광섬유 국소화 표면 플라즈몬 공명 센서를 위한 광섬유 표면상의 금 나노 입자 특성 분석

이 훈 · 이승기[†]

Characterization of gold nanoparticles on optical fiber for localized surface plasmon resonance sensor

Hoon Lee and Seung-Ki Lee[†]

Abstract

In this study, the optical properties of localized surface plasmon resonance sensor using optical fiber was analyzed as the variation of a size and surface density of gold nano particles on the etched optical fiber surface. It is shown that a size and surface density of gold nano particles on optical fiber surface are controlled by Na_3 citrate quantity and pH of gold colloid solution. To measure the sensitivity, peak wavelength of absorbance spectrum was detected as the reflective index of the solution. The sensor sensitivity is linearly dependent on the size and surface densities of gold nano particles from the results of optical experiments.

Key Words : localized surface plasmon resonance, gold nanoparticles

1. 서 론

표면 플라즈몬 공명 현상(surface plasmon resonance : SPR)은 프리즘을 통해 입사된 광이 프리즘 표면의 금이나 은 등의 금속 박막과 반응할 때 자유전자의 집단적 진동에 의해 발생하는 현상으로 특정 표시자 없이 생체물질 간의 반응을 실시간으로 측정할 수 있는 장점 때문에 단백질 칩 분석 및 다양한 바이오 반응들을 측정할 수 있는 바이오센서에 응용되고 있다^[1,2].

최근에는 새로운 형태의 SPR 바이오센서로서 금 박막이 아닌 금 나노 입자의 광학적 특성을 이용한 제작 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 유리 기판에 금 나노 입자를 간단한 화학적 방식으로 형성할 수 있다는 이점을 활용하여 국소화 표면 플라즈몬 공명(localized surface plasmon resonance : LSPR) 현상을 이용한 바이오센서가 제작되어 왔다. LSPR 바이

오센서는 SPR 바이오센서에 비해 빠른 응답속도를 가지며 저비용으로 제작할 수 있고 LSPR과 SERS(surface-enhanced raman scattering)를 동시에 측정할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 LSPR 센서의 공명 파장은 센서 표면에 형성된 금 나노 입자의 크기, 표면 밀도, 형태, 금 나노 입자 주변의 굴절률에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다^[3].

또 다른 새로운 SPR 바이오센서의 형태로서 광섬유를 이용하는 방식이 있다. 이는 광섬유의 유용성이 통신 분야뿐만 아니라 다양한 분야로 점차 확대되면서 소형화된 센서를 제작하기 위한 시도와 맞물려 바이오센서에도 적용되고 있는데, 광섬유를 바이오센서에 적용하게 되면 소형화, 저비용, 원격측정 등의 장점을 가질 수 있고 간단한 광학계를 사용할 수 있다는 우수한 장점을 가진다. 광섬유를 이용한 바이오센서는 광섬유 식각 형태에 따라 다양한 구조를 가질 수 있으며 식각된 광섬유 표면에 자기조립단원자층(self-assembled monolayer : SAM)을 사용하여 금속 나노입자를 형성하는 것도 가능하다^[4]. 하지만 광섬유의 식각된 부분을 광이 통과할 때 손실이 많아 감도가 낮은 단점 때문에 상용화 단계에 이르지 못하고 있다. 따라서 광섬유 센

단국대학교 전자전기공학부(Department of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University)

[†]Corresponding author: skilee@dku.edu
(Received : March 2, 2009, Revised : April 22, May 6, 2009,
Accepted : May 11, 2009)

서가 가진 장점을 활용하기 위해서는 낮은 감도의 문제를 극복하는 것이 필수적으로 요구된다.

본 연구는 광섬유와 LSPR 센서의 구조가 결합된 FO LSPR(fiber-optic localized surface plasmon resonance) 센서를 제작하여 광섬유를 사용했을 때의 장점을 유지하고 센서의 표면에 형성된 금 나노 입자를 이용하여 감도가 낮은 단점을 보완하고자 한다. 이때 LSPR 센서의 감도가 센서의 표면에 형성된 금 나노 입자의 크기와 표면 밀도에 따라 변한다는 점을 활용하여 식각된 광섬유 표면에 크기와 표면 밀도를 조절하고 정량화하여 분석한 후 광섬유 표면에 형성된 금 나노 입자의 특성에 따른 감도 변화를 광학 실험을 통하여 확인한다.

