F,  $C_2 = 3.6520 \times 10^{-12}$  F,  $C_3 = 3.2834 \times 10^{-12}$  F를 얻게 되고<sup>[12]</sup>, 이로부터  $\frac{1}{\tau_{e1}} = 0.15228 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ,  $\frac{1}{\tau_{e2}} = 0.13691 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ,  $\frac{1}{\tau_{e3}} = 0.15228 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 를 얻게 된다.

이상의 필터 특성은 채널 간격 100 GHz인 파장분할다중(wavelength division multiplexing, WDM) 전송 시스템에 적용하는 것을 감안하여 결정한 것이다.

이와 같이 등가 회로와 Chebyshev 필터 테이블로부터 얻은 변수들을 식 (7)의 이론적인 모델에 적용하면 주파수 투과 특성은 그림 6과 같이 나타난다. 그림에서 보는 바와 같이 원하는 0.1 dB의 리플과 통과 대역 폭을 갖는 것을 확인할 수 있다. 그림 6에서 가로축인 주파수는 광결정의 주기에 대해서 정규화된 주파수이며 이는 범위를 고려한 광결정 공진기 구조 설계 결과와의 비교를 용이하게 하기 위함이다. 여기서 c는 진공중의 광속이다. 우리가 설계하고자 하는 중심파장 193.55 THz는  $a=0.577 \mu\text{m}$ 의 경우에 해당한다.

### V. 점 결함을 이용한 광결정 공진기 설계

이제 앞서 등가 회로로부터 설계된 이론적인 주파수 투과 특성을 갖는 필터를 광결정을 이용해 구현하기 위해서는, 먼저 동일한 중심 주파수를 가지며 각각의 외부 감쇄비율이 IV 절에서 결정한 값을 가지는 단일 공진기들을 설계하여야 한다. 본 연구에서 고려한 공진기 구조는 그림 1(a)의 구조를 가지는데, 앞서 언급한 바와 같이 공진기의 특성을 결정하는 변수로서 점 결함의 반지름  $r_b$ 와 점 결함과 도파로 사이에 위치한 원기둥의 개수와 반지름  $r_a$  그리고 점 결함 위/아래의 원기둥의 반지름  $r_c$ 를 고려하였다. 이상의 구조 변수를 변화시키며 공진기의 중심 주파수와 Q-factor의 변화를 FDTD를 이용한 주파수 투과 특성을 계산함으로써 조사하였다. 내부 감쇄가 무시할 정도로 작다면, 공진기의 Q-factor와 외부 감쇄비율은  $Q = \omega_0 \tau_e/4$ 의 관계를 가진다.

먼저  $r_b$ 를 0.1a,  $r_c$ 를 0.2a로 고정하고 점 결함과 도파로 사이의 원기둥의 개수와 반지름  $r_a$ 를 변화시키며 공진기의 특성을 조사하였다. 그림 7(a)는 공진 주파수 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이  $r_a$ 가 커지면서 더 낮은 공진주파수를 갖고, 같은 반지름에서 개수가 많아질수록 더 높은 공진 주파수를 갖는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)는 Q값의

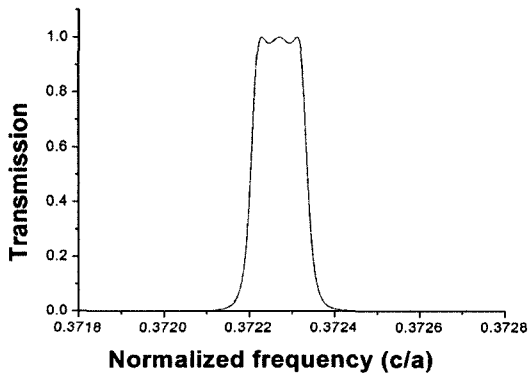


그림 6. 식(7)을 이용하여 얻은 이론적인 3차 공진필터 모델의 주파수 투과 특성.

