

공명각 및 반사광 측정 모드에서 다양한 물질 구성의 표면 플라즈몬 공명 센서 칩의 민감도 특성

손영수⁺

A Study on the Sensitivity of Surface Plasmon Resonance Sensor Chips with Various Material Configurations in Angle and Intensity Detection Modes

Young-Soo Sohn⁺

Abstract

Characteristics of various material surface plasmon resonance (SPR) chips were investigated in angular interrogation mode and intensity interrogation mode. Among five metals, silver (Ag), gold (Au), copper (Cu), chromium (Cr) and titanium (Ti), three metals, Ag, Au and Cu were paid attention to since their characteristics can be easily analyzed in angular interrogation mode by investigating the change of their reflectance curves according to refractive index change from 1.331 to 1.335. Most of SPR chips with various configurations showed the similar property in angular interrogation mode. The application of the SPR chip made of Ag, Au and Cu or their combinations depends on their reflectance properties. In intensity interrogation mode, the operation range may be limited since the variation of the intensity was not linearly related to refractive index change ranging from 1.331 to 1.335. However, the SPR chip containing high ratio of Ag may be applicable to high sensitive detection due to their sharp reflectance curves in intensity interrogation mode.

Keywords: Surface plasmon resonance, Angular interrogation mode, Intensity interrogation mode, Sensors, Metal

1. 서 론

표면 플라즈몬 공명(Surface Plasmon Resonance: SPR) 센서는 p-편광된 빛이 프리즘을 통과하여 금속 박막에 조여지고, 이 금속 박막에서 반사되는 반사광의 강도를 입사각에 따라 모니터링하는 것을 기본으로 한다. 이 그래프를 반사도 곡선이라 일컫는다. 입사되는 빛이 금속 박막의 표면 플라즈몬 파를 여기시키고, 광의 파벡터(wavevector)와 플라즈몬의 파벡터가 같아질 때 공명 현상이 나타난다. 공명 현상이 일어나면 반사광의 강도가 최저가 되는데, 이때의 입사각을 공명각(resonance angle)이라고 한다. SPR센서는 금속 박막의 매우 가까운 영역에서 굴절률의 아주 작은 변화에 매우 민감하게 반응하는 센서이다. 극미량의 생분자들 사이의 상호작용(예, 단백질의 흡착)으로 금속 박

막 근처에서 굴절률이 변하면 SPR센서는 그것을 실시간으로 초고감도로 모니터링 할 수 있어 생명공학 분야에 광범위하게 적용되고 있다[1-3]. 최근에는 형광 측정기 등의 이중 검출기와 결합되어 의료용 진단기기로서의 가능성에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다[4-7].

SPR 센서는 금속 박막 양면의 굴절률 변화에 따라 그 특성이 바뀌는데, 주로 사용되는 Kretschmann 구성[8]을 이용할 경우 단백질 흡착 등과 같은 생분자들 사이의 상호작용을 측정하는 것이 용이할 수 있다. 그 이유는 금속 박막의 한쪽 면이 프리즘과 직접 접촉되어 있고, 이 프리즘의 굴절률은 변하지 않기 때문이다. 따라서 프리즘과 접촉하지 않는 금속 박막의 다른 면에서 굴절률 변화가 일어나면 SPR 센서의 반응도 이에따라 다르게 나타나기 때문이다.

본 연구에서는 네 가지 측정 방법[9] 중 민감도가 좋은 공명각 측정 모드와 반사광 측정 모드에서 다양한 금속 재료의 특성에 대해 조사하고자 한다. 단일 금속 또는 쌍금속 층의 조합이 공명각 측정 모드와 반사광 측정 모드에서 어떤 특성을 나타내는지 확인하고자 한다. 이를 위해 표면 플라즈몬 파를 여기시킬 수 있는 재료 중 은(Ag), 금(Au), 구리(Cu), 티타늄(Ti)과 크롬(Cr)의 다섯 금속을 선택하여 조사를 진행하였다.

