

# SOI 슬롯 광도파로 기반 캐스케이드 링 공진기 바이오·케미컬 집적광학 센서의 효용성 해석

장재식<sup>1</sup> · 정흥식<sup>1,\*</sup>

## Application Utility Analysis of Series-cascaded Ring Resonators Based on SOI Slot Optical Waveguides in Integrated Optical Biochemical Sensor

Jaesik Jang<sup>1</sup> and Hongsik Jung<sup>1,\*</sup>

### Abstract

This study investigated via computational analysis the application utility of series-cascaded ring resonators based on silicon-on-insulator (SOI) slot optical waveguides in integrated optical biochemical sensors. The radii of the two rings in the series-cascaded ring resonators were 59.4  $\mu\text{m}$  and 77.6  $\mu\text{m}$  respectively, and the coupling distance was 0.5  $\mu\text{m}$ . The series-cascaded ring resonators were computationally analyzed using FIMMProp and PICWave numerical software. The free spectral range (FSR), full width at half maximum (FWHM), sensitivity, and quality-factor (Q-factor) of the series-cascaded ring resonators were 12.2 nm, 0.134 nm, 4100 nm/RIU, and 11580, respectively, and the measurement range was calculated to be slightly smaller than  $3 \times 10^{-3}$  RIU. Although the measurement range was smaller than that of the single ring resonator, upon considering other characteristic parameters, the series-cascaded ring resonators are found to be more effective as integrated sensors than single ring resonators.

**Keywords:** Series cascaded ring resonator, Silicon photonics, Slot optical waveguides, Integrated optical biochemical sensor

### 1. 서 론

SOI(Silicon-On-Insulator) 광도파로 기반 집적광학 센서는 환경 분석, 질병 진단, 화학물질 검사 등 다양한 분야에서 활용된다[1]. 이는 집적광학 센서의 높은 감도(sensitivity)와 기존의 CMOS 집적화 공정으로 제작이 가능한 점, 전자파의 영향을 적게 받고, 실시간으로 데이터 확인이 가능하다는 점 등 여러가지 장점들에 기인하고 있다. 집적광학 센서는 링 공진기[2, 3], 마하-젠더 간섭기(MZI)[4], Bragg 격자[5, 6], 표면 플라즈몬 공명(Surface Plasmon Resonance)[7] 등을 활용한 다양한 구조들과 슬롯[8, 9], 립[10], ARROW (Anti Resonant Reflecting optical waveguide) [11, 12], Hollow[13]등과 같은 다양한 광도파로들과 결합시키는 형태로 폭 넓은 연구들이 진행되고 있다.

집적광학 센서들에 적용되는 다양한 센싱 원리들 중에서 보편적으로 많이 활용되는 원리는 소산파( evanescent wave)를 이용하는 것이다. 소산파 센싱 원리는 클래딩(cladding) 물질의 굴절률 및 농도(concentration) 변화가 클래딩 영역에 존재하는 소산파에 영향을 미쳐, 광도파로 내 기본 모드의 유효 굴절률의 변화를 야기하는 것이다. 따라서 광도파로 내 기본 모드의 유효 굴절률 변화는 다양한 구조들을 통해 광파의 세기, 편광(polarization), 공진 파장(resonant wavelength) 등 여러 물리적인 요소의 변화를 야기하고, 이러한 변화를 해석하여 분석 물질의 농도 및 굴절률 변화 등을 감지하고, 궁극적으로는 정량적으로 물질 농도의 변화를 측정할 수 있다.

소산파를 이용한 센싱 방법은 소산파와 분석 물질간의 상호작용이 기본 원리이기 때문에 클래딩 영역에 존재하는 소산파가 많을수록 높은 감도를 얻는데 효과적이며, 다양한 광도파로들 중에서 슬롯 광도파로가 이에 부합되는 구조이다. 슬롯 광도파로[8]는 굴절률이 높은 두 개의 레일 사이에 굴절률이 낮은 슬롯으로 구성되어 있는 구조이며, 경계 조건을 적용한 광파 해석에 따르면 슬롯에 많은 양의 광파가 분포되어 있다. 참고문헌 [14]에서 립, 릿지, 슬롯 광도파로 각각에 대해서, 소산파의 구속계수를 전산해석한 결과를 비교해 보면, 립, 릿지 광도파로의 클래딩 영역에 존재하는 소산파의 구속계수는 각각 0.08, 0.19이며, 슬롯 광도파로의 슬롯에 존재하는 소산파의 구속계수는

<sup>1</sup> 홍익대학교 대학원 전자전산공학과(Department of Electronic & Computer Engineering, Graduate School, Hongik University) 2639 Sejong-ro, Jochiwon, Sejong 30016, Korea  
\*Corresponding author: hsjung@hongik.ac.kr  
(Received: Sep. 19, 2022, Accepted: Sep. 26, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

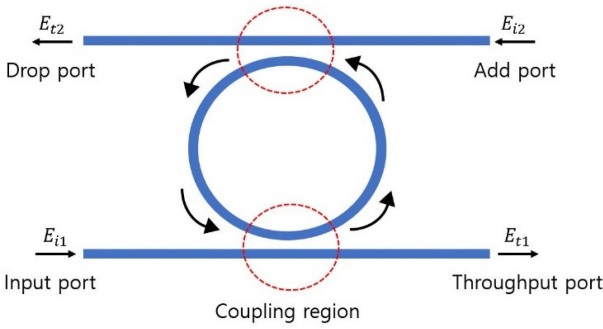


Fig. 1. Schematic of add-drop single ring resonator.