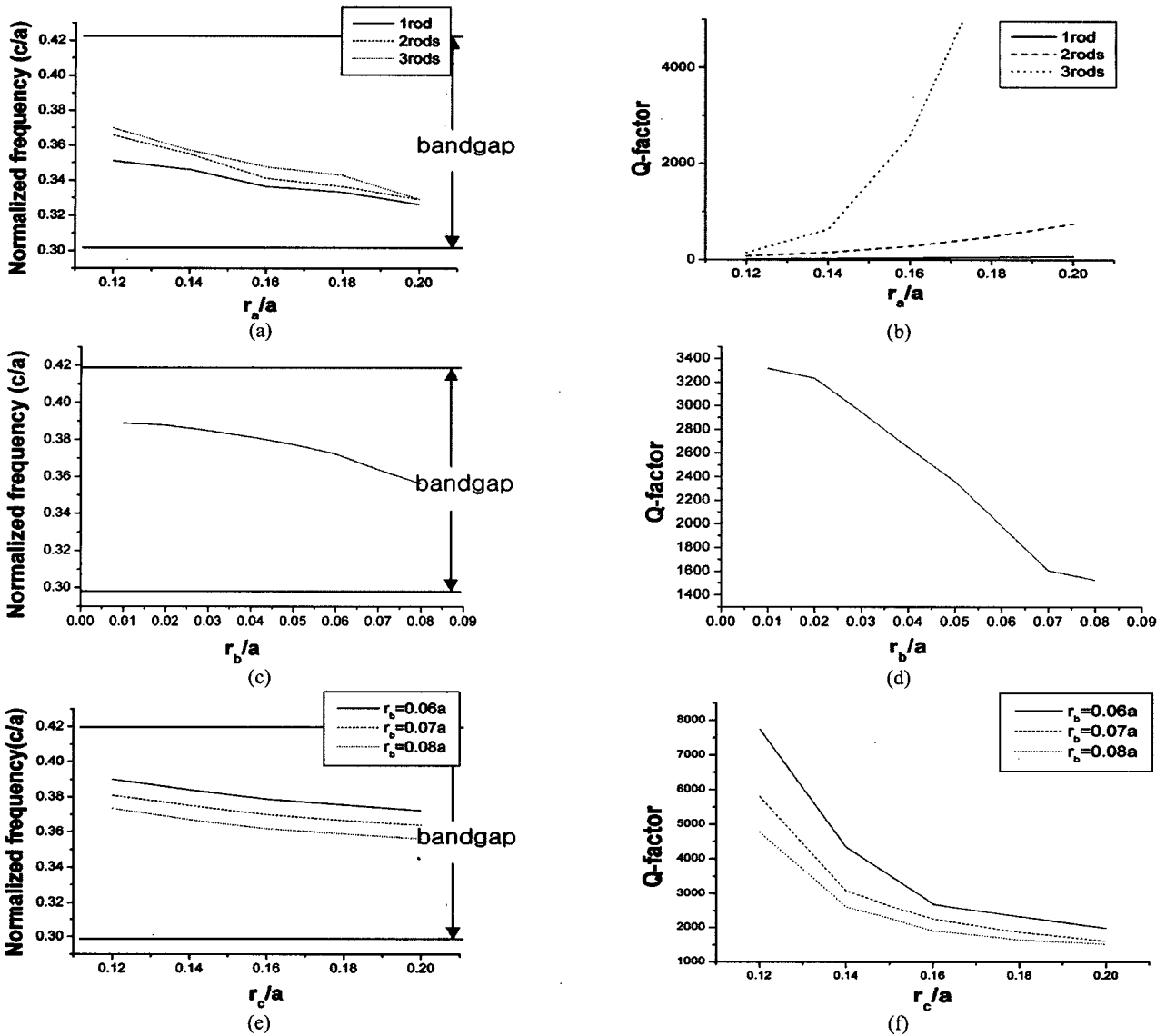


그림 7. (a)  $r_a$ 에 따른 공진 주파수 변화 ( $r_b = 0.1a$ ,  $r_c = 0.2a$ ).  
 (b)  $r_a$ 에 따른 Q-factor 변화 ( $r_b = 0.1a$ ,  $r_c = 0.2a$ ).  
 (c)  $r_b$ 에 따른 공진 주파수 변화 ( $r_a = 0.15a$ ,  $r_c = 0.2a$  점 결함 주변의 원기둥의 수 = 3).  
 (d)  $r_b$ 에 따른 Q-factor 변화 ( $r_a = 0.15a$ ,  $r_c = 0.2a$ , 점 결함 주변의 원기둥의 수 = 3).  
 (e)  $r_c$ 에 따른 공진 주파수 변화 ( $r_a = 0.15a$ ,  $r_b = 0.6a, 0.7a, 0.8a$ , 점 결함 주변의 원기둥의 수 = 3).  
 (f)  $r_c$ 에 따른 Q-factor 변화 ( $r_a = 0.15a$ ,  $r_b = 0.6a, 0.7a, 0.8a$ , 점 결함 주변의 원기둥의 수 = 3).

변화를 나타낸 것인데, 반지름이 커지면서 더 높은 Q값을 갖고, 개수가 많아질수록 그 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 앞 절에서 결정한 공진기의 외부 감쇄비율은 약 2000의 Q값에 해당하기 때문에, 그림 7(b)로부터 원기둥의 개수는 3,  $r_a$ 는  $0.15a$ 이 적합함을 알 수 있다. 다음으로 점 결함과 도파로 사이에  $r_a = 0.15a$ 인 3개의 원기둥이 위치한 구조에 대해서  $r_c$ 는 앞 서와 마찬가지로  $0.2a$ 로 고정하고  $r_b$ 를 변화시키며 공진 주파수와 Q값의 변화를 알아보았다. 그림 7(c)와 7(d)에서 보는 바와 같이  $r_b$ 가 커지면서 더 낮은 공진 주파수를 갖고 더 낮은 Q값을 갖는 것을 볼 수 있는데, 여기서 원하는 Q값을 얻기 위해 결함의 반지름을 조정하면 Q값뿐