대구가톨릭대학교 의공학과(Department of Biomedical Engineering, Daegu Catholic University)
13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 38430, Korea
⁺Corresponding author: sohnsy@cu.ac.kr
(Received: Nov. 6, 2017, Revised: Nov. 20, 2017, Accepted: Nov. 23, 2017)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://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.

2. 실험 방법

2.1 설계 조건

SPR 칩에 사용하려는 다섯 가지 재료에 대한 상온(room temperature)에서의 굴절률은 Johnson & Christy[10]의 결과를 사용한다. 파장은 770 nm로 선택을 했는데, 현재 국내에서 상용화된 SPR 제품(K-MAC, SPRmicro)에 적용된 LED(Light Emitting Diode)의 파장이다. 770 nm에 해당되는 Ag, Au, Cu, Ti 및 Cr의 굴절률은 각각 $R_{Ag} = 0.032151 + i5.3463$, $R_{Au} = 0.14430 + i4.6583$, $R_{Cu} = 0.24430 + i4.7758$, $R_{Ti} = 3.0452 + i4.0100$ 과 $R_{Cr} = 3.1058 + i3.4329$ 이다. 프리즘으로 주로 사용되는 재료는 BK7 또는 SF10인데 여기서는 BK7으로 정하고 770 nm 광에 대한 굴절률로 1.511을 적용하였다. 프레넬 반사도 계산은 Kretschmann 구성에 한정하여 Robert M. Corn 그룹의 프로그램을 사용하였다[11].

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 금속 SPR 칩 특성

다섯 가지 금속 재료의 두께에 대한 반사도 곡선을 계산하여, 공명각에서 가장 작은 반사도를 나타내는 두께를 최적의 두께로 설정하고 연구를 진행하였다.

Fig. 1은 p-편광된 770 nm 파장의 빛이 BK7 프리즘을 통과해서 두께가 최적화된 Ag 60 nm, Au 50 nm, 그리고 Cu 45 nm의 칩들에 반사된 빛의 강도를 입사각에 따라 나타낸 곡선이다. 앞에 언급하였듯이 이를 반사도 곡선이라 하고, 여기서 샘플의 굴절률은 1.333으로 고정하였다. Ag의 공명각은 65.67°이고 입사광에 대한 반사광 강도는 0.0201이다. Ag의 반치전폭(FWHM: Full Width at Half Maximum)은 0.24°이다. Au의 공명각은 67.13°이고 반사도는 0.0036이고, Cu의 공명각은 66.92°이고 반사도는 0.0010이다. Au와 Cu의 반치전폭은 각각 1.67°와 2.51°이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 반사광의 세기가 공명각 가까이 접근할 때 낙폭이 클수록 반사도 곡선의 접선의 기울기가 크고 반치전폭은 좁아진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 두께가 최적화된 Ti와 Cr에 대한 반사도 곡선을 나타내고 있다. Ti의 두께는 20 nm이고, Cr의 두께는 25 nm이다. 여기서 Ti의 최저 반사광 강도는 0.0062이다. 이런 반사광 강도를 얻기 위한 입사각은 75.72°~76.08°로 하나의 입사각으로 나타나는 것이 아니고 하나의 영역 범위로 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한 Cr의 경우도 Ti와 유사하게 최저 반사광 강도는 0.0001로 이에 해당되는 입사각은 77.79°~77.98°로 하나의 특정 입사각으로 나타나지 않는다. 또한 Ti와 Cr의 반사도 곡선이 완만하다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 Ti와 Cr은 생분자들간의 상호

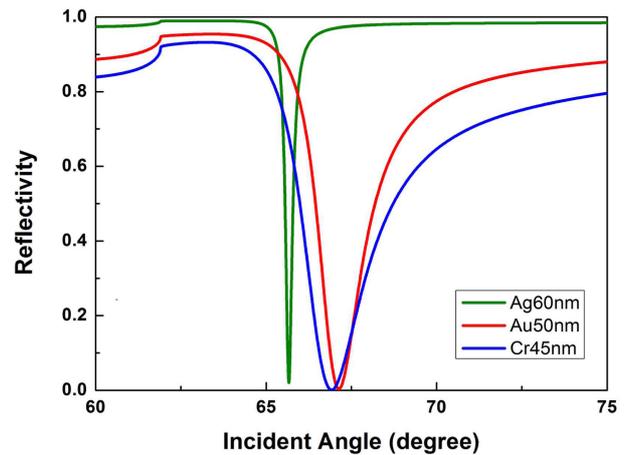


Fig. 1. Reflectance curves of Ag(60 nm), Au(50 nm) and Cu(45 nm)