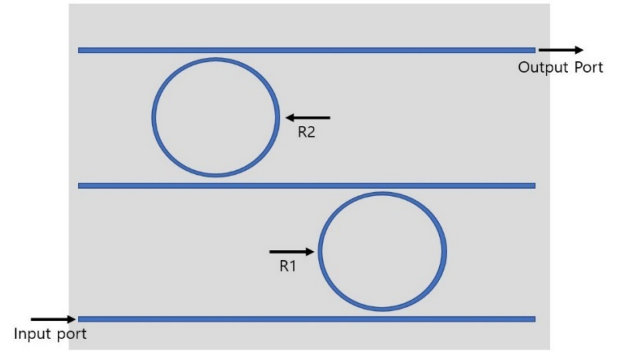
0.47로, 전자의 두 광도파로 보다 매우 큰 값을 보이고 있다. 이를 통하여 슬롯 광도파로를 활용해서 센서를 구현할 경우, 전자의 두 광도파로 보다 높은 감도를 기대할 수 있다.

Fig. 1은 단일 링 공진기 구조이며, 입사된 광파( $E_{i1}$ )가 결합 영역에서 광 결합이 발생하고 공진 파장에서 출력되는 광파의 세기가 최소( $E_{i1}$ ) 그리고 최대( $E_{i2}$ )가 되는 구조이다.[15] 공진 파장은 클래딩 물질의 굴절률에 영향을 받기 때문에 링 공진기를 활용한 집적광학 센서는 굴절률 변화에 따른 공진 파장의 변화를 측정하여 물질의 굴절률 및 농도를 계산할 수 있으며, 감도는 식 (1)과 같이 정의된다.

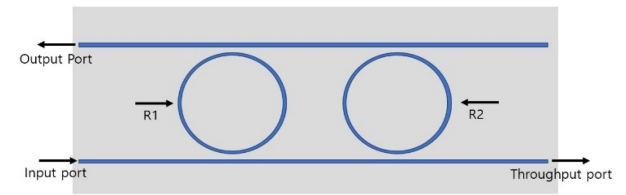
$$S_{res} = \frac{d\lambda_{res}}{dn_{Clad}} [nm/RIU] \quad (1)$$

링 공진기의 특성 파라미터들은 FSR(Free Spectrum Range)와 FWHM(Full Width at Half Maximum)이 대표적이며, 높은 품질인자(Q-factor), 높은 감도, 작은 footprint등 다양한 장점으로 인하여 집적광학 센서뿐만 아니라 광학 필터[16], 광학 스위치[17], 레이저[18,19], 광변조기[20]등 다양한 분야에서도 유용한 구조로 활용되고 있다. 링 공진기는 단일 구조뿐만 아니라 2개 이상의 링 공진기로 구성된 캐스케이드 링 공진기도 많은 분야에서 활용되고 있다. 캐스케이드 링 공진기는 링 공진기끼리 연결되는 방식에 따라 직렬(series) 및 병렬(parallel) 캐스케이드 구조로 나누어 지며, 두 구조의 간단한 개략도는 Fig. 2와 같다. 두 구조 모두 단일 링 공진기에 비해 여러가지 장점을 지니고 있으며, 다양한 분야에서 활용되고, 그 중 집적광학 센서에서는 Vernier 효과를 적용한 직렬 캐스케이드 링 공진기 구조가 보다 많은 연구에 이용된다.

본 논문에서는 SOI 물질 체계와 중심 파장이 1.55  $\mu\text{m}$ 에서 전산 해석을 통하여 직렬 캐스케이드 링 공진기를 집적광학 센서로 활용 시 효율성 확인을 진행하였다. 2장에서는 행렬식을 통하여 직렬 캐스케이드 링 공진기의 출력 포트에서 필드 세기 분포를 정량적으로 검토하였다. 3장에서는 이전의 링 공진기 체원[14]을 이용하여 직렬 캐스케이드 링 공진기의 FSR, FWHM, 품질인자 및 감도를 해석하여 단일 링 공진기보다 센서로서 효과적이지 확인하였다. 전산 해석은 Photon Design사의 FIMMPROP과 PICWave



(a)



(b)

Fig. 2. Schematics of (a) series and (b) parallel cascaded ring resonator.

를 이용하여 진행하였으며, 4장에서는 결론으로 마무리하였다.

## 2. 직렬 캐스케이드 링 공진기 모드 해석 및 특징

### 2.1 직렬 캐스케이드 링 공진기 모드 해석

Fig. 3은 직렬 캐스케이드 링 공진기로 결합상수와 각 포트에서 정의되는 광파들을 나타내었다. 해당 구조에서 출력포트의 광파( $E_{i4}$ )는 두 개의 링 공진기를 거쳐 출력되기 때문에 삽입-분기 채널 링 공진기의 행렬식을 이용하여 출력 광파의 세기를 계산하는 것이 가능하다. 따라서 삽입-분기 채널 링 공진기의 행렬식을 사용하여  $E_{i2}$ 를 먼저 정의한 다음,  $E_{i4}$ 를 정의하였다. Fig. 4는 첫 번째 링 공진기(R1)의 구조로 Fig. 3의 R1에 추가적으로 링 공진기에서의 광파와 손실계수  $\alpha_1$ , 반경  $R_1$ 을 나타내었다.  $t_1$ ,  $k_1$ 은 결합 상수로 복소수 값을 가지며, 광파의 결합이 발생할 때 광파의 세기 분포를 계산하는 행렬식에 사용되며, 아래 식 (2)와 같이 만족한다.