2. 금 나노 입자

2.1. 금 콜로이드 용액

금 콜로이드 용액을 만들기 위해서 500 ml 비커에 물을 채운 후 100 °C 정도가 될 때까지 끓인다. 250 ml 삼각플라스크를 끓는 물에 담그고 0.01 % (w/v) HAuCl₄를 50 ml 채운 후 마그네틱 바를 이용하여 1분 동안 저어준다. 그 후에 1 % (w/v) Na₃ citrate를 넣어주고 20분 동안 저어주게 되면 점차 용액의 색깔이 보라색에서 빨간색으로 변하게 되는데 이때 금 콜로이드 용액이 완성된다.

2.2. 식각된 광섬유 표면에 금 나노 입자 형성

광섬유의 클래딩(cladding)을 식각용액으로 제거한 후에 유기물 제거와 표면 활성화를 위해 H₂O₂와 H₂SO₄를 1:4(v/v)의 비율로 혼합한 용액에 20분 동안 담가두고 증류수로 세척한다. 수분을 완전히 제거한 후에 2-propanol 4 ml와 3-(ethoxydimethylsilyl)-propyl amine 200 µl를 혼합한 용액에 식각된 섬유를 3시간 동안 담가 SAM(self-assembled monolayer)을 형성한다. 그 후에 SAM이 형성된 광섬유를 금 콜로이드 용액에 1시간 동안 담가두면 식각된 광섬유 표면에 형성된 아미노 그룹과 금 나노 입자 사이의 정전기력에 의해서 금 나노 입자가 형성된다.

2.3. 금 나노 입자의 크기 조절

식각된 광섬유의 표면에 크기가 다른 금 나노 입자를 형성하기 위해 금 콜로이드 용액을 합성할 때 첨가되는 Na₃ citrate의 양을 0.5 ml, 1.0 ml, 1.5 ml로 구분하여 첨가하였다. 이때 금 나노 입자의 평균 직경은 61.5 nm, 32.5 nm, 19.7 nm로 측정되었고 Na₃ citrate의

(a)

(b)

(c)

Fig. 1. Gold nanoparticles on etched optical fiber surface. (a)Na₃ citrate 0.5 ml, (b)Na₃ citrate 1.0 ml, (c)Na₃ citrate 1.5 ml.

양이 증가할수록 금 나노 입자의 크기가 비교적 선형적으로 작아지는 것을 확인하였다. 이 원리는 Na₃ citrate가 금 이온을 중성화 시키는 과정에서 전기적 반발력이 금 나노 입자 형성에 영향을 미쳐 크기 변화를 일으키는 것이다. Na₃ citrate가 상대적으로 많은 양이

Fig. 2. Diameter of gold nanoparticles as a quantity of Na₃ citrate.

첨가되면 반발력이 증가하여 작용하므로 금 나노 입자의 크기가 작아지고 반대로 적은 양이 첨가되면 전기적 반발력이 약화되어 크기가 증가한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 FE-SEM 이미지를 통해 확인한 결과 식각된 광섬유 표면에 형성된 금 나노 입자의 크기는 대체적으로 균일하였으며 크기가 작을수록 비교적 일정한 간격으로 분포하였다. Fig. 2는 Na₃ citrate의 양에 따른 금 나노 입자의 평균 크기를 그래프로 표현한 것이다.

2.4. 금 나노 입자의 표면 밀도 조절

금 콜로이드 용액의 pH값에 따라 광섬유 표면에 형성되는 금 나노 입자의 표면 밀도를 조절하는 것이 가능하며 이 원리는 광섬유 표면에 금 나노 입자가 흡착되는 과정을 통해 알 수 있다. 식각된 광섬유 표면에 APDMS(aminopropyldimethylethoxysilane) 용액을 처리하게 되면 아미노 그룹이 형성되고 그 아미노 그룹과 금 나노 입자 간에 정전기력이 발생하여 금 나노 입자가 광섬유 표면에 흡착된다. 상대적으로 높은 pH값의 콜로이드 용액은 이온화되는 아미노 그룹을 감소시켜 금 나노 입자의 결합을 억제하는 역할을 하고 반대로 낮은 pH값의 콜로이드 용액의 경우는 이온화된 아미노 그룹이 상대적으로 많아 금 나노 입자와 결합될 확률이 높아진다. 결국, 콜로이드 용액의 pH값을 조절하여 식각된 광섬유 표면에 형성된 아미노 그룹의 이온화 확률을 변화시켜 표면 밀도를 정할 수 있는 것이다. pH값이 다른 콜로이드 용액을 만들기 위해 NaOH (10 wt.%)를 혼합하였는데 처음에 만들어진 금 콜로이드 용액의 pH값은 3.87정도로 강한 산성이었다. 이 콜

Fig. 3. Gold nanoparticles on etched optical fiber surface. (a)pH 5.87, (b)pH 8.26, (c)pH 10.53, (d)pH 11.42.