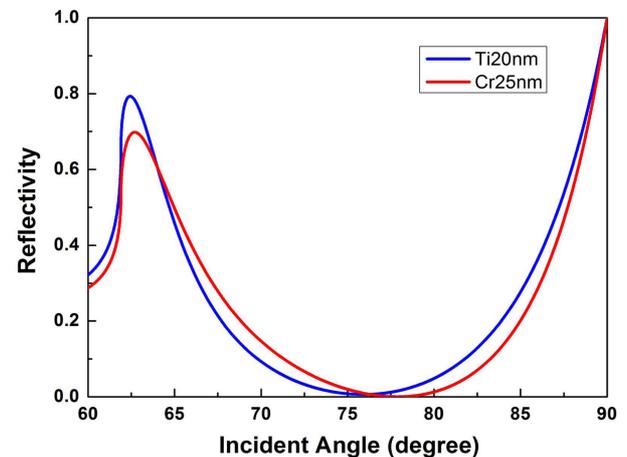


Fig. 2. Reflectance curves of Ti(20 nm) and Cr(25 nm)

작용으로 인한 굴절률의 변화를 공명각 변화로 측정하는 것이 쉽지 않음을 알 수 있다. 따라서 앞으로의 분석은 세 물질 Ag, Au 그리고 Cu에 국한하여 진행하도록 하겠다.

일반적으로 생분자들 사이의 상호작용이 이루어지면 금속 박막의 샘플 면 부근에 굴절률의 변화가 발생한다. 굴절률의 변화에 따른 반사도 곡선의 변화가 발생하고, 이 변화를 측정하여 생분자들 사이의 상호작용을 정량적 또는 정성적으로 분석한다. 샘플 면 부근의 굴절률이 1.331에서 1.335로 0.001간격으로 변화하였을 때, Ag, Au 그리고 Cr SPR 칩의 특성을 Table 1과 2에 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 공명각 변화를 측정하는 경우 Au와 Cu가 Ag보다는 단위 굴절률의 변화 당 공명각의 변화가 아주 조금 더 발생하고, 특히 Au는 굴절률의 변화 영역(1.331~1.335)에서 일정하게 변화하고 있다. 따라서 공명각 변화를 측정 방법으로 사용할 경우 Au가 상대적으로 Ag와 Cu에 비해 안정적이라고 할 수 있다.

반사광 측정은 편광된 광을 어떤 특정한 입사각에 고정하고

Table 1. Resonance angle shift due to refractive index change(RI = Refractive index, RA = Resonance angle)

RI	1.331	1.332	1.333	1.334	1.335
Ag RA	65.46°	65.56°	65.67°	65.77°	65.87°
Ag ΔRA	0.10°	0.11°		0.10°	0.10°
Au RA	66.91°	67.02°	67.13°	67.24°	67.35°
Au ΔRA	0.11°	0.11°		0.11°	0.11°
Cu RA	66.71°	66.81°	66.92°	67.03°	67.14°
Cu ΔRA	0.10°	0.11°		0.11°	0.11°

Table 2. Reflectivity change due to refractive index change (RI = Refractive index, Reflec = Reflectivity, MS = Maximum slope, RA = Resonance angle)