$$t_1 = |t_1|e^{j\phi_1} \quad (2-1)$$

$$k_1 = |k_1|e^{j\phi_1} \quad (2-2)$$

$$|t_1|^2 + |k_1|^2 = 1 \quad (2-3)$$

식 (2)에서  $\phi_1$ 은 광 결합 시 발생하는 위상 변화를 의미하며, 결합 시 발생하는 손실은 고려하지 않았다. Fig. 4의 두 개의 결합 영역에서 채널 도파로의 체원과 링 공진기의 체원 그리고 결

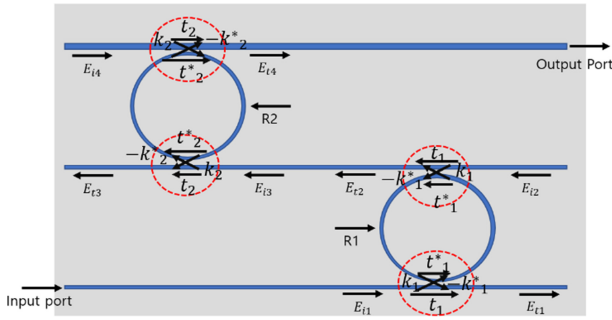


Fig. 3. Schematic of series cascaded ring resonator with various transmitted and coupling coefficients.

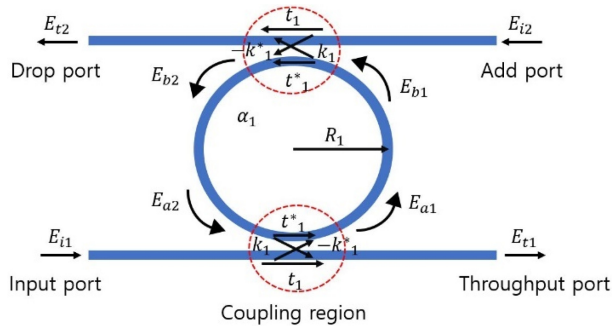


Fig. 4. Detailed schematic of single ring-resonator with two channel waveguides including add-drop ports.

합 간격은 동일하게 설정하고, 두 영역에서의 결합상수는 동일하게 고려하였다.

$E_{i2} = 0$  으로 설정하고 행렬식을 이용한 삽입-분기 채널 링 공진기의 각 포트에서 출력되는 광파의 세기를 유도하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 자세한 유도과정은 참고문헌[14, 15]에서 확인된다.

$$E_{i1} = \frac{t_1 - t_1^* e^{j\theta_1} \alpha_1}{1 - t_1^* t_1^* e^{j\theta_1} \alpha_1} E_{i1} \quad (3-1)$$

$$E_{i2} = \frac{-k_1^* k_1 e^{j\theta_1'} \alpha_1'}{1 - t_1^* t_1^* e^{j\theta_1} \alpha_1} E_{i1} \quad (3-2)$$

식 (3)에서  $\alpha_1'$ ,  $\theta_1'$ 은 링 공진기를 반 바퀴 이동하였을 때의 손실 계수와 위상 변화로  $(\alpha_1')^2 = \alpha_1$ ,  $2\theta_1' = \theta_1$  을 만족한다. 두 번째 링 공진기(R2)에서 입력, 출력, 삽입, 분기 포트의 광파는 각각  $E_{i3}, E_{i3}, E_{i4}, E_{i4}$  으로 표현하고, 결합 상수  $t_2, k_2$  는 R1의 결합 상수와 동일하게 설정하였다. R2의 행렬식은 R1의 행렬식과 동일하고,  $E_{i3} = e^{j\varphi} E_{i2}$ ,  $E_{i4} = 0$  으로 고려하여  $E_{i4}$  를 유도하면 식 (4)와 같다. 이때,  $\varphi$ 는  $E_{i2}$  가 채널 광도파로를 이동하여 R2에서 결합되기 전까지 발생하는 위상변화를 의미한다.

$$E_{i4} = \frac{-k_2^* k_2 e^{j\theta_2'} \alpha_2'}{1 - t_2^* t_2^* e^{j\theta_2} \alpha_2} e^{j\varphi} E_{i2} \quad (4)$$

$\alpha_2$ ,  $\theta_2$  는 각각 R2에서의 손실 계수와 링 공진기를 한 바퀴 회전했을 때 발생하는 위상변화를 의미하고,  $(\alpha_2')^2 = \alpha_2$ ,  $2\theta_2' = \theta_2$  를 만족한다. 입력 광파  $E_{i1} = 1$  로 설정하고, 식 (4)에 식 (3)을 대입하여  $E_{i4}$  를 재정리하면 다음과 같다.

$$E_{i4} = \left( \frac{-k_2^* k_2 e^{j\theta_2'} \alpha_2'}{1 - t_2^* t_2^* e^{j\theta_2} \alpha_2} \right) \left( \frac{-k_1^* k_1 e^{j\theta_1'} \alpha_1'}{1 - t_1^* t_1^* e^{j\theta_1} \alpha_1} \right) e^{j\varphi} \quad (5)$$

식 (5)와 식 (2)를 이용하여 직렬 캐스케이드 링 공진기 출력 포트에서 광파의 출력  $P_o$  를 계산하면 다음과 같다.

$$P_o = |E_{i4}|^2 = \frac{(1 - |t_1|^2)^2 (1 - |t_2|^2)^2 \alpha_1 \alpha_2}{(1 - 2|t_1|^2 \alpha_1 \cos(\theta_1 - 2\phi_1) + |t_1|^4 \alpha_1^2)(1 - 2|t_2|^2 \alpha_2 \cos(\theta_2 - 2\phi_2) + |t_2|^4 \alpha_2^2)} \quad (6)$$

위 식에서  $\theta_1 - 2\phi_1 = 2m\pi$  와  $\theta_2 - 2\phi_2 = 2n\pi$  ( $m, n =$  정수)가 동시에 충족되면 공진이 발생하게 되고 이때의 파장은 공진파장이 된다.