만 아니라 부수적으로 공진 주파수까지 변화하는 것을 알 수 있다. 우리가 앞서 얻은 이론적인 필터 구현을 위해서는 서로 다른 Q값을 가지면서 공진 주파수는 일치하는 공진기가 요구되기 때문에, 추가적으로  $r_c$ 를 변화시켜 공진기의 특성을 조정 하였다. 그림 7(e)와 7(f)는  $r_a = 0.15a$ 으로 고정시키고 점 결함 주변의 원기둥의 수는 3인 경우에  $r_b = 0.06a, 0.07a, 0.08a$ 에 대해서  $r_c$ 의 변화에 따른 공진 주파수와 Q값의 변화를 나타낸다. 그림 7(e)와 7(f)에서 보면  $r_b$ 를 변화시켰던 경우와 마찬가지로  $r_c$ 가 커지면서 공진 주파수와 Q값이 모두 감소함을 알 수 있다. 그러나  $r_b$ 를 변화시킬 때와 비교하여 Q값의 변화량은 비슷하나, 공진 주파수의 변화폭

이 더 작은 것을 알 수 있다. 따라서 우리는 원하는 특성을 얻기 위해,  $r_b$ 를 조정하여 공진 주파수를 대략적으로 조정하고,  $r_c$ 의 조정을 통하여 세밀하게 공진 주파수를 조정하면서 목표로 하는 Q값을 얻도록 하였다.

이러한 과정을 통하여 동일한 공진 주파수  $0.37227 c/a$ 를 가지며 Q값이 각각  $1996(1/\tau_{\omega} = 1/\tau_{\omega} = 0.15228 \times 10^{12} s^{-1})$  과  $2220(1/\tau_{\omega} = 0.13691 \times 10^{12} s^{-1})$  인 공진기를 설계하였다. 설계된 공진기는 각각  $r_{1a} = r_{3a} = 0.15a$ ,  $r_{1b} = r_{3b} = 0.06a$ ,  $r_{1c} = r_{3c} = 0.2a$  와  $r_{2a} = 0.15a$ ,  $r_{2b} = 0.065a$ ,  $r_{2c} = 0.1751a$  의 구조를 가진다.