RI	1.331	1.332	1.333	1.334	1.335
Ag Reflec(MS)	0.3089 65.39°	0.7200	0.8698	0.9275	0.9538
ΔReflec	0.4111	0.1498		0.0577	0.0263
Ag Reflec (RA)	0.0192 65.46°	0.4697	0.7817	0.8923	0.9372
ΔReflec	0.4505	0.3120		0.1106	0.0449
Au Reflec (MS)	0.2789 66.47°	0.3832	0.4801	0.5650	0.6367
ΔReflec	0.1043	0.0969		0.0849	0.0717
Au Reflec (RA)	0.0035 66.91°	0.0235	0.0795	0.1642	0.2648
ΔReflec	0.0200	0.0560		0.0847	0.1006
Cu Reflec (MS)	0.2859 66.08°	0.3635	0.4383	0.5078	0.5704
ΔReflec	0.0776	0.0748		0.0695	0.0626
Cu Reflec (RA)	0.0011 66.71°	0.0091	0.0347	0.0779	0.1361
ΔReflec	0.0080	0.0256		0.0432	0.0582

반사광을 측정하는 방법이다. 생분자들 사이의 상호작용으로 굴절률 변화가 나타나면 이에 따른 반사도 곡선의 변화가 발생하고, 이 때 고정된 특정 입사각의 광에 대한 반사광의 강도를 모니터링하면 굴절률 변화에 따른 반사광의 변화를 측정할 수 있다. Table 2는 단일 금속 박막이 굴절률 변화에 따라 반사광 강도의 변화가 발생하는 것을 보여주고 있다. 세 종류의 단일 금속 SPR 칩에서는 굴절률의 변화에 따른 반사광 강도 변화가 공명각 측정 모드보다 일정하지 않음을 알 수 있다. 이는 동작 범위가 공명각 측정 모드보다 좁다는 것을 의미하고 있다. 하지만 반사광의 변화 폭은 상대적으로 공명각의 변화 폭보다 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 아주 작은 굴절률의 변화에 따른 SPR 센서의 반응을 확인하려면 이 반사광 측정 모드를 사용하는 것이

유리할 수 있음을 의미한다. 이 표에서 주의해서 볼만한 것은 Ag를 제외한 Au나 Cu의 경우 반사도 곡선의 기울기가 가장 큰 입사각에 광원을 고정하고 반사광을 측정하면 공명각에 광원을 고정하고 반사광을 측정하는 것보다 변화 폭이 크다는 것을 알 수 있다. Ag의 경우는 반치전폭이 매우 좁아 공명각에 광원을 고정하고 반사광을 측정하는 것이 유리함을 알 수 있다.

3.2 쌍금속 SPR 칩 특성

최근에 Ag와 Au를 이용한 쌍금속 SPR 칩에 대한 연구는 발표되었다[12,13]. 본 연구에서는 위에서 언급한 Ag, Au 그리고 Cu의 세 가지 물질을 조합한 쌍금속 칩에 대해 논의하고자 한다.

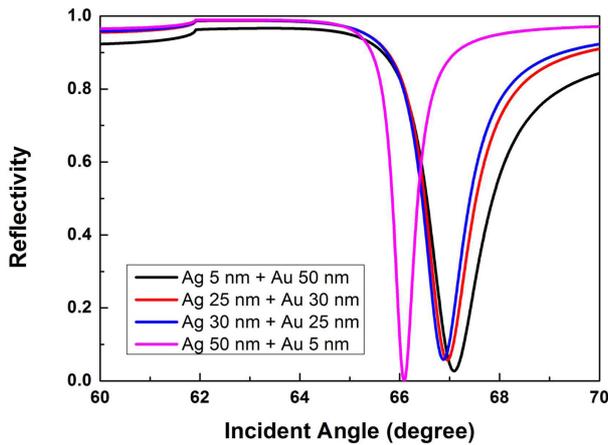


Fig. 3. Reflectance curves of bimetallic layers consisting of Ag and Au.