## 2.2 직렬 캐스케이드 링 공진기의 특징

단일 링 공진기와 비교했을 때, 직렬 캐스케이드 링 공진기의 가장 큰 장점은 Vernier 효과로 인한 FSR과 감도의 증가이다. Vernier 효과[21, 22]는 다른 주기를 가지는 두 신호가 중첩되어, 측정 정확도와 분해능을 향상시키는 효과로 정밀한 측정을 요구하는 분야에서 활용되는 원리이다. Vernier 효과를 통하여 직렬 캐스케이드 링 공진기의 공진현상은 단일 링 공진기의 공진현상보다 발생 빈도가 낮아지고, 이는 FSR의 증가를 야기하며, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$FSR_l = \frac{FSR_1 FSR_2}{|FSR_1 - FSR_2|} \quad (7)$$

식(7)은 Vernier 효과를 사용한 직렬 캐스케이드 링 공진기의 FSR를 표현한 식으로  $FSR_1$ ,  $FSR_2$ ,  $FSR_l$ 는 각각 R1과, R2의 FSR, 그리고 직렬 캐스케이드 링 공진기의 FSR을 의미한다. 식(7)을 통하여 R1과 R2의 FSR 차이가 작으면 작을수록,  $FSR_l$ 는 더욱 더 넓어지는 것을 확인할 수 있으며, 동일한 FSR을 가지는 링 공진기를 사용할 경우 제대로 된 효과를 기대할 수 없다. Fig. 5에 Vernier 효과에 의한 FSR의 변화를 도식적으로 나타내었다.

## 3. 직렬 캐스케이드 링 공진기 해석

Fig. 6(a)는 전산해석에서 사용한 직렬 캐스케이드 슬롯 링 공진기의 구조로 2개의 슬롯 링 공진기로 구성되어 있다. 해당 구조를 센서로 활용할 때, 첫 번째 링 공진기(Ring-1)는 필터로서

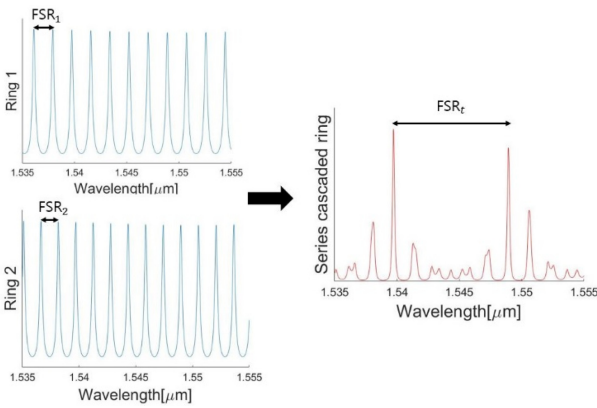


Fig. 5. Transmission spectrum of Vernier effect in series cascaded ring resonators.

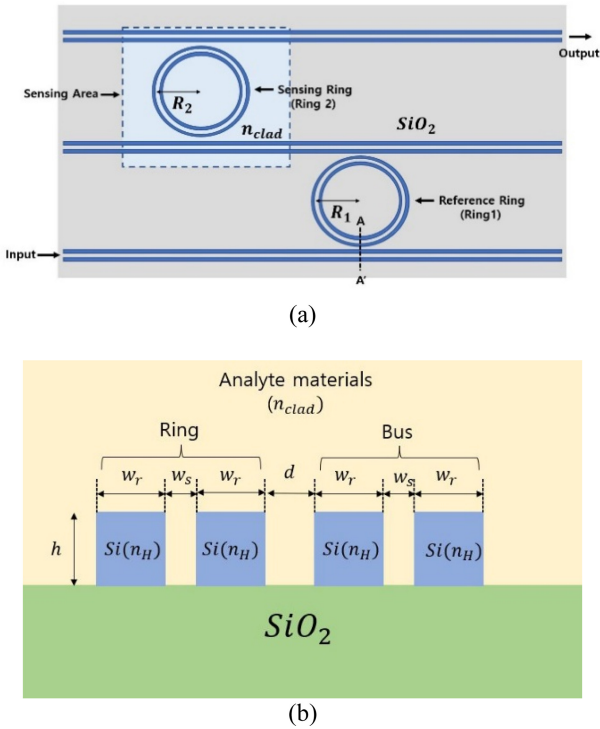


Fig. 6. (a) Top view of sensor schematic consisting of series cascaded slot ring resonator and (b) cross section view along A-A' of slot optical waveguide-based ring resonator.

동작하고, 두 번째 링 공진기(Ring-2)는 센싱 링 공진기로 동작한다[23]. 직렬 캐스케이드 링 공진기에서 센서로 동작하는 링 공진기는 Ring-2이기 때문에, Ring-2를 포함하는 점선 영역은 클래딩 굴절률의 변화를 감지하는 센싱 영역(sensing area)이며, 그 외의 클래딩 영역은 SiO<sub>2</sub>로 증착되어 있는 것으로 가정한다. 또한 Vernier 효과를 활용하기 위하여 FSR이 다른 Ring-1 과 Ring-2로 직렬 캐스케이드 링 공진기를 구성하였고, Ring-1과 Ring-2의 반경은 각각 R1, R2이다.