### VI. 3차 광결정 대역 통과 필터 설계

앞 절에서 설계한 공진기들을 결합하여 3차 광결정 대역 통과 필터를 구성하고 주파수 투과 특성을 계산하였다. 공진기의 결합에 있어서 2차원 광결정의 주기를 유지하도록 하였으며, 주파수 투과 특성은 2차원 FDTD를 이용하여 계산하였다. 그림 8의 실선은 계산된 주파수 투과 특성을 나타낸다. 목표로 하는 주파수 투과 특성인 그림 6과 비교해 볼 때, 중심 주파수는 약  $0.37227 c/a$ 로 목표치에 가까우며 유사한 roll-off 특성을 보이나, 통과 대역에서 큰 리플을 보이며 목표치 보다 넓은 대역폭을 가짐을 알 수 있다. 이것은 사용한 Chebyshev 필터 테이بل은 위상천이가  $-\pi/2$ 일 때를 고려한 반면, 우리가 설계한 광결정 필터는 2차원 광결정의 주기성을 유지함으로  $-\pi/2$ 와는 다른 위상천이를 갖기 때문에 나타나는 특성이다. 식 (7)에서 각 공진기의 외부 감쇄비율은 Chebyshev 필터 테이블로부터 얻은 값을 적용하고  $\phi$ 를 조정하여 이론적인 주파수 특성과 FDTD를 이용한 계산 결과가 일치하도록 하였다. 그림 8의 점선은  $\phi = -\pi/4$ 일 때의 식 (7)에 의한 이론적인 주파수 투과 특성을 나타내는데, FDTD를 이용한 계산 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서, 현재 설계된 필터는 공진기 간의 위상천이가 바람직한 값과는 다른 값을 가지도록 설계 되어 있음을 알 수 있다. 이를 해결하기 위한 한 방안으로 공진기 간의 간격을

변화시켜서 위상천이를 조정함으로써 해결하는 방안을 생각할 수 있다. 그러나 그러한 경우에 공진기 간에 간격의 조정에 의해 광결정의 주기를 유지할 수 없게 되어 두 공진기 사이에 일치 않는 또 다른 공진 특성이 나타날 수 있고 또한 공진기와 공진기 사이에서 손실이 발생할 수 있어 적합하지 않다.

따라서, 본 연구에서는 위상천이의 조정 없이 이를 해결할 수 있는 방안을 강구하였다. 식 (5)를 보면 공진기 간의 결합 상수가 위상천이  $\phi$ 와 각 공진기의 외부 감쇄비율  $1/\tau_e$ 의 함수임을 알 수 있는데,  $\phi = -\pi/4$ 인 대해서  $\phi = -\pi/2$ 일 때의 결합 상수와 동일한 크기의 결합 상수를 가지도록 각 공진기의 외부 감쇄비율  $1/\tau_e$ 를 조정하면 위상천이의 오차로 인한 효과를 상쇄할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 위해서는 인접한 두 공진기 가운데 임의의 하나, 또는 둘 다의 외부 감쇄비율을 조정 할 수 있는데, 본 연구에서는 중앙에 위치한 공진기의 외부 감쇄비율만을 조정하였다. 가장 자리에 위치한 공진기의 외부 감쇄비율을 조정 할 경우 도파로의 결합 상수 또한 변하게 되므로 이를 회피하기 위함이다. 식(5)로부터  $\phi = -\pi/4$ 일 때 가운데 공진기의 외부 감쇄비율을 Chebyshev 필터 테이블로부터 얻은 값의 절반인  $1/\tau_e = 0.06846 \times 10^{12} s^{-1}$ 으로 조정하면 결합 상수의 크기가  $\phi = -\pi/2$ 일 때의 값과 같게 됨을 알 수 있다. 이와 같이 조정된 변수 값들을 식 (7)에 대입하여 얻은 이론적인 주파수 투과 특성이 그림 9에 점선으로 그려져 있다. 그림 6과 비교해 보면 완전히 동일한 주파수 특성을 보임을 알 수 있으며, 이는 가운데 공진기의 외부 감쇄비율의 조정을 통해서 위상천이 오차로 인한 효과를 완전히 상쇄할 수 있음을 시사한다.