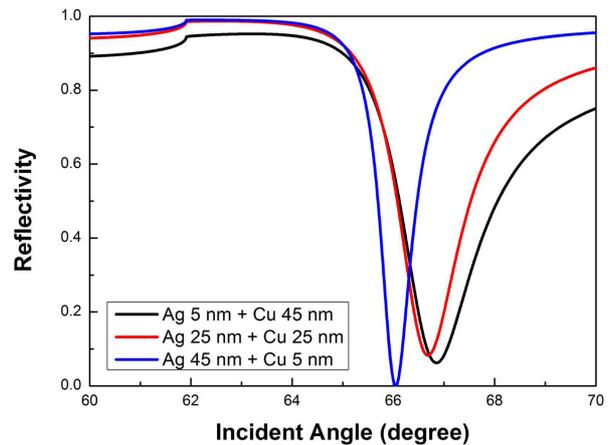


Fig. 4. Reflectance curves of bimetallic layers consisting of Ag and Cu.

3.2.1 Ag와 Au 조합의 SPR 칩

Ag와 Au의 두께의 합을 55 nm로 고정하고 Ag와 Au의 두께 비에 따른 반사도 곡선들을 Fig. 3에 나타내었다. 두께는 Ag 5 nm + Au 50 nm의 조합, Ag 25 nm + Au 30 nm의 조합, Ag 30 nm + Au 25 nm의 조합 그리고 Ag 50 nm + Au 5 nm의 조합으로 구성하였다. 이때 샘플의 굴절률은 1.333으로 설정하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 Ag의 비율이 높을수록 반치전폭이 좁아짐을 알 수 있다. Ag 50 nm + Au 5 nm의 조합으로 구성된 칩(공명각: 66.09°)의 반치전폭은 약 0.51°인데 비해서 Ag 5 nm + Au 50 nm의 조합으로 구성된 칩(공명각: 67.09°)의 반치전폭은 약 1.32°으로 Ag 비율이 높은 Ag 50 nm + Au 5 nm의 조합으로 구성된 칩의 반치전폭보다 약 2.6배 넓은 것을 알 수 있다.

Table 3은 Ag와 Au로 구성된 네 가지 조합의 SPR 칩에 대해 굴절률의 변화에 따른 공명각의 변화를 나타내고 있다. 네 가지 조합의 SPR 칩들은 비록 두께 구성은 다르지만 공명각의 변화는 0.001의 굴절률 변화에 대해 0.10~0.11°로 뚜

렷하게 큰 변화를 나타내지 않는다는 것을 볼 수 있다. Table 4는 Ag와 Au로 구성된 네 가지 조합의 SPR 칩에 대해 굴절률의 변화에 따른 반사광 강도 값을 나타내고 있다. 반사광 강도를 측정하기 위한 입사각의 설정은 샘플의 굴절률이 1.331일 때 각각의 조합 칩의 반사도 곡선이 최대 기울기를 갖는 입사각으로 설정하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 Ag의 비가 가장 높은 조합의 SPR 칩은 반치전폭이 좁고 반사도 곡선의 기울기가 가장 가파르기 때문에 반사광 강도의 변화가 좁은 영역의 굴절률 변화에 대해 가장 크게 변화하고 있다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 Ag와 Cu 조합의 SPR 칩

이번 계산에서는 Ag와 Cu의 두께의 합을 50 nm로 고정하고 Ag와 Cu의 두께 비에 따른 반사도 곡선들을 Fig. 4에 나타내었다. 세 가지 조합으로 구성을 하였고, 이번에도 샘플의 굴절률은 1.333으로 설정하였다. Fig. 3과 4에 나타난 바와 같이 이 조합에서도 Ag의 비율이 높을수록 반치전폭이 좁아짐을

Table 3. Resonance angle shift of Ag and Au bimetallic layers due to refractive index change (RI = Refractive index)

RI	1.331	1.332	1.333	1.334	1.335
Ag5 nm+Au50 nm	66.87°	66.98°	67.09°	67.20°	67.31°
Ag25 nm+Au30 nm	66.735°	66.84°	66.95°	67.06°	67.17°
Ag30 nm+Au25 nm	66.66°	66.77°	66.88°	66.985°	67.09°
Ag50 nm+Au5 nm	65.88°	65.99°	66.09°	66.19°	66.30°

Table 4. Reflectivity change of Ag and Au bimetallic layers due to refractive index change (RI = Refractive index)