Fig. 4. Surface density ratio of gold nanoparticles as a variation of pH values.

로이드 용액에 NaOH(10 wt.%)를 첨가하고 pH측정기로 측정한 후 4가지의 pH값(5.87, 8.26, 10.53, 11.42)을 가진 콜로이드 용액을 만들었다.

콜로이드 용액의 pH값이 12정도가 되면 안정화 상태가 무너져 침전물이 생성되므로 그 이상 증가시킬 수 없었으며 콜로이드 용액 각각의 pH값에 따른 금 나노 입자의 표면 밀도를 측정한 결과 pH값이 증가할수록 표면 밀도가 감소하는 것을 확인하였다. Fig. 3의 FE-SEM 이미지를 통해 금 나노 입자의 표면 밀도를 확인할 수 있으며 광섬유 표면에 형성된 금 나노 입자의 표면 밀도 비율을 측정하여 Fig. 4에 그래프로 나타내었다.

Fig. 5. (a)Schematic of the optical setup, (b)Image of the optical setup, (c)Structure of sensor.

3. 금 나노 입자의 광 특성 분석

Fig. 5(a)는 광 특성 분석을 위한 광 실험 장치의 구성도이다. 백색광원(ANDO, AQ-4303B)의 출력단에 광섬유의 한쪽 끝을 연결하여 광이 전달되도록 하였고 제작된 센서 표면에서 금 나노 입자와 반응을 일으킨 후에 반사된 광을 스펙트로미터(spectral products, SM200)를 이용하여 신호를 측정하였다. 센서 표면에서 발생하는 굴절률의 변화를 측정하기 위해 테프론을 이용하여 채널을 제작하였고 멀티모드 광섬유(코어 직경: 105 μm , 클래딩직경: 125 μm)를 사용하여 광원을 통해 입사된 광의 세기가 충분하도록 하였다. 금 나노 입자가 형성된 센서부위의 길이는 1.5 cm 정도이고 식각용액(BHF)을 이용하여 클래딩을 완전히 제거하였다. 식각용액은 NH_4F (16 wt.%), HF (48 wt.%), 증류수를 5:1:1의 비율로 혼합한 BHF용액을 사용하였다^[5]. 금 나노 입자는 주변 물질의 굴절률 변화에 민감하게 반응하는 광학적 특징을 가지고 있으므로 테프론으로 제작한 채널에 굴절률이 다른 용액(1.36, 1.39, 1.43)을 흘려주면서 반사율(reflectance)을 측정

한 다음 공명 파장의 변화를 측정하였다. 반사율을 측정하는 방법은 식각한 광섬유를 증류수에 담가 측정된 스펙트럼을 기준 값으로 설정하고 굴절률이 다른 용액을 채널에 흘려주었을 때 측정된 스펙트럼 값을 기준 값으로 나누어 주었다. Fig. 5(b)에 실제 구성된 광 실험 장치를 나타내었으며 Fig. 5(c)는 센서 부위로 식각된 광섬유 상에 형성된 금 나노 입자를 그림으로 표현한 것이다.

LSPR 현상은 금, 은과 같은 금속 나노 입자와 광이 반응하여 발생하는 전자들의 집단적인 진동에 의해 국소화된 표면 플라즈몬을 발생시키는 것으로 일반적인 표면 플라즈몬 공명 현상에 이용되는 금속 박막과 구조적인 차이점을 보인다. 또한 금속 나노 입자와 반응하여 강한 흡수 특성을 나타내며 금속 나노 입자의 크기, 형태, 입자간 거리, 군집의 형성 등에 따라 그 특성이 변화한다. 따라서 LSPR 센서의 감도를 증가시키기 위해 금속 나노 입자의 변화에 따른 광학적 특성을 분석하는 일은 필수적이다. 본 논문에서는 금 나노 입자의 크기와 표면 밀도 비율을 조절하여 센서의 광학적 특성을 분석 하였다.