Fig. 6(b)는 링 공진기와 슬롯 광도파로의 단면도이며,

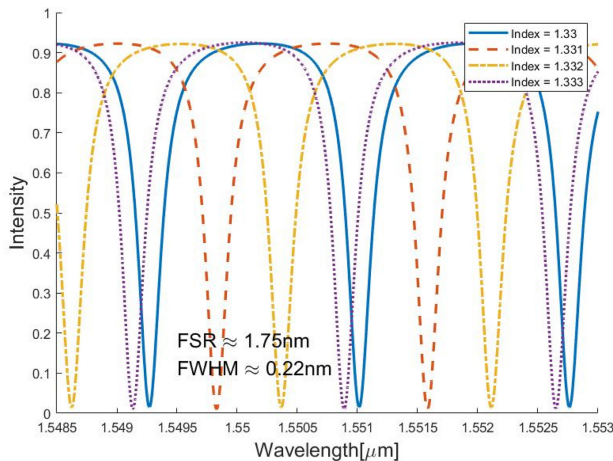
Table 1. Materials parameters and dimensions used in the simulation.

Parameter	Description	Value
d	Coupling distance	0.5 μm
h	Waveguide height	0.32 μm
w <sub>r</sub>	Waveguide width	0.2 μm
w <sub>s</sub>	Slot width	0.12 μm
R1	Radii of Ring 1	59.4 μm
R2	Radii of Ring 2	77.6 μm
n <sub>si</sub>	Refractive index of Si	3.4757
n <sub>SiO<sub>2</sub></sub>	Refractive index of SiO <sub>2</sub>	1.444

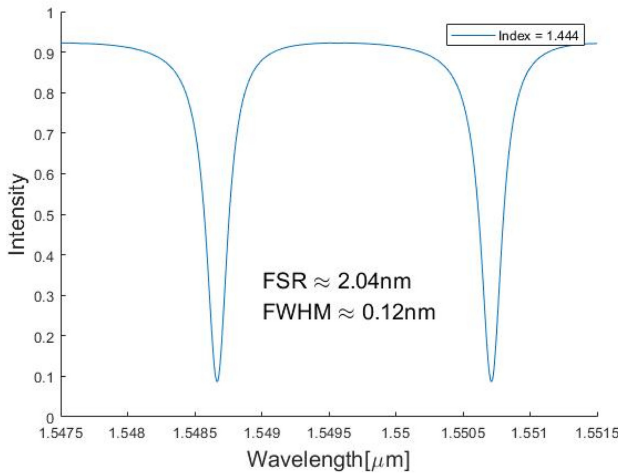
w<sub>r</sub>, w<sub>s</sub>, d, h는 각각 광도파로의 폭, 슬롯의 폭, 광도파로와 링 공진기의 결합 간격 그리고 광도파로의 높이를 나타내고, Ring-1과 Ring-2에서 동일한 값을 가진다. Table 1은 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에서 명시된 변수들의 값과 전산해석에 사용된 Si, SiO<sub>2</sub>의 굴절률을 보여준다. 해당 제원들은 참고문헌 [14, 24]에서 제시된 제원을 참고해서 설정하였다.

### 3.1 삽입-분기 링 공진기에 대한 추가적인 전산해석

직렬 캐스케이드 링 공진기에 사용한 Ring-1과 Ring-2는 참고문헌[14]의 제원을 참고하였다. 다만, 참고문헌[14]에서 진행한 전산해석은 광파가 센싱 영역내에서 입사되어 광 결합이 발생하는 경우에 대해서만 진행하여, 채널 광도파로의 클래딩 물질이 SiO<sub>2</sub>로 증착된 센싱 영역 밖에서 광파가 입사되어 센싱 영역에서 광 결합이 발생하는 경우를 고려하지 못하였다. 실제로 클래딩이 SiO<sub>2</sub>인 채널 광도파로 영역을 고려한 경우 전산해석 결과에서 차이가 발생하였다. 따라서 직렬 캐스케이드 링 공진기에 대한 전산해석을 진행하기에 앞서 삽입-분기 링 공진기에 대한 추가적인 전산해석을 진행하였다. Fig. 7(a)는 반경과 결합 간격이 각각 59.4 μm, 0.5 μm인 Ring-2에 대한 전산해석 결과로 기존의 전산해석 결과와 비교를 하면, FWHM은 0.22 nm로 동일하지만, FSR은 약 0.05 nm정도 작아졌다. 또한 품질인자를 계산해 보았을 때, 7080으로 평가되었고 이는 이전의 전산해석 결과인 6779와 비교해 보았을 때, 품질인자의 값이 증가하였다. 또한 센싱 영역의 클래딩 굴절률을 가변 하여 굴절률의 측정범위를 확인한 결과, 해당 제원의 굴절률 측정 범위는 3×10<sup>-3</sup> RIU이다. Fig. 7(b)는 반경과 결합 간격이 각각 77.6 μm, 0.5 μm인 Ring-1에 대한 전산해석 결과로 해당 제원의 링 공진기는 필터로 동작하여 클래딩이 SiO<sub>2</sub>로 구성되어 있기 때문에 클래딩 물질이 SiO<sub>2</sub>인 조건에 대해서만 전산해석을 진행하였고, FSR과 FWHM은 각각 2.04 nm, 0.12 nm으로 도출되었다. 해당 결과를 이전의 전산해석 결과와 비교를 해보았을 때, FWHM은 동일하고 FSR은 약 0.16 nm줄어든 것을 확인하였다. Fig. 8은 식 (1)을 이용하여 Ring-2의 감도를 계산한 결과로, 감도는 560 nm/