RI	1.331	1.332	1.333	1.334	1.335
Ag5 nm+Au50 nm	0.2859	0.4095	0.5210	0.6142	0.6887
Ag25 nm+Au30 nm	0.3050	0.4422	0.5620	0.6580	0.7318
Ag30 nm+Au25 nm	0.2961	0.4410	0.5665	0.6655	0.7404
Ag50 nm+Au5 nm	0.2625	0.5225	0.6959	0.7990	0.8608

Table 5. Resonance angle shift of Ag and Cu bimetallic layers due to refractive index change (RI = Refractive index)

RI	1.331	1.332	1.333	1.334	1.335
Ag5nm+Cu45 nm	66.64°	66.745°	66.85°	66.96°	67.07°
Ag25 nm+Cu25 nm	66.47°	66.58°	66.685°	66.79°	66.90°
Ag45 nm+Cu5 nm	65.84°	65.94°	66.05°	66.15°	66.25°

Table 6. Reflectivity change of Ag and Cu bimetallic layers due to refractive index change (RI = Refractive index)

RI	1.331	1.332	1.333	1.334	1.335
Ag5 nm+Cu45 nm	0.3563	0.4418	0.5213	0.5919	0.6529
Ag25 nm+Cu25 nm	0.3442	0.4412	0.5309	0.6092	0.6754
Ag45 nm+Cu5 nm	0.2768	0.4601	0.6055	0.7103	0.7837

알 수 있다. Ag 45 nm + Cu 5 nm의 조합으로 구성된 칩(공명각: 66.05°)의 반치전폭은 약 0.76°인데 비해서 Ag 5 nm + Cu 45 nm의 조합으로 구성된 칩(공명각: 66.85°)의 반치전폭은 약 1.98°으로 Ag 비율이 높은 Ag 45 nm + Cu 5 nm의 조합으로 구성된 칩의 반치전폭보다 이번에도 약 2.6배 넓음을 알 수 있다.

Table 5는 Ag와 Cu로 구성된 세 가지 조합의 SPR 칩에 대해 굴절률의 변화에 따른 공명각의 변화를 나타내고 있다. 세 가지 조합의 SPR 칩들은 굴절률 0.001의 변화에 대해 공명각의 변화는 0.10~0.11°로 Ag와 Au로 구성된 칩들의 변화와 차이를 나타내지 않는다는 것을 알 수 있다. Table 6은 Ag와 Cu로 구성된 세 가지 조합의 SPR 칩에 대해 굴절률의 변화에 따른 반사광 강도 값을 나타내고 있다. 반사광 강도를 측정하기 위한 입사각의 기준은 샘플의 굴절률이 1.331일 때 반사도 곡선의 최대 기울기를 갖는 입사각으로 설정하였다. Ag와 Cu의 조합으로 이루어진 칩의 반사광 강도의 변화는 Table 4와 비교하면 알 수 있듯이 Ag와 Au의 조합으로 이루어진 칩에 비해 변화가 작음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4에서 보는 바와 같이 Ag와 Cu로 이루어진 칩 또한 Ag의 비가 가장 높은 조합의 SPR 칩이 반치전폭이 좁고 반사도 곡선의 기울기가 가장 가파르기 때문에 반사광 강도의 변화가 좁은 영역에서의 작은 굴절률 변화에 대해 가장 크게 변화하고 있다는 것을 알 수 있다.

3.2.3 Cu와 Au 조합의 SPR 칩

이번 마지막 조합의 계산에서는 Cu와 Au에 관한 것으로 두께의 합을 50 nm로 고정하고 Cu와 Au의 두께 비에 따른 반사도 곡선들을 Fig. 5에 나타내었다. 두께는 Ag와 Cu의 조합과 유사하게 세 가지로 Cu 5 nm + Au 45 nm의 조합, Cu 25 nm + Au 25 nm의 조합 그리고 Cu 45 nm + Au 5 nm의 조합으로 구성하였다. 이번에도 샘플의 굴절률은 1.333으로 설정하였다. 이 구성은 Fig. 3과 4에 나타난 Ag의 구성 비율이 높아 다른 구성 비율을 가진 칩의 반사도 곡선에 비해 반치전