위의 아이디어를 바탕으로, 공진 주파수는 동일하게 유지하며  $1/\tau_e = 0.06846 \times 10^{12}$ 가 되도록 가운데 공진기를 다시 설계한 결과,  $r_{2a} = 0.15a$ ,  $r_{2b} = 0.08$ ,  $r_{2c} = 0.123a$  구조를 얻었다. 가장 자리에 위치한 공진기들은 앞서 설계한 구조를 그대로 유지하였다. 이들을 결합한 구조에 대해서 2차원 FDTD를 이용하여 계산한 주파수 투과 특성이 그림 9에 실선으로 그려

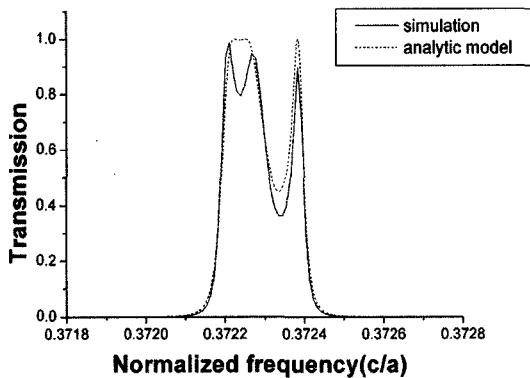


그림 8. 위상변이의 오차 효과가 보상되지 않은 공진필터의 주파수 투과 특성( — 전산모사한 결과, ..... 이론적인 모델의 분석 결과).

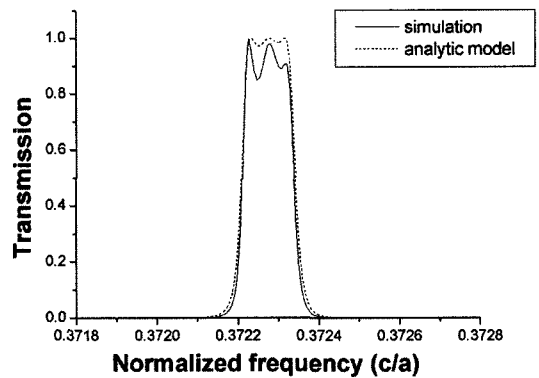


그림 9. 위상천이 오차 효과가 보상된 3차 공진필터의 주파수 투과 특성( — 전산모사한 결과, ..... 이론적인 모델의 분석 결과).  
 $r_{1a} = r_{3a} = 0.15a$ ,  $r_{1b} = r_{3b} = 0.06a$ ,  $r_{1c} = r_{3c} = 0.2a$  와  
 $r_{2a} = 0.15a$ ,  $r_{2b} = 0.08a$ ,  $r_{2c} = 0.123a$

져 있다. 점선으로 그려진 이론적인 특성과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. FDTD를 이용한 전산모사 결과가 약 0.5 dB(10%)의 리플을 갖는 것을 볼 수 있는데, 설계된 공진기들의 감쇄비율과 공진 주파수의 오차에 기인한다.

**VII. 결 론**

우리는 일반적인 전자회로 필터 설계방식을 적용하여 쉽게 고차 광결정 대역 통과 필터를 설계하는 방법론을 제시하였고, 기존의 Chebyshev 필터 테이블을 이용하여 3차 필터를 2차원 광결정 도파로에 삽입된 점 결합 공진기들을 결합하여 설계하였다. 본 논문에서 제안하는 설계 방법론은 광결정의 주기성을 유지하기는 구조에서 공진기 간의 도파로의 위상 천이의 오차 효과를 공진기의 외부손실에 의한 감쇄비율을 조정함으로써 상쇄할 수 있음에 기초하고 있으며, 이는 이론적인 분석과 3차원 광결정 필터를 설계함으로써 확인하였다. 본 논문에서 설계한 3차원 광결정 필터는 격자 상수가  $a=0.577 \mu\text{m}$ 일 때에 193.55 THz의 중심 주파수를 가지고 통과 대역은 50 GHz이며 0.5 dB의 리플을 갖는다. 이는 현재 널리 사용되고 있는 채널 간격이 100 GHz인 WDM 전송 시스템에 적용이 가능한 특성이다.