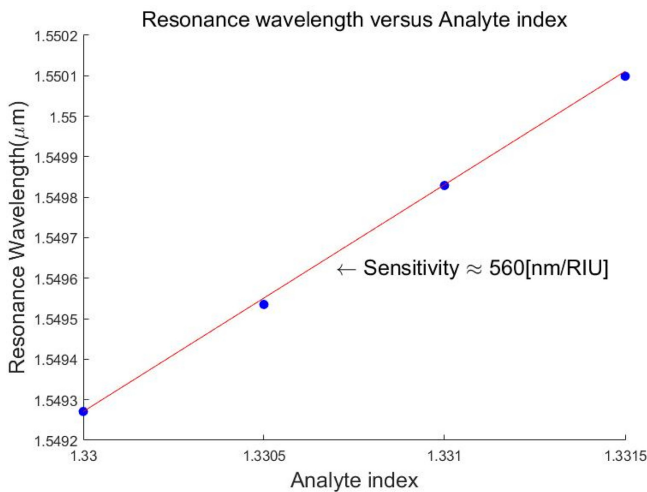


(a)

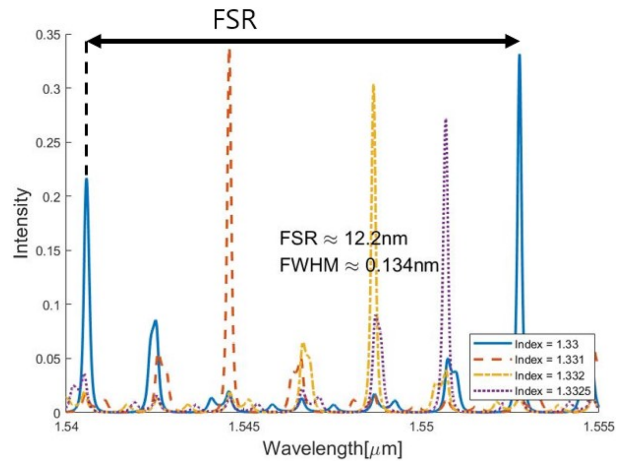


(b)

**Fig. 7.** Intensity responses versus wavelength of (a) the slot Ring-2 resonator with add-drop channel waveguide for different cladding indices and (b) the slot Ring-1 resonator for SiO<sub>2</sub> cladding.



**Fig. 8.** Sensitivity of Ring-2 with add-drop channel waveguide versus analyte refractive index.



**Fig. 9.** Intensity responses of the series cascaded slot ring resonator for different cladding indices.

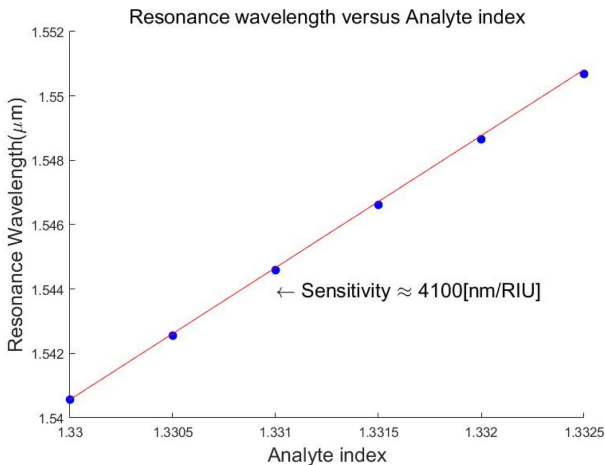
RIU 이고 이전의 데이터와 비교를 해보았을 때, 약 20 nm/RIU 감소한 값인 것을 확인하였다.

### 3.2 직렬 캐스케이드 링 공진기에 대한 전산해석

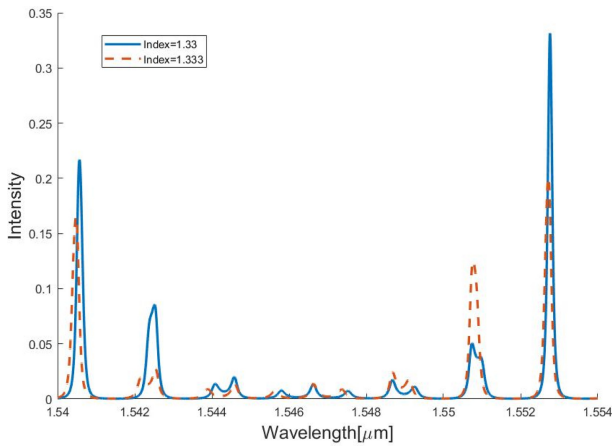
Fig. 9는 Ring-1과 Ring-2로 구성된 직렬 캐스케이드 링 공진기 (Ring-s)에서 Ring-2의 클래딩 물질의 굴절률을 변화시키면서 전산 해석한 결과이며, FSR, FWHM은 각각 12.2 nm, 0.134 nm로 해석 되었다. Ring-2와 Ring-s의 FSR을 비교해보았을 때, Ring-s의 FSR이 약 6.97배 정도 넓은 값을 보이며, 식 (7)을 이용하여 Ring-s의 FSR 이론값을 계산하면 약 12.3 nm로 계산된다. 전산 해석 한 결과와 이론값을 비교하면, 약 0.1 nm 정도의 오차가 발생하였지만, 이는 이론값을 계산할 때 FSR의 유효숫자를 3자리로 맞춰 계산하면서 발생한 오차이다. Ring-2와 Ring-s의 FWHM을 비교해 보면 Ring-2의 FWHM이 약 1.63배 정도 큰 값을 보이고 있으며, 이는 Ring-s가 Ring-2보다 분해능이 좋다는 것을 의미한다. 앞서 언급한 특성 파라미터뿐만 아니라 두 개의 링 공진기의 품질인자를 비교해보면, Ring-s의 품질인자는 11580으로 Ring-2의 품질인자 보다 약 1.63배 정도 높은 값을 보이고 있다. 품질인자가 높을수록 에너지 손실이 적다는 것을 의미하기 때문에, 높은 품질인자를 토대로 보면 직렬 캐스케이드 링 공진기가 단일 링 공진기보다 센서로서 높은 효율을 보인다.