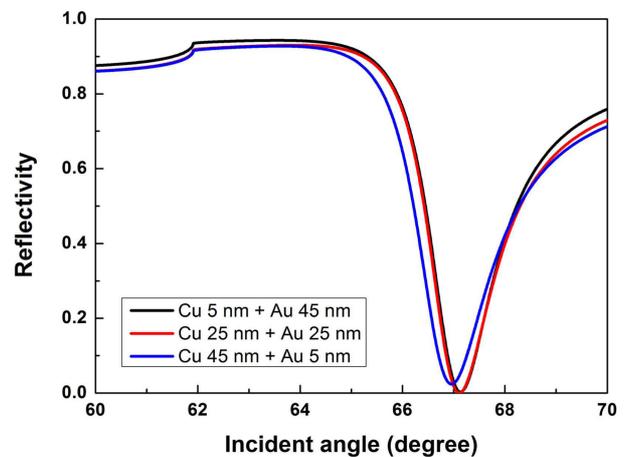


Fig. 5. Reflectance curves of bimetallic layers consisting of Cu and Au

폭이 좁아지는 반사도 곡선을 얻을 수 없었다. 그 이유는 Cu의 굴절률과 Au의 굴절률이 비슷하기 때문일 것이라고 추측할 수 있다.

Table 7은 Cu와 Au로 구성된 세 가지 조합의 SPR 칩에 대해 굴절률의 변화에 따른 공명각의 변화를 나타내고 있다. 세 가지 조합의 SPR 칩들은 굴절률 변화에 대해 공명각의 변화는 0.001의 굴절률 변화에 대해 약 0.11°로 위에서 언급한 다른 재료의 조합으로 구성된 칩들의 변화와 큰 차이를 나타내지 않는다는 것을 알 수 있다. Table 8은 Cu와 Au로 구성된 Table 7의 조합과 같이 구성된 세 가지 조합의 SPR 칩에 대해 굴절률의 변화에 따른 반사광 강도 값을 나타내고 있다. 반사광 강도를 측정하기 위한 입사각의 기준은 위에서 언급한 기준과 동일하게 샘플의 굴절률이 1.331일 때 반사도 곡선의 최대 기울기를 갖는 입사각으로 설정하였다. Cu와 Au의 조합으로 이루어진 칩의 반사광 강도의 변화는 세 가지 조합에서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그 이유는 반사도 곡선의 기울기가 Fig. 5에서 알 수 있듯이 차이가 없기 때문이다.

Table 7. Resonance angle shift of Cu and Au bimetallic layers due to refractive index change (RI = Refractive index)

RI	1.331	1.332	1.333	1.334	1.335
Cu5 nm+Au45 nm	66.915°	67.02°	67.135°	67.24°	67.355°
Cu25 nm+Au25 nm	66.89°	67.00°	67.11°	67.22°	67.33°
Cu45 nm+Au5 nm	66.74°	66.855°	66.96°	67.065°	67.175°

Table 8. Reflectivity change of Cu and Au bimetallic layers due to refractive index change (RI = Refractive index)

RI	1.331	1.332	1.333	1.334	1.335
Cu5 nm+Au45 nm	0.2995	0.403	0.4976	0.5795	0.6479
Cu25 nm+Au25 nm	0.2919	0.3965	0.4926	0.5759	0.6455
Cu45 nm+Au5 nm	0.3559	0.4461	0.5279	0.5991	0.6593