**부 록**

두 개의 공진기가 결합 되었을 때 결합에 의한 효과를 분석하기 위해서 가상적으로 두 공진기는 외부와 단절 되어 있고 오로지 둘 사이에만 에너지를 주고 받는 다고 가정하자. 이 때, 식 (1)에 의해서 각 공진기의 모드는 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{dt} &= j \omega_0 u_1 - \frac{u_1}{\tau_{e1}} + \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} S_{+1} \\ \frac{du_2}{dt} &= j \omega_0 u_2 - \frac{u_2}{\tau_{e2}} + \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} S_{+2} \end{aligned} \quad (\text{부록 1})$$

위식에서 공진기의 내부손실은 없다고 가정하였고,  $S_{+1}$ 은 공진기간의 상호 작용에 의해서  $u_2$ 로부터  $u_1$ 으로 입사되는 파동이며,  $S_{+2}$ 은  $u_1$ 로부터  $u_2$ 로 입사되는 파동이다. 입사파와 반사파는 식 (2)에 의해서 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$S_{-1} = S_{+1} + \sqrt{\frac{2}{\tau_{e1}}} u_1 \quad (\text{부록 2a})$$

$$S_{-2} = S_{+2} + \sqrt{\frac{2}{\tau_{e2}}} u_2 \quad (\text{부록 2b})$$

이 때, 1번 공진기의 반사파  $S_{-1}$ 는 2번 공진기에서 입사 파  $S_{+2}$ 성분이 되고, 2번 공진기의 반사파  $S_{-2}$ 는 1번 공진기에서 입사파  $S_{+1}$ 성분이 된다. 각 입사파의 측정 기준점은

해당 공진기 모드와 같은 위상을 갖도록 정한다고 가정하고, 측정 기준점 간의 진행으로 인한 위상천이  $\phi$ 를 고려하면 하면 인접한 공진기의 입사파와 반사파의 관계는 다음을 만족한다.

$$S_{-1} = e^{j\phi} S_{-2} \quad (\text{부록 3a})$$

$$S_{+2} = e^{j\phi} S_{-1} \quad (\text{부록 3b})$$

식 (부록 2)과 식 (부록 3)을 식 (부록 1)에 대입하면 다음과 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{dt} &= j \omega_0 u_1 - \left(1 + \frac{2e^{j\phi}}{1 - e^{j\phi}}\right) \frac{1}{\tau_{e1}} u_1 + \\ &\quad \frac{e^{j\phi}}{1 - e^{j\phi}} + \frac{2}{\sqrt{\tau_{e1} \tau_{e2}}} u_2 \end{aligned} \quad (\text{부록 4a})$$

$$\begin{aligned} \frac{du_2}{dt} &= j \omega_0 u_2 - \left(1 + \frac{2e^{j\phi}}{1 - e^{j\phi}}\right) \frac{1}{\tau_{e2}} u_2 + \\ &\quad \frac{e^{j\phi}}{1 - e^{j\phi}} + \frac{2}{\sqrt{\tau_{e2} \tau_{e1}}} u_1 \end{aligned} \quad (\text{부록 4b})$$

단, 위의 식은  $e^{j\phi} \neq 1$ 일 때만 유효하고,  $e^{j\phi} = 1$ 는 두 공진기가 단지 100% 반사경으로만 작용하는 것을 의미하므로 여기서 다루고자 하는 공진기간의 결합과는 무관한, 즉 가치 없는 (trivial) 문제가 된다. 결과적으로 공진기의 결합 효과는 결합된 방향으로의 외부 감쇄비율의 변화와 인접한 공진기의 모드로부터 유입되는 항을 추가하는 것으로 나타나게 된다. 위의 식에서 임의의  $\phi$ 에 대해서 항상  $\frac{d(u_1 u_1^* + u_2 u_2^*)}{dt} = 0$ 임을 확인할 수 있는데, 이는 유도 과정의 정확성을 입증한다.