Fig. 10은 Ring-s의 센싱 영역의 굴절률의 변화에 따른 공진파장의 변화를 식 (1)을 이용하여 계산한 결과이다. 감도는 약 4100 nm/RIU로 계산되었고, 이는 Ring-2의 감도 보다 7.3배 정도 높은 감도를 보이기 때문에 센서로서 활용 시 보다 정밀한 측정이 가능하다는 것을 의미한다.

Fig. 11은 Ring-s의 센싱 영역의 클래딩 굴절률이 1.33 (실선)과 1.333(파선) 각각에 대해서 출력된 스펙트럼이다. 공진파장을 비교해보면 두 스펙트럼의 공진파장은 동일하게 측정이 된



**Fig. 10.** Sensitivity of the series cascaded slot ring resonator versus analyte refractive index.



**Fig. 11.** Intensity responses of the series cascaded slot ring resonator for cladding index in 1.33 (solid line) and 1.333 (dashed line).

다. 공진파장이 1.55276  $\mu\text{m}$  인 경우, 감도를 이용하여 클래딩 물질의 굴절률을 계산하면, 클래딩 굴절률이 1.33으로 계산이 되지만 해당 공진파장은 클래딩 굴절률이 1.33인 스펙트럼의 2 번째 공진 파장과 동일하여 실제로는 정확한 굴절률 측정이 불가능하다. 이러한 결과는 Ring-s의 굴절률 측정범위가  $3 \times 10^{-3}$  RIU보다 작다는 것을 의미하고 이는 Ring-2의 굴절률 측정범위보다 작은 범위를 가진다. 이론적으로는 직렬 캐스케이드 링 공진기는 단일 링 공진기와 동일한 굴절률 측정범위를 가지지만 [1], 전산 해석결과는 직렬 캐스케이드 링 공진기의 측정범위가 조금 작게 도출되었다. 이와 같은 오차가 발생한 이유는 Ring-s의 FSR의 증가량이 감도의 증가량 보다 작아 굴절률이  $3 \times 10^{-3}$  RIU 만큼 변화하였을 때, 공진파장의 변화량이 기존 굴절률의 FSR과 일치하여 두 굴절률에서 링 공진기의 공진파장이 동일하게 해석되어 발생한 것으로 보인다.

전산 해석을 통하여 도출된 Ring-s, Ring-2의 FSR, FWHM,

**Table 2.** Comparison of characteristic parameters of series cascaded ring resonator (Ring-s) and single ring resonator (Ring-2).

Parameter	Ring 2	Series ring resonator
FSR	1.75 nm	12.2 nm
FWHM	0.22 nm	0.134 nm
Q-factor	7080	11580
Sensitivity	560[nm/RIU]	4100[nm/RIU]

품질인자, 감도를 Table 2에 비교하여 정리하였다. Table 2의 데이터를 비교해보면, 직렬 캐스케이드 링 공진기는 단일 링 공진기에 비하여 넓은 FSR, 좁은 FWHM, 높은 품질인자, 높은 감도를 통하여 집적광학 센서로서 보다 효과적임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

Photon Design사의 FIMMPROP과 PICWave를 이용하여 Table 1에 제안된 제원에 대하여 단일 링 공진기의 추가적인 전산 해석과 직렬 캐스케이드 링 공진기의 전산해석을 통하여 FSR, FWHM, 품질인자, 측정범위 그리고 감도를 비교하여, 집적광학 센서로서 직렬 캐스케이드 구조가 더 유용함을 확인하였다.

Table 2에 정리된 단일 링 공진기(Ring-2)와 직렬 캐스케이드 링 공진기(Ring-s)의 특성 파라미터를 비교해 보았을 때, 직렬 캐스케이드 링 공진기는 단일 링 공진기보다 훨씬 넓은 FSR을 보이며, 좁은 FWHM, 높은 품질인자, 높은 감도로 인하여 단일 링 공진기보다 센서로서 좋은 성능을 보이고 있다. 다만, 직렬 캐스케이드 링 공진기의 굴절률 측정범위가 단일 링 공진기의 굴절률 측정범위보다 작게 측정이 되었는데, 이는 직렬 캐스케이드 링 공진기의 감도 증가율이 FSR의 증가율 보다 높아서 발생한 오류로 보인다. 비록 측정범위는 직렬 캐스케이드 링 공진기가 작게 측정이 되었지만, 모든 항목을 종합하여 판단하면 집적광학 센서로 활용 시, 단일 링 공진기보다 직렬 캐스케이드 링 공진기가 높은 분해능, 정밀한 측정, 높은 품질인자라는 장점을 통하여 센서로서 효용성이 높은 것을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 한국연구재단 이공학개인지초연구(2018-R1D1A1B07049908) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

[1] Y. Liu, Y. Li, M. Li, and J. J. He, "High-sensitivity and wide-range optical sensor based on three cascaded ring resonators", *Opt. Express.*, Vol. 25, No. 2, pp. 972-978, 2017.