4. 결 론

Ag, Au 그리고 Cu의 SPR 칩 재료들의 단일 금속 칩과 쌍금속 칩의 공명각 측정 모드와 반사광 측정 모드에서의 특성을 조사하였다. 공명각 측정 모드에서 단일 금속 칩과 쌍금속 칩 모두 굴절률의 변화에 따른 공명각의 변화가 비슷하였으며, 특히 굴절률이 1.331에서 1.335로 변할 때 선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이에 비해 반사광 측정 모드에서의 재료와 구성 요소에 따라 특성은 다르게 나타났다. 특히 굴절률이 1.331에서 1.335로 변할 때 선형적으로 변화하지 않았으며, 은의 비율이 높은 칩일수록 좁은 영역에서 반사광 강도의 변화가 크게 나타났다. 따라서 매우 민감한 측정이 필요한 경우는 은의 비율이 높은 칩을 반사광 측정 모드에서 사용하는 것이 유리하고, 넓은 동작 범위에서 사용하고자 할 경우는 공명각 측정 모드에서 사용하는 것이 유리하며 이 경우는 어떤 조합으로 이루어진 칩이든 유사하게 사용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 결과물은 2017년도 대구가톨릭대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

REFERENCES

[1] J. Homola, "Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species", *Chem. Rev.* Vol. 108, No. 2 pp. 462-493, 2008

[2] J. Ashley, M. Piekarska, C. Segers, L. Trinh, T. Rodgers, and R. Willey, "An SPR based sensor for allergens detection", *Biosens. Bioelectron.* Vol. 88, pp. 109-113, 2017

[3] Y. K. Lee, K.-S. Lee, W. M. Kim, and Y.-S. Sohn, "Detection of Amyloid-β42 Using a Waveguide-Coupled Bimetallic Surface Plasmon Resonance Sensor Chip in the Intensity

Measurement Mode", *PLoS One*, Vol. 9, No. 6, p. e98992, 2014.

[4] A. R. Sadrolhosseini, M. Naseri, and H. M. Kamari, "Surface plasmon resonance sensor for detecting of arsenic in aqueous solution using polypyrrole-chitosan-cobalt ferrite nanoparticles composite layer", *Opt. Commun.* Vol. 383, pp. 132-137, 2017.

[5] A. Aubé, D. M. Charbonneau, J. N. Pelletier, and J.-F. Masson, "Response Monitoring of Acute Lymphoblastic Leukemia Patients Undergoing I-Asparaginase Therapy: Successes and Challenges Associated with Clinical Sample Analysis in Plasmonic Sensing", *ACS Sensors*, Vol. 1, No. 11, pp. 1358-1365, 2016

[6] J. Breault-Turcot, H.-P. Poirier-Richard, M. Couture,^a D. Pelechacz and J.-F. Masson, "Single chip SPR and fluorentin ELISA assay of prostate specific antigen", *Lab Chip*, Vol. 15, No. 23, pp.4433-4440, 2015

[7] S. A. Meyer, E. C. Le Ru, and P. G. Etchegoin, "Combining Surface Plasmon Resonance (SPR) Spectroscopy with Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS)", *Anal. Chem.* Vol. 83, No. 6, pp. 2337-2344, 2011

[8] E. Kretschmann, "Decay of non radiative surface plasmons into light on rough silver films. Comparison of experimental and theoretical results", *Opt. Commun.* Vol. 6, Issue 2, pp. 185-187, 1972.

[9] F.-C. Chien, and S.-J. Chen, "A sensitivity comparison of optical biosensors based on four different surface plasmon resonance modes", *Biosens. Bioelectron.* Vol. 20, Issue 3, pp. 633-642, 2004.

[10] P. B. Johnson and R. W. Christy, "Optical Constants of the Noble Metals", *Phys. Rev. B* Vol. 6, No. 12, pp. 4370-4379, 1972.

[11] <http://corninfo.ps.uci.edu/calculations.html> (retrieved on Oct. 8, 2017)

[12] Y. K. Lee, D. H. Jang, K.-S. Lee, W. M. Kim and Y.-S. Sohn, "Enhancing performance of a miniaturized surface plasmon resonance sensor in the reflectance detection mode using a waveguide-coupled bimetallic chip", *Nanoscale Res. Lett.*, Vol. 8 p. 344, 2013.

[13] S. Chen, and C. Lin, "High-performance bimetallic film surface plasmon resonancesensor based on film thickness optimization", *Optik*, Vol. 127, pp. 7514-7519, 2016.