먼저 광섬유 표면에 형성된 금 나노 입자의 표면 밀도 비율에 따른 광 특성 실험을 하였다. Fig. 6은 센서 표면에 형성된 금 나노 입자의 표면 밀도 비율에 따른 흡수 스펙트럼을 표현한 것으로 Fig. 3에 나타난 표면 밀도 비율이 다른 4가지 경우에 대한 스펙트럼 측정 결과이다. 스펙트럼의 분석 결과, Fig. 6(a)와 같이 표면 밀도 비율이 상대적으로 높은 경우 여러 곳에서 솔더(shoulder)가 발생하였고 스펙트럼의 선포이 다소 넓은 것을 확인 할 수 있다. Fig. 3의 금 나노 입자를 보면 완벽한 구형을 형태가 아니고 다각형의 구조를 가진 것으로 판단되는데 이런 금 나노 입자의 구조 때문에 구형입자에서 관찰되는 단일 쌍극자 모드가 아닌 배향성에 따른 다양한 플라즈몬 모드의 여기를 유발하여 스펙트럼의 결과와 같이 솔더 및 선포이 넓어지는 스펙트럼의 결과를 얻은 것으로 판단된다. Fig. 6(d)와 같이 금 나노 입자의 표면 밀도 비율이 낮은 경우는 Fig. 6(a)에 비해 솔더가 줄어들 것을 알 수 있다. 스펙트럼에서 솔더는 위에 언급된 금 나노 입자의 배향성에 따른 원인 이외에 금속 나노 입자가 뭉쳐져 있을 경우에 나타나는 효과도 있다. 따라서 표면 밀도가 높은 Fig. 6(a)의 경우가 상대적으로 금 나노 입자들이 많이 뭉쳐져 있다는 것을 스펙트럼을 통해 간접적으로 알 수 있다. 또한 전체적으로 금 나노 입자의 표면 밀도 비율이 낮을수록 솔더가 감소하는 대략적인 경향을 Fig. 6에서 확인 할 수 있다.

Fig. 6. Optical spectrum of gold nano particles as a function of the refractive index. (a)surface density ratio : 59.90 %, (b)34.50 %, (c)5.19 %, (d)3.07 %.

Fig. 7. Sensitivity as a function of surface density ratio.

광섬유 표면에 형성된 금 나노입자의 표면 밀도 비율에 따른 감도 변화를 측정하기 위해 Fig. 6의 스펙트럼을 통해 공명 파장을 측정하고 감도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 측정결과 표면 밀도 비율이 증가할수록 감도가 선형적으로 향상되는 것을 확인할 수 있었는데 이 결과는 Fig. 3의 사진과 Fig. 6의 스펙트럼 분석을 통하여 알 수 있는 바와 같이 표면 밀도 비율이 높을수록 상대적으로 금 나노 입자가 접해있을 확률이 증가하게 되고 이때 금 나노 입자의 접촉부분에서 전계가 집중되는 hot spot 효과의 영향으로 감도가 증가되는 것으로 판단된다. 표면 밀도 비율이 10 % 미만 정도가 되면 금 나노 입자와 입사된 광의 반응이 불안정하여 정확한 감도를 측정하기 어려운 상태가 되었다.

FO LSPR 센서의 감도 변화를 측정하기 위해서 감도에 영향을 미칠 수 있는 또 다른 요소로 금 나노 입자의 크기를 고려할 수 있다. 크기에 따른 감도를 분석하기 위해서 Fig. 1에 나타난 3가지 샘플에 대해서 광 특성 실험을 하여 Fig. 8과 같이 금 나노 입자의 직경에 따른 흡수 스펙트럼을 나타내었다. 공명 파장의 이동을 측정하여 굴절률 변화에 의한 센서의 감도 변화를 확인하였다. 스펙트럼의 공명파장은 스펙트럼미터에서 측정된 data값을 이용하여 계산된 결과 값으로 감도를 나타내었다. 실제로 굴절률 변화에 따른 공명파장의 이동이 수nm 수준으로 매우 낮고 스펙트럼이 선폭이 넓어 공명파장을 판단하기 어려운 문제점이 있다. 특히, Fig. 8(c)에서 보는 바와 같이 스펙트럼의 선폭이 상당히 넓은 경우 공명파장을 구별하기 더욱 어렵기 때문에 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 차후에 측정된 스펙트럼에서 굴절률 변화에 따라 빛의 세기가 일정한 구간을 선정한 후 단파장의 레이저를 이용하여 굴절률 변화에 따른 빛의 세기 변화를

Fig. 8. Optical spectrum of gold nano particles as a function of the refractive index. (a)mean diameter : 61.3 nm, (b)32.5 nm, (c)19.7 nm.