- [2] C. A. Barrios, "Analysis and modeling of a silicon nitride slot-waveguide microring resonator biochemical sensor", *Proc. SPIE 7356. Optical sensors 2009.*, pp. 66-69, Prague, Czech Republic, 2009.
- [3] P. Sanati, S. S. Hashemi, M. Bahadoran, A. A. Babadi, and E. Akbari, "Detection of *Escherichia coli* K12 in Water Using Slot Waveguide in Cascaded Ring Resonator", *Silicon.*, Vol. 14, No. 3, pp. 851-857, 2021.
- [4] Y. Zhao, H. Zhao, R. Lv and J. Zhao, "Review of optical fiber Mach-Zehnder interferometers with micro-cavity fabricated by femtosecond laser sensing applications", *Opt. Lasers. Eng.*, Vol. 117, pp. 7-20, 2019.
- [5] C. A. Barrios, B. Sanchez, K. B. Gylfason, A. Griol, H. Sohlstrom, M. Holgado, and R. Casquel, "Demonstration of slot-waveguide structures on silicon nitride/silicon oxide platform", *Opt. Express.*, Vol. 15, No. 11, pp. 6846-6856, 2007.
- [6] X. Wang, S. Grist, J. Flueckiger, N. A. F. Jaeger, and L. Chrostowski, "Silicon photonics slot waveguide Bragg gratings and resonators", *Opt. Express.*, Vol. 21, No. 16, pp. 19029-19039, 2013.
- [7] Y. Chen and H. Ming, "Review of surface plasmon resonance and localized surface plasmon resonance sensor", *Photonic. Sens.*, Vol. 2, No. 1, pp. 37-49, 2012.
- [8] V. R. Almeida, Q. Xu, C. A. Barrios, and M. Lipson, "Guiding and confining light in void nanostructure", *Opt. Lett.*, Vol. 29, No. 11, pp. 1209-1211, 2004.
- [9] K. Y. You, *Emerging Waveguide Technology*, IntechOpen, London, pp. 187-207, 2018.
- [10] I. Kiyay, A. Aydinli, and N. Dagli, "High-Q silicon-in-insulator optical rib waveguide racetrack resonators", *Opt. Express.*, Vol. 13, No. 6, pp. 1900-1905, 2005.
- [11] R. Bernini, S. Campopiano, L. Zeni and P. M. Sarro, "ARROW optical waveguides based sensors", *Sens. Actuators. B. Chem.*, Vol. 100, No. 1-2, pp. 143-146, 2004.
- [12] F. Prieto, A. Llobera, D. nez, C. niguez, A. Calle, and L. M. Lechuga, "Design and Analysis of Silicon Antiresonant Reflecting Optical Waveguide for Evanscent Field Sensor", *J. Lightwave. Technol.*, Vol. 18, No. 7, pp. 966-972, 2000.
- [13] W. Zhang, S. Serna, X. L. Roux, L. Vivien and E. Cassan, "Silicon slot waveguide ring resonators: Can we target high Q factors?", *17th International Conference On Transparent Optical Networks. (ICTON)*, pp. 1-2, Budapest, Hungary, 2015.
- [14] J. S. Jang and H. S. Jung, "Sensitivity Analysis for Specification of Silicon-On-Insulator (SOI) Slot Optical Waveguide-based Single and Add-drop Channel Ring-resonant Biochemical Integrated Optical Sensors", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 2, pp. 107-114, 2022.
- [15] D. G. Rabus, *Integrated Ring Resonators The compendium.*, Springer, Heidelberg, pp. 3-11, 2007.
- [16] M. Seifouri, V. Fallahi and S. Olyae, "Ultra-high-Q optical filter based on photonic crystal ring resonator", *Photon. Netw. Commun.*, Vol. 35, No. 2, pp. 225-230, 2018.
- [17] K. Suzuki, G. Cong, K. Tanizawa, S. H. Kim, K. Ikeda, S. Namiki, and H. Kawashima, "Ultra-high-extinction-ratio  $2 \times 2$  silicon optical switch with variable splitter", *Opt. Express.*, Vol. 23, No. 7, pp. 9086-9092, 2015.
- [18] B. Liu, A. Shakouri, and J. E. Bowers, "Passive microring-resonator-coupled lasers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 22, pp. 3561-3563, 2001.
- [19] S. Matsuo and T. Segawa, "Microring-Resonator-Based Widely Tunable Lasers", *IEEE. J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, Vol. 15, No. 3, pp. 545-554, 2009.
- [20] T. Baba, S. Akiyama, M. Imai, N. Hiroyama, H. Takahashi, Y. Noguchi, T. Horikawa and T. Usiki, "50-Gb/s ring-resonator-based silicon modulator", *Opt. Express.*, Vol. 21, No. 10, pp. 11869-11876, 2013.
- [21] T. Claes, W. Bogaerts and P. Bienstman, "Experimental characterization of a silicon photonic biosensor consisting of two cascaded ring resonators based on the Vernier-effect and introduction of a curve fitting method for an improved detection limit", *Opt. Express.*, Vol. 18, No. 22, pp. 22747-22761, 2010.
- [22] A. D. Gomes, M. S. Ferreira, J. Bierlich, J. Kobelke, M. Rothhardt, H. Bartelt, and O. Frazao, "Optical Harmonic Vernier Effect: A New Tool for High Performance Interferometric Fiber Sensors", *Sensors.*, Vol. 19, No. 24, p. 5431, 2019.
- [23] V. Zamora, P. Lützow, M. Weiland, and D. Pergande, "Investigation of cascaded SiN microring resonator at  $1.3\mu\text{m}$  and  $1.5\mu\text{m}$ ", *Opt. Express.*, Vol. 21, No. 23, pp. 27550-27557, 2013.
- [24] H. S. Jung, "Optimization of vertical SOI slot optical waveguide with confinement factor and sensitivity for integrated-optical biochemical sensors", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 30, No. 3, pp. 131-138, 2021.