**감사의 글**

본 연구는 한국과학기술정보연구원의 ‘제 6차 슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램’을 통해 수행되었음. 컴퓨팅 자원을 제공해 준 슈퍼컴퓨팅센터와 기술지원을 해 준 이상민 박사(연구원)에게 감사함.

**참고문헌**

[1] S. Fan, P. R. Vuilleneuve, J. D. Joannopoulos, and H. A. Haus, "Channel drop filters in photonic crystals", Optics Express, Vol. 3, p. 4, 1998.  
 [2] M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, M. Mochizuki, T. Tanaka, "Channel drop filter using a single defect in a 2-D photonic crystal slab waveguide", Journal of Lightwave Technology, vol. 20, no. 5, pp. 873-878, 2002.  
 [3] C.J.M. Smith, R.M. De La Rie, H. Benisty, "In-plane microcavity resonators with two-dimensional photonic bandgap mirrors," Proc. Inst. Elect. Eng.-Optoelectron., vol.

- 145, no .6, pp. 373-378, 1998.
- [4] M. Rattier, H. Benisty, C.J.M. Smith, A. Beraud, "Performance of waveguide-based two-dimensional photonic-crystal mirrors studied with Fabry-Perot resonators," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, pp. 237-243, Feb. 2001.
- [5] Raffaella Costa, Andrea melloni "Bandpass resonant filters in photonic-crystal waveguides" *IEEE photonics technology letters*, vol.15, no. 3, pp. 401-403, 2003.
- [6] A. Melloni, and M. Martinelli, "Synthesis of direct-coupled-resonators bandpass filters for WDM system", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 296-303, 2002.
- [7] A. Melloni, M. Floridi, F. Mrichetti, and M. Mrtinelli, "Equivalent circuit of a Bragg grating and its applications to Fabry-Petor cavities", *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, v. 20 no. 2, pp. 273-281, 2003.
- [8] S. Lan, S. Nishikawa, Y. Sugimoto, "Analysis of defect coupling in one and two dimensional photonic cristas," *Phys. Rev. B*, vol. 65, pp. 165 208-1-165208-9, 2002.
- [9] A. L. Reynolds, U. Peschel, F. Lederer, P.J. Roberts, T. F. Krauss, and P. J. I. De Maagt, "Coupled defect in photonic crystals," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 49, pp. 1860-1867, 2001.
- [10] Hermann A. Haus, *Wave and Fields in Optoelectronics*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1984.
- [11] Hermann A. Haus, IEEE, and Y. Lai, "Theory of cascaded Quarter wave shifted distributed feedback resonators" *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.28, no. 1 , pp . 205-212, 1992.
- [12] David M. Pozar, *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 1998.



## Photonic Crystal Based Bandpass Filter Design for WDM Communication Systems

Dong Soo Park, Sang In Kim<sup>†</sup>, Ik Mo Park and Han Jo Lim

*School of Electrical Engineering, Ajou University San 5 Woncheon-Dong Youngtong-Gu Suwon 443-749, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: sangin@ajou.ac.kr*

(Received June 29, 2005, Revised manuscript June 15, 2005)

We have designed photonic crystal based bandpass filters whose characteristics are suitable for WDM communication system. The filters consist of coupled point defect resonators in two-dimensional photonic crystal. The frequency response of coupled resonators has been analyzed by the coupling of modes in time, from which the design parameters for the coupled resonator filters have been extracted. For the appropriate choice of the design parameters, each resonator is treated as a lumped L-C resonance circuit, and from the analogy between the equivalent circuit and the standard L-C filter circuits, the design parameters are simply determined from the table for general filter circuit design. Based on the determined design parameters, a photonic crystal based filter has been designed and its performance has been calculated using the finite-difference time-domain method. The designed filter shows a pass band of 50GHz and 0.5 dB in-band ripple, which is suitable for typical WDM communication systems with 100GHz channel spacing.

OCIS Codes : 230.0230, 230.5750.