측정할 필요성이 있다. 또한, Fig. 6과 마찬가지로 스펙트럼에 솔더가 발생한 것을 확인할 수 있으며 선풍도 비교적 넓은 것으로 보아 금 나노 입자가 구형보다는 다각형의 형태에 가까워 다양한 플라스몬이 여기된 것으로 판단된다. Fig. 8의 흡수 스펙트럼을 통해서 확인할 수 있는 점은 금 나노 입자의 크기가 작을수록 솔더가 적게 형성된 것이다. 이 현상은 금 나노 입자 합성

Fig. 9. (a)Surface density ratio of gold nano particle as a function of size, (b)Sensitivity as a function of size.

시 금 나노 입자 주변에 음 전하가 유도 되는데 크기가 작으면 상대적으로 음전하가 많이 형성되어 전기적 반발력에 의해 금 나노 입자가 일정한 간격을 두고 형성되기 때문에 예상할 수 있다. 즉, 금 나노 입자 간의 전기적 반발력에 의해서 금 나노 입자의 크기가 작을수록 일정한 간격을 유지하게 되어 금 나노 입자가 군집을 이룰 확률이 낮아져 솔더가 사라진 것을 스펙트럼 분석을 통해 알 수 있다. 이는 Fig. 1에 나타나 있는 FE-SEM 사진을 통해서도 금 나노 입자가 크기가 큰 경우에 비해 크기가 작을 때 일정한 간격을 유지 한다는 것을 확인할 수 있다.

금 나노 입자의 크기에 따른 감도를 분석 시 금 나노 입자의 표면 밀도에 따른 영향을 배제하기 위해서 3가지 샘플의 표면 밀도 비율을 비슷한 수준으로 유지 하였으며 이를 Fig. 9(a)를 통해 나타내었다. Fig. 9(b)는 금 나노 입자의 크기에 따른 감도를 표현한 것으로

Fig. 10. Sensitivity as a function of the surface density ratio and size.

측정결과를 보면 크기가 작을수록 감도가 증가한 것을 알 수 있다. 하지만 이 결과는 현재 다수의 문헌에서 보고된 결과와 상반되는 내용이다^[7]. 일반적으로 입자의 크기 증가에 따라 국부전기장의 증진 효과, 매질 내 유효 입사파장의 감소, 그리고 자유전자 진동의 복원력 감소의 영향을 종합적으로 받아 공명파장의 변화가 이루어진다. 본 논문의 결과가 이미 보고된 논문의 결과와 상반되는 부분이 있지만 금 나노 입자에서 자유전자의 밀도가 높은 경우 플라스마 주파수가 증가하여 공명파장의 이동이 상승되는 경향이 있다^[8]. 이러한 점에서 판단해보면 금 나노 입자 합성 시 크기변화를 일으키기 위해서 $\text{Na}_3\text{citrate}$ 가 첨가되는데 환원제 역할을 하는 이 용액의 양이 많이 첨가되면 금 나노 입자의 크기는 작아지고 금 나노 입자 표면에 상대적으로 많은 전자가 표면에 유도되고 반대로 용액을 적게 첨가하면 금 나노 입자의 크기는 커지는 동시에 입자 표면에 적은 양의 전자가 유도된다^[9,10]. 따라서 크기가 작은 금 나노 입자의 경우 표면 전자 밀도가 크기가 큰 금 나노 입자의 표면 전자 밀도에 비해 높아 공명파장의 변화가 더 민감하게 반응한 것으로 예상된다. 하지만 본 논문의 금 나노 입자의 크기 변화에 따른 감도 변화는 기존에 보고된 내용과 상반되는 결과이며 공명파장의 변화도 매우 낮고 흡수 스펙트럼의 선평이 넓어 추가적인 실험이 요구된다.

Fig. 10은 금 나노 입자의 크기와 표면 밀도 비율에 따른 감도의 변화를 종합적으로 확인하기 위해 콘투어(contour) 그래프로 표현한 것이다. 이 그래프를 통해서 크기가 작을수록 표면 밀도비율이 높을수록 감도가 증

가하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

광섬유 상에 형성된 금 나노 입자의 특성은 광섬유를 이용한 LSPR 바이오센서의 감도를 결정짓는 중요한 요소이다. 따라서 금 나노 입자의 특성을 변화시켜 광 특성을 분석하는 것은 최적화된 감도를 갖는 센서를 구현하기 위해서 반드시 선행되어야 하는 연구이다. 따라서 본 연구에서는 금 나노 입자의 크기와 표면 밀도를 조절할 수 있는 공정변수를 설정하고 이에 따른 공정조건을 확립하였다. 금 콜로이드 용액의 pH값을 변화시켜 금 나노 입자의 표면 밀도가 조절 가능함을 보였고 동시에 금 콜로이드 합성 시 첨가되는 $\text{Na}_3\text{citrate}$ 의 양을 달리하여 금 나노 입자의 크기 역시 조절 가능함을 확인하였다. 또한 금 나노 입자의 크기와 표면 밀도에 따른 광 특성을 정량적으로 분석하여 표면 밀도 비율이 높고 크기가 작을수록 감도가 향상되는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 2008학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고 문헌

- [1] P. Englebienne, A. V. Hoonacker and M. Verhas, "Surface plasmon resonance: principles, methods and applications in biomedical sciences", *Spectroscopy*, vol. 17, pp. 255-273, 2003.
- [2] 윤성식, 이수현, 안종혁, 이종현, "Cyclic olefin copolymer(COC) 폴리머 프리즘을 사용한 광섬유 기반 표면 플라스몬 공명(SPR) 바이오 센서", *센서학회지*, 제17권, 제5호, pp. 369-374, 2008.
- [3] A. J. Haes and R. P. Van Duyne, "A unified view of propagating and localized surface plasmon resonance biosensors", *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 379, pp. 920-930, 2004.
- [4] L.-K. Chau, Y.-F. Lin, S.-F. Cheng, and T.-J. Lin, "Fiber-optic chemical and biochemical probes based on localized surface plasmon resonance", *Sensors and Actuators B*, vol. 113, pp. 100-105, 2006.
- [5] 이훈, 이승기, "광섬유 국소화 표면 플라스몬 공명 센서를 위한 광섬유 표면상의 금속 나노 입자 형성", *센서학회지*, 제17권, 제2호, pp. 95-99, 2008.

- [6] K. Kurihara, H. Ohkawa, Y. Iwasaki, O. Niwa, T. Tobita, and K. Suzuki, "Fiber-optic conical micro-sensors for surface plasmon resonance using chemically etched single-mode fiber", *Analytica Chimica Acta*, vol. 523, pp. 165-170, 2004.
- [7] C. Noguez, "Surface plasmons on metal nanoparticles: the influence of shape and physical environment", *J. Phys. Chem. C*, vol. 111, pp. 3806-3819, 2007.
- [8] A. Toyota and T. Sagara, "Particle size dependence of the charging of Au nanoparticles immobilized on a modified ITO electrode", *Electrochimica Acta*, vol. 53, pp. 2553-2559, 2008.
- [9] S. M. Nasir and H. Nur, "Gold nanoparticles embedded on the surface of polyvinyl alcohol layer", *Journal of Fundamental Sciences*, vol. 4, pp. 245-252, 2008.
- [10] J.-P. Sylvestre, A. V. Kabashin, E. sacher, M. Meunier, and J. H. T. Luong, "Stabilization and size control of gold nanoparticles during laser ablation in aqueous cyclodextrins", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 126, pp. 7176-7177, 2004.

이 훈

- 1981년 3월 29일 생
- 2007년 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업(공학사)
- 2009년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

이 승 기

- 1963년 5월 15일 생
- 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)
- 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
- 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
- 1992년~1993년 일본 동북(東北)대학교 기계전자공학과 특별연구원(JSPS fellow)
- 1994년~1996년 단국대학교 전기공학과 전임강사
- 1996년~2000년 단국대학교 전기공학과 조교수
- 2000년~2006년 단국대학교 전기공학과 부교수
- 2003년~2004년 미국 Univ. of Washington 기계공학과 방문교수
- 2006년~현재 단국대학교 전자전기공학부 교수